



CHALMERS



ENERGIEFFEKTIVISERING AV TEGELFASAD MED KULTURHISTORISKT VÄRDE

ENERGY EFFICIENCY OF BRICK FAÇADE WITH CULTURAL
HISTORICAL VALUE

Pontus Johansson, Gabriella Josefsson och Maria Daoud Rajha

Institutionen för Byggnadsteknologi

Examinator: Mihail Serkitjis

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2018

Kandidatarbete: ACEx-10-18-14

Förord

Det här arbetet är en C-uppsats gjord på Chalmers Tekniska Högskola för att få en kandidatexamen inom samhällsbyggnadsteknik för civilingenjörer. Uppsatsen består av 15 högskolepoäng och är gjord på institutionen för byggnadsteknologi.

Vi vill rikta ett tack till vår handledare Pär Johansson på institutionen för byggnadsteknologi för hans stöd och hjälp med uppsatsen. Vi vill även tacka Roland Skogh vid MölnDala Fastigheter AB och Alexander Erlandsson vid Sto Scandinavia AB för att de försåg oss med material för våra laborationer.

Ett extra stort tack till Marek Machowski för hans hjälp med materialhantering och laborationer.

Pontus Johansson
Gabriella Josefsson
Maria Doud Rajha

Sammandrag

Denna rapporten handlar om möjligheterna till att energieffektivisera äldre byggnader. Rapporten tar upp en specifik byggnad från Göteborgs tätort som står inför en omfattande renovering där möjligheterna till en vattenavvisande behandling och invändig isolering tas upp. Syftet med rapporten är att visa att det är möjligt att bevara kulturvärdet samtidigt som byggnaderna kan inkluderas i en modern miljöeffektiv stad.

Metoderna som använts är flera mätningar på ett nyare och ett äldre tegel från den specifika byggnaden. Materialdata på teglets egenskaper har hämtats till beräkningar, litteraturstudier på fuktransport och hydrofobering (som är en vattenavvisande behandling), numeriska uträkningar genom simuleringsprogrammet WUFI på olika uppbyggnader av ytterväggen som är möjliga att genomföra.

Simuleringsresultatet visar mycket positiva effekter på en tegelfasad som har genomgått en vattenavvisande behandling där fukthalten drastiskt minskat jämfört med ett obehandlat tegel. Det resultat som står ut efter en hydrofobering är framförallt att den kapillära uppsugningen blir försumbar vilket leder till att materialet som behandlats i princip inte tar upp vatten i vätskeform. Då fukthalten sjunker minskar även risken för frostsprängning och materialet får ett lägre lambda-värde som ger energibesparande effekter.

När fukthalten sjunker kan temperaturen i väggen sänkas utan att få de problem som är klassiskt betingat med en kall yttervägg, såsom kondensationspunkt inuti väggen. Därför är det möjligt att tilläggsisolera inifrån trots att det anses vara en riskkonstruktion.

Abstract

This report deals with the possibilities of older buildings made out of bricks more energy efficient. The study involves a specific building situated in the urban area of Gothenburg which stands in front of a comprehensive renovation where the possibilities for a hydrophobic treatment and an internal insulation is evaluated. The purpose of the study is to show the possibilities and opportunities to preserve the cultural value and at the same time include the building into a modern and environmentally efficient city.

The methods used are several measurements on one new brick and one from the specific building. The data for calculations are extracted, literature study on moisture transport and water repelling treatments, numeric calculations with the simulation program WUFI on different structures on the outer wall that is possible to implement.

The results from the simulation shows very positive effects on the brick façade that has gone through the hydrophobic treatment where the moisture content has fallen drastically compared to a untreated brick façade. The main effect of the treatment is that the capillary suction becomes negligible which results in the material basically not absorbing water in liquid form. As the moisture content becomes lower the hazard of frost blasting also drops and the brickwork gets a lower heat loss factor.

When the moisture content drops the temperature in the wall can also be lower without causing the typical problems that is connected to a cold and moist wall like getting a condensation point inside the wall. Therefore, it is possible to apply insulation interiorly even though it is often thought of as a potential risk construction.

Innehållsförteckning

1. INLEDNING.....	1
1.1 Syfte.....	2
1.2 Frågeställning	2
1.3 Metod.....	2
1.4 Avgränsningar	3
2 TEORI OM FUKT OCH WUFI-BERÄKNINGSPROGRAM.....	4
2.1 Fukt.....	4
2.1.1 Ånghalt	4
2.1.2 Mättnadsånghalt	4
2.1.3 Relativ fuktighet.....	5
2.2 Fukttransport.....	5
2.3 WUFI.....	5
3 LITTERATURSTUDIE.....	7
3.1 Vilka lagar, regler och föreskrifter måste beaktas?	7
3.1.1 Kulturmärkta byggnader	7
3.1.2 Krav på klimatskärmen	7
3.1.3 Krav på fukt i byggnader.....	8
3.1.4 Termiskt klimat	9
3.2 Forsåkerområdet	10
3.2.1 Mölndalsån	10
3.2.2 Pappersbruket	10
3.2.3 Boende i området	10
3.3 Teglets historia	12
3.4 Tillverkning av tegel.....	12
3.5 Fuktegenskaper för tegel	12
3.6 Hydrofobiskt ytskikt	13
3.7 Tilläggsisolering	15
3.7.1 Utvändig tilläggsisolering;	15
3.7.2 Invändig tilläggsisolering	15
4 MÄTNINGAR PÅ TEGLETS EGENSKAPER.....	16
4.1 Densitet.....	16
4.1.1 Metod för mätning av densitet	16
4.1.2 Resultat av densitet mätning	17

4.2	Porositet	17
4.2.1	Metod för mätning av porositet	18
4.2.2	Resultat av porositet mätning	18
4.3	Kapillärsugning	18
4.3.1	Metod för mätning av kapillärsugning	19
4.3.2	Resultat av kapillärsugningsmätning	20
4.4	Uttorkning.....	22
4.4.1	Metod för uttorkning av tegel.....	23
4.4.2	Resultat för uttorkningsmätning.....	23
4.5	Koppmetoden.....	26
4.5.1	Metod för att mäta ångpermabiliteten	26
4.5.2	Resultat på koppmetodsmätning	28
4.6	TPS-Analys.....	30
4.6.1	Metod för att mäta värmeledningsförmåga	31
4.6.2	Resultat av TPS-analys.....	32
4.7	Frostsprängning	33
4.7.1	Metod för att mäta frostsprängning.....	33
4.7.2	Resultat av frostsprängningsmätning	34
4.8	Tryckhållfasthet	35
4.8.1	Metod för att mäta tryckhållfastheten	36
4.8.2	Resultat av tryckhållfasthetsmätning	37
4.9	Sammanställning av samtliga mätningar	37
5	WUFI BERÄKNINGAR.....	38
5.1	Valda parametrar	38
5.2	Resultat & analys av WUFI.....	42
5.2.1	Resultat referensvägg med och utan hydrofobiskt ytskikt	43
5.2.2	Resultat yttervägg med 100 mm isolering med och utan hydrofobiskt ytskikt..	46
5.2.3	Resultat yttervägg med 100 mm isolering och ångspärr med och utan hydrofobering.....	49
5.2.4	Resultat yttervägg med 240 mm isolering och ångspärr med hydrofobering	51
6	SLUTSATS	54
7	FÖRSLAG TILL FRAMTIDA FORSKNING.....	55
8	LITTERATURFÖRTECKNING	56
9	BILAGOR.....	59
9.1	Bilaga 1.....	59

9.2	Bilaga 2.....	61
9.3	Bilaga 3 Resultat WUFI- beräkning	65
9.3.1	Referensvägg.....	65
9.3.2	Vägg med hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0).....	68
9.3.3	Vägg med hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0,1).....	71
9.3.4	Vägg med 100 mm isolering	74
9.3.5	Vägg med 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0).....	77
9.3.6	Vägg med 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0,1).....	80
9.3.7	Vägg med ångspärr och 100 mm isolering.....	83
9.3.8	Vägg med ångspärr, 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0)86	
9.3.9	Vägg med ångspärr, 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0,1) 89	
9.3.10	Vägg med ångspärr, 240 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0)92	
9.3.11	Vägg med ångspärr, 240 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0,1) 95	

1. INLEDNING

I alla årtionden har det i Göteborg byggts många byggnader av tegel. Byggnaderna bidrar i dagsläget till ett kulturellt och estetiskt värde för staden. Förutom att de har en historisk betydelse, så står de för en stor energianvändning då byggbranschen inte var lika utvecklad inom isoleringsteknik som den är idag. En fasad på ett gammalt tegelhus kan ha U-värden som varierar mellan 1–1,5 W/m²K (Lång & Sandgren, 2016). Medan det i BBR står att en ändring av byggnader ska klimatskalets ytterväggar sträva efter ett U-värde på 0,18 W/m²K (BBR, 2015). Forsåker i Mölndal är en sådan stadsdel med en anrik historia och hus med höga U-värden. Bland annat har flera olika pappersbruk varit i drift genom seklerna och givit stadsdelen en identitet som är värd att bevara enligt Mölndals kommun (Mölndals Stad, 2017).

Det senaste pappersbruket Klippan AB Mölndals Bruk lades ner 2006 och sedan dess har lokalerna stått tomma (Forsåker, 2018). Framtiden för Forsåker är att platsen skall utvecklas till en stadsdel med boende och allehanda service där “dåtid möter framtid” (Forsåker, 2018) därför är det viktigt att behålla den gamla fabriksbebyggelsen av tegel och implicera dess betydelse för historien i ett modernt samhälle.

För att både minska energianvändningen men även öka den termiska komforten för människorna i byggnaderna behöver något göras. Antingen så får byggnaderna rivas och plats ges till nybyggnation efter dagens standard eller så får de befintliga byggnaderna energieffektiviseras på andra sätt, exempelvis genom att tilläggsisolera dem. Detta sparar inte enbart på jordens material som resurs utan även det kulturella värdet i staden bevaras. Vid tilläggsisolering inifrån kan ett hydrofobiskt ytskikt målas på tegelstenarna för att förbättra teglets egenskaper med avseende på fuktproblematik. Rapporten kommer undersöka och diskutera hur mycket dessa egenskaper ändras och hur mycket tilläggsisolering som behövs för att få ett U-värde i enlighet med BBR:s strävan.

1.1 Syfte

Projektets syfte är att få fram ett exempel på hur en gammal tegelbyggnad i Forsåker kan behandlas med ett hydrofobiskt ytskikt på utsidan och tilläggsisoleras från insidan. Detta görs för att bevara byggnadens gestaltning, då den är skyddad av ett kulturmiljöprogram för Mölndals kommun (Mölndals kommun, 2000). Huruvida det är byggnadstekniskt möjligt eller inte och hur mycket tilläggsisolering som krävs för att nå upp till BBR:s krav för energieffektivisering fås fram genom mätningar, beräkningar och simuleringar. Mätningar på nytt tegel och tegel från Forsåkers egenskaper samlas i en databas och jämförs. Denna data används i simulering för beräkning av fukt- och värmetransport för att få fram en fuktsäker konstruktion som uppnår BBR:s krav.

1.2 Frågeställning

Hur kan energiförbrukningen på äldre tegelbyggnad minskas på ett hållbart sätt och samtidigt bevara gestaltningen? Detta kan ske genom att byggnaden tilläggsisoleras från insidan istället för på utsidan. Problematik som ofta uppstår vid invändig tilläggsisolering är att den yttre delen av väggen blir kall och detta kan leda till fuktproblem. För att motarbeta en eventuell fuktproblematik kan ett hydrofobiskt ytskikt appliceras på utsidan. Följande frågeställningar som besvaras i rapporten är;

- Hur ändras teglets egenskaper vid hydrofobisk ytbehandling?
- Är det möjligt med väggens förutsättningar att tilläggsisolera och få ett fungerande system utan att fuktrelaterade skador uppstår?

1.3 Metod

Metoder som användes var:

- Litteraturstudie, där information om tegel, hydrofobisk ytbehandling, fukt och tilläggsisolering togs fram. Redan tidigare rapporter lästes och diskuterades.
- Fältundersökningar, undersökning på plats av teglet från Forsåker.
- Mätningar på två olika tegel där materialegenskaper hämtades och där det hydrofobiska ytskiktets påverkan på materialegenskaperna mättes.
- Beräkningar på de olika egenskaperna hos teglet, såsom U-värdes beräkningar på den befintliga väggen.
- Simuleringar, numeriska uträkningar som simulerat den befintliga väggen och de alternativ som är aktuella i rapporten.

1.4 Avgränsningar

Projektet avgränsades till att undersökningen på det använda teglet enbart gjordes på fasadtegel som blivit utsatt för göteborgskt klimat. Detta gjordes på grund av att den valda byggnaden ligger i området samt att det finns många tegelbyggnader runt om i Göteborg som står inför renoveringar. Metoden som görs på byggnaden i Forsåker kommer därmed kunna tillämpas på byggnader med samma problem inom området.

Ljud- och brandegenskaper hos teglet togs inte hänsyn till, utan enbart fukt och värme. Det är fukt och värmetransporterna genom väggen som bidrar till energiåtgången inne i byggnaden.

Mätningarna begränsades till två sorters tegel. Ett nytt referenstegel som köptes i handeln och ett gammalt tegel som togs från byggnaden i Forsåker. Mätningarna gjordes flera gånger för att minska felmarginalen av resultaten. Mätningar på murbruket gjordes inte då vid behandling av tegel med ett hydrofobiskyttskikt kommer fogen ändå behövas bytas ut. Därför gavs murbruket vid simulering ett redan framtagna värden som hittades i simuleringsprogrammets databas.

2 TEORI OM FUKT OCH WUFI-BERÄKNINGSPROGRAM

2.1 Fukt

Fukt är vatten i olika faser: gas-, vätske- eller fastfas. Fukt kan tränga in i en byggnad från olika vägar och i olika former (Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017, s. 39). Vatten kan sugas upp i fast form av olika byggnadsdelar och komma in i materialet på det sättet. Då ökar fukthalten i byggnadsdelar som i sin tur kan leda till fuktproblem. Fukten kan också finnas i både utomhus- och inomhusluften. Fukt i utomhusluften påverkas av utetemperaturen medan fukten inomhus beror på fuktproduktionen som sker i huset.

Fukt finns i olika delar i en konstruktion och har många olika källor för att tränga in i byggnaden (Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017, ss. 25-26). Nederbörd, i sina olika former (regn, snö och slagregn), står för stor del av fukt i byggnaden. Markfukt kan även transporteras till ytan och sugas upp av byggnadsdelar. Byggfukt innebär fuktöverskott i byggnadsmaterial och som kommer torkas ut i inneluften. Byggfukten glöms ofta bort och orsakar många fuktskador.

Fukt finns i alla material i olika mängd. Materialet har ett kritiskt fukttillstånd som inte bör överskridas, annars riskerar materialets egenskaper att ändras (Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017, s. 325). Därför kommer viktiga begrepp, som förklarar fukthalten i material, att redovisas nedan:

2.1.1 Ånghalt

Vatten i form av vattenånga finns i luften omkring oss i en bestämd andel. Den här mängden av vattenånga kallas för ånghalten, v [kg/m^3]. Ånghalten inomhus skiljer sig från utomhus. Ånghalten inomhus beror framförallt på fuktproduktion som bildas av människors olika aktiviteter, såsom andning och matlagning.

2.1.2 Mättnadsånghalt

Mättnadsånghalt v_s [kg/m^3] kan definieras som den maximala mängden vatten luften kan innehålla vid en viss lufttemperatur (Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017, ss. 325-327). Mättnadsvärdet kan erhållas av en empirisk formel som är en funktion av temperatur:

$$v_s = 288,68 \frac{(1,098 + \frac{T}{100})^{8,02}}{461,4 * (T + 273,15)} [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (\text{Ekv 2.1})$$

där

v_s : mättnadsånghalt [kg/m^3]

T : Temperaturen [K]

(Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017)

2.1.3 Relativ fuktighet

Förhållandet mellan ånghalten i luften och det maxvärde som luften kan bära vid samma temperatur och samma atmosfärtryck kallas för relativ fuktighet. Relativ fuktighet beräknas med hjälp av ekv 2.2.

$$\varphi = v/v_s \quad (\text{Ekv 2.2})$$

där

v : ånghalten [kg/m^3]

v_s : mättnadsånghalten [kg/m^3]

(Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017, s. 327)

2.2 Fukttransport

Fukt transporteras och förflyttas genom material i olika faser: vätske- och ångfas. Ångfasen sker i sin tur med olika mekanismer: diffusion och konvektion (Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017, s. 338). Diffusion sker när skillnad i densitet uppstår, det vill säga när luft strömmar mellan en luftmängd med högre ånghalt och en med lägre ånghalt. Konvektion innebär att luftflödet bär med sig vatten i ångfas och överför det. För att konvektion ska kunna ske måste det bildas stora tryckskillnader mellan två medier. Konvektion sker antingen naturligt med vinden, det vill säga utan påverkan, eller onaturligt som innebär att man skapar en tryckskillnad genom att använda en fläkt.

2.3 WUFI

WUFI står för "Wärme Und Feuchte Instationär" och betyder transport av fukt och värme (WUFI, 2018). WUFI är ett simuleringsprogram där numeriska beräkningar görs av hur fukt och värme transporteras i byggnadsdelar. WUFI skapades 1995 i Tyskland av Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP). Programmet är skapat "För byggindustrin- För att undvika fuktskador och för energieffektivisering" (WUFI, 2018). WUFI används idag inom byggbranschen vid planering, projektering och utformning av byggnader för att konstruktörer, arkitekter, projektörer och beställare ska kunna föreslå byggnadskonstruktioner som är energieffektiva och som även minimerar risk för fuktskador.

Materialdata på teglets egenskaper tas från mätningarna på teglet från Forsåker.

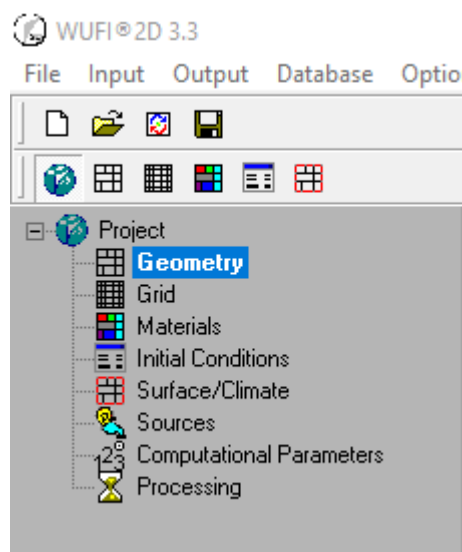
Standardvärden för isolering väljs från WUFI:s egna databas och kontrolleras så det stämmer överens med isolering som finns på marknaden. Murbruket väljs också från WUFI:s databas och justeras då det hydrofobiska ytskiktet kommer ändra dess kapillära egenskaper.

Syftet med att använda WUFI som beräkningssystem är att få ut värden på fukt- och värmetransporter genom olika typer av väggar som kan tillämpas på byggnaden i Forsåker. Här kommer en förklaring av hur programmet fungerar och hur det används. Vid modellering av en konstruktion i WUFI 2D bör följande steg följas (se figur 1):

1. **Geometry:** Geometrin definieras först genom att rita upp väggkonstruktionen och tjocklek på de olika materialen (Institut Bauphysik, 2014) .
2. **Grid:** I Grid kommer automatisk ett rutnät över konstruktionen som dividera väggen till små element. Ju finare rutnätet är desto mer detaljerade beräkningar av värme och fukttransport fås.

3. **Materials:** Materialet definieras för olika väggskikt. Material väljs från den befintliga materialdatabasen i programmet eller så kan ett nytt material skapas genom att ändra egenskaper på materialet.
4. **Initial Conditions:** Under initiala villkor anges temperatur- och ånghaltsvärden som gäller för respektive avgränsningsyta.
5. **Surface/klimat:** Här definieras klimatet som finns runt om väggen. På utsidan av väggen måste området som byggnaden ligger i väljas och orientering för väggkonstruktionen bestämmas. Olika värden bör beaktas såsom regnfaktor och regnlaster. På insidan väggen väljs lätt, medel eller hög fukthalt som demonstrerar inomhusklimatet.
6. **Computational Parameters:** Period för simulering väljs, det vill säga startdatum och perioden som kalkylering täcker. Samt vilka uträkningar som vill göras.

Efter alla stegen startar kalkyleringen.



Figur 1: visar samtliga flikar i WUFI.

3 LITTERATURSTUDIE

I detta kapitel tas litteraturstudie om referensbyggnaden, krav på byggnaden och information om teglets egenskaper upp.

3.1 Vilka lagar, regler och föreskrifter måste beaktas?

För att ändra en byggnad måste kunskap om kraven som ställs på byggnaden tas fram och lagar, regler och föreskrifter som gäller för byggnaden granskas. Viktiga lagar och bestämmelser inom byggbranschen finns i plan och bygglagen, PBL, medans föreskrifter och allmänna råd till PBL finns i boverkets byggregler, BBR (BBR, 2015).

3.1.1 Kulturmärkta byggnader

Byggnader som idag ses som värdefulla kulturhistoriskt ska bevaras för att ge förståelse och kunskap för äldre tiders byggnadshantverk, för att berätta om förhållanden i samhällen och levnadsberättelser (Mölndals stad, 2018).

I PBL kap 8, 17 § står det att ”*ändring av en byggnad och flyttning av en byggnad ska utföras varsamt så att man tar hänsyn till byggnadens karaktärsdrag och tar till vara byggnadens tekniska, historiska, kulturhistoriska, miljömässiga och konstnärliga värden*” (Sveriges riksdag, 2010). Dessa byggnader har så stort värde att man vill bevara dem för framtiden. Att en byggnad är kulturmärkt har ingen formell innebörd och är inte juridiskt bindande (Göteborgs stad, 2018).

Det finns även ett förbud mot förvanskning i PBL kap 1:221 (BBR, 2015). Det är varje enskild kommunen som skyddar byggnaderna som finns inom dess gränser. Är det däremot ett byggnadsminne eller kyrka skyddas den av landstinget. Det är upp till varje kommun vad som ska skyddas och inte. Mölndals kommun där Forsåkerområdet ligger har ett kulturmiljövårdsprogram där rekommendationerna för Forsåker finns. Den säger att byggnader, ombyggnader och andra ändringar ska utföras så att karaktärsdragen bevaras. Det är viktigt att fasad, material, fönsterutformning och färgsättning görs utan att förvanska kulturen (Mölndals kommun, 2000).

3.1.2 Krav på klimatskärmen

I kapitel 9:92 i BBR står det att om byggnaden efter ändring inte uppfyller de angivna kraven som finns i kapitel 9:2 ska klimatskärmen eftersträva följande U-värden som finns i tabell 1 (BBR, 2015, s. 247). I kapitel 9:2 står det att energianvändningen ska begränsas genom att byggnaderna ska vara utformade genom effektiv värme, el och kylanvändning, vilket ofta hör ihop med U-värdet. En byggnad med dåligt U-värde släpper ut energi genom väggar, tak, golv, etc. som måste värmas upp för att nå kraven för termisk komfort. I byggnader där den interna värmen är låg med höga transmissionsförluster kan värdena i tabell 1 ses som en riktlinje för att minska energianvändningen i byggnaden.

Tabell 1 (BFS 2011:26) tabell tagen från boverkets byggregler och visar vilka U-värden som ska eftersträvas då de specifika energikraven ej uppfylls.

U_i	[W/m ² K]
U_{tak}	0,13
$U_{\text{vägg}}$	0,18
U_{golv}	0,15
$U_{\text{fönster}}$	1,2
$U_{\text{ytterdörr}}$	1,2

Denna rapport fokuseras enbart på byggnadens ytterväggar därför bör endast ett U-värde på 0,18 W/m²K på ytterväggar tas hänsyn till. BBR tar i samma kapitel upp om att ” vid utvändig tilläggsisolering bör det övervägas hur detta påverkar byggnadens karaktär, detaljer såsom dörr- och fönsteromfattningar, samt relationen mellan fasad och takfot respektive sokel. T.ex. kan fönstren behövas flyttas ut för att bibehålla husets karaktär” (BBR, 2015, s. 247).

BBR tar även upp om att vid invändigisolering bör konsekvenserna för byggnadens kulturvärden utredas, för att inte förstöras. I BBR finns det krav på utvändig isolering, den får vara en viss tjocklek innan man behöver ansöka om bygglov (BBR, 2015). Det står däremot ingenting om invändig isolering, de krav som finns är att fuktproblem måste förhindras, se kapitel 3.1.3.

3.1.3 Krav på fukt i byggnader

Något som ofta uppstår vid tilläggsisolering är fuktproblem, i BBR kapitel 6:5 står det om att ”byggnader ska utformas så att fukt inte orsakar skador, lukt eller mikrobiell tillväxt som kan påverka hygien och hälsa” (BBR, 2015, ss. 163-168).

Det bör därför göras fuktberäkningar för att inte överskrida det högsta tillåtna fukttillståndet för varje enskilt material i väggen (BBR, 2015, ss. 163-168). En relativ fuktighet på 75% kan användas som kritiskt fukttillstånd om det kritiska fukttillståndet inte är undersökt eller dokumenterat. Det kritiska fukttillståndet är då fukt inte bidrar till skador som påverkar hygien eller hälsa. Det finns råd i BBR om ett par parametrar som då bör tas hänsyn till, vilket är;

- När tillväxt av mögel och bakterier börjar.
- När oacceptabla kemiska och elektrokemiska reaktioner sker.
- När oacceptabla fuktrörelser sker.
- När transportprocesser för fukt, joner och andra vattenlösliga ämnen sker.

Väggarna bör därför utformas så att fukt som kommer utifrån och inifrån inte påverkar byggnadskomponenterna i väggen i sådan utsträckning att fuktproblematik uppstår.

3.1.4 Termiskt klimat

Termiskt klimat står dels för hur människor upplever komforten i en byggnad och dels för hur det termiska klimatet påverkar byggnaden (Boverket, 2017). Den termiska komforten beror på den operativa temperaturen, d.v.s. hur temperaturen upplevs i ett rum på grund av strålade ytor. När dessa ytors temperatur skiljer sig mellan olika punkter bidrar de till en dålig termisk komfort. Hastigheten på luften påverkar också det termiska klimatet. En låg temperatur vid ett fönster kan upplevas som drag om U-värdet är högt. Detsamma gäller för väggar. Denna rapporten behandlar en yttervägg som i nuläget har ett U-värde på 1,35 [W/m²*K], se bilaga 1 för beräkningar. Genom att använda Per Heiselbergs förenklade formel (Ekv 3.1) på kallras kan hastigheten på kallraset beräknas (Heiselberg, 1993).

$$V_{max} = 0,055 * \sqrt{\Delta T * X * H} \quad (\text{Ekv. 3.1})$$

där

V_{max}: Luftens hastighet [m/s]

ΔT: Differensen mellan ytemperaturen på väggen och innetemperaturen [K]

H: Relevant höjd [m]

X: Relevant längd ut i rummet [m]

(Heiselberg, 1993)

3.2 Forsåkerområdet

Den valda referensbyggnaden kommer från Forsåkerområdet. Forsåkersområdet ligger i sydvästra Mölndal ungefär sju kilometer söder om korsvägen. Från början bestod Forsåker av fyra gårdar med stora ägor (Mölndals kommun, 2000). Forsåker betyder just åkern vid forsen och syftar då på forsen som rinner från Stensjön ner i Mölndalsån.

3.2.1 Mölndalsån

Höjdskillnaden på Mölndalsån och närheten till Göteborg har i alla tider gjort Forsåkerområdet till en väldigt attraktiv plats att ha en fabrik på (Mölndals Stad, 2017). Mölndalsån har genom sin vattenkraft drivit maskiner och givit sitt vatten som råmaterial. Göteborg har bidragit med en internationell marknadsplats att saluföra sina varor på där Mölndalsån igen har bidragit med sitt vatten som transportväg (Setterborg, 2013). Därför är det en lång tidsperiod med bevarad industriell bebyggelse som återfinns runt Forsåker (Mölndals Stad, 2017).

3.2.2 Pappersbruket

Sedan 1600-talet har det förekommit papperstillverkning där det i början tillverkades utav linnelump, detta fortsatte ända fram tills 1800-talet (Krus, 2000). Under mitten av 1800-talet gick produktionen från att vara handgjord till att använda sig utav maskiner. Med effektiviseringen som maskinerna innebar och den begränsade tillgången till linnelump blev så småningom träflis huvudråvaran till pappret runt 1880-talet (Setterborg, 2013). Det teknisk avancerade bruket som skapades hade år 1880 över 700 anställda och runt fabriken bildades det ett lokalt centrum med skola, bibliotek, handel och sjukhus (Mölndals Stad, 2017). Efter en konkurs på 1890-talet köptes pappersbruket upp av Marcus Wallenberg som bildade det i folkmun kända pappersbruket Papyrus (Setterborg, 2013). Papyrus var i bruk i nästan 100 år innan det såldes till ett företag som senare bytte namn till Stora Enso, som senare sålde bruket till Klippan AB. Klippan tog 2005 beslutet att lägga ner produktionen runt Mölndalsån och avsluta en lång historia av pappersproduktion. Pappersbruket köptes upp av den nuvarande ägaren Mölndala AB som är ett kommunalt företag i Mölndals kommun och nu ingår pappersbruket i en vision för ett nytt område runt Mölndalsån (Setterborg, 2013).

3.2.3 Boende i området

De arbetande på de olika industrierna byggde sina egna personalbostäder i anslutning till industrierna ofta med lånade pengar av direktören för pappersbruket. Gemensamt med industrierna skapar dessa en helhetsbild över hur ett industrisamhälle kunde se ut under olika tidsåldrar. Den mest utmärkande personalbostaden är disponentvillan som "kungen av Mölndal" David Otto Francke lät uppföra och visar tydligt den sociala struktur som fanns på sent 1800-tal, se figur 2. Där direktören bodde i det största huset och beroende på ställning bodde de arbetande i fallande storlek och påkostade byggmetoder, där de med högre befattningar bodde i tjänstemannavillor och fabriksarbetstagare bodde i enklare så kallade arbetarkaserner, se figur 3 (Mölndals Stad, 2017).



Figur 2 Disponentvillan som "kungen av Mölndal" David Otto Francke lät uppföra.



Figur 3 tjänstemannavilla vid Forsåker.

3.3 Teglets historia

Tegelsten tillhör gruppen keramiska material som främst är uppbyggd av lera, leran behandlas och formas för att så småningom ge tegelstenen sin slutliga form (Burström, 2007, s. 335). Efter formgivningningen torkas och bränns teglet i ugn, oftast över 1000 °C. Temperaturen varierar för att skapa olika sorters tegel. Det tar mellan 50–70 timmar för leran att bli färdig i ugnen, för att sedan säljas och tas i bruk.

Första användningen av bränt tegel antas ha varit för 5000 år men rester av 10 000 år gammalt keramiska material har upptäckts som var soltorkat (Burström, 2007, s. 335). Den i början soltorkade keramiken utvecklades och förbättrades genom att använda bränning vid högre temperatur vilket gav bättre beständighet och hållfasthet. En av de äldsta byggnaderna i världen som var byggt i tegel och är vida känt är Babels torn i Babylonien, tornet byggdes av tegel för mer än 2500 år sedan. I de nordiska länderna började tegelmaterialet användas och tillverkas för cirka 800 år sedan. Behandlingen av råmaterialet och dess tillverkning är fortfarande densamma som tidigare och principen har inte ändrats på 5000 år.

3.4 Tillverkning av tegel

Framställning av tegel sker i flera steg under tillverkningsprocessen: hämtning och förbehandling, formning, bränning och avkylning (Burström, 2007, s. 337). Teglets råmaterial består huvudsakligen av lera. Leran hämtas, krossas och blandas med vatten och andra material såsom sand, kalk och tegelkross. Tillsättningsmaterial är viktigt för lerans förbehandling p.g.a. att de ger leran dess flexibilitet och minskar krympningen under förbränningsprocessen. Leran får sin avsedda form genom att den skärs och placeras i formar. Torkningsprocessen börjar därefter genom att formarna placeras i speciella torkar vid lämpliga temperaturer och lufthastigheter. Tiden som krävs för den här processen är cirka fem dygn. Det sista som görs är att sätta in torkade lerformar i tunnelugnar vilket normalt tar mellan 30–70 timmar. Detta kallas förbränningsprocessen och sker i höga temperatur mellan 1000 och 1100 °C. Detta steget är väldigt viktigt vid tillverkningsprocessen för att få fram olika typer av tegel med dess önskade egenskaper.

3.5 Fuktegenskaper för tegel

Materialets porositet och porstorleksfördelning spelar en stor roll för bedömning av materialets fuktegenskaper och hur det reagerar mot fukt (Burström, 2007, s. 346). På grund av att tegel är ett poröst byggnadsmaterial är fukt en naturlig och viktig beståndsdel (Arfvidsson, Harderup, & Samuelson, 2017). Tegel har en stor förmåga att kapillärt ta upp vatten. Dessutom används det ofta som ytterbeklädnad, det vill säga den utsätts direkt för nederbörd. Pga. teglets höga ångpermabilitet och förmåga att absorbera vatten kopplas materialet till fuktproblem varav ett är frostsprängning.

Fuktproblem kan uppstå i tegelmateriel på olika sätt (Hagentoft, 2002, s. 40). När tegelfasaden är tilläggsisolerad invändigt finns det en förhöjd risk att vattnet i teglet fryser då väggen blir kallare. Detta resulterar i att vatten inne i teglet expanderar med cirka 9%. Vattnets expansion kan orsaka både visuella och ej synliga skador på materialet vid frostsprängning, d.v.s. att teglet kan spricka eller att bitar kan sprängas loss.

En annan negativ effekt av fukt i teglet kan vara korrosionsskador (Gustavsson, Jönsson, & Molnär, 2017, s. 10). Icke rostfri armeringen i tegelfasader kan korrodera. Förekomsten av rost kräver hög ånghalt, vatten och syre i materialet. Järnet i armeringen korroderar och

expanderar vilket i sin tur gör att volymen av armeringen ökar. Detta leder till att horisontella sprickor uppstår mellan fog och tegel. Sprickor växer och tillåter vatten komma in i teglet, där inträngningen av vatten i värsta fall accelererar processen av korrosionen.

Vatteninträngningen kan dessutom öka risken för frostsprängning, i och med att mer mängd vatten kommer in i teglet. För att risken för frostsprängning skall finnas menar Burström att den aktuella vattenmättnadsgraden, förhållandet mellan den mängd vatten materialet innehåller och den maximala mängden vatten materialet kan innehålla, skall överstiga den kritiska vattenmättnadsgraden. Den kritiska vattenmättnadsgraden är förhållandet mellan den mängd vatten material kan innehålla och den maximala mängden vatten materialet kan innehålla utan att riskera att frysas sönder (Burström, 2007, s. 159). Den teoretiska kritiska vattenmättnadsgraden är enligt Burström $0,917 [m^3/m^3]$ för porösa material med låg draghållfasthet och det visas genom ekv 3.2.

$$S \leq \frac{wf}{wf + l * wf} \quad (Ekv 3.2)$$

där:

S: Kritisk vattenmättnadsgrad $[m^3/m^3]$

wf: Frysbart vatten i porer $[m^3]$

l: 0,09 som är expansionsfaktorn för vatten [-]

(Burström, 2007, s. 159)

Då vatten expanderar 9 % ger faktorn i nämnaren utrymme för en expandering av vattnet (Burström, 2007). Dock visar praktiska försök att detta inte stämmer utan även en mindre vattenmängd i materialet kan ge skador. För att få fram den riktiga kritiska vattenmättnadsgraden måste mätningar göras på teglet. Den kritiska vattenmättnadsgraden varierar typiskt mellan 0,25 – 0,8 (Nilsson, 2017).

En del av vattnet i tegelstenen kommer inte kunna frysa då det är hårt kapillärt bundet till sin omgivning (Burström, 2007, s. 160). Ett värde för tegel anges vara 10 % av den totala porvolymen.

En annan konsekvens som är relaterad till fukt är de biologiska angrepp (Sandin, 1995). En av förutsättningarna för att mikroorganismer skall kunna överleva är att tegelstenen är fuktad över en längre tid. Enligt Kenneth Sandin kommer den hydrofobiska ytbehandlingen kraftigt minska förutsättningarna för mikroorganismers existens på fasadväggen. Ett gränsvärde för tillväxt anges vara en relativ fuktighet på 75 % (Johansson, o.a., 2005).

3.6 Hydrofobiskt ytskikt

Ett hydrofobiskt ytskikt fungerar som en vattenavstötande impregnering, enligt leverantören Sto Scandinavia AB så skall det vara som en sorts Gore-tex för byggnadsmaterial. Dvs. att den hindrar vatten från att sugas in kapillärt men låter vatten desorberas och absorberas från materialet.

För att en kapillärsugning skall ske fordras det att materialet har de egenskaper som behövs för att ett porvattenundertryck skall bildas (Burström, 2007, s. 67). Det vill säga att fluiden har ett utrymme att stiga i och att utrymmet har rätt förutsättningar med porer som inte har för stor eller för liten porradie. Enligt Laplace's ekvation (se ekv 3.3) beror stighöjden på tre parametrar där ytspänningen och rörets radie är svåra att påverka medan randvinkeln går att influera.

$$s = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (\text{Ekv 3.3})$$

där:

r = rörets radie [m]

σ = ytspänningen mellan vätska och gas [N/m]

θ = randvinkeln [-]

(Burström, 2007, s. 67)

Per Gunnar Burström förklarar randvinkeln såhär:

”Där vattnet kommer i kontakt med en fast vägg och luft uppstår speciella attraktionskrafter på en vattenmolekyl. Denna kommer att attraheras av andra vattenmolekyler, den fasta väggen och luften. För att dessa krafter ska balansera varandra kommer vätskeytan att bilda en vinkel mot den fasta väggen” (Burström, 2007, s. 67).

Om attraktionskrafterna mot väggen är stor kan man anta ett värde på randvinkeln vilket är noll (Burström, 2007, s. 67). Detta representerar ett hydrofilt material som exempelvis tegel är. Insättning i Laplace's ekvation (ekv 3.3) ger att $\cos(0^\circ) = 1$ vilket leder till att stighöjden blir $s = \frac{2\sigma}{r}$. Det hydrofobiska ytskiktet förändrar randvinkeln genom att det tränger in i de vägar som fluiden kan sugas upp i och ändrar randvinkeln till 90° , det i sin tur gör att stighöjden enligt Laplace's ekvation blir obefintlig.

Enligt Per Andersson på Älvstranden utveckling är det rimligt att räkna med en kostnad på 3000 kr/m² för en kraftigt skadad fasad och 1500 kr/m² för en ”normalt” skadad fasad vid en renovering av fasaden och hydrofob ytbehandling (Bolminger, 2002). Av de 1500 – 3000 kronorna är 150 - 175 kr kostnaden för hydrofobering, alltså cirka 5 - 10 %. En investering på en sådan renovering minskar energiförbrukningen mellan 10 – 30 %. Är fasaden i så gott skick att den inte behöver omfattande renovering utan bara smärre justeringar kostar det runt 500 kr för en hydrofobering och det underarbete som behövs för att få bäst effekt på den hydrofoba appliceringen.

Älvstranden utveckling AB har 2007 - 2009 renoverat huset de kallar för A-förrådet med en hydrofobering av fasaden där de beräknar spara från 40 MWh till 80 MWh på ett år (Bolminger, 2002). Vilket är en sänkt energikostnad på 20 000 – 40 000 kr på ett år, för ett pris på 50 öre/kW, för en investering på 408 000 – 476 000 kr. Återbetalningstiden vid en energibesparing på 20 % blir då ca 10 – 12 år om man räknar utan avkastning.

3.7 Tilläggsisolering

Många av dagens gamla byggnader har en hög energiförbrukning. Energiförbrukningen kan minskas på många sätt. Exempelvis genom att tilläggsisolera det befintliga klimatskalet, förbättra ventilationssystem med värmeväxlare, täta klimatskalet samt byta ut fönster och dörrar mot energisnålare varianter. Det vi i denna rapporten kommer fokusera på är tilläggsisoleringen vilket kan göras antingen utvändigt eller invändigt. Det finns flera olika typer av isoleringsmaterial och alla har sina för och nackdelar, det alla har gemensamt är att dem hjälper till att hålla värmen kvar i byggnaden. Olika typer av isoleringsmaterial som finns är mineral-, stenull, polystyren/cellplast, cellulosaisolering, träfiber, perlit (Gör Det Själv, 2015).

3.7.1 Utvändig tilläggsisolering;

Vid en utvändig tilläggsisolering läggs isoleringen till på utsidan av fasaden. Vid isolering av en tegelfasad, måste grundmuren som skalet vilar på utökas då en ny fasad byggs upp med isolering och luftspalt (Bärtås, 2013). Bärtås menar på att detta är bra metod men mycket kostsam. Vid denna typ av isolering kommer den gamla delen av väggen bli både varmare och torr vilket gör att risk för köldbryggor och fuktproblem minskas. Dock så är denna teknik inte användbar på kulturmärkta byggnader då man förvanskar fasaden och kulturbevaringen.

3.7.2 Invändig tilläggsisolering

Vid en invändig isolering läggs isoleringen till på insidan av fasaden vilket gör att boytan kommer att minska beroende på hur tjock isolering som används. Den ursprungliga väggen kommer bli kallare och den relativa fuktigheten i väggen ökar således. Både fuktskador i väggen och frostsprängning i den befintliga fasaden kan då uppstå (SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2018).

4 MÄTNINGAR PÅ TEGLETS EGENSKAPER

För att bestämma vad materialet har för egenskaper för att göra en trovärdig simulering behöver man genomföra mätningar på det specifika materialet. Mätningar som har genomförts är: densitet, porositet, kapillärsugning, uttorkning, koppmetoden, TPS-analys, frostsprängning och tryckhållfasthet.

Mätningar har gjorts på tegelprover från Forsåker och ett nyinköpt massivtegel. Vid mätningar där ett hydrofobiskt ytskikt gör skillnad har mätningarna gjorts både utan och med ett hydrofobiskt ytskikt målat på ena sidan. Resultaten jämförs för att se skillnaden mellan nytt tegel och tegel från Forsåker samt hur egenskaperna ändras pga. det hydrofobiska ytskiktet.

4.1 Densitet

Densitet är ett mått på hur tätpackat ett material är. Detta kan bevisas med det kända exemplet med bomull och bly, samma volym bly och bomull väger inte samma. Blyet kommer vara flera gånger mindre än bomullen pga. att bly är ett tätpackat material medans bomull är ett glest packat. Bly har därför en högre densitet än vad bomull har.

Hypotesen är att det nya och det gamla teglet kommer ha liknade densitet då tillverkningsprocessen inte har ändrats på 5000 år (se kap 3.4). Däremot beror densiteten på lera och vilken lera det är som finns i dem två olika typerna av tegel är okänd.

4.1.1 Metod för mätning av densitet

En standard för plast och gummi granskades och anpassades för tegel. Standarden är utformad för plast och gummi men är applicerbar på tegel då det enbart är densiteten som ska mätas. Däremot tas ingen hänsyn till att verken gummi eller plast är kapillärsugande material med porer. Med andra ord, materialen som beskrivs i standarden suger inte åt sig vatten vilket tegel gör. Därför är det viktigt att innan mätningarna se till så att teglet är torrt. I standarden står det att materialet måste vara skuren i en form som är lätt att mäta, exempelvis en rektangel (Swedish standards institute, 2006). Materialets kanter får inte förstöras och så heller inte den ursprungliga cellstrukturen. Volymen på materialet måste minst vara 100 cm³ men ju större desto bättre. Varje sida på materialet bör mätas på 3 ställen för att få ut ett medelvärde då sidorna kan vara ojämna. Mätningarna enligt standarden skall göras 5 gånger på olika bitar då bitarna kan skiljas åt. Bitarna ska ha legat i standardklimat i minst 16 timmar. Standard klimat fås ur ISO 291:2008. En anpassning till de 16 timmar gjordes med avseende till tegel och bitarna låg i standardklimat i 7 dygn för att vara säkra på att de är anpassade till klimatet.

Densiteten fås ut genom att dividera massan med volymen, se ekv 4.1.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (Ekv 4.1)$$

(Swedish standards institute, 2006)

4.1.2 Resultat av densitet mätning

Mätningarna gjordes endast på en tegelbit från Forsåker med Volymen $103,5 \times 102 \times 62 \text{ mm}^3$ och en ny tegelbit med Volymen $101,5 \times 101,5 \times 61,5 \text{ mm}^3$. Därav fick teglet från Forsåker en densitet på 1822 kg/m^3 och det nya teglet en densitet på 1642 kg/m^3 .

Teglet från Forsåker har en högre densitet än det nya detta beror ofta på bränningsgraden vid tillverkningen (Burström, 2007, s. 344). En högre bränningsgrad ger en högre densitet. Därför borde teglet från Forsåker ha en högre bränningsgrad än det nya teglet. En slutsats kan då dras att det nyproducerade teglet antagligen har en högre totalporositet.

4.2 Porositet

Förutom en kompakt massa av lera består tegel av porer, vilket gör materialet genomsläppligt för vattenånga (Burström, 2007). Tegel innehåller både öppna och slutna porer. Det är de öppna porerna som bidrar till kapillärsugningen (se kapitel 2.2) medan vätska inte kan tränga in i de slutna porerna. När materialet fylls med vätska kommer bara de öppna porerna fyllas och man kan då få ut skenbar porositet. Vill den absoluta porositeten fås ut måste materialet malas ner/krossas, för att få med de slutna porerna i beräkningen. Skillnaden mellan absolut- och skenbar porositet är mycket liten för cementbundna material, exempelvis betong. Däremot för sintrat/ihop smält material, exempelvis tegel är skillnaden lite större. Detta beror på att vid ihop smältningen av materialet bildas fler slutna porer.

Hypotesen är att det nya teglet kommer ha en högre porositet på grund av att teglet från Forsåker antagligen hade en högre bränningsgrad som leder till lägre porositet. Efter okulär besiktning av teglet var det tydligt att det nya teglet har mindre men fler porer medan teglet från Forsåker har större men färre, se figur 4 och figur 5.



Figur 4 porer för nytt tegel.



Figur 5 porer för tegel från Forsåker.

4.2.1 Metod för mätning av porositet

Tegelbitar med storlek $102 \times 102 \times 61 [mm^3]$ torkades ut i en ugn på $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ valdes för att enbart all vätska ska försvinna och inte något bindningsmaterial. Därefter vägs bitarna och vikt noterades. Bitarna läggs sedan i en tät bunke där all luft sugas ut, detta sker under 3 timmar för att bilda vakuum. All luft sugas ut för att kunna vattenmätta alla öppna porer utan luft i porerna (Burström, 2007, s. 19). Efter 2 dygn i vatten vägs återigen tegelbitarna och genom ekv 4.2 fås volymen på porerna fram, då vattnets densitet är känd. Därefter fås den skenbara porositeten ut genom att ta skillnaden mellan porernas volym och den totala volymen, se ekv 4.3.

$$V_P = \frac{V_1 - V_2}{\rho_v} \quad (\text{Ekv 4.2})$$

$$P = \frac{V_P}{V_{tot}} \quad (\text{Ekv 4.3})$$

där

V_1 : Vattenmättad vikt [kg]

V_2 : Torr vikt [kg]

ρ_v : Densitet vatten [kg/m^3]

V_P : Volymen av porerna [m^3]

V_{tot} : Totala volymen [m^3]

P : Porositeten [%]

(Burström, 2007, s. 19)

4.2.2 Resultat av porositet mätning

Porositet för teglet i Forsåker uppmättes till 29,01% och det nya teglet uppmättes till 37,47%. Hypotesen stämmer då det nya teglet har en högre porositet än teglet från Forsåker. Vilket antagligen beror på bränningstemperaturen.

4.3 Kapillärsugning

Tegel som utsätts för kontakt med vatten kommer få en kapillärupptagning av vatten. Om en invändig isolering skall fungera behövs det att fukthalten i materialet skall hållas nere för att det inte skall ske någon kondensation när materialets relativa fuktighet överstiger 100 procent eller frostsprängning om temperaturen i materialet skulle gå under fryspunkten.

Enligt tillverkaren kommer det hydrofobiska ytskiktet göra så att teglet får en yta där vatten i fastfas inte kommer kunna tränga in genom porerna medan vatten i gasfas kommer kunna tränga igenom.

Hypotesen är att det behandlade teglet inte kommer öka i vikt i samma takt som det obehandlade för att den kapillära uppsugningen kommer vara kraftigt hämmad.

4.3.1 Metod för mätning av kapillärsugning

Kapillärsugningen mäts via undersökning på kapillariteten och motståndstalet hos proverna, alltså materialets förmåga att suga vatten kapillärt från en fri vattenyta. Detta görs genom att uttorkade provbitar, med kända dimensioner, placeras i en burk med en disktrasa i botten (figur 6) (Segerholm, 2015). Disktrasan täcks precis med vatten. När vattenfronten når överytan av provkroppen sägs den vara kapillärt mättad och det är nu den når den så kallade knickpunkten. Proverna vägs med jämna mellanrum baserat på roten ur tiden. Med den kända knickpunkten kan sedan kapillaritet (A) och motståndstalet (m) beräknas med hjälp av ekv 4.4 och 4.5.

$$A = \frac{W_k}{\sqrt{t_k}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \times \sqrt{\text{s}}} \right] \quad (\text{Ekv 4.4})$$

$$m = \frac{t_k}{h^2} \quad \left[\frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{Ekv 4.5})$$

där

W_k : Fukthalten vid knickpunkten [kg/m^2]

t_k : Tiden vid knickpunkten [s]

h : höjden på provet [m]

(Burström, 2007, s. 72)



Figur 6 uppställning för kapillärsugnings mätningarna. Prov 1–3 är tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt, prov 4–6 är nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt. Prov 7–9 är nytt tegel utan hydrofobiskt ytskikt och prov 10–12 är tegel från Forsåker utan hydrofobiskt ytskikt.

4.3.2 Resultat av kapillärsugningsmätning

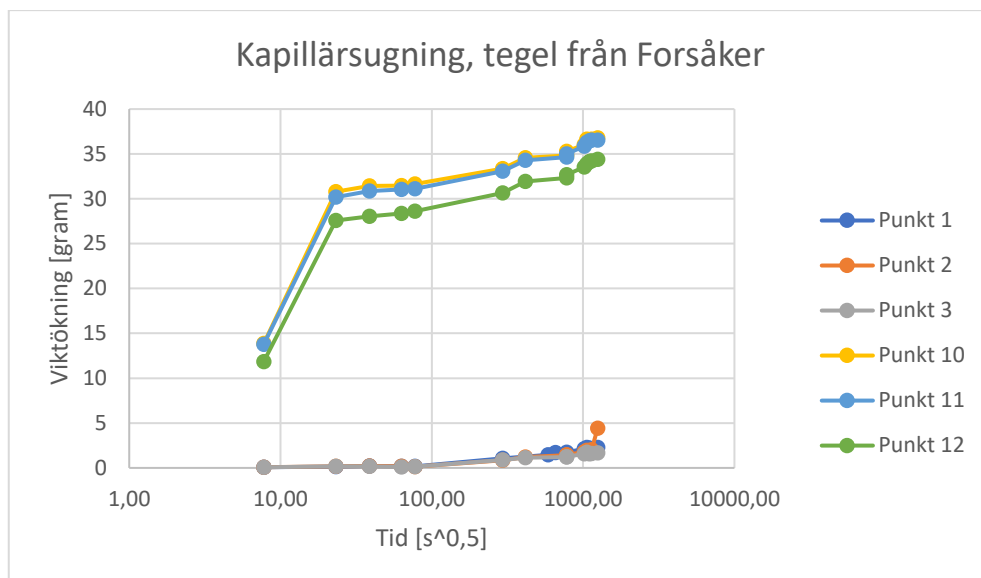
En tydlig skillnad syns mellan bitarna som har blivit behandlade med hydrofobiskt ytskikt och inte. Dem som har blivit hydrofoberade har knappt ökat i vikt under de 18 dygn som mätningarna gjordes. Dem som inte blivit behandlade med hydrofobiskt ytskikt har ökat i vikt snabbt, speciellt under de första 10 minuterna. I kapitel 3.6 har det hydrofobiska ytskiktet definierats som ett goretex-material, det släpper inte in något vatten men fukt kan transporteras igenom.

Viktökningen på bitarna med hydrofobiskt ytskikt beror på att den relativa fuktigheten i burkarna är 100% och eftersom de har täckts av ett lock kommer teglet ta upp fukten genom absorbering. Detta kan inte beskrivas som kapillärsugning och därför kan värdet sättas till noll. I figur 7 syns det tydligt skillnaden mellan proverna som blivit behandlade med hydrofobiskt ytskikt och inte. Där det är ljusare har teglet blivit behandlat och är torrt och kan därmed inte suga upp någon vätska.

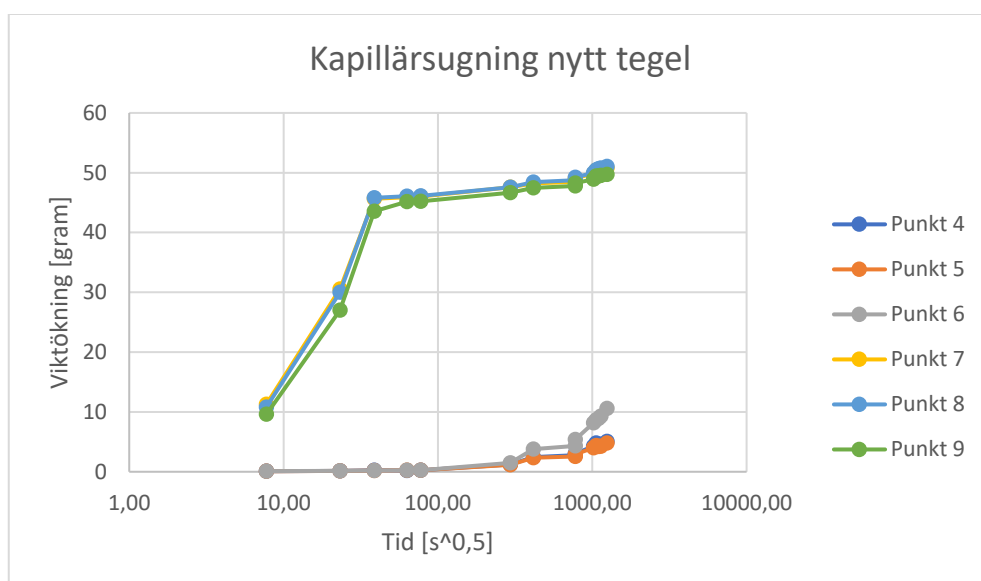


Figur 7 Bilden visar hur det hydrofobiska ytskiktet har påverkat uppsugningen. Tegelbiten till vänster är från Forsåker och tegelbiten till höger är nyproducerad.

På bitarna utan hydrofobiskt ytskikt kan en knickpunkt fås ut. Det är punkten där biten har sugit upp vatten genom hela tjockleken ända upp till ytan. Knickpunkten fås ut genom figur 8 och 9 och är där grafen bryts. Med hjälp av knickpunkten kan kapillariteten och motståndstalet beräknas.



Figur 8 viktökningen på tegel från Forsåker sker genom kapillärsugning med avseende på $\sqrt{t}$. Punkt 1–3 är med hydrofobiskt ytskikt och punkt 10–12 är utan hydrofobiskt ytskikt.



Figur 9 viktökningen på nytt tegel sker genom kapillärsugning med avseende på $\sqrt{t}$. Punkt 4–6 är med hydrofobiskt ytskikt och punkt 7–9 är utan hydrofobiskt ytskikt.

I tabell 2 finns de beräknade värdena för kapillaritet och motståndstal för tre nya tegelbitar, punkt 7–9 och tre tegelbitar från Forsåker, punkt 10–12. Det nya teglet har ett medelvärde på kapillariteten på $0,16 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$ och ett motståndstal på $3,1 \cdot 10^6 \text{ s/m}^2$ medan teglet från Forsåker har ett medelvärde på kapillariteten på $0,18 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$ och motståndstalet på $1,15 \cdot 10^6 \text{ s/m}^2$. Teglet från Forsåker har ett lägre värde på motståndstalet, vilket betyder att det är ett mer grovporöst material än vad det nya teglet vilket har finare porer (Burström, 2007, s. 72).

Tabell 2 kapillariteten och motståndstal för olika prover.

Punkt	Kapillaritet, A [kg/m ² s ^{0,5}]	Motståndstal, m [s/m ²]
7 (nytt)	0,161	3,062*10 ⁶
8 (nytt)	0,161	3,057*10 ⁶
9 (nytt)	0,154	3,166*10 ⁶
10 (Forsåker)	0,187	1,161*10 ⁶
11 (Forsåker)	0,186	1,147*10 ⁶
12 (Forsåker)	0,172	1,131*10 ⁶

Enligt tabell 5.11 i byggnadsmaterial boken bör kapillaritetskoefficienten (A), ligga på 0,37 kg/m²s^{0,5} (densitet på 1700 kg/m³) eller 0,09 kg/m²s^{0,5} (densitet på 1900 kg/m³). Och ett motståndstal, m, på 0,5*10⁶ s/m² (densitet på 1700 kg/m³) eller 2,0*10⁶ s/m² (densitet på 1900 kg/m³) (byggnadsmaterial s.95). De uppmätta värdena ligger inom detta intervall.

4.4 Uttorkning

Byggnader i Sverige blir utsatta för hårda väderklimat och mycket regn, det är därför viktigt att byggnadens ytterväggar ska kunna motstå detta. Vatten kondenserar då varm och fuktig luft kyls ner, detta beror på att kall luft inte kan bära lika mycket fukt som varm luft. Skador genom frostsprängning uppstår på byggnader då den aktuella vattenmättnadsgraden, S_{aktuell} är större än teglets kritiska vattenmättnadsgrad S_{krit} (Burström, 2007, s. 557). Detta uppstår ofta på en Söderfasad som blir utsatt för slagregn. Tegelfasader vittrar då sönder och behöver repareras oftare än övriga fasader.

Väggar som blir utsatta för mycket regn blir även lättare utsatta för mögelsvamp då fasaden är mycket fuktig. Genom att väggen snabbt kan torka ut kan man undvika en del av problemen men det bästa är att utforma väggen så att fukt inte överhuvudtaget kommer in. Att motverka att fukt kommer in i väggen kan göras med ett hydrofobiskt ytskikt på utsidan.

Ett annat problem är att fukten inifrån kan transporteras i väggen. Att beräkna uttorkningsförloppet är komplicerat då det är ett icke stationärt förlopp där transportkoefficienten varierar med fukthalten i väggen (Burström, 2007, s. 85). Detta görs med hjälp av ett beräkningsprogram. För att få fram materialdata för beräkningarna kan en enklare mätning göras, för att se om nytt tegel och tegel från Forsåker skiljer sig åt samt om det hydrofobiska ytskiktet har någon påverkan.

Hypotesen är att det inte kommer vara någon större skillnad mellan uttorkningsförloppet på dem med hydrofobiskt ytskikt och med dem utan. Däremot kommer det nya teglet torka ut snabbare än det gamla då det nya har ett bättre fördelat porsystem som fungerar som vägar för vattnet.

4.4.1 Metod för uttorkning av tegel

I dessa mätningar undersöks uttorkningsförmågan hos teglet, det vill säga hur snabbt materialet torkar ut i ett konstant klimat. Detta görs genom att proverna vattenmättats och dimensioner på teglet mäts (Segerholm, 2015). Sedan torkas dem ut i ett konstant rumsklimat (Temperatur på 20° Celsius och Relativ luftfuktighet, RF, på ~ 30%). Vikten noterades vid jämna mellanrum med hänsyn till $\sqrt{t}$. Under uttorkningen ställs bitarna på ett ställ för att kunna torka ut åt alla sidor, se figur 10. Efter 7 dygn avslutades mätningarna i rumsklimatet och tegelbitarna ställdes in i en ugn på 105° C, där allt vatten som inte är kemiskt bundet förångas. Detta görs för att kunna bestämma vikten vid helt uttorkat tillstånd.



Figur 10 uppställningen för proverna som används för uttorkningsmetod.

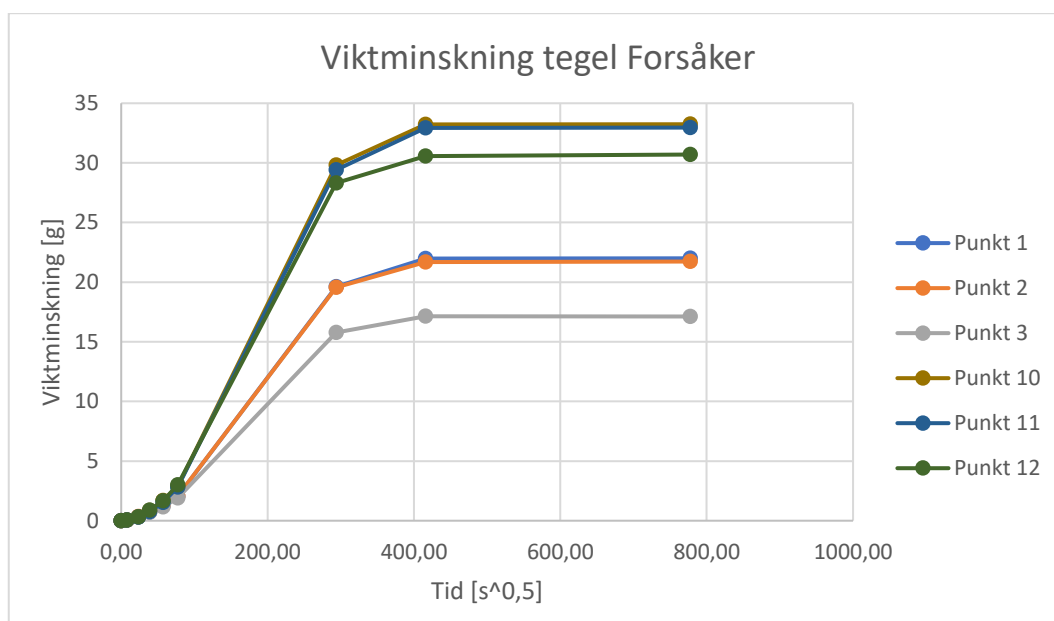
Därefter kan fuktkvoten för respektive mätvärde räknas ut med hjälp av följande ekvation;

$$u = \frac{\text{Förågningsbara vattnets vikt}}{\text{Materialets torra vikt}} \quad (\text{Ekv 4.6})$$

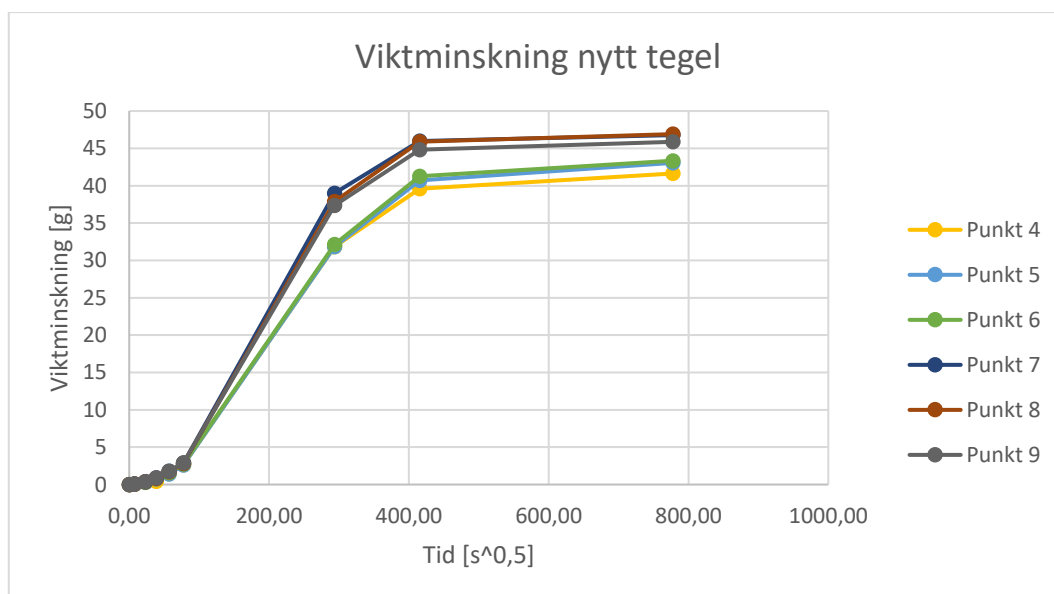
(Burström, 2007, s. 62)

4.4.2 Resultat för uttorkningsmätning

Grafer plottades för uttorkningsförloppet med hänsyn till $\sqrt{t}$. Figur 11 och 12 visar uttorkningsförloppet där det är tydligt att den hydrofobiska ytbehandlingen inte påverkar uttorkningen. Skillnaden mellan proverna är att vattenmängden från början är mindre på de med hydrofobiskt ytskikt. Detta beror att proverna inte vakuummättades innan vattenmätning och att dem då inte kan anses som fullt vattenmättade. De olika proverna har även olika andel porer vilket gör att de kan ta upp olika mycket vatten, därför blir det en viss spridning. Det syns även tydligt att det nya teglet har en mycket mindre spridning och visar därmed att det nya teglet har en bättre kvalitetssäkring än det gamla.



Figur 11 viktninskningen för tegelprover från Forsåker med avseende på roten ut tiden. Punkt 1–3 är med hydrofobiskt ytskikt och punkt 10–12 är utan hydrofobiskt ytskikt.



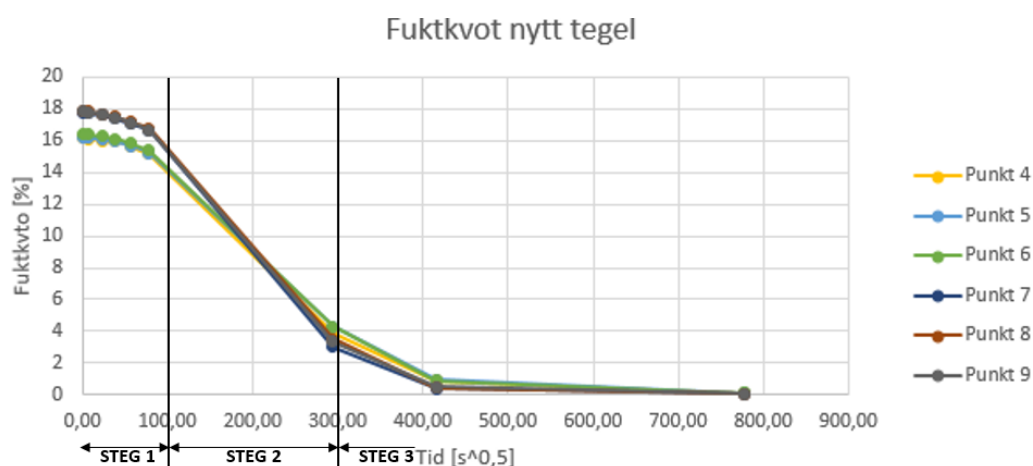
Figur 12 viktninskningen för nytt tegel med avseende på roten ut tiden. Punkt 4–6 är med hydrofobiskt ytskikt och punkt 7–9 är utan hydrofobiskt ytskikt.

Fuktkvoten plottas med hänsyn till $\sqrt{t}$ och kan ses i figur 13 och 14. Steg 1 i figurerna visar då uttorkningen sker från ytan tills ytan kommer i balans med omgivningen (Segerholm, 2015). Detta skedde under de första 3 timmarna ($100 \text{ s}^{0,5}$). Detta steg pågår tills materialets yta inte längre hålls fuktig på grund av att fukthalten och då den kapillärsugandeförmågan inte är tillräckligt stor. Efter detta steg kommer vattnet behövas transporteras till ytan, steg 2. Vattnet transporteras då en längre väg och uttorkningshastigheten minskas med uttorkningstiden. I steg 3 går uttorkningshastigheten långsammare detta beror på att fukttransporten nu sker från den borte begränsningsytan. Fuktkvoten går i detta steg mot noll, alltså mot att bli helt torr.

Uttorkningshastigheten skiljer sig ypperst lite mellan det nya teglet och det gamla men det nya torkar ut lite långsammare. Detta kan bero på att vattenmängden som torkas ut är större än i teglet från Forsåker.



Figur 13 grafen visar hur fuktkvoten beror av roten ur tiden vid uttorkning av teglet från Forsåker. Prov 1–3 är med hydrofobiskt ytskikt och prov 10–12 är utan.



Figur 14 grafen visar hur fuktkvoten beror av roten ur tiden vid uttorkning på nytt tegel. Prov 4–6 är med hydrofobiskt ytskikt och prov 7–9 är utan.

4.5 Koppmetoden

Det har förklarats i avsnitt 2.2 i rapporten hur fukt transporteras i materialet. Transporten i vätskefas kan ske som kapillärtransport medan transporten av vattenånga sker genom antingen diffusion eller konvektion. Genom den här mätningen studeras transporten av vatten i ångfas genom diffusion. Diffusion sker till följd av en koncentrationsskillnad mellan två material. I detta fallet är diffusionen vattenmolekylernas rörelse genom tegelmaterialet.

Syftet med koppmetoden är att bestämma ångpermabiliteten där materialets motstånd (Z_{material}) beräknas och därmed kan ånggenomsläpplighet erhållas för tegelbitarna (δ_{material}).

En konstant viktnedgång genom tid för proverna förväntas att fås. Där de proverna som är behandlade med hydrofobiskt ytskikt inte kommer skilja sig nämnvärt ifrån de obehandlade, då ytskiktet enbart avisar vatten i fastfas.

4.5.1 Metod för att mäta ångpermabiliteten

Koppmetoden är en standardmetod som används för att bestämma ångpermabiliteten (σ) och ångmotståndet (Z) för ett material. Tegelprover som har en specifik tjocklek och specifik diameter (d) placeras som ett lock till en kopp som innehåller vatten, se figur 7 (Burström, 2007). Relativ fuktighet inne i koppen är 100% mellan vattenytan och provet. Proverna placeras i ett rum som har konstant temperatur på $+20^\circ\text{C}$ och relativ fuktighet på 50%. På grund av ånghaltsskillnaden mellan luften i koppen och luften i rummet kommer vattenånga att förflyttas ut ur koppen genom teglet. En förutsättning är att sidoytorna på proverna är helt lufttäta för att säkerställa att ingen vattenånga kan komma ut genom sidoytorna. Proverna vägs vid två tillfällen med hänsyn taget till ett långt tidsmellanrum mellan dess tillfällen. Minskning i vikt skall vara konstant emellan de två mätningarna.

Mätningen gordes på tolv olika prover, sex bitar från Forsåker och sex stycken är nytt tegel. Tre bitar av varje sort, gamla respektive nya stenar, är målade med hydrofobiskt ytskikt. Hydrofobiskt ytskikt tillämpas på bottenytan av proverna då denna sida representerar den yttre sidan av väggen. I normalt tillstånd sker flödet av vattenånga från insidan av väggen till utsidan. Men på grund av att en ångspärr kommer att tillämpas på innersidan av väggen kommer vattenånga att påverka utsidan av väggen mest. Därför togs det hydrofobiska ytskiktet nedåt istället för uppåt.



Figur 7: Prov nr.6 är nytt tegel, hur försöket är utformat med kopp och tegel.

Vikterna för samtliga prover dokumenteras med hänsyn till tiden. Efter att det gått att säkerställa att vattenminskning är konstant över tiden kan ångpermabiliteten beräknas enligt följande formler:

Först beräknas flödet av vattenånga:

$$g = \frac{m_1 - m_2}{t_2 - t_1} * \frac{1}{A} \quad [\text{kg}/(\text{m} * \text{s}^2)] \quad (\text{Ekv 4.7})$$

där

t_1 : Tidpunkt för vägning 1

t_2 : Tidpunkt för vägning 2

m_1 : Vikt vid tidpunkt 1

m_2 : Vikt vid tidpunkt 2

A : Arean på ytan som ånga kan transporteras genom

(Burström, 2007, ss. 78-80)

Luftsmotståndet beräknas med hjälp av:

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad [\text{s}/\text{m}] \quad (\text{Ekv 4.8})$$

där

D : Tjockleken på luftspalten $[\text{m}]$

δ_v : Transportkoefficient för stillastående luft som sätts till $25 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$

(Burström, 2007, ss. 78-80)

Materialsmotståndet Z_{material} beräknas med hjälp av:

$$\Delta v = g \times Z_{\text{tot}} \rightarrow Z_{\text{material}} = \frac{\Delta v}{g} - Z_{\text{luftspalt}} \quad (\text{Ekv 4.9})$$

där

g : Flödet av vattenånga

Δv : Skillnaden i ånghalt mellan vätskeyta och rummet sätts till $8,66 \cdot 10^{-3} \text{ [kg}/\text{m}^3]$

(Burström, 2007, ss. 78-80)

Ångpermabiliteten som fås ut för materialet beräknas med hjälp av ekv 4.10

$$\delta_{material} = \frac{d_{material}}{Z_{material}} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (\text{Ekv 4.10})$$

där

$d_{material}$: Tjockleken på tegelbiten

(Burström, 2007, ss. 78-80)

I WUFI-beräkningarna behövs en faktor μ som beskriver skillnaden mellan ångpermabiliteten för luft och material och fås fram genom;

$$\mu = \frac{\delta_{luft}}{\delta_{material}} [-] \quad (\text{Ekv 4.11})$$

(WUFIwiki, 2009)

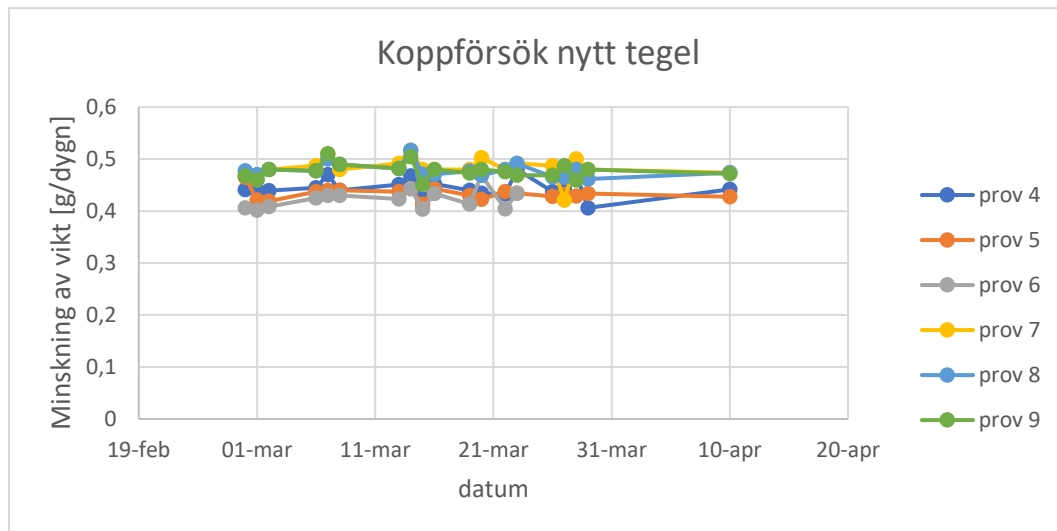
4.5.2 Resultat på koppmetodsmätning

I figur 15 och 16 kan man se att viktnedgången är stabil och det är då beräkningar kan börja göras.

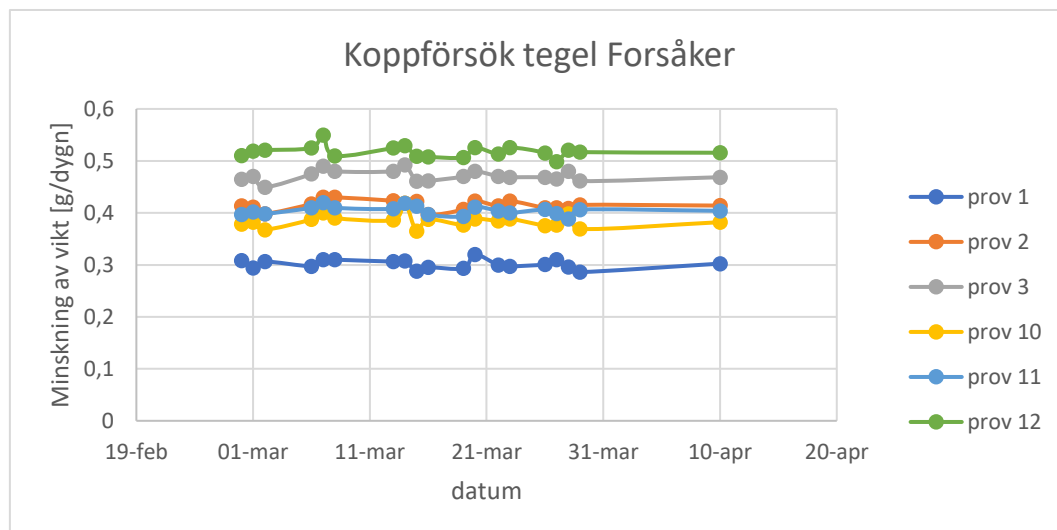
Ångpermabiliteten, δ , för respektive uppsättning beräknas med hjälp av formlerna i ovanstående kapitel. I tabell 3 visas resultat för både ångpermabiliteten och diffusionsmotståndsfaktorn, μ . Följande medelvärden finns fram;

- Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt fick en ångpermabilitet på $2,36 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$ och diffusionsmotståndsfaktorn på 10,90.
- Tegel från Forsåker utan hydrofobiskt ytskikt en ångpermabilitet på $2,61 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$ och diffusionsmotståndsfaktorn på 9,57.
- Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt ger en ångpermabilitet på $2,87 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$ och diffusionsmotståndsfaktorn på 8,72.
- Nytt tegel utan hydrofobiskt ytskikt ger en ångpermabilitet på $2,55 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$ och diffusionsmotståndsfaktorn på 9,97.

Slutsatsen är att skillnaden mellan de med hydrofobiskt ytskikt och de ej behandlade tegelstenarna är minimal. Den hydrofobiska behandlingen kan ha gett en liten ökad motståndsfaktor till teglet och en högre ångpermabilitet. Men då skillnaden är så liten behövs fler tester för att säkerställa resultatet. Det är även en stor spridning i resultatet mellan resultatet på tegelstenarna från Forsåker tillskillnad från spridningen mellan resultaten på det nya teglet.



Figur 15 grafen visar hur vikten minskat i koppmetoden per dygn för nytt tegel.



Figur 16 grafen visar hur vikten minskar i koppmetoden per dygn för tegel från Forsåker.

Tabell 3: Tabellen visar ångpermabiliteten och diffusionsmotståndsfaktorn för respektive material.

Prov	Ångpermabilitet material, δ [$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]	Diffusionsmotståndsfaktorn, μ [-]
1. Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt	1,873	13,350
2. Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt	2,378	10,512
3. Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt	2,825	8,849
4. Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt	2,655	9,415
5. Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt	2,584	9,675
6. Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt	2,595	9,633
7. Nytt tegel	2,892	8,644
8. Nytt tegel	2,902	8,614
9. Nytt tegel	2,806	8,910
10. Tegel från Forsåker	2,288	10,929
11. Tegel från Forsåker	2,328	10,740
12. Tegel från Forsåker	3,034	8,240

4.6 TPS-Analys

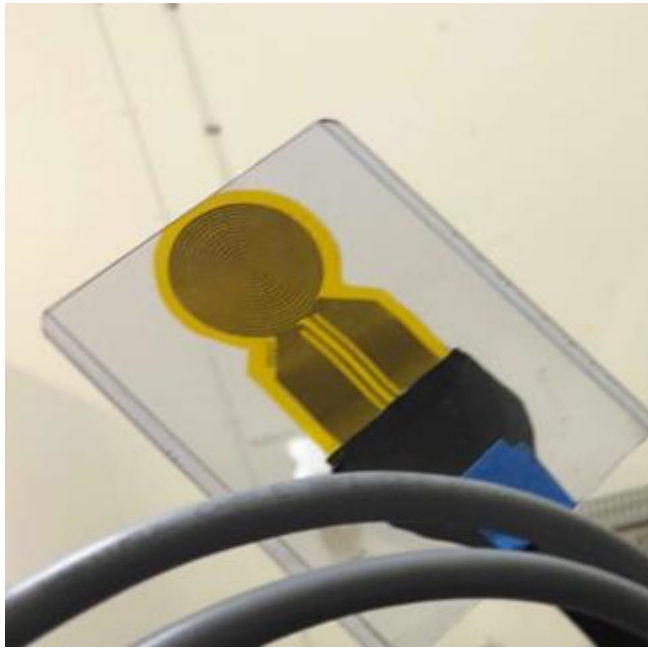
The Transient Plane Source (TPS) är den vanligaste metoden för att få fram termisk konduktivitet (λ) och termisk diffusivitet (α) för olika material. Termisk konduktivitet är ett värde på hur bra ett material släpper igenom energi och har enheten W/mK, brukar även kallas för värmeledningsförmåga. Termisk diffusivitet mäter värmeöverföringshastigheten från den varma sidan till den kalla och har enheten m^2/s .

Instrumentet som används för TPS är The Hot Disk Thermal Constant som kan mäta värmeledningsförmåga mellan 0,01 och 400 W/mK (Hot Disk, 2009).

En lägre värmeledningsförmåga för nytt tegel förväntas erhållas då värden som fås fram genom tidigare mätningar visar att porositeten är större hos det nya teglet än det från Forsåker. Porerna spelar en stor roll för värmeledningsförmåga i ett material för att luften som finns i porerna har ett lägre λ -värde än vad det fasta materialet har. En högre porositet kommer därmed leda till ett lägre värde på värmeledningsförmågan hos materialet. Den specifika värmekapaciteten förväntas även vara lite lägre för det nya än på det gamla teglet på grund av skillnaden i porositeten.

4.6.1 Metod för att mäta värmeledningsförmåga

Värmeledningsförmågan mäts genom att använda ett instrument som består av sensorer som visas i figur 17. Sensorn finns i olika diametrar och mätmoduler och en sensor valdes som passar materialets storlek (Hot Disk, 2009). Sensorn som användes var 6,364 mm i diameter då materialet som användes är ett poröst keramiskt material med en tjocklek på 25 mm.



Figur 17 sensorn som användes för att mäta värmeledningsförmågan.

Runtom sensorn finns ett skikt av kapton, vilket är ett slags isoleringsmaterial (Hot Disk, 2009). Sensorn placeras mellan två tegelprover. I datorn som är kopplad till sensorn skrivs redan känd data in. Därefter startar mätningarna, då ökar temperaturen som sensorn avger. Den ökar tillräckligt mycket för att kunna användas som värmekälla för att tillföra värme till tegelbitarna. Efter cirka 40 sekunders mätning fås en graf fram på datorn. Resultatet som fås upp är 200 punkter i en graf som visar sambandet mellan temperatur och tid. En uppskattning av hur många punkter som väljs från kurvan bör ligga mellan 3 och 200 punkter. Detta väljs på grund av att isoleringen runt sensorn påverkar punkter i början av kurvan. Därför är dessa punkter lämpliga att ta bort. Några punkter i slutet av kurvan bör även tas bort. Detta görs för att säkerställa att valda punkter inte störs av sidoytorna. Intervallet som valdes för mätningarna var mellan 30 och 160 punkter. Teglet som användes till mätningen har legat i en vecka i ett konstant klimatrum med 20 °C och 50 % RF.

Ur TPS-analysen fås värden för konduktans fram. Ur konduktansen kan den specifika värmekapaciteten hämtas genom formeln för diffusion;

$$a = \frac{\lambda}{\rho * cp} \quad (\text{Ekv 4.12})$$

där

λ : Värmeledningsförmåga [W/mK]

ρ : Densitet [kg/m³]

C_p : Specifika värmekapaciteten [J/kgK]

Ur denna formel kan den specifika värmekapaciteten c_p brytas ut till

$$cp = \frac{\lambda}{\rho * a} \quad (\text{Ekv 4.13})$$

En enhets analys ger oss

$$\frac{\frac{W}{m \cdot K}}{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s}} = \frac{W \cdot s}{kg \cdot K} = \frac{J}{kg \cdot K} \quad (\text{Ekv 4.14})$$

4.6.2 Resultat av TPS-analys

Följande resultat från TPS-analysen erhålls, se tabell 4

Tabell 4: Tabellen visar värdena som fåtts fram genom TPS-analysen.

Typ av tegel	Punkter	Termisk konduktivitet, λ [W/m.K]	Diffusivitet, a [m ² /s]	Specifik värmekapacitet, C_p [J/kg.K]
Nytt tegel	50–160	0,55126	0,49181*10 ⁻⁶	682
Tegel från Forsåker 1	30–160	0,61375	0,46714*10 ⁻⁶	721
Tegel från Forsåker 2	30–160	0,60842	0,45676*10 ⁻⁶	731

Den termiska konduktiviteten (λ) är lägre hos det nya teglet eftersom porositeten är högre än porositeten på teglet från Forsåker. Den specifika värmekapaciteten är lite lägre för det nya teglet för att det har högre porositet och därmed lägre densitet. Om man även delar den specifika värmekapaciteten [J/kg.K] med densiteten för att få fram värmekapaciteten och jämföra de två tegelsorterna blir de väldigt lika vilket är typiskt för material av samma råmaterial men med olika porositet (Burström, 2007, s. 49).

Tabell 5: Tabellen visar specifik värmekapacitet, densitet och värmekapacitet för gamla och nya teglet

Typ av tegel	C_p [J/kg.K]	ρ [kg/m ³]	C [J/k]
Tegel från Forsåker 1	726	1822	0,398
Nytt tegel	682	1642	0,415

4.7 Frostsprängning

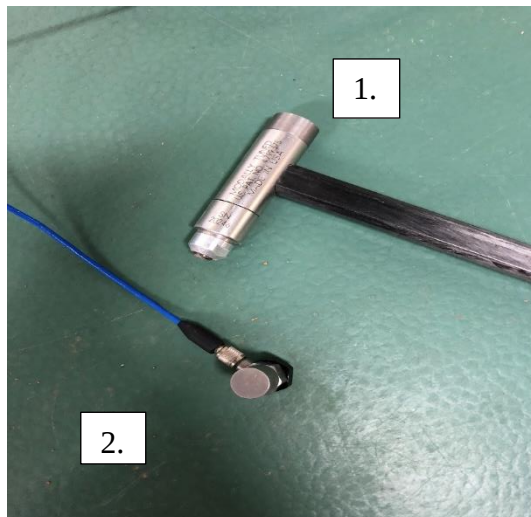
Poror i tegelstenar som befinner sig i standard klimat innehåller både luft och vatten. Vid låga utetemperaturer fryser vattnet som finns inne i materialet och omvandlas till is som kan orsaka skador. Fryst vatten har en större volym än vatten i fastform. Volymen ökar med 9% från när den går från flytande- till fastform (Burström, 2007). Det vill säga vattnet expanderar när det går över till fast fas. Detta leder i sin tur till att ett tryck bildas mellan materialets molekyler vilket gör att sprickor uppstår i materialet som kan skadas allvarligt. När sprickor i material uppstår pga. expanderande kallas processen för frostsprängning. Ett sätt för att undersöka materialproverna är att mäta egenfrekvens på teglet när de är vattenmättade (Segerholm, 2015). Sedan frysa in proverna och ta dem och då återigen mäta egenfrekvensen. Frostsprängning ses genom att en lägre egenfrekvens för de tinade provkroppar förväntas få än egenfrekvensen från initialt tillståndet.

Då material inte är helt mättat utan det fortfarande finns luft kvar i porerna finns det utrymme för vattnet att expandera, därför kan det krävas upprepade frysningsscykler för att se en tydlig skillnad i egenfrekvens.

4.7.1 Metod för att mäta frostsprängning

Proven som används i frostsprängning är 14 provkroppar av både tegel från Forsåker och nyproducerat tegel. Innan mätningarna utförs placeras bitarna i vatten under sju dygn för att vattenmättas. Proverna skulle vakuumeras för att säkerställa att alla porer inte skulle innehålla luft, men på grund av att en tegelvägg i vanliga fall står ute genomfördes inte detta för att tegelväggens porer ska innehålla både vatten och luft.

Egenfrekvensen mäts i luft vid 20°C för samtliga provkroppar med ultraljud (Thorsell, 2013). Ett lätt slag görs med en liten oscillator (figur 14) på den korta sidan av proverna. På den andra kortsidan sätts en mottagare (accelerometer) (figur 14) i en specifik punkt. Mottagaren är kopplad till ett oscilloskop som visar frekvensen vid denna punkt. Därefter förvaras provkropparna i plastpåsar var för sig och placeras i frysen i -20°C. Mätning av egenfrekvens görs om två gånger, efter 48 timmar direkt efter att proverna tagits ut från frysen och efter 1 dygn av upptining. Vikten av provkropparna tas efter varje frekvensmätning.



*Figur 18 instrumenten som används i frostsprängningsprov.
Instrument 1 kallas oscillator och instrument 2 kallas
accelerometer(mottagare)*

4.7.2 Resultat av frostsprängningsmätning

I tabell 6 kan man se att frekvensen knappt har minskat mellan mätningarna från initial tillståndet tills den blivit tinad. Proverna har även inte fått någon synlig yttre skada såsom sprickor. Skillnaden som har blivit är på grund av att vatten från bitarna har försvunnit under frysprocessen (se bilaga 2 för vikt av samtliga prover) (Machowski, 2018). Ljudets hastighet i vatten är 1480 m/s medans den i luft är den 330 m/s. Högre hastigheter ger högre egenfrekvenser då:

$$f_0 = \frac{c}{2L} \quad (\text{Ekv 4.15})$$

där

c: ljudets hastighet i ett specifikt material [m/s]

L: Längden på provkroppen ljudets färdas igenom [m]

(Machowski, 2018)

Eftersom vatten har gått bort från proverna är det inte konstigt att även frekvensen minskas då c kommer få ett värde mellan det för vatten och luft.

Tabell 6: Visar resultatet från frostsprängnings mätningarna.

Provkropp;	Frekvens, initialtillstånd [kHz]	Frekvens, fryst [kHz]	Frekvens, tinad [kHz]
1. Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt	10,82	16,04	10,77
2. Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt	10,43	15,38	10,34
3. Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt	11,03	15,56	11,06
4. Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt	6,105	13,57	5,96
5. Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt	5,585	13,19	5,38
6. Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt	5,27	12,87	5,21
7. Nytt tegel	5,845	13,78	5,61
8. Nytt tegel	5,89	14,19	5,81
9. Nytt tegel	5,15	15,49	6,54
10. Tegel från Forsåker	10,17	17,72	10,05
11. Tegel från Forsåker	10,55	17,53	10,45
12. Tegel från Forsåker	11,51	18,09	11,32
13. Nytt tegel (stor bit)	6,95	14,4	6,875
14. Tegel från foråker (stor bit)	11,03	17,26	10,96

Felkällor som kan uppstått då ingen bit gav något större utslag;

- Proverna var inte vattenmättade från början utan det finns luft i porerna pga. att proverna inte vakuum mättades. När vattnet expanderar vid frysningen kommer luften skjutas bort och ut ur porerna. När porerna är helt vattenmättade och prover fryses expanderar vattnet och har ingenstans att ta vägen och det kommer då istället bli ett stort tryck på den fasta tegelmassan och sprickor uppstår.
- Mätningarna gjordes bara en gång. Det kan hända att vid ett upprepat antal gånger att differensen blir större.

4.8 Tryckhållfasthet

Hållfasthet för ett material är materialets förmåga att stå emot tryckbelastning och krafter som det utsätts för (Ljungkrantz, Möller, & Petersons, 1994, s. 333). Tryckhållfasthetstest används för att mäta hållfastheten på material. På grund av att tegel och andra keramiska material har starka bindningskrafter mellan atomerna har det en hög beständighet mot krafter.

Hållfastheten för ett material kan granskas genom att analysera hur materialet beter sig genom att det blir utsatt för en tryckande kraft tills det krossas.

Resultatet som förväntas är en högre tryckhållfasthet för det nya teglet. Då teglet i Forsåker har varit i bruk i minst 120 år gissar vi på att det fått skador genom frostsprängning alternativt saltsprängning då det fanns mycket saltutfällningar på väggen under fältundersökningen.

4.8.1 Metod för att mäta tryckhållfastheten

Tryckhållfastheten för tegel bestäms i laboratorieundersökningar genom att hämta en provkropp med specifik storlek. Undersökningen tillämpas på två olika prover, ett tegel som hämtas från Forsåker och ett nytt tegel. Tegelbitarna har en storlek på $102 \times 102 \times 62 \text{ mm}^3$.

Prover placeras i rumstemperatur med 20°C , under fem dagar innan de utsätts för tryck. Varje prov utsätts för tryckbelastningar som höjs stegvis. Figur 19 visar maskinen som används, den nedre plattan trycks upp med en kraft som ökar gradvis. Högsta lasten precis innan provet går sönder kallas för brottlast och definieras som F_u (Ljungkrantz, Möller, & Petersons, 1994, s. 333). Spänningen är belastning som tillämpas per area enheten och beräknas genom:

$$f_c = \frac{F_u}{A} \quad (\text{Ekv 4.16})$$

där

F_c : Spänningen [N/mm^2]

F_u : Brottlast [N]

A : Tvärsnittarea [mm^2]

(Ljungkrantz, Möller, & Petersons, 1994, s. 333)



Figur 19 Apparaten som används för att trycka sönder proverna.

Ojämna tryckytor kan orsaka avvikelser i resultatet. Trycket stoppar automatiskt då materialet går sönder. Ojämna ytor kan därmed ge avvikande resultatet och lägre värden på hållfastheten kan fås ifall ytorna är sneda eller skrovliga. Därför måste såväl över som underytan vara så jämn som möjligt för att få rätt resultat. Alternativt infogas i något som har en högre hållfasthet såsom betong.

Friktionskrafter uppstår mellan provens ytor och tryckplattorna och kan ge utslag som hållfasthetshöjande samt ge en högre brottlast (Ljungkrantz, Möller, & Petersons, 1994). För att minimera friktionskrafterna används ett glidlager som placeras mellan provkroppen och tryckplattan.

4.8.2 Resultat av tryckhållfasthetsmätning

Tryckprovning utförs på två tegelbitar från Forsåker och två nya tegelbitar. Tabell 7 visar spänningarna och ett medelvärde för teglet från Forsåker uppskattas till 41,265 [N/mm²] för nya teglet 37,585 [N/mm²]. Det är ingen stor skillnad som uppstår mellan de olika proverna. Teglet från Forsåker har en högre tryckhållfasthet men resultatet bör övervägas då det är få prover som mätts. Proverna som mätts är ett litet urval och redan inre skador som sprickor kan ha funnits i materialet innan mätningens start. Ojämna ytor kommer även det påverka resultatet. Men en slutsats kan dras efter mätningarna och det är att det inte är någon större skillnad mellan teglet från Forsåker och det nya teglet när man kollar på tryckhållfasthet.

Tabell 7: Visar krafter och tryckhållfasthet för provbitarna.

Typ av tegel	Fu [KN]	Fc [N/mm ²]
1. Tegel från Forsåker	384,41	38,44
2 Tegel från Forsåker	440,88	44,09
3. Nytt tegel	356,12	35,61
4. Nytt tegel	395,64	39,56

4.9 Sammanställning av samtliga mätningar

I tabell 8 finns en sammanställning av samtliga resultat från mätningarna som gjordes.

Tabell 8: Visar en sammanställning över mätningsresultat på teglet.

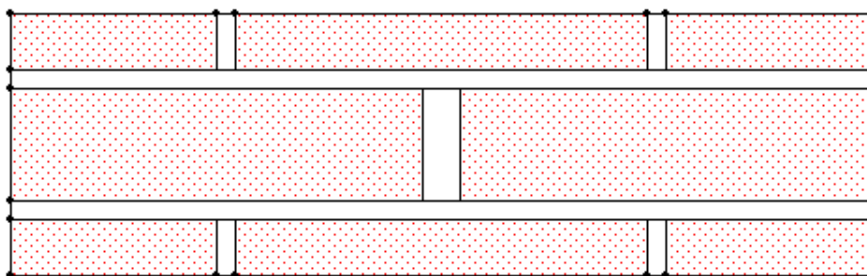
	Nytt tegel	Nytt tegel med hydrofobiskt ytskikt	Tegel från Forsåker	Tegel från Forsåker med hydrofobiskt ytskikt
Densitet [kg/m ³]	1642	1642	1822	1642
Skenbarporositet [%]	37,47	37,47	29,01	29,01
Kapillariteten [kg/m ² s ^{0,5}]	-	0,16	-	0,18
Motståndstal [10 ⁻⁶ s/m ²]	-	3,1	-	1,15
Ångpermabilitet [10 ⁻⁶ m ² /s]	2,55	2,87	2,61	2,36
Diffusionsmotståndsfaktorn [-]	9,97	8,72	9,57	10,90
Termisk konduktivitet [W/m·K]	0,551		0,611	
Diffusivitet [10 ⁻⁶ s/m ²]	0,492		0,462	
Specifik värmekapacitet [J/kg·K]	682		726	
Tryckspänning [N/mm ²]	37,585		41,265	

5 WUFI BERÄKNINGAR

5.1 Valda parametrar

Genom WUFI-beräkningar fås värden fram på hur temperatur och fukt transporteras genom en vägg. Olika typer av väggar simulerades för att få fram en vägg som är fuktsäker och får ett U-värde som står upp till BBR's krav. Väggarna skall gå att tillämpa på byggnaden i Forsåker. Simuleringarna gjordes både med och utan hydrofobiskt ytskikt, för att se hur effektivt ytbehandlingen är. Följande värden ändrades i WUFI;

1. **Geometrin:** en referensvägg ritades upp. Väggen plottades mellan två symmetrilinjer så att genom en spegling av väggen kan den förstoras till rätt storlek se figur 20. Genom att göra väggen symmetrisk antas det att ingen fukttransport sker genom väggen i vertikalled utan enbart i horisontellt led. Fukten från marken förutsätts ha spärrats av genom en spärr av plåt eller liknande därför påverkar inte den klimatet inne i väggen. På referensväggens insida tillsattes sedan isolering och ångspärr för att skapa en vägg som går att tillämpa på byggnaden.



Figur 20 visar hur referensväggen uppbyggd i WUFI där den är avskuren i symmetrilinjerna på både under och översidan.

2. **Grid:** Valdes till Medium då Course som ger ett glesare avstånd mellan mätpunkterna hade provats. Course gav instabila resultat där kontinuiteten över åren varierade.
3. **Material:** Ett nytt tegel skapades baserat på ett historiskt tegel som fanns med i WUFIs databas. Värden ändrades till resultaten som fått fram från mätningar på teglet från Forsåker. De värden som ändrades var:
 - Densitet; 1821 [kg/m³]
 - Specifik värmekapacitet; 726 [J/kgK]
 - Porositet; 29 [%]
 - Termisk konduktivitet; 0,61 [W/mK]
 - Diffusions motståndsfaktorn; 10,90 [-]

Ett hydrauliskt kalkbruk valdes då det är tidstypiskt då byggnaden uppfördes (Burström, 2007, s. 408).

För isolering valdes mineralull med standardvärden från WUFI:s databas.

I de fall där en plast lades på insidan mot ytterväggen användes ett SD-värde på 100 m.

4. **Gränsvärden:** Där väggen möter ett annat klimat behöver värden sättas då klimatet runt omkring väggen ändras av faktorer som sol, vind, fukthalt från inomhusklimatet etc.

Ytterklimat; här valdes parametrar beroende på om väggen är behandlad med ett hydrofobiskt ytskikt eller inte. Detta gjordes i WUFI genom att ändra parameter som kallas för rain water absorption factor. Regnfaktorn anger hur mycket regn som träffar fasaden och sugs upp kapillärt i väggen. Då våra mätningar från tidigare kapitlen har visat att det som skiljer det hydrofobiska ytskiktet åt är kapillärsugningsförmågan. Därför väljs ett lågt värde på faktorn, se figur 21. Faktorn valdes till 0 för att demonstrera det hydrofobiska ytskiktet, alltså att inget vatten sugas upp genom väggen. Beräkningar gjordes även med en faktor på 0,1, vilket ska demonstrera sprickor i fasaden som kan uppkomma. Då kommer vatten tränga in igenom sprickorna och väggen kommer bli blöt/fuktig. Då inget ytskikt användes sattes denna faktor till 0,7.

Surface/Climate - Hydrofobiskt ytskikt

Surface Coefficients Climate

Adiabatic/System Border..... ☐

Treat as Inner Surface..... ☐

Sd Value [m]..... No Coating

Heat Transfer Coefficient [W/m²K].....

Wind Dependent ☒

Short-Wave Radiation Absorptivity [-] 0.68 Brick, red

Long-Wave Radiation Emissivity [-] 0.9 Details ...

Rain Water Absorption Factor [-] 0

Surface Type Wall

Surface Group

Color in Model

OK Cancel Help

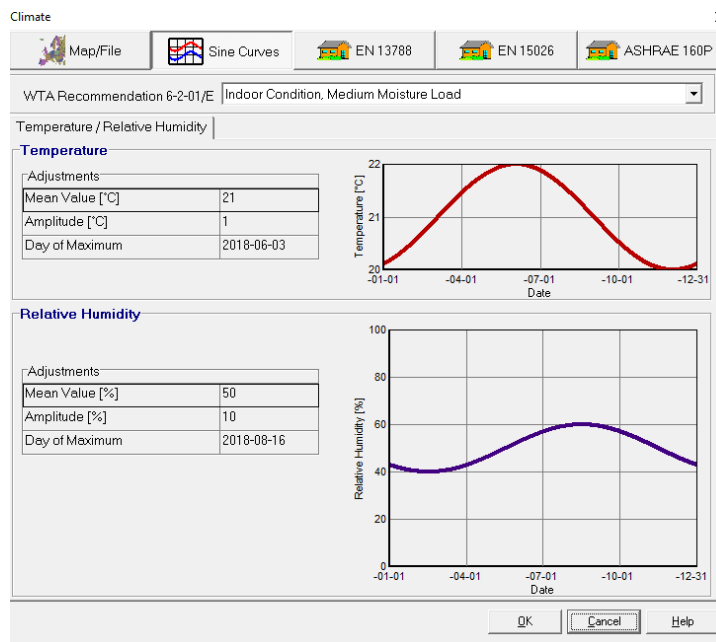
Figur 21 visar hur faktorer på gränsvärdet till ytterklimatet har benämnts i WUFI. Detta är med en regnfaktor på 0, vilket demonstrerar fallet med hydrofobiskt ytskikt, utan sprickor.

Under fliken climate valdes området Göteborg, se figur 22. Här finns data som visar hur ute temperaturen och hur mycket det regnar i medel i det valda området. Här väljs även åt vilket håll väggen är belägen. Väggen som beräkningarna har gjorts på ligger åt syd-öst.

Figur 22 visar hur Klimatet bestäms i WUFI.

- **Inneklimat:** Inneklimatet, heat transfer coefficient är $\frac{1}{R_{si}}$, där R_{si} är väggens värmemotstånd på insidan (0,13 m²K/W), vilket ger ett värde på 8 W/m²K. Klimatet på insidan väljs till indoor Condition, Medium Moisture Load och är förinställd i WUFI, se figur 23 och 24 för valda värden.

Figur 23 visar hur egenskaperna på inneklimatet har satts, där Heat transfer coefficient har satts till 8 W/m²K.



Figur 24 visar hur "Indoor Condition, Medium Moisture Load" varierar.

- **Klimat vid symmetriplanen:** Är den yta som begränsas till annat tegel vid symmetrilinjen. Här kryssas rutan för adiabatic i, se figur 25. Det betyder att systemet är ogenomträngligt här och att ingen värme tillförs eller bortförs.

Figur 25 visar hur begränsningsytan till symmetriplanen definieras genom adiabatic.

5. **Period:** Perioden valdes till 5 år, för att låta värdena bli stabila.

5.2 Resultat & analys av WUFI

Simuleringar gjordes på samtliga väggar:

- Referensvägg, som är den befintliga väggen i dagsläget.
- Vägg med hydrofobiskt ytskikt
- Vägg med 100 mm isolering
- Vägg med 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt
- Vägg med ångspärr och 100 mm isolering
- Vägg med ångspärr, 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt.
- Vägg med ångspärr, 240 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt.

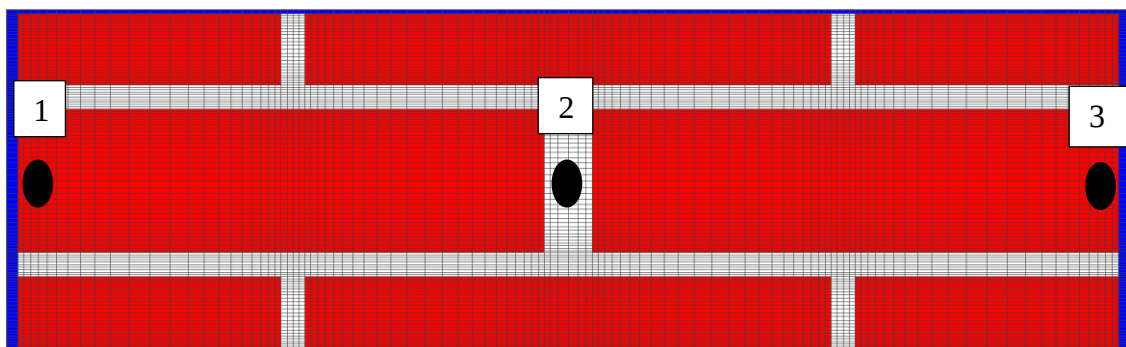
Alla simuleringar gjordes med en regnfaktor på 0,7 som representerar en obehandlad vägg, regnfaktor 0,1 som representerar en behandlad vägg med sprickor och deformationer och en med regnfaktor på 0 som är en vägg utan några sprickor där det hydrofobiska ytskiktet är heltäckande. Simuleringen sträcker sig från 2018-01-01 till och med 2022-12-31.

Resultaten baserar sig på vattenmängd, temperatur och relativ fuktighet. Alla resultat kommer inte att redovisas utan de delar som kommer fokuseras på är de delar där det kan ske frostsprängning, mikrobiologisk tillväxt och huruvida träreglarna i isoleringen kommer klara sig från fuktskador.

Kallrasberäkningen beräknas bara på referensväggen då isoleringen antas ha samma temperatur som insidan.

För att få en uppskattning av risken för frostsprängning kommer ett värde på den kritiska vattenmättnadsgraden att uppskattas till 0,7 p.g.a. observationer vid fältbesöket.

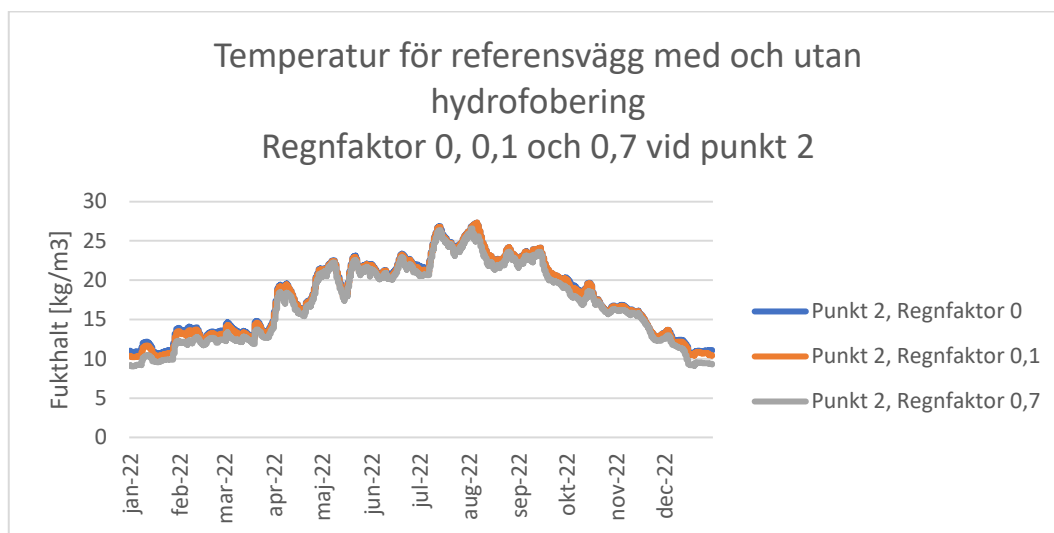
Resultat togs ut för tre olika punkter i samtliga beräkningar, se figur 26 för punkter.



Figur 26 visar vart mätningar har gjorts i tegelfasaden punkt 1 till vänster, punkt 2 i mitten och punkt 3 till höger.

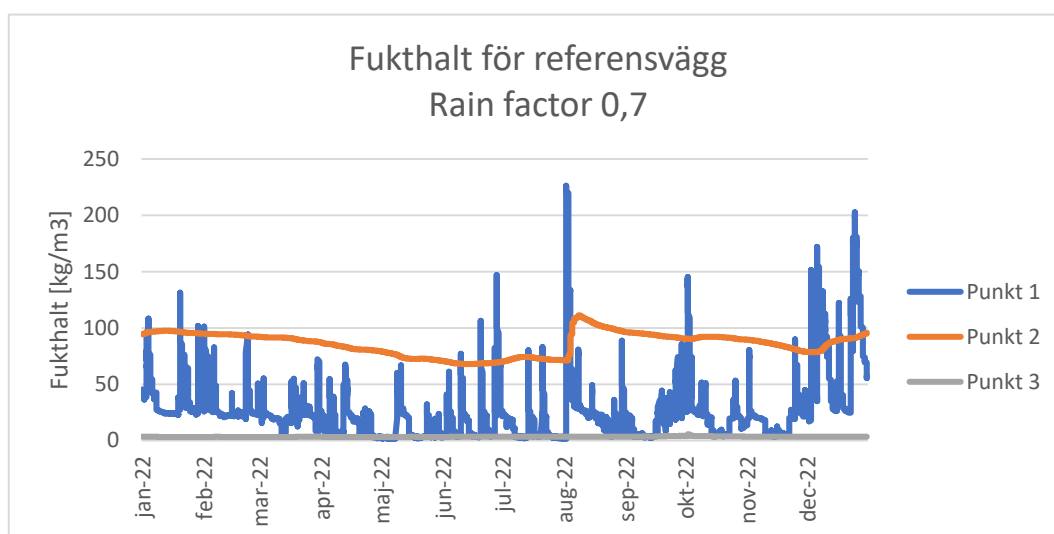
5.2.1 Resultat referensvägg med och utan hydrofobiskt ytskikt

Skillnaden vid en jämförelse mellan referensväggen och den hydrofobiskt behandlade väggen är hur fukten beter sig i väggen. Väggen som är behandlat med hydrofobiskt ytskikt kommer få en lite högre temperatur då U-värdet är lägre på grund av en torrare vägg, då mindre fukt kommer in i väggen, se figur 27.



Figur 27 grafen visar temperaturen i väggen vid punkt 2.

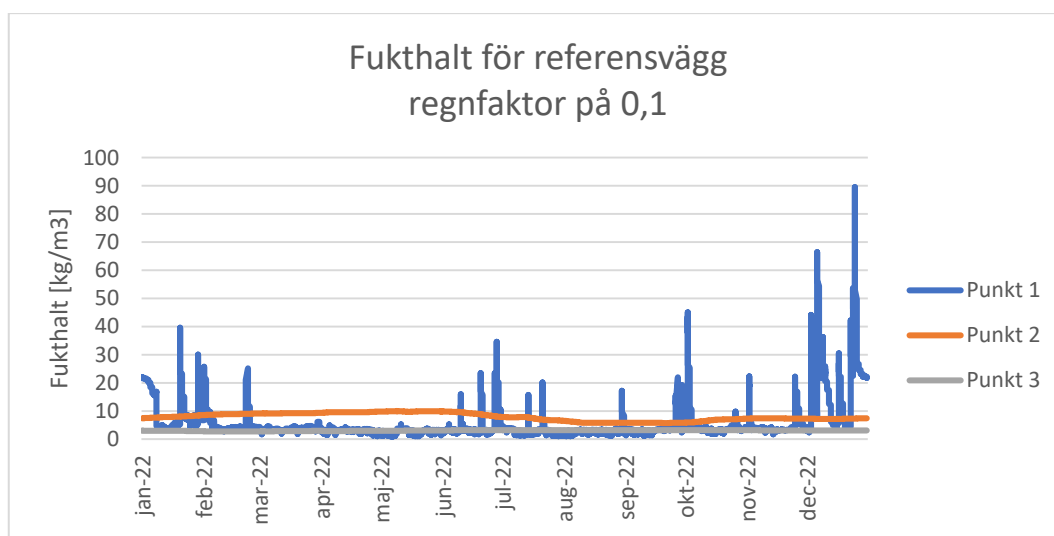
Det är tydligt i referensväggen hur de yttre delarna av väggens fukttinnehåll växlar jämfört med de andra två punkterna, se figur 28, detta beror på närheten till fuktkällan. Punkt 2 som är belägen i mitten av muren, följer kurvan för punkt 1 som är belägen längs ut. Detta syns tydligt i grafen vid augusti månad, här sker ett kraftigt fukttillskott i de yttre delarna vilket påverkar fukthalten i mitten av väggen. Effekten är inte lika kraftig i mitten pga. att den har ebbat ut. Punkt 3 som är innerst mot inneklimatet känner inte av fukttillskottet utan följer istället det konstanta inneklimatet.



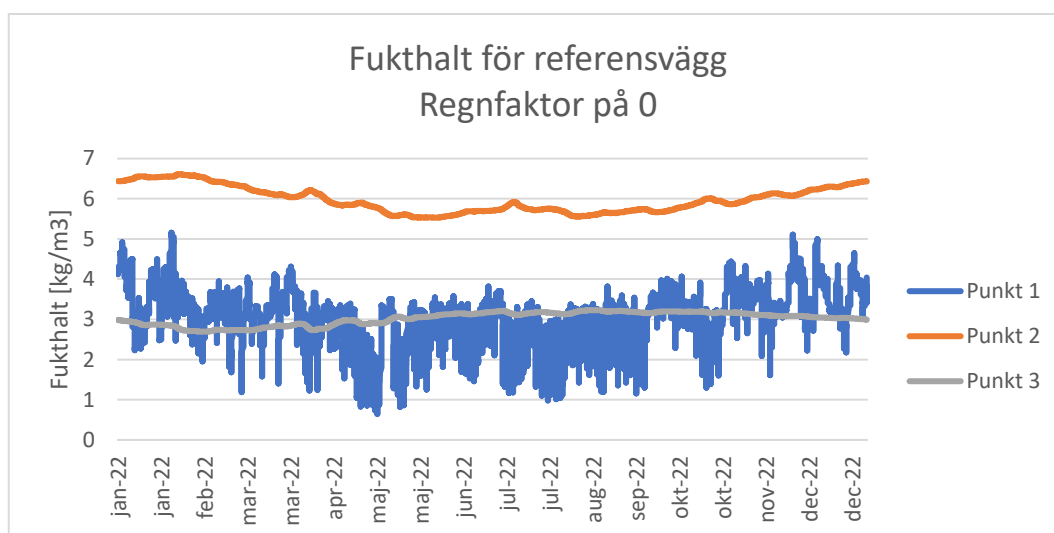
Figur 28 grafen visar fukthalten i referensväggen.

Frostsprängning har ingen teoretisk risk i referensväggen vintertid då fukthalten ej överstiger det uträknade resultatet på 239 kg/m^3 men med vald kritisk vattenmättnadsgrad kan det finnas risk under slutet av året för den obehandlade väggen. Dock sågs inte detta under fältbesöket så den valda kritiska vattenmättnadsgraden är antagligen för låg.

Efter en hydrofob ytbehandling på referensväggen är det tydligt att fukttillskottet minskat drastiskt. Den yttersta punkten fluktuerar inte alls lika mycket som den obehandlade referensväggen. Den mittersta punkten har som den innersta inte några kraftiga fukttillskott alls, se figur 29 och 30. När regnfaktorn sätts till noll så får väggen inget fukttillskott kapillärt utan får all sin fukt genom absorption från luften. Låga värden fås på fukthalten som ligger mellan $0\text{-}7 \text{ kg/m}^3$ i väggen.

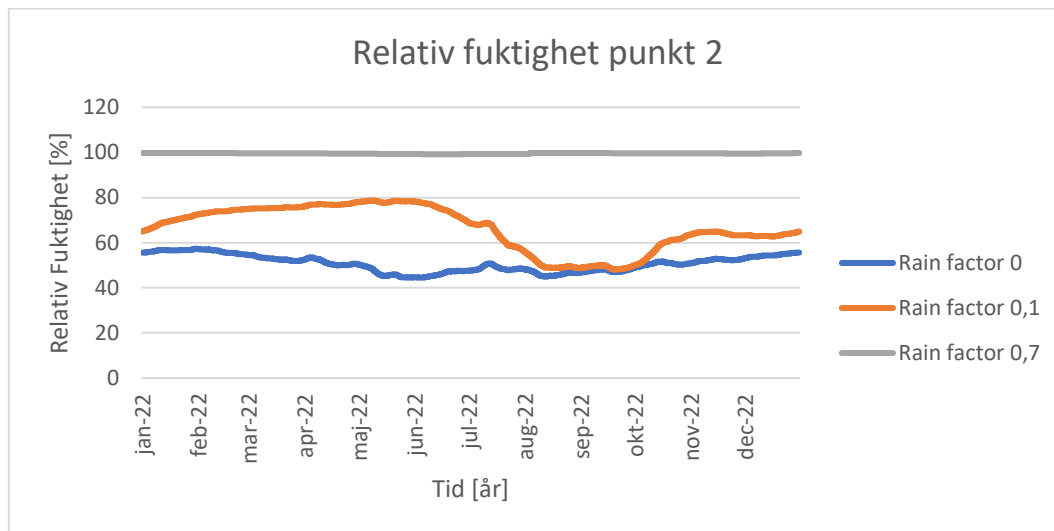


Figur 29 grafen visar fukthalten i den behandlade referensväggen med en regnfaktor på 0,1.



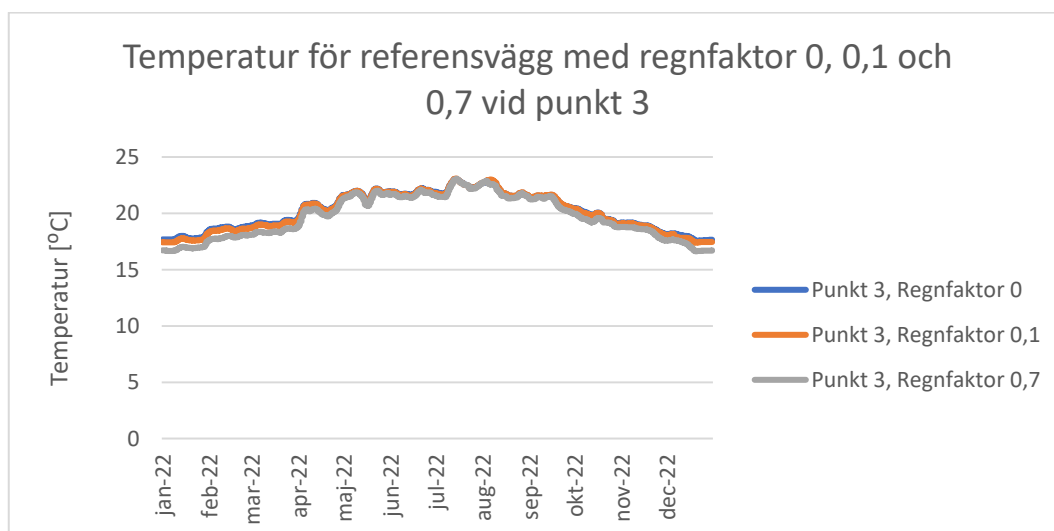
Figur 30 grafen visar fukthalten i den behandlade referensväggen med regnfaktor på 0.

För att rättvist bedöma fukttinnehållet i en nyrenoverad vägg med hydrofobiskt ytskikt får hänsyn tas till hur mycket sprickor och deformationer som finns på ytan, d.v.s. områden där det hydrofobiska ytskiktet inte täcker alla ingångar för en kapillärtransport. Figur 31 visar den relativa fuktigheten i väggen. Det syns klart att det hydrofobiska ytskiktet sänker den relativa fuktigheten genom en lägre fukthalt i väggen. Dock föreligger det fortfarande en risk för organisk tillväxt även med en hydrofobisk behandling. Detta beror på hur bra skicket på väggen är då det styr hur hög regnfaktorn i WUFI blir.



Figur 31 grafen visar den relativa fuktigheten i punkt 2 för de tre fallen av referensväggen.

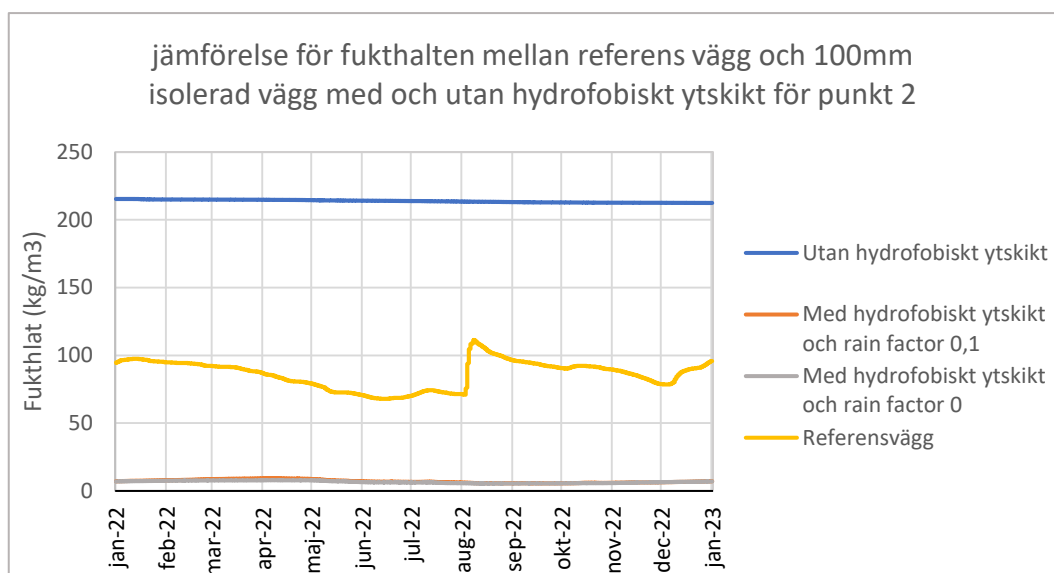
Med hjälp av temperaturen i figur 32 för punkten i mitten av väggarna kan beräkning för kallras med de givna värdena göras. En fem meter hög vägg och en meter ut i rummet den kallaste dagen med en avläst temperatur differens på 4,5 grader får vinden en hastighet på 0,26 m/s. Det resultatet överstiger boverkets rekommendation på 0,15 m/s (Boverket, 2017).



Figur 32 visar temperaturen i punkt 3 för referensvägg med och utan hydrofobiskt ytskikt, temperaturerna skiljer sig inte mycket åt från de olika väggarna.

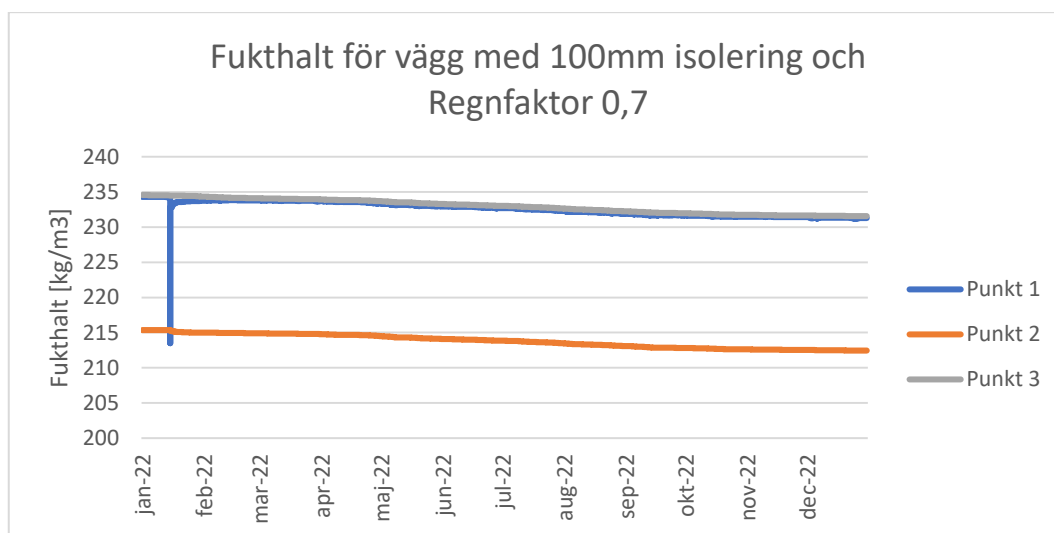
5.2.2 Resultat yttervägg med 100 mm isolering med och utan hydrofobiskt ytskikt.

En vägg som isoleras inifrån och där det inte sätts upp något skydd mot inträngande fukt kommer bli fuktigare och kallare än vad väggen var från början. Vilket syns tydligt i en jämförelse mellan fukthalten från den isolerade väggen med och utan hydrofobisk ytbehandling mot referensväggen, se figur 33.



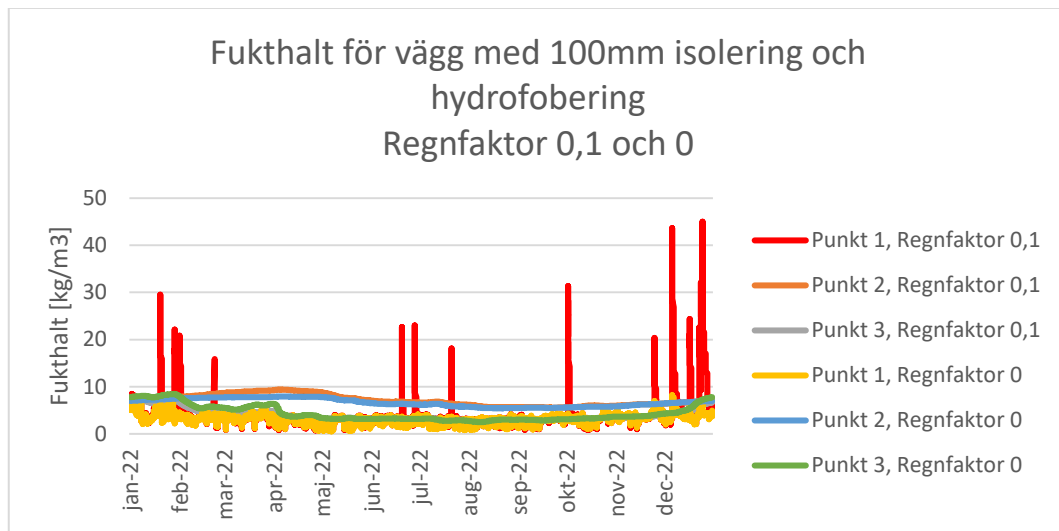
Figur 33 grafen visar hur fukthalten varierar i referens vägg jämfört med 100mm isolerad vägg med och utan hydrofobiskt ytskikt, den orangea linjen går rakt bakom den gråa.

Figur 34 visar hur fukthalten är fördelad över väggen under ett år när den isoleras utan något hydrofobiskt ytskikt. Den antagna kritiska vattenmättnadsgraden är överstigen i alla punkter och risken för frostsprängning är stor.



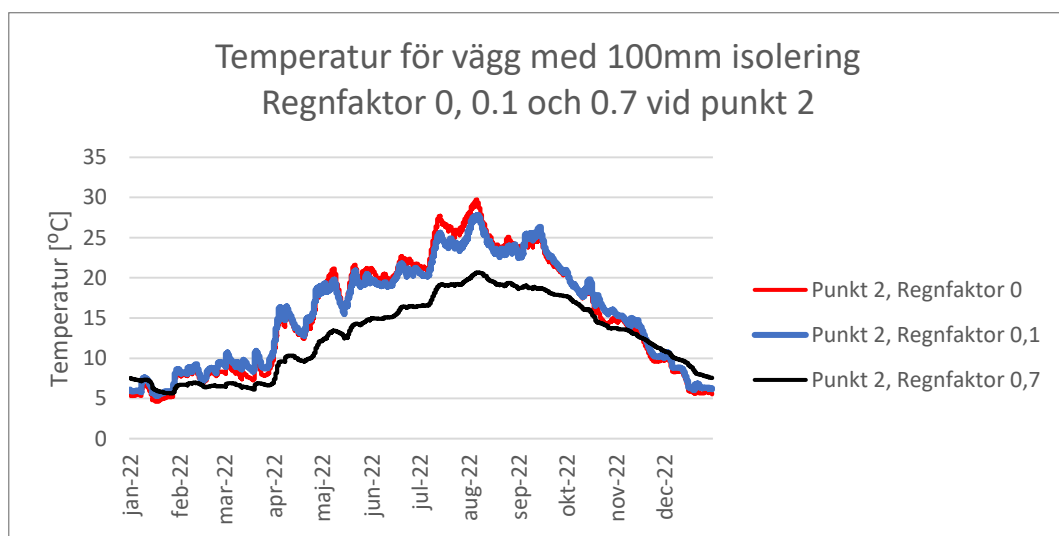
Figur 34 grafen visar fukthalten i en invändigt isolerad vägg utan hydrofobiskt ytskikt för tre olika punkter i väggen.

När en hydrofobering görs kommer den antagna kritiska vattenmättnadsgraden inte att uppnås vilket eliminerar risken för frostsprängning, se figur 35 för fukthinnehåll i väggen.



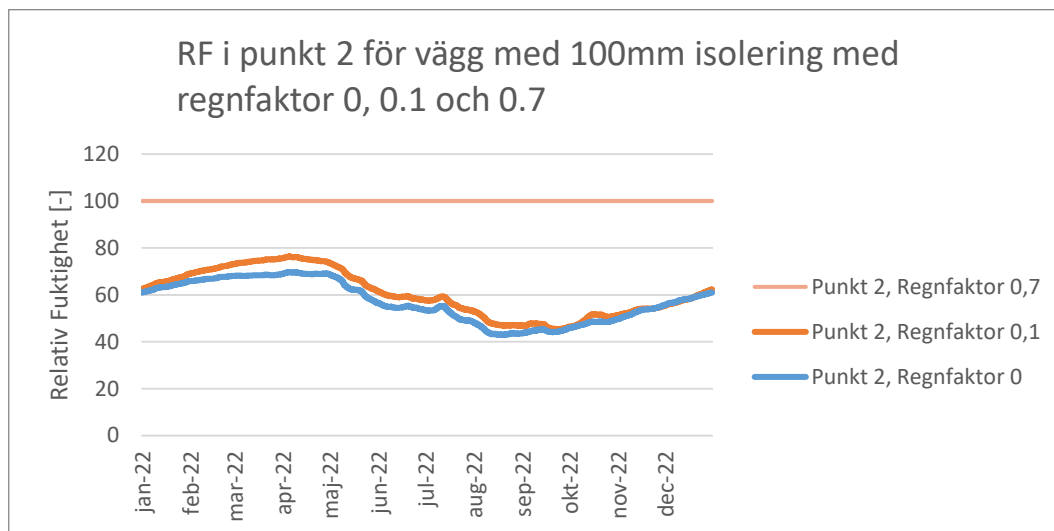
Figur 35 grafen visar fukthalten för en isolerad referensvägg med hydrofobering.

Då det är mycket mer vatten i väggen utan hydrofobering kommer dess λ -värde vara mycket högre p.g.a. att vatten leder energi mycket bättre än luft. Se figur 36 för temperaturskillnad.



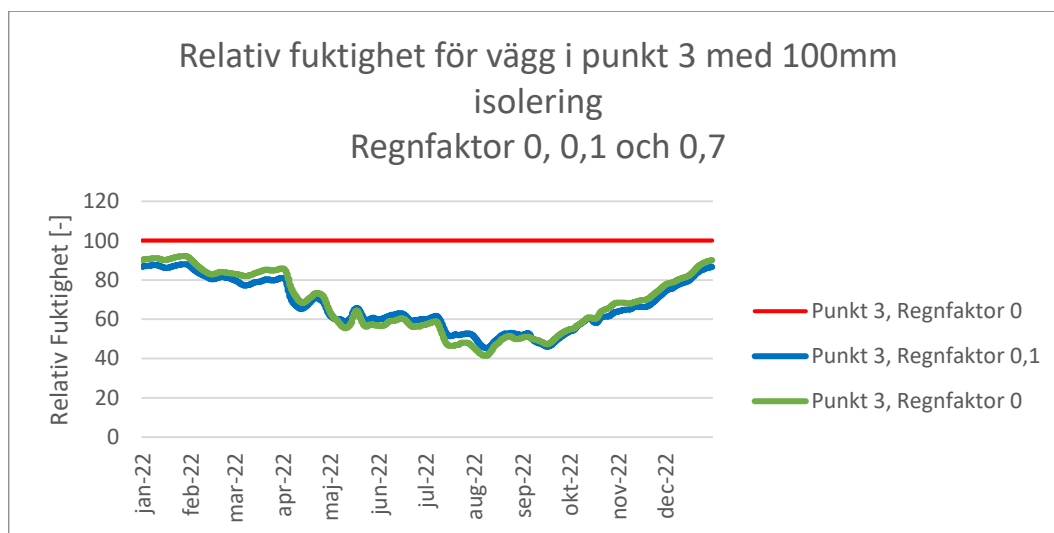
Figur 36 grafen visar hur temperaturen varierar i punkt 2 under ett år. Temperaturen är som lägst under vinterhalvåret och når sin botten i januari.

I figur 37 syns det att risken för mikrobiologisk tillväxt endast finns under våren då den relativa fukthalten ligger över 75 % för de två hydrofobiska exemplen. För den obehandlade väggen är det en konstant risk då den relativa fuktigheten ligger konstant på 100 %.



Figur 37 grafen visar den relativa fuktigheten vid punkt 2 i väggen vid tre olika fall.

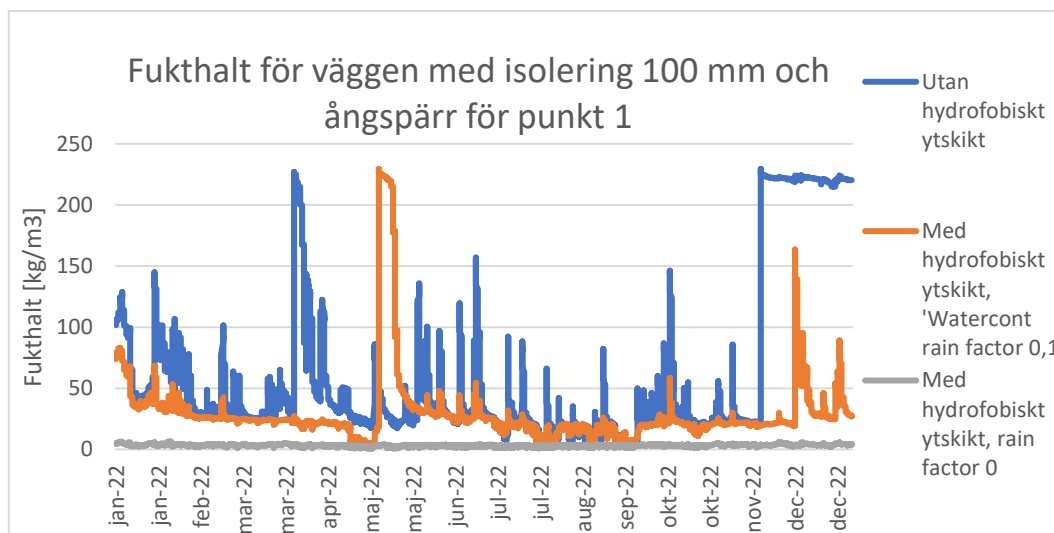
Om träreglarna som finns i isoleringen ligger mot tegelväggen finns det en överhängande risk för mögel då alla tre fallen någon gång på året ligger över de 75 % som anges som gränsvärde i kapitel 3.5.1. Se figur 38 för den relativa fuktigheten i punkt 3.



Figur 38 grafen visar den relativ fuktigheten vid punkt 3 i väggen vid tre olika fall.

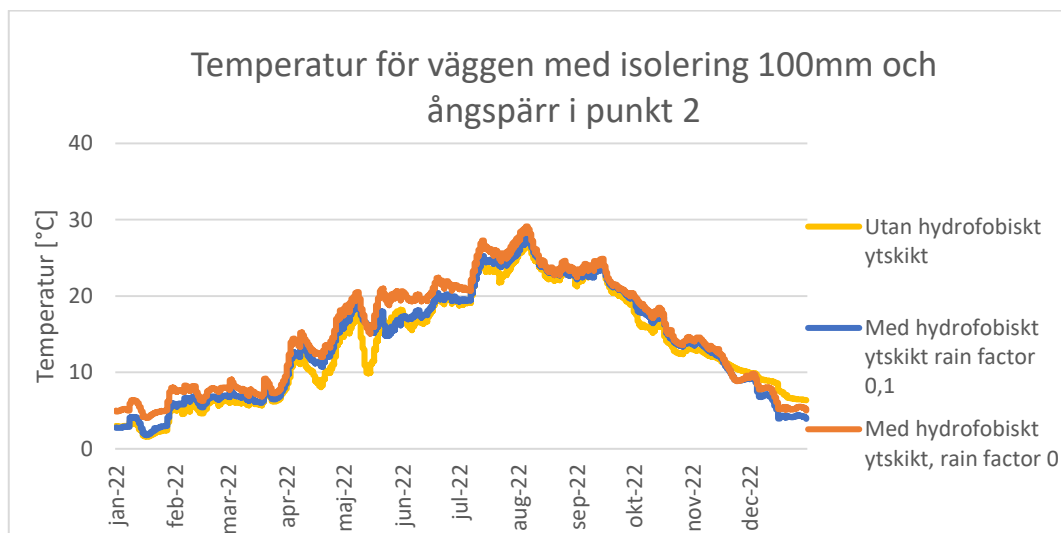
5.2.3 Resultat yttervägg med 100 mm isolering och ångspärr med och utan hydrofobering

Resultatet för hydrofobiskt ytskikt på en vägg med 100mm och ångspärr ger en sänkt fukthalt där en mer konstant fuktnivå uppnås, se figur 39. Risken för frostsprängning finns för den obehandlade väggen under vinter, medan den behandlade väggen ligger under gränsvärdet på cirka 200 kg.



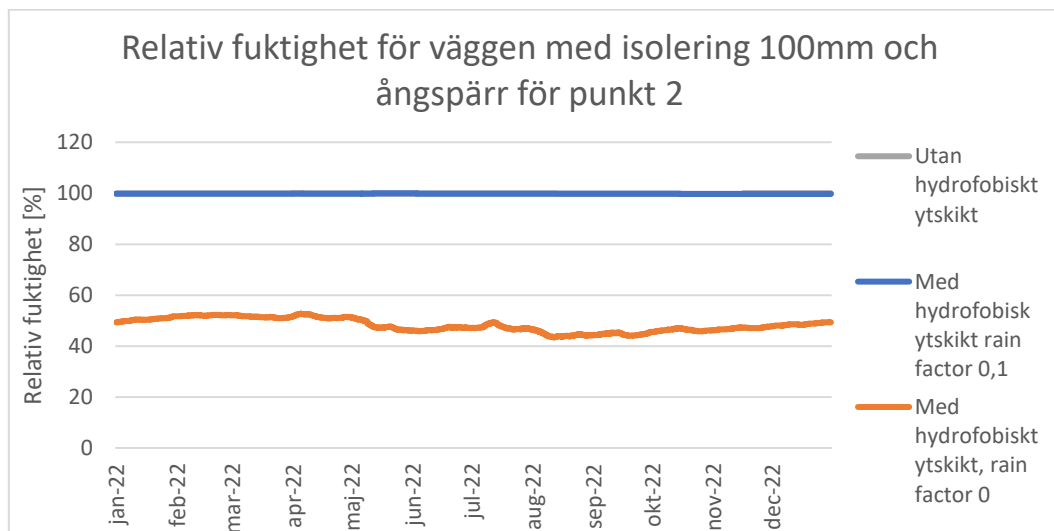
Figur 39 grafen visar fukthalten i väggen mot utsidan vid de tre olika fallen.

Temperatur fördelningen mellan de tre olika väggarna följer varandra med vissa variationer, det som tydligt trendar är att de väggar med hydrofobisk ytbehandling ger en generellt varmare vägg, se figur 40.



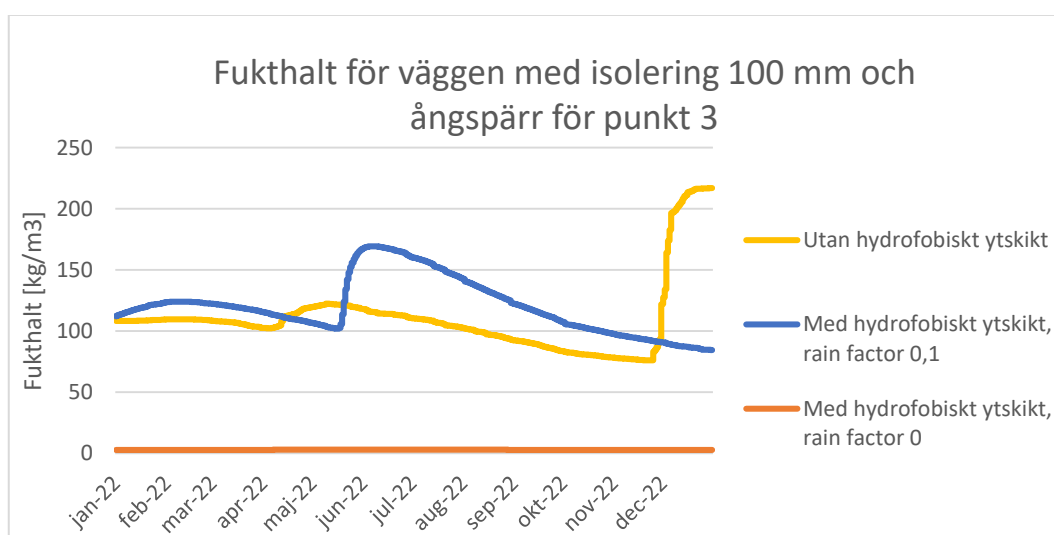
Figur 40 grafen visar temperaturen i mitten av väggen

Relativ fuktighet för punkt 2 har en relativ fuktighet på 100 % för fallet med en regnfaktor på 0,1 och 0,7 medan en regnfaktor på 0 visar ett bra resultat med hänsyn till mikrobielltillväxt med en relativ fuktighet på max 55 %, se figur 41.



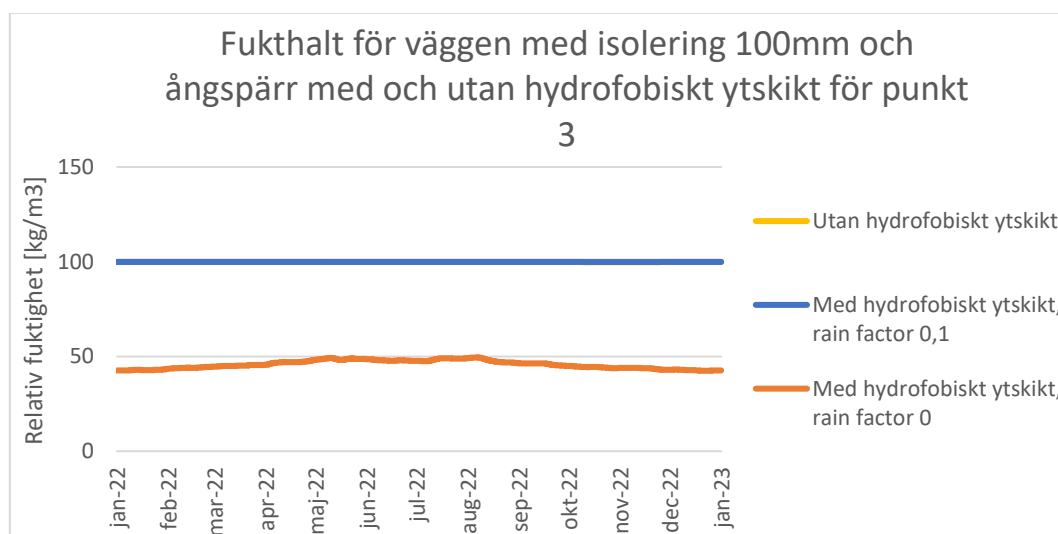
Figur 41 grafen visar den relativ fuktighet i mitten av väggen för de tre olika fallen, linjen för väggen utan hydrofobiskt ytskikt går precis under den med hydrofobiskt ytskikt och en regnfaktor på 0,1.

Punkt 3 som ligger precis innanför ångspärren har en risk i och med att träreglarna i innerväggen ligger emot, därför finns en risk för att fuktrelaterade skador kan uppkomma om ångspärren här inte är hel. Detta gäller för väggen utan hydrofobiskt ytskikt och med hydrofobiskt ytskikt med en regnfaktor på 0,1. Fuktinnehållet i dessa väggar ligger runt 125 kg /m³, medan väggen med en regnfaktor på 0 knappt innehåller någon fukt i punkt 3, se figur 42.



Figur 42 grafen visar fukthalten i punkt 3.

Risken för träreglarna syns extra tydligt i figur 43 där den relativa fuktigheten är 100 % på den obehandlade väggen och den behandlade med sprickor.

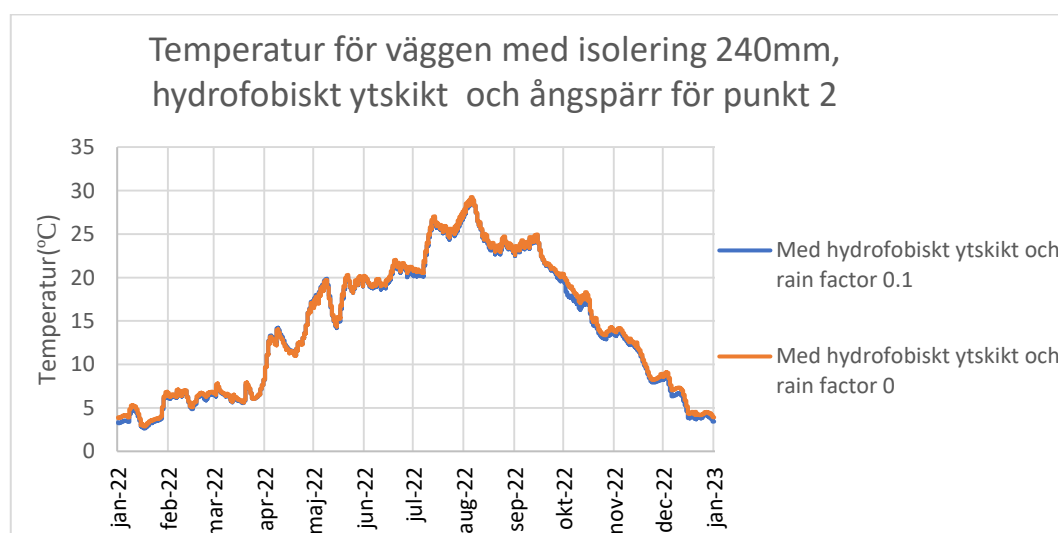


Figur 43 visar den relativa fuktigheten i punkt 3 där den gula linjen ligger bakom den blåa.

5.2.4 Resultat yttervägg med 240 mm isolering och ångspärr med hydrofobering

En vägg med 240mm isolering och ångspärr uppnår BBRs krav på U-värdet, se beräkningsbilagan. Fukthalten för den behandlade väggen ligger långt under risken för den kritiska vattenmättnadsgraden och därför kan vi utesluta frostsprängning.

Temperaturen för de olika punkterna med regnfaktor på både 0 och 0,1 har ingen märkbar skillnad utan de följer varandra under året, se figur 44, detta beror på att väggarna inte har någon skillnad i fukthalt stora delar av året, se figur 45.

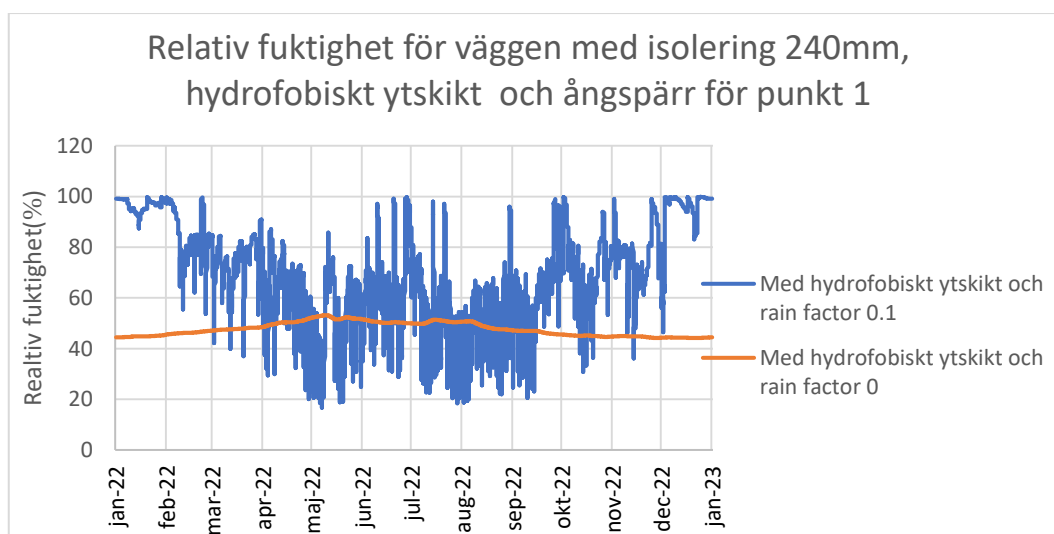


Figur 44 visar temperaturen för väggen med 240mm isolering, hydrofobiskt och ångspärr för olika rain factor för punkt 3.



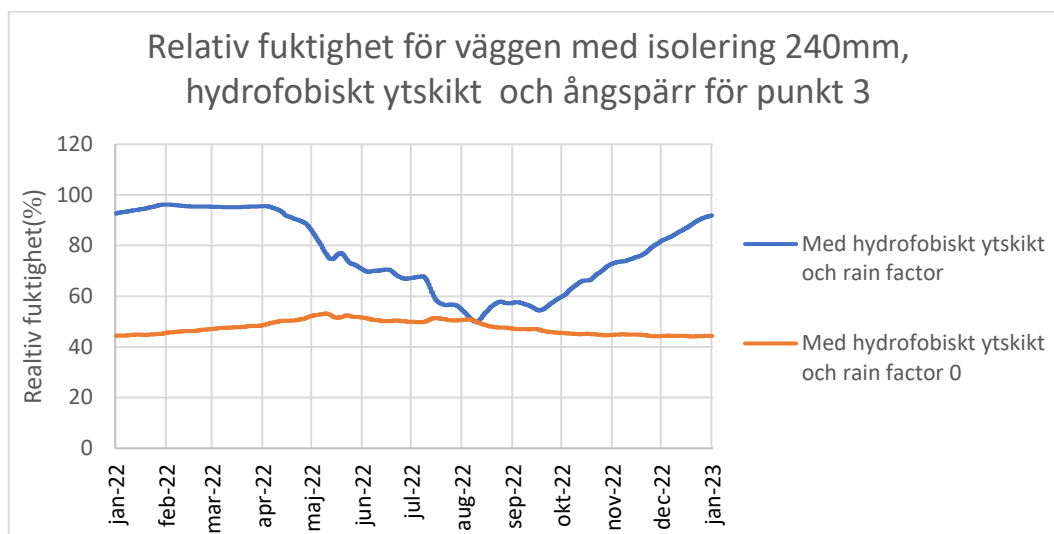
Figur 45 grafen visar fukthalten för väggen i punkt 1.

I figur 46 visas den relativa fuktigheten för punkt 1. Väggen med en regnfaktor på 0,1 har en relativ fuktighet vid 100% flera gånger under året medan en regnfaktor på 0 ger en relativfuktighet på runt 50%. En relativ fuktighet på 50 % är bra och förhindrar en mikrobiell tillväxt men så fort sprickor uppstår i fasaden så kommer den relativa fuktigheten att öka och lokalt riskeras för en biologisk tillväxt.



Figur 46 grafen visar Relativ fuktigheten för väggen med 240mm isolering, hydrofobiskt och ångspärr för olika rain factor för punkt 1.

Den relativa fuktigheten närmast träreglarna ligger under 75 % under sommarmånaderna medan den resten av året ligger strax över för en regnfaktor på 0,1. Därför finns det en liten riskfaktor vid träreglarna om ångspärren skulle gå sönder, se figur 47 för den relativa fuktigheten i väggen.



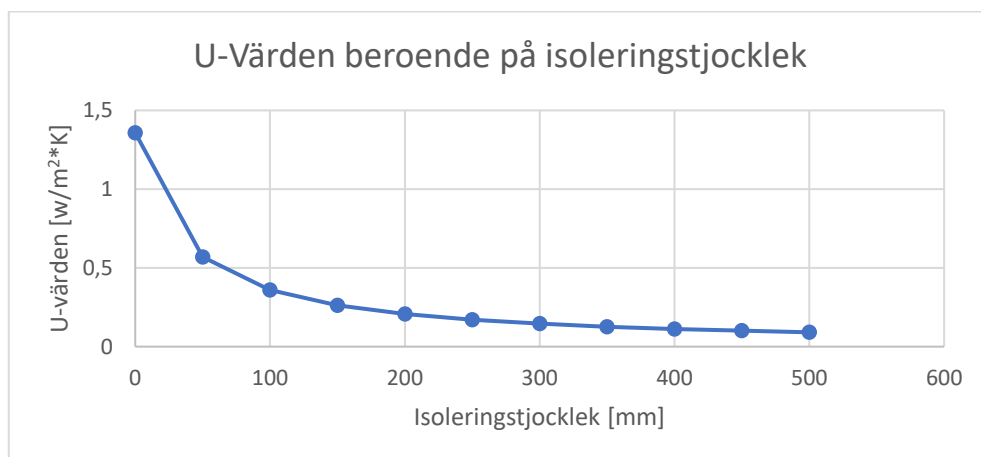
Figur 47 grafen visar relativ fuktighet för punkt 3.

6 SLUTSATS

Slutsatsen som kan dras är att det hydrofobiska ytskiktet bidrar positivt till en bättre miljö i väggen ur en fuktsäkerhetsaspekt. Vattenmängden sänks vilket gör att den relativa fuktigheten i väggen också sänks. Detta minimerar risken för frostsprängning, biologiska angrepp och energiläckage. Den största risken är om den hydrofobiska ytbehandlingen försämras och efter ett tag kanske även helt försvinner, vilket hade gjort att väggen med invändiga isoleringen blivit ännu fuktigare än vad den var innan behandlingen, se figur 33. På så sätt skulle väggen istället för en ökad fuktsäkerhet få en ökad risk för fuktproblematik. Om man monterar givare i väggen kan den relativa fuktigheten enkelt mätas och visa när det hydrofobiska ytskiktet inte har en önskad effekt längre men det blir ett moment extra i en bransch där underhållsfrihet värderas högt.

Ur en ekonomisk synpunkt vid tillsättning av hydrofobiskt ytskikt är det en omfattande renovering som skall till, då fogarna behöver bytas och då fasadens frostskadade stenar behöver ersättas. Om jobbet ändå skall göras är det en god idé att kolla om en hydrofobering ger en vinst i det långa loppet. Som exemplet i kapitel 3.6.1 är en sådan investering antagligen värd att prova då det är ett långsiktigt ägarperspektiv som tas hänsyn till. Då driftkostnaden oftast är en av de största utgifterna för hyresvärden.

I Forsåker där ägaren också är en kommunal aktör kommer driftkostnaden på samma sätt vara av särskilt intresse då det är en långsiktig investering som skall genomföras om lokalen skall renoveras till sin forna glans. I nuvarande läge med ett U-värde på $1,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ kan byggnaden inte sägas vara särskilt energisnål. Som resultatet visar är det möjligt att tilläggsisolera byggnaden och samtidigt behålla gestaltningen. Men detta leder till ännu en frågeställning, det är hur mycket man iså fall ska isolera. Som grafen visar i figur 48 så är U-värdet direkt relaterat till isolerings tjockleken. BBR förespråkar ett U-värde på $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ vilket ger en isolerings tjocklek på ungefär 24 cm. Då den befintliga väggen redan är ca 46 cm tjock blir det en tjocklek på 70 cm plus gipsskiva eller någon annan innerväggsbeklädnad/puts. Vilket leder till att väggen är runt 73 cm bred när den är färdig. På ett rum som är 10x5 meter blir det en area förlust på fyra kvadratmeter, vilket är en stor boarea som går förlorad.



Figur 48 grafen visar förhållandet mellan U-värde och isolerings tjocklek på en torr vägg.

Vid en ökad isolerings tjocklek kommer den yttre väggen bli kallare under vinterhalvåret. Vid dem tillfällen då fukt kommer in i väggen genom ett bristfälligt hydrofobiskt ytskikt kommer den relativa fuktigheten i väggen öka och en större risk för fuktproblem uppstår. Att göra en vägg med 100mm isolering som inte kommer upp till BBRs krav på en fasad kan därför vara en möjlig utväg då fuktproblematiken i väggen minimeras. Energibesparingen kommer ökas och det bidrar även till en mindre areaförlust.

För att summera så är livslängden för den hydrofobiska behandlingen dessvärre ett frågetecken. Med en livslängd hade en mer exakt beräkning kunnat göras på vinst eller förlust med ett hydrofobiskt ytskikt. Osäkerheten med livslängden gör det svårt att få ett riktigt resultat på om den hydrofobiska behandlingen är en bra metod för att kunna energieffektivisera äldre byggnader utan att förvanska fasaden. Någonting som antagligen måste göras om man tar hänsyn till de miljömål som finns.

7 FÖRSLAG TILL FRAMTIDA FORSKNING

- I denna rapport har ett urval av tegel gjorts. Därför kan inte slutsatsen dras att allt gammalt tegel från denna tidsepoken har samma egenskaper. Vidare undersökningar med flera olika referensbyggnader kan vara värdefullt att göras.
- I porositets mätningen mättes enbart den skenbara porositeten. Det kan det vara intressant att kolla skillnaden på den skenbara- och den absoluta porositeten. För att jämföra och få fram hur mycket slutna porer teglet har.
- Efter mätningen på frostsprängning gavs inget tydligt resultat. Efter att pratat med forskare inom detta område så bör mätningarna göras vid ett upprepat antal tillfällen. Porerna bör då även vara vattenmättade med hjälp av vakuum, så att det inte finns någon luft i systemet.
- Mätningar med det hydrofobiska ytskiktet bör även göras på murbruket för att se hur det reagerar. Antagandet att det reagerar samma som för teglet kan vara felaktigt.
- Nackdelen med ett hydrofobiskt ytskikt är att det behöver målas om men efter hur länge är oklart. Detta bör därför tas med i beräkningarna. Undersökningar av hur länge ytskiktet är effektivt och när de första sprickorna uppkommer som gör att fukt kommer in i väggen bör göras.

8 LITTERATURFÖRTECKNING

(u.d.).

- Arfvidsson, J., Harderup, L.-E., & Samuelson, I. (2017). *Fukt Handbook*. Halmstad.
- BBR. (2015). *Regelsamling för byggande*, BBR. Boverket.
- Bolminger, S. (den 25 11 2002). Utförda renoveringar på Norra Älvstranden - med Kalkstark och stenimpregnering . *Kalkstarkprojektet*. Göteborg, Sverige.
- Boverket. (den 24 4 2017). *Boverket*. Hämtat från [www.Boverket.se](http://www.boverket.se):
<https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/termiskt-klimat/>
- Burström, P. G. (2007). *Byggnadsmaterial*. Lund.
- Bärtås, L. (2013). *Tilläggsisolera ytterväggarna*. Hämtat från
<https://www.byggahus.se/renovera/tillaggsisolera-yttervaggarna>
- Forsåker. (2018). Hämtat från [Forsåker.se](http://www.forsaker.se): <http://www.xn--forsker-hxa.se/platsen/historik/>
- Gustavsson, T., Jönsson, J., & Molnär, M. (2017). *Reparation av murade fasader med korrosionsskador*. Hässleholm: Svensk byggtjänst och författarna.
- Gör Det Själv. (2015). *5 typer av isolering*. Hämtat från
<https://gds.se/material/isoleringsmaterial/isoleringsmaterial-de-5-vanligaste-isoleringstyperna>
- Göteborgs stad. (2018). *Om kulturhistorisk miljö*. Hämtat från
http://goteborg.se/wps/portal/start/byggande--lantmaterier-och-planarbete/kommunens-planarbete/verktyg-for-stadsplanering-2/kulturhistorisk-miljo/om-kulturhistorisk-miljo!/ut/p/z1/hY7LCoMwFES_xm3u9RGN3aUUAsa9NpuiJY2CGolpA_362mWhpbMb5gwzoKAFtXSP0XR-tEs37f6s8
- Hagentoft, C.-E. (2002). *Vandrade fukt Strålande värme*. Denmark: Carl-Eric Hagentoft och studentlitteratur.
- Heiselberg, P. (1993). *Draught risk from cold vertical surfaces*. Aalborg: University of Aalborg.
- Hot Disk. (den 18 11 2009). Instruction Manual Hot Disk Thermal Constants Analyser. *Hot Disk Thermal Constants Analyser*. Hot Disk AB.
- Institut Bauphysik. (den 09 9 2014). *WUFI*. Hämtat från WUFI web site:
https://wufi.de/en/wp-content/uploads/sites/9/2014/09/WUFI2D-3_Example.pdf
- Johansson, P., Samuelson, I., Ekstrand-Tobin, A., Mjörnell, K., Sandberg, P. I., & Sikander, E. (2005). *Kritiskt fuktillstånd för mikrobiell tillväxt på byggmaterial*. Borås: SP Sverige Provnings- och Forskningsinstitut.
- Krus, A. (den 30 8 2000). *Mölndal*. Hämtat från Mölndal-webbplats:
<https://www.molndal.se/download/18.53808c8a15893b22731b6aa/1480596335804/ku lturmiljoermolndalkalleredlindome2000.pdf>

- Ljungkrantz, C., Möller, G., & Petersons, N. (1994). *Betonghandbok*. Stockholm: Svensk Byggtjänst AB.
- Lång, & Sandgren. (2016). *Renovation of brick buildings constructed 1870-1930* .
- Machowski, M. (2018). Labbhandledning. (P. Johansson, Intervjuare)
- Mölnads kommun. (2000). *molndal.se*. Hämtat från <https://www.molndal.se/download/18.53808c8a15893b22731b6aa/1480596335804/ku lturmiljoermolndalkalleredlindome2000.pdf>
- Mölnads Stad. (den 16 11 2017). Hämtat från <https://www.molndal.se/download/18.166854331623d369b2e1c40/1521791917971/19 %20Kulturmilj%C3%B6program%20f%C3%B6r%20M%C3%B6lndals%20stad.pdf>
- Mölnads stad. (2018). *Kultturhistoriska byggnader*. Hämtat från Mölnads stad: <https://www.molndal.se/startside/bygga-bo-och-miljo/bygglov-och-fastighetsfragor/kultturhistoriska-byggnader.html>
- Nilsson, O. (2017). *Hydrofobisk ytbehandling av tegel*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Sandin, K. (1995). *Vattenavvisande fasadimpregnering*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.
- Segerholm, I. (10 2015). "Laboration 1 Krypning samt fuktrelaterade egenskaper hos porösa byggnadsmaterial". [Laboration] *Byggnadsmaterial BOM 195*. Chalmers tekniska högskola. Hämtat från [Laboration].
- Setterborg, T. (2013). *STRATEGI FÖR FÖRSÅKERSOMRÅDET, BEVARANDE OCH OMVANDLING AV EN STADS NÄRA INDUSTRI MILJÖ*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. (2018). *Fuktsäkra byggnader*. Hämtat från <http://www.fuktsakerhet.se/sv/byggnad/tillaggsisolering/Sidor/default.aspx>
- Swedish standards institute. (2006). *ISO 845:2006*. Hämtat från Cellgummi och cellplast - Bestämning av skrymdensitet: <https://enav.sis.se/sok/?q=ISO%20845:2006>
- Sveriges riksdag. (2010). *Plan- och bygglag (2010:900)*. Hämtat från http://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/plan--och-bygglag-2010900_sfs-2010-900
- Thorsell, P.-E. (2013). *Studier av frysningsegenskaper Från 1 BMA*. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB.
- WUFI. (2018). Hämtat från WUFI.de: <https://wufi.de/en/>
- WUFI. (2018). Hämtat från WUFU.se: <https://wufi.se/for-vem-och-nar/>
- WUFIwiki. (2009). *Water Vapor Diffusion*. Hämtat från wufi-wiki.com: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:WaterVaporDiffusion>

9 BILAGOR

9.1 Bilaga 1

BERÄKNING U-VÄRDE

$$\lambda^m = V_1 \lambda_1^m + V_2 \lambda_2^m + \dots + V_n \lambda_n^m$$

där

$m = +1$ är parallellmetoden

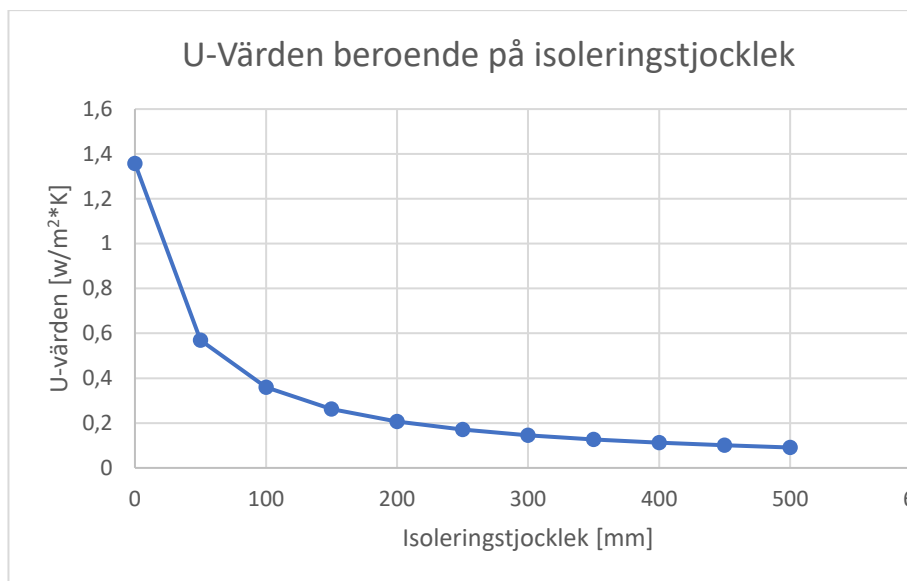
$m = -1$ är seriemetoden

(Burström, 2007)

R _{si}	0,04 m ² K/W
R _{se}	0,13 m ² K/W
λ tegel	0,61 W/mK
λ Murbruk	0,70 W/mK
Längd Tegelsten	0,22 m
Bredd Tegelsten	0,11 m
Tjocklek murbruk	0,01 m
Tjocklek vägg	0,46 m

		Andel av total volym [-]
R Övre väggdel	0,75 m ² K/W	0,43
R murbruk	0,66 m ² K/W	0,14
R mitten	0,75 m ² K/W	0,43
R _{tot} , referensvägg	0,74 m ² K/W	
U-värde referensvägg	1,36 W/m ² K	
λ isolering	0,04 W/mK	0,91
λ träreglar	0,14 W/mK	0,09
λ isolering+reglar	0,049 W/mK	

$$U - \text{värde, med isolering} = \frac{1}{\frac{Tjocklek isolering}{\lambda isolering + reglar} + R_{tot, referensvägg}}$$



BERÄKNING KALLRAS

$$V_{max} = 0,055 * \sqrt{\Delta T * X * H}$$

KALLRAS	Aktuell	Enligt BBR
H	5	5
X	1	1
Delta T	4,5	1,5
Vmax	0,2609	0,1506

Beräkning teoretisk vattenmängd utan frysrisk

	Tegel från Forsåker	Nytt tegel
Porositet	29	37,47 %
Mängden icke frysbart vatten/total porvolym	2,9	3,7 %
Mängd frysbart vatten	261,0	337,33 l/m3
Icke frysbart vatten	29,0	37 l/m3
Kritisk vattenmättnadsgrad	0,917	0,917 -
Maximal mängd vatten utan teoretisk frysrisk	239,4	309,48 l/m3
Vald kritisk vattenmättnadsgrad	0,8	-
Vatten mängd för frysrisk vald kritisk vattenmättnadsgrad	208,8	l/m3

9.2 Bilaga 2

Provkropp

1: Våtlagrad, 20°C

Vikt
Uppmätt
egenfrekvens

	Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
[g]	309,06	308,45	308,28
[Hz]	10,82	16,04	10,77

Provkropp

2: Våtlagrad, 20°C

Vikt
Uppmätt
egenfrekvens

	Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
[g]	303,75	303,05	302,66
[Hz]	10,43	15,38	10,34

Provkropp

3: Våtlagrad, 20°C

Vikt
Uppmätt
egenfrekvens

	Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
[g]	286,53	285,92	285,72
[Hz]	11,03	15,56	11,06

Provkropp

4: Våtlagrad, 20°C

Vikt
Uppmätt
egenfrekvens

	Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
[g]	296,31	295,46	295,25
[Hz]	6,105	13,57	5,96

Provkropp**5:** Våtlagrad, 20°C

		Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
Vikt	[g]	305,6	304,18	304,01
Uppmätt egenfrekvens	[Hz]	5,585	13,19	5,38

Provkropp**6:** Våtlagrad, 20°C

		Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
Vikt	[g]	304,02	303,23	303,03
Uppmätt egenfrekvens	[Hz]	5,27	12,87	5,21

Provkropp**7:** Våtlagrad, 20°C

		Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
Vikt	[g]	316,32	314,71	314,39
Uppmätt egenfrekvens	[Hz]	5,845	13,78	5,61

Provkropp**8:** Våtlagrad, 20°C

		Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
Vikt	[g]	315,86	313,56	313,37
Uppmätt egenfrekvens	[Hz]	5,89	14,19	5,81

Provkropp**9:** Våtlagrad, 20°C

		Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
Vikt	[g]	309,13	307,81	307,63
Uppmätt egenfrekvens	[Hz]	5,15	15,49	6,54

Provkropp**10:** Våtlagrad, 20°CVikt
Uppmätt
egenfrekvens

[g]

[Hz]

Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
304,7	303,5	303,33
10,17	17,72	10,05

Provkropp**11:** Våtlagrad, 20°CVikt
Uppmätt
egenfrekvens

[g]

[Hz]

Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
315,79	314,96	314,75
10,55	17,53	10,45

Provkropp**12:** Våtlagrad, 20°CVikt
Uppmätt
egenfrekvens

[g]

[Hz]

Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
312,8	311,48	311,75
11,51	18,09	11,32

Stor ny: Våtlagrad, 20°CVikt
Uppmätt
egenfrekvens

[g]

[Hz]

Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
1233,09	1228,67	1227,8
6,95	14,4	6,875

Stor**Gammal:** Våtlagrad, 20°C

Vikt

[g]

Initialt tillstånd	Fryst	Tinad
1326,61	1318,53	1317,9

Uppmätt
egenfrekvens

[Hz]

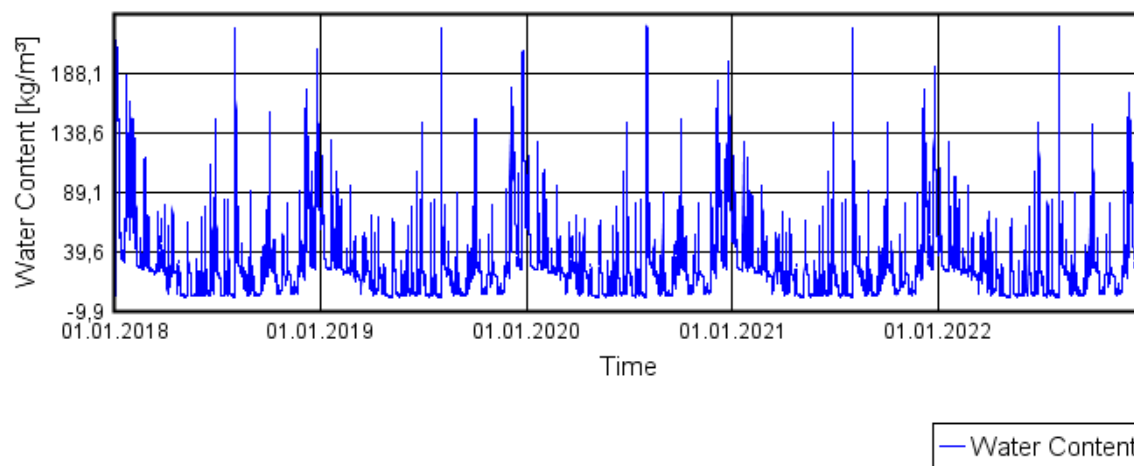
11,03	17,26	10,96
-------	-------	-------

9.3 Bilaga 3 Resultat WUFI- beräkning

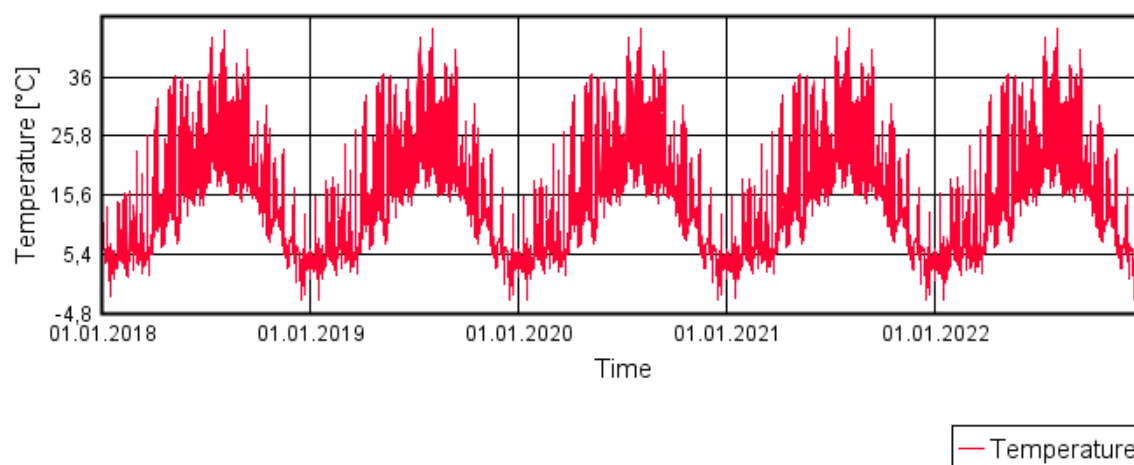
9.3.1 Referensvägg

9.3.1.1 Punkt 1

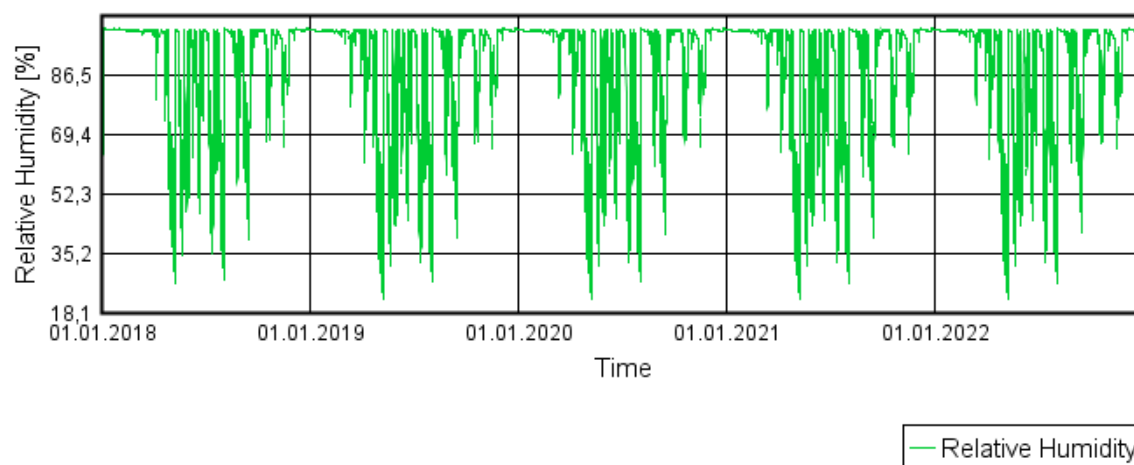
Water Content



Temperature

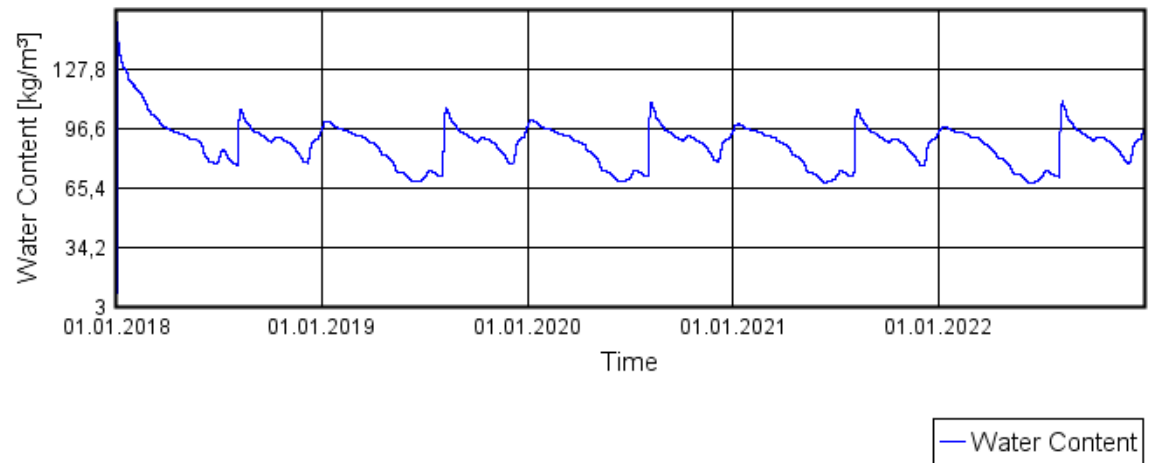


Relative Humidity

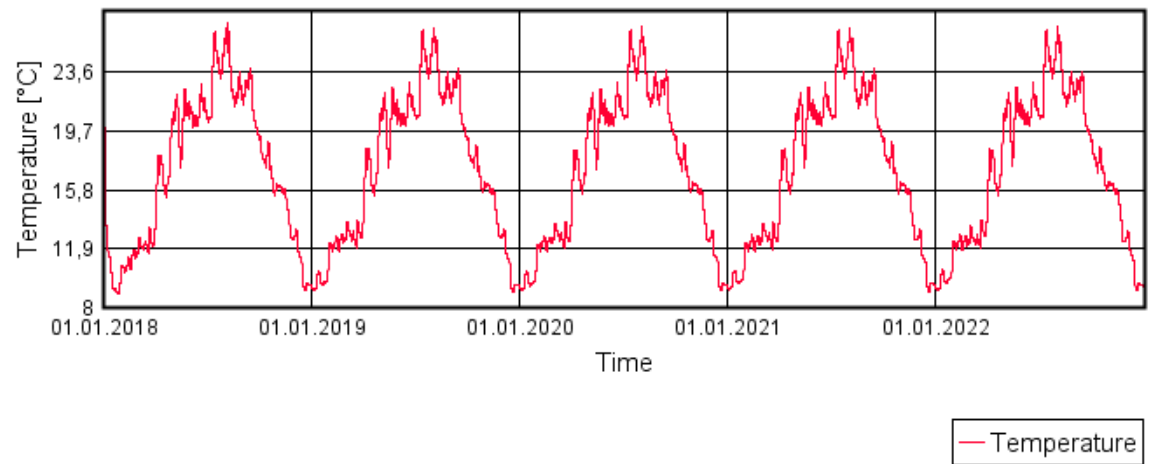


9.3.1.2 Punkt 2

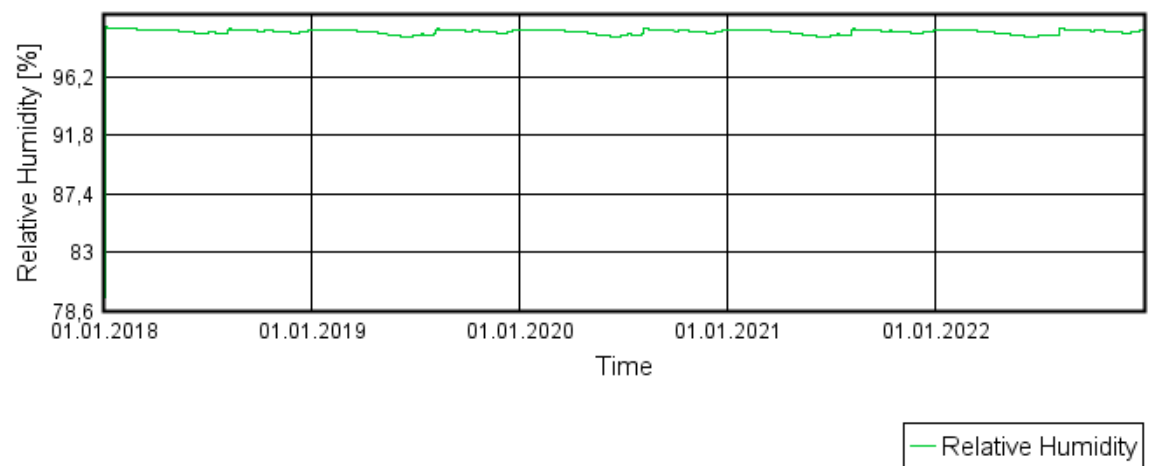
Water Content



Temperature

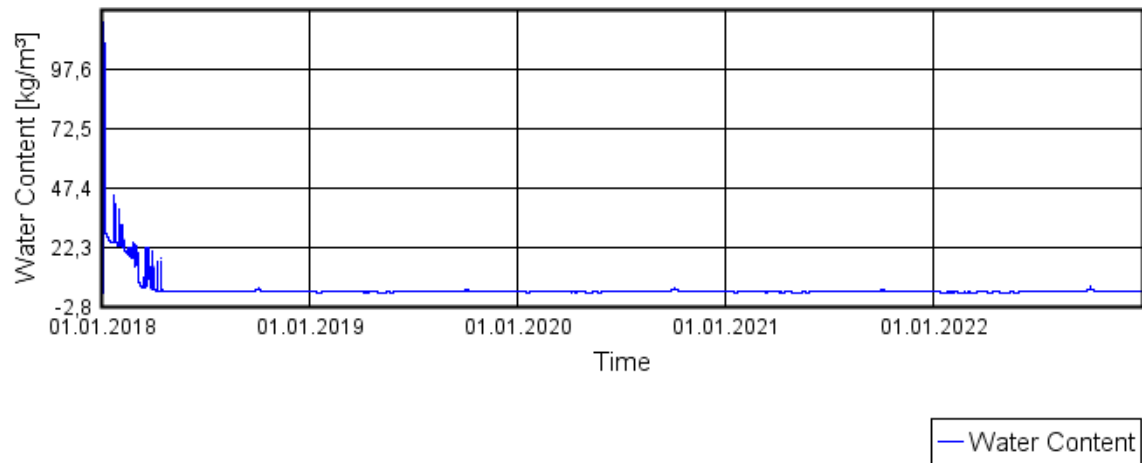


Relative Humidity

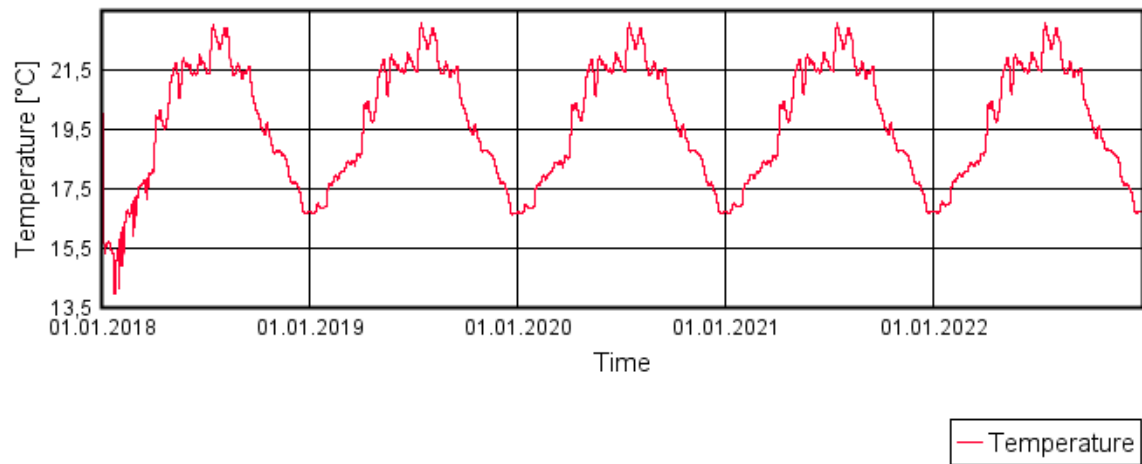


9.3.1.3 Punkt 3

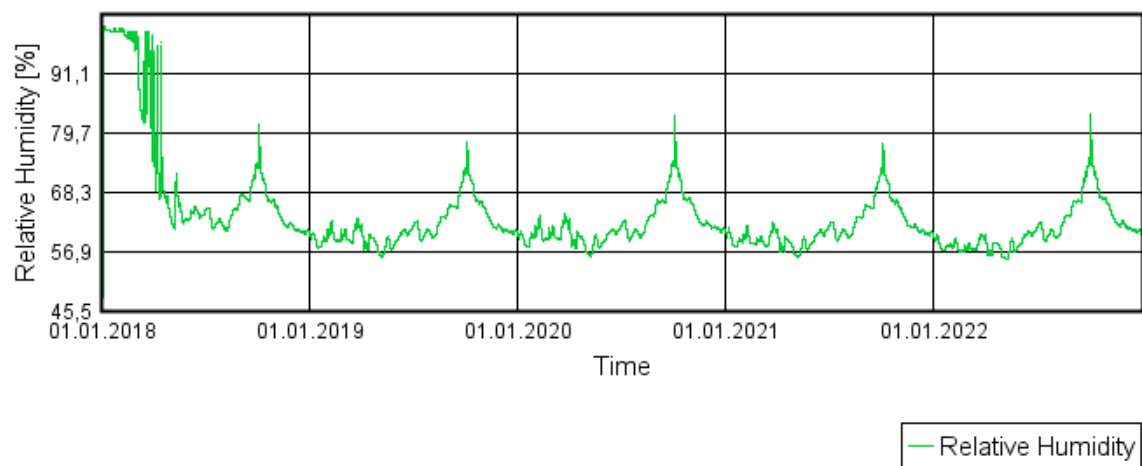
Water Content



Temperature



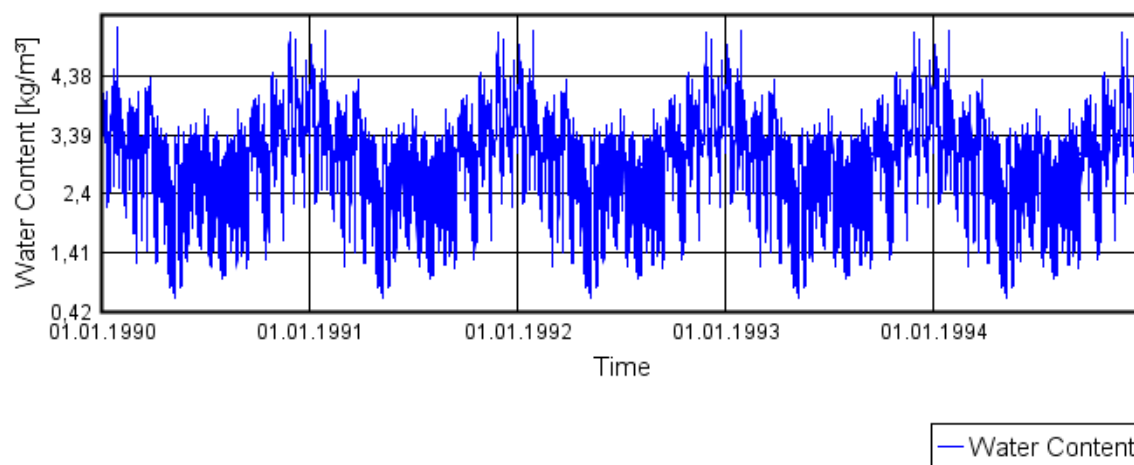
Relative Humidity



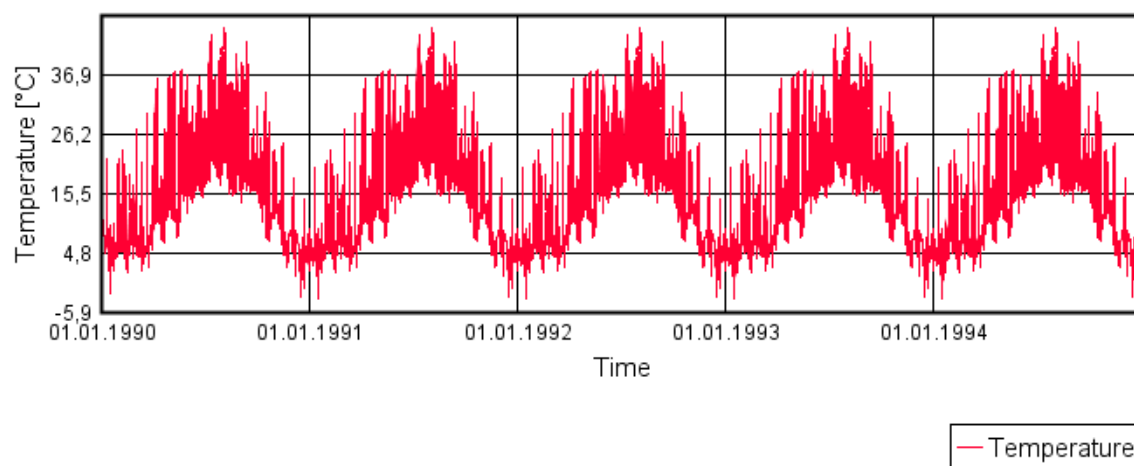
9.3.2 Vägg med hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0)

9.3.2.1 Punkt 1

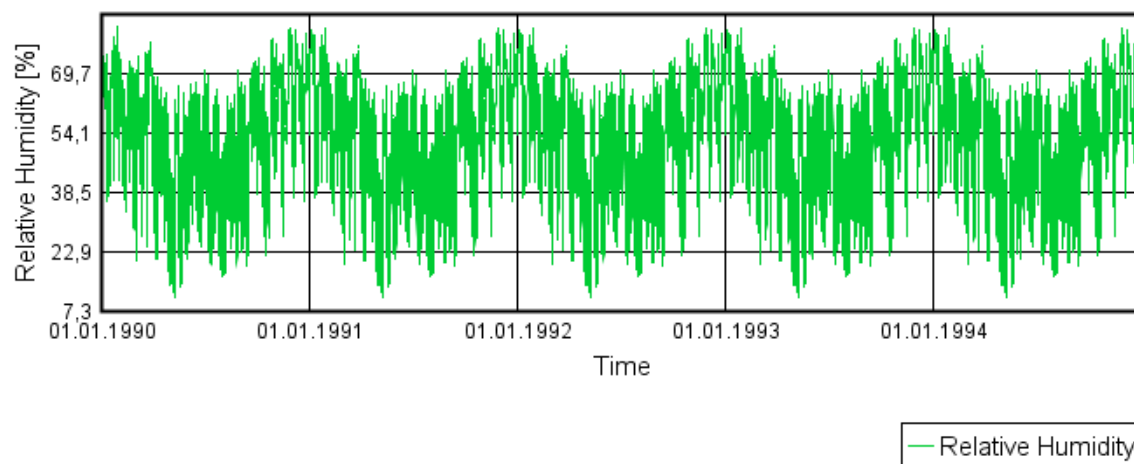
Water Content



Temperature

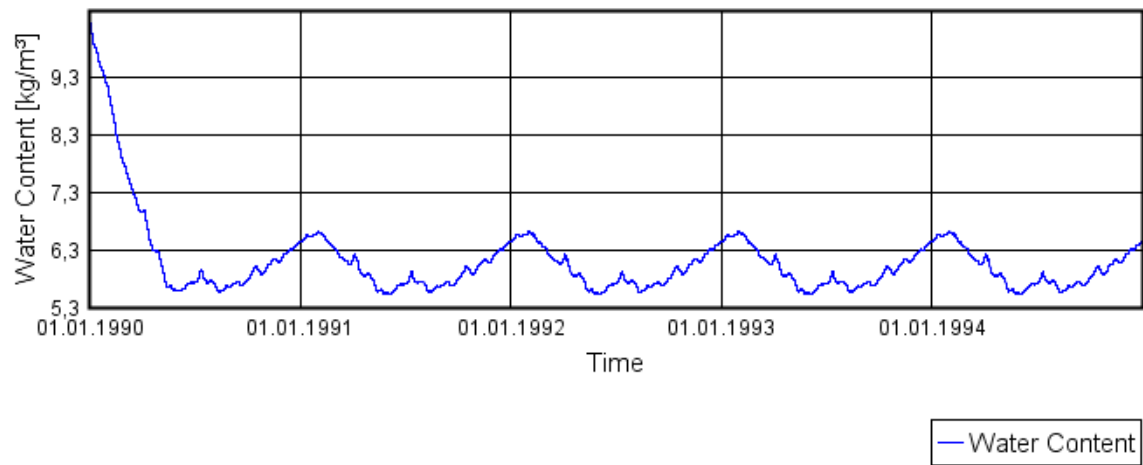


Relative Humidity

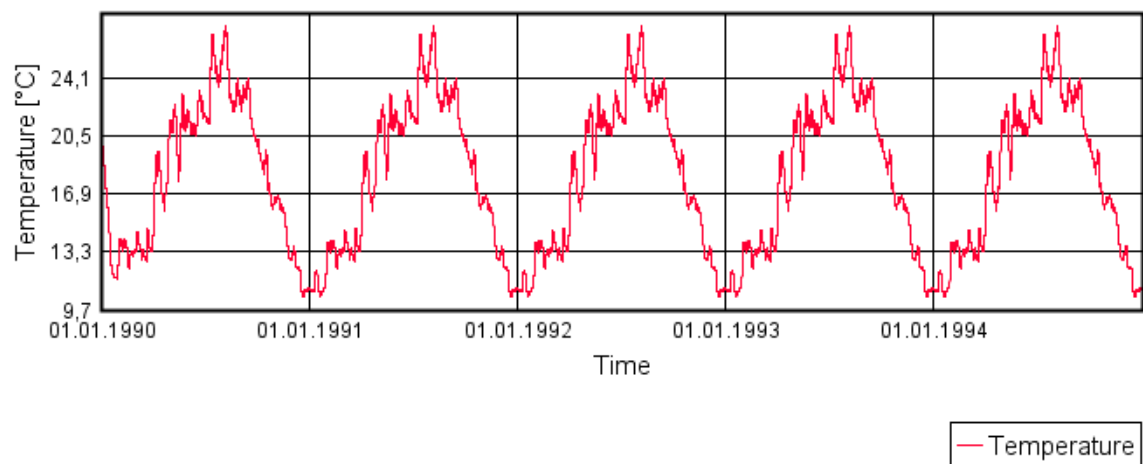


9.3.2.2 Punkt 2

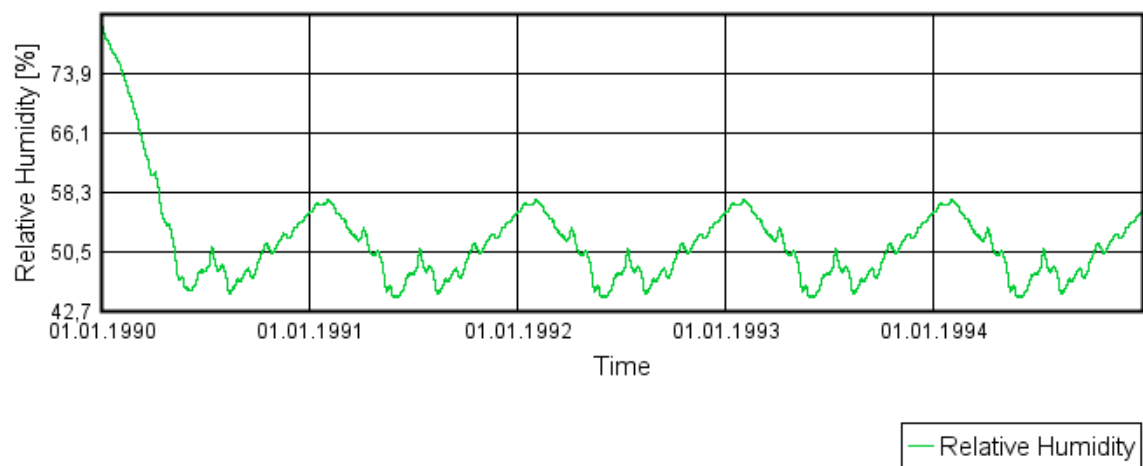
Water Content



Temperature

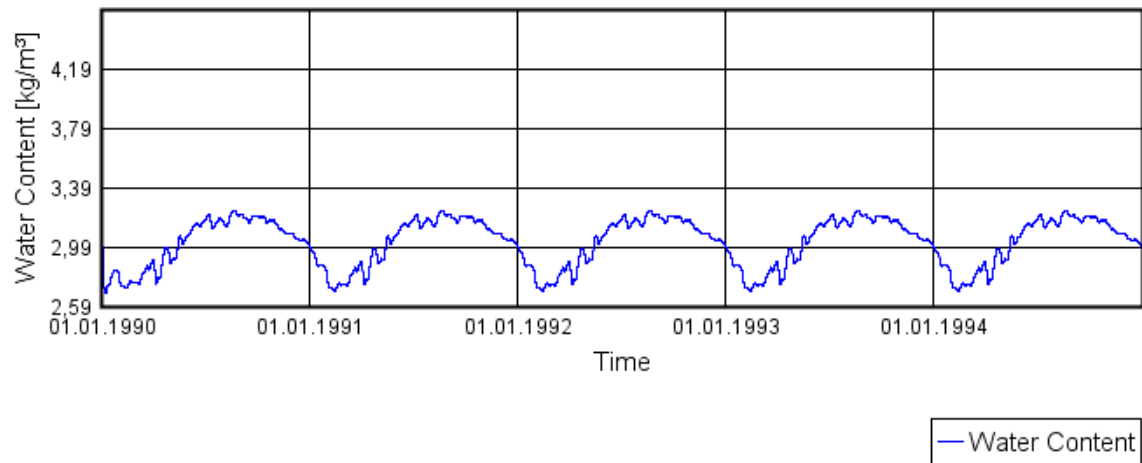


Relative Humidity

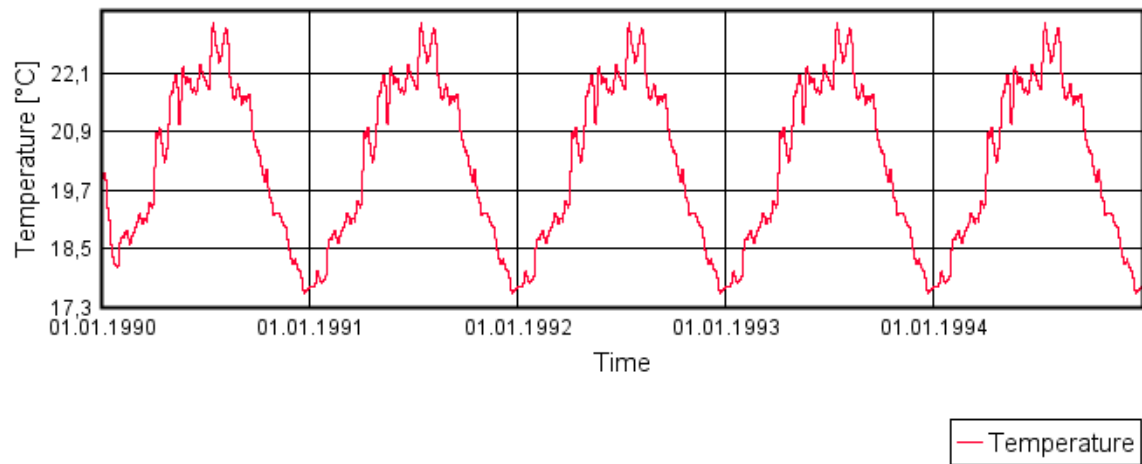


9.3.2.3 Punkt 3

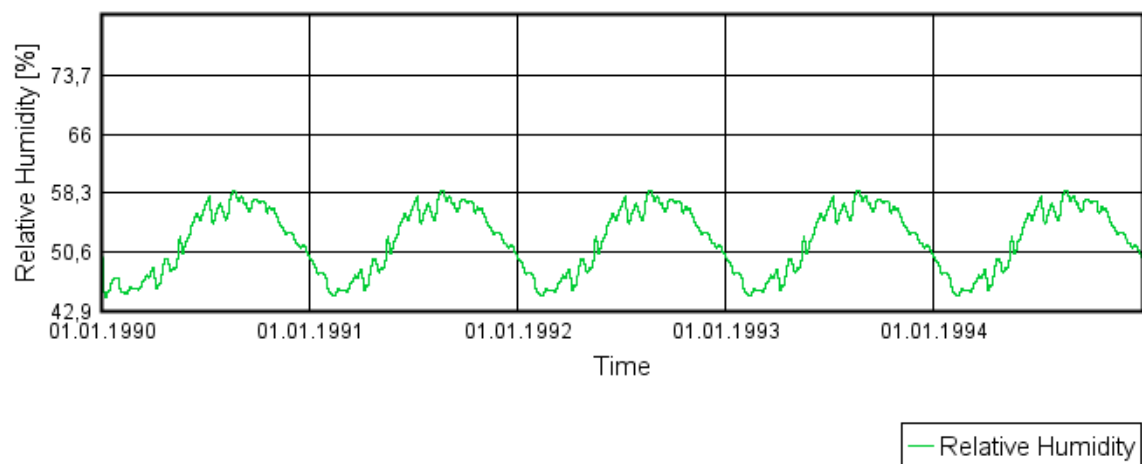
Water Content



Temperature



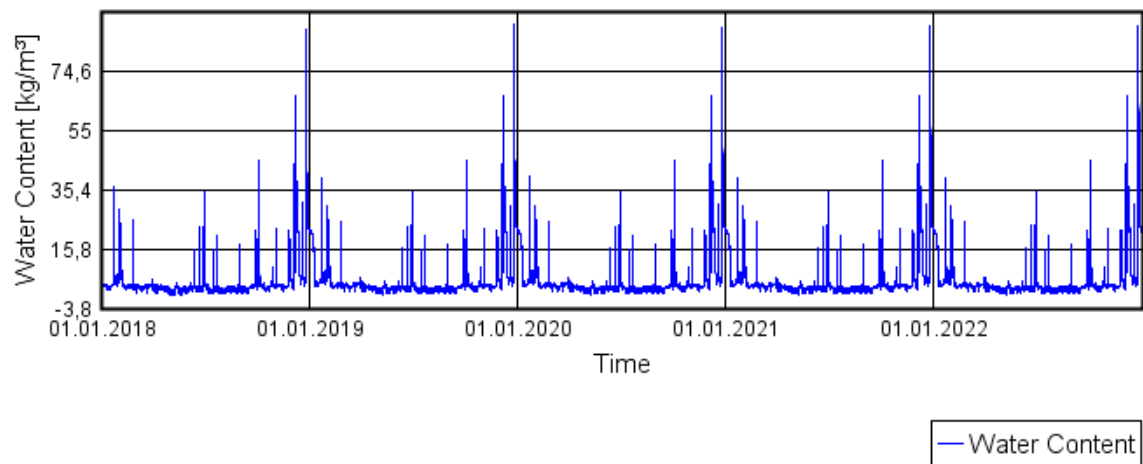
Relative Humidity



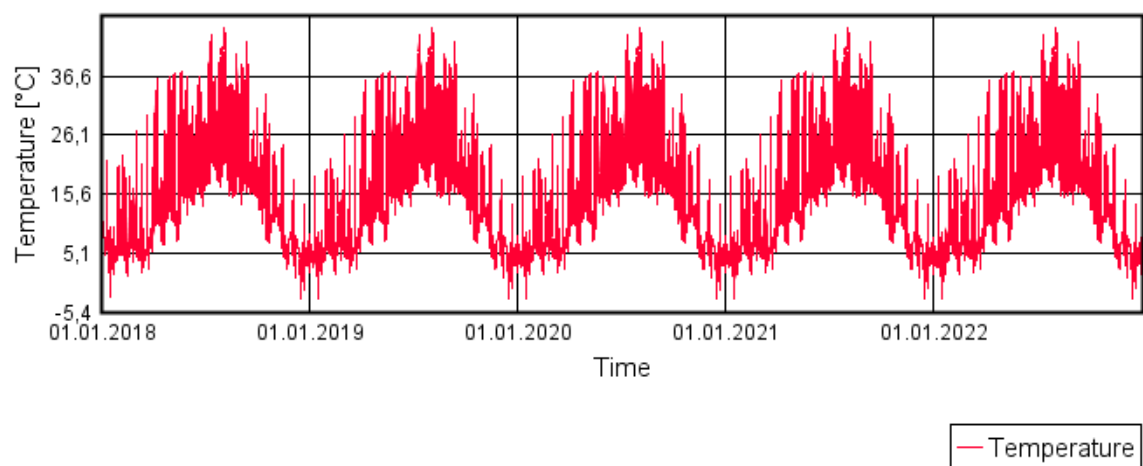
9.3.3 Vägg med hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0,1)

9.3.3.1 Punkt 1

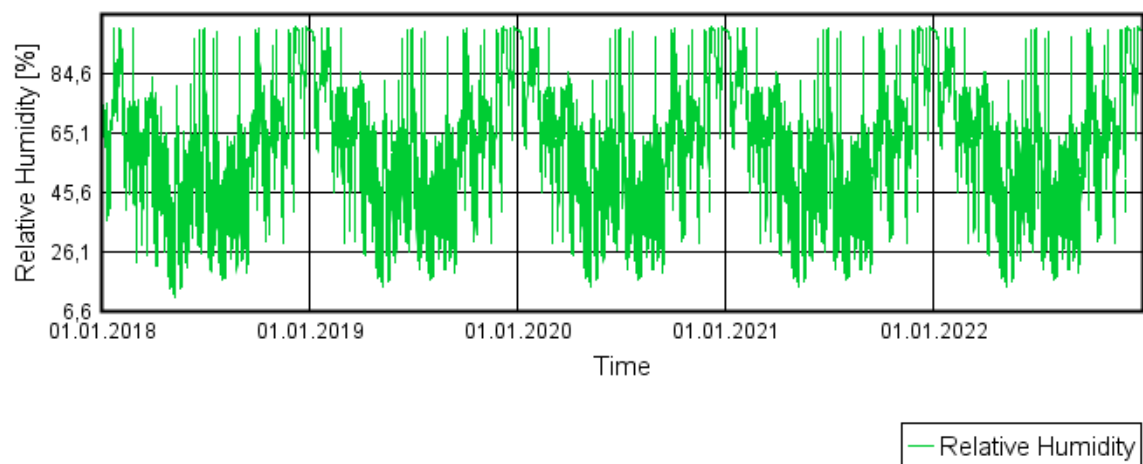
Water Content



Temperature

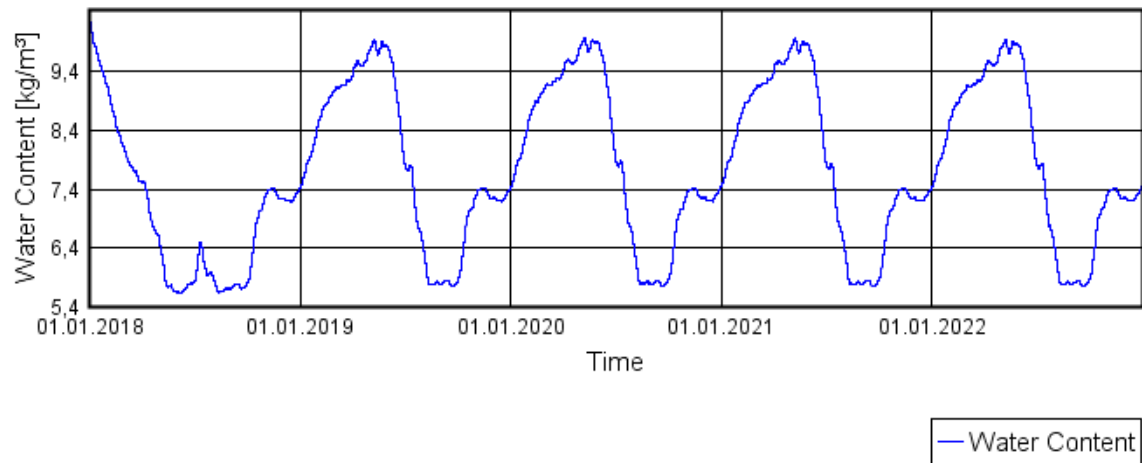


Relative Humidity

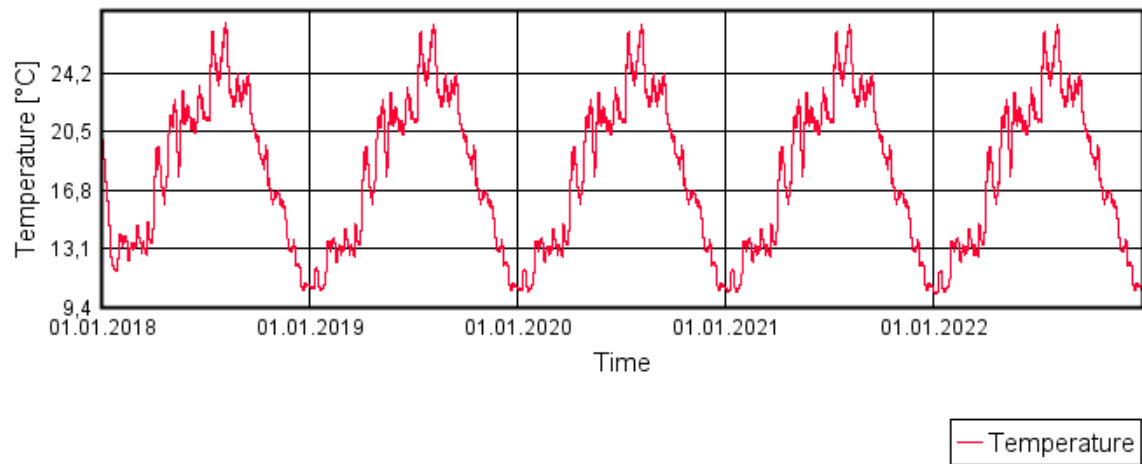


9.3.3.2 Punkt 2

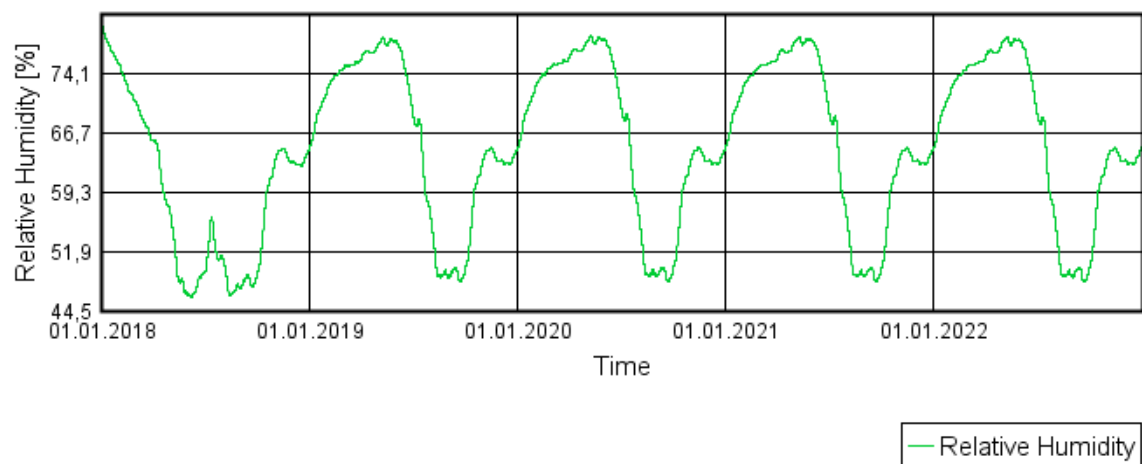
Water Content



Temperature

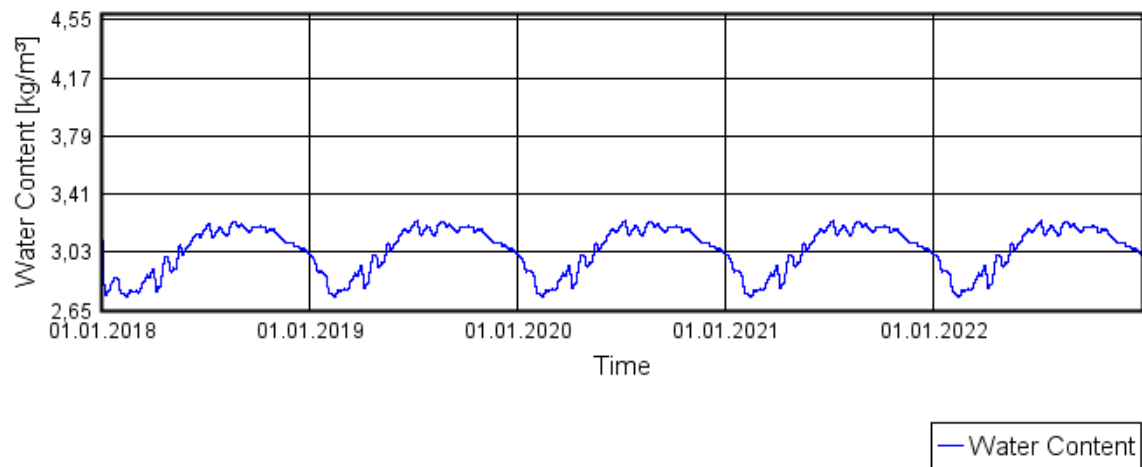


Relative Humidity

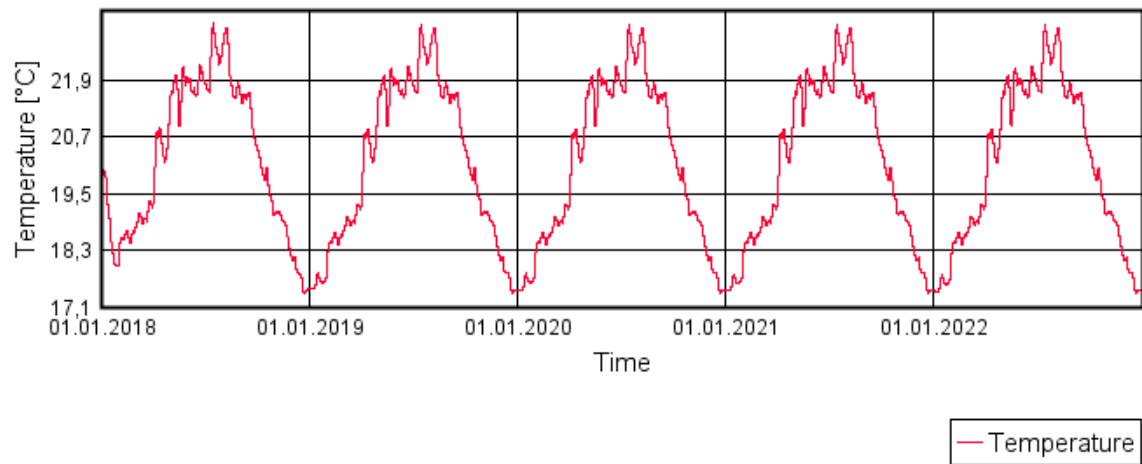


9.3.3.3 Punkt 3

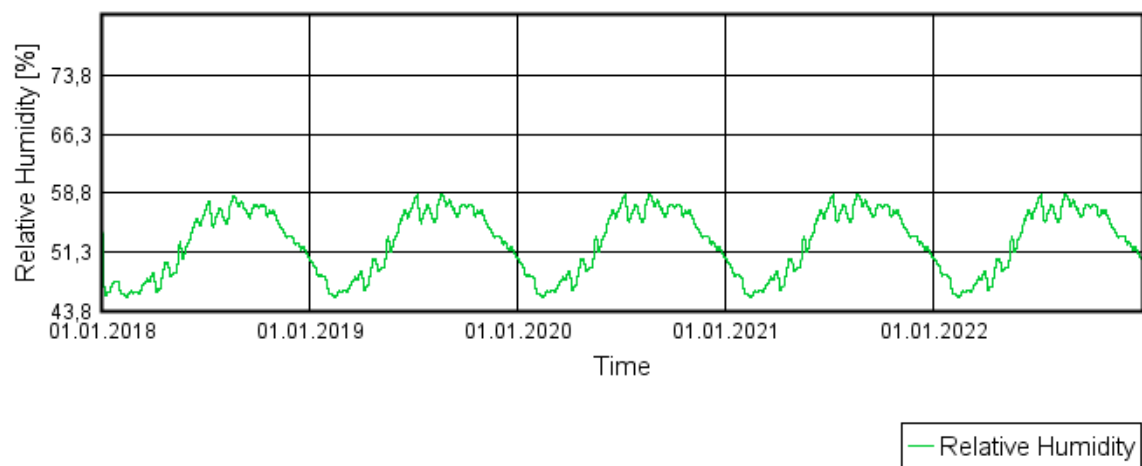
Water Content



Temperature



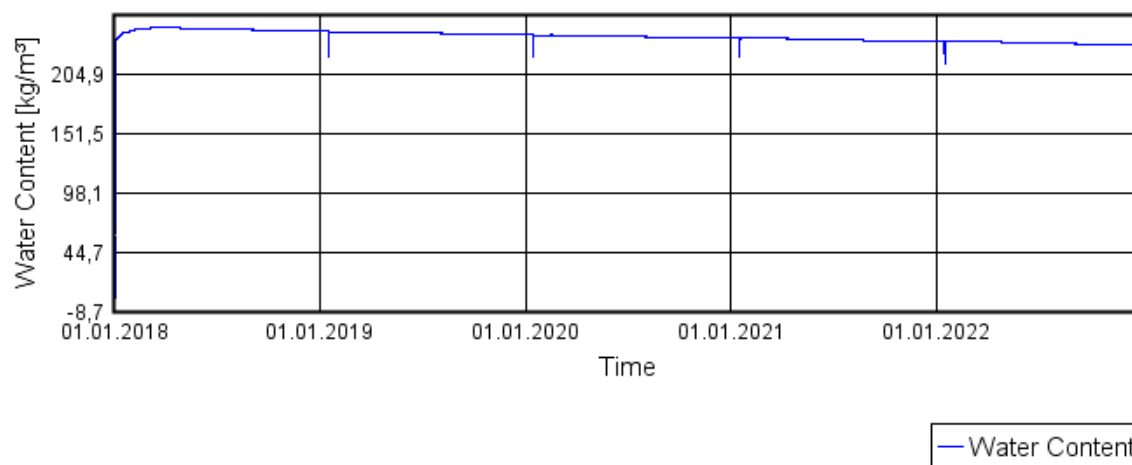
Relative Humidity



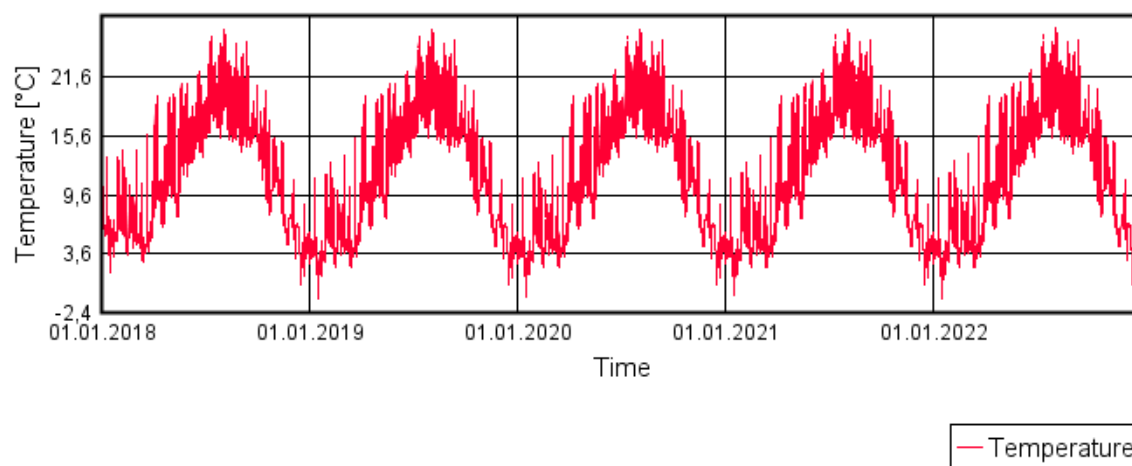
9.3.4 Vagg med 100 mm isolering

9.3.4.1 Punkt 1

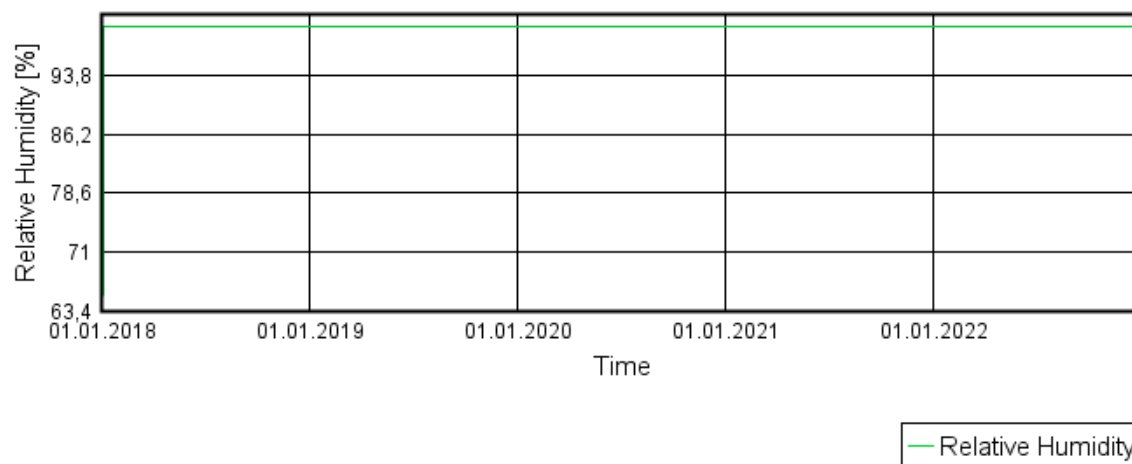
Water Content



Temperature

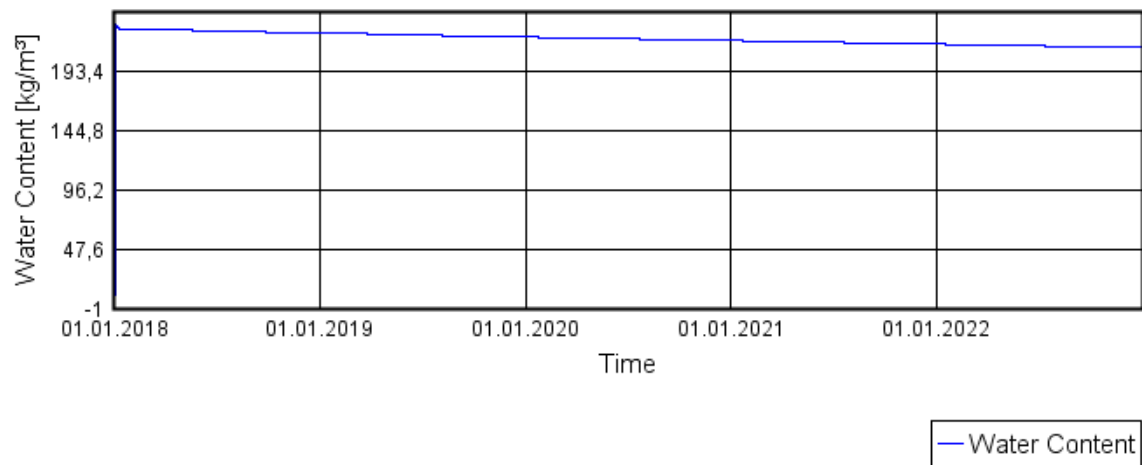


Relative Humidity

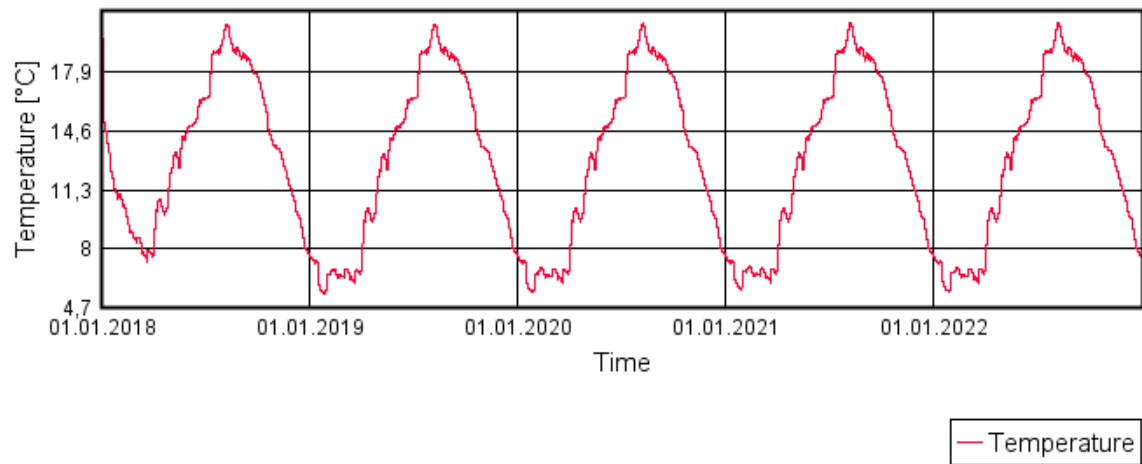


9.3.4.2 Punkt 2

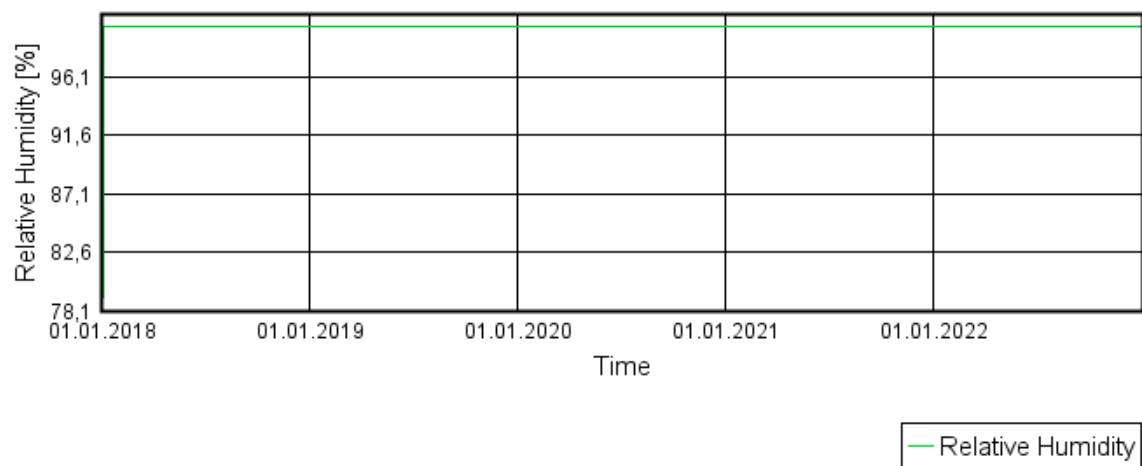
Water Content



Temperature

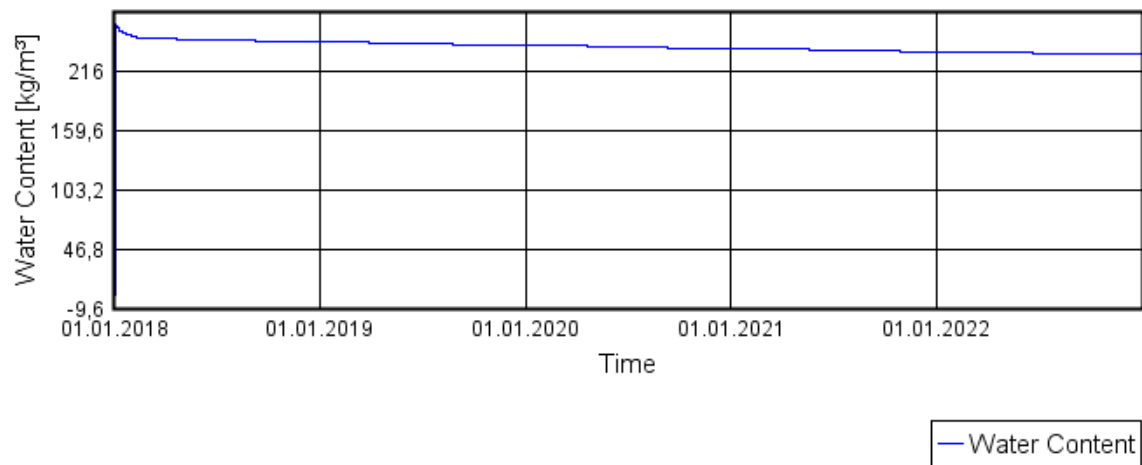


Relative Humidity

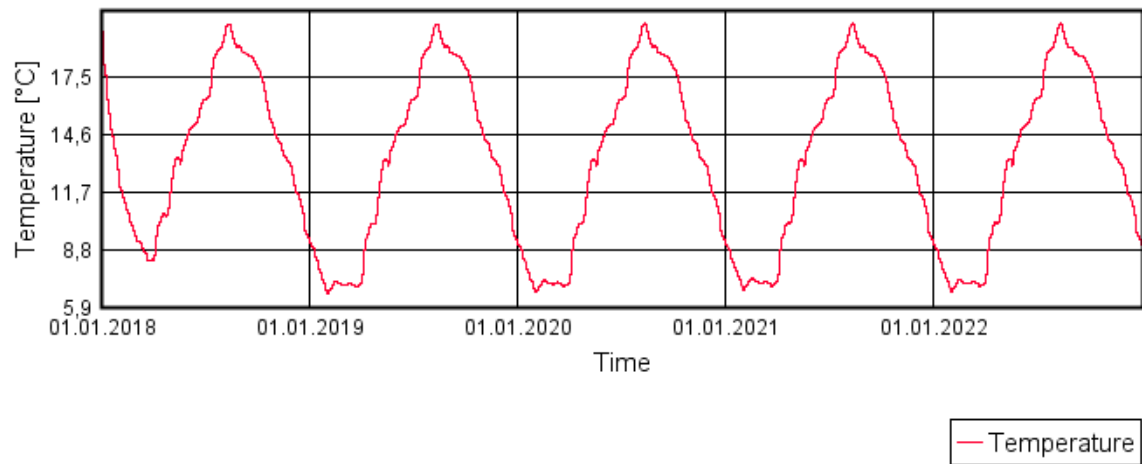


9.3.4.3 Punkt 3

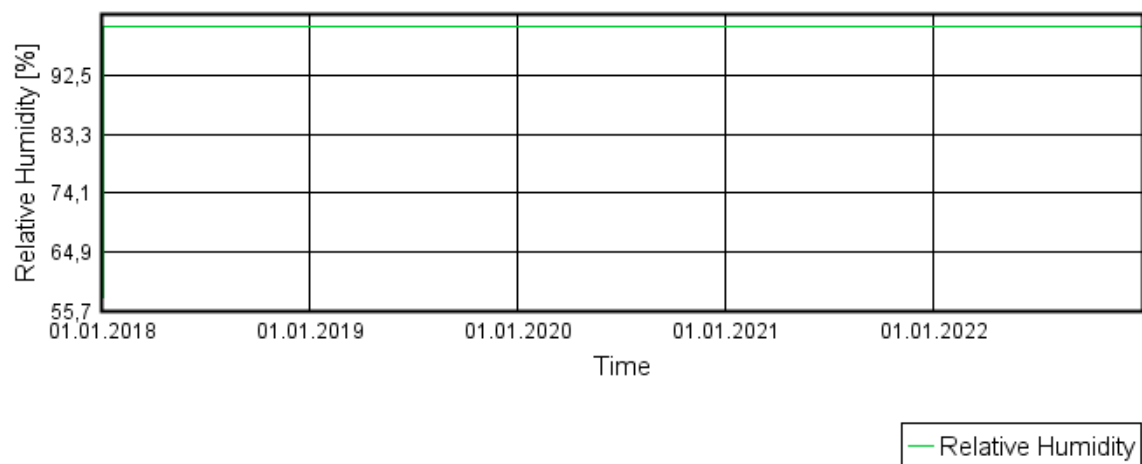
Water Content



Temperature



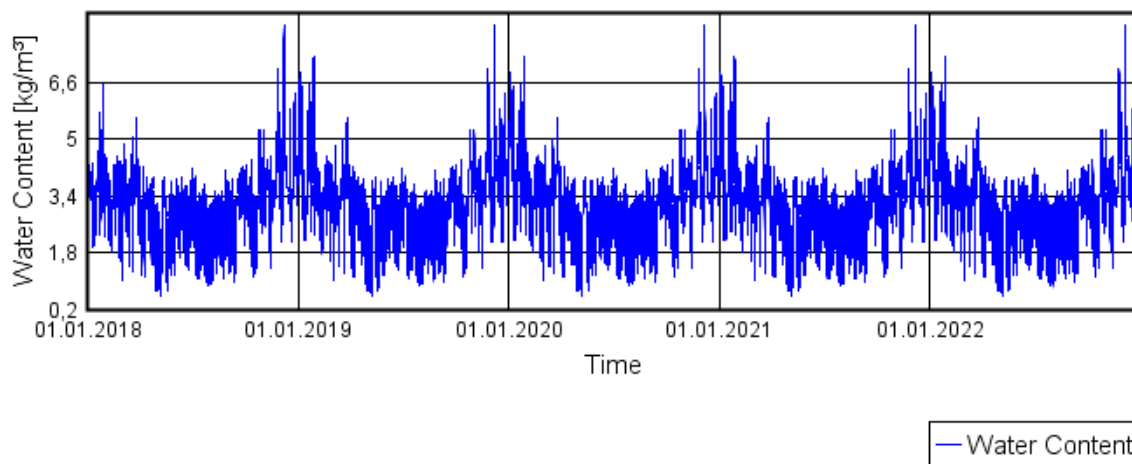
Relative Humidity



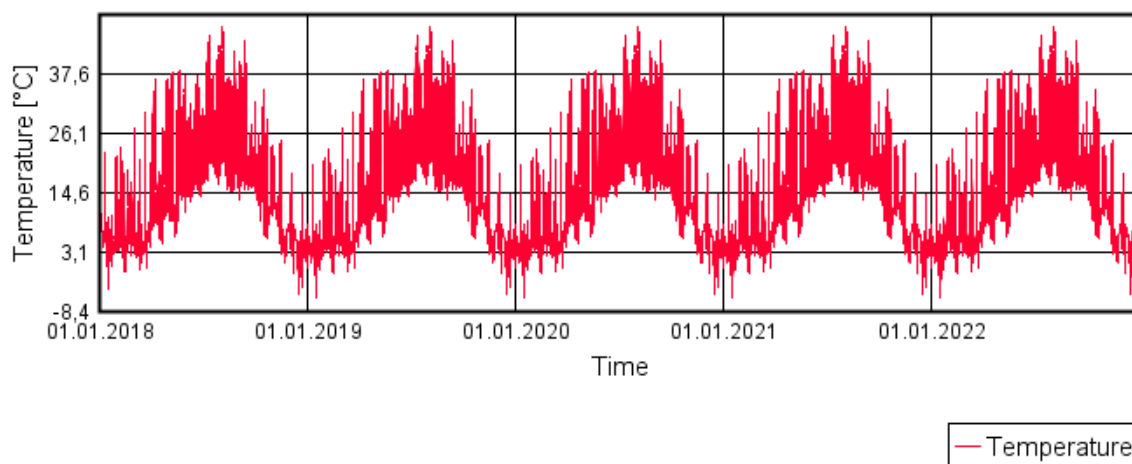
9.3.5 Vegg med 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0)

9.3.5.1 Punkt 1

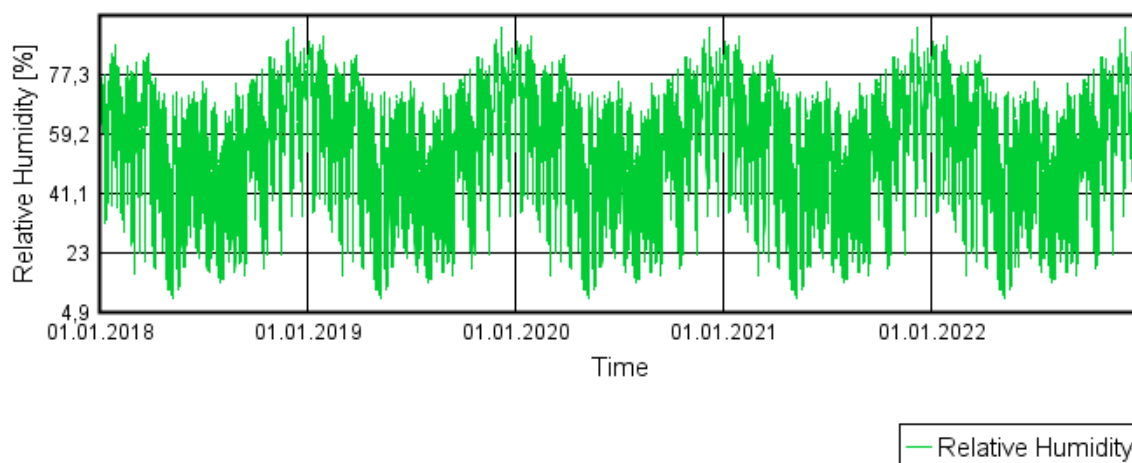
Water Content



Temperature

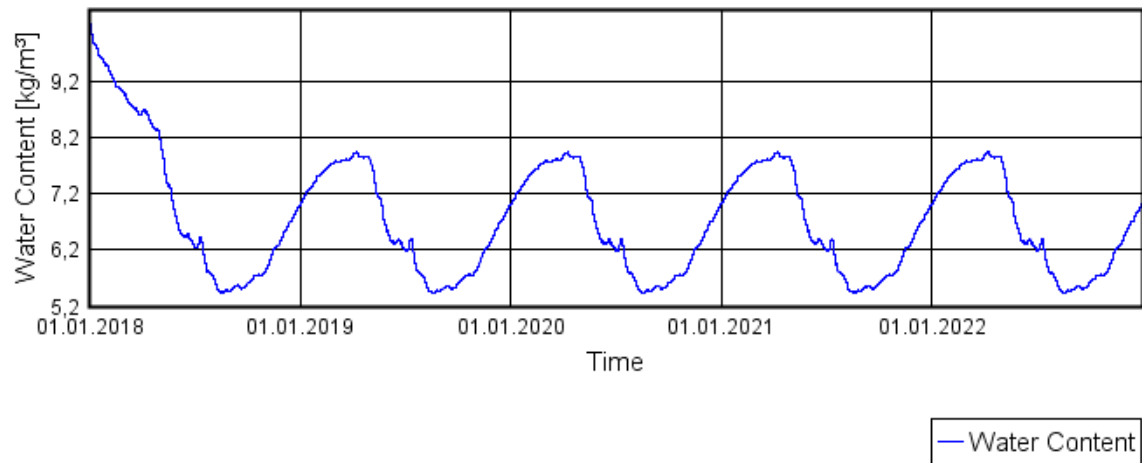


Relative Humidity

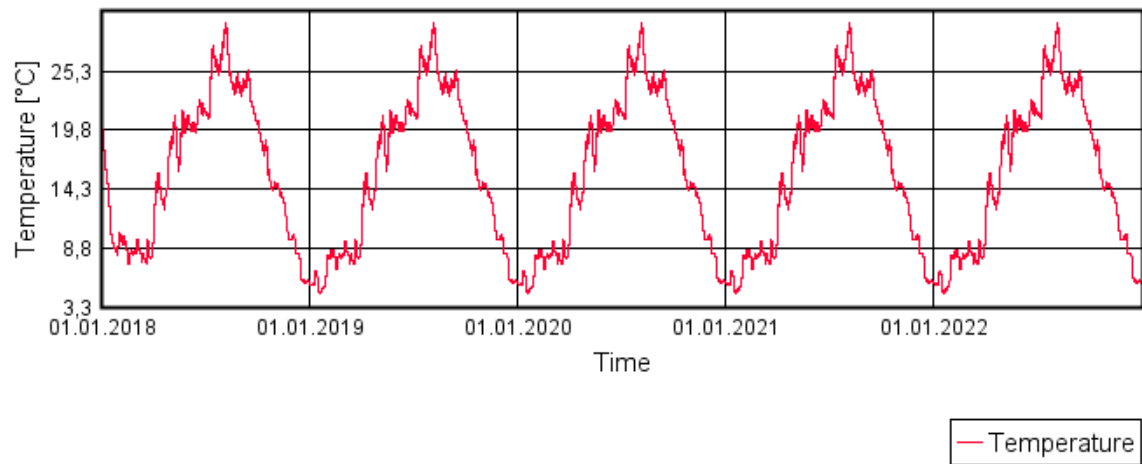


9.3.5.2 Punkt 2

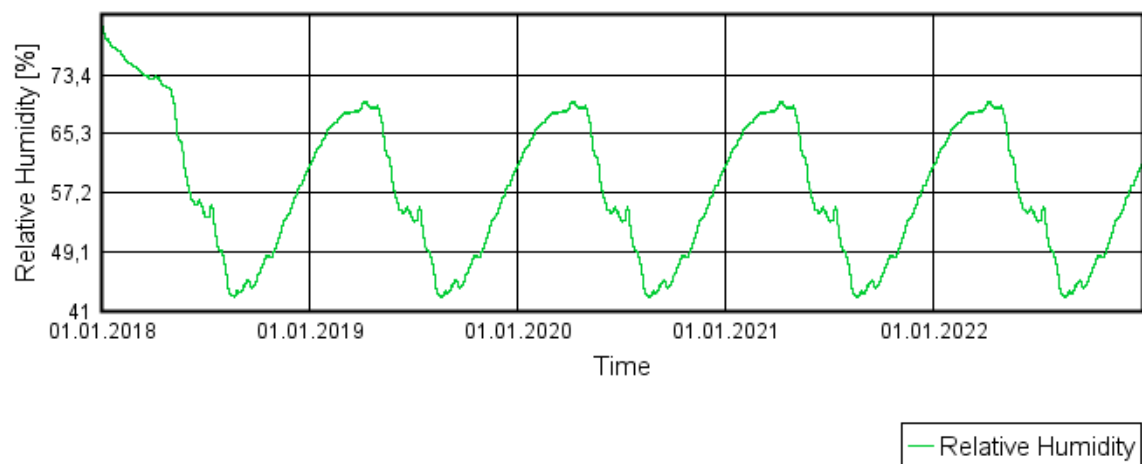
Water Content



Temperature

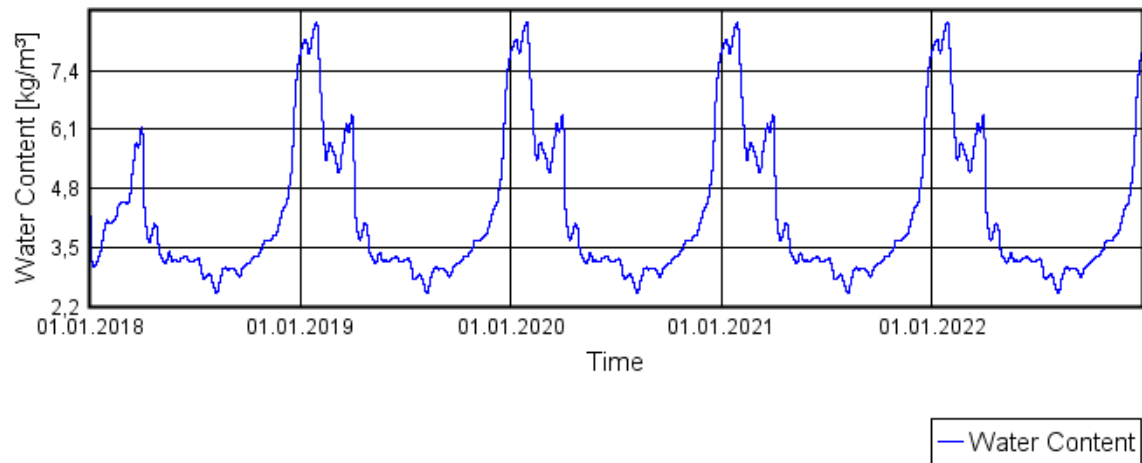


Relative Humidity

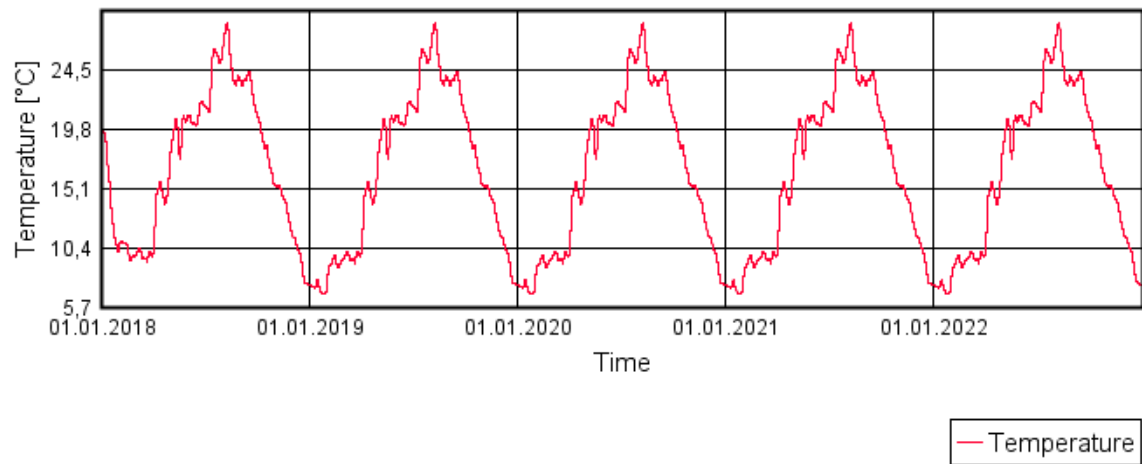


9.3.5.3 Punkt 3

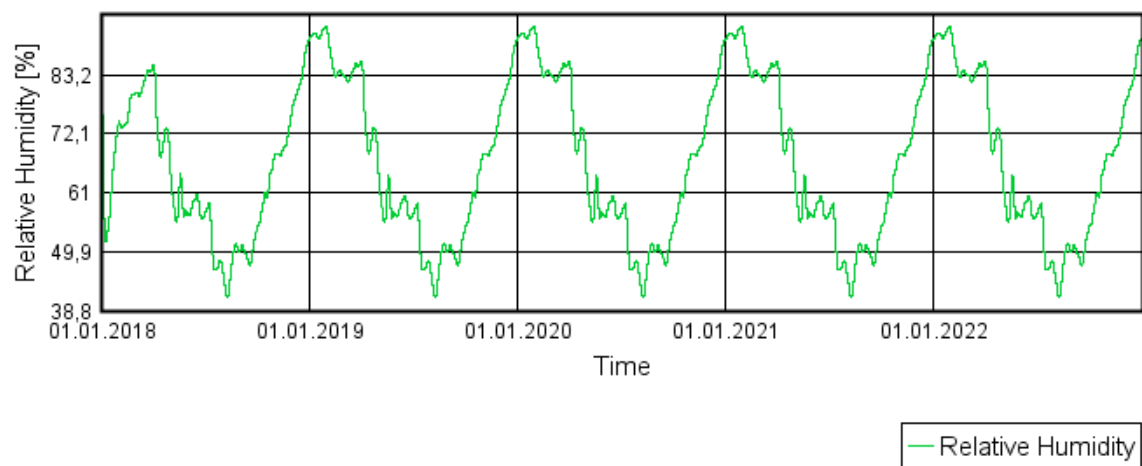
Water Content



Temperature



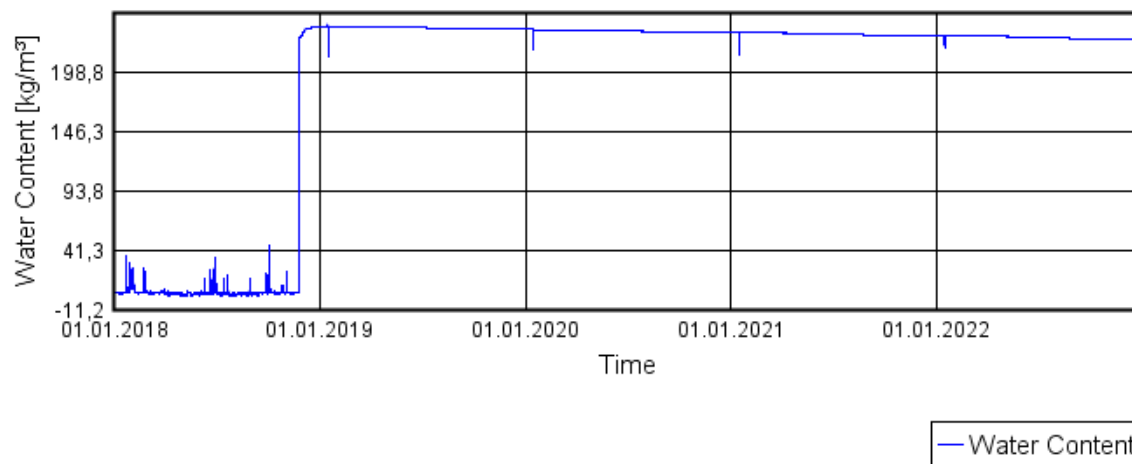
Relative Humidity



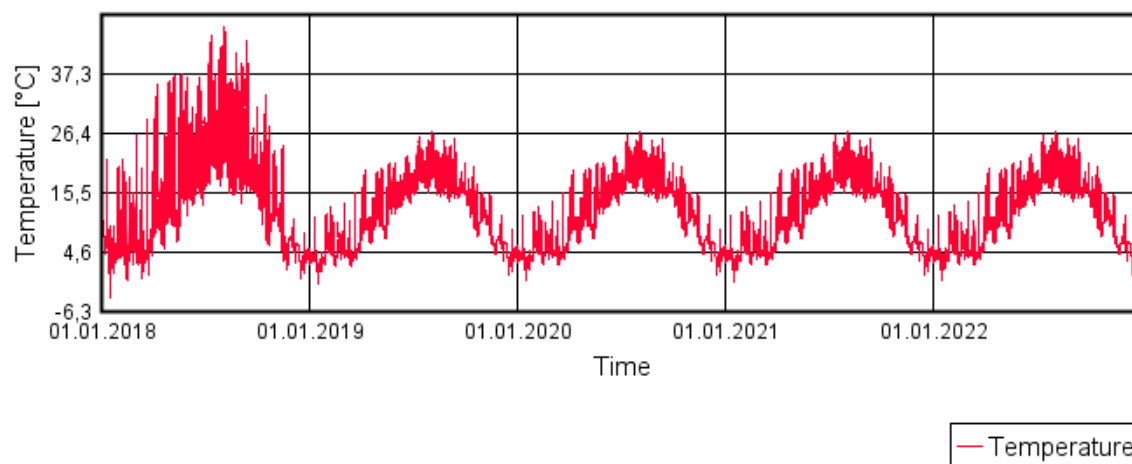
9.3.6 Vägg med 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0,1)

9.3.6.1 Punkt 1

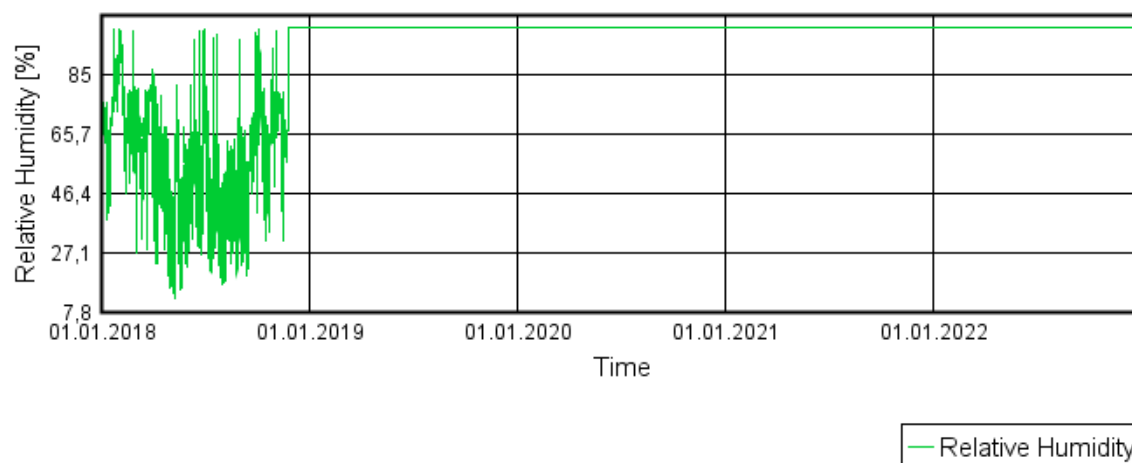
Water Content



Temperature

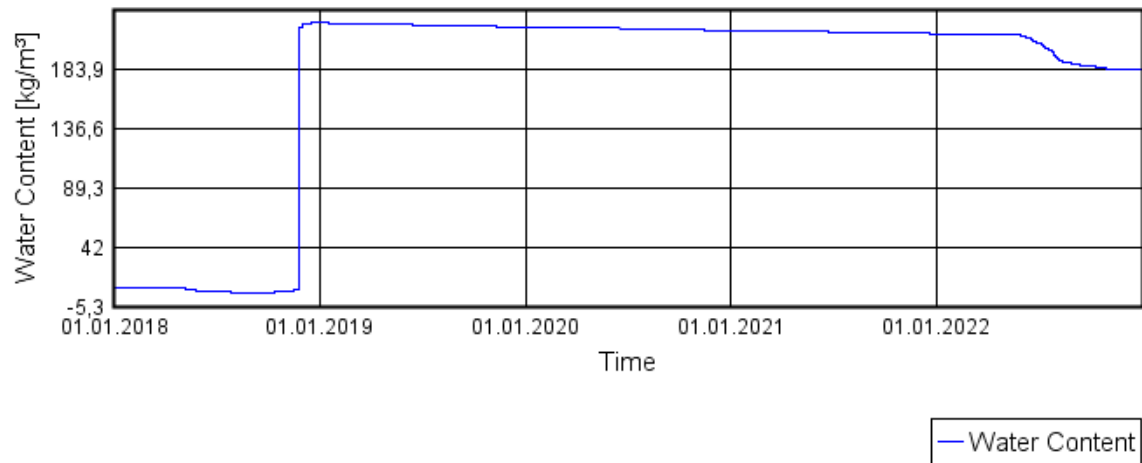


Relative Humidity

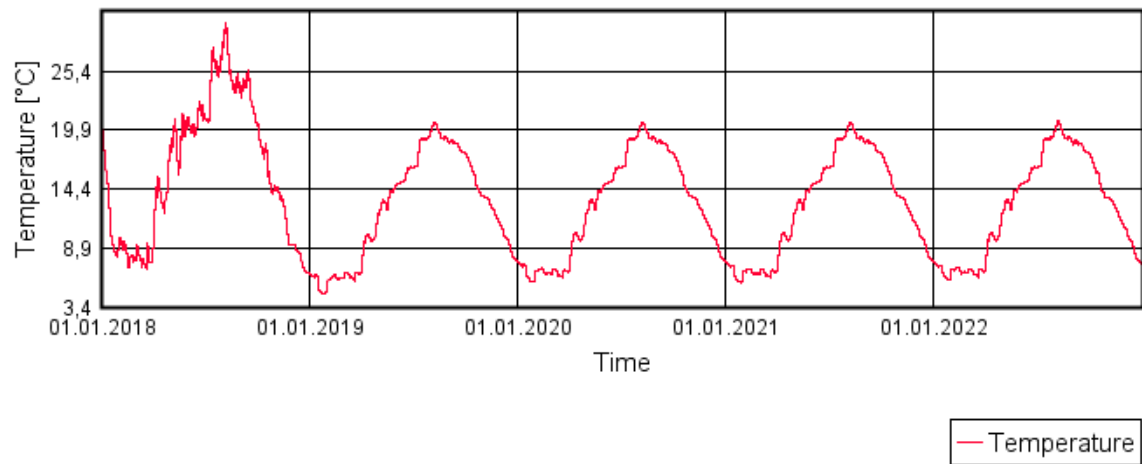


9.3.6.2 Punkt 2

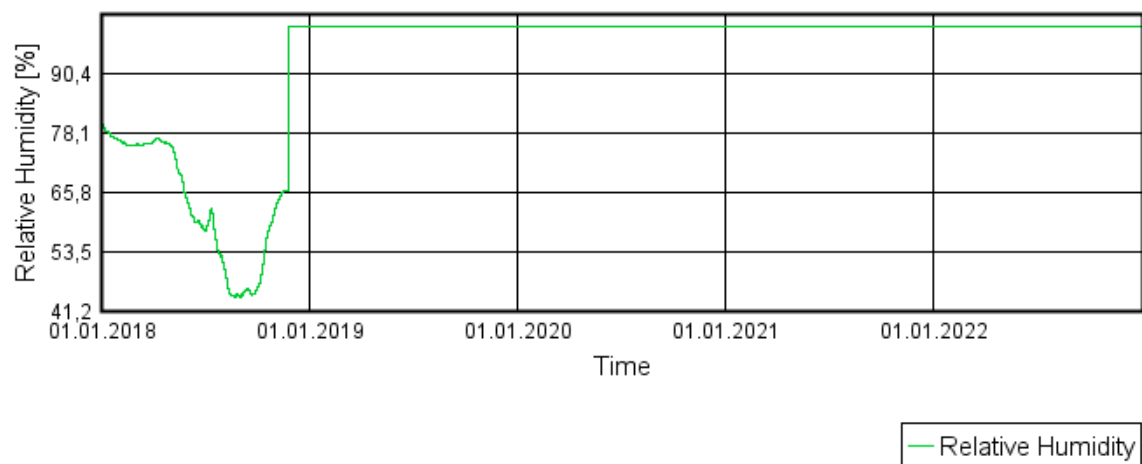
Water Content



Temperature

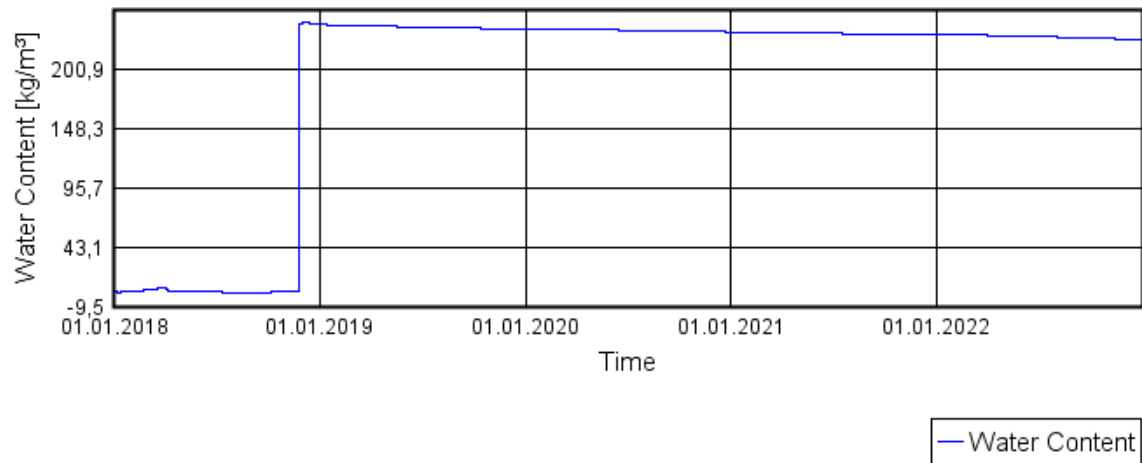


Relative Humidity

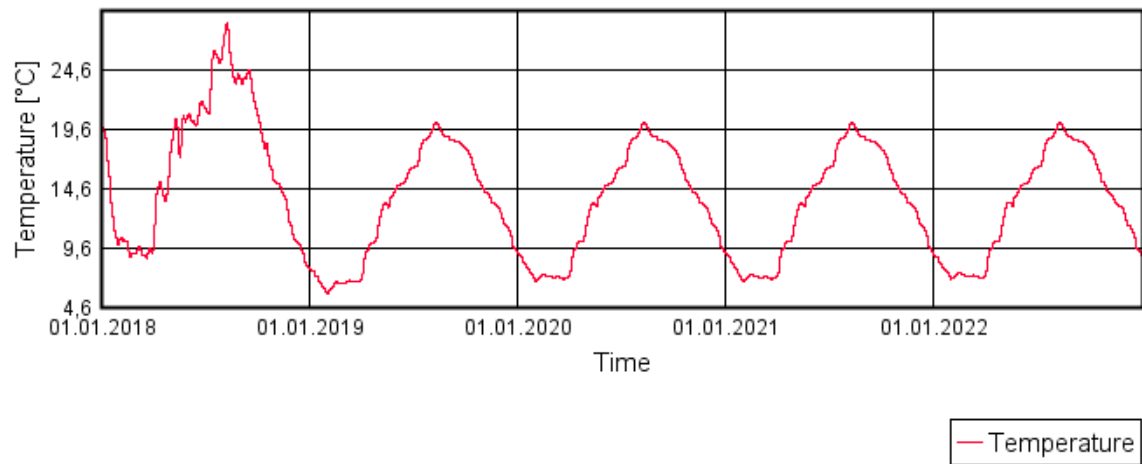


9.3.6.3 Punkt 3

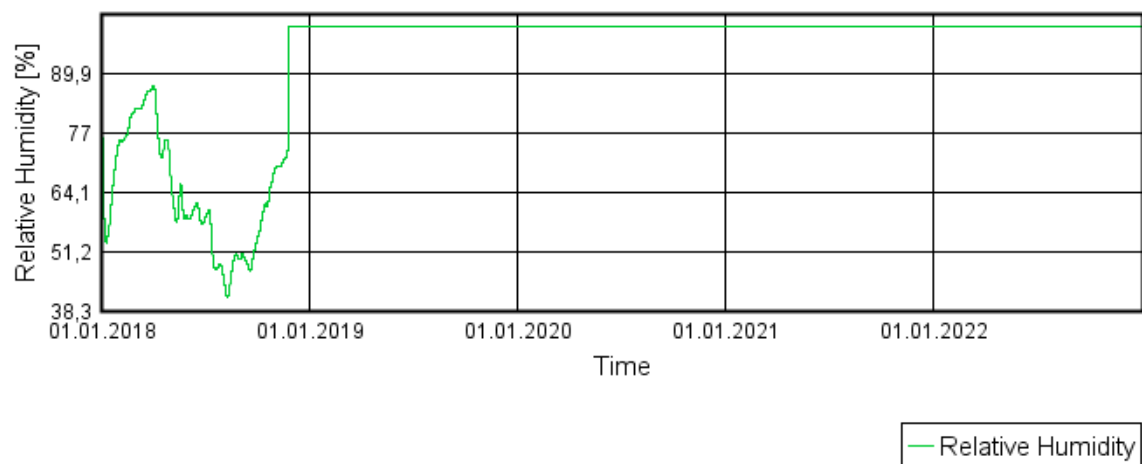
Water Content



Temperature



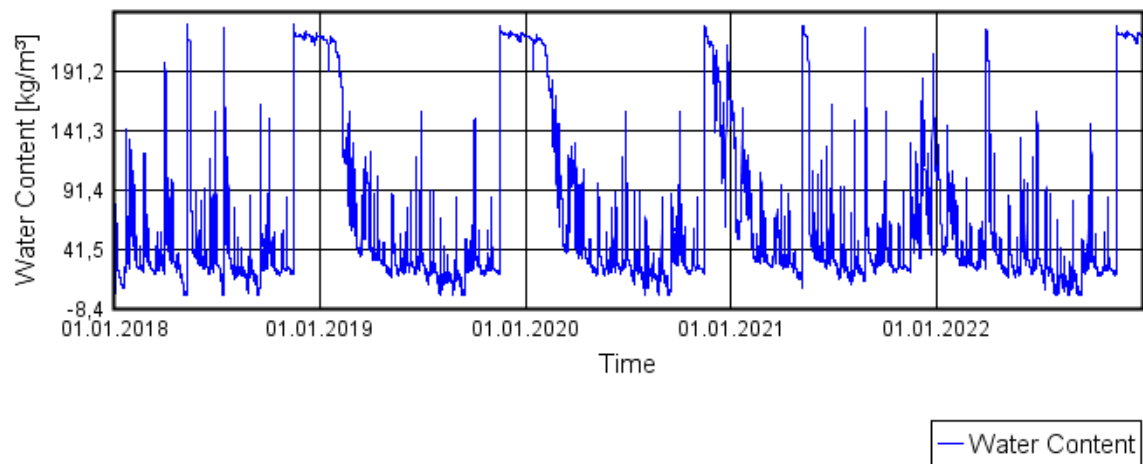
Relative Humidity



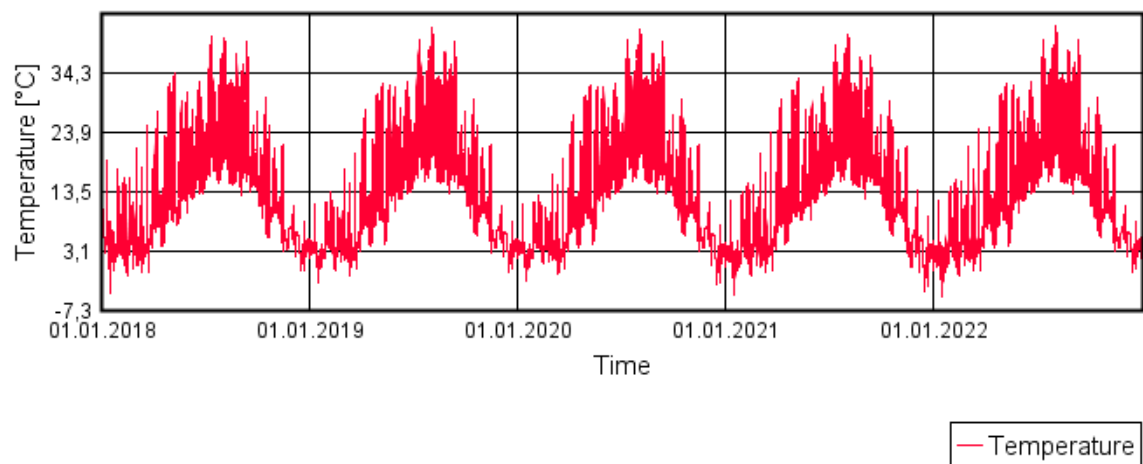
9.3.7 Vägg med ångspärr och 100 mm isolering

9.3.7.1 Punkt 1

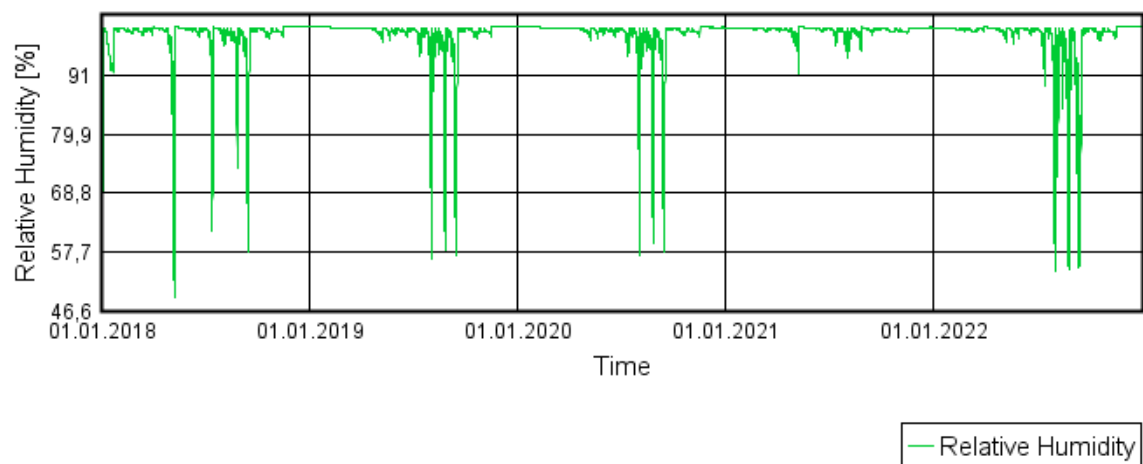
Water Content



Temperature

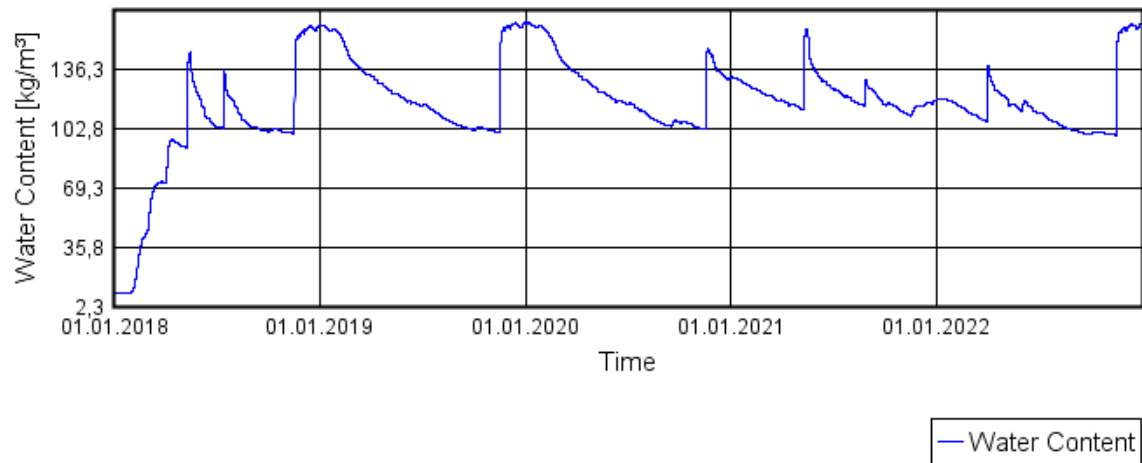


Relative Humidity

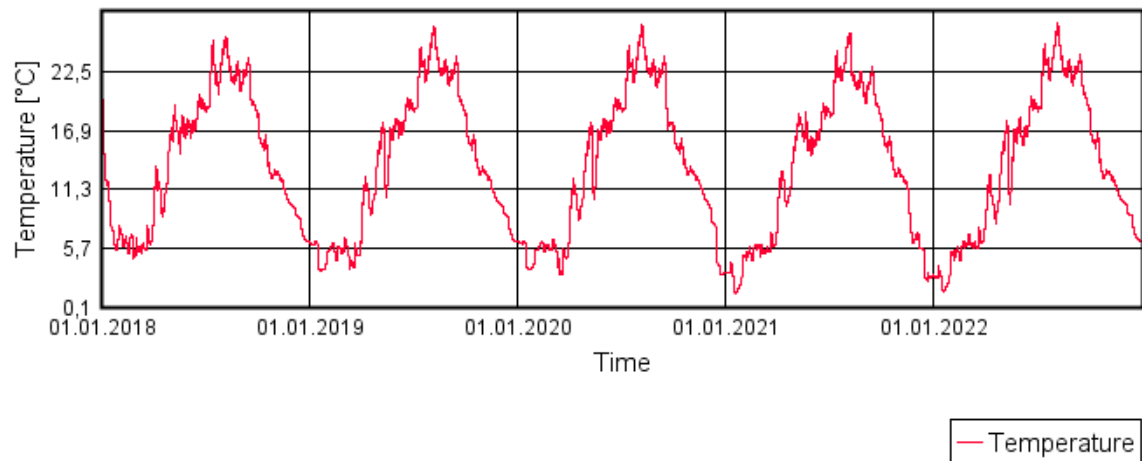


9.3.7.2 Punkt 2

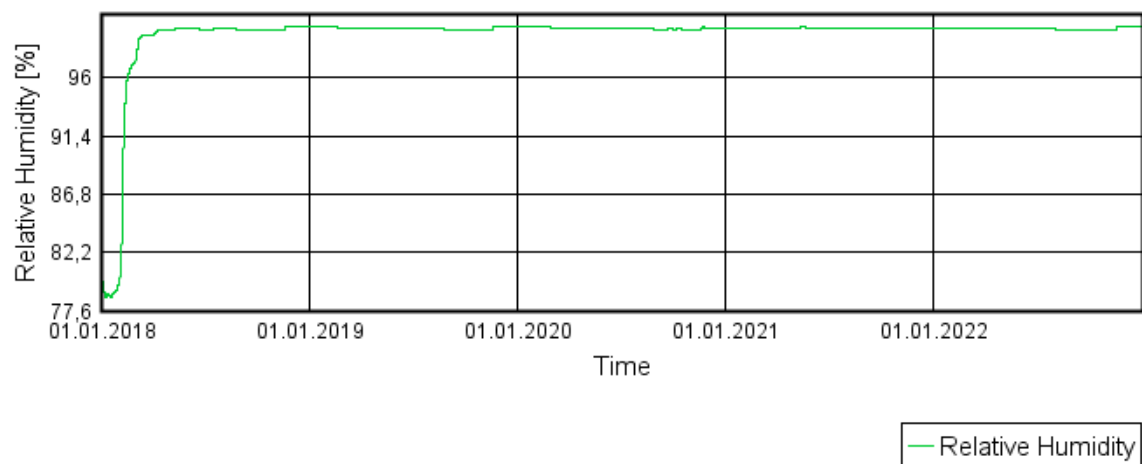
Water Content



Temperature

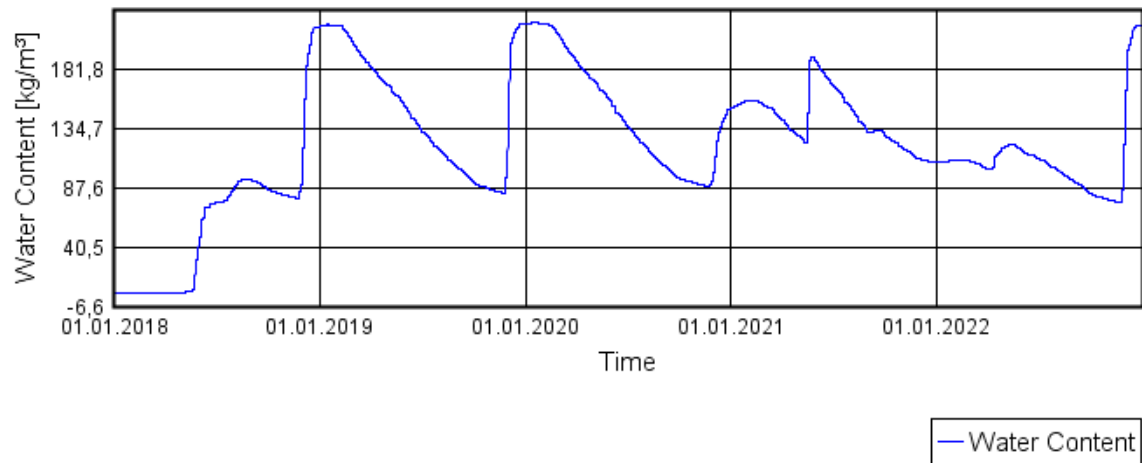


Relative Humidity

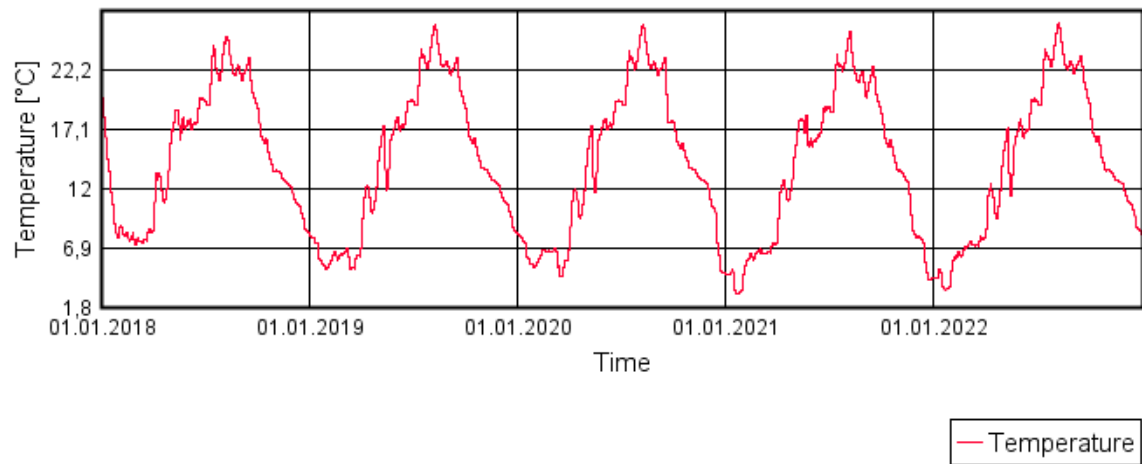


9.3.7.3 Punkt 3

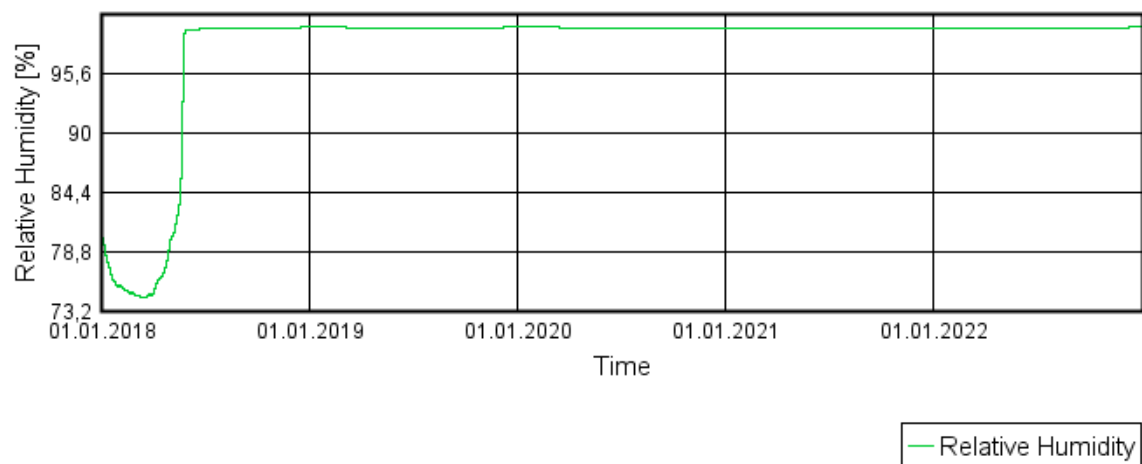
Water Content



Temperature



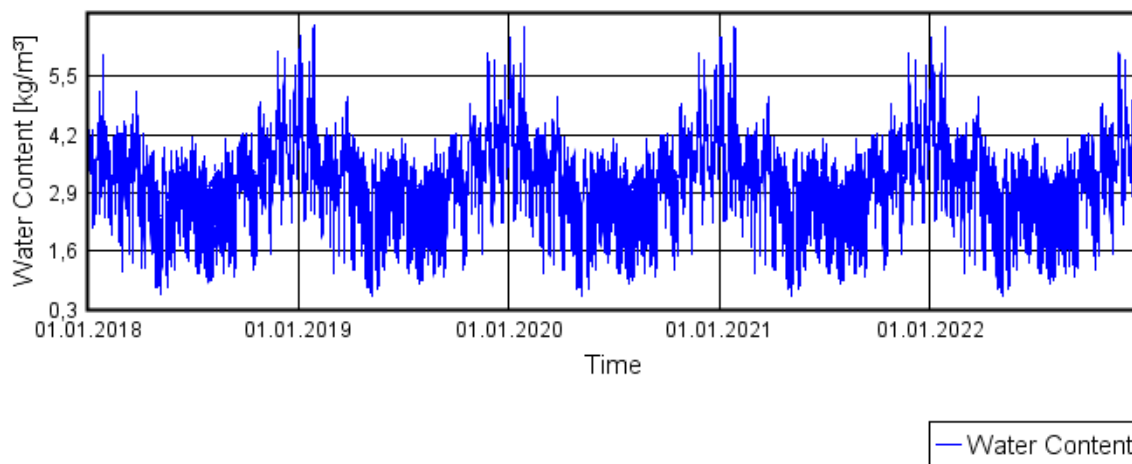
Relative Humidity



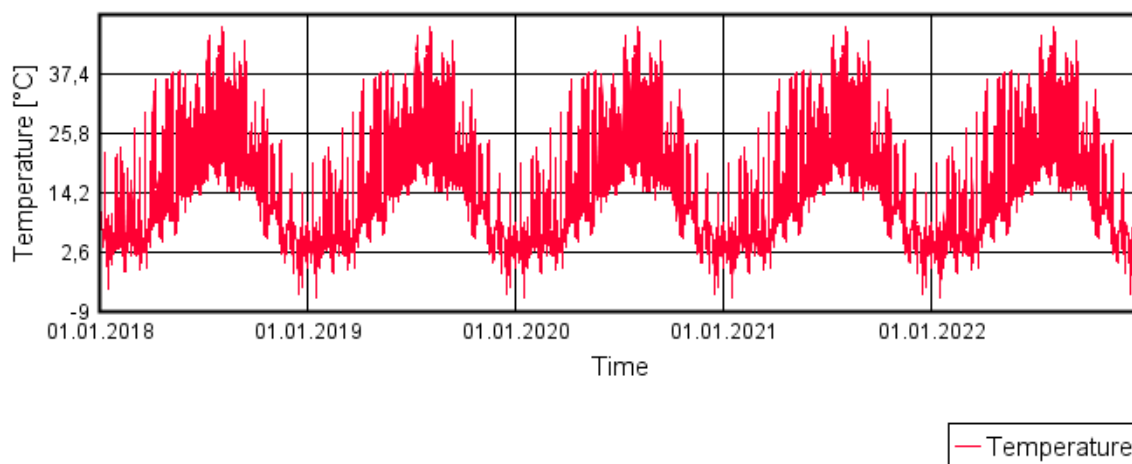
9.3.8 Vägg med ångspärr, 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0)

9.3.8.1 Punkt 1

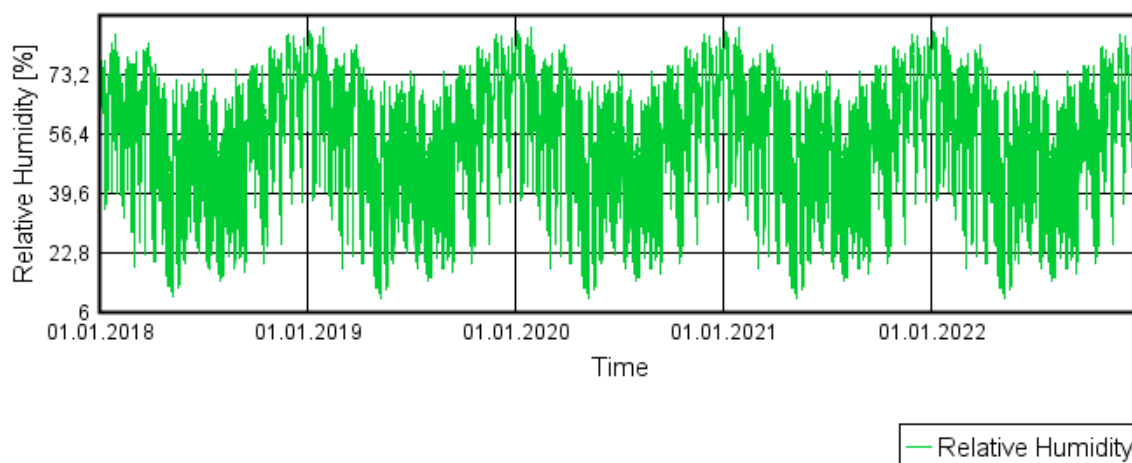
Water Content



Temperature

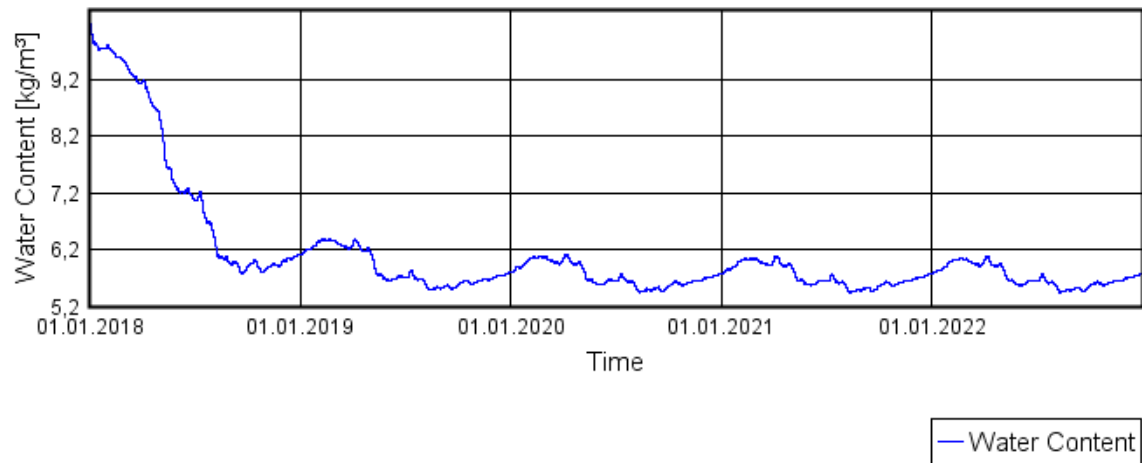


Relative Humidity

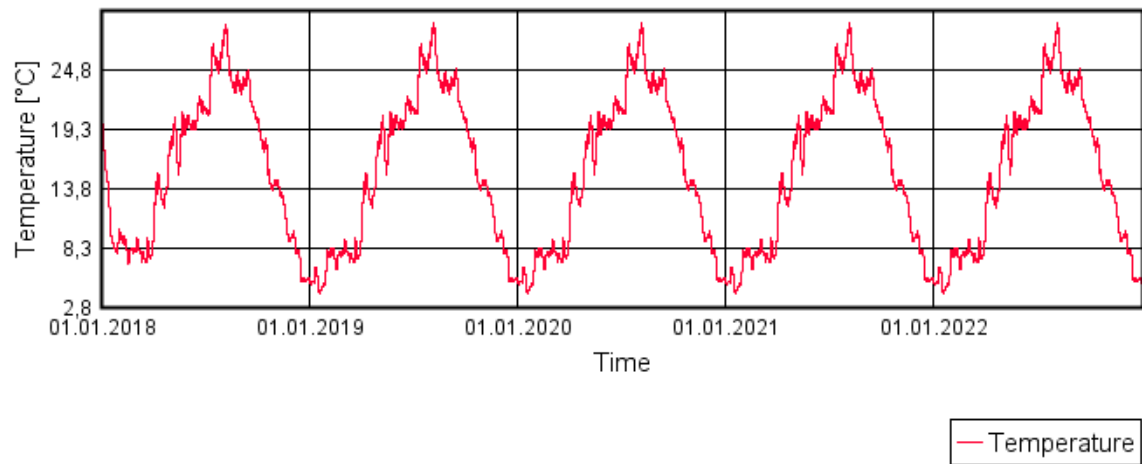


9.3.8.2 Punkt 2

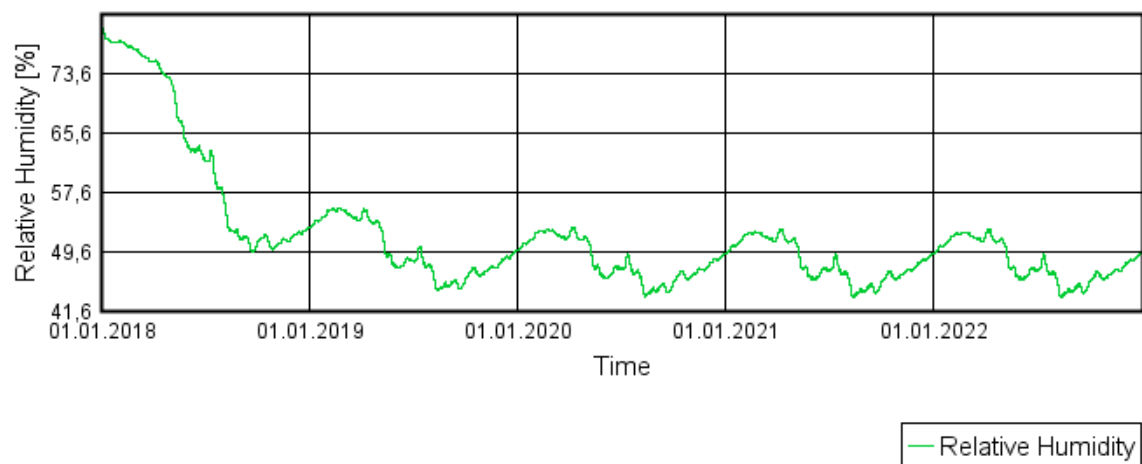
Water Content



Temperature

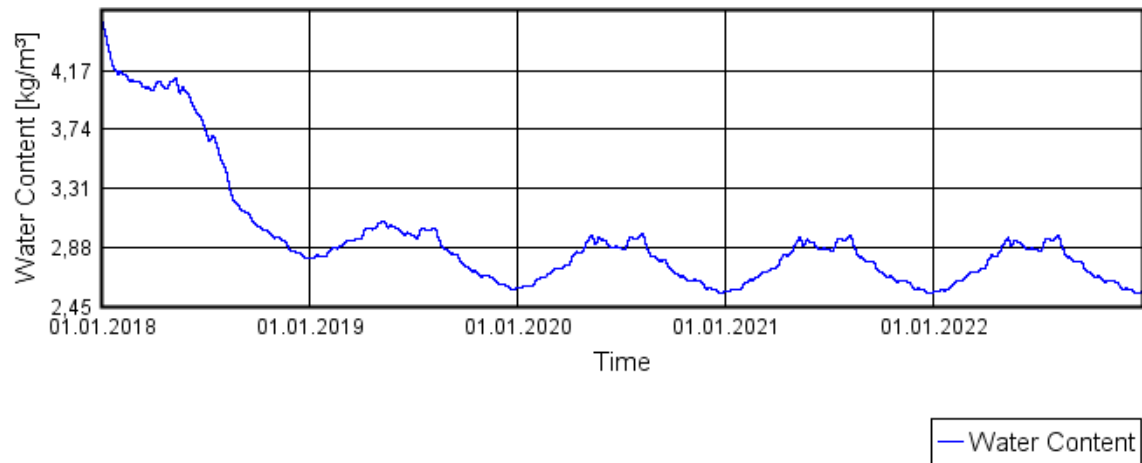


Relative Humidity

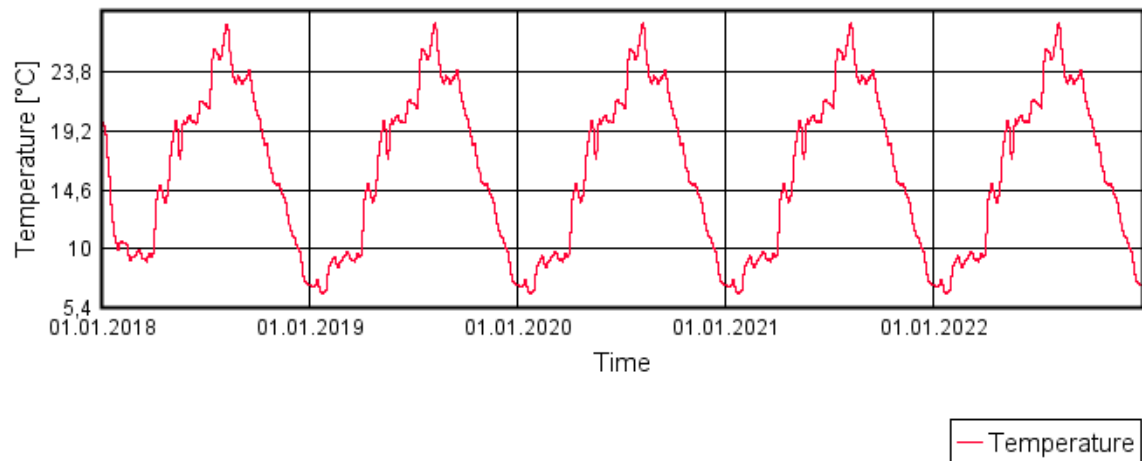


9.3.8.3 Punkt 3

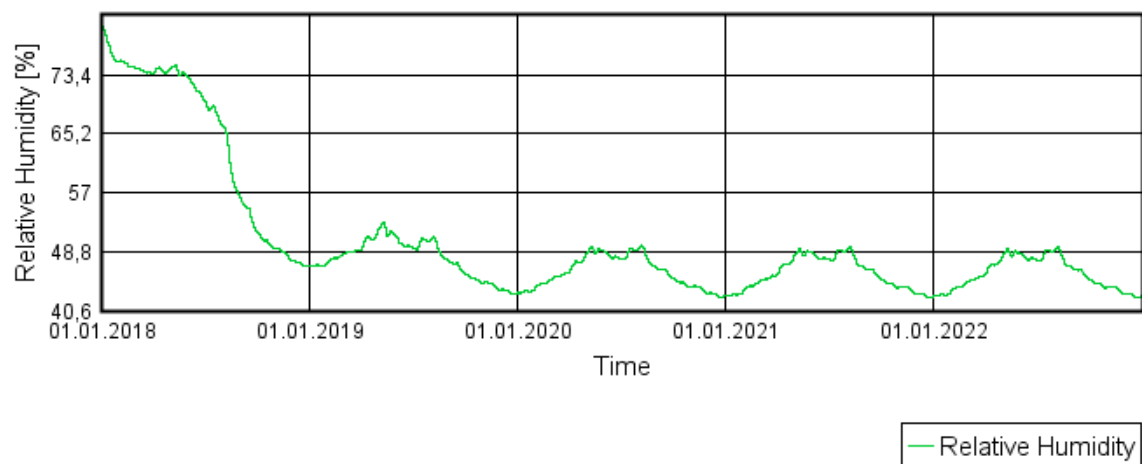
Water Content



Temperature



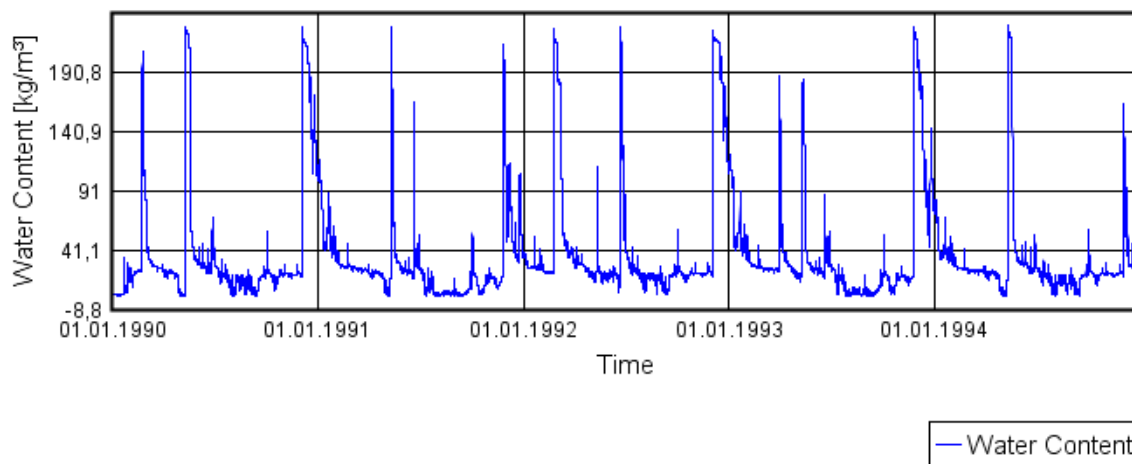
Relative Humidity



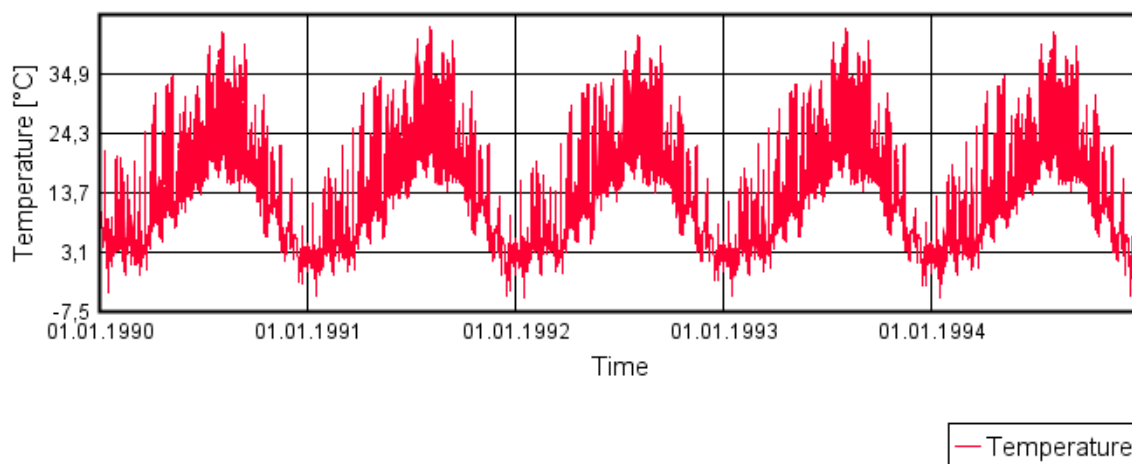
9.3.9 Vägg med ångspärr, 100 mm isolering och hydrofobiskt ytskikt (rain factor 0,1)

9.3.9.1 Punkt 1

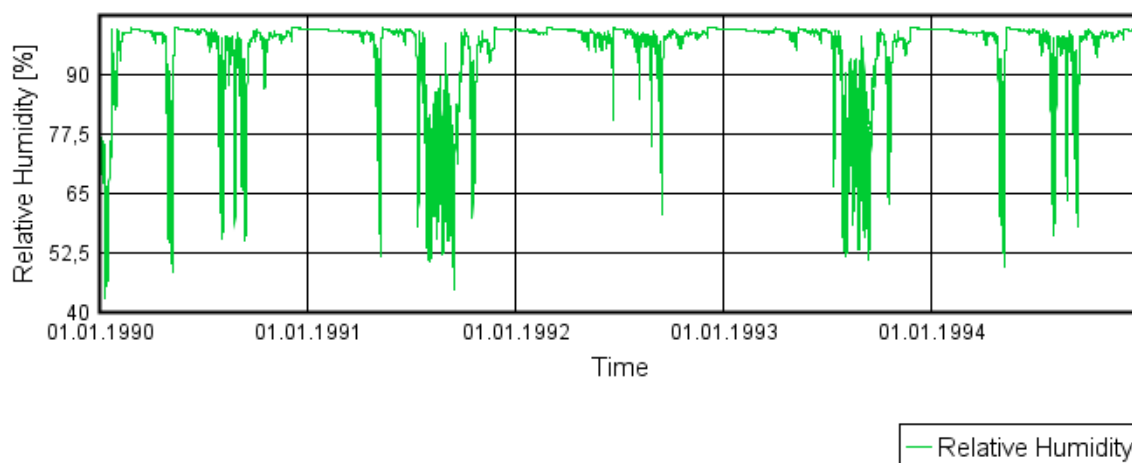
Water Content



Temperature

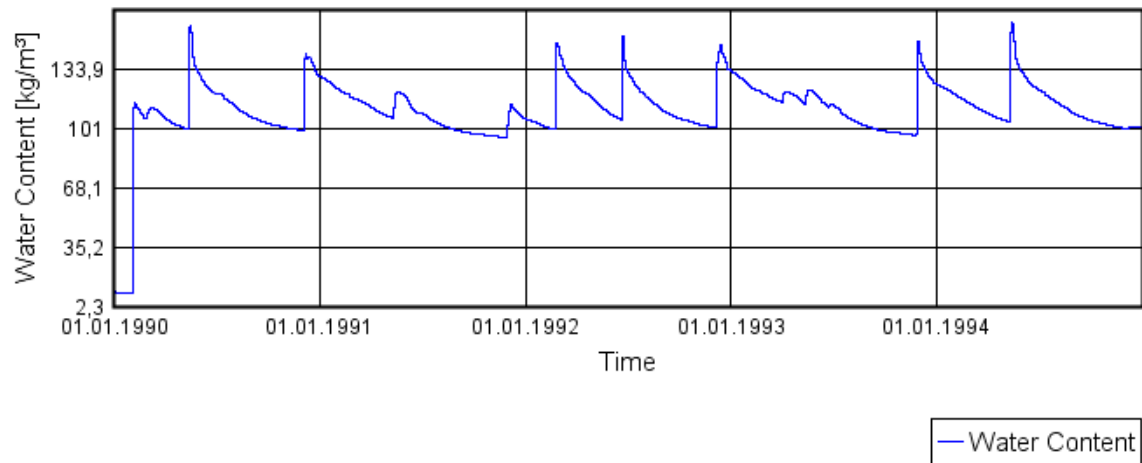


Relative Humidity

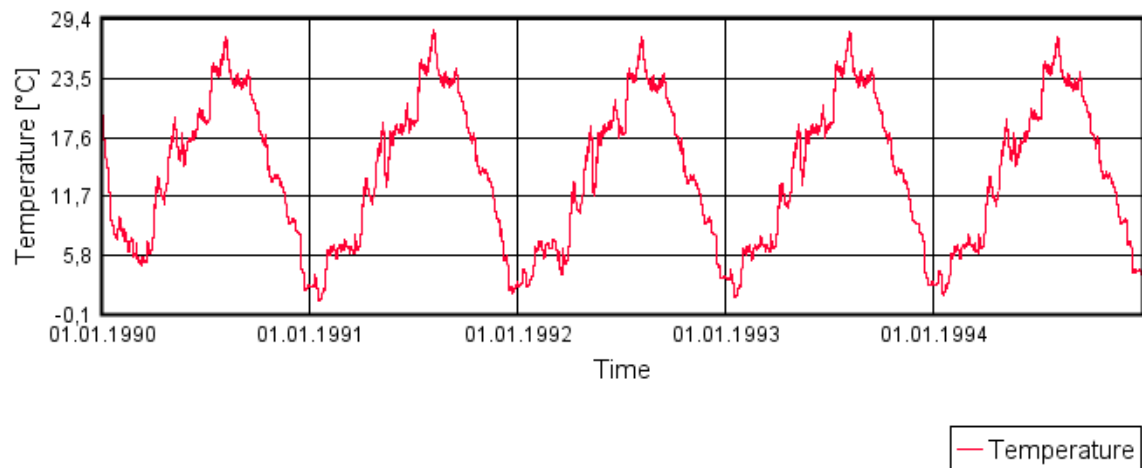


9.3.9.2 Punkt 2

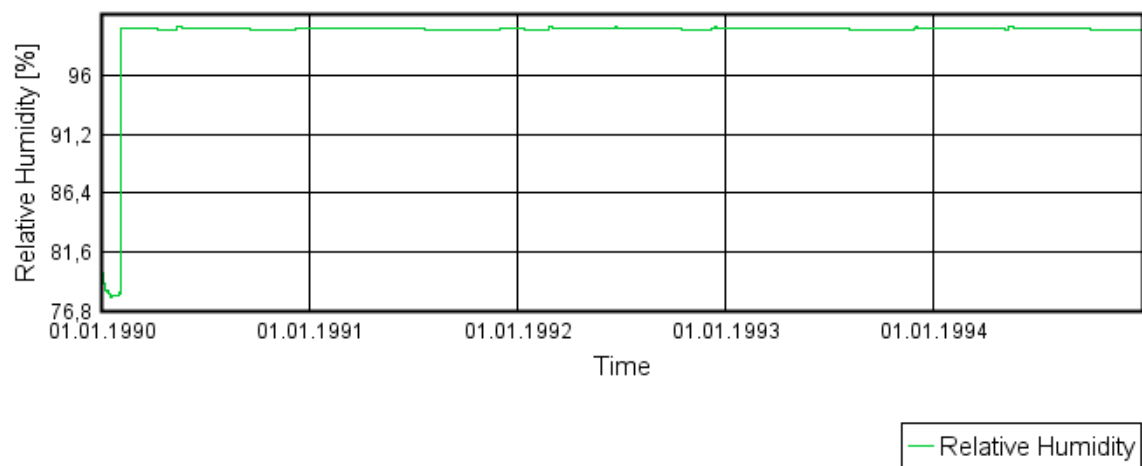
Water Content



Temperature

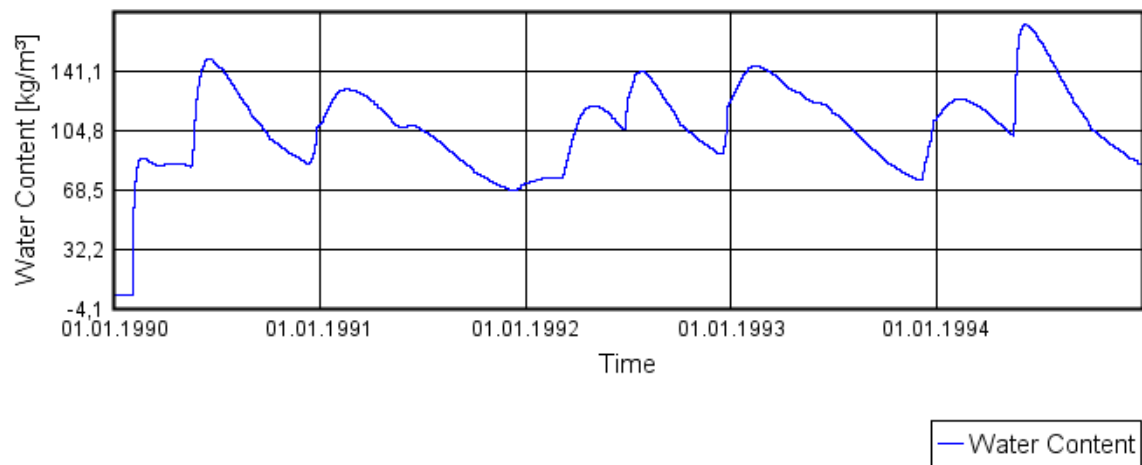


Relative Humidity

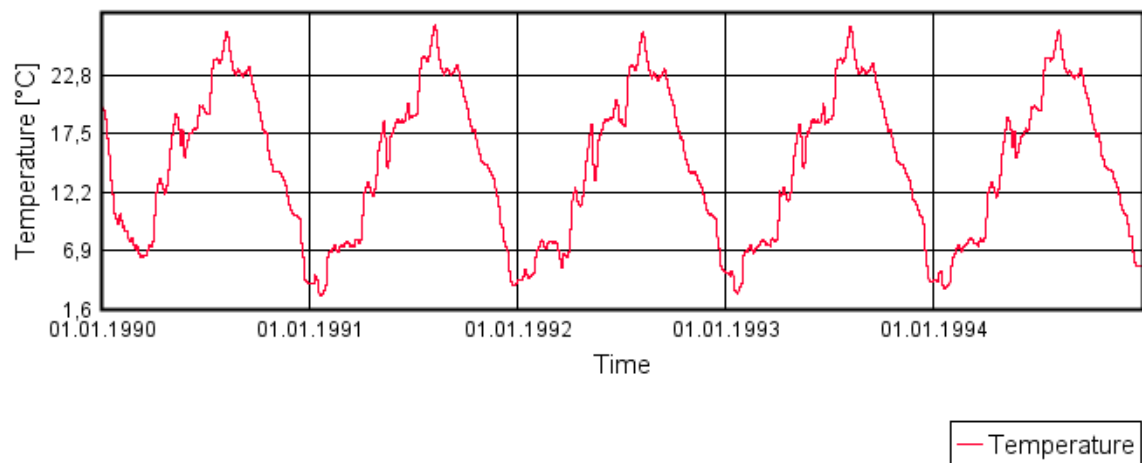


9.3.9.3 Punkt 3

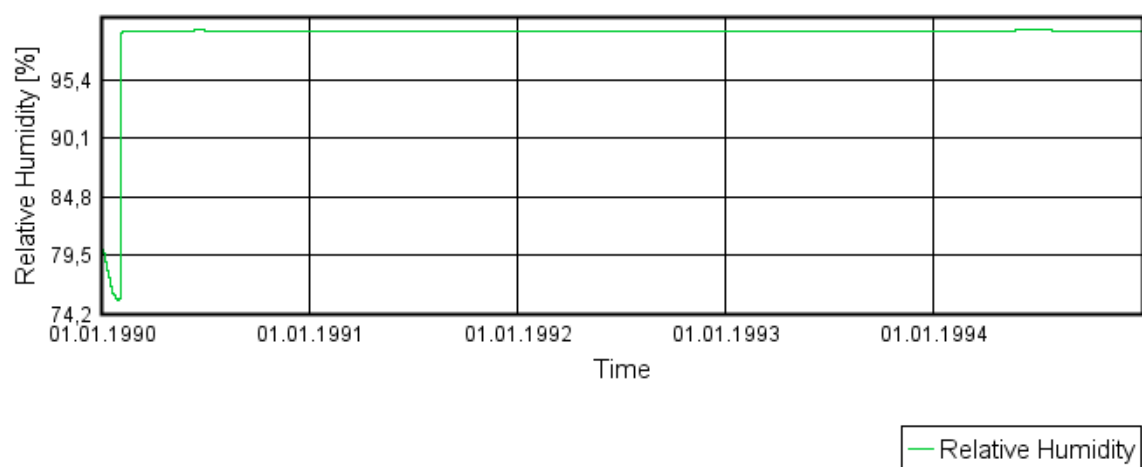
Water Content



Temperature



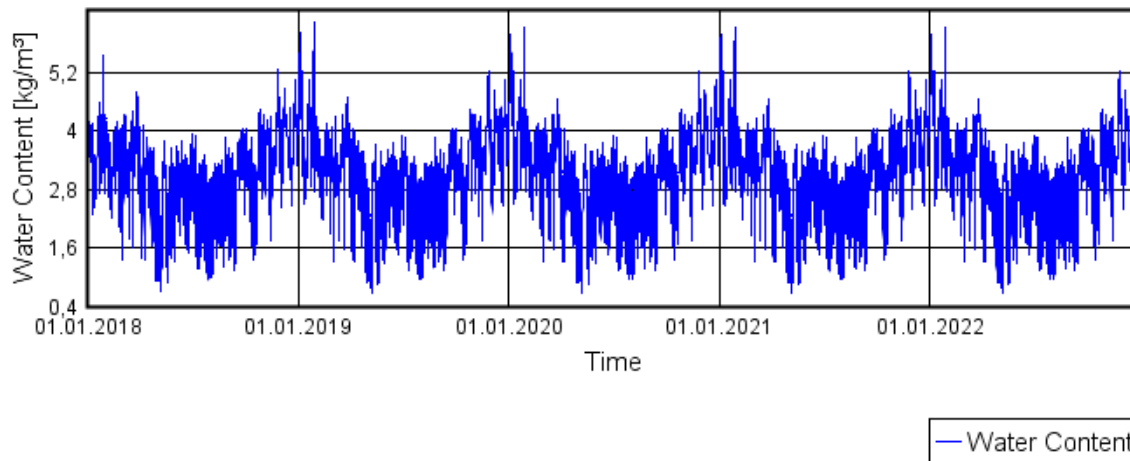
Relative Humidity



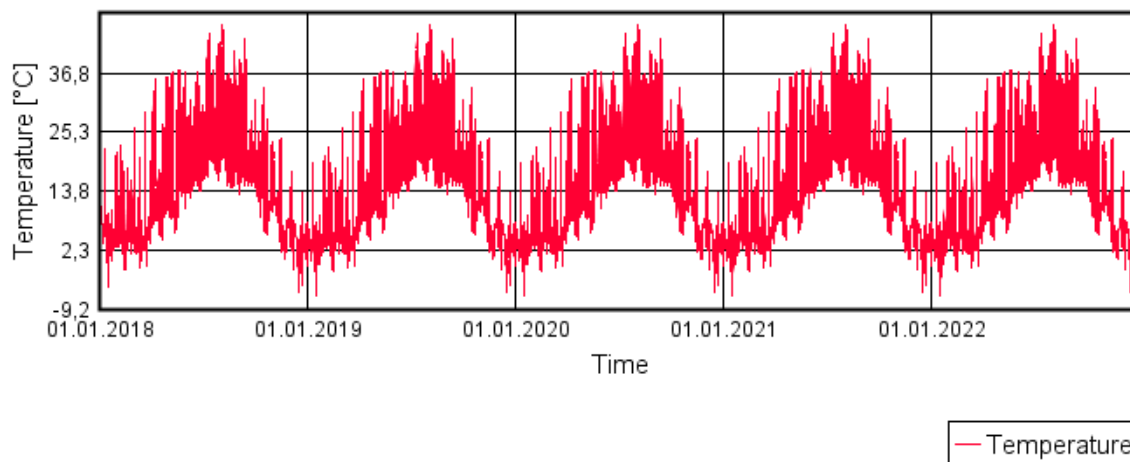
9.3.10 Vagg med angsparr, 240 mm isolering och hydrofobiskt utskikt (rain factor 0)

9.3.10.1 Punkt 1

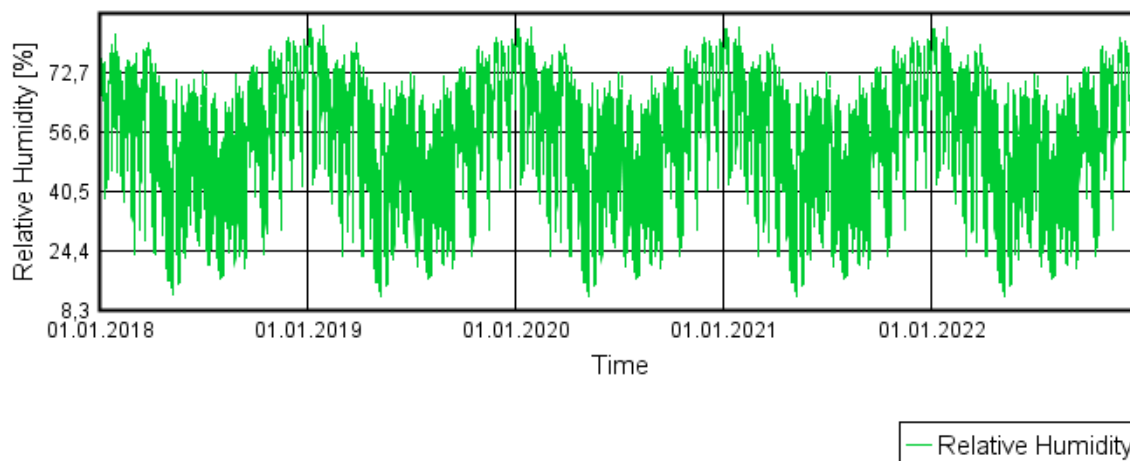
Water Content



Temperature

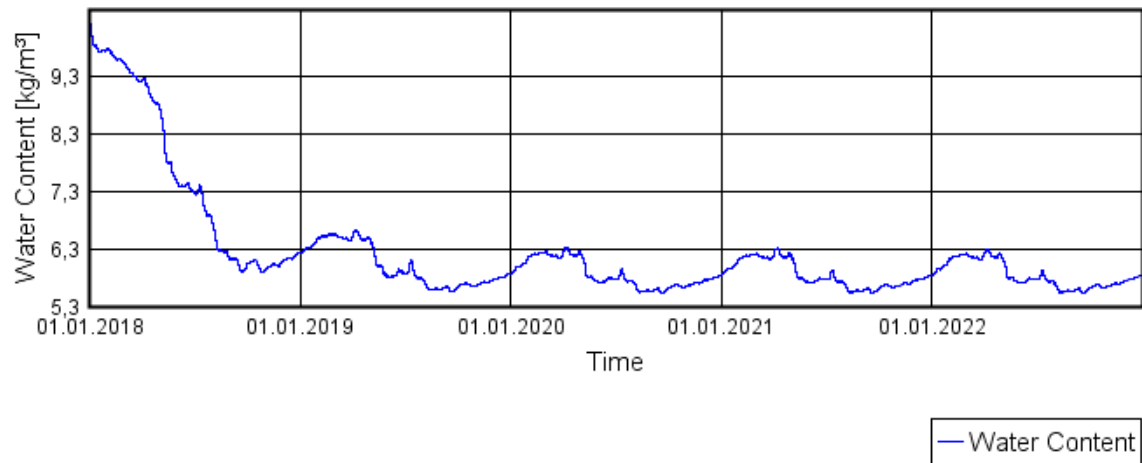


Relative Humidity

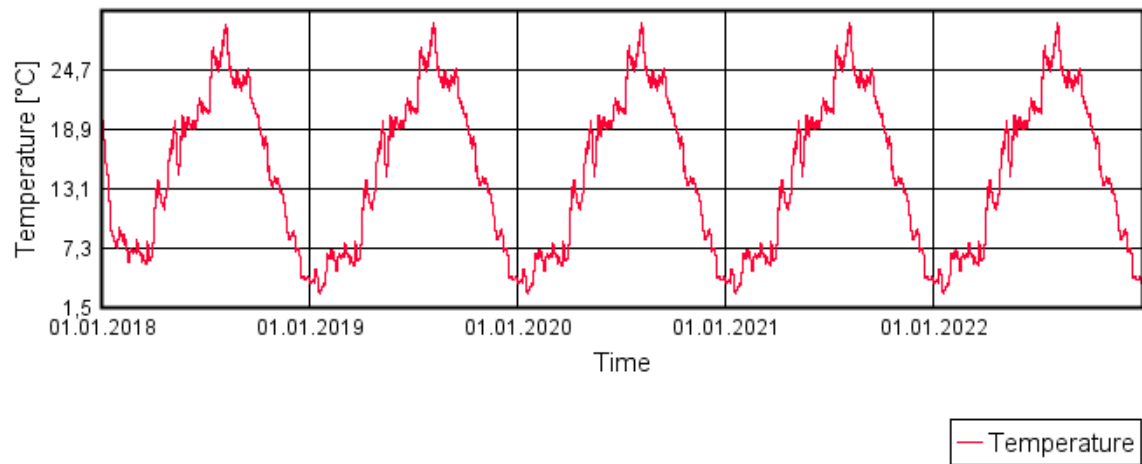


9.3.10.2 Punkt 2

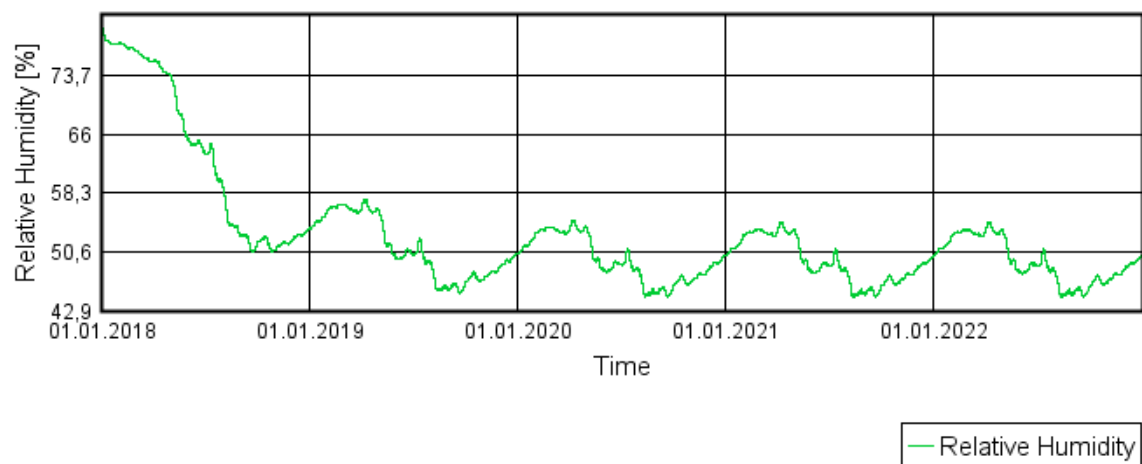
Water Content



Temperature

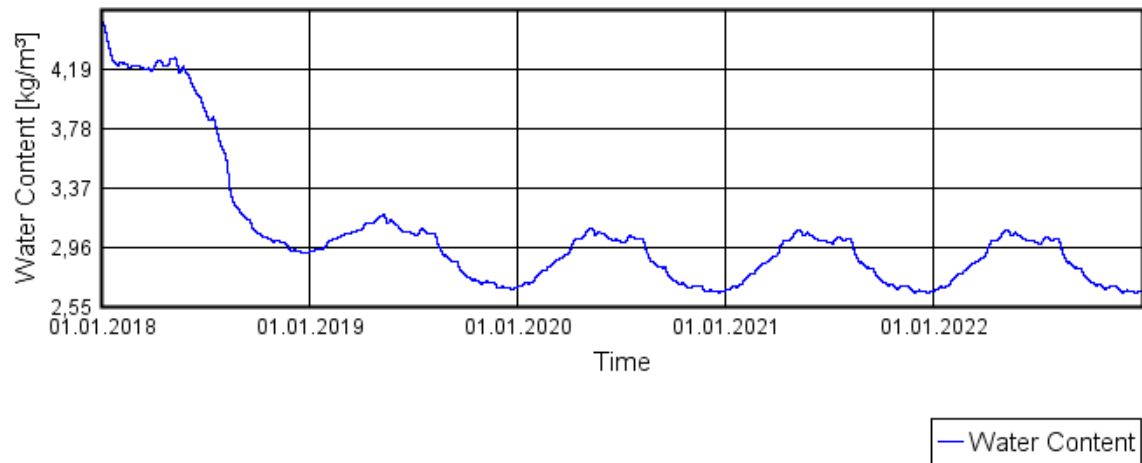


Relative Humidity

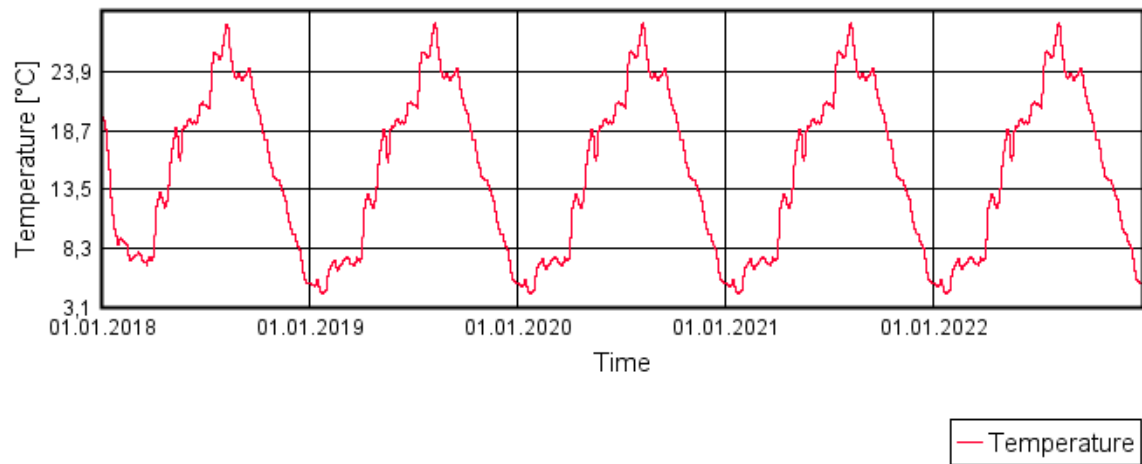


9.3.10.3 Punkt 3

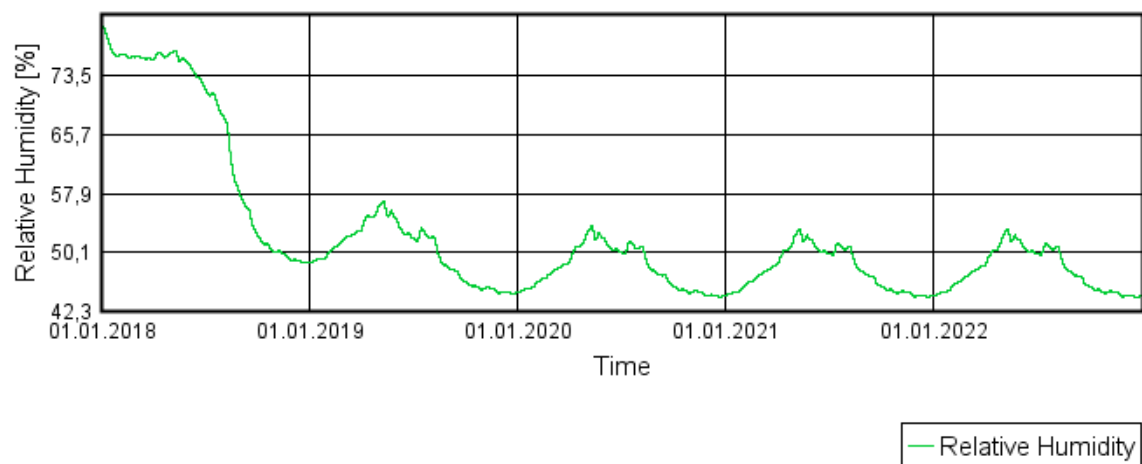
Water Content



Temperature



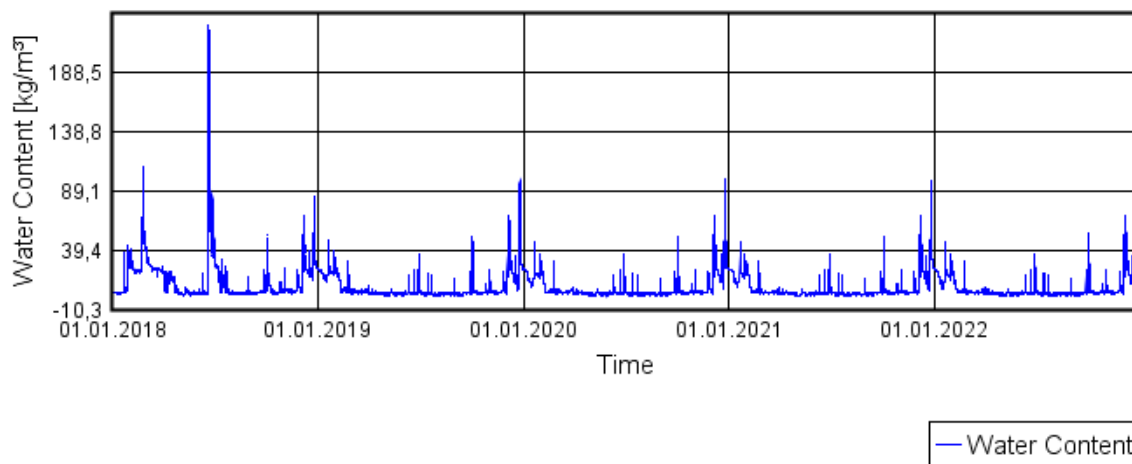
Relative Humidity



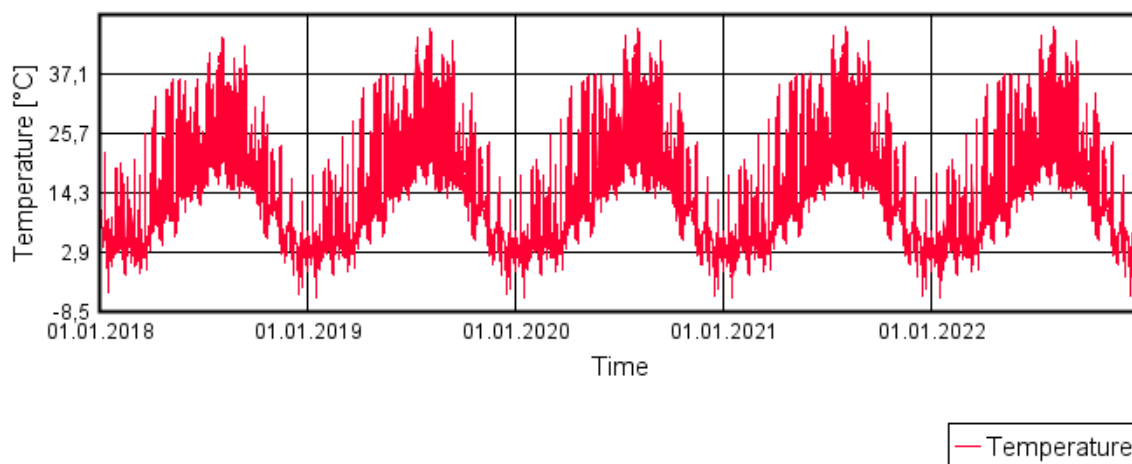
9.3.11 Vägg med ångspärr, 240 mm isolering och hydrofobiskt utskikt (rain factor 0,1)

9.3.11.1 Punkt 1

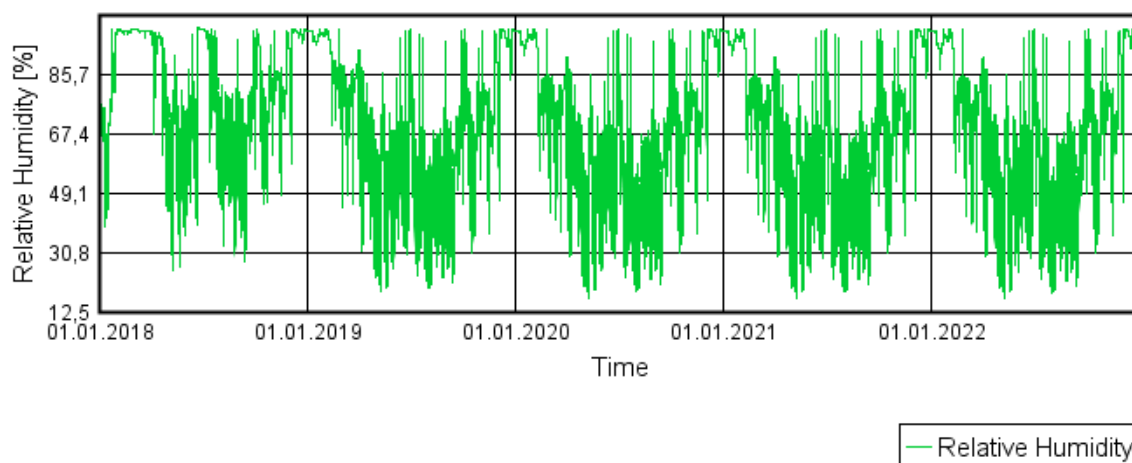
Water Content



Temperature

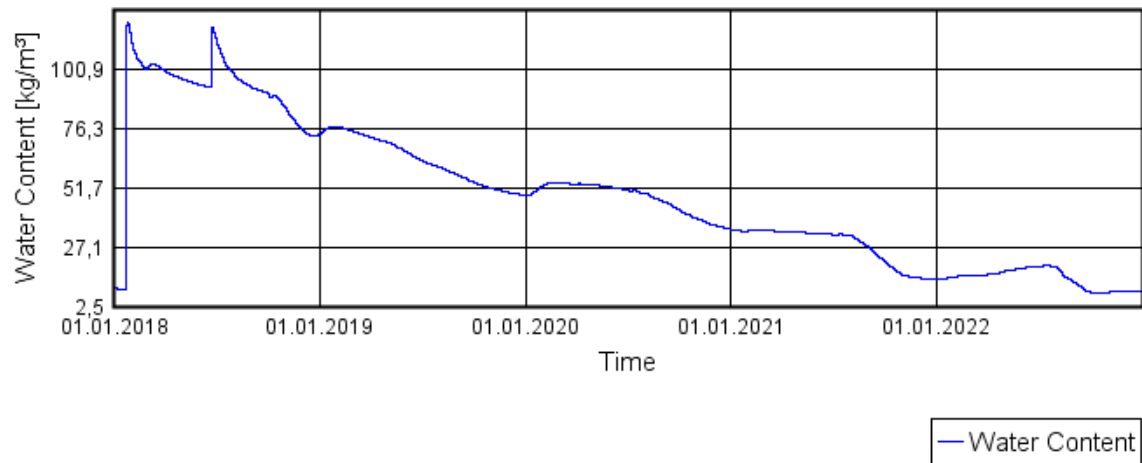


Relative Humidity

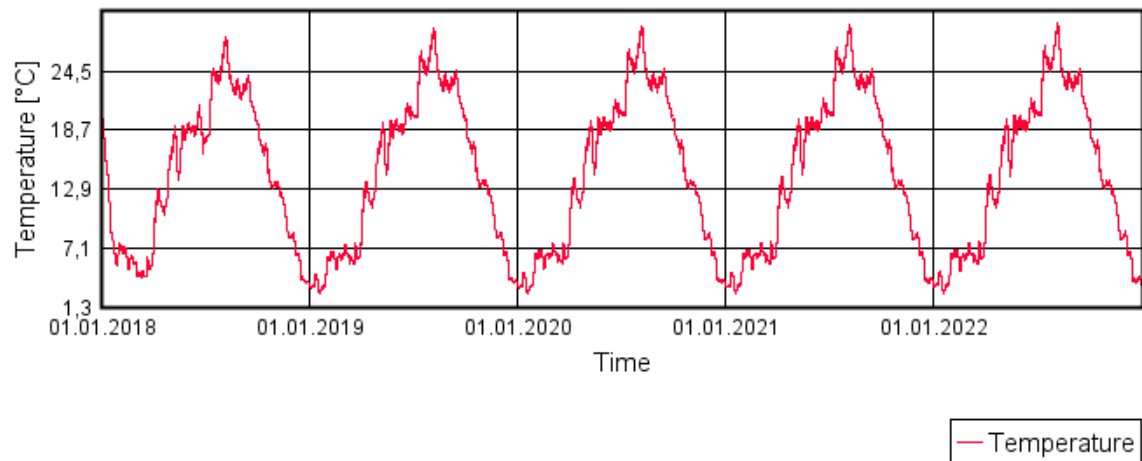


9.3.11.2 Punkt 2

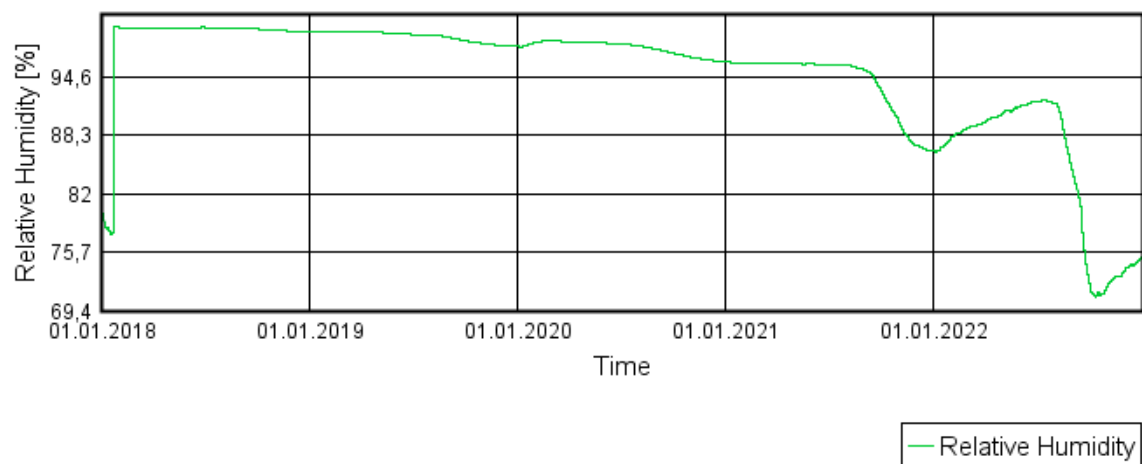
Water Content



Temperature

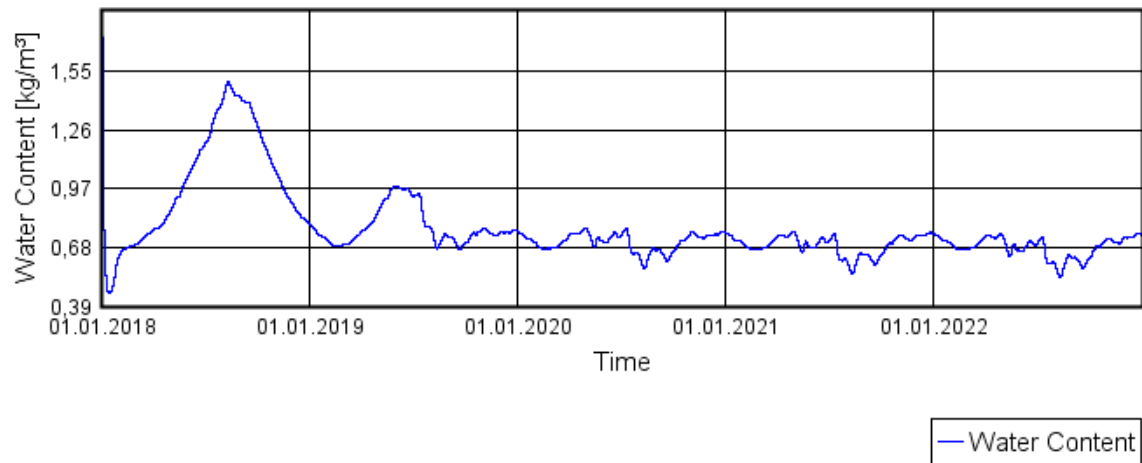


Relative Humidity

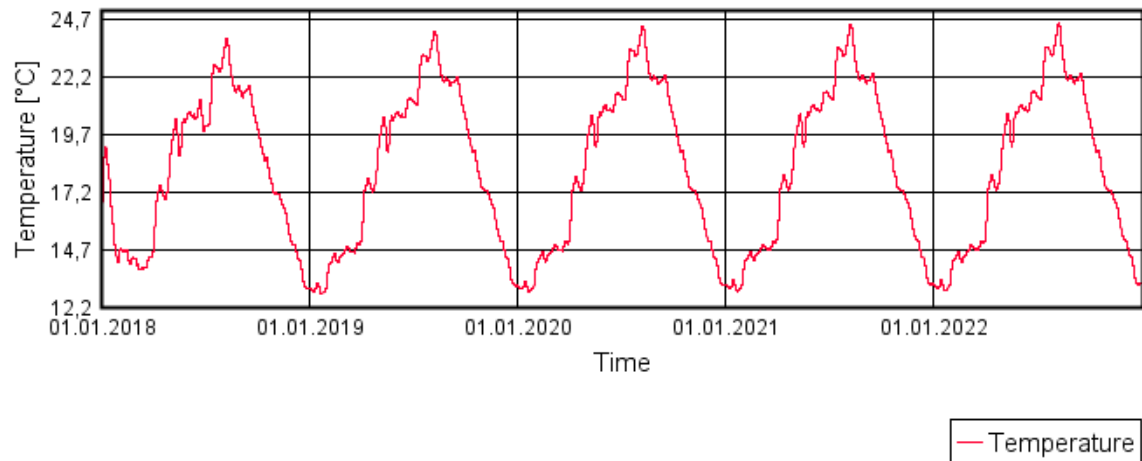


9.3.11.3 Punkt 3

Water Content



Temperature



Relative Humidity

