

Vochtproblemen in bouwknopen: studie naar het vochtgedrag van metselwerk aan de hand van het numerieke simulatiepakket WUFI

Glenn De Meersman

Promotor: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Begeleiders: Lien De Backer, Nathan Van Den Bossche

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2011-2012



Vochtproblemen in bouwknopen: studie naar het vochtgedrag van metselwerk aan de hand van het numerieke simulatiepakket WUFI

Glenn De Meersman

Promotor: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Begeleiders: Lien De Backer, Nathan Van Den Bossche

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2011-2012



Gedurende het maken van deze masterproef kreeg ik van vele mensen steun op zowel technisch, persoonlijk als academisch vlak.

Vooreerst wens ik prof. dr. ir. arch. Arnold Janssens te danken wiens lessen bouwfysica me al in het derde bachelorjaar warm maakten voor het vakgebied, onderhavige thesis vormt dan ook een voortzetting van die interesse. Zijn kennis strekte mij meermaals tot voorbeeld tijdens de masterproef.

Mijn begeleiders drs. ir. arch. Nathan Van Den Bossche, drs. ing. Lien De Backer en drs. ir. arch. Jolien Vermeulen ben ik ook dank verschuldigd: op hen kon ik bij problemen altijd terugvallen en mede dankzij hen werd elke begeleiding leerrijk en aangenaam. Ook de hulp die ik van drs. ir. Marnix Van Belleghem kreeg wordt erg geapprecieerd.

Deze thesis had echter ook nooit tot stand kunnen komen zonder de steun die ik op technisch vlak kreeg. Hiervoor wil ik Robert Gillis en Patrick De Pue bedanken: zonder hen had het proefgedeelte van deze masterproef moeizamer verlopen. Ook de bijdrage van de firma Wienerberger NV werd geapprecieerd: de 50 tal bakstenen die ik van hen kreeg werden ten volle benut.

Op persoonlijk vlak is de steun van vrienden en familie meer dan welkom gebleken, in het bijzonder wil ik Samuel bedanken om al die tijd te willen luisteren naar mijn verhalen en theorieën over het vochtgedrag van metselwerk. Zonder deze monologen had ik nooit al mijn gedachten kunnen ordenen tot een consistent geheel.

Glenn De Meersman, 29 mei 2012

“De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.”

“The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use.

In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.”

Glenn De Meersman, 29 mei 2012

Vochtproblemen in bouwknopen: studie naar het vochtgedrag van metselwerk aan de hand van het numerieke simulatiepakket WUFI

door

Glenn De Meersman

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master in de
ingenieurswetenschappen: architectuur
Academiejaar: 2011 – 2012

Promotor: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Begeleiders: Lien De Backer, Nathan Van Den Bossche, Jolien Vermeulen

Faculteit ingenieurswetenschappen en architectuur
Universiteit Gent

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. Pieter Uyttenhove

Het doel van deze scriptie is te onderzoeken hoe vocht zich gedraagt in metselwerk en op welke manier hiermee kan omgegaan worden in numerieke simulaties. Als basis wordt hiervan vertrokken van zowel proeven als een gedetailleerde literatuurstudie, deze worden in de verdere masterproef ingezet om een fysisch zo getrouw mogelijke benadering te krijgen uitgaande van de simulaties.

De focus van de literatuurstudie ligt grotendeels op een beschrijving van schadefenomenen die kunnen optreden onder invloed van vocht en op een beschrijving van het fysische en wiskundige model van de WUFI-software.

De focus bij de simulaties lag enerzijds op het beschrijven en simuleren van het vochtgedrag van de materialen baksteen en mortel in langdurig contact met water. Anderzijds werd er ook gekeken naar de interactie die optreedt wanneer deze materialen gecombineerd worden tot gemetste gehelen. Bij vergelijking van de proefresultaten met eigen berekeningen en simulaties bleek dat er aanzienlijke verschillen optraden: deze bleken hoofdzakelijk te wijten aan het optreden van scheuren, zijdelingse bevochtiging van het ene materiaal door het andere, het optreden van grensweerstand aan de mortel-baksteen grenzen en het nazuigingseffect. Bij simulaties waarbij al deze effecten opgenomen werden werd een aanzienlijke verbetering waargenomen in de benadering van de proeven.

De kennis die opgedaan werd bij deze proeven werd ook ingezet om een onderzoek te verrichten naar de inzetbaarheid van WUFI om hydrofoberingen te simuleren. Na een kort overzicht over de manier waarop hydrofoberingen gesimuleerd kunnen worden werd een case gesimuleerd waarbij defecten aan de hydrofobering van een wand werden opgenomen. Uit dit onderzoek bleek dat het al dan niet opnemen van de effecten van grensweerstand en nazuiging bij korte termijn belastingen verwaarloosbaar zijn. Eventuele scheuren en de keuze van het hydrofobeermiddel kunnen dan weer grote verschillen veroorzaken.

Trefwoorden

WUFI - vochtgedrag metselwerk – schadecriteria – scheuren – hydrofoberingen – grensweerstand

Moisture related problems in building envelopes: study of the moisture behavior of masonry with WUFI

Glenn De Meersman

Supervisor(s): prof. dr. ir. arch. A. Janssens, ir.arch. Nathan Van Den Bossche, ing. Lien De Backer,
ir.arch. Jolien Vermeulen

Abstract This dissertation is the report of a study concerning the usability and validation of the numerical simulation software WUFI. The study was performed on two main issues: long-term and short-term contact of masonry with water.

Keywords WUFI, masonry, brick, mortar, after-suction effect, interface resistance, cracks, hydrophobic treatments, water absorption tests, frost damage

I. INTRODUCTION

The last decade new computer-based numerical methods have been developed to simulate the moisture behavior of building envelopes. Recently a new 2D version of the WUFI simulation software has been released. Because of the possibility to now include 2D objects in this software, new possibilities open to investigate numerically several phenomena such as for example the effects of flaws and cracks on hydrophobic treated walls. Within this study it was investigated how reliable this software is and how it can be used to research both long-term and short-term contact of materials with water. To do this a comparison was made at first between the 1D and 2D version of the software. Additional tests on brick, mortar and masonry samples allowed to investigate the effects occurring on masonry effects which were then compared against the simulations. Several recommendations have been made to take into account all of these effects.

II. COMPARISON OF WUFI 1D AND 2D

Simulations of a concrete element drying out resulted after approx. 1000 h in a growing difference in the 1D and 2D simulations leading to significant differences over longer time periods. Close analysis of the results and the working of the computer program learned that this was due to the use of different convergence criteria and a different number of iterations by the 2 versions. Adapting both versions to the same criteria and number of iterations gave an important correction to the software. Note that no conclusions could be made about the correctness of any of the simulations because test results were not available.

III. TEST RESULTS

In addition to the simulations tests were performed on brick, mortar and masonry samples made of 2 bricks bonded together by 12mm of mortar. Two types of bricks and mortars were used: the bricks were differentiated in high and low water absorption coefficient, the mortars were based on sand and on loam, mainly for historical reasons. It was found out of the comparison of simulations and test that the combined influence of cracks and interface resistance amounted to 15% of the water absorption coefficient. Comparison of calculations and simulations learned that the effect of wetting of the mortar by the brick and vice versa amounted to an additional 10% increase in water absorption coefficient compared to the coefficient of the separate materials.

Out of the test the theorem was formulated that the total water content of the masonry samples can be achieved as the sum of the water contents of the parts, the extra inflow due to the flaws and cracks, the influence of the wetting of the materials on each other. Of this sum have to be subtracted: the effects of the difference in side surface in contact with water due to the combination of both examples and the effect the interface resistance has on the water absorption coefficient. Once the point of free water saturation is reached the effect of the interface resistance goes to zero and the effect of after-suction becomes dominant.

IV. QUANTIFICATION OF THE EFFECTS

A. Interface resistance

Based on the findings of Derluyn [1] a formula was composed to allow input of the interface resistance:

$$\Delta D_w = - \frac{\rho_w \cdot R_D \cdot \left(\left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_1 - \left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_2 \right)}{\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi_{i=2}}{\partial x} \cdot R_{IF}}$$

Where D_w is the liquid transport coefficient, ρ_w the density of water, R_D the gas constant for water vapor, φ the relative humidity, T the temperature and R_{IF} the interface resistance in m/s.

Good comparison was found for the interface resistance using this formula. The influence of this resistance is circa 0,5 to 2% of the water absorption coefficient.

G. De Meersman is student at the department of Architecture and urban planning at the faculty of Architecture and Engineering, Ghent University (UGent), Gent, Belgium. E-mail: glennmeersman@gmail.com .

B. Cracks

By means of iteration it was found that the effect of cracks amounted to approximately 15 – 20% depending on the combination of brick – mortar and therefore on the nature of the contact. Several ways to deal with this effect in WUFI are discussed in the study.

C. After-suction effect

The effect of the after-suction effect depends mainly on the duration of the studied time interval and will reach its maximum once complete saturation of the pores of the material is achieved. During the tests it was found that the effect amounted to 15% extra water uptake after 336 hours. Suggested was to approximate this effect as linear in time and to take it in addition with the results outside WUFI.

V. LONG-TERM CONTACT WITH WATER

Comparison between simulation and measurements showed important differences, as was earlier discussed. Simulation of the tests where the effects of cracks, interface resistance and after-suction effect were taken into account gave an important better agreement with the performed tests. As a result the earlier announced theorem about the total water content of the masonry samples was proven to be correct. It was found that the biggest increase could be made by introducing the effects of flaws and cracks by adjusting the water absorption coefficient and the free water saturation water content w_f . Taking into account the effect of after-suction gave an important amelioration in the water content after the free water saturation was reached.

The results are shown in figure 2.

VI. SHORT-TERM CONTACT WITH WATER

The short-term contact was investigated on the case of a wall treated with a hydrophobic product that was influenced by the Brussels climate. Due to the use of this climate periods of rain and drying were achieved, thereby resulting in short-term contact with water. It was assumed that the hydrophobic treatment had defects at the mortar and that water could penetrate through there behind the hydrophobic treatment. Due to the hydrophobic treatment the water might not dry out resulting in an accumulation and possibly leading to frost damage of the wall during winter periods.

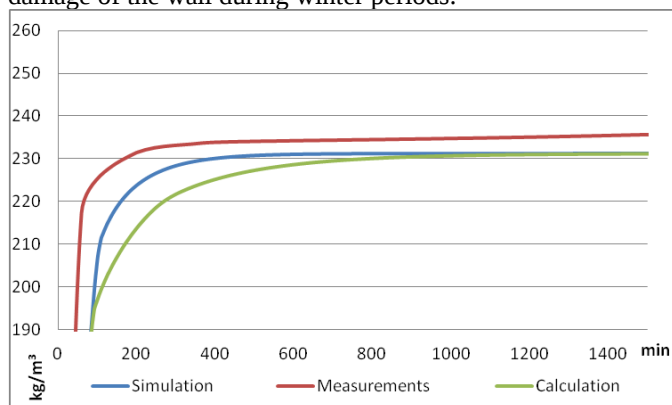


Figure 1 Comparison of the measurements, simulation and calculation of an Atinea-loam combination. The difference between calculation and simulation gives the effect of wetting on one material on another, the difference between simulation and measurement learns about the effect of flaws, interface resistance and after-suction.

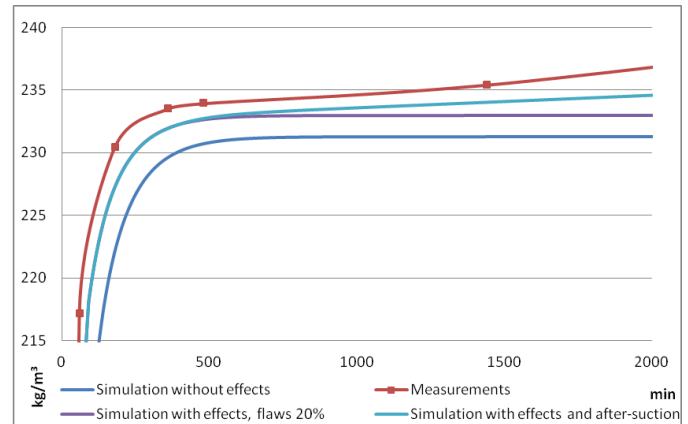


Figure 2 Comparison between measurements, initial simulation and simulation taking into account all effects.

This case allows to take into account the importance of the correct modeling of a hydrophobic treatment, several methods are discussed in the study.

Comparison of simulations learned that the effects of the interface resistance and after-suction were of minor importance. Differences in the modeling of the flaws and cracks proved to be very important, as well as the modeling and choice of the hydrophobic treatment.

VII. CONCLUSIONS

Comparison between measurements and simulations proved that for long-term contact of masonry with water the effects of cracks, interface resistance and after-suction are important and should be modeled in order to get a good agreement.

Comparison between simulations proved that for short-term contact only the effect of cracks is dominant. Nevertheless is the correct modeling of the hydrophobic treatment and these flaws and cracks of uttermost importance in order to assess the risk of frost damage in masonry walls.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the support of his supervisors prof. dr. ir.arch. A. Janssens, ir.arch. Nathan Van Den Bossche, ing. Lien De Backer and ir.arch. Jolien Vermeulen.

REFERENCES

- [1] DERLUYN, H., JANSSEN, H. and CARMELIET, J. *Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials*. Construction and Building Materials 25 : s.n., 2011, p. 3685–3693.
- [2] KÜNZEL, H.M. *Simultaneous heat and moisture transport in building components - one and two dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart : doctoral thesis, Fraunhofer IRB Verlag, 1995.

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	1
A. Literatuurstudie.	2
Inleiding.....	2
2. Fysische beschrijving van het vochtgedrag in een constructie.....	3
3. Schadecriteria voor vocht in een constructie.	8
3.1. Condensatie: Norm EN ISO 13788 en DRAFT 2010.....	8
3.2. Vorstschade.....	9
3.3. Hout.	14
3.3.1. Houtrot.....	14
3.3.2. Zwellings van hout.....	14
3.4. Oplossing van het materiaal.	15
3.5. Corrosie van metalen.....	15
3.6. Schimmels.	16
3.6.1. Wateractiviteit.	17
3.6.2. Time of wetness.....	17
3.6.3. Temperatuurfactor f.	18
3.6.4. Ashrae 160 P.	18
3.6.5. Isopleten.	19
4. Modellerings technieken.....	21
4.1. Algemeen.....	21
4.2. Glaser methode.	21
4.3. WUFI.....	22
4.4. Nauwkeurigheid van de numerieke oplossing.....	25
4.4.1. Terminatiecriteria, tijdsstappen en grid.	25
4.4.2. Onzekerheid input data.	26
4.4.2.1. Materiaalparameters.	26
4.4.2.2. Klimaatdata.	27
4.4.3. 2d tegen 1D.....	28
4.4.4. Beperkingen WUFI.	28
4.5. WUFI BIO.....	29
4.5.1. Modelbeperkingen.....	30
5. Detail studies.	31
5.1. Vochtgedrag in poreuze materialen: metselwerk als detail studie.	31

5.1.1.	Vochtgedrag van metselwerk.	31
5.1.1.1.	Imperfect hydraulisch contact.	32
5.1.1.2.	Eigenschappen van mortel in metselwerk.	33
5.1.1.3.	Eigenschappen van steen in metselwerk.	33
5.1.2.	WUFI.....	34
5.2.	De invloed van scheuren.....	37
5.2.1.	WUFI.....	37
5.3.	Hydrofoberingen.....	38
5.3.1.	WUFI.....	43
6.	Onderzoeksvraag.	44
B.	Experimenteel onderzoek en simulaties.....	46
7.	Inleiding.....	46
8.	Validatie WUFI.	47
8.1.	WUFI 1D – WUFI 2D.	47
8.1.1.	Case: invloed van de convergentiecriteria en het aantal iteraties.	47
8.2.	Invloed van de interactie van baksteen en mortel op het vochtgedrag van metselwerk: proef en simulatie.	51
8.2.1.	Waterabsorptie proeven.....	51
8.2.1.1.	Doel van de proef.....	51
8.2.1.2.	Waterabsorptieproef: gebruikte normen.	52
	IRA proef.	52
	Waterabsorptie door immersie.	52
	Capillaire waterabsorptieproef.....	53
8.2.1.3.	Materiaaleigenschappen: gebruikte normen.	53
	Klimaatkast: referentie water gehalte bij 80% relatieve vochtigheid.	54
8.2.1.4.	Gebruikte materialen.	54
	Baksteen.....	54
	Mortels.....	54
	Overzichtstabel materialen.....	56
8.2.1.5.	Werkwijze.....	57
	Aanmaak profelementen.	58
	Proeven.	58
8.2.1.6.	Resultaten.	59
	IRA proef.	59

Waterabsorptie door immersie	60
Capillaire waterabsorptieproef.....	61
Klimaatkast: referentie water gehalte bij 80% relatieve vochtigheid.	63
8.2.1.7. Vochtgedrag ter plaatse van de mortel-baksteen voeg.....	63
8.2.2. Modelleren in WUFI.	72
8.2.2.1. Materiaalgegevens.....	72
Basis gegevens.	72
Benaderende waarden en metingen.....	72
8.2.2.2. Gevoeligheidsanalyse proefresultaten.	73
Vrije waterverzadiging – capillair vochtgehalte.....	74
Waterabsorptiecoëfficiënt.....	75
Referentiewatergehalte bij 80% relatieve vochtigheid.	75
Porositeit.....	75
Conclusie.....	75
8.2.2.3. Simulatie van de proeven in WUFI 2D: case 1.	76
8.2.2.4. Simulatie van de interfaceweerstand.	79
8.2.2.5. Simulatie van de effecten van scheuren en nazuiging.....	83
Simulatie van scheuren.....	84
Nazuigingseffect.....	87
8.2.2.6. Simulatie van de proeven in WUFI 2D: case 2.	87
8.3. Case studie: vorstbestendigheid van een gehydrofobeerde wand.	91
8.3.1. Modelleren van een hydrofobering in WUFI.	91
8.3.2. Case 3: modelleren van vorstbelasting op een gehydrofobeerde wand.....	94
9. Algemeen besluit	98
10. Bibliografie	101
11. Annex.	109
11.1. Annex A: info fiches materialen.....	109
11.2. Annex B: resultaten ijking weegschaal.....	110
11.3. Annex C: initiële waterabsorptie.	111
11.4. Annex D: waterabsorptie door immersie.....	112
11.5. Annex E: capillaire waterabsorptieproef.	113
11.6. Annex F: berekeningen bij het deel <i>Vochtgedrag ter plaatse van de mortel-baksteen voeg</i>	114
11.7. Annex G: bepaling van het vrije waterverzadigingsgehalte w_f	115

11.8.	Annex H: gevoeligheidsanalyse proefresultaten.	116
11.9.	Annex I: grafieken bij case 1.	117

Symbol	Eenheid	Betekenis
δ_p	Kg/msPa	Waterdamp permeabiliteit
ε	-	Expansie- en contractiefactor
λ	W/mK	Warmtegeleidingcoëfficiënt
φ	%	Relatieve vochtigheid
ρ_w	kg/m ³	Dichtheid van water
θ	°C	Temperatuur
θ_e	°C	Buitentemperatuur
θ_i	°C	Binnentemperatuur
θ_{si}	°C	Binnenoppervlakte temperatuur
A	kg/m ² s ^{0,5}	Capillaire waterabsorptiecoëfficiënt
A_s	mm ²	Oppervlakte ondergedompeld vlak
a_w	-	Wateractiviteit
b	-	Benaderingscoëfficiënt
c_{w,i}	kg/m ² min	Initiële waterabsorptiecoëfficiënt
c_{w,s}	g/m ² s ^{0,5}	Waterabsorptiecoëfficiënt Zie ook A
D_φ	kg/ms	Vloeibare geleidingscoëfficiënt
D_w	m ² /s	Capillaire transportcoëfficiënt
D_{ws}	m ² /s	Capillaire transportcoëfficiënt voor zuiging
F	-	Vorstduurzaamheidparameter
f	-	Temperatuurfactor
g_c	-	Condensatiedebiet
g_{IF}	-	Waterstroom over de interface
g_w	kg/m ² s	Vloeibaar transport fluxdensiteit
g_v	kg/m ² s	Dampdiffusiefluxdensiteit
H	J/m ³	Totale enthalpie
h_v	J/kg	Verdampingswarmte water
M_d	g	Massa gedroogde element
M_s	g	Massa bevochtigde element
m	kg	massa
m_{dry,s}	g	Massa droge proefstuk
m_{so,s}	g	Massa proefstuk na bevochtiging
p_K	Pa	Capillaire zuiging/druk
p	Pa	Dampdruk
p_c	Pa	Capillaire druk
p_{condensvlak}	Pa	Dampdruk aan het condensvlak
p_e	Pa	Dampdruk buiten
p_i	Pa	Dampdruk binnen
p_{sat}	Pa	Verzadigingsdampdruk
Q	W/m ²	Warmteflux densiteit
R_D	J/kgK	Gasconstante voor waterdamp

Symbol	Eenheid	Betekenis
R_{IF}	m/s	Grensweerstand
S	kg/m ²	Opslorpingsgraad
S_{cr}	%	Kritisch verzadigingsgraad voor vorstschade
S_h	W/m ³	Enthalpieveranderingen
S_t	%	Werkelijke verzadigingsgraad op een tijdstip t
S_w	kg/m ³ s	Bronterm
T	K	Absolute temperatuur
TOW_{cr}	-	Kritische Time Of Wetness
t	s	Tijd
t_{so}	s	Tijdsduur proef
u	%	Vochtgehalte
W_s	%	waterabsorptie
w	kg/m ³	Watergehalte component Evenwichtsvochtgehalte
w_{act}	kg/m ³	Te verwachten vochtgehalte
w_c	kg/m ²	Capillair vochtgehalte
w_{crf}	kg/m ³	Kritisch watergehalte
w_f	kg/m ³	Vrije waterverzadigings watergehalte
w_m	kg/m ³	Verzadigingsvochtgehalte Watergehalte van een monomoleculaire laag op het binnenoppervlak
w_{max}	kg/m ³	Maximale hoeveelheid water dat een materiaal kan opnemen
w_s	kg/m ²	Capillair vochtgehalte per eenheid contactoppervlak
Z	m	Diffusieweerstand

1. Inleiding

Vocht is 1 van de meest voorkomende problemen in gebouwen waar het al snel aanleiding geeft tot grote schade die kan gaan van problemen van structurele aard tot op het vlak van de gezondheid van de bewoners. Een goede aanpak van deze problemen start bij preventie, om die reden werden gedurende jaren vele normen en berekeningswijzen opgesteld om het risico op vochtproblemen in te kunnen schatten. Veel van deze normen en berekeningen blijven echter nogal vaag of ruw en laten geen vlotte en snelle analyse toe van de gebouwschil. De laatste decennia is er echter samen met de sterke opkomst van de computertechnologie een grote interesse in het numeriek simuleren van vocht en warmte stromen ontstaan. Deze methode laat toe om op een snelle en nauwkeurigere manier een voorspelling te maken van het te verwachten gedrag van de constructie. Hiertoe wordt gebruikt gemaakt van verschillende differentiaalsystemen die een benadering vormen van de werkelijk optredende stromen.

Recentelijk werd zo een numeriek simulatiepakket, WUFI genaamd, opgesteld dat toelaat om via een eenvoudige invoer van gegevens een beeld te scheppen van de te verwachten vochtuithouding. Aan de hand hiervan kunnen bouwknopen geanalyseerd worden nog tijdens de conceptiefase en kunnen afdoende maatregelen getroffen worden voor de bouw van de constructie.

Zoals reeds aangehaald gaat het echter altijd om een benadering van stromingen. Vooral de manier waarop het gedrag van vocht benaderd kan worden is problematisch: door een gebrek aan duidelijk afgelijnde drijvende potentialen worden in elk van de numerieke simulatiepakketten essentieel vereenvoudigingen gemaakt. Door deze vereenvoudigingen zal er altijd een onzekerheid zijn op de resultaten aangeleverd op deze manier, validatie van de simulaties met proeven probeert hier het hoofd aan te bieden.

Deze masterproef heeft als doel dieper in te gaan op de mogelijkheden die deze software biedt en de inzetbaarheid ervan binnen verschillende scenario's van vochtbelasting te onderzoeken. Na een overzicht van de huidige kennis binnen het vakgebied in de literatuurstudie wordt gekeken naar de verschillen die bestaan tussen de een dimensionale en twee dimensionale versies van de software, en wordt onderzocht hoe inzetbaar de software is voor het onderzoek naar korte en lange termijn vochtbelastingen.

Om dit mogelijk te maken werd ook een proefcampagne opgezet waarbij verschillende materiaalparameters bepaald werden maar waarbij ook het vochtgedrag van de materialen in detail geanalyseerd en besproken werd. Aan de hand van deze resultaten werd het mogelijk een gefundeerd oordeel over de software te formuleren.

Gekeken werd ook naar de algemene correctheid van het model waarop WUFI gebaseerd is: kan er van uitgegaan worden dat de gebruikte vergelijkingen met genoeg effecten rekening houden of niet?

De globale doelstelling is met andere woorden te onderzoeken binnen welk toepassingsgebied de software het meest geschikt is en waar belangrijke verbeteringen dienen aangebracht te worden teneinde snelle simulaties te kunnen uitvoeren in plaats van langdurige en arbeidsintensieve proefcampagnes.

A. Literatuurstudie.

Inleiding.

In dit literatuuronderzoek wordt een overzicht gegeven van de problematiek rond vocht in bouwknopen.

In hoofdstuk 1 wordt zowel dieper ingegaan op het fysische gedrag van vocht in poreuze materialen, als een algemeen overzicht over de huidige kennis gegeven.

Hoofdstuk 2 handelt over de verschillende schadecriteria die in de literatuur te vinden zijn voor vocht. Aan bod komen condensatie, schimmelvorming, houtrot, zwellen, vorstschade, zwellen en oplossing van materialen en corrosie.

Het derde hoofdstuk behandelt modelleringstechnieken: aandacht wordt besteed aan een algemene wiskundige beschrijving van het fenomeen, de Glaser methode, het softwareprogramma WUFI en WUFI BIO. Ook wordt dieper ingegaan op de nauwkeurigheid van numerieke oplossingen.

Het laatste hoofdstuk bevat 3 detailstudies die binnen het kader van de literatuurstudie interessant leken: het gaat hier om het vochtgedrag in metselwerk, het vochtgedrag ten gevolge van scheuren in metselwerk en hydrofoberingen.

Een algemeen overzicht van andere modellen wordt hier niet gegeven. In de literatuur bestaan wel dergelijke overzichten, zie hiervoor IEA Annex 14[1], 24[2], 41 [3] en Review of modelling methods for building enclosure design door Straube en Burnett [4].

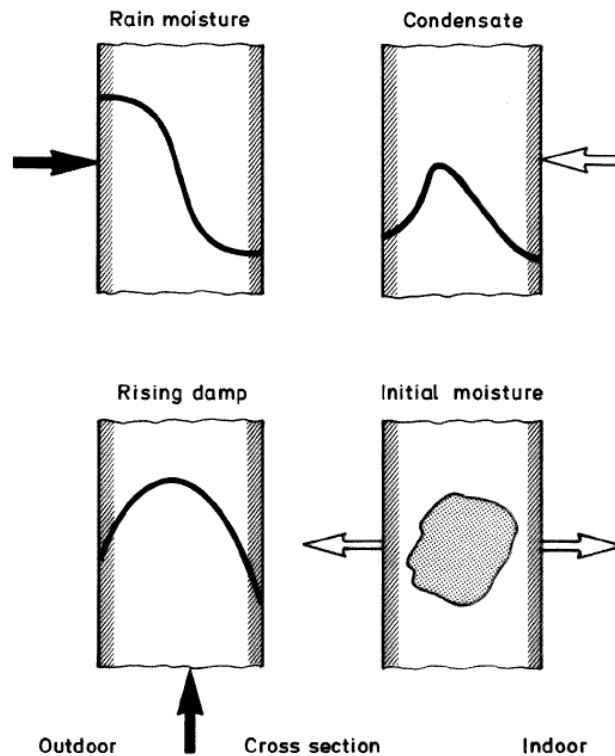
2. Fysische beschrijving van het vochtgedrag in een constructie.

De bedoeling van dit hoofdstuk is om te bespreken hoe vocht zich fysisch gedraagt in een gebouw of constructie-element. Hierbij wordt aandacht besteed aan de vochtbalans, transport- en opslagprocessen en het gedrag van vocht in de poriën van materialen. Schimmelgroei en schade fenomenen komen in verdere hoofdstukken aan bod.

Fysisch gezien kan vocht zich in 3 toestandsvormen bevinden: vloeibaar, vast en gasvormig. Deze 3 toestandsvormen komen bij het temperatuursbereik van gebouwen allen voor, waarbij zich ook een gelijktijdigheid van fasen kan voordoen: het is mogelijk dat de buitengevel van een gebouw onderworpen wordt aan een regenbelasting terwijl er intern waterdamp wordt geproduceerd, op poriënschaal kan een baksteen een mengsel van waterdamp, vloeibaar water en ijs bevatten. Deze 3 toestandsvormen hebben dan ook elk hun invloed op de gebouwschil. Hoe de materialen op de aanwezigheid van dit vocht reageren hangt af van hun eigenschappen. Hygroscopische materialen gaan dit water opnemen op de oppervlakten van hun poriën en in evenwicht komen met de vochtigheid van de omgevende lucht, terwijl niet hygroscopische materialen droog blijven. Materialen die capillair actief zijn gaan bij normale omstandigheden vloeibaar water absorberen tot ze capillair verzadigd zijn, hydrofobe materialen absorberen geen water.

Opdat daarnaast een aan vocht gerelateerd probleem zou voorkomen moet er volgens Straube[5] ook minimaal aan 4 condities voldaan worden: een vochtbron moet aanwezig zijn, er moet een route of manier zijn voor dit vocht om zich voort te bewegen, er moet een drijvende kracht zijn om beweging te veroorzaken en de materialen moeten gevoelig zijn aan vochtbelasting en de hieruit volgende schade. Men zou hieruit kunnen denken dat het voldoende is om 1 van deze voorwaarden te verhinderen om zo vochtproblemen te vermijden. In realiteit is dit echter zeer moeilijk te realiseren, het is veel efficiënter om uitgaande van goede keuzes naar materiaal, opbouw, e.d. het risico op vochtproblemen te vermijden en op die manier het gehalte aan vocht in de constructie te controleren. Dit wil dus ook zeggen dat het op zich geen kwaad kan dat er vocht aanwezig is in de constructie, er moet echter een balans gevonden worden tussen drogen en bevochtigen, waarbij de veilige opslagcapaciteit van de materialen als een buffer dient.

Om deze vochtbalans te kunnen opstellen is echter wel kennis nodig over vochtbronnen, vochttransport en de buffer capaciteit van de materialen. Künzle[6] en Straube [5] geven 4 primaire vochtbronnen aan: 1. vloeibaar water dat door regen en sneeuw of door interne lekken wordt aangebracht, 2. waterdamp dat zich zowel van buitenaf naar binnen als door interne vochtproductie kan uiten, vb. in condensaat als het neerslaat, 3. vloeibaar en gasvormig vocht dat uit de grond komt, dit uit zich als stijgend vocht, en 4. vocht dat zich initieel reeds in het materiaal bevond. Elk van deze bronnen is te herkennen aan een typerende vochtdistributie in het materiaal.



Figuur 1: typerende vochtdistributies in materialen, bron: [6].

Water kan afhankelijk van zijn toestand en van de drijvende kracht op verschillende manieren getransporteerd worden door een constructie-element. Straube[5] beschrijft 4 transport processen, in oplopende kracht: 1. dampdiffusie, 2. damp convectie, 3. capillaire werking, 4. stroming onder invloed van de zwaartekracht.

Künzel [6] voegt er hier nog enkele aan toe. Volgens hem kan water in de gasvormige fase zich verplaatsen door: 1. waterdamp diffusie, 2. effusie of moleculair transport, in het geval van transport door materiaal met zeer kleine poriën, 3. oplossingsdiffusie in het geval van organische polymeren, zoals dampschermen, waarbij de watermoleculen zich in de macromoleculen van het polymeer plaatsen en zo het polymeer doen zwellen. Deze 3 werken allen met als drijvende kracht de dampdruk. Als 4^e mechanisme kan waterdamp nog verplaatst worden door convectie, op voorwaarde dat er een drukverschil aanwezig is over het element.

Vloeibaar water kan zich volgens Künzel verplaatsen door: 1. capillairwerking door capillaire zuiging in poreuze materialen, 2. oppervlaktediffusie: vochttransport in waterlagen van moleculaire dikte geadsorbeerd op de poriënwallen, onder invloed van de relatieve vochtigheid, 3. stroming onder invloed van de zwaartekracht, 4. stroming door hydraulische verschillen, 5. elektrokinetische en 6. Osmose.

Tabel 1 geeft van deze mechanismen een overzicht.

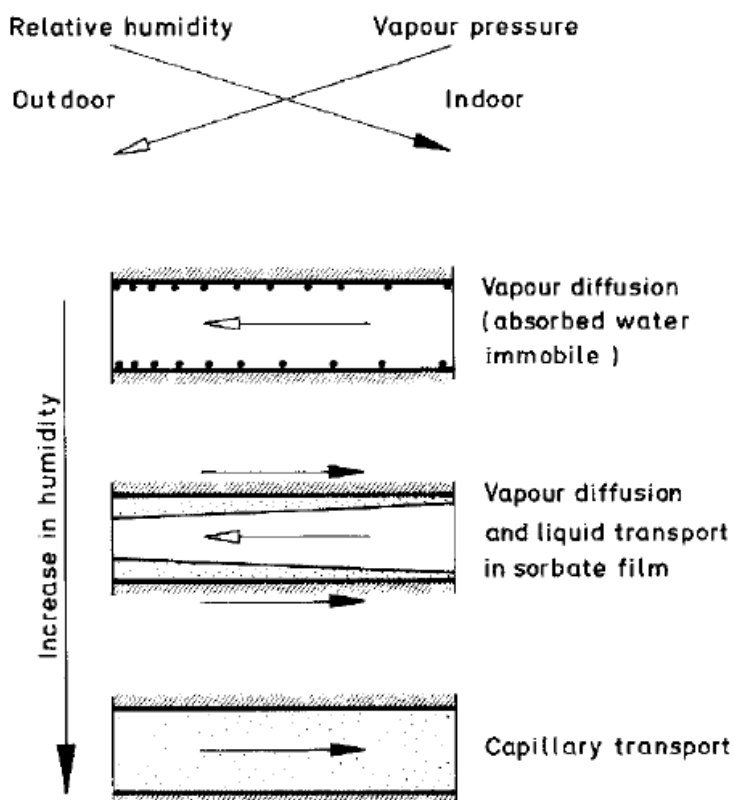
Toestand	Mechanisme	Drijvende kracht
Gasvormig	Diffusie	Dampdruk
	Convectie	Luchtdrukverschil
	Effusie	Dampdruk
	Oplossingsdiffusie	Dampdruk
Vloeibaar	Oppervlaktediffusie	Relatieve vochtigheid
	Stroming	Hydraulische drukverschillen
	Electrokinese	Elektrische velden
	Osmose	Ionen concentratie
	Capillaire conductie	Capillaire zuiging
	Stroming	Zwaartekracht

Tabel 1: transportmechanismen en hun drijvende krachten in poreuze materialen.

Van al deze transportmechanismen zijn waterdampdiffusie en vloeibaar watertransport door capillaire krachten de belangrijkste in fysische berekeningen. Convectie wordt vaak achterwege gelaten omdat lekken en hun invloed moeilijk te kwantificeren zijn; elektrokinese, osmose en stroming door zwaartekracht of doorsijpeling worden vaak achterwege gelaten vanwege hun specifieke karakter.

Waterdampdiffusie en capillaire conductie werken ook op elkaar in in de capillairen van poreuze materialen, zoals te zien is in Figuur 2. In een wintersituatie zullen de temperatuur en de dampdruk binnen groter zijn dan buiten; hierdoor ontstaat een dampdiffusiebeweging in de capillair van binnen naar buiten en vormt er zich een laagje geabsorbeerd water op de randen. Tegelijkertijd is door de lagere temperaturen de relatieve vochtigheid buiten hoger dan binnen. Bij stijgend vochtgehalte zal hierdoor een film van geabsorbeerd vocht ontstaan dat dikker is aan de buitenzijde dan aan de binnenzijde. Door de toenemende dikte van de vochtlaag zal er een beweging van vochtmoleculen op gang gebracht worden van buiten naar binnen onder invloed van de oppervlakte diffusie. Door deze beweging van buiten naar binnen wordt het damptransport tegengewerkt, en zal door de start van capillaire geleiding bij toenemende relatieve vochtigheid het vochttransport omgekeerd worden.

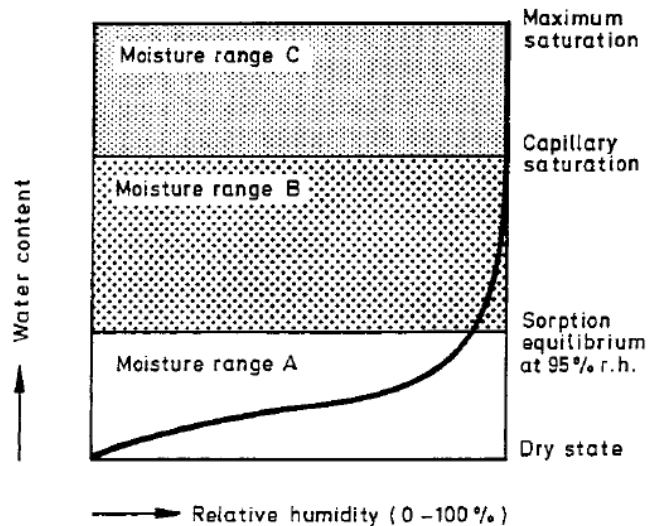
Moisture transport in capillary pores



Figuur 2: vochttransport in capillaire poriën, bron: [6].

Zoals reeds eerder aangehaald zijn vele materialen zelf ook in staat een hoeveelheid vocht op te slaan in hun poriënsysteem. De opslagcapaciteit van de materialen hangt dus af van de porositeit van het materiaal. Theoretisch gezien kan dit tot alle poriën gevuld zijn met vloeibaar water. In de werkelijkheid doen zich echter 3 fasen voor bij vochttopslag afhankelijk van de relatieve vochtigheid. Straube[7] spreekt van 3 basis mechanismen: 1. adsorptie op de materialen en poriënwallen door waterdampabsorptie, 2. absorptie in de materialen door capillairwerking en als 3^e vrij water in de vorm van vloeibaar water.

Figuur 3 verduidelijkt dit. In regio A bevindt zich de hygroscopische regio, deze omvat alle vocht dat resulteert uit waterdampopname om te komen tot een evenwichtstoestand met de omgeving. Regio B is de capillaire water regio, en gaat van 95 percent relatieve vochtigheid tot waterverzadiging. Deze zone hangt samen met de radii van de poriën en de capillaire zuigkracht van het materiaal. Regio C is de oververzadigde zone, deze kan niet door normale zuiging bereikt worden, maar enkel door bvb. waterdampdiffusie over een temperatuurgradiënt. De relatieve vochtigheid is er altijd 100 procent. In niet hygroscopische, niet capillaire materialen komt enkel regio C voor, vocht in deze materialen kan dus enkel voorkomen onder dauwpuntcondities en het verschijnt dan in vloeibare vorm. In hygroscopische capillair actieve materialen komen de 3 regio's voor.



Figuur 3: schematisch diagram van de vochttopslagfunctie van een hygroscopisch capillair-actief bouw materiaal, bron [6].

Voor het drogen van materialen staan volgens Straube [5] en ORNL [8] oppervlakteverdamping en waterdampverplaatsing, respectievelijk door convectie en diffusie, en drainage door de zwaartekracht in. De drainage verplaatst enkel vloeibaar water, en verhindert dat materialen verzadigd blijven. Bij het verder drogen zal er eerst verdamping optreden onder invloed van convectie, dan verdere droging door diffusie. Bij droging kan het fenomeen van hysteresis optreden: concreet houdt dit in dat de desorptie curve een andere weg volgt dan de absorptie curve. Dit effect wordt veroorzaakt door de tragere afgifte van water uit de poriën dan de opname ervan, en is materiaalafhankelijk. Hierdoor heeft het materiaal een hoger vochtgehalte bij dezelfde relatieve vochtigheid ten opzichte van de bevochtigingcurve.

3. Schadecriteria voor vocht in een constructie.

Vocht kan in gebouwen en gebouwelementen voor aanzienlijke schade zorgen, zo kan het schimmels en houtrot veroorzaken, maar een te hoog vochtgehalte zal ook een invloed hebben op de isolerende werking van materialen. In dit hoofdstuk wordt een overzicht geboden van de schade- en duurzaamheidscriteria van materialen. Hierbij wordt aandacht besteed aan de huidige normeringen, aan criteria voor schimmelgroei en aan eisen naar vochtbelasting van diverse materialen.

Idealiter worden alle gebouwen met volledig droge materialen opgetrokken, in werkelijkheid starten vele gebouwen reeds met een aanzienlijke hoeveelheid vocht aanwezig in hun materialen. Dit vochtgehalte zal een invloed hebben op hoe de materialen reageren, en de opbouw van de constructie zal mee bepalen of de materialen zullen uitdrogen of verder nat worden. In die context spreekt men van de aanvaardbare performantie [8], materialen mogen vochtig worden, als ze daarbij hun duurzaamheid niet verliezen en als ze na periodes van bevochtiging genoeg periodes van droging hebben.

3.1. Condensatie: Norm EN ISO 13788 en DRAFT 2010.

Deze norm geeft een berekeningsmethode om te bepalen hoeveel de jaarlijkse vochtbalans bedraagt door condensatie in de constructie. Deze methode moet echter eerder als een ruwe dan als een nauwkeurige bepaling beschouwd worden, en houdt geen rekening met vocht aanwezig door bvb. de constructie van het element.

Startend met de eerste maand waarin condensatie optreedt wordt de hoeveelheid condensatie of verdamping in elk van de 12 maanden van een jaar bepaald uitgaande van de maandelijks gemiddelde externe condities. De geaccumuleerde massa van het gecondenseerde water over de maanden waarin condens optreedt wordt vergeleken met de totale verdampte hoeveelheid over de resterende maanden. Hierbij worden 1-dimensionale, constante condities verondersteld gedurende elke maand.

Door vereenvoudigingen bevat de methode verschillende fouten t.o.v. de werkelijkheid:

- De methode houdt geen rekening met het feit dat de thermische geleidbaarheid afhankelijk is van het vochtgehalte. Ook zal bij verdampen of condenseren warmte worden geabsorbeerd of afgegeven.
- Er wordt gebruik gemaakt van materiaaleigenschappen die constant zijn in de tijd.
- Capillaire zuiging en vloeibaar vochttransport gaan in werkelijkheid de vochtdistributie beïnvloeden.
- Er wordt geen rekening gehouden met eventuele lekken. De effecten van regen en sneeuw worden ook verwaarloosd.
- Er wordt uitgegaan van constante omgevingscondities.
- Er wordt van uitgegaan dat materialen geen water kunnen opnemen.

- Er wordt uitgegaan van 1 dimensionaal vocht transport.
- Stralingseffecten worden genegeerd.

Hierdoor is de methode beperkt inzetbaar om een correcte voorspelling te maken.

Om de eigenlijke berekening uit te voeren wordt uitgegaan van de Glaser methode, deze komt verder nog aan bod bij de bespreking van simulatiemethodes en wordt hier niet behandeld.

De norm bevat ook criteria om gebouwcomponenten te beoordelen. Aan de hand van de uitgevoerde berekening kunnen er zich 3 omstandigheden voordoen:

- 1) Geen condensatie op de oppervlakken gedurende het volledige jaar. In dit geval mag de structuur als vrij van condensatie beschouwd worden.
- 2) Condensatie gebeurt op 1 of meer oppervlakken gedurende enkele maanden, maar er is voor geen enkel oppervlak een netto accumulatie over de periode van 1 jaar omdat het condensaat opnieuw verdampt gedurende die periode. In dit geval dient de maximaal optredende hoeveelheid condensatie gerapporteerd en afgewogen te worden tegen de eisen van de materialen en eventuele wettelijke eisen.
- 3) Condensatie op 1 of meerdere oppervlakken verdampt niet volledig. In dit geval treedt er accumulatie op van vocht op het oppervlak en wordt de structuur als gefaald beschouwd.

Naast het risico op condensatie bespreekt de draft uit 2010[9] van de norm EN ISO 13788 [10] ook het drogen van gebouwcomponenten en verbindt het hieraan criteria.

De berekening gebeurt aan de hand van een overtollig vochtgehalte van 1kg/m^2 geconcentreerd in het midden van een materiaallaag. De maandelijkse externe condities worden dan gebruikt om de hoeveelheid verdampt vocht in elke maand gedurende 1 jaar te bepalen. Dit jaar wordt herhaald tot al het overtollig vocht uit de laag verdwenen is. Deze tijd in maanden wordt gebruikt om het element te toetsen. Tegelijkertijd moet ook het risico op condensatie op andere lagen door het verdampte vocht geëvalueerd worden.

Als criteria worden gebruikt:

- 1) Laag gedroogd binnen de 10 jaar zonder condensatie in andere lagen. In dit geval dient de duur opgegeven te worden en het risico op degradatie van de laag geëvalueerd te worden.
- 2) Laag gedroogd binnen 10 jaar, met tijdelijke condensatie in andere lagen. In dit geval moet de hoeveelheid gecondenseerd vocht op de overige lagen gecontroleerd worden.
- 3) Droogtijd langer dan 10 jaar, de norm eist dat het vocht binnen de 10 jaar uitgedroogd is.

3.2. Vorstschade.

Vorst kan verantwoordelijk zijn voor schade aan poreuze materialen, vooral materialen met een lage treksterkte zoals steen. Ten gevolge van een combinatie van temperaturen onder het vriespunt en een kritisch vochtgehalte kunnen scheuren optreden die visueel waarneembaar zijn. De schade kan optreden door toedoen van het ijs of door het ingesloten water. Vorst is essentieel een cyclisch

fenomeen aangezien het klimaat cyclisch verloopt, hierdoor is vorstschade eerder te zien als vermoeiingsschade waarbij door herhaaldelijke blootstelling microscheuren zullen ontstaan die op hun beurt weer meer water zullen opnemen en de schade vergroten.

Een eerste schademechanisme is dat waarbij het aanwezige water door bevriezing uitzet en zo het materiaal wegduwt, met andere woorden door volume expansie van het aanwezige water. Een tweede schademechanisme treedt op door lokale microscopische ijslenzen die door hun groei druk uitoefenen op de poriënwallen, het water nodig voor de groei wordt aangevoerd door kleine poriën waarin het water bij de optredende temperatuur niet bevriest. Een derde mechanisme gebeurt door macroscopische lens vorming, waarbij druk uitgevoerd wordt door een grote mobiele ijslens die gevoed wordt door een bron buiten het materiaal [2].

Ook is het mogelijk dat het ijs door zijn expansie grote drukken uitoefent op water dat ingesloten zit, deze hydraulische drukken zijn groter dan die uitgeoefend door het ijs, en veroorzaken spanningen en rekken in het materiaal waardoor breuk kan optreden [11].

In verband met vorstweerstand spreekt Straube [7] [12] als criteria over:

- Verzadigingsgraad, als vereiste wordt gesteld dat de materialen bijna verzadigd moeten zijn tijdens het vriezen: Straube [12] geeft 90% aan als grenswaarde, dit komt overeen met de volume-expansie van 9 à 10% die het water bij bevriezen ondergaat. Deze expansie kan dan de resterende 10% lucht in de poriën vervangen.
- Omgevingstemperatuur.
- Poriëngrootteverdeling.
- Vloeibare diffusiviteit.
- Snelheid van bevriezen.
- Aantal vries-dooi cycli: een vries cyclus begint bij -5°C en een dooicyclus bij temperaturen vanaf 0°C. Dit is gebaseerd op de observatie dat vries-dooi cycli geen probleem zijn bij temperaturen net onder het vriespunt. Cyclische belasting zorgt voor een langzame voortschrijdende degradatie die tot plotse breuk kan leiden.

In de IEA-Annex 24 [2] definieert men de vorstweerstand aan de hand van de vorst duurzaamheidsparameter F :

$$F = S_{cr} - S_t$$

Of door Hens [11] ook gegeven als:

$$F = w_{crf} - w_{act} > 0$$

Schade door vorst kan voorkomen worden als een voldoende aantal poriën niet gevuld is met water: beschikbare lege poriën laten de expansie van water toe zonder schade te veroorzaken. De limietwaarde voor de waterhoeveelheid die schade veroorzaakt wordt gegeven door de kritische waarde S_{cr} of w_{crf} . Deze is vooral afhankelijk van de gemiddelde afstand tussen luchtgepulde poriën en de poriëngrootte verdeling en is m.a.w. materiaalafhankelijk. De weerstand tegen vorst neemt toe met toenemend verschil tussen de kritische verzadigingsgraad S_{cr} of het kritische watergehalte w_{crf} en de werkelijke verzadigingsgraad S of het te verwachten vochtgehalte w_{act} , welke veranderlijk

zijn in de tijd en afhangen van de hygrothermische omgeving van het element. De tijd t waarvoor $F=0$ definieert de levensduur van het element.

Deze vergelijkingen tonen ook de relativiteit van vorstbestandheid aan: materialen met een gegeven kritisch vochtgehalte kunnen afhankelijk van de omgeving waarin deze worden toegepast performant zijn dan wel falen.

Hens [11] definieert ook nog de materiaalkwaliteit als bijkomend criterium: de grens van 90% verzadigingsgraad is voor vele materialen te optimistisch. Vaak is de inwendige treksterkte niet genoeg en faalt het materiaal nog voor de grens van 90% bereikt is. Hens definieert daarom enkele globale waarden voor steenachtige materialen:

Materiaal	S_{crf}
Natuursteen	0,65 à 0,96
Beton	0,9
Baksteen	0,87
Cementmortel	0,9
Kalkmortel	0,65

Tabel 2: kritische verzadigingsgraden voor steenachtige materialen zoals gedefinieerd door Hens, bron: [11].

Hens [11] geeft ook nog volgende tabel voor de vorstbestandheid van natuursteen, tegels en baksteen afgeleid uit de correlatie tussen poriënstructuur, resultaten van directe vorstproeven en waarnemingen.

90%- poriëndiameter μm	% poriën met diameter $<2,5\mu\text{m}$	Resultaat proeven
≥ 3	≤ 90	Vorstbestand
$2,5 \leq \leq 3$	-	Meestal vorstbestand
$2 \leq \leq 2,5$	-	Meestal niet vorstbestand
< 2	> 90	Niet vorstbestand

Tabel 3: vorstbestandheid van natuursteen, tegels en baksteen in functie van poriënkenmerken, bron: [11].

Voor de beoordeling van de vorstbestandheid bestaan er in de Belgische normeringen 2 globale testmethodes: de onrechtstreekse en de rechtstreekse vorstproef.

Bij de onrechtstreekse vorstproef gebeurt een analyse van de relatieve wateropsloringsgraad door capillariteit als functie van de tijd en hieruit wordt een vorstbestendigheidindex GC bepaald voor de materialen [13]. Aan de hand van een grafiek in functie van de wortel van de tijd en de relatieve opsloringsgraad kan dan GC bepaald worden uit de hoekfactoren α die de rechten maken.

Grafiek met 2 rechten:

$$GC = -14,53 - 0,309\alpha + 0,203 S$$

Grafiek met 1 rechte:

$$GC = -6,35 + 21,473 \alpha$$

Met S de opsloringsgraad op het snijpunt van de 2 rechten.

Naarmate GC hoger is worden de eisen die aan de materialen gesteld worden in de directe proeven hoger.

Hens [11] geeft dezelfde formule in aangepaste vorm waarbij de hoekfactor α vervangen werd:

Grafiek met 2 rechten:

$$VF = -14,53 - 240 \frac{A}{w_m h} + 20,3 \frac{w_c}{w_m}$$

Grafiek met 1 rechte:

$$VF = -6,35 + 16676 \frac{A}{w_m h}$$

Met

A de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt.

w_c het capillair vochtgehalte.

w_m het verzadigingsvochtgehalte.

Aansluitend hierop definieert Hens [11] ook klassen:

VF	Vorstbestandheid	Klasse
<-2,5	Materiaal vorstbestand, zelfs bij de strengste blootstelling	D
-2,5 ≤ <-0,95	Materiaaltoepassing aan steeds strengere beperkingen onderworpen	C
-0,95 ≤ <0		B
0 ≤ <4,5		A
≥4,5	Materiaal niet vorstbestand	0

Tabel 4: vorstbestandheidsklassen in functie van de VF waarde, bron: [11].

Aan de hand van deze eisen werd door Hens ook een beslissingsmatrix opgesteld[11]:

	Spouwmuur		Binnen verwarmd	Buitenvlak via vormgeving afgeschermd			
	Niet geïsoleerd	geïsoleerd		J		N	
				Z+W	N+O	Z+W	N+O
Opgaand metselwerk	X		J	B	B	C	B
	X		N	C	C	D	C
		X	J	C	C	D	C
		X	N	C	C	D	C
muuraanzet	X		J	B	B	C	C
	X		N	C	C	D	D
		X	J	C	C	D	D
		X	N	C	C	D	D
Muurdelen boven dakvlak	X	X				D	C
horizontale delen	x	x		D	C	D	D
schoorsteen	x	x		C	C	D	D
Muren in contact met water						D	D

Tabel 5: beslissingsmatrix, bron: [11].

Bij de rechtstreekse vorstproef [14] wordt het materiaal verzadigd en aan vries-dooi cycli onderworpen. De indirecte proef is ondergeschikt aan de directe proef: materialen die volgens de GC-index onvoldoende vorstbestand zijn kunnen door een gunstige beoordeling in de directe vorstproef toch nog in een hogere klasse terechtkomen [15].

De norm NBN-B27 011 [15] voorziet 5 prestatieniveaus gelinkt aan de indirecte[13] en de directe[14] vorstproeven.

Prestatieklasse	$GC \leq -2,5$	$-2,5 \leq GC < -0,95$	$-0,95 \leq GC$
5 sterk blootgestelde materialen	Geen zichtbare vorstschade na 20 vorst-dooi cycli, wateropname gebeurde onder restdruk van 51 kPa	Geen zichtbare vorstschade na 20 vorst-dooi cycli, wateropname gebeurde onder restdruk van 2,7 kPa	
4 gewoon blootgestelde materialen	Geen directe vorstproef nodig	Geen zichtbare vorstschade na 20 vorst-dooi cycli, wateropname gebeurde onder restdruk van 51 kPa	
1-3 weinig tot niet blootgesteld		Geen directe vorstproef nodig: Klasse 1: $GC > 4,5$ Klasse 2: $0 < GC \leq 4,5$ Klasse 3: $-2,5 < GC \leq 0$	

Tabel 6: prestatieniveaus volgens uit de indirecte en directe vorstproeven, bron: [15].

Vergelijking door het WTCB tussen de Europese norm NBN EN 539-2 en de Belgische normen toonde aan dat de Belgische normen erg geschikt waren en voor baksteen zelfs strenger waren [16].

3.3. Hout.

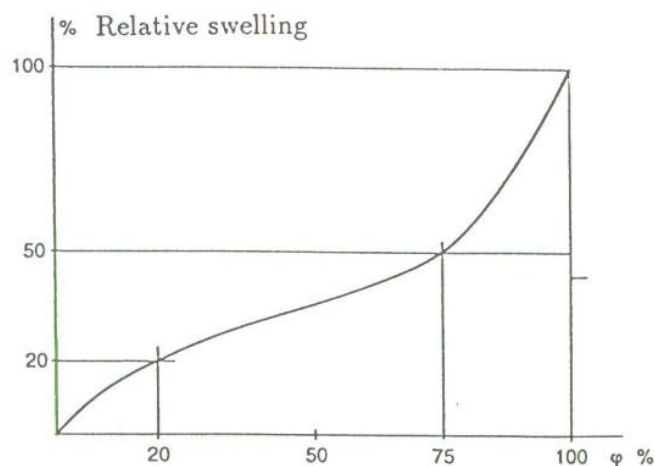
3.3.1. Houtrot.

Buxbaum [17] en Sedlbauer [18] beschrijven als criteria voor houtrot een vochtgehalte boven 20 massaprocent en een temperatuursbereik tussen +3°C en +40°C met een optimum afhankelijk van de schimmelsoort tussen +18°C en +20°C. Daarnaast wordt vermeld dat als kritische limiet een temperatuur van meer dan +5°C moet beschouwd worden in gebouwen.

Straube [7] heeft het over een oppervlakte vochtigheid groter dan 95 procent en een vochtgehalte van meer dan 30 procent, binnen een temperatuursbereik van +5°C tot +50°C. Algemeen stelt hij dat houtrot sterk afhankelijk is van de houtsoort, het houtstaal en de blootstelling.

3.3.2. Zwelling van hout.

De IEA Annex 24 [2] vermeldt dat de meeste zwelling van hout en houtgebaseerde materialen plaatsvindt vanaf relatieve vochtigheid groter dan 75 procent. Figuur 4 toont de relatieve zwelling als functie van de relatieve vochtigheid. Een zwelling van 100 percent treedt op bij een relatieve vochtigheid van 100 procent.



Figuur 4: relatieve zwelling van hout in functie van de relatieve vochtigheid, bron: [2].

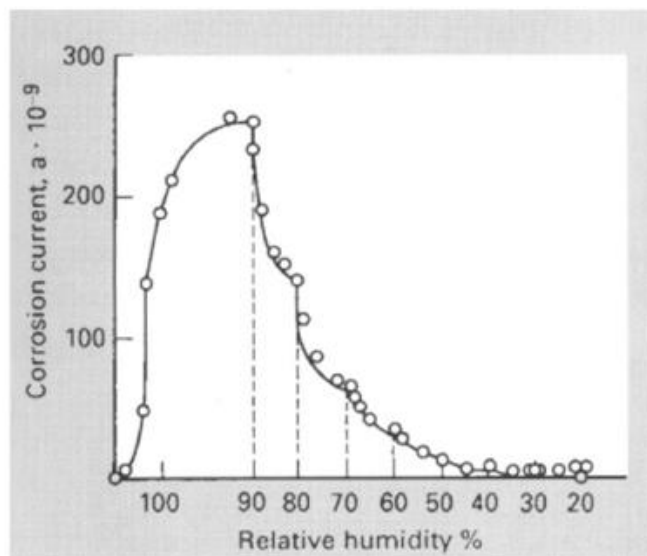
3.4. Oplossing van het materiaal.

Water is een universele solvent en kan ervoor zorgen dat gips wak wordt of dat lijm oplost. Straube[7] raadt aan om capillaire verzadiging te vermijden. Deze treedt zoals reeds eerder aangehaald op bij een relatieve vochtigheid hoger dan 95 percent.

3.5. Corrosie van metalen.

Opdat corrosie op metalen zou optreden is een toegang tot vloeibaar water of tot hoge relatieve vochtigheden én tot zuurstof nodig. Bij stijgende relatieve vochtigheid zal de corrosiesnelheid stijgen, maar ook omgevingen die bvb SO_2 of chloriden bevatten kunnen de corrosie versnellen. IEA Annex 24 [2] meldt ook nog dat er geen corrosie optreedt op staal bij een relatieve vochtigheid onder de 60 procent.

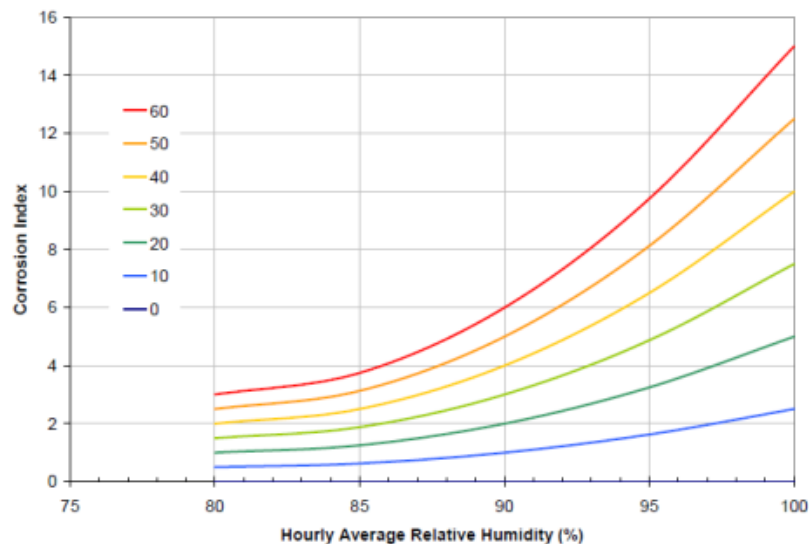
Straube [12] nuanceert dit: vanaf 75-80 procent relatieve vochtigheid wordt de corrosiesnelheid significant, maar corrosie kan al beginnen bij lagere waarden. Ook is bij 100 procent luchtvochtigheid de corrosie vaak over haar piek heen: reden hiervoor is het zuurstofafsluitende effect van de waterlaag die zich vormt. In dynamische omstandigheden treden er echter afwisselende fasen op van hoge en lage relatieve vochtigheid waardoor dit effect teniet gedaan wordt. Daarnaast is ook de temperatuur belangrijk: deze levert de energie nodig om de chemische reacties te activeren.



Figuur 5: corrosiesnelheid in functie van de relatieve vochtigheid, bron: [12].

Door Straube[12] werd hierop een corrosie index voorgesteld: de index is gebaseerd op een waarde 1 voor 20°C en 80% relatieve vochtigheid. Bij een verdubbeling van de temperatuur verdubbelt de indexwaarde, deze verdubbelt ook bij een stijging in relatieve vochtigheid van 80-90 procent en stijgt met een factor 2,5 bij een stijging van 90-100%. De corrosie potentiaal onder 80% relatieve vochtigheid en bij vriestemperaturen wordt nul genomen. Data uit simulaties kunnen dan geïnterpreteerd worden door de corrosie indexen voor een punt elk uur op te tellen en te delen door 100. In grafiek brengen van deze cumulatieve corrosie indexen ten opzichte van de tijd laat zien

wanneer corrosie optreedt en hoe snel. Steil stijgende hellingen duiden op sterke opeenvolgingen van de corrosie indexen en dus periodes met een hoog corrosie potentieel. Horizontale delen duiden op periodes zonder kans op corrosie. Aangezien corrosie irreversibel is kan er geen negatieve corrosie index zijn, en moet de grafiek dus blijven stijgen.



Figuur 6: voorbeeld van corrosie-index waarden voor verschillende temperaturen en relatieve vochtigheden, bron: [12].

3.6. Schimmels.

Schimmels zijn algemeen gesteld een geheel van organismen dat onder de juiste omstandigheden het oppervlak van materialen kan aantasten. Vochtige oppervlakken waarop zich de juiste nutriënten bevinden kunnen een variëteit aan soorten ondersteunen, en zelfs onder droge condities kunnen sporen en fragmenten van schimmels in de lucht, op oppervlakken en in de grond gevonden worden.

De IEA annex 14 [1] geeft als voorwaarden voor de succesvolle besmetting en groei van schimmels:

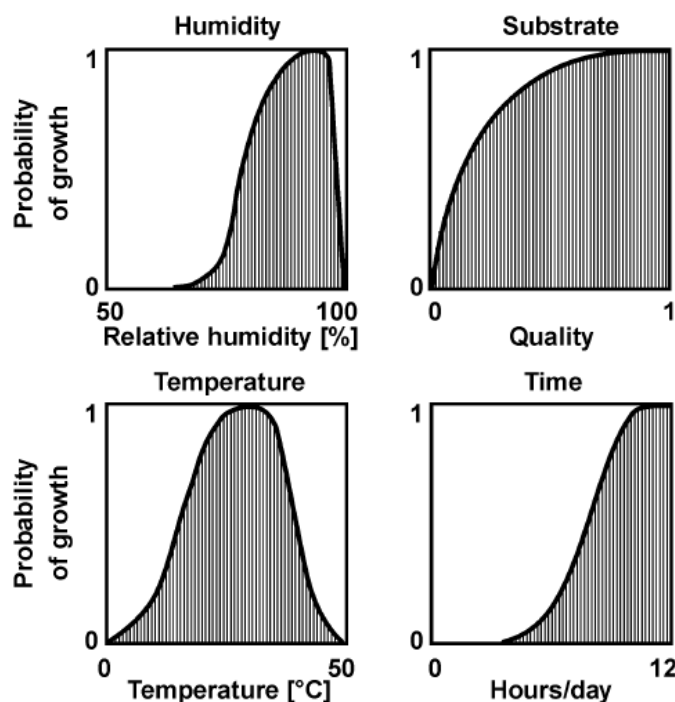
- Een voedingssubstraat, dit kan het materiaal zelf zijn, maar ook erg kleine hoeveelheden stof e.d. zijn voldoende.
- De aanwezigheid van sporen.
- Zuurstof.
- Geschikte temperaturen, het temperatuursbereik aan de binnenzijde van wanden behoort hiertoe.
- Vocht.

Deze voorwaarden moeten ook gedurende voldoende tijd vervuld zijn om schimmels tot ontwikkeling te laten komen. De eerste en laatste voorwaarde maakt dat vooral poreuze hygroscopische materialen vatbaarder zijn voor schimmelgroei, ten opzichte van niet poreuze materialen, want deze kunnen in hun poriën voldoende hygroscopisch vocht en voedsel bevatten

voor het ontkiemen van de schimmels. Bij niet poreuze materialen is een vervuiling nodig op het materiaal. Aandacht dient ook uit te gaan naar de buitenhoeken van gebouwen: door een slechtere luchtcirculatie in de hoek, grotere windsnelheden die voor extra warmteverlies zorgen en een grotere buitenoppervlakte voor een gegeven binnenoppervlakte (geometrische koudebrug), kan in hoeken een hogere relatieve vochtigheid ontstaan omdat de hoeken kouder zijn dan de omliggende muur. Schimmelvorming komt dan ook vaak in de hoeken van gebouwen voor.

3.6.1. Wateractiviteit.

Omdat aan de eerste 4 van deze voorwaarden bijna altijd voldaan is hangt de gevoeligheid van materialen aan schimmelgroei voornamelijk af van de beschikbare hoeveelheid water. De IEA Annex 14 [1] definieert in deze context de water activiteit of a_w waarde. Water activiteit is een maat voor de beschikbaarheid van water voor micro organismen en hangt af van de ratio van de dampdruk in het substraat tot die van zuiver water bij gelijke temperatuur en druk, dus gelijk aan de relatieve vochtigheid van het materiaal. Deze is onder constante omstandigheden numeriek gelijk aan de evenwichts relatieve vochtigheid van de lucht. Als kritische grens voor a_w wordt een waarde van 0,8 gedurende verschillende dagen aangereikt.



Figuur 7: kwalitatieve beschouwing van de groei condities voor schimmels, bron: [18].

3.6.2. Time of wetness

IEA annex 24 [2] vermeldt dat de groei van schimmels beïnvloed wordt door de temperatuur en de relatieve vochtigheid van het substraat. Deze relatie wordt geïllustreerd aan de hand van isopleten,

die de nodige temperatuur en relatieve vochtigheid beschrijven voor schimmelgroei. Punten langs een isopleet hebben dezelfde groei. De aantasting van het oppervlak wordt beoordeeld aan de hand van de schimmelindex. De kritische waarde voor de relatieve vochtigheid is 80 procent, onafhankelijk van de temperatuur (bij normale kamertemperaturen). Voor dynamische condities wordt ook het aantal bevochtigingen gedefinieerd: als limietwaarde geldt dat gedurende de halve tijdsperiode de relatieve vochtigheid boven de 80 procent mag zijn als gedurende de andere helft de relatieve vochtigheid zich onder deze waarde bevindt. Of:

$$TOW_{cr} = 0.5$$

3.6.3. Temperatuurfactor f.

Naast deze methoden bestaat ook de dimensieloze temperatuur of temperatuurfactor f. Dit is een meer algemene parameter die de binnenoppervlaktetemperatuur onafhankelijk van de exacte randvoorwaarden beschrijft.

$$f = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Met

θ_{si} [°C] de binnenoppervlakte temperatuur.

θ_i [°C] de binnentemperatuur.

θ_e [°C] de buitentemperatuur.

Het constructie ontwerp en de detaillering moet nu zo zijn dat f op elk punt van het binnenoppervlak groter is dan 0,7. Bij de bepaling van f moet men bovendien gebruik maken van een warmteovergangscoefficiënt = 5W/(m²K)[2].

De norm EN ISO 13788 [10] stelt dat om schimmelgroei te vermijden de maandelijkse gemiddelde relatieve vochtigheid aan het oppervlak nooit 0,8 mag overschrijden. De methode bestaat er in om voor elke maand de interne dampdruk te bepalen en dan, gebaseerd op de geëiste relatieve vochtigheid op het oppervlak, de minimum aanvaardbare verzadigingsdampdruk op het oppervlak te bepalen. Hieruit kan dan een minimale oppervlaktetemperatuur en hieruit een thermische kwaliteit van de constructieopbouw bepaald worden, uitgedrukt in de temperatuurfactor f. De maand met de hoogste eis aan f is de kritische maand. Haar temperatuurfactor bepaalt de opbouw van het element.

3.6.4. Ashrae 160 P.

De Amerikaanse norm Ashrae 160-P [19] is een van de weinige normen die concrete tijdseisen oplegt. Ze stelt als minimale eisen voor de voorkoming van ontwikkeling van schimmels:

- Dertig daagse gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 80% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C
- 7 daagse gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 98% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C
- 24 uren gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 100% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C

3.6.5. Isopleten.

Zoals eerder aangehaald wordt het risico op schimmelgroei weergegeven in isopleten via de relatie tussen relatieve vochtigheid en temperatuur. Afhankelijk van de duur kan dan bekeken worden of er risico is op schimmelgroei. Sedlbauer [18] heeft aan deze isopleten gevaarklassen en substraatgroepen toegevoegd.

De gevaarklassen zijn:

- klasse A: de schimmel of zijn metabolische producten zijn hoogst pathogeen, ze mogen niet voorkomen in gebruikte gebouwen.
- Klasse B: de schimmel is pathogeen als men er lange tijd aan blootgesteld wordt en kan allergische reacties veroorzaken.
- Klasse C: de schimmel is niet gevaarlijk voor de gezondheid, maar schimmelvorming kan wel economische schade vormen.

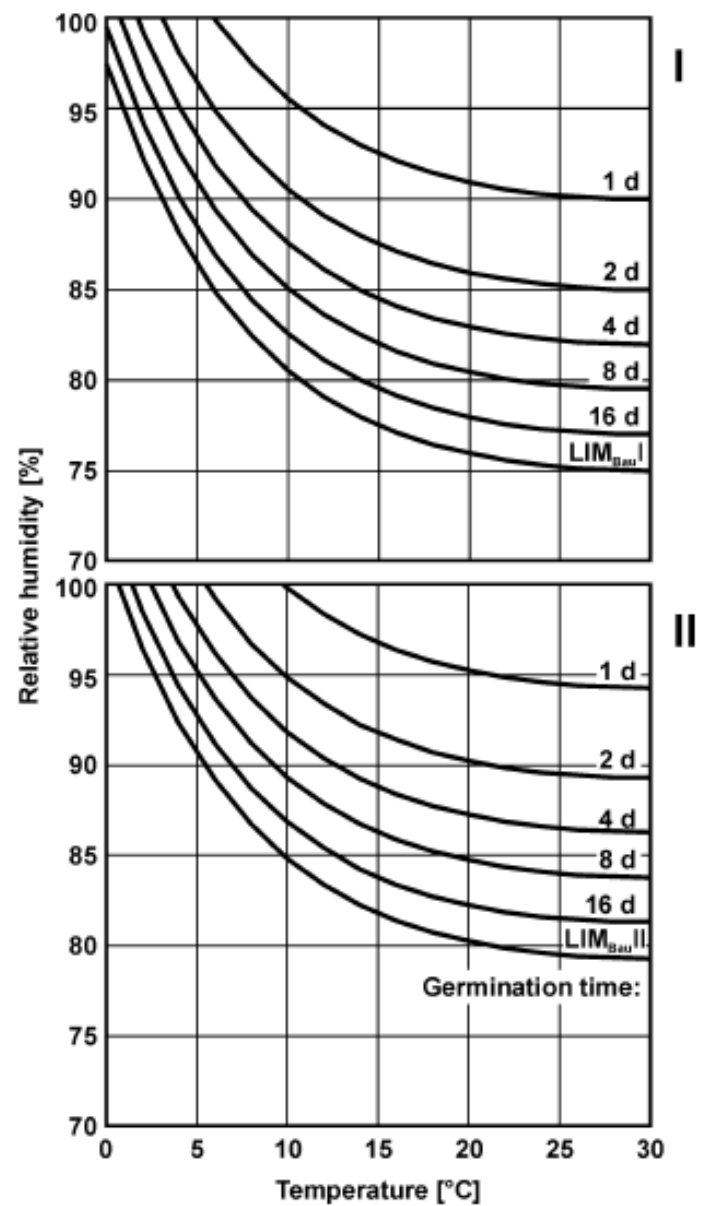
Door de sterke gelijkenis tussen klasse B en C worden deze door Sedlbauer samengevoegd tot 1 klasse.

Als substraatgroepen geeft hij:

- Categorie 0: optimaal medium.
- Categorie I: biologisch recycleerbare bouwmaterialen, vb. papier, materialen gemaakt uit biologisch afbreekbare grondstoffen en materiaal voor permanente elastische voegen.
- Categorie II: materialen met een poreuze structuur.
- Categorie III: materialen die noch degradeerbaar zijn noch voedingsstoffen bevatten, deze categorie materialen wordt dus niet beschouwd.

Combinatie van deze gevaarklassen met de substraatgroepen laat toe 4 isopleet systemen op te stellen die rekening houden met de gebruikte materialen. Omgekeerd kan ook gecontroleerd worden tot welke gevarencategorie een bepaalde wandopbouw aanleiding kan geven.

Spore germination



Figuur 8: voorbeeld van een isopleet voor de spoor kieming, bron: [18].

4. Modelleringstechnieken.

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de modellering van vochttransport in gebouwen. Aandacht wordt besteed aan de Glasermethode, de formules die WUFI gebruikt en aan de meer algemene wiskundige formuleringen van vochttransport. Bedoeling van dit hoofdstuk is een algemeen beeld te geven van modelleringstechnieken en deze af te wegen tegen de methodes gebruikt in het programma WUFI om zo tot een dieper inzicht te komen van de mogelijkheden en beperkingen van WUFI.

4.1. Algemeen.

In tegenstelling tot warmtetransport, waar de drijvende potentiaal de temperatuur is, is er geen unanimititeit over de keuze van drijvende potentialen voor vochttransport. De keuze van deze potentialen is van groot belang voor de algemene toepasbaarheid en nauwkeurigheid van wiskundige en computer modellen. In het verleden werden vaak het watergehalte en de temperatuur als drijvende potentialen gebruikt, maar geen van beide is een fysisch drijvende kracht voor damp of vloeibaar water transport, waardoor deze modellen niet meer geschikt zijn. De potentialen moeten ook constant zijn in meerlagige bouwcomponenten en daarnaast moeten de drijvende potentialen, opdat nauwkeurighedscontroles makkelijk uitvoerbaar zouden zijn, makkelijk te meten grootheden zijn.

Door deze moeilijkheid is er dan ook geen eenduidige manier om vochttransport praktisch te modelleren en bestaan er meerdere modellen met elk hun tekortkomingen en sterktes. Zo beschouwt de Glasermethode enkel het waterdamptransport.

Künzel [6] geeft aan dat aangezien vocht zich in gasvormige of vloeibare toestand kan verplaatsen, met in elke toestand andere drijvende krachten, er minimaal 2 onafhankelijke drijvende potentialen nodig zijn. Meest gebruikt zijn temperatuur, watergehalte, dampdruk en capillaire zuiging, waarvan enkel de laatste twee directe drijvende potentialen zijn.

Naast zuiver vochttransport treedt er ook een beïnvloeding op tussen vocht- en warmtetransport: zo zal bijvoorbeeld bij condensatie of verdamping van vocht in de constructie warmte worden afgegeven of opgenomen. Ook zal bijvoorbeeld de isolatiewaarde van vochtige materialen verschillen van droge materialen.

4.2. Glasermethode.

De methode van Glaser is een methode die uitgaande van statische condities het condensaat gevormd gedurende een koude winter periode en de theoretische hoeveelheid verdampt water in een koude zomer bepaalt[20]. Als de hoeveelheid condensaat onder bepaalde limieten blijft en kleiner blijft dan de verdampbare hoeveelheid vocht wordt de constructie als veilig beschouwd.

De methode bestaat er in om een doorsnede van het gebouw te tekenen waarbij de dikte van elke laag gelijk wordt gesteld aan zijn diffusieweerstand Z , met als ordinaat de dampdruk p . De verzadigingsdampdrukken, berekend met de oppervlaktetemperaturen, tussen 2 oppervlakken worden door rechte lijnen verbonden. Hierop wordt het isotherm dampdrukverloop getekend, deze verbindt de dampdrukken binnen en buiten. Bij snijding van beide lijnen treedt een onmogelijke situatie op: de plaatselijke dampdruk is hoger dan de verzadigingsdampdruk, condensatie treedt op. Het juiste dampdrukverloop over het element wordt dan verkregen door een raaklijnenconstructie ter hoogte van de knikpunten.

Volgens de norm EN ISO 13788 [10] wordt het condensatiedebiet gegeven als het verschil tussen in- en uitstroom van vocht:

$$g_c = \left(\frac{p_i - p_{\text{condensvlak}}}{\sum_{j=c}^i Z_j} - \frac{p_{\text{condensvlak}} - p_e}{\sum_{j=e}^c Z_j} \right)$$

Künzel [20] geeft enkele beperkingen van de Glasermethode aan: ze houdt noch rekening met hygroscopische zuiging noch met vloeibaar transport. Hierdoor is haar gebruik grotendeels gelimiteerd tot lichtgewicht structuren, massieve structuren geven minder betrouwbare resultaten. Daarnaast is de berekening essentieel statisch: tijdelijke effecten verlangen correcte vochttopslag termen. Problemen met andere vochtlasten, zoals bvb constructievocht, zomercondensatie, regenbelasting of opstijgend vocht vallen ook buiten het bereik van de Glasermethode. Hierdoor moet de Glasermethode dus eerder gezien worden als een middel om het risico op condensatie te bepalen, dan een simulatie van de realiteit.

4.3. WUFI.

Het softwarepakket WUFI werd ontwikkeld aan het Fraunhofer IBP te Stuttgart en berekent het vocht- en warmtetransport op een numerieke manier. Hiervoor gaat het uit van transportvergelijkingen opgesteld door Künzel [6], waaruit een gesloten differentiaalvergelijking systeem werd ontwikkeld.

Künzel [6] stelde dat voor het niet isotherm vochttransport in poreuze stoffen 2 onafhankelijke drijvende krachten nodig zijn: de dampdruk en de capillaire zuiging. Het probleem met capillaire zuiging is echter dat het niet gedefinieerd kan worden in droge of niet capillair actieve materialen en het kan ook niet direct gemeten worden in vochtige stoffen. Via de formule van Kelvin kan dit echter opgelost worden door de capillaire zuiging te vervangen door de relatieve vochtigheid:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{P_k}{\rho_w R_D T}\right)$$

Met

P_k [Pa] de capillaire zuiging.

ρ_w [kg/m³] de dichtheid van water.

R_D [J/kgK] de gasconstante voor waterdamp.

T [K] de absolute temperatuur.

Hierdoor beschikt WUFI over 2 fysisch plausibele vochttransport potentialen die bovendien ook makkelijk meetbaar zijn.

De hoofdmechanismen voor warmtetransport in gebouwcomponenten zijn warmtegeleiding en warmtetransport door dampdiffusie met faseveranderingen. Voor geleiding is de potentiaal de temperatuur, maar de thermische geleiding van materialen kan door vocht beïnvloed worden. De dampdiffusie is via de dampdruk een functie van de temperatuur en de relatieve vochtigheid.

Algemeen stelt Künzle [6] voor de totale enthalpie van een systeem:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla q + S_h$$

Met

H [J/m³] de totale enthalpie, en $H = H_{\text{droog materiaal}} + H_{\text{vocht in het materiaal}}$.

Q [W/m²] de warmte flux dichtheid, met $q = -\lambda \nabla \theta$.

S_h [W/m³] enthalpieveranderingen door vochtbeweging en faseovergangen, met $S_h = -h_v \nabla g_v$ waarbij h_v de latente warmte van de faseovergang is, en g_v de dampdiffusie fluxdichtheid.

Voor het vochtgehalte van een systeem geldt:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(g_w + g_v) + S_w$$

Met

w [kg/m³] het watergehalte van een component.

g_w [kg/m²s] de vloeibaar transport flux dichtheid, met $g_w = -D_\varphi \nabla \varphi$, waar D_φ de vloeibare geleidingscoëfficiënt en φ de relatieve vochtigheid zijn.

g_v [kg/m²s] de dampdiffusie flux dichtheid, met $g_v = -\delta_p \nabla p$, waar δ_p waterdamp permeabiliteit en p de waterdamp partiële druk.

S_w [kg/m³s] de vocht bron of verlies term, een bron kan optreden ten gevolge van lekken, een verlies kan bvb optreden bij het uitharden van beton. Künzle [6] neemt deze niet in rekening.

De vergelijkingen van de warmte- en vocht balans zijn dus sterk gekoppeld aan elkaar: de warmtebalans is afhankelijk van de vochtbalans door: 1. de totale enthalpie van het systeem door $H_{\text{vocht in het materiaal}}$, 2. de thermische geleiding van materialen, door de vochtafhankelijkheid van λ , en 3. door enthalpieveranderingen, door g_v . De vochtbalans is afhankelijk van de warmtebalans door de temperatuursafhankelijkheid van de transportfluxdichtheiden: respectievelijk door de relatieve vochtigheid en door de waterdamp partiële druk.

Deze 2 balansen kunnen slechts opgelost worden als er in beide vergelijkingen maximaal 2 variabelen zijn: de temperatuur en de relatieve vochtigheid.

De dampdruk p is zelf ook omzetbaar in de relatieve vochtigheid via de formule:

$$\varphi \cdot p_{\text{sat}} = p$$

Waarbij p_{sat} enkel afhankelijk is van de temperatuur via:

$$p_{sat} = \exp\left(65,8094 - \frac{7066,27}{273,15 + \vartheta}\right) - 5,976 \ln(273,15 + \vartheta)$$

$$-10^{\circ}\text{C} < \vartheta < 50^{\circ}\text{C}$$

Met θ de temperatuur in graden Celsius.

Hierdoor is het vochttransport door WUFI enkel nog afhankelijk van de relatieve vochtigheid en de temperatuur: bij capillaire conductie of regen is de relatieve vochtigheid plaatselijk 1.

Hieruit volgt:

$$\frac{dH}{d\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla \theta) + h_v \nabla(\delta_p \nabla(\varphi p_{sat}))$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_{\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{sat}))$$

Of met carthesische coördinaten:

$$\frac{dH}{d\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_{px} \frac{\partial \varphi p_{sat}}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial y} \left(\delta_{py} \frac{\partial \varphi p_{sat}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\varphi x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \delta_{px} \frac{\partial \varphi p_{sat}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\varphi y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \delta_{py} \frac{\partial \varphi p_{sat}}{\partial y} \right)$$

Waarin:

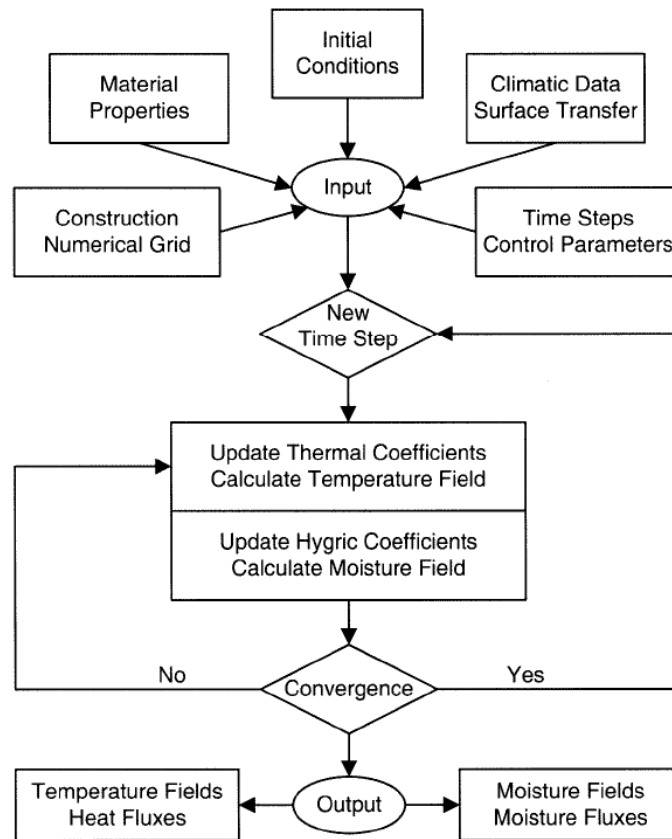
$dH/d\theta$ [J/m³K] de warmteopslagcapaciteit van een vochtig materiaal.

$dw/d\varphi$ [kg/m³] de vochttopslagcapaciteit van een materiaal.

De vloeibare geleidingscoëfficiënten en de waterdamppermeabiliteit kunnen afhankelijk van het bouw materiaal in x en y richting verschillen, bvb. zoals in houten materialen. De berekeningen kunnen ook in 1 dimensie worden uitgevoerd door de y-termen weg te laten.

Voor de ruimtelijke discretisatie van de differentiaal vergelijkingen wordt een eindigvolume techniek toegepast: hierbij wordt een controle volume met zijden Δx en Δy ingevoerd, waarover constante condities verondersteld worden. De discretisatie in de tijd gebeurt aan de hand van een impliciete formulering: hierbij worden alle variabelen simultaan berekend op het nieuwe punt in de tijd. Het resulterende matrix systeem wordt vervolgens opgelost.

Om het warmte en vocht gedrag van gebouwcomponenten te berekenen heeft WUFI verschillende soorten data nodig: deze worden weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: werkingsschema van WUFI, bron: [6].

Eens al deze data correct ingevoerd zijn worden de initiële verdelingen van vocht en temperatuur berekend, of worden opgegeven initiële condities ingeladen. Vervolgens begint de dynamische berekening van de temperatuur- en vochtvelden: elke nieuwe tijdstap worden de gekoppelde warmte- en vochttransport vergelijkingen afwisselend berekend tot het beëindigingcriterium wordt bereikt. Voor elke oplossing van de warmtetransportvergelijking worden alle vocht en temperatuursafhankelijke thermische opslagtermen en transportcoëfficiënten aangepast en omgekeerd worden voor elke oplossing van de vochttransport de hygrische coëfficiënten aangepast.

4.4. Nauwkeurigheid van de numerieke oplossing.

4.4.1. Terminatiecriteria, tijdstappen en grid.

Künzel [6] geeft aan dat de nauwkeurigheid van de numerieke oplossingen afhangt van de keuze van de terminatie criteria, de tijdstappen en de grootte van het grid. Om terminatie criteria te bepalen geeft hij aan dat het voldoende is als de maximale verandering van de variabelen in de berekening lager is dan 1 duizendste van een procent in relatieve vochtigheid en 1 duizendste van 1 graad Celsius. Bij hoge watergehaltes wordt het criterium voor vocht beter nog eens door 10 gedeeld. Voor de tijdstappen geeft Künzel aan dat om de berekening te optimaliseren de tijdstappen continue zouden moeten aangepast worden aan de temperatuur en vocht veranderingen in de component. In

de praktijk worden de tijdsstappen echter gekozen in functie van de tijdsstappen van de klimaatdata. De grid grootte hangt af van het verwachte vocht- en temperatuursveld in de gebouw component. Optimaal veranderen de grid elementen in een ruimtelijk continue manier zonder te grote overgangen aan de grenzen. Künzle [6] geeft hiervoor een expansie- en contractiefactor ε waarvoor geldt:

$$\Delta x_{i+1} = \varepsilon \cdot \Delta x_i$$

Met Δx_i , Δx_{i+1} de grid groottes van naburige grid elementen

Als ε groter is dan 1 zal het grid uitzetten, voor kleinere waarden krimpt het in, ε dient niet constant te zijn en kan variëren over verschillende lagen. Op deze manier kan op kritische plaatsen, vb. aan bevochtiging of uitdrogingsvlakken, een fijner grid gemaakt worden om zo sneller en efficiënter tot een resultaat te komen.

4.4.2. Onzekerheid input data.

De hygrothermische conditie van een constructiedeel hangt in sterke mate af van de variatie van factoren als klimaat en materiaalkarakteristieken: het element zal niet aan dezelfde belastingen onderworpen worden in verschillende seizoenen, en binnen hetzelfde materiaal bestaat er een spreiding in de karakteristieken, afhankelijk van onder andere de omgeving waar het zich in bevindt. Deze verscheidenheid kan ervoor zorgen dat er in voorspellingen aanzienlijk afgeweken wordt van wat in de werkelijkheid gebeurt. Anderzijds gebruiken HAM modellen vaak technieken die toelaten om uit eenvoudig meetbare parameters, moeilijker te bepalen parameters benaderend te berekenen, zonder daarvoor uitgebreide en dure tests te moeten uitvoeren.

Om aan de onzekerheden die hieruit voortvloeien tegemoet te komen kan in WUFI gebruik gemaakt worden van 2 onzekerheidsaanpakken: de gevoeligheidsanalyse en de waarschijnlijkheidsanalyse [21]. Bij de gevoeligheidsanalyse wordt bestudeerd of de gevonden oplossing gevoelig is aan een variatie in een van de parameters. Rode [22] geeft een voorbeeld hiervan toegepast op het model van Pedersen: er werden 4 beschrijvingen van de materiaaleigenschappen gebruikt, namelijk optimaal, ruw, constant en zoals in de database opgenomen. Indien informatie over de stochastische afwijking van de beïnvloedende parameters gekend is kan deze gebruikt worden in een waarschijnlijkheidsanalyse.

4.4.2.1. Materiaalparameters.

Experimenten door Holm [21], waarbij een differentiële gevoeligheidsanalyse en een Monte Carlo analyse werden uitgevoerd, tonen aan dat de benaderingstechnieken die gebruikt worden voor het bepalen van de materiaalkarakteristieken slechts kleine en aanvaardbare afwijkingen van de werkelijkheid hebben zolang binnen normale omstandigheden gewerkt wordt [23] [24]. Experimenten op een plat dak met cellenbetonnen drager gaven aan dat bij de typisch verwachte onzekerheden van de materiaaldata, oppervlakteparameters en klimaatsinvloeden, de maximaal optredende afwijking in het totale vochtgehalte 12-14 procent was. Verdere analyse van deze simulatie gaf ook aan dat de invloed van de klimaatscondities vergelijkbaar was aan de invloed van

de spreiding op de materiaal karakteristieken. Monte Carlo analyse van de proef gaf aan dat de grootste onzekerheid werd gegeven door de oppervlakte parameters zoals de warmte transfer coëfficiënten.

Holm [23] en Pavlikova [25] geven ook aan dat chemische interacties, zoals carbonisatie of transport van zouten, zwellen en krimpen, de nauwkeurigheid van de berekeningen kunnen beïnvloeden omdat deze de eigenschappen van de materialen kunnen wijzigen in de tijd afhankelijk van hun huidige en voorgaande vochtgehalte. In deze gevallen kan enkel een vergelijking met proeven op materialen aantonen of de berekeningen accuraat zijn of niet. Als voorbeeld haalt Holm [23] het gebruik van een betonnen façade aan: door de zwelling van het beton worden de al kleine capillaire poriën nog verder verkleind waardoor de waterabsorptie wordt verstoord, WUFI neemt deze effecten niet in rekening, waardoor de behaalde resultaten met voorzichtigheid moeten benaderd worden.

4.4.2.2. *Klimaatdata.*

Ook bij gebruik van klimaatdata, zoals bvb onder de vorm van gemeten waarden omgezet in test referentie jaren, bestaat er een onzekerheid. Holm [26] duidt op zowel het binnen als het buiten klimaat: het gebruik van de kamer heeft een beslissende invloed op het interne klimaat. Als parameter schuift hij de inwendige vochtbelasting naar voor. Simulaties in WUFI uitgevoerd door Holm op een plat dak met cellenbetonnen drager, waarbij de inwendige vocht belasting gevarieerd werd tussen de sinus curven voor een lage vochtbelasting en een hoge vochtbelasting, leverde een afwijking van 4 procent op ten opzichte van een normale vochtbelasting.

Onderzoek door Künzle [27] naar de invloed van buitenklimaatdata, gevormd door meteorologische datasets, op het vochtgehalte in een hellend dak toont aan dat ook hier voorzichtigheid geboden is. Een experiment waarbij 2 metingen van volledige jaren werden vergeleken toonde significante afwijkingen: vochtaccumulatie gedurende het ene jaar, uitdroging in het andere. Het onderzoek toonde ook aan dat er een correlatie bestaat tussen de gemiddelde jaartemperatuur en de vochtbalans van het dak, terwijl de invloed van het jaarlijkse stralingsaanbod en de slagregensom weinig significant is. Er wordt dan voorgesteld, uitgaande van deze proeven, om de jaargemiddelde temperatuur als selectie criterium te gebruiken in de keuze van de klimaatdata afhankelijk van de te beschouwen proef: bij winterse condensatie een koud jaar, bij zomercondensatie een warm jaar. Het gebruik van zogenaamde “test-reference years” wordt door Künzle afgeraden: zij behandelen enkel doorsnee jaren, en houden geen rekening met extrema. Bestaan er echter datasets gemeten over vele jaren dan wordt het volgens Künzle [27] zinvol een 10-procent jaar te nemen. Hierbij wordt uit meerdere jaarmetingen een jaar gevormd dat rekening houdt met de totale jaarlijkse vochtaccumulatie die statistisch gezien eens om de 10 jaar kan optreden.

IEA Annex 24[2] gaat verder in op deze “Design reference years”: er worden 2 eisen gesteld: enerzijds gaat men er van uit dat eens om de 10 jaar een vorm van vochtschade zal optreden, er wordt m.a.w. een klimaat met retourperiode 10 jaar voorzien. Anderzijds kiest men er voor het referentie jaar in oktober te laten starten, om zo rekening te houden met het bevochtigen tijdens de winter met daaropvolgend drogen in de zomer.

Voor de meeste constructies bestaat het slechtste jaar dan uit een combinatie van lage temperaturen, lage radiatie en hoge externe vochtigheden. IEA ANNEX 24[2] bevat een tabel met een DRY voor Ukkel. Andere constructies, zoals die die onderworpen worden aan zomer condensatie, worden dan weer meer belast door hoge zomer instraling na een koude vochtige winter. Het kan dan ook noodzakelijk zijn om voor verschillende constructies verschillende referentie jaren te kiezen.

Ook bij simulaties waarbij de langgolvlige straling belangrijk wordt, zoals bij onderkoeling van de gebouwschil bij een heldere nacht, is correcte data belangrijk. WUFI brengt deze straling in rekening door automatisch op de buitenste gridelementen een bronterm te voorzien die de zonnestraling, aardse en atmosferische tegenstraling als warmtebronnen beschouwd, en de thermische emissie van het oppervlak als verliesterm. Validatie van deze werkwijze door Künzle en Holm [28] toonde aan dat er bij een gevoeligheidsanalyse naar de parameters een verschil tot 14 procent bij de aardse tegenradiatie en 8 procent bij de atmosferische tegenstraling optrad.

4.4.3. 2d tegen 1D.

Zoals reeds aangegeven bij de afleiding van de transportvergelijkingen van WUFI is het enige verschil tussen WUFI 1D en WUFI 2D het weglaten van de y -term in de vergelijkingen. Hierdoor kunnen in WUFI-1D enkel gevallen behandeld worden die slechts transport in 1 richting veronderstellen, en die homogeen van materiaal worden verondersteld in de y -richting. Validatie door Künzle [2] [6] geeft aan dat er een zeer goede overeenkomst is tussen experiment en simulatie in 1D situaties. Validatie van een 2D situatie toonde een goede overeenkomst, ondanks het feit dat de 2D simulatie veel gevoeliger reageerde op fouten in de niet-lineaire materiaal parameters dan de 1D simulatie.

Dagliesh, et al. [29] voerde onderzoek naar de inzetbaarheid van 1D en 2D simulaties met het programma HygIRC. Met deze software bleek metselwerk de grootste afwijkingen tussen 1D en 2D te geven: de 1D simulaties gaven voor de relatieve vochtigheid hogere resultaten dan de 2D simulaties. Vooral de onmogelijkheid om in HygIRC 1D convectieve stromingen op te nemen werd aangegeven als oorzaak, en niet zozeer de heterogeniteit in de verticale richting. Omdat WUFI geen rekening houdt met convectief transport is verder onderzoek hiernaar aangewezen.

4.4.4. Beperkingen WUFI.

Er bestaan tot op heden geen sluitende modellen om vochttransport te modelleren, wel bestaan er verschillende modellen die een benadering vormen van de mechanismen die het vochttransport drijven. Het computerprogramma WUFI voert om deze reden enkele vereenvoudigingen en afrondingen door die een invloed kunnen hebben op het de algemene correctheid van het model.

In het model van Künzle [6] wordt primair al geen rekening gehouden met warmte en vochttransport door convectie, wegens de moeilijke kwantificeerbaarheid en situatieafhankelijkheid van luchtstromingen en lekken door een constructie. Dit kan voor aanzienlijke afwijkingen zorgen t.o.v. de werkelijkheid, zoals blijkt uit onderzoek door Blom en Holos [30]. Op vlak van vloeibaar transport

wordt er geen rekening gehouden met stromingen onder invloed van de zwaartekracht of hydraulische druk, elektrokinetische en osmotische.

Op vlak van de eigenlijke modellering van het vochttransport worden ook enkele vereenvoudigingen doorgevoerd. Zo worden in WUFI hysteresis effecten uitgevlakt bij de absorptie en desorptie curven door het gemiddelde te nemen van beide curven. Ook worden bij de afleiding van de transportvergelijkingen geen vochtbronnen of verliezen opgenomen, deze zijn wel apart definieerbaar in het programma. Ook de invloed van chemische processen op de vochtbalans wordt niet ondersteund, wel kunnen deze via brontermen of verliestermen ingevoerd worden.

Holm[24] geeft nog een beperking: hoewel de invloed van ijsvorming op de enthalpie en het vloeibaar transport wel in rekening wordt gebracht, wordt haar effect op de thermische geleiding niet opgenomen.

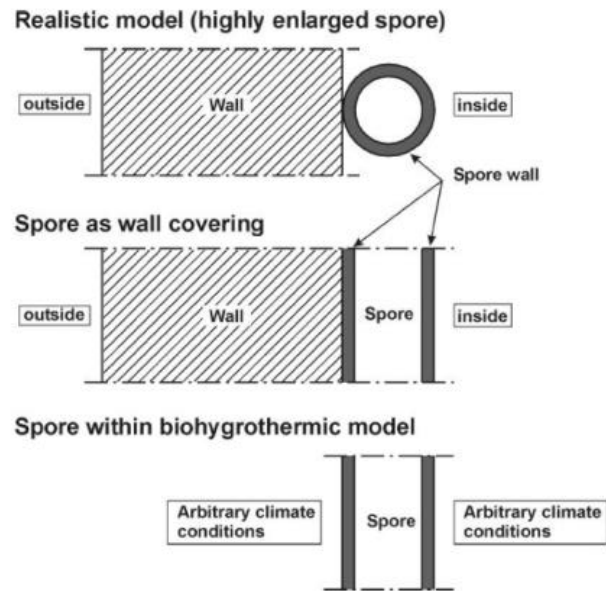
Künzel [6] geeft zelf ook nog een beperking: hoewel lange termijn veranderingen in de thermische of hygrische materiaal eigenschappen wel in rekening kunnen worden gebracht kan dit voor korte termijn fluctuaties van de eigenschappen veroorzaakt door de swelling en krimpprocessen in de poriënruimte niet. Om dit toch te kunnen opnemen raadt hij aan om materiaal parameters te gebruiken die onafhankelijk van de tijd zijn en die rekening houden met de korte termijn eigenschappen relevant voor het specifieke geval.

4.5. WUFI BIO.

Binnen het WUFI simulatieprogramma is het mogelijk om het risico op schimmelvorming in een constructiedeel te bepalen uitgaande van dynamische omstandigheden waaraan het onderworpen is. Krus en Sedlbauer [31] geven aan waarom: de 3 factoren die nodig zijn voor groei - voedingsstoffen, temperatuur en vochtigheid - moeten samen bestaan over een bepaalde tijdsperiode, tijd is daardoor 1 van de belangrijkste invloedsfactoren. Een dynamische simulatie laat dan toe om in de tijd vochtabsorptie en uitdroging te beschouwen.

De procedure opgesteld door Sedlbauer [18] bestaat uit 2 voorspellingsmodellen: het isopletenmodel en het dynamische biohygrothermische model. Het isopletenmodel maakt het mogelijk om de ontkiemingstijd van de sporen en de groei van het mycelium te bepalen op basis van verschillende laagste limiet isopleetsystemen die de invloed van het substraat in rekening brengen. Nadeel van dit model is echter dat het een statische manier is, waardoor bijvoorbeeld uitdrogingsperiodes niet in rekening kunnen worden gebracht. Het biohygrothermische model vertrekt van het idee dat sporen een bepaald osmotisch potentiaal hebben, bvb door de aanwezige zouten, waardoor sporen in staat zijn water op te nemen. Dit vermogen wordt in het model weergegeven door een vochttopslagfunctie. Vanaf dat een bepaalde hoeveelheid vocht in de sporen is binnengedrongen kan de kieming beginnen en bestaat er gevaar voor het optreden van schimmel. De vochtopname wordt in het model beschreven door diffusie onder isotherme voorwaarden, wat gezien de kleine afmetingen van de sporen gerechtvaardigd is. Hieraan gekoppeld krijgt het model ook een diffusieweerstand die iteratief aangepast wordt in relatie met de kiemtijden gegeven door de isopleetcurven.

Omdat de sporen een erg hoge diffusieweerstand hebben die invloed zou kunnen hebben op de vochtbalans worden in WUFI de sporen gemodelleerd in 2 stappen: eerst wordt de vochtbalans van het constructiedeel bepaald, in een 2^e stap worden deze resultaten als randvoorwaarden aan het spoormodel gegeven. Indien het kritische vochtgehalte voor kieming bereikt is kan schimmelgroei verwacht worden.



Figuur 10: modellering van de sporen door WUFI BIO, bron: [18].

4.5.1. Modelbeperkingen.

Sedlbauer [18] geeft zelf ook de beperkingen van dit model:

- Invloedsfactoren zoals pH-, zout- en zuurstofgehalte, licht, oppervlakteruwheid en biologische factoren worden niet in rekening gebracht in het model, maar er wordt verondersteld dat ze de groei niet hinderen. Dit heeft als gevolg dat de verkregen kiemtijden lager kunnen zijn dan in de werkelijkheid te verwachten is, waardoor de verkregen waarden aan de veilige kant zijn.
- Specifieke materialen worden door het model niet rechtstreeks behandeld maar er wordt gewerkt met substraatklassen. Indien er hierover onzekerheid is wordt er aangeraden om de strengere klasse te nemen.
- De vochtopslag curve welke gebruikt wordt voor de schimmels is eigenlijk gebaseerd op bacteria en werd licht aangepast. Validatie door Sedlbauer [18] toonde aan dat dit een verwaarloosbaar effect had op de diffusieweerstand gebruikt in het model.

Ook dient er aandacht besteed te worden aan de klimaatdata gebruikt door het model: onderzoek door Krus [32] toonde aan dat het buffereffect van materialen het risico op schimmelgroei drastisch kan verlagen. Het is dan ook af te raden met gemiddelde dagwaardes voor het binnenklimaat te werken omdat deze te ver kunnen staan van de werkelijkheid die grotere variaties kent.

5. Detailstudies.

Binnen het literatuuronderzoek zijn er meer gedetailleerde studies gebeurd naar het vochtgedrag van metselwerk, scheuren in metselwerk en hydrofoberingen. Deze 3 zijn relevant om meerdere redenen: niet alleen zijn ze alle 3 concrete voorbeelden die in de praktijk veel voorkomen, ze zijn ook erg geschikt om het simulatiepakket WUFI tegen af te wegen. Het vochtgedrag van metselwerk is essentieel twee dimensionaal door de complexe interactie van de bakstenen en de mortel. De invloed die scheuren hebben op het vochtgedrag van gemetste wanden is hierop een interessante aanvulling omdat ze zowel ingrijpen op dit meerdimensionaal karakter alsook erg geschikt zijn om de gevoeligheid van de berekeningssoftware te testen. De studie naar hydrofoberingen is interessant omdat ze zowel onderwerp is van veel hedendaags onderzoek, en ze is, net zoals de scheuren in metselwerk, interessant omdat ze toelaat de gevoeligheid en limieten van de simulatiesoftware te onderzoeken.

5.1. Vochtgedrag in poreuze materialen: metselwerk als detailstudie.

Baksteen is een keramische verbinding die gevormd wordt door klei of kleiachtige materialen samen met eventuele toevoegstoffen, zoals zand, op voldoende hoge temperatuur te verhitten. Baksteen is ook een poreus materiaal, waarbij de porositeit bepalend is voor de totale hoeveelheid water die kan opgenomen worden en voor de hechting tussen de baksteen en de mortel.

Mortel wordt samengesteld uit cement, water, hulpstoffen en kleine granulaten, zoals bvb zand, en is het bindmiddel van het metselwerk dat de stenen hecht en de lasten verdeelt. Algemeen kan gesteld worden dat de mortelvoegen het zwakste punt vormen van de constructie naar waterinfiltratie en dat de porositeit van het metselwerk van minder belang is. Het effect dat de voeg kan hebben door vb. imperfecties zal dus een grotere rol spelen op de waterinfiltratie dan de porositeit van de baksteen of de mortelvoegen. [33].

Metselwerk bestaat uit de combinatie van baksteen met mortel, 2 poreuze materialen met elk aparte eigenschappen. Het feit dat ze beide verschillende eigenschappen hebben maakt dat metselwerk een interessant onderzoeksonderwerp is: het gaat hier om een essentieel 2 dimensionaal probleem waarbij een raakvlak optreedt tussen 2 materialen en waarbij verschillende fouten kunnen optreden, zoals bvb haarscheuren, die het vochtgedrag en de doorlatendheid van de constructie erg kunnen beïnvloeden.

5.1.1. Vochtgedrag van metselwerk.

In homogene materialen in contact met vloeibaar water neemt de hoeveelheid geabsorbeerd water toe proportioneel aan de vierkantswortel van de tijd. Dit wordt uitgedrukt door de water absorptie coëfficiënt A of de vloeibare transport coëfficiënt D_w . In metselwerk zal echter enkel lokaal deze wet

werken, de waterabsorptie van de muur als geheel hangt vooral af van de zuiging tussen de materialen onderling en van de imperfectie van de oppervlakken[34].

Bij het modelleren van metselwerk is het dan ook belangrijk om én correcte materiaaleigenschappen te gebruiken én op een correcte manier om te gaan met de invloed van de raakvlakken tussen de materialen onderling.

5.1.1.1. *Imperfect hydraulisch contact.*

Roels [35] stelt dat er 4 soorten contact bestaan tussen 2 materialen: 1. een perfect hydraulisch contact met continuïteit over de grenzen, 2. een luchtlaag tussen de materialen, 3. een natuurlijk contact, zonder indringing van elkaars poriënstructuur, en 4. een reëel contact, waarbij indringing van elkaars poriënstructuur optreedt.

Brocken [36] stelt dat er in de werkelijkheid een grenspermeabiliteit optreedt tussen 2 materialen die in imperfect hydraulisch contact met elkaar zijn. Deze permeabiliteit kan voortkomen uit een kleine opening gevuld door lucht die tussen beide materialen aanwezig is, of door een discontinuïteit van de poriënsystemen tussen beide materialen en zorgt voor een sprong in de capillaire druk over de materialengrens.

Als gevolg van deze overgang zal de relatie tussen beide watergehaltes niet uniek zijn, maar afhangen van de richting van het transport en de capillaire drukken in beide materialen. Kleine verschillen in de capillaire druk kunnen hierdoor zorgen voor grote verschillen in het vochtgehalte van de materialen.

Experimenten door Brocken[36] naar baksteen-baksteen grenzen tonen aan dat dit ook een invloed heeft op de absorptie en droging van de materialen. Bij waterabsorptie lijkt er geen grens te bestaan tussen beide materialen, bij droging is er een dip merkbaar in het watergehalte aan het raakvlak.

Onderzoek naar baksteen-mortel grenzen toonde aan er geen eenduidige manier was om de werking van deze grens te definiëren volgens perfect of imperfect hydraulisch contact. Verdere simulaties en onderzoek toonden aan dat de vochttransportparameters van de mortelvoegen erg varieerden en dominant waren voor de reactie van de grens. Om praktisch toch deze grenzen te simuleren stelt Brocken [36] voor te werken met een overgangsweerstand tussen baksteen en mortel die bepaald kan worden door de gradiënt van het vochtprofiel aan de materiaalgrens te delen door de vochtflux over die grens.

Derluyn et al [37] voeren een weerstandswaarde voor imperfect contact in onder de vorm

$$g_{IF} = \frac{1}{R_{IF}} \cdot \Delta p_c$$

Met

g_{IF} de waterstroom over de interface.

Δp_c de sprong in capillaire druk.

R_{IF} de weerstandswaarde.

5.1.1.2. *Eigenschappen van mortel in metselwerk.*

De mortelvoegen zijn, zoals hierboven bleek, van groot belang in de modellering van het vochttransport in metselwerk: niet alleen gaan ze in de horizontale richting voor vocht toestroom zorgen in de gevel, ook kunnen ze voor een extra vocht toestroom naar de bakstenen in de verticale richting zorgen.

Een belangrijk fenomeen dat optreedt bij het metselen is de waterabsorptie door de steen uit de mortel: als gevolg hiervan zakt het watergehalte van de mortel, worden de vaste deeltjes samengedrukt en worden kleine mortelpartikels naar de grens mortel-baksteen gebracht. Eens een bepaalde hoeveelheid water geabsorbeerd is door de steen zal de toename aan weerstand aan de grenzen de waterstroom afremmen[36] [37].

De eigenschappen van de mortel worden dus grotendeels bepaald door applicatie, maar ook door zijn samenstelling. De cementpasta en de holle ruimtes kunnen water bevatten, terwijl de zandpartikels dit niet kunnen [36], zo zal een mortel met hoog cementgehalte wel de porositeit doen dalen, maar het hygroscopisch vochtgehalte en de zuiging zullen toenemen door de vele microporiën aanwezig in de cementpasta.

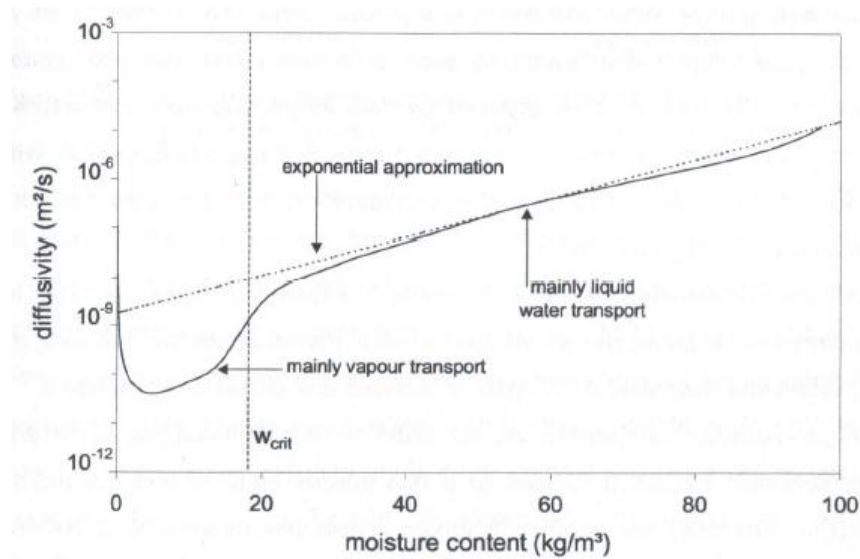
Onderzoek door Derluyn et al [37] naar de invloed van het vochtgehalte van de stenen tijdens het metselen op de wateropname door de voegen toonde aan dat mortel geplaatst tussen ovdroge stenen een imperfecter contact heeft dan mortel geplaatst tussen bevochtigde stenen door de grotere stroom die voor een lagere water/cement factor zorgt en zo voor een sterkere pakking, die resulteert in een grotere grensweerstand tussen steen en mortel.

5.1.1.3. *Eigenschappen van steen in metselwerk.*

Onderzoek op zandstenen door Roels [35] [38] stelt dat vochttransport in stenen op microschaal beïnvloed wordt door de complexe poriënstructuur: kleine scheuren, of doorlopende microporiën kunnen een grote invloed hebben op de doorlatendheid van de steen. Preferentiële stroming kan ook optreden op macroschaal in schijnbaar homogene poreuze materialen onder de vorm van stroming in sterk doorlatende lagen of herverdeling in de buurt van niet permeabele lagen.

Vaak wordt om het vochttransport over poreuze materialen te benaderen gewerkt met een diffusiviteitsaanpak, waarbij de diffusiviteit, of totale doorlatendheid, ten opzichte van het watergehalte verder vereenvoudigd wordt door ze te benaderen met een exponentiële functie. Roels toont echter aan dat dit niet geheel correct is: bij lage vochtgehaltes is er een sterke niet-lineariteit van de diffusiviteitscurve. Dit wordt veroorzaakt door de wijze waarop vocht in poreuze materialen wordt getransporteerd: initieel treedt er damptransport op in de open poriën. Eenmaal de fijne poriën gevuld zijn met vloeibaar water, zal het vochttransport enkel nog door de grotere poriën gebeuren door damptransport: doordat de grotere poriën de kleinere doorsnijden wordt de capillaire geleiding in de kleinere poriën onderbroken, wat leidt tot een daling van de totale diffusiviteit. Bij stijgend vochtgehalte worden ook de grotere poriën gevuld met vloeibaar water, waardoor de

capillaire conductie door het materiaal kan starten, wat veel efficiënter is, en de totale diffusiviteit weer stijgt.



Figuur 11: diffusiviteitscurve en haar exponentiële benadering, bron: [35].

Künzel en Holm [35] hebben hierom verschillende exponentiële functies geïntroduceerd voor de verschillende transportprocessen, maar dit blijkt problematisch als er meerdere transportprocessen tegelijk optreden[35]. De corresponderende vochtprofielen zijn hierdoor in principe vereenvoudigingen van de werkelijkheid, die voor de studie van vocht op korte termijn grote verschillen kunnen introduceren: de overschatting van de diffusiviteit bij lagere vochtgehaltes zal er voor zorgen dat er een te grote instroom is bij het vochttransport.

5.1.2. WUFI.

Binnen WUFI kan er op verschillende manieren omgegaan worden met metselwerk: er kan gewerkt worden volgens een continuüaanpak waarbij de gehele sectie gemodelleerd wordt als een homogeen materiaal met aangepaste eigenschappen, of de imperfectie van de raakvlakken kan nagebootst worden door een aangepaste weerstand. Krus en Holm [39] brengen dit in rekening door ter hoogte van het raakvlak mortel – baksteen een 1 mm hoge mortelvoeg te modelleren die een vermindering met factor 200 heeft in haar capillair transportcoëfficiënten.

Ook kunnen de voegen fysisch gemodelleerd worden, waardoor er een accurater beeld gevormd kan worden van de doorlatendheid ter hoogte van de voegen [34] [40].

Künzel [6] geeft aan in verband met de invloed van de raakvlakken dat de correcte bepaling van de vochttopslag functies enkel nodig is bij materialen die in direct capillair contact met elkaar staan, voor andere materialen mag er vereenvoudigd worden. In WUFI wordt dan ook een vereenvoudigde formule gebruikt voor de vochttopslagfunctie die een aangepaste formule is van de BET theorie:

BET theorie:

$$w = w_m \cdot \frac{1}{1 - \varphi}$$

Deze formule geeft bij een relatieve vochtigheid 100 procent echter een watergehalte van oneindig.

Vereenvoudigd wordt dit:

$$w = w_f \cdot \frac{(b - 1)\varphi}{b - \varphi}$$

Waarbij

w [kg/m³] het evenwichtsvocht gehalte.

w_m [kg/m³] het watergehalte van een monomoleculaire laag op het binnenoppervlak.

w_f [kg/m³] het vrije waterverzadigingsgehalte.

b [-] een benaderingscoëfficiënt.

φ [-] de relatieve vochtigheid.

De factor b kan bepaald worden uit het evenwichtsvochtgehalte bij 80 procent relatieve vochtigheid.

De formule van het vloeibaar capillair transport in poreuze materialen is vereenvoudigd:

$$g_w = -D_\varphi \nabla \varphi$$

Met

g_w [kg/m²s] de vloeibare flux densiteit.

D_φ [kg/ms] de vloeibare geleidingscoëfficiënt.

φ [-] de relatieve vochtigheid.

En

$$D_\varphi = D_w \cdot \frac{dw}{d\varphi}$$

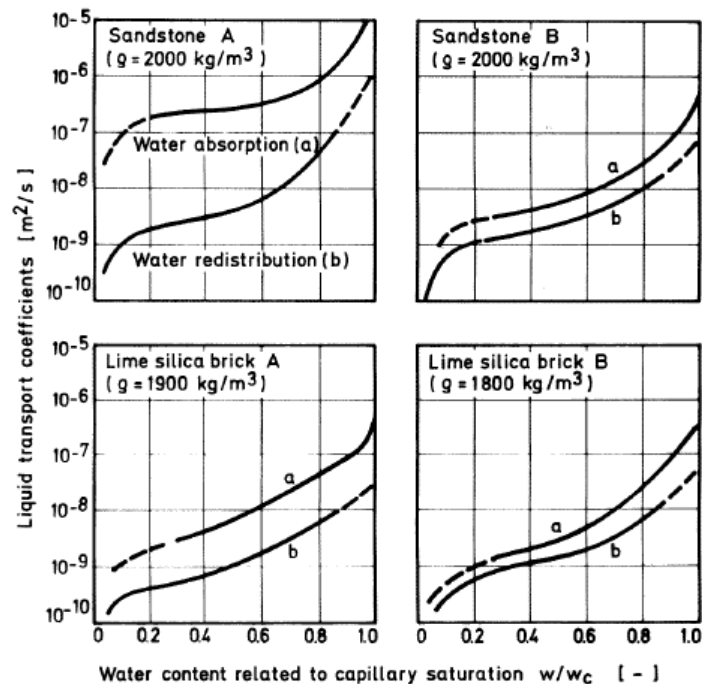
Met

D_w [m²/s] de capillaire transportcoëfficiënt.

$dw/d\varphi$ [kg/m³] de afgeleide van de vochttopslag functie.

Künzel [6] geeft echter zelf aan dat dit een voorwaardelijk model is waarvoor de hysteresis effecten in de vochttopslagfuncties verwaarloosd worden. Ook wordt D_φ gekoppeld aan D_w waarbij er geen rekening wordt gehouden met het verschil in D_w tussen de waterabsorptie en de waterherverdeling in het materiaal. Dit effect vergroot nog bij materialen met grote poriën omdat bij hen het verschil tussen de absorptie en herverdelingscurve groter is dan bij materialen met kleine poriën. Ook zal er in de werkelijkheid in de poriën de meniscus, nadat de volledige hoeveelheid water is opgezogen, zich tegengesteld krommen waardoor lokaal de capillaire zuigkracht stijgt en de relatieve vochtigheid daalt aan het raakvlak, waardoor er een

vertraging optreedt in het bereik van het evenwichtsvochtgehalte en een lokale daling in het watergehalte zichtbaar is [36].



Figuur 12: capillaire transportcoëfficiënt D_w voor verschillende materialen in functie van het watergehalte, bron: [36].

Künzel [6] geeft ook nog aan dat er in WUFI geen rekening wordt gehouden met het nazuigingseffect dat optreedt door de langzame vervanging van luchtmoleculen door watermoleculen bij capillair actieve materialen die in contact staan met water. Door dit effect kunnen deze materialen meer vocht opnemen dan overeenkomt met hun vrije verzadigingswatergehalte. In een proefopstelling waarbij het gedrag van een baksteen werd onderzocht was er een verschil van 25 kg/m^3 na 120 dagen tussen de gemeten en voorspelde waarden, wat neerkomt op een verschil van 15 procent van het totale watergehalte.

Ook wordt er slechts in beperkte mate rekening gehouden met de lokale anisotropie van de materialen, zoals aangetoond door Künzel [6]. Het is in WUFI 2D enkel mogelijk om de x of y richting andere eigenschappen te geven, met preferentiële paden en dergelijke kan daardoor slechts in beperkte mate rekening worden gehouden.

Vanwege deze vereenvoudigingen is voorzichtigheid geboden bij het gebruiken van WUFI om onderzoek te doen naar de vochtverdeling in baksteen, voegen en de invloed van interfaces op het vochtgedrag, en vooral als de korte termijn wordt beoogd (het nazuigingseffect trad op na 50 dagen).

5.2. De invloed van scheuren.

Scheuren doen zich het vaakst voor in het zwakste punt van de constructie, namelijk de verbinding tussen de bakstenen en de mortel. Door bijvoorbeeld het krimpen van de mortel of door een slecht contact, vb. door uitvoering, tussen de baksteen en de mortel kunnen scheuren optreden. Ook het gebruik van sterk absorberende stenen kan dit veroorzaken: door de sterke absorptie wordt veel water uit de mortel gezogen wat tot een slecht contact leidt tussen mortel en steen. Scheuren hoeven ook niet beperkt te zijn tot een lokaal effect: ze kunnen doorlopen langs meerdere baksteen-mortel grenzen en zo voor aanzienlijke lekken zorgen in een constructie.

Ook de oriëntatie van de scheuren is van belang: horizontale scheuren gaan voor meer instroom zorgen door regen omdat water over de volledige lengte kan instromen, terwijl dit voor verticale scheuren slechts over de breedte is[41].

Simulaties uitgevoerd door Poupeleer et al [42] tonen aan dat vooral convectie de drijvende kracht is bij damptransport in scheuren. Hierbij gaan verticale scheuren een grotere impact van de convectie ondervinden, waarbij bij toenemende hoogte een rotationele convectiestroom zal optreden.

Naast dit transport door convectie treden er nog andere vochttransport processen op in een scheur: diffusie in de richting van de scheur en diffusie loodrecht op de scheur naar de omliggende baksteen of mortelvoeg[42]. Het belangrijkste transportmechanisme in poreuze materialen, capillaire zuiging, wordt over de scheur gehinderd in de gas gevulde zone. Stroming over de vochtgevulde zone van de scheur ondervindt geen hinder hiervan [43].

Roels [44] onderzocht de vochtopname in scheuren in contact met vloeibaar water: ter plaatse van de scheur, met breedte 0,1 mm, bereikt het water snel de andere zijde van het staal, waardoor er over de lengte van de scheur lokaal een extra vochtbron kan optreden voor de omliggende matrix. Bij kleinere scheuren, in de proef 0,01 mm, stagneert het waterfront in de scheur en loopt het vochtprofiel in de matrix voor op dat in de scheur. Dit gebeurt doordat de matrix het water instromend in de scheur opneemt, en de capillaire zuiging in de scheur zelf niet sterk genoeg is om dit te compenseren. Hieruit volgt dat de stijghoogte van het waterfront in de scheur sterk gerelateerd is aan de waterabsorptiecoëfficiënt en de instroom capaciteit van de scheur.

5.2.1. WUFI.

Alfaiate [43] stelt algemeen dat de invloed van scheuren gesimuleerd kan worden door ze expliciet te modelleren, wat lokaal een erg fijn grid nodig maakt, of door een sterke discontinuïteitaanpak, waarbij de scheuren als interne grenzen worden voorgesteld.

Roels[35] voegt hier methodes aan toe: de scheuren zouden kunnen in rekening gebracht worden door uit te gaan van een continuïteitsaanpak, waarbij de scheuren als deel van de porositeit worden verondersteld. Ook zou er lokaal kunnen gewerkt worden met andere porositeiten.

Krus en Künzl [45] onderzochten de invloed van scheuren en imperfecties op hydrofoberingen. Hierbij simuleerden ze de scheuren door ter hoogte van de mortelvoeg geen hydrofobering aan te brengen en de omliggende stenen een hogere waterabsorptiecoëfficiënt te geven. Hiermee

simuleerden ze het effect dat scheuren preferentiële paden zijn waarlangs de omliggende stenen extra water kunnen opnemen.

Ook zou er kunnen gewerkt worden met een extra bronterm die de extra vochtopname door de scheur kan voorstellen.

Een ander probleem om een correcte invloed van scheuren te kunnen beschouwen is dat er in WUFI geen convectieve stromingen werden opgenomen, waardoor het effect beschreven door Poupeleer et al [42] niet in rekening kan worden gebracht. Opgemerkt dient te worden dat vloeibaar watertransport een grotere impact heeft op de invloed van scheuren dan convectie. Uit een fysisch standpunt is het een effect dat optreedt in de scheuren tijdens het damptransport, de tekst van Poupeleer biedt echter geen getallen die uitsluitsel geven over de impact gedurende een langere tijdsperiode.

Een tweede vereenvoudiging ligt in het beperkt aantal dimensies van het programma: WUFI laat slechts toe om in 2D te werken, terwijl hier eigenlijk 3D processen optreden: de kleine breedte van de scheur is enerzijds erg lokaal, anderzijds gaat ze invloed hebben op de naastliggende stenen en op de bovenliggende stenen. Om hieraan te verhelpen zou wel kunnen bepaald worden wat de extra instroom door de scheur is, en deze dan relatief tot de gescheurde oppervlakte in rekening brengen.

5.3. Hydrofoberingen.

Hydrofoberingen of waterwerende oppervlaktebehandelingen hebben als bedoeling om oppervlakken waterwerend te maken, waardoor deze een lagere vochtopname hebben bij blootstelling aan gelijke vochtbelasting. Voorbeelden zijn het waterwerend maken van de gevels van oude herenhuizen, om zo door de daaropvolgende uitdroging een hogere thermische weerstand aan de muren te geven, of om de waterabsorptie van gevels te verminderen, om zo het risico op vorstschade te doen dalen binnen welbepaalde gevallen.

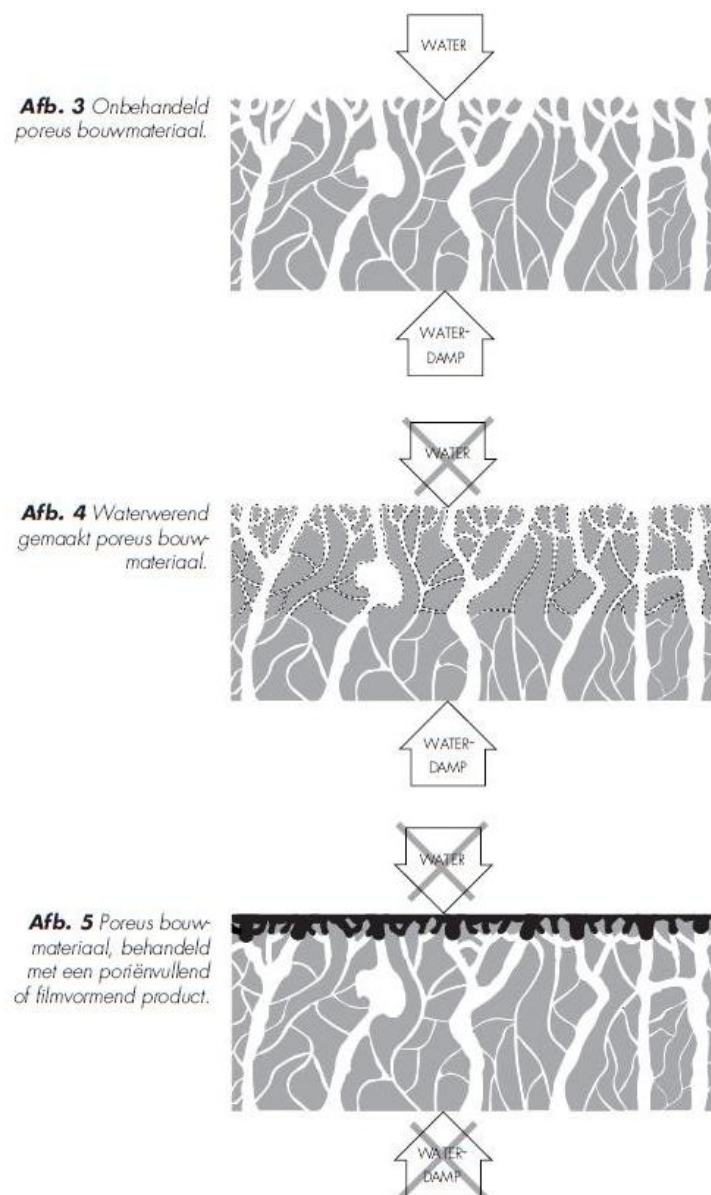
Hiervoor worden waterwerende middelen, of hydrofugen, gebruikt: kleurloze producten die bij de behandeling van gevels gebruikt worden om poreuze materialen waterwerend te maken zonder hun uitzicht of hun waterdampkarakteristieken gevoelig te wijzigen[46]. Deze definitie is erg strikt: middelen die de poriën afsluiten of filmvormend zijn worden uitgesloten. Dit is ook noodzakelijk: primair doel is de capillaire waterabsorptie sterk te verhinderen, terwijl de droging door waterdampdiffusie nog mogelijk blijft. Droging door diffusie is echter ten opzichte van droging door convectie vanaf het oppervlak een langzaam proces waarbij ook de poriënkarakteristieken een rol spelen: hoe fijner de poriën, hoe trager het materiaal droogt, ook de connectiviteit van de poriën speelt hierin een rol[46].

De tegenstrijdige eisen die aan een hydrofobeermiddel gesteld worden, worden vervuld door de oppervlaktespanning van de steenachtige bouwmaterialen te verlagen: door afzetting van een uiterst dun laagje dat indringt over een beperkte diepte, waarbij de vrije doorsnede van de poriën nauwelijks wijzigt, dat hydrofobe eigenschappen vertoont. Dit laagje, bestaande uit silanen of siloxanen, zorgt op het oppervlak, in de poriën en in de haarbuisjes voor een verlaging van de

oppervlaktespanning tot waarden die lager liggen dan die van water, waardoor een parelend gedrag optreedt in plaats van een uitspreidingsgedrag wat bij hydrofiele materialen optreedt. Door het parelende gedrag zal de contacthoek tussen water en materiaal van die aard worden dat vochtopname verhindert wordt: de capillaire zuigkracht wordt negatief.

Het verschil tussen silanen en siloxanen wordt gemaakt op basis van de graad van polymerisatie waarin deze hydrofobeermiddelen zich bevinden wanneer ze worden aangebracht op het oppervlak. In het poreus materiaal zal deze polymerisatie verder verlopen en kan je dit onderscheid dus niet langer maken. Het onderscheid heeft wel een invloed op de toepassingen waarvoor een bepaald middel geschikt is: een silaan zal bvb. interessanter zijn voor een materiaal met heel fijne poriën dan een siliconen hars.

Doordat er zich op de randen van de poriën een dun laagje afzet dat hydrofoob is blijft het materiaal dampopen, de poriën worden immers niet afgesloten.



Figuur 13: werking van hydrofobeermiddelen: vergelijking met onbehandeld materiaal en poriënafsluitend middel, bron [46].

De indringingsdiepte van het waterwerend middel kan gaan van enkele honderdsten van een millimeter, zoals voor bvb. beton, tot enkele centimeters, afhankelijk van de eigenschappen van de poriën van het behandelde materiaal. Technisch voorlichting 224 van het WTCB geeft aan dat voor de meeste poreuze gevelmaterialen zoals baksteen en mortel de indringingsdiepte 1-5 mm bedraagt.

Technische voorlichting 224 definieert ook prestatieklassen voor de waterwerende middelen: enerzijds klassen naar initiële doeltreffendheid en duurzaamheid, anderzijds criteria voor de nevenverschijnselen die kunnen optreden.

De klassen voor initiële doeltreffendheid en duurzaamheid zijn:

- Door meting van de waterabsorptie onder lage druk

Klasse	Berekende doeltreffendheid
A	Doeltreff. $\geq 95\%$
B	$85\% \leq \text{doeltreff.} \leq 95\%$
C	$75\% \leq \text{doeltreff.} \leq 85\%$
D	Doeltreff. $\leq 75\%$

- Door meting van de capillaire waterabsorptie:

Klasse	Relatieve Absorptie
A	Abs. $\leq 5\%$
B1	Abs. $< 5\%$ (eerste 60 minuten) $5\% > \text{abs.} < 15\%$ (nadien)
B2	$5\% < \text{abs.} < 15\%$
C	$15\% < \text{abs.} < 25\%$
D	Abs. $> 25\%$

De criteria voor de voor ons relevante nevenverschijnselen zijn:

Waterdampdoorlatendheid		Droogsnelheid	
Klasse	Vermindering van de diffusie	Klasse	Verhouding van de verdamping voor en na behandeling
A	Vermindering $< 10\%$	A	$> 90\%$
B	$10\% < \text{vermindering} < 20\%$	B	$60\% < \dots < 90\%$
C	$20\% < \text{vermindering} < 40\%$	C	$30\% < \dots < 60\%$
D	Vermindering $> 40\%$	D	$< 30\%$

Proeven uitgevoerd door het WTCB [46] toonden aan dat een behandeling met een gewoon waterwerend middel op basis van silanen of siloxanen (beide klasse A) de waterdampdiffusie karakteristiek met minder dan 10% doen dalen. Ook bleek een te diepe waterwerende behandeling de vocht migratie in vloeibare vorm uit het materiaal naar het oppervlak

ernstig te hinderen, er is geen vochtmigration naar het oppervlak meer mogelijk, waardoor de verdampingsmogelijkheden met meer dan 90% kunnen verminderen. Het vochtfront ligt bij deze te diep geïmpregneerde materialen dieper, waardoor over de afstand tussen het oppervlak en het vochtfront enkel diffusie mogelijk is. De diepte waarover watertransport niet meer kan en diffusie de enige andere optie is, is dus cruciaal.

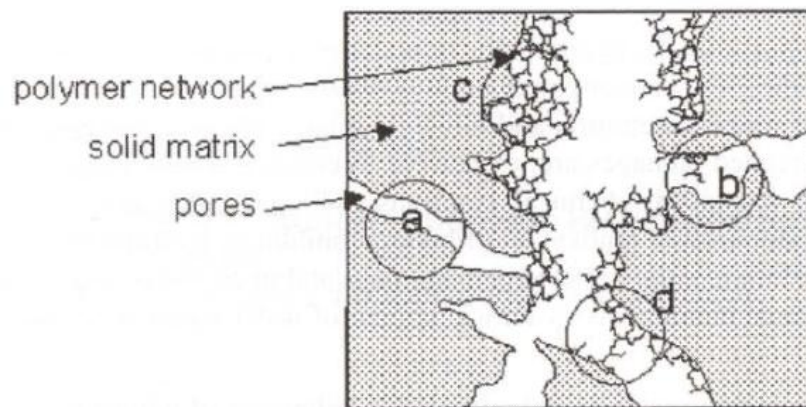
Het verlaagd drooggedrag heeft ook gevolgen voor de toepasbaarheid van waterwerende middelen: bij gevels die lijden aan waterinfiltratie door lekken of door bvb opstijgend vocht kan een verergering van de schade optreden doordat de droogsnelheid van de gevel aanzienlijk aangetast kan worden. Ook gevels met scheuren zijn hieraan gevoelig: de scheur zal door haar grootte niet of slechts gedeeltelijk bedekt worden met het waterwerende middel, waarna ze door haar functie als preferentieel pad aanzienlijke hoeveelheden vocht achter de gehydrofobeerde laag kan brengen dat vervolgens maar zeer langzaam kan uitdrogen. Over de scheurbreedte waarbij dit kan gebeuren bestaat geen consensus[47][48]. Opgemerkt dient ook te worden dat de vochtbelasting van een scheur in een gehydrofobeerde wand groter is dan die in een niet gehydrofobeerde: door de waterwerende werking van het omringende oppervlak wordt het deel van de vochtbelasting dat anders zou opgenomen worden door de buitenste laag van de wand afgestoten, waarna het in de scheur zou kunnen binnendringen.

Aandacht dient ook besteed te worden aan de volledige behandeling van de gevel om te vermijden dat flankerende niet behandelde zones zorgen voor watertoevoer. Ook erg vorstgevoelige materialen worden beter niet behandeld met een hydrofobering vanwege de vertraagde droogsnelheid[46].

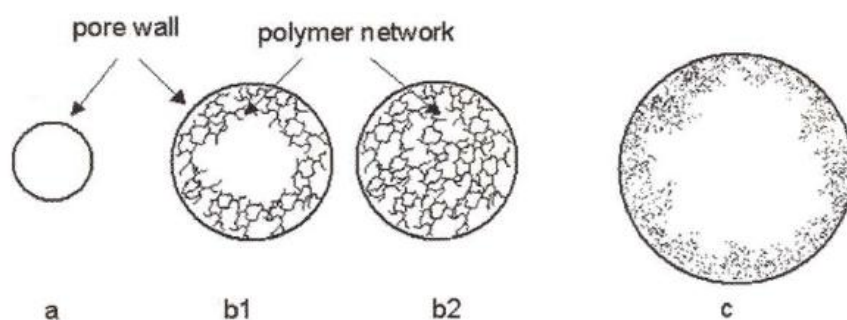
Carmeliet et al [49] deden onderzoek naar hoe regendruppels zich op een gehydrofobeerde muur gedragen. Dit onderzoek wees uit dat regendruppels die zich op een hydrofoob oppervlak bevinden met een contacthoek groter dan 90 graden de neiging hebben om zich gedurende een korte tijd uit te spreiden en zo een waterfilm te vormen. Via deze film kan dan wateropname en penetratie in scheuren plaats vinden. Een goed waterwerend middel kan hier op ingrijpen door parelvorming en afloop van water te promoten, en de capillaire werking genoeg te reduceren. Opgemerkt dient te worden dat parelvorming en waterafloop een groter vochtbelasting voor eventuele scheuren kan opleveren en dat onder invloed van UV straling de hydrofoberingslaag aan het directe oppervlak, verantwoordelijk voor het parelend effect, na verloop van tijd afbreekt.

Onderzoek [47] [48] [49] naar de invloed van de poriëngrootte op het verloop van de polymerisatie van het waterwerend middel bracht aan het licht dat bij materialen met een poriënsysteem kleiner dan de ketenlengtes die gevormd worden slechts een gedeeltelijke bedekking van de poriën optreedt. Door het statistische karakter van het polymerisatieproces is de overgang tussen behandelde en niet behandelde poriën niet abrupt, maar verdeeld over verschillende poriëngroottes. Toch kunnen materialen met erg fijne poriënsystemen grote percentages onbehandelde of slechts gedeeltelijk behandelde poriën bevatten. Bij vergelijking tussen een baksteen en een stuk calciumsilicaat bleek de baksteen door zijn groter poriënsysteem een reductie in de capillaire absorptie coëfficiënt te hebben van factor 2903, terwijl het calciumsilicaat, met haar fijnere poriënsysteem, slechts een reductie met factor 33 had. Aangeraden wordt om een waterwerend middel te gebruiken waarvan de ketenlengtes kleiner zijn dan de grootte van de verbindende gemiddelde poriën.

Een experiment naar de dampdiffusieweerstandsverhoging gaf voor de baksteen een verhoging met factor 2, voor het calciumsilicaat een factor 6. Hierbij bleek vooral het verstopping van poriën door de polymeernetwerken bepalend te zijn. Ook bleek er in gehydrofobeerde materialen nog altijd capillaire condensatie op te treden, maar met lagere vochtgehaltes, waardoor er lokaal eilandjes van vocht kunnen ontstaan tussen de polymeerketens, wat ook de dampweerstand verhoogt. Hieruit volgt volgens Carmeliet dat de werking van een ideaal hydrofoberingsmiddel een combinatie is van 4 eisen: 1. capillaire condensatie, capillaire zuiging en vloeibaar water transport moeten in de grote poriën gestopt worden, 2. in de fijne poriën moeten deze echter wel nog optreden, om zo de onverzadigde permeabiliteit van het materiaal te verbeteren, waardoor de uitdroging van het materiaal verbetert, 3. het middel moet zorgen voor een trage druppelspreiding, en de afloop bevorderen, 4. ook moet het verstopping van de poriën worden verhinderd, aangezien dit de waterdampweerstand sterk doet stijgen.



Figuur 14: schematische representatie van een polymeernetwerk in de poriënstructuur. a. Geen verstopping van de kleinere poriën. b. Gedeeltelijke verstopping in de middelgrote poriën. c. Volledig afdichting in de bredere poriën. d. Verstopping in een verbindende porie., bron: tekst [47].



Figuur 15: verschillende effecten van de ontwikkeling van een polymeer netwerk op de poriëndiameter. a. Fijne poriën vertonen geen vernauwing. b. Middelgrote poriën kunnen ofwel deels gevuld worden (b1) ofwel volledig gevuld worden (b2). c. In de bredere poriën heeft het polymeernetwerk een constante breedte die resulteert in afnemende vernauwing bij stijgende poriënbreedte, bron: [47].

Zoals eerder aangegeven zal ook in scheuren een polymeerlaag gevormd worden. Het waterdamptransport door deze scheur zal zorgen voor vorming van waterdruppels op de wanden. Door de grote breedte van de scheur t.o.v. de poriën zal hier meer en sneller waterdamp transfer optreden, waardoor de druppels zich snel kunnen vormen en samensmelten. Hierdoor ontstaat een watergevulde scheur die eens ze doorbreekt naar het niet behandelde materiaal voor een capillair transport zal zorgen, wat veel efficiënter is dan de tegenwerkende droging door dampdiffusie.

5.3.1. WUFI.

Hydrofoberingslagen kunnen in WUFI op een paar manieren gemodelleerd worden. Sterk vereenvoudigd kan de waterabsorptiefactor uitgeschakeld worden, zoals in [50], dit gaat echter uit van een ideale situatie: de absorptie wordt nul, en de dampdiffusie blijft ongehinderd, wat in de werkelijkheid niet het geval is.

Een andere optie is om het geïmpregneerde stuk van het materiaal als aparte laag te modelleren, gezien de indringdiepte in de buurt van de 1-5 mm is, met aparte eigenschappen die overeenstemmen met waarden gehaald uit proeven. Simulaties door Krus et al [45] werden op deze wijze uitgevoerd waarbij er uitgegaan werd van een indringingsdiepte van 2 cm, een verhoging van de dampdiffusieweerstand met 50 procent, en geen waterabsorptie.

De hydrofobering zou ook kunnen voorgesteld worden als een extra onafhankelijke laag met geringe dikte die door haar karakteristieken ervoor zorgt dat het water afgevoerd wordt, dus waterabsorptie nul, maar wel nog diffusie toelaat. Bij simulaties door Künzle en Kießl [51] werd met behulp van proeven de extra diffusie weerstand bepaald, deze was 0,2m voor een siloxaan impregnatie. De daaropvolgende simulaties vertoonden een goede overeenkomst met de proeven. Ook bleek dat kleine scheuren tot 1 mm breed de bescherming niet beïnvloedden indien ze voldoende geïmpregneerd zijn.

6. Onderzoeksvraag.

De detailstudies onderzocht in dit literatuuronderzoek blijken interessante insteken te zijn op het masterproefonderwerp: niet alleen laten ze toe om 2 dimensionaal WUFI te testen, ook handelen ze over hedendaagse onderzoeksonderwerpen.

De studie over metselwerk is interessant omdat ze enkele pijnpunten binnen WUFI aan het licht brengt en zo toelaat de software te evalueren ten opzichte van de realiteit.

Scheuren in metselwerk worden hierbij interessant omdat ze, net zoals metselwerk, de grenzen van de software opzoeken, maar ook omdat ze een meerdimensionaal probleem zijn. Proeven zullen hierbij toelaten om de invloed van scheuren, nazuiging, grensweerstand en zijdelingse bevochtiging van de materialen op elkaar correct te kwantificeren en verdere verfijning van het gebruik van de WUFI software mogelijk maken door te helpen de invloed van deze parameters te bepalen.

Hydrofoberingen zijn om dezelfde redenen interessant: het specifieke karakter van waterwerende middelen is voor een gevoeligheidsanalyse van de software zeker interessant.

Het verdere verloop van de masterproef is dan ook gericht op deze detailstudies, en de invloed van parameters en dergelijke hierin, om zo het onderzoek naar het vochtgedrag van metselwerk aan de hand van numerieke simulaties verder te kunnen zetten.

B. Experimenteel onderzoek en simulaties.

7. Inleiding.

Het experimenteel onderzoek is uitgewerkt in verschillende delen die elk een problematiek uit de onderzoeksvraag aansnijden. Een eerste deel gaat over het verschil tussen de oplossingen van WUFI 1D en 2D, en hoe te verifiëren dat beide oplossingen elkaar bevestigen.

Een tweede deel behandelt de simulatie en het experiment waarbij de waterabsorptie van baksteen, mortel en baksteengehelen bepaalt en gebruikt werden voor een validatie van WUFI, met name in de periode van de korte duur waar de hiervoor besproken fenomenen van grensweerstand, nazuiging en scheuren het sterkst optreden. Voor de bepaling van de waterabsorpties werd een proefcampagne opgezet, deze wordt hier ook besproken en geanalyseerd waarna een vergelijking met de resultaten uit WUFI plaatsvindt. Aansluitend hierbij worden ook de relevante normen en proefmethodes kort besproken.

Deel drie behandelt de modellering en simulatie van hydrofoberingen, grensweerstand, nazuiging en scheuren in metselwerk aan de hand van een case die dieper ingaat op de vorstbestendigheid van een gehydrofobeerde wand. Hierbij wordt beroep gedaan op de literatuur om een zo correct mogelijke simulatie te verkrijgen.

De bedoeling van dit 2^e deel van de masterproef is dus enerzijds de validatie van WUFI voor het gedrag van metselwerk bij korte en lange termijn bevochtiging en anderzijds modelleringstechnieken aan te reiken voor de simulatie van hydrofoberingen, scheuren, grensweerstand, nazuiging en scheuren.

8. Validatie WUFI.

8.1. WUFI 1D – WUFI 2D.

Als eerste punt van validatie werd de overeenkomst in resultaat van WUFI 1D met 2D geverifieerd. Een eerste problematiek die daarbij optreedt is natuurlijk de beperkte dimensionaliteit van WUFI 1D. Om hieraan te verhelpen werden in WUFI 2D enkel cases gemaakt die uitgaan van 1D transport: om dit te bereiken werden adiabatistische grenzen toegevoegd in de y-richting van de te onderzoeken componenten. Omdat een adiabatistische grens uitgaat van een exacte voortzetting van de condities aan de adiabatistische grens kan er dus geen enkele vocht of warmte uitwisseling over deze grens plaatsvinden. Dit gecombineerd met het feit dat WUFI geen gravitaire stromingen in rekening brengt, zorgt ervoor dat er geen vocht- of warmtetransport in de y-richting zal optreden. Door deze keuzes wordt de y-term in de vergelijkingen van WUFI uitgeschakeld, waardoor een intrinsieke 1D case gesimuleerd wordt.

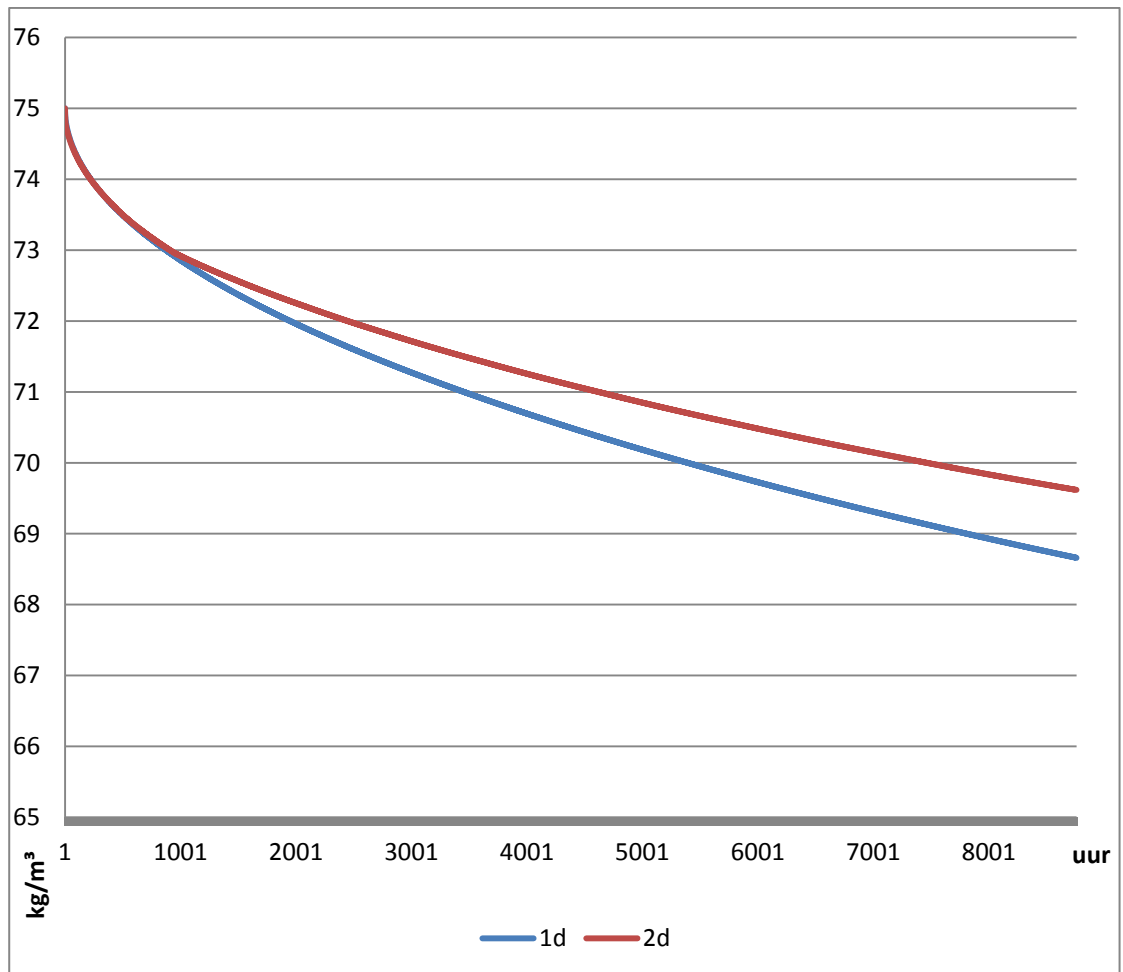
Künzel [6] geeft als verschil nog aan dat 2D berekeningen altijd gevoeliger reageren op fouten in de niet-lineaire materiaal parameters dan in 1D simulaties het geval is. Deze gevoeligheid vangen we echter op door transport in de y-term te verhinderen, waardoor wederzijdse beïnvloeding van de grid elementen in de y-richting verhinderd wordt. Hierdoor mag het grid in de y-richting ook erg groot zijn.

8.1.1. Case: invloed van de convergentiecriteria en het aantal iteraties.

Als eerste case werd gekeken naar de invloed van het verschil in convergentiecriteria en het aantal iteraties tussen WUFI 1D en 2D op de resultaten.

Een eerste simulatie werd uitgevoerd op een betonnen element van 0,2m op 0,01m, over een tijdsperiode van 1 jaar. Als materiaal werd uit de database gekozen: Concrete C35/45. Voor de initiële condities werd een temperatuur van 20°C en een vochtgehalte van 75 kg/m³ (RV 80%) aangenomen. Het buitenklimaat werd vastgelegd op een constante waarde van 18°C en een constante relatieve vochtigheid van 80%. Voor het binnenklimaat werd een temperatuur van 21°C en een relatieve vochtigheid van 50% gekozen. Door deze twee omgevingscondities treedt er een gradiënt in de temperatuur en de relatieve vochtigheid op waardoor vochttransport zal optreden. De precieze aard van het vochttransport is voor deze simulatie uiteraard van minder belang, aangezien wordt gezocht naar de verschillen in resultaat voor WUFI 1D en 2D in de tijd.

Opgemerkt dient ook te worden dat er geen uitspraak mogelijk is over de correctheid van de berekening, er kan enkel uit deze simulaties bepaald worden wat het verschil is tussen een 1D- en een 2D-berekening, de validatie van de simulatie met proeven komt in een volgend hoofdstuk aan bod.



Figuur 16: resultaten uit WUFI 1D en 2D, vochtgehaltes in kg/m³.

Zoals blijkt uit de resultaten van de simulaties van deze case in WUFI 1D en 2D, weergegeven in Figuur 16, treedt er na ongeveer 1000 uur een significant verschil op tussen beide berekeningen. Aangezien de case uitgevoerd werd met identieke randvoorwaarden en materiaaleigenschappen, moet dus de manier van berekenen een invloed hebben op het uiteindelijke resultaat.

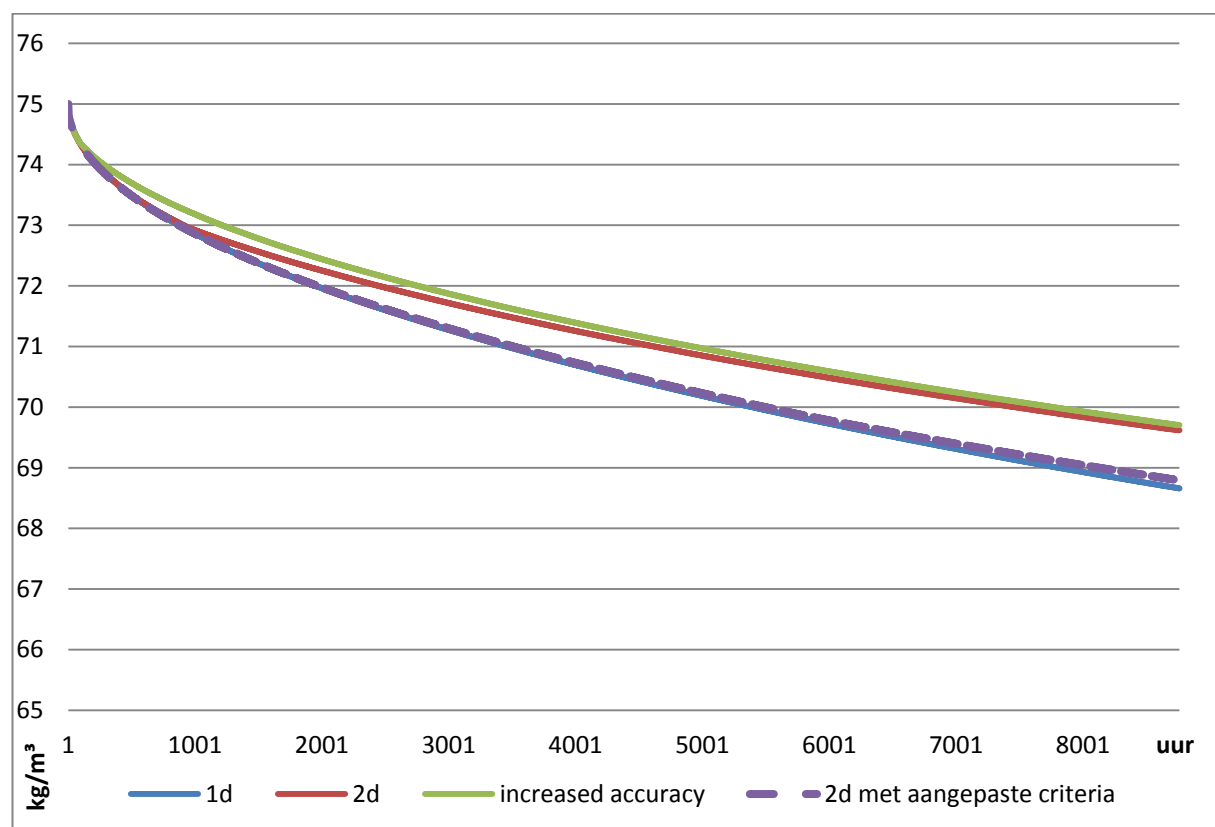
Zoals reeds eerder aangehaald zijn belangrijke factoren voor de nauwkeurigheid van de numerieke oplossing de gebruikte terminatiecriteria, tijdsstappen en gridgroottes. Omdat voor beide berekeningen constante omgevingsvariabelen werden gebruikt hebben de tijdsstappen geen invloed. De gridgroottes zijn eveneens van minder belang voor de nauwkeurigheid: over de y-richting gebeurt geen transport, in de x-richting is er geen bijzondere opbouw die lokaal vochtconcentraties kan veroorzaken, waardoor een door WUFI voorgestelde verdeling geschikt blijkt. WUFI 2D laat echter niet toe om slechts 1 gridelement in de y-richting te plaatsen, waardoor steeds met 2 gridelementen in de y-richting gesimuleerd werd.

In verband met de terminatiecriteria werd reeds aangegeven dat het voldoende is als de maximale verandering van de variabelen in de berekening lager is dan 1 duizendste van een procent relatieve vochtigheid en 1 duizendste van 1 graad Celsius tussen 2 iteraties. Standaard gebruikt WUFI 2D als convergentie criterium: $5 \cdot 10^{-5}$, wat wil zeggen dat de berekening stopt eens de verandering in de variabelen lager dan deze waarde wordt. Gekoppeld hieraan is ook een maximaal aantal iteraties, wat bij WUFI 2D standaard $1,5 \cdot 10^3$ is. WUFI 1D gebruikt als convergentie criterium $5 \cdot 10^{-6}$, en het

maximum aantal iteraties wordt bepaald door de formule: $200,4 \cdot n_i$, waarbij n_i het totaal aantal elementen is.

Naast deze waarden laat WUFI 2D ook toe om de opties: “increased accuracy” en “adapted convergence” in te schakelen, deze veranderen het maximaal aantal iteraties naar $1 \cdot 10^3$ en het convergentiecriteria naar $5 \cdot 10^{-4}$.

Figuur 17 toont de resultaten van de simulaties met verschillende terminatiecriteria. Er is duidelijk te zien dat de simulatie “2d met aangepaste criteria”, waarbij een simulatie in WUFI 2D uitgevoerd werd met als maximaal aantal iteraties 500, en als convergentiecriteria $5 \cdot 10^{-6}$, een veel betere overeenkomst toont met de resultaten uit WUFI 1D.

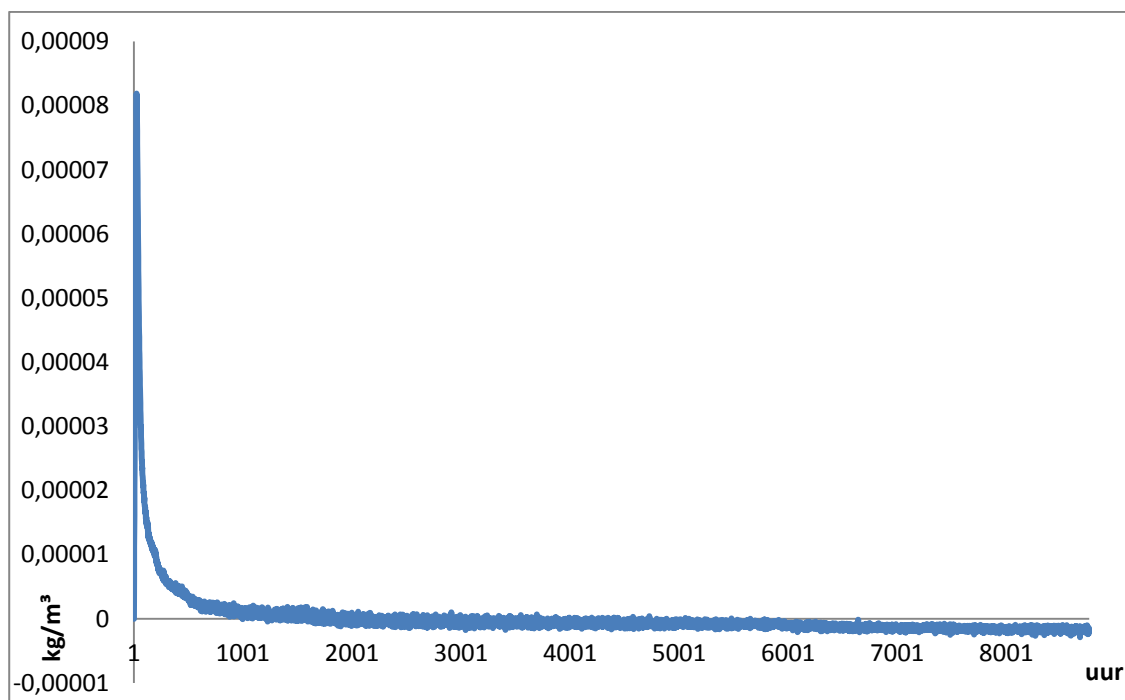


Figuur 17: resultaten van het onderzoek naar de invloed van de convergentiecriteria, vochtgehalte in kg/m^3 .

Een kleine verbetering werd bereikt door in de y-richting een materiaal te plaatsen dat gekenmerkt wordt door een hoge diffusieweerstand, een erg lage dichtheid, porositeit, warmtecapaciteit en thermische geleiding. Hierdoor wordt in de y-richting elk transport tussen de 2 resterende grid elementen volledig onmogelijk gemaakt. Mogelijks wordt deze kleine verbetering ook veroorzaakt net door de aanwezigheid van deze 2 grid elementen, die een erg kleine interactie in de y-richting zouden kunnen mogelijk maken tijdens de berekening door wederzijdse beïnvloeding.

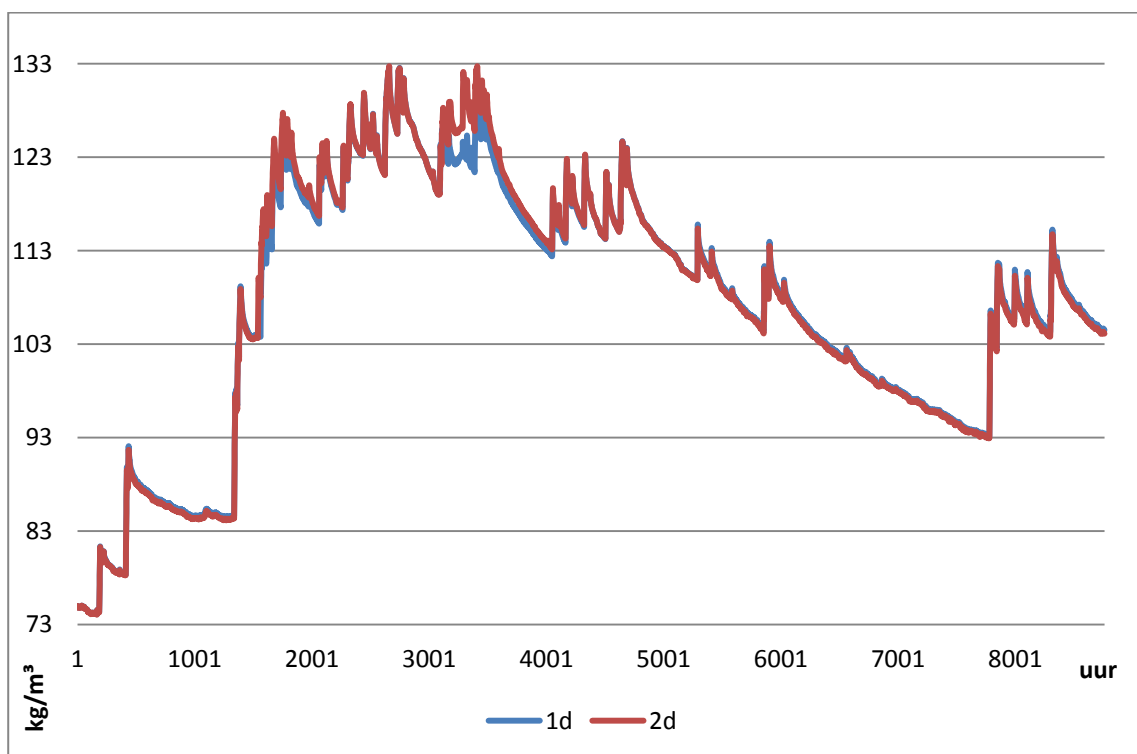
Densiteit (kg/m^3)	10^{-6}
Porositeit (m^3/m^3)	10^{-6}
Warmtecapaciteit (J/kgK)	10^{-6}
Thermische geleiding, droog, 10°C (W/mK)	10^{-6}
Dampdiffusieweerstandsfactor (-)	99900000

Tabel 7: eigenschappen materiaal gebruikt in de y-richting.



Figuur 18: verschil uitgezet in de tijd tussen de berekening met het aangepaste materiaal en zonder wijziging, vochtgehalten in kg/m^3 .

Figuur 18 toont de grootte van deze beïnvloeding. Getoond wordt het verschil tussen de berekening waarbij het aangepaste materiaal gebruikt werd voor de y-richting en de berekening waarbij voor x – en y-richting hetzelfde materiaal gebruikt werd. De grootst optredende afwijking bedraagt $8,19 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^2$, de gemiddelde afwijking $1,88 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^3$, waardoor dit effect te verwaarlozen is.



Figuur 19: simulatie van het vochtgehalte in kg/m^3 van een betonnen element onderworpen aan een realistische vochtbelasting.

De belangrijkste parameters die het verschil in resultaat tussen WUFI 1D en 2D bepalen blijken dus de terminatiecriteria te zijn. Hierbij kunnen tijdelijk aanzienlijke verschillen optreden tussen de resultaten uit WUFI 1D en 2D: simulatie van hetzelfde betonnen element onder een gemeten klimaatbelasting voor Brussel, zoals aangeleverd in de database van het programma, levert verschillen op tot 8 kg/m^3 , met een gemiddelde afwijking van $0,18 \text{ kg/m}^3$. Voorzichtigheid is echter geboden: zonder langdurige validatie kan er geen uitspraak gedaan worden over welke simulatie de meest correcte is.

8.2. Invloed van de interactie van baksteen en mortel op het vochtgedrag van metselwerk: proef en simulatie.

In dit deel wordt dieper ingegaan op de effecten die optreden wanneer baksteen en mortel gecombineerd worden tot 1 geheel, en de invloed die deze effecten hebben op de waterabsorptie van het geheel. In een eerste deel wordt ingegaan op waterabsorptieproeven die werden uitgevoerd. Eerst worden het doel, de gebruikte normen en materialen, en de werkwijze toegelicht, om vervolgens de bekomen resultaten te bespreken. Een tweede deel handelt over hoe we deze effecten in WUFI kunnen modelleren op een fysisch zo getrouw mogelijke manier.

8.2.1. Waterabsorptie proeven.

8.2.1.1. Doel van de proef.

Om een concrete validatie van WUFI te kunnen maken zijn proefresultaten meer dan nodig. Ze laten toe om alle materiaaleigenschappen te bepalen, en ze leveren ook bruikbare resultaten waartegen de simulaties kunnen vergeleken worden.

Concreet werd in deze proeven betracht de waterabsorptie te onderzoeken van zowel bakstenen, mortelprismas, als gecombineerde gehelen. Hiervoor werden meerdere stalen gedurende een lange periode in contact met een wateroppervlak gebracht. Drijvende krachten, zoals wind of vacuümtechnieken werden niet gebruikt, waardoor de waterabsorptie van het materiaal zelf werd bepaald.

Naast deze hoofdproef werden nog andere eigenschappen van de materialen bepaald zodat deze in het programma WUFI kunnen worden ingebracht.

Aandacht werd vooral besteed aan de interactie die optreedt door het samenbrengen van mortel en baksteen. Zoals eerder vermeld ontstaat hierdoor een overgangsweerstand die op de waterabsorptie van de gehelen een invloed zal uitoefenen. Hogere waterabsorptie door scheuren en door onvolmaaktheden zijn niet direct onderzocht, maar kunnen indirect uit de resultaten afgeleid worden.

8.2.1.2. *Waterabsorptieproef: gebruikte normen.*

Om de proeven onder correcte, repliceerbare, omstandigheden te laten gebeuren werd beroep gedaan op meerdere normen, deze worden hier kort aangekaart.

IRA proef.

Voor de “Initial Rate of Absorption” proef, ofwel initiële waterabsorptie proef, werd gebruikt gemaakt van de norm “NBN EN 772-11:2011. Metselsteenproeven - Deel 11: Bepaling van de capillaire waterabsorptie van betonmetselstenen, cellenbetonsteen, metselstenen van kunststeen en natuursteen, alsook van de initiële waterabsorptie van metselbaksteen”[52]. Het principe van deze proef is dat na drogen tot een constante massa, 1 vlak van het te beproeven object in contact wordt gesteld met water voor een bepaalde tijdsperiode en dat de toename in massa gemeten wordt.

Een droogtemperatuur van 105°C wordt vereist. Het materiaal wordt verondersteld droog te zijn indien tussen 2 opeenvolgende metingen het verschil in massa 0,1% van de totale massa bedraagt. Vervolgens wordt na drogen de oppervlakte bepaald van het onder te dompelen vlak volgens de norm EN 772-16[53]. Hierop wordt het te beproeven element via dit oppervlak in contact gebracht met water dat op constant peil gehouden wordt, waarbij een immersiediepte van 5mm +/-1mm geëist wordt. Na 1 minuut wordt het element verwijderd en gewogen.

De IRA-waarde kan vervolgens bepaald worden via:

$$c_{w,i} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \cdot t} \cdot 10^3 \frac{kg}{m^2 min}$$

Waarbij t=1min.

$c_{w,i}$ [kg/m²min] de initiële waterabsorptiecoëfficiënt.

$m_{so,s}$ [g] de massa van het proefstuk na bevochtiging voor een periode t.

$m_{dry,s}$ [g] de massa van het droge proefelement.

A_s [mm²] de oppervlakte van het ondergedompelde vlak.

Waterabsorptie door immersie.

Voor deze proef werd gebruikt gemaakt van de norm “NBN EN 772-21:2011. Metselsteenproeven - Deel 21: Bepaling van de waterabsorptie van metselbaksteen en kalkzandsteen door koud-water-absorptie” [54]. Het principe van de proef bestaat erin de waterabsorptie van proefelementen te bepalen door volledige immersie.

Na drogen tot constante massa op 105°C waarbij maximaal een verschil van 0,2% van de totale massa optreedt tussen 2 opeenvolgende metingen met 24u verschil, laat men het element afkoelen, om het vervolgens volledig onder te dompelen in een watertank. Na 24u wordt het proefelement verwijderd en gewogen.

De waterabsorptie W_s kan vervolgens bepaald worden volgens:

$$W_s = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100\%$$

Met

M_s [g] de massa van het bevochtigde proefelement.

M_d [g] de massa van het gedroogde proefelement.

Capillaire waterabsorptieproef

Deze proef wordt genormeerd door de norm “NBN EN 772-11:2011. Metselsteenproeven - Deel 11: Bepaling van de capillaire waterabsorptie van betonmetselstenen, cellenbetonsteen, metselstenen van kunststeen en natuursteen, alsook van de initiële waterabsorptie van metselbaksteen” [52], die ook gebruikt wordt voor de IRA proef. Primair verschil is de tijd: waar de IRA proef een meting na 1 minuut vereist zijn voor deze proef langere proefuren nodig. De norm zelf specificeert geen tijdsduren. De norm “NBN B 05-201: 1976. Proeven op bouwmaterialen, vorstbestendigheid, wateropsloppingsvermogen door capillariteit” [55] en de norm “NBN B 27-010: 1983. Keramische producten voor wand en vloerbekledingen. Vorstbestendigheid, vermogen tot wateropslopping door capillariteit” [13] geven deze wel: 1u, 3u, 8u, 24u, 48u, 72u, 96u, 120u, 168u, 240u, 288u, 336u.

Omdat deze proeven langdurig zijn is er een grote kans bij traag absorberende stenen dat het water dat door capillariteit wordt opgenomen door diffusie weer uit de steen verdwijnt. Om dit te verhinderen wordt gevraagd de proeven in een afgesloten watertank uit te voeren, zodat de relatieve vochtigheid 100% kan naderen waardoor geen diffusie uit het element meer kan optreden, of de elementen te bekleden met een materiaal met een hoge diffusieweerstand.

De waterabsorptiecoëfficiënt kan bepaald worden door:

$$c_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \cdot \sqrt{t_{so}}} \times 10^6 \frac{g}{m^2 s^{0,5}}$$

Waarbij:

$C_{w,s}$ [g/m²s^{0,5}] de waterabsorptiecoëfficiënt.

$m_{so,s}$ [g] de massa van het bevochtigde element op een tijdstip t .

$m_{dry,s}$ [g] de massa van het gedroogde element.

A_s [mm²] de oppervlakte van het vlak in contact met water.

t_{so} [s] de tijd over dewelke het element beproefd werd.

In het geval van bakstenen dient een grafiek uitgezet te worden met op de x-as de term: $\frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s}$, en op de y-as de wortel van de tijd in seconden gedurende dewelke de elementen beproefd werden. $C_{w,s}$ kan dan bepaald worden als de gradiënt van het initiële lineaire deel van de grafiek.

8.2.1.3. Materiaaleigenschappen: gebruikte normen.

Naast het bepalen van de waterabsorptie werden ook proeven gedaan die peilden naar het referentie watergehalte bij 80% relatieve vochtigheid nodig om in WUFI een correcte simulatie te kunnen maken. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een klimaatkast.

Klimaatkast: referentie water gehalte bij 80% relatieve vochtigheid.

Het bepalen van deze eigenschap gebeurde aan de hand van de norm “NBN EN ISO 12571:2000. Thermische en vochtwerende eigenschappen van bouwmaterialen en bouwwaren – bepaling van de thermische sorptie-eigenschappen” [56]. Het principe van deze proef bestaat er in het tot een constante massa gedroogde object (105°C, Δ= 0,1%) in een omgeving te plaatsen waar een constante temperatuur en relatieve vochtigheid optreedt. Eens het materiaal een constante massa heeft bereikt kan het met een bepaalde relatieve vochtigheid overeenstemmend watergehalte bepaald worden. Een constante temperatuur van 23 ±0,5°C wordt vereist.

Het vochtgehalte u horende bij een bepaalde luchtvochtigheid kan bepaald worden door:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

Met m [kg] de massa van het bevochtigde proefstuk.

m_0 [kg] de massa van het gedroogde element.

De fout die op deze meting door een weegschaal met nauwkeurigheid van ±0,01% van de massa gebeurd kan bepaald worden door:

$$\frac{\Delta u}{u} = \pm 0,0002 \frac{m_0}{m - m_0}$$

8.2.1.4. Gebruikte materialen.**Baksteen.**

Voor de proeven werd gebruikt gemaakt van 2 types bakstenen: aan de ene kant een baksteen met lage waterabsorptiecoëfficiënt, en daartegenover een baksteen met grote waterabsorptiecoëfficiënt.

De baksteen met lage waterabsorptiecoëfficiënt is de “Wienerberger Leder Wanlin”, een strengpers steen met als voornaamste eigenschap een IW klasse van 2. De fabrikant verbindt hieraan een initiële waterabsorptie van 3 kg/m²min. Als maximumwaarde voor de porositeit geldt 8%.

De baksteen met hoge waterabsorptiecoëfficiënt is de “Wienerberger Atinea Beerse”, wat een handvorm baksteen is met als voornaamste eigenschap een IW3 klassering. De fabrikant verbindt hieraan een initiële waterabsorptie van 6 kg/m²min. De maximale porositeit is 17%.

Van beide stenen bevinden zich infofiches in annex A.

Mortels.

Er werd gebruik gemaakt van 2 types mortel, dit om een extra vergelijking te kunnen maken naar de invloed van het type mortel op het vochtgedrag van metselwerk.

De eerste mortel is een zandmortel, dit wil zeggen een mortel met als bestanddelen zand, cement en water. De tweede mortel is gebaseerd op zavel in plaats van zand en wordt verder aangeduid als

zavelmortel. Mortels op basis van zavel zijn vooral uit een historisch oogpunt relevant, meer gebruikelijk zijn de mortels op basis van zand. Een van de grootste verschillen is de sterkte van de mortels: zavelmortels zijn veel zwakker dan zandmortels.

Om tot een consistente mortel te komen werden eerst 2 proefmortels gemaakt: één met de door de fabrikant van de bakstenen, Wienerberger, voorgeschreven verhouding van 1 eenheid cement op 5 eenheden zand of zavel, en een mortel met de gebruikelijke verhouding van 1 eenheid cement op 3 eenheden zand/zavel. De proefmortel met de verhouding 1/3 gaf een veel betere hechting en consistentie ten beste dan bij de verhouding 1/5. Bijgevolg werd steeds de verhouding 1/3 toegepast.

Als zand werd gebruik gemaakt van rivierzand 0/2, dit wil zeggen een rivierzand met korrelverdeling die vervat zit in het interval gevormd door de zeven met maaswijdten van 0,08mm en 2mm.

Zavel is een zand met een belangrijke hoeveelheid kleideeltjes, lutum genaamd, het wordt ook aangeduid als “vettig zand”. Het gebruikte zavel heeft een korrelverdeling 0/2, met andere woorden een korrelverdeling binnen het interval 0,08mm en 2 mm. Globaal gezien is de zavel echter fijner dan het zand, omdat er een grotere fractie tot een kleinere korrelverdeling behoort. Door de aanwezigheid van de fijne kleipartikels ontstaat ook een grotere oppervlakte die bevochtigd dient te worden, wat zich vertaalt in een hogere waterconsumptie dan bij de mortel op basis van zand om tot een consistente mortel te komen.

Het gebruikte cement is van het type CEM II/B – M(S-V-L) 32,5 R, wat wil zeggen: een portlandcomposietcement met hoogovenslak, siliciumhoudende vliegashoudend en kalksteen, van de sterkteklasse 32,5 MPa, met een hoge druksterke op jonge ouderdom.

Overzichtstabel materialen.

Mortel	Cement		Zand	Zavel	Water		Steen 1		Droog		Nat		tijd		Droog		Nat		tijd	
	g		g	g	g		Steen 1		g		g		s		g		g		s	
1	400		1200			onbekend	AT9		onbekend		onbekend		onbekend		onbekend		onbekend		onbekend	
2	400		1200				175 AT7		onbekend		onbekend		onbekend		onbekend		onbekend		onbekend	
3	400.1		1200				194.8 leder 7		1531.3		1548.6		onbekend		1523.2		1539.1		onbekend	
4	400.1		1200				193 AT4		1680.6		1809.9		onbekend		1655.3		1775.7		onbekend	
5	400.1		1201				204 AT6		1674.7		1817.8		120 AT24		1680.4		1800.9		60	
6	400.7		1199.8				170 LEDER4		1538.8		1558.8		20 LEDER24		1525.9		1551.3		20	
7	400.1		1200.7				191 LEDER9		1523.8		1535.4		20 LEDER10		1548.3		1558.4		20	
8	400		1200				200 AT19		1850.1		1947		49.93 AT18		1667.2		1775.3		49	
9	403		1202				180 LEDER5		1552.3		1570.7		20 LEDER6		1559.3		1577.4		20	
10	400.5			1207			278.5 LEDER20		1537.8		1553.2		20 LEDER3		1534.9		1551.5		20	
11	403			1195			300 AT20		1823.6		1927.8		60.97 AT3		1637.5		1745.5		59.56	
12	401.1			1198.3			287.3 AT17		1646.9		1787.6		102 AT16		1681.1		1796.4		93	
13	400.1			1200			256 LEDER 16		1551.1		1570.5		20 LEDER 17		1529.3		1544.9		20	
14	399.7			1202.2			268.8 AT 14		1666.4		1801.3		100 AT 15		1698		1835.2		100	
15	399.6			1200.9			271 LEDER 18		1563.6		1579.3		20 LEDER 19		1549.7		1567.8		20	
16	400			1199.8			267.5 AT1		1680.1		1822.5		100 AT2		1701.6		1838.7		100	
17	400.3			1200			266.3 LEDER 14		1526.9		1550.3		20 LEDER 15		1533.3		1558		20	

Tabel 8: overzichtstabel van de materialen.

Bovenstaande tabel geeft een overzicht van de samenstelling van de gebruikte mortels, alsook van de bakstenen waarmee zij een geheel vormen.

De consistentie van de mortels werd verkregen door persoonlijke beoordeling, Eurocode 6 (NBN ENV 1996-1-1 2002) blijft hierover tamelijk vaag en stelt hierover: “de consistentie van de mortel dient op passende wijze geregeld te worden, rekening houdend met de materiaaleigenschappen van de stenen.” [57]. Getracht werd een mortel te verkrijgen die zowel voldoende bewerkbaar was als ook niet te vloeibaar, gestreefd werd naar een mortel die na menging van het truweel gleed zonder grote resten, en na het vallen consistent genoeg was om niet uit te lopen, en waarbij scheuren op het oppervlak optraden.

De goede praktijk veronderstelt dat bakstenen bevochtigd worden alvorens ze te vermetsen, in de literatuur zijn hierover uiteenlopende meningen te vinden[57]. Omdat het in dit geval over stenen ging die droog uit de oven kwamen werd een kleine proef uitgevoerd waarbij een staal gemaakt werd dat met ovendroge stenen van het type Atinea gemetst werd en een staal met bevochtigde stenen van hetzelfde type. De door onderdompeling bevochtigde stenen vertoonden een goede hechting aan de zandmortel, terwijl de niet bevochtigde tot breuk kwamen aan het raakvlak mortel – baksteen. Ook was een zeker inzuigend effect van de droge steen merkbaar waarbij de ovendroge baksteen een overmaat aan water uit de natte mortel zoog, wat tot een slechtere binding kan leiden[57].

Aan de hand van deze resultaten werd besloten om voor alle gehelen de ovendroge bakstenen te bevochtigen. De totale gewichtstoename is uit Tabel 8 afleidbaar. De tijdsduur van onderdompeling wordt ook vermeld, hiervoor werd uitgegaan van een persoonlijke beoordeling: gekeken werd naar de hoeveelheid luchtbellens die uit de baksteen kwamen na onderdompeling. Eens deze gestopt waren werd de baksteen korte tijd opzij geplaatst. Hierdoor zoog de steen het nog op het oppervlak aanwezige water op en voldeed het oppervlak aan de vroegere Belgische norm (NBN B24-401 1981) die stelde dat: “Sterk capillair zuigende bakstenen vooraf moeten natgemaakt worden, behoudens gebruik van waterweerstandend middel. De metselstenen moeten lichtjes natgemaakt worden, zonder dat het water er afstroomt; het steenoppervlak moet er vochtig tot droog uitzien. Het natmaken door onderdompeling is geen goede praktijk.” [57]. In verband met de onderdompeling stelt Eurocode 6 (NBN ENV 1996-1-1 2002) echter: “de stenen moeten een vochtgehalte hebben dat geschikt is om de voorgeschreven aanhechting met de mortel te bereiken. De stenen mogen ondergedompeld worden in water om het watergehalte op het juiste peil te brengen als dit nodig is.” [57].

8.2.1.5. *Werkwijze.*

Aansluitend op de algemene toelichting van de normen in punt 8.2.1 volgt hier een korte toelichting bij de werkwijze waarop de stalen werden geproduceerd. Ook wordt er ingegaan op de omstandigheden onder dewelke de proeven werden uitgevoerd.

Aanmaak proefelementen.

Voor de proeven werden zowel gemetste gehelen als mortelprismas gemaakt. Info over de consistentie van de mortel en de samenstelling wordt hierboven gegeven.

De mortelprismas werden aangemaakt volgens NBN EN 1015-11 [58] in een mal met binnenafmetingen 160mm x 40mm x 40mm. Conform de norm werd de mal in gevuld 2 gelijke lagen en iedere laag verdicht met 25 schokken van een stamper. Vervolgens werd het overschot aan mortel verwijderd om een glad oppervlak te krijgen bovenaan. Na afstrijken werden de stalen 2 dagen bewaard bij een temperatuur van 20±2°C in een polyethyleen zak om tot voldoende uitharding te komen. De norm geeft aan dat de stalen uitgehard zijn na 2 dagen bewaring volgens deze wijze. Na 2 dagen werden de prismas uit de mallen verwijderd en gedroogd.

Vanwege het erg gladde oppervlak van de mortelprismas werd besloten deze middendoor te breken om een poreuzer oppervlak te verkrijgen. Deze werkwijze komt voort uit de norm NBN EN 1015-18 [59]. Voor de proeven in de klimaatkast werden ongebroken stalen gebruikt.

Het metsen van de combinaties baksteen-mortel-baksteen gebeurde steeds op een zelfde manier: eerst werd de mortel gemengd tot een goede consistentie werd bekomen. Vervolgens werden de stenen korte tijd ondergedompeld volgens Tabel 8. Na een pauze van een 10 tal seconden werden de gehelen op elkaar gemetst. Hiervoor werd gebruikt gemaakt van houten kaders met de bedoeling steeds eenzelfde voegafstand te verkrijgen. Analooq aan de mortelprismas werden de gehelen vervolgens 2 dagen bewaard in een polyethyleenzak om tot uitharding van de mortel te komen.

Tijdens de proeven werden 2 elementen gebroken: element 1, bestaande uit Atinea 9, 10 en zandmortel 1, vermoedelijk door gebruik te maken van niet bevochtigde stenen. Ook element 12, bestaande uit Atinea 16 en 17 en een zavelmortel faalde, vermoedelijk door een te lange pauze tussen het aanbrengen van de mortel en het aanbrengen van de steen. Bij deze 2 elementen trad telkens een quasi perfect breukvlak op tussen de mortel en de baksteen, wat wijst op een slechte binding tussen beide elementen.

Proeven.

De proeven werden steeds uitgevoerd volgens de desbetreffende norm.

Voor de start van de proeven werden de gebruikte weegschalen gecontroleerd met ijkgewichten, voor beide was de benadering heel goed: voor de kleine weegschaal werd een afwijking van 0,4 gram op 1000 gram gevonden, voor de grote weegschaal een afwijking van 1 gram op 1000 gram. In annex B bevinden zich de resultaten van de ijking.

Voor de IRA en de capillaire waterabsorptieproef werd gebruik gemaakt van een container waarin een constant waterpeil werd gehouden door middel van een toevoerleiding en afvoergaten geboord op het gewenste peil: aldus werd steeds een peil van 5mm ±1mm behouden. Deze container werd bovenaan voorzien van rubberstrips waarop een afdekplaat geplaatst werd. Hierop werd vervolgens een gewicht geplaatst. Hierdoor werd tegemoet gekomen aan het mogelijke gevaar dat bij kleine vochtopnames diffusie met de omgeving de eventuele opname teniet deed. Naarmate de tijd vorderde steeg de relatieve vochtigheid in de container om tot boven een gemeten waarde van 98,6% te stijgen. Aldus mag veronderstelt worden dat in de eerste uren van de opstart van de proef

er slechts een beperkte invloed van de relatieve vochtigheid in de container op de proefelementen optrad, na verloop van tijd als de relatieve vochtigheid voldoende gestegen was mag er ook vanuit gegaan worden dat er geen diffusie optrad uit het element aangezien de relatieve vochtigheid de 100% benaderde. Ongeacht de eventuele invloed van de diffusie blijft natuurlijk de capillaire geleiding een veel krachtiger mechanisme om vocht te transporteren.

Voor de waterabsorptieproef door immersie werd gebruik gemaakt van een container waarin de elementen volledig konden ondergedompeld worden. Een van de gevolgen hiervan is dat er een overdruk kan optreden op de elementen door de druk van het water. Een andere moeilijkheid is dat het water langs alle zijden van het materiaal wordt opgenomen, en niet over 1 oppervlak, waardoor geen gegevens bekend zijn van het vochttransport over 1 oppervlak in 1 richting. Door deze 2 redenen bleek deze proef minder bruikbaar.

8.2.1.6. Resultaten.

IRA proef.

De proef naar de “initial rate of absorption” werd uitgevoerd op 20 Atinea bakstenen, 20 Leder Wanlin bakstenen, 12 zandmortels en 10 zavelmortels. Daarnaast werd ze ook uitgevoerd op 7 baksteengehelen gebaseerd op de steensoort Atinea, en op 8 gehelen gebaseerd op de steensoort Leder Wanlin.

Voor de Atinea stenen werd een gemiddelde IRA van $2,912 \text{ kg/m}^2\text{min}$ verkregen, met standaardafwijking $0,153 \text{ kg/m}^2\text{min}$. Dit is ongeveer de helft van wat de fabrikant zelf voorschrijft als maximale waarde, namelijk $6 \text{ kg/m}^2\text{min}$. De gevonden waarde bevestigt de IW3 klasse.

De Leder Wanlin stenen hebben een gemiddelde IRA van $0,268 \text{ kg/m}^2\text{min}$, met standaardafwijking $0,0755 \text{ kg/m}^2\text{min}$. Ten opzichte van de door de fabrikant aangegeven maximale waarde van $3 \text{ kg/m}^2\text{min}$ is dit drastisch lager. Als gemiddelde waarde wordt echter ook $0,85 \text{ kg/m}^2\text{min}$ aangegeven, waardoor deze steen in een IW1 klasse valt, hetgeen overeenstemt met de gevonden waarde. Opgemerkt dient dus wel dat er binnen de steensoort erg grote verschillen mogelijk zijn zoals de door de fabrikant gegeven waardes aantonen.



Over de 12 zandmortels wordt een gemiddelde IRA van 1,014 kg/m²min gevonden met standaardafwijking 0,298 kg/m²min. De zavelmortels geven een gemiddelde IRA van 1,371 kg/m²min, standaardafwijking 0,2555 kg/m²min.

De gehelen gevormd uit de Atinea bakstenen met de zandmortel geven een gemiddelde van 3,889 kg/m²min met standaardafwijking 1,866 kg/m²min. Deze standaardafwijking ligt zo hoog door de erg hoge IRA waarde van combinatie 8 bestaande uit de bakstenen Atinea 18 en 19. Voor de zavelmortel wordt een IRA verkregen van 2,739 kg/m²min gemiddeld, standaardafwijking 0,168 kg/m²min.

De Leder Wanlin gehelen met zandmortel hebben een gemiddelde IRA van 0,226 kg/m²min, standaardafwijking 0,0327 kg/m²min. De gehelen met een zavelmortel hebben een IRA van 0,4403 kg/m²min, standaardafwijking 0,129 kg/m²min.

Opvallend is de grote spreiding in de resultaten van de Leder Wanlin bakstenen, mogelijks wordt dit veroorzaakt door de geringe hoeveelheid water die deze opnemen, waardoor een kleine meetfout grote gevolgen kan hebben.

De volledige proefresultaten met bijhorende grafieken bevinden zich in annex C.

Waterabsorptie door immersie.

Deze proef werd enkel uitgevoerd op de 2 baksteensoorten. Er werden 6 Atinea stenen beproefd en 10 Leder Wanlin stenen vanwege hun gespreider resultaat in de IRA proef.

De proef vereist strikt genomen enkel de massa na 24 uur om de W_s -waarde te berekenen, de proefresultaten werden echter uitgevoerd op meer tijdstippen om zo een beter beeld te hebben van de evolutie van de waterabsorptie.

De Atinea bakstenen hebben een W_s -waarde op 24u van gemiddelde 13,955% met een standaardafwijking van 0,1941%. De absorptie kenmerkt zich in de tijd door een snelle opname, ongeveer 230gram water in 1 uur, gevolgd door een meer langzame opname. De proeven werden stopgezet op 672 uur, de opname bedroeg dan nog 1 a 2 gram ten opzichte van de meting bij 600uur, en stemt overeen met een W_s van gemiddeld 16,11% met standaardafwijking 0,1021%.

Voor de Leder Wanlin steensoort werd een gelijkaardig verloop gevonden: sterkere opname in de beginfase, gevolgd door een tragere opname. Na 24 uur werd een gemiddelde W_s -waarde gevonden van 5,66%, met een standaardafwijking van 0,588%. Na 1176 uur werd een gemiddelde W_s van 7,8654% verkregen. Binnen het uur wordt ongeveer 70 gram water opgenomen.

Zoals reeds eerder aangehaald is deze proef echter minder geschikt: door de onderdompeling en het ontbreken van concrete gegevens over de oppervlakte, directionaliiteit en dergelijke levert hij geen concrete info over de waterabsorptiecoëfficiënt over 1 oppervlak. In de proeven is dit duidelijk merkbaar in het verschil in opname over de eerste uren tussen deze proef en de proef naar de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt.

In zekere zin kan gesteld worden dat het verkregen resultaat meer iets zegt over hoeveel procent van de poriën gevuld zijn na een bepaalde tijd en geeft het aldus een indicatie van de correctheid van de door de fabrikant opgegeven porositeit.

Op basis van deze stelling, de door de fabrikant opgegeven porositeiten en wateropnames en de W_s -waarden bij beëindiging van de proef kan gesteld worden dat zowel voor de Atinea als voor de Leder Wanlin bakstenen de opgegeven porositeiten en wateropnames aannemelijk zijn.

De volledige resultaten van deze proef zijn te vinden in annex D.

Capillaire waterabsorptieproef.

De waterabsorptiecoëfficiënt door capillaire zuiging werd bepaald op 10 Atinea en 10 Leder Wanlin stenen, 12 zandmortel en 10 zavelmortel prisma's, 4 gehelen bestaande uit Atinea stenen gecombineerd met een zandmortel, 3 gehelen van de combinatie Atinea – zavelmortel, 4 gehelen bestaande uit Leder Wanlin stenen en een zandmortel en 4 gehelen bestaande uit een Leder Wanlin steen in combinatie met een zavelmortel.



Voor alle elementen werden minimaal tot 336 uur na de start van de proeven de watergehaltes bepaald. Uit de verkregen datapunten werden grafieken van het verschil in massa per oppervlakte-eenheid contactoppervlak in functie van de wortel van de tijd opgesteld. Daarnaast werden ook de overeenkomende waterabsorptiecoëfficiënten per tijdsstap bepaald. Uit de grafieken werd vervolgens de gradiënt bepaald van het initiële lineaire deel, met andere woorden het deel waar het transport door capillariteit wordt gedomineerd, wat de waterabsorptiecoëfficiënt van het materiaal geeft [60].

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de verkregen coëfficiënten door bepaling van de gradiënt.

Atinea		Leder		Zandmortel		Zavelmortel	
$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$		$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$		$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$		$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$	
11	250,48	11	16,538	1A	55,244	13A	133,63
12	251,63	12	17,387	1B	66,362	13B	120,29
13	230,85	13	30,789	2A	77,545	14A	113,43
14	238,5	14	32,483	2B	78,999	14B	115,07
15	246,81	15	30,807	3A	90,28	15A	123,34
16	249,14	16	29,248	3B	164,69	15B	118,69
17	239,21	17	12,905	7A	111,04	16A	121,39
18	243,96	18	13,081	7B	111,41	16B	118,13
19	239,73	19	16,349	8A	91,375	17A	137,42
20	237,82	20	11,229	8B	90,405	17B	156,08
				9A	109,05		
				9B	102,48		
Gem.	242,813		21,0816		95,74		125,747
St. dev.	6,691427		8,628963		28,03888		13,10884

Atinea Zand		Atinea Zavel		Leder Zand		Leder zavel	
$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$		$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$		$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$		$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$	
4 en 5	230,69	1 en 2	239,08	4 en 24	29,568	3 en 20	22,425
6 en 24	235,15	3 en 20	225,78	5 en 6	20,185	14 en 15	38,732
7 en 8	231,66	14 en 15	236,25	7 en 8	23,02	16 en 17	29,042
18 en 19	231,59	16 en 17		9 en 10	10,814	18 en 19	22,291
Gem.	232,2725		233,7033		20,89675		28,1225
St. dev.	1,968525		7,006185		7,786039		7,743274

Tabel 9: overzicht van de waterabsorptiecoëfficiënten, grafische methode.

Opgemerkt dient te worden dat het voor sommige stalen erg moeilijk was om de gradiënt te bepalen: zo is bvb. voor de Atinea stenen de bepaalde rechte niet altijd even passend. Dit plaatst een grote onzekerheid op de resultaten op deze manier verkregen. Indien er twijfel was over welke punten tot welke rechte behoorden werd het criterium van Chauvenet toegepast.

Een tweede opmerking is de sterke spreiding op de resultaten van de Leder Wanlin stenen en de gehelen die hiermee gevormd zijn. Mogelijks wordt dit verklaard door de erg kleine wateropname die de Leder Wanlin stenen vertonen, waardoor meetfouten signifikanter worden.

Om aan deze problemen hoofd te bieden werden ook voor elke tijdsstap de waterabsorptiecoëfficiënten bepaald. Deze laten een preciezere analyse per tijdsstap toe.

In annex E bevinden zich alle gemeten resultaten en berekende coëfficiënten.

Klimaatkast: referentie water gehalte bij 80% relatieve vochtigheid.

Na ongeveer 30 dagen werd een evenwicht bereikt in de profelementen. De resultaten zijn te vinden in onderstaande tabel.

		Ref. watergehalte	
		kg/m ³	
Mortel	Atinea	21	2,34375
		22	3,125
		23	1,953125
	Leder	21	4,296875
		22	3,90625
		23	3,90625
	Zand mortel	4	66,015625
		5	68,359375
		6	72,265625
	Zavel mortel	10	64,453125
		11	62,890625
		12	65,234375

Tabel 10: referentie watergehalte bij 80% relatieve vochtigheid.

8.2.1.7. Vochtgedrag ter plaatse van de mortel-baksteen voeg.

Zoals in de literatuurstudie reeds vermeld wordt het vochtgedrag ter plaatse van de mortel-baksteen voeg beïnvloed door verschillende factoren: enerzijds is er de grensweerstand die optreedt bij vochttransport over deze grens maar ook scheuren en zijdelingse bevochtiging van de materialen onderling gaan een zeer grote invloed hebben.

Een gevolg hiervan is dat het totaal geabsorbeerde watergehalte van de metselwerkgehlen op tijdstip t tijdens de proef verschillend zal zijn van de som van de watergehaltes van de samenstellende delen op hetzelfde tijdstip t .

Tussen het capillaire watergehalte op een tijdstip t en de waterabsorptiecoëfficiënt bestaat een eenvoudige relatie[60]:

$$A = \frac{w_s}{\sqrt{t}}$$

Waarbij:

A [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$] de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt.

w_s [kg/m^2] het watergehalte dat over een oppervlakte gestroomd is, m.a.w. het capillair vochtgehalte per eenheid contactoppervlak.

t [s] de tijd.

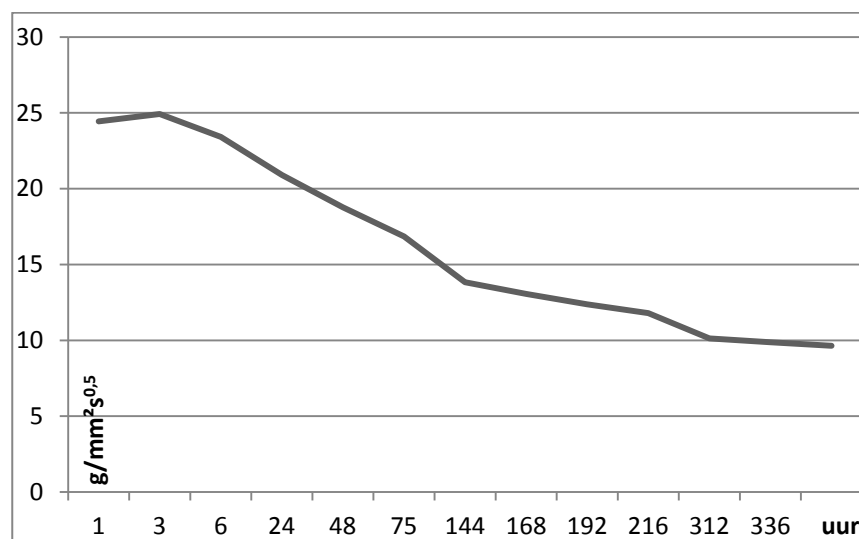
Door deze relatie mogen bijgevolg de waterabsorptiecoëfficiënten voor een gegeven tijdstip t oppervlakte gewogen opgeteld worden om zo een totale waterabsorptiecoëfficiënt te voorspellen. Deze kan dan eenvoudig ten opzichte van het gemiddelde van de gemeten waarden vergeleken worden.

De berekeningen bevinden zich in annex F.

Opvallend bij de berekeningen is dat voor de combinaties bestaande uit Atinea bakstenen een goede overeenkomst wordt gevonden tussen de voorspelde en de gemeten waarde: de maximaal optredende afwijking bedraagt -2,316%, wat wil zeggen dat de gehelen 2,316% meer geabsorbeerd hebben dan de som van de aparte delen.

Bij de combinaties gebaseerd op de Leder Wanlin stenen zijn echter veel grotere verschillen aanwezig. Voor de combinatie Leder – zandmortel bedraagt het verschil voor het eerste uur 39,42%, om op 48u nog 1,2% te bedragen en na 336u -3,639%. Er wordt met andere woorden gestart met een waterabsorptie die 39% lager is dan de som van de aparte delen en geëindigd met een watergehalte dat 3,639% hoger ligt. De combinatie Leder – zavelmortel geeft nog een ander verloop: gering verschil het eerste uur, na 24u een verschil van -13,664% om na 336u -7,125% te bedragen.

Kijken we naar het vochtgedrag van de stenen en mortels apart dan zien we dat de Leder Wanlin stenen een vreemd gedrag vertonen: over de eerste 24 uur stijgt de waterabsorptiecoëfficiënt om vervolgens een daling in te zetten. Voor alle andere materialen gebeurt dit niet: daar wordt gestart met een hogere waterabsorptiecoëfficiënt voor het eerste uur die vervolgens afneemt naarmate er meer water geabsorbeerd is en de steen dus verzadigd raakt. Mogelijk beïnvloeden meetfouten dit resultaat door de kleine wateropnames van de Leder Wanlin baksteen.



Figuur 20: waterabsorptiecoëfficiënt van de Leder Wanlin stenen in functie van de tijd.

Een tweede correctie die kan worden aangebracht heeft te maken met de wijze waarop de proef uitgevoerd wordt: de gebruikte normen vragen een watervlak dat op ongeveer 5mm boven het beproefde contactoppervlak gehouden wordt. Dit levert echter een aanzienlijk verschil op tussen de proeven van de materialen onderling en de gemetste gehelen: de aparte materialen worden beproefd met telkens een volledige rand van 5 mm langs 4 zijden, bij de gehelen is dit echter onmogelijk ter plaatse van de aanhechting. Hierdoor worden bij de gehelen de bakstenen slechts aan 3 zijden onderworpen aan deze rand en de mortelvoeg slechts aan de 2 kopse zijden. Deze reductie in blootgesteld oppervlak uit zich onmiddellijk in de hoeveelheid opgenomen water.

Voor de materialen apart vinden we als oppervlaktes:

Leder	mm	mm	aantal	mm²
ondervlak	188	48	1	9024
zijvlak water	188	5	2	1880
	48	5	2	480
			som	11384
Atinea				
ondervlak	188	63	1	11844
zijvlak water	188	5	2	1880
	63	5	2	630
			som	14354
mortel				
ondervlak	188	12	1	2256
zijvlak water	188	5	2	1880
	12	5	2	120
			som	4256
			Som Leder	27024
			Som Atinea	32964

Voor de gehelen:

Leder				
ondervlak	188	108	1	20304
zijvlak water	188	5	2	1880
	108	5	2	1080
			som	23264
			delta	3760
			%	13,91356

Atinea				
ondervlak	188	138	1	25944
zijvlak water	188	5	2	1880
	138	5	2	1380
			som	29204
			delta	3760
			%	11,40638

Tabel 11: bepaling van de randoppervlakte van de materialen apart en de combinaties

Zoals in de tabel te zien is levert het al dan niet in rekening brengen van de rand een verschil in oppervlakte van 11,4% voor de Atinea stenen en 13,9% voor de Leder Wanlin stenen.

Brengen we vervolgens dit randeffect via een weging door oppervlaktecoëfficiënten in bij de bepaling van een rekenkundige waarde van de waterabsorptiecoëfficiënt van de gemetste gehelen en vergelijken we deze waarde met de oppervlaktegewogen som van de waterabsorptiecoëfficiënten van de aparte delen, dus zonder aftrek van de randoppervlakte, dan laat ons dit toe zicht te krijgen op de grootte van dit randeffect. Opgemerkt dient te worden dat dit nog niets zegt over de gemeten waarden van de gemetste gehelen, er wordt enkel vertrokken van de gemeten waterabsorptiecoëfficiënten voor de aparte materialen op 3 tijdstippen, namelijk 1u, 24u en 336u.

Gebruikte waterabsorptiecoëfficiënten:

	1u	24u	336u	
Leder Wanlin	24,44	20,90	9,88	$\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$
Atinea	351,33	74,22	21,27	$\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$
Zandmortel	108,69	55,44	16,15	$\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$
Zavelmortel	136,46	62,15	17,52	$\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$

Tabel 12: gemeten waterabsorptiecoëfficiënten.

	1 u			24u			336u		
	zonder randeffect	Som delen		zonder randeffect	Som delen		zonder randeffect	Som delen	
Leder - zand			43,80 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Leder - zand		30,60 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Leder - zand		12,62 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$
	33,04 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		24,56 %	24,43 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		20,16 %	10,52 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		16,67 %
Leder - zavel			48,88 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Leder - zavel		31,82 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Leder - zavel		12,87 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$
	35,88 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		26,60 %	25,11 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		21,09 %	10,66 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		17,20 %
Atinea - zand			361,20 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Atinea - zand		81,04 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Atinea - zand		23,26 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$
	331,58 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		8,20 %	72,69 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		10,30 %	20,86 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		10,35 %
Atinea - zavel			365,24 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Atinea - zavel		82,02 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$	Atinea - zavel		23,46 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$
	333,84 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		8,60 %	73,24 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		10,70 %	20,97 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$		10,64 %

Tabel 13: berekende waterabsorptiecoëfficiënten, met en zonder correctie voor het randeffect

Doordat in deze berekening enkel gebruik wordt gemaakt van de waterabsorptiecoëfficiënten van de aparte materialen en deze oppervlaktegewogen worden ingebracht kunnen de gevonden waarden gebruikt worden voor de bepaling van het randeffect: de invloed van scheuren aan het raakvlak baksteen-mortel of de interfaceweerstand over dit raakvlak maken geen deel uit de gebruikte waardes.

Wat uit de berekende verschillen blijkt is dat de invloed van het al dan niet in rekening brengen van de randzone significant is: de gevonden verschillen in waterabsorptiecoëfficiënt variëren van 8,2% tot 26%. Ook het verschil in resultaat tussen de Leder Wanlin stenen en de Atinea bakstenen is significant: de iets grotere bodemoppervlakte die de Atinea steen heeft ten op zichte van zijn randoppervlak en zijn hogere waterabsorptiecoëfficiënt reduceert een groot deel van dit randeffect. De gevonden resultaten lijken te suggereren dat de rand voor een erg grote extra vochtopname zorgt die voor een lange periode significant is.

Vergelijken we de resultaten waarin het randeffect gecorrigeerd is met de gemeten waterabsorptiecoëfficiënten op dezelfde tijdstippen van de gemetste gehelen dan vinden we voor de gehelen opgebouwd uit Atinea bakstenen een tamelijk goede overeenkomst. Voor de Leder gehelen wordt een significante afwijking gevonden. Meetfouten kunnen hierin een rol spelen, maar ook de interfaceweerstand en scheuren kunnen dit resultaat negatief beïnvloeden.

	1u	%	24u	%	336u	%
Leder zand	19,34958	41,43951	21,72766	11,05428	10,814484	-2,83303
Leder zavel	34,34102	4,283089	27,93262	-11,2274	11,308652	-6,12268
Atinea zand	329,9899	0,481036	73,50383	-1,11813	21,277807	2,024074
Atinea zavel	329,3779	1,33774	72,89209	0,470667	20,906932	0,286134

Tabel 14: gemeten waterabsorptiecoëfficiënten op 1u, 24u, 336u voor de gemetste gehelen, waarden in $\text{g}/\text{mm}^2\text{s}^{0,5}$.

Fysisch gezien kan het vochtgehalte op een tijdstip t van de gemetste bakstenen namelijk gedefinieerd worden op volgende manier:

$$\begin{aligned}
& \text{Totale watergehalte} \\
& = \text{som van de watergehaltes van de delen} \\
& \quad - \text{het optredende randeffect} \\
& \quad + \text{extra instroom ten gevolge van scheuren} \\
& \quad + \text{beïnvloeding van het meest zuigende materiaal door een hoger vochtfront} \\
& \quad - \text{het effect van de weerstandsopbouw van de mortel}
\end{aligned}$$

Hierbij dient eens het punt van vrije waterverzadiging bereikt nog de invloed van nazuiging bijgeteld worden.

De beïnvloeding van het meest zuigende materiaal op het andere door een hoger vochtfront is een term die rekening houdt met de extra bevochtiging die kan optreden als 1 van de 2 materialen heel sterk capillair zuigend is en het vochtfront in zijn poriën erg hoog reikt. Hierdoor kan een zijdelingse bevochtiging ontstaan van het andere materiaal. Dit is echter moeilijk kwantificeerbaar, nemen we deze term samen met de term die rekening houdt met de invloed van scheuren dan resten ons nog 2 effecten die werken op de gehelen: het effect van scheuren en vochtfront als bronterm en het effect van de weerstandsopbouw als verliesterm.

Kijken we naar de resultaten in Tabel 14 dan zien we dat enkel voor de Leder Wanlin stenen deze effecten aanwezig lijken te zijn: voor de Atinea stenen is het procentuele verschil erg klein. Brengen we in rekening dat de Atinea stenen erg zuigende stenen zijn dan zou het kunnen dat de sterke absorptie van de bakstenen alle effecten teniet doet, waardoor een goede overeenkomst tussen voorspelling en meting kan ontstaan.

waterabscoeff.	6u	48u	75u
Leder Wanlin	23,41935	18,76882	16,85189
Zandmortel	94,23616	40,38287	32,88547
Zavelmortel	115,8289	44,59424	36,06727
Voorspeld			
Leder Zand	30,65201	20,9763	18,48943
Leder zavel	32,85732	21,40642	18,81439
Gemeten			
Leder Zand	21,91818	20,44407	18,4881
Leder zavel	31,12345	24,06056	20,71431
Verschil	%	%	%
Leder Zand	28,49351	2,537301	0,007166
Leder zavel	5,276974	-12,3988	-10,0982

Tabel 15: voorspelde en gemeten waterabsorptiecoëfficiënten voor 6u, 48u en 75u, waarden in $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$.

Voor de Leder Wanlin stenen treden er wel duidelijke verschillen op: voor de eerste uren is er een lagere waterabsorptie dan voorspeld: mogelijk wordt dit veroorzaakt door de trage waterabsorptie van de materialen en door meetfouten bij de nog kleine watergehaltes. De waarde voor Leder-zand bij tijdstip 1u kan hierdoor ook verklaard worden. Na 24 uur is voor de Leder-zavel stenen dit verschil omgeslaan in een overschot: de bakstenen hebben meer geabsorbeerd dan voorspeld: niet toevallig werd het capillair vochtgehalte voor deze combinaties in de proeven ook bereikt na +- 24uur: via de meer zuigende mortel kan een bevochtiging langs de zijanten van de bakstenen bestaan waardoor een hoger vochtgehalte bereikt wordt. Voor de Leder-zand elementen treedt dit punt pas later op: de 11% lagere gemeten waterabsorptiecoëfficiënt zou kunnen verklaard worden door de mortel die een lagere waterabsorptiecoëfficiënt heeft dan de zavelmortel en de interfaceweerstand niet kan compenseren door het nog lagere vochtfront. Ook zou het kunnen dat de zavelmortel een slechtere binding aangaat met de bakstenen waardoor meer of dieper strekkende scheuren kunnen optreden.

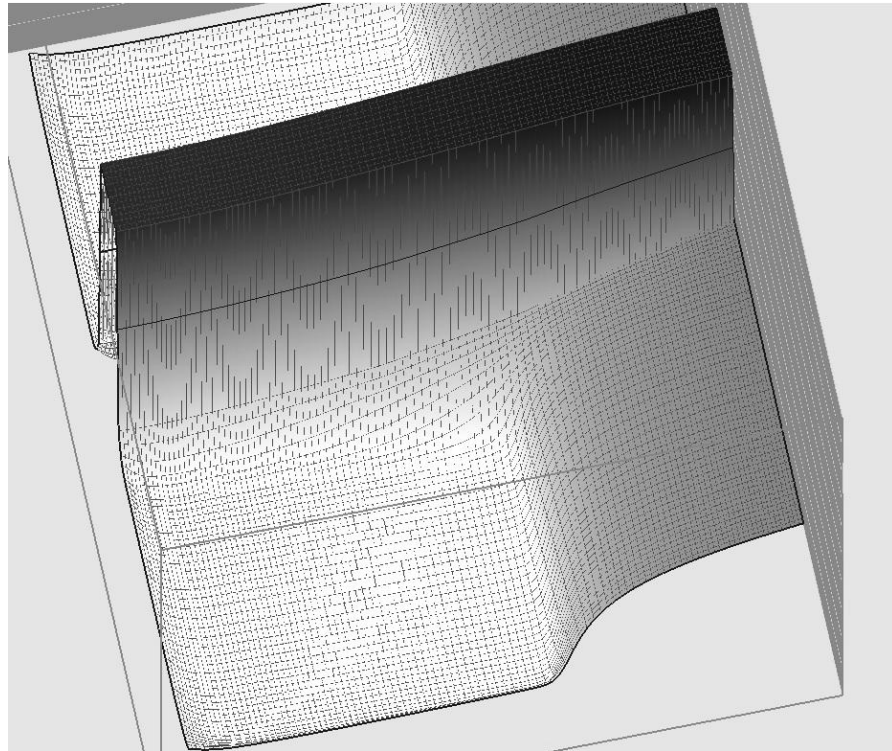
De kwantificering van de invloed van de scheuren is echter moeilijk: voor elk type combinatie en voor elke uitvoeringswijze kunnen andere scheuren optreden. De proefresultaten lijken voor de Leder-zavel elementen te suggereren dat na 1 uur de invloed van scheuren en interfaceweerstand klein is, er wordt dan ook een minder water opgenomen dan voorspeld, na 24 uur is er echter 11% meer water opgenomen dan voorspeld. Indien verondersteld wordt dat na het bereiken van het capillaire vochtgehalte van de mortel, hier gemiddeld na 6 à 8 uur, de invloed van scheuren en zijdelingse bevochtiging door herverdeling het grootste is omdat het vochtfront de bovenkant van de mortel bereikt heeft, en de waterabsorptie van de Leder Wanlin stenen laag genoeg is om na 6 à 8 uur geen grote hoeveelheid water te hebben opgenomen, de coëfficiënt wijzigt slechts van 24,44 naar 23,4 $\text{g/mm}^2\text{s}^{0,5}$, dan kan voor de Leder-zavel combinatie een voorzichtige schatting van de invloed van de

bron en verlies term gebeuren. De verder uitgevoerde simulaties steunen deze werkwijze: eerst zal de mortelvoeg sneller water opnemen dan de bakstenen om vervolgens, na +- 6uur, de naastliggende bakstenen te beïnvloeden over de volledige hoogte. Voor de gemeten proefresultaten vinden we na 6uur een waterabsorptiecoëfficiënt van $31,123 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$; voor 8 uur $31,034 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$ en voor 24uur $27,93 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$. De gecorrigeerde voorspelde benaderingen geven voor 6uur: $32,85 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$ en voor 24 uur $25,11 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$. Aldus vindt er voor de gemeten waarden een sprong van 10% plaats in de periode tussen 6 en 24 uur. Kijken we naar de voorspelde waarde, dus zonder de invloed van scheuren, zijdelingse bevochtiging of weerstand dan vindt er een sprong van 23,5% plaats. De lagere sprong in waterabsorptiecoëfficiënt kan enkel verklaard worden door de extra bevochtiging die kan optreden door de invloed van scheuren en de zijdelingse bevochtiging via het hoger vochtfront van de mortel. Ruw geschat draagt dit effect voor de Leder-zavel combinatie bij tot 13,5% meer vochtopname dan ten opzichte van de som van de aparte materialen.

Passen we deze zelfde veronderstellingen toe op de Leder-zand combinatie dan vinden we voor de gemeten waarden een verschil tussen de gemeten waardes tussen 6 en 24uur van 21,91 naar 21,72 $\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$, ofwel 0,86%. De voorspelde waarde evolueert van 30,65 naar 24,43 $\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$, ofwel 20,92%. Ruw geschat vinden we hierdoor een beïnvloeding van 20%. Kijken we naar de verdere evolutie dan zal pas na 75 uur een omslag gebeuren in een onderschatting door de voorspelde waarde, mogelijk wordt dit veroorzaakt door de specifieke combinatie van zandmortel en bakstenen die een ander soort binding vormen dan de zavelmortel met de baksteen heeft waardoor meer luchtinsluitels, bredere scheuren e.d. een vertraging kunnen veroorzaken.

Het lijkt een veilige aanname om de gecombineerde invloed van scheuren en interfaceweerstand op 10 a 15% te ramen, en de invloed van de zijdelingse bevochtiging op nog eens 10%, vooral omdat de waarden voor de Leder-zand combinatie in de eerste uren sterker afwijken van de voorspelde waarden dan het geval is bij de Leder-zavel combinaties.

Dit effect neemt ook af in de tijd, zoals te zien in Tabel 15. Dit is te verklaren doordat zowel de gemeten gehelen als de voorspelde na verloop van tijd verzadigd raken, waardoor de invloed van scheuren en dergelijke geen voordeel meer oplevert.



Figuur 21: simulatie van een Leder-zandmortel geheel op 6 uur. Gedurende de eerste uren zal de mortel verzadigd raken om nadien pas de stenen te beginnen bevochtigen, in de figuur te zien door de steile overgang tussen mortel en baksteen. Het watervlak bevindt zich rechtsbovenaan.

8.2.2. Modelling in WUFI.

Om de proeven op een correcte manier te kunnen simuleren werden eerst nog enkele studies in het programma WUFI uitgevoerd waarbij gefocust werd op het correct modelleren van de aparte materialen en gehelen, de interfaceweerstand en de invloed van scheuren en nazuiging. Ook werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de gebruikte materiaaldata.

8.2.2.1. Materiaalgegevens.

Het computerprogramma WUFI vereist een aantal gegevens opdat een materiaal kan gesimuleerd worden: sommige van deze gegevens komen voort uit de proeven of werden door de fabrikant aangereikt, andere werden uit materiaalcatalogi genomen[1] [2] [3]. Voor sommige gegevens, zoals de vochttopslagfunctie, werden formules gebruikt die een goede benadering toelaten. Waar mogelijk worden ook de standaardafwijkingen aangegeven.

Basis gegevens.

	Atinea	Leder Wanlin	Zandmortel	Zavelmortel
Densiteit (kg/m ³)	1725	2100	1625	1625
Porositeit (m ³ /m ³)	0,25*	0,3	0,327	0,327
Warmtecapaciteit, droog (J/kgK)	840	840	932	932
Thermische geleiding, droog, 10°C (W/mK)	1,01	1,01	2,035	2,035
Waterdampdiffusie weerstandsfactor (-)	17	17	16,12	16,12

De waarde voor de porositeit van de Atinea baksteen komt niet overeen met de door de fabrikant aangereikte waarde, de proefresultaten lagen in conflict met deze waarde: het capillair watergehalte verkregen door de proeven was hoger dan de opgegeven porositeit. Gebruik werd gemaakt van de porositeit zoals aangereikt in IEA Annex 24[2].

Benaderende waarden en metingen.

Naast de basisgegevens die WUFI vereist kunnen ook parameters ingevoerd worden waaruit de hygrothermische functies benaderd worden. Binnen dit onderzoeksproject zijn de belangrijkste functies de vochttopslagfunctie en de functies voor de vloeibare transport coëfficiënten voor zuiging en herverdeling. De functies die de thermische geleiding benaderen zijn van gering belang: er wordt steeds gewerkt met situaties waarbij er geen temperatuurgradiënt optreedt.

De vochttopslagfunctie wordt benaderd met de formule die reeds onder punt 5.1.2 werd toegelicht:

$$w = w_f \cdot \frac{(b - 1)\varphi}{b - \varphi}$$

De vereiste invoergegevens voor deze functie zijn het referentiewatergehalte bij een relatieve vochtigheid van 80%, zoals bepaald in punt 8.2.1.3, ter bepaling van de factor b. Een tweede

parameter is het vrije waterverzadigingsgehalte w_f . Dit werd bepaald als het snijpunt van de 2 lineaire delen in de grafiek van de waterabsorptieproef, de berekeningen bevinden zich in annex G.

De functies van de vloeibare transportcoëfficiënten maken naast de 2 voorgaande waarden ook gebruik van de waterabsorptiecoëfficiënt. Deze worden gedefinieerd als de gradiënt van het eerste lineaire deel van de grafiek van de capillaire waterabsorptieproef en werden reeds eerder bepaald.

	Atinea	Leder Wanlin	Zandmortel	Zavelmortel
Referentiewatergehalte (kg/m ³)	2,474 (0,59669)	4,036 (0,225527)	68,88 (3,157384)	64,193 (1,193379)
Vrije waterverzadiging (kg/m ³)	232,153 (5,42)	114,33 (12,289)	197,66 (36,1275)	221,721 (31,6741)
Waterabsorptiecoëfficiënt (kg/m ² s ^{0,5})	0,242 (0,0066914)	0,021082 (0,0086289)	0,09574 (0,028038)	0,125747 (0,013108)
Vochtgehalte afhankelijk thermische geleiding supplement (%/M-%)	15	15	4,55	4,55
Temperatuursafhankelijk thermisch geleiding supplement (W/mK²)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Tabel 16: invoergegevens voor de benaderende functies, de waarden tussen haakjes zijn de standaardafwijkingen.

8.2.2.2. Gevoeligheidsanalyse proefresultaten.

Op de belangrijkste input gegevens werd een gevoeligheidsanalyse in WUFI uitgevoerd. Voor de waarden verkregen uit de proeven werd gewerkt met de gevonden standaardafwijkingen, voor de overige met een vast percentage afwijking.

Getest werden: de waterabsorptiecoëfficiënt, het referentiewatergehalte, de vrije waterverzadiging en de porositeit; allen parameters die verband houden met het vochtgedrag van de elementen. Wegens de kleine relevantie werden parameters die met temperatuur te maken hebben niet getest.

Voor de waterabsorptie, het referentiewatergehalte en de vrije waterverzadiging werd gebruikt gemaakt van de gevonden standaardafwijkingen. Alle simulaties werden uitgevoerd met ± 2 maal de standaardafwijking, aldus wordt een gebied verkregen waarin 95,4% van de mogelijke waarden kunnen liggen.

Voor de porositeit, welke uit de literatuur afkomstig is, werd een gebied beslagen van $\pm 10\%$. In de WUFI simulaties is de porositeit vooral van belang ter bepaling van w_{max} , de maximale hoeveelheid die kan opgenomen worden indien alle poriën volledig gevuld zijn. Normaliter treedt dit slechts op in uitzonderlijke gevallen en wordt dit in de beproefde periode niet bereikt.

Als cases werden telkens een Atinea en een Leder baksteen, en een zand- en zavelmortel gesimuleerd. Dit brengt het totaal aantal simulaties op 36: 4 referentiegevallen met de gemiddelde waarde en voor elke parameter de 2 uiterste grenzen.

De studie werd uitgevoerd over 336 uur, even lang als de proeven dus. De uitvoering werd gebaseerd op [21] [24] [26]. Onderaan de elementen werd een randvoorwaarde gecreëerd van 100% relatieve vochtigheid: door gebruikt te maken van waterdamp en niet van vloeibaar water wordt een langzamer verloop gekregen en kan de gevoeligheidsanalyse nauwkeuriger geanalyseerd worden; in het geval van vloeibaar water zou al na enkele uren verzadiging optreden, wat bij deze werkwijze langer duurt. Gevolg hiervan is dat de opgenomen watergehaltes lager uitvallen, maar gezien de uiteindelijke toepassing in een concrete case is dit van weinig belang: in werkelijkheid zal regen nooit langdurig optreden en vooral het buffereffect van de steen van belang zijn [61].

De grafieken met de resultaten zijn te vinden in annex H. De resultaten worden hier kort besproken.

Vrije waterverzadiging – capillair vochtgehalte.

Het watergehalte overeenstemmend met vrije waterverzadiging wordt in WUFI gebruikt voor zowel de benadering van de vochttopslagfunctie als voor de bepaling van de vloeibaar transport coëfficiënten voor zuiging. Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van de formule:

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot \left(\frac{A}{w_f}\right)^2 \cdot 1000^{\frac{w}{w_f} - 1}$$

Met

D_{ws} [m²/s] de capillaire transport coëfficiënt voor zuiging.

A [kg/m²s^{0,5}] de waterabsorptiecoëfficiënt.

w [kg/m³] het watergehalte.

w_f [kg/m³] het vrije waterverzadigingsgehalte.

Voor de herverdeling wordt een benaderende waarde opgesteld uit 2 waarden: voor de hygroscopische zone wordt de waarde bepaald uit de waterdampdiffusieweerstandsfactoren, voor de capillair verzadigde zone geldt dat deze waarde 1 decimaal onder de D_{ws} waarde ligt [6].

Künzel [6] geeft verder nog aan dat deze coëfficiënten benaderingen zijn die vooral voor processen waar vloeibaar transport niet belangrijk is geschikt zijn.

Voor de Leder Wanlin bakstenen werd een resultateninterval gevonden begrepen tussen 11,99 en 14,41 kg/m³, het gemiddelde bedroeg 13,01 kg/m³. In de grafieken is te zien dat de waarde met bijtelling van de standaardafwijking steeds lager zijn dan waar ze werd afgetrokken. Dit komt door de coëfficiënten voor vloeibaar transport waar een grotere w_f waarde een lagere coëfficiënt geven en bijgevolg minder vochtopname. Simulatie over een jaar vertoont het omgekeerde: na verloop van tijd wordt door de hogere w_f waarde een hoger watergehalte bereikt.

Voor de Atinea bakstenen werd een resultateninterval gevonden tussen 19,93 en 20,56 kg/m³. Het gemiddelde bedroeg 20,24 kg/m³.

Gevoeligheidsanalyse op de zandmortel levert een gebied op tussen 104,5 en 111,89 kg/m³. Als gemiddelde werd 115,54 kg/m³ gevonden na 336 uur. Voor de zavelmortel werd een gebied gevonden tussen 106,2 en 111,89 kg/m³ met als gemiddelde 113,37 kg/m³.

Waterabsorptiecoëfficiënt.

De grootste verschillen in watergehalte worden gevonden bij de materialen met de grootste standaardafwijking ten opzichte van hun gemiddelde. Voor de Atinea baksteen zijn de verschillen verwaarloosbaar en is de invloed op het watergehalte van de stenen erg klein, voor de andere materialen zijn de verschillen signifikanter. Het oplossingsinterval voor de Atinea baksteen is begrepen tussen 20,26 en 20,245g/m³ met een gemiddelde van 20,246g/m³.

Variatie van de waterabsorptiecoëfficiënt bij de Leder Wanlin baksteen levert voor het watergehalte in kg/m³ een interval na 336uur op tussen 17,4 en 16,5 kg/m³, met een gemiddelde van 13,01kg/m³.

Voor de zandmortel wordt een interval na 336 uur gevonden tussen 120,7 en 86,23 kg/m³, het gemiddelde bedraagt 115,54kg/m³. Bij de zavelmortel is de spreiding kleiner, na 336uur wordt een interval bekomen begrepen tussen de 116,5 en de 86,2kg/m³ met een gemiddelde van 115,5 kg/m³.

Referentiewatergehalte bij 80% relatieve vochtigheid.

Het referentiewatergehalte bij 80% relatieve vochtigheid is vooral belangrijk ter bepaling van de factor b, zoals besproken in punt 8.2.1.3. Variatie in deze parameter zal een verschil geven in de vochttopslagfunctie en bijgevolg in het watergehalte.

Voor de Atinea bakstenen werd een grote spreiding gevonden: als bovengrens op 336uur geldt een waarde van 25,18kg/m³, als ondergrens 14,27kg/m³. Het gemiddelde bedraagt 20,246kg/m³.

De referentiewatergehaltes voor de Leder Wanlin bakstenen liggen voor 95,4% in het interval tussen 13,72 en 12,23kg/m³, het gemiddelde bedraagt: 13,01kg/m³.

Bij de mortels wordt voor de zandmortel na 336uur een interval gevonden dat reikt tussen 121,84 en 108,67 kg/m³. Het gemiddelde bedraagt 115,54 kg/m³. Variatie in het referentiewatergehalte bij de zavelmortel levert een interval van 116,02 tot 110,73 kg/m³ na 336 uur, het gemiddelde bedraagt 113,37 kg/m³.

Porositeit.

Zoals reeds eerder vermeld is de porositeit binnen WUFI voornamelijk belangrijk voor de totale hoeveelheid water die in het materiaal kan opgenomen worden. Binnen de tijdsperiode van de proeven, 336 uur, wordt deze waarde echter nooit bereikt, waardoor een variatie in de porositeit voor alle 4 materialen van weinig belang is.

De optredende variaties zijn voor alle materialen qua grootte orde 1/10 000 van het watergehalte en worden daarom niet verder in detail besproken.

Conclusie.

Vooraf bij de gemeten parameters lijken variaties een belangrijke invloed uit te oefenen. Vooral die proeven en elementen die een weinig water opnamen, zoals de mortels en Leder Wanlin bakstenen reageren gevoelig op de variaties. Ook de proef naar het referentie watergehalte levert belangrijke spreidingen: dit wordt ook veroorzaakt doordat tijdens de proef slechts kleine hoeveelheden water opgenomen werden. De porositeit is van geen belang.

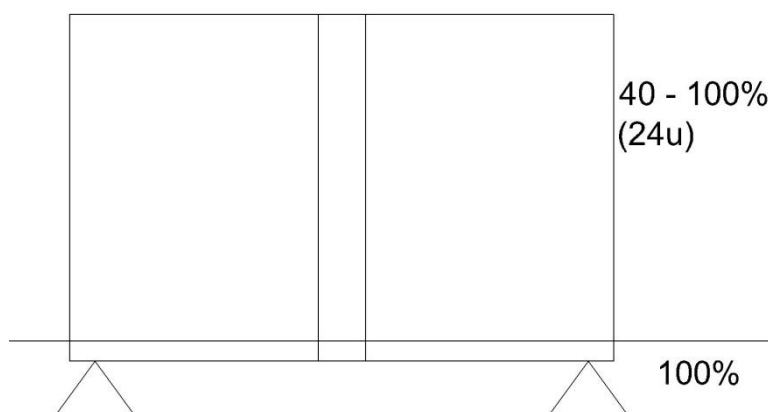
Aan de hand van deze studie kunnen globaal 2 soorten elementen gedefinieerd worden die voor de verdere studies van belang zullen zijn: elementen die veel water zullen absorberen en elementen die een weinig water opnemen.

De elementen die veel water absorberen kenmerken zich door voor de vrije waterverzadiging w_f door een ondergrens en voor de waterabsorptiecoëfficiënt en het referentiewatergehalte door bovengrenzen van de materiaalkarakteristieken.

Elementen die weinig water zullen opnemen kenmerken zich door de omgekeerde eigenschappen.

8.2.2.3. Simulatie van de proeven in WUFI 2D: case 1.

Zowel van de aparte materialen als van de gemetste gehelen werden simulaties in WUFI 2D gemaakt om deze vervolgens te vergelijken met de gemeten vochtgehaltes. De gesimuleerde opstelling was identisch aan de beproefde: er werd gewerkt met elementen die aan 1 zijde in contact met water stonden, aan de andere zijden werd een benadering van de omgeving relatieve vochtigheid van de proef aangehouden.



Figuur 22: configuratie van de proef en simulaties.

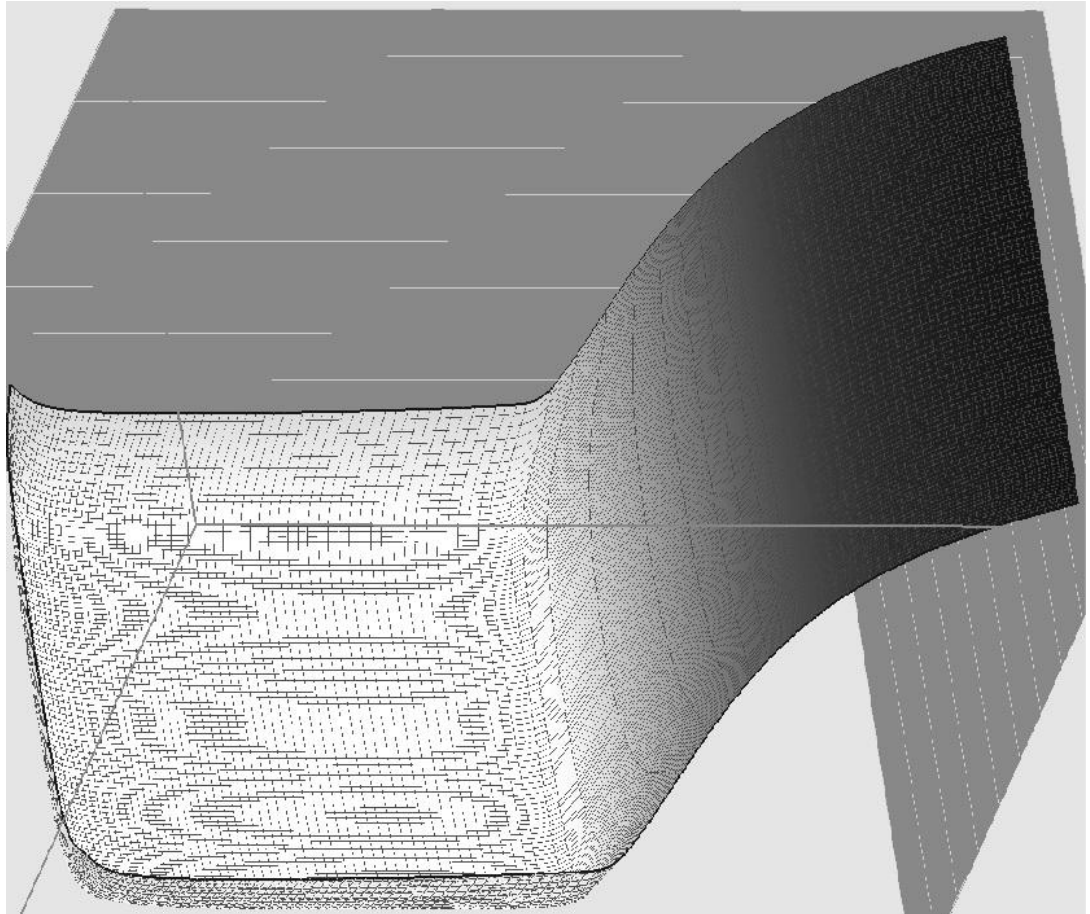
Voor de simulatie van het watervlak werd een specifieke klimaatfile aangemaakt die uitgaat van een overdaad aan regen, namelijk 1000 liter/m²h en een relatieve vochtigheid van de lucht van 100%. Dit vertaalt zich in volgende datalijn welke voor elke tijdstap heringelezen wordt:

TIME	TA	HREL	PMSL	RM	ISM
1900-01-01 01:00	20	1	1013	10000	0

De vlakken niet in contact met het water werden gesimuleerd met een klimaatfile die evolueert van 40% relatieve vochtigheid naar 100% relatieve vochtigheid. Dit is gestoeld op eigen metingen naar de relatieve vochtigheid in de gebruikte container: de gemiddelde relatieve vochtigheid in het labo bedroeg ongeveer 40%, bij metingen in de container werd vastgesteld dat na 24uur waarden tot boven 98,6% relatieve vochtigheid aanwezig waren. Aldus wordt een situatie verkregen die overeenkomt met een opstart van de proef bij 40% relatieve vochtigheid, en wordt na 24 uur in de afgesloten container 100% relatieve vochtigheid bereikt. De impact hiervan op het totale

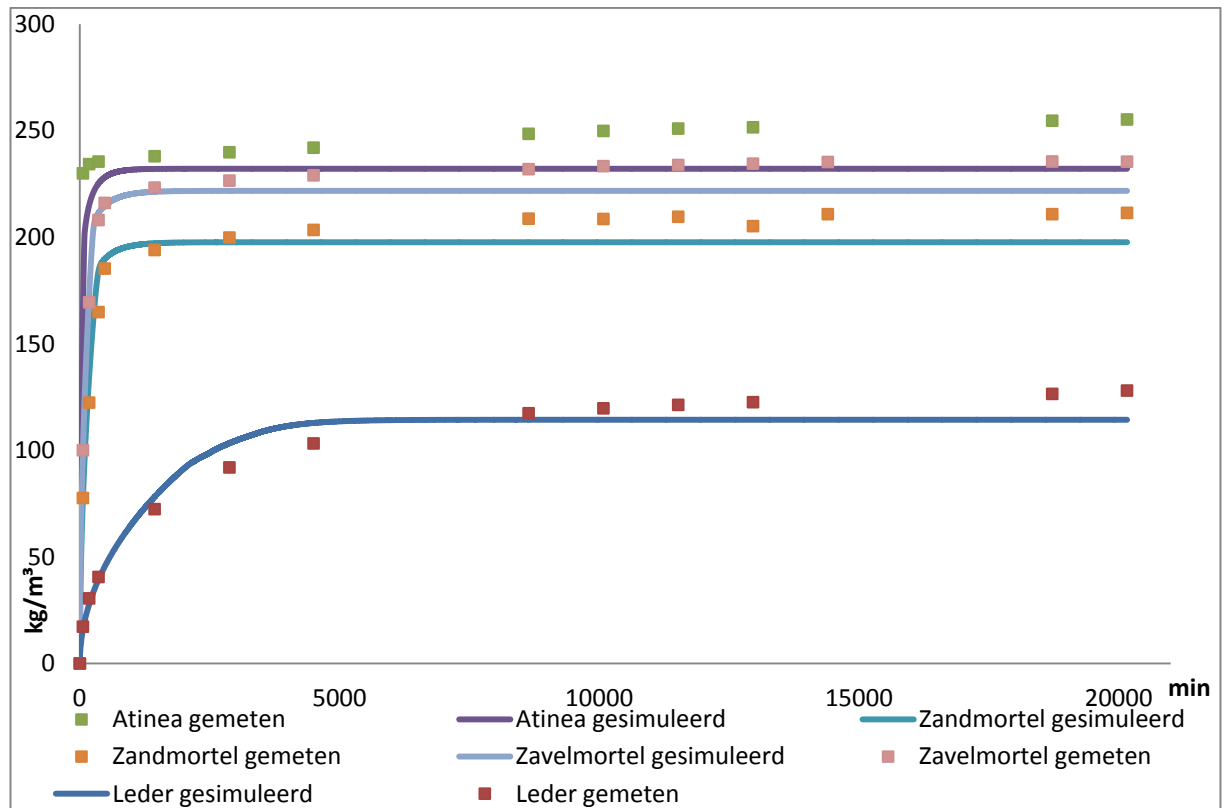
watergehalte is beperkt doordat het in essentie een traag proces gebaseerd op dampdiffusie is en doordat het geabsorbeerde water afkomstig van het watervlak snel het volledige element bevochtigd. Simulaties waarbij een adiabaat als grens werd ingesteld gaf quasi hetzelfde resultaat.

Het al dan niet simuleren van de 5mm wateropstand die in de proeven gevraagd wordt heeft eveneens een verwaarloosbare impact op de simulaties.



Figuur 23: vergelijking van het rechtse watervlak met de invloed van de relatieve vochtigheid op de zijvlakken op het totale watergehalte van het element, figuur genomen op 276 minuten.

Vergelijken we de gesimuleerde materialen met de gemeten waarden dan stellen we vast dat voor de Atinea en Leder bakstenen en de zavel- en zandmortels een betrekkelijk goede overeenkomst gevonden wordt voor de eerste uren. Na verloop van tijd wordt in de simulatie echter de vrije waterverzadiging of w_f bereikt en wordt deze als maximale waarde aangehouden. De gemeten waarden zullen echter nog geruime tijd toenemen, dit kan verklaard worden door het nazuigingseffect: door langzame oplossing van de ingesloten luchtballen zal het watergehalte blijven toenemen tot complete waterverzadiging w_{max} . Zoals reeds in de literatuurstudie vermeld geeft Künzel [6] aan dat met dit effect geen rekening wordt gehouden gezien de kleine kans dat dit effect zich voordoet in praktische toepassingen.



Figuur 24: vergelijking simulaties met metingen.

Door de simulaties van de baksteen en mortel combinaties te vergelijken ten opzichte van de gemeten waarden kunnen we meer info verkrijgen over de impact van dit nazuigingseffect en de invloed die scheuren en dergelijke uitoefenen op het totale vochtgehalte. Tegelijkertijd werd de vergelijking gemaakt met het vochtgehalte dat door oppervlaktegewogen optelling van de vochtgehaltes van de samenstellende delen bekomen wordt. Hiermee kan aangeduid worden hoe groot de extra instroom ten gevolge van de zijdelingse bevochtiging door de mortel of baksteen is.

De relevante grafieken bevinden zich in annex I.

De grafieken waarop zowel metingen, simulaties als berekeningen te zien zijn laten toe de invloed van scheuren en interfaceweerstand verder te kwantificeren. Voor de Atinea-zandmortel combinatie bedraagt het verschil tussen simulatie en meting na 336uur $29,2 \text{ kg/m}^3$, wat ongeveer 11,3% van de gemeten waarde is. Voor de Atinea-zavel combinatie wordt een verschil gevonden van 8,48% na 336uur, de leder-zand en leder-zavel combinatie leveren respectievelijk 12,39% en 13,47% op.

De grafiek die het verschil toont tussen de gevonden vochtgehaltes uit de simulatie en uit de berekende waarde laat zien hoe groot de zijdelingse bevochtiging van de materialen op elkaar is. Voor de Atinea en de Leder combinaties wordt binnen 336uur de vrije waterverzadiging bereikt, hierdoor zijn beide materialen capillair verzadigd en kan er dus geen uitwisseling tussen beide materialen optreden, de grafieken worden voor deze gevallen dan ook nul na verzadiging.

De grafieken die info verschaffen over de verschillen tussen meting-simulatie en meting-berekeningen geven in essentie hetzelfde weer en geven ook info over het nog te overbruggen verschil met de proeven in de simulaties.

Deze waarden liggen in lijn met wat uit de proeven bepaald is onder punt 8.2.1.7, namelijk dat de gecombineerde invloed van scheuren, interfaceweerstand, zijdelingse beïnvloeding en nazuiging circa 10 a 15% bedraagt.

8.2.2.4. *Simulatie van de interfaceweerstand.*

In de literatuurstudie is er reeds sprake van de modellering van interfaceweerstand: er worden 4 manieren aangereikt. Een eerste manier is om te werken met een continuüaanpak waarbij het effect dat de interfaceweerstand heeft globaal in rekening wordt gebracht, deze aanpak is hier echter irrelevant aangezien het precieze gedrag ter hoogte van het raakvlak mortel-baksteen beschouwd wordt. De aanpak van Gandhi [40] is evenmin van toepassing: zijn toepassing is vooral gericht op verticale voegen bij een wandopbouw specifiek voor Wales. De manieren die Krus en Holm [39], en Holm en Künzel [34] uitwerkten zijn wel toepasbaar.

Krus en Holm [39] en Holm en Künzel [34] brengen deze weerstand in rekening door ter plaatse van de mortelvoeg een 1mm dikke mortelzone in te brengen die in haar capillaire transport coëfficiënten een vermindering met factor 200 heeft. Aldus wordt een zone gevormd die veel trager het vocht zal transporteren en bijgevolg als een weerstand optreedt.

Derluyn [37] geeft, zoals in de literatuurstudie vermeld, voor de interfaceweerstand zowel een formule als gemeten waarden.

$$R_{IF} = \frac{\Delta p_c}{g_{IF}}$$

Met

R_{IF} de weerstandswaarde.

g_{IF} de waterstroom over de interface.

Δp_c de sprong in capillaire druk over de materiaalgrens.

Daarnaast werd door Janssen, Derluyn en Carmeliet [62] uit proeven afgeleid dat de volledige dikte van de mortelvoeg een lagere porositeit en een lagere permeabiliteit heeft dan niet gemetste mortelstalen vanwege de interactie die optreedt tussen baksteen en mortel tijdens het metselprocedé en de mortelbinding waarbij de volledige voeg gecompacteerd en onderworpen wordt aan de vochtuitwisseling tussen mortel en baksteen.

Binnen WUFI kan met de lagere permeabiliteit rekening worden gehouden door de vloeibare transport coëfficiënten te wijzigen. Wijzigingen in de porositeit kunnen rechtstreeks ingebracht worden.

Verdere uitwerking van de formule voor de overgangsweerstand geeft:

$$g_{IF} = \frac{\Delta p_c}{R_{IF}}$$

$$\Leftrightarrow g_w + g_v = \frac{P_{K1} - P_{K2}}{R_{IF}}$$

Met

g_w de waterstroom over de grens ten gevolge van vloeibaar water.

g_v de waterstroom over de grens ten gevolge van waterdamp.

P_k de capillaire druk in respectievelijk materiaal 1 en materiaal 2.

Stellen we dat de stroming ten gevolge van waterdamp gering is dan krijgen we na toepassen van de formule van Kelvin, gerechtigd doordat deze ook voor de capillaire zone geldt[6], de volgende vergelijking:

$$g_w = \frac{\rho_w \cdot R_D \cdot \left(\left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_1 - \left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_2 \right)}{R_{IF}}$$

En met [6]:

$$g_w = -D_\varphi \cdot \nabla \varphi_{1 \rightarrow 2}$$

$$D_\varphi = D_w \cdot \frac{dw}{d\varphi}$$

Met

ρ_w [kg/m³] de dichtheid van water.

R_D [J/kg K] de gasconstante voor waterdamp.

T [K] de temperatuur in Kelvin.

φ [-] de relatieve vochtigheid.

D_φ [kg/ms] de vloeibare geleiding coëfficiënt.

D_w [m²/s] de capillaire transport coëfficiënt.

$dw/d\varphi$ [kg/m³] de afgeleide van de vochttopslagfunctie.

We vinden voor de invloed die de grensweerstand op de vloeibaar transport coëfficiënt D_w heeft:

$$\Delta D_w = - \frac{\rho_w \cdot R_D \cdot \left(\left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_1 - \left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_2 \right)}{\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi_{1 \rightarrow 2}}{\partial x} \cdot R_{IF}}$$

Het in mindering brengen van deze waarde bij de capillaire transport coëfficiënten voor de volledige mortelvoeg zorgt ervoor dat de grensweerstand in rekening wordt gebracht in de simulaties.

Künzel [6] geeft aan dat de bepaling van D_w via metingen van vochtprofielen gebeurt. Vanwege de grote technologische eisen die hieraan gekoppeld zijn werd voor het computerprogramma WUFI een belangrijke vereenvoudiging ingevoerd: de factor D_w wordt opgedeeld in 2 componenten. Een eerste factor is D_{ws} welke de vloeibaar transport coëfficiënt voor zuiging is, een tweede factor is D_{ww} welke voor de herverdeling van het vocht in het materiaal instaat. In geval er zich vloeibaar water aan het oppervlak bevindt, zoals tijdens een regenbui, wordt D_{ws} gebruikt in de berekening, nadien als het water verwijderd is wordt D_{ww} gebruikt. Binnen de simulaties van de proeven zal het dus D_{ws} zijn die bepalend is, hiervoor mag de D_w waarde welke gevonden wordt met bovenstaande formule gebruikt worden.

Voor de bepaling van D_{ww} wordt een vereenvoudiging gebruikt in het programma: voor de hygroscopische zone wordt de parameter gebaseerd op de waterdampdiffusiefactoren, voor de zone rond de vrije waterverzadiging wordt D_{ww} begroot op een tiende van de waarde voor D_{ws} [6].

Om bovenstaande formule in te voeren in WUFI werden enkele aannames gedaan voor de termen van de vergelijking:

- Voor ρ_w wordt 1000 kg/m^3 gebruikt, voor R_D $461,5 \text{ J/kgK}$, T_1 en T_2 worden allebei 293 K verondersteld.
- De term $\frac{dw}{d\varphi}$ is de afgeleide van de vochttopslagfunctie van de mortel. In de capillaire waterregio, van 75% tot 100% relatieve vochtigheid, is er een sterke toename die ruwweg lineair kan benaderd worden. De gradiënt van deze rechte levert de benodigde waarde.
- Voor de term $\frac{\partial \varphi_{1 \rightarrow 2}}{\partial x}$, dus het verschil in relatieve vochtigheid over een gridelement, wordt aangenomen dat deze klein is naarmate het element meer verzadigd raakt. Voor de beginperiode zal deze echter groot zijn. Als waarde ter plaatse van de grensweerstand wordt uit simulaties gevonden dat het verval over 1 gridelement in de begin periode 23% rv kan bedragen, na langere tijd reduceert deze tot nul. Een waarde van 12% rv lijkt voor dit geval, gebaseerd op simulaties, aangewezen. Deze parameter is uiteraard heel erg afhankelijk van de combinatie van materialen.
- De term $\left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_1 - \left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) \cdot T \right]_2$ levert een logaritmische functie die voor de capillaire regio, de zone tussen 75 en 100 procent rv, negatief is. Voortgebouwd wordt op de veronderstelling dat de variatie in de relatieve vochtigheid over een gridelement erg klein is, de variatie op de oplossingen van deze vergelijking voor de relatieve vochtigheden tussen 75% en 100% is dan erg klein: de precieze bepaling van de heersende relatieve vochtigheid is bijgevolg van minder belang. Veiligheidshalve wordt in de simulatie een relatieve vochtigheid van 92% aangenomen voor φ_1 met een verschil ten opzichte van φ_2 van 12% relatieve vochtigheid, gebaseerd op het hierboven aangenomen verschil in RV over 1 gridelement.

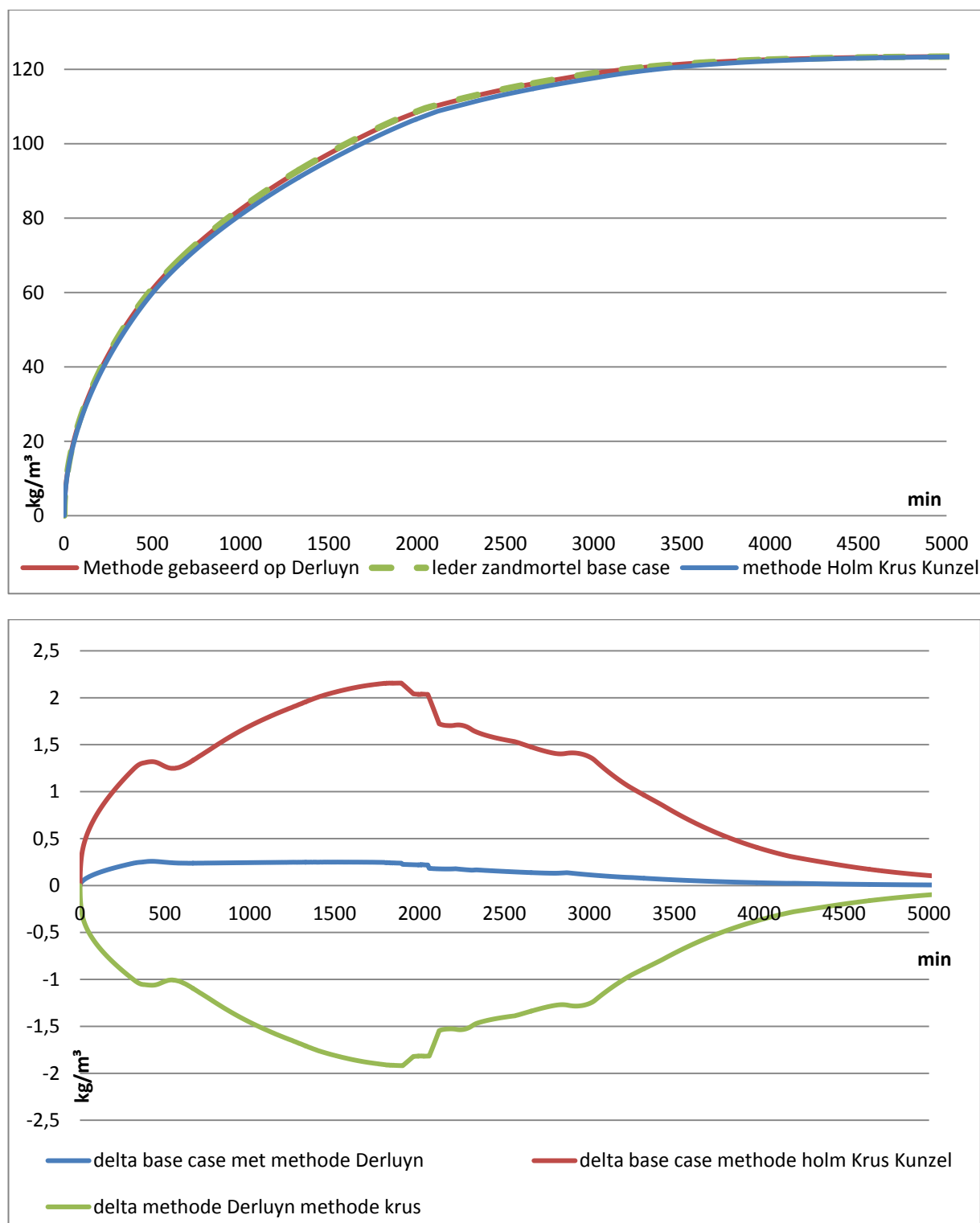
Voortbouwend op het werk van Derluyn[37] nemen we als overgangswaarde voor mortel dat tussen bevochtigde stenen gebonden is de waarde van $1,25 \cdot 10^{10} \text{ m/s}$. Uit het zelfde onderzoek blijkt ook dat de porositeit van de mortel met 15,7% daalt. De bepaling van deze waarden gebeurde op een baksteen met waterabsorptiecoëfficiënt $0,116 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$, wat weliswaar afwijkt van de waterabsorptiecoëfficiënten van de door ons gebruikte bakstenen.

Voor de simulatie volgens deze methode werden volgende parameters gebruikt:

Combinatie	W (kg/m ³)	D _{ws} (m ² /s)	D _{ww} (m ² /s)	Porositeit
Leder - Zandmortel	68,88	$9,9 \cdot 10^{-9}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	0,275661
	197,66	$8,6928227 \cdot 10^{-8}$	$8,6928227 \cdot 10^{-9}$	

Simulatie volgens de methode van Krus en Holm, en Holm en Künzel, en bovenstaande methode gebaseerd op de waarden gevonden door Derluyn levert voor beide een lager vochtgehalte tijdens de capillaire opzuiging dan ten opzichte van het referentiegeval. Kijken we naar het onderlinge verschil tussen beide manieren dan zien we dat de methode van Holm, Krus en Künzel een lager vochtgehalte oplevert dan de methode gebaseerd op Derluyn. De verschillen beperken zich echter in

grootteorde tot enkele procenten. Naarmate de tijd vordert wordt het effect van de grensweerstand gereduceerd tot nul, wat correct is aangezien er dan het punt van de vrije waterverzadiging w_f is bereikt.



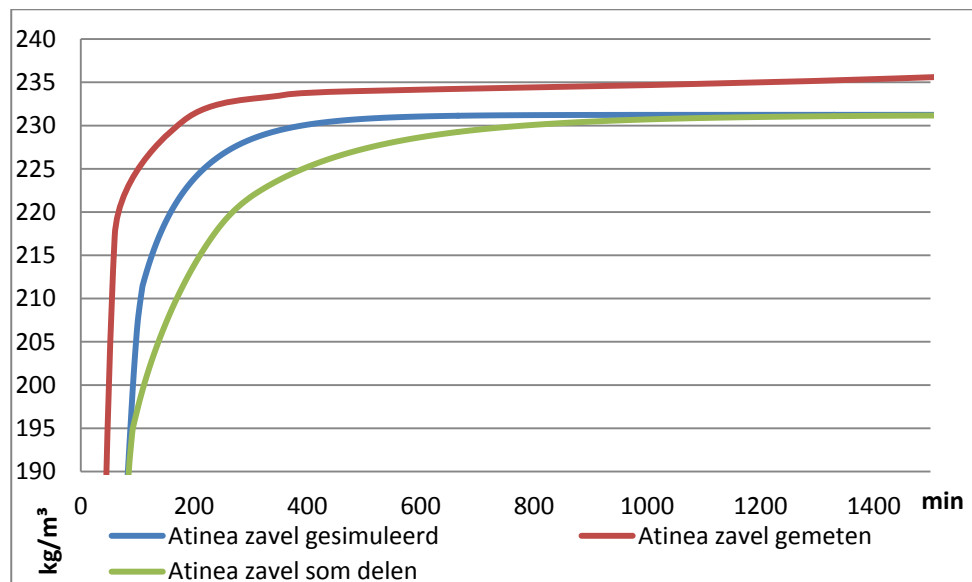
Figuur 25: resultaten van de simulatie van de interfaceweerstand. De bovenste grafiek bevat een vergelijking van de verschillende methodes, de onderste geeft aan hoe de verschillen onderling zijn.

Beide methoden lijken geschikt om de grensweerstand te simuleren, indien voldoende data bekend is over de grensweerstand en over de gebruikte materialen ter bepaling ervan gaat de voorkeur uit naar de methode volgens Derluyn aangezien deze op gemeten waarden gestoeld is.

Globaal genomen is het effect van de grensweerstand beperkt tot 0,5 a 2 percent afhankelijk van de gebruikte methode.

8.2.2.5. Simulatie van de effecten van scheuren en nazuiging.

De hierboven gevonden waarden gaven een verschil aan tussen de metingen en de simulaties van de gehelen van 10% a 15% na 336 uur. Bekijken we dit verschil meer in detail dan zien we dat voor het bereiken van de vrije waterverzadiging dit verschil te wijten is aan scheuren die een extra instroom veroorzaken in de gemetste gehelen, eens de vrije waterverzadiging bereikt treedt in de metingen het fenomeen van de nazuiging op.



Figuur 26: detail van het verloop van de gevonden vochtgehalten voor de metingen, simulaties en de berekeningen van de Atinea zavelmortel combinatie. Er is duidelijk het verschil tussen simulatie en berekening te zien welke veroorzaakt wordt door de interactie van het vochtgehalte in de mortel en baksteen (zijdelingse bevochtiging). Het verschil tussen de simulatie en de meting is te wijten aan de invloed van scheuren (links) en het nazuigingseffect (uiterst rechts).

Bijgevolg is het voor de simulaties wenselijk beide fenomenen op te nemen: de invloed van scheuren zal zorgen voor een snellere opname van het water en een groter vochtgehalte bij het punt van de vrije waterverzadiging door de iets grotere porositeit. Het nazuigingseffect zal ervoor zorgen dat na dit punt een groter vochtgehalte bereikt wordt.

Bekijken we de vergelijkingen van de metingen met de simulaties in annex I, dan zien we dat het vooral de combinaties met Atinea bakstenen zijn die invloed van scheuren lijken te ondervinden, in de literatuurstudie werd reeds vermeld dat sterk absorberende stenen gevoeliger zijn voor scheuren. Bij de Leder combinaties overschat de simulatie de metingen, waarschijnlijk door meetfouten en een beter contact tussen mortel en baksteen. Het nazuigingseffect wordt bij alle combinaties waargenomen.

Simulatie van scheuren.

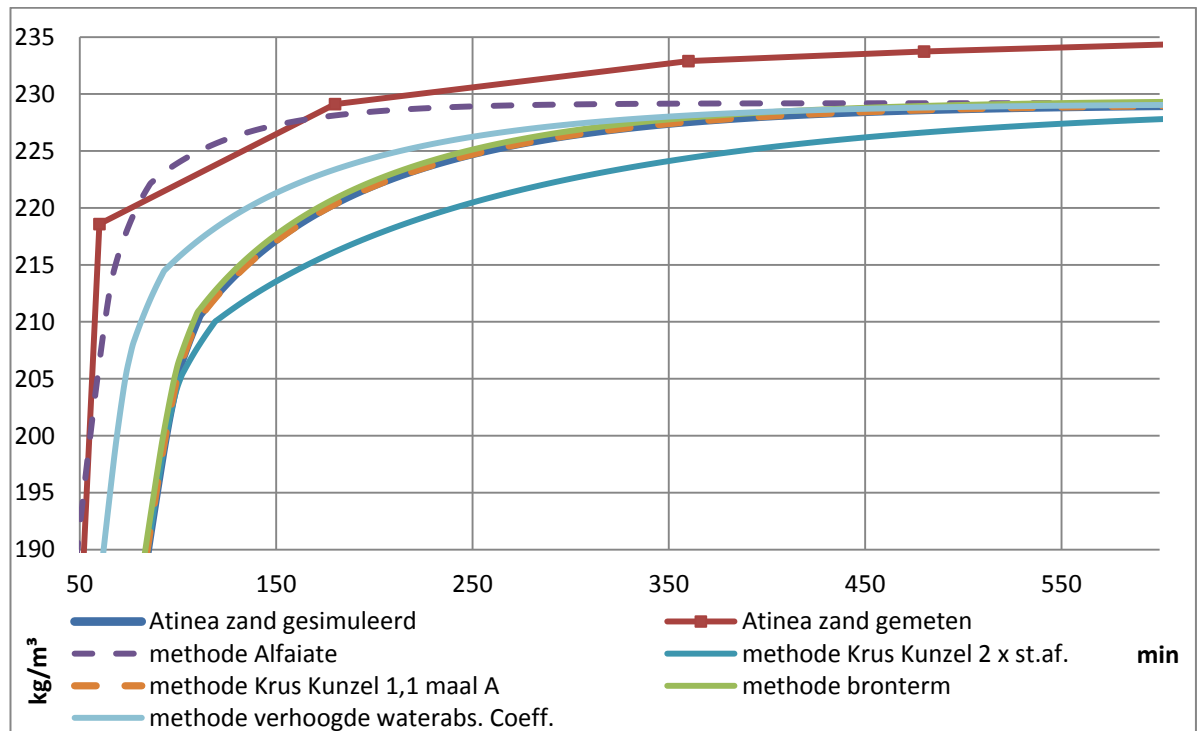
In de literatuurstudie onder punt 5.2.1 worden enkele methodes aangehaald volgens dewelke scheuren kunnen gemodelleerd worden. Het onderzoek naar scheuren werd uitgevoerd op de Atinea-zandmortel combinatie welke erg zuigend is en waar bijgevolg de interfaceweerstand een geringere rol speelt op het totale vochtgehalte op een tijdstip t .

De methode voorgesteld door Alfaiate [43] werd gesimuleerd door 2 leemtes te laten ter hoogte van de raakvlakken mortel-baksteen van 44mm hoog en 0,1mm breed. Aldus wordt de door Roels [44] beproefde breedte gekozen die het meeste waterinfiltratie gaf en worden de scheuren tot de helft van de hoogte van het element gerekend. Op de oppervlakken van deze scheur werd dezelfde randconditie toegepast als op het oppervlak in contact met water. Een belangrijke opmerking bij deze methode is dat ze enerzijds ze geen rekening houdt met het erg lokale aspect van scheuren en er vanuit gaat dat de scheuren onmiddellijk volledig met water zijn gevuld.

Roels[35] stelt voor om uit te gaan van een continuïteitsaanpak en de porositeit van het gescheurde materiaal aan te passen. Ook zou er lokaal kunnen gewerkt worden met andere porositeiten. Zoals uit de gevoeligheidsanalyse reeds gebleken is heeft de porositeit weinig impact binnen WUFI voor deze toepassing, het is eerder het vrije waterverzadigingswatergehalte w_f dat zowel bij de factor voor de zuiging, D_{ws} , als voor het totaal geabsorbeerde water van belang is. Deze methode werd bijgevolg niet gemodelleerd.

De methode die Krus en Künzle [45] voorstellen om de waterabsorptiecoëfficiënt lokaal te wijzigen is wel relevant: de literatuurstudie vermeldde reeds onderzoek door Roels [44] waaruit bleek dat de stijghoogte van het waterfront ter plaatse van de scheur sterk gerelateerd is aan de waterabsorptiecoëfficiënt en de instroomcapaciteit van de scheur. Een concrete waterabsorptiecoëfficiënt werd echter niet gegeven. Als waterabsorptiecoëfficiënt werd gebruik gemaakt voor een eerste simulatie van de gemiddelde waterabsorptiecoëfficiënt uit de proeven verhoogd met 2 maal de standaardafwijking. Deze werd net als bij Alfaiate ingebracht ter plaatse van het raakvlak mortel-baksteen over een breedte van 0,1mm en een hoogte van 44mm, de helft van het element. Voor een tweede simulatie werd de waterabsorptiecoëfficiënt met 10 procent verhoogt, gebaseerd op de 10 a 15 procent invloed van de scheuren en zijdelingse bevochtiging gevonden uit de proeven, en toegepast op de volledige mortelvoeg. Via iteratie werd ondervonden dat de invloed van scheuren voor de Atinea elementen hoger ligt, in de grafiek is een invloed van 15% gebruikt.

Een andere methode om met de invloed van scheuren om te gaan is een bronterm te introduceren die ter hoogte van het mortel-baksteen raakvlak een extra instroom genereert. Voor de modellering werd gekozen 2 brontermen van 0,1mm dik te nemen die tot de helft van het element reiken. Beide brontermen worden gemodelleerd om te zorgen dat een zelfde watertoevoer gebeurt als aan het oppervlak in contact met het water. De zo binnen gebrachte overdaad aan water zal binnen de berekening door de vloeibaar transport coëfficiënten opgevangen worden.



Figuur 27: resultaten van de simulaties van de scheuren. Vanwege het beperkte aantal meetpunten is de verbindende lijn erg ruw, in principe is een afronding te verwachten.

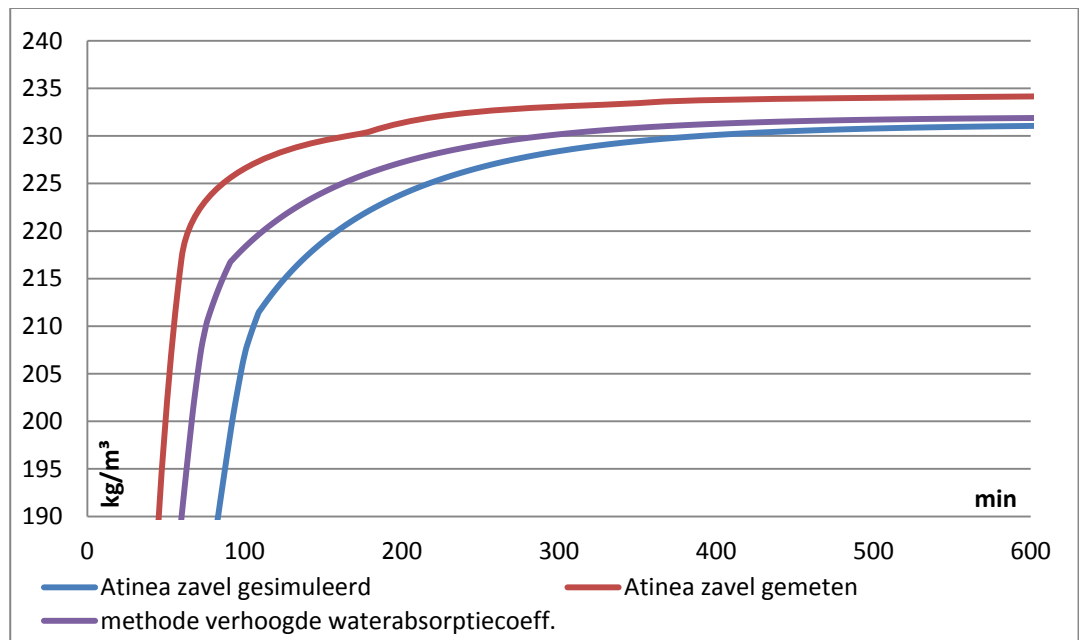
Bij analyse van de resultaten is te zien dat de methode voorgesteld door Alfaiate de beste benadering ten opzichte van de gemeten waarden levert. Dit is echter toevallig: doordat er geen enkele manier is om de grootte van of hoeveelheid aan scheuren in te geven in de z-richting is deze methode onbetrouwbaar, het resultaat wordt vooral bekomen doordat een extra aan wateroppervlak blootgestelde oppervlakte wordt ingegeven. De methode met de brontermen kan hieraan uitkomst bieden indien exact bekend is hoeveel vocht langs de scheuren binnendringt. De overige simulaties blijven erg dicht bij de oorspronkelijke simulatie zonder veel rekenschap te geven aan de invloed van scheuren. De methode gebaseerd op Krus en Künzel waarbij de waterabsorptiecoëfficiënt met 2 maal de standaardafwijking wordt verhoogd levert geen bevredigend resultaat, dit doordat slechts heel lokaal een hogere waterabsorptiecoëfficiënt gedefinieerd wordt.

Naast de eerder aangehaalde opmerkingen is een belangrijk probleem van de methode voorgesteld door Alfaiate en de methode met de brontermen dat deze erg arbeidintensief zijn aangezien ze de exacte modellering van de scheuren voorstellen. Een methode die enkel een wijziging in de globale materiaalkarakteristieken van de mortelvoeg inhoudt is meer aangewezen voor het in rekening brengen van scheuren in grotere elementen.

Vanuit een fysisch oogpunt kan gesteld worden dat de optredende scheuren een invloed uitoefenen op de porositeit van het geheel, een kleine impact op de vrije waterverzadiging w_f door de impact op de porositeit, en een grotere impact op de waterabsorptiecoëfficiënt aangezien sneller meer water zal geabsorbeerd worden.

Voor de Atinea-zand combinatie is bekend dat het punt waarop het capillaire vochtgehalte, w_f , bereikt wordt na circa 180 minuten optreedt. De kleine stijging in het watergehalte w_f kan hierdoor makkelijk bepaald worden aangezien er vlakbij een meetpunt ligt op 3 uur. Uit de gevoeligheidsanalyse bleek reeds dat de porositeit van verwaarloosbaar belang is voor de simulaties. Uit de proeven werd bepaald dat de impact van scheuren, grensweerstand en zijdelingse bevochtiging van het ene element op het andere circa 10 tot 15% bedraagt.

Simulatie waarbij de waterabsorptiecoëfficiënt van zowel baksteen als mortel met 15% verhoogd werden, gaven een aanzienlijke verbetering in de benadering van het watergehalte uit de proeven voor de Atinea – zandmortel combinaties. Voor de Atinea-zavelmortel combinaties werd eveneens een goede benadering bekomen, de maximale afwijking was 12,4%, op het meetpunt van 1 uur. Deze afwijking is vooral te wijten aan het gebrek aan precieze info over het aantal scheuren, het beperkte aantal meetpunten en mogelijke meetfouten. Indien meer info bekend is over de stijging van de waterabsorptiecoëfficiënt kan een veel betere benadering verkregen worden aangezien dit de bepalende parameter is.



Figuur 28: resultaten voor de Atinea-zavel combinatie.

De modellering van geïsoleerde scheuren, vb. in gehydrofobeerde wanden, is binnen WUFI van minder belang: bij aanraking van een materiaal met vloeibaar water wordt door WUFI verondersteld dat het volledige materiaal meezuigt en worden voor alle gridelementen de vloeibare transportcoëfficiënten voor zuiging gebruikt. Hydrofoberingen maken slecht een kleine zone uit van de diepte van de wand waar het water snel doorheen gaat via scheuren die meestal dieper reiken: vanwege deze beperkte diepte mag verondersteld worden dat heel snel het achterliggende materiaal bereikt wordt. In de simulaties kan daardoor gewerkt worden met bovenstaande methode waarbij de waterabsorptiecoëfficiënten verhoogd worden, en waarbij plaatselijk over de breedte van een scheur geen hydrofobering wordt aangebracht. Simulaties door Krus en Künzle [45] die op dit principe berusten geven goede overeenkomsten met gemeten waarden.

Nazuigingseffect.

Het nazuigingseffect zal eens het vrije watergehalte bereikt is voor aanzienlijke afwijkingen zorgen: in de literatuurstudie werd al een verschil van 15% in vochtgehalte gemeld door Künzel [6]. Vooral bij de simulatie van situaties in lange termijn contact met water kan dit effect dus belangrijk worden. WUFI houdt met dit effect geen rekening en zal na verloop van tijd steeds het vrije watergehalte als bovengrens bereiken. Om het nazuigingseffect toch te bereiken kan op 2 manieren te werk worden gegaan: indien info bekend is over de duur van het nazuigingseffect tot volledige verzadiging kan er iteratief gewerkt worden waarbij voor elke tijdstap het vrije watergehalte iets verhoogd wordt tot de maximale porositeit wordt bereikt. Een tweede manier is uitgaande van de proefmetingen te veronderstellen dat het nazuigingseffect lineair kan benaderd worden, aan de hand van het eindresultaat van de metingen kan dan een rechte opgesteld worden tussen het punt van vrije waterverzadiging en deze meting. Het resultaat is dan de samengestelde kromme waarbij voor het punt van vrije waterverzadiging gewerkt wordt met de simulatie door WUFI aangereikt, voorbij dit punt met de opgestelde rechte.

Door de materiaalafhankelijkheid van dit effect is het echter moeilijk om in WUFI een manier te vinden die niet uitgaat van meetresultaten. Voor korte termijn bevochtigingen is de invloed van dit effect verwaarloosbaar.

8.2.2.6. Simulatie van de proeven in WUFI 2D: case 2.

Combineren we de 3 bovenstaande effecten dan kan een belangrijke correctie op de in punt 8.2.2.3 vermelde case 1 gemaakt worden.

De effecten kunnen op een eenvoudige manier gecombineerd worden in WUFI door gebruik te maken van de directionaliteit die met elk van hen samenhangt: de grensweerstand werkt in de loodrechte richting op de mortel-baksteen grens, scheuren reiken meestal in de diepte, dus evenwijdig aan de mortel-baksteen grens. De grensweerstand heeft nog een extra component in de evenwijdige richting: door de compressie en verdensing van de mortelvoeg zal in principe ook in deze richting een weerstand optreden.

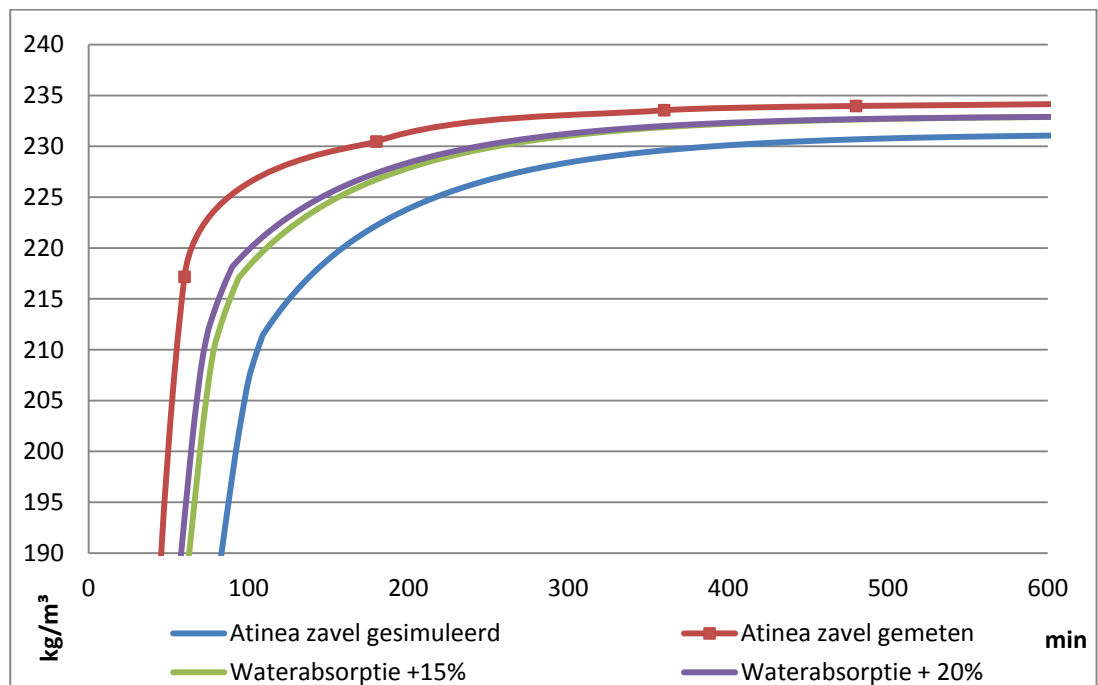
Doordat zowel voor de scheuren als voor de grensweerstand gebruikt gemaakt wordt van het volledige materiaal, i.p.v. met lokaal geïnitieerde scheuren, kan ook op een eenvoudige manier dit effect in grotere elementen opgenomen worden. Voor de scheuren komt dit vooral doordat in WUFI bij aanraking van een materiaal met een vloeibare waterbron het volledige materiaal de vloeibaar transport parameter voor zuiging D_{ws} gebruikt wordt welke 10 maal efficiënter is dan de parameter voor herverdeling D_{ww} zoals eerder al besproken werd. Hierdoor is er geen nood om aparte scheuren te modelleren en kan toch een goed resultaat bekomen worden [45]. Voor de grensweerstand berust dit op vaststellingen door Janssen [62] dat de volledige mortelvoeg gecompacteerd wordt en de grensweerstand over deze volledige mortelvoeg werkt en niet enkel ter hoogte van de grensvlakken. Er kunnen bijgevolg kleine wijzigingen aan de materiaaleigenschappen aangebracht worden i.p.v. arbeidintensieve modelleringen van fysieke scheuren.

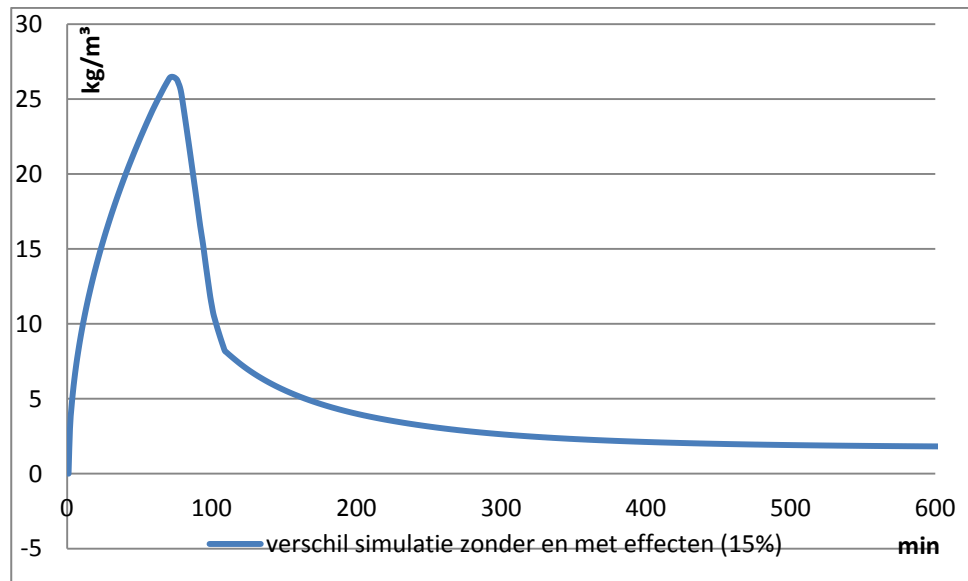
In deze case wordt de Atinea-zavelmortel combinatie bekeken aangezien deze duidelijk gevoelig is aan de besproken effecten van scheurvorming, grensweerstand en nazuigingseffect. De Atinea-zand combinatie vertoont een gelijkaardig gedrag en wordt hier niet verder besproken.

Voor de scheuren nemen we aan dat hun effect 15% bedraagt. De effecten van de grensweerstand kunnen op 2 manieren bepaald worden. Voor de zavelmortels worden in onderstaande tabel de waarden gegeven gevonden via de methode gebaseerd op Derluyn. Zoals reeds eerder aangehaald is de grootte van de grensweerstand erg afhankelijk van de combinaties aangezien dit het verschil in relatieve vochtigheid over de gridelementen zal bepalen. Ook de methode voorgesteld door Krus werd toegepast.

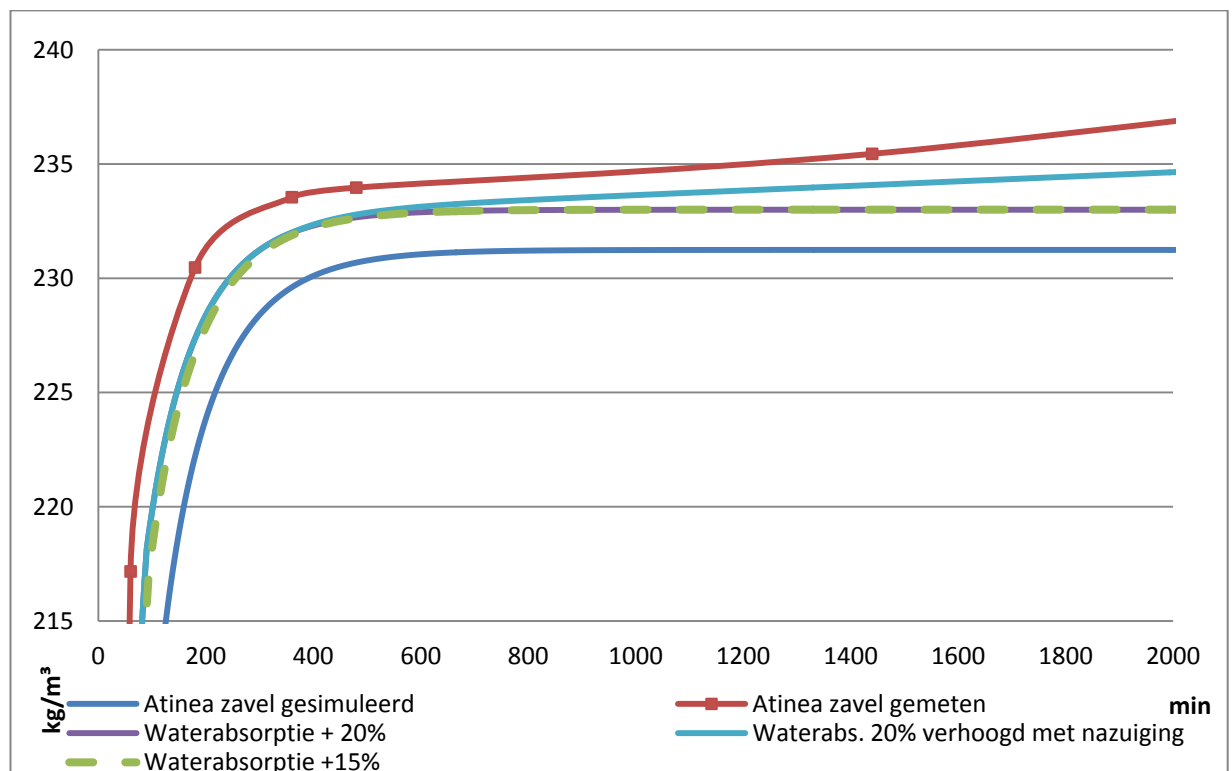
Combinatie	W (kg/m ³)	D _{ws} (m ² /s)	D _{ww} (m ² /s)	Porositeit
Atinea -Zavelmortel	64,19	$9,9 \cdot 10^{-9}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	0,275661
	221,72	$1,1772907 \cdot 10^{-6}$	$1,1772907 \cdot 10^{-7}$	

Zoals hierboven reeds aangehaald zal een aanzienlijke verbetering verkregen worden door de invloed van scheuren op te nemen in het model. Aangezien de Atinea bakstenen een erg hoge waterabsorptiecoëfficiënt hebben heeft het effect van de grensweerstand een kleine invloed, er zal namelijk weinig stroming gebeuren over het element omdat het front in de mortel en de bakstenen gelijkmatig voortschrijdt en quasi gelijk blijft. Zoals reeds eerder vermeld werd de gecombineerde invloed van scheuren, weerstand en zijdelingse bevochtiging bepaald op Leder combinaties. Bij deze combinaties spelen scheuren echter een kleine rol en zijn het vooral de grensweerstand en zijdelingse bevochtiging die bepalend zijn. Iteratief werd gevonden dat voor de Atinea combinaties een grotere invloed door scheuren optreedt in de eerste uren, in de grafiek is er ook een resultaat waarbij de waterabsorptiecoëfficiënt met 20% werd verhoogd.





Toepassen van het nazuigingseffect levert een extra verbetering van het model. Na ongeveer 3 uur zal het punt van vrije waterverzadiging bereikt worden. Het nazuigingseffect wordt vanaf dit punt ingerekend. In principe is dit een vereenvoudiging: de poriën die zich het dichtste bij het wateroppervlak bevinden zullen veel sneller w_f bereiken en het nazuigingseffect zal daar dus ook veel vroeger optreden. Doordat de methode werd toegepast die een lineair verloop veronderstelt is natuurlijk het resultaat erg gevoelig aan meetfouten in het watergehalte. Voor de korte termijn tot enkele dagen wordt echter een goede benadering gevonden. Voor langere termijnen is meer gedetailleerde info vereist over het verloop van het nazuigingseffect.



Figuur 29: resultaten voor de Atinea-zavel combinatie. Het resultaat waarbij ook nazuiging werd ingerekend geeft de beste overeenstemming.

Bij de gehelen gebaseerd op Leder bakstenen ligt de benadering moeilijker: door de erg kleine waterabsorpties bestaat er een grotere onzekerheid over de meetwaarden, daarnaast lijkt het ook dat de invloed van scheuren en zijdelingse bevochtiging door de invloed die de grensweerstand uitoefent gecompenseerd worden, wat zich uit in de eerder behandelde erg goede overeenkomst tussen de voorspelde berekende waarden en de gemeten waarden. Gesteld kan worden dat de bepalende effecten voor het vochtgedrag in de Leder combinaties de grensweerstand en de nazuiging zijn. Hier wordt eerst dieper ingegaan op de grensweerstand bij Leder-zavel gehelen. Bij het deel over de modellering van de grensweerstand in punt 8.2.2.4 werden 2 methodes aangereikt ter bepaling van de grensweerstand: een methode gebaseerd op de waarde voor de grensweerstand gevonden door Derluyn en een methode gebaseerd op Krus waarbij de capillaire transportcoëfficiënten door 200 worden gedeeld.

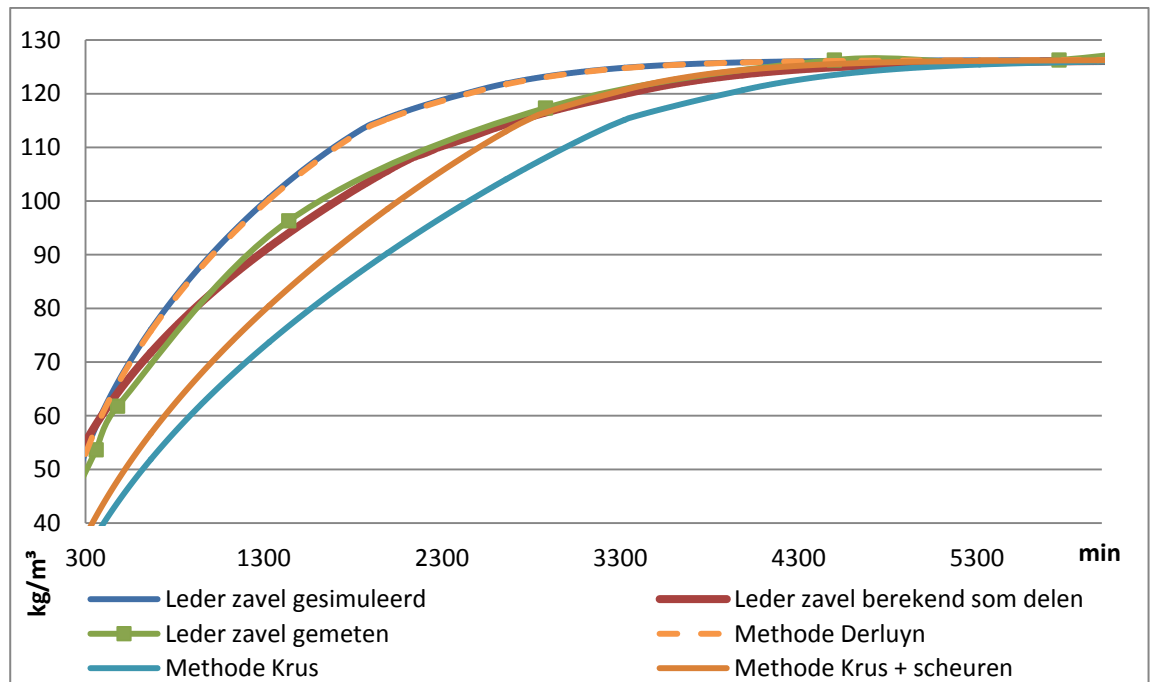
Voor de methode gebaseerd op Derluyn werd uitgegaan van een verschil in relatieve vochtigheid over de gridelementen ter plaatse van de materiaalgrens van 8%, gebaseerd op simulaties waarbij geen weerstand ingebracht werd. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gebruikte waarden voor de zavelmortel.

Combinatie	W (kg/m ³)	D _{ws} (m ² /s)	D _{ww} (m ² /s)	Porositeit
Leder -Zavelmortel	64,19	$9,9 \cdot 10^{-9}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	0,275661
	221,72	$1,18306 \cdot 10^{-6}$	$1,18306 \cdot 10^{-7}$	

Kijken we naar de resultaten dan zien we dat de methode gebaseerd op Derluyn quasi geen verbetering levert. Dit wordt meer dan waarschijnlijk veroorzaakt door de gebruikte waarde van $1,25 \cdot 10^{10}$ m/s voor de interfaceweerstand welke door Derluyn gevonden werd op een gemetste combinatie waarvan de stenen een waterabsorptiecoëfficiënt van $0,116 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0,5}$ hadden. De Leder bakstenen vertonen echter een waterabsorptiecoëfficiënt van $0,021 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0,5}$ wat een aanzienlijk verschil bedraagt. Ook de mortels zijn significant verschillend: $0,125 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0,5}$ voor de zavelmortel, $0,015 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0,5}$ voor de mortel gebruikt door Derluyn. Om de methode gebaseerd op Derluyn correct te kunnen toepassen is meer gedetailleerde info vereist over de interfaceweerstand voor dit concrete geval.

De methode gebaseerd op Krus levert dan weer een beter resultaat: er is een duidelijke invloed van de grensweerstand merkbaar. Deze methode ondersteunt ook de these dat zowel scheuren, zijdelingse beïnvloeding als grensweerstand op de combinaties inwerken. Simulatie waarbij de invloed van scheuren, iteratief bepaald op 10%, ook werd opgenomen leverde een aanzienlijke verbetering.

Opgemerkt dient te worden dat door gebrek aan exacte waarden voor de waarde van de grensweerstand en het aantal scheuren voor dit geval slechts een goede benadering mogelijk is.



Figuur 30: resultaten van de simulatie van een Leder-zavel combinatie. Doordat er geen grensweerstand beschikbaar is geeft de methode gebaseerd op Derluyn slechts een kleine grensweerstand , in de grafiek te zien door de nabijheid bij de initiële simulatie.

8.3. Case studie: vorstbestendigheid van een gehydrofobeerde wand.

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de modellering van hydrofoberingen binnen WUFI om deze vervolgens toe te passen op een praktisch voorbeeld, namelijk de vorstbestendigheid van een gehydrofobeerde wand. Op deze manier wordt gekeken naar de nauwkeurigheid van WUFI bij korte termijn belastingen, na het voorgaande deel over lange termijn vochtbelastingen.

De case van een vorstbelasting van een gehydrofobeerde wand is interessant aangezien door de hydrofobering een belangrijke wijziging in de eigenschappen van het metselwerk wordt gecreëerd: de wand zal veel minder water opnemen, maar ook gevoelig trager uitdrogen. Deze wijzigingen kunnen in combinatie met vaak optredende scheuren belangrijke gevolg hebben voor de duurzaamheid van de wand indien een slechte keuze van hydrofobering gebeurt. De mogelijkheid hebben om dit risico met simulaties te kunnen inschatten kan bijgevolg sterk bijdragen aan het voorkomen van deze schadegevallen.

8.3.1. Modelleren van een hydrofobering in WUFI.

Hydrofoberingen hebben als bedoeling oppervlakken waterwerend te maken waardoor deze een lagere vochtopname hebben bij blootstelling aan gelijke vochtbelasting. Dit wordt bereikt door primair de capillaire waterabsorptie sterk te verhinderen en de droging door waterdampdiffusie zo ongehinderd mogelijk te laten.

De simulaties worden gebaseerd op de publicatie van het WTCB[46]: uitgegaan wordt van een Atinea baksteen in capillair contact met water, in principe dus een herhaling van de capillaire waterabsorptieproef maar nu met een hydrofobeerlaag aangebracht. De initiële condities van de materialen worden 20°C en 55% relatieve vochtigheid veronderstelt. De zijden niet in contact met water worden bekleed met een Bitumen afdichting met Aluminium kern met $\mu=1000$. De simulaties worden over 50 uur uitgevoerd in tijdstappen van 60 seconden.

Aangezien voor deze proef de materialen in contact staan met een wateroppervlak is te verwachten dat de bakstenen in massa zullen toenemen onder invloed van zowel capillaire waterabsorptie als diffusie van waterdamp. De doeltreffendheid van de hydrofobering zal gekenmerkt worden door de hoeveelheid geabsorbeerd water t.o.v. de waterabsorptie van het onbehandelde materiaal. Ook de waterdampdiffusie is echter van cruciaal belang: zoals reeds eerder aangehaald mag deze niet te veel stijgen om de uitdroging van de elementen niet te veel te hinderen. Door Künzel [63] [64] werden criteria vastgesteld die aan coatings en pleisters gesteld worden en de maximale verhouding tussen waterabsorptie en dampdiffusieweerstand vastleggen om droging nog mogelijk te maken. Op basis van deze criteria kan de geschiktheid van een hydrofobering op het vlak van diffusieweerstand getoetst worden.

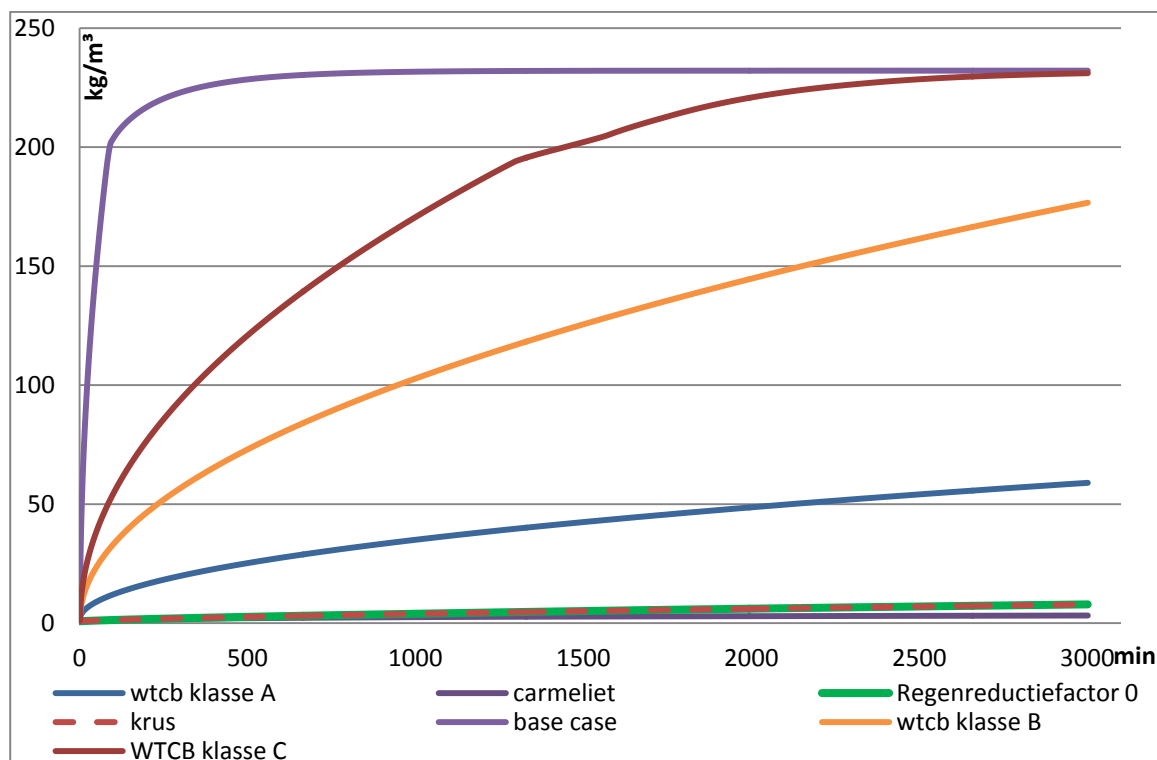
In de literatuurstudie worden onder punt 5.3.1 enkele manieren gegeven waarop hydrofoberingen kunnen gemodelleerd worden binnen het computerprogramma WUFI.

Een eerste methode vertrekt van het idee de waterabsorptiefactor uit te schakelen en de dampdiffusie ongehinderd te laten, aldus wordt een ideale situatie verkregen die in de werkelijkheid niet gehaald wordt.

Een tweede manier is gebaseerd op het werk van Krus et al [45] en gaat uit van de modellering van het geïmpregneerde stuk als een aparte laag. Krus spreekt over een indringdiepte van 2 cm en een verhoging van de dampdiffusieweerstand met 50 procent, de regenreductiefactor aan het oppervlak wordt tot nul gereduceerd.

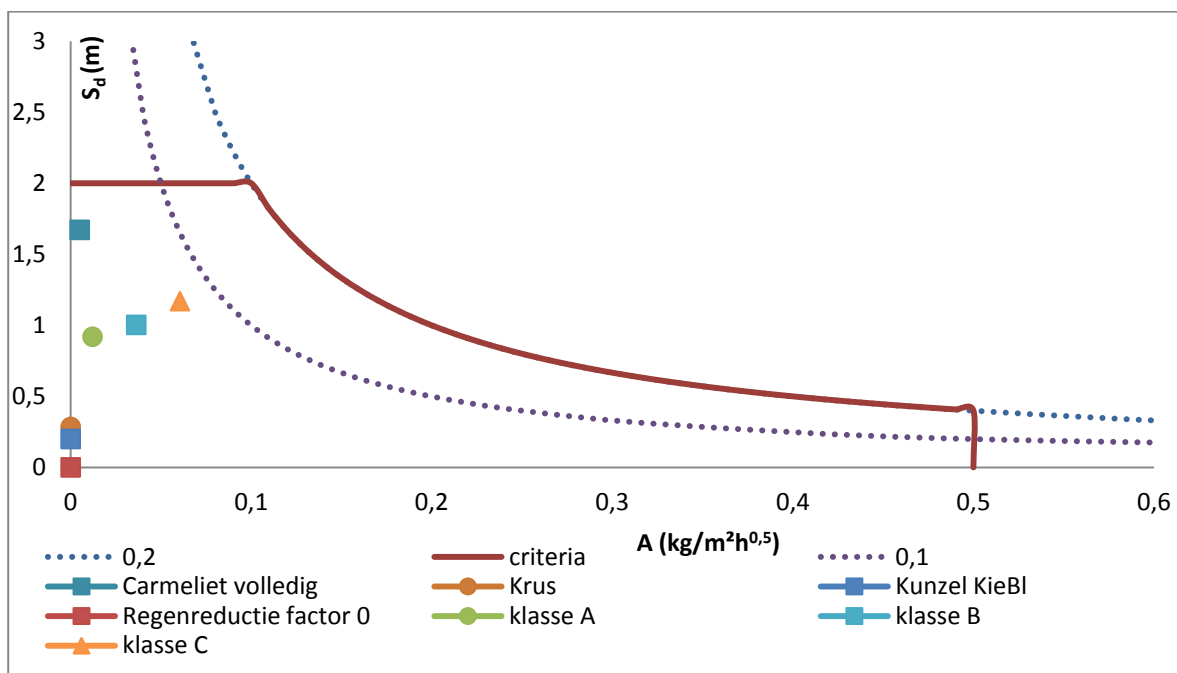
Künzel en Kießl [51] bepaalden de extra diffusieweerstand die een siloxaan impregnatie levert: 0,2m. De door hen beschreven methode bestaat erin de hydrofobering te modelleren in de randcondities door de regenreductiefactor tot nul te reduceren en deze extra diffusieweerstand op te leggen.

Carmeliet [47] [48] [49] geeft nog extra info over de eigenschappen van bakstenen behandeld met alkyl-alkoxyl silanen: uit proeven bleek een baksteen in de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt een reductie met factor 2903 ondergaan te hebben, de dampdiffusieweerstand verhoogde met factor 2. Deze eigenschappen werden gemodelleerd over de volledige baksteen aangezien de proeven ook de waterabsorptiecoëfficiënt over de volledige baksteen gemeten geven.



Figuur 31: resultaten van de simulaties van de hydrofoberingen.

De simulaties die op deze manier uitgevoerd werden geven allemaal erg goede resultaten: er is een erg sterke daling in waterabsorptie ten opzichte van de onbehandelde situatie. Vergelijken we deze resultaten met de klassering opgesteld door het WTCB[46] dan zien we dat de voorgestelde methodes ruim voldoen aan de criteria voor klasse A die slechts een daling in waterabsorptiecoëfficiënt van 95% en een maximale stijging van de dampdiffusieweerstand met 10% vereist, wat in vergelijking met de vaststelling door Carmeliet erg weinig is.



Figuur 32: toetsing van de simulatie wijzen aan de criteria opgesteld door Künzel voor coatings en pleisters.

Vergelijken we deze werkwijzen met de Künzelscriteria dan zien we dat ze allen voldoen, ze voldoen zelfs aan de strengere eis van $A \cdot S_d = 0,1$ [63].

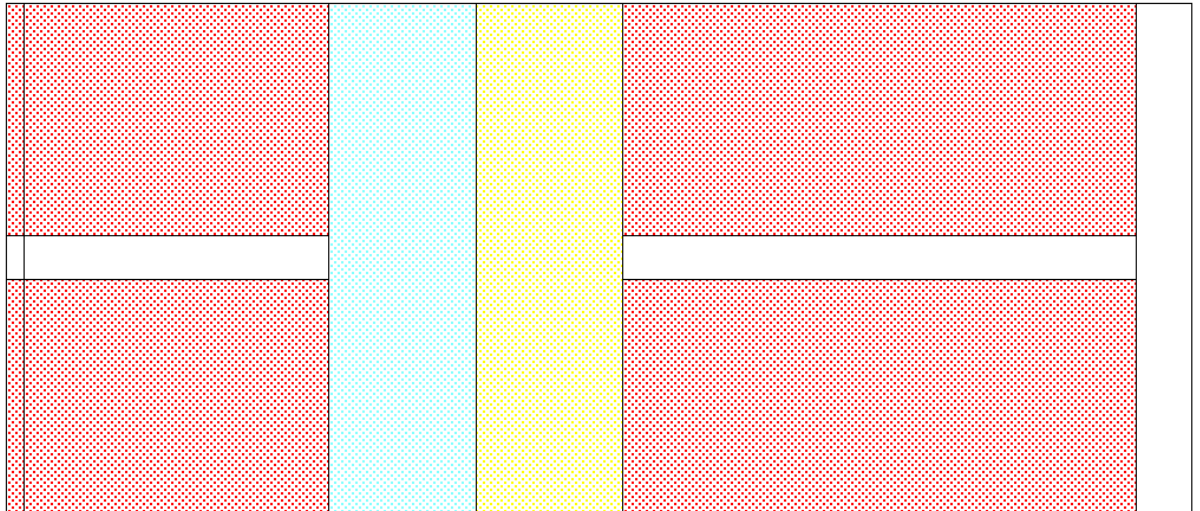
Algemeen kan gesteld worden dat om hydrofoberingen te modelleren er 2 globale manieren zijn om de gewijzigde materiaaleigenschappen op te nemen: op gebied van de randvoorwaarden en op schaal van de materiaaleigenschappen. Indien geen eigenschappen van de hydrofobering gekend zijn en er een beperkte regenbelasting te verwachten is kan op het gebied van de randvoorwaarden gekozen worden de regenreductie factor aan te passen en eventueel een extra diffusieweerstand in te voegen, dit geval is natuurlijk een overschatting. Is nauwkeurigere data gegeven dan kan gekozen worden ofwel de materiaaleigenschappen van het volledige element, dus de diffusieweerstand en de waterabsorptiecoëfficiënt aan te passen, zoals bvb. bij de methode van Carmeliet, of lokaal over de indringdiepte van de hydrofobering een nieuw materiaal te definiëren met aangepaste eigenschappen. Aangezien vooral de mate van polymerisatie in de poriën bepalend is voor de hydrofobe eigenschappen en de mate van waterdampdiffusieweerstandsverhoging is het niet voldoende enkel eigenschappen van het hydrofobeermiddel te kennen maar zijn eigenschappen van het gehydrofobeerde element wenselijk.

8.3.2. Case 3: modelleren van vorstbelasting op een gehydrofobeerde wand.

Zoals reeds eerder aangehaald kan een gebrekkige keuze in hydrofobeermiddel grote gevolgen hebben voor de duurzaamheid van een wand. De keuze in hydrofobeermiddel hoeft echter niet de enige reden te zijn die tot schade kan leiden, ook de aanwezigheid van scheuren die de hydrofobering doorbreken kunnen aanleiding geven tot aanzienlijke schaderisico's. In deze case wordt daarom een waarheidsgetrouwe simulatie gepresenteerd waarin de effecten van de interfaceweerstand en scheuren worden opgenomen, en wordt deze vervolgens afgezet tegen een vereenvoudigde ingave in WUFI waarbij met deze effecten geen rekening wordt gehouden. Op die manier wordt het mogelijk het belang van correcte modellering in WUFI te testen voor korte termijn belastingen.

Voor de simulaties wordt uitgegaan van een wandopbouw bestaande uit binnen en buitenspouwblad, waarvan dit laatste onderworpen wordt aan het test referentiejaar voor Brussel. Omdat warmtestromen de uitkomst zouden kunnen beïnvloeden werd gekozen om het binnenklimaat qua temperatuur gelijk aan het buitenklimaat te nemen. Dit vertegenwoordigt een situatie die overeenstemt met bvb. een gemetste onverwarmde garage die los van de woning staat.

Het buitenspouwblad wordt gebaseerd op de reeds behandelde Atinea bakstenen gecombineerd met zavelmortel. De gebruikte grensweerstand en de invloed van scheuren op de waterabsorptiecoëfficiënt, 15%, werden reeds eerder behandeld. De keuze voor deze combinatie is bewust: door de hoge waterabsorptiecoëfficiënten wordt het mogelijke effect van lekken of scheuren in de hydrofobering sterk uitvergroot. Voor de spouw werd een luchtlag van 4cm gekozen, gevolgd door 4cm EPS isolatie, een binnenspouwblad bestaande uit traditioneel dragend metselwerk en afgewerkt met een pleisterlaag. Een recente studie door Künzl[65] toonde aan dat voor dit soort gevallen luchtlekken door de gebouwschil weinig effect hebben op de vochtthuishouding.



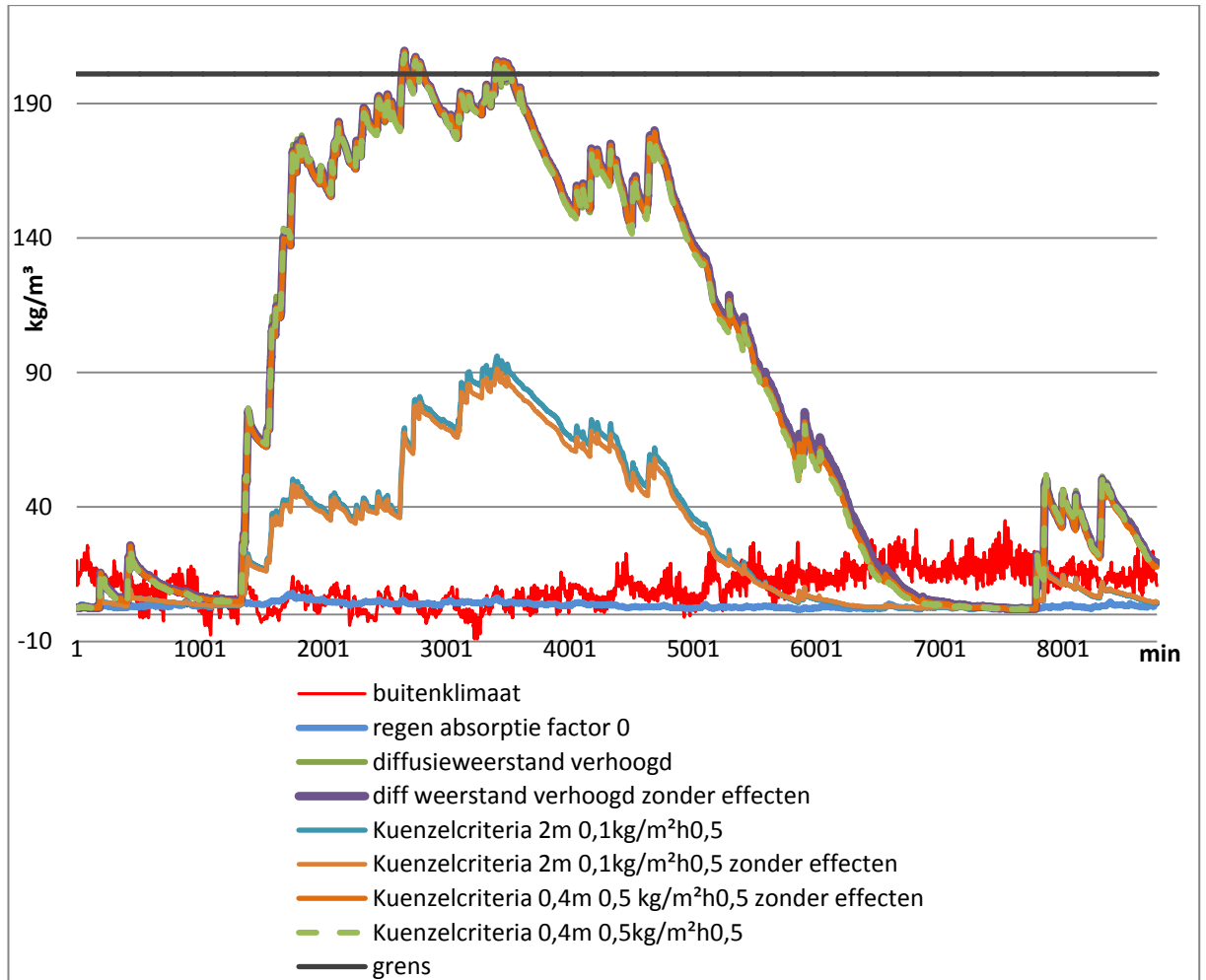
Figuur 33: opbouw van de gesimuleerde wand. Links is een strook van 5mm te ontwaren waar de hydrofobering verondersteld wordt ingedrongen te zijn.

Om de hydrofobering te modelleren werd gewerkt volgens de werkwijze voorgesteld door Künzel [45]. Deze werkwijze veronderstelt een indringdiepte, hier 5mm genomen, waarover de hydrofobering de eigenschappen van het materiaal wijzigt. De eigenschappen van deze zone werden gehaald uit de uiterste grenzen van de Künzelcriteria zoals deze beschreven worden in [63] en [64]. Deze zijn enerzijds: $\mu d < 2$ m bij $A < 0.1 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0.5}$, en $A < 0.5 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0.5}$ bij $\mu d < 0.4$ m. Hoewel deze criteria eigenlijk voor coatings opgesteld zijn, zijn ze ook voor hydrofoberingen geschikt aangezien ze eisen opleggen aan de verhouding waterabsorptiecoëfficiënt – diffusieweerstand, de 2 belangrijkste eigenschappen voor een hydrofobering. Aansluitend werden simulaties uitgevoerd waarbij de regenreductiefactor nul werd genomen, en de diffusie ongewijzigd bleef, wat een ideale situatie voorstelt, en een situatie waarbij de diffusieweerstand verhoogd tot een niveau buiten de Künzelcriteria met de bedoeling vochtaccumulatie te krijgen.

Uit de literatuurstudie bleek reeds dat hydrofobeermiddelen in staat kunnen zijn kleine scheuren te overbruggen, terwijl iets grotere scheuren onmogelijk overbrugbaar zijn. Aangezien er geen data beschikbaar is over het effect dat hydrofoberingen hebben op de waterabsorptiecoëfficiënt van gescheurde materialen is het onmogelijk op een correcte manier de extra instroom ten gevolge van deze scheuren in rekening te brengen. Gekozen werd de hydrofobering ter hoogte van de mortelvoeg niet aan te brengen: op die manier ontstaat er een defect in de hydrofobeerlaag langs waar vocht in de muur voorbij de gehydrofobeerde laag kan treden. De waterabsorptiecoëfficiënt van de materialen werd, op de gehydrofobeerde zone na, verhoogd met 15% om het effect dat scheuren uitoefenen op de waterabsorptiecoëfficiënt in rekening te brengen. Dit zal echter een overschatting zijn om de hierboven vermelde reden, maar volgt volledig de werkwijze voorgesteld door Künzel [45]. De regenreductiefactor ter plekke van de mortelvoeg werd naar 1 bijgesteld om de extra instroom ten gevolge van het aflopende water van de hydrofobeerlaag in rekening te brengen.

Als basis voor de vaststelling van de optredende schade wordt gekeken naar het risico op vorstschade in de constructie: deze kan optreden door ofwel een blijvende vochtaccumulatie of een cyclisch optredend kritisch vochtgehalte bij vriestemperaturen zonder dat over een jaar gezien accumulatie nodig is. In de literatuurstudie werd reeds dieper ingegaan op de bepaling van dit risico. Gekozen werd te werken met de methode uitgewerkt door Hens[11]: de globale eis is dat het kritisch

vochtgehalte voor bakstenen 87% bedraagt en bijgevolg dient het vochtgehalte hieronder te blijven. Voor de gebruikte Atinea bakstenen komt dit overeen met een vochtgehalte van 201,84 kg water per m³ baksteen.



Figuur 34: resultaten van de simulaties. Er is duidelijk te zien dat de effecten van scheuren en de keuze van de hydrofobering bepalend zijn. De effecten uitgeoefend door nazuiging en grensweerstand zijn verwaarloosbaar.

Kijken we naar de resultaten dan zien we dat het al dan niet opnemen van alle optredende effecten een kleine invloed heeft op het vochtgehalte van de gevelstenen. De manier waarop de hydrofobering gemodelleerd wordt levert echter wel grote verschillen: waar de ideale simulatie die vertrekt van een regenwater reductie factor 0 probleemloos lijkt te zijn blijken de simulaties met $\mu_d = 0,4$ en $A=0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ risico op vorstschade in te houden.

Er kan dus algemeen gesteld worden dat de effecten van grensweerstand en nazuiging voor gevallen met korte termijn belastingen quasi geen invloed uitoefenen op het totale vochtgehalte. Van cruciaal belang zijn echter wel de modellering van de scheuren en de eigenschappen van de gemodelleerde hydrofobering om tot een realistische inschatting van het vorst risico te komen.

9. Algemeen besluit

Het numerieke simulatiepakket WUFI werd binnen deze masterproef aan een aantal vragen onderworpen. De globale doelstelling was te onderzoeken binnen welk toepassingsgebied de software het meest geschikt is en aan te duiden waar verbeteringen dienen aangebracht te worden. Hiervoor werd gebruikt gemaakt van een literatuurstudie, proeven, een vergelijking van WUFI-1D met WUFI-2D en een casestudie op een gehydrofobeerde wand.

Uit de literatuurstudie bleek dat de software essentieel enkele vereenvoudigingen doorvoert: met effecten zoals bvb. nazuiging, grensweerstand, zwellings, ... wordt door de software geen rekening gehouden. Voor vochtbelastingen van korte duur, zoals bvb. bij regen, zullen deze effecten een geringe invloed uitoefenen. Situaties waarbij lange termijn contact optreedt met vocht zullen dan weer significante verschillen opleveren tussen simulatie en werkelijkheid: een verschil tot circa 15% na 336 uur werd gevonden.

Uit de proeven werd gevonden dat de gecombineerde invloed van scheuren en grensweerstand en ongeveer 10 a 15% van de waterabsorptiecoëfficiënt bedraagt. Het effect van zijdelingse bevochtiging van het ene materiaal op het andere levert nog eens 10%. Ook werd gevonden dat afhankelijk van het materiaal bepaalde effecten meer significant zullen zijn: zo wordt bij de combinaties gebaseerd op Leder bakstenen de grensweerstand een erg belangrijke parameter, bij de Atinea combinaties wordt deze quasi volledig teniet gedaan door de hoge waterabsorptiecoëfficiënt van de bakstenen. Uitgaande van de proefresultaten werd hierop de stelling geformuleerd dat het totale watergehalte van de gemetste combinaties afhankelijk is van: de watergehalten van de delen, het optredende randeffect, de extra instroom ten gevolge van scheuren, de beïnvloeding van het meest zuigende materiaal op het andere, de grensweerstand en het effect van nazuiging.

Bij de simulatie van deze proeven werden aanzienlijke verbeteringen bereikt door het in rekening brengen van deze effecten. Opgemerkt dient te worden dat voor de simulaties geen rekening werd gehouden met de holtes die zich in de Atinea bakstenen bevinden, temeer daar er geen info over de afmetingen bekend is, in principe zal hierdoor een hogere fractie mortel aanwezig zijn dan momenteel opgenomen is. Door de hoge waterabsorptiecoëfficiënt van de bakstenen en bijgevolg de invloed die zij uitoefenen in de bevochtiging van de mortel wordt verondersteld dat dit geen gevolgen heeft op de correctheid van de resultaten de eerste uren. Voor de vrije waterverzadiging w_f heeft dit in principe tot gevolg dat deze iets te hoog is in de simulaties, dit effect wordt ook als erg klein verondersteld. De holtes in de Leder Wanlin stenen werden eveneens als zonder invloed verondersteld, in principe zal de mortel hier een iets groter contactoppervlak hebben en bijgevolg een iets snellere bevochtiging uitoefenen, de erg lage waterabsorptiecoëfficiënt van de stenen doet dit effect teniet.

De gevoeligheidsanalyse op de proefresultaten toonde aan dat vooral de vrije waterverzadiging w_f , de waterabsorptiecoëfficiënt en het referentiewatergehalte een invloed uitoefenen op de resultaten. Variatie in de porositeit oefende geen invloed uit.

Voor de interfaceweerstand werd uitgaande van onderzoek door Derluyn een formule opgesteld die een goede benadering levert voor de Atinea combinaties. Door het grote verschil tussen de waterabsorptiecoëfficiënten van de Leder combinaties en de combinaties waarop Derluyn proeven

deed lukte dit voor de Leder combinaties niet. Besloten kan worden dat indien data over de grensweerstand bekend is de voorgestelde formule een goede benadering kan leveren, indien dit niet bekend is kan gewerkt worden met de vereenvoudiging door Holm, Künzel en Krus.

De effecten van scheuren en nazuiging kunnen in rekening gebracht worden door te werken volgens de voorgestelde werkwijzen. Toepassing van deze manieren bracht een aanzienlijke verbetering in de benadering van de proefresultaten: de overgebleven verschillen in het uiterste punt bedragen nog 10%, voornamelijk door de beperkte kennis over het precieze aantal scheuren.

Toepassing van deze effecten op een simulatie van de proeven levert voor zowel Leder als Atinea combinaties een erg goede benadering. Voor lange termijn vochtbelastingen, zoals in de proeven gebeurde, kan geconcludeerd worden dat er belangrijke effecten optreden die een significante afwijking tussen proef en simulatie kunnen opleveren, in rekening brengen van deze effecten zorgt voor een veel betere simulatie.

Voor toepassingen waarbij korte termijn contact met water optreedt, in de masterproef onderzocht aan de hand van de case van de gehydrofobeerde wand, kan gesteld worden dat de hierboven vermelde effecten een erg kleine invloed uitoefenen op het resultaat. Het wisselende karakter van het klimaat zal de invloed van deze effecten teniet doen. De effecten van scheuren zijn daarentegen wel significant: het niet in rekening brengen zal voor een aanzienlijk schaderisico zorgen. De keuze van simulatiemethode van het hydrofobemiddel is eveneens cruciaal.

Bij vergelijking van de 1D met de 2D versie van de software werd gevonden dat verschillen kunnen optreden in de resultaten. De reden hiervoor werd teruggebracht tot de convergentiecriteria en het aantal iteraties. Aanpassing van deze termen levert een goede overeenstemming tussen beide versies. Opgemerkt dient te worden dat dit niets zegt over de algemene correctheid van het model.

10. Bibliografie

1. *IEA ANNEX 14*. Leuven : Acco, 1991.
2. *IEA Annex 24*. Leuven : Acco, 1996.
3. *IEA ANNEX 41*. Leuven : sn, 2008.
4. **STRAUBE, J. en BURNETT, E.** *Review of modeling methods for building enclosure design*. Waterloo : University of Waterloo.
5. **STRAUBE, J.** *Moisture in buildings*. sl : ASHRAE JOURNAL, 2002.
6. **KÜNZEL, H.M.** *Simultaneous heat and moisture transport in building components - one and two dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart : doctoraatsthesis, Fraunhofer IRB Verlag, 1995.
7. **STRAUBE, J.** *Moisture control*. Ontario : University of Waterloo.
8. **LSTIBUREK, J. en CARMODY, J.** *Moisture control handbook - new, low-rise, residential construction*. sl : ORNL, 1991.
9. **CEN.** *ISO CD13788 Draft 2010: hygrothermal performance of building components and building elements - internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - calculation methods*. Brussel : CEN, 2010.
10. —. *EN ISO 13788: hygrothermal performance of building components and building elements - internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - calculation methods*. Brussel : CEN, 2001.
11. **HENS, H.** *Toegepaste bouwfysica 1: randvoorwaarden en prestatie-eisen*. Leuven : Acco, 1993.
12. **STRAUBE, J. en SCHUMACHER, C.** *Assessing the durability impacts of energy efficient enclosure upgrades using hygrothermal modeling*. sl : WTA-Journal 2, 2006.
13. *NBN B27-010: keramische producten voor wand en vloerbekleding: vorstbestandheid - vermogen tot wateropslorping door capillariteit*. sl : NBN, 1983.
14. *NBN B27-009: keramische producten voor wand en vloerbekleding, vorstbestendigheid, vorst en dooi cyclussen*. sl : NBN, 1996.
15. *NBN B27-011: keramische producten voor wand- en vloerbekleding - prestatiecriteria*. sl : NBN, 1983.
16. **GREGOIRE, Y. en SMITS, A.** *Vorstweerstand van baksteen: gebreken van de Europese methode*. WTCB dossiers : nr. 3, kat. 2., 2009.
17. **BUXBAUM, C., SEILER, A. en PANKRATZ, O.** *Analysis and comparison of the hygrothermal performance of a "passive house" - wall systems in the climate of central Europe*. Clearwater Beach,

USA : Proceedings of the 10th international conference on thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings, 2007.

18. **SEDLBAUER, K.** *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components.* Stuttgart : doctoraatsthesis, Fraunhofer IBP, 2001.

19. **ASHRAE STANDARD 160 P criteria for moisture control design analysis in buildings.** sl : ASHRAE, 2009.

20. **KÜNZEL, H.M.** *Moisture risk assessment of roof constructions by computer simulation in comparison to the standard Glaser-method.* Eindhoven : Proceedings of the international building physics conference: tools for design and engineering of buildings, 2000.

21. **HOLM, A.** *Drying of an AAC flat roof in different climates. Computational sensitivity versus material property measurements.* Wellington, New Zealand : Proceedings of the CIB W40 symposium "Heat and Moisture Transfer in Buildings", 2001.

22. **RODE, C. en BURCH, D.M.** *Empirical validation of a transient computer model for combined heat and moisture transfer.* Clearwater Beach, Florida : Proceedings of the thermal performance of the exterior envelopes of buildings conference VI, 1995, p. 283-295.

23. **HOLM, A. en KÜNZEL, H.M.** *Non isothermal moisture transfer in porous building materials.* Munchen : Materialsweek, 2000.

24. —. *Practical application of an uncertainty approach for hygrothermal building simulations - drying of an AAC flat roof.* Building and Environment : Volume 37, Issues 8-9, 2002, p. 883-889.

25. **PAVLIKOVA, M., PAVLIK, Z. en CERNY, R.** *Hygric and thermal properties of materials used in historical masonry.* Copenhagen : Proceedings of the Nordic symposium on building physics, 2008.

26. **HOLM, A. en KÜNZEL, H.M.** *Uncertainty approaches for hygrothermal building simulations - drying of an AAC flat roof in different climates.* Rio de Janeiro : Tagungsband 2, Building Simulation, 2001.

27. **KÜNZEL, H.M. en SCHMIDT, TH.** *Auswahl und aufbereitung von meteorologischen datensätzen für feuchtetransportberechnungen.* Dresden : Tagungsband 2 des 10. Bauklimatischen Symposiums, 1999, p. 637-647.

28. **KÜNZEL, H.M., SCHMIDT, TH. en HOLM, A.** *Exterior surface temperature of different wall constructions - comparison of numerical simulation and experiment.* Dresden : Proceedings 11th symposium for building physics, 2002, p. 441-449.

29. **DAGLIESH, A., CORNICK, S. en MAREF, W.** *Hygrothermal performance of building envelopes: uses for 2D and 1D simulation.* Ottawa : Proceedings of the 10th conference on building science and technology, 2005, p. 32-41.

30. **BLOM, P. en HOLOS, S.B.** *Moisture content in insulated basement walls.* Copenhagen : Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, vol. 2., 2008.

31. **KRUS, M., et al.** *A new model for mould prediction and its application on a test roof.* Cracow : Proceedings of the II international scientific conference on the current problems of building physics in the rural building, 2001.
32. **KRUS, M.** *Influence of moisture buffering effects on the risk of mould growth.* Stuttgart : Fraunhofer IBP.
33. **GRIMM, C.T.** *Water Permeance of Masonry Walls: A review of the Literature.* . American society for testing and materials : ASTM STP778, 1982.
34. **HOLM, A. en KÜNZEL, H.M.** *Two-dimensional transient heat and moisture simulations of rising damp with WUFI 2D.* Madrid : Proceedings of the 12th international brick/block masonry conference: Volume 2, 2000.
35. **ROELS, S.** *Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone.* Leuven : doctoraatsthesis, KU Leuven, 2000.
36. **BROCKEN, H.J.P.** *Moisture transport in brick masonry: the grey area between bricks.* Eindhoven : doctoraatsthesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1998.
37. **DERLUYN, H., JANSSEN, H. en CARMELIET, J.** *Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials.* Construction and Building Materials 25 : sn, 2011, p. 3685–3693.
38. **ROELS, S., CARMELIET, J. en HENS, H.** *An upscaling technique to predict the moisture permeability of heterogeneous porous media.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST-2001), 2001, p. 143-147.
39. **KRUS, M. en HOLM, A.** *Über den einfluss von fehlstellen hydrophobierter außenwände auf den feuchtehaushalt von mauerwerken.* Kühlungsborn : Vortrag, Hanseatische Sanierungstage, 2000.
40. **GANDHI, K.** *Investigations of the hygrothermal performance of stone walls in the north Wales climate by modelling and physical monitoring.* Cardiff : Cardiff University.
41. **MOERS, H.** *Waterdichtheid van na-geïsoleerde spouwmuren.* Gent : Masterthesis, Universiteit Gent, 2011.
42. **POUPEREEL, A.S., et al.** *Diffusion-convection transport of salt solutions in cracked porous building materials, part one: parameters, model description and application to cracks.* Restoration of buildings and monuments : Vol. 12, nr. 3, 2006, p. 187-204.
43. **ALFAIATE, J., et al.** *On the use of strong discontinuity formulations for the modeling of preferential moisture uptake in fractured porous media.* Comput. Methods Appl. Mech. Eng. : sn, 2010. .
44. **ROELS, S., VANDERSTEEN, K. en CARMELIET, J.** *Measuring and simulating moisture uptake in a fractured porous medium.* Advances in Water Resources 26 : Elsevier, 2003, p.237–246.
45. **KÜNZEL, H.M. en KRUS, M.** *Untersuchungen zum feuchteverhalten von fassaden nach hydrophobierungsmaßnahmen.* sl : WTA Journal 2, 2003, p. 149-166.

46. **WTCB.** *Technisch Voorschrift 224: waterwerende oppervlaktebehandeling.* Brussel : sn, 2002.
47. **CARMELIET, J., et al.** *Moisture phenomena in hydrophobic porous building materia, part one: measurements and physical interpretations.* International Journal for Restoration of Buildings and Monuments : 8, 2002, p. 165-183.
48. **CARMELIET, J., VAN BESIEN, T. en ROELS, S.** *Moisture phenomena in hydrophobic porous building material. Part 2: Measurements and modelling.* International Journal for Restoration of Buildings and Monuments : 8, 2002, p.185-203.
49. **CARMELIET, J., HOUVENAGHEL, G. en ROELS, S.** *Moisture phenomena in hydrophobic porous materials.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST-2001), 2001, p. 263-267.
50. **KÜNZEL, H.M.** *Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls.* Materials and Structures : Vol. 31, 1998, p. 99-103.
51. **KÜNZEL, H.M. en KIEBL, K.** *Drying of brick walls after impregnation.* Bauinstandsetzen 2 : Ed. 2, 1996, p. 87-100.
52. **NBN EN 772-11: Metselsteenproeven - Deel 11: Bepaling van de capillaire waterabsorptie van betonmetselstenen, cellenbetonsteen, metselstenen van kunststeen en natuursteen, alsook van de initiële waterabsorptie van metselbaksteen.** sl : NBN, 2011.
53. *Handboek baksteenmetselwerk.* Brussel : Belgische baksteenfederatie, 2008.
54. **NBN EN 772-21: Metselsteenproeven - Deel 21: Bepaling van de waterabsorptie van metselbaksteen en kalkzandsteen door koud-water-absorptie.** sl : NBN, 2011.
55. **NBN B 05-201: proeven op bouwmaterialen. Vorstbestendigheid - wateropsloppingsvermogen door capillariteit.** sl : NBN, 1976.
56. **NBN EN ISO 12571: Thermische en vochtwerende eigenschappen van bouwmaterialen en bouwwaren - Bepaling van de thermische sorptie-eigenschappen.** sl : NBN, 2000.
57. **HENDRICKX, R., et al.** *Metselen met natte of droge stenen? Experimentele bepaling van watertransport tussen voeg en baksteen.* Leuven : KU Leuven.
58. **NBN EN 1015-11: Beproevingsmethoden voor metselmortel - Deel 11: bepalen van de buigsterkte en druksterkte van verharde mortel.** sl : Normen antennen "Beton - mortel - granulaten" - Normenfiche, 2007.
59. **NBN EN 1015-18: beproevingsmethode voor metselmortel - deel 18: bepaling van de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt van verharde mortel.** sl : Normen antennen - Fiche "Beton - mortel-granulaten", 2003.
60. **PLAGGE, R., SCHEFFLER, G. en GRUNEWALD, J.** *Automatic measurement of water uptake coefficient of building materials.* Dresden : TU Dresden.

61. **HENS, H., et al.** *Brick cavity walls: a performance analysis based on measurements and simulations.* Journal of Building Physics : sn, 2007.
62. **JANSSEN, H., DERLUYN, H. en CARMELIET, J.** *Moisture transfer through mortar joints: interface resistances or hygric property changes ?* Leuven : KU Leuven, 2007.
63. **KUNZEL, H.M., KUNZEL, H. en HOLM, A.** *Rain protection of stucco facades.* Clearwater : Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference, 2004.
64. **DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.** sl : DIN, 2001.
65. **KUNZEL, H.M., ZIRKELBACH, D. en SCHAFACZEK, B.** *Modelling the effect of air leakage in hygrothermal envelope simulation.* Stuttgart : Fraunhofer IBP Verlag, 2012.
66. **TORRES, M.I.M. en DE FREITAS, V.P.** *Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation.* Building and Environment : Volume 42, Is, 2005.
67. **CARMELIET, J. en VAN DEN ABEELE, K.** *Poromechanical approach describing the moisture influence on the non-linear quasi-static and dynamic behaviour of porous building materials.* Materials and Structures/Concrete Science and Engineering : Vol. 37, 2004, p. 271-280.
68. **MATIASOVSKY, P., et al.** *The relationships between pore structure parameters and heat and mass transfer coefficients.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST 2001), 2001, p. 257-261.
69. **HENS, H.** *Bouwfysica 1: warmte- en massatransport.* Leuven : Acco, 2003.
70. **SEDLBAUER, K. en KÜNZEL, H.M.** *Frost damage of masonry walls - a hygrothermal analysis by computer simulations.* Journal of Thermal Envelope & Building Science : Vol. 23, no. 3, p. 277-281, 2000.
71. **RYMELL, R.J.** *Moisture and thermal design in metal building construction - a specification issue.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST-2001), 2001, p. 131-135.
72. **KAKELA, P., VINHA, J. en LINDBERG, R.** *Moisture performance of timber-framed external wall element structure under Finnish outdoor climate, field test.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST-2001), 2001, p. 217-221.
73. **VINHA, J., KAKELA, P. en LINDBERG, R.** *Moisture performance of timber-framed external wall structures.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST-2001), 2001, p. 137-142.
74. **DESJARLAIS, A.** *WUFI: moisture engineering in the 21st century (and beyond).* sl : Oak Ridge National Laboratory, 2011.

75. **KRUS, M., RÖSLER, D. en SEDLBAUER, K.** *New model for the hygrothermal calculation of condensate on the external building surface.* Montreal : Proceedings of the international building physics conference 3rd Concordia university, 2006, p. 329-333.
76. **KAROGLOU, M., et al.** *A powerful simulator for moisture transfer in buildings.* Building and Environment : Volume 42, Issue 2, 2007, p. 902-912.
77. **KÜNZEL, H.M.** *Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis?* IBP-Mitteilung 26 : Nr. 355., 1999.
78. **KÜNZEL, H.M. en KAUFMANN, A.** *Feuchteadaptive Dampfbremse für Gebäudedämmungen.* IBP-Mitteilung 22 : nr. 268, 1995.
79. **KÜNZEL, H.M.** *Adapted vapour control for durable building enclosures.* Lyon : Proceedings of the 10DBMC international conference on durability of building materials and components, 2005.
80. **VAN HEES, R.P.J. en CASTENMILLER, C.J.J.** *Vochtproblemen in bestaande woningen.* Rotterdam : Stichting Bouwresearch, 1986.
81. **ROSE, W.B.** *Water in buildings - an architect's guide to moisture and mold.* Hoboken (N.J.) : Wiley, 2005.
82. **GALBRAITH, G.H., KELLY, D.J. en MCLEAN, R.C.** *Techniques for measuring moisture retention properties.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST-2001), 2001, p. 125-129.
83. **SHIRAKAWA, M.A., et al.** *Mould and phototroph growth on masonry facades after repainting.* Materials and Structures : Vol. 37, 2004, p. 472-479.
84. **KÜNZEL, H.M. en SEDLBAUER, K.** *Entwicklung der hygrothermischen simulation im bauwesen am beispiel der softwarefamilie WUFI.* 2006.
85. **CERNY, R., MADERA, J. en GRUNEWALD, J.** *Numerical simulation of heat and moisture transport in building envelopes with inside thermal insulation systems on the mineral wool basic.* Ottawa : Proceedings of the international conference on building envelope systems and technologies (ICBEST-2001), 2001, p. 251-255.
86. **KALAMEES, T. en VINHA, J.** *Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures.* Building and Environment : Volume 38, Issue 5, 2003, p. 689-697.
87. **BOMBERG, M., PAZERA, M. en ZHANG, J.S.** *On validation of hygric characteristics for heat, air, moisture models.* Montreal : Proceedings of the international building physics conference 3rd Concordia university, 2006.
88. **KARAGIOZIS, A., KÜNZEL, H. en HOLM, A.** *WUFI-ORNL/IBP- A north American hygrothermal model.* Clearwater Beach, Florida : Contribution to "Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII", 2001.
89. **BORDACHEV, A.** *Moisture calculation analysis and injection methods in brick masonry walls.* Lappeenranta : Bachelorthesis, Saimaa University of Applied Sciences, 2010.

90. **ABUKU, M., JANSSEN, H. en ROELS, S.** *Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption.* Energy and Building : 41, 2009, p. 101-110.
91. **SALONVAARA, M., KARAGIOZIS, A. en HOLM, A.** *Stochastic building envelope modeling - the influence of material properties.* Clearwater Beach, Florida : Contribution to "Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII", 2001.
92. **CALLEBAUT, K.** *State of the art of research/diagnostics of historical building materials in Belgium.* Proceedings of Ariadne 9 : Historic materials and their diagnostics, 2002.
93. **BROSANAN, D.** *The brave new world of building physics, or "who's afraid of the big bad WUFI".* Brickyard Road : sn, 2003.
94. **DE CLERQ, H.** *Waterwerende behandelingen: realistisch of utopisch.* Brussel : Koninklijk instituut voor het kunstpatrimonium, 2010.
95. **CARMELIET, J., DESCAMPS, F. en HOUVENAGHEL, G.** *A multiscale network model for simulating moisture transfer properties of porous media.* Transport in porous media 35 : Kluwers, 1999, p. 67-68.
96. **CARMELIET, J.** *Influence of microcracking on the poromechanical coupling in quasi-brittle nonsaturated porous media.* Leuven : KU Leuven.
97. **STRAUBE, J.: SCHUMACHER, C.J.** *Hygrothermal enclosure models: comparison with field data.* Antwerpen : Proceedings of the 2nd international conference on building physics, 2003, p. 319-325 .
98. **CARMELIET, J., ROELS, S. en BOMBERG, M.T.** *Towards development of methods for assessment of moisture-originated damage.* chapter 28 in Moisture Control in Buildings: The Key Factor in Mold Prevention, MNL18-2nd, edited by Heinz R. Trechsel and Mark Bomberg-2nd ed. : ASTM international , 2009, p.591-605.
99. **VAN DEN BOSSCHE, N., LACASSE, A.M. en JANSSENS, A.** *A critical review of wind driven rain loads on buildings - towards an enhanced watertightness test method.* Gent : Universiteit Gent.
100. **MAREF, W.** *Hygrothermal performance of wall and window systems.* Ottawa : 18th Session of Canada Japan Housing Committee Meeting Proceedings, 2007, p. 1-46.
101. **ASTM E104 - 02.** *Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions.* sl : ASTM.
102. **HALL, C. en HOFF, W.** *Water transport in brick, stone and concrete.* London : Spon, 2002.
103. **BS EN ISO 12571:** *hygrothermal performance of building materials and products - determination of hygroscopic sorption properties.* sl : BS, 2000.
104. **BS EN ISO 12570:** *hygrothermal performance of building materials and products - determination of moisture content by drying at elevated temperature.* sl : BS, 2000.
105. **NBN EN 771-1:** *Voorschriften voor metselstenen - Deel 1: metselbaksteen.* sl : NBN, 2011.

106. *NBN EN 1015-2: Beproevingmethoden voor metselmortel - deel 2: monsterneming van mortels en aanmaken van proefmortels*. sl : Normen antennen - Fiche "Beton - mortel - granulaten", 2007.
107. **KRUS, M.** *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials - theoretical principles and new test methods*. Stuttgart: doctoraatsthesis : Fraunhofer IRB Verlag, 1996.
108. **GALEN, O.** *Experimental evaluation of water penetration through brick veneer*. Toronto : Ryerson University, 2011.
109. *Baksteen en metselwerk: technische eigenschappen*. Brussel : Belgische baksteen federatie, 2006.

11. Annex.

11.1. Annex A: info fiches materialen.

Leder Cuir

Wanlin

Strengpers Etirée



Porositeit Porosité

≤ 8 %

Initiële wateropname Porosité initiale

IW2

Lambda waarde λ_{ue} Valeur Lambda

1,08 W/mK

Vorstbestendigheid Résistance au gel

Euroklasse F2 - zéér vorstbestand (Benor)

Classe Euro F2 - très résistant au gel (Benor)

Beschikbaar in Disponible en

met perforaties avec perforations M50, M57, M65, M90,
± 288 x 88 x 48 mm*, ± 288 x 88 x 63 mm*, ± 288 x 88 x 88 mm*

*op bestelling sur commande

Uit klei gebakken stenen kunnen per productie enige lichte kleurvariatie vertonen ten opzichte van vorige producties.
De foto's zijn indicatief en kunnen afwijkingen vertonen ten opzichte van het reële materiaal.

Les briques en terre cuite peuvent présenter une légère différence de teinte d'une fabrication à l'autre.
Les photos sont indicatives et peuvent présenter des différences par rapport au matériau réel.

De fabrikant kan in het kader van de Europese Bouwproductenrichtlijn de CE declaratie voorleggen.
Deze kan tevens gedownload worden via www.terca.be. U vindt daar ook alle bijkomende technische informatie, plaatsings- en onderhoudsvorschriften. Beschikt u niet over internet, dan kan u steeds contact opnemen met onze commerciële binnendienst op **tel +32 56 24 96 16** of **fax +32 56 22 87 11**.

De producten worden geleverd met het Benor-label, welke de overeenkomstigheid aan het CE label en aan de normen NBN EN 771-1 en PTV 23-002 garandeert.

Le fabricant est en mesure de produire la déclaration CE dans le cadre de la Directive européenne des matériaux de construction. Celle-ci peut également être téléchargée sur www.terca.be. Vous y trouverez aussi toutes les informations techniques supplémentaires et les prescriptions de pose et d'entretien. Si vous ne disposez pas de l'Internet, vous pouvez prendre contact avec notre service commercial interne au numéro de **tél. +32 56 24 96 16** ou de **fax +32 56 22 87 11**.

Les produits sont livrés avec le label Benor, qui garantit la conformité au label CE et aux normes NBN EN 771-1 et PTV 23-002.



BENOR

Leder Cuir

Wanlin

Strengpers Etirée



Architect Architecte W. Wuyts, 's Gravenwezel



VOOR ALLE INFORMATIE POUR TOUTE INFORMATION

nv Wienerberger sa • Kapel ter Bede 121 • BE-8500 Kortrijk
T +32 56 24 96 16 • F +32 56 20 47 60 • e-mail: info@terca.be • www.terca.be

SHOWROOMS • Ook open op zaterdag Aussi ouvert le samedi
Kapel ter Bede 88 • BE-8500 Kortrijk • T +32 56 24 95 88
Rue de la Briqueterie 28 • BE-5564 Wanlin-sur-Lesse • T +32 82 66 55 00
A12, Koning Leopoldlaan 1 • BE-2870 Breendonk • T +32 52 31 10 10

<http://referenties.terca.be>
<http://references.terca.be>



Jaar van de markering: 12
Certificerende instantie: 0749
Certificaat: 0749-CPD-BC2-201-676-500/14-10
Norm: EN 771-1:2003 + A1:2005

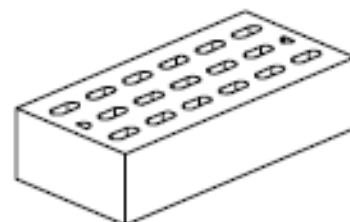


Producent: Wienerberger NV
B-8500 Kortrijk, Kapel ter Bede 86
BELGIUM
Productie-locatie: Plant 1265
B-5564 Wanlin-sur-Lesse, Route de la Briqueter
BELGIUM

Product: LEDER
Groep: HD - Producten

Productnummer: 12653060
Product-code: 12653060-B1-1265

Afmetingen en toleranties:		fabrieksma ^æ	tolerantie	mm	maatspreidi	mm
Lengte	mm	188	klasse	± 3	klasse	4
Breedte	mm	88	T2	± 2	R2	3
Hoogte	mm	48		± 2		2
Volumieke massa:		gemiddelde	klasse		%	
Bruto droge vol. massa	kg/m³	1700	D1		10	
Netto droge vol. massa	kg/m³	2100				
Verschijningsvorm:		Verticaal geperforeerde steen				
Metselbaksteengroep	-	1				
Percentage holle ruimte	%	30				
Dikte mantel	mm	NPD				
Dikte ribben	mm	NPD				
Volume grootste van alle perforaties	%	NPD				
Volume van handvaten	%	NPD				
Gecombineerde dikte van ribben en mar	%	NPD				
Gecombineerde dikte van ribben en mar	%	NPD				
Oppervlakte van perforaties op een legv	%	NPD				
Oppervlak van de handvaten	%	NPD				
Druksterkte:		gemiddelde	genormaliseerd		categorie	
loodrecht op het mortelbedvlak	N/mm²	30	NPD		I	
loodrecht op de kop	N/mm²	NPD	NPD			
Hechtsterkte:	N/mm²	0,15/0,30				
Thermische geleiding:	W/m·K	λ _{equ} =	0,7			
Dampdoorlatendheid:	-	μ = 5/10				
Vorst/dooi-weerstand:	klasse	F2				
Wateropneming:	%	8				
Initiële wateropzuiging	kg/(m²·min)	3				
Gehalte actieve oplosbare zouten:	klasse	S2				
Vochtexpansie:	mm/m	NPD				
Brandreactie:	klasse	A1				
Vlakheid:	mm	NPD				
Planparalleliteit	mm	NPD				
Gevaarlijke stoffen:	-	NL BSB-1B				



Daadwerkelijk perforatiebeeld kan gering afwijken

Aanvullende nationale technische specificaties:

volgens PTV 23-002 - Baksteen voor gewoon metselwerk

Formaat

M50

Karakteristieke druksterkte vlgs NBN B 24-301

N/mm²

25

Vorstbestendigheid vlgs NBN B 27-009

Klasse

zéér vorstbestand

Uitbloeiing vlgs NBN B 24-009

uitbloeiingsvrij

Gemiddelde initiële wateropname ten behoeve van de mortelkeuze (EN 772/11)

kg/m²·min

0,85

Thermische geleidbaarheid : λ_{Ui} volgens NBN B 62-002/A1, Tabel C

W/m.K

0,55

Thermische geleidbaarheid : λ_{Ue} volgens NBN B 62-002/A1, Tabel C

W/m.K

1,08

Benor certificatennummer

BB - 201 - 676 - 500-14



Leder

Herkomst: Wanlin

Beschikbare afmetingen:

Benaming	fabricagestreefmaten L x B x H	stuks/m ² voeg nom. 12 mm	stuks/m ² voeg nom. 5 mm	CE code
M50	188 x 88 x 48 mm	83	98	12653060-B1-1265
M57	188 x 88 x 55 mm	75	86	12653061-B1-1265
M65	188 x 88 x 63 mm	67	76	12653070-B1-1265
M90	188 x 88 x 88 mm	50	56	12653080-B1-1265
*	288 x 88 x 48 mm	56	64	12653020-B1-1265
*	288 x 88 x 63 mm	44	50	12653290-B1-1265
*	288 x 88 x 88 mm	33	37	12653230-B1-1265

* op bestelling

Gebruik :

Type steen : machinale strengpers baksteen

Toepassingsgebied : decoratief niet-dragend binnen- en buitenmetselwerk

Productie :

Kleisamenstelling : lokale Famenniaan schiefferklei met

interstratificatie van Kwartaire loess en Brunssum klei

Temperatuur en atmosfeer : 1060 °C, oxiderend

Vormgeving : werkelijke verschijningsvorm: afhankelijk van formaat - behorend tot groep 1 volgens EC6 (max. perforatiegraad 25%)

Uitzichtkenmerken :

Algemeen: De stenen worden gevormd door het afsnijden van een hoeveelheid klei van een geperste streng. Een strak afgelijnde heel regelmatige vorm wordt bekomen.

Uitzicht: genuanceerd

Kleurtint: lederbruin – de kleur is homogeen in de massa

Oppervlaktetextuur: ruw – onbezand, licht geschaafd

Aspect: mat

Prestatiecriteria :

Druksterkte:

- Informatief : gemiddelde druksterkte volgens NBN B 24-301: > 35 N/mm²
- gemiddelde druksterkte volgens NBN EN 771-1 en karakteristieke druksterkte volgens NBN B 24-301: > 30 N/mm²

Vorstbestendigheid:

Euroklasse F2 – zéér vorstbestand (Benor)

Porositeit:

≤ 8 %

Initiële wateropname:

IW2

Conformiteitskeurmerk en normen.

De fabrikant kan in het kader van de Europese

Bouwproductenrichtlijn de CE-declaratie voorleggen.

De producten worden geleverd met het Benor-label, welke de overeenkomstigheid aan het CE label en aan de normen NBN EN 771-1 en PTV 23-002 garandeert.

Bijkomende prestatiecriteria + CE declaratie beschikbaar via

<http://ce.wienerberger.com>

Uitvoering:

De gevelstenen worden verwerkt uit 4 à 5 verschillende pakken, en worden weggenomen in diagonale richting.

De gevelstenen worden gemetseld/gedunmetseld/verlijmd* volgens halfsteens-/stapel-/wild-/... verband*.

Gebruik de juiste mortelsamenstelling en het verwerkingsadvies voor matig zuigende gevelstenen.

Raadpleeg bovendien het specifieke verwerkingsadvies voor Wanlin gevelstenen!

Vóór uitvoering zullen stalen door de aannemer op de werf neergelegd worden ter goedkeuring van de opdrachtgever.

* schrappen wat niet past

Opmerking

Voor eventuele naleveringen en voor het postinterventiedossier is het van belang het batchnummer van Uw levering zorgvuldig bij te houden. Kleurverschillen intrinsiek verbonden aan de productie kunnen zo worden geminimaliseerd.

Onderhoud:

Op bleke stenen is veroudering en vervuiling gemakkelijker waarneembaar dan op donker gekleurde bakstenen. Het is daarom aanbevolen de gevel regelmatig te onderhouden of preventieve maatregelen te treffen.

Aanvulling op de uitzichtkenmerken :

Beschadigingen :

Bij stenen bedoeld voor zichtbaar metselwerk zullen bij een steekproef van 100 stenen tenminste 90 stenen aanwezig zijn met één onbeschadigde strek en één onbeschadigde kop, beschreven volgens PTV 23-002.

Fouten :

Het aantal stenen met fouten mag de 5% niet overschrijden.

Worden beschouwd als fout :

- de aanwezigheid van insluitsels die door zwelling kunnen aanleiding geven tot afschilferingen in het oppervlak van de steen
- scheuren met breedte ≥ 0.2 mm die aangrijpen op ten minste twee ribben

Beschadigingen en fouten dienen steeds gemeld te worden alvorens te verwerken ! Het metselwerk is te beoordelen van op 2 meter afstand.

Raadpleeg steeds het verwerkings-, veiligheids- en onderhoudsadvies. De specifieke richtlijnen kan u downloaden of telefonisch opvragen.

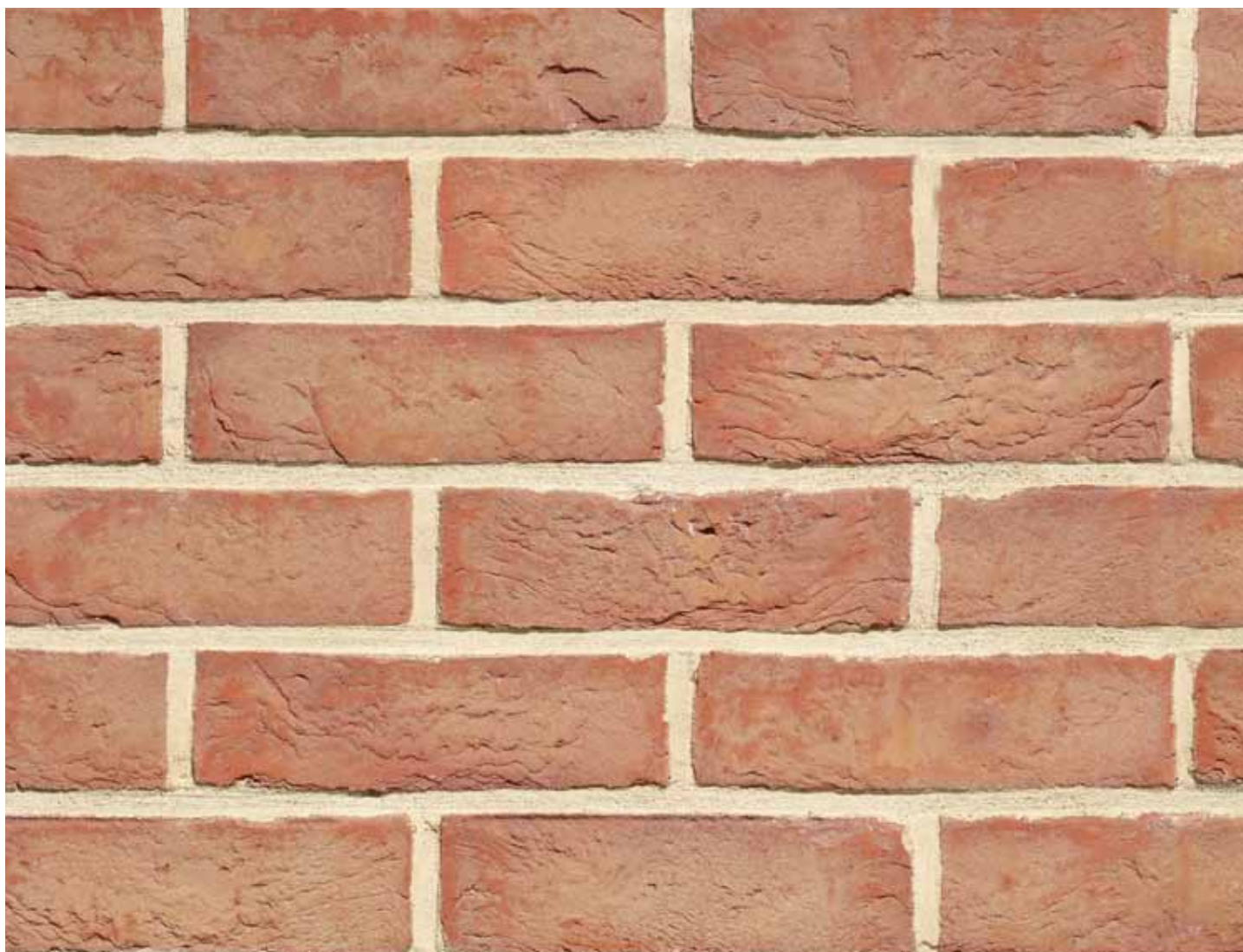
April 2010.

- Dit document is niet contractueel en vernietigt alle voorgaande publicaties. De fabrikant behoudt zich het recht voor om het productengamma of de productkarakteristieken te wijzigen. De gebruiker dient zich ervan te vergewissen steeds te beschikken over de meest recente beschrijvende tekst.
- De volledige partij dient in één maal besteld te worden aangezien er per verschillende producties een lichte kleurvariatie mogelijk is.
- Er wordt geen aanspraak gemaakt op volledigheid. Daar wij het specifieke gebruik, het respect voor de regels der kunst, de verwerking, de hoedanigheid van de mortels en de weersomstandigheden niet kunnen beoordelen, kan hierbij geen aansprakelijkheid aanvaard worden op grond van deze beschrijvende tekst.
- Niets uit deze tekst mag zonder toestemming worden veranderd.
- Keramiek blijft een natuurproduct. Leveringen kunnen qua kleur, oppervlakteaspect en afmeting afwijken t.o.v. de stalen door fluctuaties in productie en grondstoffen.

Atinea

Beerse

Handvorm Moulée-main



Porositeit Porosité

≤ 17 %

Initiële wateropname Porosité initiale

IW3

Lambda waarde λ_{ue} Valeur Lambda

0,99 W/mK

Vorstbestendigheid Résistance au gel

Euroklasse F2 - zéér vorstbestand (Benor)

Classe Euro F2 - très résistant au gel (Benor)

Beschikbaar in Disponible en

M50, M65, WF, WFD

Uit klei gebakken stenen kunnen per productie enige lichte kleurvariatie vertonen ten opzichte van vorige producties. De foto's zijn indicatief en kunnen afwijkingen vertonen ten opzichte van het reële materiaal.

Les briques en terre cuite peuvent présenter une légère différence de teinte d'une fabrication à l'autre.

Les photos sont indicatives et peuvent présenter des différences par rapport au matériau réel.

De fabrikant kan in het kader van de Europese Bouwproductenrichtlijn de CE declaratie voorleggen. Deze kan tevens gedownload worden via www.terca.be. U vindt daar ook alle bijkomende technische informatie, plaatsings- en onderhoudsvorschriften. Beschikt u niet over internet, dan kan u steeds contact opnemen met onze commerciële binnendienst op **tel +32 56 24 96 16** of **fax +32 56 22 87 11**.

De producten worden geleverd met het Benor-label, welke de overeenkomstigheid aan het CE label en aan de normen NBN EN 771-1 en PTV 23-002 garandeert.

Le fabricant est en mesure de produire la déclaration CE dans le cadre de la Directive européenne des matériaux de construction. Celle-ci peut également être téléchargée sur www.terca.be. Vous y trouverez aussi toutes les informations techniques supplémentaires et les prescriptions de pose et d'entretien. Si vous ne disposez pas de l'Internet, vous pouvez prendre contact avec notre service commercial interne au numéro de **tél. +32 56 24 96 16** ou de **fax +32 56 22 87 11**.

Les produits sont livrés avec le label Benor, qui garantit la conformité au label CE et aux normes NBN EN 771-1 et PTV 23-002.



BENOR

Atinea

Beerse

Handvorm Moulée-main



<http://referenties.terca.be>
<http://references.terca.be>

VOOR ALLE INFORMATIE POUR TOUTE INFORMATION

nv Wienerberger sa • Kapel ter Bede 121 • BE-8500 Kortrijk
T +32 56 24 96 16 • F +32 56 20 47 60 • e-mail: info@terca.be • www.terca.be

SHOWROOMS • Ook open op zaterdag Aussi ouvert le samedi

Kapel ter Bede 88 • BE-8500 Kortrijk • T +32 56 24 95 88
Rue de la Briqueterie 28 • BE-5564 Wanlin-sur-Lesse • T +32 82 66 55 00
A12, Koning Leopoldlaan 1 • BE-2870 Breendonk • T +32 52 31 10 10



Jaar van de markering: 12
Certificerende instantie: 0749
Certificaat: 0749-CPD-BC2-201-676-500/08-07
Norm: EN 771-1:2003 + A1:2005

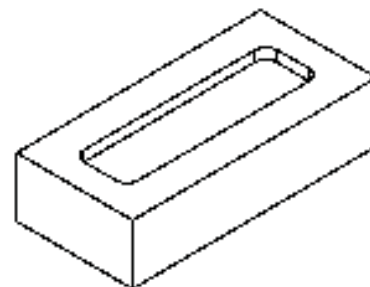


Producent: Wienerberger NV
B-8500 Kortrijk, Kapel ter Bede 86
BELGIUM
Productie-locatie: Plant 1210
B-2340 Beerse, Absheide 28
BELGIUM

Product: ATINEA
Groep: HD - Producten

Productnummer: 151670
Product-code: 151670-B1-1210

Afmetingen en toleranties:		fabrieksma ^æ	tolerantie	mm	maatspreidi	mm
Lengte	mm	190	klasse	± 3	klasse	8
Breedte	mm	88	T2	± 2	R1	6
Hoogte	mm	63		± 2		5
Volumieke massa:		gemiddelde	klasse		%	
Bruto droge vol. massa	kg/m³	1600	D1		10	
Netto droge vol. massa	kg/m³	1750				
Verschijningsvorm:		Steen met een frog				
Metselbaksteengroep	-	1	Groep volgens EN 1996-1-1			
Percentage holle ruimte	%	20	Gemiddelde			
Dikte mantel	mm	NPD				
Dikte ribben	mm	NPD				
Volume grootste van alle perforaties	%	NPD				
Volume van handvaten	%	NPD				
Gecombineerde dikte van ribben en mar	%	NPD				
Gecombineerde dikte van ribben en mar	%	NPD				
Oppervlakte van perforaties op een legv	%	NPD				
Oppervlak van de handvaten	%	NPD				
Druksterkte:		gemiddelde	genormaliseerd		categorie	
loodrecht op het mortelbedvlak	N/mm²	12	NPD		I	
loodrecht op de kop	N/mm²	NPD	NPD			
Hechtsterkte:	N/mm²	0,15/0,30	Tabelwaarde volgens EN 998-2, Annex C			
Thermische geleiding:	W/m·K	λ _{equ} = 0,47	Tabelwaarde volgens EN 1745, Tabel A1 met P=90%			
Dampdoorlatendheid:	-	μ = 5/10	Min- en max.-waarden uit tabel volgens EN 1745			
Vorst/dooi-weerstand:	klasse	F2	Volgens CEN/TS 772-22			
Wateropneming:	%	17	Maximale waarde volgens EN 771-1, Annex C			
Initiële wateropzuiging	kg/(m²·min)	6	Maximale waarde			
Gehalte actieve oplosbare zouten:	klasse	S2				
Vochtexpansie:	mm/m	NPD				
Brandreactie:	klasse	A1	Commissie Besluit 96/603/EC, aangevuld in het Com			
Vlakheid:	mm	NPD				
Planparalleliteit	mm	NPD				
Gevaarlijke stoffen:	-	NL BSB-1B				



Daadwerkelijk perforatiebeeld kan gering afwijken

Aanvullende nationale technische specificaties:
volgens PTV 23-002 - Baksteen voor gewoon metselwerk

Formaat

M65

Karakteristieke druksterkte vlgs NBN B 24-301

N/mm²

≥ 6

Vorstbestendigheid vlgs NBN B 27-009

Klasse

zéér vorstbestand

Uitbloeiing vlgs NBN B 24-009

uitbloeiingsvrij

Gemiddelde initiële wateropname ten behoeve van de mortelkeuze (EN 772/11)

kg/m²·min

4

Thermische geleidbaarheid : λ_{Ui} volgens NBN B 62-002/A1, Tabel C

W/m.K

0,5

Thermische geleidbaarheid : λ_{Ue} volgens NBN B 62-002/A1, Tabel C

W/m.K

0,99

Benor certificatennummer

BB - 201 - 676 - 500-08



Atinea

Herkomst: Beerse

Beschikbare afmetingen:

Benaming	fabricagestreefmaten L x B x H	stuks/m ² voeg nom. 12 mm	stuks/m ² voeg nom. 5 mm	CE code
M50	188 x 88 x 48 mm	83	98	151660-B1-1210
M65*	188 x 88 x 63 mm	67	76	151670-B1-1210
WF*	215 x 102 x 50 mm	71	83	151600-B1-1210
WFD*	215 x 102 x 65 mm	57	65	151610-B1-1210

* op bestelling

Gebruik :

Type steen : machinale handvormbaksteen

Toepassingsgebied : decoratief dragend en niet-dragend binnen- en buitenmetselwerk

Productie :

Kleisamenstelling : Kempische oud kwartaire klei van het Waaliaan Interglaciaal

Temperatuur en atmosfeer : 1050 °C, oxiderend

Vormgeving : handvorm met frog

Uitzichtkenmerken :

Algemeen : De stenen worden gevormd door het werpen van klei in een mal. Ze vertonen de typische onregelmatige vormen en nerven van oude, handgevormde stenen.

Uitzicht : effen, licht gnuanceerd

Kleurint : roze - de basiskleur is homogeen in de massa

Oppervlaktetextuur : generfd, fijn bezand

Aspect : mat

Prestatiecriteria :

Druksterkte:

- Informatief : gemiddelde druksterkte volgens NBN B 24-301 (oude norm) :
> 15 N/mm²
- gemiddelde druksterkte volgens NBN EN 771-1 (CE-declaratie) en karakteristieke druksterkte volgens NBN B 24-301 (Benor) :
> 12 N/mm²

Vorstbestendigheid:

Euroklasse F2 – zéér vorstbestand volgens NBN B 27-209

Porositeit:

≤ 17 %

Initiële wateropname (gemiddelde i.k.v. verwerking):

4.0 kg/m².min

Conformiteitskeurmerk en normen.

De fabrikant kan in het kader van de Europese Bouwproductenrichtlijn de CE-declaratie voorleggen.

De producten worden geleverd met het Benor-label, welke de overeenkomstigheid aan het CE label en aan de normen NBN EN 771-1 en PTV 23-002 garandeert.

Bijkomende prestatiecriteria + CE declaratie beschikbaar via

<http://ce.wienerberger.com>

Uitvoering:

De gevelstenen worden verwerkt uit 4 à 5 verschillende pakken, en worden weggenomen in diagonale richting.

De gevelstenen worden gemetseld/dungemetseld/verlijmd* volgens halfsteens-/stapel-/wild-/... verband*.

Gebruik de juiste mortelsamenstelling en het verwerkingsadvies voor normaal zuigende gevelstenen.

Vóór uitvoering zullen stalen door de aannemer op de werf neergelegd worden ter goedkeuring van de opdrachtgever.

* schrappen wat niet past

Onderhoud:

Op bleke stenen is veroudering en vervuiling gemakkelijker waarneembaar dan op donker gekleurde bakstenen. Het is daarom aanbevolen de gevel regelmatig te onderhouden of preventieve maatregelen te treffen.

Aanvulling op de uitzichtkenmerken :

Beschadigingen :

Bij stenen bedoeld voor zichtbaar metselwerk zullen bij een steekproef van 100 stenen tenminste 90 stenen aanwezig zijn met één onbeschadigde strek en één onbeschadigde kop, beschreven volgens PTV 23-002.

Fouten :

Het aantal stenen met fouten mag de 5% niet overschrijden.

Worden beschouwd als fout :

- de aanwezigheid van insluitels die door zwelling kunnen aanleiding geven tot afschilferingen in het oppervlak van de steen
- scheuren met breedte ≥ 0.2 mm die aangrijpen op ten minste twee ribben

Beschadigingen en fouten dienen steeds gemeld te worden alvorens te verwerken ! Het metselwerk is te beoordelen van op 2 meter afstand.

Raadpleeg steeds het verwerkings-, veiligheids- en onderhoudsadvies. De specifieke richtlijnen kan u downloaden of telefonisch opvragen.

April 2007.

- Dit document is niet contractueel en vernietigt alle voorgaande publicaties. De fabrikant behoudt zich het recht voor om het productengamma of de productkarakteristieken te wijzigen. De gebruiker dient zich ervan te vergewissen steeds te beschikken over de meest recente beschrijvende tekst.
- De volledige partij dient in één maal besteld te worden aangezien er per verschillende producties een lichte kleurvariatie mogelijk is.
- Er wordt geen aanspraak gemaakt op volledigheid. Daar wij het specifieke gebruik, het respect voor de regels der kunst, de verwerking, de hoedanigheid van de mortels en de weersomstandigheden niet kunnen beoordelen, kan hierbij geen aansprakelijkheid aanvaard worden op grond van deze beschrijvende tekst.
- Niets uit deze tekst mag zonder toestemming worden veranderd.

11.2. Annex B: resultaten ijking weegschaal.

Ijking Weegschaal							
Kleine weegschaal 4kg				Grote weegschaal			
Gewicht (g)	Meting (g) #		%	Gewicht (g)	Meting (g) #		%
0,1	0	-0,1	-1				
0,1	0	-0,1	-1				
0,2	0,2	0	0				
0,5	0,5	0	0	0,9	1	0,1	0,111111
10	10	0	0	10	10	0	0
10	10,1	0,1	0,01	10	10	0	0
20	20	0	0	20	20	0	0
50	50	0	0	50	50	0	0
100	100,1	0,1	0,001	100	100	0	0
100	100	0	0	100	100	0	0
200	200	0	0	200	200	0	0
500	500,2	0,2	0,0004	500	500	0	0
1000	1000,4	0,4	0,0004	1000	1001	1	0,001
2000	2000,9	0,9	0,00045	2000	2001	1	0,0005

11.3. Annex C: initiële waterabsorptie.

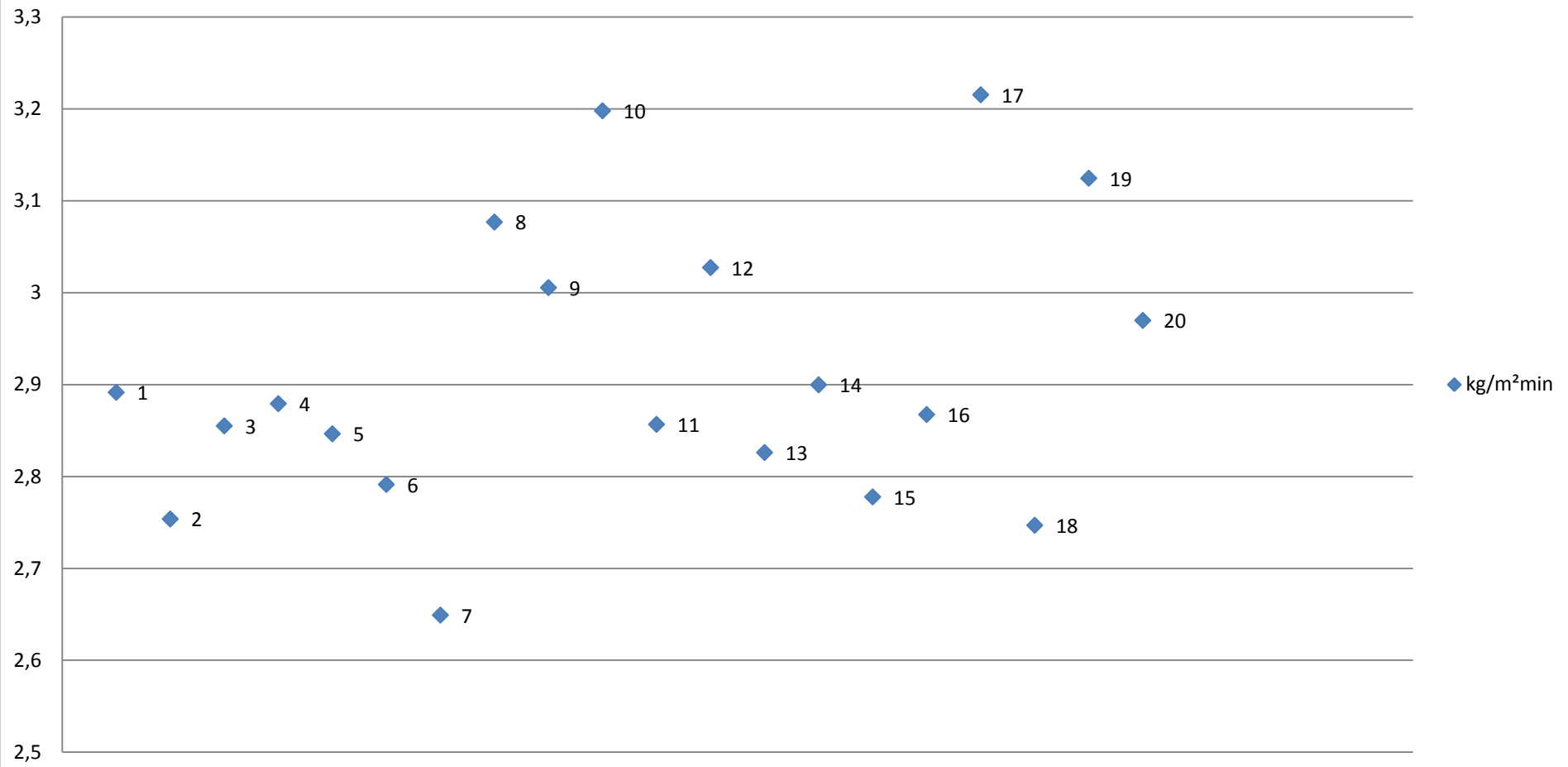
Initiele waterabsorptie*

immersietijd: 60 +/- 2s													
Atinea	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}	Meting	C _{w,s}				
	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
1	1689,5		0,184	0,060333	0,011101		59,83	1	1721,6	2891,545	373,8268	2,891545	0,373827
2	1712,0		0,1845	0,062	0,011439		59,94	1	1743,5	2753,737	355,6838	2,753737	0,355684
3	1644,2		0,186	0,058	0,010788		60,19	1	1675	2855,024	367,9998	2,855024	0,368
4	1687,4		0,1835	0,06	0,01101		59,54	1	1719,1	2879,201	373,1363	2,879201	0,373136
5	1662,6		0,185	0,0583	0,010786		60,03	1	1693,3	2846,414	367,3787	2,846414	0,367379
6	1681,9		0,1845	0,06	0,01107		59,89	1	1712,8	2791,328	360,6897	2,791328	0,36069
7	1684,3		0,1875	0,061	0,011438		59,83	1	1714,6	2649,18	342,4933	2,64918	0,342493
8	1690,3		0,184	0,062	0,011408		59,96	1	1725,4	3076,788	397,3441	3,076788	0,397344
9	1697,4		0,183	0,06	0,01098		60,11	1	1730,4	3005,464	387,6486	3,005464	0,387649
10	1675,4		0,185	0,0595	0,011008		60,01	1	1710,6	3197,82	412,8023	3,19782	0,412802
11	1637,2		0,186	0,05966	0,011097		60,04	1	1668,9	2856,69	368,6742	2,85669	0,368674
12	1663,2		0,187	0,059	0,011033		59,69	1	1696,6	3027,282	391,8339	3,027282	0,391834
13	1694,5		0,1855	0,06066	0,011252		59,53	1	1726,3	2826,056	366,2797	2,826056	0,36628
14	1669,2		0,186	0,061	0,011346		60,06	1	1702,1	2899,7	374,1627	2,8997	0,374163
15	1700,5		0,184	0,063	0,011592		59,71	1	1732,7	2777,778	359,4794	2,777778	0,359479
16	1684,8		0,186	0,06	0,01116		60,09	1	1716,8	2867,384	369,9003	2,867384	0,3699
17	1650,1		0,185	0,058	0,01073		59,95	1	1684,6	3215,284	415,2645	3,215284	0,415264
18	1669,5		0,1855	0,05966	0,011067		59,95	1	1699,9	2746,923	354,774	2,746923	0,354774
19	1852,8		0,19	0,063	0,01197		59,68	1	1890,2	3124,478	404,4483	3,124478	0,404448
20	1827,0		0,189	0,062	0,011718		60,06	1	1861,8	2969,79	383,2067	2,96979	0,383207

Gemiddelde	2912,893	376,3514	2,912893	0,376351
Standaardafwijking	153,3665	19,77529	0,153366	0,019775

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Atinea



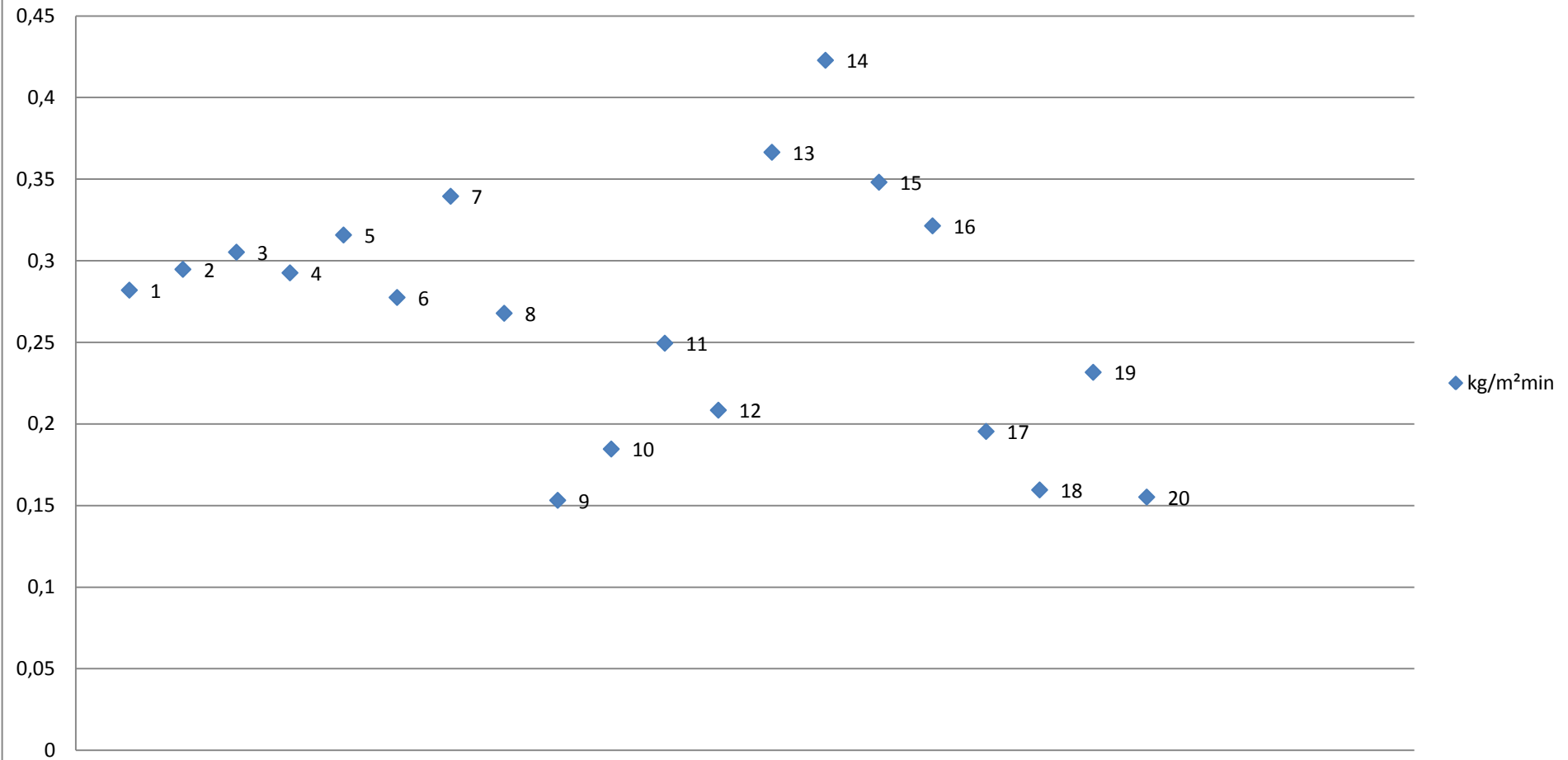
Initiele waterabsorptie*

Leder Wanlin	immersietijd: 60 +/- 2s												
	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}	Meting	C _{w,s}				
	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
1	1552,4		0,1915	0,05	0,009575		59,74	1	1555,1	281,9843	36,48315	0,281984	0,036483
2	1539,6		0,19	0,05	0,0095		60,27	1	1542,4	294,7368	37,96504	0,294737	0,037965
3	1535,6		0,19	0,05	0,0095		59,93	1	1538,5	305,2632	39,43231	0,305263	0,039432
4	1539		0,1895	0,0505	0,00957		59,89	1	1541,8	292,5886	37,8077	0,292589	0,037808
5	1553,7		0,19	0,05	0,0095		59,83	1	1556,7	315,7895	40,82612	0,315789	0,040826
6	1561,1		0,19	0,055	0,01045		59,89	1	1564	277,512	35,85953	0,277512	0,03586
7	1532,3		0,1885	0,05	0,009425		59,97	1	1535,5	339,5225	43,84313	0,339523	0,043843
8	1524,3		0,1905	0,049	0,009335		59,94	1	1526,8	267,8237	34,59319	0,267824	0,034593
9	1524,8		0,1865	0,049	0,009139		59,99	1	1526,2	153,198	19,77943	0,153198	0,019779
10	1548,9		0,186	0,0495	0,009207		59,07	1	1550,6	184,6421	24,02411	0,184642	0,024024
11	1565		0,1905	0,0505	0,00962		60,02	1	1567,4	249,4738	32,20156	0,249474	0,032202
12	1555,9		0,19	0,0505	0,009595		59,63	1	1557,9	208,4419	26,99309	0,208442	0,026993
13	1546		0,191	0,05	0,00955		60,13	1	1549,5	366,4921	47,26276	0,366492	0,047263
14	1527,4		0,192	0,0505	0,009696		60,1	1	1531,5	422,8548	54,54488	0,422855	0,054545
15	1533,8		0,1915	0,0495	0,009479		60,24	1	1537,1	348,1288	44,85362	0,348129	0,044854
16	1551,6		0,191	0,0505	0,009646		60,08	1	1554,7	321,3934	41,46408	0,321393	0,041464
17	1530		0,188	0,049	0,009212		60,25	1	1531,8	195,3973	25,17329	0,195397	0,025173
18	1564		0,188	0,05	0,0094		60,11	1	1565,5	159,5745	20,58212	0,159574	0,020582
19	1550,3		0,185	0,049	0,009065		59,87	1	1552,4	231,6602	29,93966	0,23166	0,02994
20	1538,1		0,186	0,0485	0,009021		60,03	1	1539,5	155,1934	20,03038	0,155193	0,02003

Gemiddelde	268,5835	34,68296	0,268584	0,034683
Standaardafwijking	75,54376	9,730658	0,075544	0,009731

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Leder Wanlin



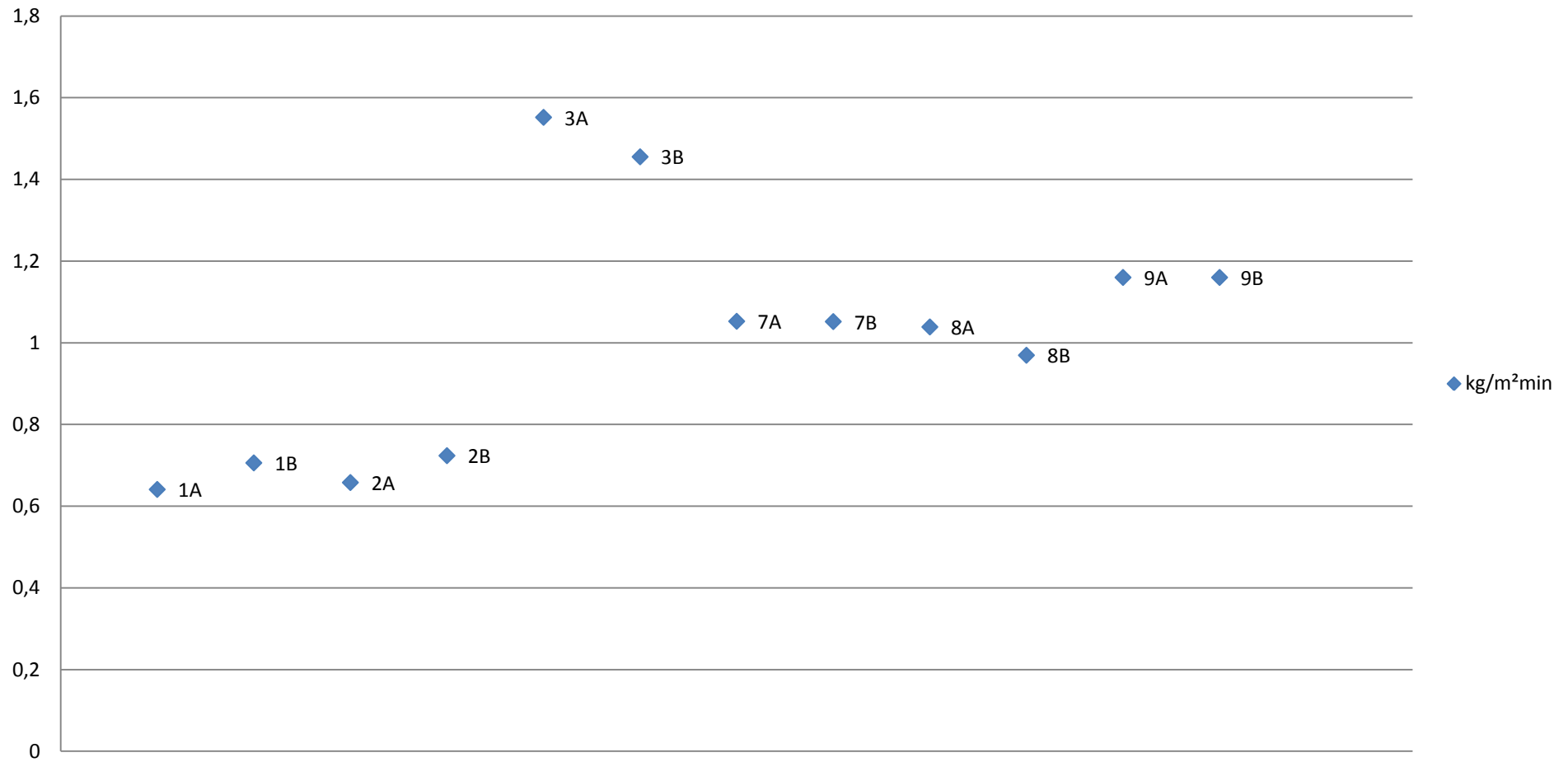
Initiele waterabsorptie*

immersietijd: 60 +/- 2s													
Mortel	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}	Meting	C _{w,s}				
Zand													
	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
1A	251,3		0,04	0,039	0,00156		59,83	1	252,3	641,0256	82,87354	0,641026	0,082874
1B	221,5		0,038	0,041	0,001558		59,89	1	222,6	706,0334	91,23218	0,706033	0,091232
2A	236		0,038	0,04	0,00152		60,07	1	237	657,8947	84,88434	0,657895	0,084884
2B	218,6		0,038	0,04	0,00152		59,93	1	219,7	723,6842	93,48178	0,723684	0,093482
3A	133,2		0,039	0,038	0,001482		59,96	1	135,5	1551,957	200,4236	1,551957	0,200424
3B	285,9		0,039	0,037	0,001443		60,09	1	288	1455,301	187,7379	1,455301	0,187738
7A	207,2		0,038	0,04	0,00152		59,43	1	208,8	1052,632	136,5443	1,052632	0,136544
7B	220,4		0,039	0,039	0,001521		59,39	1	222	1051,94	136,5005	1,05194	0,1365
8A	220		0,038	0,038	0,001444		59,37	1	221,5	1038,781	134,8157	1,038781	0,134816
8B	228		0,038	0,038	0,001444		59,63	1	229,4	969,5291	125,5534	0,969529	0,125553
9A	237,1		0,042	0,039	0,001638		59,87	1	239	1159,951	149,9115	1,159951	0,149912
9B	228,9		0,042	0,039	0,001638		60,34	1	230,8	1159,951	149,3266	1,159951	0,149327

Gemiddelde	1014,057	131,1071	1,014057	0,131107
Standaardafwijking	298,0725	38,45814	0,298072	0,038458

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Zandmortels

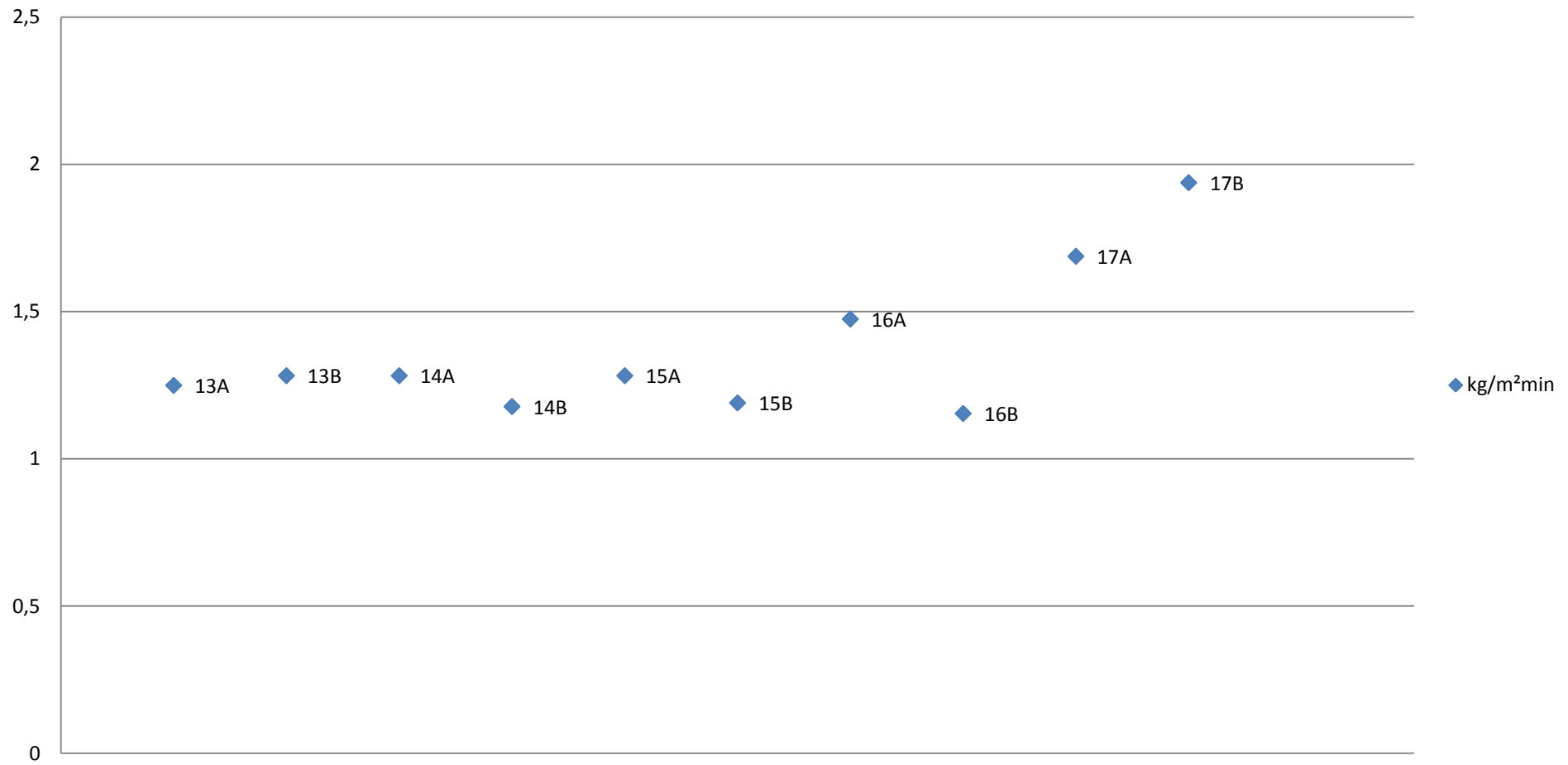


Initiele waterabsorptie*													
	immersietijd: 60 +/- 2s												
Mortel	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}		Meting	C _{w,s}			
Zavel													
	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
13A	232,2		0,039	0,039	0,001521		59,98	1	234,1	1249,178	161,2951	1,249178	0,161295
13B	194,3		0,04	0,039	0,00156		60,27	1	196,3	1282,051	165,141	1,282051	0,165141
14A	223,6		0,038	0,039	0,001482		59,66	1	225,5	1282,051	165,9831	1,282051	0,165983
14B	187,7		0,038	0,038	0,001444		59,47	1	189,4	1177,285	152,6626	1,177285	0,152663
15A	215,5		0,039	0,042	0,001638		60,33	1	217,6	1282,051	165,0588	1,282051	0,165059
15B	252,1		0,041	0,041	0,001681		59,83	1	254,1	1189,768	153,8164	1,189768	0,153816
16A	165,3		0,04	0,039	0,00156		64,27	1	167,6	1474,359	183,9074	1,474359	0,183907
16B	261,5		0,04	0,039	0,00156		59,03	1	263,3	1153,846	150,1798	1,153846	0,15018
17A	236,2		0,04	0,04	0,0016		59,37	1	238,9	1687,5	219,0081	1,6875	0,219008
17B	217,4		0,04	0,04	0,0016		59,44	1	220,5	1937,5	251,3057	1,9375	0,251306

Gemiddelde	1371,559	176,8358	1,371559	0,176836
Standaardafwijking	255,5771	33,0552	0,255577	0,033055

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Zavelmortel



Initiele waterabsorptie*

immersietijd: 60 +/- 2s													
Gehelen	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}	Meting	C _{w,s}				
Atinea													
Zand	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
4 en 5	3883,7		0,186	0,135	0,02511		59,71	1	3955,7	2867,384	371,0755	2,867384	0,371075
6 en 24	3849		0,135	0,184	0,02484		59,79	1	3917,6	2761,675	357,1562	2,761675	0,357156
7 en 8	3938,8		0,186	0,1365	0,025389		59,96	1	4021,5	3257,316	420,658	3,257316	0,420658
18 en 19	4044		0,186	0,137	0,025482		59,31	1	4214	6671,376	866,2664	6,671376	0,866266

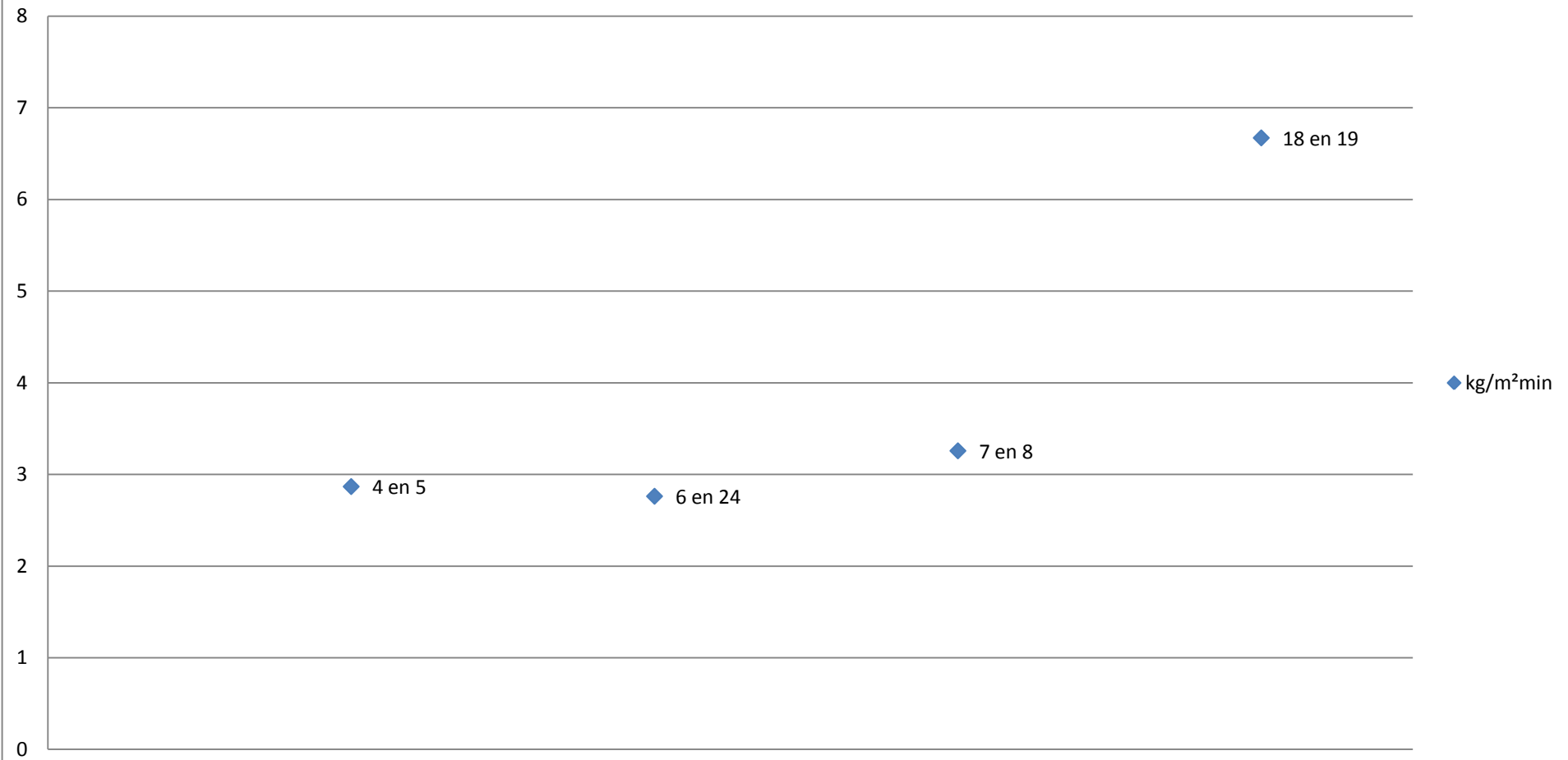
Gemiddelde	3889,438	503,789	3,889438	0,503789
Standaardafwijking	1866,833	243,1835	1,866833	0,243184

Gehelen	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}	Meting	C _{w,s}				
Atinea													
Zavel	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
1 en 2	3831		0,185	0,134	0,02479		59,29	1	3903,7	2932,634	380,8616	2,932634	0,380862
3 en 20	3941		0,188	0,136	0,025568		58,93	1	4009	2659,574	346,4527	2,659574	0,346453
14 en 15	3817		0,1845	0,135	0,024908		58,98	1	3882,4	2625,715	341,8969	2,625715	0,341897
16 en 17	3894		0,184	0,1365	0,025116		Gefaald						

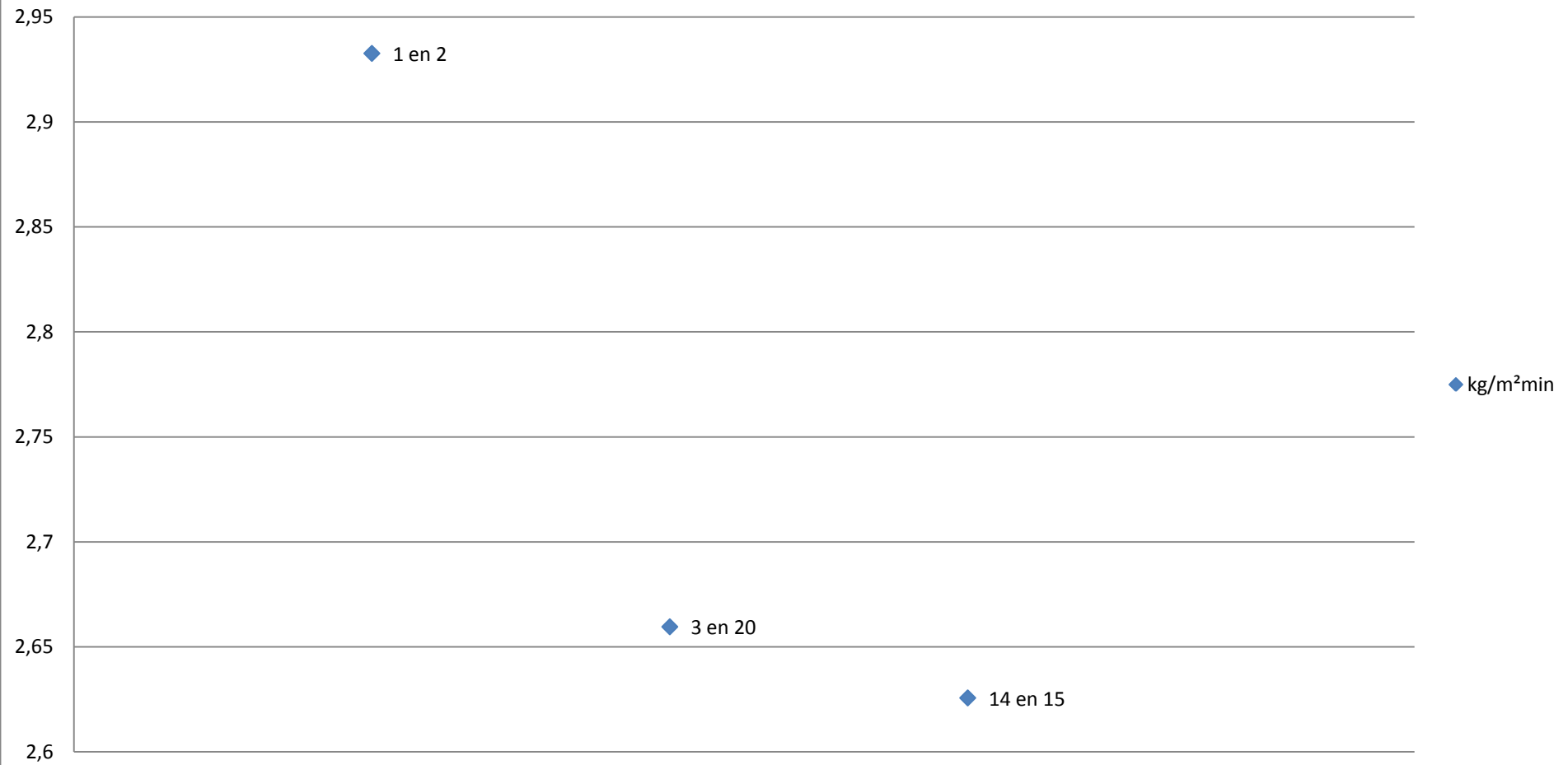
Gemiddelde	2739,308	356,4037	2,739308	0,356404
Standaardafwijking	168,2792	21,30324	0,168279	0,021303

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Atinea gehelen Zand



Atinea gehelen Zavel



Initiele waterabsorptie*

	immersietijd: 60 +- 2s												
Gehelen	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}		Meting	C _{w,s}			
Leder													
zand	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
4 en 24	3487,1		0,112	0,19	0,02128		59,92	1	3492,9	272,5564	35,21036	0,272556	0,03521
5 en 6	3583,8		0,114	0,19	0,02166		59,41	1	3588,7	226,2235	29,34998	0,226223	0,02935
7 en 8	3503,9		0,11	0,189	0,02079		59,72	1	3508,1	202,0202	26,14176	0,20202	0,026142
9 en 10	3506,6		0,1125	0,187	0,021038		59,84	1	3510,9	204,3969	26,42278	0,204397	0,026423

Gemiddelde	226,2992	29,28122	0,226299	0,029281
Standaardafwijking	32,70532	4,210553	0,032705	0,004211

Gehelen	Massa ini		lengte	breedte	As		t _{immersie}		Meting	C _{w,s}			
Leder													
zavel	g		m	m	m ²		s	min	g	g/m ² min	g/m ² s ^{0,5}	kg/m ² min	kg/m ² s ^{0,5}
3 en 20	3581,7		0,189	0,111	0,020979		60,17	1	3589	347,967	44,85884	0,347967	0,044859
14 en 15	3522		0,1905	0,1115	0,021241		60,07	1	3535,4	630,8628	81,39658	0,630863	0,081397
16 en 17	3508,6		0,1905	0,1105	0,02105		59,39	1	3517,1	403,7957	52,39683	0,403796	0,052397
18 en 19	3582		0,1095	0,188	0,020586		60	1	3589,8	378,8983	48,91556	0,378898	0,048916

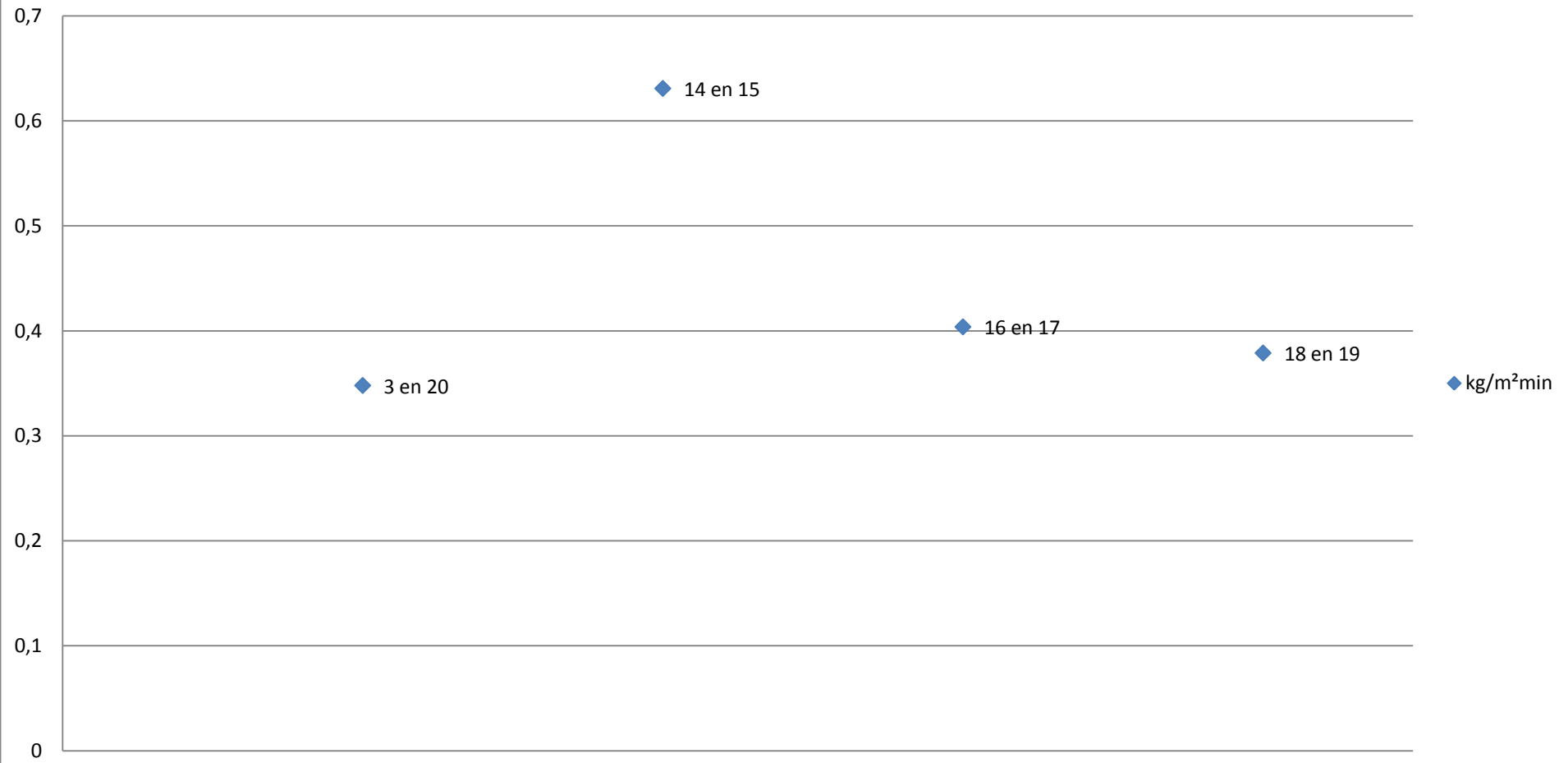
Gemiddelde	440,381	56,89195	0,440381	0,056892
Standaardafwijking	129,0249	16,62429	0,129025	0,016624

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Leder gehelen zand



Leder gehelen zavel



11.4. Annex D: waterabsorptie door immersie.

Waterabsorptie door immersie*

Atinea	Massa ini	1u	W _s	3u	W _s	8u	W _s	24u	W _s	48u	W _s	72u	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1	1688,5	1920	13,71039	1920,9	13,7637	1923,1	13,89399	1928	14,18419	1931,4	14,38555	1935,7	14,64021
2	1710,5	1943,4	13,6159	1944,9	13,7036	1947,5	13,8556	1952,1	14,12452	1956,3	14,37007	1960,8	14,63315
3	1643,3	1862,7	13,35118	1864,8	13,47898	1866,4	13,57634	1870,9	13,85018	1872,8	13,9658	1876,6	14,19704
4	1686,6	1910,4	13,2693	1912,2	13,37602	1914	13,48275	1917,3	13,67841	1920,5	13,86814	1923,4	14,04008
5	1661,7	1887,6	13,59451	1889,2	13,6908	1891,9	13,85328	1895,1	14,04586	1899,1	14,28657	1902,2	14,47313
6	1681,1	1907,7	13,47927	1909,1	13,56255	1910,4	13,63988	1913,9	13,84808	1917,4	14,05627	1920,9	14,26447

Gemiddelde	13,50343	13,59594	13,71697	13,95521	14,1554	14,37468
Standaardafwijking	0,168736	0,149592	0,17304	0,194136	0,221157	0,246034

Atinea		96u	W _s	168u	W _s	192u	W _s	216u	W _s	240	W _s	267	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1		1937,8	14,76458	1945,3	15,20877	1946,8	15,2976	1946,4	15,27391	1947,4	15,33314	1948	15,36867
2		1963,2	14,77346	1971,1	15,23531	1972,3	15,30547	1972,3	15,30547	1974	15,40485	1974,7	15,44578
3		1877,9	14,27615	1883,6	14,62301	1884,4	14,6717	1884,7	14,68995	1885,7	14,75081	1885,2	14,72038
4		1926,2	14,2061	1931,1	14,49662	1931,7	14,53219	1931,9	14,54405	1932,5	14,57963	1932,6	14,58556
5		1904,9	14,63561	1912,1	15,06891	1912,2	15,07492	1912,6	15,099	1913,4	15,14714	1913,7	15,16519
6		1923,6	14,42508	1929,2	14,75819	1929,6	14,78199	1929,8	14,79388	1930,8	14,85337	1931,2	14,87716

Gemiddelde	14,5135	14,89847	14,94398	14,95104	15,01149	15,02712
Standaardafwijking	0,246651	0,314906	0,329488	0,319455	0,333483	0,352859

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-21: 2011

Waterabsorptie door immersie*

Atinea		336u	W _s	360u	W _s	384u	W _s	408u	W _s	504u	W _s	528u	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1		1951,9	15,59964	1952,9	15,65887	1943	15,07255	1954,4	15,74771	1956,8	15,88984	1956,4	15,86615
2		1978,3	15,65624	1979,7	15,73809	1974,6	15,43993	1980,9	15,80824	1984,2	16,00117	1984,3	16,00702
3		1888,7	14,93337	1890,9	15,06724	1889,4	14,97596	1891,3	15,09158				
4		1936	14,78715	1937,2	14,85829								
5		1916,5	15,33369	1917,5	15,39387								
6		1933,7	15,02588	1934,8	15,09131								

Gemiddelde	15,22266	15,30128	15,16281	15,54918	15,94551	15,93658
Standaardafwijking	0,361808	0,352801	0,2448	0,397442	0,07872	0,099605

Atinea	Massa ini	552u	W _s	576u	W _s	600u	W _s	672u	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%
1	1688,5	1957,3	15,91946	1958	15,96091	1958,2	15,97276	1959,3	16,0379
2	1710,5	1984,3	16,00702	1984,3	16,00702	1985,1	16,05379	1987,3	16,1824

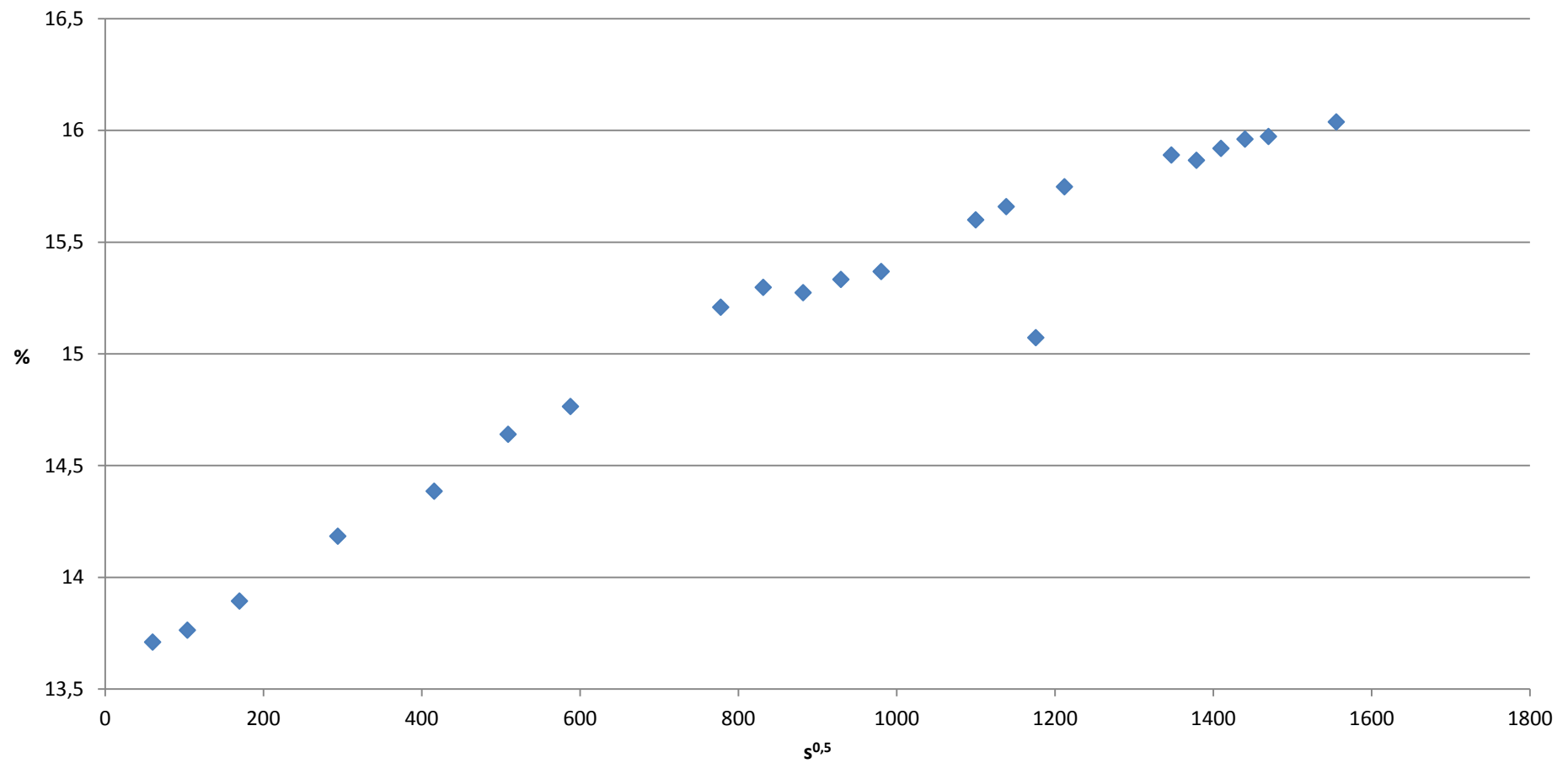
Gemiddelde	15,96324	15,98396	16,01327	16,11015
Standaardafwijking	0,061915	0,0326	0,057296	0,102176

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-21: 2011

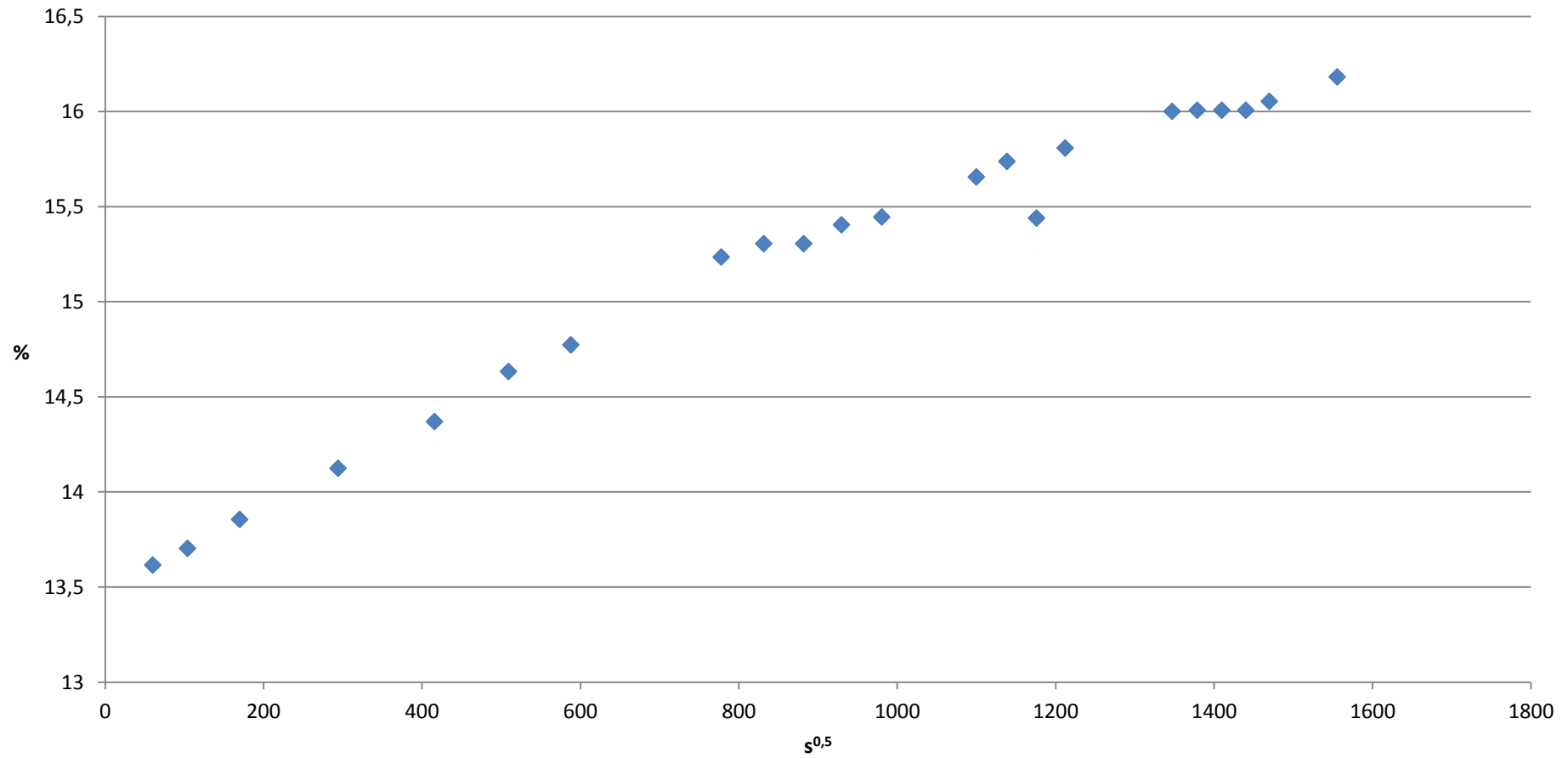
Waterabsorptie door immersie*

Atinea										
tijd			Steen							
Uur	seconden	s ^{0,5}	1	2	3	4	5	6	Gemiddelde	Standaard afwijking
									%	%
1	3600	60	13,71039	13,6159	13,35118	13,2693	13,59451	13,47927	13,5034266	0,168736324
3	10800	103,923	13,7637	13,7036	13,47898	13,37602	13,6908	13,56255	13,59593932	0,149592199
8	28800	169,7056	13,89399	13,8556	13,57634	13,48275	13,85328	13,63988	13,71697243	0,173040446
24	86400	293,9388	14,18419	14,12452	13,85018	13,67841	14,04586	13,84808	13,95520504	0,194136238
48	172800	415,6922	14,38555	14,37007	13,9658	13,86814	14,28657	14,05627	14,15540013	0,221156737
72	259200	509,1169	14,64021	14,63315	14,19704	14,04008	14,47313	14,26447	14,3746807	0,246034225
96	345600	587,8775	14,76458	14,77346	14,27615	14,2061	14,63561	14,42508	14,51349695	0,246650975
168	604800	777,6889	15,20877	15,23531	14,62301	14,49662	15,06891	14,75819	14,89846849	0,314906158
192	691200	831,3844	15,2976	15,30547	14,6717	14,53219	15,07492	14,78199	14,94397851	0,329488336
216	777600	881,8163	15,27391	15,30547	14,68995	14,54405	15,099	14,79388	14,95104404	0,319454906
240	864000	929,516	15,33314	15,40485	14,75081	14,57963	15,14714	14,85337	15,01148842	0,333482724
267	961200	980,4081	15,36867	15,44578	14,72038	14,58556	15,16519	14,87716	15,02712317	0,352859219
336	1209600	1099,818	15,59964	15,65624	14,93337	14,78715	15,33369	15,02588	15,22266123	0,361808299
360	1296000	1138,42	15,65887	15,73809	15,06724	14,85829	15,39387	15,09131	15,30127961	0,352800759
384	1382400	1175,755	15,07255	15,43993	14,97596				15,16281415	0,244800071
408	1468800	1211,941	15,74771	15,80824	15,09158				15,54917743	0,397441843
504	1814400	1346,997	15,88984	16,00117						
528	1900800	1378,695	15,86615	16,00702						
552	1987200	1409,681	15,91946	16,00702						
576	2073600	1440	15,96091	16,00702						
600	2160000	1469,694	15,97276	16,05379						
672	2419200	1555,378	16,0379	16,1824						

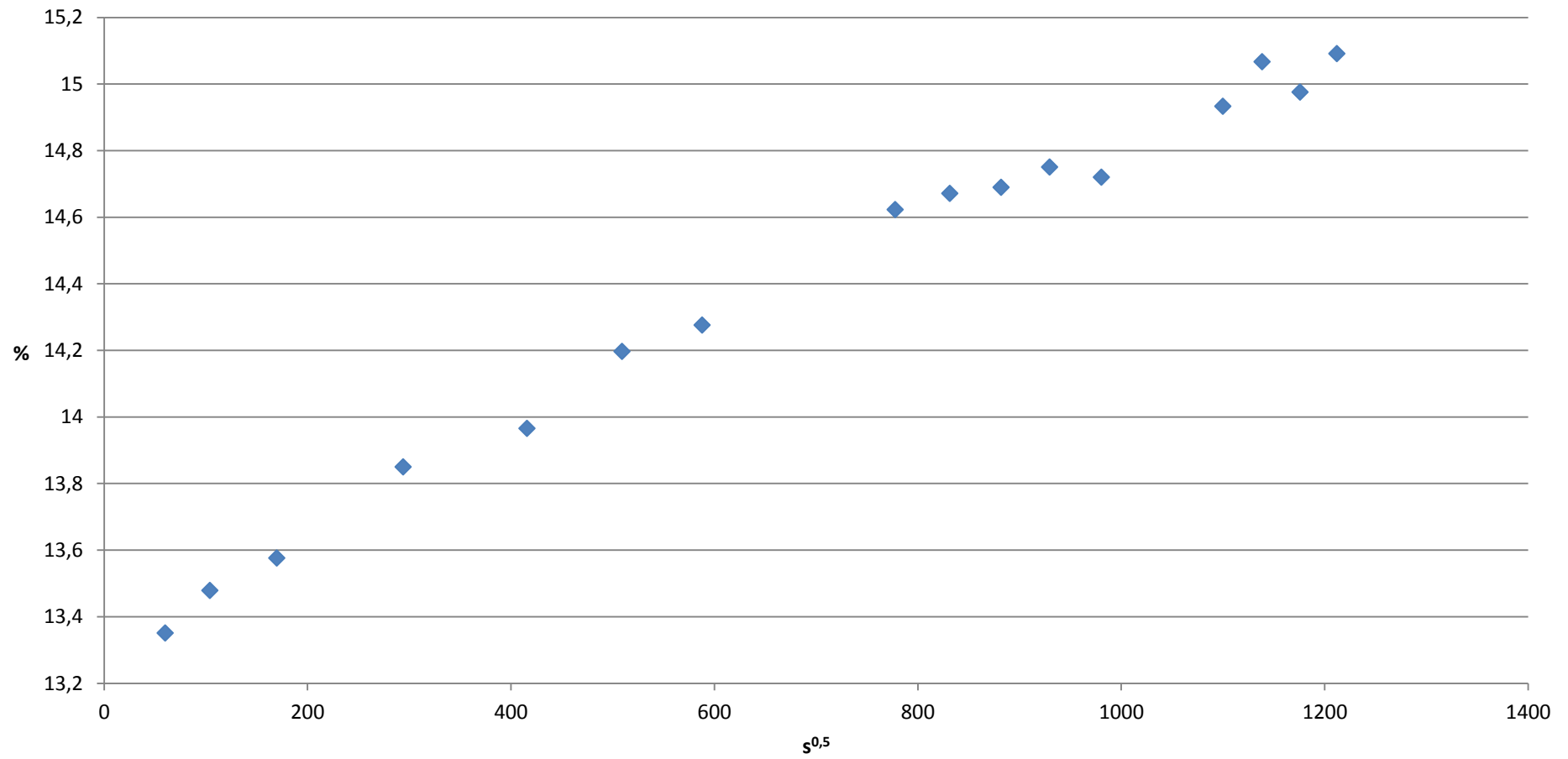
Atinea 1



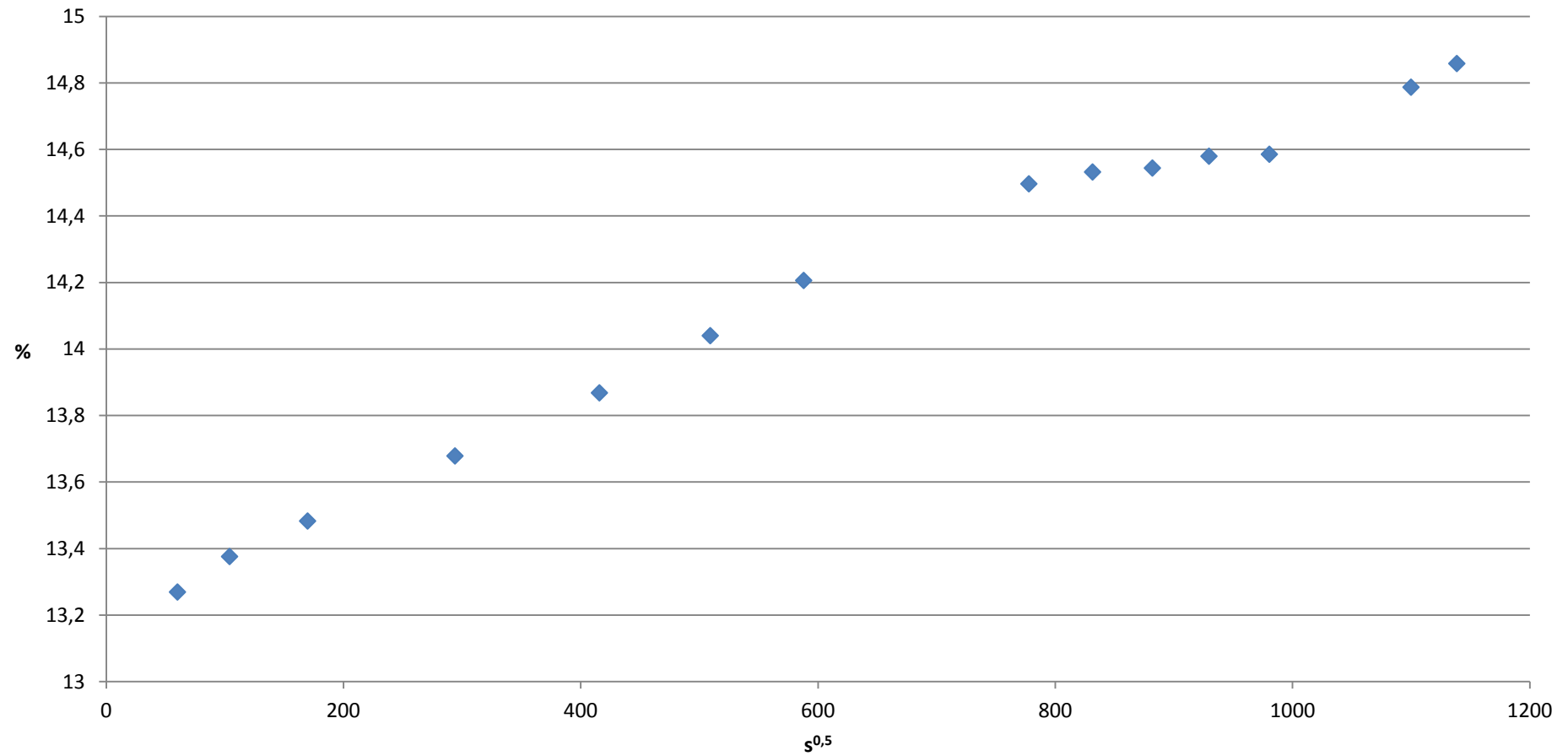
Atinea 2



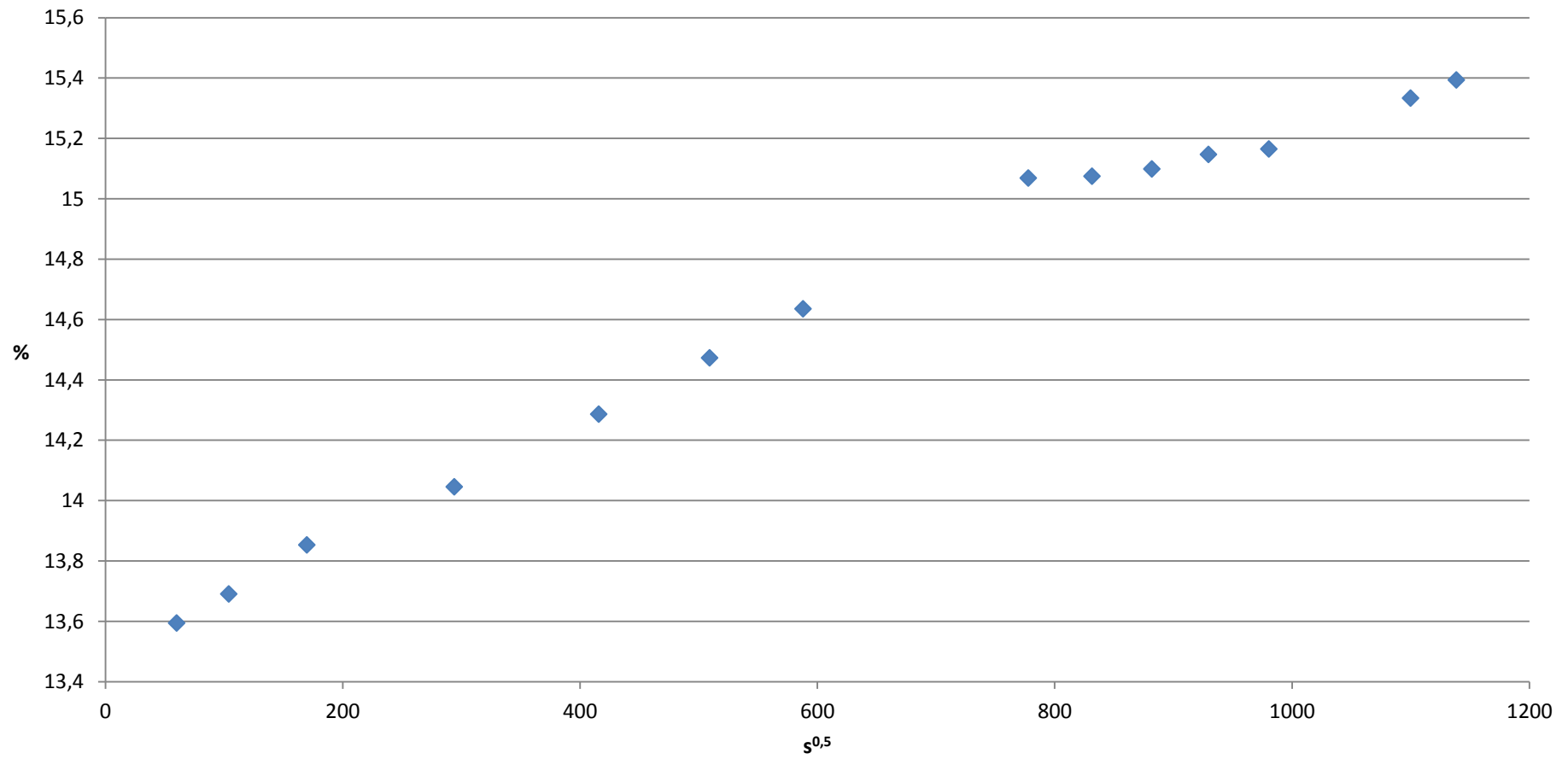
Atinea 3



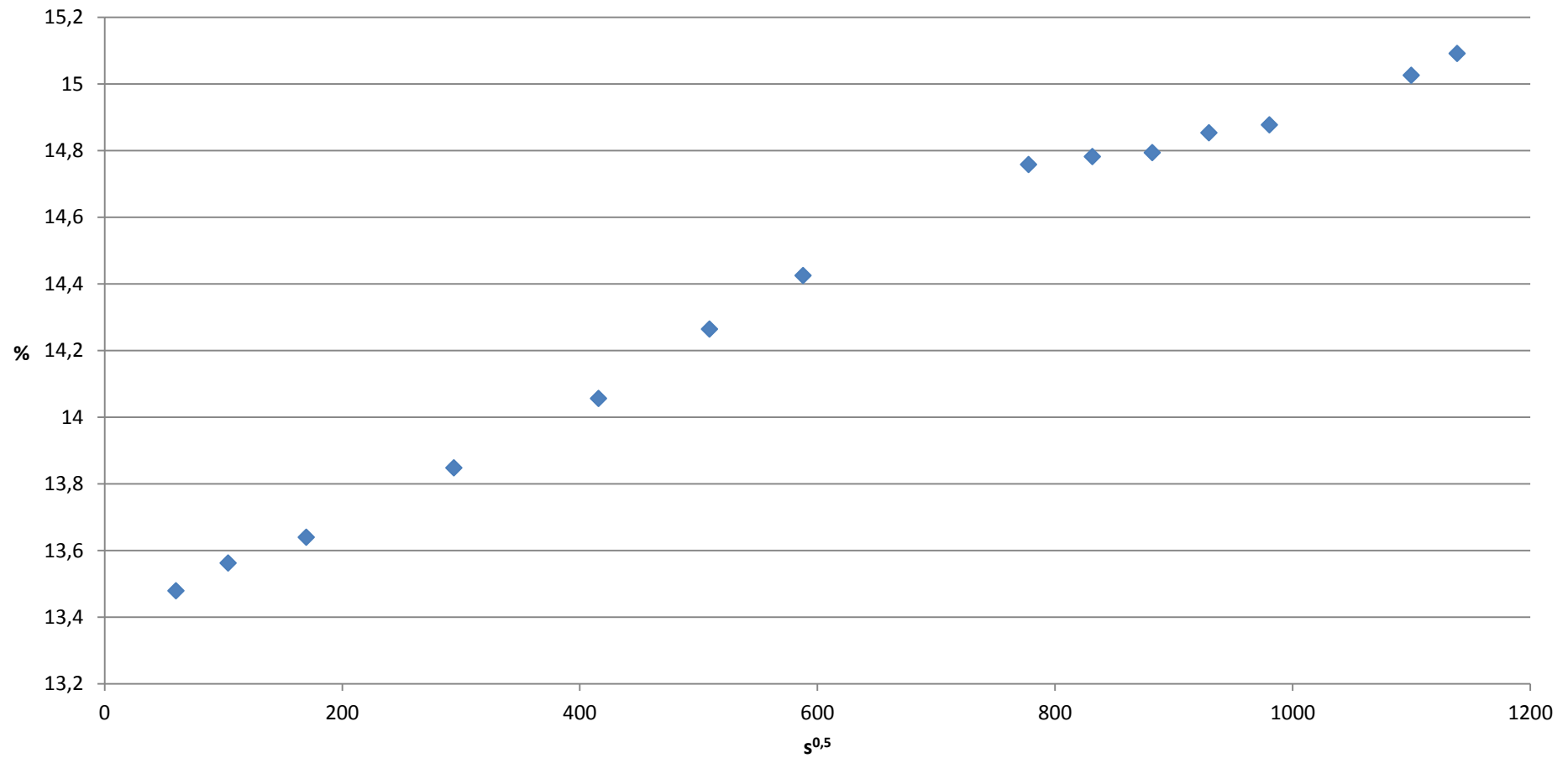
Atinea 4



Atinea 5



Atinea 6



Waterabsorptie door immersie

Leder Wanlin	Massa ini	1u	W _s	3u	W _s	8u	W _s	24u	W _s	48u	W _s	72u	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1	1551,8	1621,7	4,504446	1633,1	5,239077	1638,8	5,606393	1643,3	5,896378	1647,4	6,160588	1649,1	6,270138
2	1539	1610,5	4,645874	1620,4	5,289149	1625	5,588044	1628,9	5,841455	1632,5	6,075374	1636,9	6,361274
3	1535,2	1608,9	4,800677	1617,7	5,373893	1621,8	5,640959	1627,7	6,025274	1631,7	6,285826	1634,9	6,494268
4	1538,6	1609,3	4,595086	1620,6	5,32952	1623,4	5,511504	1631,3	6,024958	1632,5	6,102951	1636,1	6,33693
5	1553,1	1627,5	4,790419	1637,9	5,460048	1640,3	5,614577	1646,4	6,00734	1650,2	6,252012	1652,2	6,380787
6	1560,6	1627,2	4,267589	1642,2	5,228758	1645,4	5,433808	1650,2	5,741382	1654,1	5,991285	1656,9	6,170704
7	1531,9	1615,5	5,457275	1620	5,751028	1622,7	5,92728	1628,8	6,325478	1632,1	6,540897	1633,3	6,619231
8	1523,7	1587,3	4,17405	1601,3	5,092866	1603,3	5,224125	1607,9	5,526022	1614,4	5,952615	1612,4	5,821356
9	1524,3	1565,4	2,69632	1578,4	3,54917	1589,8	4,297054	1595,3	4,657876	1600,8	5,018697	1600,3	4,985895
10	1548,8	1583,3	2,227531	1598,6	3,215393	1613,6	4,183884	1619,7	4,577738	1621,7	4,70687	1624,1	4,861829

Gemiddelde	4,215927	4,95289	5,302763	5,66239	5,908711	6,030241
Standaardafwijking	0,993989	0,8494	0,587412	0,588688	0,58061	0,62053

Leder Wanlin	Massa ini	96u	W _s	168u	W _s	192u	W _s	216u	W _s	240u	W _s	267u	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1	1551,8	1651,2	6,405465	1657,6	6,817889	1657,9	6,837221	1659,6	6,946771	1659,3	6,927439	1660,9	7,030545
2	1539	1637	6,367771	1641,8	6,679662	1645,1	6,894087	1645,6	6,926576	1647,1	7,024042	1647,9	7,076023
3	1535,2	1634,9	6,494268	1639,9	6,819958	1641,8	6,943721	1643,2	7,034914	1644,4	7,11308	1644,5	7,119594
4	1538,6	1637,3	6,414923	1642,1	6,726895	1643,6	6,824386	1643,8	6,837385	1645,5	6,947875	1646,7	7,025868
5	1553,1	1655	6,561071	1659,4	6,844376	1660,8	6,934518	1663,3	7,095486	1664,4	7,166313	1664,4	7,166313
6	1560,6	1658,6	6,279636	1663,2	6,574394	1664,8	6,676919	1666,1	6,76022	1667,2	6,830706	1667	6,817891
7	1531,9	1635	6,730204	1641,2	7,13493	1642,4	7,213265	1642,7	7,232848	1644,3	7,337294	1643,8	7,304654
8	1523,7	1614,3	5,946052	1618,5	6,221697	1621,3	6,40546	1620,5	6,352957	1622,7	6,497342	1623	6,517031
9	1524,3	1601	5,031818	1605,5	5,327035	1606,5	5,392639	1606,9	5,418881	1607,7	5,471364	1607,9	5,484485
10	1548,8	1625,8	4,971591	1630	5,242769	1630,5	5,275052	1630,9	5,300878	1631,6	5,346074	1631,9	5,365444

Gemiddelde	6,12028	6,438961	6,539727	6,590692	6,666153	6,690785
Standaardafwijking	0,623213	0,650737	0,668322	0,690169	0,699346	0,700872

Waterabsorptie door immersie

Leder Wanlin	Massa ini	336u	W _s	360u	W _s	384u	W _s	408u	W _s	504u	W _s	528u	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1	1551,8	1663	7,165872	1664,8	7,281866	1655,9	6,708339	1667,1	7,430081	1666,2	7,372084	1665,5	7,326975
2	1539	1649,8	7,19948	1651,2	7,290448	1641,9	6,68616	1650,8	7,264457	1653,7	7,452891	1652,3	7,361923
3	1535,2	1646,8	7,269411	1646,9	7,275925	1639,1	6,767848	1649,3	7,432256				
4	1538,6	1649,4	7,201352	1649,6	7,214351								
5	1553,1	1666,5	7,301526	1666,7	7,314403								
6	1560,6	1669,8	6,997309	1671,2	7,087018								
7	1531,9	1647,8	7,565768										
8	1523,7	1627,3	6,799239										
9	1524,3	1610,5	5,655055										
10	1548,8	1633,6	5,475207										

Gemiddelde	6,863022	7,244002	6,720782	7,375598	7,412488	7,344449
Standaardafwijking	0,713208	0,083773	0,042242	0,096257	0,05714	0,024712

Waterabsorptie door immersie

Leder Wanlin	Massa ini	552u	W _s	576u	W _s	600u	W _s	672u	W _s	696u	W _s	720u	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1	1551,8	1666,4	7,384972	1665,9	7,352752	1666,5	7,391416	1667,4	7,449414	1668,6	7,526743	1669	7,55252
2	1539	1652,7	7,387914	1653,9	7,465887	1652,5	7,374919	1653,4	7,433398	1653,8	7,459389	1656,2	7,615335

Waterabsorptie door immersie

Leder Wanlin	Massa ini	744u	W _s	768u	W _s	864u	W _s	888u	W _s	912	W _s	984	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1	1551,8	1669,6	7,591184	1669,9	7,610517	1668,7	7,533187	1670,6	7,655626	1671,8	7,732955	1672,4	7,77162
2	1539	1655,1	7,54386	1655	7,537362	1655,1	7,54386	1656,3	7,621832	1657,7	7,712801	1659,5	7,82976

Waterabsorptie door immersie

Leder Wanlin	Massa ini	1008	W _s	1032	W _s	1056	W _s	1080	W _s	1152	W _s	1176	W _s
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1	1551,8	1672,9	7,803841	1674	7,874726	1673	7,810285	1674,5	7,906947	1673,8	7,861838	1673,4	7,836061
2	1539	1659,5	7,82976	1660	7,862248	1659	7,797271	1662	7,992203	1661,4	7,953216	1660,5	7,894737

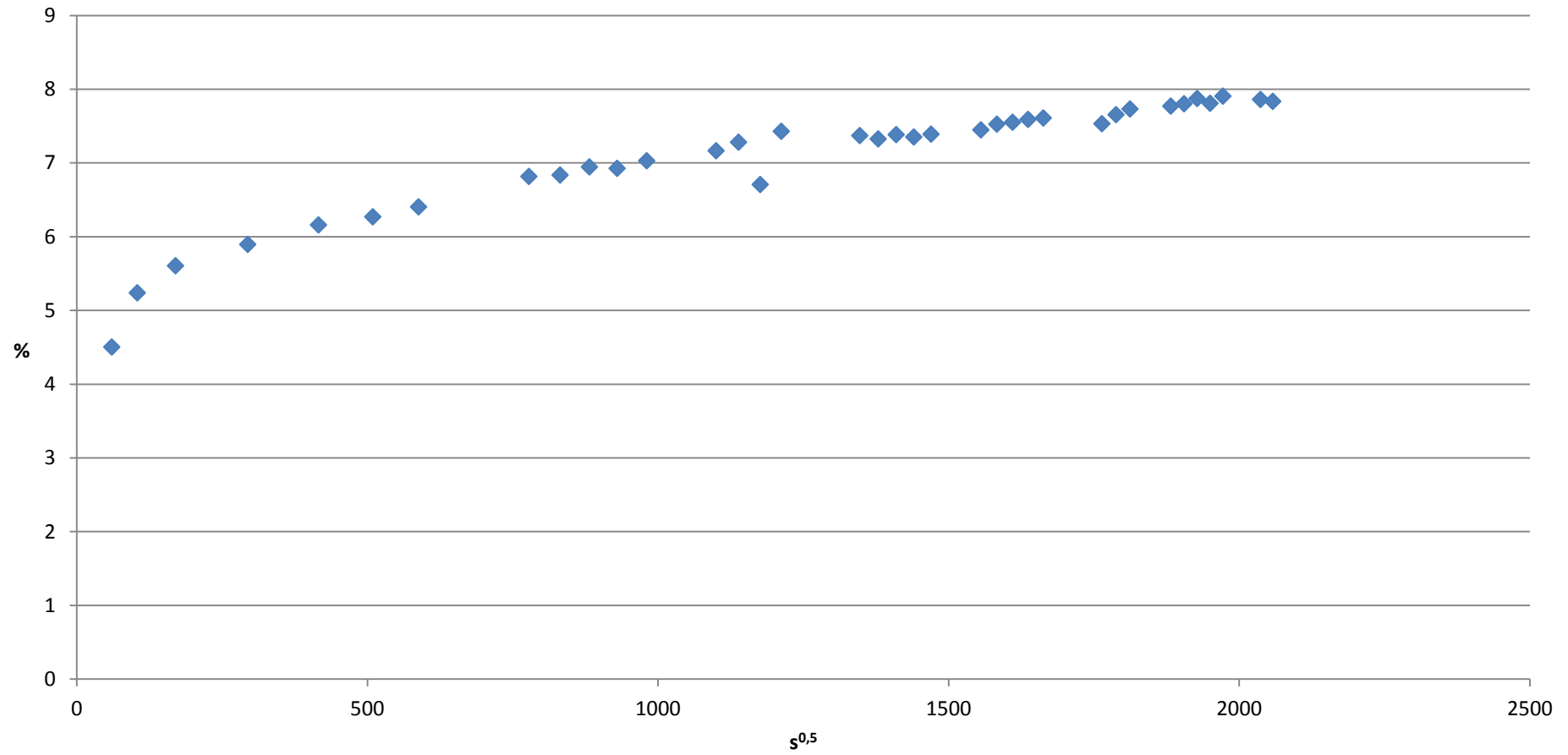
Waterabsorptie door immersie*

Leder Wanlin													
tijd		Steen										Gem.	St. afwijk.
Uur	s ^{0,5}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	%	
1	60	4,504446	4,645874	4,800677	4,595086	4,790419	4,267589	5,457275	4,17405	2,69632	2,227531	4,215927	0,993989
3	103,923	5,239077	5,289149	5,373893	5,32952	5,460048	5,228758	5,751028	5,092866	3,54917	3,215393	4,95289	0,8494
8	169,7056	5,606393	5,588044	5,640959	5,511504	5,614577	5,433808	5,92728	5,224125	4,297054	4,183884	5,302763	0,587412
24	293,9388	5,896378	5,841455	6,025274	6,024958	6,00734	5,741382	6,325478	5,526022	4,657876	4,577738	5,66239	0,588688
48	415,6922	6,160588	6,075374	6,285826	6,102951	6,252012	5,991285	6,540897	5,952615	5,018697	4,70687	5,908711	0,58061
72	509,1169	6,270138	6,361274	6,494268	6,33693	6,380787	6,170704	6,619231	5,821356	4,985895	4,861829	6,030241	0,62053
96	587,8775	6,405465	6,367771	6,494268	6,414923	6,561071	6,279636	6,730204	5,946052	5,031818	4,971591	6,12028	0,623213
168	777,6889	6,817889	6,679662	6,819958	6,726895	6,844376	6,574394	7,13493	6,221697	5,327035	5,242769	6,438961	0,650737
192	831,3844	6,837221	6,894087	6,943721	6,824386	6,934518	6,676919	7,213265	6,40546	5,392639	5,275052	6,539727	0,668322
216	881,8163	6,946771	6,926576	7,034914	6,837385	7,095486	6,76022	7,232848	6,352957	5,418881	5,300878	6,590692	0,690169
240	929,516	6,927439	7,024042	7,11308	6,947875	7,166313	6,830706	7,337294	6,497342	5,471364	5,346074	6,666153	0,699346
267	980,4081	7,030545	7,076023	7,119594	7,025868	7,166313	6,817891	7,304654	6,517031	5,484485	5,365444	6,690785	0,700872
336	1099,818	7,165872	7,19948	7,269411	7,201352	7,301526	6,997309	7,565768	6,799239	5,655055	5,475207	6,863022	0,713208
360	1138,42	7,281866	7,290448	7,275925	7,214351	7,314403	7,087018					7,244002	0,083773
384	1175,755	6,708339	6,68616	6,767848								6,720782	0,042242
408	1211,941	7,430081	7,264457	7,432256								7,375598	0,096257
504	1346,997	7,372084	7,452891									7,412488	0,05714
528	1378,695	7,326975	7,361923									7,344449	0,024712
552	1409,681	7,384972	7,387914									7,386443	0,00208
576	1440	7,352752	7,465887									7,409319	0,079999
600	1469,694	7,391416	7,374919									7,383168	0,011666
672	1555,378	7,449414	7,433398									7,441406	0,011325
696	1582,909	7,526743	7,459389									7,493066	0,047626
720	1609,969	7,55252	7,615335									7,583927	0,044417
744	1636,582	7,591184	7,54386									7,567522	0,033464
768	1662,769	7,610517	7,537362									7,573939	0,051728
864	1763,633	7,533187	7,54386									7,538523	0,007547
888	1787,96	7,655626	7,621832									7,638729	0,023896

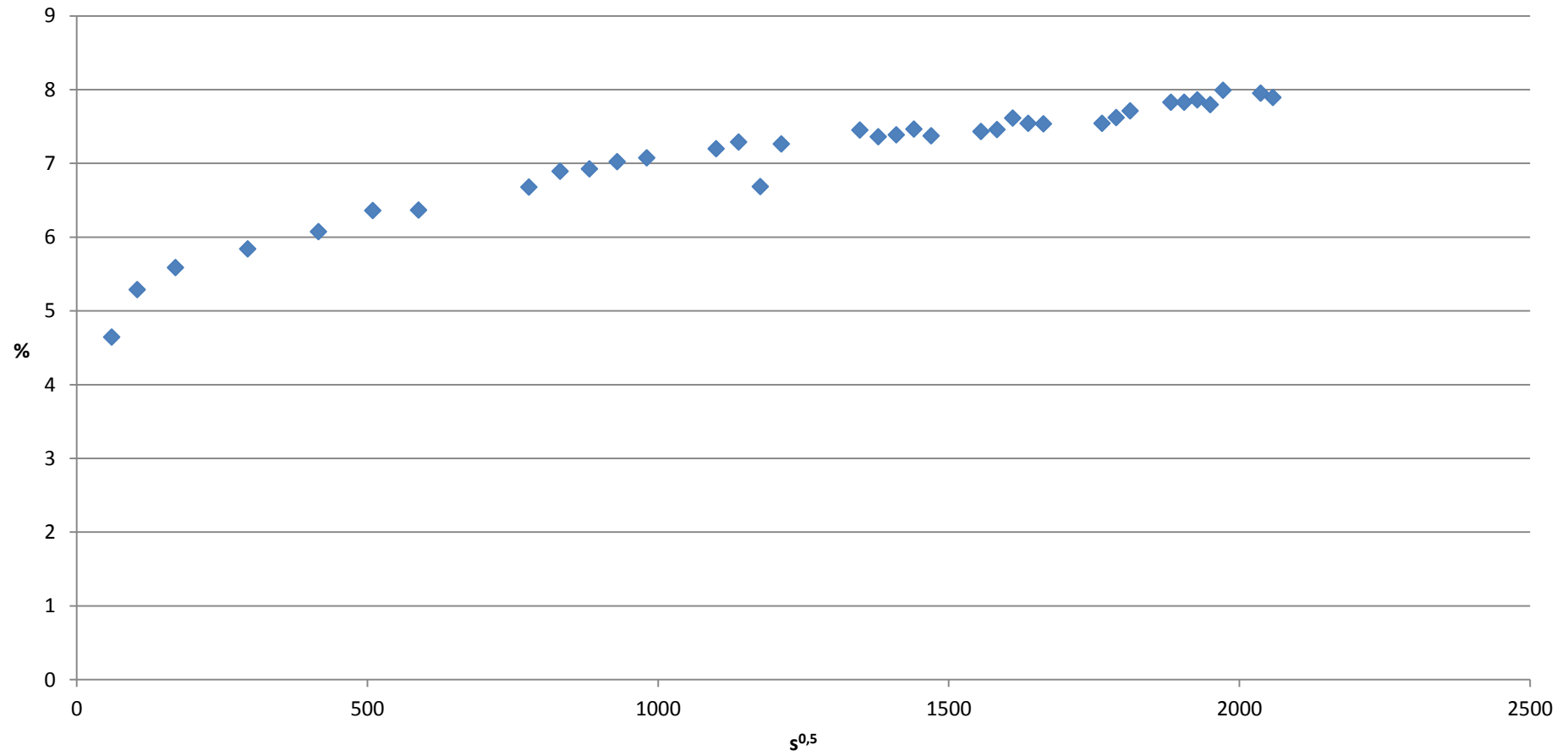
Waterabsorptie door immersie*

Leder Wanlin													
tijd		Steen										Gem.	St. afwijk.
Uur	s ^{0,5}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	%	
912	1811,96	7,732955	7,712801									7,722878	0,014252
984	1882,126	7,77162	7,82976									7,80069	0,041111
1008	1904,941	7,803841	7,82976									7,8168	0,018327
1032	1927,485	7,874726	7,862248									7,868487	0,008823
1056	1949,769	7,810285	7,797271									7,803778	0,009202
1080	1971,801	7,906947	7,992203									7,949575	0,060285
1152	2036,468	7,861838	7,953216									7,907527	0,064614
1176	2057,571	7,836061	7,894737									7,865399	0,04149

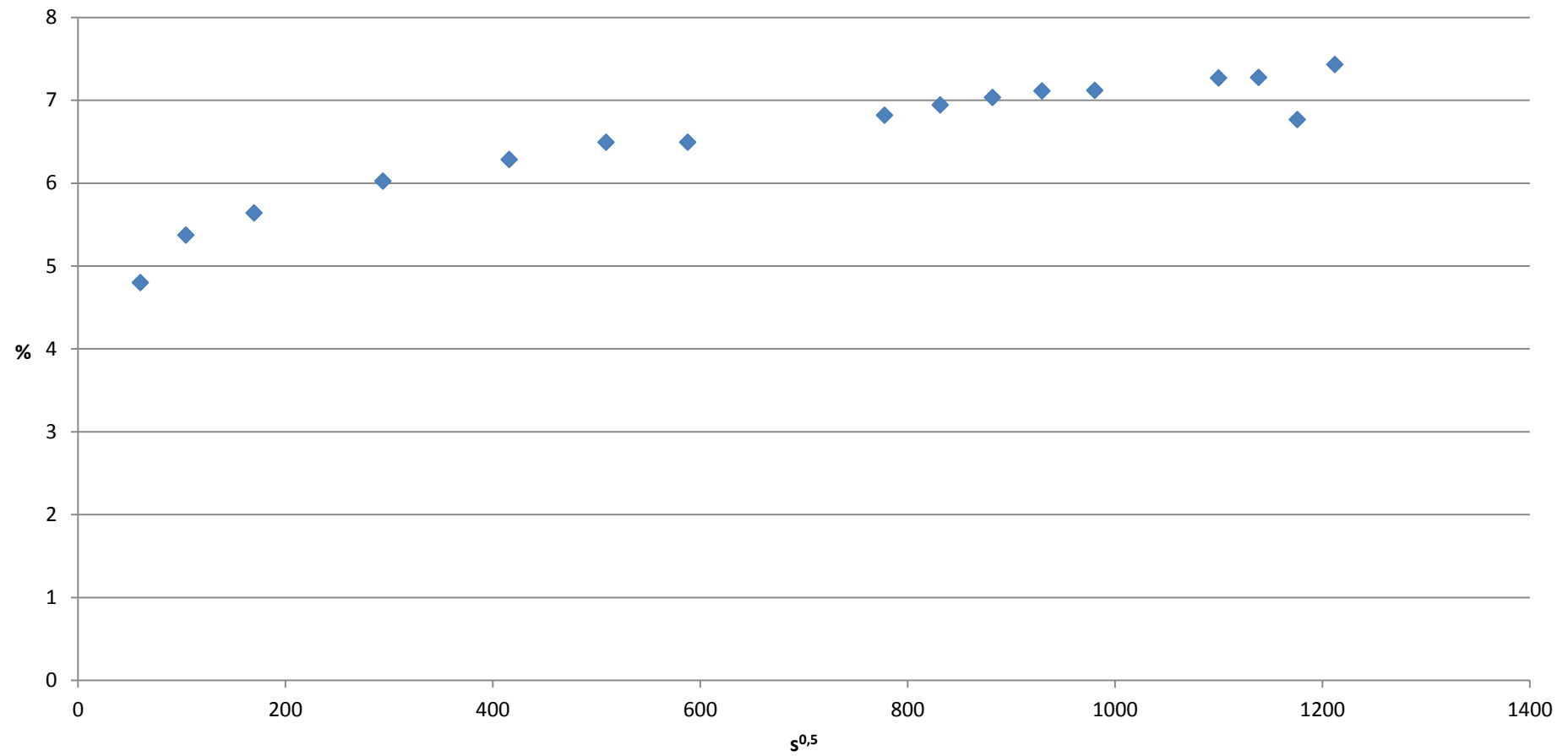
Leder Wanlin 1



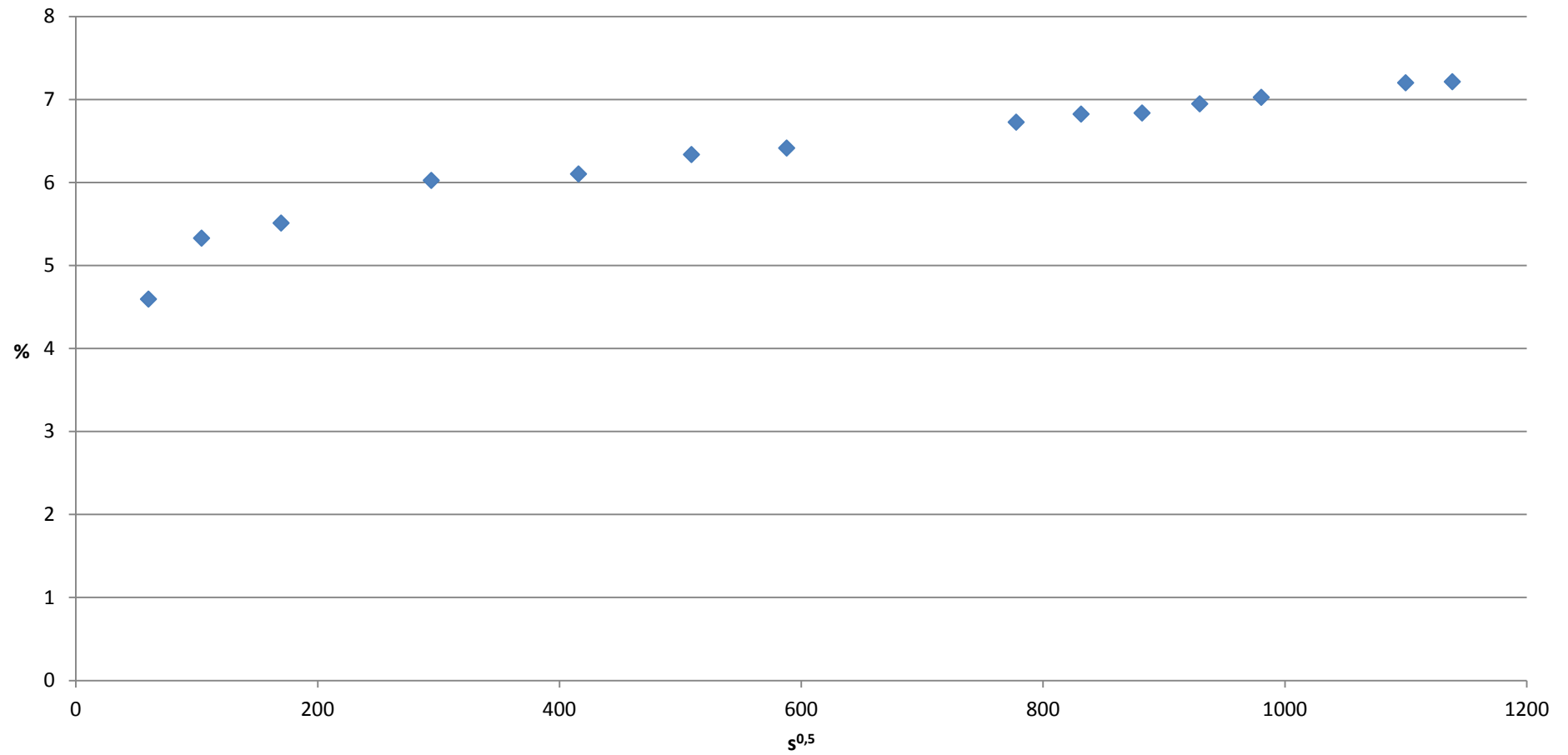
Leder Wanlin 2



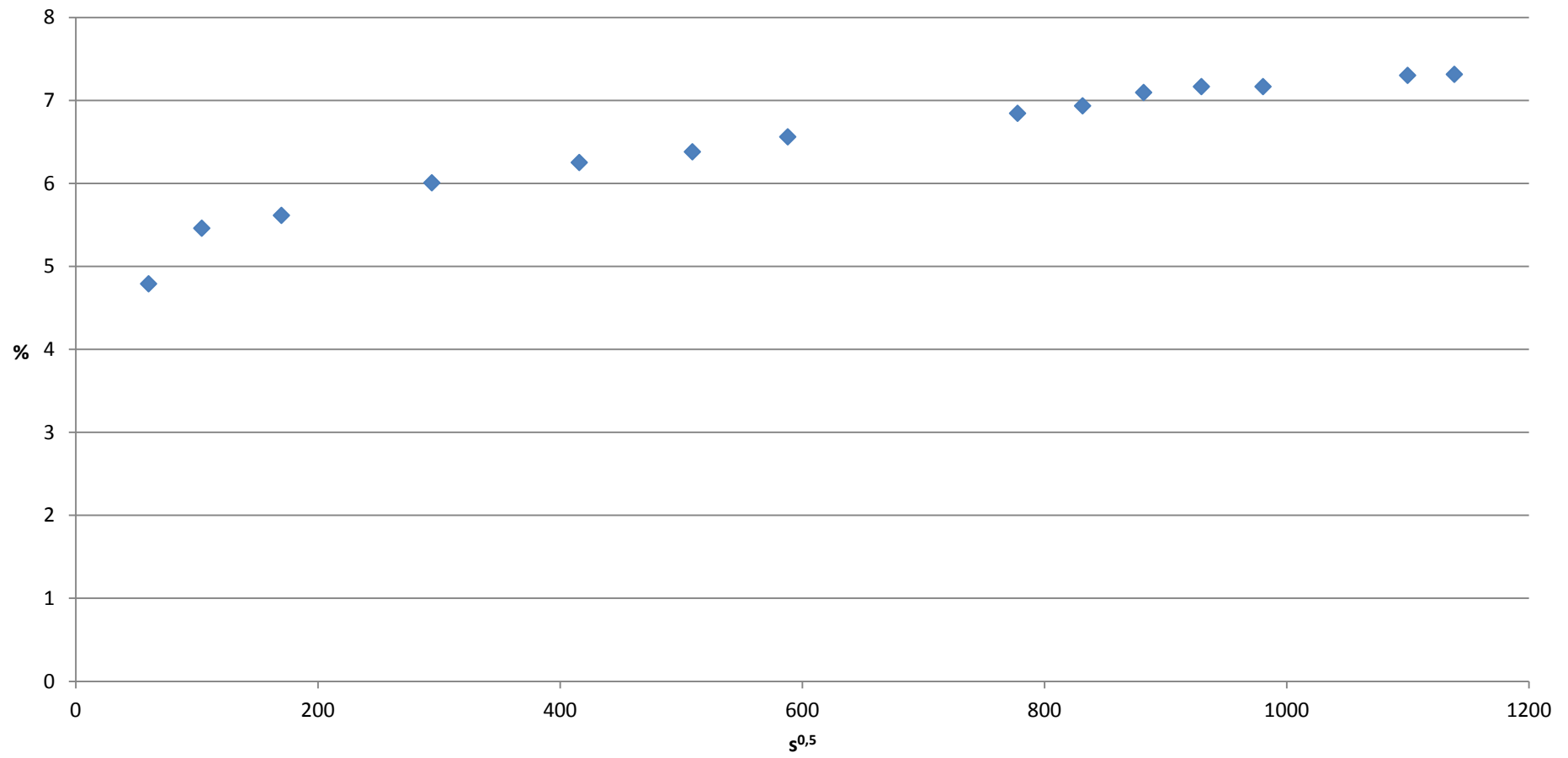
Leder Wanlin 3



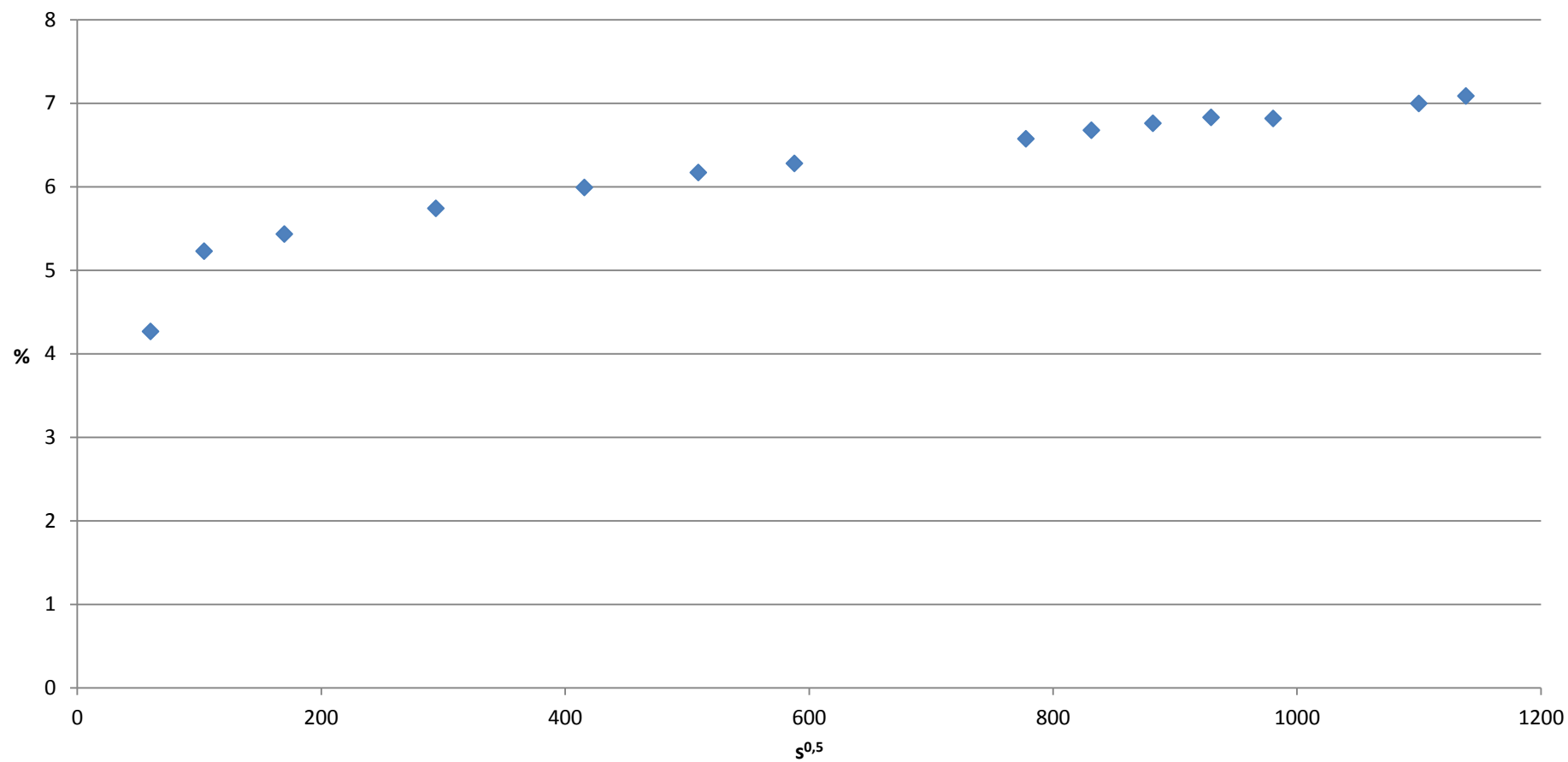
Leder Wanlin 4



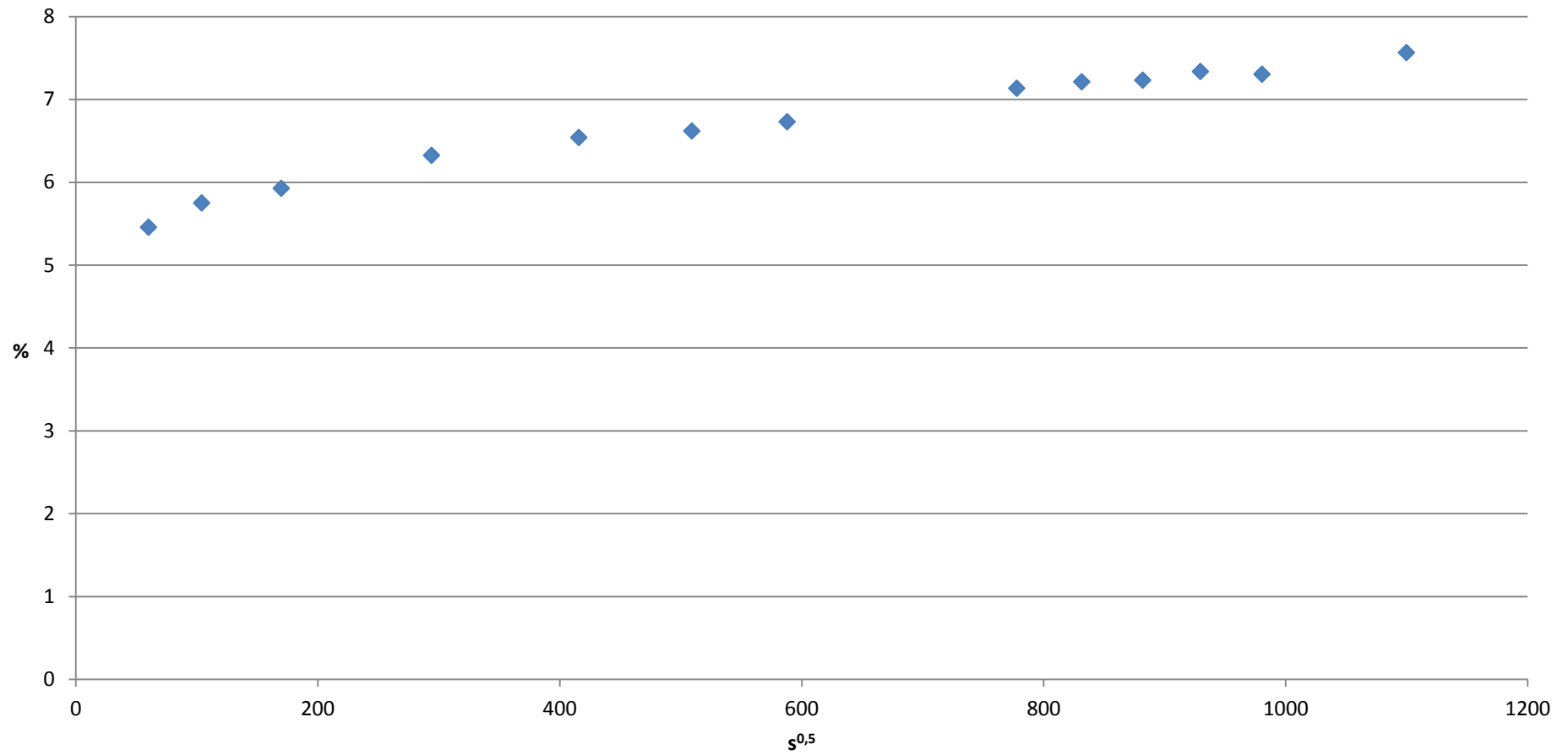
Leder Wanlin 5



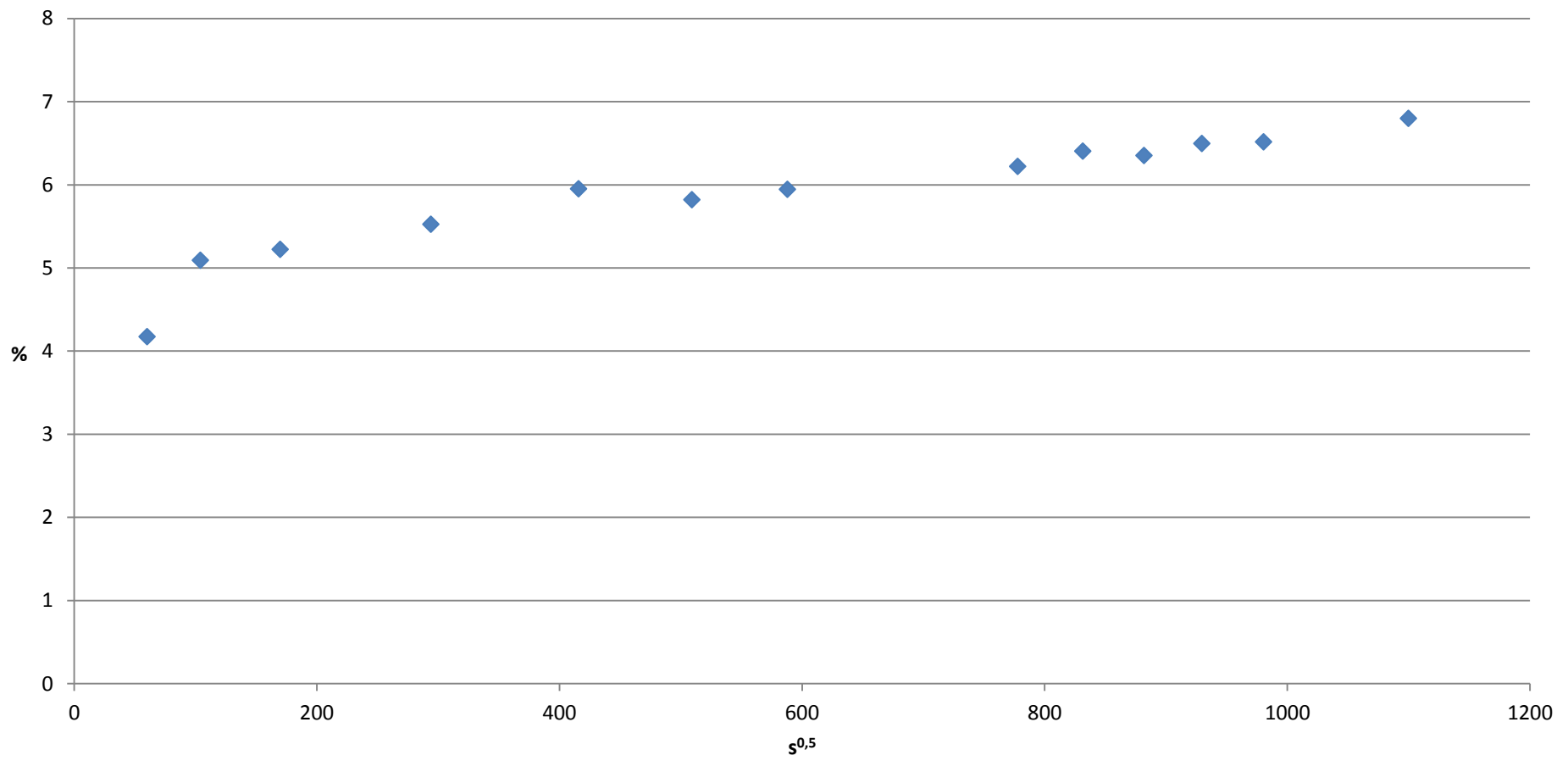
Leder Wanlin 6



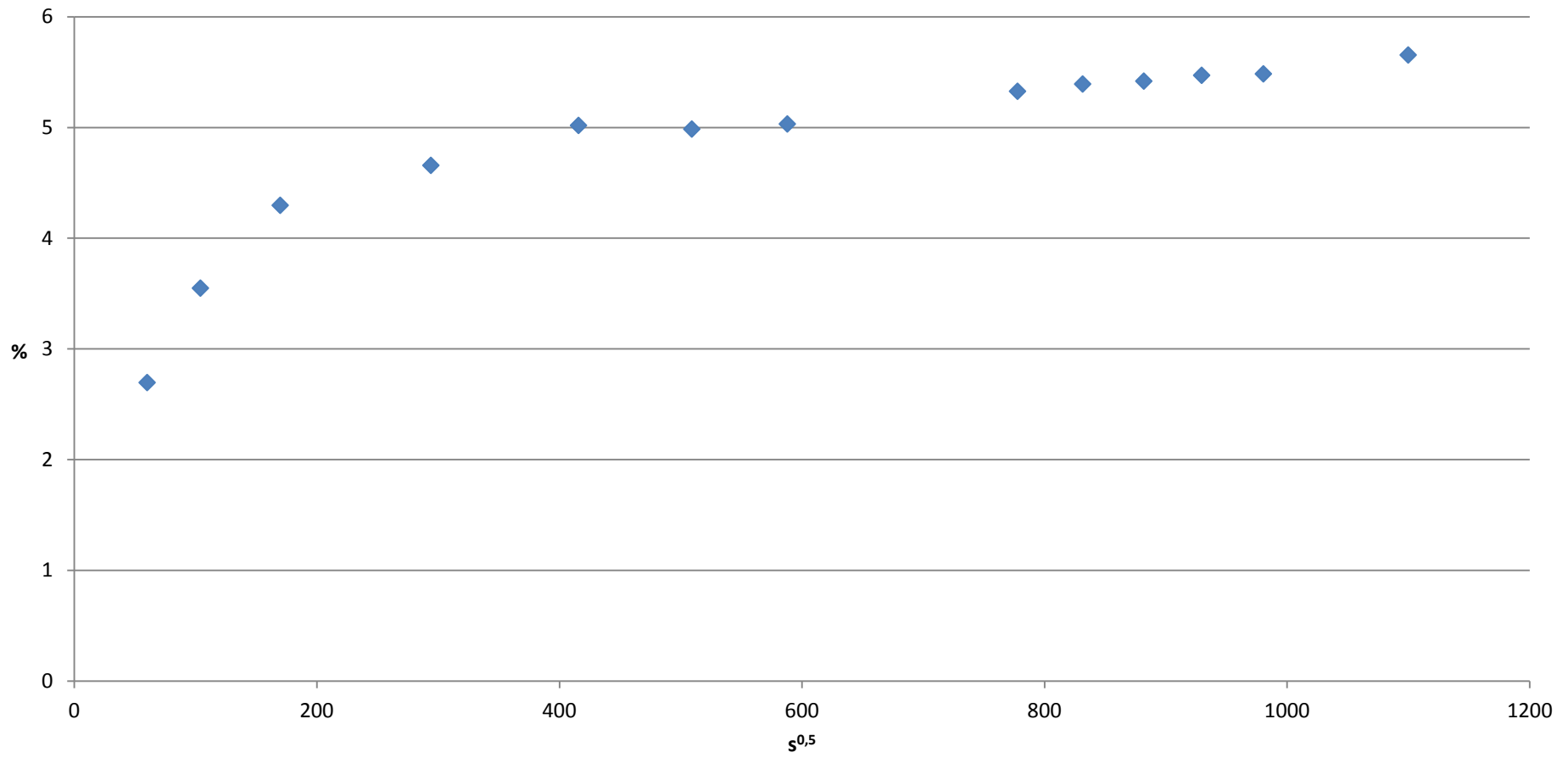
Leder Wanlin 7



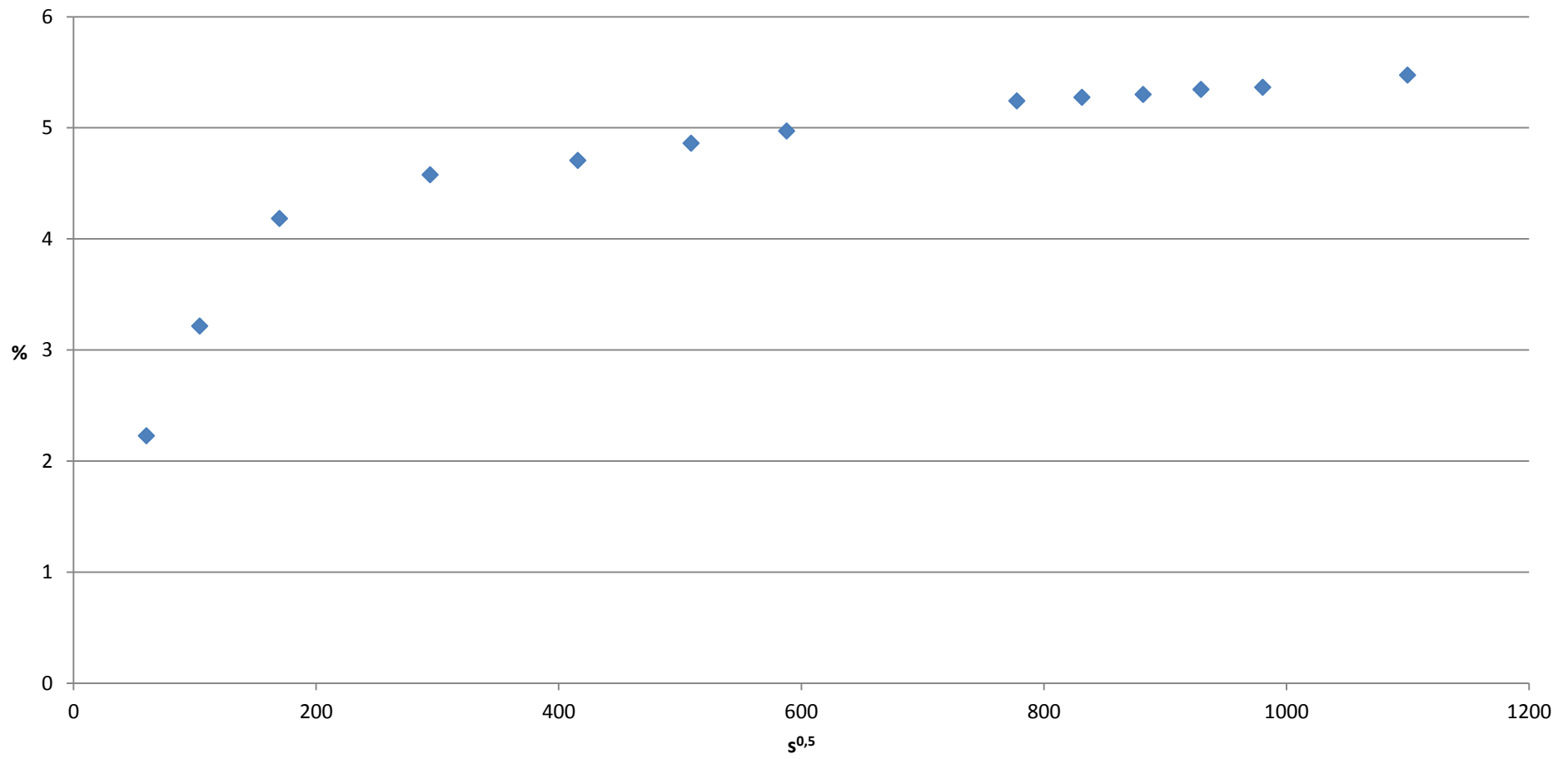
Leder Wanlin 8



Leder Wanlin 9



Leder Wanlin 10



11.5. Annex E: capillaire waterabsorptieproef.

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Atinea	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	Δm/A	3u	Δm/A	6u	Δm/A	24u	Δm/A
		m	m	m²		g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²
11	1635.5	0.185	0.059	0.010915		1871.8	21649.11	1877.9	22207.97	1878.5	22262.94	1881.8	22565.28
12	1661.4	0.185	0.06	0.0111		1904.1	21864.86	1908.3	22243.24	1909.7	22369.37	1912.6	22630.63
13	1693.6	0.185	0.065	0.012025		1934.8	20058.21	1939	20407.48	1941	20573.8	1943	20740.12
14	1668.3	0.185	0.0625	0.011563		1907.7	20704.86	1912.2	21094.05	1914.5	21292.97	1918	21595.68
15	1699.5	0.183	0.0615	0.011255		1940.6	21422.54	1945.2	21831.27	1946.3	21929.01	1948.8	22151.14
16	1683.5	0.1855	0.0595	0.011037		1922.4	21644.88	1926.6	22025.41	1927.4	22097.9	1929.6	22297.22
17	1648.9	0.184	0.06	0.01104		1878.8	20824.28	1882.1	21123.19	1882.9	21195.65	1885.6	21440.22
18	1668.3	0.1845	0.06	0.01107		1901.8	21093.04	1907.7	21626.02	1909.3	21770.55	1912.1	22023.49
19	1851.8	0.188	0.064	0.012032		2102.9	20869.35	2106.5	21168.55	2107.7	21268.28	2110	21459.44
20	1825.6	0.1885	0.062	0.011687		2067.1	20663.99	2071.3	21023.36	2072.1	21091.81	2074	21254.39
					Gemiddelde	21079.51		21475.05		21585.23		21815.76	
					Standaardafwijking	562.1493		604.2905		586.2879		614.798	

Atinea		48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$	192u	$\Delta m/A$	216u	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
11		1883.6	22730.19	1886.1	22959.23	1892.9	23582.23	1894.5	23728.81	1896.1	23875.4	1896.6	23921.21
12		1914.3	22783.78	1916.3	22963.96	1923.1	23576.58	1924.5	23702.7	1926.2	23855.86	1926.7	23900.9
13		1945.1	20914.76	1946.8	21056.13	1952.7	21546.78	1953.9	21646.57	1954.7	21713.1	1955	21738.05
14		1920.8	21837.84	1923.8	22097.3	1931	22720	1932.3	22832.43	1933.9	22970.81	1934.6	23031.35
15		1950.6	22311.08	1952.7	22497.67	1958.6	23021.9	1959.9	23137.41	1961.1	23244.04	1961.3	23261.81
16		1931.6	22478.43	1933.2	22623.39	1939.1	23157.94	1940.3	23266.67	1940.7	23302.91	1941.6	23384.45
17		1887	21567.03	1889.6	21802.54	1895.5	22336.96	1896.7	22445.65	1897.4	22509.06	1897.8	22545.29
18		1913.9	22186.09	1916.3	22402.89	1922.4	22953.93	1924	23098.46	1925.3	23215.9	1926.5	23324.3
19		2112.1	21633.98	2114.4	21825.13	2123.1	22548.2	2125	22706.12	2126.2	22805.85	2127	22872.34
20		2075.9	21416.96	2078.3	21622.32	2086.9	22358.18	2088.3	22477.97	2089.2	22554.98	2090	22623.43
Gemiddelde		21986.01		22185.06		22780.27		22904.28		23004.79		23060.31	
Standaardafwijking		612.031		616.2673		620.2239		628.8494		652.3665		658.5981	

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Atinea		312u	Δm/A	336u	Δm/A	360u	Δm/A	384u	Δm/A	408u	Δm/A	480u	Δm/A						
		g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²						
11		1899.7	24205.22	1899.5	24186.9	1900	24232.71	1900.1	24241.87	1900.5	24278.52	1902	24415.94						
12		1930.3	24225.23	1930.3	24225.23	1930.6	24252.25	1930.4	24234.23	1931.2	24306.31	1932.4	24414.41						
13		1957.9	21979.21	1958	21987.53	1958.9	22062.37	1958.5	22029.11	1958.8	22054.05	1960.6	22203.74						
14		1937.9	23316.76	1938.1	23334.05	1938.6	23377.3												
15		1964.3	23528.37	1964.4	23537.25	1965.2	23608.33												
16		1944.5	23647.19	1944.7	23665.32	1945.4	23728.74												
17		1901	22835.14	1901	22835.14	1901.8	22907.61												
18		1929.4	23586.27																
19		2131	23204.79																
20		2093.3	22905.79																
Gemiddelde		23343.4		23395.92		23452.76		23501.74		23546.29		23678.03							
Standaardafwijking		669.71		786.1099		772.8671		1275.341		1292.391		1276.773							

Atinea		504u	$\Delta m/A$	528u	$\Delta m/A$	552u	$\Delta m/A$	576u	$\Delta m/A$	672u	$\Delta m/A$	696u	$\Delta m/A$
		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
11		1901.6	24379.29	1902.4	24452.59	1903.2	24525.88	1903.4	24544.21	1903.9	24590.01	1903.6	24562.53
12		1932	24378.38	1932.3	24405.41	1933.4	24504.5	1933.4	24504.5	1933.7	24531.53	1934.5	24603.6
13		1960.2	22170.48	1961.2	22253.64	1962.2	22336.8	1961.9	22311.85	1962.7	22378.38	1963.7	22461.54
Gemiddelde		23642.72		23703.88		23789.06		23786.85		23833.31		23875.89	
Standaardafwijking		1274.996		1256.165		1257.742		1277.544		1260.345		1225.037	

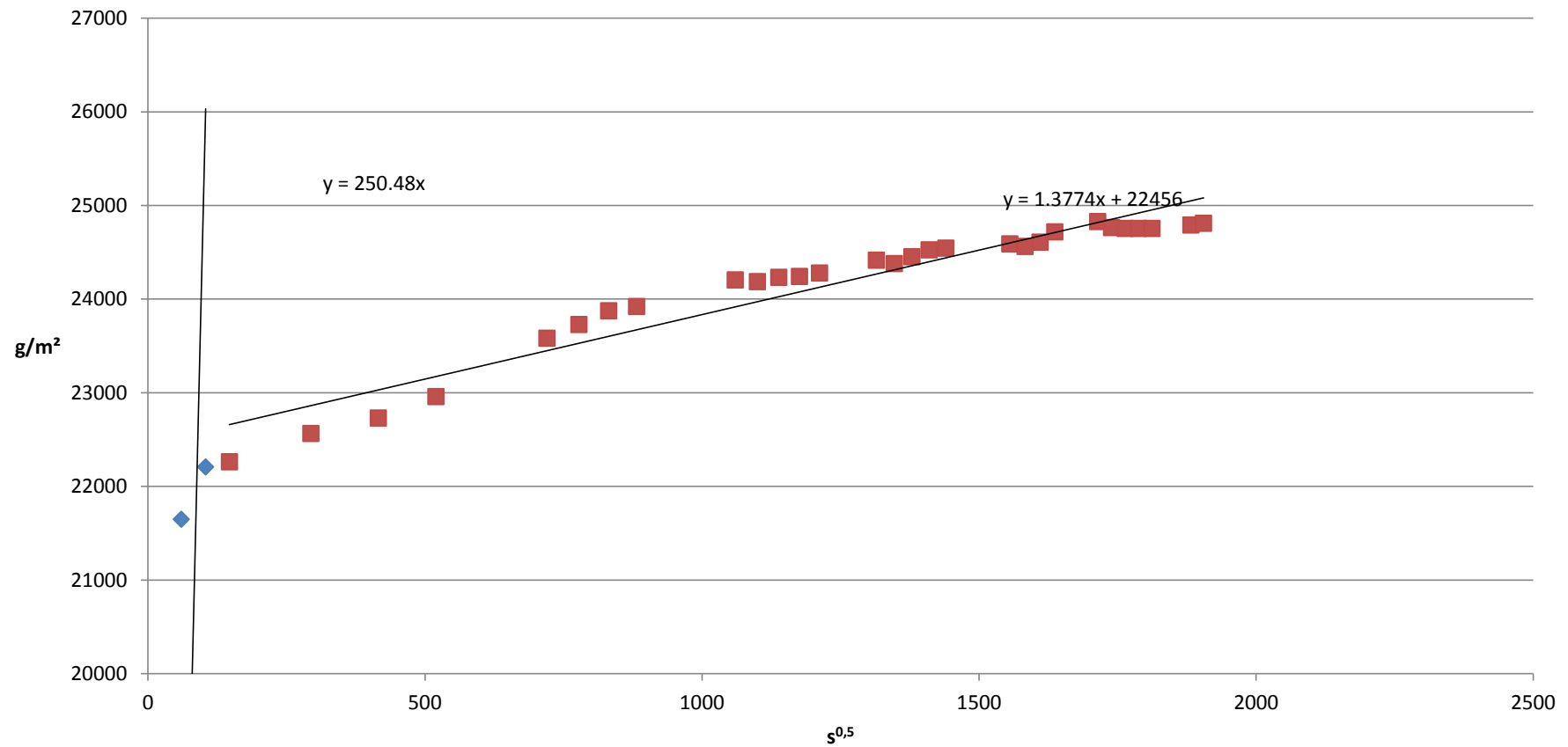
Atinea		720	$\Delta m/A$	744	$\Delta m/A$	816	$\Delta m/A$	840	$\Delta m/A$	864	$\Delta m/A$	888	$\Delta m/A$
		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
11		1904.1	24608.34	1905.3	24718.28	1906.5	24828.22	1905.8	24764.09	1905.7	24754.92	1905.7	24754.92
12		1935.1	24657.66	1936.5	24783.78	1938.2	24936.94	1938	24918.92	1937.5	24873.87	1937.7	24891.89
13		1963.1	22411.64	1964.6	22536.38	1967.2	22752.6	1966.8	22719.33	1966.4	22686.07	1966.7	22711.02
Gemiddelde		23892.55		24012.81		24172.58		24134.11		24104.96		24119.28	
Standaardafwijking		1282.737		1279.047		1230.945		1227.677		1230.229		1221.51	

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

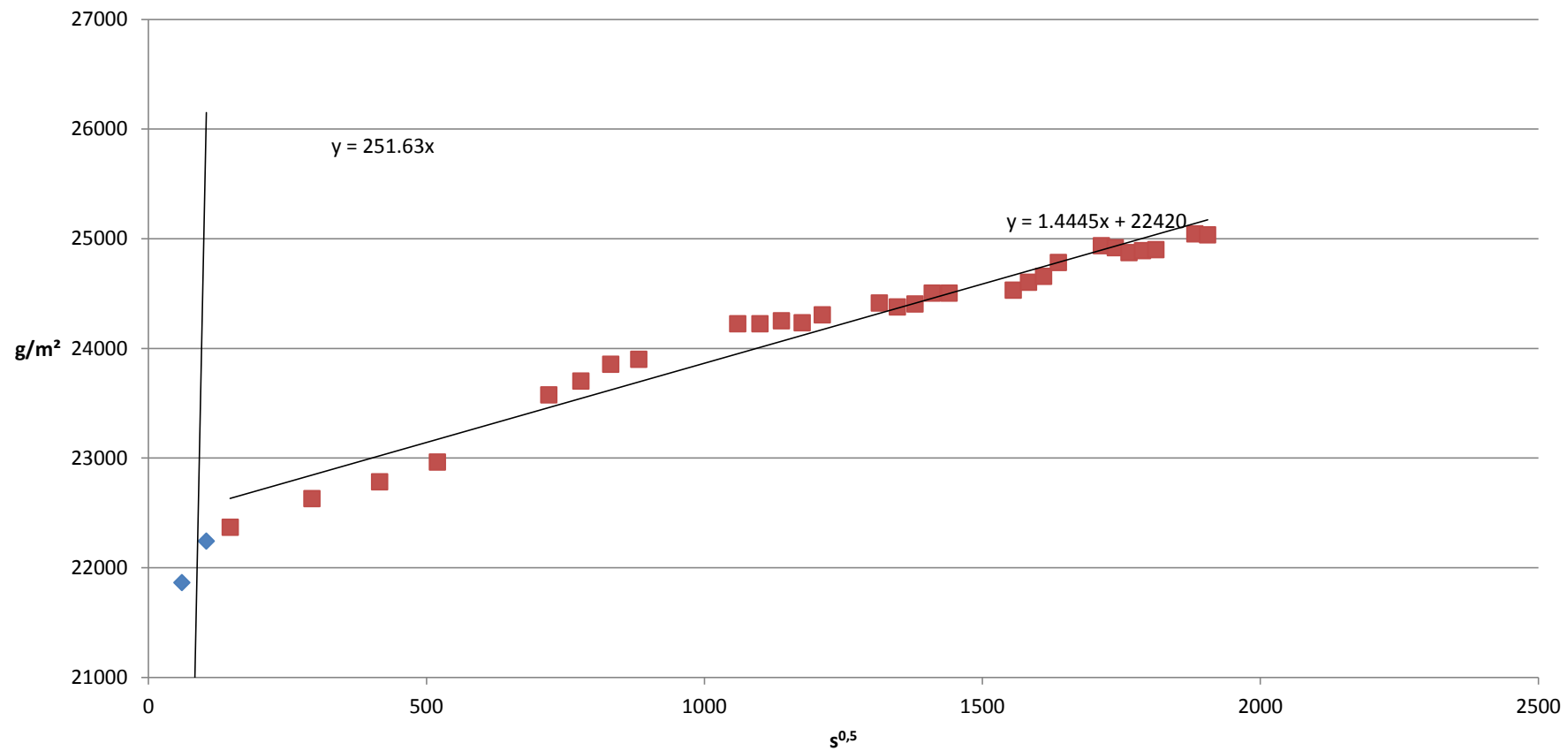
Waterabsorptiecoefficient capillaire opzuiging*

Atinea		912	$\Delta m/A$	984	$\Delta m/A$	1008	$\Delta m/A$
		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
11		1905.7	24754.92	1906.1	24791.57	1906.3	24809.89
12		1937.8	24900.9	1939.4	25045.05	1939.3	25036.04
13		1966.7	22711.02	1968.6	22869.02	1968.2	22835.76
Gemiddelde			24122.28		24235.21		24227.23
Standaardafwijking			1224.367		1189.924		1210.342

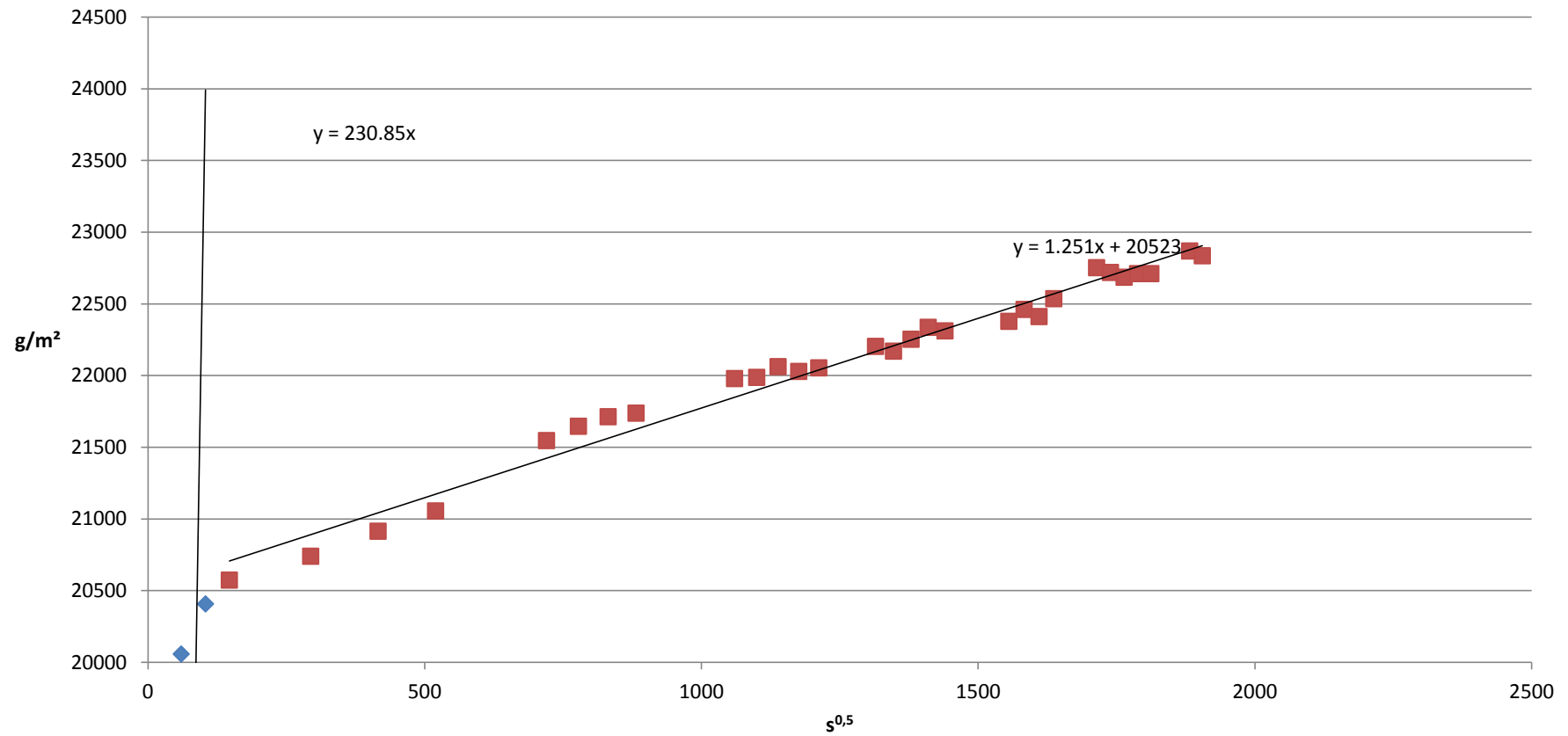
Atinea 11



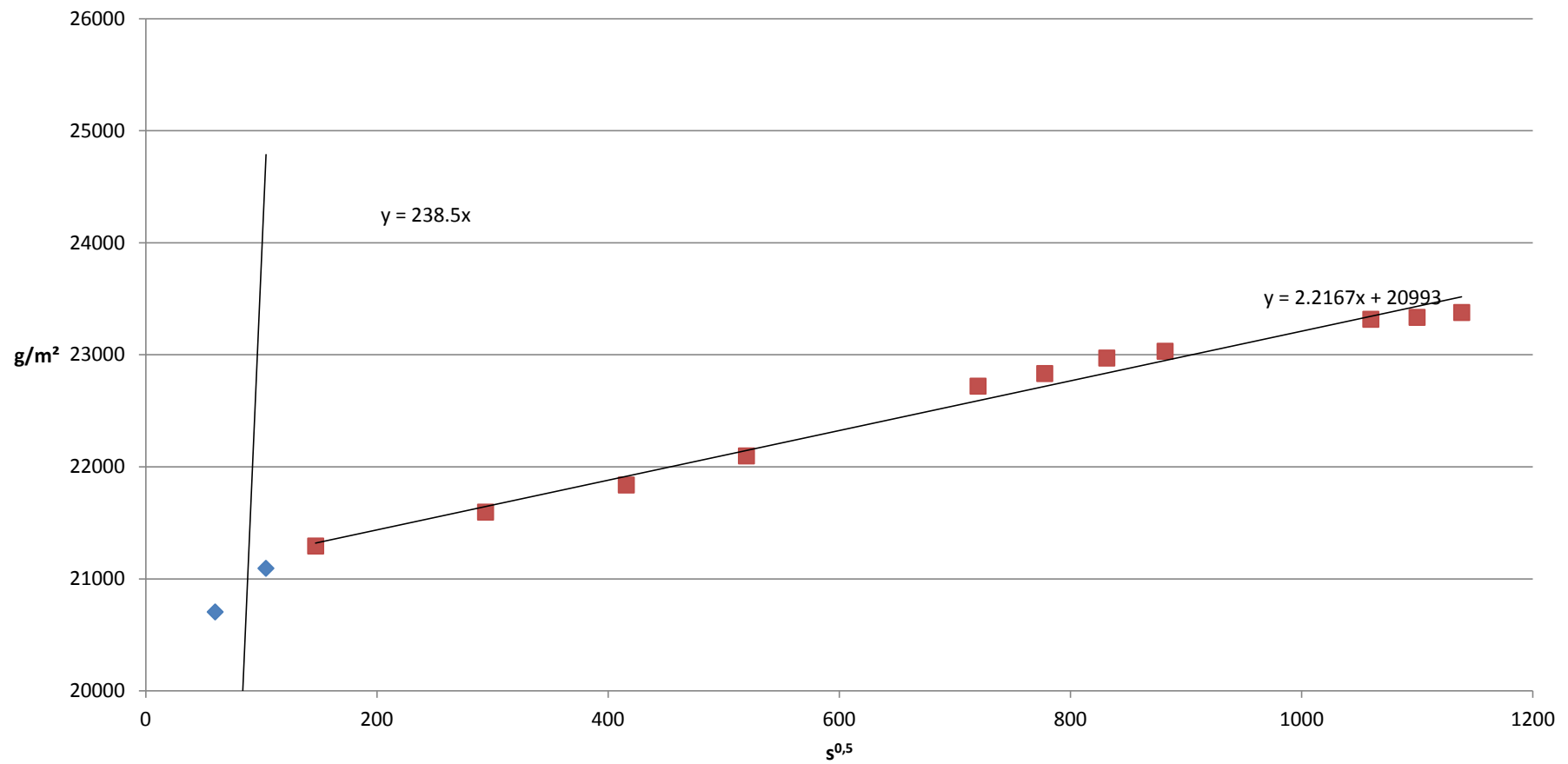
Atinea 12



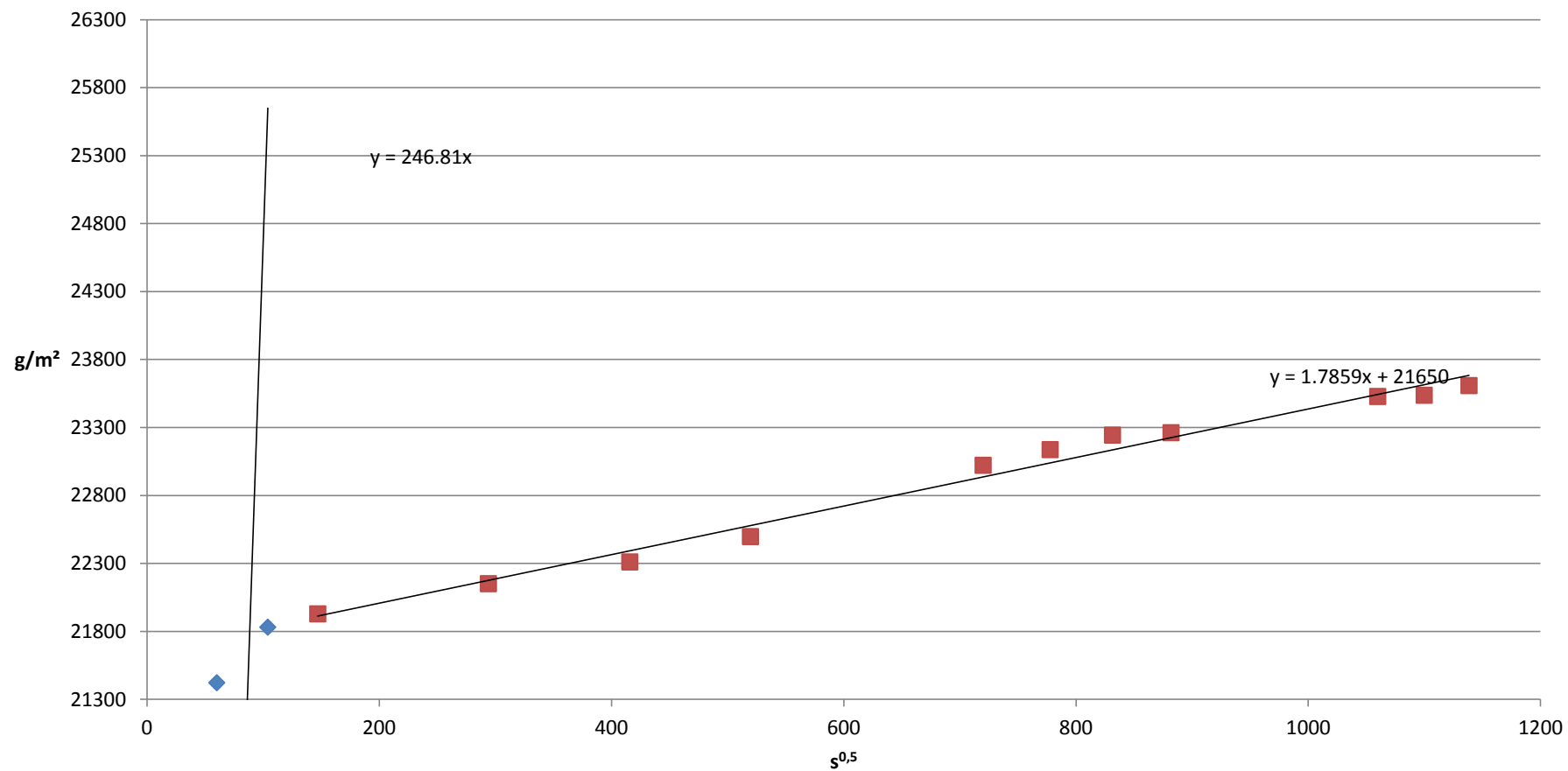
Atinea 13



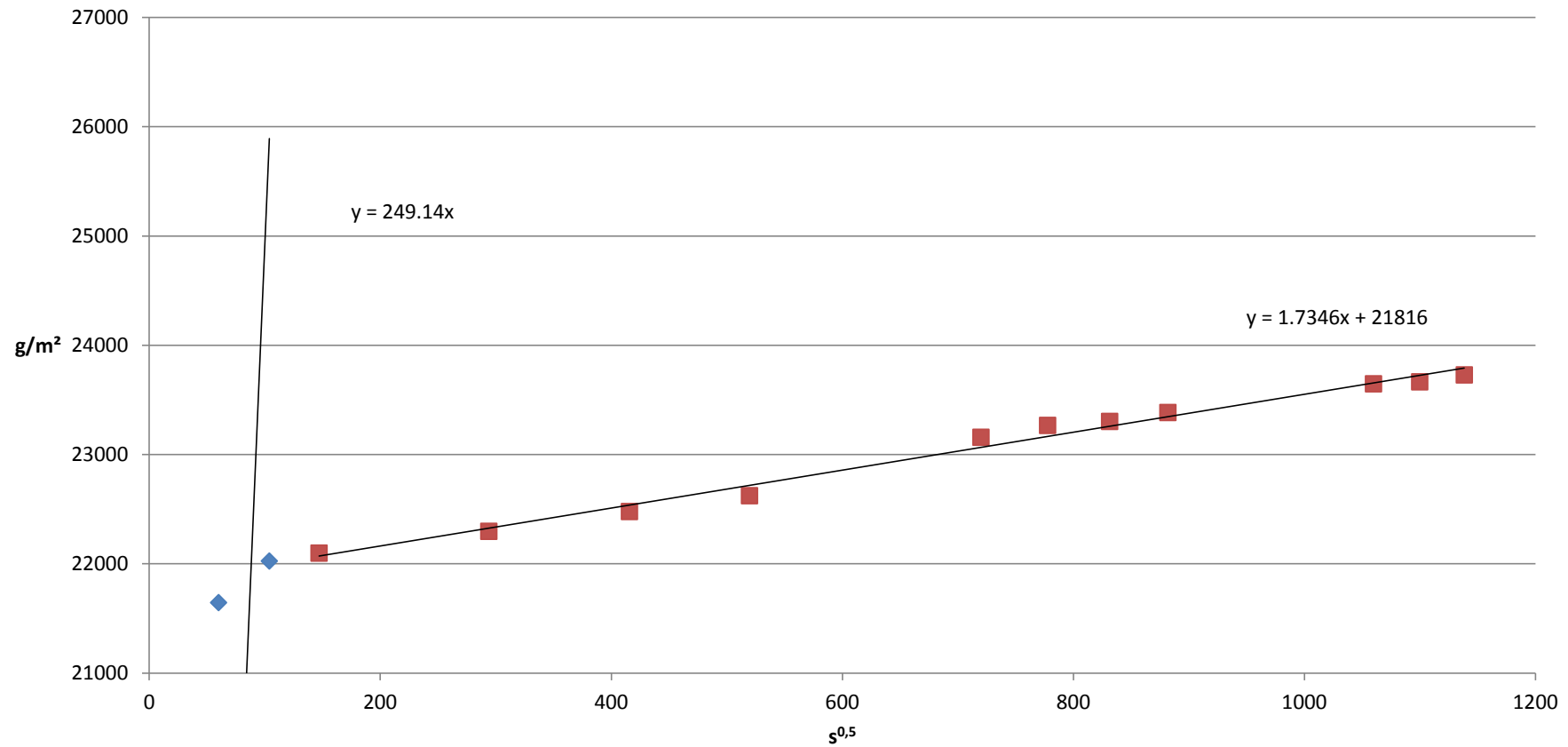
Atinea 14



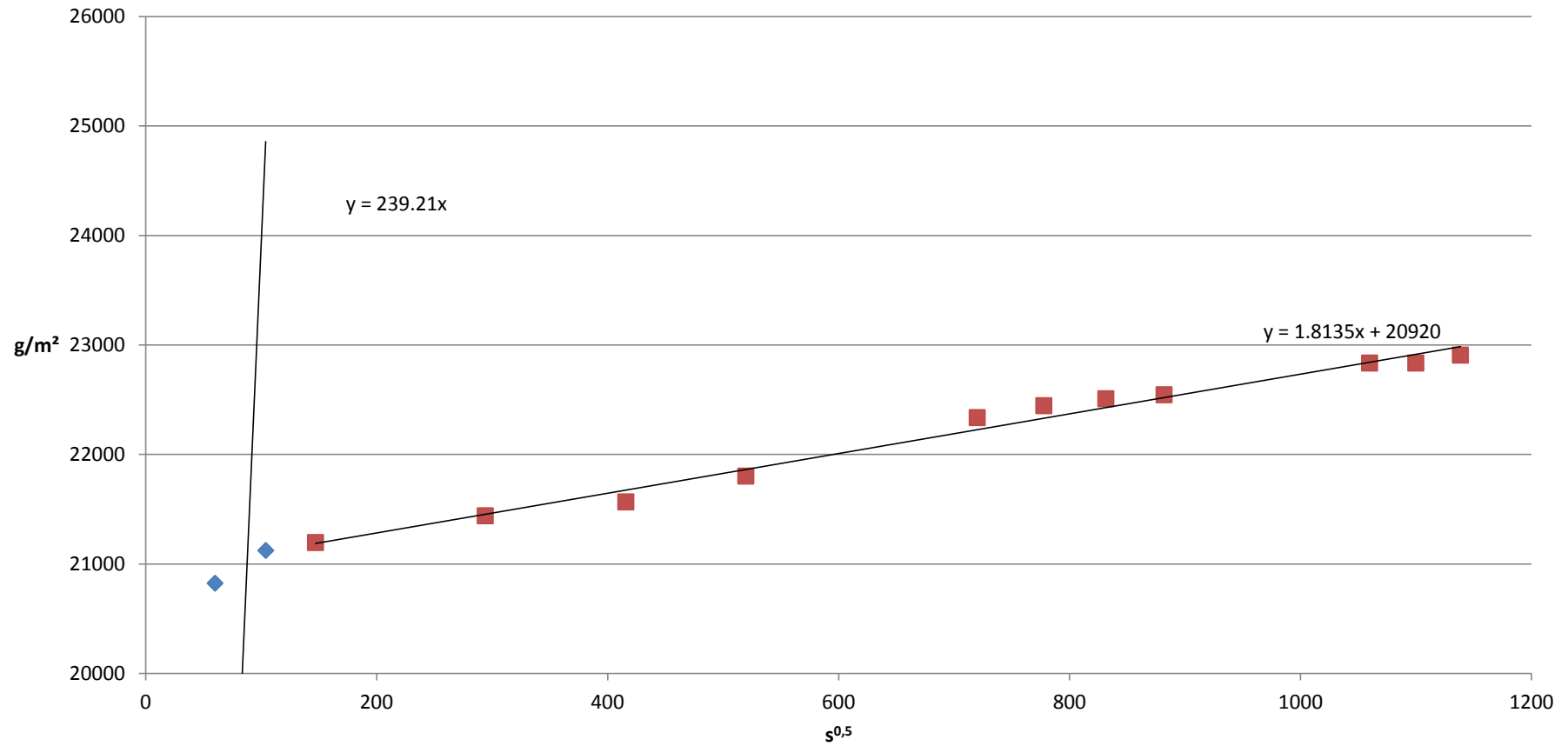
Atinea 15



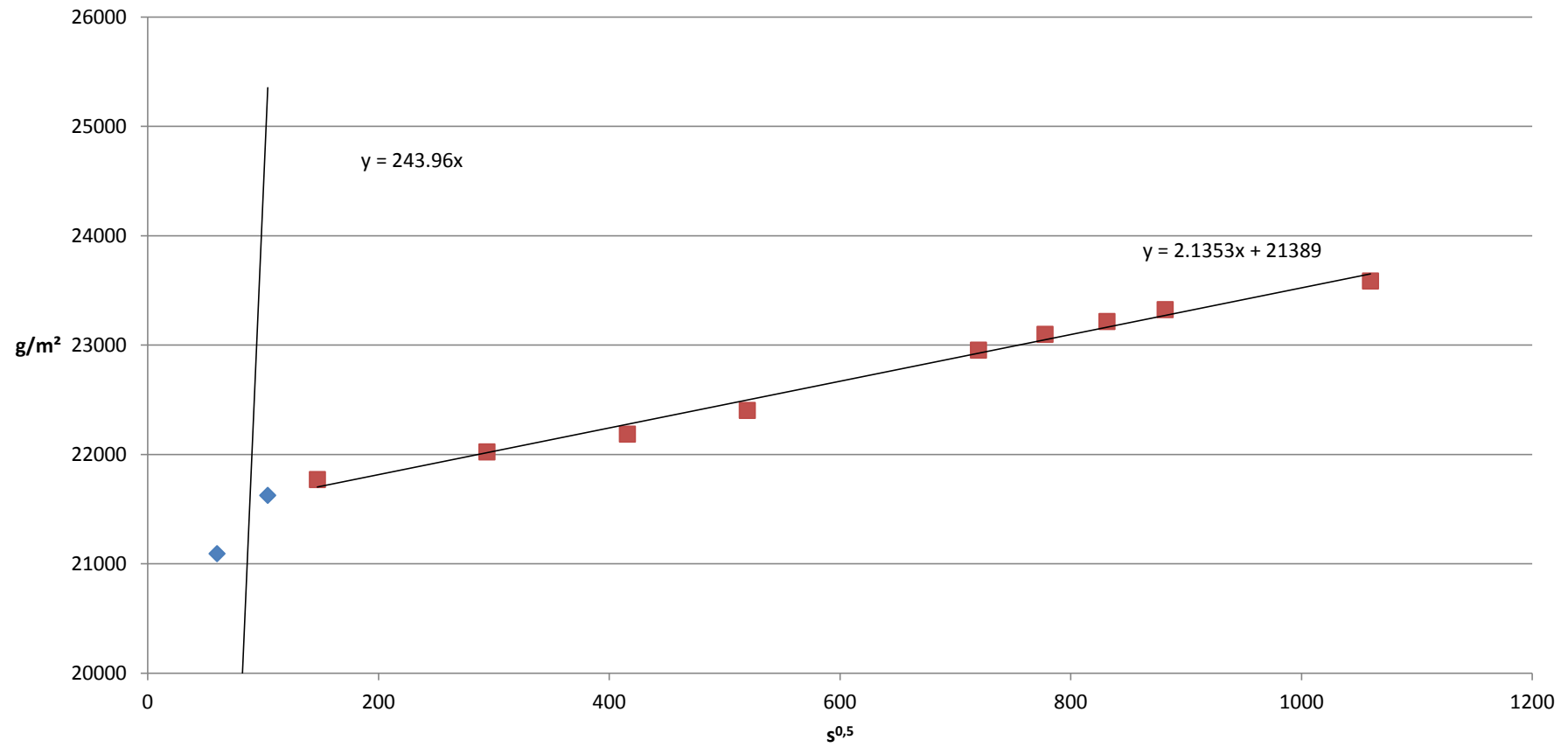
Atinea 16



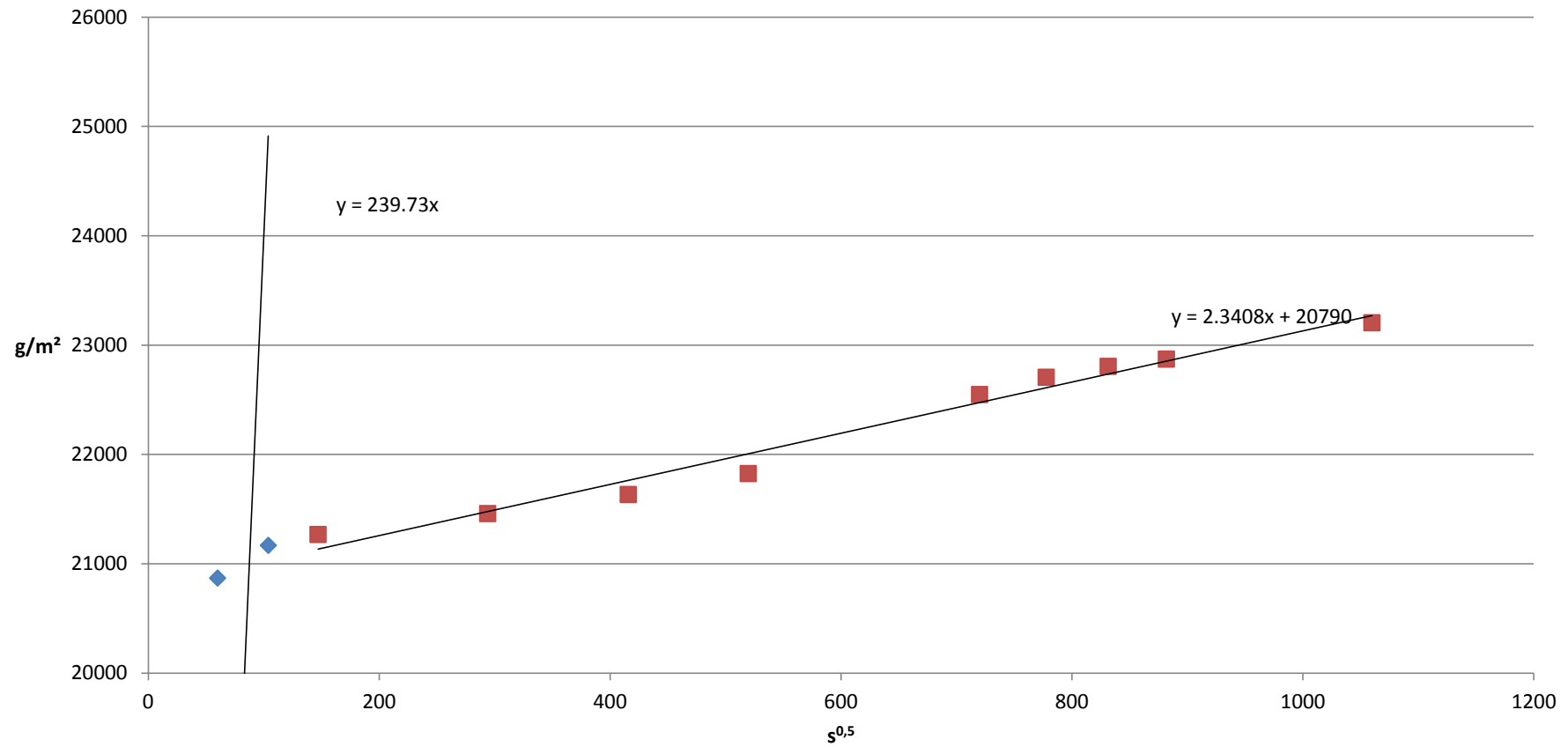
Atinea 17



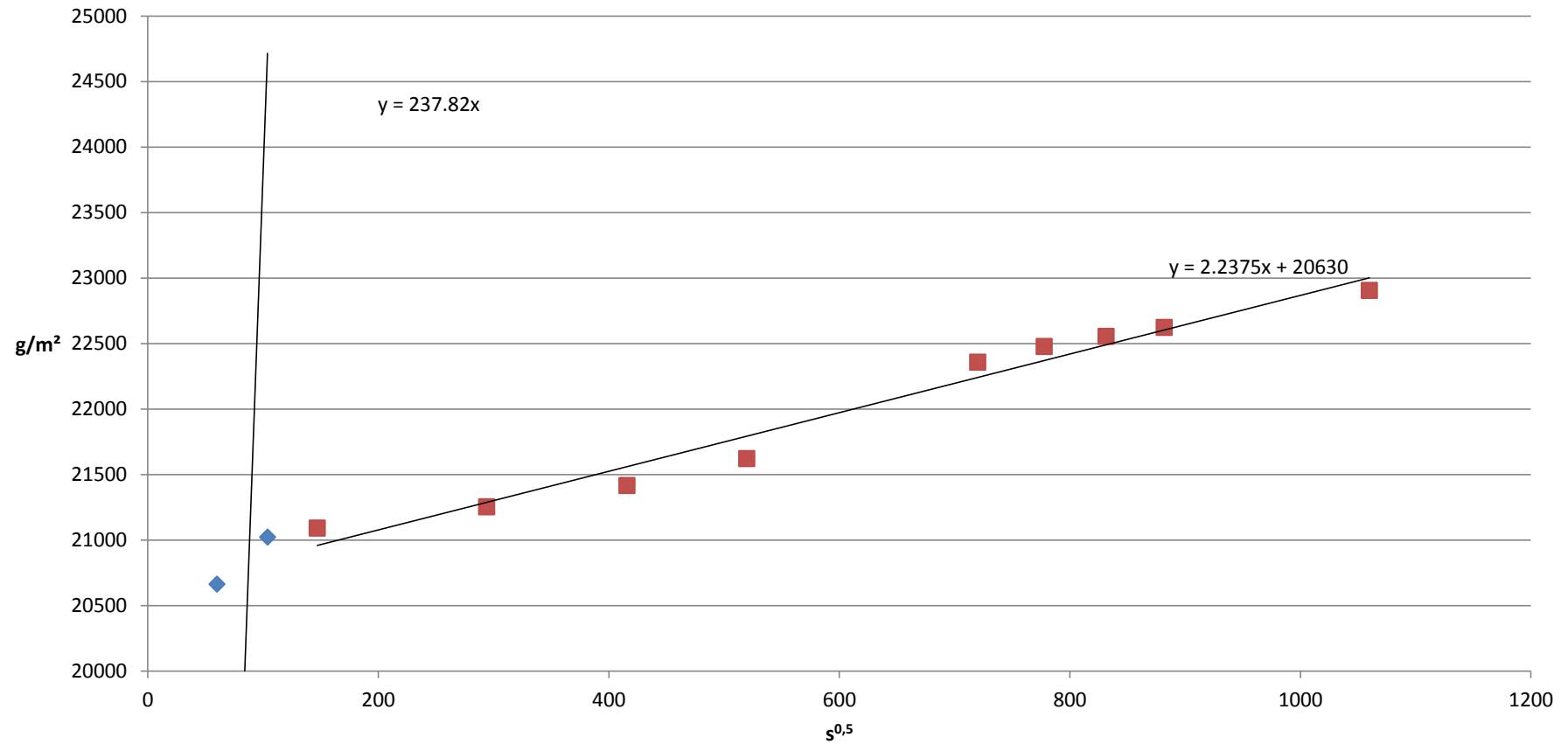
Atinea 18



Atinea 19



Atinea 20



Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Leder Wanlin	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	$\Delta m/A$	3u	$\Delta m/A$	6u	$\Delta m/A$	24u	$\Delta m/A$
		m	m	m ²		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
11	1564	0.189	0.05	0.00945		1577.9	1470.899	1588.1	2550.265	1593.2	3089.947	1611.5	5026.455
12	1555.2	0.18	0.05	0.009		1567.3	1344.444	1577.3	2455.556	1584.2	3222.222	1602.6	5266.6667
13	1545.6	0.1905	0.05	0.009525		1565.8	2120.735	1580.8	3695.538	1590.9	4755.906	1628.5	8703.4121
14	1527.3	0.192	0.05	0.0096		1550.1	2375	1565.2	3947.917	1576.1	5083.333	1614.7	9104.1667
15	1533.7	0.1905	0.0495	0.00943		1554.6	2216.39	1568.5	3690.448	1578.7	4772.131	1615.6	8685.278
16	1551.2	0.1905	0.05	0.009525		1570.3	2005.249	1584.6	3506.562	1594.2	4514.436	1630	8272.9659
17	1529.5	0.188	0.0485	0.009118		1538.4	976.0912	1545.6	1765.738	1552.6	2533.45	1566	4003.0708
18	1563.7	0.1855	0.05	0.009275		1570.7	754.717	1577	1433.962	1584	2188.679	1600.9	4010.7817
19	1550.2	0.19	0.0495	0.009405		1558.3	861.244	1567	1786.284	1575.3	2668.793	1597	4976.0766
20	1538.1	0.188	0.0495	0.009306		1543.1	537.2878	1548.1	1074.576	1552.9	1590.372	1569.6	3384.913
Gemiddelde						1466.206		2590.684		3441.927		6143.3786	
Standaardafwijking						674.7677		1059.097		1244.302		2271.3967	

Leder Wanlin		48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$	192u	$\Delta m/A$	216u	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
11		1627.3	6698.413	1641.8	8232.804	1654.5	9576.72	1656.2	9756.614	1656.8	9820.106	1658	9947.0899
12		1618.8	7066.667	1633.7	8722.222	1646.3	10122.22	1647.5	10255.56	1648.2	10333.33	1649.8	10511.111
13		1646.6	10603.67	1649.5	10908.14	1654	11380.58	1655.4	11527.56	1656.8	11674.54	1657.6	11758.53
14		1629.4	10635.42	1632.2	10927.08	1636.4	11364.58	1638.3	11562.5	1639.2	11656.25	1640	11739.583
15		1633	10530.5	1636	10848.64	1640.6	11336.46	1642.1	11495.53	1643.3	11622.79	1644.3	11728.837
16		1649.9	10362.2	1653.1	10698.16	1657.5	11160.1	1658.9	11307.09	1660.1	11433.07	1661.1	11538.058
17		1577.2	5231.41	1587.9	6404.913	1606.1	8400.965	1608.3	8642.246	1609.5	8773.854	1610.7	8905.4617
18		1614.1	5433.962	1625.1	6619.946	1641.8	8420.485	1643.3	8582.21	1644.9	8754.717	1645.7	8840.9704
19		1613.8	6762.36	1628.7	8346.624	1641	9654.439	1642.3	9792.663	1643.5	9920.255	1644.2	9994.6837
20		1581.8	4695.895	1592.6	5856.437	1614.1	8166.774	1618.4	8628.842	1621.2	8929.723	1622.1	9026.4346
Gemiddelde		7802.051		8756.497		9958.333		10155.08		10291.86		10399.076	
Standaardafwijking		2462.607		2012.094		1316.929		1264.062		1235.225		1230.7954	

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Leder Wanlin		312u	$\Delta m/A$	336u	$\Delta m/A$	360u	$\Delta m/A$	384u	$\Delta m/A$	408u	$\Delta m/A$	480u	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
11		1661.1	10275.13	1660.9	10253.97	1661.9	10359.79	1662	10370.37	1662.6	10433.86	1664.1	10592.593
12		1652.4	10800	1652.1	10766.67	1653.3	10900	1653.6	10933.33	1654.2	11000	1655.5	11144.444
13		1660.9	12104.99	1660.9	12104.99	1661.8	12199.48	1662.1	12230.97	1662.6	12283.46	1664.3	12461.942
14		1643.4	12093.75	1643.3	12083.33	1644.3	12187.5	1644.5	12208.33	1645.3	12291.67	1646.7	12437.5
15		1647.4	12057.58	1647.6	12078.79	1648.6	12184.84	1648.4	12163.63	1649.4	12269.68	1650.8	12418.145
16		1664.4	11884.51	1664.4	11884.51	1665.5	12000						
17		1613.9	9256.416	1613.4	9201.579	1614.6	9333.187						
18		1648.4	9132.075	1647.9	9078.167	1649.2	9218.329						
19		1647.1	10303.03	1647.1	10303.03	1648.1	10409.36						
20		1625.5	9391.79										
Gemiddelde			10729.93		10861.67		10976.94		11581.33		11655.73		11810.925
Standaardafwijking			1236.281		1234.559		1223.178		871.8607		880.1052		882.2791

Leder Wanlin		504u	$\Delta m/A$	528u	$\Delta m/A$	552u	$\Delta m/A$	576u	$\Delta m/A$	672u	$\Delta m/A$	696u	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
11		1664.7	10656.08	1664.9	10677.25	1665.4	10730.16	1665.9	10783.07	1666.1	10804.23	1666.8	10878.307
12		1656	11200	1656.5	11255.56	1657.2	11333.33	1657.4	11355.56	1657.6	11377.78	1658.4	11466.667
13		1664.8	12514.44	1665.2	12556.43	1665.8	12619.42	1666.6	12703.41	1667	12745.41	1667.9	12839.895
Gemiddelde			11456.84		11496.41		11560.97		11614.01		11642.47		11728.29
Standaardafwijking			955.4278		962.4654		964.9839		985.9155		997.2896		1006.624

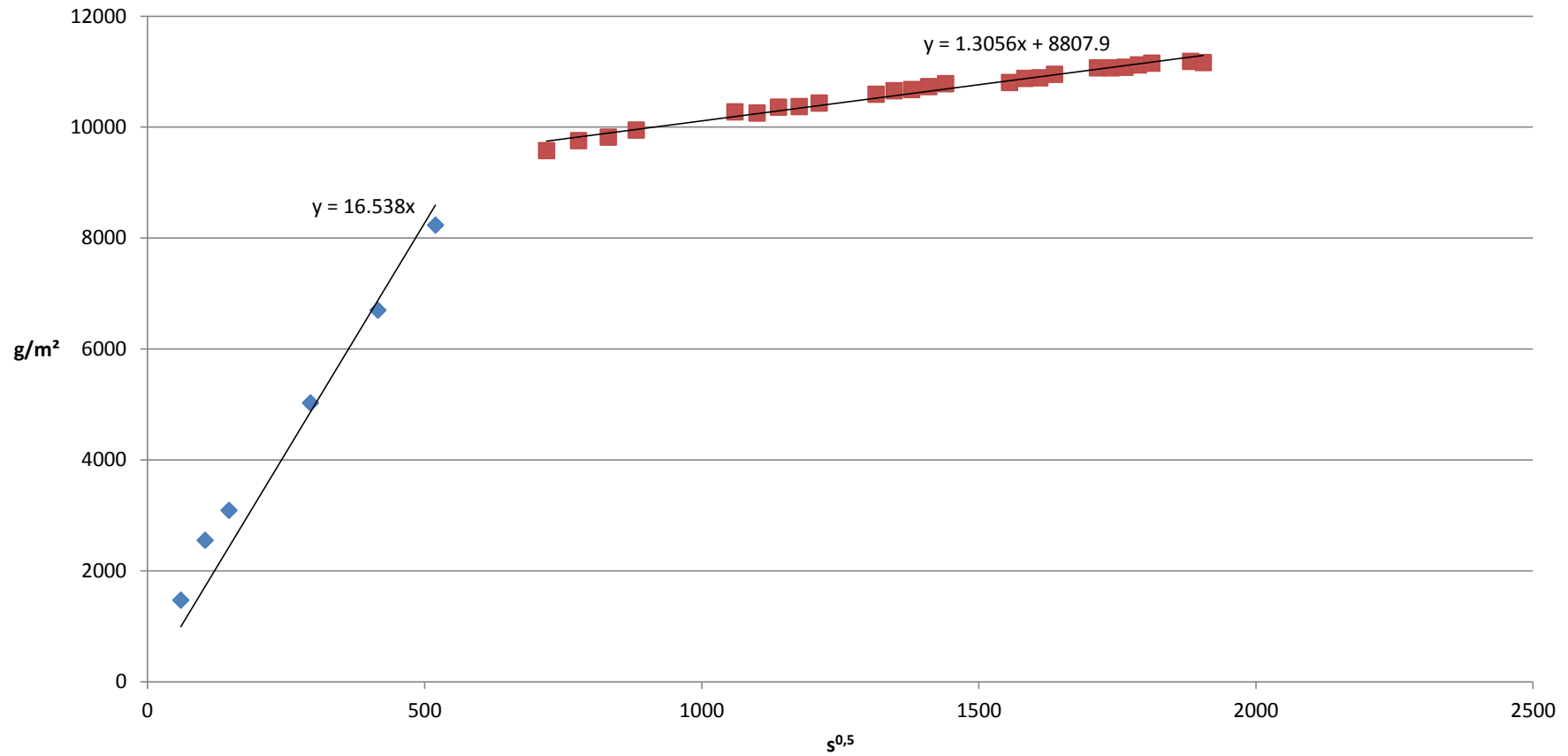
Leder Wanlin		720	$\Delta m/A$	744	$\Delta m/A$	816	$\Delta m/A$	840	$\Delta m/A$	864	$\Delta m/A$	888	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
11		1666.9	10888.89	1667.5	10952.38	1668.6	11068.78	1668.6	11068.78	1668.7	11079.37	1669.1	11121.693
12		1658.4	11466.67	1658.8	11511.11	1659.9	11633.33	1660	11644.44	1659.9	11633.33	1660.3	11677.778
13		1667.7	12818.9	1668.4	12892.39	1669.9	13049.87	1669.5	13007.87	1670	13060.37	1670.2	13081.365
Gemiddelde			11724.82		11785.29		11917.33		11907.03		11924.36		11960.279
Standaardafwijking			990.5629		998.6437		1020.62		995.8581		1022.063		1009.9175

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

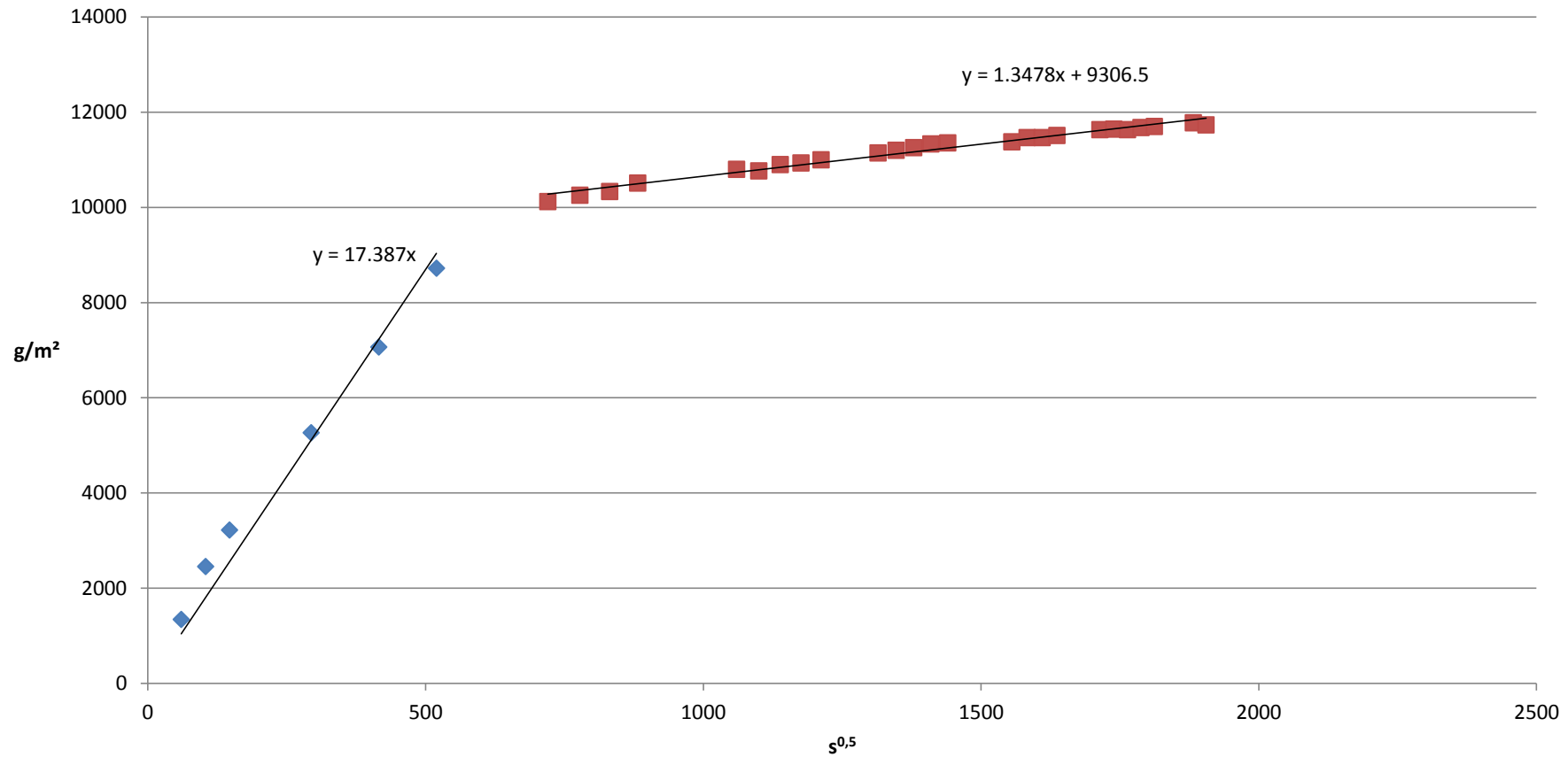
Waterabsorptiecoefficient capillaire opzuiging*

Leder		912	$\Delta m/A$	984	$\Delta m/A$	1008	$\Delta m/A$
Wanlin		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
11		1669.4	11153.44	1669.7	11185.19	1669.5	11164.02
12		1660.5	11700	1661.2	11777.78	1660.8	11733.33
13		1671.4	13207.35	1671	13165.35	1671.4	13207.35
Gemiddelde			12020.26		12042.77		12034.9
Standaardafwijking			1063.749		1016.334		1054.516

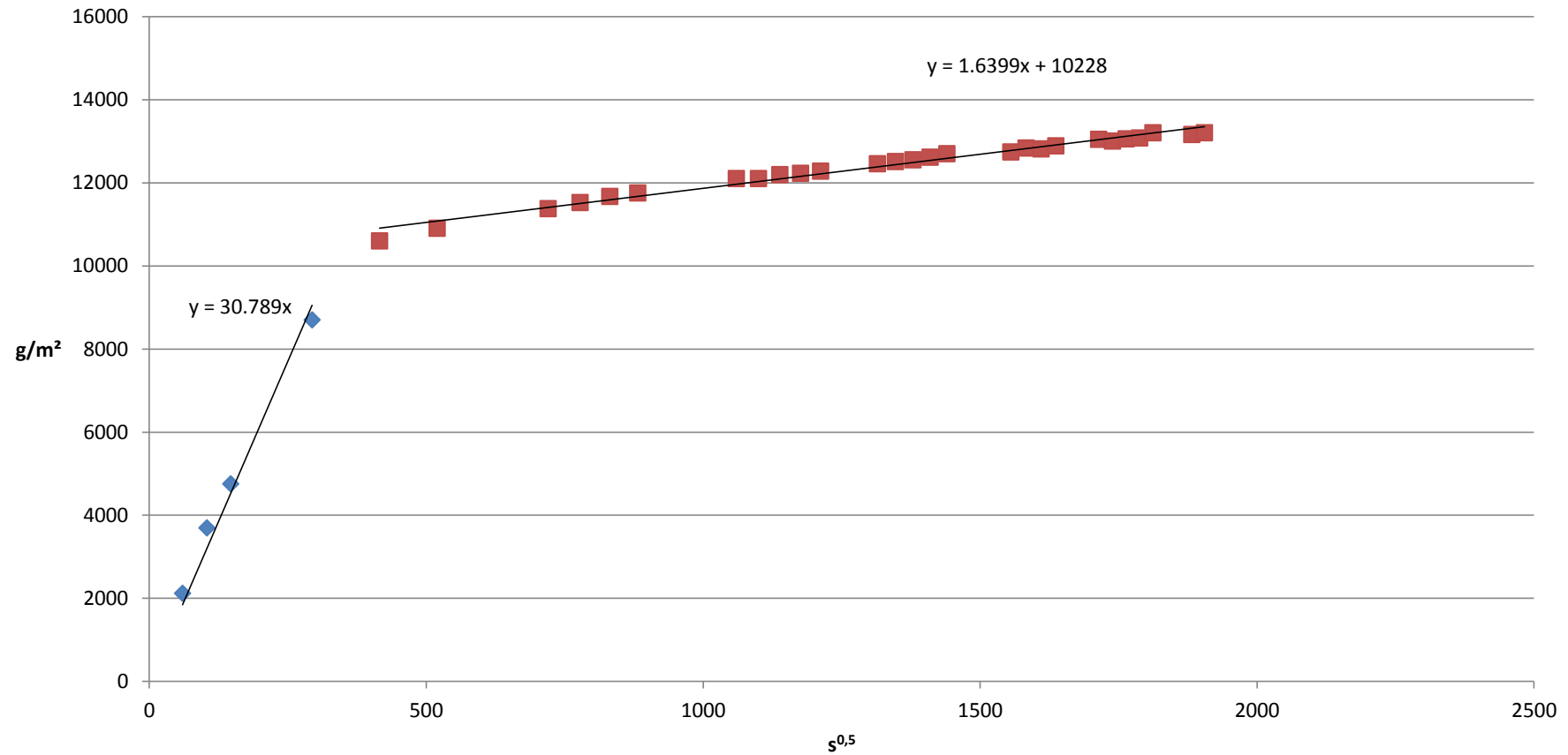
Leder Wanlin 11



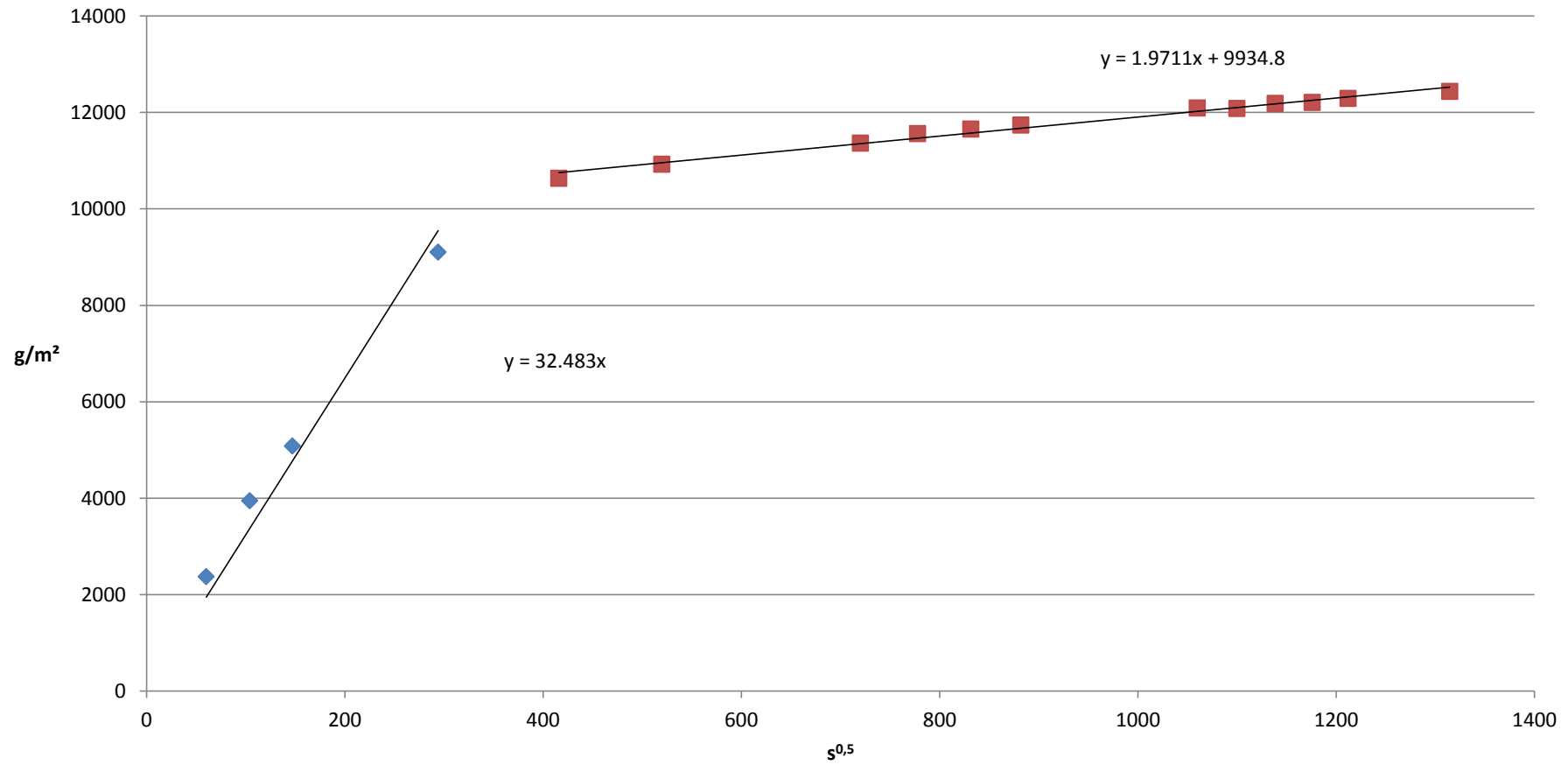
Leder Wanlin 12



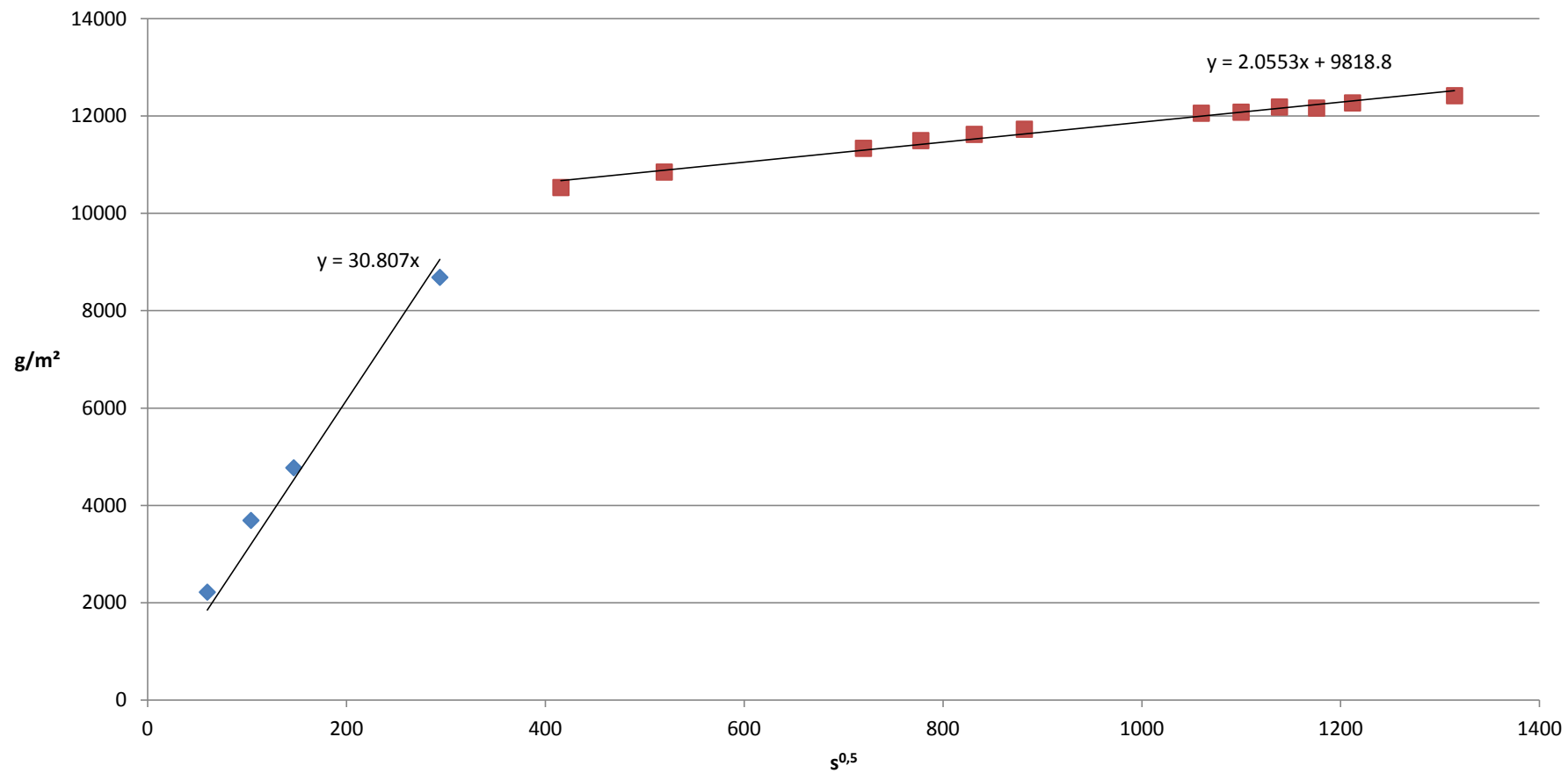
Leder Wanlin 13



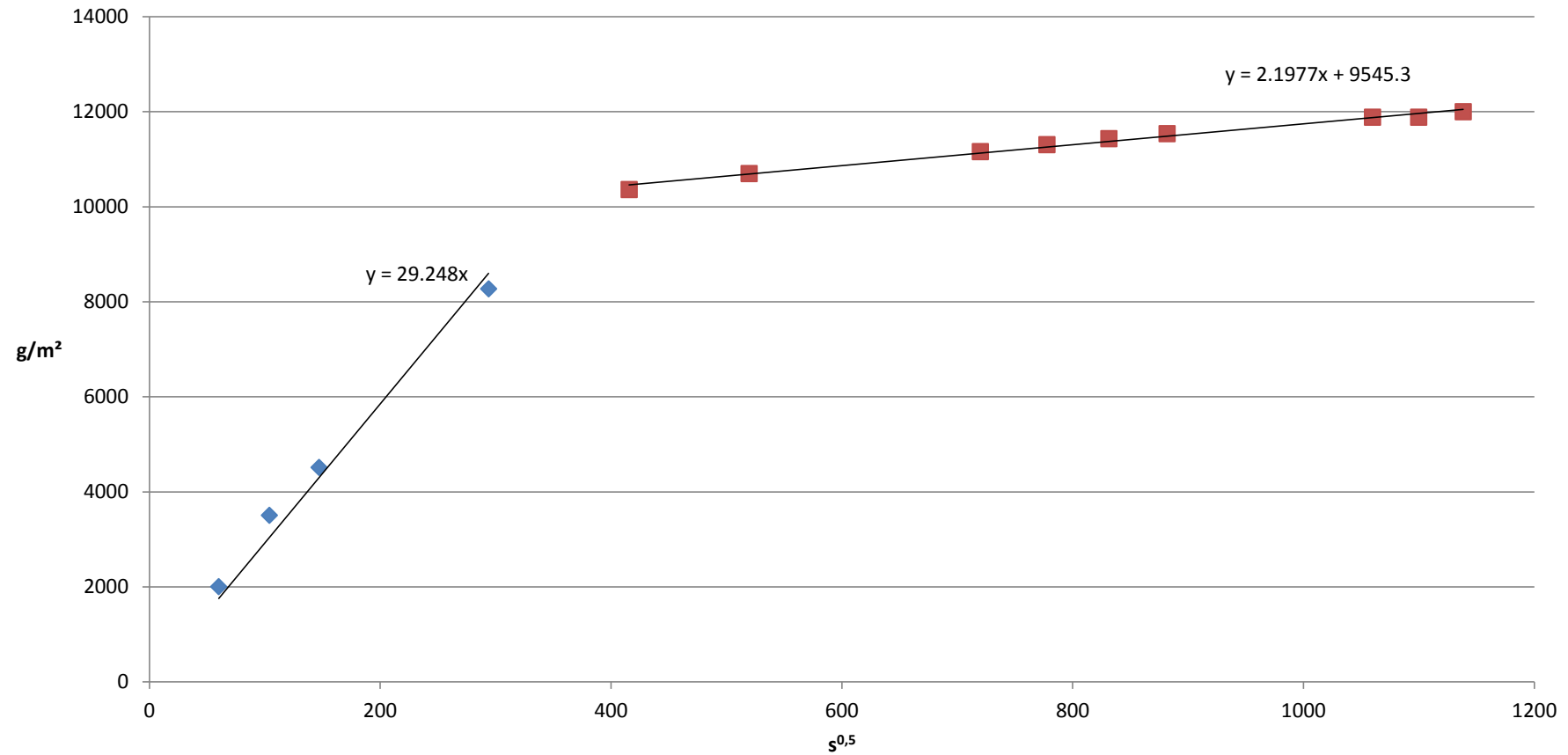
Leder Wanlin 14



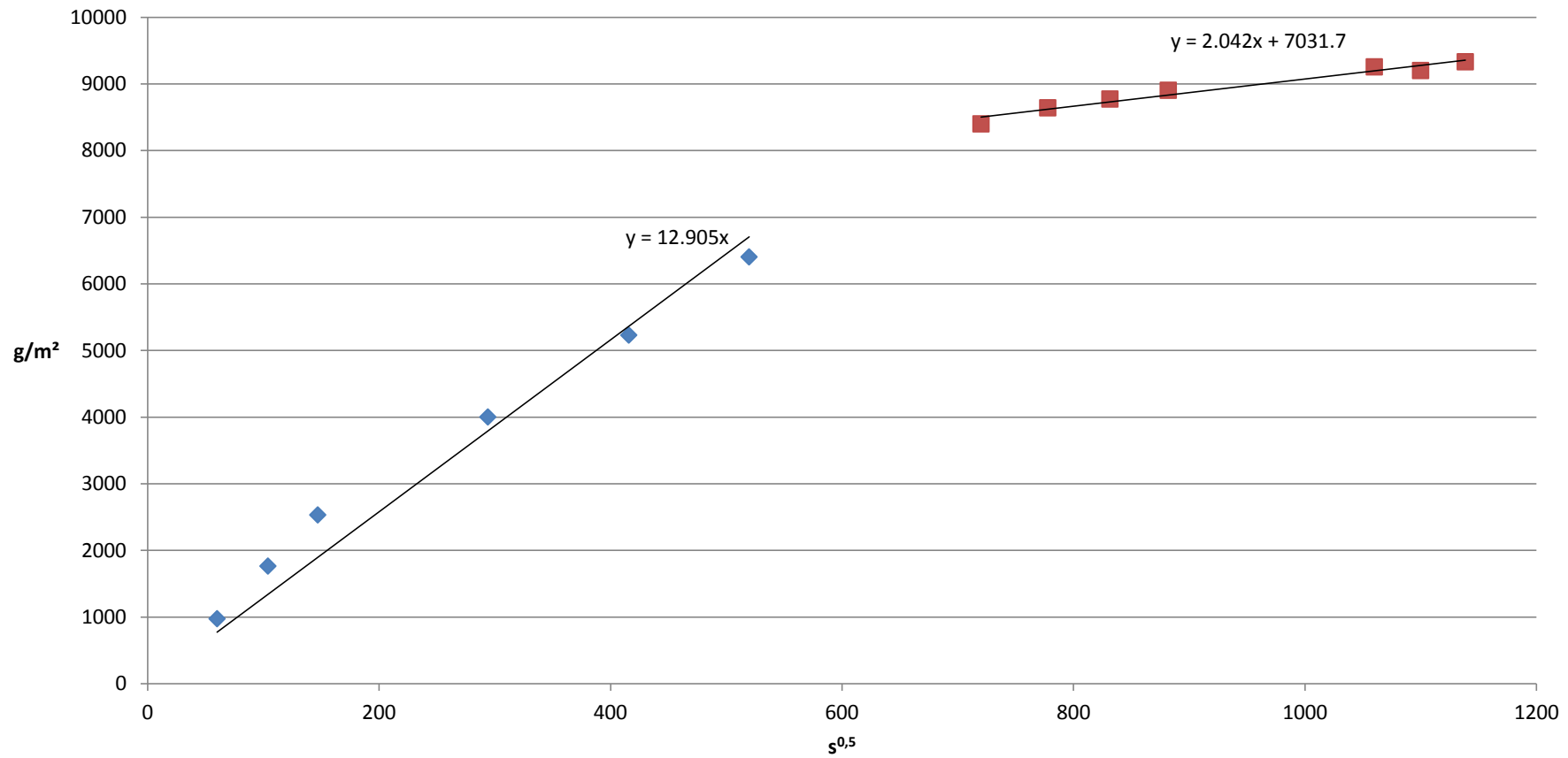
Leder Wanlin 15



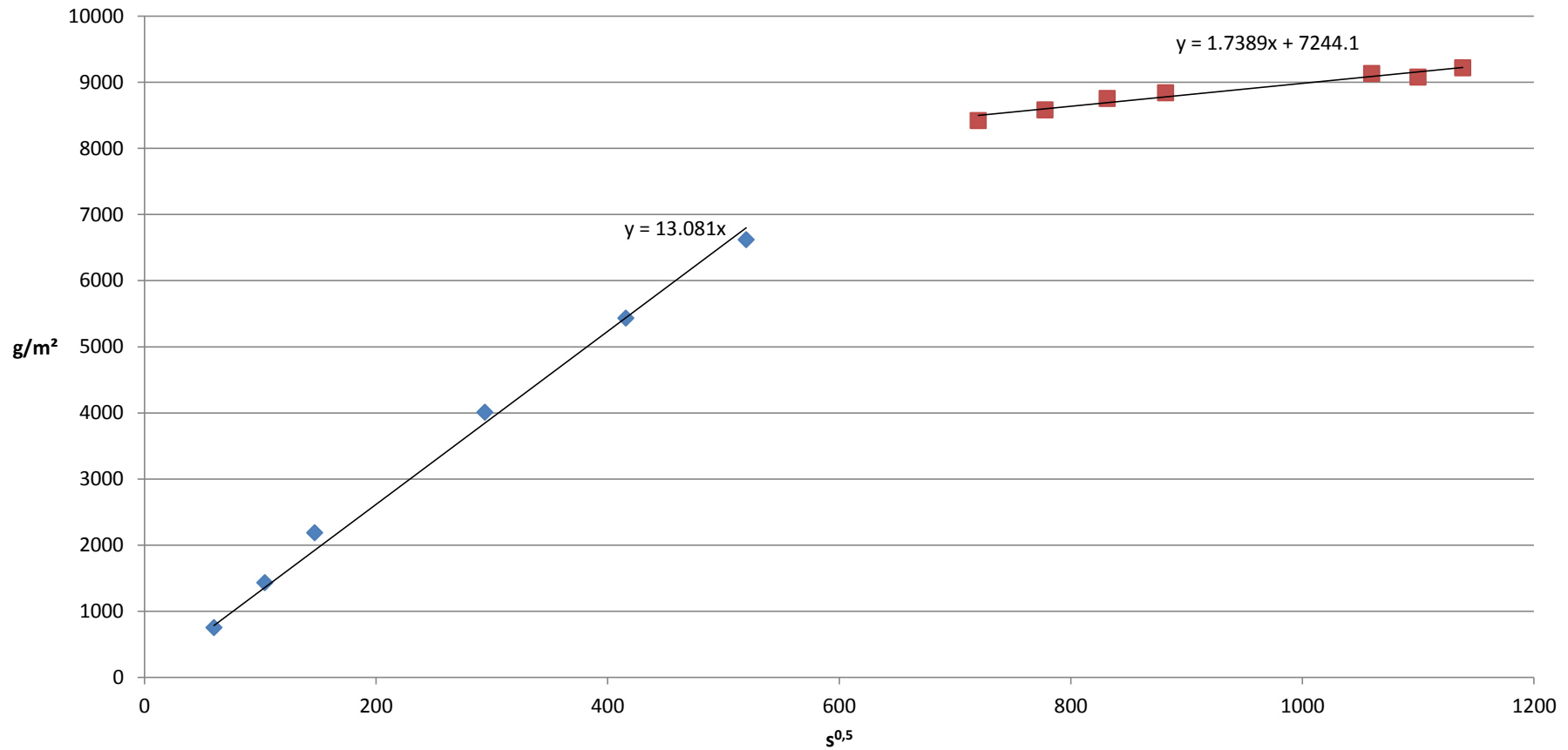
Leder Wanlin 16



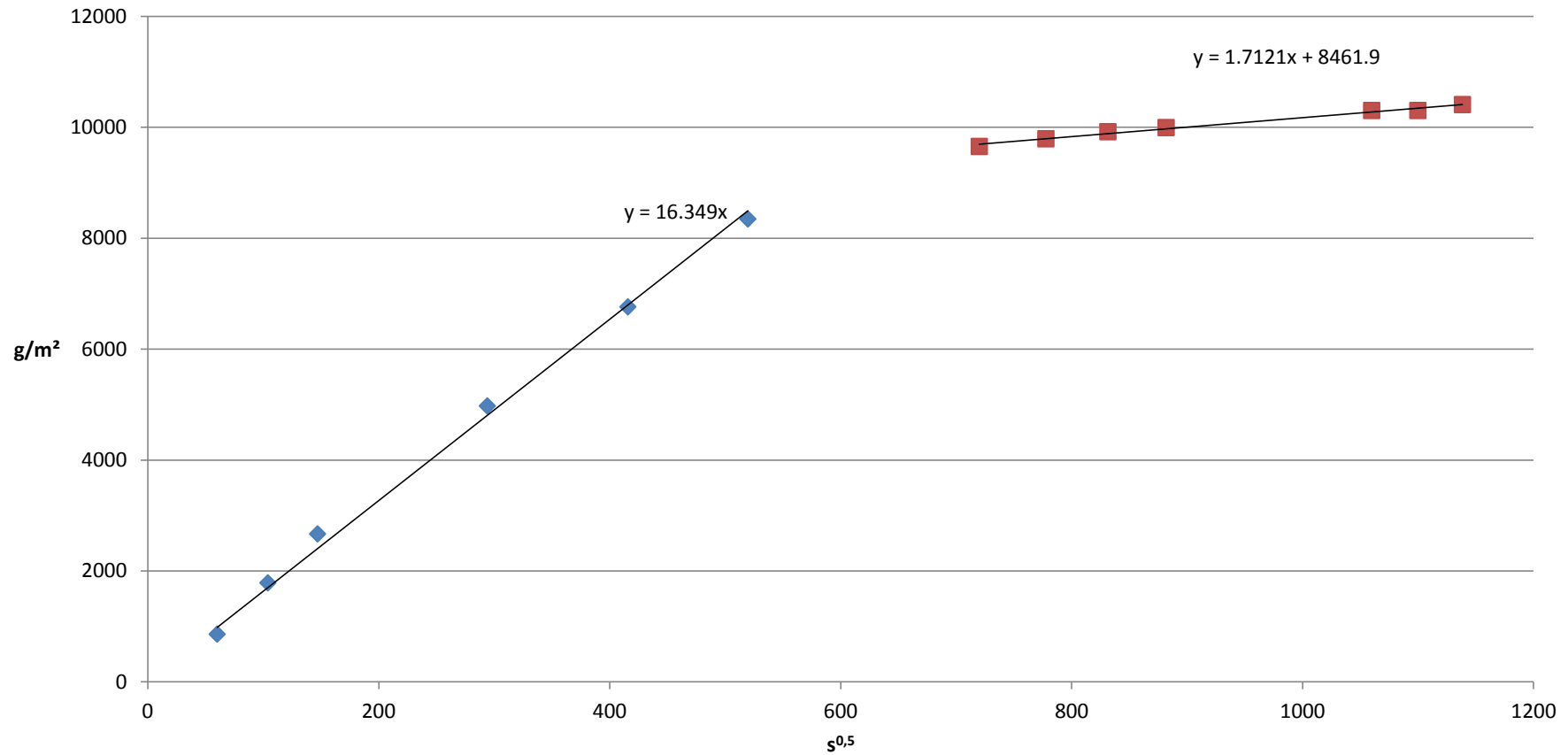
Leder Wanlin 17



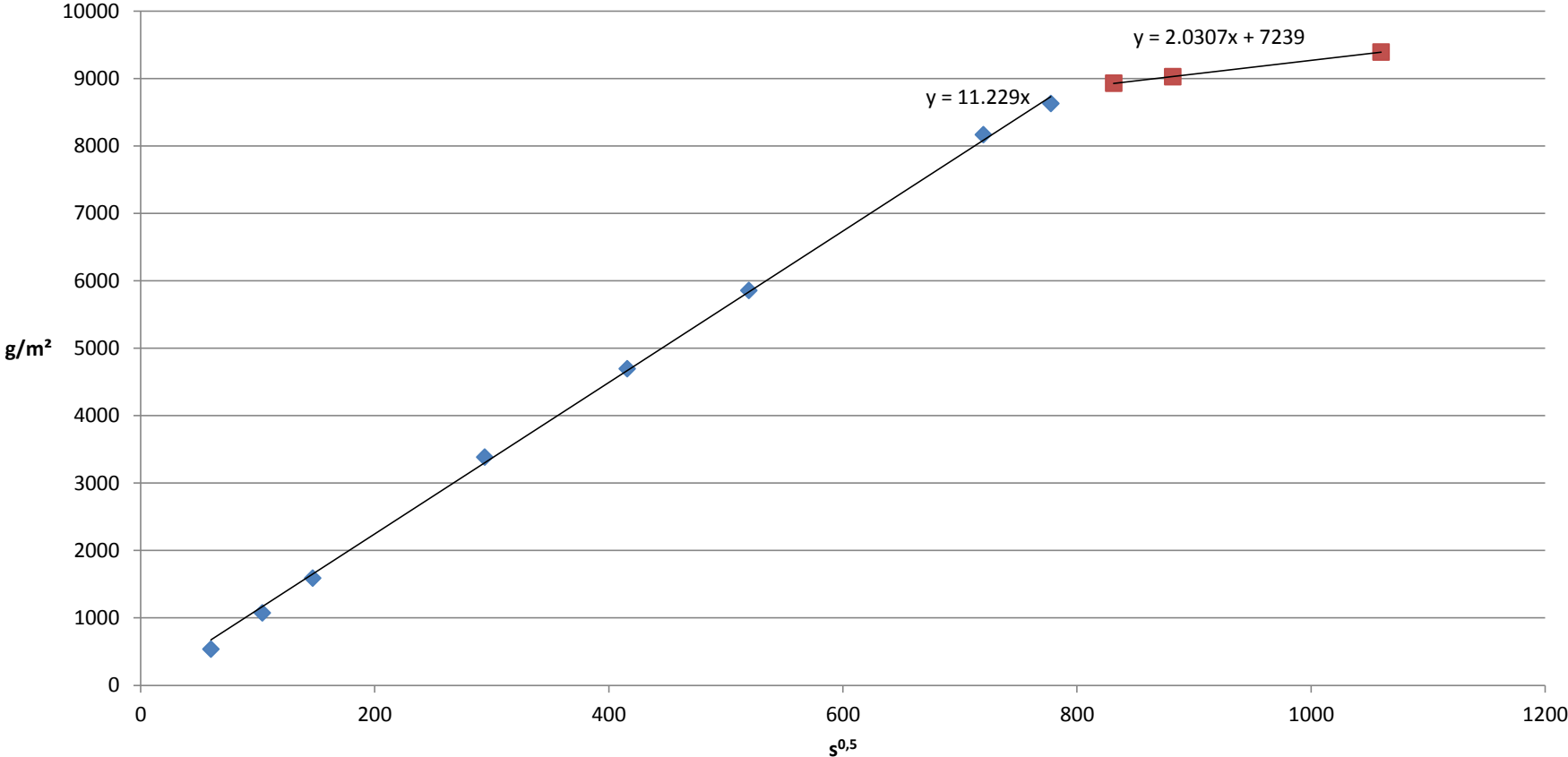
Leder Wanlin 18



Leder Wanlin 19



Leer Wanlin 20



Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Mortel ZAND	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	$\Delta m/A$	3u	$\Delta m/A$	6u	$\Delta m/A$	8u	$\Delta m/A$
		m	m	m ²		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
1A	251.3	0.04	0.039	0.00156		257.4	3910.256	261.6	6602.564	266.7	9871.795		
1B	221.5	0.038	0.041	0.001558		227.8	4043.646	231.9	6675.225	236.9	9884.467		
2A	236	0.038	0.04	0.00152		243.1	4671.053	247.7	7697.368	253.7	11644.74		
2B	218.6	0.038	0.04	0.00152		225.7	4671.053	230.5	7828.947	236.7	11907.89		
3A	133.2	0.039	0.038	0.001482		148	9986.505	148.8	10526.32	148.9	10593.79		
3B	285.9	0.039	0.037	0.001443		301.1	10533.61	311.5	17740.82	319.9	23562.02		
7A	207.2	0.038	0.04	0.00152		218.4	7368.421	225.4	11973.68	231.1	15723.68	231.2	15789.474
7B	220.4	0.039	0.039	0.001521		231.3	7166.338	238.3	11768.57	244.8	16042.08	245.7	16633.794
8A	220	0.038	0.038	0.001444		228.7	6024.931	234.4	9972.299	239.5	13504.16	241.6	14958.449
8B	228	0.038	0.038	0.001444		236.7	6024.931	242.3	9903.047	247.3	13365.65	249.3	14750.693
9A	237.1	0.042	0.039	0.001638		248.8	7142.857	256.3	11721.61	262.5	15506.72	263.4	16056.166
9B	228.9	0.042	0.039	0.001638		239.9	6715.507	246.9	10989.01	252.8	14590.96	253.8	15201.465
Gemiddelde						6521.592		10283.29		13849.83		15565.007	
Standaardafwijking						2131.153		3057.362		3778.848		720.70949	

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Mortel ZAND		24u	$\Delta m/A$	48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$	192u	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
1A		274.6	14935.9	277.3	16666.67	277.9	17051.28	279	17756.41	278.9	17692.31	279	17756.41
1B		243.5	14120.67	244.2	14569.96	244.7	14890.89	245.6	15468.55	245.4	15340.18	245.5	15404.365
2A		262.2	17236.84	262.9	17697.37	263.5	18092.11	264.2	18552.63	264.1	18486.84	264.3	18618.421
2B		242.8	15921.05	243.3	16250	243.8	16578.95	244.4	16973.68	244.4	16973.68	244.5	17039.474
3A		149.2	10796.22	149.7	11133.6	149.8	11201.08	150.4	11605.94	150.4	11605.94	150.5	11673.414
3B		320.7	24116.42	321.5	24670.82	322	25017.33	323	25710.33	322.8	25571.73	322.9	25641.026
7A		231.7	16118.42	232.2	16447.37	232.7	16776.32	233.1	17039.47	233.2	17105.26	233.2	17105.263
7B		246.3	17028.27	247	17488.49	247.3	17685.73	247.8	18014.46	247.9	18080.21	248.1	18211.703
8A		243.5	16274.24	243.9	16551.25	244.4	16897.51	244.8	17174.52	244.8	17174.52	245	17313.019
8B		252.4	16897.51	252.9	17243.77	253.4	17590.03	254.2	18144.04	254.1	18074.79	254.3	18213.296
9A		264	16422.47	264.6	16788.77	265.1	17094.02	265.7	17460.32	265.8	17521.37	266	17643.468
9B		254.6	15689.87	255	15934.07	255.4	16178.27	255.9	16483.52	256.1	16605.62	256.2	16666.667
Gemiddelde			16296.49		16786.84		17087.79		17531.99		17519.37		17607.21
Standaardafwijking			3020.05		3041.555		3092.461		3158.639		3127.155		3132.3673

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Mortel		216u	$\Delta m/A$	240u	$\Delta m/A$	312u	$\Delta m/A$	336u	$\Delta m/A$	360u	$\Delta m/A$	384U	$\Delta m/A$
ZAND		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
1A		279.1	17820.51	279.3	17948.72			279.3	17948.72	279.2	17884.62	279.3	17948.718
1B		245.6	15468.55	245.7	15532.73			245.6	15468.55	245.6	15468.55	245.8	15596.919
2A		264.3	18618.42	264.4	18684.21			264.4	18684.21	264.5	18750	264.6	18815.789
2B		244.6	17105.26	244.6	17105.26			244.7	17171.05	244.7	17171.05	244.8	17236.842
3A		150.4	11605.94	150.6	11740.89			151.1	12078.27	150.9	11943.32	150.8	11875.843
3B		323.1	25779.63	323.1	25779.63			323.2	25848.93	323.3	25918.23	323.4	25987.526
7A		233.3	16447.37	233.3	17171.05	233.5	17302.63	233.4	17236.84				
7B		248.1	17488.49	248.1	18211.7	248.3	18343.2	248.3	18343.2				
8A		245	16551.25	245.2	17451.52	245.3	17520.78	245.2	17451.52				
8B		254.3	17243.77	254.3	18213.3	254.5	18351.8	254.4	18282.55				
9A		266	16788.77	266.2	17765.57	266.3	17826.62	266.3	17826.62				
9B		256.3	15934.07	256.6	16910.87	256.6	16910.87	256.4	16788.77				
Gemiddelde			17237.67		17709.62		17709.31		17760.77		17855.96		17910.273
Standaardafwijking			3207.017		3138.694		577.375		3106.151		4624.465		4653.6633

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

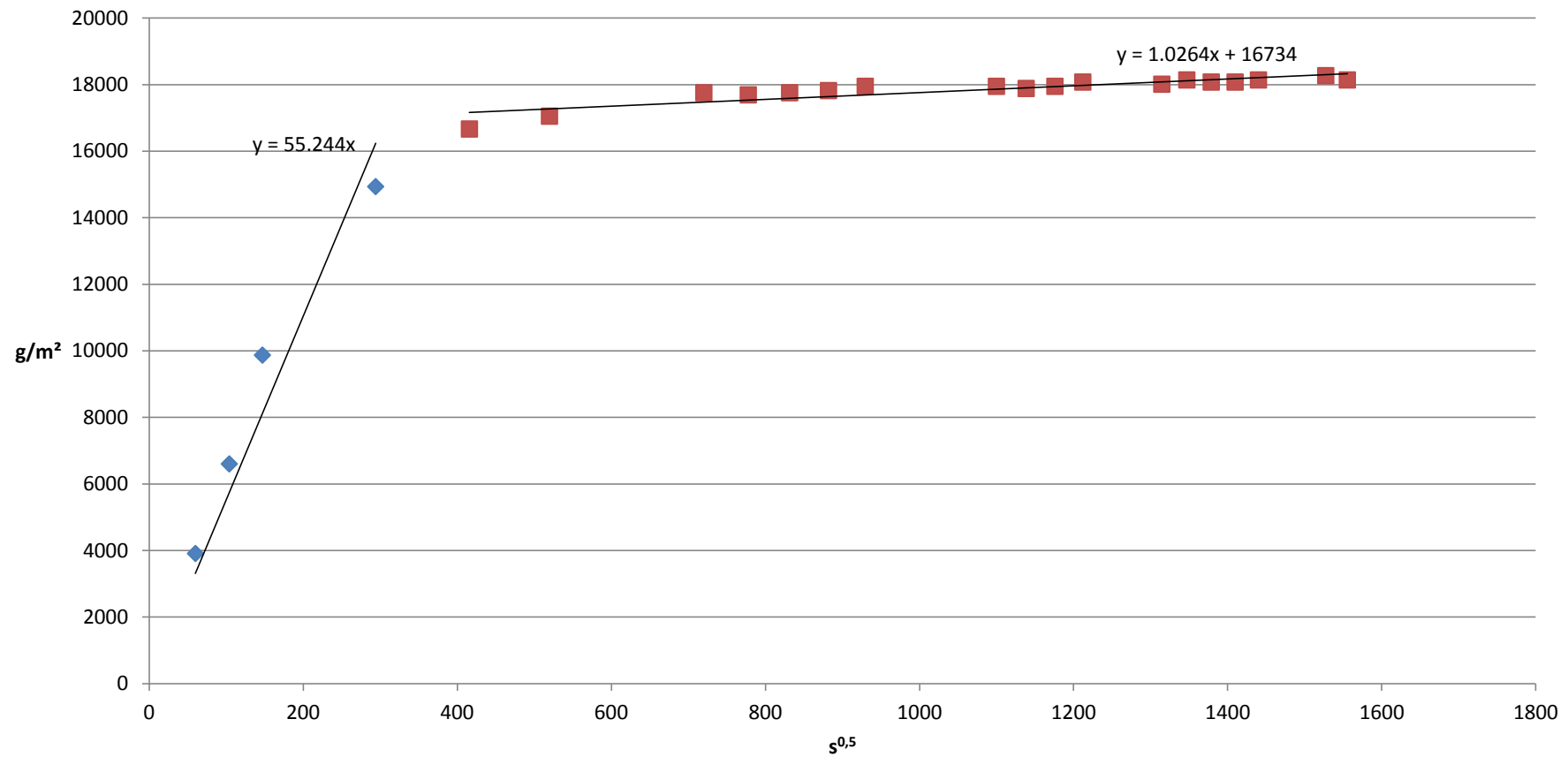
Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Mortel ZAND		408	$\Delta m/A$	480	$\Delta m/A$	504	$\Delta m/A$	528	$\Delta m/A$	552	$\Delta m/A$	576	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
1A		279.5	18076.92	279.4	18012.82	279.6	18141.03	279.5	18076.92	279.5	18076.92	279.6	18141.026
1B		245.8	15596.92	245.9	15661.1	246.2	15853.66	246.1	15789.47	246	15725.29	246.1	15789.474
2A		264.5	18750	264.7	18881.58	264.8	18947.37	264.8	18947.37	264.8	18947.37	264.8	18947.368
2B		244.8	17236.84	244.9	17302.63	245	17368.42	244.9	17302.63	245.1	17434.21	245	17368.421
3A		150.9	11943.32	150.7	11808.37	150.9	11943.32	150.9	11943.32	151	12010.8	150.9	11943.32
3B		323.5	26056.83	323.5	26056.83	323.6	26126.13	323.6	26126.13	323.7	26195.43	323.7	26195.426
Gemiddelde			17943.47		17953.89		18063.32		18030.97		18065		18064.172
Standaardafwijking			4658.375		4689.778		4660.822		4668.784		4677.779		4690.9784

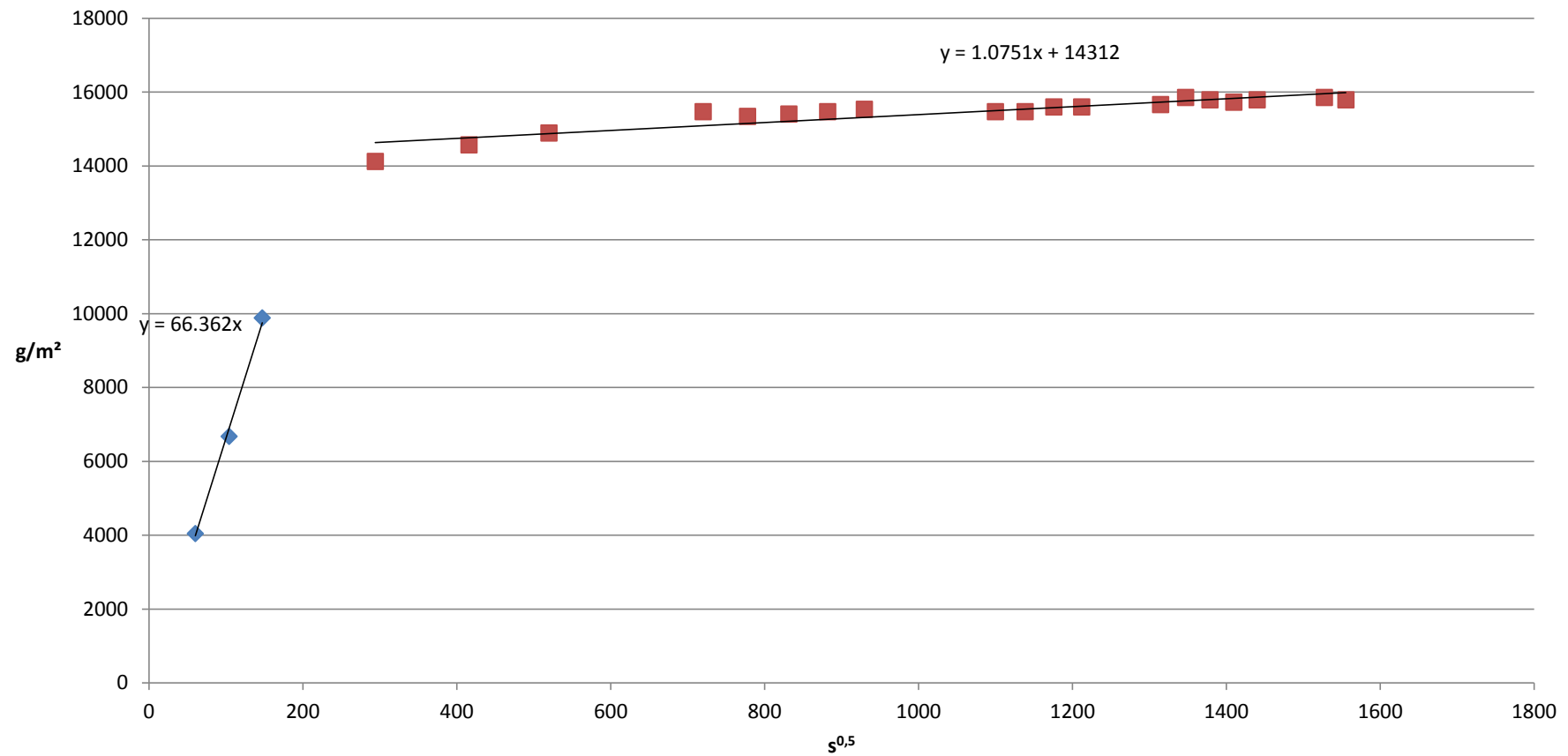
Mortel ZAND		648	$\Delta m/A$	672	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²
1A		279.8	18269.23	279.6	18141.03
1B		246.2	15853.66	246.1	15789.47
2A		264.9	19013.16	264.8	18947.37
2B		245.1	17434.21	245	17368.42
3A		151	12010.8	150.9	11943.32
3B		323.8	26264.73	323.8	26264.73
Gemiddelde			18140.96		18075.72
Standaardafwijking			4692.183		4715.027

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

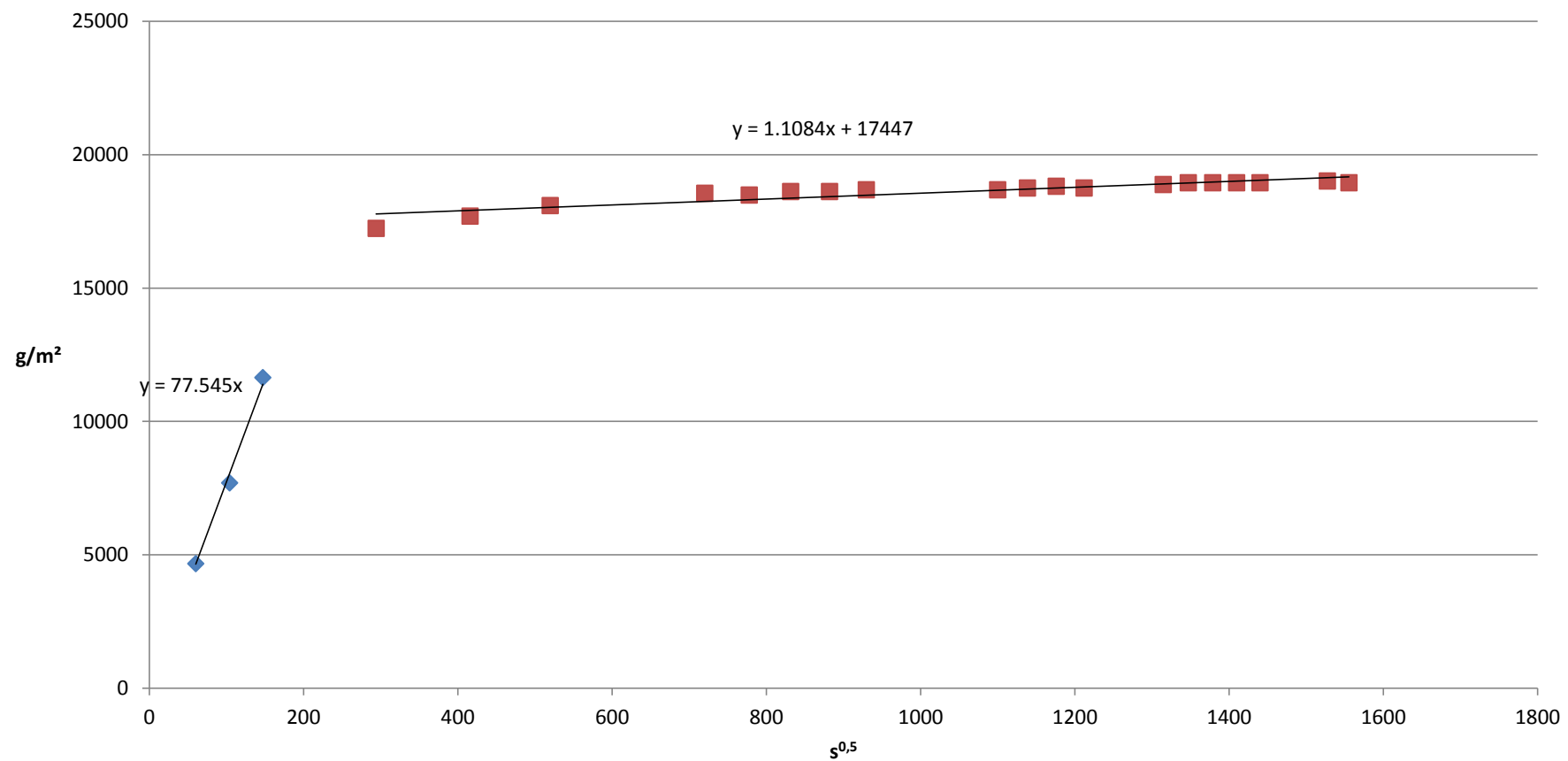
Mortel 1A



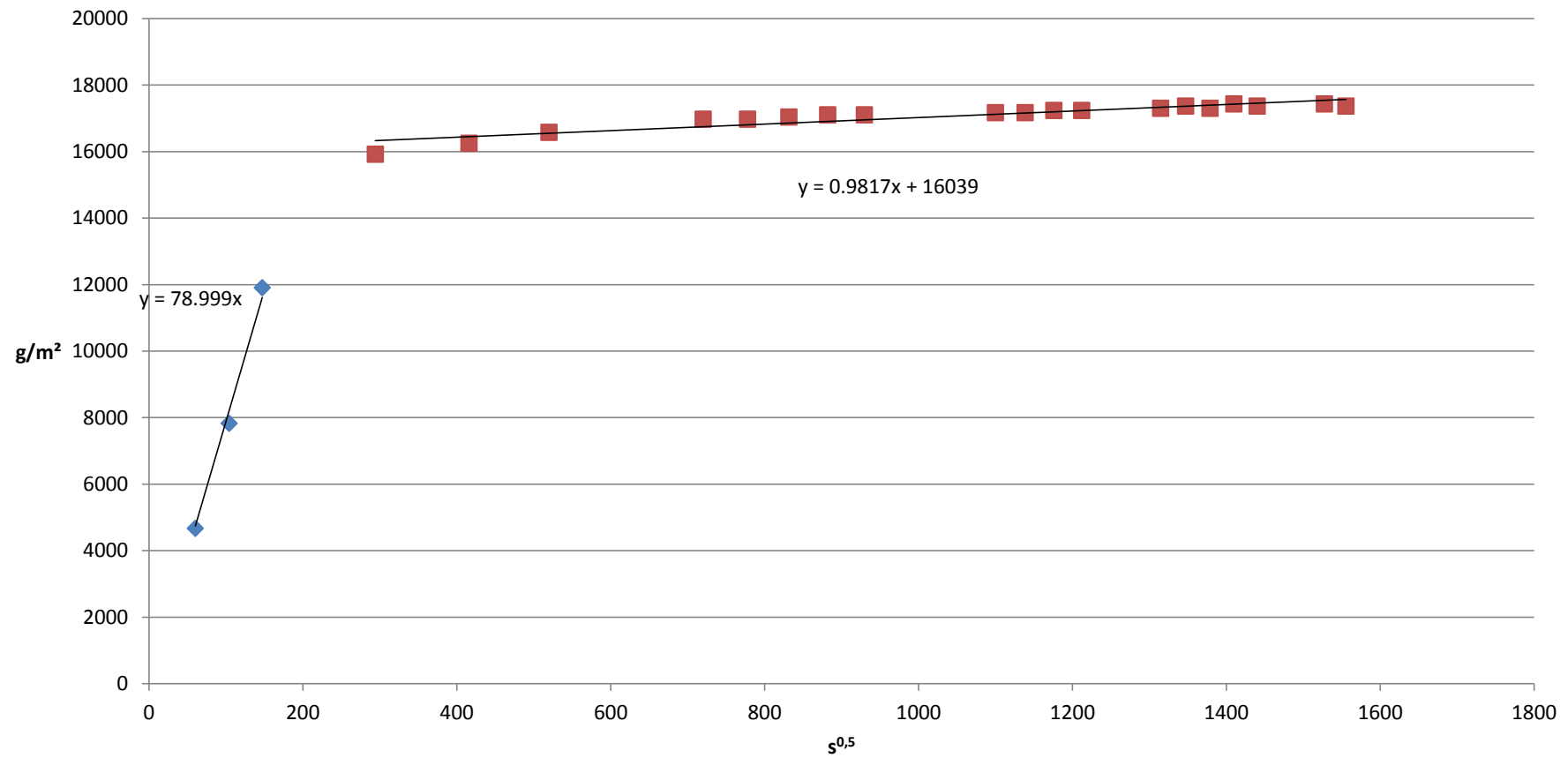
Mortel 1B



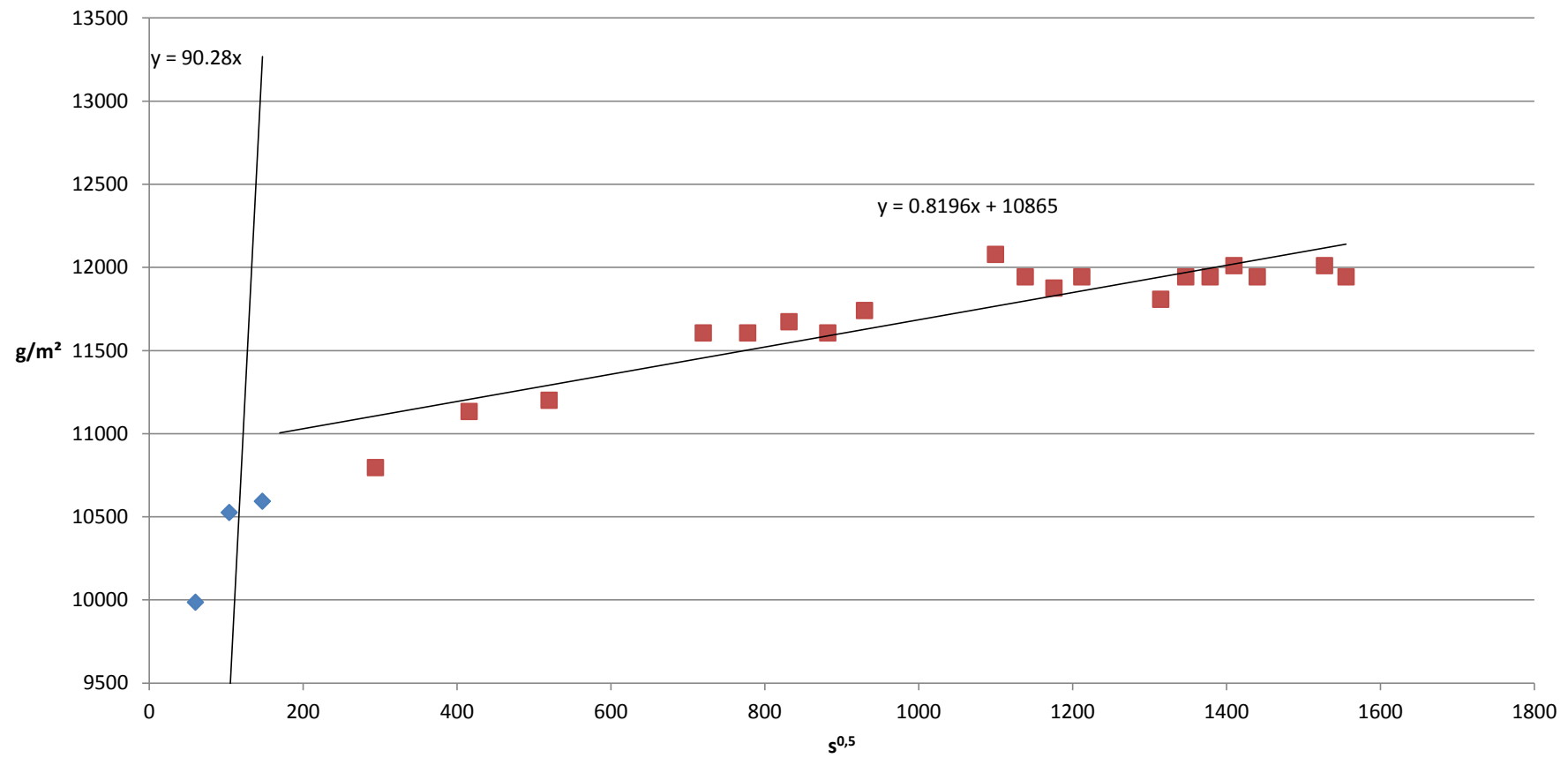
Mortel 2A



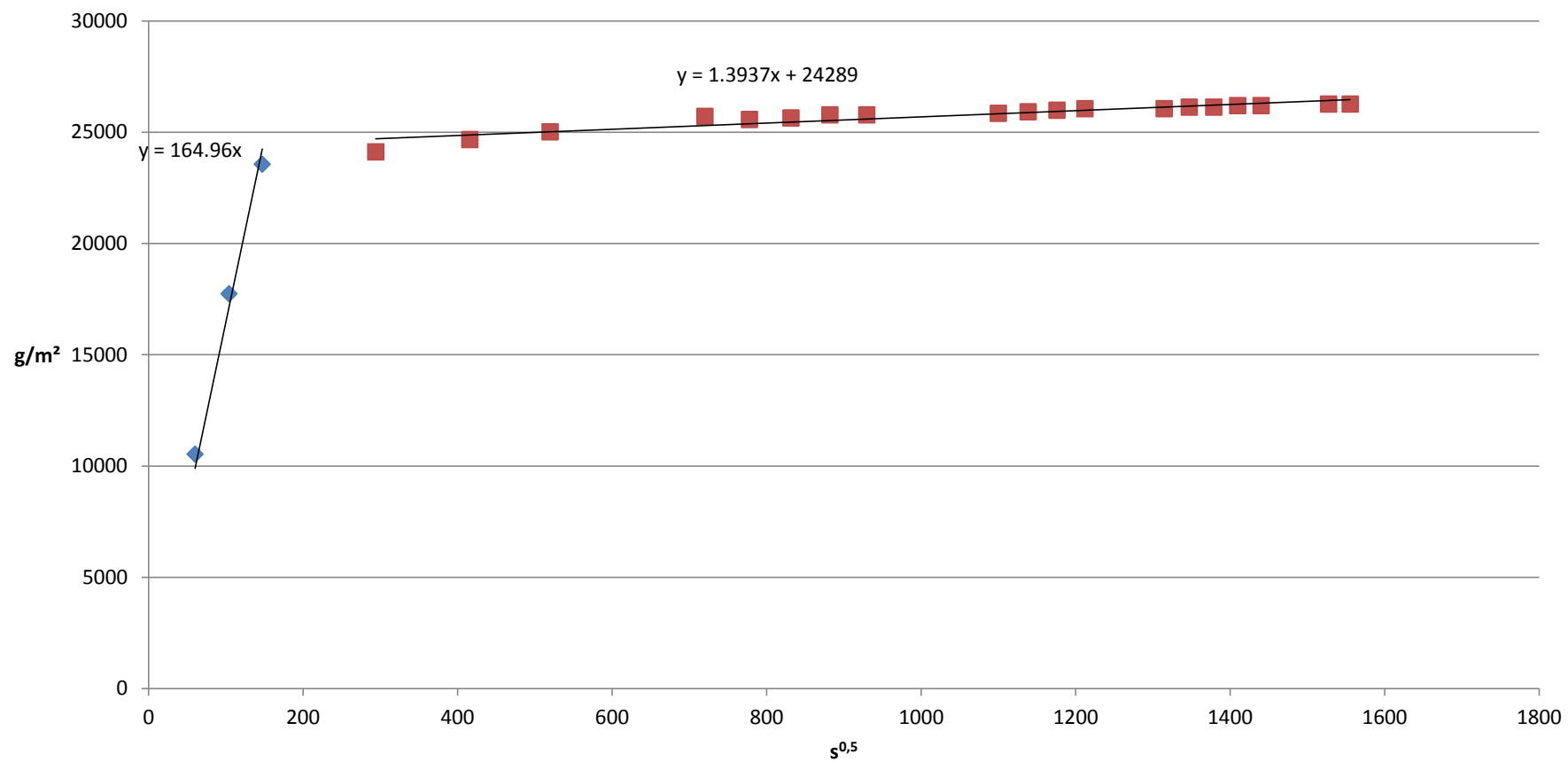
Mortel 2B



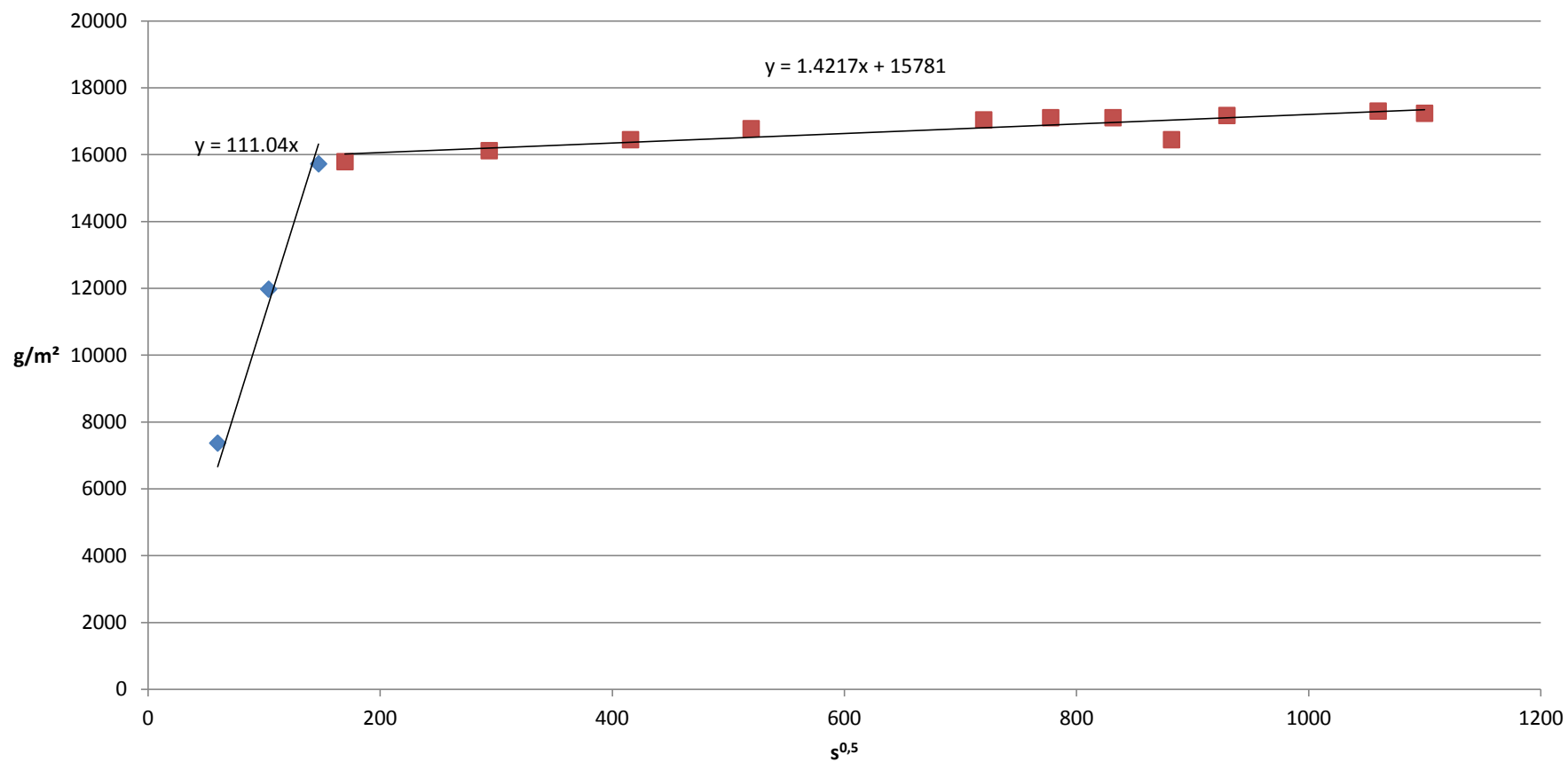
Mortel 3A



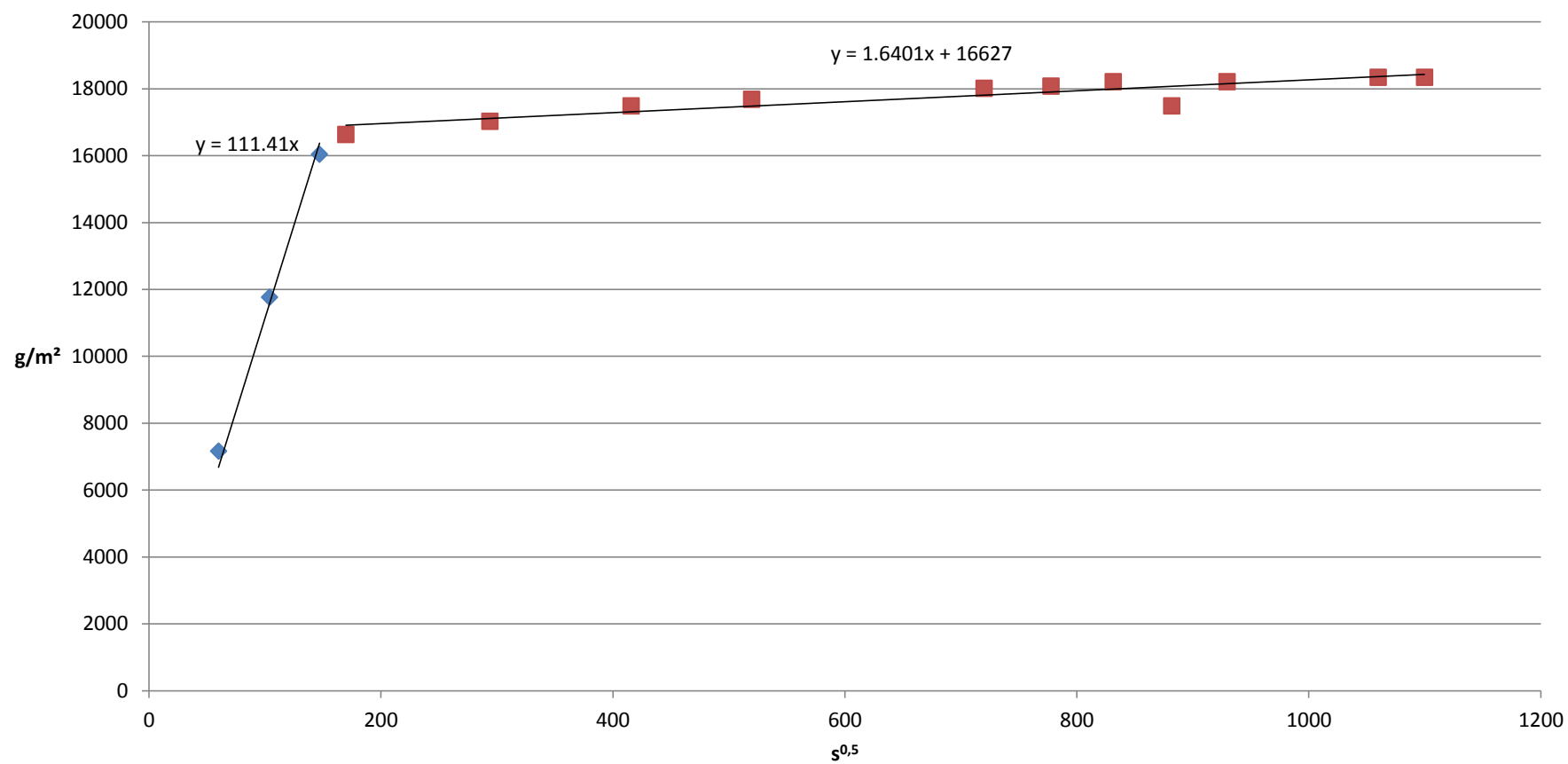
Mortel 3B



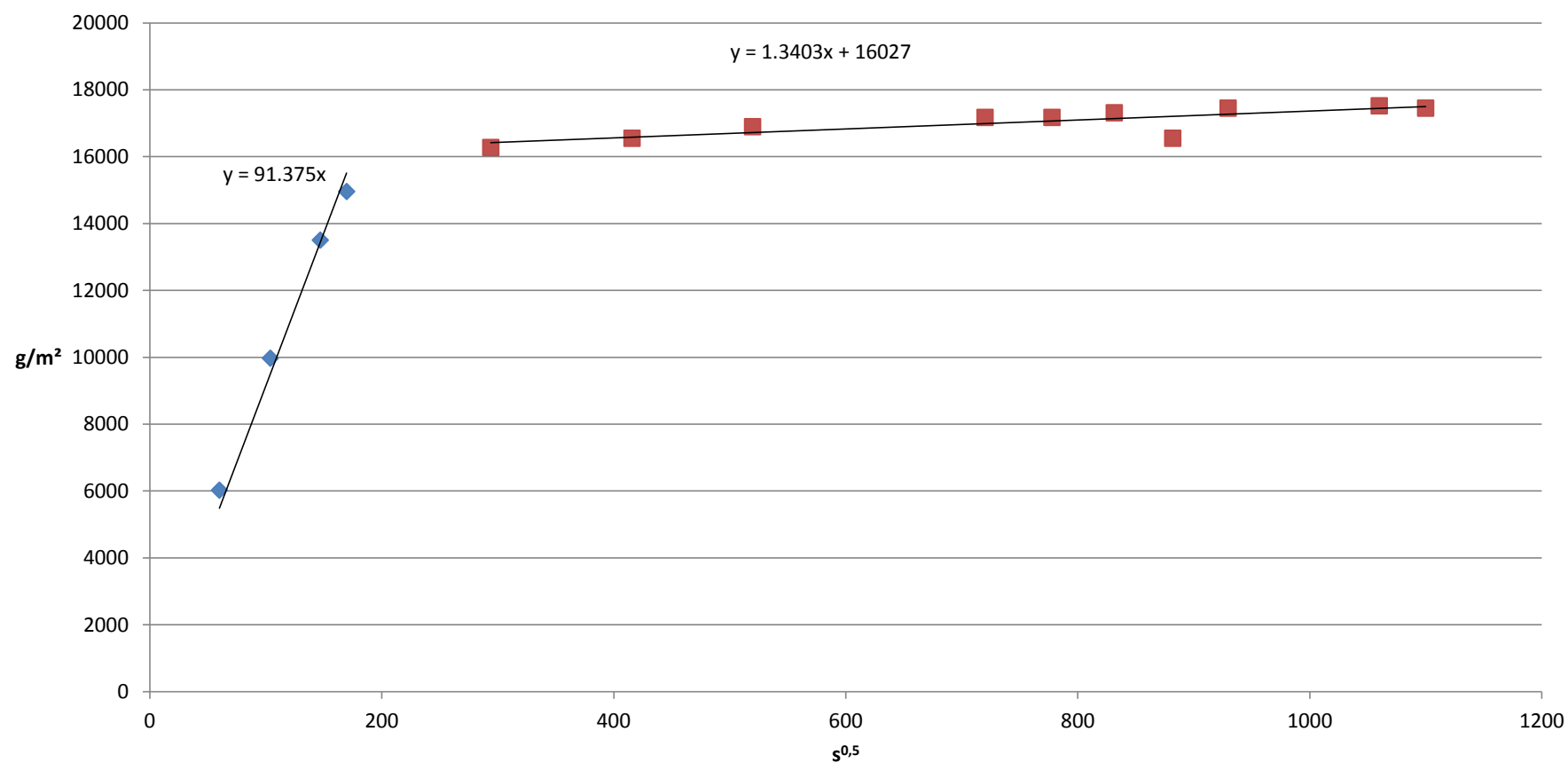
Mortel 7A



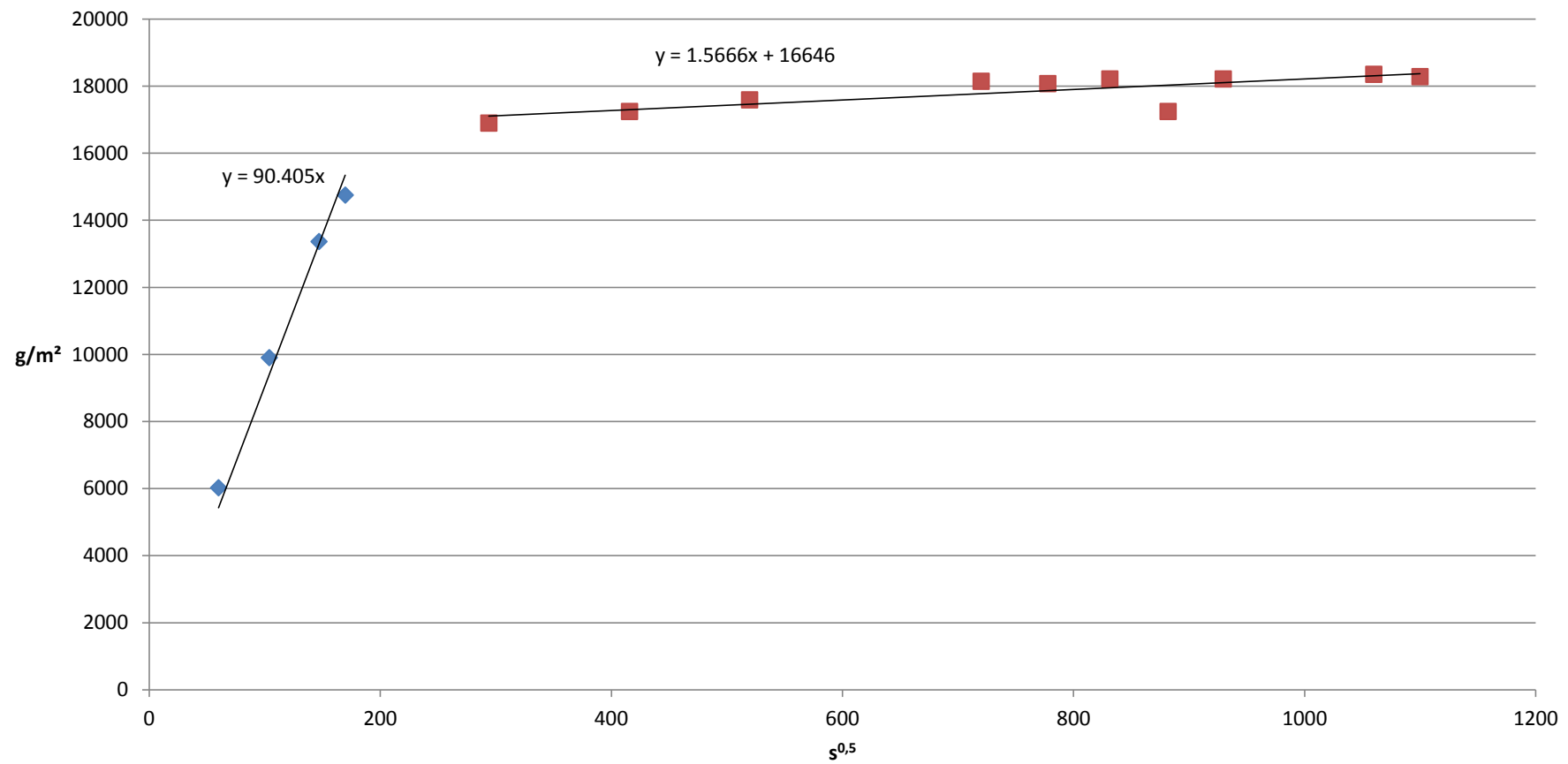
Mortel 7B



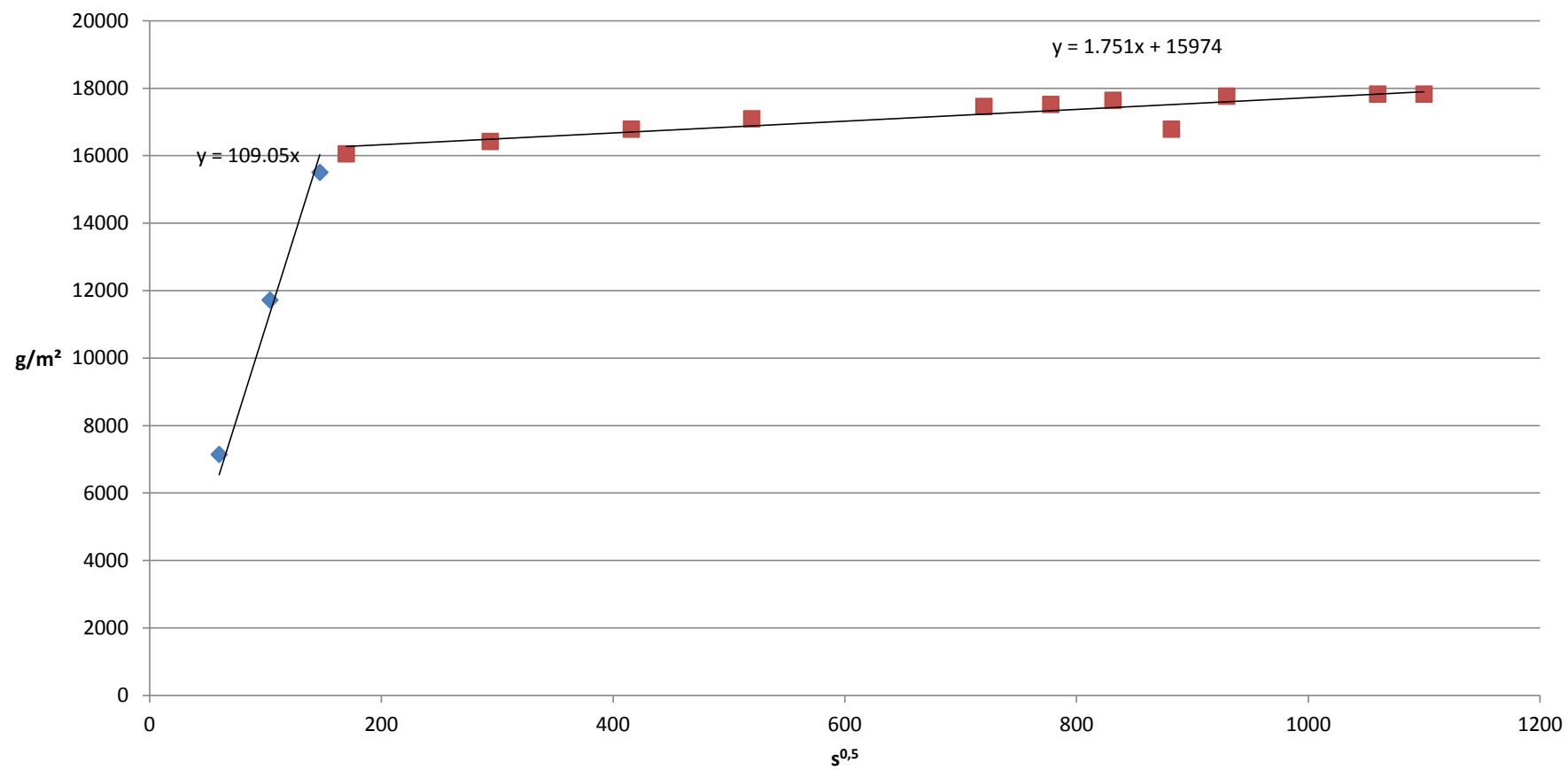
Mortel 8A



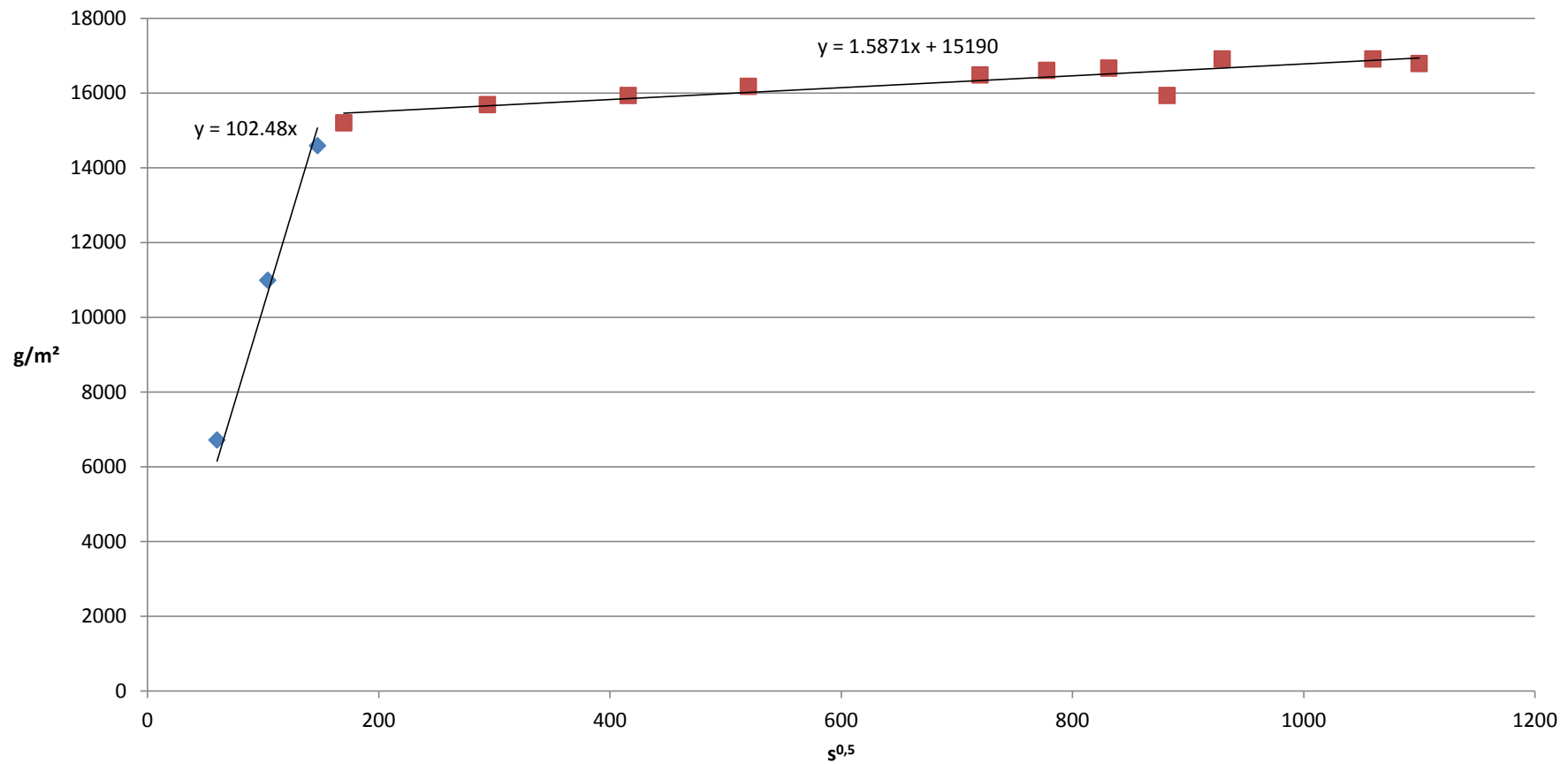
Mortel 8B



Mortel 9A



Mortel 9B



Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Mortel ZAVEL	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	$\Delta m/A$	3u	$\Delta m/A$	6u	$\Delta m/A$	8u	$\Delta m/A$
		m	m	m ²		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
13A	232.2	0.039	0.039	0.001521		245.5	8744.247	254.2	14464.17	261	18934.91	262.4	19855.3583
13B	194.3	0.04	0.039	0.00156		207.3	8333.333	216.3	14102.56	219.4	16089.74	219.7	16282.0513
14A	223.6	0.038	0.039	0.001482		235.3	7894.737	242.5	12753.04	248.4	16734.14	250.6	18218.6235
14B	187.7	0.038	0.038	0.001444		198.7	7617.729	206.1	12742.38	210.9	16066.48	211.1	16204.9861
15A	215.5	0.039	0.042	0.001638		228.9	8180.708	238.1	13797.31	243.5	17094.02	243.8	17277.1673
15B	252.1	0.041	0.041	0.001681		265.2	7792.98	274.5	13325.4	281.7	17608.57	284.3	19155.2647
16A	165.3	0.04	0.039	0.00156		176.8	7371.795	184.9	12564.1	185.9	13205.13	186.1	13333.3333
16B	261.5	0.04	0.039	0.00156		273.3	7564.103	282	13141.03	288.8	17500	291.5	19230.7692
17A	236.2	0.04	0.04	0.0016		250.7	9062.5	261	15500	266.6	19000	266.8	19125
17B	217.4	0.04	0.04	0.0016		232.3	9312.5	243.4	16250	246.2	18000	246.4	18125
Gemiddelde						8187.463		13864		17023.3		17680.7554	
Standaardafwijking						665.2089		1237.643		1684.551		1974.1481	

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Mortel ZAVEL		24u	$\Delta m/A$	48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$	192u	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
13A		263	20249.84	263.5	20578.57	263.7	20710.06	264.2	21038.79	264.4	21170.28	264.5	21236.0289
13B		220.1	16538.46	220.6	16858.97	220.8	16987.18	221.1	17179.49	221.3	17307.69	221.3	17307.6923
14A		251.9	19095.82	252.4	19433.2	252.7	19635.63	253	19838.06	253.3	20040.49	253.3	20040.4858
14B		211.5	16481.99	211.9	16759	212.1	16897.51	212.4	17105.26	212.6	17243.77	212.6	17243.7673
15A		244.3	17582.42	244.6	17765.57	245.1	18070.82	245.5	18315.02	245.6	18376.07	245.7	18437.1184
15B		285.7	19988.1	286.2	20285.54	286.5	20464.01	286.9	20701.96	287.1	20820.94	287.1	20820.9399
16A		186.4	13525.64	186.7	13717.95	187.2	14038.46	187.4	14166.67	187.4	14166.67	187.5	14230.7692
16B		294.7	21282.05	295.1	21538.46	295.5	21794.87	295.9	22051.28	296.2	22243.59	296.3	22307.6923
17A		267.5	19562.5	267.8	19750	268.1	19937.5	268.6	20250	268.7	20312.5	268.9	20437.5
17B		246.8	18375	247.3	18687.5	247.6	18875	248	19125	248.2	19250	248.3	19312.5
Gemiddelde			18268.18		18537.48		18741.1		18977.15		19093.2		19137.4494
Standaardafwijking			2296.967		2317.249		2296.359		2342.21		2381.092		2388.04621

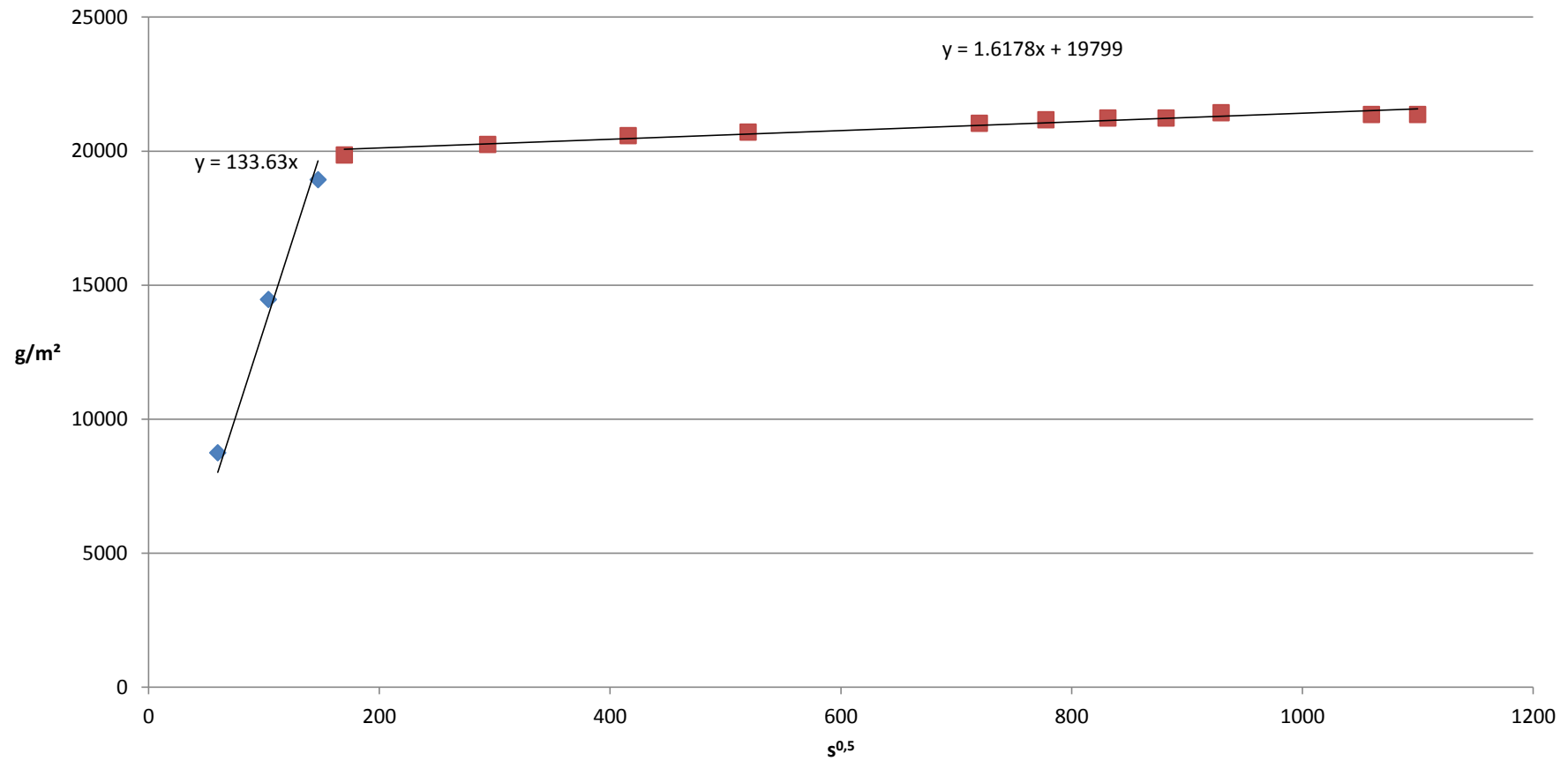
* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

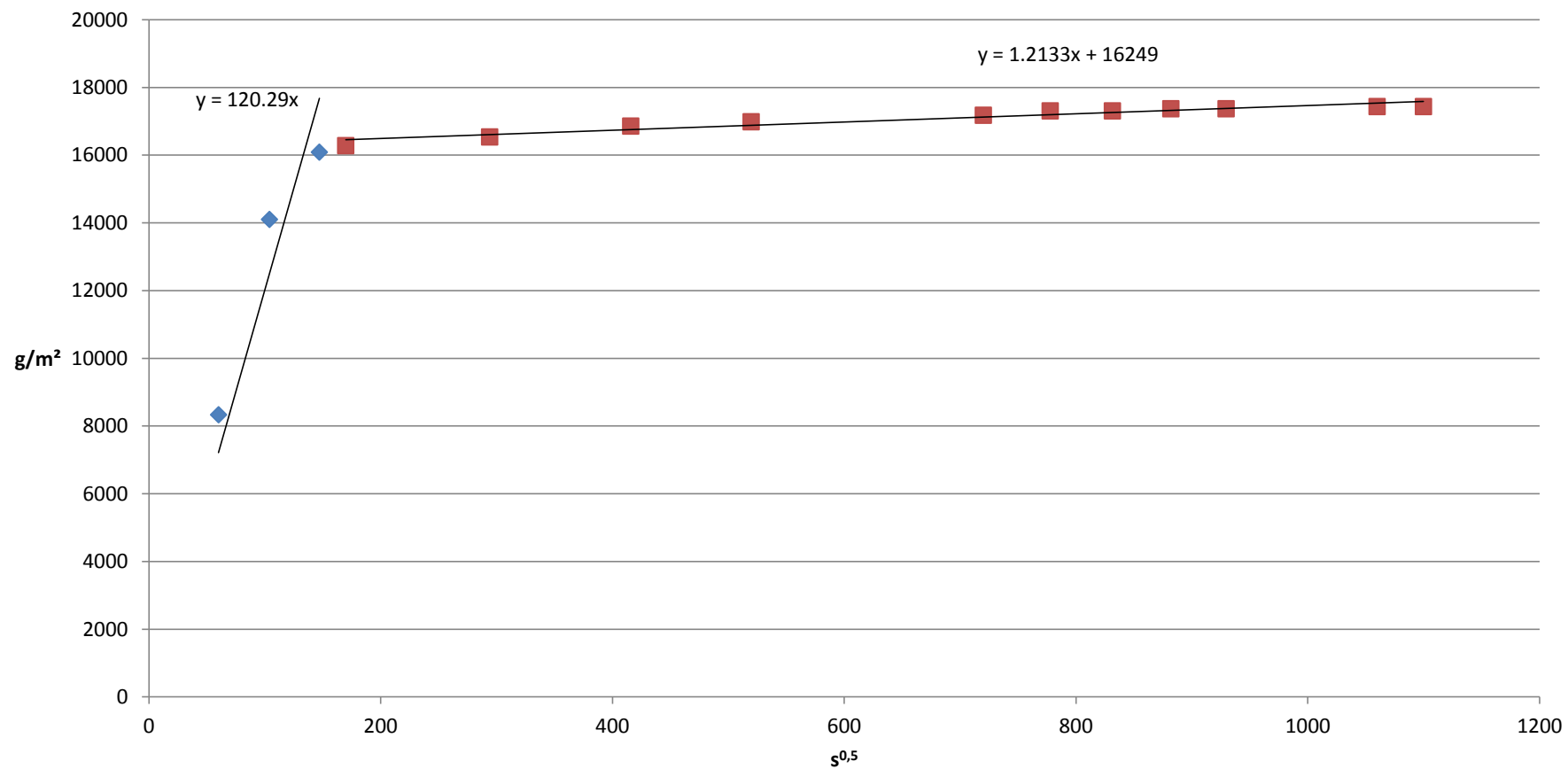
Mortel ZAVEL		216u	$\Delta m/A$	240u	$\Delta m/A$	312U	$\Delta m/A$	336	$\Delta m/A$
		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
13A		264.5	21236.03	264.8	21433.27	264.7	21367.52	264.7	21367.52
13B		221.4	17371.79	221.4	17371.79	221.5	17435.9	221.5	17435.9
14A		253.3	20040.49	253.4	20107.96	253.5	20175.44	253.5	20175.44
14B		212.7	17313.02	212.7	17313.02	212.7	17313.02	212.7	17313.02
15A		245.8	18498.17	245.8	18498.17	245.9	18559.22	245.9	18559.22
15B		287.3	20939.92	287.2	20880.43	287.4	20999.41	287.4	20999.41
16A		187.6	14294.87	187.6	14294.87	187.7	14358.97	187.7	14358.97
16B		296.4	22371.79	296.9	22692.31	296.8	22628.21	296.6	22500
17A		269	20500	268.9	20437.5	269	20500	269	20500
17B		248.3	19312.5	248.6	19500	248.4	19375	248.5	19437.5
Gemiddelde			19187.86		19252.93		19271.27		19264.7
Standaardafwijking			2382.727		2446.794		2422.781		2403.722

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

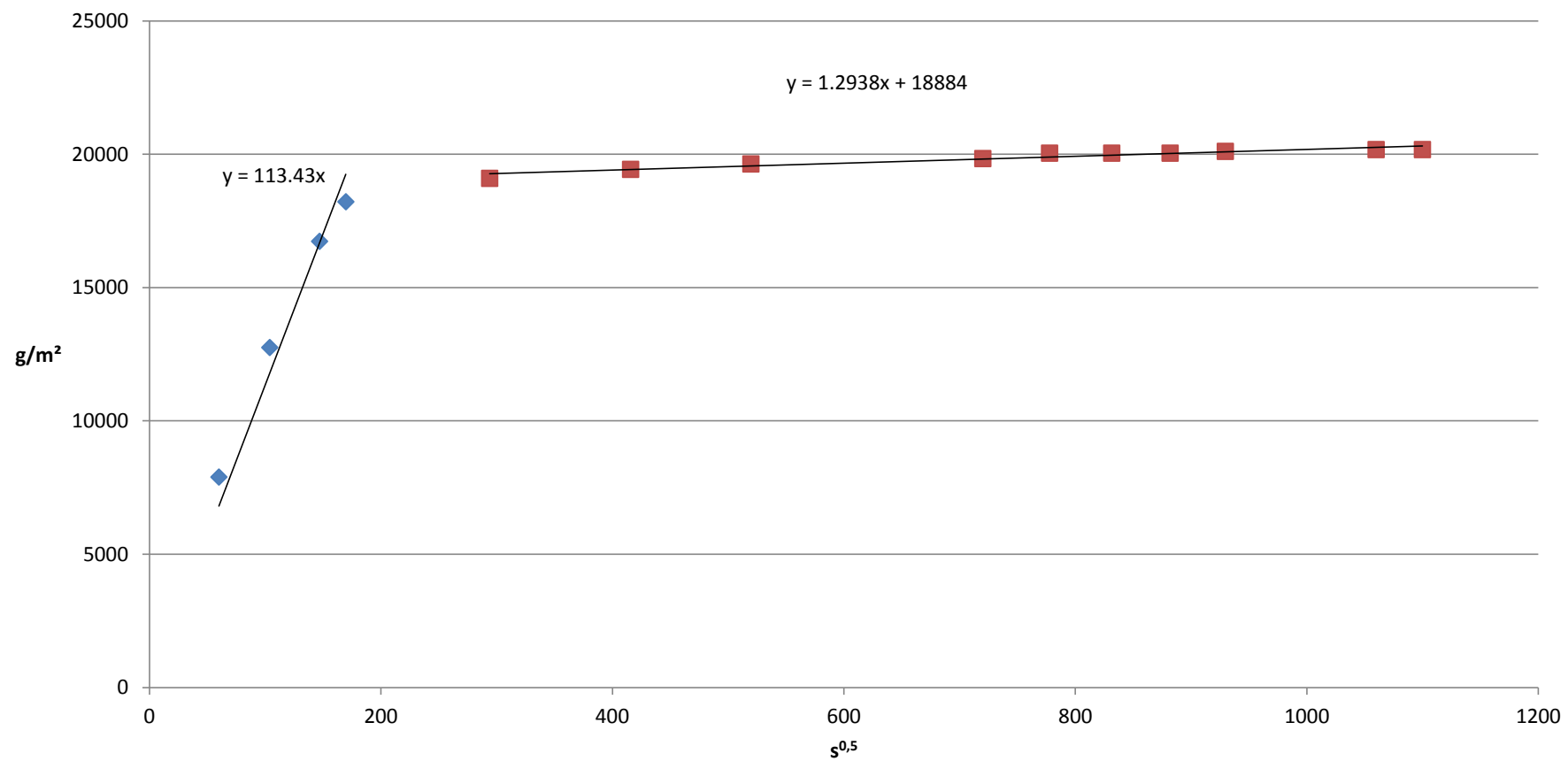
Mortel 13A



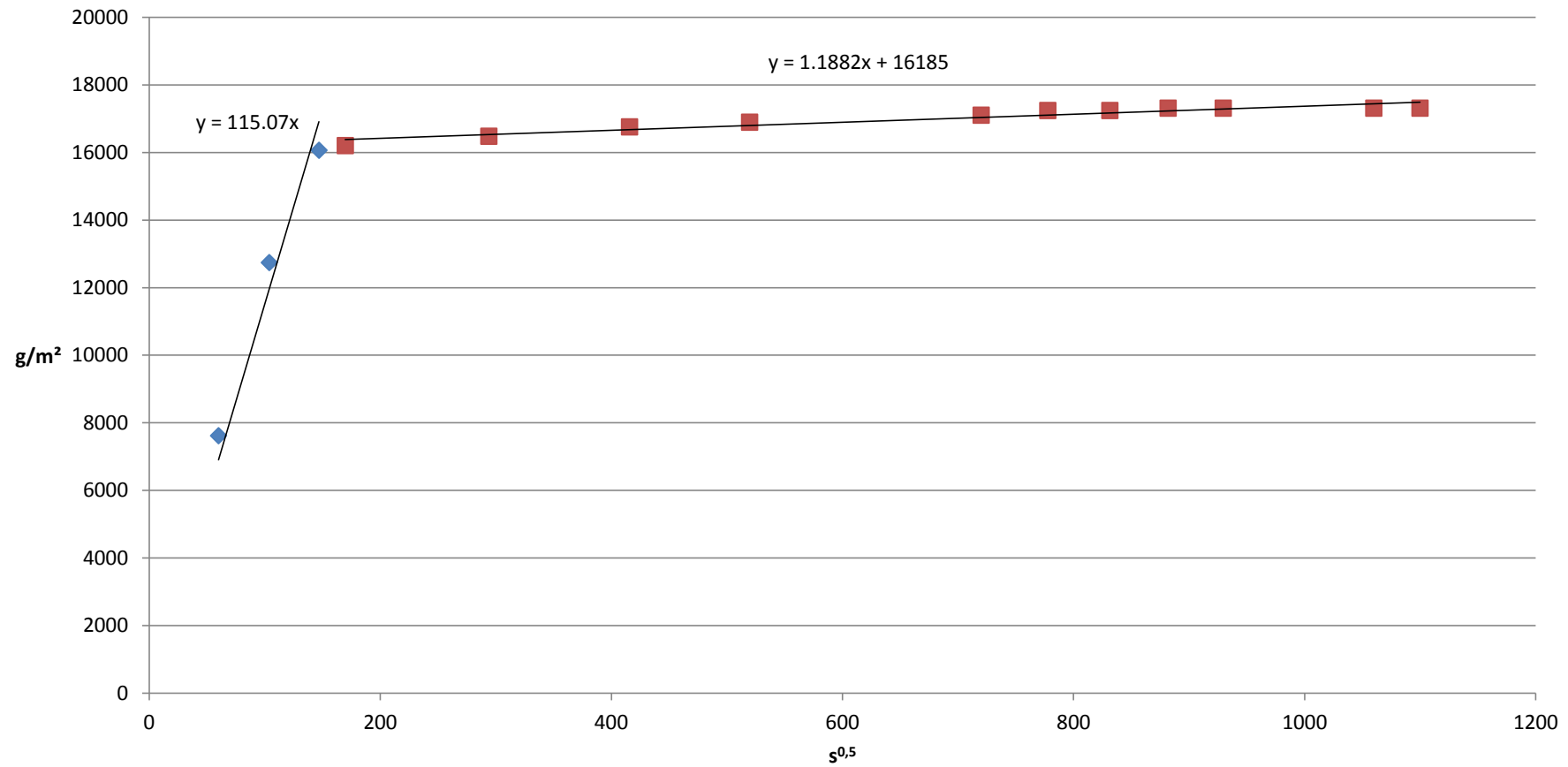
Mortel 13B



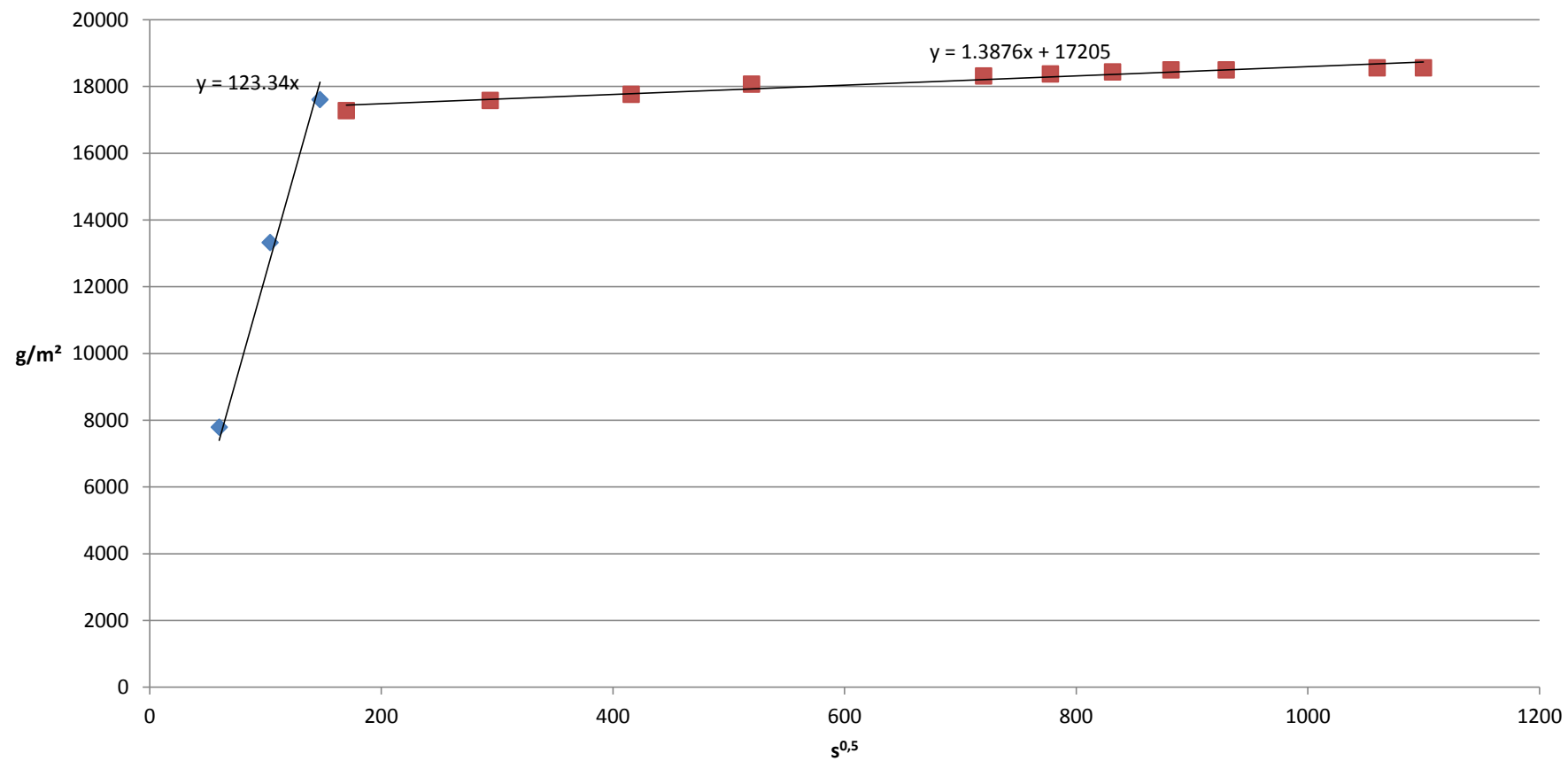
Mortel 14A



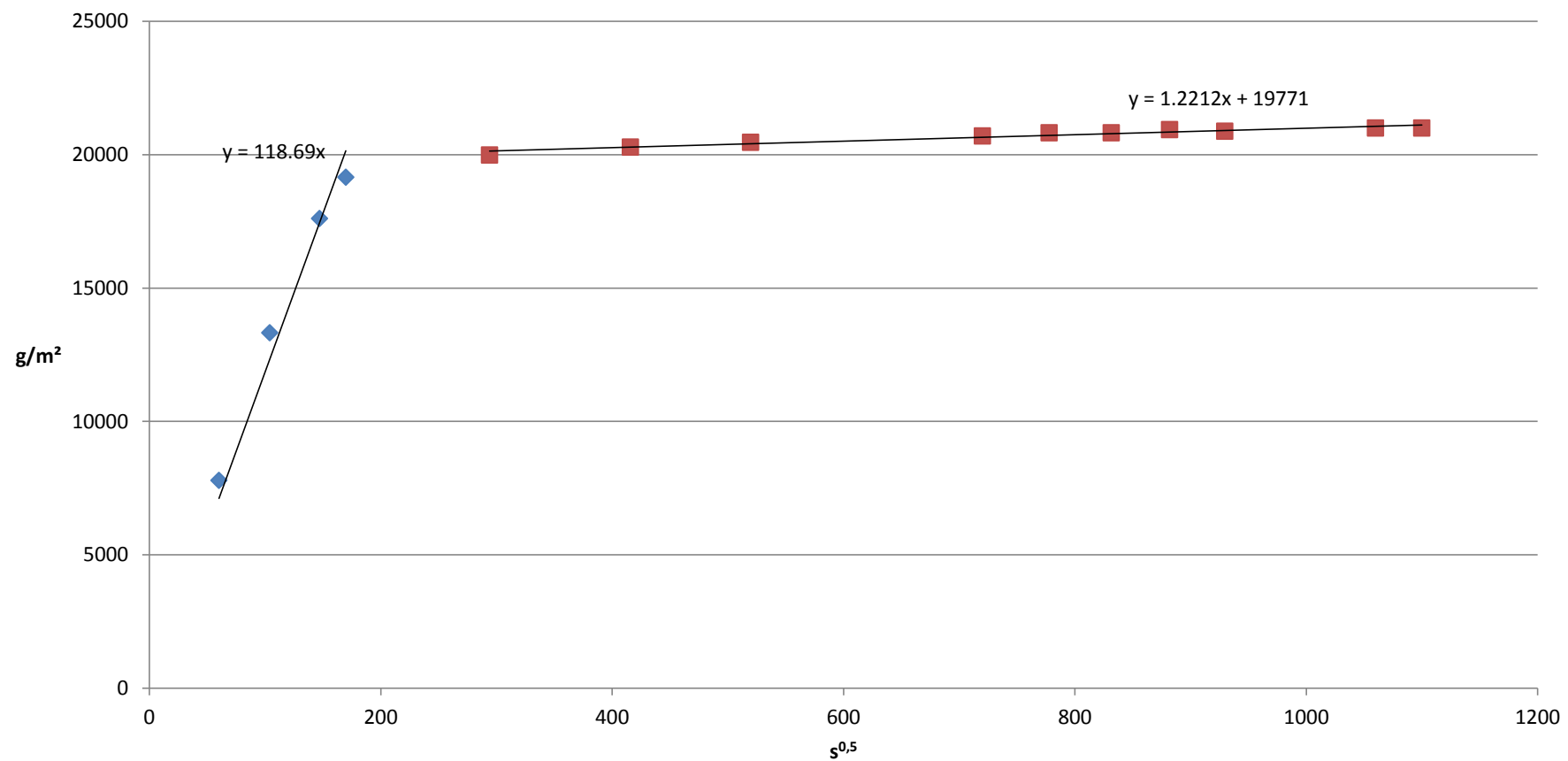
Mortel 14B



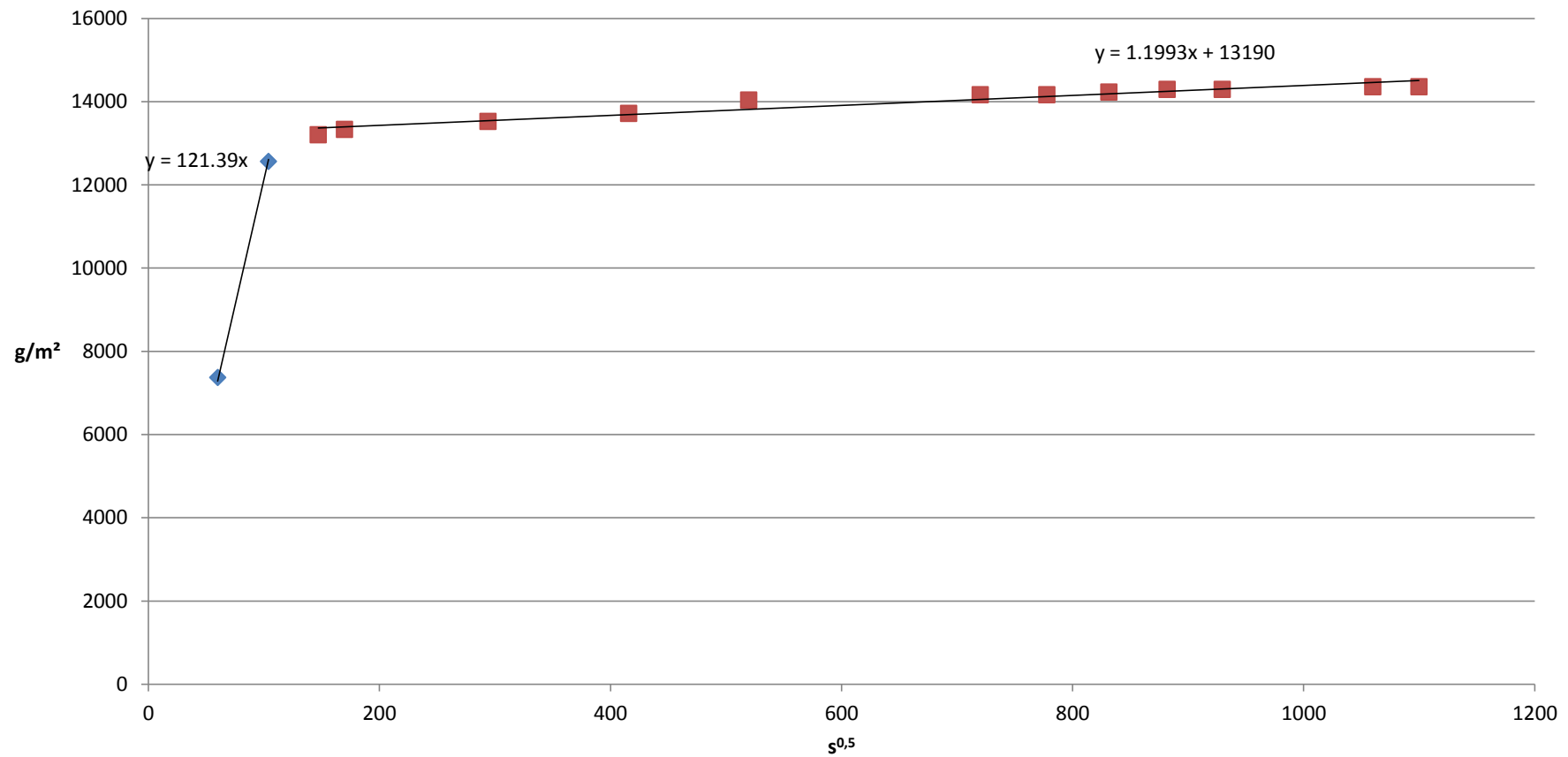
Mortel 15A



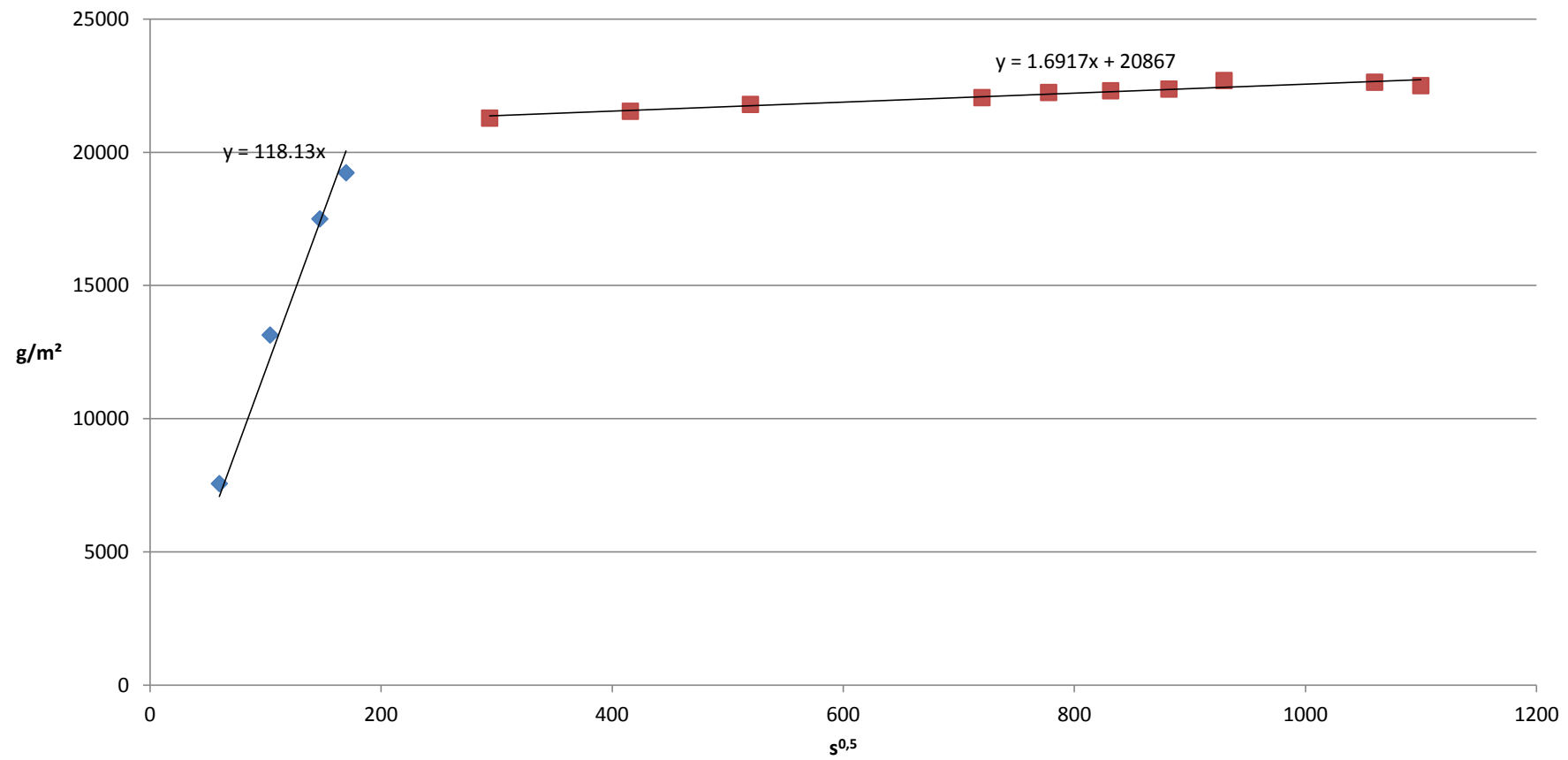
Mortel 15B



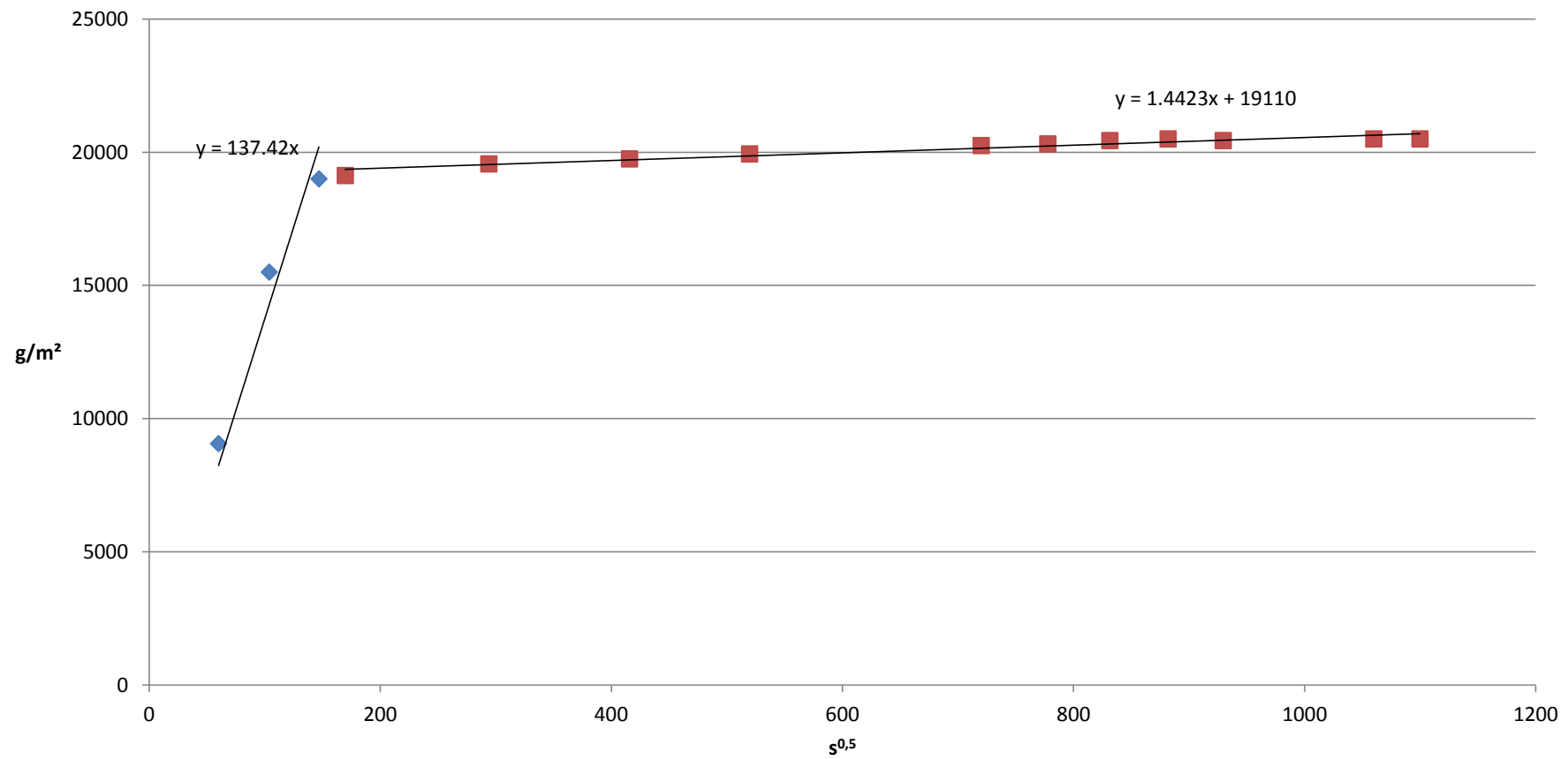
Mortel 16A



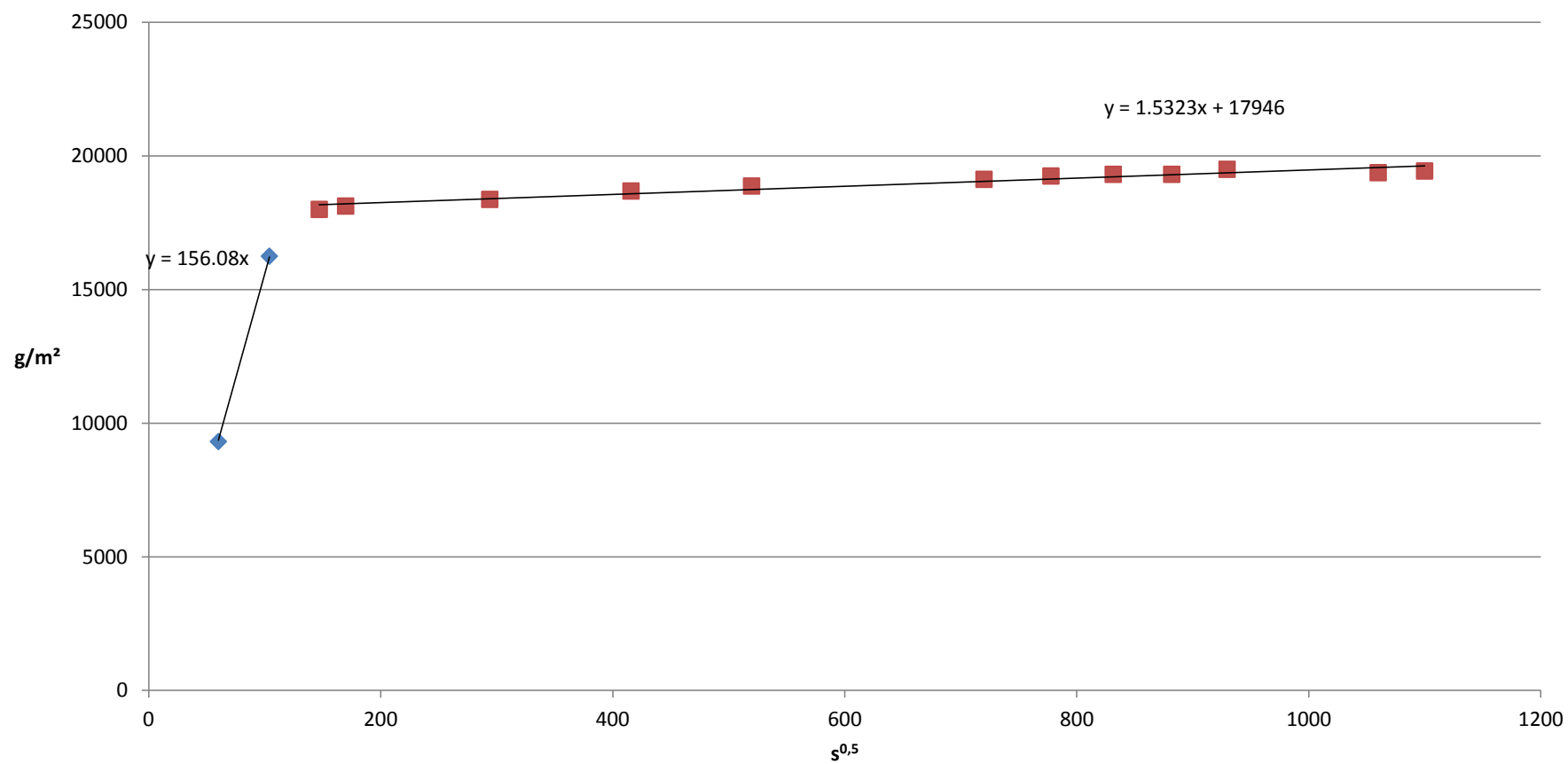
Mortel 16B



Mortel 17A



Mortel 17B



Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	$\Delta m/A$	3u	$\Delta m/A$	6u	$\Delta m/A$	8u	$\Delta m/A$
Atinea		m	m	m ²		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
Zand													
4 en 5	3883.8	0.186	0.135	0.02511		4373	19482.28	4404	20716.85	4410	20955.79		
6 en 24	3849	0.135	0.184	0.02484		4345	19967.79	4372	21054.75	4378	21296.3		
7 en 8	3940	0.186	0.1365	0.025389		4444	19851.12	4464	20638.86			4481	21308.441
18 en 19	4044	0.137	0.186	0.025482		4551	19896.4	4569	20602.78	4580	21034.46	4580	21034.456
Gemiddelde						19799.4		20753.31		21095.52		21171.448	
Standaardafwijking						216.7994		206.5225		178.2739		193.73663	

Gehelen Atinea	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	Δm/A	3u	Δm/A	6u	Δm/A	8u	Δm/A
		m	m	m²		g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²	g	g/m²
Zavel													
1 en 2	3831	0.185	0.134	0.02479		4332	20209.76	4363	21460.27	4372	21823.32	4370	21742.638
3 en 20	3941	0.188	0.136	0.025568		4431	19164.58	4458	20220.59	4463	20416.15	4468	20611.702
14 en 15	3817	0.1845	0.135	0.024908		4313	19913.68	4346	21238.58	4353	21519.62	4353	21519.623
16 en 17	3894	Gefaald											
				Gemiddelde		19762.67		20973.15		21253.03		21291.321	
				Standaardafwijking		538.705		661.0923		740.4977		599.03698	

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen		24u	$\Delta m/A$	48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	96u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$
Atinea		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
Zand													
4 en 5		4424	21513.34	4430	21752.29	4440	22150.54	4440	22150.54			4453	22668.26
6 en 24		4390	21779.39	4400	22181.96	4406	22423.51	4407	22463.77			4421	23027.375
7 en 8		4495	21859.86	4500	22056.8	4509	22411.28			4522	22923.31	4523	22962.7
18 en 19		4586	21269.92	4596	21662.35	4600	21819.32			4620	22604.19	4621	22643.435
Gemiddelde			21605.63		21913.35		22201.16		22307.15		22763.75		22825.442
Standaardafwijking			268.3568		246.084		283.9907		221.4874		225.6534		197.86348

Gehelen		24u	$\Delta m/A$	48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	96u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$
Atinea		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
Zavel													
1 en 2		4375	21944.33	4386	22388.06	4391	22589.75			4408	23275.51	4409	23315.853
3 en 20		4467	20572.59	4476	20924.59	4483	21198.37			4500	21863.27	4500	21863.267
14 en 15		4359	21760.51	4364	21961.26	4370	22202.15			4386	22844.52	4387	22884.673
16 en 17													
Gemiddelde			21425.81		21757.97		21996.76				22661.1		22687.931
Standaardafwijking			744.6057		752.6139		718.0696				723.7706		746.01112

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen		192u	$\Delta m/A$	216u	$\Delta m/A$	240u	$\Delta m/A$	312u	$\Delta m/A$	336u	$\Delta m/A$	360u	$\Delta m/A$
Atinea		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zand													
4 en 5		4453	22668.26	4458	22867.38	4463	23066.51	4468	23265.63	4468	23265.63	4467	23225.806
6 en 24		4424	23148.15	4428	23309.18	4433	23510.47	4438	23711.76	4439	23752.01	4434	23550.725
7 en 8		4528	23159.64	4534	23395.96	4531	23277.8			4537	23514.12	4540	23632.282
18 en 19		4619	22564.95	4622	22682.68	4624	22761.16	4631	23035.87	4632	23075.11	4636	23232.085
Gemiddelde			22885.25		23063.8		23153.98		23337.75		23401.72		23410.225
Standaardafwijking			313.0929		343.6925		318.5221		343.6666		294.693		211.96953

Gehelen		192u	$\Delta m/A$	216u	$\Delta m/A$	240u	$\Delta m/A$	312u	$\Delta m/A$	336u	$\Delta m/A$	360u	$\Delta m/A$
Atinea		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zavel													
1 en 2		4406	23194.84	4408	23275.51	4412	23436.87	4417	23638.56	4417	23638.56	4422	23840.258
3 en 20		4499	21824.16	4501	21902.38	4503	21980.6	4508	22176.16	4507	22137.05	4512	22332.603
14 en 15		4387	22884.67	4389	22964.97	4391	23045.27	4395	23205.86	4395	23205.86	4400	23406.604
16 en 17													
Gemiddelde			22634.56		22714.29		22820.91		23006.86		22993.82		23193.155
Standaardafwijking			718.7567		720.0745		753.6121		751.2383		772.8899		776.16122

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen		384u	$\Delta m/A$	408	$\Delta m/A$	480	$\Delta m/A$	504	$\Delta m/A$	528	$\Delta m/A$	552	$\Delta m/A$
Atinea		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zand													
4 en 5		4467	23225.81	4468	23265.63	4473	23464.76	4473	23464.76				
6 en 24		4437	23671.5	4439	23752.01	4444	23953.3	4443	23913.04				
7 en 8		4540	23632.28	4544	23789.83	4548	23947.38	4548	23947.38	4547	23907.99	4548	23947.379
18 en 19		4639	23349.82	4640	23389.06								
Gemiddelde			23469.85		23549.13		23788.48		23775.06		23907.99		23947.379
Standaardafwijking			216.8035		261.4653		280.3682		269.279				

Gehelen		384u	$\Delta m/A$	408u	$\Delta m/A$
Atinea		g	g/m^2	g	g/m^2
Zavel					
1 en 2		4424	23920.94	4427	24041.95
3 en 20		4515	22449.94	4519	22606.38
14 en 15		4400	23406.6	4407	23687.64
16 en 17					
Gemiddelde			23259.16		23445.33
Standaardafwijking			746.5013		747.8324

Gehelen		576	$\Delta m/A$	648	$\Delta m/A$	672	$\Delta m/A$
Atinea		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zand							
7 en 8		4549	23986.77	4553	24144.31	4552	24104.93
Gemiddelde			23986.77		24144.31		24104.93
Standaardafwijking							

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	$\Delta m/A$	3u	$\Delta m/A$	6u	$\Delta m/A$	8u	$\Delta m/A$
Leder		m	m	m ²		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
Zand													
4 en 24	3487.1	0.19	0.112	0.02128		3518.7	1484.962	3550.9	2998.12	3579.7	4351.504		
5 en 6	3583.8	0.114	0.19	0.02166		3606.7	1057.248	3626.9	1989.843	3644.1	2783.934		
7 en 8	3503.9	0.11	0.189	0.02079		3530.3	1269.841	3552.9	2356.902	3584.6	3881.674		
9 en 10	3506.6	0.1125	0.187	0.021038		3524.1	831.8479	3536	1397.504	3545.9	1868.093		
Gemiddelde							1160.975		2185.593		3221.301		
Standaardafwijking							280.4185		670.5592		1115.932		

Gehelen	Massa ini	LENGTE	BREEDTE	A		1u	$\Delta m/A$	3u	$\Delta m/A$	6u	$\Delta m/A$	8u	$\Delta m/A$
Leder		m	m	m ²		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
Zavel													
3 en 20	3581.7	0.189	0.111	0.020979		3615.7	1620.668	3642.9	2917.203	3666.1	4023.071	3678.8	4628.438
14 en 15	3522	0.1905	0.1115	0.021241		3585.7	2998.952	3622.1	4712.64	3650.6	6054.4	3668	6873.58
16 en 17	3508.6	0.1905	0.1105	0.02105		3550.9	2009.477	3580.3	3406.135	3603.7	4517.761	3617.6	5178.086
18 en 19	3582	0.1095	0.188	0.020586		3615.2	1612.747	3637.9	2715.438	3658.2	3701.545	3672.3	4386.476
Gemiddelde							2060.461		3437.854		4574.194		5266.645
Standaardafwijking							652.4905		897.9694		1042.345		1121.322

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen		24u	$\Delta m/A$	48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	96u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$
Leder		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
Zand													
4 en 24		3673.8	8773.496	3720.6	10972.74	3733.8	11593.05	3739.3	11851.5			3751.7	12434.21
5 en 6		3716	6103.416	3769.5	8573.407	3807.7	10337.03	3821	10951.06			3838.1	11740.54
7 en 8		3643.3	6705.147	3700.6	9461.279	3726.5	10707.07			3745.6	11625.78	3743.6	11529.58
9 en 10		3590	3964.349	3611.5	4986.334	3628.4	5789.661	3642.6	6464.646			3687.2	8584.67
Gemiddelde			6386.602		8498.441		9606.701		9755.737		11625.78		11072.25
Standaardafwijking			1978.74		2542.292		2598.688		2885.508				1702.816

Gehelen		24u	$\Delta m/A$	48u	$\Delta m/A$	75u	$\Delta m/A$	96u	$\Delta m/A$	144u	$\Delta m/A$	168u	$\Delta m/A$
Leder		g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²	g	g/m ²
Zavel													
3 en 20		3736.2	7364.507	3781.9	9542.876	3800.2	10415.18			3824.2	11559.18	3828.3	11754.61
14 en 15		3748.2	10649.34	3779.2	12108.8	3785.6	12410.11			3797.1	12951.52	3799	13040.97
16 en 17		3678.6	8075.914	3714.2	9767.105	3729.6	10498.69			3747.7	11358.53	3750.7	11501.05
18 en 19		3721	6752.162	3758.8	8588.361	3782.3	9729.914			3809.4	11046.34	3812.9	11216.36
Gemiddelde			8210.481		10001.79		10763.47				11728.89		11878.25
Standaardafwijking			1713.526		1494.763		1150.518				841.9542		805.7259

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen		192u	$\Delta m/A$	216u	$\Delta m/A$	240u	$\Delta m/A$	312u	$\Delta m/A$	336u	$\Delta m/A$	360u	$\Delta m/A$
Leder		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zand													
4 en 24		3754.8	12579.89	3757.1	12687.97	3759.8	12814.85	3764.6	13040.41	3765.7	13092.11	3766.9	13148.5
5 en 6		3842.4	11939.06	3843.5	11989.84	3846.4	12123.73	3849.9	12285.32	3850.2	12299.17	3851.6	12363.8
7 en 8		3746.3	11659.45	3748.5	11765.27	3751.2	11895.14			3756.6	12154.88	3757.8	12212.6
9 en 10		3694.5	8931.67	3700.7	9226.381	3707.2	9535.354	3716.7	9986.928	3717.6	10029.71	3720	10143.79
Gemiddelde			11277.52		11417.37		11592.27		11770.89		11893.97		11967.17
Standaardafwijking			1610.66		1512.571		1425.925		1590.416		1309.359		1282.939

Gehelen		192u	$\Delta m/A$	216u	$\Delta m/A$	240u	$\Delta m/A$	312u	$\Delta m/A$	336u	$\Delta m/A$	360u	$\Delta m/A$
Leder		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zavel													
3 en 20		3830	11835.65	3831.9	11926.21	3834.8	12064.45	3839.4	12283.71	3840.7	12345.68	3840.9	12355.21
14 en 15		3801.3	13149.25	3803.5	13252.83	3805.6	13351.69	3810.1	13563.55	3811.6	13634.17	3812	13653
16 en 17		3751.3	11529.55	3754	11657.82	3755.7	11738.58	3761.2	11999.86	3761.2	11999.86	3762.3	12052.11
18 en 19		3815.8	11357.23	3816.7	11400.95	3821	11609.83	3823.3	11721.56	3824.3	11770.14	3824.7	11789.57
Gemiddelde			11967.92		12059.45		12191.14		12392.17		12437.46		12462.47
Standaardafwijking			812.0238		823.9801		797.0088		813.9464		832.1373		826.6525

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

Waterabsorptiecoëfficiënt capillaire opzuiging*

Gehelen		384u	$\Delta m/A$	408	$\Delta m/A$	480	$\Delta m/A$	504	$\Delta m/A$	528	$\Delta m/A$	552	$\Delta m/A$
Leder		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zand													
4 en 24		3767.6	13181.39	3769	13247.18	3772.5	13411.65	3772.9	13430.45				
5 en 6		3852	12382.27	3853.2	12437.67	3856.3	12580.79	3856.6	12594.64				
7 en 8		3759.7	12303.99	3762	12414.62	3765.2	12568.54	3766	12607.02	3767.2	12664.74	3768.6	12732.08
9 en 10		3720.7	10177.06	3721.5	10215.09	3724.8	10371.95	3725.4	10400.48				
Gemiddelde			12011.18		12078.64		12233.24		12258.15		12664.74		12732.08
Standaardafwijking			1285.408		1301.293		1302.083		1298.741		#DEEL/0!		#DEEL/0!

Gehelen		384u	$\Delta m/A$	408u	$\Delta m/A$
Leder		g	g/m^2	g	g/m^2
Zavel					
3 en 20		3842.6	12436.25	3844.2	12512.51
14 en 15		3814.1	13751.87	3816.4	13860.15
16 en 17		3763.4	12104.37	3764.9	12175.63
18 en 19		3826	11852.72	3827.7	11935.3
Gemiddelde			12536.3		12620.9
Standaardafwijking			844.8806		859.4206

Gehelen		576	$\Delta m/A$	648	$\Delta m/A$	672	$\Delta m/A$
Leder		g	g/m^2	g	g/m^2	g	g/m^2
Zand							
7 en 8		3768.5	12727.27	3770.6	12828.28	3770.9	12842.71
Gemiddelde			12727.27		12828.28		12842.71
Standaardafwijking							

* uitgevoerd volgens NBN EN 772-11: 2011

11.6. Annex F: berekeningen bij het deel *Vochtgedrag ter plaatse van de mortel-baksteen voeg*.

Rekenkundige gehelen				
ATINEA	ZANDMORTEL			
	breedte	lengte	opp (m²)	procent
Opp voeg	0.012	0.18535	0.002224	0.089079
Opp steen	0.011372	2maal	0.022745	0.910921
Totaal opp			0.024969	1

g/m²	1U	3U	6u	8u	24u	48u	75u	144u	168u	192u	216u	336u
Stenen	21079.51	21475.05	21585.23		21815.76	21986.01	22185.06	22780.27	22904.28	23004.79	23060.31	23395.92
Voeg	6521.592	10283.29	13849.83		16296.49	16786.84	17087.79	17531.99	17519.37	17607.21	17237.67	17760.77
Som	19782.71	20478.1	20896.17		21324.11	21522.88	21731	22312.76	22424.6	22523.98	22541.64	22893.94
Gemeten												
steen	19799.4	20753.31	21095.52		21605.63	21913.35	22201.16	22763.75	22825.44	22885.25	23063.8	23401.72
Delta	-16.68852	-275.2049	-199.3482		-281.5176	-390.4744	-470.1665	-450.9945	-400.8452	-361.2697	-522.163	-507.7758
%	-0.084359	-1.343899	-0.953994		-1.320185	-1.81423	-2.163576	-2.021241	-1.787525	-1.603934	-2.316438	-2.217948

Met Coeff	1U	3U	6u	8u	24u	48u	75u	144u	168u	192u	216u	336u
Stenen	351.3252	206.6438	146.8689		74.21872	52.89013	42.69516	31.63926	29.45173	27.67046	26.15092	21.27253
Voeg	108.6932	98.95099	94.23616		55.44178	40.38287	32.88547	24.34999	22.52748	21.17818	19.54791	16.14882
Som	329.7118	197.0506	142.1804		72.54609	51.77599	41.82132	30.98994	28.83492	27.09214	25.56274	20.81612
Gemiddelde												
steen	329.9899	199.6988	143.5368		73.50383	52.71533	42.72616	31.61632	29.35035	27.52668	26.15488	21.27781
Delta	-0.278142	-2.648161	-1.356392		-0.957742	-0.939335	-0.904836	-0.626381	-0.515431	-0.43454	-0.592145	-0.461691
%	-0.084359	-1.343899	-0.953994		-1.320185	-1.81423	-2.163576	-2.021241	-1.787525	-1.603934	-2.316438	-2.217948

negatief	Geheel zuigt harder
positief	Geheel weerstand

Rekenkundige gehelen				
Atinea	ZAVELMORTEL			
	breedte	lengte	opp (m²)	procent
Opp voeg	0.012	0.18535	0.002224	0.089079
Opp steen	0.011372	2maal	0.022745	0.910921
Totaal opp			0.024969	1

g/m²	1U	3U	6u	8u	24u	48u	75u	144u	168u	192u	216u	312u	336u
Stenen	21079.51	21475.05	21585.23		21815.76	21986.01	22185.06	22780.27	22904.28	23004.79	23060.31	23343.4	23395.92
Voeg	8187.463	13864	17023.3		18268.18	18537.48	18741.1	18977.15	19093.2	19137.45	19187.86	19271.27	19264.7
Som	19931.1	20797.07	21178.86		21499.75	21678.82	21878.27	22441.49	22564.79	22660.29	22715.36	22980.66	23027.91
Gemiddelde													
steen	19762.67	20973.15	21253.03		21425.81	21757.97	21996.76	22661.1	22687.93	22634.56	22714.29	23006.86	22993.82
Delta	168.4276	-176.0761	-74.17109		73.93294	-79.14959	-118.4864	-219.6105	-123.1386	25.73529	1.070126	-26.20531	34.08775
%	0.845049	-0.846639	-0.350213		0.343878	-0.365101	-0.541571	-0.978591	-0.545711	0.11357	0.004711	-0.114032	0.148028

negatief	Geheel zuigt harder
positief	Geheel weerstand

Rekenkundige gehelen				
Leder	ZANDMORTEL			
	breedte	lengte	opp (m²)	procent
Opp voeg	0.012	0.1884	0.002261	0.107721
Opp steen	0.009363	2maal	0.018727	0.892279
Totaal opp			0.020988	1

g/m²	1U	3U	6u	8u	24u	48u	75u	144u	168u	192u	216u	312u	336u
Stenen	1466.206	2590.684	3441.927		6143.379	7802.051	8756.497	9958.333	10155.08	10291.86	10399.08	10729.93	10861.67
Voeg	6521.592	10283.29	13849.83		16296.49	16786.84	17087.79	17531.99	17519.37	17607.21	17237.67	17709.31	17760.77
Som	1916.535	3275.934	4369.052		7047.808	8602.407	9498.641	10632.99	10811.08	10943.51	11008.25	11351.64	11476.24
Gemiddelde													
steen	1160.975	2185.593	3221.301		6386.602	8498.441	9606.701	11625.78	11072.25	11277.52	11417.37	11770.89	11893.97
Delta	755.5595	1090.341	1147.751		661.2053	103.9657	-108.0604	-992.7947	-261.1651	-334.0091	-409.1157	-419.2421	-417.7306
%	39.42322	33.28337	26.27003		9.381717	1.208565	-1.137641	-9.336931	-2.415716	-3.052121	-3.716446	-3.693228	-3.639962

Met Coeff	1U	3U	6u	8u	24u	48u	75u	144u	168u	192u	216u	312u	336u
Stenen	24.43676	24.92887	23.41935		20.9002	18.76882	16.85189	13.83102	13.05803	12.37919	11.79279	10.12438	9.875879
Voeg	108.6932	98.95099	94.23616		55.44178	40.38287	32.88547	24.34999	22.52748	21.17818	19.54791	16.70988	16.14882
Som	31.94224	31.52269	29.72764		23.97713	20.69417	18.28014	14.76804	13.90155	13.16299	12.48361	10.71101	10.43467
Gemiddelde													
steen	19.34958	21.03087	21.91818		21.72766	20.44407	18.4881	16.14692	14.23738	13.56474	12.94756	11.10659	10.81448
Delta	12.59266	10.49181	7.809459		2.249466	0.250103	-0.207962	-1.378882	-0.335822	-0.40175	-0.463947	-0.395582	-0.379818
%	39.42322	33.28337	26.27003		9.381717	1.208565	-1.137641	-9.336931	-2.415716	-3.052121	-3.716446	-3.693228	-3.639962

negatief	Geheel zuigt harder
positief	Geheel weerstand

Rekenkundige gehelen				
Leder	ZAVELMORTEL			
	breedte	lengte	opp (m ²)	procent
Opp voeg	0.012	0.1884	0.002261	0.107721
Opp steen	0.009363	2maal	0.018727	0.892279
Totaal opp			0.020988	1

g/m ²	1U	3U	6u	8u	24u	48u	75u	144u	168u	192u	216u	312u	336u
Stenen	1466.206	2590.684	3441.927		6143.379	7802.051	8756.497	9958.333	10155.08	10291.86	10399.08	10729.93	10861.67
Voeg	8187.463	13864	17023.3		18268.18	18537.48	18741.1	18977.15	19093.2	19137.45	19187.86	19271.27	19264.7
Som	2064.929	3594.9	4651.742		7223.444	8758.351	9645.916	10761.72	10951.28	11079.82	11181.97	11490.78	11610.2
Gemiddelde													
steen	2060.461	3437.854	4574.194		8210.481	10001.79	10763.47	11728.89	11878.25	11967.92	12059.45	12392.17	12437.46
Delta	4.467463	157.0461	77.54771		-987.0371	-1243.434	-1117.556	-967.1732	-926.9691	-888.1017	-877.4808	-901.3879	-827.2562
%	0.21635	4.36858	1.667068		-13.66436	-14.19713	-11.58579	-8.987162	-8.464482	-8.015488	-7.847282	-7.844444	-7.125252

negatief	Geheel zuigt harder
positief	Geheel weerstand

11.7. Annex G: bepaling van het vrije waterverzadigingsgehalte w_f .

Vrij waterverzadigingsgehalte w_f

Atinea	RECHTE 1	RECHTE 2			SNIJPUNT		Contact opp m ²	Vochtgehalte g	Capillair vochtgehalte kg/m ³
	Y=	y=	x +		X=	y=			
11	250,48 X	1,3774	x +	22456	90,14759	22580,17	0,010915	246,4625479	233,977508
12	251,63 X	1,4445	x +	22420	89,61351	22549,45	0,0111	250,2988585	237,6194829
13	230,85 X	1,251	x +	20523	89,38628	20634,82	0,012025	248,1337374	235,5640402
14	238,5 X	2,2167	x +	20993	88,84674	21189,95	0,0115625	245,0087571	232,5973619
15	246,81 X	1,7859	x +	21650	88,35866	21807,8	0,0112545	245,435882	233,0028499
16	249,14 X	1,7346	x +	21816	88,17916	21968,96	0,01103725	242,4768548	230,1937181
17	239,21 X	1,8135	x +	20920	88,12261	21079,81	0,01104	232,7211064	220,932166
18	243,96 X	2,1353	x +	21389	88,44837	21577,86	0,01107	238,8669523	226,7666821
19	239,73 X	2,3408	x +	20790	87,5777	20995	0,012032	252,6118626	239,8153173
20	237,82 X	2,2375	x +	20630	87,57017	20825,94	0,011687	243,3927404	231,0632077

Gemiddelde	232,1532
Standaardafwijking	5,420365

Leder									
11	16,538 X	1,3056	x +	8807,9	578,2346	9562,843	0,00945	90,36886665	113,7986413
12	17,387 X	1,3478	x +	9306,5	580,2347	10088,54	0,009	90,79686266	114,3376031
13	30,789 X	1,6399	x +	10228	350,8856	10803,42	0,009525	102,90255	129,5819104
14	32,483 X	1,9711	x +	9934,8	325,6041	10576,6	0,0096	101,5353433	127,8602304
15	30,807 X	2,0553	x +	9818,8	341,5033	10520,69	0,00942975	99,20749257	124,928842
16	29,248 X	2,1977	x +	9545,3	352,8722	10320,81	0,009525	98,30568978	123,7932304
17	12,905 X	2,042	x +	7031,7	647,3074	8353,502	0,009118	76,16722811	95,91496931
18	13,081 X	1,7389	x +	7244,1	638,6912	8354,72	0,009275	77,49002995	97,58073163
19	16,349 X	1,7121	x +	8461,9	578,1211	9451,701	0,009405	88,89324838	111,9404421
20	11,229 X	2,0307	x +	7239	786,9932	8837,147	0,009306	82,23849175	103,5603186

Gemiddelde	114,3297
Standaardafwijking	12,28914

Mortel Zand	RECHTE 1		RECHTE 2			SNIJPUNT		Contact opp m ²	Vochtgehalte g	Capillair vochtgehalte kg/m ³
	Y=		y=			X=	y=			
1A	55,244 X		1,0264	x +	16734	308,6452	17050,79	0,00156	26,5992377	207,8065445
1B	66,362 X		1,0751	x +	14312	219,217	14547,68	0,001558	22,66528579	177,0725452
2A	77,545 X		1,1084	x +	17447	228,2545	17700	0,00152	26,90399592	210,1874682
2B	78,999 X		0,9817	x +	16039	205,5826	16240,82	0,00152	24,68604708	192,8597428
3A	90,28 X		0,8196	x +	10865	121,4504	10964,54	0,001482	16,24944937	126,9488232
3B	164,96 X		1,3937	x +	24289	148,4964	24495,96	0,001443	35,34766938	276,153667
7A	111,04 X		1,4217	x +	15781	143,9632	15985,67	0,00152	24,29822215	189,8298605
7B	111,41 X		1,6401	x +	16627	151,4714	16875,43	0,001521	25,66752635	200,5275496
8A	91,375 X		1,3403	x +	16057	178,3424	16296,03	0,001444	23,53147057	183,8396138
8B	90,405 X		1,5666	x +	16646	187,3739	16939,54	0,001444	24,46069575	191,0991856
9A	109,05 X		1,751	x +	15974	148,8737	16234,68	0,001638	26,59240234	207,7531433
9B	102,48 X		1,5871	x +	15190	150,5557	15428,95	0,001638	25,27261508	197,4423053

Gemiddelde	197,6641
Standaardafwijking	36,12756

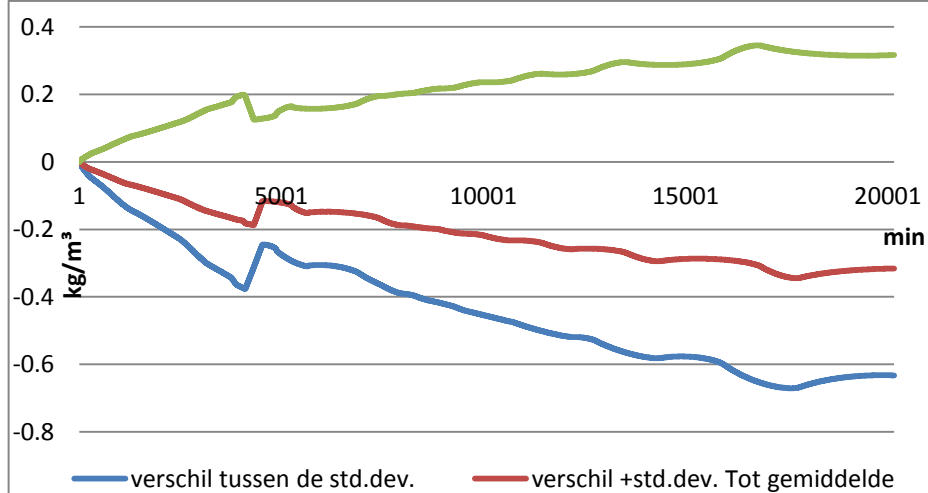
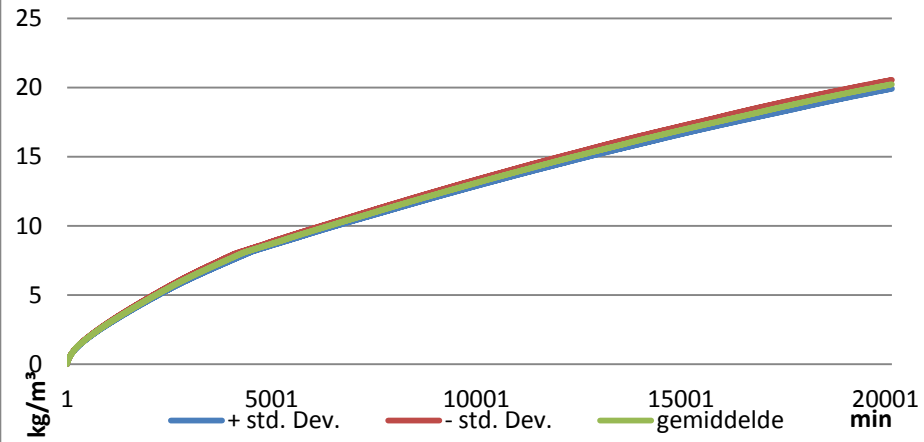
Mortel Zavel										
13A	133,63 X		1,6178	x +	19799	149,9786	20041,64	0,001521	30,48332732	238,1509947
13B	120,29 X		1,2133	x +	16249	136,4583	16414,56	0,00156	25,60672111	200,0525087
14A	113,43 X		1,2938	x +	18884	168,4024	19101,88	0,001482	28,30898463	221,1639424
14B	115,07 X		1,1882	x +	16185	142,121	16353,87	0,001444	23,61498571	184,4920759
15A	123,34 X		1,3876	x +	17205	141,0796	17400,76	0,001638	28,50244832	222,6753775
15B	118,69 X		1,2212	x +	19771	168,3085	19976,54	0,001681	33,58056099	262,3481328
16A	121,39 X		1,1993	x +	13190	109,7423	13321,61	0,00156	20,78171769	162,3571694
16B	118,13 X		1,6917	x +	20867	179,2108	21170,17	0,00156	33,0254666	258,0114578
17A	137,42 X		1,4423	x +	19110	140,5377	19312,7	0,0016	30,90031615	241,40872
17B	156,08 X		1,5323	x +	17946	116,1195	18123,93	0,0016	28,99828783	226,5491237

Gemiddelde	221,721
Standaardafwijking	31,67408

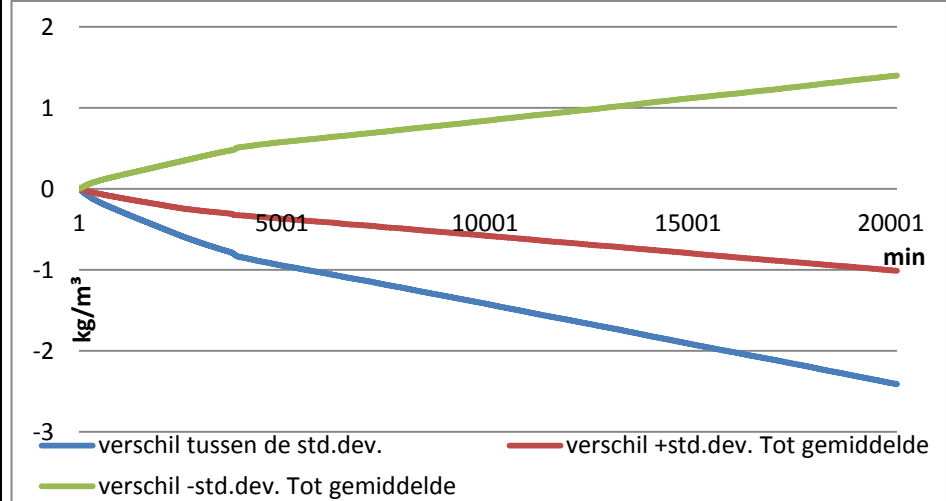
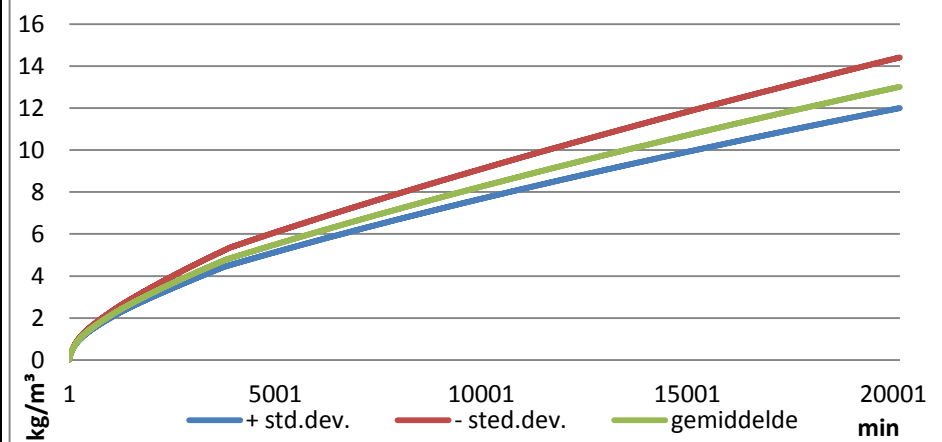
11.8. Annex H: gevoeligheidsanalyse proefresultaten.

Gevoeligheidsanalyse capillair vochtgehalte w_f

Atinea

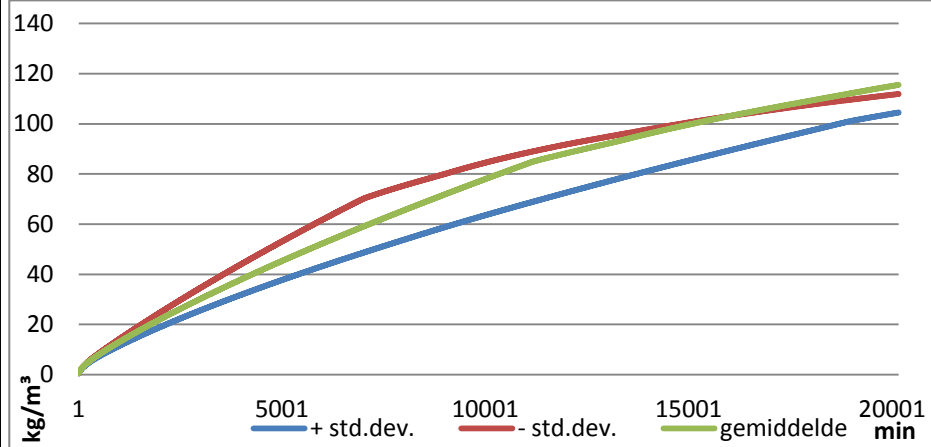


Leder Wanlin

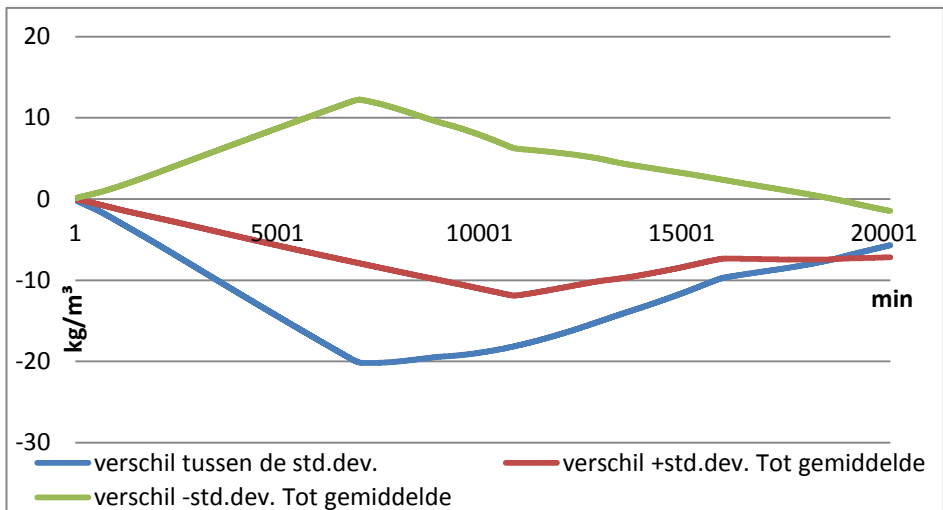
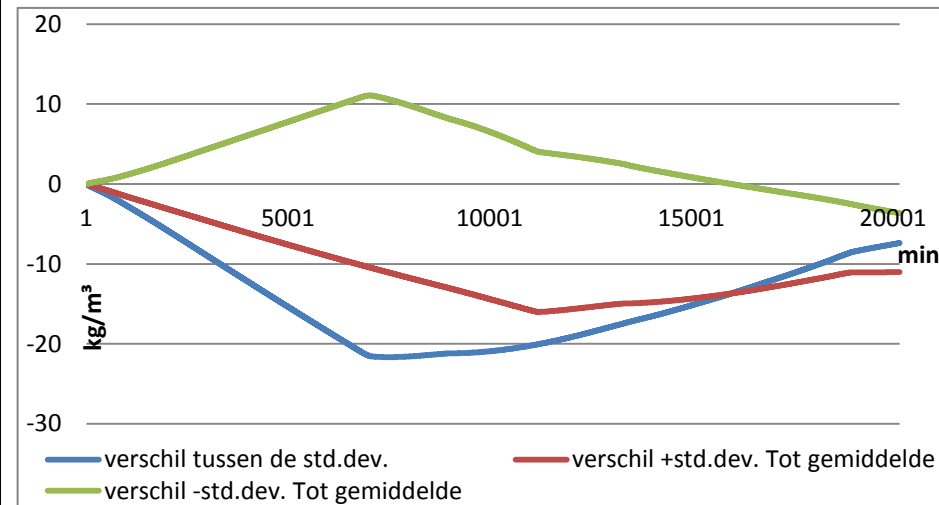
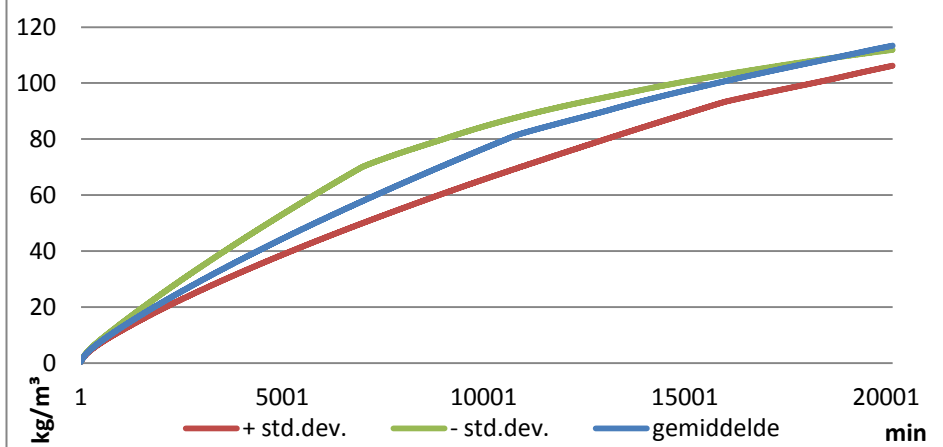


Gevoeligheidsanalyse capillair vochtgehalte w_f

Zandmortel

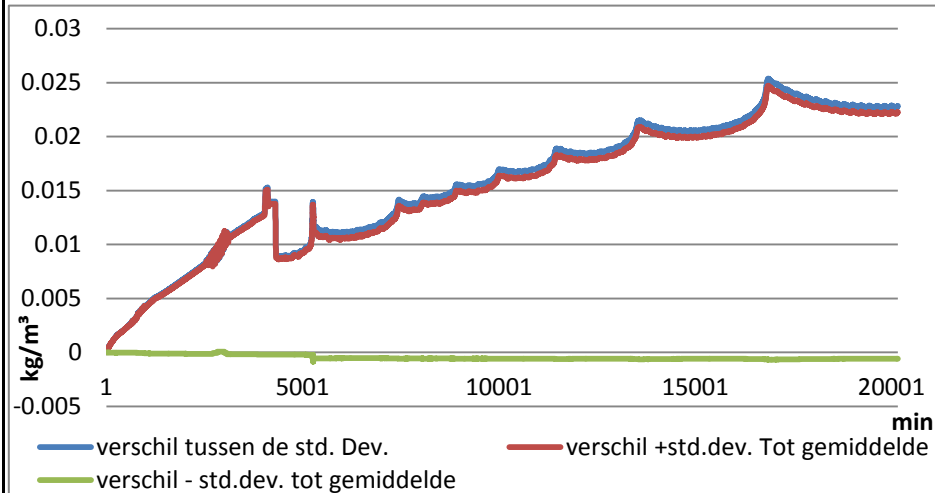
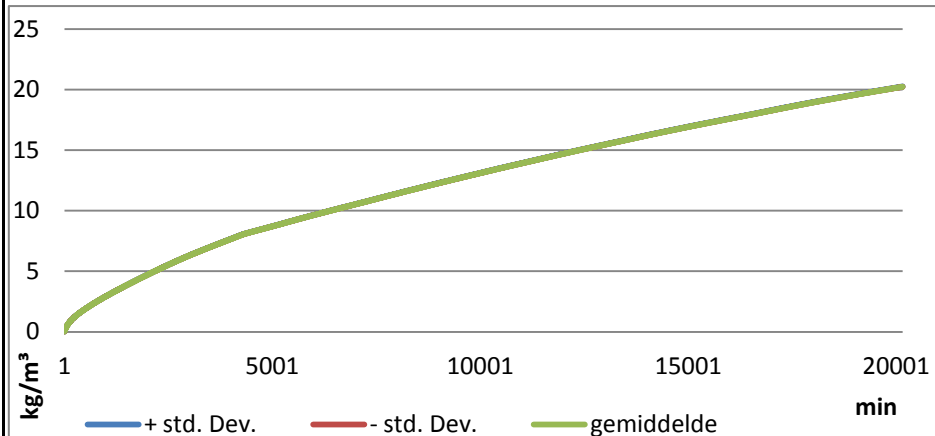


Zavelmortel

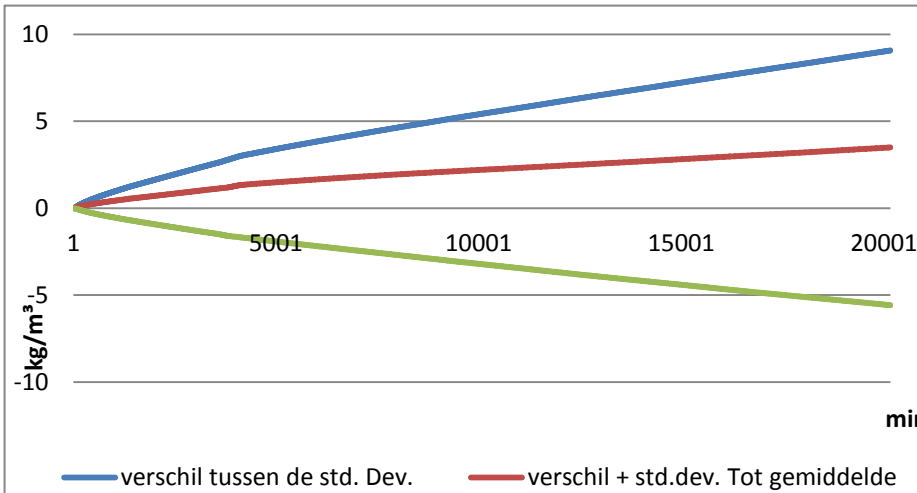
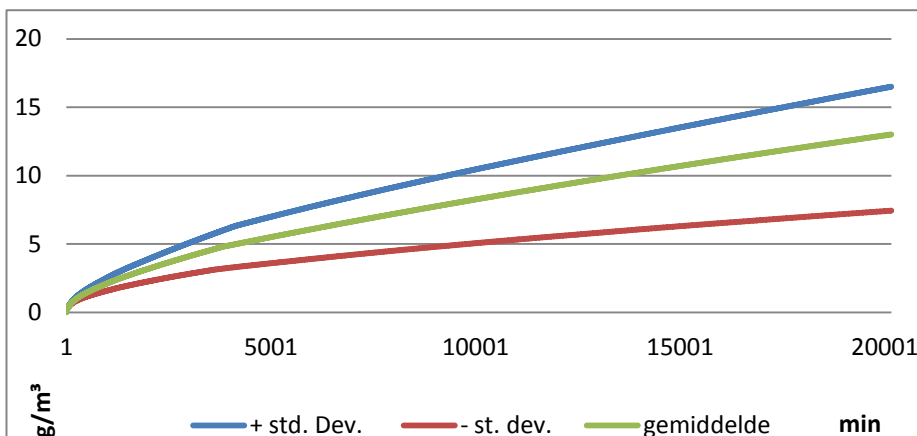


Gevoeligheidsanalyse waterabsorptiecoëfficiënt

Atinea

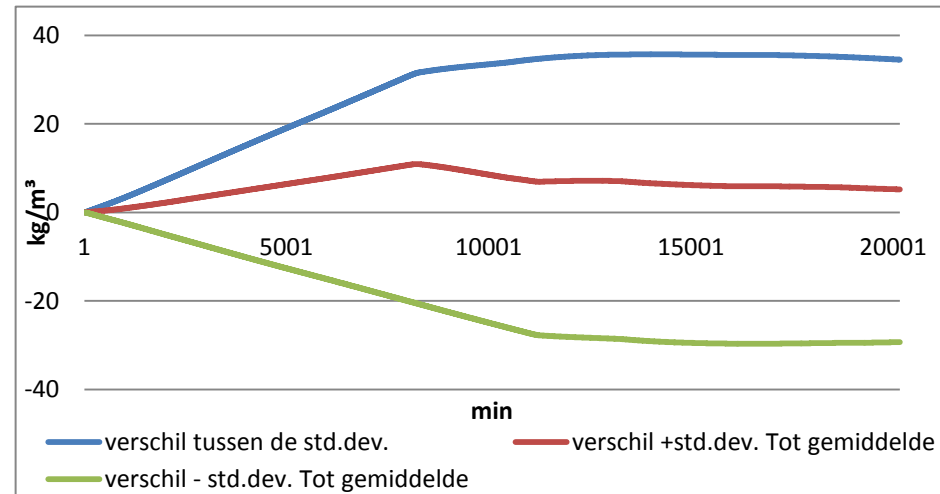
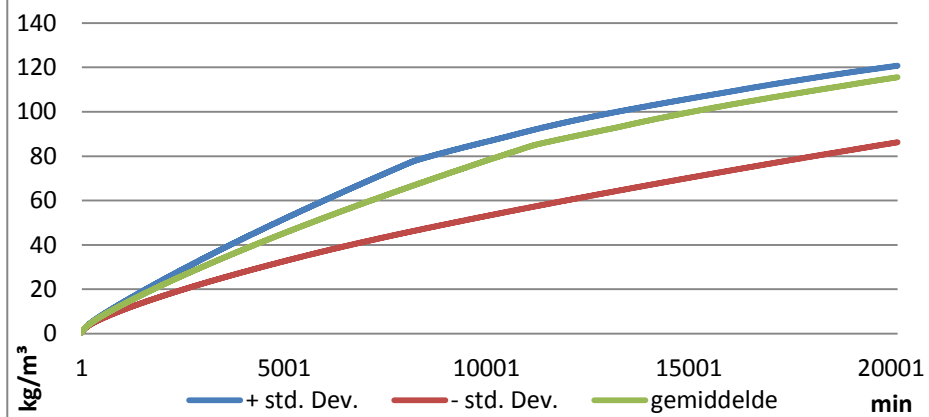


Leder Wanlin

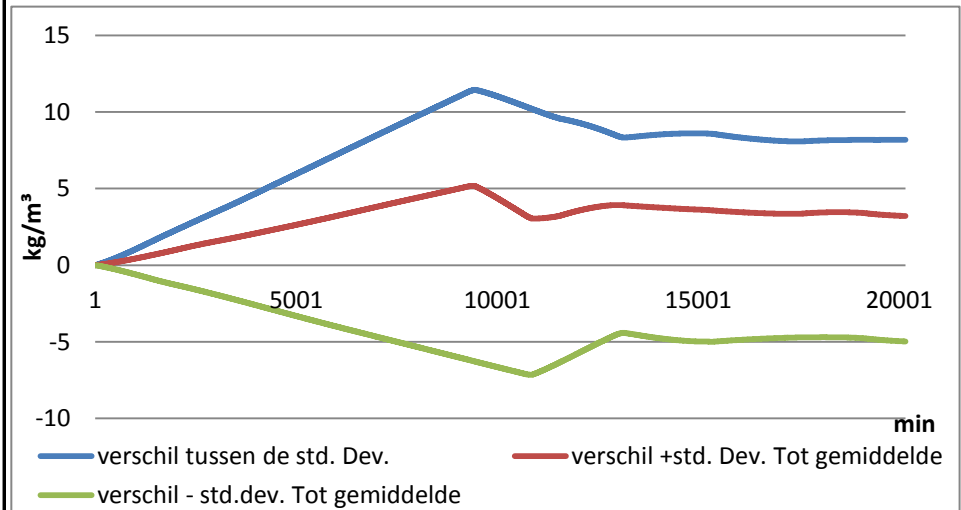
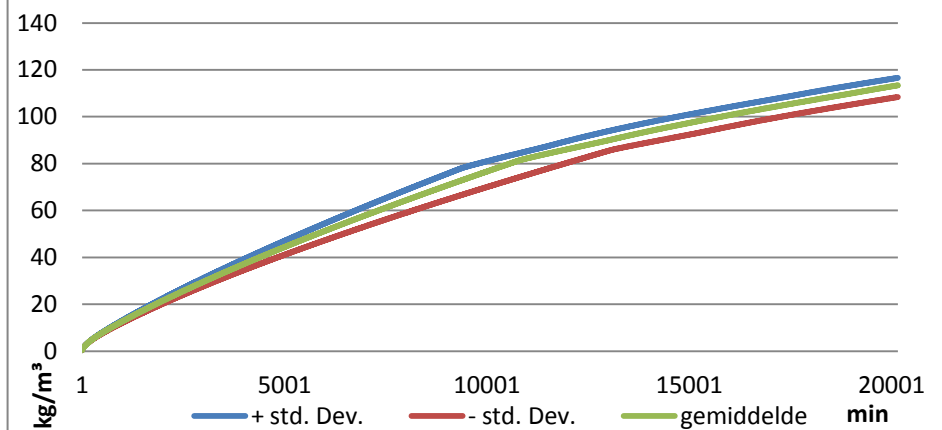


Gevoeligheidsanalyse waterabsorptiecoëfficiënt

Zandmortel

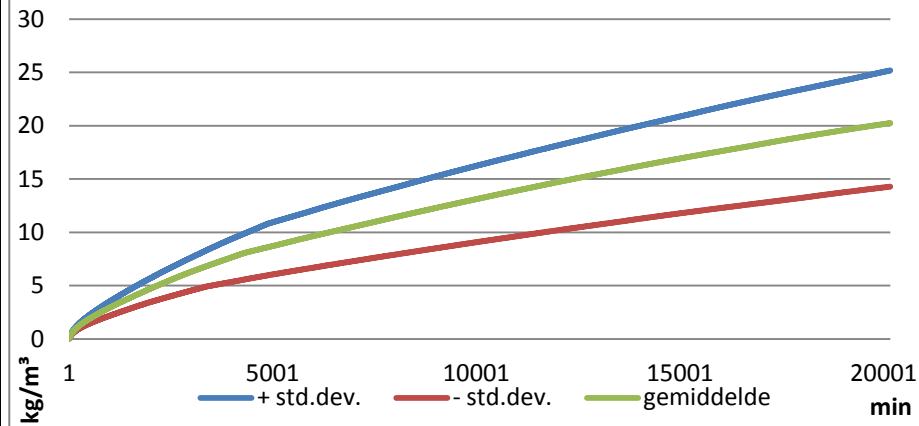


Zavelmortel

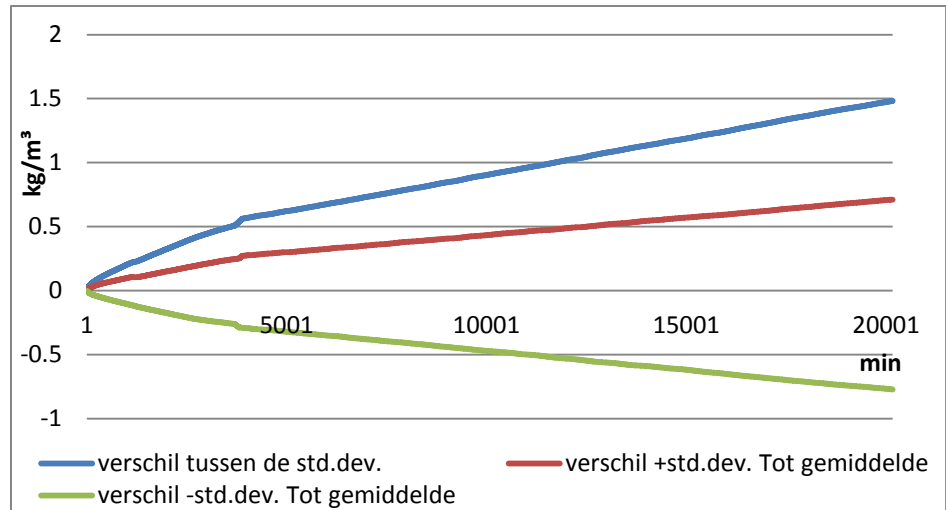
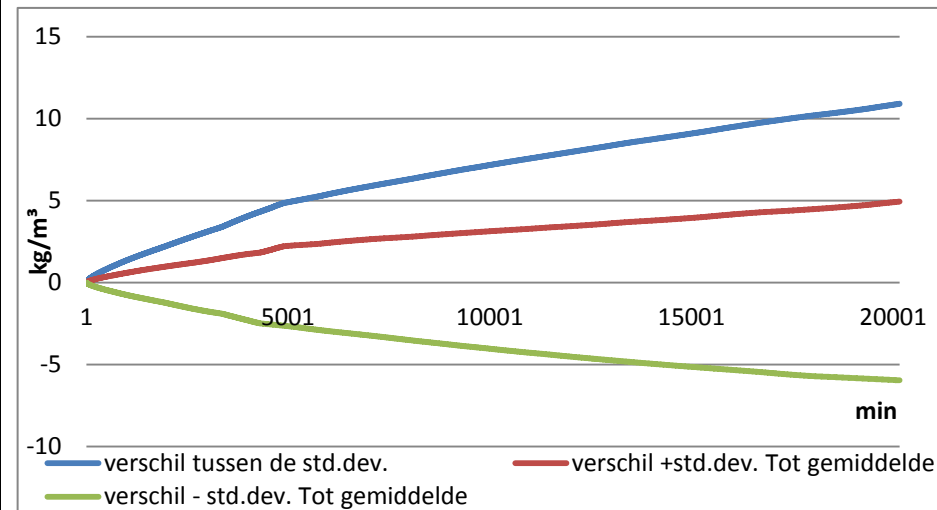
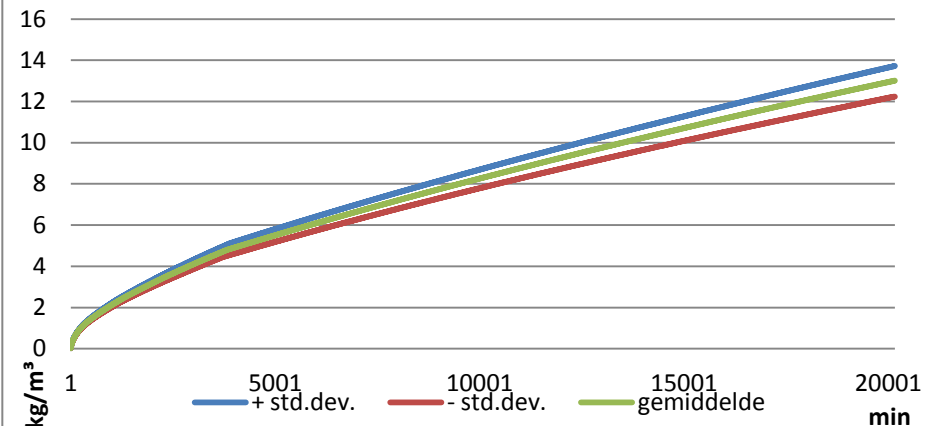


Gevoeligheidsanalyse referentie watergehalte (80% RV)

Atinea

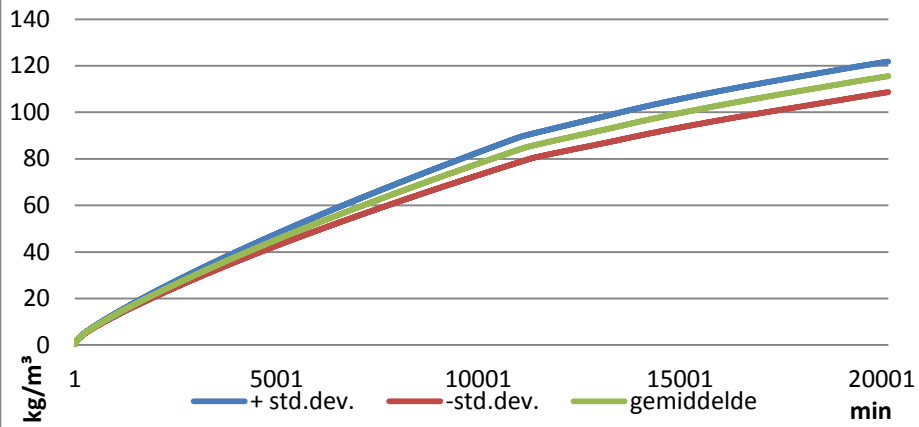


Leder Wanlin

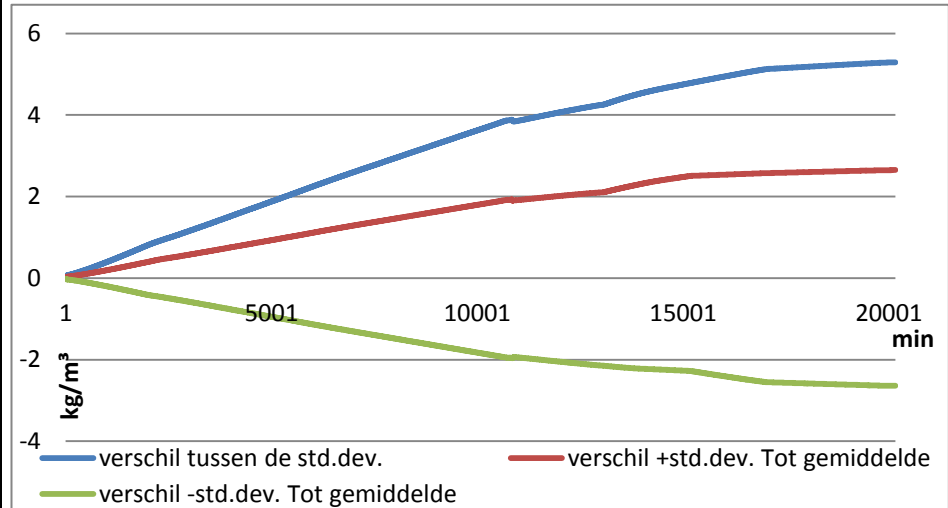
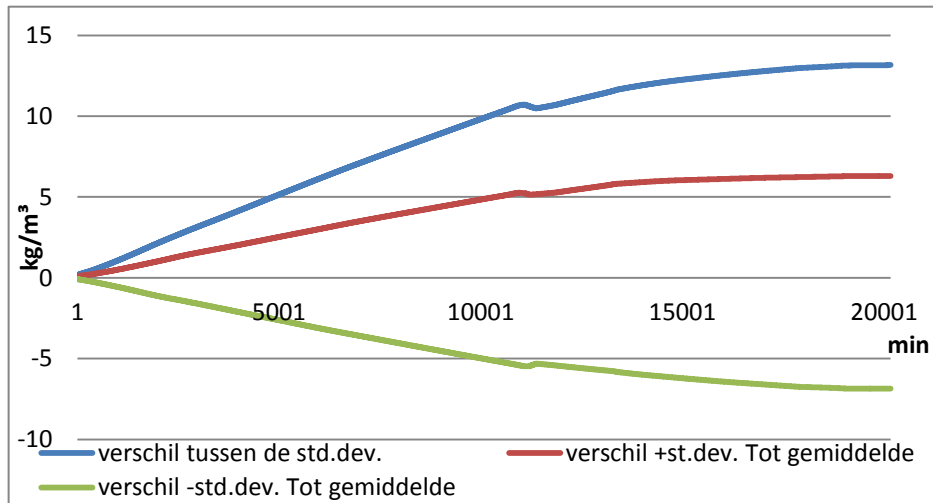
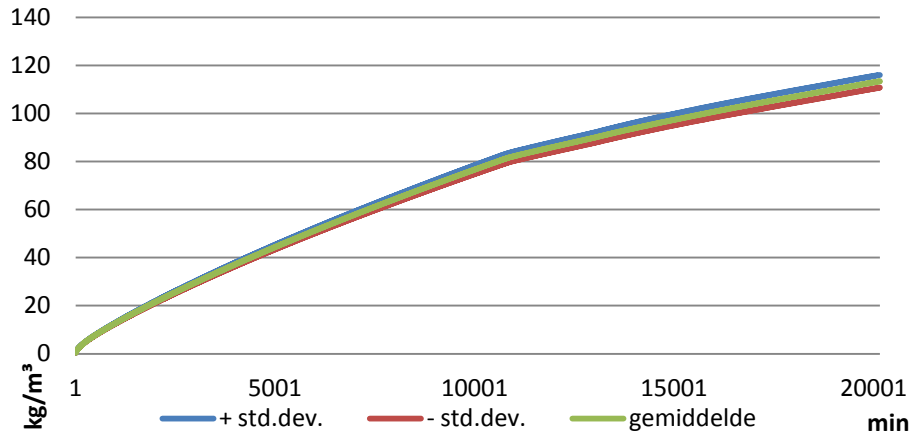


Gevoeligheidsanalyse referentie watergehalte (80% RV)

Zandmortel

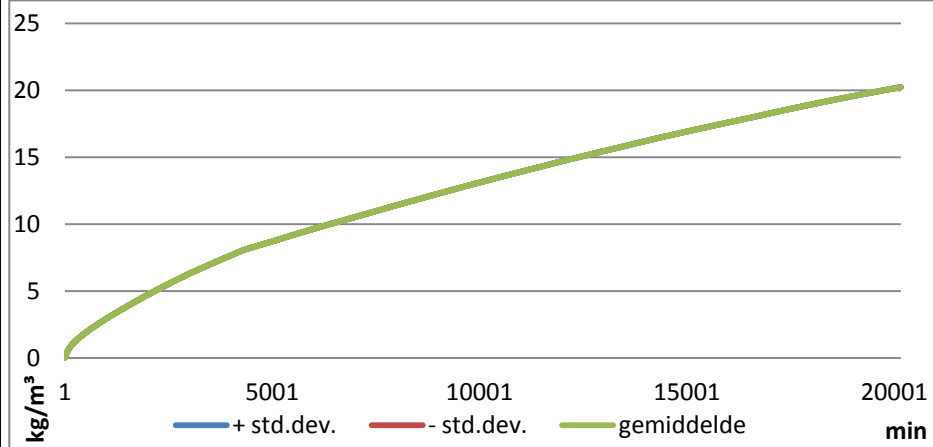


Zavelmortel

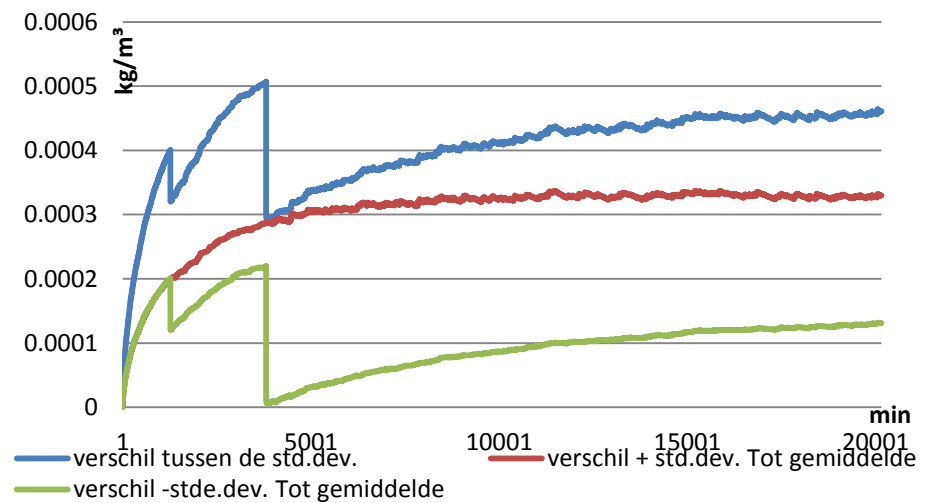
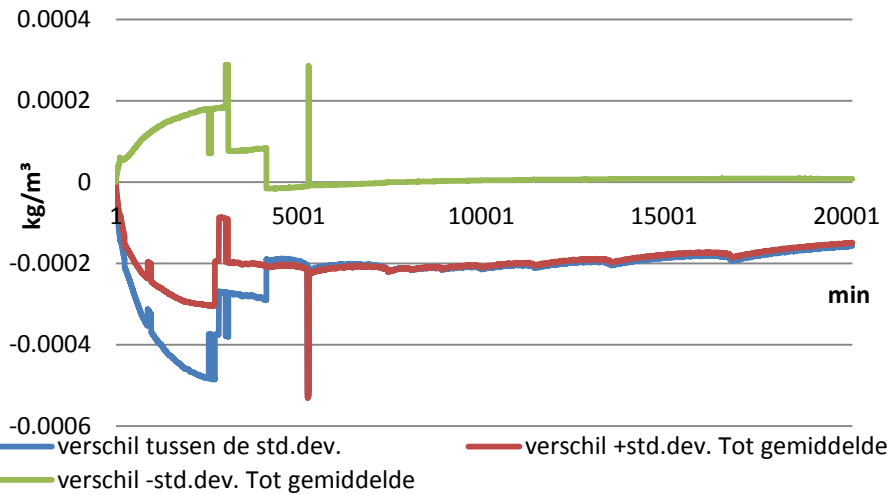
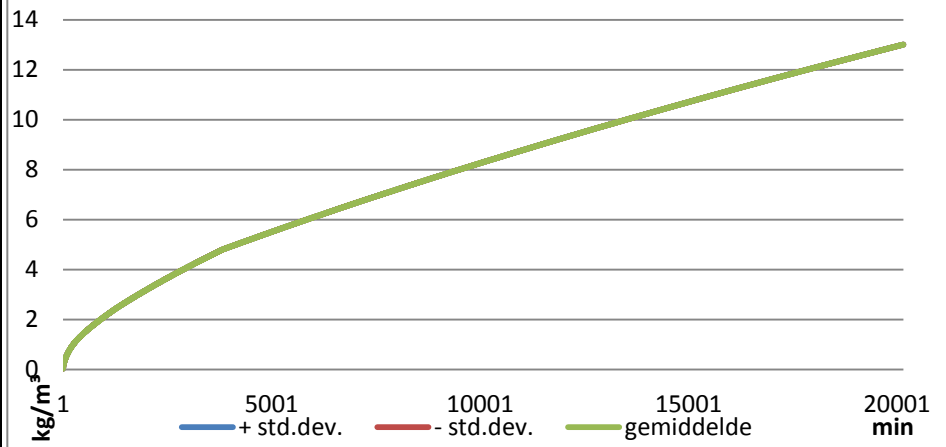


Gevoeligheidsanalyse porositeit

Atinea

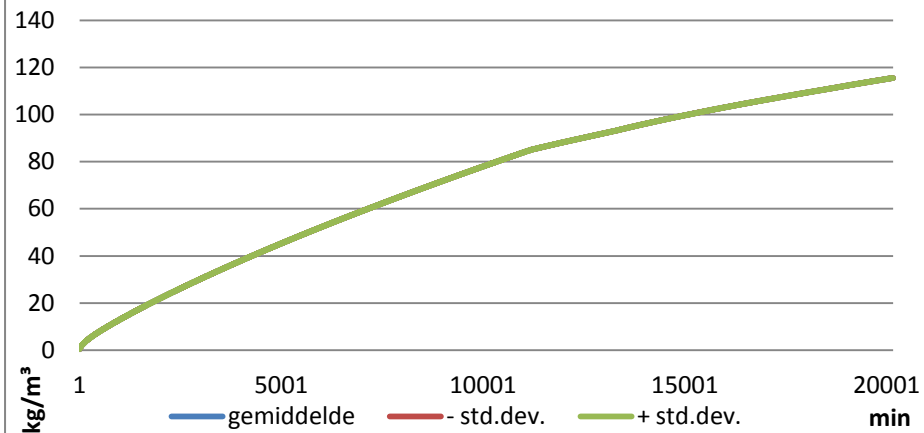


Leder Wanlin

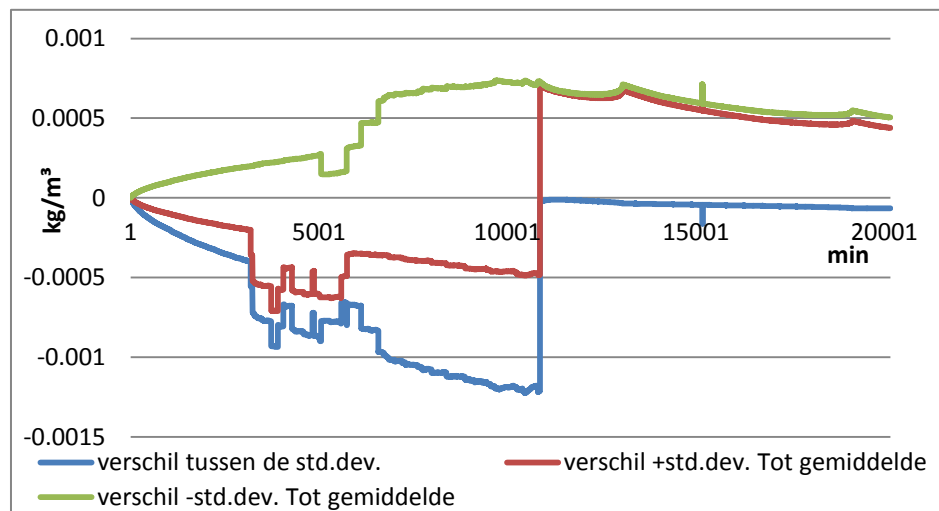
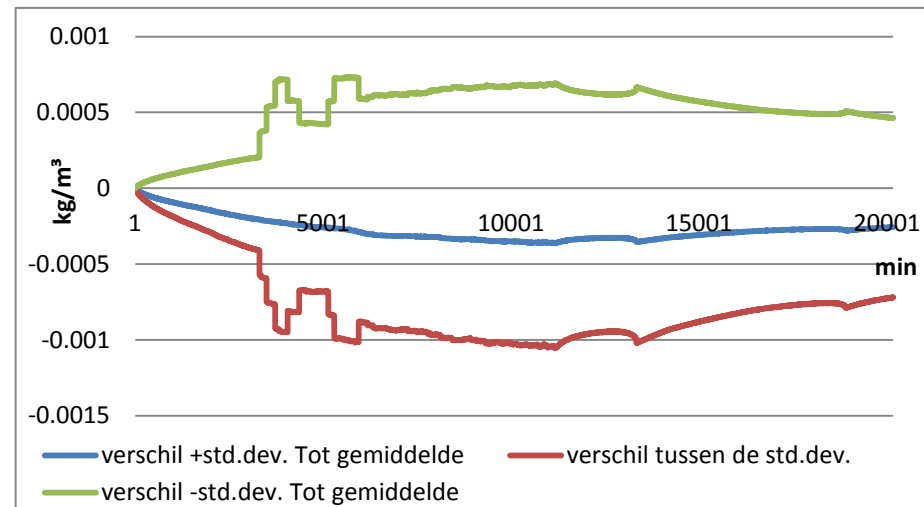
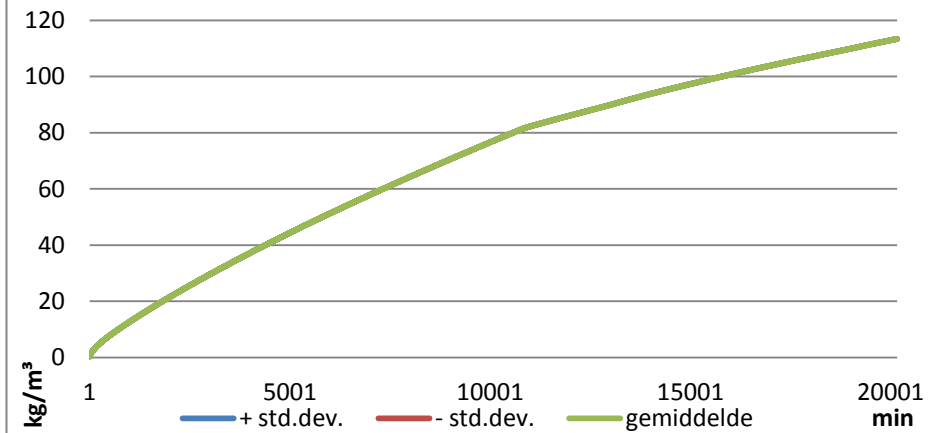


Gevoeligheidsanalyse porositeit

Zandmortel



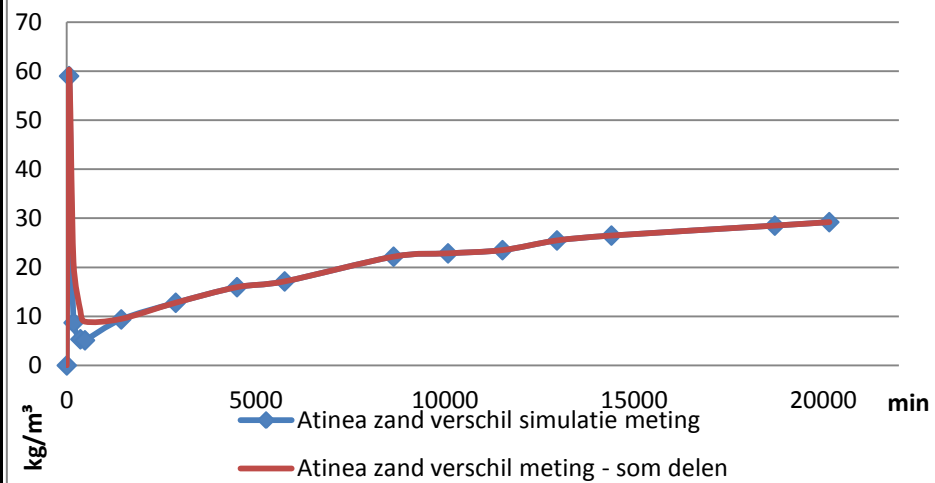
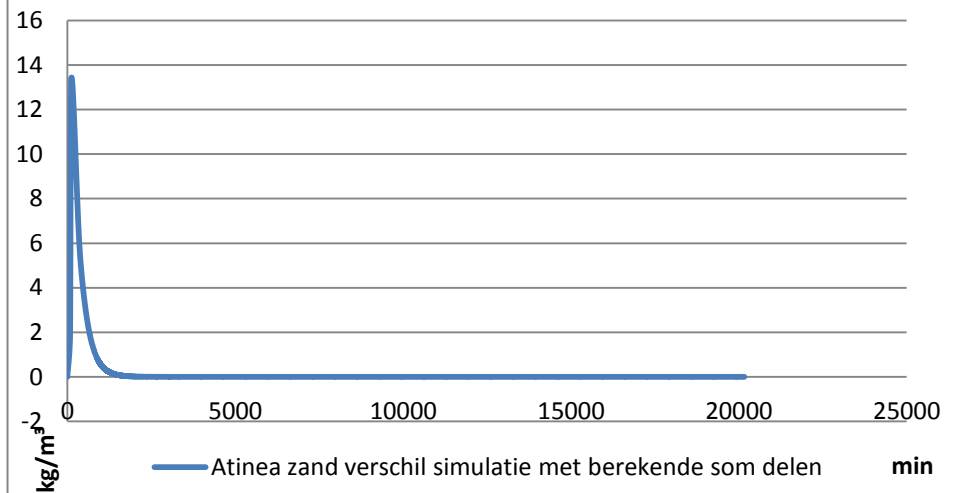
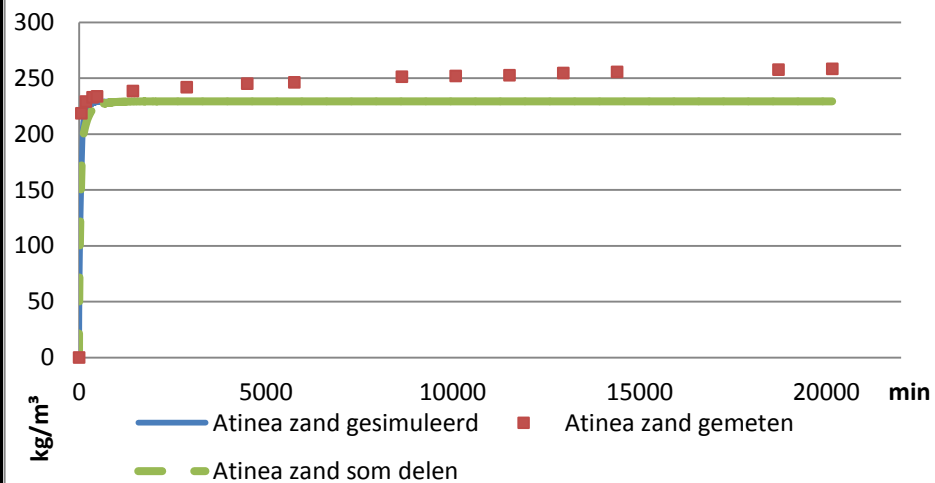
Zavelmortel



11.9. Annex I: grafieken bij case 1.

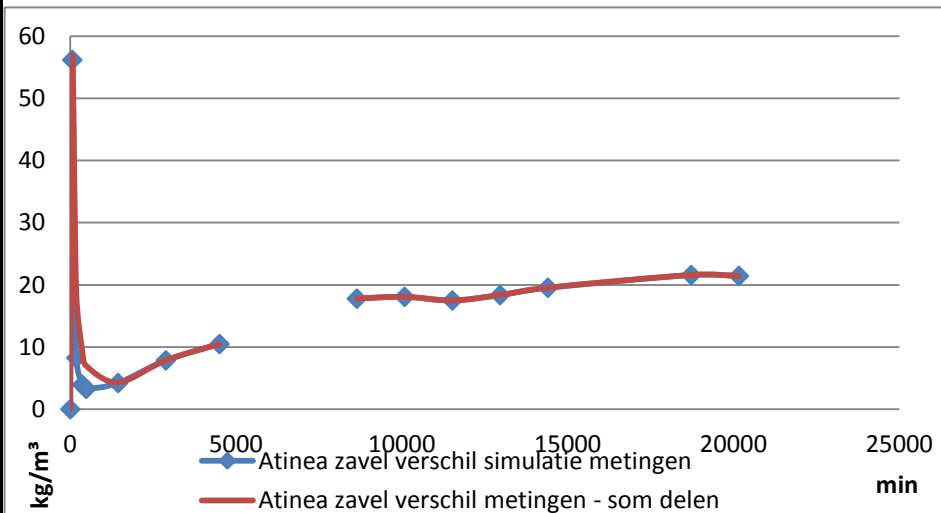
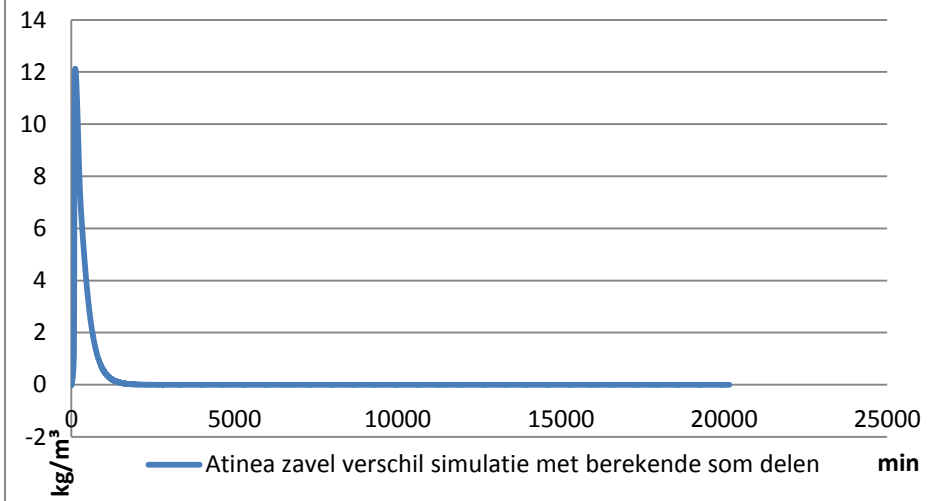
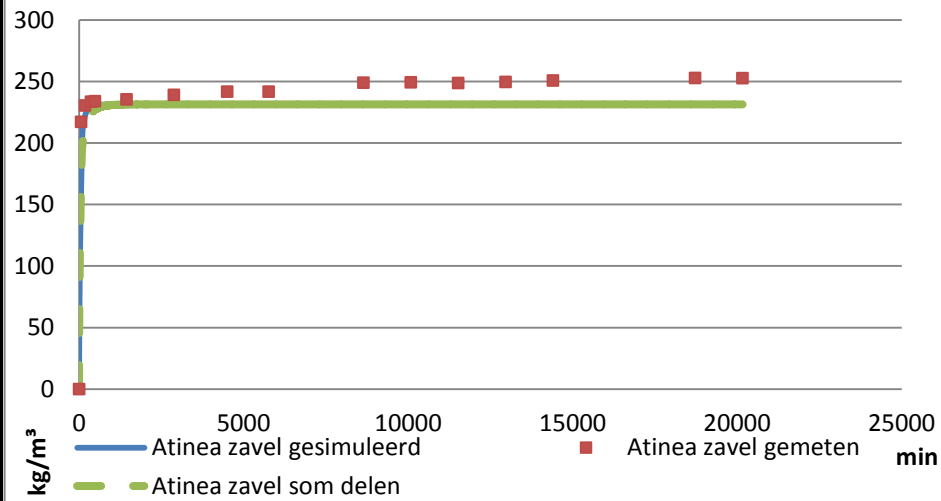
Case 1: vergelijkingen simulaties - berekeningen - metingen

Atinea zandmortel



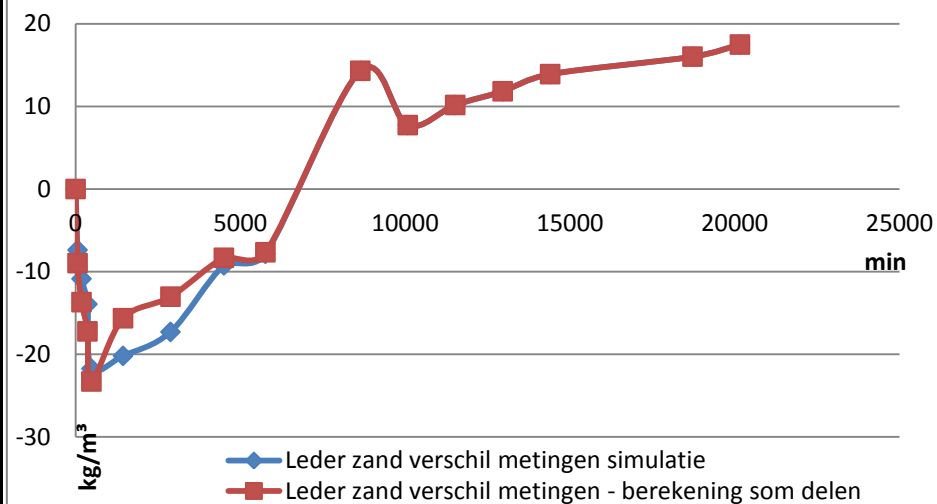
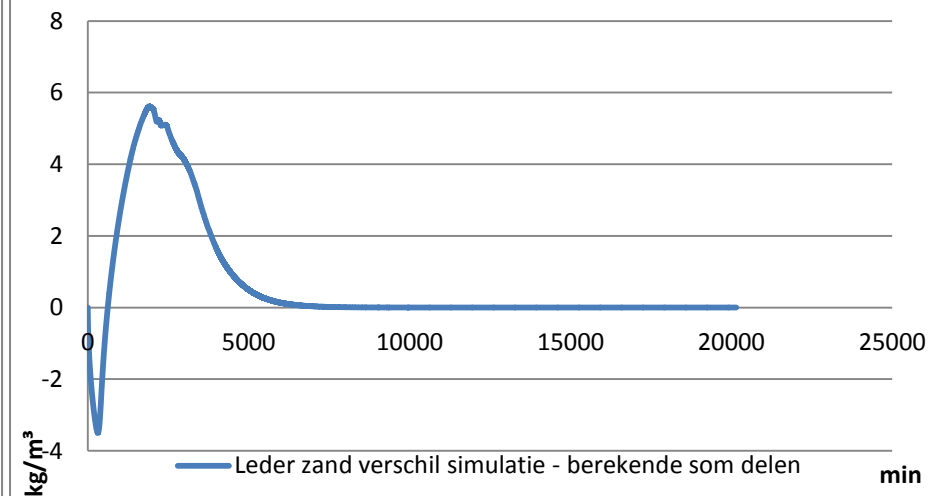
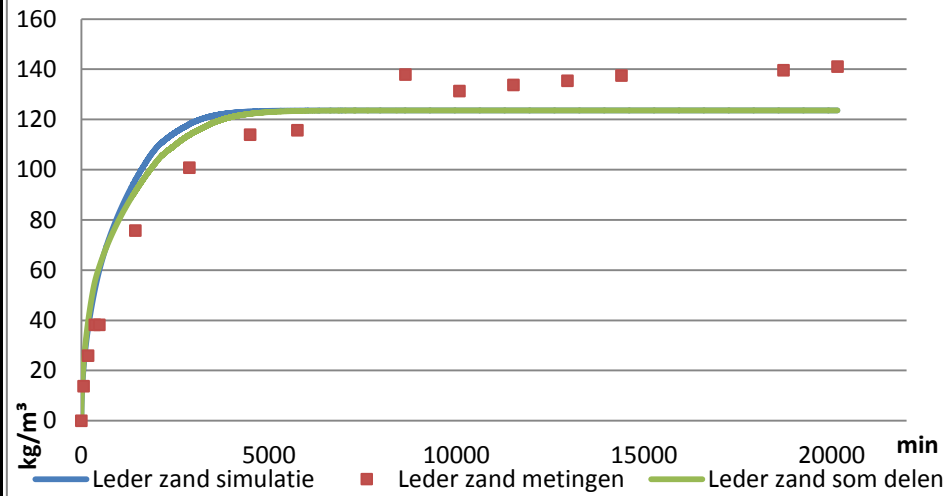
Case 1: vergelijkingen simulaties - berekeningen - metingen

Atinea zavelmortel



Case 1: vergelijkingen simulaties - berekeningen - metingen

Leder zandmortel



Case 1: vergelijkingen simulaties - berekeningen - metingen

Leder zavelmortel

