

UTELUFTSVENTILERAD KRYPGRUND, TEORI OCH PRAKTIK

Johan Westö



Sammanfattning

Uteluftsventilerade krypgrunder är kända för att kunna drabbas av problem med hög relativ luftfuktighet inne i kryputrymmet. Förhållandena som uppstår kan då vara gynnsamma för biologisk påväxt vilket i sin tur kan ha en negativ inverkan på både konstruktionens hållfasthet och inomhusluftens kvalitet. Problem uppstår dels på grund av att krypgrunden förblir för kall sommartid och dels på grund av en hög fuktbelastning från underliggande mark. I denna rapport härleds nya teoretiska samband för att beskriva hur temperaturen vid blindbotten inne i krypgrunden beror av temperaturen inomhus, utomhus och vid grundbotten. Metoden kan användas för att uppskatta hur relativa luftfuktigheten varierar inne i kryputrymmet och hur denna påverkas av olika åtgärder. Forskningsarbetet har här riktat in sig på att undersöka effekten av ventilation kombinerat med värmeförsel, och en framtagna regleralgoritm påvisar att värmeförsel kan användas periodvis under kritiska perioder för att öka mängden fukt som ventilation kan föra ut ur krypgrunden.

Abstract

Outdoor air-ventilated crawls spaces are known to face problems caused by a high relative humidity inside the crawl space. The conditions then become favourable for different types of biological fouling. This in turn can have a negative impact on both the structural properties of building materials and the quality of the indoor air. Problems with high relative humidity are partly due to insufficient heating of the crawl space during the summer and partly due to a high moisture load from the ground below. In this report, new theoretical relations are derived that explain how the temperature beneath the floor structure is related to the temperature indoors, outdoors, and at the ground surface. The method can be used to estimate how the relative humidity varies inside the crawl space and how it can be affected by different measures. We have focused on measures based on combinations of controlled ventilation and heating, and developed a control algorithm which suggests that additional heating could be used periodically, during critical periods, to increase the amount of moisture that can be removed from the crawl space using ventilation.



Utgivare: YrkesHögskolan Novia, Fabriksgatan 1, Vasa, Finland

© Johan Westö & YrkesHögskolan Novia

Novia publikation och produktion, serie R: Rapporter 1/2014

ISSN: 1799-4179,

ISBN: 978-952-5839-83-8 (online)

Layout: Johan Westö

Innehåll

1	Inledning	1
2	Bakgrund	3
2.1	Uteluftsventilerad krypgrund	3
2.2	Historik och problemomfång	4
2.3	Värme	5
2.3.1	Värmetransport	5
2.3.2	Specifik värme och ångbildningsvärme	6
2.3.3	1-dimensionellt flöde	6
2.4	Fukt	7
2.4.1	Fukt i material	7
2.4.2	Fukttransport	7
2.5	Biologisk påväxt	9
3	Värme- och fuktflöden	10
3.1	Värmefflöden	10
3.1.1	Slutsatser	12
3.2	Fuktflöden	12
3.2.1	Slutsatser	13
4	Problembeskrivning	14
5	Framtagna lösningar	16
5.1	Passiva	16
5.1.1	Dag- och dräneringsvatten	17
5.1.2	Kapillärbrytande material	17
5.1.3	Ångspärr	17
5.1.4	Isolering av grundbotten	18
5.1.5	Isolering av grundmur	19
5.1.6	Ventilation	20
5.2	Aktiva	20
5.2.1	Sorptionsavfuktare	20
5.2.2	Termisk avfuktare	20
5.3	Byggnadsdirektiv	21

6	Undersökt kryppgrund	22
6.1	Undersökt byggnad	22
6.2	Styr- och övervakningssystem	23
6.3	Insamlad mätdata och tolkning av resultat	24
6.4	Effekter av åtgärder	24
7	Reglermetod	28
7.1	Styrdonens inverkan	28
7.1.1	Temperaturdifferens	28
7.1.2	Differens i ånghalt	30
7.2	Reglering	30
7.2.1	Scenarion	31
7.2.2	Riskevaluering	31
7.3	Resultat	32
8	Sammanfattning	34
	Litteratur	35
	Appendix	37
A	Härledning av viktade medelvärden	37
B	Specifikation av givare och aktuatorer	40

1

Inledning

I takt med att byggnader har försetts med en tjockare golvisolering så har också fuktproblem med den uteluftsventilerade krypgrunden ökat (Matilainen, Kurnitski & Seppänen, 2003; Sveriges tekniska forskningsinstitut SP, u.å.-b). Trots att problemet tidigare har konstaterats bero på att krypgrunden sommartid inte värms upp tillräckligt snabbt (Burke, 2007; Nevander & Elmarsson, 1994; Kurnitski & Matilainen, 2000) så fokuserar de finska byggföreskrifterna främst på att säkerställa ventilationen. En för låg temperatur i krypgrunden leder sommartid till att ventilationen inte förmår föra ut fukt; följden blir en hög relativ luftfuktighet som i sin tur kan bana väg för biologisk påväxt. Fuktproblem kan då uppstå trots att åtgärder vidtagits för att begränsa markfukten såsom dränering, massabyte och marktäckning.

Trots att fuktproblemen med den uteluftsventilerade krypgrunden är välkända så är de fortfarande vanligt förekommande vid nybyggnationer (Lehto, 2011), problemet är därför aktuellt för såväl nya som äldre konstruktioner. Fuktproblem i krypgrunden kan vidare leda till en försämrad inomhusmiljö då biologisk påväxt ger upphov till mögelsporer och andra partiklar som kan vara hälsoskadliga. Är golvet inte helt lufttätt så kan dessa partiklar nå inomhusluften varvid dess kvalitet försämras (Airaksinen, Pasanen, Kurnitski & Seppänen, 2004).

Tidigare har flertalet lösningar tagits fram för att minska risken för fuktproblem i krypgrunder. Dessa utgörs av såväl passiva byggtekniska åtgärder som aktiva (energikrävande) åtgärder i form av avfuktning. Detta arbete bidrar till att öka kunskapen kring båda dessa typer av åtgärder genom att presentera nya metoder för både modellering och reglering av den uteluftsventilerade krypgrunden. Relevant ny information påvisas genom att:

1. Påvisa teoretiskt hur relativa luftfuktigheten vid blindbotten påverkas av temperaturen och ånghalten inomhus, utomhus och vid grundbotten.
2. Kombinera teori och praktik för att validera teoretiskt härledda effekter av åtgärder mot uppmätta värden från en verklig krypgrund.
3. Illustrera uppmätta mätvärden över nästan två års tid från en verklig krypgrund.
4. Presentera en teoretiskt härledd regleringsalgoritm för att minimera relativa luftfuktigheten vid blindbotten utgående från styrd ventilation och uppvärmning.

Insamlade mätvärden tyder på att även den undersökta kryppgrunden initialt är för kall sommartid. Varm utomhusluft som ventileras in kyls ner så pass mycket att kondens uppstår mot de kallaste ytorna inne i kryppgrunden. Detta resulterar i att nettotransporten av fukt, via ventilation, går från utomhusluften in till kryppgrunden under hela sommaren. Utöver så torkar markytan aldrig upp under resterande delar av året och den relativa luftfuktigheten förblir därför mellan 80-95 % under hela året. På grund av detta försågs kryppgrunden med en extra värmekälla och delvis täcktes även grundbotten med en ångspärr. Resultaten av dessa åtgärder har verifierats mot framtagen teori och jämförelsen antyder att speciellt effekten av en värmekälla kan predikteras väl. Tillförsel av extra värme kan kraftigt sänka relativa luftfuktigheten och även helt eliminera fuktflödet in till kryppgrunden under sommaren, men uppvärmningen kräver även en hel del energi. Den här framtagna regleralgoritmen rekommenderade användning av värmekällan vid över 70 % av tiden under maj-augusti. Den höga användningen anses bero på att fuktillskottet från underliggande mark, i den undersökta kryppgrunden, är så pass stort att fukttransporten ut via ventilationen inte förmår torka upp grundbotten.

Denna rapport är avsedd för personer som vill veta mera om modellering och reglering av en kryppgrund, varför problem kan uppstå, vilka lösningar som finns att tillgå samt hur dessa fungerar. Kapitel 2 inleder med nödvändig bakgrundsinformation vartefter Kapitel 3 introducerar väsentliga värme- och fuktflöden i en kryppgrund. En utförlig problembeskrivning ges i Kapitel 4, medan framtagna lösningar presenteras i Kapitel 5. Mätresultat från den undersökta kryppgrunden ges i Kapitel 6, och slutligen presenteras den framtagna regleralgoritmen i Kapitel 7 följt av en sammanfattning i Kapitel 8.

Arbetet är utfört inom projektet Teori Möter Arbetslivet (TEMA) vid Yrkeshögskolan Novia. Samarbetspartners för projektet har varit Yrkeshögskolan Novia, Umeå Universitet, Västerbottens läns landsting och Finlands Kommunförbund och finansiering har erhållits från EU/Botnia Atlantica, Österbottens Förbund, Region Västerbotten och parterna själva.

2

Bakgrund

DET här kapitlet strävar till att ge en teoretisk referensram för kommande kapitel angående modellering och reglering. Utöver så beskrivs även de problem med biologisk påväxt som en hög fuktighet kan ge upphov till.

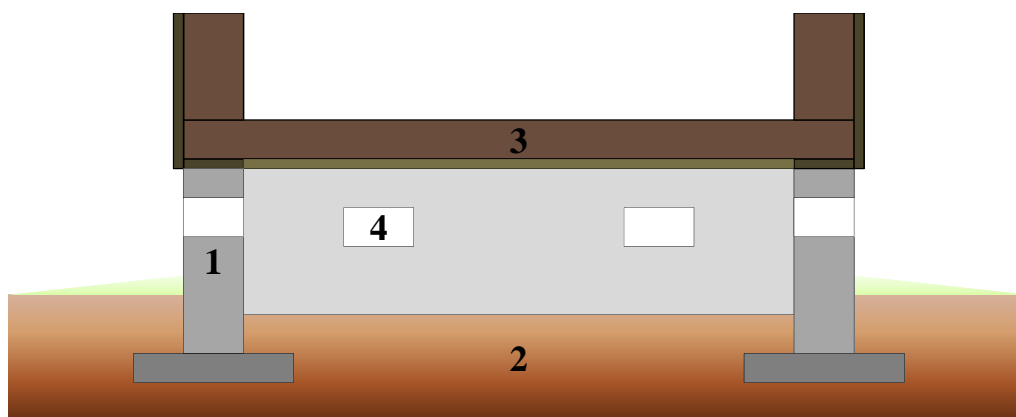
Definition

Denna rapport behandlar endast den uteluftsventilerade krypgrunden och ordet krypgrund syftar här alltid till denna typ av konstruktion.

2.1 Uteluftsventilerad krypgrund

I den uteluftsventilerade krypgrunden skapas ett ventilerat utrymme mellan bostaden och markytan. Det ventilerade luftlagret skall göra det möjligt att ventileras ut fukt, elak lukt samt eventuellt hälsofarliga ämnen, samtidigt som en värmeisolering skapas mellan bjälklag och den kallare markytan. Kontakten till utomhusluften kan dock medföra problem då fukttransportens riktning är beroende av krypgrundens temperatur.

Krypgrundsutrymmet, illustrerat i Figur 2.1, omges av tre ytor (grundmur, grundbotten och blindbotten) och ventileras via öppningar i grundmuren. Grundbotten kan bestå av olika material beroende på om något massabyte (t.ex. jord mot makadam) gjorts och kan även vara täckt med något värmeisolerande material och/eller en ångspärr. Massabyten och/eller marktäckning ses normalt i nyare konstruktioner och utgör en byggnadsteknisk åtgärd för att minska risken för biologisk påväxt. I äldre konstruktioner saknas normalt dessa och grundbotten består då av jord. Liksom grundbotten så kan även de andra två ytorna förses med extra isolering och det är i sådana fall återigen fråga om mer moderna åtgärder för att minska risken för biologisk påväxt. I Kapitel 5 kommer dock att påvisas att effekten av denna isolering inte alltid behöver vara positiv. Slutligen kan ännu nämnas att bjälklaget mellan bostad och krypgrund kan vara av trä eller betong varav det senare har fördelen att det inte innehåller något organiskt material.



Figur 2.1: Uteluftsventilerad krypgrund. 1 grundmur, 2 underliggande mark (markytan inne i krypgrunden benämns grundbotten), 3 bjälklag (undersidan av bjälklaget benämns blindbotten), 4 ventilationsglugg.

2.2 Historik och problemomfång

Historiskt sett så bygger den uteluftsventilerade krypgrunden på den äldre torpargrunden som också hade ett ventilerat utrymme mellan bostad och markyta. Torpargrunden skiljer sig dock väsentligt från krypgrunden på följande två punkter:

- ingen eller väldigt lite isolering i golvbjälklaget,
- eldstadens fundament var placerat i krypgrunden och fungerade där som en värmekälla.

Båda dessa två punkter bidrar till att värmeförlusten till utrymmet mellan marken och bostaden var väsentligt mycket större med den gamla torpargrunden. Trots detta så kunde golvet bli kallt vintertid och ventilationsöppningarna (även kallade kattgluggar) täcktes därför igen. Att endast täcka igen gluggarna var dock inte alltid tillräckligt och i sådana fall skottades snö upp längs grundmuren för att förbättra värmeisoleringen (Svensson, 2001; Hagentoft, 2002).

Borttagandet av värmekällan (fundamentet) och tillägget av golvisolering förändrar grundens termiska egenskaper väsentligt och det är därför inte längre säkert att ventilationen klarar av att avfukta krypgrunden. Exempelvis så uppskattar Matilainen och Kurnitski (2003) att en förändring av golvisoleringen från 10 cm mineralull till 20 cm kan ge upphov till en årlig temperatursänkning på 2 °C inne i krypgrunden. Denna temperatursänkning kan medföra en stor skillnad i mängden fukt som kan transporteras ut via ventilation, detta kommer även att påvisas i Kapitel 6. Följaktligen så kan det inte längre garanteras att krypgrunden som helhet är en fuktsäker konstruktion. På grund av detta så klassas uteluftsventilerade krypgrunder som en riskkonstruktion i både Finland och Sverige (Hometalkoot.fi, 2012; Sveriges tekniska forskningsinstitut SP, u.å.-a). För att ytterligare belysa detta kan nämnas att Anticimex 2008 uppskattade att 300 000 hushåll i Sverige hade fuktproblem i krypgrunden (Anticimex, 2008). Fuktproblemen kan dock lösas, och orsaken till den höga siffran i Anticimex rapport anses främst bero på att husägare är omedvetna om problemet.

2.3 Värme

Definition

När ett varmt föremål kommer i kontakt med ett kallt föremål så sker ett spontant värmefflöde från det varma föremålet till det svalare. Ordet värme syftar då till den energi som överförs mellan de två föremålen på grund av deras temperaturskillnad. Temperaturen i sig är vidare ett mått på medelvärdet för molekylernas rörelseenergi, d.v.s. molekylerna i ett varmt föremål har större kinetisk energi än molekylerna i ett kallt föremål och rör sig därför fortare (Giancoli, 2008).

2.3.1 Värmetransport

Värmetransport mellan föremål kan ske på tre olika sätt: ledning, konvektion och strålning. Vid ledning överförs värme genom att molekyler som rör sig snabbt kolliderar med molekyler som rör sig långsammare. Nettoresultatet blir att en del av den kinetiska energin överförs och följaktligen uppstår ett värmefflöde. I vätskor och gaser kan värmefflöden även uppstå på grund av luft- eller vätskeflöden och mekanismen kallas då konvektion. Konvektiva värmefflöden uppstår naturligt i många sammanhang då temperaturskillnader i gaser och vätskor ger upphov till densitetsskillnader (varm luft stiger). Vind, pumpar och fläktar ger även upphov till konvektiva flöden men i dessa fall är det frågan om påtvingad konvektion. Strålning skiljer sig från den andra två metoderna för värmeöverföring då denna inte kräver något medium för överföring. Alla föremål strålar värme och nettovärmetransporten ses då som inkommande minus utgående värmestrålning. Värmestrålningen från ett föremål är proportionellt mot temperaturen upphöjt till fyra och följaktligen kan metoden dominera vid högre temperaturer. Utgående från alla tre metoder för överföring så fås det totala värmefflödet mellan två föremål som summan av alla tre delflöden. Matematiskt beskrivs värmefflödet (\dot{Q}) för de tre metoderna enligt (Giancoli, 2008; Cengel & Ghajar, 2011):

Ledning

$$\dot{Q} = U(T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

Konvektion

$$\dot{Q} = \alpha A(T_{\text{yta}} - T_{\text{luft}}) \quad (2.2)$$

Strålning (mellan två parallella ytor)

$$\dot{Q} = \frac{\sigma A}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.3)$$

där U är materialets värmegenomgångskoefficient, A arean, T temperaturen, α värmeövergångskoefficienten, σ Stefan-Boltzmanns konstant, ϵ respektive ytas emissivitet och indexen 1 samt 2 beskriver två ytor. Både värmegenomgångskoefficienten och emissiviteten är materialberoende medan värmeövergångskoefficienten är specifik för luftflödet intill ytan. På grund av att temperaturen förekommer med exponenten 4 i Ekvation 2.3 så måste temperaturen där anges i Kelvin medan den i resterande ekvationer kan anges i Celsius. Ekvation 2.3 kan även deriveras med avseende på T_1 för att erhålla ett linjärt temperaturberoende.

$$\dot{Q} = \alpha_{\text{strålning}} A (T_1 - T_2) \quad \text{där} \quad \alpha_{\text{strålning}} = \frac{4\sigma T_1^3}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2.4)$$

Det erhållna uttrycket är då en linjärisering av Ekvation 2.3 runt T_1 .

2.3.2 Specifik värme och ångbildningsvärme

Ett materials specifika värmekapacitet anger hur mycket energi som behövs eller frigörs för varje grad som temperaturen ändrar. Vid ventilation där de inkommande och utkommande flödena håller skilda temperaturer kan energitransporten beskrivas som (Kurnitski & Matilainen, 2000):

Ventilation

$$\dot{Q} = \dot{V} \rho c_p \Delta T \quad (2.5)$$

där \dot{V} är volymflödet, ρ densiteten och c_p den specifika värmekapaciteten. Vid fasövergångar, såsom vatten till ånga, så ändrar inte temperaturen utan energiflödet är istället beroende av övergången. Avdunstning kräver energi medan kondensation frigör energi. Mängden energi som behövs är både fas- och materialberoende, men energin som behövs eller frigörs vid övergången vätska-gas kallas för materialets ångbildningsvärme. Utgående från denna så kan energibehovet för avdunstning och kondensation beskrivas som (Kurnitski & Matilainen, 2000):

Avdunstning

$$\dot{Q} = \dot{g} E \quad (2.6)$$

där \dot{g} är avdunstnings/kondensationshastigheten och E ångbildningsvärmerna.

2.3.3 1-dimensionellt flöde

Ekvationerna för värmetransport beskriver ett värmeflödes storlek utgående från en temperaturskillnad. De säger däremot ingenting om dynamiken, d.v.s. hur ett föremåls temperatur varierar med tiden på grund av värmeflödet. Utgående från resonemangen att nettoflödet till ett föremål måste kompenseras av en motsvarande förändring i lagrad energi så kan dynamiken beskrivas med (Cengel & Ghajar, 2011):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{dT}{dt} \quad (2.7)$$

där T är temperaturen, z djupet (flödet antas ske i lodrät riktning), ρ materialets densitet, c_p materialets specifika värmekapacitet och k materialets värmekonduktivitet. Ekvation 2.7 kan lösas numeriskt för ett antal förutbestämda punkter längs z-axeln genom att ersätta derivatorna med finita differenser:

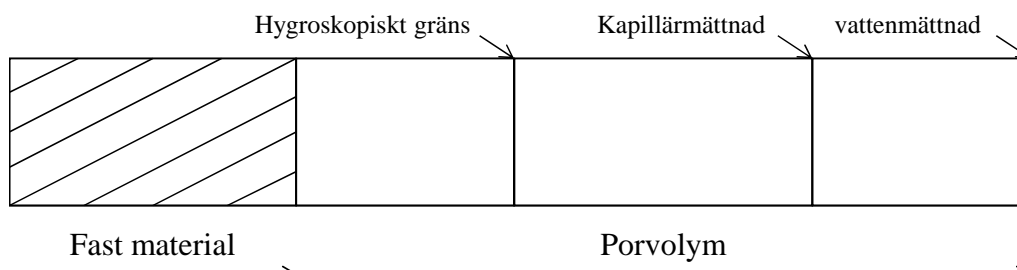
$$\frac{T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i}{\Delta x^2} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (2.8)$$

varvid indexet m syftar till punktens position längs z-axeln och indexet i till den diskreta tiden. Om initial- och gränstillstånd är kända så kan temperaturen för en punkt ett tidssteg framåt bestämmas explicit som:

$$T_m^{i+1} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i) + T_m^i \quad (2.9)$$

För att metoden som helhet skall vara stabil krävs att Δt väljs enligt:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\rho c}{k} \quad (2.10)$$



Figur 2.2: Fukt i material. (Nevander & Elmarsson, 1994)

2.4 Fukt

2.4.1 Fukt i material

Ett material kan binda vatten antingen kemiskt eller fysikaliskt. Det kemiskt bundna vattnet är fast fixerat medan det fysikaliskt bundna vattnet kan förångas. Med fukt avses därför det fysikaliskt bundna vattnet i materialet och det anges normalt med någon av följande storheter:

- Fukthalt, mängden förångningsbart vatten per volym material ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).
- Fuktkvot, mängden förångningsbart vatten per mängd torrt material (%).

Materialens förmåga att fysikaliskt absorbera fukt är bundet till porositeten, då fukten lagras i dessa hålrum. Hur stor del av porvolymen som är vattenfylld beror vidare på tillgången till fukt. Det exakta sambandet är specifikt för olika material men generellt så kan situationen beskrivas som i Figur 2.2. Den hyroskopiska gränsen anger till vilken grad porerna kan fyllas till följd av luftens **Relativa Fuktighet** (RF), medan gränsen för kapillärmättnad anger till vilken grad kapillära krafter kan fylla materialet med vatten. Om slutligen vattenmättnad nås är hela porvolymen fylld med vatten (Nevander & Elmarsson, 1994).

2.4.2 Fukttransport

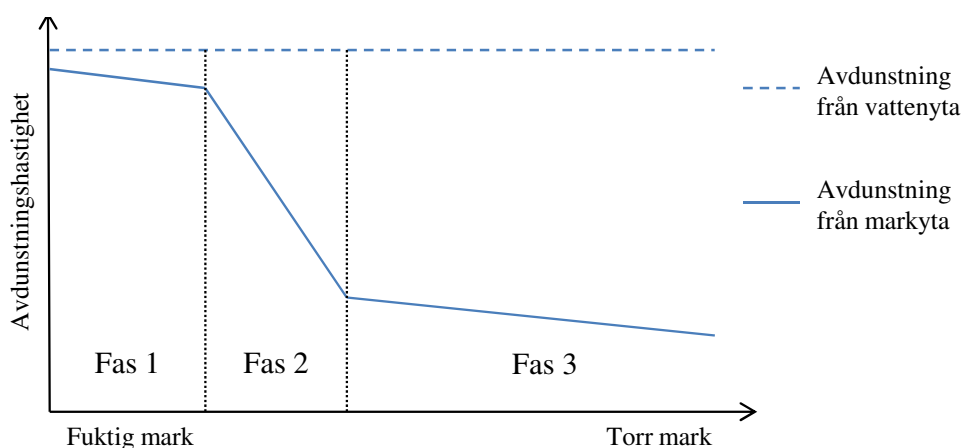
Fukt kan transporteras i antingen vätske- eller ångfas. Nedan beskrivs i båda dessa fall de transportmekanismer som är av väsentlig betydelse i kommande kapitel.

Ångfas

- Diffusion, vattenmolekylerna i luften strävar till att utjämna en koncentrationsskillnad. Det sker därför en nettotransport från högre koncentration till lägre.
- Fuktkonvektion, vattenmolekyler förflyttas på grund av att luftmassan där de befinner sig förflyttas (t.ex. vid ventilation).

Vätskefas

- Tyngdkraft, vatten rinner från en högre terräng till en lägre.
- Kapillärkraft, markens förmåga att lyfta vatten ovanför grundvattennivån.



Figur 2.3: Avdunstningshastighet från markyta i relation till avdunstningshastigheten från en vattenyta. (Wilson, Fredlund & Barbour, 1994)

Matematiskt så kan en konvektiv fukttransport (\dot{g}) beskrivas som:

$$\dot{g} = \dot{V} \Delta v \quad (2.11)$$

där \dot{V} är volymflödet och Δv en differens i ånghalt. I likhet med Ekvation 2.2 så kan avdunstningen från en yta beskrivas med:

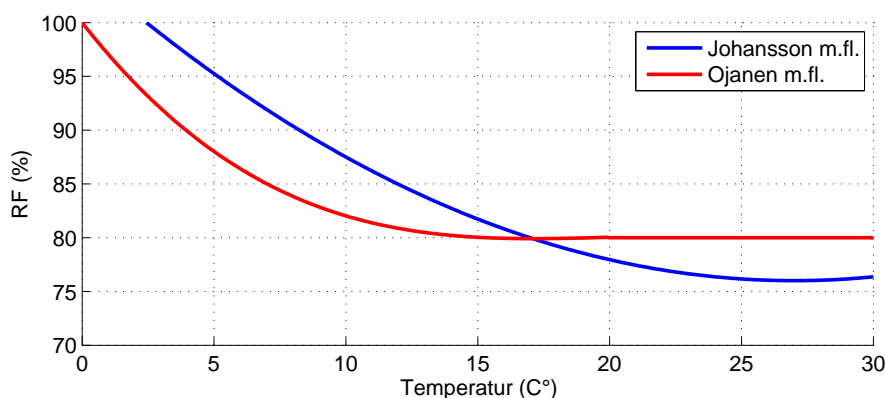
$$\dot{g} = \beta A (v_{yta} - v_{luft}) \quad (2.12)$$

där β är en massöverföringskoefficient och A ytans area. Massöverföringskoefficienten β är här beroende av både luftströmmens egenskaper och hur fuktigt ytan är. Om ytan är våt, medför likheten till Ekvation 2.2 att Lewis samband kan användas för att knyta de två tillsammans enligt (Cengel & Ghajar, 2011):

$$\beta = \frac{\alpha}{c_p \rho} \quad (2.13)$$

där c_p är luftens specifika värmekapacitet och ρ luftens densitet. Avdunstningen från en markyta kan även ställas i relation till avdunstningen från en vattenyta. Vid en sådan jämförelse kan avdunstningshastigheten delas in i tre faser beroende på hur fuktig ytan är. Det exakta förhållandet och fuktnivåerna vid vilka fasövergångarna sker är materialberoende men Figur 2.3 ger en generell bild av situationen.

Luftskiktet precis ovanför en vattenyta är alltid mättat på vattenånga och så länge marken är tillräckligt fuktig så gäller detta även för en markyta. Det här resulterar då i att avdunstningen från markytan i det närmaste motsvarar avdunstningen från en vattenyta när marken befinner sig i fas 1. I fas 2 börjar ytan torka upp och effekten kan ses som att den effektiva arean varifrån avdunstning sker minskar, det uppstår med andra ord små torra områden på ytan. I enighet med Ekvation 2.12 resulterar det här i att avdunstningen avtar. Fas 3 representerar slutligen ett skede där ytan är helt torr och i det skedet sker fuktflödet från marken till ytan i huvudsak i ångfas. Det här medför en långsammare transport av fukt i marken och följaktligen så sker även avdunstningen långsammare. Baserat på detta så kommer då benämningen torr markyta här att syfta på en markyta som befinner sig i fas 2 eller 3 (Wilson, Fredlund & Barbour, 1994).



Figur 2.4: LIM-kurvor för trämaterial. (Ojanen m.fl., 2010), (Johansson, Svensson & Ekstrand-Tobin, 2013)

Tillgången på vatten och avdunstningens storlek är avgörande för om marken kan torkas upp till fas 2 eller 3. Även om markytan inte förses med vatten uppifrån så kan fukt transporteras från nedanförliggande jordlager via kapillära krafter. Hur högt ovanför grundvattennivån vattnet kan transporteras avgörs av jordmaterialens kornstorlek. Fin-kornigt material kan lyfta vattnet högre men transporten går långsammare då vattnet skall transporteras genom mindre porer.

2.5 Biologisk påväxt

Vid gynnsamma förhållanden kan biologisk påväxt uppstå på byggnadsmaterial. Det är då fråga om olika svampar såsom blånadssvampar, rötsvampar, mögelsvampar och actinomyceter. Blånadssvampar orsakar främst missfärgningar på trämaterial och är så till vida inget större hot mot hälsan. Mögelsvampar och actinomyceter försämrar däremot luftkvaliteten då den första ger ifrån sig sporer och den andra ger upphov till en ”mögellukt”. Slutligen så har rötsvampar en konstruktionsmässigt negativ inverkan då dessa försämrar trämaterialets hållfastighet. För att svamparna skall kunna frodas krävs främst näring, vatten och en gynnsam temperatur. Näring består av organiskt material (såsom trä), medan vatten kan erhållas ur både luften och materialet om RF är tillräckligt högt. Optimal tillväxttemperatur ligger mellan 20 och 30 °C men tillväxt kan även ske vid lägre temperaturer. På grund av att mögelsvamparna är de första som börjar växa så anpassas normalt riktlinjer för kritiska förhållanden i omgivningen efter dessa. (Hagentoft, 2002)

För att beskriva både tillväxthastigheten och grotiden, vid olika temperaturer och RF-nivåer, så används nivåkurvor (isopleths). Dessa är beroende av både svamparten och materialet där påväxten sker. För att beskriva gränsnivån vid vilken tillväxt kan ske på ett material så används då en **Lowest Isoleth for Mould (LIM)** nivåkurva. Kurvor för diverse byggnadsmaterial ges bl.a. i Sedlbauer (2002), Ojanen m. fl. (2010) och Johansson, Svensson och Ekstrand-Tobin (2013). Den lägsta observerade RF-nivån för trämaterial ligger runt 75–80 % RF vid optimal tillväxttemperatur (20–30 °C) och stiger mot 100 % vartefter temperaturen närmar sig 0 °C. Av denna orsak anges ofta att RF skall ligga under 75 eller 80 % vilket även motsvarar att trämaterialet skall hålla en fuktkvot lägre än ca. 15–19 %. I Figur 2.4 ges två exempel på LIM-kurvor för trämaterial, även om dessa skiljer sinsemellan så ger de en bild av var gränsområdet ligger.

3

Värme- och fuktflöden

UTGÅENDE från den erhållna bakgrundsinformation kommer detta kapitel att behandla de fukt- och värmeflöden som är väsentliga i en krypgrund. Den presenterade modellen används vidare för att förklara vilka mekanismer som tillsammans stabiliserar förhållandena inne i krypgrunden, d.v.s. vad det är som bestämmer krypgrundens temperatur och fuktighet. Den introduktion som här ges utgår från en krypgrund som saknar marktäckning, massabyten och isolering (förutom golvisolering). Situationen ses därför som ett utgångsläge gentemot vilket jämförelser kan göras i nästa kapitel då byggnadstekniska åtgärder beaktas.

Tidigare forskning gjord av Kurnitski och Matilainen (2000) introducerade fukt- och värmeflödena i Figur 3.1 för att beskriva krypgrundsluftens ånghalt och temperatur. I modellen syftar indexet k till att benämna konvektiva värmeflöden mellan krypgrundsluften och en yta medan indexet s indikerar strålning mellan två ytor. Dock så är endast strålningsflödet mellan bjälklag och markyta inkluderat. Utgående från att differensen mellan ut- och inflöden absorberas av krypgrundsluften så fås att variationer i temperatur och ånghalt kan beskrivas med sambanden nedan.

$$V\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_{bb(k)} + \dot{Q}_{gb(k)} + \dot{Q}_{mur(k)} + \dot{Q}_{vent} \quad (3.1)$$

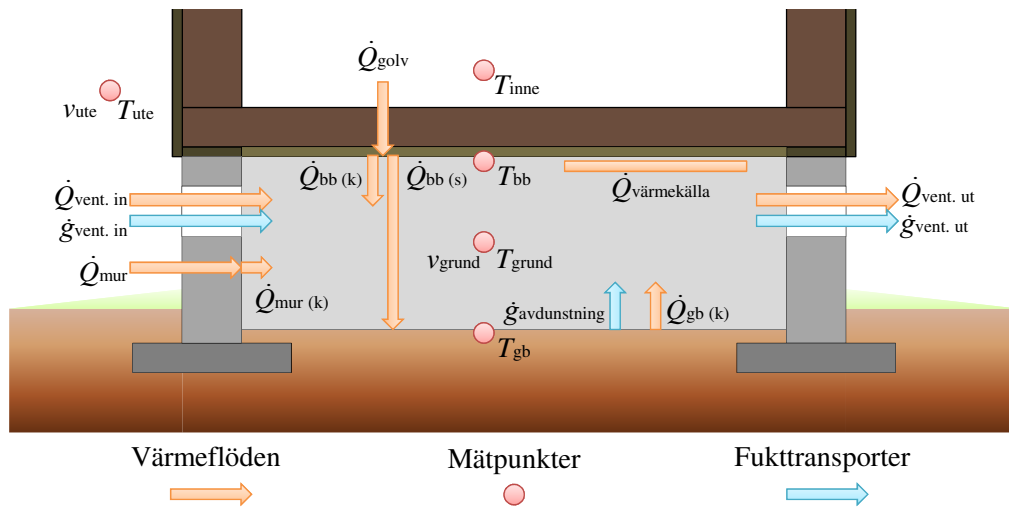
$$V \frac{\partial v}{\partial t} = \dot{g}_{vent} + \dot{g}_{avdunstning} \quad (3.2)$$

Värmekällan, som kan utgöra en aktiv lösning för att begränsa RF, antas här vara placerad direkt under bjälklaget (värmekabel) och påverkar således temperaturen via $\dot{Q}_{bb(k)}$.

3.1 Värmeflöden

När luft utifrån ventileras in till krypgrunden så kommer denna att antingen kylas eller värmas av de omgivande ytorna. Temperaturförändringen påverkar RF och ytornas temperatur är därför av intresse, speciellt temperaturen vid blindbotten då det är här som trämaterial oftast finns blottat. I stationärt tillstånd så kommer inkommande värmeflöden till bjälklaget att vara lika stora som utgående. Från Figur 3.1 fås då följande samband:

$$\dot{Q}_{golv} - \dot{Q}_{bb(k)} + \dot{Q}_{värmekälla} = \dot{Q}_{bb(s)} \quad (3.3)$$



Figur 3.1: Fukt- och värmeflöden. (k = konvektivt flöde mellan yta och kryppgrundsluft, s = strålning mellan två ytor, bb = blindbotten och gb = grundbotten).

Uppdelningen av termerna i Ekvation 3.3 utgår från att grundbotten alltid är kallare än blindbotten. Det här medför att termerna i vänstra ledet jobbar för att höja temperaturen vid blindbotten medan strålningstermen i högra ledet motverkar uppvärmningen.

Utgående från presenterade samband i Kapitel 2 så kan värmeflödena i Ekvation 3.3 ersättas med temperaturberoende uttryck. Bearbetning av den resulterande ekvationen ger att temperaturen vid blindbotten kan beskrivas med ett viktat medelvärde av temperaturerna inomhus, utomhus och vid grundbotten samt en term som härrör från värmekällan (se Appendix A för härledning). För en kvadratisk exempelgrund (sidolängden 10 m och höjden 0.8 m) som saknar isolering mot både grundmur och grundbotten så erhålls följande vikter:

$$T_{bb} = 0,036T_{inne} + 0,897T_{gb} + 0,067T_{ute} + \frac{\dot{q}_{\text{värmekälla}}}{5,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}} \quad (3.4)$$

Utgående från vikternas storlek noteras att grundbottens vikt är kraftigt dominerande. Blindbottens temperatur är därför starkt knuten till grundbottens temperatur. Vikterna för både T_{inne} och T_{ute} anger vidare hur mycket en temperaturskillnad, mellan grundbotten och inomhusluft respektive grundbotten och utomhusluft, kan förskjuta blindbottens temperatur från grundbottens. Om grundbotten och utomhusluften håller samma temperatur och inomhustemperaturen är 10°C varmare än grundbotten så kommer blindbotten att hålla en temperatur som är 0.36°C högre än vid grundbotten. Utgående från samma resonemang för utomhusluften så kan konstateras att temperaturskillnaden mellan blind- och grundbotten väldigt sällan överstiger 1°C . Orsaken till att temperaturskillnaden förblir liten ligger i att energiutbytet via strålning mellan ytorna är väldigt effektivt i förhållande till flödena via konvektion och ledning. Vikterna i Ekvation 3.4 är därför främst känsliga för variationer i emissiviteten hos någondera ytorna. Ytterligare bör nämnas att isolering av grundmuren kommer att minska på vikten för utomhustemperaturen. Termen för värmekällan anger slutligen hur mycket energi en värmekälla under bjälklaget måste tillföra för att höja temperaturen en grad.

3.1.1 Slutsatser

Även om vikterna i Ekvation 3.4 är baserade på ett specifikt exempel så ändrar inte slutresultatet markant ifall något annorlunda värden används, med undantag för ytornas emissivitet. Den väsentliga informationen kan därför summeras i följande punkter:

- Bjälklagets temperatur är starkt förankrad till markytans temperatur. I frånvaro av en värmekälla skiljer det sällan mer än $1\text{ }^\circ\text{C}$ mellan ytorna.
- En signifikant höjning av temperaturen vid blindbotten kräver att även markytans temperatur höjs.
- En värmekälla under bjälklaget måste leverera ungefär $5,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ för att höja bjälklagets temperatur $1\text{ }^\circ\text{C}$ i förhållande till markytans.
- Vikterna i Ekvation 3.4, och då också blindbottens temperatur i förhållande till markytans, påverkas effektivast via en förändring i emissiviteten hos någon av ytorna.

3.2 Fuktflöden

Krypgrundsluften har två primära fuktkällor i form av luftfukt (ventilation) och markfukt (avdunstning). Utöver dessa så kan även byggmaterial lagra eller ge ifrån sig fukt och fungera som en buffert. Denna buffertverkan kommer inte att tas i beaktande här då det i grund och botten inte är fråga om en fukttransport till eller från krypgrunden, utan endast en form av lagring. Vid stationärt tillstånd fås då från Ekvation 3.2:

$$-\dot{g}_{\text{vent}} = \dot{g}_{\text{avdunstning}} \quad (3.5)$$

Ekvationerna från Kapitel 2 kan även här användas för att införa ånghalter. Härledningen i Appendix A påvisar att också ånghalten inne i krypgrunden kan beskrivas med ett viktat medelvärde av ånghalten utomhus och vid grundbotten. Om grundbotten inte är täckt och marken är fuktig så erhålls följande vikter vid en ventilation på **1 air change per hour** (ach).

$$v_{\text{grund}} = 0,16v_{\text{ute}} + 0,84v_{\text{gb}} \quad (3.6)$$

Även i detta fall dominerar grundbottens vikt och ånghalten vid grundbotten påverkar därför kraftigt ånghalten i krypgrundsluften. Vikten för ånghalten ute kan vidare tolkas som hur mycket krypgrundsluftens ånghalt kan förskjutas utgående från ånghaltsdifferensen mellan utomhusluften och grundbotten. Det betyder då att om utomhusluftens ånghalt är ett $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ lägre än grundbottens så kommer krypgrundsluften att hålla en ånghalt som är $0,16 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ lägre än vid grundbotten. För att sänka RF vid $10\text{ }^\circ\text{C}$ från 85 % till 80 % krävs att ånghalten sänks med $0,5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, följaktligen så krävs normalt sett en stor skillnad mellan grundbottens och utomhusluftens ånghalt för att åstadkomma en signifikant påverkan på RF.

Orsaken till att grundbottens vikt dominerar beror i detta fall på att potentiell avdunstning från grundbotten är väldigt hög i jämförelse till fuktmängden som normalt kan bortföras via ventiler. Av samma orsak så kan grundbottens vikt kraftigt reduceras ifall marken kan hållas torr (god dränering) eller ifall grundbotten förses med en ångspärr.

3.2.1 Slutsatser

Effekten av ventilation och avdunstning på ånghalten i krypgrunden kan summeras enligt:

- Om grundbotten är fuktig så medför det att krypgrundsluftens ånghalt kommer att ligga nära mätnadsånghalten vid markytan.
- Krypgrundsluftens ånghalt kan fås att följa ånghalten utomhus om avdunstningen kraftigt begränsas genom användning av ångspärr eller om grundbotten hålls torr.

4

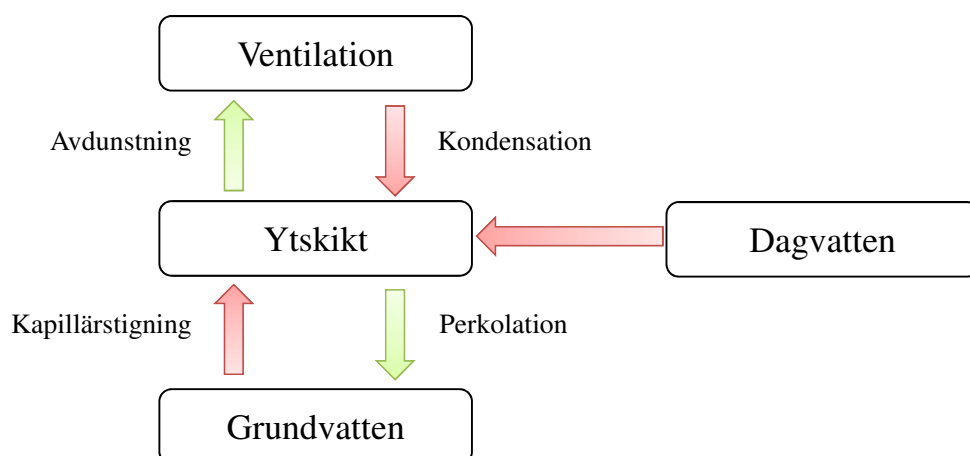
Problembeskrivning

BASERAT på de slutsatser som gjordes i Kapitel 3 så kommer här fuktproblemet med den uteluftsventilerade krypgrunden att presenteras. Då problem med biologisk påväxt först uppmärksammades angavs orsaken vara för dålig ventilation (Svensson, 2001). Senare forskning har dock visat att endast ökad ventilation i sig inte kan lösa problemet, och detta kapitel strävar till att förklara varför. Tyvärr ses och hörs ofta den gamla förklaringen ännu idag fast den saknar grund.

En fuktig markyta är förknippad med RF-värden runt 95 % (Nevander & Elmarsson, 1994). I frånvaro av temperatur- och ånghaltsdifferenser, mellan grund- och blindbotten, så kommer detta också att gälla för krypgrunden som helhet. I verkligheten förekommer differenser, men på grund av ett välisolerat bjälklag är dessa för små för att undvika att LIM-kurvan inte överskrids under sommarhalvåret. Exempelvis kan nämnas att en temperaturökning på en grad och en sänkning av ånghalten med $0,5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ endast sänker RF från 95 % till ca 85 % då temperaturen är mellan 10–15 °C. Följaktligen är en torr grundbotten ett första krav för att undvika risk för biologisk påväxt.

De väsentliga fuktflödena till och från grundbotten ges i Figur 4.1. Utgående flöden bör här kunna vara storleksmässigt större än inkommande för att grundbotten skall kunna hållas torr. Perkolation förekommer endast ifall marken innehåller mera vatten än vad den kan hålla via kapillära krafter; följaktligen inträffar detta utflöde endast ifall dagvatten (smält- och regnvatten) haft möjlighet att tränga in i krypgrunden. Ventilation är därför den enda naturliga processen som kan föra bort fukt som inte rinner ner genom marken. Av denna orsak är ventilation ett måste för att krypgrunden skall kunna fungera fuktsäkert, i frånvaro av aktiv avfuktning. Fuktflödet via ventilation kan dock gå i båda riktningarna; vilkendera processen av avdunstning och kondensation som uppstår beror då på mätnadsånghalten vid grundbotten i förhållande till utomhusluftens ånghalt. Är mätnadsånghalten vid grundbotten högre så kan upptorkning ske, medan det motsatta leder till kondensation mot de svalaste ytorna i krypgrunden. På grund av att mätnadsånghalten är temperaturberoende så blir även krypgrundens fuktsäkerhet i slutändan en temperaturfråga.

Vintertid då markens termiska tröghet bidrar till att hålla krypgrunden varmare än utomhusluften så är normalt förhållandena gynnsamma för uttorkning. Sommartid är dock förhållandet det motsatta och i värsta fall kan ventilation bidra med en nettotransport av fukt in till krypgrunden. Orsaken till att transporten av fukt går ”fel väg” beror i sådana fall



Figur 4.1: Fuktflöden till och från ytskiktet ovanför marken.

på att marken inte värms upp tillräckligt mycket och följaktligen förblir måtnadsånghalten vid grundbotten låg. Ur det här avseendet var den gamla torpargrunden betydligt bättre; där kunde värmeffödet från fundament och bostad hjälpa till att värma upp marken under sommaren. I den uteluftsventilerade krypgrunden måste uppvärmningen av marken istället ske med värmefföden genom grundmur, ventilation och omgivande mark. Tyvärr så har det visat sig i praktiken att detta inte alltid är tillräckligt eftersom problem förekommer.

Det är svårt att på förhand säga hur stor värmetillförsel som behövs för att markytan sommartid inte skall vara för kall. Flertalet faktorer påverkar men de tre väsentligaste är:

- Det lokala klimatet avgör vilken temperatur grunden måste hålla sommartid innan ventilationen transporterar fukt i "rätt riktning".
- Tillgången på fukt, avdunstning har en kylande verkan och påverkar således uppvärmningen av grunden negativt.
- Markens termiska egenskaper, markens värmekonduktivitet och specifika värmekapacitet påverkar hur lätt ytskiktet kan värmas upp.

Sammanfattningsvis kan konstateras att ventilationen är en del av fuktproblemet, och för att ventilationen skall fungera måste grunden vara tillräckligt varm. Lösningar som grundar sig på enbart ökad ventilation kan därför inte garantera en fuktsäker krypgrund och bör följaktligen undvikas.

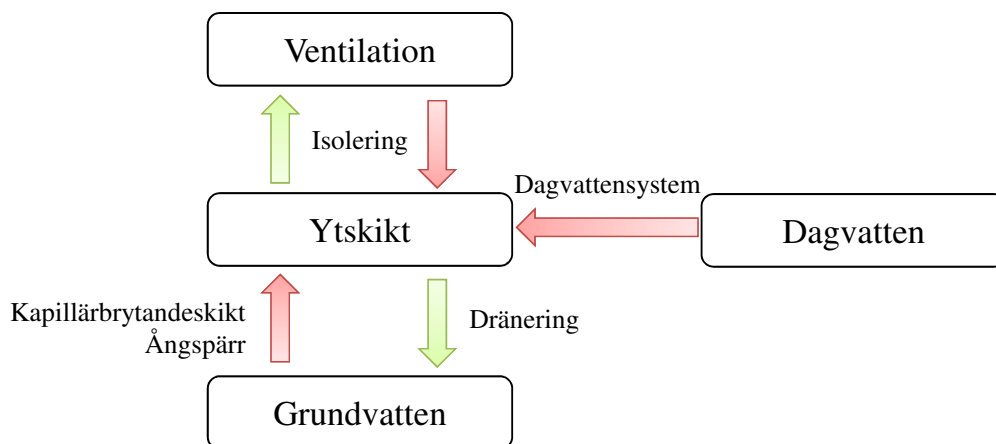
5

Framtagna lösningar

PROBLEM beskrivningen i Kapitel 4 nämner tre huvudfaktorer som påverkar RF i krypgrunden (det lokala klimatet, fuktbelastningen och markens termiska egenskaper). Det lokala klimatet kan inte påverkas men det kan däremot både markens termiska egenskaper och fuktbelastningen. De metoder som här tas upp bygger både på att strypa något av fuktflödena in till ytskiktet i Figur 4.1 eller på att göra något av utflödena större. Passiva åtgärder som tas upp redovisas i Figur 5.1 för att indikera vilket flöde de påverkar. Även om dessa åtgärder inte helt kan eliminera risken för biologisk påväxt så minskar de på fuktbelastningen i krypgrunden. Det betyder även att mängden fukt som en potentiell aktiv avfuktare behöver hantera minskar och följaktligen så minskar även brukskostnaden för denna.

5.1 Passiva

Passiva åtgärder syftar här på installationer som inte kräver någon energitillförsel för att fungera. Det handlar om byggnadssätt som undviker eller minskar risken för att gynnsamma förhållanden för biologisk påväxt råder.



Figur 5.1: Passiva åtgärder inplacerade invid fuktflödena som de påverkar.

5.1.1 Dag- och dräneringsvatten

Installation av dagvattensystem skall hindra att regn- och smältvatten kan tränga in till krypgrunden. Vatten från hängrännor och stuprör samlas upp och leds till antingen en dagvattenledning, grönområden, stenkista eller motsvarande. För att undvika att fristående vatten på markytan letar sig in i krypgrunden bör markytan alltid luta bort från byggnaden.

Markvatten definierar vatten som förekommer i marken mellan grundvattennivån och markytan. Det kan både bestå av vatten som infiltrerats vid markytan och vatten som lyfts från grundvattennivån. Dränering möjliggör att vatten som inte kan bindas till marken via kapillära krafter rinner bort och på så vis kan mängden vatten i marken under huset begränsas. Mängden vatten som kan stiga till markytan blir då mindre och följaktligen blir det lättare att hålla grundbotten torr (Nevander & Elmarsson, 1994).

5.1.2 Kapillärbrytande material

Krypgrunder kan även fyllas upp med ett kapillärbrytande skikt, av t.ex. tvättad makadam, ovanpå underliggande mark. Skiktet hindrar inte att fukt som avdunstat från marken söker sig upp till krypgrunden, det försämrar endast luftutbytet mellan marken och krypgrundsluften. Ett kapillärbrytande skikt skall därför inte ses som en fuktspärr, utan skiktet hindrar endast att fritt stående vatten blir kvar i krypgrunden.

5.1.3 Ångspärr

En ångspärr är ett material som hindrar eller kraftig begränsar att vattenmolekyler via diffusion kan röra sig från ett område med högre koncentration till ett med lägre, vanligt förekommande material är 0.2 mm åldersbeständig byggplast. Ångspärren hindrar att fukt som avdunstat från marken når krypgrundsluften och strävar därmed till att eliminera fuktflödet från mark till/från ytskiktet. Under plasten kommer RF att bestämmas utgående från hur fuktig marken är, och då ventilationen inte längre för bort fukt som avdunstat så finns det heller ingen mekanism som torkar marken längre. Följaktligen så kommer RF att vara nästan 100 % under plasten, det är därför viktigt att se till att inga material som kan mögla (organiskt material) blir kvar (Svensson, 2001). Även om markens inverkan på ånghalten inne i krypgrunden inte helt kan elimineras så medför en korrekt installerad ångspärr att ånghalten inne i krypgrunden bör gå mot att följa ånghalten utomhus, som exempel kan nämnas att Erickson och Zhai (2008) utförde mätningar i en krypgrund med och utan plast där detta tydligt syns. Vidare så konstaterade Kurnitski (2000) att avdunstningen från marken reducerades med 70 % efter installation av ångspärr. Effekten av åtgärden blir därför att grundbotten upplevs som om den skulle vara torr och befinna sig i fas 2 eller 3 i Figur 2.3

En ångspärr kan även bidra till att höja temperaturen i krypgrunden. Detta då energi som tidigare gick åt för avdunstning istället kan användas för att höja temperaturen (Kurnitski & Matilainen, 2000), se Ekvation 2.6. I Kapitel 3 konstaterades även att ytornas emissivitet är nyckeln till att höja blindbottens temperatur i förhållande till grundbottens, av denna orsak säljs även ångspärrar med en aluminiumyta som kraftigt minskar ytans emissivitet. Ångspärren är dock ingen garanti för att fukttransporten via ventilation går önskad väg och kondens ovanpå ångspärren kan i sådana fall indikera att krypgrunden fortfarande är för kall. Slutligen så är det viktigt att notera att ångspärren även hind-

Tabell 5.1: Materialegenskaper

Material	ρ	k	c
Jord/Lera	1600 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1,6 $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	1800 $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
LECA kulor	950 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0,12 $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	250 $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

(Matilainen & Kurnitski, 2003)

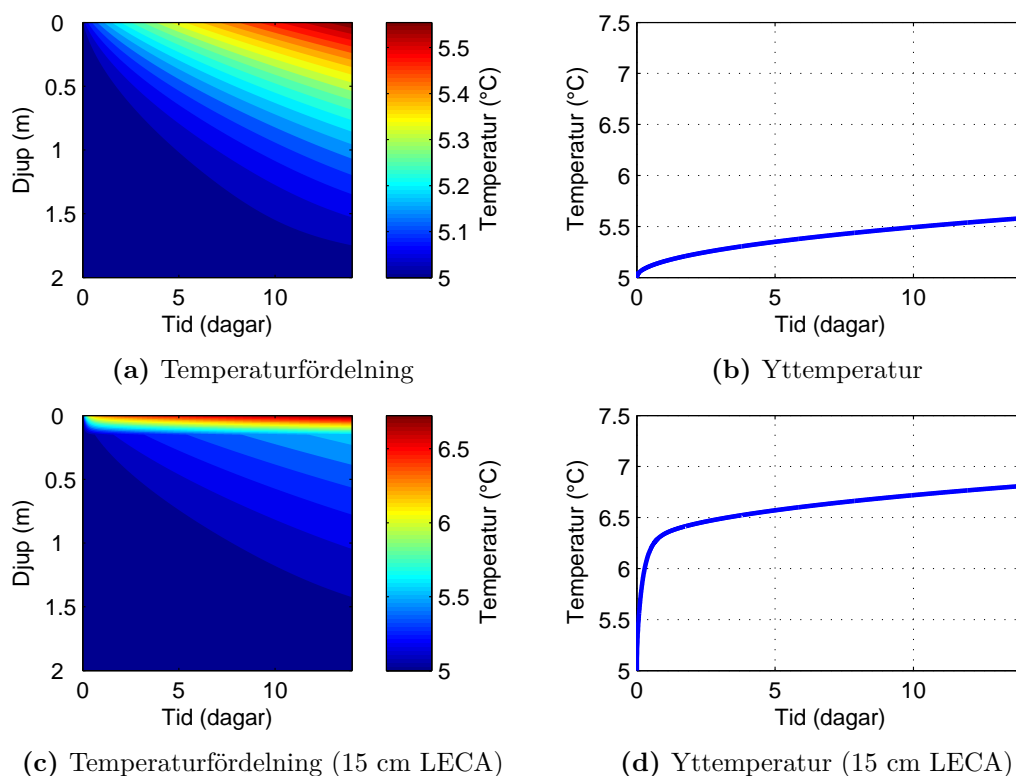
rar vatten som sluppit att tränga in i krypgrunden från att rinna undan. Försiktighet bör därför vidtas vid användning för att säkerställa att vatten aldrig kan samlas ovanpå ångspärren.

5.1.4 Isolering av grundbotten

I Kapitel 3 påvisades att ytornas temperaturer är starkt bundna till varandra och att värmetrögheten i marken därför även orsakar en värmetröghet för krypgrunden som helhet. Att förse grundbotten med isolering strävar till att minska på värmetrögheten och följaktligen blir det lättare att värma krypgrunden. Utgående från ekvationerna i Avsnitt 2.3.3 så illustreras i Figur 5.2 ett beräknat exempel för en grundbotten med och utan isolering. Marken antas bestå av jord/lera, isoleringen av 15 cm **light expanded clay aggregate** (LECA) kulor och värmeflödet till ytan har angetts som $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, värdena som använts för materialens egenskaper är sammanfattade i Tabell 5.1. Från beräkningarna kan ses att det värmeisolerande skiktet värms upp både mer och fortare än jorden/leran, och följaktligen så kan krypgrunden reagera betydligt snabbare på förändringar i utomhustemperaturen. Av denna orsak bedömdes markisolering av Matilainen och Kurnitski (2003) vara det säkrast sättet att lindra fuktproblem i en krypgrund. Om därtill det inkommande värmeflödet till ytan görs större (termisk avfuktning 5–10 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) så blir även temperaturskillnaden mellan de två fallen större, och därav så kan även isoleringen minska på arbetet som en aktiv avfuktare behöver göra. Orsaken till varför ett isolerande material värms fortare ligger närmast i att inkommande värme inte leds vidare i lika stor utsträckning och följaktligen värms materialet upp; av samma orsak kan en blottad bergyta göra det svårare att värma grunden då berget leder värme ned i marken effektivare än jord/lera.

I dagens läge finns flertalet olika isoleringsmaterial som kan användas i en krypgrund. Dessa behöver inte endast vara värmeisolerande utan materialen kan även vara dränerande eller diffusionstäta. Diffusionstäta isoleringsmaterial, eller normal isolering med ångspärr, fungerar som både ångspärr och isolering, medan dränerande material är tänkta att användas utan ångspärr. Med ett diffusionstätt skikt ovanför marken stängs fukt under skiktet in och marken förblir fuktig, dränerande skikt i sin tur tillåter fukttransport, i ångfas, men isoleringen skapar en temperaturdifferens som eliminerar en eventuell koncentrationsdifferens som kunde driva ånga från marken till krypgrunden sommartid. D.v.s. temperaturen vid ytan varifrån avdunstning kan ske är så pass låg att mätnadsånghalten där inte överstiger ånghalten i krypgrunden vid tolererade fuktnivåer. Vintertid är situationen det motsatta och den dränerande isoleringen tillåter att marken under isoleringen torkar upp. Oberoende av vilken typ av isolering som används så bör den tåla att krypa på, detta för att det fortfarande skall vara möjligt att inspektera krypgrunden (Trygghetsvakten, u.å. LFS, u.å.).

Isolering av grundbotten påverkar det tjälfria djupet och Nevander och Elmarsson



Figur 5.2: Differens i markens uppvärmningstid, med och utan isolering, från ett initialtillstånd med $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ på alla djup och med ett konstant värmeflöde till ytan på $1\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

(1994) rekommenderar därför att isoleringen inte ges ett större R-värde än $1,5\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$. Speciellt vid fall där reducerat grundläggningsdjup tillämpats vid byggnadsskedet så bör försiktighet tillämpas vid eventuell isolering av grundbotten i efterhand.

5.1.5 Isolering av grundmur

Att isolera grundmuren minskar ytterligare på kryppgrundens termiska tröghet men påverkar på samma gång värmeflödet in till grunden. En 30 cm tjock mur av betong kan stå för ett lika stort värmeflöde som ventilationen då kryppgrunden skall värmas upp under våren och försommaren. Följaktligen kan isolering av grundmuren få både positiva och negativa konsekvenser. Positivt är att den termiska trögheten minskas, medan det på samma gång är negativt att värmeflödet till grunden begränsas.

Uppvärmning av marken är huvudorsaken till kryppgrundens termiska tröghet. Av denna orsak kommer inte en isolering av grundmuren att påverka trögheten i grunden signifikant, före grundbotten också isolerats. Att endast isolera grundmuren kan därför vara negativt då grundens termiska tröghet inte signifikant påverkas, medan värmeflödet signifikant begränsas. Sett under hela året leder isoleringen av grundmuren till en minskad värmeförlust från grunden. Isoleringen är därför inte någon dålig ide men den bör endast göras om grundbotten även isolerats (Trygghetsvakten, u.å.).

5.1.6 Ventilation

Kurnitski (2000) riktade in sig på hitta ett optimalt ventilationsflöde, och för konstant ventilation under hela året konstaterades detta ligga mellan 1–3 **Air Change per Hour** (ach). Normalt önskas ett större luftflöde sommartid för att hjälpa till att värma grunden och av samma orsak ett lägre luftflöde vintertid för att undvika onödig nedkylning. När markisolering eller aktiv termisk avfuktning tillämpats justerades värdet till 0,5–1 ach (Matilainen & Kurnitski, 2003; Matilainen m. fl., 2003). Dessa värden kan normalt uppnås endast via självdragsventilation med ventilationsöppningar i grundmuren, men i problemfall kan det vara nödvändigt att komplettera med maskinell ventilation.

5.2 Aktiva

I nuläget finns två aktiva åtgärder som minimerar riskerna för biologisk påväxt. Den ena bygger på maskinell avfuktning med hjälp av sorptionsavfuktare, medan den andra baserar sig på uppvärmning (termisk avfuktning). Kostnadmässigt är den mekaniska avfuktaren en dyrare investering och den kräver årligt underhåll i form av filterbyten. Utöver detta belastas båda metoderna med driftskostnader i och med att energi måste tillföras för att driva avfuktningssprocessen. Hur mycket energi metoderna kräver vid drift varierar från fall till fall då arbetsmängden beror på fuktbelastningen.

Avfuktning kan även ske med hjälp av kondensavfuktare. Dessa har dock en dålig verkningsgrad vid de temperaturer som råder i en krypgrund och rekommenderas därför inte för detta ändamål (Försvarets materialverk, 2010).

5.2.1 Sorptionsavfuktare

Sorptionsavfuktare använder ett sorptionsmaterial som har förmåga att binda vattenånga i luften. Krypgrundsluften torkas då genom att pumpa luften genom sorptionsmaterialet varpå den återförs till krypgrunden. Sorptionsmaterialet kan endast hålla en begränsad mängd fukt och måste därför även avfuktas. Detta görs genom att värma en del av den intagna luften och pumpa denna genom sorptionsmaterialet i motsatt riktning. Då varm luft kan hålla mer vattenånga än kall luft avger sorptionsmaterialet fukt till den uppvärmda luften varefter denna i sin tur pumpas ut ur krypgrunden. Metoden möjliggör att avfuktning även kan ske effektivt vid de temperaturer som råder i en krypgrund (Azetec, u.å. Munters, 2010).

För att minska på mängden fukt som avfuktaren måste transportera ut ur krypgrunden bör alla fuktkällor elimineras efter bästa förmåga. Det här görs genom att förse marken med en ångspärr samt stänga och täta alla ventilationsluckor och andra eventuella otätheter mot utomhusluften.

5.2.2 Termisk avfuktare

Vid termisk avfuktning förses krypgrunden med tilläggsvärme för att skapa mer gynnsamma ventilationsförhållanden. Värmetillskottet värmer krypgrunden på sikt varpå ånghalten inne i krypgrunden höjs (varm luft håller mer fukt vid samma RF). Då fukttransporten via ventilation är beroende av differensen i ånghalt mellan utomhusluften och luften inne i krypgrunden så har åtgärden en positiv inverkan för fukttransporten ut ur krypgrunden.

Uppvärmningen strävar med andra ord till att få ventilationen av krypgrunden att fungera planenligt.

Tilläggsvärmnen kan tillföras på olika sätt, det säkraste är dock att använda eluppvärmning så att effekttillgången inte blir beroende av faktorer som inte kan påverkas. Ett exempel är då att använda en värmekabel under blindbotten, i sådana fall sänks RF vid blindbotten i två steg: 1) via ett ökat värmefflöde (se Ekvation 3.4) och 2) på grund av att grundbotten sakta torkar upp. En inverkan av steg ett syns inom en timme, medan inverkan av steg två kan dröja eller i värsta fall utgå ifall fukttillskottet från underliggande mark är för stort.

Precis som i fallet med sorptionsavfuktare är även här energiförbrukningen beroende av fuktkällornas storlek och grundens termiska tröghet. Skillnaden ligger främst i att ventilationen i detta fall skall föra ut fukt och då gäller det i första hand att minska på fuktflödet från marken. Grundbotten bör därför förses med ångspärr och/eller isolering för att underlätta avfuktarens arbetsbörda.

5.3 Byggnadsdirektiv

De finska byggnadsdirektiven gällande fukt är från 1998 och behandlar tre huvudpunkter (Miljöministeriet, 1998):

1. Planera så att: vatten inte blir stående inne i krypgrunden, ventilationen är tillräckligt och rådande RF inte påverkar konstruktionen negativt.
 - Dagvattensystem, marklutning från konstruktionen och dränering.
 - Hindra att fukt som stigit via kapillära krafter når krypgrunden med kapillär-brytande skikt eller ångspärr.
 - RF kan sänkas sommartid om marken isoleras.
 - Ventilationen måste kunna ventilera alla områden inne i krypgrunden.
 - Ventilationsgluggarnas totala effektiva area (skyddsgaller minskar på den effektiva arean) skall vara minst 4 ‰ av hela krypgrundsarean och vara minst 150 cm² stora.
 - Ventilationsgluggarna skall placeras minst 150 mm ovanför markytan och med max 6 m emellan.
 - Eventuella grundmurar inne i krypgrunden måste förses med ventilationsgluggar som är minst dubbelt så stora som de mot utomhusluften.
2. Hela krypgrunden måste vara tillgänglig för inspektion.
 - Höjden inne i krypgrunden bör vara minst 0,8 m.
3. Inget byggmaterial eller annat organiskt material får vara kvar i krypgrunden.

Från punkterna ovan framkommer att fokus ligger på ventilation och bortledning av vatten från krypgrunden. Varken ångspärr eller markisolering krävs, utan dessa är endast rekommenderade.

6

Undersökt kryppgrund

FÖR att undersöka hur väl den presenterade teorin i Kapitel 3 överensstämmer med verkligheten har en verklig byggnad försetts med ett styr- och övervakningssystem. Systemet möjliggör utöver loggning av mätvärden även att effekter av olika passiva och aktiva åtgärder kan evalueras. Det här kapitlet kommer att presentera den undersökta byggnaden, styr- och övervakningssystemet, insamlade mätvärden, och slutligen jämföra hur insamlade mätvärden förhåller sig till den tidigare givna teorin.

6.1 Undersökt byggnad

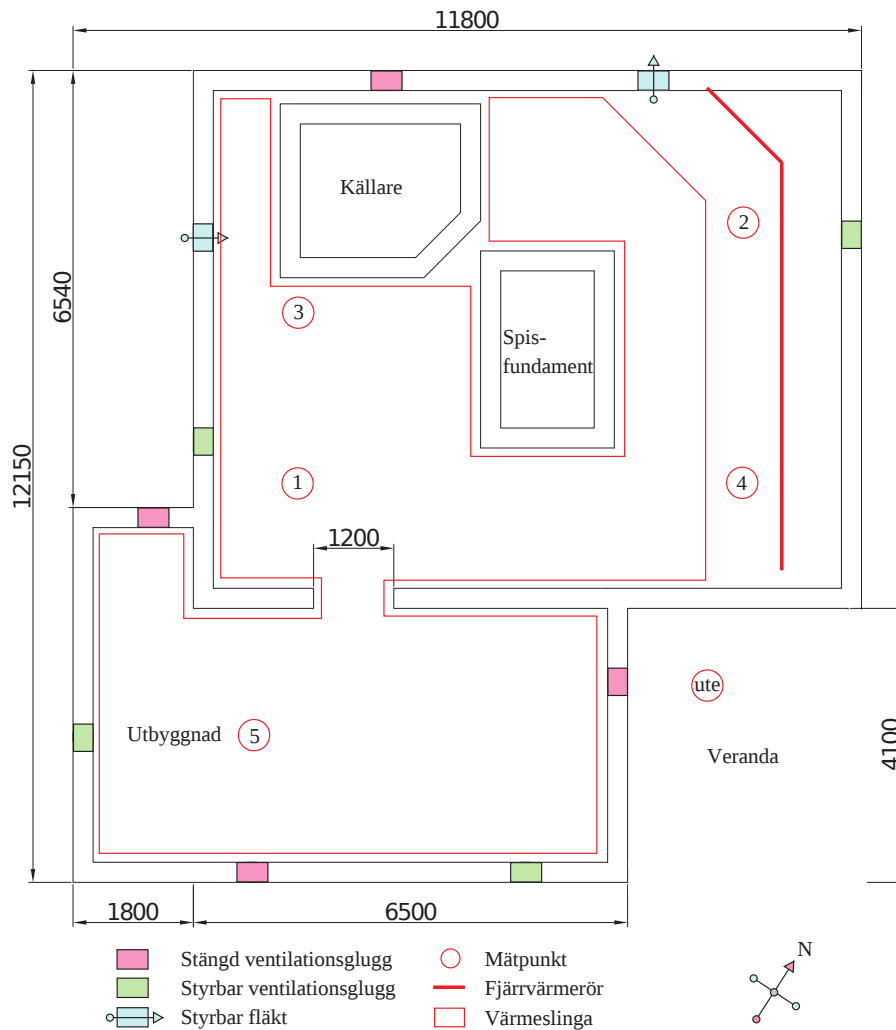
Byggnaden som undersökts är byggd på 1930-talet och har sedan tidigare haft fuktproblem i kryppgrunden. 1997 byggdes huset ut och konstruktionen består i dagens läge av en nyare och en äldre del. Ett resultat av den stora tidsdifferensen mellan byggnadstidpunkterna är att kryppgrundslösningarna mellan de båda delarna skiljer. De väsentligaste skillnaderna sammanfattas i Tabell 6.1, medan en planritning över hela kryppgrunden ges i Figur 6.1.

Kryppgrundens dimensioner skiljer från exempelgrunden som användes för beräkning av vikterna i Ekvation 3.4 och en ny beräkning utgående från Tabell 6.2 ger istället:

$$T_{bb} = 0,036T_{inne} + 0,894T_{gb} + 0,070T_{ute} + \frac{\dot{q}_{\text{värmekälla}}}{5,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}} \quad (6.1)$$

Tabell 6.1: Jämförelse mellan kryppgrunden i den ursprungliga konstruktionen jämfört med utbyggnaden

	Ursprunglig del	Utbyggnad
Isolering (grundmur)	-	5 cm cellplast
Grundbotten	Matjord/Lera	Krossgrus
Värmekälla	Fjärrvärmerör	-



Figur 6.1: Planritning med styr- och övervakningssystemets mätpunkter och aktuatorer utmärkta.

Tabell 6.2: Specifika värden för den undersökta krypgrunden

Koefficient	Värde	Källa/Kommentar
A	88,2 m ²	103,2 m ² - källare och spisfundament
A_{mur}	20 m ²	medelhöjden för muren uppskattad till 0,4 m
V	53 m ³	medelhöjden uppskattad till 0,6 m

6.2 Styr- och övervakningssystem

De installerade styr- och övervakningssystemet mäter temperatur och RF inomhus, utomhus och på fem olika ställen inne i krypgrunden (vid blindbotten). Ventilationen kan vidare styras genom att öppna/stänga fyra av de tio ventilationsgluggarna och även genom att koppla på/av två fläktar installerade vid ytterligare två ventilationsgluggar, övriga

ventilationsgluggar hålls stängda. Som aktiv åtgärd så har blindbotten försetts med 75 m värmekabel, med märkeffekten 750 W. Figur 6.1 illustrerar var systemets mätpunkter har placerats, vilka ventilationsgluggar som styrs och slutligen också var fjärrvärmerören är lokaliserade. Fjärrvärmerören har märkts ut då dessa fungerar som en lokal värmekälla och installationen av värmekabeln har därför koncentrerad till kringliggande områden. Kabeln är självreglerande vilket i praktiken betyder att levererad effekt endast är ca 75–80 % av märkeffekten. Detta resulterar då i slutändan till att levererad effekt per areaenhet till det uppvärmda området är ca $7,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. En mer utförlig specifikation av använda givare och aktuatorer hittas i Appendix B.

6.3 Insamlad mätdata och tolkning av resultat

Figur 6.2 presenterar RF- och temperaturvariationerna som uppmätts under 2011 vid blindbotten. Mätvärdena placeras sig i två grupper där mätpunkterna 1, 3 och 5 utgör en grupp och mätpunkterna 2 och 4 utgör den andra. Gruppen med mätpunkterna 2 och 4 påvisar ett väntat resultat där de högsta RF-nivåerna ses under sommaren, medan givarna i den första gruppen påvisar höga RF-nivåer året runt. Skillnaden mellan grupperna har konstaterats bero på att krypgrunden konstant är varmare vid mätpunkterna 2 och 4 samt att grundbotten i detta område även är torr. Den uppmätta temperaturskillnaden är ca 2°C och förklaras med värmestillskottet från fjärrvärmerören samt att avdunstningen från en torr grundbotten är lägre (avdunstning har en kylande verkan).

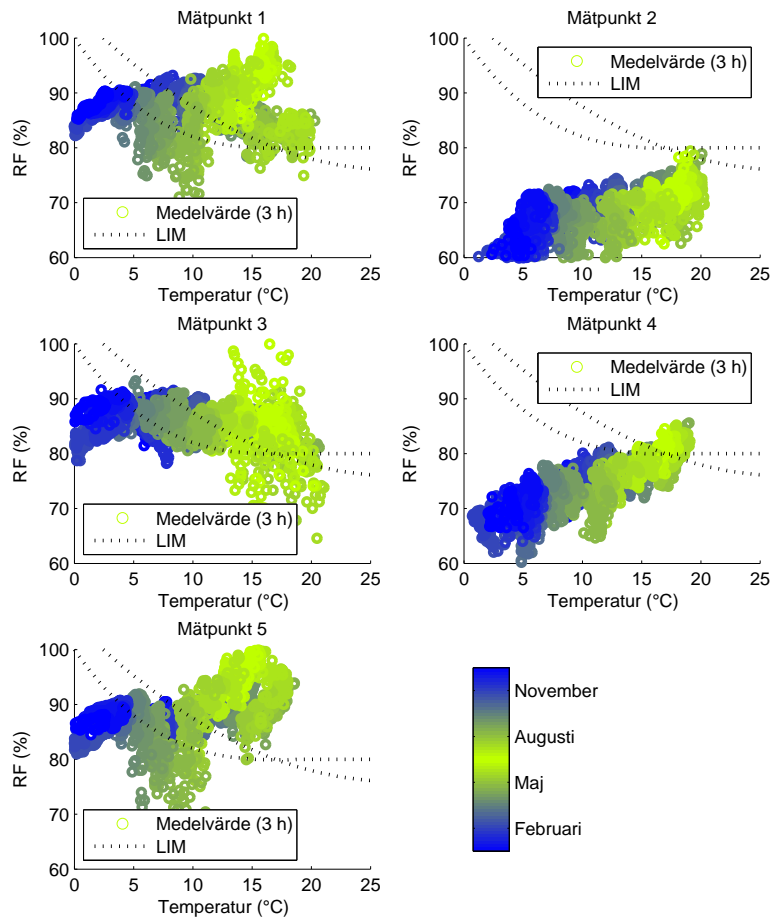
Gruppen med mätpunkterna 1, 3 och 5 förknippas här med en fuktig grundbotten då RF nästan konstant ligger mellan 80–90 %. LIM-kurvorna överskrids under stora delar av året och risken för biologisk påväxt anses därför vara hög. Trots detta så har ingen okulärt iakttagbar påväxt noterats.

Uppmätta värden från mätpunkt 5, som placerats i den utbyggda delen, påvisar att endast ett dräneringsskikt inte fungerar som ångspärr, därtill kan konstateras att området är det svalaste i hela krypgrunden. Huruvida detta beror på att denna del försetts med isolering mot grundmuren eller på en större avdunstning är svårt att säga, men Ekvation 3.4 antyder att isoleringen har en negativ påverkan på temperaturen.

Genom att jämföra den uppmätta ånghalten vid blindbotten med ånghalten i utomhusluften så kan ventilationens inverkan på fukttransporten bestämmas. Figur 6.3 presenterar vad den kumulativa fukttransporten under hela året skulle vara med ventilationsflödet 1 ach. Problemet med att den undersökta krypgrunden förblir för kall sommartid syns tydligt i figuren då fukttransporten sommartid (maj–september) går in till krypgrunden istället för ut.

6.4 Effekter av åtgärder

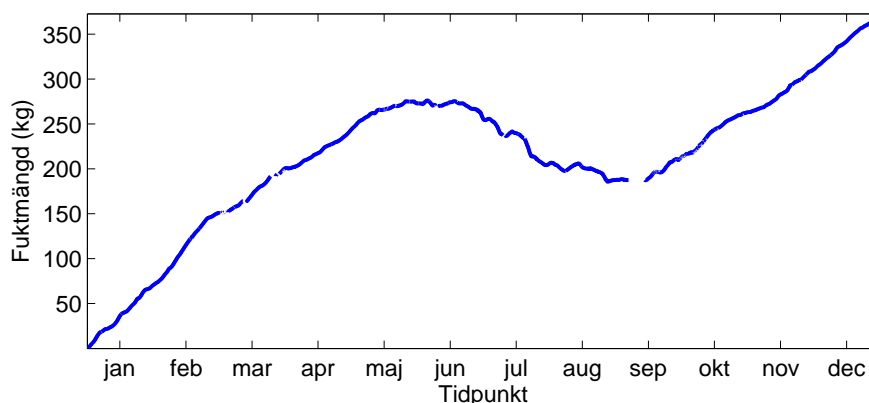
För att få bukt med den höga fuktigheten i krypgrunden testades här att pröva två olika metoder: 1) ångspärr och 2) termisk avfuktning. Det ansågs dock allt för opraktiskt att försöka lägga ut en ångspärr under den äldre delen av byggnaden (väldigt ojämn markyta) och denna lades därför ut endast under utbyggnaden. Värmekällan (värmekabel), för termisk avfuktning, är som redan påvisades i Figur 6.1 utspridd över hela krypgrunden med undantag för ett litet område kring fjärrvärmerören. Följaktligen så har krypgrunden under utbyggnaden både ångspärr och värmekälla för att lindra fuktbelastningen, medan resterande delar endast har en värmekälla.



Figur 6.2: Uppmätta medelvärden, över 3 timmar, för temperatur och RF vid blindbotten under 2011 i jämförelse med LIM-kurvor (LIM-kurvor från Avsnitt 2.5).

Installationen av ångspärren gjordes den 28.3.2013 och från detta datum har även värmekällan konstant varit inkopplad under en månads tid. I Ekvation 6.1 konstaterades att en värmekälla bör värma med effekten $5,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ för att höja temperaturen vid blindbotten med 1°C . I detta kapitel har vidare nämnts att styr- och övervakningssystemet klarar av att leverera $7,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, följaktligen skall då temperaturen vid blindbotten teoretiskt kunna höjas med $1,3^\circ\text{C}$. Det här illustreras i Figur 6.4 där temperaturen utomhus och vid mät punkterna 1, 3 och 5 presenteras vid ett stegsvar för värmekällan. Från figuren kan noteras att temperaturen, efter inkoppling av värmekällan klockan 13:30, stiger med $1,5\text{--}2^\circ\text{C}$ på fyra timmar, trots att utomhustemperaturen hålls konstant. Vidare kan konstateras att temperaturförändringarna vid mät punkterna efter 18:00 följer variationen hos utomhustemperaturen med en liten fördröjning. En jämförelse mellan temperaturen utomhus och temperaturen vid blindbotten antyder att en sänkning av utomhustemperaturen med 5°C även sänker temperaturen vid blindbotten med ca $0,5^\circ\text{C}$. Ett sådant samband motsvaras av en vikt med värdet 0.1 i Ekvation 6.1 och överensstämmer väl med given teori.

Formen på stegsvaret, för värmekällan i Figur 6.4, antyder att temperaturförändringen

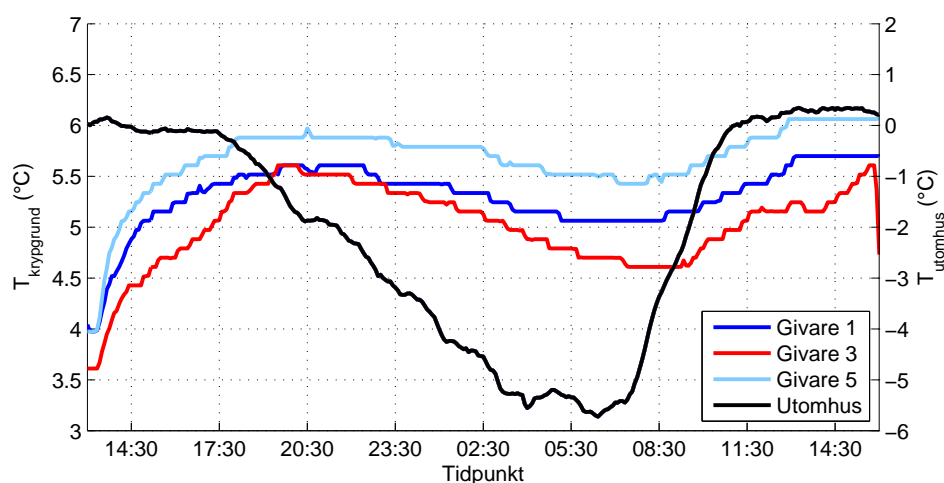


Figur 6.3: Kumulativ fukttransport från krypgrunden under 2011. Resultatet baserat på ventilationen (1 ach) och differensen mellan ånghalten ute och medelvärdet för ånghalten vid blindbotten.

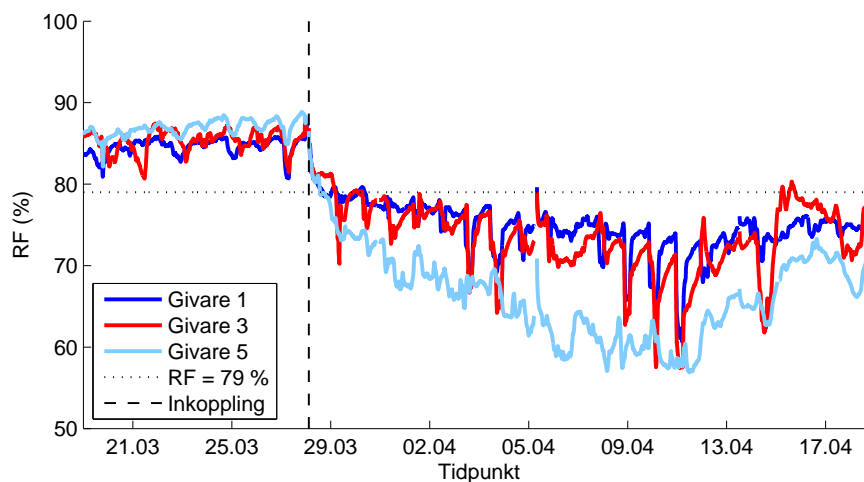
vid blindbotten är en process med en tidskonstant. Utgående från tidsaxeln i figuren kan denna tidskonstant uppskattas till ca 1 timme. För en icke isolerad grundbotten är denna tidskonstant signifikant mindre än tidskonstanten för att värma upp grundbotten; det är därför motiverat att se temperaturökningen vid blindbotten som en ökning av temperaturskillnaden mellan grund- och blindbotten.

En temperaturhöjning vid blindbotten ger även upphov till lägre RF om ånghalten hålls konstant. Vid rådande temperatur och ånghalt kan en temperaturhöjning på 1,5–2 °C sänka RF med ca 10 % enheter. Från Figur 6.5, noteras att sänkningen av RF direkt efter påkopplingen av värmekällan är i den storleksordningen; på sikt sjunker RF dock lite mera eftersom uppvärmningen medför att grundbotten sakta torkar upp.

Det är även av intresse att se hur en ångspärr påverkar sänkningen av RF. För detta jämförs värden från mätpunkterna 1 och 3 med värden från mätpunkt 5. Även om RF



Figur 6.4: Temperaturen utomhus och vid mätpunkterna 1, 3 och 5 (28.3.2013–29.3.2013) stegsvar för systemets värmekälla).



Figur 6.5: RF vid mätpunkterna 1, 3 och 5 efter inkoppling av systemets värmekälla (en timmes glidande medelvärden).

sänks vid samtliga mätpunkter så sjunker RF vid mätpunkt 5 betydligt lägre än vid mätpunkterna 1 och 3. Då mätpunkt 5 är placerad vid den del där markytan även försetts med en ångspärr så bedöms den uppmätta skillnaden representera ångspärrens påverkan på RF. Ångspärren tycks då kunna sänka RF med ytterligare 10–15 % enheter utöver det som åstadkoms genom en högre temperatur vid blindbotten. Den här sänkningen åstadkoms genom att β kraftigt reduceras i Ekvation 2.12 varvid även vikten för grundbottens ånghalt reduceras i Ekvation 3.6. Det betyder också att effekten är störst då differensen i ånghalt mellan grundbotten och utomhusluft är stor och obefintlig när differensen är noll.

7

Reglermetod

TIDIGARE kapitel har beskrivit teorin för att modellera krypgrunden samt vilka mätvärden och åtgärder som det installerade styr- och övervakningssystemet har till förfogande. I detta kapitel fogas denna information samman i en regulator som använder en matematisk modell av krypgrunden för att prediktera resultat av olika styråtgärder. Regulatorn strävar till att minimera RF vid blindbotten samtidigt som energikonsumtionen begränsas. Detta åstadkoms genom att endast tillåta användning av energikrävande åtgärder såsom värmeförsel vid tidpunkter då risken för biologisk påväxt anses överhängande.

7.1 Styrdonens inverkan

RF vid blindbotten är normalt lägre än vid grundbotten på grund av två orsaker: 1) temperaturen vid blindbotten är högre och 2) ånghalten är normalt lägre. För att avgöra om en regleråtgärd är lönsam så kommer regulatorn att uppskatta hur åtgärden påverkar dessa två differenser. De uppskattade förändringarna kan vidare användas för att beräkna förväntade RF-värden för olika åtgärder, varefter den åtgärd som resulterar i lägst RF väljs.

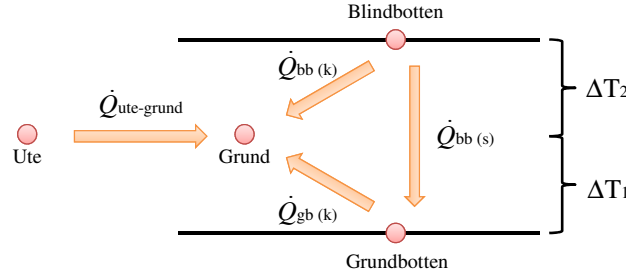
7.1.1 Temperaturdifferens

För att uppskatta ventilationens och värmekabelns inverkan på temperaturdifferensen mellan blind- och grundbotten används en något enklare modell än i Kapitel 3. Då värmeffödet genom grundmur och via ventilation drivs av samma temperaturdifferens har dessa slagits ihop för att bilda $\dot{Q}_{\text{ute-grund}}$. Vidare har värmeffödet genom golv försumrats så att Ekvation 3.1 och 3.3 vid stationärt tillstånd ger:

$$\dot{Q}_{\text{ute-grund}} = -\dot{Q}_{\text{bb (k)}} - \dot{Q}_{\text{gb (k)}} \quad (7.1)$$

$$-\dot{Q}_{\text{bb (k)}} + \dot{Q}_{\text{värmekälla}} = \dot{Q}_{\text{bb (s)}} \quad (7.2)$$

Att försumma värmeffödet genom golvet berättigas då U -värdet för golvet är litet jämfört med $\alpha_{\text{strålning}}$ ($\alpha_{\text{strålning}} = 4,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ och $U_{\text{golv}} = 0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$). Ekvationerna ovan kan baserat på Figur 7.1, Ekvation 2.2 samt 2.4 och division med arean vidare uttryckas som:



Figur 7.1: Förenklad krypgrundsmodell (värmeflöden).

$$\dot{q}_{ute-grund} = -\alpha_{bb}\Delta T_2 - \alpha_{gb}\Delta T_1 \quad (7.3)$$

$$-\alpha_{bb}\Delta T_2 + \dot{q}_{värmekälla} = \alpha_s(\Delta T_2 - \Delta T_1) \quad (7.4)$$

Efter ytterligare bearbetning erhålls till slut:

$$\Delta T_1 = \frac{-\dot{q}_{ute-grund} - \dot{q}_{värmekälla} \frac{\alpha_{bb}}{\alpha_{bb} + \alpha_s}}{\alpha_{gb} + \frac{\alpha_{bb}\alpha_s}{\alpha_{bb} + \alpha_s}} \quad (7.5)$$

$$\Delta T_2 = \frac{\dot{q}_{värmekälla} - \dot{q}_{ute-grund} \frac{\alpha_{strålning}}{\alpha_{\downarrow}}}{\alpha_{strålning} + \frac{\alpha_{strålning}\alpha_{\uparrow}}{\alpha_{\downarrow}} + \alpha_{\uparrow}} \quad (7.6)$$

Temperaturdifferensen ΔT mellan blind- och grundbotten fås som $\Delta T_2 - \Delta T_1$ och med värden från Tabell A-1 (Appendix A) fås till slut följande samband:

$$\Delta T = \frac{\dot{q}_{ute-grund}}{8,5 \frac{W}{m^2 K}} + \frac{\dot{q}_{värmekälla}}{5,1 \frac{W}{m^2 K}} \quad (7.7)$$

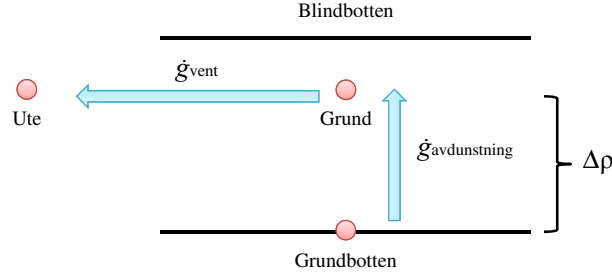
Om en jämförelse nu görs till Ekvation 3.4 noteras att värmekällan här har en större inverkan på temperaturen vid blindbotten, skillnaden är dock liten och den kan förklaras utgående från de förenklingar som gjorts.

Med hjälp av Ekvation 7.7 är det möjligt att uppskatta hur ΔT varierar i stationärt tillstånd om förändringarna som styråtgärderna orsakar på $\dot{q}_{ute-grund}$ och $\dot{q}_{värmekälla}$ är kända. Det är med andra ord inte den absoluta storleken av $\dot{q}_{ute-grund}$ och $\dot{q}_{värmekälla}$ som är av intresse utan variationen i dessa för olika styråtgärder.

Ventilationens inverkan på $\dot{q}_{ute-grund}$ fås ur Ekvation 2.5, medan $\dot{q}_{värmekälla}$ anges av värmekällans märkeffekt. Med värden för luftens densitet och specifika värme tagna ur Tabell A-1 (Appendix A), och värden för arean och volymen ur Tabell 6.2 kan styråtgärdernas inverkan på ΔT vid stationärt tillstånd skrivas som:

$$C_{styråtgärd}^T = 0,025(T_{ute} - T_{grund})\kappa + 1,661\lambda^{\circ C} \quad (7.8)$$

där κ anger ventilationen i ach och λ indikerar om värmekabeln är inkopplad (1 = inkopplad / 0 = fränkopplad). Vid användning av Ekvation 7.8 bör dock noteras att en framtida förändring av $T_{ute} - T_{grund}$ till följd av en styråtgärd inte beaktas. Därtill mäter styr- och övervakningssystemet endast temperaturen vid blindbotten varför även approximationen $T_{grund} \approx T_{blindbotten}$ görs vid beräkning av $\Delta T_{styråtgärd}$



Figur 7.2: Krypgrundsmodell (fuktflöden).

7.1.2 Differens i ånghalt

Då de modellerade fuktflödena endast består av två flöden, se Figur 7.2, kan styråtgärdernas inverkan på $\Delta\rho$ vid stationärt tillstånd skrivas som: (utgående från Ekvation A-11 i Appendix A)

$$C_{\text{styråtgärd}}^{\rho} = \frac{\dot{V}}{\beta A} (\rho_{\text{ute}} - \rho_{\text{grund}}) \quad (7.9)$$

värden från Tabell A-1 (Appendix A) och 6.2 ger vidare:

$$C_{\text{styråtgärd}}^{\rho} = 0,14(\rho_{\text{ute}} - \rho_{\text{grund}})\kappa \quad (7.10)$$

där κ återigen är ventilationsflödet angivet i ach för evaluerad styråtgärd. Ekvation 7.10 har dock samma brist som Ekvation 7.8, i och med att en framtida förändring av $(\rho_{\text{ute}} - \rho_{\text{grund}})$ till följd av en styråtgärd inte heller här beaktas.

7.2 Reglering

Styråtgärdernas påverkan på ΔT och $\Delta\rho$ kommer här att beskrivas med $\Delta T_{\text{styråtgärd}}$ respektive $\Delta\rho_{\text{styråtgärd}}$, och dynamiken modelleras med följande differentialekvationer:

$$\tau_T \frac{d\Delta T_{\text{styråtgärd}}}{dt} = C_{\text{styråtgärd}}^T - \Delta T_{\text{styråtgärd}} \quad (7.11)$$

$$\tau_{\rho} \frac{d\Delta\rho_{\text{styråtgärd}}}{dt} = C_{\text{styråtgärd}}^{\rho} - \Delta\rho_{\text{styråtgärd}} \quad (7.12)$$

där de båda tidskonstanterna bestämts empiriskt till: $\tau_T = 60$ min och $\tau_{\rho} = 5$ min. Ekvation 7.11 och 7.12 kan vidare lösas analytiskt som:

$$\Delta T_{\text{styråtgärd}} = C_{\text{styråtgärd}}^T + (\Delta T_{\text{styråtgärd}}^0 - C_{\text{styråtgärd}}^T) e^{-\frac{t}{\tau_T}} \quad (7.13)$$

$$\Delta\rho_{\text{styråtgärd}} = C_{\text{styråtgärd}}^{\rho} + (\Delta\rho_{\text{styråtgärd}}^0 - C_{\text{styråtgärd}}^{\rho}) e^{-\frac{t}{\tau_{\rho}}} \quad (7.14)$$

där $\Delta T_{\text{styråtgärd}}^0$ samt $\Delta\rho_{\text{styråtgärd}}^0$ är initialvillkor och t anger tidshorisonten, d.v.s. hur långt in i framtiden uppskattningen av $\Delta T_{\text{styråtgärd}}$ och $\Delta\rho_{\text{styråtgärd}}$ sker. På grund av krypgrundens värmetröghet så kan förändringen av $\Delta T_{\text{styråtgärd}}$ och $\Delta\rho_{\text{styråtgärd}}$ tillskrivas T_{bb} respektive ρ_{grund} . En följd av detta blir att framtida värden vid blindbotten fås som:

$$T_{\text{bb}} = T_{\text{bb}}^0 + \Delta T_{\text{styråtgärd}} \quad (7.15)$$

$$\rho_{\text{bb}} = \rho_{\text{bb}}^0 + \Delta\rho_{\text{styråtgärd}} \quad (7.16)$$

Tabell 7.1: Olika reglerscenarion

ID	Beskrivning	Ventilation	Värmekälla
1	Ingen ventilation eller värme	0 ach	av
2	Ingen ventilation med värme	0 ach	på
3	Självdraagsventilation utan värme	0,5 ach	av
4	Självdraagsventilation med värme	0,5 ach	på
5	Mekanisk ventilation utan värme	2 ach	av
6	Mekanisk ventilation med värme	2 ach	på

där T_{bb}^0 och ρ_{bb}^0 representerar rådande värden. Utgående från dessa värden kan slutligen även framtida värden för RF beräknas.

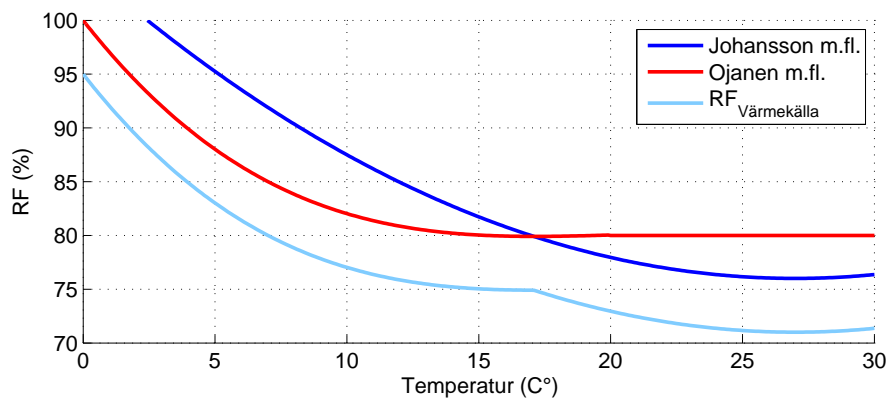
Kontinuerlig reglering, där T_{bb} och ρ_{bb} beräknas med jämna intervall, medför även att felen som introducerades i både Ekvation 7.8 och 7.10 kommer att elimineras på sikt. Det betyder då att fast dessa ekvationer till att börja med inte tar förändringen av $T_{ute} - T_{grund}$ och $\rho_{ute} - \rho_{grund}$ i beaktande så kommer dessa förändringar att inkluderas vartefter T_{bb} och ρ_{bb} beräknas i ett senare skede.

7.2.1 Scenarion

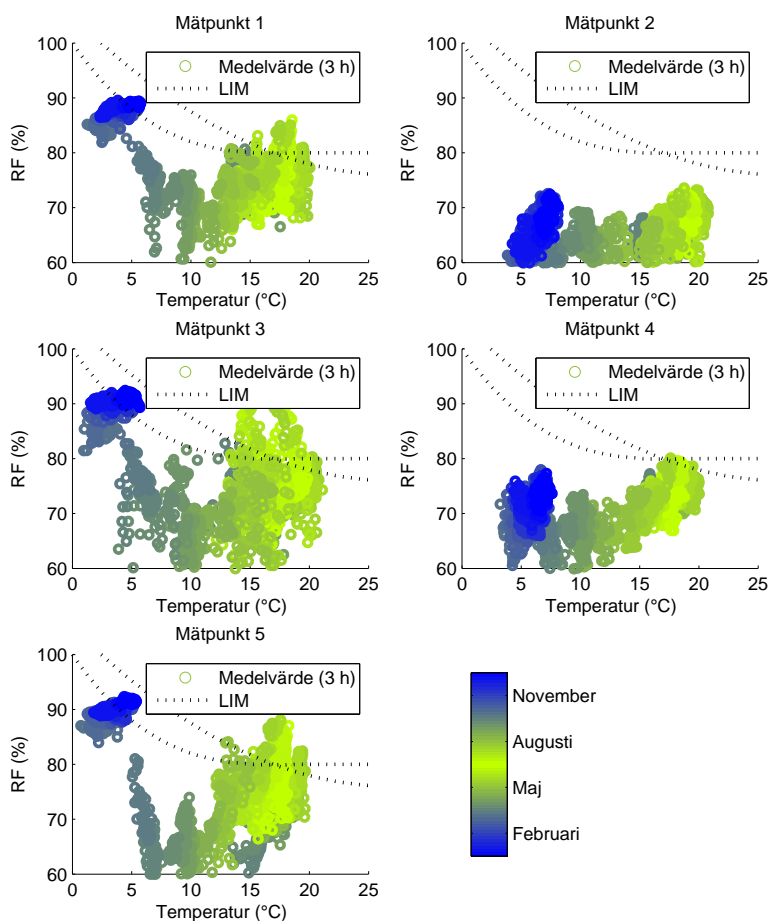
Utgående från aktuatorernas binära signaler så har sex scenarion i Tabell 7.1 formulerats. Baserat på framtida RF-värden väljer regulatorn det tillåtna scenarion som uppskattas ge upphov till lägst RF. Det är här nödvändigt att begränsa vilka scenarion som är tillgängliga då användning av värmekällan alltid annars väljs, vilket inte är energieffektivt. Det angivna ventilationsflödet i Tabell 7.1 är vidare baserat på empiriska mätningar där det konstaterats att frånluftsfläkten upprätthåller ett flöde på ca 1,5 ach.

7.2.2 Riskevaluering

Baserat på Avsnitt 2.5 ansågs det rimligt att tillåta användning av värmekällan då gränsen för uppmätta LIM-kurvor nås. För att även ta mätfel i beaktande läggs gränsen 5 enheter



Figur 7.3: LIM-kurvor från Avsnitt 2.5 samt gräns för inkoppling av värmekällan.



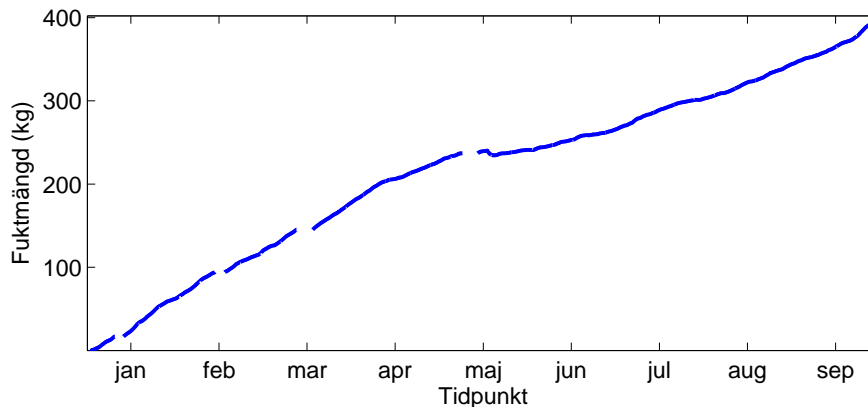
Figur 7.4: Uppmätta medelvärden, över 3 timmar, för temperatur och RF vid blindbotten under 2013 i jämförelse med LIM-kurvor (LIM-kurvor från Avsnitt 2.5).

under lägsta LIM-värdet, se Figur 7.3.

7.3 Resultat

Regulatorn har körts från 17.5.2013 till 1.9.2013 med fem minuters intervall och en 60 minuters tidshorisont. Under denna tid har värmekällan varit inkopplad 73 % av tiden medan ventilationen ansetts vara fördelaktig 95 % av tiden. Regulatorns strategi kan med andra ord förenklas till kontinuerlig ventilation och användning av värmekälla då RF stiger över ett givet gränsvärde. Användningen av värmekällan har gett upphov till ett annorlunda mönster i mätresultaten jämfört med 2011. I Figur 7.4 ges uppmätt temperatur och RF vid blindbotten för samtliga givare och från dessa resultat kan konstateras att:

- Inkopplingen av värmekällan under våren gav upphov till en kraftig sänkning av RF vid mätpunkterna 1, 3 och 5.



Figur 7.5: Kumulativ fukttransport från krypgrunden under 2013. Resultatet baserat på ventilationen (1 ach) och differensen mellan ånghalten ute och medelvärdet för ånghalten vid blindbotten.

- Sommartid överskrider fortfarande LIM-kurvorna vid mätpunkterna 1, 3 och 5, om än till betydligt lägre grad.
- Uppmätta RF-värden sommartid är även lägre vid mätpunkterna 2 och 4 även om uppvärmningen inte koncentrerats till dessa områden.

Både den höga användningsgraden av värmekällan och det faktum att RF fortfarande överskrider LIM-kurvan sommartid antyder att grundbotten förblir fuktig. Temperaturdifferensen mellan blind- och grundbotten räcker då inte till för att få ner RF under 80 % vid svårare förhållanden (de svåra fallen korresponderar till situationer där ventilationen inte förmår föra ut fukt ur grunden på grund av att ånghalten utomhus är hög i förhållande till ånghalten inne i krypgrunden). Trots detta så förekommer det ingen netto transport av fukt in till krypgrunden under sommarhalvåret 2013. En jämförelse mellan Figur 7.5 och Figur 6.3 påvisar att den negativa lutning kurvan hade under sommaren 2011 inte längre syns under 2013. Orsaken till detta bedöms bero på att den höga användningsgraden av värmekällan höjt temperaturen i grunden så pass mycket att ventilationen alltid kan transportera fukt i önskad riktning.

Att använda värmekällan mer än 70 % av tiden kan inte anses vara energieffektivt. Effektiviteten kan förbättras genom att höja på gränsen för inkoppling eller genom att isolera grundbotten. I det rådande fallet ansågs isolering av grundbotten vara opraktiskt på grund av att ytan är ojämn och på grund av den låga höjden inne i krypgrunden. Installationskostnaden för isoleringen skulle vara hög och det beslöts därför att låta värmekällan vara påslagen större delen av tiden istället.

8

Sammanfattning

DENNA rapport har sammanfattat krypgrundsproblematiken och diverse existerande lösningar, samt redogjort för nytt material i form av teoretiskt härledda samband, evaluering av åtgärder såsom uppvärmning och ångspärrar, mätvärden från nästan två år och dessutom så har en regleralgoritm uppgjorts. Den här framtagna teoretiska modellen har även validerats mot insamlat mätdata och uppmätta förhållanden i den undersökta krypgrunden kan förklaras utgående från denna, speciellt effekten av en extra värmekälla vid blindbotten. Den framtagna regleralgoritmen antyder dessutom att en värmekälla placerad vid blindbotten sporadiskt kan användas vid sidan om kontinuerlig ventilation för att sänka RF vid behov.

Det har återigen konstaterats att endast ökad ventilation inte kan lösa krypgrundens fuktproblematik. Även den undersökta krypgrunden förblev för kall sommartid och resultatet var ett nettoflöde av fukt in till krypgrunden via ventilationen. Kraftig användning av värmekällan kunde eliminera detta flöde och få krypgrunden att fungera plan enligt. Trots att värmekällan användes över 70 % av tiden (maj–augusti) så antyder insamlade mätvärden att grundbotten förblev fuktig och detta anses bero på en kraftig fuktbelastning från underliggande mark. Resultaten belyser vikten av att minimera fukttillskottet från underliggande mark för att minska mängden fukt som ventilationen måste föra ut. Sammanfattningsvis kan konstateras att en värmekälla kraftigt kan minska på risken för biologisk påväxt men den bör kombineras med isolering av grundbotten, i mån av möjlighet, för att maximera uppvärmningen och för att spara energi.

Framtida forskning kunde utveckla det här gjorda arbetet genom att validera de framtagna teoretiska sambanden för ytterligare testgrunder som skiljer från den som undersöktes här. Det vore då skäl att speciellt undersöka krypgrunder med isolering mot grundbotten och hur en värmekälla påverkar förhållandena i dessa. Teoretiskt borde värmekällan, via strålning, i dessa fall kunna höja temperaturen signifikant vid grundbotten och slutresultatet borde bli att krypgrunden som helhet får en betydligt högre temperatur än om isoleringen saknades.

Litteratur

- Airaksinen, M., Pasanen, P., Kurnitski, J. & Seppänen, O. (2004). Microbial contamination of indoor air due to leakages from crawl space: a field study. *Indoor Air*, 14(1), 55–64.
- Anticimex. (2008). *300 000 villaägare med kryppgrund riskerar att drabbas av fukt- och mögelskador*. Anticimex. Hämtad 12 december 2013, från http://www.anticimex.com/PageFiles/2139/Anticimex_rapport_kryppgrund_2008.pdf
- Azetec. (u.å.). Sorptionsavfuktare. Hämtad 12 mars 2013, från <http://docs.acetec.se/PD/#/3/zoomed>
- Burke, S. (2007). Crawl spaces in wood framed single family dwellings in sweden: unwanted yet popular. *Structural Survey*, 25(1), 51–60.
- Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and mass transfer*. New York: McGraw-Hill.
- Erickson, B. & Zhai, Z. (2008). Evaluation of ventilation code requirements for building crawl spaces. *Building Simulation*, 1, 311–325.
- Försvarets materialverk. (2010). *Avfuktningsteknisk materielhandbok (ath)*. Försvarets materialverk. Hämtad 12 december 2013, från http://www2.autotech.se/mvif_online/pdf/ath/ath.pdf
- Giancoli, D. C. (2008). *Physics for scientists and engineers*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Hagentoft, C.-E. (2002). *Vandrande fukt och strålände värme*. Lund: Studentlitteratur.
- Hometalkoot.fi. (2012). Tunnistaa ja tutki riskirakenne. Hämtad 12 mars 2013, från http://devhometalkoot.mcasiakas.net/filebank/904-Tunnista_ja_tutkiriskirakenn_e2012.pdf
- Johansson, P., Svensson, T. & Ekstrand-Tobin, A. (2013). Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials. *Building and Environment*, 62, 201–209.
- Kurnitski, J. (2000). Crawl space air change, heat and moisture behaviour. *Energy and Buildings*, 32(1), 19–39.

- Kurnitski, J. (2001). Ground moisture evaporation in crawl spaces. *Building and Environment*, 36(3), 359–373.
- Kurnitski, J. & Matilainen, M. (2000). Moisture conditions of outdoor air-ventilated crawl spaces in apartment buildings in a cold climate. *Energy and Buildings*, 33(1), 15–29.
- Lehto, M. (2011). *Pientalon puisen roSSIPohjan tutkimusja korjausopas*. Aducate. Hämtad 12 december 2013, från http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-0334-1/urn_isbn_978-952-61-0334-1.pdf
- LFS. (u.å.). Krypgrundsisolering. Hämtad 12 mars 2013, från <http://www.lfs-web.se/Krypgrundsisolering.htm>
- Matilainen, M. & Kurnitski, J. (2003). Moisture conditions in highly insulated outdoor ventilated crawl spaces in cold climates. *Energy and Buildings*, 35(2), 175–187.
- Matilainen, M., Kurnitski, J. & Seppänen, O. (2003). Moisture conditions and energy consumption in heated crawl spaces in cold climates. *Energy and Buildings*, 35(2), 203–216.
- Miljöministeriet. (1998). *Kosteus, määräykset ja ohjeet*. Hämtad 12 december 2013, från <http://www.finlex.fi/data/normit/1918-c2.pdf>
- Munters. (2010). *Sorptionsavfuktare*. Hämtad 1 april 2013, från http://www.munters.se/upload/Related%20product%20files/M190Y_Teknisk_Manual.pdf
- Nevander, L. E. & Elmarsson, B. (1994). *Fukthandbok*. Mölnlycke: Svensk Byggtjänst.
- Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010). Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. *Proceedings Building XI, Florida*.
- Sedlbauer, K. (2002). Prediction of mould growth by hygrothermal calculation. *Journal of Building Physics*, 25(4), 321–336.
- Svensson, C. (2001). *Effekter av åtgärder i uteluftsventilerade krypgrunder med fukt- och mögelskador*. Lund: Lunds Universitet.
- Sveriges tekniska forskningsinstitut SP. (u.å.-a). Riskkonstruktioner. Hämtad 12 mars 2013, från <http://www.sp.se/sv/index/services/moist/risk/Sidor/default.aspx>
- Sveriges tekniska forskningsinstitut SP. (u.å.-b). Uteluftsventilerade kryprum - en riskkonstruktion? Hämtad 11 december 2013, från http://www.sp.se/sv/index/services/moist/crawl_space/Sidor/default.aspx
- Trygghetsvakten. (u.å.). Isolera krypgrunden? Hämtad 12 mars 2013, från <http://www.trygghetsvakten.se/om-krypgrunder/isolera-krypgrunden/>
- Wilson, G. W., Fredlund, D. & Barbour, S. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2), 151–161.

A Härledning av viktade medelvärden

Kapitel 3 presenterade väsentliga värme- och fuktflöden för en kryppgrund (illustreras på nytt i Figur A-1). Flödena resulterade i följande differentialekvationer för att beskriva kryppgrundsluftens temperatur och ånghalt.

$$V\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_{bb(k)} + \dot{Q}_{gb(k)} + \dot{Q}_{mur(k)} + \dot{Q}_{vent} \quad (\text{A-1})$$

$$V \frac{\partial v}{\partial t} = \dot{g}_{vent} + \dot{g}_{avdunstning} \quad (\text{A-2})$$

Dessa kan vid stationärt tillstånd beskrivas med:

$$\dot{Q}_{golv} - \dot{Q}_{bb(k)} + \dot{Q}_{värmekälla} = \dot{Q}_{bb(s)} \quad (\text{A-3})$$

$$-\dot{g}_{vent} = \dot{g}_{avdunstning} \quad (\text{A-4})$$

Användning av ekvationerna för värme- och fuktflöden från Kapitel 2 möjliggör specifika uttryck för temperatur och ånghalt. För temperaturen vid blindbotten ger insättning av Ekvation 2.1, 2.2 och 2.4:

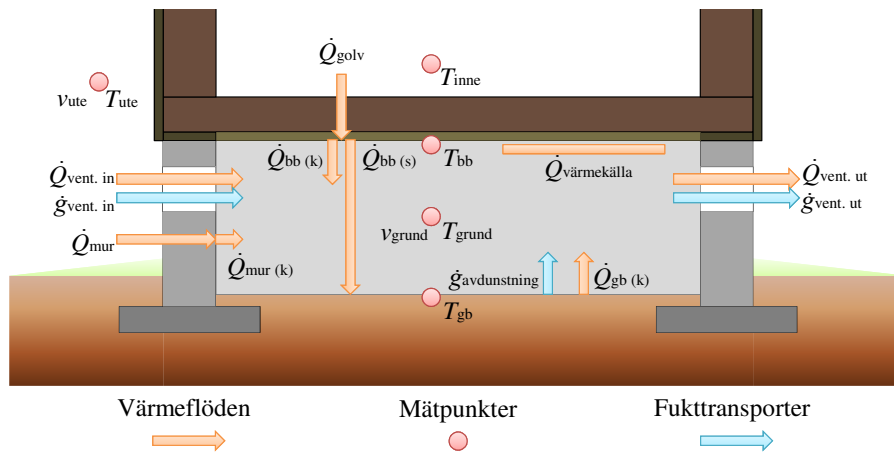
$$U_{golv}A(T_{inne} - T_{bb}) - \alpha_{bb}A(T_{bb} - T_{grund}) + \dot{Q}_{värmekälla} = \alpha_s A(T_{bb} - T_{gb}) \quad (\text{A-5})$$

Efter lite algebra och division med arean (A) erhålls för T_{bb} :

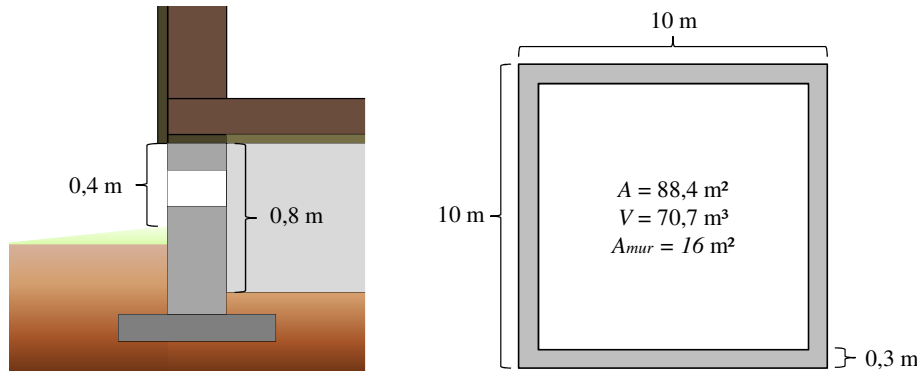
$$\begin{aligned} T_{bb} &= \frac{U_{golv}}{U_{golv} + \alpha_{bb} + \alpha_s} T_{inne} + \frac{\alpha_s}{U_{golv} + \alpha_{bb} + \alpha_s} T_{gb} + \\ &\frac{\alpha_{bb}}{U_{golv} + \alpha_{bb} + \alpha_s} T_{grund} + \frac{\dot{Q}_{värmekälla}}{U_{golv} + \alpha_{bb} + \alpha_s} \\ &= k_1 T_{inne} + k_2 T_{gb} + k_3 T_{grund} + k_4 \dot{Q}_{värmekälla} \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

T_{grund} är även beroende av T_{bb} och vid stationärt tillstånd fås från Ekvation A-1:

$$\dot{Q}_{bb(k)} = -\dot{Q}_{gb(k)} - \dot{Q}_{mur(k)} - \dot{Q}_{vent} \quad (\text{A-7})$$



Figur A-1: Fukt- och värmefflöden. (k = konvektivt flöde mellan yta och kryppgrundsluft, s = strålning mellan två ytor, bb = blindbotten och gb = grundbotten).



Figur A-2: Dimensioner för exempelgrund.

vilket med insättning av ekvationerna för värmetransport, division med arean och utbrytning av T_{grund} ger:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{grund}} &= \frac{\alpha_{\text{bb}}}{\alpha_{\text{bb}} + \frac{\dot{m}c_p}{A} + \alpha_{\text{bb}} + U_{\text{mur}} \frac{A_{\text{mur}}}{A}} T_{\text{bb}} + \\
 &\quad \frac{\alpha_{\text{gb}}}{\alpha_{\text{bb}} + \frac{\dot{m}c_p}{A} + \alpha_{\text{bb}} + U_{\text{mur}} \frac{A_{\text{mur}}}{A}} T_{\text{gb}} + \frac{\frac{\dot{m}c_p}{A} + U_{\text{mur}} \frac{A_{\text{mur}}}{A}}{\alpha_{\text{bb}} + \frac{\dot{m}c_p}{A} + \alpha_{\text{bb}} + U_{\text{mur}} \frac{A_{\text{mur}}}{A}} T_{\text{ute}} \quad (\text{A-8}) \\
 &= k_5 T_{\text{bb}} + k_6 T_{\text{gb}} + k_7 T_{\text{ute}}
 \end{aligned}$$

Insättning i Ekvation A-6 resulterar slutligen i att temperaturen vid blindbotten kan beskrivas med ett viktat medelvärde av temperaturen inomhus, utomhus och vid grundbotten samt en additiv term från värmekällan.

$$T_{\text{bb}} = \frac{k_1}{1 - k_3 k_5} T_{\text{golv}} + \frac{k_2 - k_3 k_6}{1 - k_3 k_5} T_{\text{gb}} + \frac{k_3 k_7}{1 - k_3 k_5} T_{\text{ute}} + \frac{\dot{q}_{\text{värmekälla}}}{1 - k_3 k_5} \quad (\text{A-9})$$

Konstanterna k kan bestämmas utgående från krypgrundens dimensioner och fastställda koefficientvärden från tidigare gjort forskning. Användning av värden från både Figur A-2 och Tabell A-1 ger då:

$$T_{\text{bb}} = 0,036 T_{\text{inne}} + 0,897 T_{\text{gb}} + 0,067 T_{\text{ute}} + \frac{\dot{q}_{\text{värmekälla}}}{5,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}} \quad (\text{A-10})$$

Ånghalten inne i krypgrundens kan härledas enligt samma metodik och insättning av Ekvation 2.11 och 2.12 i Ekvation A-4 ger:

$$\dot{V}(v_{\text{grund}} - v_{\text{ute}}) = \beta A(v_{\text{gb}} - v_{\text{grund}}) \quad (\text{A-11})$$

Följaktligen fås att även v_{grund} kan beskrivas som ett viktat medelvärde av v_{ute} och v_{gb} :

$$v_{\text{grund}} = \frac{\dot{V}}{\dot{V} + \beta A} v_{\text{ute}} + \frac{\beta A}{\dot{V} + \beta A} v_{\text{gb}} \quad (\text{A-12})$$

som återigen kan beskrivas med numeriska värden utgående från Figur A-2 och Tabell A-1.

$$v_{\text{grund}} = 0,16 v_{\text{ute}} + 0,84 v_{\text{gb}} \quad (\text{A-13})$$

Tabell A-1: Koefficient värden

Koefficient	Värde	Källa/Kommentar
U_{golv} inneluft–blindbotten	$0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	20 cm mineralull
U_{mur} uteluft–krypgrundsluft	$2,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	30 cm cement
ϵ för byggnadsmaterial	0,9	(Cengel & Ghajar, 2011)
α_{bb} (blindbotten)	$2,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	(Kurnitski & Matilainen, 2000)
α_{gb} (markyta)	$1,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	(Kurnitski, 2001)
α_{s} (strålning)	$4,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,9$ och $T_1 = 10^\circ \text{C}$
β	$0,0012 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	(Kurnitski, 2001)
ρ (luft)	$1,246 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	(Cengel & Ghajar, 2011)
c_p (luft)	$1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	(Cengel & Ghajar, 2011)
E (vatten)	$2478 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	(Cengel & Ghajar, 2011)
Ventilation		
air change per hour	1 ach	(Matilainen & Kurnitski, 2003)
\dot{V} (luft)	$0,0196 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$\dot{V} = \frac{\text{ach } V}{3600}$

B Specifikation av givare och aktuatorer

Temperatur/RF

Modell	Envic, HRT-103-C
Mätområde	Temperatur: -40...+70 °C, RF: 0...100 %
Noggrannhet	Temperatur: $\pm 0,3$ °C, RF: ± 2 % (0...90 %), ± 5 % (90...100 %)
Givartyp	Temperatur: Pt100, RF: kapacitiv
Matning	18...36 VDC

Linjära styrdon

Modell	Linak LA35
Slaglängd	30 cm
Matning	24 VDC

Fläktar

Modell	TD-Silent 160/100
Effekt	20 W
Matning	230 VAC

Värmekabel

Modell	Devi Pipeguard 10
Effekt	$10 \frac{\text{W}}{\text{m}}$ vid 10 °C
Matning	230 VAC

Yrkeshögskolan Novia har ca 4000 studerande och personalstyrkan uppgår till ca 380 personer. Novia är den största svenskspråkiga yrkeshögskolan i Finland som har examensinriktad ungdoms- och vuxenutbildning, utbildning som leder till högre yrkeshögskoleexamen samt fortbildning och specialiseringsutbildning. Novia har utbildningsverksamhet i Vasa, Jakobstad, Raseborg och Åbo. Yrkeshögskolan Novia är en internationell yrkeshögskola, via samarbetsavtal utomlands och internationalisering på hemmaplan. Novias styrka ligger i närvaron och nätverket i hela Svenskfinland. Novia representerar med sitt breda utbildningsutbud de flesta samhällssektorer. Det är få organisationer som kan uppvisa en sådan kompetensmässig och geografisk täckning. Högklassiga och moderna utbildningsprogram ger studerande en bra plattform för sina framtida yrkeskarriärer.

YRKESHÖGSKOLAN NOVIA
Fabriksgatan 1, 65100 Vasa, Finland
Tfn +358 (0)6 328 5000 (växel)
www.novia.fi

ANSÖKNINGSBYRÅN
PB 6, 65201 Vasa, Finland
Tfn +358 (0)6 328 5555
ansokningsbyran@novia.fi



Yrkeshögskolan Novia upprätthåller en publikations- och produktionsserie för att sprida information och kunskap om verksamheten såväl regionalt, nationellt som internationellt. Publikations- och produktionsserien är indelad i fem kategorier:
R - Rapporter • P - Produktioner • A - Artiklar • L - Läromedel • S -
Studerandes arbete

Läs våra senaste publikationer på www.novia.fi/FoU/publikation-och-produktion