

CHALMERS



Luftfuktighetens påverkan på konstruktion och klimat i en berghangar

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör*

CHRISTOPHER SCHYBERG HANSEN

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2013
Examensarbete 2013:44

EXAMENSARBETE 2013:44

Luftfuktighetens påverkan på konstruktion och klimat i en berghangar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

CHRISTOPHER SCHYBERG HANSEN

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2013

Luftfuktighetens påverkan på konstruktion och klimat i en berghangar
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

CHRISTOPHER SCHYBERG HANSEN

© CHRISTOPHER SCHYBERG HANSEN, 2013

Examensarbete / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2013:44

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Grundvatteninträngning i skalet leder till korrosion på armeringen.

Chalmers reproservice
Göteborg 2013

Luftfuktighetens påverkan på konstruktion och klimat i en berghangar
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

CHRISTOPHER SCHYBERG HANSEN
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Aeroseum är ett flyginriktat upplevelsecenter som bedrivs i en gammal militär berghangar. Anläggningens militära ändamål var från början att skydda stridsflygplan i händelse av en kärnvapenattack. Flygbränsle och ammunition förvarades i ett slutet utrymme långt under marken vilket krävde att explosiva gaser kunde ventileras bort utan risk för personal och material. Tilluftsventilationen sker genom utrymmet mellan hangaren och bergrummet och utformningen har den fördelen att gaser ej ansamlas i hålrummet utanför hangaren. Denna lösning skapar problem för dagens verksamhet som har helt andra behov. Problemen visar sig som mycket höga fukthalter i lokalerna under sommarmånaderna. Undersökningen som presenteras i rapporten syftar till att utreda omfattningen på fuktproblemen och föreslå vilken fuktighet och temperatur i inomhusmiljön som är lämplig för Aeroseums verksamhet. Målet är att presentera och analysera förslag på förbättringar av systemet. Undersökningen koncentreras kring fuktproblematiken och utreder ventilationssystemet endast i den omfattning det krävs för att skaffa en förståelse för problemen i den publika delen av hangaren. Material till undersökningen kommer från samtal med personal, mätningar på plats i hangaren och litteraturstudier om fuktproblematik. Data från mätningarna och litteraturstudierna används i beräkningar för att visa på problemen och förslag till förändringar. Insamlingen av temperaturer och fukthalter som har genomförts kontinuerligt under våren 2013 har inte visat på onormala värden för årstiden vilket stämmer med information från personal på Aeroseum. Problemen uppträder under varma, regniga sommardagar. Den relativa ånghalten sommartid har uppmätts till nästan 100 % medans undersökningen visar att den verksamheten som bedrivs i anläggningen i dag mår bäst av en halvering av det värdet. Konstruktionen uppvisar skador i form av sprucken betong på grund av höga relativa ånghalter. Med det befintliga ventilationssystemet och hangarens uppbyggnad visar undersökningen att en enkel lösning inte går att hitta. Data från temperatur och fuktmätningarna är otillräckliga för att kunna presentera en generell lösning på problemet utan att bygga om hela systemet. Däremot kan en sänkning av temperaturen på förvärmningen av tilluften och en flytt av friskluftintaget ge en stabilisering av fuktvärdena och en sänkning av energiförbrukningen vissa delar av året. Utifrån denna undersökning kan rekommendationen endast bli att ventilationssystemet måste byggas om med hänsyn till de nya behov som verksamheten ställer på anläggningen framförallt om målet att öka antalet besökare i berget kvarstår.

Nyckelord: berghangar, fukthalter, fuktproblem, relativ ånghalt, ventilationssystem

The influence of humidity on construction and climate in an underground hangar

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

CHRISTOPHER SCHYBERG HANSEN

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Building Technology

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Aeroseum is an aviation museum located in an old military underground hangar. The ventilation system in the hangar is designed for the military purpose of the hangar. This design includes a solution with air flowing through the space between the construction of the hangar and the rock surface. The solution is intended to avoid a buildup of inflammable gases. This design leads to high humidity levels in the hangar. The investigation presented in this report aims to decide an acceptable humidity level for the hangar construction and the activity it is used for and analyze suggestions for improvement of the ventilation system. During the investigation it became clear that the temperature and humidity data from measurements made during the spring of 2013 was insufficient. High levels of humidity occur during summertime and the lack of data made calculations very theoretical. Therefore this investigation fails to present any reliable solutions to solve the problems. Although improvements with the humidity can be made. If the temperature of air flowing through the void outside the hangar could be lowered the air wouldn't be able to carry the same amount of moisture in to the hangar. If the air intake is moved to the surface, the heat from the outside air could be utilized during periods of the year and a decrease of heating costs could be possible. These examples should be investigated further. Based on the findings in this report the only suggestion to create an acceptable indoor climate is to rebuild the entire ventilation system.

Key words: humidity, underground hangar, ventilation system

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
DEFINITIONER	VII
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
2 METOD	2
2.1 Studiebesök	2
2.2 Muntliga källor	2
2.3 Litteraturstudier	2
2.4 Mätningar	2
2.4.1 Ritningar	2
2.4.2 Temperatur och fuktmätning 1	2
2.4.3 Mätning över avfuktare	3
2.4.4 Temperatur och fuktmätning 2	3
3 HANGARENS UTFORMNING	4
3.1 Ventilation	4
3.2 Tilluft	4
3.3 Frånluft	5
3.4 Avfuktning	6
3.5 Luftflöde	6
3.6 Konstruktion	6
4 SAMMANSTÄLLNING AV ÅNGHALTER	8
4.1 Situationen i dag	8
4.2 Utställningen	8
4.3 Boverkets byggregler	8
4.4 Betongkonstruktioner och fukt	9
4.5 Skador på konstruktionen	10
4.6 Människor	11

4.7	Sammanställning	12
5	FUKTTILLSKOTT UTIFRÅN MÄTRESULTAT	13
5.1	Mätning över avfuktare	13
5.2	Jämförelse av mätpunkterna	13
6	BERÄKNINGAR PÅ TEMPERATUR OCH FUKTFÖRDELNING	15
6.1	Sommartid	15
6.2	Utan förvärmning av tilluften	19
6.3	Tegelparti	21
6.4	Tak	22
6.5	Ombyggnad av ventilationen	23
7	ANALYS	25
7.1	Omställning av ventilationssystemet	25
7.2	Nödutgång	25
7.3	Ombyggnad av ventilationssystemet	26
8	SAMMANFATTANDE KOMMENTARER	27
8.1	Återkoppling	27
8.2	Metoddiskussion	27
8.3	Fortsatta studier	28
9	REFERENSER	29
10	BILAGOR	30
10.1	Bilaga 1	30
10.2	Bilaga 2	31
10.3	Bilaga 3	32
10.4	Bilaga 4	33
10.5	Bilaga 5	34
10.6	Bilaga 6	35
10.7	Bilaga 7	36
10.8	Bilaga 8	37
10.9	Bilaga 9	38

Förord

Denna rapport utgör den avslutande delen av min utbildning till byggingenjör på Chalmers tekniska högskola. Rapporten presenterar mitt examensarbete som omfattar 15 högskolepoäng. Arbetet har utförts i Aeroseums lokaler med stöd från Fastighetskontoret i Göteborg.

Jag vill tacka personalen på Aeroseum för deras hjälp under arbetets gång. Tack till mina handledare Ingemar Segerholm på Chalmers och Olle Björquist på Fastighetskontoret. Ett extra stort tack till Jonas Averius på Polygon som bidragit med mätinstrument som har varit ovärderliga för detta arbete. Sist men inte minst vill jag tacka mina kollegor på Fastighetskontoret för stödet och hjälpen de bidragit med.

Göteborg juni 2013

Christopher Schyberg Hansen

Definitioner

Nedan listas termer som används i rapporten och förklaras med stöd av läroboken Tillämpad byggnadsfysik (Petersson 2009).

<i>Mättnadsånghalt</i>	Den maximala mängd vattenånga som luft kan innehålla vid en viss temperatur. Mängden vattenånga som luften kan innehålla ökar med temperaturen.
<i>Värmeledningsförmåga</i>	Beskriver materials förmåga att släppa igenom värme och anger den värmemängd per sekund som passerar igenom en kvadratmeters yta av ett material med tjockleken en meter då temperaturdifferensen över materialet är en grad (Celsius eller Kelvin). Värmeledningsförmågan avser den totala värmetransporten genom materialet vilket innebär värmeledning i dess fasta material och strålningsöverföring och konvektionsöverföring (egenkonvektion) av värme inuti materialets porer. [W/mK]
<i>Värmemotstånd</i>	Ett materialskiktets tjocklek dividerat med dess värmeledningsförmåga definierar skiktets värmemotstånd. [m^2K/W]
<i>Värmeövergångsmotstånd</i>	En förenkling av värmeöverföringen vid konstruktioners ytor som tar hänsyn till både värmestrålning och överföring via konvektion. [m^2K/W]
<i>Ånggenomgångsmotstånd</i>	Ett materials tjocklek dividerat med dess ånggenomsläpplighet definierar skiktets ånggenomgångsmotstånd. [s/m]
<i>Ånggenomsläpplighet</i>	Beskriver materials genomsläpplighet för vattenånga och anger hur snabbt vattenångan transporteras genom materialet med mängd vattenånga per sekund som passerar igenom en kvadratmeter av materialet med en meters tjocklek då ånghaltsdifferensen över materialet är ett kg/m^3 vattenånga. [m^2/s]

1 Inledning

Aeroseum är ett upplevelsecentrum placerat 30 meter under marken i en berghangar. Hangaren finns i Säve på Hisingen i Göteborg och tillhörde Göta flygflottilj. Berghangaren färdigställdes 1955.

1.1 Bakgrund

Lokalerna som Aeroseum har till sitt förfogande uppfördes ursprungligen för att skydda stridsflygplan och konstruktionen är designad för detta ändamål. Denna design leder till problem för dagens verksamhet i form av bland annat höga ånghalter i lokalerna under sommartid. Uppvärmning och ventilationssystem är föråldrade och klarar trots hög energiförbrukning ej av att skapa ett bra inomhusklimat för de flyginriktade samlingarna som förvaras där och för de människor som besöker utställningen. Stiftelsen som driver Aeroseum har frågat Chalmers om hjälp med att lösa problemen. 2012 tog Fastighetskontoret över förvaltningen av berggrummet från Fortifikationsverket och de blev då också intresserade av att utreda möjligheten till en förbättring av energiförbrukning och inomhusmiljö.

1.2 Syfte

Undersökningarna som genomförts på Aeroseum under våren har varit inriktade mot att kartlägga fuktproblemen i anläggningen samt utreda möjligheter till förbättringar av fuktsituationen. Målet är att visa vilka konsekvenser fel ånghalter har på konstruktionen och verksamheten samt sammanställa vilka ånghalter som är lämpliga för dagens verksamhet samt presentera och analysera förslag på förbättringar av systemet.

1.3 Avgränsningar

Detta projekt är inriktat mot att hitta lösningar till en förbättrad inomhusmiljö med avseende på fukt. Ett led i detta är att undersöka och beskriva hangarens konstruktion samt mäta temperaturer och fukttransporter i denna. Ventilationstekniska system utreds endast i den mån det krävs för att beskriva den nuvarande problematiken och för att ge tillförlitliga data i beräkningarna. Beskrivning av ventilationssystemet begränsas till aggregaten som försörjer områden där besökare rör sig. Det vill säga hallarna som används till Aeroseums utställningar.

2 Metod

Kapitlet redogör för hur undersökningens fakta samlats in.

2.1 Studiebesök

Ett inledande besök på Aerozeum gjordes tillsammans med Sten-Erik Kaspersson som är fastighetsgruppchef på Fortifikationsverket och ansvarade för driften av hangaren innan den övertogs av Fastighetskontoret. Han gick igenom systemet ur driftsynpunkt och förklarade vilka problem som lokalerna hade. En genomgång av ventilationssystemet gjordes på plats tillsammans med Anders Aldengran från Primär fastighetsförvaltning AB och Olle Björquist som är energiingenjör på Fastighetskontoret.

2.2 Muntliga källor

Då en stor del av arbetet gått ut på att skaffa en förståelse för verksamheten och lokalernas uppbyggnad har en del information i rapporten kommit från personal som arbetar i hangaren. Denna muntliga information kommer från samtal under arbetets gång och är ej renodlade intervjuer. En kompletterande intervju genomfördes med Stiftelsen ordförande, Roger Eliasson 2013-05-02 och behandlade hangarens historik och om hur personal samt besökare upplever inomhusmiljön i lokalerna.

2.3 Litteraturstudier

Litteraturstudierna som genomförts har främst legat till grund för att hitta nivåer på fukthalter som är lämpliga för dagens verksamhet samt olika fukthalters påverkan på konstruktionen. Informationen har hämtats från forskningsrapporter och handböcker. I samband med beräkningar har läroböcker från kurserna i byggt teknik och installationsteknik använts. I beskrivningen av ventilationssystemet har nästan uteslutande driftinstruktioner som Göteborgs Fastighetskontoret tillhandahållit använts.

2.4 Mätningar

Mycket av informationen som krävts för denna undersökning har tagits fram på plats genom kontinuerliga besök i berghangaren där fukt- och temperaturmätningarna med fuktloggrar har genomförts. Mätningarnas syfte har varit att kartlägga fuktillskottet i inomhusluften samt undersöka uppvärmning och avfuktningsskapaciteten i delar av ventilationssystemet.

2.4.1 Ritningar

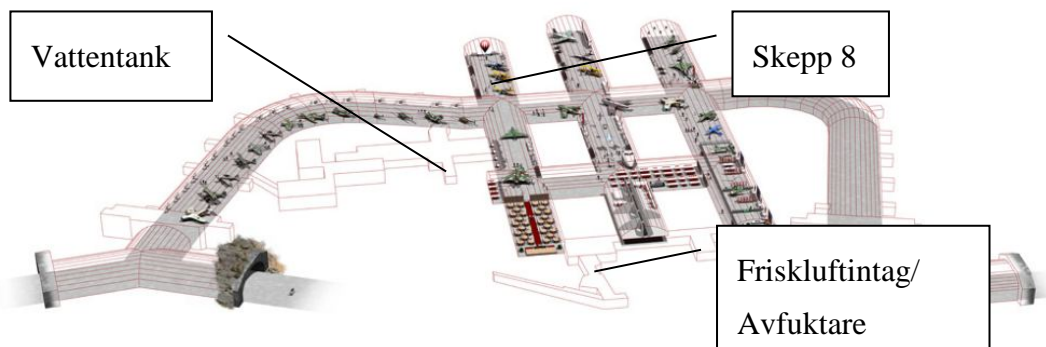
Ritningar över konstruktionen är framtagna efter egna mätningar. De dimensioner som inte gått att mäta har uppskattats. Alla längdmått är uppmätta med laseravståndsmätare Leica DISTO D3a.

Ventilationssystemet beskrivs utifrån driftinstruktioner som tillhandahållits av Fastighetskontoret och okulära besiktningar.

2.4.2 Temperatur och fuktmätning 1

De första mätningarna genomfördes mellan 2013-03-13 och 2013-04-16 och avsåg att ta reda på vilken mängd fukt som berget ger ifrån sig. Tre loggrar tillhandahölls av Chalmers och kalibrerades och startades upp av Marek Machowski som är tekniker på

avdelningen för byggnadsteknologi. Temperatur och relativ luftfuktighet loggas var tionde minut under maximalt 5 veckors tid. Olyckligtvis var en logger skadad och kunde inte användas. Därför placerades en tredje logger ut först två veckor senare 2013-03-28 efter att en ny kunde tillhandahållas av Jonas Averius på fuktmätningföretaget Polygon. Loggrorna placerades i hangaren i skepp 8, det ventilerade hålrummet mellan berget och hangarkonstruktionen (som fortsättningsvis benämns skalet) vid skepp 8. Som referens för oventilerat berg valdes ett utrymme där en vattentank till det urkopplade sprinklersystemet är placerad.



Figur 2.1 Översiktsskiss över hangaren med markerade mätpunkter. (Aerosseum 2013)

Då de tömdes på information visade sig att den logger från Chalmers som placerats i skalet ej hade tömts på information från tidigare användare vilket medförde att den slutade hämta information 2013-03-27. Vattentankutrymmet gav inte en exakt bild av temperatur och fukt då utrymmet ventileras av otätheter i hangarskalet (Bilaga 3).

Mätningen i oljetankutrymmet kan därför inte användas som referens och jämförelser görs bara mellan loggrar i hangaren och skalet från denna mätning (Bilaga 1 och 2).

2.4.3 Mätning över avfuktare

Mätningar för att ta reda på avfuktarens kapacitet genomfördes mellan 2013-04-19 och 2013-05-08. Två loggrar från Chalmers placerades ut, en logger placerades innan kylbatteriet och en logger efter batteriet inne i ventilationskanalen. Loggrarna låg på plats i elva dagar innan avfuktaren slogs igång 2013-04-30. Detta för att kunna jämföra nivåerna innan och efter avfuktning av luften (Bilaga 4 och 5).

2.4.4 Temperatur och fuktmätning 2

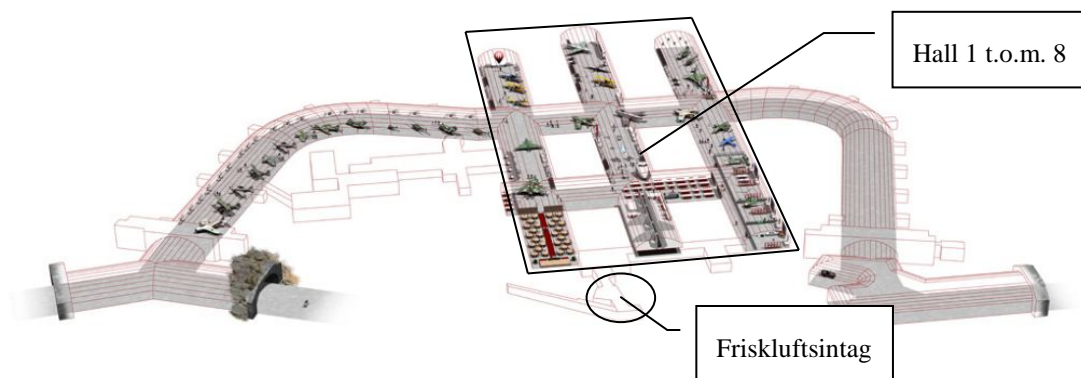
Då den första mätningen endast gav lite information som gick att använda i arbetet genomfördes en ny mätning mellan 2013-05-03 och 2013-05-08 med loggrar från Polygon. De placerades ut i hall 8, i skalet vid hall 8 och efter avfuktaren vid friskluftintaget. Detta gav fyra mätpunkter som kunde jämföras då loggrar från Chalmers låg ute samtidigt (Bilaga 4,6,7 och 8).

3 Hangarens utformning

Här beskrivs konstruktionen och ventilationen utifrån egna mätningar och information från driftinstruktioner.

3.1 Ventilation

Luftbehandlingsanläggningen är uppdelad på fem system med ett antal fläktaggregat i varje system (Driftinstruktion G 0406, 1993). Systemet som beskrivs i detta kapitel försörjer hall ett till och med åtta, genomfartstunnel, inre genomfartstunnel och personal- och verkstadsutrymmen.



Figur 3.1 Översiktsbild över hangaren med aktuellt område markerat.(Aeroseum 2013)

3.2 Tilluft

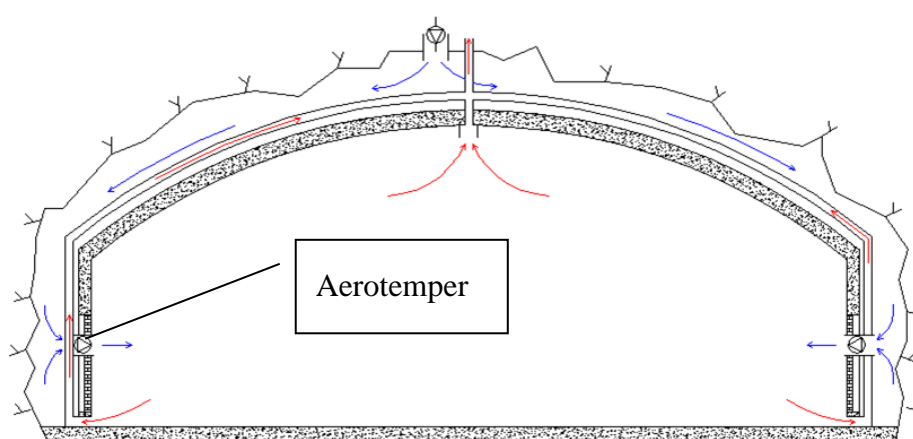
Friskluftsintaget sitter i nödutgångstunneln. Tunneln som är ungefär 35 meter lång har inget betongskal, vägg och takyta består av rent berg. Luften förvärms till 15 °C med värmebatteri innan den trycks ut i skalet mellan berget och betongkonstruktionen (Driftinstruktion G 0406, 1993). Hela utrymmet mellan skalet och berget fungerar således som en ventilationskanal som uppskattas ha en volym 12000 m³. Denna speciella utformning på ventilationssystemet kom till för att undvika att gaser från flygbränslet samlades i skalet. Anledningen till förvärmningen av luften är enligt Sten-Erik Kaspersson att avlasta aerotemperarna och att undvika stora temperaturskillnader och kondensutfällning i utrymmet mellan väggen och berget. Ett uppvärmt berggrum skulle vid detta djup under marken ha samma temperatur som årsmedelvärdet för området då temperaturväxlingarna skulle jämnas ut på grund av bergets förmåga att lagra värme (Georgios, 2004). Berggrummet skulle utan uppvärmning ha en temperatur kring 8 °C vilket är årsmedeltemperaturen för Göteborg (SMHI, 2012)

Aerotemperarna som är monterade i hangarväggen, se Figur 3.2, ska värma luften genom varmvattenflänsar till 19 °C och blåser in luften i hangaren. Varmvattnet värms upp av tre oljepannor (Driftinstruktion G 0406, 1993).



Figur 3.2 Aerotemper.

I den obligatoriska ventilationskontrollen påpekas att det samlats damm och smuts i skalet. Enligt kontrollen anses det inte vara ett problem. Tilluftsfläktarna arbetar med mycket låga tryck och hastigheter därför är det liten risk att det trycks in i lokalen (Roos, 2011). Aerotemperarna är utformade för att filter ska sitta på insidan men det saknas filter på samtliga i dagsläget. Figur 3.3 visar flödesriktningar på från- och tilluft.



Figur 3.3 Principskiss över luftflöden.

3.3 Frånluft

Frånluften tas dels från ventiler vid golvnivå samt takventiler. Ventilerna vid golvnivå ventilerar bort ca 40 % av frånluften och hade enligt Roger Eliasson som funktion att föra bort ångor från flygbränsle när anläggningen var i militärt bruk. De tunga gaserna från flygbränslet sjunker till golvet och ventileras bort i frånluftsystemet.

3.4 Avfuktning

Innanför luftintaget i nödutgången sitter kylslingor som förses med kylvätska från vätskekylaggregatet. Köldbärartemperaturen i systemet är inställd på 3 °C (Driftinstruktion G 0406, 1993). Avfuktningen är oftast påkopplad under maj till september och aggregatet fungerar som en värmepump övrig tid. Omställning från värmeåtervinning till avfuktning sker manuellt men avfuktningen sker endast om hygrostaten som mäter ånghalten i skepp åtta visar värden över 55 % relativ ånghalt (RÅ). Om givaren i maskinkontoret visar värden under 6,5 g/kg luft, vilket motsvarar ca 35 % RÅ vid 19°C, går systemet automatiskt tillbaka till värmeåtervinning. Således sker avfuktning vid behov om vätskekylaggregatet är inställt på avfuktning medan aggregatet ej automatiskt slår över till avfuktning om den är inställd på värmeåtervinning (Driftinstruktion G 0406, 1993). Kondensavfuktaren fungerar genom att den fuktiga luften passerar genom kylslingor som sänker lufttemperaturen. Luften kan bara bära med sig en viss mängd fukt vid en given temperatur. Genom att sänka temperaturen på luften till dess daggpunkt skapas kondensutfällning på kylslingorna. När luften sedan värms igen efter att ha passerat kylslingorna har luften fått en lägre relativ ånghalt (Dahlblom, 2010).

3.5 Luftflöde

I Boverkets byggregler kapitel 6:251 står följande om ventilationsflöde.

”Ventilationssystem ska utformas för ett lägsta uteluftsflöde motsvarande 0,35 l/s per m² golvarea”

Frånluftsflödet i utställningshallen är i samband med den obligatoriska ventilationskontrollen uppmätt på frånluftsfläkten. Flödet är 13280 m³/h och arean på utställningshallen är 8500 m² vilket ger ett flöde på ca 0,43 l/s per m² golvarea. Enligt kontrollen klarar ventilationen då Boverkets regler (Roos, 2011). Luftomsättningen var enligt Sten-Erik Kaspersson 0,5 luftomsättningar per timme (oms/h) när anläggningen användes militärt. Med dagens flöde blir omsättningen ca 0,35 (oms/h).

I kontrollen påpekas att luftflödena i systemet bör omprojekteras med hänsyn till den nya verksamheten och att projekteringen bör innefatta hela systemet (Roos, 2011).

3.6 Konstruktion

Roger Eliasson berättar att hangaren skyddas av en detonation från kärnvapen genom att den placeras i berg. Berget tillsammans med fyllnadsmaterial och dimensionering av portarna ska klara tryckvågen från en detonation. Som mest är det ca 30 meter berg och fyllnadsmaterial över hangaren. Hangaren är uppbyggd av valvtak i armerad betong som har uppskattats ha en medeltjocklek på ca 300 millimeter och vilar på väggar av betong och tegel. Ovanpå betongskalet ligger ett 300 millimeter tjockt lager med singel. Det här lagret har till uppgift att sprida trycket från nedfallande bergmaterial vid ett eventuellt anfall enligt Leif Pettersson som arbetar på Aerozeum. På vissa ställen har takplåtar lagts ut över valvet för att förhindra vatten från berget att rinna in i hangaren. Betongväggarna har sektioner med murade tegelväggar och väggkonstruktionen är uppbyggd delvis med ett pelar- och balksystem samt sektioner av tjockare vägg och takelement. Teglet är murat på en sockel av betong och är 2200 millimeter höga, tegelsektionerna syns i Figur 3.4.

Över tegelväggen ligger det betongbalkar för att ta upp last från taket. Betongdelen av väggen har en tjocklek på 200 millimeter och tegelpartierna 120 millimeter.



Figur 3.4 Tegelsektioner.

Hangaren ansluter till berget via betongstag på vissa ställen, synlig i Figur 3.5. Betongskalet är uppbyggt med ett avstånd till det utsprängda berget som varierar mellan 600 millimeter och 1300 millimeter. Betonggolvet är dränerat och vatten leds ner till en bassäng under anläggningen. Dräneringen har en oljeavskiljare i händelse av att flygbränsle läcker ut på golvet.



Figur 3.5 Gjutning mot berget.

4 Sammanställning av ånghalter

I detta kapitel sammanställs ånghalter från olika utredningar, rapporter, bestämmelser och vägs samman med stiftelsens önskemål om inomhusmiljö. Detta för att hitta en bra realistisk fuktnivå att utföra beräkningar på samt för att utreda fuktens påverkan på betongkonstruktionen.

4.1 Situationen i dag

Materialet som utsätts för fukt på Aeroseum består till största del av militära fordon såsom flygplan, helikoptrar och bilar. Störst problem med fukt upplevs varma regniga sommardagar enligt Roger Eliasson. Sommartid har Aeroseums personal uppmätt relativa ånghalter på 99 %. Dessa halter leder till hög belastning på avfuktarna. Inomhusmiljön upplevs kall i och med de höga ånghalterna. Sommartid har personalen upptäckt att uniformerna i samlingen möglar och att golvet på nedfarten till hangaren blir vått. Detta leder till problem för verksamheten då de tvingas be gäster som vill hyra för konferens- eller festlokalerna att klä på sig ordentligt. Detta kan göra stiftelsens kunder tveksamma till att hyra av Aeroseum. Roger Eliasson har förhoppningar om att höja temperaturen ett par grader och ha en inomhustemperatur på 20-21 °C med en relativ ånghalt på 40 % och i framtiden även öka antalet besökare till 1200 från dagens tillåtna 600 besökare.

4.2 Utställningen

För museer i allmänhet ska den relativa ånghalten vara mellan 45-50 % och temperaturen 20-22°C. Om arkivering sker bör den vara 35 % med temperatur på 12-18°C. (Davidsson, 1999)

Vid höga ånghalter utsätts föremålen för korrosion och mögelangrepp. Ett sätt att undvika korrosionsangrepp är att sänka luftfuktigheten. För att minska korrosion på stål ska den relativa ånghalten understiga 60 %. Temperaturen har påverkan för hur snabbt korrosionsprocessen går. Vid -2 °C upphör korrosionsprocessen nästan helt. (ATH, 2010)

För att undvika påväxt av mögelsvampar har Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut kommit fram till att den relativa ånghalten ska hållas under 75 % förutsatt att materialet ej är fuktigare än luften. Prover har visat påväxt av mögelsvampar vid 50 % relativ ånghalt i luften när materialet varit genomfuktigt. (Johansson, 2005)

4.3 Boverkets byggregler

Boverkets byggregler sätter inte upp några gränser för ånghalter i inomhusluft utan skriver allmänt om fukt:

”Byggnader ska utformas så att fukt inte orsakar skador, elak lukt eller hygieniska olägenheter och mikrobiell tillväxt som kan påverka människors hälsa.”

Däremot anger Boverket gränser för fukthalter i material vilket i Boverkets byggregler benämns med termen kritiskt fuktillstånd. Fuktillståndet kan uttryckas med till exempel relativ fuktighet eller fuktkvot och beskriver vilken nivå fuktförhållandet i ett material har och det kritiska fuktillståndet beskriver vid vilken relativ fuktighet ett material ej längre uppfyller sin tänkta funktion. När det gäller påväxt av mögel sker detta vid den kritiska gränsen i respektive material.

”Om det kritiska fuktillståndet för ett material inte är väl undersökt och dokumenterat ska en relativ fuktighet (RF) på 75 % användas som kritiskt fuktillstånd” (BBR, 2012).

4.4 Betongkonstruktioner och fukt

Berghangarens konstruktion är ur mögelsynpunkt optimal då den är uppbyggd av betong och tegel. Tillväxt av mögel är ovanligt då betong och tegel är oorganiska material. Men det kan uppstå mikrobiell påväxt då temperaturen ligger på 10°C och den relativa ånghalten överstiger 95 %. Samtidigt har vissa formoljor visat sig bidra till mögelpåväxt på betong (Johansson, 2005). Betongens kritiska nivå ligger mellan 90 och 95 % relativ fuktighet enligt en sammanställning av forskning som Statens Provningsinstitut har genomfört. Den kritiska fukthalten kan förutsättas om materialet är helt rent. Om en nedsmutsning av organiskt material sker på betongen kan den kritiska ånghalten behöva sänkas (Johansson, 2005). En del organiskt material finns i skalet i form av gammalt virke från uppförandet av byggnaden och reparationsarbete. Detta kan skapa mögelproblem i lokalerna om den relativa ånghalten är hög, då ingen filtrering av luften sker mellan hålrummet och hangaren.

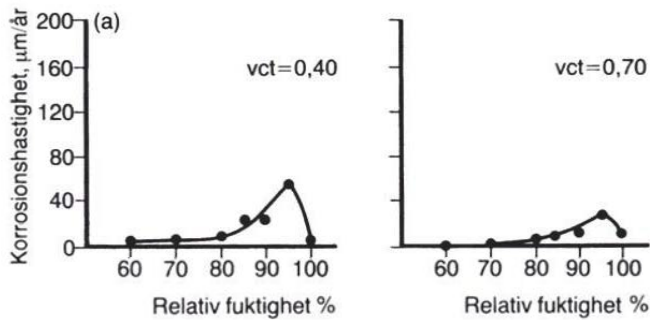
Fuktighet i konstruktionen har en inverkan på livslängden på betongen. Armering som rostar ökar i volym och kan då orsaka en spjälkning av betongen. Det täckande betongskiktet släpper då från konstruktionen och bärigheten försämras. Får korrosionen av armeringen fortgå kan armeringen rosta av och konstruktionen tappar sin draghållfasthet (Fagerlund, 2011).

Armeringen i en betongkonstruktion skyddas av betongskiktet som omger den. En nygjuten betong är starkt alkalisk och har ofta ett pH-värde mellan 12,5 och 13,5. Vid denna pH-halt kan inte armeringen rosta och skyddas på så sätt. För att armeringen ska börja rosta måste pH-halten sänkas markant vilket sker om betongen karbonatiseras eller om inträngning av kloridjoner sker (Fagerlund, 2011).

Karbonatisering beror på att koldioxid i luften tränger in i betongen och reagerar med kalciumföreningar och bildar kalciumkarbonat. Karbonatiseringen sänker pH-värdet från utgångsvärdet ner till ungefär nio. När betongen som omsluter armeringen får detta värde kan armeringen börja rosta. Betongens motståndskraft mot pH-sänkning beror främst på tätheten i materialet och tjocklek på täckande betong. Hur tät den täckande delen av betongkonstruktionen är beror på vattencementtalet (vct), cementtyp och fuktighet. Med ett lågt vct, alltså en mindre mängd vatten vid blandningen erhålls en tätare betong vilket ger betongen ett bättre motstånd mot att koldioxid tränger in i konstruktionen. En cementtyp med hög koncentration av kalk bidrar också till att koldioxidinträngningen minskar då det finns en stor mängd karbonatiseringsbar kalk i betongen. Oxidation sker mycket långsamt i fuktig betong då syre inte transporteras lika bra i fuktmättad betong. Syre krävs för att oxidationen ska fungera. Samtidigt fungerar oxidationsprocessen dåligt i mycket torr betong då den elektriska ledningen inte är lika stor som i fuktig betong (Fagerlund, 2011).

Inträngning av kloridjoner som skadar armeringen sker på konstruktioner som är uppförda i utsatta miljöer. Kloridjoner finns i havsvatten eller tölsalter från isbekämpning av vägar (Fagerlund, 2011). Att utfällningar av kloridjoner skulle ske i farliga mängder i berggrummet är osannolikt enligt mätningar gjorda på bergmaterial som ballast. Prover som presenteras i rapporten från Svenska renhållningsverksföreningen visar på nivåer av kloridjoner under bestämbarhetsgränsen i bergmaterial (Ekvall, 2006).

I Figur 4.1 nedan visas inverkan av vct och relativ fuktighet. Vid en relativ fuktighet under 60 % undviks korrosion på grund av karbonatisering. (Fagerlund, Göran 2011)



Figur 4.1 Korrosionshastighet (Fagerlund, 2011).

4.5 Skador på konstruktionen

Vid genomgång av anläggningen upptäcktes skador på betongkonstruktionen som kan bero på spjälkning av betongen på grund av karbonatisering. I figur 4.2 syns skador på en betongbalk där armeringen är synlig och betongen enkelt lossnar.



Figur 4.2 Betongbalk där täckande betong spjälkats.

Det område som har drabbats extra mycket av spjälkning är ventilationskanalen efter friskluftsintaget. Där är armeringen synlig i stora delar av taket. Stålbalken i taket i Figur 4.3 visar kraftiga korrosionsskador.



Figur 4.3 Synlig armering i taket. Nederst syns kåpan som täcker kylbatteriet.

4.6 Människor

Människan har svårt att avgöra den relativa ånghalten i luft men påverkas negativt av extrema värden. Vid låg luftfuktighet, under 20 %, bildas damm och hud och slemhinnor blir torra. Detta är särskilt besvärande för människor med luftrörsbesvär och allergier. Vid höga värden är det framförallt tillväxt av svamp och kvalster som påverkar inomhusmiljön negativt men också kemiska emissioner från vissa material kan vara skadliga för människan. För att minimera tillväxt av bakterier och virus bör ånghalterna ligga mellan 50 % och 60 %. Den optimala luftfuktigheten för människor är området mellan 40 % och 60 % med hänsyn till ovanstående faktorer (Dahlblom, 2010).

4.7 Sammanställning

Den relativa luftfuktigheten i lokalerna bör ligga mellan 40 % och 50 % utifrån verksamhet och vad som är bäst ur hälsosynpunkt för människor som arbetar och besöker lokalerna. Då undviks också att karbonatiseringen av betongen accelererar. En sammanställning visas i Tabell 4.1.

Tabell 4.1 Sammanställning av fuktnivåer.

	RÅ min (%)	RÅ max (%)
Korrosionsrisk för utställning	-	60
Risk för påväxt på utställning	-	75
BBR	-	75
Konstruktion	-	60
Människor	40	60
Museum	45	50
Museum arkivering	35	35
Målsättning Aerozeum	40	40

5 Fukttillskott utifrån mätresultat

I detta kapitel redovisas och analyseras resultatet från mätningarna. Mättnadsånghalterna är hämtade ur tabell. Temperaturen och relativ ånghalt utomhus kommer från väderstationen i Säve.

5.1 Mätning över avfuktare

Den största skillnaden i temperatur över kylbatteriet registreras kl 16:41 2013-04-30, cirka två timmar efter att vätskekylaggregatet slagits om från värmeåtervinning till avfuktning. Temperaturen innan kylbatteriet är då 7,4 °C och sjunker till 4,7 °C, den relativa ånghalten stiger från 85,3 % till 89,1 %.(bilaga 1). Efter avfuktningen har luften ett fuktinnehåll på 5,94 g/m³. Detta värde fås genom att luftens mättnadsånghalt vid 4,7°C är 6,67 g/m³. När luften sedan värms upp i värmebatteriet till 15°C får den en relativ ånghalt på 46,3 %. Den maximala mängd fukt som luften kan ta upp innan den når hangaren är vid detta tillfälle skillnaden mellan ånghalten efter avfuktaren som är 5,94 g/m³ och mättnadsånghalten för 15 °C som är 12,83 °C Om luften blir mättad med fukt kan den maximalt ta upp 6,89 g/m³.

Detta är inget maximalt värde på fuktavgivningen från berget. Om luften hade en högre temperatur när den lämnar värmebatteriet kan den också ta upp mer fukt.

5.2 Jämförelse av mätpunkterna

Jämförelse mellan de olika mätpunkterna görs med utgångspunkt vid det datumet där den relativa ånghalten var som störst i skalet. Utomhustemperatur och relativ fuktighet var vid detta tillfälle 16,1°C respektive 46 % (Säve, 2013). Den 2013-05-07 klockan 13:20 hade temperatur och fuktighet värden enligt Tabell 5.1

Ånghalten v_i i luften räknas fram genom att relativ ånghalt och mättnadsånghalt är kända värden med hjälp av ekvationen för relativ ånghalt.

$$R\ddot{A}_i = \frac{v_i}{v_s} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Detta för att lättare ta reda på var i systemet fuktillskottet sker.

Tabell 5.1 Ånghalt utifrån temperatur och relativ ånghalt 2013-05-07.

Placering	Temp °C	Mättnadsånghalt g/m ³	RÅ %	Ånghalt v_i g/m ³
1. Utomhus	16,1	13,72	46	6,311
2. I nödutgång innan insug	10,4	9,65	78,2	7,546
3. Efter insug och avfuktning	11,9	10,60	70,9	7,196
4. I skalet vid hall 8	15,4	13,50	60,86	8,00
5. I hall 8	16,94	14,39	53,44	7,69

Det största fuktillskottet sker vid denna tidpunkt i nödutgången, Tabell 5.1. Skillnaden mellan ånghalten i utomhusluften och ånghalten innan luftintaget är $1,235 \text{ g/m}^3$. Fuktillskottet får antas komma från berget i nödutgången. Det sker en temperaturökning och ånghalten sjunker när luften passerar över avfuktaren. Denna temperaturökning är oförutsedd och om luften avfuktas borde temperaturen i stället sjunka. En förklaring till temperaturökningen kan vara läckage i ventilationskanalen. Avfuktaren ska vid dessa förhållanden inte vara igång då det beskrivs i kapitel 3 att luften bara avfuktas om RÅ i hallen överstiger 55 %. Det sker ett fuktillskott i luften mellan mätningen vid avfuktaren och i skalet vid hall 8 med $0,804 \text{ g/m}^3$. Slutligen sker en minskning av ånghalten inne i hallen med $0,31 \text{ g/m}^3$.

När denna mätning görs är skillnaden mellan utomhustemperaturen och temperaturen i hall 8 bara $0,84 \text{ }^\circ\text{C}$ vilket visar på en onödig uppvärmning av luften. I bilaga 2 går det att följa luftens temperatur och relativa ånghalt i ett mollierdiagram vilket visar grafiskt hur luftbehandlingssystemet endast höjer temperaturen $0,84 \text{ }^\circ\text{C}$ och ökar den relativa ånghalten från 46 % till 53 % (Bilaga 9).

6 Beräkningar på temperatur och fuktfördelning

Kapitlet beskriver vilken påverkan olika fukthalter och temperaturer har på berghangarens konstruktion och förslag på ändringar av systemet testas. Beräkningarna är baserade på värden från fukt- och temperaturmätningar som presenterats tidigare i kapitel 5. De första exemplen använder data från de första mätningarna medan i exemplet om ombyggnad av ventilationen hämtas data från de sista mätningarna. Beräkningarna är gjorda i Excel och beräkningsgången beskrivs i första exemplet men inte ingående för varje exempel. Ekvationer, mätnadsånghalter och materialdata är hämtade från B-Å. Petersson, (2009), *Tillämpad byggnadsfysik*.

6.1 Sommartid

I dagens system förvärms luften innan den trycks in i utrymmet mellan betongskalet och berget. Detta för att undvika kondens i skalet. En stor del av uppvärmningsenergin kan då antas gå till att värma berget.

Den 27 mars klockan 12 uppmättes en relativ ånghalt på 41.1 % vid temperaturen 15.8 °C i utrymmet mellan skalet och berget. Hangaren hade då en relativ luftfuktighet på 33.8% vid samma tidpunkt och temperaturen uppmättes till 17.1 °C. Dessa värden skapar inga problem för verksamheten och ligger i närheten av målvärdena som presenterades i kapitel 4.

Samma temperatur används för att visa hur temperatur och fuktfördelningen skulle se ut under en sommarmånad i en vägg av betong.

Betongväggen delas upp i fyra delar med en tjocklek om vardera 50 mm för att kunna se ånghalterna och temperaturen inne i konstruktionen och inte bara på ytorna. Värmeledningsförmågan λ för betong är 1.7 W/mK. För att få fram värmemotståndet R i väggens olika skikt divideras vägg tjockleken med λ -värdet. Övergångsmotståndet sätts till 0.13 på båda sidor om väggen då luftrörelserna kan antas likartade. Temperaturdifferensen över respektive skikt fås med följande uträkning.

$$\Delta T_j = \frac{R_i}{R_{si} + \sum R_i + R_{se}} \cdot (T_i - T_e) \quad (6.1)$$

Ekvationen ger hur mycket temperaturen sjunker genom ett materialskikt, i detta fall genom övergångsmotståndet på väggens in- och utsida.

$$\Delta T = \frac{0,13}{0,13 + (0,0294 \cdot 4) + 0,13} \cdot (17,1 - 15,8) = 0,45 \text{ °C} \quad (6.2)$$

Mätnadsånghalt för respektive temperatur fås ur tabell. Värdet på ånggenomsläppligheten δ varierar med fukthalten i materialet och valdes i denna uträkning till $1.0 \cdot 10^{-6}$ på grund av den höga relativa fukthalten. Ånggenomgångsmotståndet Z fås fram enligt samma princip som värmemotståndet.

$$Z = \frac{d}{\delta} = \frac{0.05}{0.000001} = 50000 \text{ s/m} \quad (6.3)$$

Värdet på den relativa ånghalten inne i hangaren RA_i beräknas genom att dividera ånghalten inne v_i med mätnadsånghalten för aktuell temperatur $17,1^\circ\text{C}$.

$$RA_i = \frac{v_i}{v_s} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Ånghalten inne i hangaren v_i är lika med ånghalten utanför betongväggen v_e adderat med fuktillskottet Δv som är fuktproduktionen G dividerat med luftomsättningen n och luftvolymen i hangaren V

$$\Delta v = \frac{G}{n+V} \quad (6.5)$$

$$v_i = v_e + \frac{G}{n+V} \quad (6.6)$$

I följande beräkning begränsas fuktproduktionen till den som kommer från besökare i lokalen. En människa avger 120 gram fukt per timma och vi antar att 100 personer är i hangaren samtidigt. Luftomsättningen i lokalen är 0.35 omsättningar i timmen och volymen är 37400 m^3 . Ånghalten i skalet v_e är mätnadsånghalten v_s för temperaturen $15,8^\circ\text{C}$ då det antas vara 100 % relativ ånghalt i skalet.

$$v_e = v_s = 13,47 \text{ g/m}^3 \quad (6.7)$$

$$v_i = 13,47 + \frac{120 \cdot 100}{37400 \cdot 0,35} = 14,39 \text{ g/m}^3 \quad (6.8)$$

Det nya värdet på v_i stoppas in i ekvation med mätnadsånghalten v_s för $17,1^\circ\text{C}$ som är $14,56 \text{ g/m}^3$ och ger den relativa ånghalten i hangaren.

$$RA_i = \frac{14,39}{14,56} \cdot 100 = 99 \% \quad (6.9)$$

Ånghaltsdifferensen Δv_n räknas sedan ut genom att dividera ånggenomgångsmotståndet i respektive skikt med det totala motståndet och multiplicera med ångdifferensen över hela väggen.

$$\Delta v_n = \frac{Z_n}{Z_T} \cdot (v_i - v_e) \quad (6.1.1)$$

$$\Delta v = \frac{5000}{5000 \cdot 4} \cdot (14,39 - 13,47) = 0,23 \frac{g}{m^3} \quad (6.1.2)$$

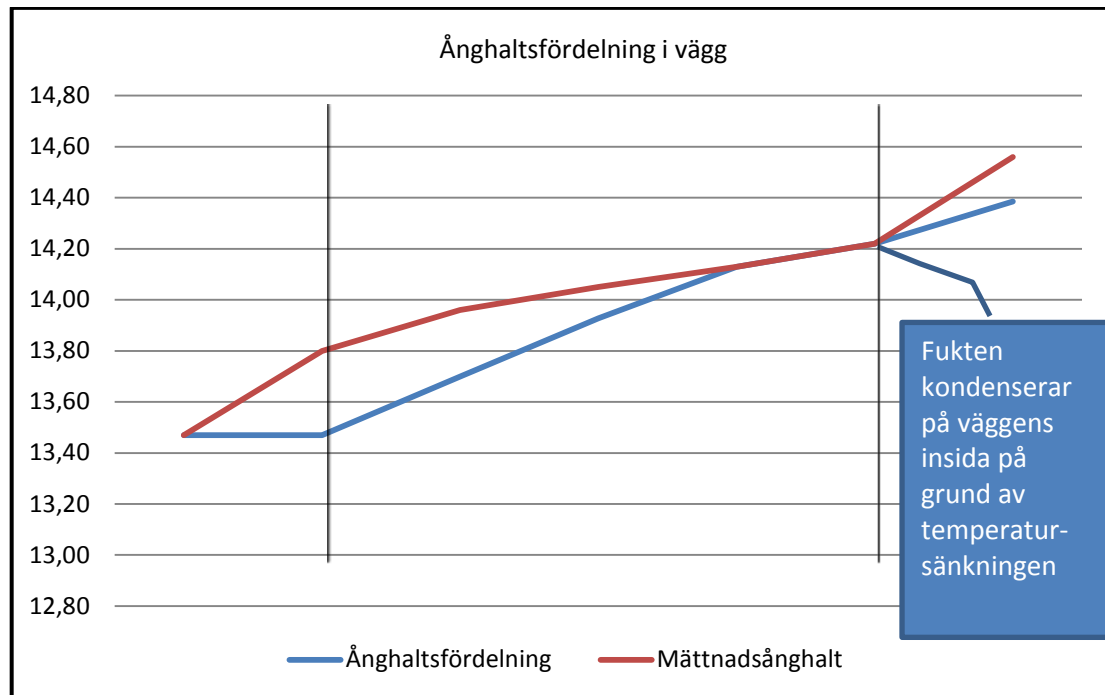
Att den relativa ånghalten valdes till 100 % utanför skalet beror dels på att det rekommenderas vid fuktberäkningar under marknivå men också på grund av att Aeroseums personal uppmätt värden på 99 % relativ ånghalt inne i hangaren. Detta tyder på väldigt höga ånghalter utanför skalet. Då luften alltid värms innan den kommer in i skalet och därmed får en sänkt relativ ånghalt jämfört med ånghalten i skalet. Om värden på den relativa ånghalten är uppmätt till 99 % i hangaren och då ska vara lägre än i skalet måste ånghalten i skalet vara 100 %.

Värdena som räknats fram plockas in i Tabell 6.1 nedan och resultatet visar på kondensation på väggens insida och även i skiktet 5 cm in i väggen där ånghalten v överskrider mätnadsånghalten v_s .

Tabell 6.1 Kondensation i vägg

	dim	λ	ΔR	ΔT	Temp	$v_s(T)$	δ	ΔZ	Δv	v	RÅ
Material-skikt	m	W/m °C	$\frac{m^2}{°C/W}$	°C	°C	g/m ³	m ² /s	s/m	g/m ³	g/m ³	%
I skalet					15,8	13,47				13,47	100
R _{se}			0,13	0,45	16,2	13,8				13,47	98
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,10	16,3	13,96	0,000001	50000	0,23	13,7	98
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,10	16,5	14,05	0,000001	50000	0,23	13,93	99
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,10	16,6	14,13	0,000001	50000	0,23	14,16	100
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,10	16,7	14,22	0,000001	50000	0,23	14,39	101
R _{si}			0,13	0,45	17,1	14,56				14,39	99
I Hangaren					17,1	14,56				14,39	99

Tabell 6.1 visar hur ånghalten i väggen förhåller sig till mättnadsånghalten.



Figur 6.1 Ånghaltsfördelning

6.2 Utan förvärmning av tilluften

En i sammanhanget enkel lösning är att ställa om systemet och endast värma luften till 8 °C och på så sätt försöka hålla samma temperatur som berget.

Sommartid avfuktas tilluften och förångningstemperaturen bestäms till 8 °C. Den har då en relativ fuktighet på 100 %. Med uppmätta värden på 99 % i hangaren sommartid går det att anta att utrymmet håller 100 % redan i dag även med förvärmad luft utanför skalet.

Luften värms till 20 °C som är den innetemperaturen Roger Eliasson önskade ha i hangaren och har då en relativ fuktighet i hangaren på ca 53 %.

Tabell 6.2 Utan förvärmning med 100 personer i lokalen.

	dim	λ	ΔR	ΔT	Temp	$v_s(T)$	δ	ΔZ	Δv	v	RÅ
Material-skikt	m	W/m °C	m ² °C/W	°C	°C	g/m ³	m ² /s	s/m	g/m ³	g/m ³	%
I skalet					8	8,28				8,28	100
R _{se}			0,13	4,13	12,13	10,73				8,28	77
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	13,07	11,42	0,000001	50000	0,23	8,51	75
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	14	12,07	0,000001	50000	0,23	8,74	72
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	14,93	12,75	0,000001	50000	0,23	8,97	70
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	15,87	13,55	0,000001	50000	0,23	9,2	68
R _{si}			0,13	4,13	20	17,28				9,2	53
I Hangaren											

I beräkningarna ovan har fuktillskottet beräknats utifrån att det är 100 personer i hangaren men AeroSeum har tillstånd för 600 besökare. Vilket ger ett fuktillskott på 5,5 g/m³.

$$\Delta v = \frac{120 \cdot 600}{37400 \cdot 0,35} = 5,5 \text{ g/m}^3 \quad (6.1.3)$$

Med det nya fuktillskottet får tabellen ett nytt utseende vilket visar på kondensation på betongväggens insida.

Tabell 6.3 Kondensation insida vägg med 600 personer i lokalen

	dim	λ	ΔR	ΔT	Temp	$v_s(T)$	δ	ΔZ	Δv	v	RF
Material-skikt	m	W/ m °C	m ² °C/ W	°C	°C	g/m ³	m ² /s	s/m	g/m ³	g/m ³	%
I skalet					8	8,28				8,28	100
R _{se}			0,13	4,13	12,13	10,73				8,28	77
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	13,07	11,42	0,000001	50000	1,38	9,66	85
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	14	12,07	0,000001	50000	1,38	11,03	91
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	14,93	12,75	0,000001	50000	1,38	12,41	97
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	15,87	13,55	0,000001	50000	1,38	13,78	102
R _{si}			0,13	4,13	20	17,28				13,78	80
I Hangaren											

För att undvika kondensation i väggen i en ny beräkning ökas luftomsättningen i hangaren från 0.35 som räknades fram i ventilationsavsnittet till 0,5 som det enligt Sten-Erik Kaspersson ska vara i systemet. Detta minskar fuktillskottet i lokalen till nivåer där ingen kondensation sker vilket syns i Tabell 6.4.

Tabell 6.4 Utan kondensation med 600 personer och luftomsättningen 0,5

	dim	λ	ΔR	ΔT	Temp	$v_s(T)$	δ	ΔZ	Δv	v	RF
Material-skikt	m	W/ m °C	m ² °C/ W	°C	°C	g/m ³	m ² /s	s/m	g/m ³	g/m ³	%
I skalet					8	8,28				8,28	100
R _{se}			0,13	4,13	12,13	10,73				8,28	77
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	13,07	11,42	0,000001	50000	0,96	9,24	81
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	14	12,07	0,000001	50000	0,96	10,21	85
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	14,93	12,75	0,000001	50000	0,96	11,17	88
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,93	15,87	13,55	0,000001	50000	0,96	12,13	90
R _{si}			0,13	4,13	20	17,28				12,13	70
I Hangaren											

6.3 Tegelparti

Väggarna består till stor del av tegel och därför är det viktigt att även göra beräkningar på dem. Värdena för tegelväggen hämtas ur tabeller från boken Tillämpad byggfysik. Värmeledningsförmåga för murverk av 6-hålstegel är $0,6 \text{ W/mK}$. Ångomsläpplighet för tegel ligger mellan 2,7 och 5,5 i tabellen och väljs till $4,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Luftomsättningen är 0,5 och antalet besökare är 600 stycken. Tjockleken på tegelväggen delas i två skikt. Det visas i Tabell 6.5 att även tegelväggen klarar av en sänkning av temperaturen i skalet.

Tabell 6.5 Utan kondensation i tegelparti.

	dim	λ	ΔR	ΔT	Temp	$v_s(T)$	δ	ΔZ	Δv	v	RF
Material-skikt	m	W/m K	$\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	g/m^3	m^2/s	s/m	g/m^3	g/m^3	%
I skalet					8	8,28				8,28	100
R_{se}			0,13	3,39	11,39	10,28				8,28	81
Tegel	0,06	0,6	0,1	2,61	14	12,07	0,0000041	14634	1,92	10,2	85
Tegel	0,06	0,6	0,1	2,61	16,61	14,31	0,0000041	14634	1,92	12,13	85
R_{si}			0,13	4,13	20	17,28				12,13	70
I Hangaren											

6.4 Tak

Taket behöver också kontrolleras och i denna beräkning tillkommer 300 millimeter grus som ligger uppe på taket. Värmeledningsförmågan λ för odränerat grus är cirka $2,3 \text{ W/mK}$. Ånggenomsläppligheten δ för grus har inte hittats och lämnas därför tom. Takets tjocklek delas upp i sex skikt om vardera 50 millimeter. Tabell 6.6 visar att takkonstruktionen också klarar en sänkning av temperaturen.

Tabell 6.6 Utan kondensation i tak.

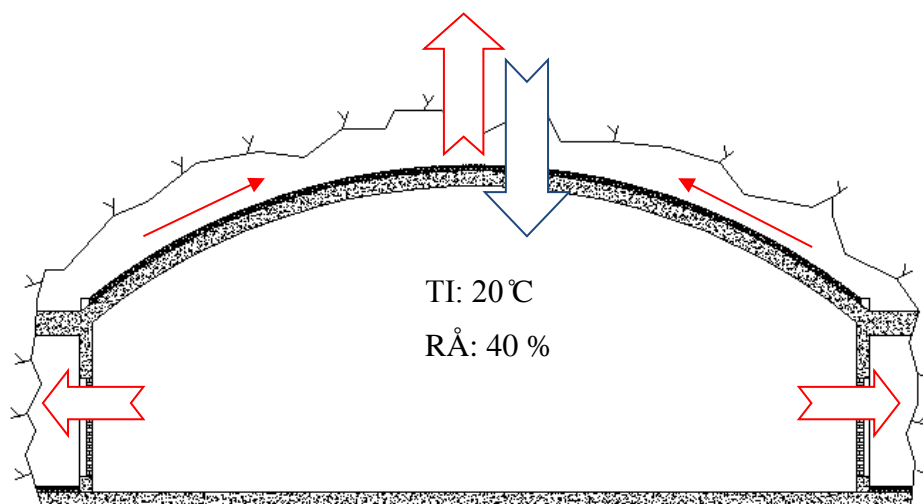
	dim	λ	ΔR	ΔT	Temp	$v_s(T)$	δ	ΔZ	Δv	v	RF
Material-skikt	m	W/m °C	m ² °C/W	°C	°C	g/m ³	m ² /s	s/m	g/m ³	g/m ³	%
I skalet					8	8,28				8,28	100
R _{se}			0,13	2,75	10,75	9,9				8,28	84
Grus	0,3	2,3	0,1304	2,76	13,51	11,71				8,28	71
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,62	14,13	12,15	0,000001	50000	0,64	8,92	73
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,62	14,75	12,68	0,000001	50000	0,64	9,56	75
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,62	15,37	13,15	0,000001	50000	0,64	10,2	78
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,62	16	13,63	0,000001	50000	0,64	10,85	80
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,62	16,62	14,13	0,000001	50000	0,64	11,49	81
Betong	0,05	1,7	0,0294	0,62	17,25	14,74	0,000001	50000	0,64	12,13	82
R _{si}			0,13	2,75	20	17,28				12,13	70
I hangaren											

Om mätnadsånghalten för 8 °C, som är $8,28 \text{ g/m}^3$ överskrids kommer fukten kondenseras på bergväggen som håller samma temperatur som luften i skalet. Bergväggen skulle då få samma funktion som en avfuktare. Det påverkar inte väggkonstruktion om golvdräneringen klarar av att ta hand om vattnet som kondenserar mot bergväggen. Taket däremot kan bli vått från vatten som droppar från berget ovanför. På många ställen ligger i dagsläget plåtar för att skydda konstruktionen från vatten som rinner ur berget. Eventuellt kräver denna lösning att flera plåtar placeras över konstruktionen för att skydda taket i hangaren från kondensvatten.

6.5 Ombyggnad av ventilationen

Ventilationssystemet i berghangaren är avsett för att ta hand om gaser från flygbränsle och undvika att skalet fylls med gaser. Dagens verksamhet har inga behov av den funktionen och det står även i ventilationskontrollen att systemet bör anpassas efter dagens behov. För att se fuktillskottet i skalet används i följande beräkningar data från de senaste mätningarna som genomfördes mellan den 3 och 8 maj.

Vid en ombyggnad bör tilluften tryckas in i hangaren direkt från tilluftsaggregatet och frånluften passerar genom skalet för att torka berget, se Figur 6.2.



Figur 6.2 Förslag på ändrat luftflöde.

Nedan listas förutsättningarna som tagits fram tidigare i rapporten.

- Önskad inomhustemperatur: 20 °C
- Lämplig luftfuktighet RÅ: 40 %
- Bergets fuktillskott i skalet: 0,804 g/m³
- Luftomsättning: 0,5 oms/h
- Volym i skalet: 12000 m³

Vid en temperatur på 20 °C och relativ ånghalt på 40 % innehåller luften 6,96 g/m³. Fuktillskottet från 600 människor är 3,85 g/m³

$$\Delta v = \frac{120 \cdot 600}{37400 \cdot 0,50} = 3,85 \text{ g/m}^3 \quad (6.1.4)$$

Fukttinnehållet i luften när den kommer ut i skalet är då 10,81 g/m³. Luften håller fortfarande en temperatur på 20 °C vilket innebär att mättnadsånghalten är 17,28 g/m³ vilket ger den relativa ånghalten 62,5 %. När luften har passerat skalet och når frånluftsfälkten har den fuktats upp med fukten från berget och har ett fukttinnehåll på 11,61 g/m³ och en relativ ånghalt på 67,2 %.

Sommartid ger berget ifrån sig en större mängd vatten som visas i det första exemplet i detta kapitel. I kapitlet 5 som beskriver fuktillskottet i luften redovisas att luften tar upp 6,89 g/m³ från att den värms upp till 15 °C och passerar genom skalet. Det skulle

ge luften i det nya systemet en ånghalt på $17,7 \text{ g/m}^3$ när den når frånluftsfläkten vilket är omöjligt då mätnadsånghalten vid 20°C är $17,28 \text{ g/m}^3$. Fukten kondenserar någonstans i skalet. Det primära i detta system är att fukten inte kondenserar på betongytan och läcker in i hangaren. För att få en bättre uppfattning om hur mycket fukt luften kan ta upp i skalet används en ekvation som tar hänsyn till hur lång tid det tar för ånghalten att stiga till den nivå då kondensation sker.

$$v_i = v_e + \frac{G}{n \cdot V} \cdot (1 - e^{-n \cdot t}) \quad (6.1.5)$$

Kondensationen sker när mätnadsånghalten uppnås vid ytorna på berget och väggarna. Mätnadsånghalten är $17,28 \text{ g/m}^3$ för ytorna då både berget och väggarna har en temperatur på 20°C . Fukthalten måste öka med $6,47 \text{ g/m}^3$ från $10,81 \text{ g/m}^3$ v_e upp till $17,28 \text{ g/m}^3$ v_i för att kondensation ska ske på ytorna. Det som saknas i ekvationen är fuktillskottet G och tiden t . G fås ur:

$$6,47 \text{ g/m}^3 = \frac{G}{12000 \cdot 0,5} \quad (6.1.6)$$

$$G = 38820 \text{ g/h}$$

Och tiden det tar för ånghalten i luften att nå $17,28 \text{ g/m}^3$

$$17,28 = 10,81 + \frac{38820}{12000 \cdot 0,5} \cdot (1 - e^{-0,5 \cdot t}) \quad (6.1.7)$$

$$t = 5,6 \text{ h}$$

Efter fem och en halv timme finns risken att luften kondenserar på ytorna i skalet men då har det också varit 600 personer i hangaren under den tiden vilket det troligtvis inte är konstant i hangaren.

7 Analys

I kapitlet diskuteras och analyseras resultaten som presenterats i rapporten.

7.1 Omställning av ventilationssystemet

I kapitlet om temperatur och fuktfördelning presenteras teoretiska beräkningar som beskriver hur konstruktionen påverkas av sommarklimatet i hangaren. Vidare presenteras ett förslag om att justera uppvärmningen vid tilluften för att hålla samma temperatur som berget skulle ha utan uppvärmning. Uppvärmningen av luften ska i detta fall ske i aerotemperarna. Förslaget ger fördelarna att onödig uppvärmning av berget undviks och en lägre lufttemperatur minskar luftens möjlighet att bära med sig fukt in i hangaren. Rent teoretiskt fungerar förslaget och det beror på bristen av värmemotstånd i väggen. Detta blir tydligt när betong och tegelväggen jämförs, sämre värmemotstånd ger högre temperatur på utsidan av väggen vilket gör att luften kan ha en högre ånghalt. Förslaget förutsätter också att aerotemperarna klarar av att höja lufttemperaturen med 12 °C. Temperaturmätningarna visar att luftens temperatur stiger med ungefär 1 °C i aerotempern mellan skalet och hangaren och för att uppnå en ökning av 12 °C krävs en genomgång av värmesystemet och en undersökning av kapaciteten på aerotemperarna vilket inte görs i denna undersökning. Lösningen kräver också att en relativ ånghalt på 70 % accepteras i hangaren vilket överskrider värdena som presenteras i kapitlet om fukt. Enligt sammanställningen i kapitel fyra bör den relativa ånghalten i hangaren ligga mellan 40 % och 50 %. I förslaget visar fuktfördelningen över väggen att fukthalterna i betongen närmar sig värden där karboniseringen accelererar vilket är något som bör undvikas. Sänkningen av temperaturen i skalet skulle även leda till kondensering på bergväggen vilket troligtvis skulle skapa en större mängd vatten som behöver tas om hand av dräneringen. Teorin behöver utredas mer men skulle i bästa fall bara vara en nödlösning där en eventuell energibesparing kan göras och en jämnare fuktnivå uppnås i lokalerna.

7.2 Nödutgång

Mätningarna som genomförts visar att under den aktuella perioden sker det största fukttillskottet i nödutgången där friskluftintaget sker. Luften kyls också på väg ner i nödutgången. Lufttemperaturen sjunker med nästan 6 °C samtidigt som ånghalten ökar med 1,235 g/m³. Att det största tillskottet sker i nödutgången och inte som förväntat i skalet beror på att berget konstant värms till 15 °C och en kontinuerlig uttorkning av fukt sker där. Det är dock troligt att det under sommarmånader sker ett större fukttillskott i skalet. Den viktigaste informationen som visas i mätningarna är dock skillnaden i temperatur mellan uteluften och temperaturen inne i hangaren. De mätningarna som presenteras i kapitlet om fukt visar en skillnad på bara 0,84 °C den aktuella dagen. Då har luften först kylts ner av berget i nödutgången för att sedan värmas i två steg innan den i hangaren har en temperatur på 16,94 °C. En i sammanhanget billig lösning är att bygga om friskluftintaget och ta tilluften vid marknivå under vår och höst när utomhustemperatur och fuktighet ligger på bra nivåer. Sommar- och vintertid tas luften från nödutgången då berget värmer luften vintertid och kyler den sommartid. Detta skulle spara uppvärmningsenergi under vår och höst när avfuktningen är avslagen utan en kostsam ombyggnad av systemet.

7.3 Ombyggnad av ventilationssystemet

Att bygga om ventilationssystemet är den enda lösningen om fuktnivåerna ska komma ner på de nivåer som presenteras i kapitel 4. Enligt beräkningarna i kapitel 6 bör ett omvänt system fungera där frånluften ventilerar skalet om antalet besökare hålls på en acceptabel nivå. Hela uträkningen baseras dock på teoretiska fuktmängder då verkligt fukttillskott från berget saknas. Ventilations - och uppvärmningssystemet är komplext och en ombyggnad av det uppskattas bli mycket kostsamt.

8 Sammanfattande kommentarer

I de sammanfattande kommentarerna återkopplas undersökningens resultat med inledningen. Metoden som användes i undersökningen kommenteras och förslag på vidare studier presenteras.

8.1 Återkoppling

Syftet med undersökningarna på Aeroseum var att ge förslag till förbättringar som kunde bidra till en sänkning av ånghalterna i hangaren. För att lyckas med det behövdes ett klarläggande av vilka ånghalter som krävs för att konstruktionen ska behålla sin funktion och verksamheten ska kunna drivas utan problem. Vidare undersöktes hur fuktsituationen var i hangaren i nuläget, var de största fuktillskotten skedde och hur de hade påverkat konstruktionen.

Sammanställningen av ånghalter visade att Aeroseums lokaler och verksamhet kräver en relativ ånghalt i luften mellan 40 % och 50 % där den övre gränsen framförallt är satt utifrån utställningens krav. En något högre ånghalt upp mot 60 % hade inte bidragit med några komplikationer för varken konstruktionen eller besökare. Dessa gränser var däremot svåra att hålla när beräkningar gjordes för att hitta enklare lösningar till fuktproblemen. I förslaget som gick ut på att minimera förvärmningen av luften i skalet hamnade ånghalten strax över 70 % och i förslaget där ventilationsflödet skulle vändas bildades kondens i skalet efter drygt 5 timmar. Kombinationen av ett högt antal besökare och ett antagande om stora fuktillskott från berget medför att en lösning på problemet är svår att hitta. Ventilationssystemet måste anpassas till dagens användningsområde för att lösa fuktproblemen och den anpassningen innebär att hela systemet behöver byggas om. En enklare ombyggnation av friskluftintaget borde däremot utredas närmare då en förlängning av ventilationskanalen upp till marknivå kan ge en minskning av ånghalten under vår och höst men framförallt bidra till en lägre energiförbrukning.

8.2 Metoddiskussion

Då berghangaren från början var en hemlig anläggning är det mycket svårt att få tag i tillförlitlig information. Handlingar som rör konstruktionen är inte hemligstämplade längre men då de en gång varit det är det ingen som längre vet var de finns. Uppgifter om t.ex. betongkvalitet, tjocklek på väggar och tak samt armeringsdimensioner hade underlättat arbetet. En stor del av tiden gick åt till att skapa en uppfattning om ventilationssystemets funktion och anledningen till att det är utformat som det är. Den svåraste delen som inte gick att ta sig förbi var att fuktmätningarna genomfördes under fel årstid då fuktnivåerna inte är tillräckligt höga för att ge några problem. Detta leder till antaganden i beräkningarna vilket gör att de blir mindre tillförlitliga. Chalmers hade endast två fuktloggror som fungerade. När det behövdes flera mätpunkter för att skapa en uppfattning om fukttransporten fick Polygon som är ett privat företag ställa upp med ytterligare loggor. Detta leder till tidsbrist då det inte går att styra lika fritt när mätningarna ska göras och loggrorna tömmas på data.

8.3 Fortsatta studier

Berghangaren är en omfattande anläggning och kräver många timmars arbete. De uppgifter som hade underlättat den här undersökningen och som kommer att behövas för vidare undersökningar listas nedan.

- Fukt- och temperaturmätningar som genomförs sommartid i hangaren, skalet, nödutgången och i ventilationskanalerna.
- Beräkningar som visar bergets verkliga fukttillskott i luften.
- Mätningar som visar karboniseringsdjupet i bärande betongkonstruktioner för att utreda de verkliga skadorna på konstruktionen.
- En jämförelse över en längre period mellan utomhustemperaturen och temperaturen innan friskluftintaget

9 Referenser

Böcker, rapporter och webbkällor

- Aeroseum (2013), <http://www.aeroseum.se/projektet.html> (2013-04-26)
- Avfuktningsteknisk materielhandbok (ATH)*, (2010)
http://www2.autotech.se/mvif_online/pdf/ath/ath.pdf (2013-04-29)
- Dahlblom, M & C Warfvinge (2010), *Projektering av VVS-installationer*. Studentlitteratur AB, Lund.
- Davidsson, Leif (1999), *Befuktning, Vad Varför & Hur*.
<http://www.ahlsell.se/upload/2478/befuktning.pdf> (2013-04-29)
- Ekvall, Annika (2006), *Lakegenskaper för naturballast, Bergmaterial och moräner*. (Rapport 2006:06). Svenska renhållningsverksföreningen.
- Fagerlund, Göran (2011), *Ytreparation av betongkonstruktioner, Metoder. Beständighet*. (Rapport TVBM-3160) Lunds universitet. Lunds Tekniska Högskola.
- Georgios, F & S Kalogirou (2004), *Measurements of Ground Temperature at Various Depths*. <http://ktisis.cut.ac.cy/bitstream/10488/870/1/C55-PRT020-SET3.pdf> (2013-05-08)
- Johansson, Niklas (2005), *Uttorkning av betong, Inverkan av cementtyp, betongkvalitet och omgivande fuktförhållanden* (Rapport TVBM-3124) Lunds universitet. Lunds Tekniska Högskola.
- Johansson, Pernilla m.fl. (2005), *Kritiskt fuktillstånd för mikrobiell tillväxt på byggmaterial – kunskapssammanfattning*. (SP Rapport 2005:11). SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.
- Petersson, Bengt-Åke (2009), *Tillämpad byggnadsfysik* (Fjärde upplagan) . Studentlitteratur AB, Lund.
- Regelsamling för byggande, BBR* (2012) Boverket oktober (2011) Karlskrona

Temperaturdata.

- SMHI (2012), *Årsmedeltemperatur*, www.smhi.se (2013-05-28)
- Säve (2013), *Väderhistorik* www.vackertvader.se (2013-05-23)

Driftinstruktioner och Besiktningssprotokoll.

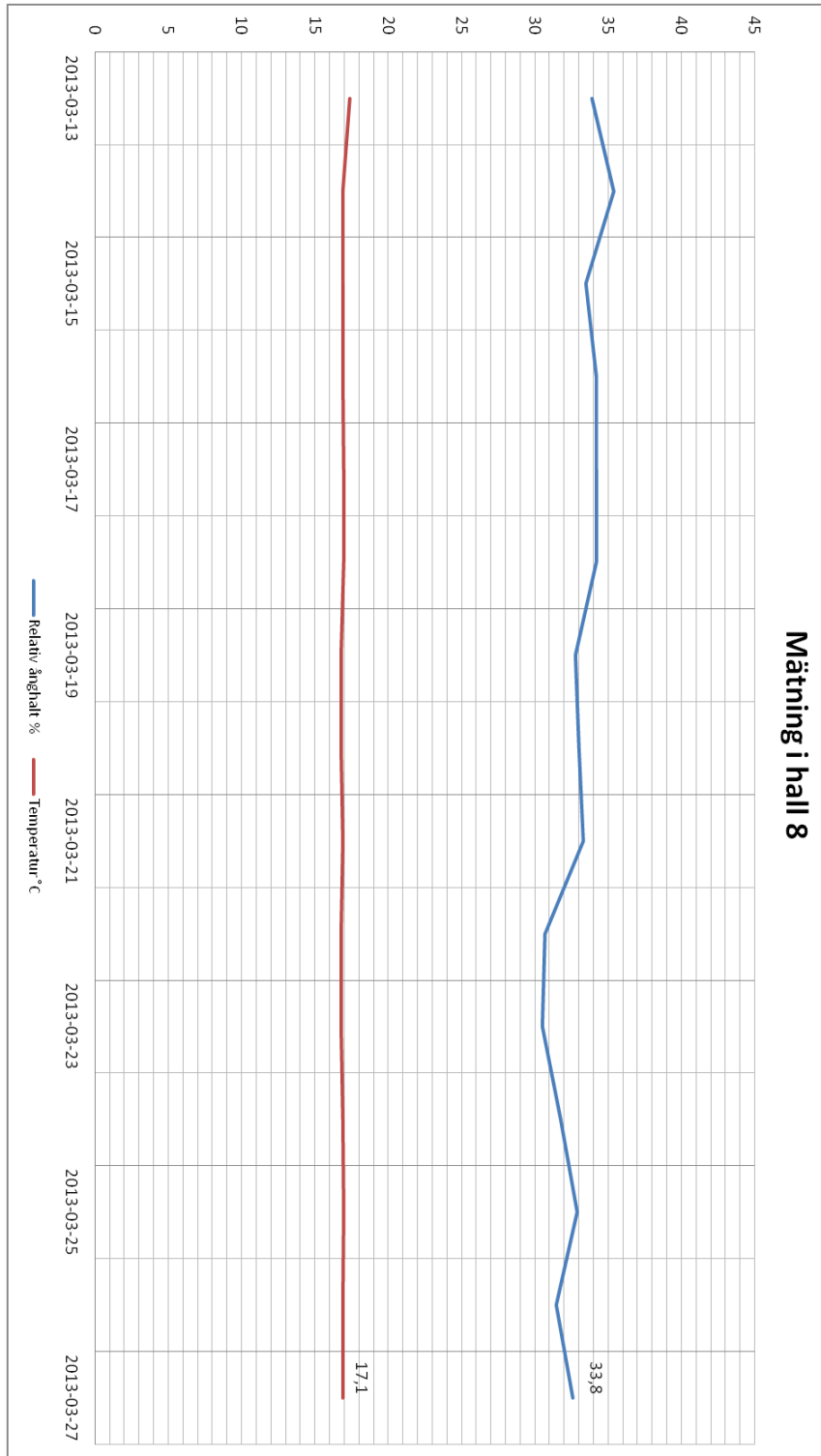
- Driftinstruktion G 0406* (1993), FortF Teknikinformation, Göteborgs Stad Fastighetskontoret.
- Roos, Patrik (2011), *Besiktningssprotokoll OVK*. Ventilations Gruppen AB, Göteborg

10 Bilagor

10.1 Bilaga 1

Hall 8. Första mätningen med logger från Chalmers.

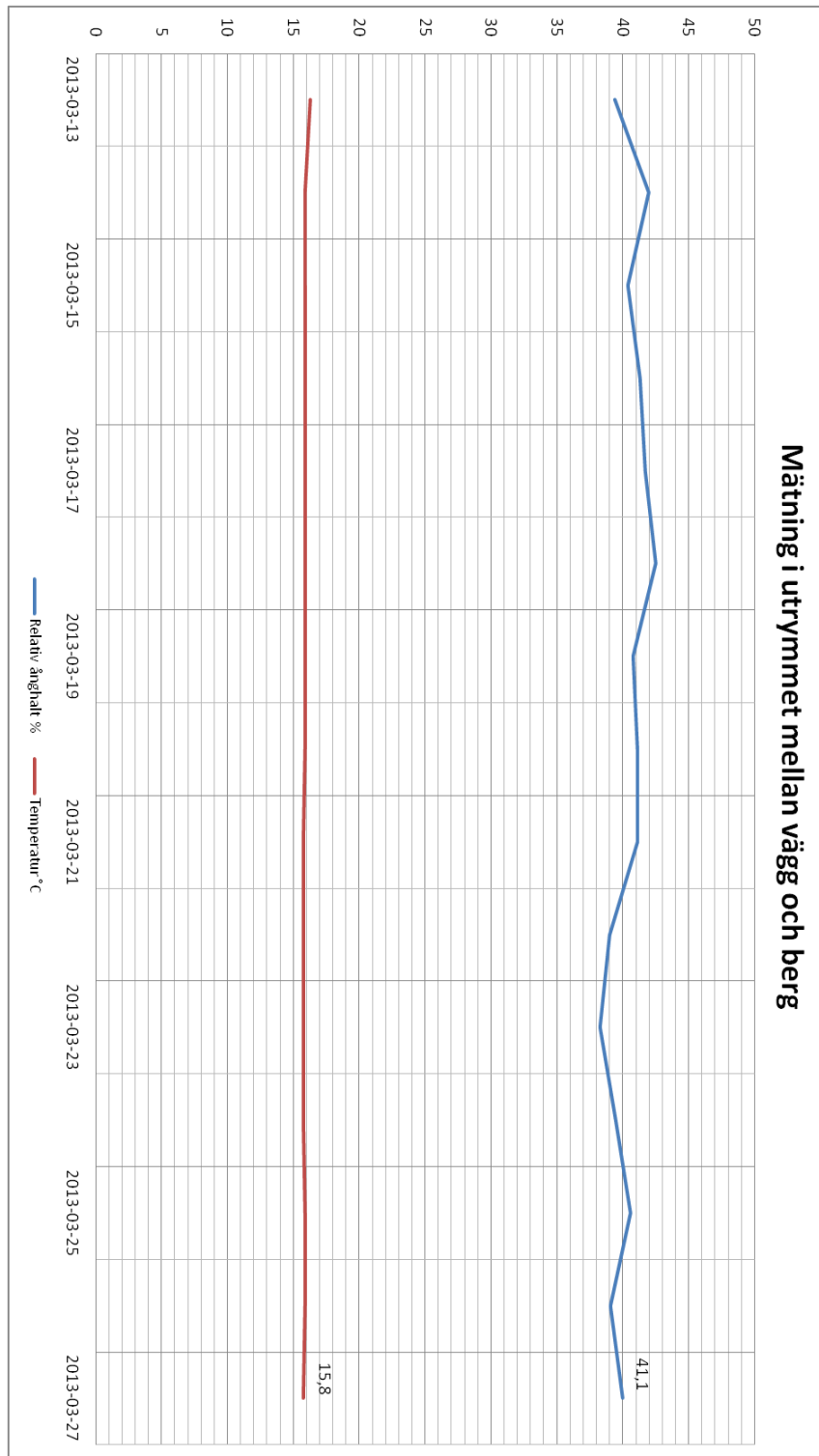
Max RÅ: 38,9 %. Min RÅ: 30,1 %. Max temp: 17,8°C. Min temp: 16,7°C



10.2 Bilaga 2

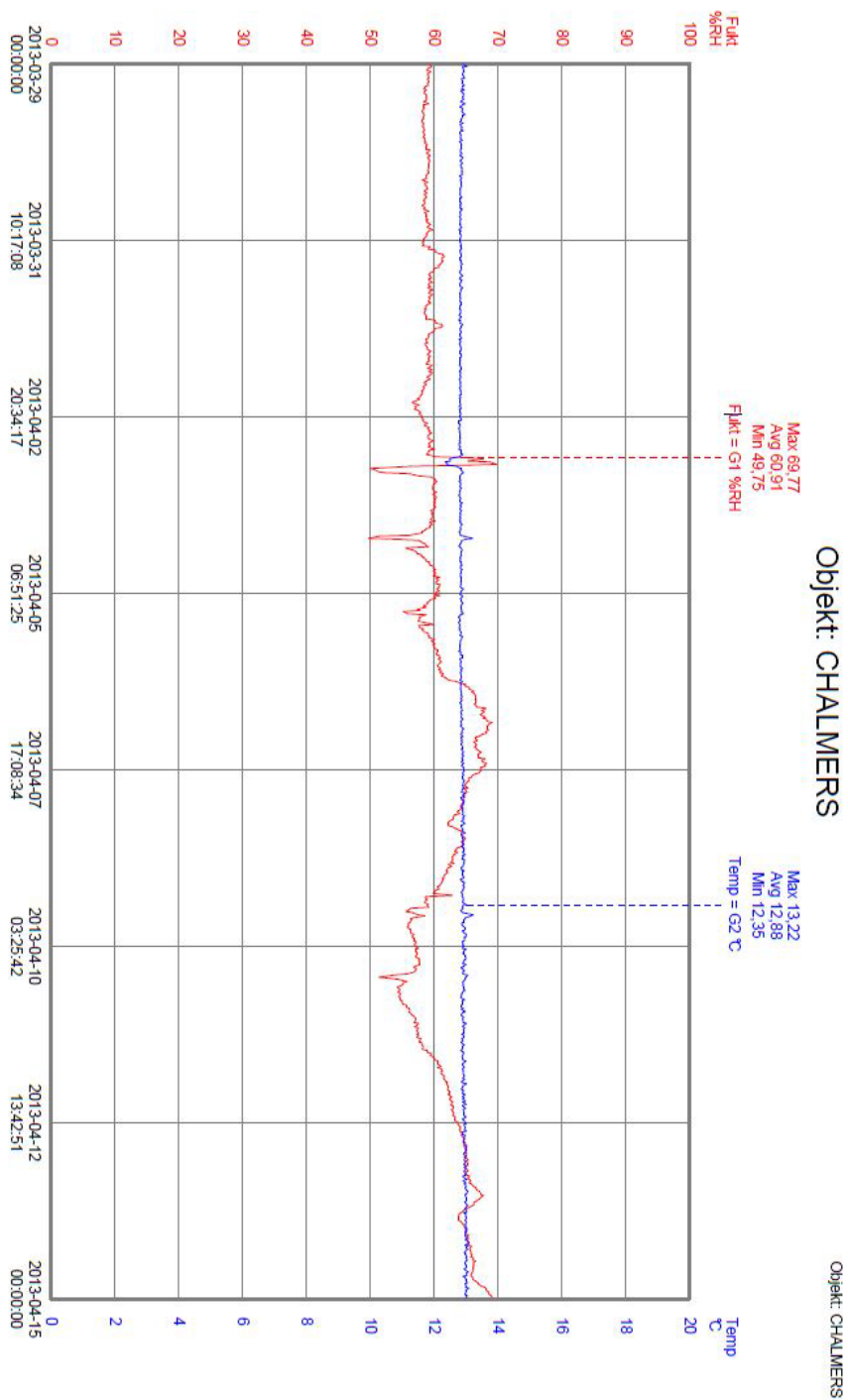
Skalet vid hall 8. Första mätningen med logger från Chalmers.

Max RÅ: 44,2 %. Min RÅ: 37,4 %. Max temp: 16,3 °C. Min temp: 15,8 °C



10.3 Bilaga 3

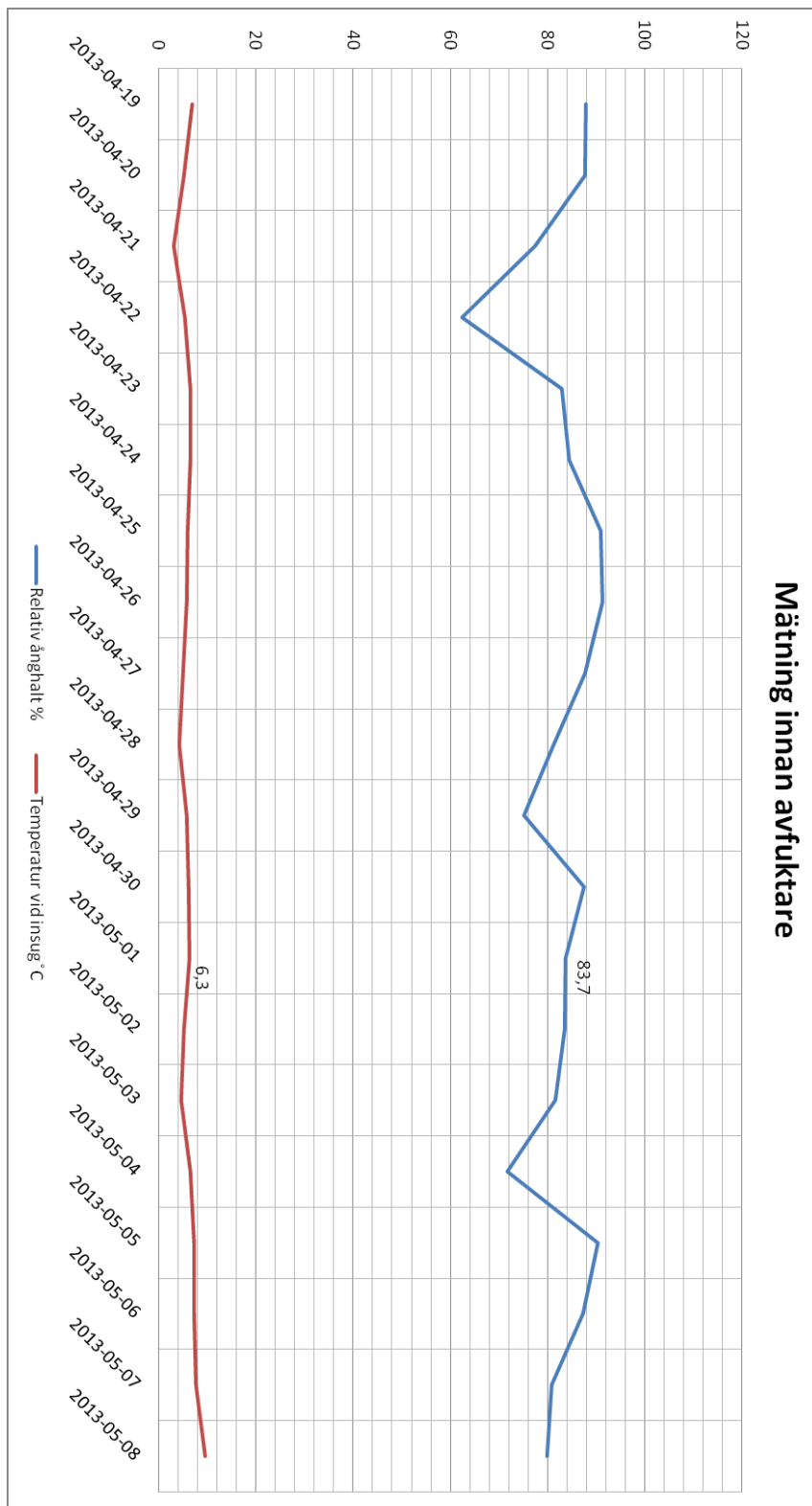
Oljetankutrymmet. Logger från Polygon.



10.4 Bilaga 4

Innan friskluftintaget. Logger från Chalmers.

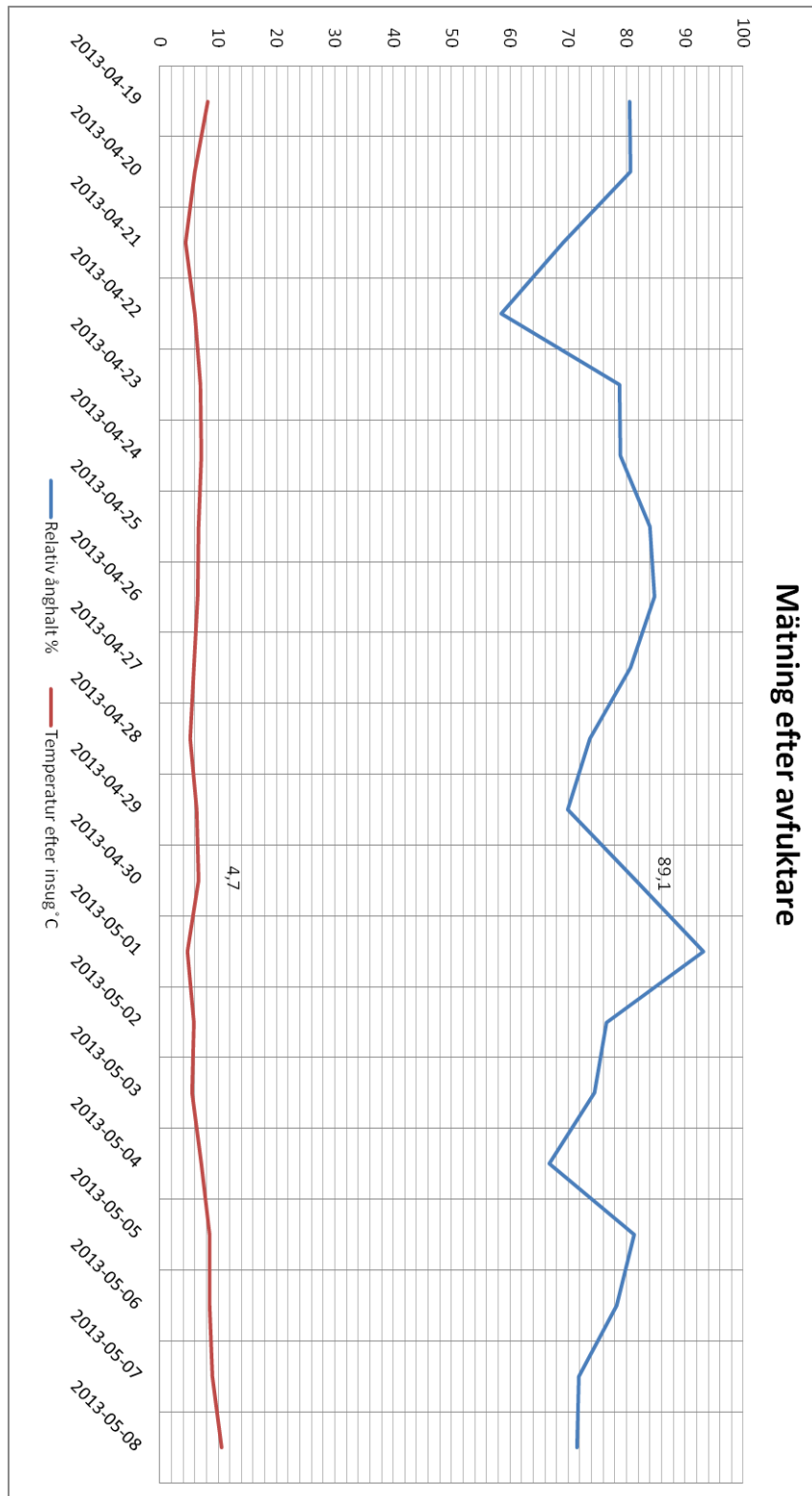
Max RÅ: 96,5 %. Min RÅ: 47,2 %. Max temp: 11,1 °C. Min temp: 2,4 °C



10.5 Bilaga 5

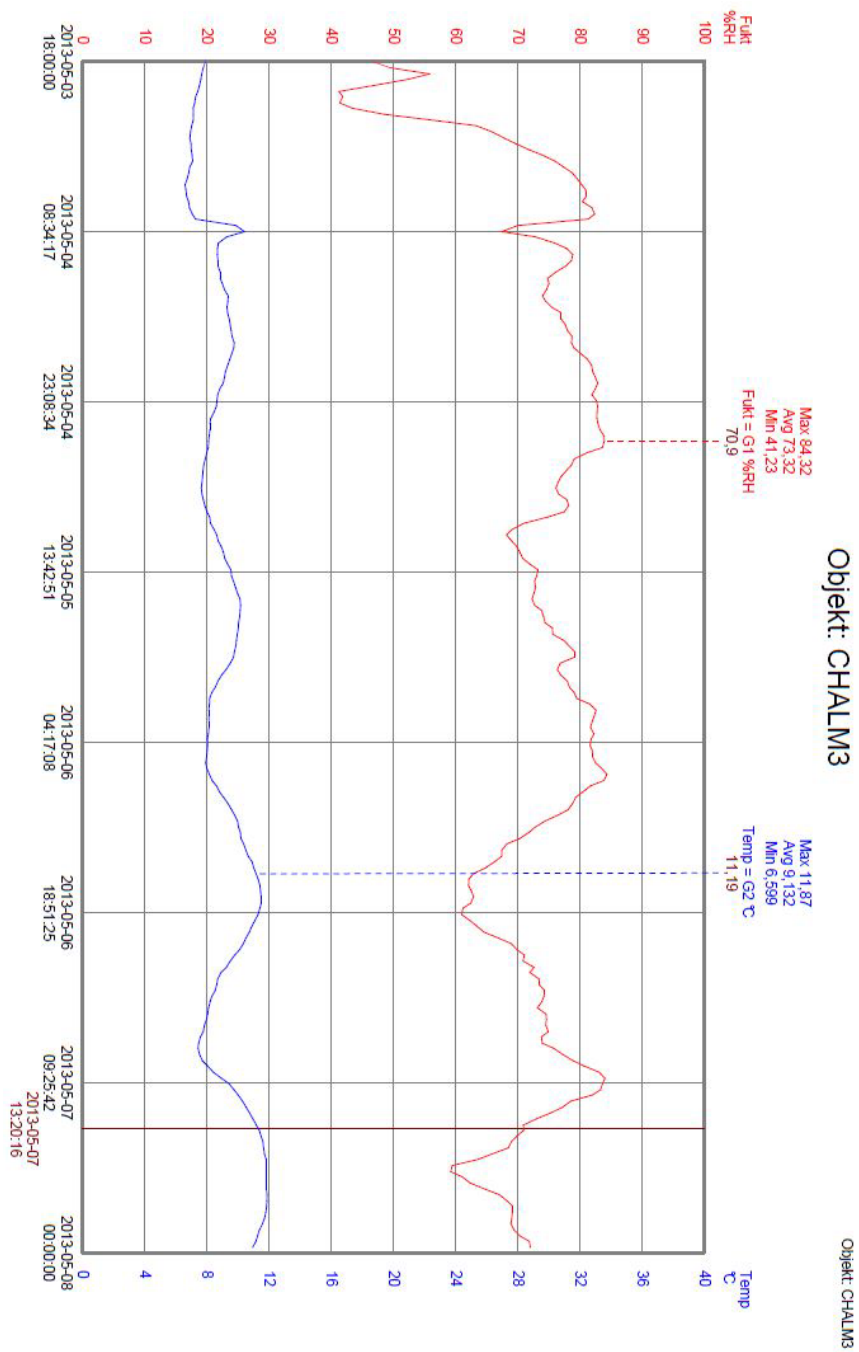
Efter friskluftintaget. Logger från Chalmers.

Max RÅ: 93,5 %. Min RÅ: 43,4 %. Max temp: 11,6 °C. Min temp: 3,5 °C



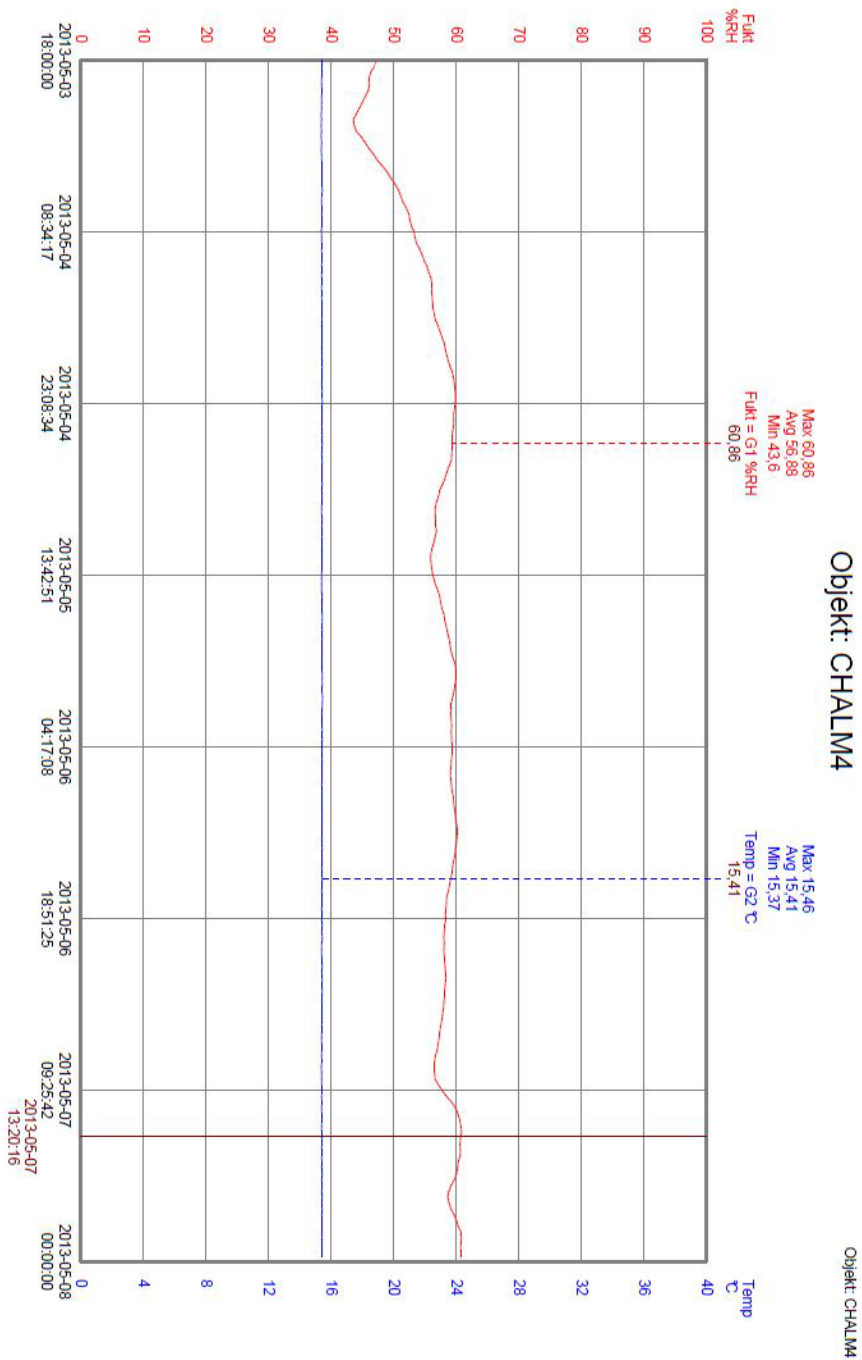
10.6 Bilaga 6

Efter friskluftintaget. Logger från Polygon.



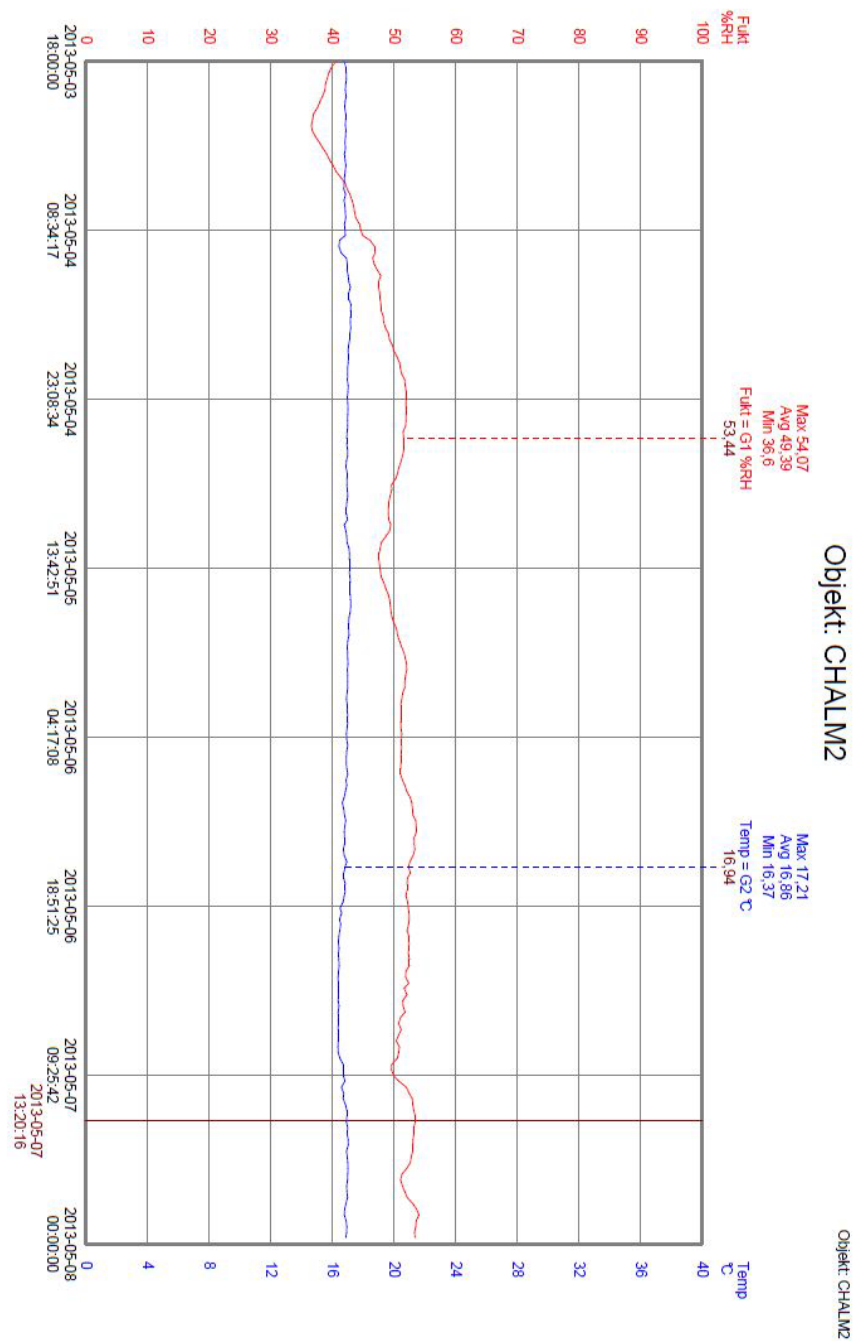
10.7 Bilaga 7

Skalet vid hall 8. Andra mätningen med logger från Polygon.



10.8 Bilaga 8

Hall 8. Andra mätningen med logger från Polygon.



10.9 Bilaga 9

Mollierdiagrammet beskriver förändringar i temperatur och relativ ånghalt genom systemet.

