



UPPSALA UNIVERSITET

Självständigt arbete i miljö- och vattenteknik 15 hp	Dokumenttyp	Dokumentkod
	Slutrapport	W-16-56 / S-04
	Datum	Ersätter
	2 juni 2016	W-16-56/S-03
	Författare	Linnea Andersson, Magnus Andersson, Josefine Dahlstedt, Harald Edlund, Jenny Lundberg, Johanna Sjölund
Handledare Mikael Höök	Rapportnamn	Verifiering och utveckling av Airwatergreens simuleringsverktyg

Sammanfattning

Den här rapporten beskriver hur en modell för energi-, fuktlast- och kostnadsberäkningar har utvecklats för avfuktare från företaget Airwatergreen. Arbetet har utgått från en färdig modell som inte gav tillräckligt bra resultat på grund av felaktiga och stora förenklingar av olika termodynamiska och meteorologiska samband. Modellen består huvudsakligen av två differentialekvationer som beskriver hur temperaturen i lokalen som avfuktas varierar, samt hur mycket fukt som sammanlagt kommer in i lokalen från olika källor. Först verifierades modellen mot uppmätt data som togs under en period i december 2015 från ett pumphus på Äppelvägen i Uppsala och det kunde konstateras att modellen inte simulerade verkligheten med önskvärd noggrannhet.

För att förbättra modellen analyserades först var i modellen de stora bristerna låg för att sedan identifiera vad som var fel och rätta till dem. Modellens påtagliga brister var att den inte tog hänsyn till konvektionsvärme från våta ytor och att formeln för evaporation från öppna vattenytor till luften var förenklad och gav ett inkorrekt resultat. En term lades därför till för svärmen och formeln för evaporation korrigerades. Efter utveckling av modellen uppnåddes förbättrade resultat; både temperatur- och fuktlastsimuleringarna hamnar nära de uppmätta värdena. Utifrån parametrar som är dimensionerade efter pumphuset på Äppelvägen gav modellen en temperatur som till 79.6 % stämde överens med den uppmätta temperaturen och en fuktlast som stämde överens till 92.8 %, till skillnad från originalmodellen som endast gav 32.9 % av verkliga temperaturen och 6.3 % av fuktlasten. En brist i modellen är att vissa inparametrar som har stor inverkan på resultatet är svåra att mäta i verkligheten, vilket betyder att modellen inte nödvändigtvis fungerar lika bra på andra pumphus och lokaler.

Med den färdiga modellen gjordes en simulering som visade att energivinsten av att använda Airwatergreens produkt istället för uppvärmning av ett specifikt pumphus gav en energibesparing på 83.0 %.

Resultaten betyder att Airwatergreen nu kan ge en förbättrad bild av hur mycket energi och pengar en potentiell köpare kommer tjäna på att använda deras produkt framför en konkurrents. Ur ett energi- och samhällsekonomiskt perspektiv visar resultaten att Airwatergreens produkt kan ge stora besparingar, både med avseende på energi och ekonomi.

Innehåll

1	Introduktion	4
1.1	Energiaspekten	4
1.2	Bakgrund till Airwatergreen	4
1.3	Syfte och mål	5
2	Teoretisk bakgrund	7
2.1	Luftfuktighet	7
2.2	Daggpunktens betydelse för fuktuppkomst	7
2.3	Mekanismen bakom fuktskador i väggar och hus	8
2.4	Avfuktningens problematik i olika lokaler	9
2.4.1	Kyrkor	9
2.4.2	Fjärrvärmesystem	10
2.4.3	VA-system	10
2.5	Airwatergreens avfuktningens metod	10
2.6	Andra tekniker för avfuktning	11
2.7	Airwatergreens sätt att modellera den fysiska miljön	12
2.8	Airwatergreens simuleringsmodell	13
2.9	Att verifiera en modell	14
3	Metod	16
3.1	Verifieringsunderlag	16
3.2	Genomförande	16
4	Resultat	19
4.1	Utveckling av modell	19
4.2	Jämförelse av verkliga och simulerade värden	19
4.3	Känslighetsanalys	21
4.3.1	U-värde	21
4.3.2	Skattad våt golvarea	23
4.3.3	Vattentemperatur	24
4.4	Energiförbrukning	25
5	Diskussion	27
5.1	Utveckling av modell	27
5.2	Jämförelse av verkliga och simulerade värden	27
5.3	Känslighetsanalys	28
5.3.1	U-värde	28
5.3.2	Skattad våt golvarea	28
5.3.3	Vattentemperatur	28
5.3.4	Ventilation	29
5.4	Tillämpning i andra lokaler	29

5.5	Fördelar med en verifierad modell	30
5.6	Vidareutveckling	30
5.7	Felkällor	31
6	Slutsats	32

1 Introduktion

Fukt i byggnader är ett problem som kan få stora konsekvenser. Bakterier och mögel trivs i fuktiga miljöer och organiska material som trä förstörs och metall korroderar på sikt. Går det riktigt långt kan husets hållfasthet försämrast. Fuktskador i husets konstruktion kan även leda till att inomhusmiljön försämrast då mögel kan ge bland annat irriterade luftvägar. Det är därför viktigt att upptäcka fuktskador i tid så att de kan förebyggas innan de ger allvarliga konsekvenser.

För att förhindra att en byggnad får problem med fuktskador så får den relativa luftfuktigheten inte vara för hög. För att hålla den på rätt nivå är en vanlig åtgärd att höja inomhustemperaturen då den relativa luftfuktigheten sjunker med en ökande temperatur. Uppvärmning av byggnader som sällan är besökta leder till betyngande energianvändning vilket påfrestar både ekonomin och miljön. För att undvika uppvärmning är avfuktning av byggnaden ett energisnålare alternativ.

1.1 Energiaspekten

Utvecklingen av energisnålare lösningar går framåt i takt med att kraven på minskad energiförbrukning ökar vilket också ställer högre krav på tillverkare och producenter. Idag ökar intresset för energisnåla lösningar och därmed blir också marknaden större. Denna efterfrågan ser inte ut att minska i närmsta framtiden (European Union 2010/2012) och i samband med ökande population behöver alla hjälpas åt att lösa framtidens energibehov (Fedoroff et al. 2010).

Som ett exempel i denna utveckling kan idag ses hur allt fler hus byggs och renoveras med energisnåla konstruktioner. För att minska energiförbrukningen för uppvärmning byggs husen med allt tjockare väggar för en bättre isoleringsförmåga. Detta kan tyvärr leda till negativa konsekvenser ur en annan aspekt, nämligen uppkomsten av fukt. Med en större vägg tjocklek kommer temperaturskillnaden vara större mellan in- och utsidan av väggen och utsidan kommer bli kallare eftersom mindre värme läcker ut. Det leder till att fukt har svårare att avdunsta. Med dessa problem kan man förstå vikten av att hålla ett bra inomhusklimat för att minska risken för fuktskador. Med hänsyn till energibesparingarna i dessa hus bör även avfuktningen ske med viss begränsning ur energisynpunkt (Valtin 2009).

1.2 Bakgrund till Airwatergreen

Airwatergreen är ett ungt företag startat 2009 av två civilingenjörstudenter från Uppsala Universitet. Företagsidéen uppkom då de två studenterna kom på en ny teknik att kondensera fukt i luften till vatten vilket skulle kunna lösa problem med vattenbrist i torra länder. Idag är företaget dock inriktat på avfuktning i kyrkor,

VA-industrin och fjärrvärmekammare. Då deras teknik är unik i det avseendet att avfuktning kan ske i lägre temperaturer leder det till att processen blir mer energieffektiv och kostnaderna sjunker då många andra avfuktningssätt kräver en temperatur över 15 °C (Ljungby Fuktkontroll och Sanering AB 2014). Detta gör att den är lämplig att applicera i kyrkor och kulturbyggnader som är stängda under vinterhalvåret (Airwatergreen u.å.) och byggnader som sällan används.

Idag har Airwatergreen fyra produkter: Flex Basic, Flex Smart, Flex Cloud och Flex Integrate. De alla har samma design och storlek (se Figur 1) men skiljer sig bland annat i den mån hurvida de går att övervaka och styra på avstånd via en app och vissa tillval med kolfilter och ställbart luftflöde. Airwatergreen har också under 2016 fått möjligheten att expandera sitt företag ut i världen. De har i två pressmeddelanden under början av 2016 gått ut med att både den kinesiska och den amerikanska patentmyndigheten har beviljat deras kondenseringssteknologi (Wamstad 2016a) (Wamstad 2016b).



Figur 1: *Airwatergreens produkt från FLEX-serien (Airwatergreen u.å.).*

1.3 Syfte och mål

Syftet med detta projekt är att hjälpa Airwatergreen att förbättra sina kundmöten genom att kunna ge kunden en god initial uppskattning av hur mycket energi och således pengar de kommer spara på produkten och hur mycket installationen och driften kommer kosta.

Airwatergreen behöver hjälp att förbättra sitt simuleringsverktyg. Deras nuvarande modell för klimatsimulering som står till grund för deras offert är inte kontrollerad mot verkliga värden och det går därför inte att säga något om hur tillförlitlig modellen är.

Målet med detta projekt är att verifiera Airwatergreens modell för att se om den är användbar och sedan möjligtvis vidareutveckla den. För att uppnå detta kommer följande undersökas

- Skillnaden mellan simulerade och verkliga värden för inomhustemperatur och fuktlast.
- Hur känslig modellen är för förändringar i vissa inparametrar.

Om det visar sig att modellen inte är tillräckligt noggrann ska den vidareutvecklas så att simulerade värden bättre överensstämmer med verkligheten. Airwatergreen vill även att modellen ska utvecklas genom att den bland annat ska kunna ta hänsyn till att en vägg i byggnaden håller en konstant temperatur.

För att uppnå målet har ett antal frågeställningar formulerats:

- Vilka parametrar i modellen bidrar till det felaktiga utfallet?
- Hur ska dessa parametrar ändras för att stämma bättre överens med det verkliga utfallet?
- Vad måste tas hänsyn till när en vägg har konstant temperatur?

2 Teoretisk bakgrund

2.1 Luftfuktighet

När vatten avdunstar från hav, sjöar, vegetation och mark så bildas det vattenånga i atmosfären. På jorden finns det vatten i alla tre aggregationsformer: gas i form av vattenånga, flytande i form av vatten och fast som snö och is. Luftfuktighet är ett mått på mängden vatten som finns i luften och det kan mätas på många olika sätt. Ett vanligt mått är absolut fuktighet [g vatten/m³] som beskriver massan vattenånga i 1 m³ luft. Relativ luftfuktighet [%] är halten vattenånga i luften vid en viss temperatur jämfört med mättnadsångtrycket. Mättnadsångtrycket är ångtrycket då luften håller maximal halt vatten utan att vattnet kondenserar. Entalpi [kJ/kg torr luft] beskriver värmeinnehållet i luften som summan av systemets inre energi och produkten av systemets tryck och volym, och kan också användas som ett mått på luftfuktighet (Wern 2013).

2.2 Dagpunktens betydelse för fuktuppkomst

Dagpunkten är den temperatur då vattenånga kondenserar, det vill säga då mättnadsångtrycket (100 % relativ luftfuktighet) och luftens ångtryck sammanfaller. Dagpunkten (T_{DP}) kan beräknas beräknas enligt Magnus formel som är en härledning från Clausius-Clapeyrons ekvation. (NASA 1977), (Atkins & De Paula 2010):

$$T_{DP} = \frac{c\gamma(T, RH)}{b - \gamma(T, RH)} \quad (1)$$

där

$$\gamma(T, RH) = \ln \frac{RH}{100} + \frac{bT}{c + T} \quad (2)$$

och T är temperaturen [°C], RH är den relativa luftfuktigheten [%] samt a och b är anpassade konstanter.

En förbättrad och mer noggrann variant av Magnus ekvation är den som använder delar av Arden Bucks ekvation (Buck 2012):

$$T_{DP} = \frac{c\Gamma(T, RH)}{b - \Gamma(T, RH)} \quad (3)$$

där

$$\Gamma(T, RH) = \ln\left(\frac{RH}{100} \exp\left(\left(b - \frac{T}{d}\right)\left(\frac{T}{c + T}\right)\right)\right) \quad (4)$$

där konstanterna b, c och d från tidigare forskning kan sättas till (SENSIRON AG 1990):

- $b=17.62$ millibar
- $c=243.12$ °C

- $d=234.5\text{ }^\circ\text{C}$

för temperaturer mellan $-45^\circ\text{C} < T < +60^\circ\text{C}$ ($T \pm 0.35^\circ\text{C}$). Med dessa värden på konstanterna fås en maximal osäkerhet på 0.1%.

I inomhusmiljöer är det viktigt att temperaturen på och inuti väggar och isolering ligger över daggpunkten då luft kan transporteras genom en vägg. Om en yta är kallare än den rådande daggpunkten bildas kondens på ytan och risk för fuktskador uppkommer.

För att beräkna var i väggen daggpunkten sker vid olika klimatförhållanden kan olika modeller användas. Samtliga modeller använder information om hur temperaturen förändras genom varje del av väggen baserat på materialens värmemotstånd, R-värde. R-värdet är specifikt för varje material och definieras som kvoten av materialets tjocklek och materialets värmeledningsförmåga. R har enheten $[\text{m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}]$ och beräknas enligt Ekvation 5

$$R = \frac{\text{Materialets tjocklek}}{k - \text{värde}} \quad (5)$$

där k-värdet är en materialkonstant som beskriver materialets värmeledningsförmåga. I Sverige används ofta det inverterade R-värdet som kallas U-värdet med enheten $[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}]$ (Aton Teknikkonsult AB 2007) och beräknas med Ekvation 6

$$U = \frac{1}{R} \quad (6)$$

2.3 Mekanismen bakom fuktskador i väggar och hus

Fukt kan uppstå i olika delar av en byggnads konstruktion, både på in- och utsida samt inuti väggarna. Om förhållandena är sådana att risken för kondensation i väggen är stor är det viktigt att veta var daggpunkten ligger. Utanför väggen råder en viss temperatur, ett visst ångtryck och mätnadsångtryck. Samma sak gäller på insidan av väggen där temperaturen ofta är högre. Inuti väggen finns därför gradienter för temperaturen och ångtrycken som går mellan ytterförhållandena och innerförhållandena. Om gradienterna för relativ luftfuktighet och det mättade ångtrycket skulle bli samma inuti väggen uppstår där en daggpunkt och kondens bildas. Om daggpunkten ligger i isoleringen uppstår en ackumulation av fukt i materialet som kan skada väggen. Fiberglas som är den vanligaste typen av isolering är särskilt känslig (TLPCA u.å.) och för att undvika detta är det viktigt att känna till väggens olika material och dess egenskaper. Optimalt är att daggpunkten inträffar utanför väggen.

De främsta källorna till att fukt bildas på husfasader är regn och kondens. Risken för kondens ökar vid en hög luftfuktighet. Fukt leder till att bakterier, mögel, alger och lavar växer bra, och fukt på fasader leder då även till att huset blir visuellt oattrak-

tivt. Energisnåla hus gynnar den här typen av fuktskador, eftersom dess tjocka och välisolerade väggar leder till att fasadens temperatur sjunker till under daggpunkten under kalla nätter och kondens bildas (Aelenei & Henriques 2008).

I Sverige varierar temperaturen och luftfuktigheten mycket både med året och dygnet vilket gör att det ställs stora krav på våra byggnader. Varm luft kan innehålla mer fukt än kall luft vilket till exempel leder till att när varm fuktig luft under sommaren når en kall del av huset kyls luften ner och fukten kondenserar.

2.4 Avfuktningproblematik i olika lokaler

De lokaler som Airwatergreen riktar in sig på skiljer sig från varandra och ställs därmed inför olika problem gällande fuktskador. De följande tre sektionerna syftar till att ge en överblick av problematiken i de lokaler som Airwatergreen främst arbetar med.

2.4.1 Kyrkor

Kyrkor är i de flesta fall historiska byggnader och många innehåller värdefulla föremål som till exempel målningar. Detta gör att det är viktigt att klimatet i kyrkor är gynnsamt och inte leder till skador. Kyrkor innehåller också många möbler i solitt trä som kan vara känsliga mot fukt och temperaturförändringar. Under vinterhalvåret värms kyrkor upp för att undvika en hög luftfuktighet. Detta betyder att kyrkor hålls varma även när de står tomma (Klenz Larsen 2007), något som bidrar till en hög energikonsumtion och påfrestar kyrkans redan ansträngda ekonomi.

Det är svårt att veta hur en kyrkas ventilation och uppvärmning ska vara konstruerad för att miljön ska vara så fördelaktig som möjligt. Då kyrkor ofta är byggda för länge sedan är de ofta inte så energifektiva, och vinddraget sågs som fördelaktigt då det inte fanns någon typ av ventilationssystem. Ett exempel är Lekaryd kyrka i Alvesta där Mikael Andersson utredde energisituationen tillsammans med FLK Sverige AB 2007 (Andersson 2007). Det visade sig att kyrkan hade stora energiförluster på grund av konstruktionen och att den påverkades mycket av utomhusklimatet. Andersson skriver också allmänt om problematiken med uppvärmning och ventilation i kyrkor. Då en kyrka inte används så ofta kan den stå tom under långa tider och då kan temperaturen i kyrkan hållas relativt låg. När kyrkan sedan används värms den upp och temperaturen höjs markant. Den snabba temperaturökningen kan leda till skador på till exempel trä möbler. Mikael Andersson tar också upp olika problem med en varierad luftfuktighet, till exempel att om en kyrka hålls uppvärmd under en lång tid minskar den relativa fuktigheten vilket kan leda till saltutfällning på olika ytor. Det kan också bli sprickor i trä på grund av uttorkning. En för hög relativ fuktighet är inte heller optimalt då fukten kan binda till material som sedan kan utsättas för

mögel eller ruttna.

2.4.2 Fjärrvärmesystem

Ett fjärrvärmeverk hettar upp vatten till 70-120 °C (Svensk fjärrvärme u.å.) för att sedan skicka ut det i ledningar. Varje fastighet har en central för att fördela det varma vattnet till element och kranar i huset. Fjärrvärme är det vanligaste sättet att värma upp sin bostad i Sverige (ibid.). De ledningar som vattnet skickas genom leds ofta genom kulvertar och längs ledningsnätet finns det även flera fjärrvärmekammare. Det är utrymmen under mark där underhåll av ledningarna sker. I dessa kammare är luftfuktigheten väldigt hög, något som förstärks ytterligare av att det kan ske läckage genom gatubrunnar genom vilka driftteknikerna får tillgång till utrymmet. Temperaturen kan gå upp emot 50 °C vilket gör det till en väldigt utsatt miljö. Bakterier och mögel trivs vilket kan innebära hälsorisker för drifttekniker som utför underhållet. Kamrarna är ofta byggda för länge sedan och inte ersatta eftersom det är problematiskt att gräva upp näten i stadskärnan, och i många fall har isoleringen runt ledningarna fallit bort. Det i samband med de extrema förhållandena kan leda till korrosion och skador, vilket också påskyndas i och med att vattnet kan innehålla vägsalt och halogener (FVUab 2016). Även betong och balkar kan skadas. Att renovera kamrarna är väldigt kostsamt, därför finns det stort intresse i att åtgärda problemen på annat sätt. Att sänka den relativa luftfuktigheten och temperaturen skulle underlätta underhållsarbetet och förhoppningsvis leda till färre skador på ledningarna.

2.4.3 VA-system

Avloppsvatten leds från hushåll till reningsverk. För att kunna transportera vattnet långa sträckor krävs det att pumpar hjälper till längs vägen. Pumparna ligger nere i marken och vid markytan byggs en överbyggnad där pumpen kan kontrolleras och övervakas. Dessa bodar hålls varma året runt för att handskas med fuktproblemet då en hög luftfuktighet leder till ökad korrosion. Detta sätt att kontrollera fuktproblemen är energikrävande och dyrt.

Avloppsvatten luktar illa vilket gör att även pumpstationerna är illaluktande. När dessa pumpstationer ligger nära bebyggelse blir luktproblemet aktuellt och adsorptionsfilter installeras för att få bukt med problemet. Lukt molekyler från avloppsvattnet och vattenmolekyler är väldigt lika i storleken (FVUab 2016) vilket gör att även vattenmolekyler fastnar i filtret och blockerar lukt molekyler från att adsorberas. Att sänka luftfuktigheten skulle därmed även åtgärda luktproblemet.

2.5 Airwatergreens avfuktningssmetod

Den teknik som Airwatergreen använder sig av vid avfuktning kallas varmkondensering. Den gör det möjligt att avfukta platser som tidigare varit svåra på grund av låga

temperaturer som exempelvis ouppvärmade kryppgrunder, underjordiska miljöer eller vinterstängda kyrkor och kulturbyggnader. Att de kan avfukta i låga temperaturer gör att lokaler som ofta står tomma inte behöver värmas upp enbart ur avfuktningssynpunkt. Ett test av Airwatergreens produkt genomfördes i november 2013 av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (FVUab 2016) och visade då att energimängden halverades i jämförelse med en motsvarande ledande produkt på marknaden.

Varmkondenseringsteknik använder ett absorberande material som fångar upp fukten från luften. Sedan tillsluts utrymmet och luftflödet avstannar. Materialet värms upp och vattnet tvingas sedan ut på grund av det ökande trycket i materialet. Detta leder till att trycket inuti behållaren ökar och därmed spontankondenserar ångan och det bildas då droppar på de ytor de kommer åt. Dessa droppar ansamlas i en behållare och leds sedan ut. Vid konventionell kondensering utnyttjas istället att luftens förmåga att hålla vatten minskar med sjunkande temperatur. Tekniken bakom konventionell kondensering är att kylda ytor används för att kyla luften och därmed sänka luftens egenskap att hålla vatten. Genom denna process tvingas vatten ut ur luften. Det här ger luften en relativ luftfuktighet på 100 % och för att skapa ett torrt klimat måste luften värmas upp efter kylningen. Uppvärmning enbart av avfuktningssynpunkt är en energikrävande process som kostar pengar. Varmkondensering är oberoende av temperaturen utanför systemet eftersom det är ett slutet system. Det medför att denna process fungerar i ett större temperaturintervall från $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ och gör den användbar i fler situationer och miljöer (FVUab 2016).

2.6 Andra tekniker för avfuktning

Utöver den teknik som Airwatergreen har utvecklat är det två olika tekniker som främst används i avfuktare: kondensavfuktning och sorptionsavfuktning (Energimyndigheten 2014).

Kondensavfuktare använder som ovan nämnt kondensationsprincipen där den fuktiga luften träffar ett kylmedium som gör att luften kondenseras och vatten ansamlas på ytan som sedan samlas upp i en behållare. Den avfuktade luften värms sedan upp då den passerar den varma kondensatorn, innan den släpps ut i rummet igen (Deling & Eskilander 2014). Denna teknik är främst avsedd för inomhusklimat då den fungerar bäst i högre temperaturer (Energimyndigheten 2014).

Sorptionsavfuktare använder en teknik som bygger på att luften förs genom ett fuktabsorberande material. Det finns två olika principer detta kan utföras på, rotationsprincipen och acetecprincipen. Rotationsprincipen är en äldre teknik som grundas i ett roterande sorptionshjul som den fuktiga luften förs igenom. Hjulet absorberar fukten, och den avfuktade luften förs ur rummet igen vilket leder till ett undertryck i lokalen. Fukten i sorptionshjulet leds sedan ut genom att varm luft blåses

genom hjulet och drar med sig fukten ut genom en avskild kanal. Acetecprincipen bygger på samma teknik med ett vattenabsorberande material men den har inga roterande delar, utan luften transporteras genom ett stillastående absorptionblock (Deling & Eskilander 2014). Sorptionstekniken fungerar i både varma och kalla miljöer vilket gör dessa avfuktare är lämpliga att använda i ouppvärmade hus, kryppgrunder, kalla vindar med mera (Ljungby Fuktkontroll och Sanering AB 2014).

2.7 Airwatergreens sätt att modellera den fysiska miljön

För att uppskatta hur många avfuktare som behövs i en lokal för att luftfuktigheten ska hållas på en tillåten nivå har Airwatergreen utvecklat ett verktyg för detta. Den beräknar även energiåtgången och kostnad för olika tidsperioder, beroende på hur länge kunden är intresserad av produkten. I ett underlag för modellen beskrivs grunden för hur de modellerar och skattar fuktlasten i inomhusmiljö (Edström 2014). Fuktlasten är den totala mängd vatten som förs in i lokalen via till exempel ventilation och evaporation och mäts i enheten m^3/h . Fuktlasten skattas genom den relativa luftfuktigheten, luftflödet inomhus och minimal tillåten temperatur. Vid beräkningen av fuktlast studeras det totala flödet av luft i lokalen då detta påverkar genom temperatur- och luftfuktighetsförändringar eftersom fuktlasten är en funktion av temperatur och vattenmängd i material och luft. Även evaporationen måste tas hänsyn till då detta i stor grad påverkar mängden tillfört vatten i lokalen. Evaporation sker främst då luften är torr och beräknas med Ekvation 7 (Sun & Besant 2005) och används av Airwatergreen.

$$r_v = k_g \cdot S_v (P_v - \phi_w \cdot P_{vs}(T_\sigma)) \quad (7)$$

där r_v är massan vatten som tillförs luften i lokalen per sekund [kg/s], k_g är en materialkonstant som beskriver masstransporten [$kg/(m^2Pas)$], S_v är arean på det fuktupptagande/avgivande materialet [m^2/m^3], P_v är ångtrycket i luften [Pa], $P_{vs}(T_\sigma)$ är partialtrycket i vattenångan [Pa] och ϕ_w är den relativa fuktigheten [%]

Hur mycket vatten luften kan innehålla innan den kondenserar bestäms av temperaturen och hastigheten på evaporationen. För att uppskatta hur lufttemperaturen förändras med tiden används värmeövergångskoefficienten U som beskriver värmeöverföringen mellan de två sidorna av ytan som ändrar temperatur (Abel u.å.).

Hur temperaturen förändras över tiden är relevant för modellen eftersom temperaturen är en faktor som påverkar luftfuktigheten. Temperaturförändringen i en lokal kan beskrivas med Ekvation 8 (Edström 2014)

$$\dot{T} = \frac{P_v + P_{avf} + U \cdot A(T_o - T_i)}{C_v \cdot \rho \cdot V + (T_o - T_i) \cdot Q/V} \quad (8)$$

där \dot{T} är temperaturförändringen per sekund [C°/s], P_v är värmen från element i lokalen mätt i [Wh], P_{avf} är den värme som kommer från avfuktaren mätt i [Wh], A beskriver arean på lokalen, T_i och T_o är inomhus- respektive utomhustemperatur, värmekapaciteten för luften beskrivs med C_v i [J/K], ρ är luftens densitet i [kg/m^3], V är lokalens volym och Q är luftflödet in i lokalen mätt i [m^3/h].

Evaporation, ventilation och avfuktning påverkar vatteninnehållet i luften och för att beskriva ändringen av vatteninnehållet används Ekvation 9 (Edström 2014)

$$\dot{x} = (x_o - x_i)\rho \cdot Q + k_g \cdot S_v(P_v - \phi_w \cdot P_{vs(T\sigma)}) - c \quad (9)$$

där \dot{x} är förändringen av vatteninnehållet i luften [kg/h], x_o är absolut vatteninnehåll i den luft som ventileras in, x_i är absolut vatteninnehåll i luften inne i lokalen och c är avfuktningskapaciteten [kg/h].

2.8 Airwatergreens simuleringsmodell

Airwatergreens modell beräknar avfuktningsbehovet genom att utgå från de två differentialekvationerna i Ekvation 8 och Ekvation 9 (Edström 2014). In- och utparametrar till modellen beskrivs i Tabell 1. Simuleringen initieras genom inparametrarna temperatur och relativ luftfuktighet, vilka är variablerna som bör uppmätas i aktuell lokal. Nollställena till differentialekvationen identifieras sedan genom att studera dess jämviktsläge med hjälp av Scilabs kommando *fsolve*. Scilab är det program Airwatergreen har skrivit sin modell i och är ett program som liknar MATLAB. Ett värde för temperaturen inomhus erhålls och om den temperaturen är lägre än den lägsta tillåtna temperaturen beräknas den effekt som krävs från ett externt värmeelement. Detta görs även genom att jämviktsläget för Ekvation 8 hittas med hjälp av *fsolve* som i sin tur använder en iterativ Newton-Raphson algoritm och initialgissning för att lokalisera de reella rötterna till funktionen. Fuktlasten beräknas för den bestämda temperaturen med Ekvation 9 och sedan beräknas hur många avfuktare som krävs. Utifrån fuktlasten och värden för effekten från det externa elementet beräknas även kostnaderna.

Tabell 1: *Beskrivning av in- och utparametrar i Airwatergreens modell.*

Inparameter	Förklaring
Längd [m]	Mått på byggnad.
Bredd [m]	Mått på byggnad.
Höjd [m]	Mått på byggnad.
Temperatur inomhus [°C]	Lägsta tillåtna temperatur inomhus.
Skattad våt golvarea [%]	Andel av golvet som är vattenbelagt.
Skattad våt väggarea [%]	Andel av väggen som är vattenbelagt.
Ventilation [m ³ /h]	Ventilation/flöde i byggnaden.
U-värde [W/A/K]	U-värde för väggarna.
Relativ luftfuktighet inomhus [%]	Önskad relativ luftfuktighet inomhus.
Relativ luftfuktighet utomhus [%]	Uppmätt relativ luftfuktighet utomhus.
Temperatur utomhus [°C]	Uppmätt temperatur utomhus.
Elpris [SEK/kWh]	Nuvarande elpris.
Installationskostnad [SEK]	Kostnad för installation av avfuktare.
Servicekostnad [SEK/år]	Kostnader för service.
Utparametrar	Förklaring
Fuktlast [kg/h]	Beräknad fuktlast inomhus.
Temperatur inomhus [°C]	Beräknad temperatur inomhus.
Värmeeffekt [kWh]	Värmeeffekt från externt element.
Antal avfuktare	Antalet avfuktare som krävs.
Värmekostnad [SEK]	Kostnad för det externa elementet.
Driftkostnad [SEK]	Kostnad för drift av avfuktare.
Totalkostnad [SEK]	Driftkostnad plus installation/service.

2.9 Att verifiera en modell

Verifiering av en modell utförs för att säkerställa att modellen håller tillräckligt hög tillförlitlighet för att kunna motsvara det verkliga fall den representerar. Det är även ett sätt att se om modellen behöver utvecklas för att få ett bättre utfall. En tillräckligt hög kvalitet på en modell är en lös term som inte säger något om exakt hur nära det verkliga fallet den bör ligga och måste då bedömas utifrån varje enskild modell och fall.

För att studera modellens känslighet kan en känslighetsanalys göras. Känslighetsa-

analysen går ut på att undersöka hur de ingående parametrarna i modellen påverkar utfallet. Genom att ändra enskilda värden på inparametrar, och se hur stort utslag det ger på resultatet, kan det ses hur stor betydelse parametern har för modellen. Parametrar som ger ett stort utslag på resultatet vid ändring är av stor betydelse och måste då bestämmas med stor noggrannhet. I motsats så är en parameter av liten betydelse för modellen då den ger ett litet eller obetydligt utslag på resultatet. Den behövs då inte bestämmas med samma noggrannhet och kan i vissa fall helt elimineras från modellen (Hellgren & Larsson u.å.).

För att jämföra resultaten beräknades det normaliserade rotminstakvadratfelet (NRMSE) enligt Ekvation 10 (21)

$$NRMSE = 1 - \left\| \frac{xref(:, i) - x(:, i)}{xref(:,)} \right\|^2 \quad (10)$$

där $xref$ är referensvärdena och x är simulerade värden. Detta är en vanlig metod för att mäta skillnaden mellan mätdata och beräknade simuleringsvärden. Värdena ligger mellan 1 och $-\infty$, där 1 är perfekt anpassning.

3 Metod

3.1 Verifieringsunderlag

I början av projektet erhöles en testrapport från Airwatergreen som användes som verifieringsunderlag under projektets gång. Rapporten tar upp tester som Airwatergreen och SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut har gjort på en av Airwatergreens avfuktare under 13 dagar i december 2015 (FVUab 2016). Testerna gjordes på en pumpstation som är placerad på Äppelvägen i Uppsala. Pumpstationen var 2.4 meter lång, 2.4 meter bred och 2.2 meter hög (Edström 2016) och används till att pumpa avloppsvatten från det närliggande området till reningsverket. Pumphuset värms i vanliga fall upp till en temperatur mellan 15 °C och 18 °C och testerna gjordes för att se vilka energibesparingar som skulle göras om det istället installerades en avfuktare. I pumphuset fanns en brunn som låg flera meter ner i marken med ett rör som mynnade ut i pumpstationens golv. Röret var täckt med ett tunt plastlock. I detta pumphus placerades en avfuktare av modellen FLEX Cloud. Pumphusets befintliga element stängdes av och det fanns ingen ventilation. Den relativa luftfuktigheten ställdes in på att hålla ett konstant värde på 50 %. Den relativa luftfuktigheten och temperaturen inomhus mättes sedan under hela testperioden. Även energiförbrukningen från avfuktaren mättes. Testerna från försöket granskades sedan av FVU (FVUab 2016).

3.2 Genomförande

Grundmodellen som är skriven i Scilab studerades och ett försök att konvertera den till MATLAB gjordes. Komplexiteten i översättning av programspråk visade sig dock vara stor vilket resulterade i ett fortsatt arbete i Scilab. Programkoden undersöktes för att förstå vilka inparametrar, utparametrar och konstanter den innehöll och hur dessa interagerade. När full insikt i funktionalitet och samband erhöles påbörjades nästa steg i processen – verifiering.

Verkliga värden på temperatur och luftfuktighet (SMHI 2016) användes över den 13-dagarsperiod där mätningarna gjordes. Från den temperatur- och luftfuktighetsdata som införskaffats, vilken bestod av mätvärden för varje timme, beräknades ett medelvärde per dag. Värden på övriga inparametrar och energiförbrukningen från avfuktaren erhöles från Airwatergreen (Edström 2016), se Tabell 2. Ett medelvärde för varje dygn togs även fram för dessa värden. Temperaturen inomhus sattes till -100 °C för att modellen skulle köras utan externt element. Modellen kördes sedan och grafer skapades över hur temperaturen varierade med tiden. Simulering av temperatur jämfördes sedan med de verkliga uppmätta värdena från testrapporten. Detta gjordes även för fuktlasten. De verkliga värdena för fuktlasten erhöles genom att beräkna den motsvarande fuktlasten till den uppmätta energiförbrukningen med Ekvation 11.

Tabell 2: *Värden på inparametrar i Airwatergreens modell.*

Inparameter	Värde
Längd	2,4 m
Bredd	2,4 m
Höjd	2,2 m
Temperatur inomhus	-100 °C
Skattad våt golvarea	20 %
Skattad våt väggarea	0 %
Ventilation	2 m ³ /h
U-värde	0,5 W/A/K
Relativ luftfuktighet inomhus	50 %
Relativ luftfuktighet utomhus	Data från SMHI
Temperatur utomhus	Data från SMHI

Efter tester av originalmodellen och dess simulerade värden jämförts med uppmätt data gjordes förändringar i modellen för att förbättra dess noggrannhet. Den stora förändringen i modellen är tillägget av en term i differentialekvationerna vilken estimerar inverkan av en våt yta i lokalen. För att öka precisionen ytterligare implementerades ett program vilket beräknar luftdensiteten i lokalen för rådande klimat. Utöver detta förbättrades modellprecisionen ytterligare genom större decimalnoggrannhet på flertalet parametrar vilket är av stor betydelse i icke linjära termer (se Ekvation 8 och 9). Slutligen visualiserades simulerade värden och jämfördes med de verkliga värdena.

För att undersöka känsligheten i modellen gjordes simuleringar där valda inparametrar ökades med 20.0 % för att se hur stor inverkan varje parameter hade på modellen. Parametrarna som studerades i känslighetsanalysen är de som är svårast att bestämma exakta värden på och/eller kan variera med tiden; Q, U-värdet, skattad våt golvarea och temperaturen på vattenytan. Förändringen i värdena på utparametrarna analyserades för att se hur stor skillnaden blev. Efter det kunde slutsatser dras om vilka inparametrar som bidrog till tydliga skillnader på utparametrarna.

På förfrågan från Airwatergreen gjordes även grafer som visade hur stora energibesparingar som skulle kunna göras om avfuktare installerades istället för att värma upp lokalen med element i pumphus i Eskilstuna kommun. Data över temperatur och relativ luftfuktighet för Eskilstuna under 2015 användes (SMHI 2015). Genom att sätta minsta tillåtna temperatur inomhus till 18 °C, ventilationen till 30 m³/h

(Edström 2016) och den önskade relativa luftfuktigheten inomhus till 100.0 % kunde simuleringar göras för ett pumphus utan avfuktare. Genom att sätta den önskade relativa luftfuktigheten till 100.0 % så går aldrig avfuktaren igång och modellen beräknar endast hur mycket energi elementet förbrukar för att hålla lokalens temperatur på 18 °C som skapar ett bra klimat. Sedan gjordes även en simulering när den önskade luftfuktigheten valdes till 60.0 % och övriga parametrar hade standardvärden (se Tabell 2). Fuktlasten erhöles från modellen och omvandlades till energiförbrukning från avfuktaren enligt Ekvation 11. Detta gjordes för att se skillnaden mellan energiförbrukningen om element respektive avfuktare användes.

$$Energiförbrukning[kWh] = Fuktlast[kg/h] \cdot Eff[kWh/kg] \cdot Timmar[h] \quad (11)$$

Eff är effektiviteten hos avfuktaren och har värdet 2 kWh/kg och *timmar* är antalet timmar på ett dygn. Grafer gjordes för de två fallen och skillnaden i energiförbrukningen beräknades.

4 Resultat

4.1 Utveckling av modell

- Term i differentialekvationen för temperaturförändringen som adderar det konvektiva värmeflödet från en vattenyta till luften (Engineering Toolbox u.å.).

$$\dot{T} = \frac{P_v + P_{avf} + U \cdot A(T_o - T_i) + \beta \cdot A_{vat} \cdot (T_{vat} - T_i)}{C_v \cdot \rho \cdot V + (T_o - T_i) \cdot Q/V} \quad (12)$$

I Ekvation 12 som är den slutgiltiga differentialekvationen i den utvecklade modellen är β den konvektiva värmetransportskoefficienten (Engineering Toolbox u.å.), A_{vat} är den procentuella arean på av golvet som är våt och T_{vat} är temperaturen på den våta ytan.

- Ändrat så att mätnadsångtrycket och ångtrycket vid vattenytan beror av vattentemperaturen och inte lufttemperaturen.
- Ändrat termen för evaporationen från öppna vattenytor i differentialekvationen för fuktlasten (Engineeringtoolbox u.å.).

$$\dot{x} = (x_o - x_i)\rho \cdot Q + A_e \cdot S_v(x_{vat} - x_i) - c \quad (13)$$

där x_{vat} är absoluta vatteninnehållet i luften precis vid vattenytan och A_e är evaporationskonstanten (Engineering Toolbox u.å.).

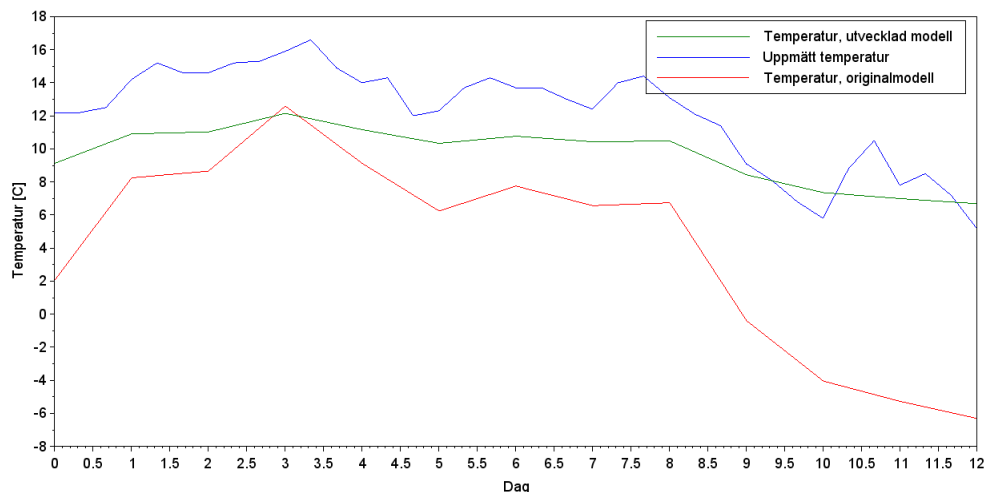
- Ändrat felaktigt värde på atmosfärstrycket från 1 000 000 Pa till 101 325 Pa.
- Förbättrat noggrannheten på temperaturen från 273 K till 273.15 K samt det molekylära viktförhållandet mellan vattenånga och torr luft från 6.122 till 6.12198.
- Korrigerat täljaren i ekvationen för luftens vatteninnehåll från $0.622 \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{luft}}$ till $0.62198 \cdot \frac{P_{luft}}{P_{atm} - P_{luft}}$.
- Implementerat en loop som beräknar luftens densitet vid varje specifik temperatur och relativ luftfuktighet.

4.2 Jämförelse av verkliga och simulerade värden

Nedanstående grafer presenterar en jämförelse mellan originalmodellen och den utvecklade modellen med tillsammans med uppmätta verkliga värden.

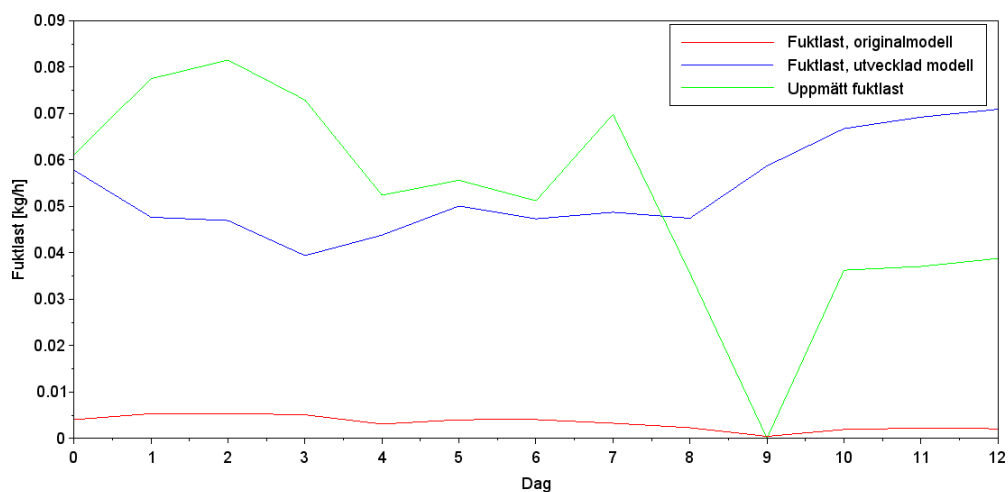
Figur 2 visar temperaturförändringen över tiden. I figuren visas tre kurvor varav två motsvarar simulerade temperaturer från originalmodellen (röd) respektive den utvecklade modellen (grön). Den tredje och blå kurvan representerar den uppmätta temperaturdatan (SMHI 2016). Enligt Ekvation 10 beräknades det normaliserade

rotmedelkvadratfelet till -0.16 för den utvecklade modellen medan originalmodellens NRMSE låg på -2.72 . Numerisk analys av resultaten visar att den utvecklade modellen i procentuellt medelvärde motsvarar den verkliga temperaturen till 79.6% noggrannhet i förhållande till originalmodellen som endast simulerar verkligheten till 32.9% för samma värden på alla parametrar.



Figur 2: Graf över modellerad temperatur med originalmodell och utvecklad modell i jämförelse med uppmätt temperatur.

Figur 3 visar den simulerade fuktlasten med de två olika modellerna och fuktlasten som beräknades utifrån verkliga värden på energiförbrukningen. NRMSE för originalmodellen beräknades till -1.43 och för den utvecklade modellen till -0.30 enligt Ekvation 10. Den utvecklade modellens medelvärde stämmer överens till 92.8% med det beräknade från energiförbrukningen. Skillnaden mellan originalmodellen och de uppmätta värdena är betydligt större, originalmodellen ger endast 6.3% av den verkliga fuktlasten.



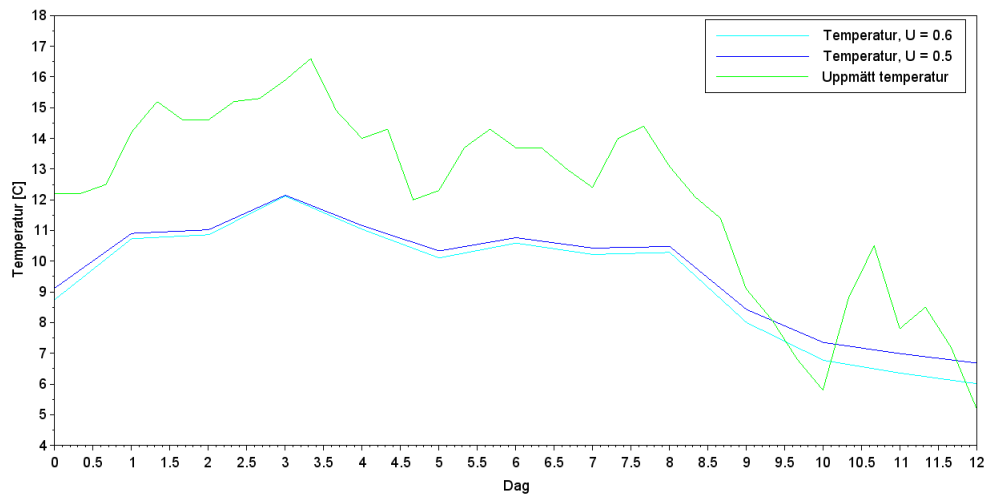
Figur 3: Graf över fuktlasten uträknad med den utvecklade modellen, originalmodellen samt verklig data från pumphuset.

4.3 Känslighetsanalys

I den här delen har modellens känslighet studerats genom att undersöka inparametrarnas påverkan på modellen. För att undersöka dess påverkan har de ökat med 20.0 % och förändringen i fuktlast respektive inomhustemperatur har studerats. En liten förändring av ventilationensparametern Q påverkade varken fuktlasten eller temperaturen i någon större utsträckning. En ökning av Q med 20.0 % gav mindre än 1.0 % skillnad på både fuktlasten och temperaturen, därför är inte de graferna med i resultatet.

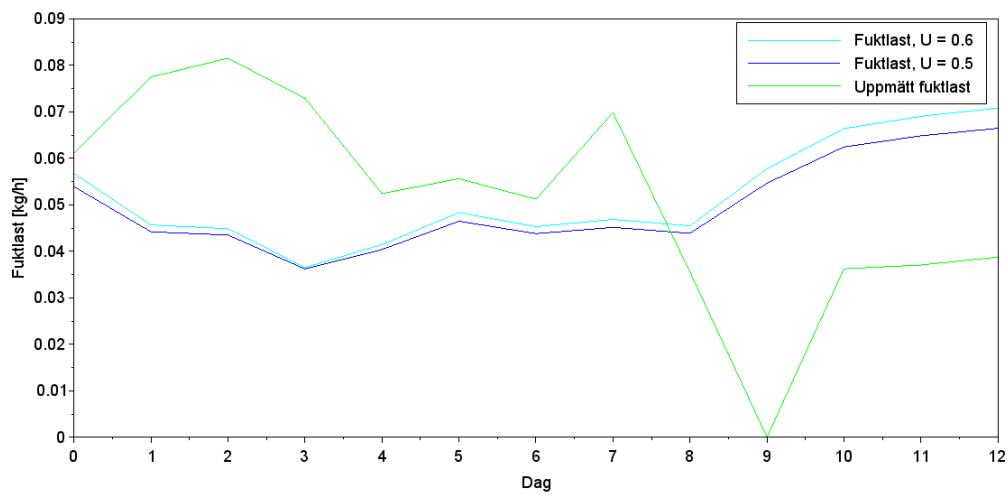
4.3.1 U-värde

Temperaturens variation med två olika värden på värmegenomgångskoefficienten, U , redovisas i Figur 4. När väggens U -värde ökades med 20.0 % minskade temperaturen inomhus med ca 3.2 % i medelvärde.



Figur 4: Graf över modellerad inomhustemperatur där U -värdet varierades mellan 0.5 och $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

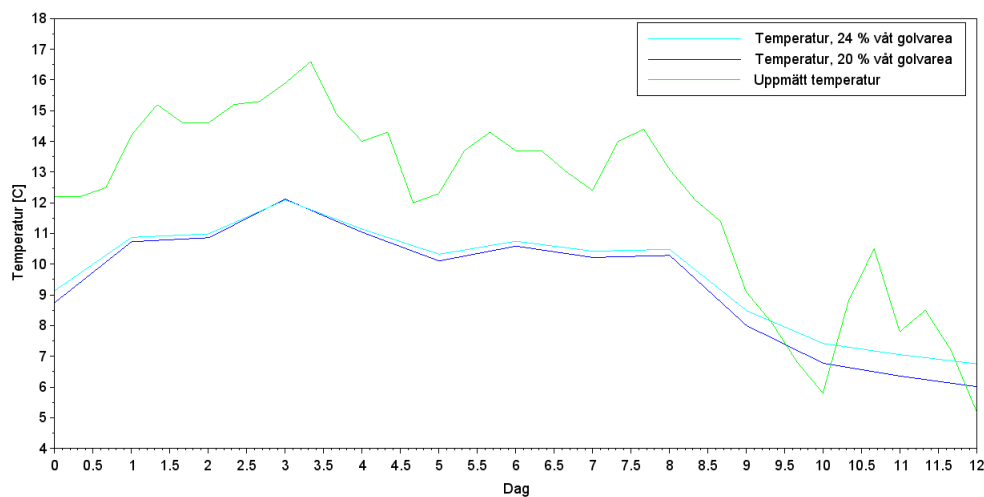
U -värdet har en liten inverkan på fuktlasten i modellen. En ökning med 20.0% på parametern gav en ökning av fuktlasten på 6.0% . Resultatet syns i Figur 5.



Figur 5: Graf över modellerad fuktlast där parametern U varierades mellan $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ och $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

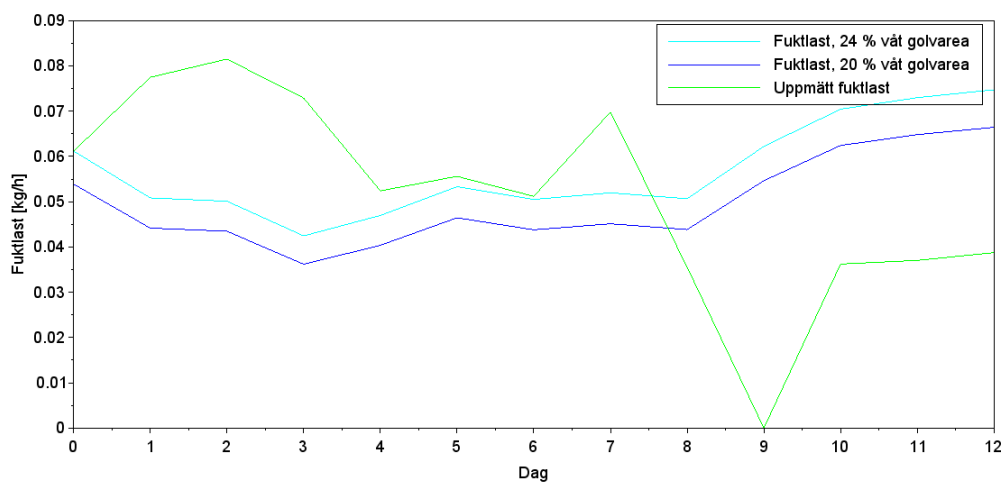
4.3.2 Skattad våt golvarea

I Figur 6 visas resultat från hur temperaturen förändras då modellen körs med olika värden på den skattade våta golvarean. Med en ökning på 20.0 % av den våta golvarean ökade rumstemperaturen i snitt 3.0 %.



Figur 6: Graf över modellerad inomhustemperatur där parametern våt golvarea varierades mellan 20.0 % och 24.0 %.

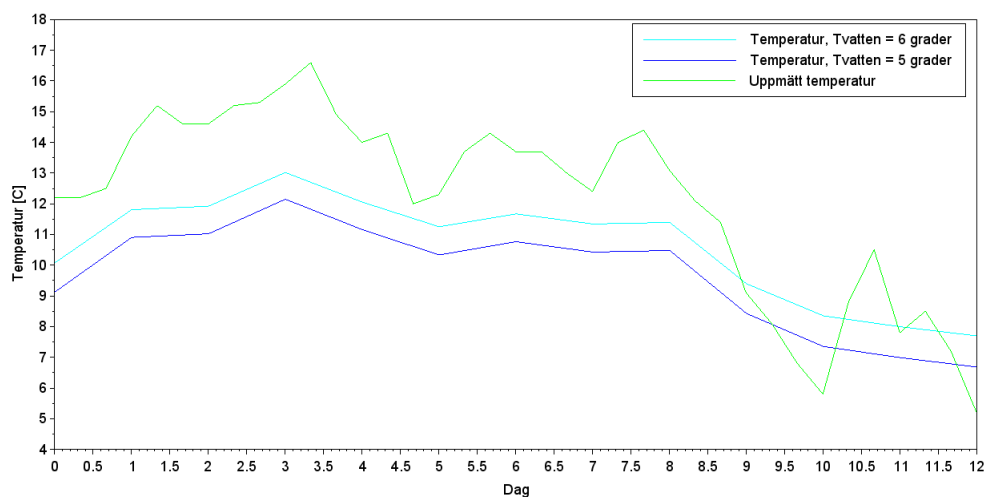
Figur 7 visar hur fuktlasten beror av parametern för våt golvarea. Hur stor del av golvet i byggnaden som är våt hade stor inverkan på resultatet. En ökning med 20.0 % på parametern för våt golvarea resulterade i en 16.0 % högre fuktlast.



Figur 7: Graf över modellerad fuktlast där parametern våt golvarea varierades mellan 20.0 % och 24.0 %.

4.3.3 Vattentemperatur

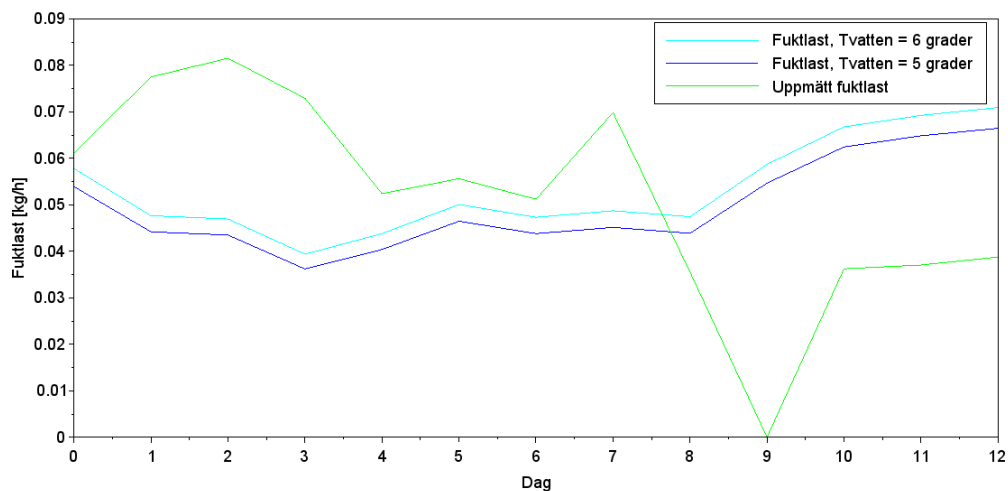
Den största temperaturförändringen gavs av inparametern vattentemperatur. En ökad vattentemperatur med 20.0 % resulterade i 9.7 % snittökning i inomhustemperatur. Resultatet av detta redovisas i Figur 8.



Figur 8: Graf över modellerad temperatur där Tvatten, temperaturen på den våta golvytan, varierades mellan 5 °C och 6 °C.

I Figur 9 har temperaturen på den våta vattenytan ökats med 20.0 %. Resultatet blev

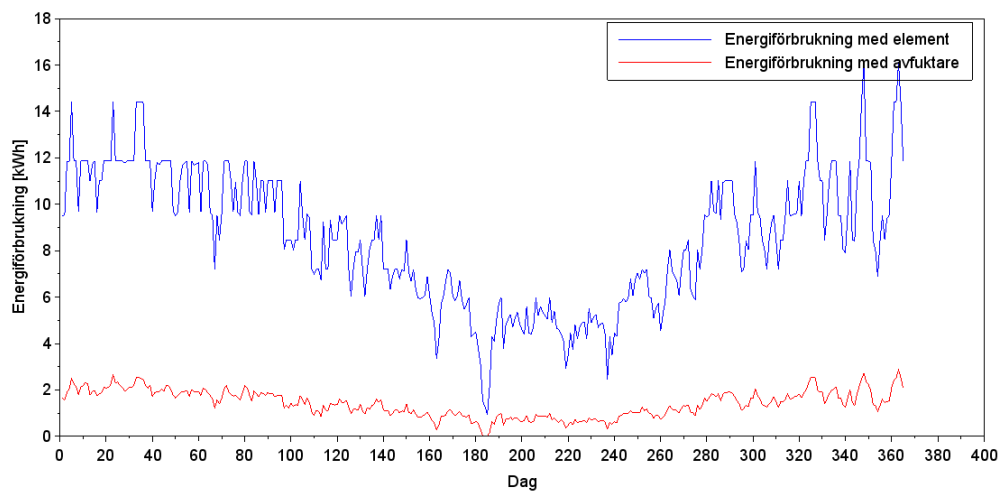
en ökad fuktlast på 9.0 %.



Figur 9: Graf över modellerad fuktlast där T_{vatten} , temperaturen på den våta golvytan, varierades mellan $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.4 Energiförbrukning

I Figur 10 visas simulerade värden på energiförbrukningen för ett pumphus i Eskilstuna kommun med temperaturdata under 2015 (SMHI 2016). Den blå linjen visar de simulerade värdena för pumphuset utan avfuktare men med ett element som håller temperaturen på $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den röda linjen visar de simulerade värdena för energiförbrukningen om det istället hade funnits en avfuktare och inget element. Resultatet från simuleringen visar att med en avfuktare blir energiförbrukningen för ett år 513.8 kWh och med ett element 3101.57 kWh . Energiförbrukningen om en avfuktare skulle användas istället för element blir 83.0% mindre.



Figur 10: Graf över simulerad energiförbrukning för ett pumphus i Eskilstuna med avfuktare respektive element.

5 Diskussion

5.1 Utveckling av modell

Vid skapandet av en vetenskaplig simuleringsmodell krävs en stor del abstraktion och tillräcklig kunskap inom området för att göra korrekta antaganden. Modellen fungerar endast med god indata. Arbetet med denna modell har inte varit något undantag, arbetsgången har varit en iterativ process.

Alla förbättringar i modellen genomgick en process vilken initierades genom ett välgrundat och kvalificerat antagande som sedan uttrycktes matematiskt och fysikaliskt. Detta implementerades därefter i programkod där resultat och påverkan jämfördes iterativt med olika inparametrar för att kontrollera dess validitet. Av upphovsrättsliga skäl kan den fulständiga koden ej redovisas i rapporten.

Tidigt i skedet sågs stora felmarginaler i beräknad inomhustemperatur, med detta som utgångspunkt påbörjades en undersökning av orsak till förevarande. Efterforskningar om var och hur denna temperaturpåverkan uppstod visade att en golvbrunn med varmt vatten fanns i pumphuset som inte fanns modellerad i den ursprungliga modellen. Golvbrunnen påverkade både fuktlasten och temperaturen. Termodynamiska ekvationer med empirisk härkomst studerades för att kontrollera om dessa var applicerbara på modellen för att simulera påverkan från en våt golvyta. Slutligen valdes en formel vilken förbättrade modellen ur både fukt- och temperatursynpunkt. Denna formel kombinerades med differentialekvationerna och den slutliga formeln redovisas i Ekvation 12 och 13.

5.2 Jämförelse av verkliga och simulerade värden

Med hjälp av Figur 2 kan det konstateras att simulerade värden för temperaturen inomhus har förbättrats. För originalmodellen ligger nästan alla värden lägre än de verkliga värdena, variationerna är också mycket högre och medelvärdet för temperaturen stämmer endast till 32.9 %. Den största anledningen till felet beror förmodligen på att denna modell inte tog hänsyn till att det i pumphuset fanns en brunn som innehöll uppvärmt vatten. Genom att en utveckling av modellen gjordes så att den tog hänsyn till hur temperaturen påverkades av våt vattenyta och vattnets temperatur förbättrades resultatet påtagligt. Simulerade värden för temperaturen från den utvecklade modellen stämmer med de verkliga värdena betydligt bättre och medelvärdet förbättrades till att stämma med 79.6 %.

Genom att studera Figur 3 och medelvärdena för fuktlasten kan det konstateras att även värdena från originalmodellen skiljer sig markant från de verkliga värdena. Denna

skillnad kan antagligen förklaras med den missade golvbrunnens bidrag. Medelvärdet för fuktlasten från utvecklade modellen stämmer bättre med de verkliga värdena och skillnaden har minskat. I figuren syns det tydligt att kurvorna inte följer varandra. De enskilda värdena, är dock inte det mest relevanta då ett medelvärden över en längre period togs för att beräkna kostnad och hur många avfuktare som behövs, och det är det som modellens huvudsakliga syfte är. Skillnaden i de enskilda värdena beror förmodligen på att modellen inte tar hänsyn till att avfuktaren jobbar i intervall och det kan göra att förändringen i fuktlast och energiförbrukning inte följer varandra momentant, då fuktlasten är konverterad från data över energiförbrukning.

5.3 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen gjordes för att se hur små förändringar i parametrarna påverkar modelleringen av fuktlast. Variablerna som följer valdes eftersom dessa är svåra att approximera och därför var av intresse att undersöka närmare. De valda indatavariablerna är också av teoretiska anledningar viktiga för modellens ekvationer.

5.3.1 U-värde

Pumpstationens U-värde har måttligt till medelstor påverkan på temperatur respektive fuktlast, endast några få procent, vilket kan ses i Figur 4 samt 5. Detta värde är en grov approximation av det faktiska värdet som i framtiden kan beräknas med större precision med hjälp av väggens detaljerade materialsammansättning och tjocklek.

5.3.2 Skattad våt golvarea

Enligt resultaten presenterade i Figur 7 har parameteren "Skattad våt golvarea" stor inverkan på fuktlasten. Hur den uppmäts är därför viktigt. I fallet med pumpstationen handlar det om en uppskattning då själva brunnen ligger flera meter ner i marken och luften i pumpstationen inte har direkt kontakt med vattnet i brunnen. Det läcker dock runt locket vilket gör att parameteren ökar. Hur stor del av golvet som är blött blir därför svårt att uppskatta eftersom hela brunnen yta inte bör medräknas. I detta fall har värdet uppskattats till drygt hälften av brunnen area. Då denna parameter har stor inverkan på slutresultatet på fuktlasten är det en stor felkälla och den bör mätas mer noggrant på plats. Parameteren påverkar även temperaturen (se Figur 6) några procentenheter, vilket i sin tur påverkar den relativa luftfuktigheten som beror av temperaturen. När temperaturen ökar så minskar luftfuktigheten och avfuktaren behöver inte gå på lika hög effekt.

5.3.3 Vattentemperatur

Vattentemperaturen orsakade, som den våta golvarean, en märkbar förändring på både temperaturen (se Figur 8) och fuktlast (se Figur 9). Denna parameter skattades men

kan i framtiden mätas med större noggrannhet. Mätdata på vattnets temperatur finns som minimi- respektive maximivärden under året. För att skatta vattentemperaturen under den aktuella perioden analyserades förhållandet aktuell utomhustemperatur mot sina maximi respektive minimi-värden under samma tids spann. Hänsyn togs även till att rören som leder vattnet går igenom marken och därmed påverkas av en viss temperaturfördröjning- och isolering. Ökningen på parametern med 20.0 % motsvarade en grad på vattentemperaturen och gjorde både inomhustemperaturen och fuktlasten 9.0 % större. Vattentemperaturen varierar dock under året mellan 2 och 12 °C, en variation som innebär en fördubbling av fuktlasten som går från 0.039 kg/h vid 2 °C till 0.079 kg/h vid 12 °C. Under året varierar även klimatet och en 12 gradig vattentemperatur behöver därför inte nödvändigtvis betyda en högre fuktlast.

5.3.4 Ventilation

Ventilationen, Q , är den parameter som påverkar simuleringen minst vid 20.0 % ökning. Detta förklaras av att en ökning på $0.4 \left[\frac{m^3}{h}\right]$ är en försumbart liten förändring av ventilationen. Luftkonditionering kan t.ex. ligga på $800 \left[\frac{m^3}{h}\right]$ för ett litet badrum. Osäkerheten i denna parameter är stor då detta är en uppskattning av Airwatergreen.

5.4 Tillämpning i andra lokaler

De modifikationer som är gjorda för att förbättra modellen är verifierade mot verklig data från en enda pumpstation vilket gör att det inte är garanterat att modellen fungerar lika bra för andra typer av lokaler.

Airwatergreens främsta kund är Svenska kyrkan, och kyrkor skiljer sig från pumpstationer på flera sätt. Formen går inte att approximera som fyra väggar och ett tak, utan kyrkor har ofta torn och utbyggnader, något som modellen inte tar hänsyn till. Det kan också uppkomma kallhorn i kyrkor då någon typ av självdragsventilation används, dvs ventilation som sker genom att luft kommer in genom exempelvis fönster eller väggar. Att bara ta hänsyn till den totala vägg- och golvarean ger då inte en korrekt modellering av kyrkans konstruktion. Konstruktionen på väggarna kan variera mycket och därmed även U-värdet, vilket gör att det slutgiltiga U-värdet blir svårberäknat och inte representativt för hela byggnaden. Fönstren har inte alltid dubbelglas och fungerar därför som stora köldbryggor. Den nuvarande modellen tar inte hänsyn till fönster över huvud taget, och eftersom de flesta fönster som byggs idag har dubbelglas och är energismarta, har de inte lika stor betydelse som de har i en kyrka. Pumpstationer har oftast inte fönster alls vilket gör att modellen är bättre approximerad för den typ av byggnader i jämförelse med kyrkor.

Kyrkor är ofta mycket större än pumpstationer vilket gör att infiltrationen får större

betydelse och temperaturförändringar sker långsammare. Även taket påverkar fuktlasten och det består oftast inte av samma material som väggarna. Att använda modellen på en kyrka kommer då att bli missvisande, då det inte är samma U-värde i taket som i väggarna, vilket modellen inte tar hänsyn till.

Företaget specialiserar sig även på fjärrvärmesystem. I en fjärrvärmekulvert är temperaturen och den relativa luftfuktigheten hög. Det finns en större andel våt golvyta än i pumpstationer vilket gör att luftfuktigheten påverkas. Pumphus skiljer sig från fjärrvärmekulvertar när det kommer till omgivningen. Modellen förutsätter att väggarna är omgivna av luft, något som inte stämmer för fjärrvärmekulvertar. Väggarna är inte ytterväggar utan omges av andra kulvertar eller mark. Det gör att infiltrationen och U-värdet påverkas eftersom minimalt luftflöde sker genom väggarna. Temperaturen på marken är förstås säsongsberoende, men håller en mer konstant temperatur än luft och kan därför ha en mer eller mindre permanent kylande eller värmande effekt. Det gör att modellen inte kommer att approximera verkligheten lika bra i denna typ av utrymme.

5.5 Fördelar med en verifierad modell

Fördelarna med en verifierad modell är många. Med en bra modell som är mer tillförlitlig och återskapar verkligheten med god träffsäkerhet kan processer effektiviseras och resurser begränsas. Modellen i detta projekt verifierades för att sedan utvecklas och förbättras. Genom modifikationerna som applicerats på modellen har den blivit påtagligt förbättrad men fortfarande endast till en typ av byggnad. Det är dock tydligt att modellen har blivit bättre anpassad till verkligheten (se Figur 2 och 3).

Ur Airwatergreens synpunkt kan en verifierad modell leda till ökad försäljning, eftersom de med en bra modell kan på ett trovärdigt och tydligt sätt visa kunderna att deras produkt kan leda till besparingar. Ett exempel på användningsområden för modellen är att visa kunder hur energiförbrukningen minskar om en avfuktare installeras i en byggnad. I Figur 10 visas skillnaden i energiförbrukning med och utan deras avfuktare för ett simulerat fall i pumphus i Eskilstuna. Det konstateras att enligt modellen skulle energiförbrukningen minska med 83.0 % om en avfuktare installerades.

5.6 Vidareutveckling

Modellen har förbättrats och beskriver bättre verkligheten. Men den är dock fortfarande begränsad i sitt användningsområde. Att endast ha en modell är inte optimalt för Airwatergreen eftersom avfuktarnas användningsområden har stor spridning. Att skapa en mer generell, eller olika modeller för olika byggnader är därför en relevant vidareutveckling av detta arbete.

Modellen kan också förbättras genom att ta hänsyn till det faktum att vissa byggnader har fönster. Fönster spelar roll eftersom dessa har en annan förmåga att släppa in värme eller kyla i jämförelse med väggar. För att få med luftinsläppen från fönsterna bör det finnas inparametrar som beskriver vilken typ av fönster det är och hur stor fönsterarea lokalen har. Att lokalerna har tak tar modellen ej hänsyn till utan det är som en stängd yta där ingen värme eller kyla släpps igenom. Modellen bör räkna med att även taket släpper in luft och påverkar inomhustemperaturen. Ett tak kan ses som en vägg men möjligtvis med ett individuellt U-värde. En annan aspekt att titta vidare på kan vara hur ofta lokalen i fråga används av människor eftersom de påverkar fuktigheten inomhus. Människor kräver även vissa luftfuktighetsnivåer för största komfort och av hälsoskäl, vilket också är en intressant aspekt att ta hänsyn till.

I detta projekt fanns en önskan från Airwatergreens sida att utveckla en modell som kunde ta hänsyn till att en eller flera väggar höll en konstant temperatur. Detta fall är något som kan tillämpas inom fjärrvärme-området då vissa väggar kan vara belägna mot en bassäng som håller en konstant temperatur. En vägg med konstant temperatur kan ha en kylande eller värmande effekt i en lokal och kommer på så vis påverka både temperaturen och luftfuktigheten. Eftersom det är en faktor som påverkar luftfuktigheten är det en viktig aspekt att räkna med i modellen för att kunna beräkna resurserna rätt. I brist på tid så lades detta aldrig till i modellen men det är något som kan förbättra modellen ytterligare.

5.7 Felkällor

Det finns flera felkällor som är intressanta att ta upp. Data på den uppmätta inne-temperaturen och luftfuktigheten i pumpstationerna som användes för att verifiera modellen togs fram utifrån grafer i testrapporten från FVUab. Detta gjordes med ett datainsamlingsprogram och då punkterna markerades manuellt kan små mätfel ha gjorts, men detta påverkade inte modellen utan enbart den data modellen jämfördes med. Skillnaderna kan dock antas vara väldigt små och bör inte ha påverkat verifieringen märkbart.

Ännu en felkälla är att konstanten β i Ekvation 12 är uträknad utifrån att luften i rummet står stilla, och problemet är att ekvationen för β är en empirisk funktion som fungerar bäst för lufthastigheter mellan 2 och 20 m/s (Engineering Toolbox u.å.).

Ytliggare en felkälla i detta projekt är temperaturdatan från SMHI som modellen verifierades mot. Denna data är uppmätt för Uppsala vilket är ett stort område och tar ej hänsyn till lokala temperaturer. Även det faktum att pumphuset där mätningarna utfördes kan ligga i sol- eller skuggläge kan påverka temperaturen och där med resultatet.

6 Slutsats

De simulerade värdena för temperaturen inomhus från originalmodellen stämde överens till 32.9 % medan värdena för fuktlasten stämde överens till 6.0 %. Modellen utvecklades så att de simulerade värdena för temperaturen inomhus stämde överens med 79.6 % och värdena för fuktlasten stämde överens med 92.8 %. Det kunde konstateras att värden på vissa konstanter hade avrundats på fel sätt och att den ursprungliga modellen inte hade tagit hänsyn till att det i pumphuset fanns det uppvärmt vatten som påverkade temperaturen och fuktlasten genom värme.

Med en känslighetsanalys kunde slutsatsen dras att känsligheten var hög för storleken på parametern för den våta golvarean och vattnets temperatur, medan parametrarna Q och U-värde var mindre känsliga. Det betyder att små fel vid uppmätning av dessa parameter kan leda till stora fel i simuleringen. Detta gjorde att det kunde konstateras att modellen fungerar bra för detta fall men att det är svårt att bedömma hur bra det fungerar för andra typer av lokaler och förutsättningar. Sammanfattningsvis får projektet ses som lyckat även om målet med att simulera en vägg med konstant temperatur ej uppfylldes.

Referenser

- Abel, E. (u.å.) *Värmeföring*, *Nationalencyklopedin*. Tillgänglig: <http://www.ne.se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ngv%C3%A4rme%C3%B6verf%C3%B6ring>
- Aelenei, D. & Henriques, F. M.A. (2008). *Analysis of the condensation risk on exterior surface of building envelopes*. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.its.uu.se/science/article/pii/S0378778808000881>
- Airwatergreen (u.å.) *Produkter*. Tillgänglig: <http://airwatergreen.com/produkter/> [2016-04-12]
- Airwatergreen. (u.å.). *Låt oss presentera FLEX-serien*. Uppsala: Airwatergreen. [Broschyr]. Tillgänglig: [Tillgänglig:http://airwatergreen.com/wp-content/uploads/2015/05/AWG_Prodktblad.pdf](http://airwatergreen.com/wp-content/uploads/2015/05/AWG_Prodktblad.pdf)
- Andersson, M. (2007). *Energieffektivisering av kulturhistoriska byggnader - energi och klimat i Lekaryd kyrka*. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:205346/FULLTEXT01.pdf>
- Atkins & De Paula (2010). *Atkins' physical chemistry* 9. ed.: Oxford: Oxford University Press, 2010
- Energirådgivarna (2016) *Energideklarering av bostadsbyggnader. Metoder för besiktning och beräkning*. Tillgänglig: http://www.energiradgivarna.com/uploaded/pdfarkiv/metoder_for_besiktning_2007.pdf [2007-01-31]
- Buck Research Instruments, LLC (2012) *CR-1A users manual* Boulder: Buck Research Instruments, LLC
- Deling, J. & Eskilander, C. (2004). *Fukttekniska lösningar för uteluftsventilerade kryprumsgrunder* Kungliga Tekniska Högskolan. Väg och vattenbyggnadsteknik (Examensarbete i byggnadsteknik No. 339)
- Edström, F (2014). *Modell för energiberäkning i Kyrkobyggnader*. Airwatergreen. Opublicerat dokument.
- Energimyndigheten (2014) *Luftavfuktare*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/tester/tester-a-o/luftavfuktare/>
- Engineering Toolbox (u.å.) *Latent heat from evaporation from water surfaces* Tillgänglig: http://www.engineeringtoolbox.com/indoor-temperature-humidity-d_114.html
- Engineering Toolbox (u.å.) *Convective Heat Transfer* Tillgänglig: http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html

- Engineeringtoolbox Tillgänglig: http://www.engineeringtoolbox.com/indoor-temperature-humidity-d_114.html
- European Union (2016-04-18). *Energy Efficiency*. Tillgänglig: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency>. [2016-04-18]
- FVUab (2016). *Testrapport: Airwatergreen, FLEX*. Tillgänglig:https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/static.wm3.se/sites/71/media/64505_01-1602_Airwatergreen_FLEX_20160208.pdf?1455264697
- Feoroff, NV. et al. (2010). Radically rethinking agriculture for the 21th century. *Science* 12 februari.
- Hellgren. O & Larsson.H (u.å.) SLU. *Känslighetsanalys av modell*. Tillgänglig: http://4t.sockerbetor.nu/4T/kap3_08.pdf
- Klenz Larsen, P. (2007). *Climate control in Danish churches*. Tillgänglig: <http://eprints.sparaochbevara.se/58/1/larsen.pdf>
- LFS – Ljungby Fuktkontroll och Sanering AB (2014). *Sorptionsavfuktare - Effektiva avfuktare i kalla utrymmen*. Tillgänglig: <http://www.lfs-web.se/sorptionsavfuktare.htm>
- Mathworks (2016) Tillgärnglig:<http://se.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html>
- Parish, Putnam (1977). *Equations for the Determination of Humidity from Dew-point and Psychrometric Data*. Edwards NASA. Tillgän:glig:http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/87878main_H-937.pdf
- SENSIRON AG (1990). *Dew-point Calculation* (1990) Tillgänglig: http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/Misc/Dewpoint_Calculation_Humidity_Sensor_E.pdf
- SMHI (2016-04-27) *SMHI öppna data* Tillgänglig: <http://opendata-catalog.smhi.se/explore/> [2016-04-27]
- SMHI (2016-04-27) *SMHI öppna data* Tillgänglig: <http://opendata-catalog.smhi.se/explore/> [2016-04-27]
- Sun, J.& Besant, R. W. (2005). *Heat and mass transfer during silica gel-moisture interactions*. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.its.uu.se/science/article/pii/S001793100500342X?np=y>
- Svensk fjärrvärme (u.å.). *Så funkar fjärrvärme*. Tillgänglig: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Fjarrvarme/Sa-funkar-fjarrvarme/> [2016-05-03]

TLPCA (u.å) *Texas Lathing and Plastering Contractors Association, How to Avoid Moisture Damage to Walls from Condensation*. Texas. Tillgänglig: http://www.tlpc.org/images/articles_condensation.pdf

Valtin (2009) *Analys av lågenergihus - Energieffektivt klimatskal*, Högskolan i Gävle. Akademin för teknik och miljö. Bygg-, energi- och miljöteknik/energisystem. (Examensarbete) Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:662414/FULLTEXT01.pdf>

Wamstad, J. (2016a). *Pressmeddelande, Kina beviljar Airwatergreen patent för ny teknologi för att producera vatten från luft* Tillgänglig: <http://airwatergreen.com/press/2016-02-16%20Kina%20beviljar%20AWG%20patent.pdf>

Wamstad, J. (2016b). *Pressmeddelande, USA beviljar Airwatergreen patent för ny fukthanteringsteknik* Tillgänglig: <http://airwatergreen.com/press/2016-03-30%20USA%20beviljar%20AWG%20patent.pdf>

Wern, L (2013). *Luftfuktighet, variationer i Sverige*. Norrköping: Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut. Tillgänglig: http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.34705!/Luftfuktighet_-_variationer_i_Sverige-2013-12-09.pdf

Icke publicerat material

Edström, F, Airwatergreen (2016-04-25) *Muntlig källa*