

# Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak

Fallstudie med blinda beräkningar och  
utveckling av luftflödesmodell



Gabriel Odén  
Gustav Månhardt



**LUNDS**  
UNIVERSITET



# Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak

Fallstudie med blinda beräkningar och utveckling av  
luftflödesmodell

Gabriel Odén  
Gustav Månhardt

Examensarbete

Avdelningen för Byggnadsfysik  
Institutionen för Bygg- och miljöteknologi  
Lunds Universitet  
Box 118  
221 00 Lund

© Gabriel Odén och Gustav Månhardt

ISRN LUTVDG/TVBH—20/5104—SE(100)

Institutionen för bygg- och miljöteknologi

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Box 118

221 00 LUND

# Sammanfattning

**Titel:** **Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak:** Fallstudie med blinda beräkningar och utveckling av luftflödesmodell

**Författare:** Gabriel Odén & Gustav Månhardt

**Handledare:** Petter Wallentén, Avdelningen för Byggnadsfysik, Institutionen för Bygg- och miljöteknologi

S. Olof Mundt-Petersen, Avdelningen för Byggnadsfysik, Institutionen för Bygg- och miljöteknologi och Polygon|AK-konsult

Martina Stockhaus, PE Teknik & Arkitektur AB  
Jörgen Wadman, PE Teknik & Arkitektur AB  
Ken Hagrydh, PE Teknik & Arkitektur AB

**Examinator:** Lars-Erik Harderup, Avdelningen för Byggnadsfysik, Institutionen för Bygg- & Miljöteknologi

**Bakgrund:** Parallelltak är en takkonstruktion som är väl använd vid nyproduktion av småhus. Takkonstruktionen är svåråtkomlig för inspektion och risk föreligger för fuktskador. Det ställs i *BBR* höga krav på fuktsäkerhet i takkonstruktioner samtidigt som det saknas tydliga riktlinjer för hur kraven ska uppfyllas.

Fuktsäkerheten i parallelltak har undersökts i en mängd tidigare studier där luftomsättningen i spalten oftast ansatts till konstanta värden. I studierna har eventuella jämförelser mellan beräkningar och mätningar sällan skett med blinda metoder. Frågan är om undersökningar med konstant luftomsättning möjligen kan vara väl förenklade och om det går att erhålla god överensstämmelse mellan blinda beräkningar och mätningar.

**Syfte:** Arbetet syftade till att utreda fuktsäkerheten i ventilerade parallelltak genom att undersöka hur luftflödet i spalten kan modelleras samt hur relevant det är att beakta ett variabelt flöde för att erhålla tillförlitliga resultat i kopplade värme- och fuktberäkningar. Precisionen i blinda beräkningar för parallelltak undersöktes. Beräkningsmetodiken användes vid försök att identifiera lämpliga riktlinjer för utformning av parallelltak.

**Metod(er):**

En luftflödesmodell utformades i *MatLAB* (2019) för beräkning av timvisa luftomsättningar vilka användes som indata i det hygrotermiska beräkningsverktyget *WUFI Pro* (2019).

Precisionen i blinda beräkningar undersöktes genom beräkning för och jämförelse mot ett mätobjekt i form av ett bebott enbostadshus på Rådmansö utanför Norrtälje. Mätningar av temperatur, relativ fuktighet och fuktkvot över cirka 1,5 år för mätpunkter i 4 olika takpartier användes för validering av de blinda beräkningarna.

En parameterstudie gav eventuella riktlinjer och känsligheten i beräkningsförfarandet. I parameterstudien undersöktes spaltgeometri, utomhusklimat och fuktkällor från regnläckage samt luftläckage inifrån.

Studien är avgränsad till välisolerade parallelltak med luftspalt som ventileras från takfot till takfot (utan ventileradnock), med taktäckning av plåt eller papp. Mätningar av temperatur och relativ fuktighet i luftspalten samt fuktkvot i den luftspaltsbildande läkten användes. Beräknade luftomsättningar validerades således inte i direkt form utan sekundärt genom jämförelse mellan uppmätta värden och blint beräknade fuktnivåer.

**Slutsatser:**

- En luftflödesmodell eller lämpligt vald konstant luftomsättning kan implementeras vid blinda hygrotermiska beräkningar och ge god överensstämmelse med mätningar.
- Implementerad luftflödesmodell gav i de flesta fall bättre överensstämmelse med uppmätta värden än beräkning med den konstanta omsättning som rekommenderas i *RäknaF*.
- Då faktiska förhållanden eftersträvas i blinda beräkningar identifierades begynnelsefuktigheten, materialparametrar för det undersökta materialet samt grad av skuggning som viktiga.
- Tätheten mot regninträngning och luftläckage inifrån, i kombination med utomhusklimatet, var de viktigaste av de undersökta parametrarna för säkerställande av fuktsäkerheten i konstruktionen.
- Spaltens specifika utformning var relativt oviktig vid säkerställande av fuktsäkerheten. Beräkningsresultaten indikerade att en lägre omsättning är något mer gynnsam än en högre.

**Nyckelord:** Parallelltak, WUFI, blinda beräkningar, varierad luftomsättning, luftflödesmodell, fuktsäkerhet, MRD, termisk drivkraft, klimatdata, ventilerad luftspalt, värme och fukttransport, konvektion, analytisk lösning, fallstudie





## Abstract

Parallel roofs are commonly used in Sweden when constructing new small house buildings and are also difficult to access for inspection. Furthermore, high demands are set in the Swedish building regulations, although there are no clear guidelines for their compliance. Many previous studies investigating moisture safety in parallel roofs applies a constant air exchange in the ventilated air cavity. In studies where calculations are compared with measurements, it is rarely done blindly. This study aimed to investigate the described problems, in a parallel roof ventilated from eave to eave, by examining how the varying air flow in the cavity could be modeled and the relevance of considering this variation in coupled heat and moisture calculations. The accuracy of moisture safety assessments using blind calculations (without knowledge of measurement results) in *WUFI Pro* (2019) were also studied. The results of the study indicated that it was possible to get high resemblance with measurements when using an air flow model for the air exchange in the cavity and applying that model to blind hygrothermal calculations. When real conditions are sought in blind calculations, this study identified that knowledge about the initial moisture content, material parameters for the investigated materials and the degree of shading, as the most important parameters for high compliance. To ensure moisture safety in a parallel roof, a water- and moisture proof construction in combination with the outdoor climate were identified as the most important parameters.



## Förord

Som en avslutande del av civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad på Lunds Tekniska Högskola utformades detta examensarbete omfattande 30 högskolepoäng. Arbetet är en utveckling av ett tidigare examensarbete om luftflödet i luftspalten i parallelltak av Svantesson och Säwén (2019) och undersöker även mätningar genomförda av S. Olof Mundt-Petersen i ett existerande parallelltak. Utformningen av arbetet har skett i samråd med både Martina Stockhaus (fd. Svantesson) och S. Olof Mundt-Petersen.

Vi har genom hela processen fått mycket värdefull rådgivning och hjälp från vår handledare på LTH, Petter Wallentén, både vad gäller rapportutformning men kanske främst gällande beräkningar och vetenskapligt förfarande. Vi vill därför rikta ett stort tack till Petter för den tid och engagemang han givit oss i vårt arbete! Vi vill även tacka de på institutionen för vänligt bemötande, hjälp i arbetet och tillhandahållande av arbetsplats.

Vi vill likaså tacka vår biträdande handledare på LTH och Polygon|AK-konsult S. Olof Mundt-Petersen för givande hjälp och råd i arbetet, inte minst utifrån ett konsultperspektiv, men även ett tack för förarbetet med och tillhandahållande av mätningar.

Slutligen vill vi rikta ett stort tack till Martina Stockhaus, Jörgen Wadman och Ken Hagrydh, från PE Teknik & Arkitektur, för den värdefulla handledning och hjälp de givit oss exempelvis genom veckovisa möten. Ett särskilt tack till Martina, för inspiration till val av ämne och gediget engagemang genom processen. Vi vill även rikta ett tack till Toivo Säwén för rådgivning kring luftflödesmodellen. Till sist vill vi tacka PE Teknik & Arkitektur för tillhandahållande av arbetsplats och datorer och ett tack till våra kollegor på avdelningen i Malmö för varmt bemötande, trevligt sällskap och givande diskussioner.

*Lund i maj 2020*

*Gabriel Odén och Gustav Månhardt*



# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Syfte och frågeställningar.....	2
1.3	Avgränsningar .....	3
1.4	Metodik.....	3
1.5	Tidigare forskning och studier.....	4
2	Teori .....	7
2.1	Parallelltak .....	7
2.2	Luftspalt.....	8
2.2.1	Termisk drivkraft.....	9
2.2.2	Drivkraft på grund av vind .....	12
2.2.3	Tryckfall på grund av friktion .....	12
2.2.4	Tryckfall vid engångsmotstånd.....	13
2.3	Fukt.....	14
2.3.1	Fukttransport.....	15
2.3.2	WUFI.....	18
2.3.3	Krav BBR .....	18
2.3.4	Mögelmodell.....	19
3	Mätobjekt.....	23
4	Metod.....	27
4.1	Hygrotermiska beräkningar .....	27
4.1.1	Klimatdata .....	28
4.1.2	Luftflödesmodell .....	30
4.1.3	Läckagemodell.....	32
4.1.4	WUFI-beräkningar.....	33
4.2	Beräkningsgång och validering .....	36
4.2.1	Blinda beräkningar .....	37
4.2.2	Jämförelse, förbättringar och avvikelseanalys.....	38
4.2.3	Parameterstudie .....	42
5	Resultat och analys .....	47
5.1	Termisk påverkan i luftflödesmodell.....	47
5.2	Validering .....	48
5.2.1	Mätningar .....	48
5.2.2	Validering av blinda beräkningar .....	49
5.3	Förbättring av modell och avvikelseanalys .....	57
5.3.1	Begynnelsefuktkvot.....	57
5.3.2	Materialparametrar för råspont.....	58
5.3.3	Vind.....	60
5.3.4	Slagregnsinträngning och luftläckage inifrån.....	60
5.3.5	Skuggning .....	62
5.3.6	Lösning av numeriskt fel i WUFI.....	64
5.3.7	Konstant luftomsättning .....	64
5.3.8	Förändrad isolertjocklek.....	65

5.4	Parameterstudie .....	65
5.4.1	Spaltgeometri och orientering .....	65
5.4.2	Klimat .....	69
5.4.3	Optimal omsättning .....	74
5.5	Bedömning av MRD-modellen som verktyg.....	76
6	Diskussion .....	79
7	Slutsats.....	83
8	Vidare forskning.....	85
	Referenser.....	87
	Bilagor .....	93
	Bilaga A - Klimatdata för mätobjekt .....	93
	Bilaga B - Indata till beräkningar .....	95
	Bilaga C - Samtliga mätresultat.....	97
	Bilaga D - Beräkningsresultat parameterstudie .....	99
	Bilaga E - Resultat vid olika lösningsmetoder i WUFI .....	100

# 1 Inledning

Den här studien har undersökt parallelltak ur ett fuktsäkerhetsperspektiv. I arbetet var fokus på luftspalten i konstruktionen, hur luftflödet i denna spalt kunde modelleras samt hur fuktsäkerheten i konstruktionen påverkades av luftflödet. Nedan ges en introduktion till studien, vilka frågeställningar som besvarades, vilken metodik som tillämpades samt tidigare forskning och studier i ämnet.

## 1.1 Bakgrund

Parallelltak är en takkonstruktion som idag till viss del ersatt kallvindar i småhusbyggande. Enligt Eriksson (2017) byggs parallelltak på mellan 15-50 % av småhus i södra Skåne. Bakgrunden är att det under en längre tid varit känt att det är vanligt med fuktproblem på kallvindar (Boverket, 2009; Hägerhed Engman & Samuelsson, 2006) och en lösning som tidigare föreslagits på dessa problem är att istället bygga parallelltak, för att på så vis minska den uppvärmda vindsdelen (Hägerhed Engman & Samuelsson, 2006). Parallelltak medger dessutom större boyta och kan således vara ekonomiskt motiverat.

Vindsutrymmen är, till skillnad från luftspalten i parallelltak, inspekterbara och förekommande skador kan därför upptäckas. För parallelltak finns en risk att skador förekommer, eller kommer att uppstå, men som inte upptäckts. Det förefaller således vara av stor vikt att metoden för projektering av parallelltak är tillförlitlig och representativ så risken för fuktrelaterade skador minimeras.

I takt med ökade energikrav har mängden isolering ökat i takkonstruktioner. De yttre delarna i ett parallelltak har då blir kallare och liknar alltmer en kallvind med risk för liknande fuktproblematik. Likheten framgår vidare av att modeller som tillämpas för beräkning av fuktsituationen på kallvindar och parallelltak ofta är likartade (Mundt-Petersen, 2015) varför de olika konstruktionerna också kan förväntas erhålla liknande fuktproblematik.

De riktlinjer som finns i dagsläget gällande utformning av parallelltak beaktar bland annat val av material och isolertjocklek (Mundt-Petersen, 2016). I vissa fall finns allmänna råd om luftspaltens utformning, exempelvis rekommenderad spalthöjd om minst 50 mm vid stora tak (Arfvidsson, Harderup & Samuelsson, 2017). I Sverige finns dock inga tydliga krav eller riktlinjer och det råder osäkerheter kring omfattningen av luftomsättning i luftspalten i ventilerade parallelltak. I både vetenskapliga och ingenjörsmässiga fuktberäkningar används därför vanligen en schablon om konstant luftomsättning över hela den studerade tidsperioden, se exempelvis *Fuktsäkra träkonstruktioner II* av Mundt-Petersen (2016) eller rekommendation i beräkningshjälpmedlet *RäknaF* (Wallentén, 2018). Tidigare forskning (Gullbrekken, Kvande & Time, 2017; Falk, 2010) där luftomsättningen uppmätts i parallelltak respektive ytterväggar visar på stora variationer både över dygnet och året. För att efterlikna verkliga förhållanden i fuktberäkningar bör denna variation därför beaktas.

Med hänsyn till det frekventa byggandet av parallelltak och bristen på tydliga riktlinjer för utformandet undersöktes konstruktionen vidare i denna studie. Den begränsade möjligheten till inspektion samt kraven i *BBR* (BFS, 2014:3) motiverar vikten av väl utförd fuktsäkerhetsprojektering. Likheten med kallvindar och medföljande fuktproblematik samt konstaterad stor variation i luftomsättningen underbyggde en utveckling av beräkningsmodellen för parallelltak, till en som även beaktade varierande luftomsättning i luftspalten.

I denna studie undersöktes fuktsäkerheten i parallelltak genom utveckling av en modell för beräkning av luftomsättning i spalten. Modellen är en vidareutveckling av en modell för termisk drivkraft i parallelltak av Svantesson & Säwén (2019). Fuktsäkerheten studerades genom kopplade värme- och fuktberäkningar (hygrotermiska beräkningar) som blint jämfördes med mätningar av temperatur, relativ fuktighet och fuktkvot för ett parallelltak i en bebodd villa på Rådmansö utanför Norrtälje, norr om Stockholm. Mätobjektet valdes då takkonstruktionen är ett nyproducerat, välisolerat parallelltak med varierad konstruktionsutformning vilket medgav bredare möjlighet till validering. Ett flertal mätningar i objektet gjordes även tillgängliga för studien.

### 1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med den här studien var att undersöka hur luftflödet i luftspalten i parallelltak varierar samt relevansen av att beakta denna variation vid hygrotermiska beräkningar. Syftet var även att undersöka noggrannheten i beräkningarna och uppföra förslag till riktlinjer avseende takkonstruktionen och geometrier på luftspalten som ger en fuktsäker konstruktion vid olika konstruktionsutföranden och geografiska förutsättningar.

Syftet preciserades genom följande frågeställningar:

- Hur kan varierad luftomsättning i ett parallelltak med stängdnock modelleras?
- Hur väl stämmer blinda hygrotermiska beräkningar överens med mätningar av temperatur och relativ fuktighet i luftspalten, samt fuktkvot i den luftspaltsbildande läkten?
- Vilken inverkan ger implementering av varierande luftomsättning, jämfört med lämpligt vald konstant luftomsättning, i beräkning för fuktsäkerhetsbedömning?
- Hur påverkas beräkningar för fuktsäkerhetsbedömning, med luftflödesmodell för varierande luftomsättning, vid förändringar av spaltgeometri, klimat och byggnadsorientering?



### 1.3 Avgränsningar

Denna studie avgränsades, med hänsyn till omfattningen på arbetet, till att endast beakta välisolerade parallelltak, som ventileras från takfot till takfot (d.v.s. stängda i nock) genom naturliga drivkrafter och har fuktkänsligt material (exempelvis råspont) i anslutning till luftspalten. I studien beaktades endast taktäckningar av plåt. Taktäckning av papp bedöms vara jämförbar med plåt. Effekten av ett eventuellt snötäcke ovanpå taket beaktades inte. Geografiskt studerades endast konstruktioner placerade i Sveriges varm- och kalltempererade klimat.

Luftflödet i luftspalten modellerades i en luftflödesmodell. Denna validerades endast indirekt, genom att jämföra beräknade och uppmätta temperaturer och relativa fuktigheter, eftersom luftomsättningar ej var uppmätta. Valideringen skedde enbart för två olika konstruktionstyper, båda välisolerade parallelltak, med olika lutning och olika orientering men på samma geografiska plats och med stängd nock. Beräkning av luftflödet i luftspalten baserades på antagande om jämvikt vid varje timme.

### 1.4 Metodik

Arbetet inleddes med en litteraturstudie för att bestämma studiens roll i förhållande till tidigare forskning och studier, samt fastlägga den vetenskapliga grunden i ämnet. Här eftersöktes forskning och studier som undersökt fuktsäkerhet i parallelltak genom hygrotermiska beräkningar och/eller mätningar. Även forskning om luftflöde i luftspalter, både i parallelltak och ventilerade fasader, eftersöktes.

Härefter följde arbetet med utformandet av en hygrotermisk modell som beaktar det varierande luftflödet i spalten. Den hygrotermiska delen utformades, analogt med tidigare studier, i beräkningsprogrammet WUFI medan luftflödesdelen utgick från teorier om flöde varefter en luftflödesmodell formulerades. Luftflödet beräknades således analytiskt i luftflödesmodellen, utifrån drivkrafterna vind och termik. Flödet var indata till de hygrotermiska beräkningarna.

Blinda beräkningar, beräkningar genomförda utan vetskap om mätresultatet validerades mot tillgängliga mätningar genom att resultatet av mätningar och beräkningar jämfördes avseende klimatet i luftspalten. Blinda beräkningar av detta slag anses motsvara konsultmässiga bedömningar i projekteringsskedet (Mundt-Petersen, 2015).

Beräkningsmetoden undersöktes sedan genom en parameterstudie där resultatets påverkan av förändring i utvalda parametrar studerades. Förändringen studerades utifrån beräknad risk för skada genom mikrobiell påväxt. Parameterstudien påvisade känsligheten i beräkningsmodellen och gav svar på vilka parametrar som var viktiga ur ett fuktsäkerhetsperspektiv.

## 1.5 Tidigare forskning och studier

I detta avsnitt redogörs för tidigare forskning och studier, huvudsakligen från Sverige, inom de ämnesområden som avses behandlas i detta arbete, det vill säga *fuktsäkerhet i parallelltak* samt *luftomsättning i en luftspalt*.

Tidigare examensarbeten med frågeställningar som avser fuktsäkerhet i parallelltak väljer att fokusera på olika områden. Det finns studier som utgår ifrån numeriska beräkningar (Latif Aref & Ehsani, 2013; Eriksson, 2017; Georgsdottir & Sawirs, 2012; Lindgren, 2017), praktiska mätningar (Åström, 2017) eller en jämförelse av de båda (Roil Beto & Rada, 2016; Rikner & von Platen, 2015; Johansson & Larsson, 2016), för att dra slutsatser om fuktsäkerheten. I många av arbetena konstateras vissa problem med konstruktionen ur fuktsäkerhetssynpunkt och en del lärdomar kan dras för fortsatta studier. Exempelvis erhålls fuktproblem vid högt ansatt byggfukt (Roil Beto & Rada, 2016; Ehsani & Latif Aref, 2013) och Johansson & Larsson (2016) påvisade i sina analyser potentiellt skadlig mikrobiell aktivitet på majoriteten av provbitarna. I jämförelserna mellan beräkningsresultat och mätresultat har överensstämmelsen varit låg. Dock har luftomsättningen i luftspalten i dessa studier ansatts till ett schablonmässigt konstant värde vilket inte ger svar på hur bedömningen av fuktsäkerheten förändras då luftomsättningens variation över beräkningsperioden beaktas.

I sin doktorsavhandling har Gullbrekken (2018) undersökt fuktsäkerhet i parallelltak och luftflödet i luftspalten i synnerhet. Genom en analys av skadefall erhållna från SINTEF påvisas att nederbörd och luftläckage inifrån är de dominerande källorna till fuktskador i parallelltak. Vidare presenterar Gullbrekken vindtryckskoefficienter för beräkning av luftomsättningen i ett parallelltak som ventileras från takfot till takfot och konstaterar att dessa beror av vindens anblåsningsvinkel. Gullbrekken visar också att det finns ett tydligt samband mellan vindhastigheten och lufthastigheten i luftspalten. Till sist upprättas riktlinjer på utformningen av luftspalten, dock med huvudsakligt syfte att undvika problem med snösmältning.

Mundt-Petersen och Harderup har i två studier studerat hur luftomsättningen i luftspalten påverkar fuktsäkerheten i träregelväggar med ventilerad luftspalt. I en av studierna konstateras det att luftomsättningen bakom fasadbeklädnaden i en träkonstruktion är av stor betydelse för ett tillförlitligt resultat (Mundt-Petersen & Harderup, 2010). Ett inkorrekt antagande om luftomsättningen kan leda till betydande fel i resultatet. Hur fuktsäkerheten i en ventilerad yttervägg förändras om luftomsättningen i luftspalten varierar eller ansätts konstant under hela simuleringsperioden har också studerats av Mundt-Petersen & Harderup (2011). Relativa fuktigheter och temperaturer beräknas i denna studie med varierad och konstant luftomsättning och jämförs med uppmätta värden. Resultaten visar att beräkningar med endast en vindberoende luftomsättning inte nödvändigtvis ger en bättre korrelation med uppmätta värden än beräkningar med konstant luftomsättning så länge flödet i spalten är så pass högt att all inträngande fukt ventileras ut omgående.

Mundt-Petersen (2015) jämför i sin doktorsavhandling blinda hygrotermiska beräkningar med mätningar på olika positioner i väggar och tak. Det konstateras att det går att erhålla tillräckligt god överensstämmelse vilket således visar att beräkningsprogram är ett bra verktyg för att bedöma risken för uppkomsten av kritiska fuktillstånd så länge trovärdiga start- och randvillkor appliceras. Vidare dras slutsatser kring vilka parametrar som har störst påverkan på fuktsäkerheten i träkonstruktioner. Däribland noteras inne- och uteklimat, luftflödet i spalten och alla former av läckage som inflytelserika. Det konstateras även att nordsida är dimensionerande för tak, att material inne i konstruktionen (förutom ångspärren) ska vara ånggenomsläppliga och att det är viktigt att ansätta rätt luftflöde för att erhålla överensstämmelse med mätningar.

Mundt-Petersen (2016) har studerat fuktsäkerheten i välisolerade takkonstruktioner av trä. Resultatet av studien visar att risk föreligger för fuktskador och mögelproblem i parallelltak. Störst risk råder långt ut i konstruktionen, särskilt på råsponsens insida. Han konstaterar även att luftflödet i luftspalten ska vara så lågt som möjligt men samtidigt tillräckligt högt för att möjliggöra bortförsl av inträngande fukt. Den viktigaste åtgärden för att förbättra fuktsäkerheten i konstruktionen är att fokusera på täthet mot läckage från regn och fuktig luft inifrån.

Falk (2010) har i sin licentiatuppsats studerat luftspalten i en yttervägg och dess hygrotermiska egenskaper. En modell för beräkning av luftomsättning i spalten utvecklades, vilken verifierades mot praktiska mätningar i en fullskalig spaltuppställning. Jämförelse av beräknade och uppmätta luftomsättningar visade överensstämmelse inom en felmarginal motsvarande 10 procent. Studien påvisade även att skillnaden i uttorkningstid mellan spaltbredderna 25 och 40 millimeter är liten. Uttorkningstiden förlängdes dock markant vid kortare spaltbredder (mellan 5 och 10 millimeter) och liknade de uttorkningstider som erhålls för konstruktioner som helt saknar luftspalt.

Luftflöden i parallelltak har tidigare undersökts av Svantesson och Sävén (2019). I detta examensarbete undersöktes luftflöden i luftspalten som orsakas av termisk drivkraft och hur spaltens utformning påverkar flödet. De har använt sig av experiment och simuleringar men även utformat en beräkningsmodell för beräkning av flödet som orsakas av termik. Beräkningsmodellen visade god korrelation med uppmätta värden och simuleringar.

Parallelltak har även undersökts i en studie av Johansson (2010) där mätningar av temperatur och relativ fuktighet uppmätts i två likartade takkonstruktioner med olika taktäckningsmaterial. Det konstateras att taktäckningsmaterial ska väljas med stor försiktighet med avseende på hygrotermiska egenskaper.

Sammanfattningsvis konstateras av tidigare forskning och studier att fuktsäkerhet i parallelltak har studerats tidigare även om luftomsättningens variation inte utförligt beaktats i hygrotermiska studier. Den varierande luftomsättningen i luftspalten har studerats i ett fåtal studier, bland annat för ytterväggar och parallelltak, men inte i hygrotermiska beräkningar för fuktsäkerhetsbedömning. Det anses därmed vara relevant att kombinera angreppssätten och studera fuktsäkerheten samtidigt som luftflödets variation beaktas.

## 2 Teori

Nedan presenteras bakomliggande teori och resonemang, såväl som tidigare forskning, modeller och datorprogram som låg till grund för och användes i studien.

### 2.1 Parallelltak

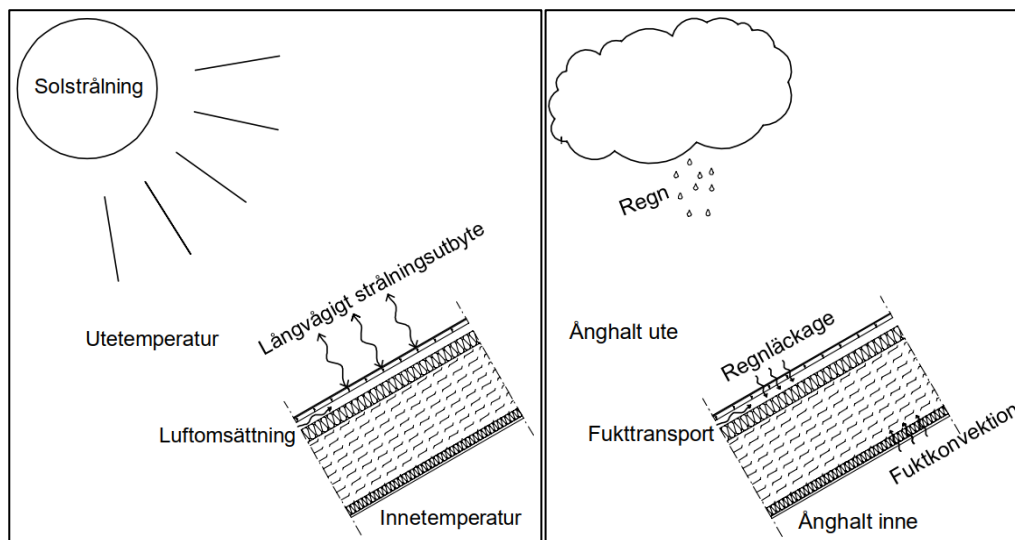
Parallelltak definieras i regel som tak där innerytan och taktäckningen är parallella. I parallelltak återfinns vanligtvis en luftspalt, mellan vindskiva och råspont eller motsvarande undertakstäckning, som ventileras med uteluft (Arfvidsson, et al., 2017).

Tak kan indelas i varma och kalla tak. Ett varmt tak definieras som ett tak där värmeflödet genom takets yttre delar är lika stort som för takets inre delar (Arfvidsson, et al., 2017). Parallelltak klassas i denna indelning som ett varmt tak om det är låg luftomsättning i spalten. I ett kallt tak fördelas istället en stor del av värmeflödet inifrån till en ventilerad luftspalt eller ett ventilerat vindsutrymme och förs genom luftflödet ut ur konstruktionen.

I takt med en ökad mängd isolering minskar värmeflödet genom taket vilket gör att temperaturen på takytan blir kallare på såväl varma som kalla tak. En indelning i ventilerade och oventilerade takkonstruktioner kan därför vara mer relevant (Arfvidsson, et al., 2017). Studien avsåg just välisolerade ventilerade parallelltak vilka, med hänsyn till mängden isolering och i viss mån luftomsättningens storlek, förväntas vara kalla i de yttre delarna.

De faktorer som påverkar de hygrotermiska beräkningarna för ett parallelltak redovisas nedan. Värmebalansen påverkas av temperaturer på in- och utsidan samt konvektion genom luftomsättningen i spalten. Dessutom påverkar strålningsutbytet värmebalansen, dels mängden inkommande kortvågig solstrålning, dels långvågigt strålningsutbyte med omgivningen. Värmebalansen illustreras i *figur 2.1*.

Fuktbalansen är beroende av ånghalten på in- och utsidan samt den fukttransport som luftomsättningen i luftspalten ger upphov till. Balansen påverkas även av förekomsten av vatten i flytande form, i detta fall regn, samt eventuella läckage i form av regnläckage och fuktkonvektion inifrån. Faktorerna i fuktbalansen illustreras i *figur 2.2*.



Figur 2.1 - Faktorer i termisk balans, parallelltak

Figur 2.2 - Faktorer i fuktbalans, parallelltak

Fuktbalansen och den termiska balansen ovan utvecklas i övriga teoriavsnitt.

## 2.2 Luftspalt

Luftspalten i parallelltak syftar till att evakuera fukt som kommer in i takkonstruktionen, exempelvis genom konvektion inifrån eller slagregnsinträngning utifrån (Arfvidsson, et al., 2017). Utan denna möjlighet finns en risk att fukt ackumuleras i konstruktionen och kritiskt höga fuktnivåer uppnås, med risk för fuktskador (Georgsdottir & Sawirs, 2012).

Luftströmningens storlek i en spalt bestäms utifrån att den totala tryckskillnaden över spalten (drivkraften som uppstår av termik och vind)  $\Delta P_{driv}$  ska vara lika stor som summan av de tryckfall som uppstår i spalten. Tryckfall i spalten uppstår genom friktion mot spaltens ytor  $\Delta P_{friktion}$  samt av engångsmotstånd vid inlopp, taknock och utlopp  $\Delta P_{engångsförluster}$ . En lufttrycksbalans för en luftspalt kan tecknas enligt *ekvation (2.1)* (Falk, 2010):

$$\Delta P_{driv} = \Delta P_{friktion} + \sum \Delta P_{engångsförluster} \quad (2.1)$$

## 2.2.1 Termisk drivkraft

Den termiska drivkraften i luftspalten i parallelltak har tidigare undersökts av Svantesson & Säwén (2019). Drivkraften beror av tryckskillnad som uppstår av skillnad i densitet vid olika temperaturer och kan tecknas enligt *ekvation (2.2)* (Hagentoft, 1991).

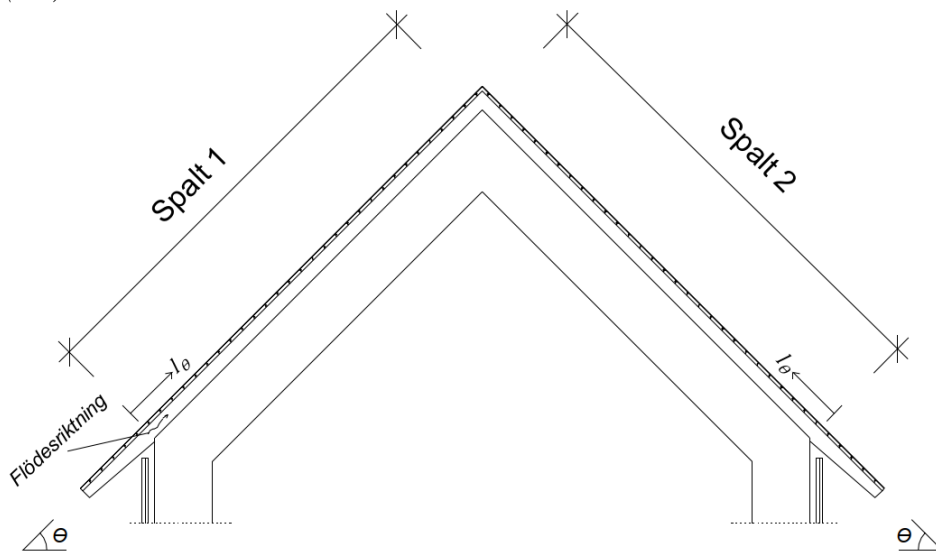
$$\Delta P_{termisk} = g \cdot \beta \cdot \rho_a \cdot \hat{y} \oint_{\Gamma} T_c(\vec{r}) - T_{ref} \overrightarrow{d\vec{r}}$$

$$\xrightarrow{\beta = \frac{1}{T_c(\vec{r})}} \Delta P_{termisk} = g \cdot \rho_a \cdot \hat{y} \oint_{\Gamma} 1 - \frac{T_{ref}}{T_c(\vec{r})} \overrightarrow{d\vec{r}} \quad (2.2)$$

Där:

$\Delta P_{termisk}$	är tryckskillnaden på grund av termisk drivkraft [Pa]
$g$	är gravitationskonstanten [ $m/s^2$ ]
$\beta$	är volymutvidgningskoefficienten för en ideal gas [1/K]
$\rho_a$	är densiteten för omgivande luft [ $kg/m^3$ ]
$\hat{y}$	är enhetsvektorn riktad parallellt men motsatt $g$ [-]
$\Gamma$	är sträckningen på kurvan som avses (i denna studie spalltlängden) [m]
$T_{ref}$	är en referenstemperatur, väljs som utetemperatur [K]
$T_c(\vec{r})$	är temperaturen längs luftkanalens riktning $\vec{r}$ [K]

För ett parallelltak med slutennock enligt *figur 2.3* kan uttrycket tecknas enligt *ekvation (2.3)*.



Figur 2.3 - Parallelltak med sluten nock, definierade riktningar och benämningar

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{termisk} &= \\
 &= g \cdot \rho_{ute} \cdot \sin(\theta) \left( \int_0^L 1 - \frac{T_{ute}}{T_{spalt\ 1}(l_\theta)} dl_\theta + \int_L^0 1 - \frac{T_{ute}}{T_{spalt\ 2}(l_\theta)} dl_\theta \right) \\
 &= g \cdot \rho_{ute} \cdot \sin(\theta) \cdot T_{ute} \int_0^L \frac{1}{T_{spalt\ 2}(l_\theta)} - \frac{1}{T_{spalt\ 1}(l_\theta)} dl_\theta
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Där:

- $\rho_{ute}$  är densiteten för utomhusluften [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\theta$  är taklutningen [ $^\circ$ ]  
 $L$  är en spalts totala längd (mätt i taklutningens riktning) [m]  
 $T_{spalt}(l_\theta)$  är lufttemperaturen i spalten som funktion av spaltlängden (mätt i taklutningens riktning) [K]  
 $T_{ute}$  är temperaturen i utomhusluften [K]

Temperaturen i spalten beror på värmeutbytet mellan såväl inne- som uteklimatet och påverkas därför av infallande solstrålning, långvågigt strålningsutbyte, lufttemperaturer ute och inne samt värmemotstånd för takets samtliga delar. Dessa parametrar kan omsättas i en effektiv temperatur  $T_0$  (den temperatur som uppnås efter lång tid utan luftomsättning) och ett effektivt värmemotstånd  $R_0$  enligt det termiska nätverk som presenteras i *figur 2.4*. Lufttemperaturen i spalten kan utifrån detta räknas ut enligt *ekvation (2.4)* (Arfvidsson, et al., 2017). Temperaturen i spalten beror även av eventuella fasomvandlingar, exempelvis avdunstning av fukt, vilket inte beaktas.

$$T_{spalt}(l_\theta) = T_0 - (T_0 - T_{in}) \cdot e^{-l_\theta/L_0} \tag{2.4}$$

Där:

- $T_0$  är effektiv temperatur, som beaktar allt värmeutbyte mellan luftspalten och omgivande ytor [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $T_{in}$  är temperaturen vid spaltens inlopp [ $^\circ\text{C}$ ]

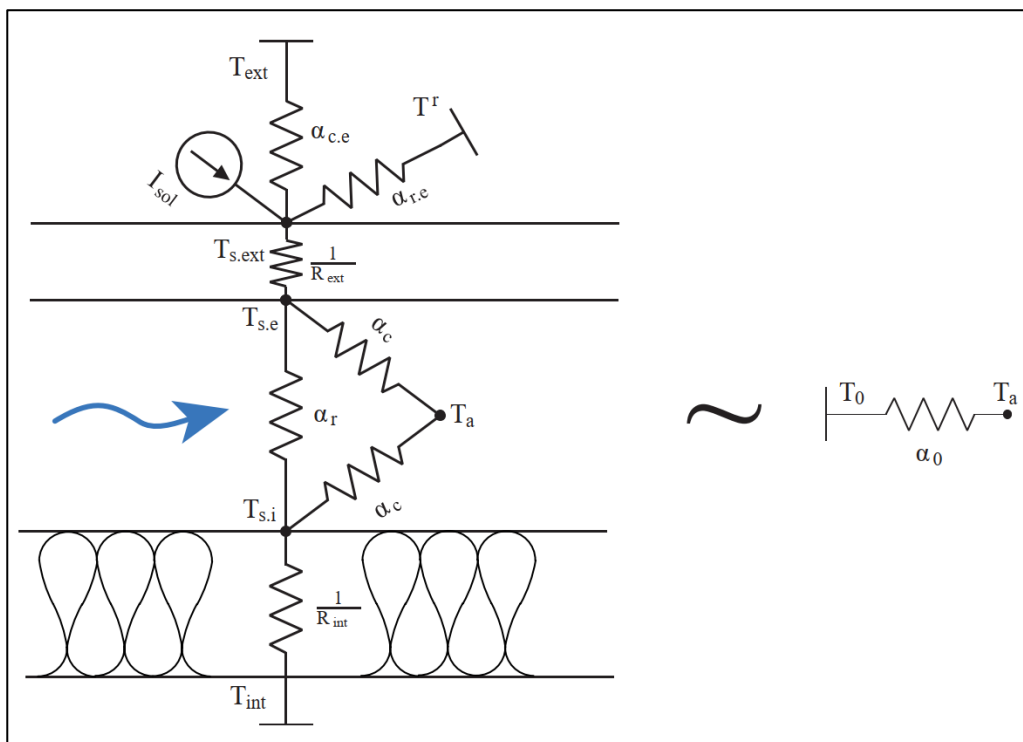
Och

$$L_0 = \rho \cdot c \cdot h_{spalt} \cdot u \cdot R_0 \tag{2.5}$$

Där:

- $\rho, c$  är densitet [ $\text{kg/m}^3$ ] respektive värmekapacitet [ $\text{J/kg,K}$ ] för luft  
 $h_{spalt}$  är luftspaltens höjd [m]  
 $u$  är lufthastigheten i spalten [m/s]  
 $R_0$  är takkonstruktionens effektiva värmemotstånd [ $\text{m}^2, \text{K/W}$ ], definierat genom  $\alpha_0$  i *figur 2.4* ( $R_0 = 1/\alpha_0$ )





Figur 2.4 - Termiskt nätverk för luftspalt i parallelltak reducerat till en effektiv temperatur  $T_0$  och ett effektivt värmeövergångsmotstånd  $\alpha_0$ . Figur av Svantesson & Säwén (2019), med tillstånd

I figur 2.4 redovisas hur temperaturen i en luftspalt  $T_a$  beror av infallande solstrålning  $I_{sol}$ , motstrålande temperatur  $T_r$ , innetemperatur  $T_{int}$  och utetemperatur  $T_{ext}$ . Beroendet bestäms genom värmeövergångskoefficient

- på grund av konvektion i spalten  $\alpha_c$  [W/m<sup>2</sup>,K]
- för strålning mellan spaltens innerytor  $\alpha_r$  [W/m<sup>2</sup>,K]
- för konvektion och strålning vid yttre ytan  $\alpha_{c,e}$  och  $\alpha_{r,e}$  [W/m<sup>2</sup>,K].

För övriga konstruktionen bestäms beroendet av värmemotstånd för material innanför och utanför spalten,  $R_{int}$  respektive  $R_{ext}$ . Temperaturen i spalten kan bestämmas genom att reducera nätverket enligt högra sidan i figuren till en effektiv temperatur  $T_0$  och en effektiv värmeövergångskoefficient  $\alpha_0$  som beaktar beroendet till samtliga, ingående parametrar. Exakt hur denna reduktion genomförs redovisas av Svantesson och Säwén (2019, pp. XXIV-XXVI).

## 2.2.2 Drivkraft på grund av vind

Drivkraften på grund av vind beror av den tryckskillnad som uppstår mellan lovart- och läsidan på grund av vindövertryck respektive vindundertryck. Tryckskillnaden kan beräknas enligt *ekvation (2.6)* (Arfvidsson, et al., 2017).

$$\Delta P_{vind} = \Delta c_p \cdot \frac{\rho_{ute} \cdot u_{vind}^2}{2} \quad (2.6)$$

Där:

$\Delta P_{vind}$	är tryckskillnaden på grund av vind [Pa]
$\Delta c_p$	är skillnaden i vindtryckscoefficient mellan lovart och läsidan
$\rho_{ute}$	är densiteten för utomhusluften [ $\text{kg/m}^3$ ]
$u_{vind}$	är vindhastigheten [m/s]

Vindhastigheten som används i denna ekvation är vanligen den uppmätta hastigheten på 10 meters höjd i öppet landskap och vindtryckscoefficienterna är således definierade utifrån densamma.

## 2.2.3 Tryckfall på grund av friktion

Luftens friktion mot spaltytorna ger upphov till ackumulerande tryckfall längs spalten. Med *Darcy-Weisbachs ekvation (2.7)* kan tryckfallet som friktionen ger upphov till beräknas (Kronvall, 1980).

$$\Delta P_{friktion} = \lambda \cdot \frac{L}{d_H} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.7)$$

Där:

$\Delta P_{friktion}$	är tryckfall [Pa]
$H$	är spaltens längd [m]
$d_H$	är hydraulisk diameter [m]
$\rho$	är luftens densitet i spalten [ $\text{kg/m}^3$ ]
$u_m$	är medelhastigheten hos luftströmmen [m/s]
$\lambda$	är en friktionsfaktor [-]

Friktionsfaktorn i *ekvation (2.7)* beror i sin tur av flödets strömningstillstånd enligt:

$$\text{För } Re < 2300: \lambda = 64/Re$$

$$\text{För } Re > 3500: \lambda = \left( 2 \cdot \lg \left( -\frac{4,793}{Re} \cdot \lg \left( \frac{10}{Re} + 0,2 \cdot \frac{\kappa}{d_H} \right) + 0,2698 \cdot \frac{\kappa}{d_H} \right) \right)^{-2} \quad (2.8)$$

Där:

$Re$	är Reynolds tal [-]
$\kappa$	är sandråheten [m]

Ett luftflödes strömningstillstånd i en luftspalt är antingen laminärt, turbulent eller i en övergångsfas mellan de båda tillstånden. Med Reynolds tal  $Re$  kan det avgöras i vilket av tillstånden luftflödet befinner sig och beräknas enligt *ekvation (2.9)* (Kronvall, 1980).

Ett antagande som är vanligt för rörströmning är att flödet anses vara laminärt om  $Re$  understiger 2300 (Falk, 2010). Överstiger  $Re$  värdet 4000 kan flödet normalt anses vara turbulent. Mellan 2300 och 4000 blir flödesberäkningen osäker då flödet kan vara antingen laminärt eller turbulent (Kronvall, 1980).

$$Re = \frac{d_H \cdot u_m}{\nu} \quad (2.9)$$

Där:

$d_H$  är hydraulisk diameter [m]  
 $u_m$  är medelhastigheten hos luftströmmen [m/s]  
 $\nu$  är kinematisk viskositet [m<sup>2</sup>/s]

Den hydrauliska diametern  $d_H$  används för att möjliggöra flödesberäkningar för generella tvärsnittsformer då flertalet teoretiska samband är framtagna för cirkulära kanaler. För en rektangulär kanal med höjden  $h$  och bredden  $b$  beräknas den hydrauliska diametern enligt (Kronvall, 1980):

$$d_H = \frac{2 \cdot h \cdot b}{(h + b)} \quad (2.10)$$

## 2.2.4 Tryckfall vid engångsmotstånd

Lokala tryckfall uppstår vid plötsliga förändringar i tvärsnittsarea eller flödesriktningsförändringar. För en luftspalt som ventileras från takfot till takfot uppstår tryckfall vid inlopp, utlopp, taknock och vid eventuella luftningsprofiler. Tryckfallet vid inlopp och utlopp ges av *ekvation (2.11)* och *(2.12)* (Kronvall, 1980):

$$\Delta P_{in} = \xi_{in} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.11)$$

$$\Delta P_{ut} = \xi_{ut} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.12)$$

Där:

$\xi$  är en förlustfaktor [-]  
 $\rho$  är luftens densitet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $u_m$  är medelhastigheten hos luftströmmen efter inlopp och innan utlopp [m/s]

Kronvall (1980) redovisar beräkningar för förlustfaktorerna  $\xi_{in}$  och  $\xi_{ut}$  med förutsättningarna att in- och utlopp mynnar ut i det fria:

$$\xi_{in} = 1 + K_c \quad (2.13)$$

$$\xi_{ut} = 0 \quad (2.14)$$

Vidare beskriver Kronvall (1980) att kontraktionsfaktorn  $K_c$  beror av strömningstillståndet i spalten och varierar med Reynolds tal  $Re$  enligt:

$$K_c = \begin{cases} 0,98 \cdot Re^{-0,03} & \text{då } Re < 1000 \\ 10,59 \cdot Re^{-0,374} & \text{då } 1000 < Re < 3000 \\ 0,57 \cdot Re^{-0,01} & \text{då } Re > 3000 \end{cases} \quad (2.15)$$

För beräkning av det tryckfall som en 90° böj ger upphov till återger Kronvall (1980) följande ekvationer (Idelchik, 1960).

$$\Delta P_{b,90} = \xi_{b,90} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.16)$$

Där:

$\xi_{b,90}$  är en förlustfaktor som beräknas enligt *ekvation (2.17)* [-]

$$\xi_{b,90} = 45 \cdot \lambda \cdot \xi \quad \text{för } 3\,000 < Re < 40\,000 \quad (2.17)$$

Där:

$\lambda$  är friktionsfaktorn för spalten som leder fram till böjen. Hur friktionsfaktorn beräknas behandlas i *avsnitt 2.2.3*

$\xi$  är en faktor som beror av spaltens geometriska utformning före och efter böjen och erhålls efter avläsning i *figur 2.3.2.4.1* i *Air Flows in Building Components* (Kronvall, 1980) till 0,8

## 2.3 Fukt

För att få en tillfredsställande fuktsäkerhet måste en byggnad utformas så att den ger ett tillräckligt skydd mot de fuktkällor som den utsätts för. De fuktkällor som ett parallelltak utsätts för och som måste beaktas vid bedömning av fuktsäkerheten redovisas i *figur 2.2* i *avsnitt 2.1* och kan utvecklas till följande (Arfvidsson, et al., 2017):

- nederbörd
- luftfuktighet utomhus
- luftfuktighet inomhus
- byggfukt
- läckage.

I underkapitel nedan redovisas hur dessa fuktkällor beaktas i hygrotermiska beräkningar, samt vilka krav som finns avseende fuktsäkerhet och hur dessa krav kan beaktas i en mögelmodell.

### 2.3.1 Fuktttransport

Fukt transporteras antingen i ångfas eller i vätskefas. I ångfas sker fukttransporten huvudsakligen på följande sätt:

- diffusion
- fuktkonvektion.

Diffusion kan beskrivas som vattenångans och andra gasers strävan att minska koncentrationsskillnader (Arfvidsson, et al., 2017). Diffusion uppstår exempelvis genom klimatskärmen på ett hus då ånghalten inomhus skiljer sig från ånghalten utomhus. Fuktttransport genom diffusion kan beskrivas som en produkt av en drivande potential och en fukttransportkoefficient. Fuktflödet som diffusionen ger upphov till beskrivs av *Ficks lag*:

$$g_x = -k \cdot \frac{d\psi}{dx} \quad (2.18)$$

Där:

$g_x$	är fuktflöde i x-riktning
$\psi$	är drivande potential som kan vara ånghalt, ångtryck, temperatur etc.
$x$	är en längdkoordinat
$k$	är en transportkoefficient som ska kopplas samman med den drivande potentialen

Fuktkonvektion innebär att vattenånga transporteras med luft som transporterande medium (Arfvidsson, et al., 2017). Fuktkonvektion kan förekomma i spalter, hål och i porösa material. En luftström som kyls ned leder till en högre relativ fuktighet och risk för kondensation till vätskefas. Om luftströmmen istället värms upp sjunker den relativa fuktigheten och luftens fuktupptagande förmåga ökar. Oftast är den fukt som avges till en konstruktion på grund av fuktkonvektion mest intressant att studera. Den mängd fukt som avges per tidsenhet kan då beräknas med *ekvation (2.19)*:

$$G = (v_{in} - v_{ut}) \cdot q \quad (2.19)$$

Där:

$G$	är fuktflöde [kg/s]
$v_{in}$	är ånghalt i luften vid inflöde [kg/m <sup>3</sup> ]
$v_{ut}$	är ånghalt i luften vid utflöde [kg/m <sup>3</sup> ]
$q$	är luftflöde [m <sup>3</sup> /s]

För fukt som transporteras i vätskefas kan drivkrafterna vara

- tyngdkraft
- vattenövertryck
- vindtryck
- kapillära krafter.

Utifrån yttre fuktkällor, fukttransport mellan ingående material och fuktlagring i desamma kan en fuktbalans ställas upp för ett parallelltak. Detta leder till ett ekvationssystem med icke-linjära ekvationer för både värme- och fukttransport som kräver en numerisk lösningsmetod (Arfvidsson, et al., 2017). Principen för att lösa detta system är att dela in takmaterialen i små celler och räkna fukttransporten mellan dessa celler, samt till ränderna, vid korta tidssteg, med antagande om stationär fukttransport inom tidssteget. Fuktinnehållet i cellerna uppdateras utifrån fukttransporten mellan cellerna och till ränderna i varje tidssteg. Processen upprepas tills önskad sluttid uppnåtts.

### 2.3.1.1 Fuktkonvektion genom otätt tätskikt

Det fuktflöde som fuktkonvektion inifrån och ut genom ett otätt tätskikt ger upphov till beräknas enligt *ekvation (2.20)*. Luftflödet genom det otäta tätskiktet beror av den totala tryckskillnaden mellan ut- och insidan av parallelltaket enligt (Arfvidsson, et al., 2017):

$$q_{läck} = q_{50} \cdot \left( \frac{\Delta P_{tot}}{50} \right)^{\beta} \quad (2.20)$$

Där:

$q_{50}$  är läckflödet vid 50 Pa tryckskillnad [l/s,m<sup>2</sup>]

$\beta$  är en exponent som beror av flödestillståndet, 0,7 brukar användas i beräkningar [-]

Och:

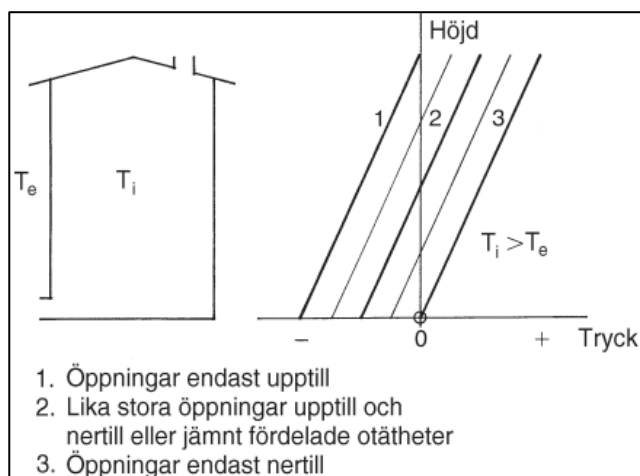
$\Delta P$  är den totala tryckskillnaden mellan parallelltakets in- och utsida som kan uppstå av fläktar, temperaturdifferens mellan ute- och inneluft och vind (Arfvidsson, et al., 2017) [Pa]

Den termiska delen av den totala tryckskillnaden över parallelltaket beräknas utifrån skillnaden i densitet mellan utomhus- och inomhusluften enligt *ekvation (2.21)*.

$$\Delta P_{termik} = 9,81 \cdot (\rho(T_{ute}) - \rho(T_{inne})) \cdot h \quad (2.21)$$

Där:

$h$  är höjdskillnaden mellan neutrala lagret (där tryckskillnaden mot utsidan är noll) och undersökt punkt enligt *figur 2.5* [m]



Figur 2.5 - Tryckförhållande i en byggnad i förhållande till omgivningen, skapad av temperaturskillnad mellan insida och utsida (Arfvidsson, et al., 2017)

Och:

$\rho(T)$  är luftdensiteten, vars temperaturberoende beaktas enligt *ekvation* (2.22) (Arfvidsson, et al., 2017):

$$\rho(T) = \frac{\rho_{ref} \cdot T_{ref}}{T} \quad (2.22)$$

Där:

$\rho_{ref}$  är en referensdensitet för luft [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $T_{ref}$  är en referenstemperatur för luft [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T$  är luftens temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Vindens del av tryckskillnaden beräknas på samma sätt som vindens drivkraft för en luftspalt, med *ekvation* (2.6). För detta fall används dock inte skillnaden i vindtryckskoefficient mellan lovartsidan och läsidan på byggnaden. Istället används skillnaden i vindtryckskoefficient mellan utsidan och insidan på taket.

Den totala tryckskillnaden över parallelltaket beräknas därefter som summan av det tryckfall som termiken, vinden och fläktarna ger upphov till. Tryckfallet som fläktar ger upphov till  $\Delta P_{fläktar}$  beror av flödesbalansen mellan till- och frånluft i en mekaniskt ventilerad byggnad.

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{termik} + \Delta P_{vind} + \Delta P_{fläktar} \quad (2.23)$$

### 2.3.2 WUFI

WUFI är ett datorprogram framtaget på forskningsinstitutet *Fraunhofer* i Tyskland. Programvaran kan utföra simuleringar med kopplad värme- och fukttransport (WUFI, 2019). I programmet beaktas de huvudsakliga transportmekanismerna för fukt i byggnadstekniska sammanhang, nämligen diffusion och kapillär transport, samtidigt som övriga transportmekanismer negligeras (ibid). Indata i programmet är materialegenskaper, randvillkor och numeriska parametrar. Programmet finns i flera versioner och den som användes i denna studie var *WUFI Pro 6.4* (2019) som räknar värme- och fuktflöden i en dimension.

Kopplade värme- och fukttransportberäkningar är invecklade. Exempelvis beror mätnadsånghalten av temperaturen samtidigt som värmeledningsförmågan är fuktberoende. För att genomföra dessa beräkningar måste ickelinjära differentialekvationer lösas varför en numerisk lösningsmetod normalt används (Arfvidsson, et al., 2017). I WUFI används finita volymmetoden där tidsberoendet beaktas genom en fullständigt implicit lösningsmetod (WUFI, 2009). Den implicita metoden medför bland annat att stabila resultat kan erhållas för längre tidssteg vilket sparar beräkningskraft. En nackdel med detta förfarande är dock att programmet löser ekvationssystemet för alla tidssteg, även om det beräknade resultatet inte nödvändigtvis är korrekt, lösningen kan i dessa fall ändå verka trovärdig. För att förhindra felaktiga lösningar finns den inbyggda funktionen *adaptivt tidssteg* i programmet som kontrollerar lösningen och minskar tidssteget tillfälligt i ett försök att erhålla konvergens i de fall det ej uppnåtts (WUFI, 2019).

En begränsning för de endimensionella beräkningarna är att ingen hänsyn tas till två- och tredimensionella aspekter avseende exempelvis köldbryggor, byggfukt och läckage. Det finns även begränsningar i hur programvaran hanterar olika materialegenskaper under beräkningarna, exempelvis så återfinns endast en sorptionsisoterm för varje material och hysteres beaktas därför inte (Mundt-Petersen, 2015). WUFI har trots dessa begränsningar påvisats tillförlitligt i hygrotermiska beräkningar i tidigare studier (ibid).

### 2.3.3 Krav BBR

Boverket ställer följande allmänna krav på byggnader ur fuktsynpunkt (BFS, 2014:3):

*”Byggnader ska utformas så att fukt inte orsakar skador, lukt eller mikrobiell växt som kan påverka hygien eller hälsa.”*

Det allmänna kravet kompletteras med ett krav på högsta tillåtna fukttillstånd. Överskridande av det högsta tillåtna fukttillståndet förväntas orsaka skador som påverkar hygien eller hälsa. För bestämning av det högsta tillåtna fukttillståndet ska det kritiska fukttillståndet användas, vilket motsvarar det fukttillstånd då materialets avsedda egenskaper och funktion inte uppfylls. Vid fastställande av det kritiska fukttillståndet får inverkan av tid och temperatur beaktas. Utöver det kritiska fukttillståndet ska även hänsyn tas till osäkerhet i beräkningsmodell, ingångsparametrar och mätmetoder. Där det kritiska fukttillståndet inte är väl dokumenterat får den relativa fuktigheten inte överstiga 75 % (BFS, 2014:3).



### 2.3.4 Mögelmodell

För träbaserade material anses risken för biologiska angrepp, i huvudsak av svampar som exempelvis mögel, vanligen vara dimensionerande ur fuktsynpunkt (Nilsson, 2006). Ett sätt att bedöma risken för mikrobiell påväxt är genom att använda en mögelmodell.

I denna studie användes MRD-modellen, framtagen på Lunds Tekniska Högskola, för att bedöma risken för mikrobiell påväxt. Modellen användes även då temperatur, relativ fuktighet och varaktigheten för kritiska förhållanden integreras till ett gemensamt värde vilket underlättade simultana jämförelser av parametrarna. Nedan följer en beskrivning av MRD-modellen och dess tillämpning som baseras på vägledningen *Fuktsäkerhet i klimatskärmen* (Thelandersson, Isaksson & Niklewski 2014).

MRD-modellen har utvecklats i syfte att beskriva kopplingen mellan en generell tidsberoende exponering och materialresistens för ett givet material. Denna koppling möjliggör bedömning av risken för mikrobiell påväxt för klimatavskiljande konstruktioner i byggnader. Exponeringen i det här fallet är den relativa fuktigheten och temperaturen intill ytan på materialet och beror således på det yttre och det inre klimatet samt konstruktionens utformning. Resistensen hos materialet beror av ytans beskaffenhet för etablering av mikrobiell påväxt.

För en viss klimatexponering beräknas en halvdygnsdos  $D_{12}(t)$  med en komponent  $D_\varphi$  som beror av ett 12-timmars medelvärde av relativa fuktigheten  $\varphi_{12}$  och en komponent  $D_T$  som beror av ett 12-timmars medelvärde av temperaturen  $T_{12}$ . 12-timmars medelvärden används för att fånga upp de variationer som finns mellan natt och dag. När förhållandena är gynnsamma för tillväxt ökar dosen och när förhållandena är ogynnsamma så minskar den. Dosen relateras sedan till ett referensklimat ( $\varphi_{ref}$ ,  $T_{ref}$ ). Vid exponering för referensklimatet initieras påväxt efter  $t_{crit}$  dagar. Den kritiska dosen kan därmed definieras som:

$$D_{crit} = D(t_{crit}) = \sum_1^{2t_{crit}} D_\varphi(\varphi_{ref}) \cdot D_T(T_{ref}) = t_{crit} \quad (2.24)$$

Den tidsberoende, ackumulerade dosen  $D(t)$  kan sedan jämföras med den kritiska dosen  $D_{crit}$ . Jämförelsen kan även uttryckas med ett MRD-index  $I_{MRD}(t)$  enligt *ekvation (2.25)*. Överstiger MRD-index 1 innebär det att gränstillståndet för påväxt är uppnått. Skalan är definierad enligt *tabell 2.1*.

$$I_{MRD}(t) = \frac{D(t)}{D_{crit}} \quad (2.25)$$

Tabell 2.1 - Skala för MRD-index

MRD	Förekomsten av mögel
0	Ingen mögelpåväxt
1	Initiell påväxt
2	Gles men etablerad påväxt
3	Fläckvis, omfattande påväxt
4	Omfattande påväxt över i princip hela ytan

Den kritiska dosen kan ses som en egenskap som är karakteristiskt för materialet och kan bestämmas genom laboratorieprovning. För fastställande av  $D_{crit}$  kan hyvlad gran användas som referensmaterial  $D_{crit,ref}$ . Den kritiska dosen för andra material fås då av *ekvation (2.26)* där  $\mu_x$  är en dimensionslös faktor som beskriver materialets mögelresistens relativt referensmaterialet och erhålls ur *tabell 2.2*.

$$D_{crit,x} = \mu_x \cdot D_{crit,ref} \quad (2.26)$$

Tabell 2.2 - Dimensionslös faktor för beräkning av kritisk dos för träbaserade materialytor. Tabell av Thelandersson, et al. (2014)

Material	$\mu_x$
Gran, hyvlad	1,0
Furu, hyvlad	0,7
Gran, originalyta <sup>1</sup>	0,6
Furu, originalyta <sup>1</sup>	0,5
Furu, tryckimpregnerad furu, klass NTR AB <sup>2</sup>	>3,0
Gran, ytbehandlad med borpreparat	>4,0
Furu, brandskyddsimpregnerad med Dricon	>3,0
Modifierat trä: furfurylerad furu WPG <sup>3</sup> ca 45 %	2,0
Modifierat trä: värmebehandlad gran och furu 212 °C (Thermowood D)	0,7
Modifierat trä: acetylerad radiatall <sup>4</sup> ca 20 %	>3,0
Trä-plastkomposit (50 % furufibrer/50 % polypropylen)	>3,0

<sup>1</sup> Gäller för trä som torkats i virkestork och där ytan inte bearbetats efter torkning

<sup>2</sup> Gäller behandling med kopparorganiska träskyddsmedel

<sup>3</sup> För furfurylerat trä anges upptagningen av furfurylalkohol som WPG = Weight Percent Gain

<sup>4</sup> För acetylerat trä specificeras acetylinnehållet i procent

För beräkning av den totala dosen på en materialyta har följande samband för beräkning av delkomponenterna  $D_\varphi$  och  $D_T$  tagits fram (Thelandersson, et al., 2014) utifrån referensvärdena  $\varphi_{ref} = 90 \%$  och  $T_{ref} = 20 \text{ °C}$ .

$$D_\varphi(\varphi_{12}) = 0,5 \cdot e^{(15,5 \cdot \ln(\frac{\varphi_{12}}{90}))} \quad \text{för } 75 \% < \varphi_{12} \leq 100 \% \quad (2.27)$$

$$D_T(T_{12}) = e^{(2,0 \cdot \ln(\frac{\varphi_{12}}{20}))} \quad \begin{array}{l} \text{om } 0,1 \text{ °C} < T_{12} \leq 30 \text{ °C och } D_\varphi > 0 \\ \text{om } D_\varphi < 0 \end{array} \quad (2.28)$$

Vid ogynnsamma förhållanden för mögeltillväxt, exempelvis vid torra förhållanden eller vid låga temperaturer, förväntas att tillväxten avstannar och tillbakabildas. Detta beskrivs i MRD-modellen som att dosen för dessa perioder är negativ och beräknas med följande samband:

$$D_{\varphi}(\varphi_{12}) = -2,118 + 0,0286 \cdot \varphi_{12} \quad \text{för } 60 \% < \varphi_{12} \leq 75 \% \quad (2.29)$$

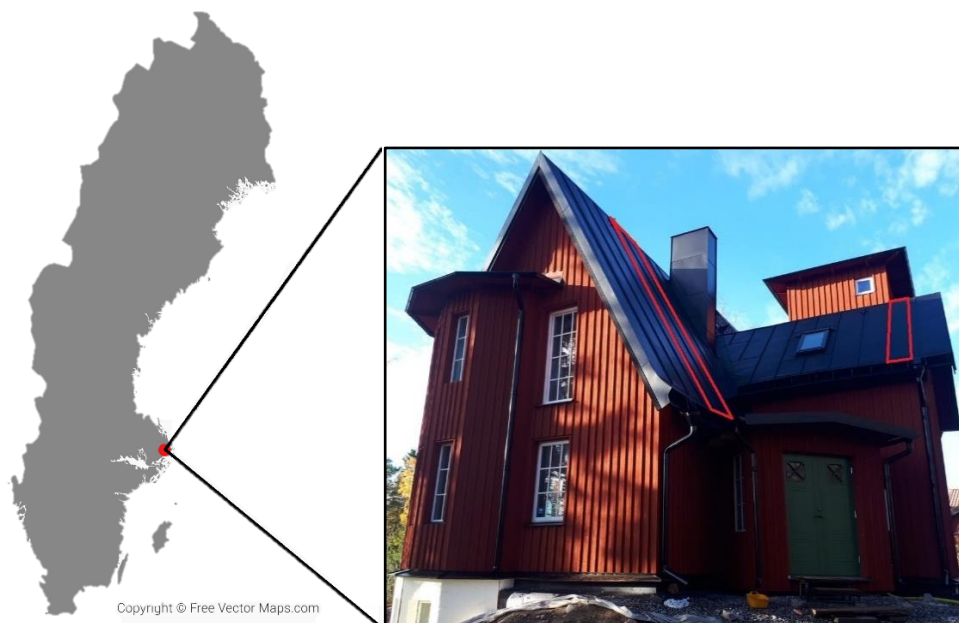
$$D_{\varphi}(\varphi_{12}) = -0,4 \quad \text{för } \varphi_{12} \leq 60 \% \quad (2.30)$$

$$D(\varphi_{12}, T_{12}) = -0,4 \quad \text{för } T_{12} < 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.31)$$



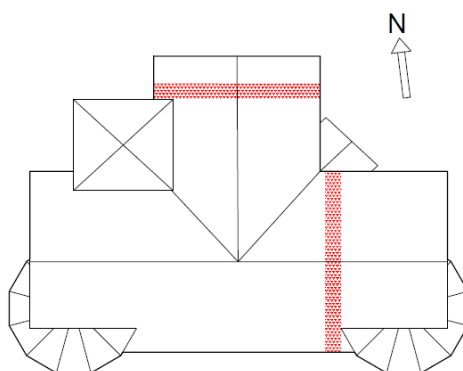
### 3 Mätobjekt

Det mätobjekt som studerats i detta arbete är parallelltaket på ett enfamiljshus beläget på Rådmansö utanför Norrtälje, cirka 8 mil norr om Stockholm. Byggnadens geografiska placering på en Sverigekarta och byggnadens gestaltning framgår av *figur 3.1*.

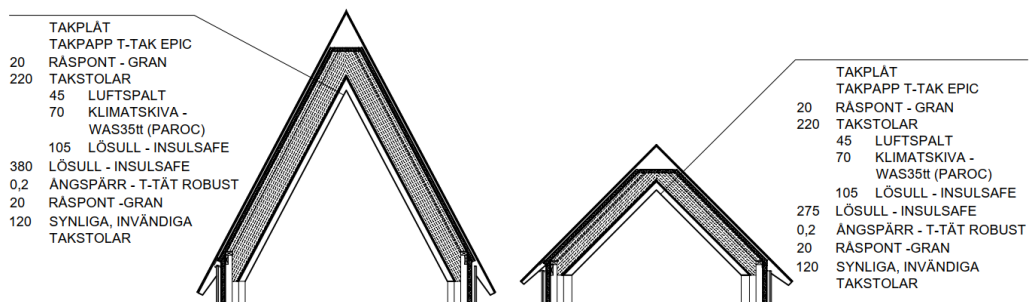


*Figur 3.1 - Geografisk placering av mätobjektet ([www.FreeVectorMaps.com](http://www.FreeVectorMaps.com)) samt byggnaden sett från öst (ungefärlig placering av luftspalterna där mätningar sker är markerade med röd färg, till vänster 62° taklutning och orientering mot norr, till höger 45° taklutning och orientering mot öster) (Fotografi av S. Olof Mundt-Petersen 2017)*

Taket är ett ventilerat och välisolerat parallelltak uppbyggt av en yttre bärande trästomme som därtill är kompletterad med en inre, separerad trästomme för att minimera förekomsten av linje- och punktköldbryggor. Taket har 45 millimeter höga luftspalter som ventileras med uteluft. Med hänsyn till denna studies avgränsningar var endast två av luftspalterna i taket aktuella. Dessa är markerade i rött i *figur 3.1* och *3.2*. Uppbyggnaden av taket vid de två studerade luftspalterna skiljer sig åt till följd av byggnadens geometriska utformning och redovisas i *figur 3.3*.



*Figur 3.2 -Principskiss av byggnaden ovanifrån där orientering framgår (studerade spalter är markerade i rött)*



Figur 3.3 - Uppbyggnad av aktuella taksektioner med lutning om 62° till vänster och 45° till höger

I tabell 3.1 redovisas de materialegenskaper för de ingående materialen som var kända och av betydelse för de hygrotermiska beräkningarna.

Tabell 3.1 - Ingående material och relevanta kända materialparametrar

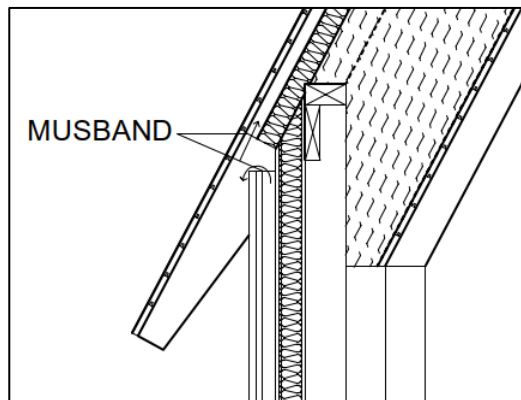
Material	Produkt	Kända materialparametrar
Takplåt	-	-
Underlagspapp	T-Tak Epic	Vattentäthet = 0,2 mvp
Råspont	Gran	-
Luftspalt	-	-
Klimatskiva	Paroc WAS 35tt	Värmeledningsförmåga = 0,033 W/m,K Diffusionsmotstånd = 1
Lösullsisolering	ISOVER InsulSafe	Värmeledningsförmåga = 0,034 W/m,K Densitet = 30 kg/m <sup>3</sup>
Ångpärr	T-Tät Robust	Ånggenomgångsmotstånd = $3 \cdot 10^6$ s/m
Råspont	Gran	-

Båda de studerade luftspalterna ventileras från takfot till takfot. En av de aktuella luftspalterna är orienterad i nord-sydlig riktning med taklutningen 62° och en nockhöjd på cirka 8 m. Den andra taksektionen är orienterad i öst-västlig riktning med taklutningen 45° och en nockhöjd på cirka 6 m. För takpartiet i öst-västlig riktning rådde det viss oklarhet kring skuggningen då övriga takpartier och en tornbyggnad blockerar den inkommande direkta solstrålningen ett antal timmar på dygnet. Hur detta hanterades beskrivs i avsnitt 4.2.1. Geometriska egenskaper för båda de aktuella spalterna listas i tabell 3.2. Värt att notera är att den spaltlängd som anges i tabellen är för en sida av taket, det vill säga från takfot upp till taknock. Då parallelltaket ventileras från takfot till takfot kommer luften i luftspalten att färdas en sträcka som är dubbla spaltlängden.

Tabell 3.2 - Geometriska egenskaper för aktuella luftspalter

Luftspalt	Taklutning [°]	Spaltbredd [mm]	Spalthöjd [mm]	Spaltlängd [mm]
Nord-sydlig	62	356	45	4 000
Öst-västlig	45	360	45	2 700

Inloppets och utloppets utformning var av betydelse för fastställande av vilket tryckfall de gav upphov till. Eftersom luftspalten ventileras från takfot till takfot är utformningen av inlopp och utlopp identisk. Musband är placerade i både inlopp och utlopp för att förhindra skadedjur från att ta sig in i spalten. Utformning av in- och utlopp framgår av *figur 3.4* och *figur 3.5*.

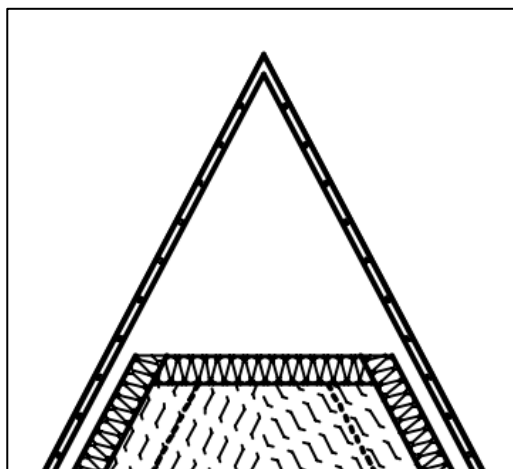


*Figur 3.4 - Utformning av inlopp/utlopp*

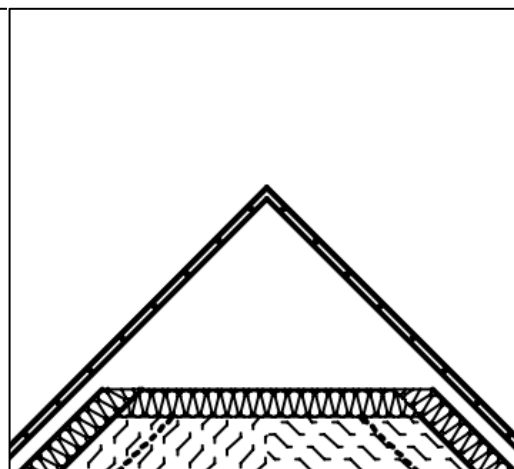


*Figur 3.5 - Bild på inlopp/utlopp med musband*

Luftspaltens utformning vid taknock var också av betydelse för luftomsättningsberäkningen och framgår av *figur 3.6* och *figur 3.7*. Storleken på engångs- och friktionsmotstånd, som luftspaltens utformning gav upphov till, behandlades närmare i *avsnitt 2.2.3* och *2.2.4*.

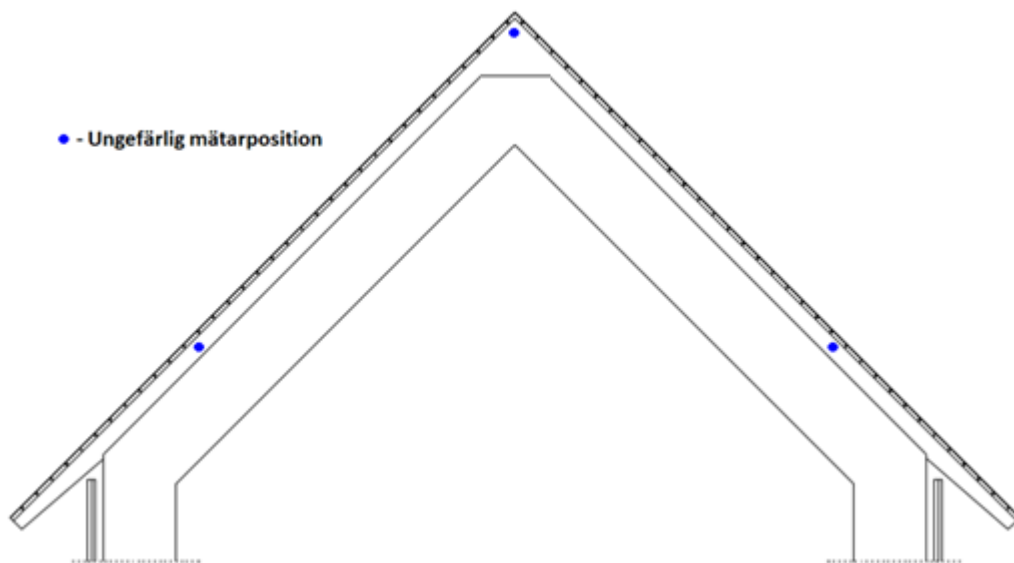


*Figur 3.6 - Utformning av taknock för takdel med 62° lutning*



*Figur 3.7 - Utformning av taknock för takdel med 45° lutning*

För de luftspalter som var aktuella i denna studie har mätutrustning installerats. Totalt tre givare för varje luftspalt har installerats; 1 i taknock och övriga 2 något över inlopp/utlopp vid respektive takfot (se *figur 3.8*).



Figur 3.8 - Mätarplacering längs luftspalterna

Givarna registrerade relativ fuktighet och temperatur i spalten samt fuktkvot i den luftspaltsbildande träläkten (se produktdata i *tabell 3.3*). Mätningarna har skett sedan givarna installerades i januari 2018 i samband med att taket uppfördes. I studien användes timmedelvärden från 21 november 2018, vilket var den dag då taket fullisolerades med lösull, till 17 februari 2020.

Tabell 3.3 - Produktdata för aktuella mätare (källa: [www.omnisense.com](http://www.omnisense.com))

Mätare	OmniSense S-160 Wireless
Uppmätta parametrar	Temperatur Relativ fuktighet Fuktkvot i trä
Mätosäkerhet - Temperatur	± 0,3 °C
Mätosäkerhet - Relativ fuktighet	± 2,0 %
Mätosäkerhet – Fuktkvot i trä	----

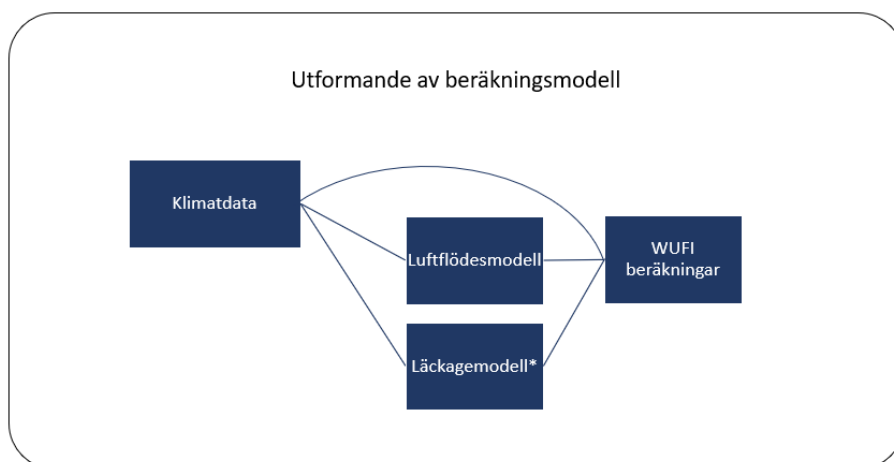


## 4 Metod

Detta kapitel är uppdelat i två delar som beskriver det förfarande som användes för att kunna svara på frågeställningarna. I den första delen 4.1 beskrivs metoden för utformandet av beräkningsmodellen. Den andra delen 4.2 beskriver beräkningsförfarandet för validering och parameterstudie, vilka beräkningar som genomfördes och vad syftet med dessa var.

### 4.1 Hygrotermiska beräkningar

I denna del redovisas de modeller och beräkningar som användes för att genomföra de hygrotermiska beräkningarna och bedöma fuktsituationen i konstruktionen. *Figur 4.1* visar hur beräkningarna tillämpades i förhållande till varandra.



*Figur 4.1 - Illustration av beräkningsmodellens utförande*

*\*Tillämpas endast i parameterstudien samt vid angivna fall i avvikelseanalysen*

### 4.1.1 Klimatdata

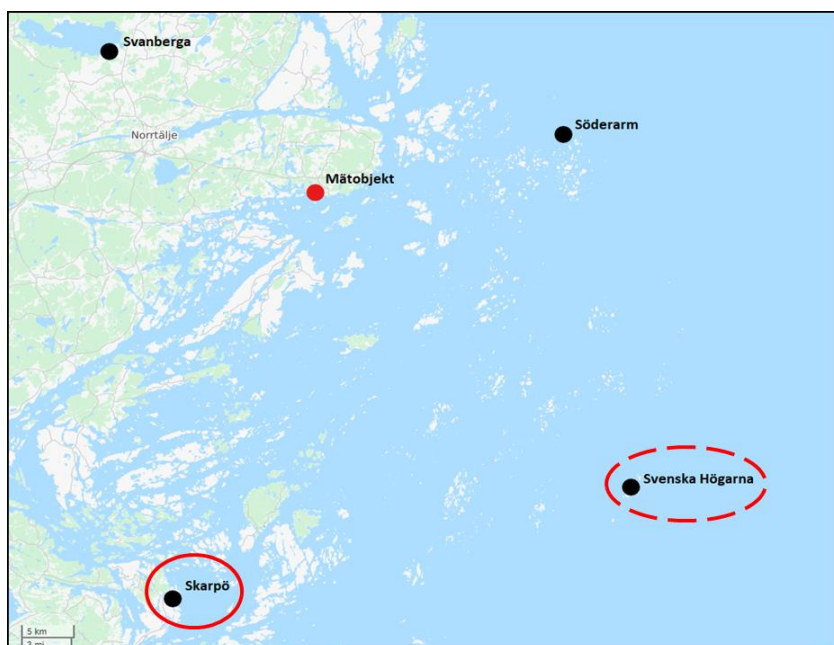
I detta avsnitt redovisas de utomhusklimat som användes i beräkningarna och hur dessa framställdes.

#### 4.1.1.1 Klimatdata för mätperioden

För både de hygrotermiska beräkningarna och luftflödesmodellen krävdes vetskap om det utvändiga klimatet under beräkningsperioden. För de inledande blinda beräkningarna användes timvisa klimatdata från Sveriges *Meteorologiska och Hydrologiska Institut* (SMHI, 2020) för mätperioden. De parametrar som var nödvändiga för studiens genomförande var

- lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- relativ luftfuktighet [-]
- vindriktning [ $^{\circ}$ ]
- vindhastighet [m/s]
- nederbörds mängd [mm/h]
- global kortvågig strålning [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- diffus kortvågig strålning [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- atmosfärisk långvågig strålning [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

Klimatdata från fyra aktiva klimatstationer (*Svanberga A*, *Söderarm A*, *Svenska högarna A* och *Skarpö A*) analyserades gentemot varandra. Orimliga data eliminerades och en uppfattning om dess potential att återskapa klimatet kring mätobjektet erhöles. Väderstationernas geografiska positioner i förhållande till mätobjektet redovisas i *figur 4.2*. I första hand användes klimatdata från *Skarpö A* då det är en kustnära mätstation vars klimatdata ansågs efterlikna de verkliga förhållandena vid mätobjektet mest. För perioder med brist på data och då parametrar saknas helt användes klimatdata från någon av de övriga tre väderstationerna.



Figur 4.2 - Klimatstationernas placering i förhållande till mätobjektet  
(© OpenStreetMaps bidrags-givare)

Vilka parametrar som har uppmätts varierar mellan de olika stationerna. *Skarpö A* och *Söderarm A* hade endast mätt lufttemperatur, relativ luftfuktighet, vindriktning och vindhastighet medan *Svanberga A* utöver dessa parametrar även mätt nederbörds mängd. *Svenska högarna A* mätte samtliga erforderliga parametrar förutom diffus kortvågig strålning. Lufttemperatur, relativ luftfuktighet, vindriktning och vindhastighet togs därför i första hand från *Skarpö A* medan nederbörds mängd i första hand togs från *Svanberga A*. Global kortvågig strålning och atmosfärisk långvågig strålning togs från *Svenska högarna A* då det var den enda av de fyra klimatstationerna där parametrarna mättes.

Diffus kortvågig strålning saknade uppmätta värden och uppskattades därför som en procentsats av den globala kortvågiga strålningen enligt den metod som Mundt-Petersen & Wallentén (2014) presenterar i sin rapport *Methods for compensate lack of climate boundary data*.

### 4.1.1.2 Dimensionerande 9-års klimat

I den efterföljande parameterstudien där studien utvidgas till att studera andra geografiska platser användes de 4 klimatfiler för Lund, Stockholm, Borlänge och Luleå som finns att tillgå på Fuktcentrums hemsida (Fuktcentrum, 2018). Klimatfilerna innehåller 9 sammanhängande år och är baserade på uppmätta värden från 1990-1998. Klimaten är dock något bearbetade för att ge mer dimensionerande år, exempelvis så att den relativa fuktigheten når 100 procent minst en gång var tredje månad (Wallentén, 2018).

## 4.1.2 Luftflödesmodell

För att beräkna luftomsättningen i luftspalten utformades en luftflödesmodell i beräkningsprogrammet *MatLAB* (2019). Modellen beräknade det timvisa luftflöde som erhålls i spalten utifrån drivkrafterna och tryckfallen vid varje timme enligt lufttrycksbalansen i *ekvation (2.1)*. Modellen antog därmed att stationära förhållanden rådde för de timvisa beräkningarna. Drivkrafter och tryckfall modellerades enligt nedan.

Drivkraften på grund av vind beräknades enligt *ekvation (2.6)* utifrån den vindhastighet som är uppmätt av *SMHI* och återfanns i klimatdatan. Vindtryckscoefficienterna vid takfoten på lovart och läsidan har tidigare undersökts av Gullbrekken, Uvsløkk, Kvande, Pettersson & Time (2018) vilka rekommenderar att en skillnad mellan lovart- och läsida  $\Delta c_p$  om 0,7 används som ett dimensionerande genomsnittligt värde. Detta värde preciserades genom att bestämma en funktion för  $\Delta c_p$  beroende av vindriktning. Utifrån redovisade mätvärden för öppen takfot, *figur 8* i *Wind pressure coefficients for roof ventilation purposes* (ibid), bestämdes en cosinusfunktion, genom minstakvadratanpassning, enligt *ekvation (4.1)*.

$$\Delta c_p(\varphi) = 0,48 \cdot \cos(1,3 \cdot \varphi) + 0,22 \quad (4.1)$$

Där:

$\varphi$  är vindriktningen i förhållande till normalen för ytterväggen på inloppssidan

För beräkning av den termiska drivkraften krävdes information om långvågigt strålningsutbyte och infallande solstrålning (enligt *figur 2.4* i teoriavsnittet). Detta återfanns i klimatdatan som *atmosfärisk långvågig strålning* respektive *global kortvågig strålning*, men dessa var definierade för en horisontell yta. Omräkningen till den faktiska ytans orientering och lutning skedde genom beräkning i beräkningsprogrammet *WUFI Pro 6.4* (2019) men kan även ske genom handberäkning utifrån ett solbanediagram. Det långvågiga strålningsutbytet beaktades i det termiska nätverket (*figur 2.4*) genom motstrålningstemperaturen  $T^r$ . Denna temperatur räknades ut baserat på den *atmosfäriska långvågiga strålningen* som infaller mot takytan utifrån *Stefan-Boltzmanns lag* enligt *ekvation (4.2)*.

$$T^r = \sqrt[4]{\frac{q_{in}}{\varepsilon_{tak} \cdot \sigma_s}} \quad (4.2)$$

Där:

$q_{in}$  är den långvågiga strålningen som infaller mot takytan [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $\varepsilon_{tak}$  är takbeläggningens emittans [-]  
 $\sigma_s$  är *Stefan-Boltzmanns konstant* ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ ) [ $\text{W/m}^2, \text{K}^4$ ]

I det termiska nätverket användes även takmaterialens värmeledningsförmåga, takbeläggningens emissions- och absorptionstal, emissionstal för materialen som omger spalten samt värmeövergångstal för takets olika luftövergångar. Värmeledningsförmågan för takmaterialen återfinns i *tabell 3.1*, samtliga övriga redogörs i *tabell 4.1*.

*Tabell 4.1 - Mätobjektets konstruktionsparametrar för luftflödesmodellen*

Parameter	Bet.	Värde	Källa
Emittans takbeläggning	$\epsilon_{tak}$	0,9	Takplåt, svart, matt enligt <i>WUFI Pro</i> (2019)
Absorptans takbeläggning	$\alpha_{sol}$	0,87	Takplåt, svart, matt enligt <i>WUFI Pro</i> (2019)
Emittans råspont	$\epsilon_1$	0,9	Trä (Arfvidsson, et al., 2017)
Emittans klimatskiva	$\epsilon_2$	0,9	Antaget värde
Konvektiv värmeövergångskoefficient i spalten	$\alpha_c$	3 W/m <sup>2</sup> ,K	Antaget värde, motsvarar temperaturskillnad om 5 K
Värmeövergångsmotstånd vid övergång inneluft	$R_{si}$	0,1 m <sup>2</sup> ,K/W	Tak - enl. SS-EN ISO 6946 (2017)

Det termiska nätverket reducerades sedan i enlighet med *Svantesson och Säwén* (2019, pp. XXIV-XXVI) och den termiska drivkraften beräknades enligt *ekvation (2.3)-(2.5)*.

Tryckfall vid flödesmotstånd beaktades för friktion enligt *ekvation (2.7)-(2.10)* (för flödes hastigheter som ger *Reynolds tal* mellan givna intervall tillämpades linjär interpolering) och ingångsmotstånd enligt *ekvation (2.11)-(2.15)*. För mätobjektet förekom även flödesmotstånd på grund av spaltgeometrin i taknock och musband vid takfot på båda sidor. Motståndet i taknock beaktades genom att se det stora utrymmet som en utgång från spalten följt av en ingång på motstående sidas spalt. Motståndet antogs således vara lika stort som ett ingångsmotstånd. Musbanden antogs ge ett motstånd som motsvarar ett insektsnät, vilket har undersökts av Gullbrekken (2018b). I studien (*ibid*) fastslogs att insektsnätet kan antas fördubbla ingångsmotståndet.

När lufttrycksbalansen i *ekvation (2.1)* ställdes upp var det viktigt att notera drivkrafternas beroende av luftflödesriktningen i luftspalten. Flödet kan gå på två olika håll och beroende på flödesriktningen är vindens drivkraft antingen pådrivande eller motverkande (se *ekvation (4.1)*). Den termiska drivkraften ändrar både storlek och ibland verkan vid förändrad flödesriktning på grund av förhållandet mellan infallande solstrålning på de båda taksidorna (se *ekvation (2.3)*). Lufttrycksbalansen beräknades med en antagen flödesriktning, ifall ingen lösning kunde erhållas därför att summan av drivkrafterna var negativ ändrades den antagna flödesriktningen. Om den totala drivkraften blev negativ även för den andra potentiella flödesriktningen antogs flödet i spalten vara 0 i denna modell.

Lufttrycksbalansen är en exponentialfunktion med flera termer av den naturliga logaritmen. Lösningemetoden som användes var därför numerisk. Inledningsvis, i beräkningar för mätobjektet, användes kommandot *vpasolve* i *MatLAB – Symbolic Math Toolbox* (2019). Lösningen optimerades senare, i parameterstudien, genom att istället använda kommandot *fsolve* och åberopa lösning med *Levenberg-Marquardt* algoritmen i *Optimization Toolbox*. Ytterligare förbättring som integrerades på slutet av studien var att anpassa startgissningen till att för varje timme gissa det flöde som beräknades enligt *ekvation (4.3)*. Skillnaden av bättre startgissning var marginell för de flesta fall, förutom vissa extrema flöden som försvann genom förbättringen.

Modellen bedömdes inledningsvis genom jämförelse mot det linjära samband Gullbrekken et al. (2017) uppmätte mellan luftflöde i spalten och vindhastighet på 10 meters höjd (se *ekvation (4.3)*).

$$u \approx 0,2 \cdot U_{10} \quad (4.3)$$

### 4.1.3 Läckagemodell

Det fuktflöde som luftläckage genom ett otätt tätskikt kan ge upphov till bestämdes av en läckagemodell. Den teoretiska bakgrunden för läckagemodellen beskrivs närmare i *avsnitt 2.3.1.1*. Fuktflöden beräknades utifrån den timvisa klimatdata som beskrivs i *avsnitt 4.1.1* med skillnaden att den vindhastighet som användes beräknades som ett medelvärde av de 24 föregående timmarna för att på så vis utjämna den stora variationen i uppmätta vindhastigheter. Samtliga beräknade negativa fuktflöden sattes till 0 då det endast var fuktbelastningen som konvektion inifrån gav upphov till, som studerades. Att inte räkna med negativa fuktflöden ger ett mer dimensionerande fall ur fuktsäkerhetssynpunkt. De beräknade timvisa fuktflödena konverterades sedan till dygnsmedel-fuktflöden. Genom att använda ett glidande dygnsmedelvärde för vinden och konvertera de timvisa fuktflödena till dygnsmedelvärden förväntades en jämnare fuktbelastning erhållas för parallelltaket. De antaganden som låg till grund för beräkningen av fuktflödet var följande:

- Luftläckaget antogs vara samma över hela parallelltaket även om det fanns en höjdskillnad mellan taknock och takfot som kan påverka den termiska delen av totaltrycket. Tryckskillnaden vid taknock användes således över hela taket (det är ett värsta fall).
- Läckageflödet genom parallelltaket vid 50 Pa tryckskillnad  $q_{50}$  antogs vara 0,3 l/s, m<sup>2</sup> vilket motsvarar täthetskravet för byggnader certifierade enligt FEBY 18 och är idag enligt Jörgen Wadman<sup>1</sup> (diplomerad fuktsakkunnig på PE Teknik & Arkitektur AB) ett vanligt krav vid småhusbyggande.
- Ventilationssystemet antogs vara i balans. Ingen tryckskillnad över parallelltaket uppstod på grund av fläktar.

---

<sup>1</sup> Jörgen Wadman. Videosamtal 13 maj 2020.

- Otätheterna antogs vara jämnt fördelade över byggnadens höjd vilket innebar att det neutrala lagret antogs ligga på halva byggnadens höjd för beräkning av den tryckskillnad som termiken gav upphov till (se *figur 2.5*). Höjden  $h$  i *ekvation (2.21)* blev således halva nockhöjden.
- Yttre vindtryckscoefficient för tryckskillnad skapad av vinden antogs vara 0,5 i enlighet med *Fukthandboken* (Arfvidsson, et al., 2017).
- Inre vindtryckscoefficient för tryckskillnad skapad av vinden antogs vara 0. I verkliga fall kan den vara negativ eller positiv. För framtagning av dimensionerande vindlaster för hållfasthetsberäkningar används normalt det mest ogynnsamma av +0,2 och -0,3 (Isaksson & Mårtensson, 2017). I denna studie avsågs inga dimensionerande fall, varför den inre vindtryckscoefficienten valdes till 0.

Fuktflödet som fuktkonvektion inifrån gav upphov till beräknades enligt *ekvation (2.19)*. Ånghalten i luften vid inflöde gavs av temperaturen och relativa fuktigheten i det ansatta inomhusklimatet. Ånghalten i luften vid utflöde beräknades utifrån antagandet om att luften som kommer ut ur konstruktionen var fuktmättad.

Luftflödet genom tätskiktet gavs av *ekvation (2.20)* där skillnaden i totaltryck mellan takets in- och utsida endast uppstod av temperaturdifferens mellan ute- och inneluft och vind eftersom ventilationen i byggnaden antogs vara i balans. Tryckskillnaden skapad av termik  $\Delta P_{\text{termik}}$  beräknades enligt *ekvation (2.21)* och (2.22). Tryckskillnaden som uppstod av vinden  $\Delta P_{\text{vind}}$  beräknades med *ekvation (2.6)* med den yttre vindtryckscoefficienten 0,5 och den inre vindtryckscoefficienten 0 enligt tidigare beskrivna antaganden. Den totala tryckskillnaden gavs av *ekvation (2.23)* där tryckskillnaden skapad av fläktar  $\Delta P_{\text{fläktar}}$  var noll.

I de beräkningar luftläckage tillämpades placerades detta i den yttersta cellen i klimatskivan, det vill säga precis intill luftspalten. I *RäknaF* (Wallentén, 2018) föreskrivs en placering i råsponten för dimensionerande fall, men i denna var ofta redan ett regnläckage ansatt, således valdes istället den näst yttersta punkten som var tillgänglig för placering. Ju längre in läckaget placeras, desto större andel transporteras inåt, vilket är felaktigt eftersom flödet är beräknat som den andel som rör sig ut genom konstruktionen.

### 4.1.4 WUFI-beräkningar

Hygrotermiska beräkningar genomfördes med beräkningsprogrammet *WUFI Pro 6.4* (2019). I detta avsnitt redovisas hur dessa beräkningar genomfördes.

#### 4.1.4.1 Beräkningsgång och indata

I programmet användes indata om konstruktionen (som för mätobjektet erhålls i *tabell 3.1*). I *tabell 4.2* redovisas hur mätobjektets konstruktion modellerades i programmet, vilka material som valdes och vilka materialegenskaper som korrigerades för att efterlikna egenskaperna för de verkliga materialen.

## Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak

Tabell 4.2 - Materialmodellering i WUFI för mätobjektet

Material	Material i WUFI	Tjocklek [mm]	Ändrade materialegenskaper	Kommentar
Takplåt	Roof Membrane V13	1	-	-
Takpapp	Weather resistive barrier (sd=0,2m)	1	-	Antagande om att ånggenomgångsmotståndet var detsamma som vattentätheten
Råspont	Spruce, radial	22	-	-
Luftspalt	Air Layer 50 mm	2*	-	Uppdelning i skikt med olika fuktlagringskapacitet för att undvika numeriska problem
	Air Layer 50 mm, without additional moisture capacity	45	-	
	Air Layer 50 mm	2*	-	
Klimatskiva	ISOVER INTEGRA AP Supra - 035	70	Värmeledningsförmåga: 0,035 till 0,033 W/m,K	-
Isolering	ISOVER ULTIMATE Klemmfiltz -035	5 skikt á 97 mm (nord-syd) 5 skikt á 90 mm (öst-väst)*	Densitet 25,2 till 30 kg/m <sup>3</sup> Värmeledningsförmåga: 0,035 till 0,034 W/m,K	Uppdelning i skikt för att undvika eventuella numeriska problem
Ångspärr	Vapour retarder (sd=100m)	1	Diffusionsmotstånd för vattenånga: 100 000 till 75 000	-
Råspont*	Spruce, radial	22	-	-

\*Ändras i parameterstudien

Utöver ovan angivna materialparametrar krävdes även indata som exempelvis konstruktionens olika värmeövergångstal, absorptionstal för kortvågig och emissionstal för långvågig – strålning. Om inte annat anges användes följande. För den yttre ytan ansattes värmemotståndet som vindberoende, analogt med luftflödesmodellen. För den inre ytan valdes värmemotståndet till 0,125 m<sup>2</sup>,K/W som är programmets standardvärde för tak. Absorptionstalet för kortvågig- och emissionstalet för långvågig strålning bestämdes utifrån taktäckningens material och kulör till 0,87 respektive 0,9 i enlighet med tidigare beräkningar. Långvågigt strålningsutbyte med omgivningen beaktades genom användande av en explicit strålningsbalans. Den omgivande markens kortvågiga reflektionsförmåga valdes till 0,26 vilket motsvarar reflektionsförmågan hos grönt gräs.

I WUFI anges även slagregnsbelastningen vilket är andelen av nederbörden som träffar konstruktionen (WUFI, 2019). För takkonstruktioner ansattes denna till hundra procent eftersom ingen avskärmning mot regn antogs finnas ovan tak. Dessutom ska absorptionstal för regnvatten anges, vilket är andelen av regnvattnet som stannar kvar på ytan (ibid). Med hänsyn till att takplåt är vattenavvisande ansattes absorptionstalet för regnvatten till 0.



Initiala förhållanden i konstruktionen ansätts i form av *Begynnelsefuktighet – relativ fuktighet vid start*. För mätobjektet ansattes initialt 44 %, eftersom detta motsvarade den relativa fuktigheten vid 18 °C med ånghalt motsvarande månadsmedel i utomhusklimatet den senaste månaden innan beräkningens start. Antagandet var att konstruktionen var i jämvikt med klimatet det senaste dygnet samt att inget fuktillskott inomhus förekom.

Som tidigare beskrivits i *avsnitt 2.3.2* så använder sig WUFI av finita volymmetoden där gitteruppbyggnad och tidssteg är två parametrar som påverkar de numeriska beräkningarna. I *tabell 4.3* listas vilka inställningar som valdes i programmet avseende dessa parametrar.

*Tabell 4.3 - Numeriska parametrar i WUFI*

Numerisk parameter	Inställning i WUFI	Kommentar
Gitteruppbyggnad	Automatisk (II) – Fint Antal celler: 100	För att erhålla en högre noggrannhet i beräkningarna valdes en gitteruppbyggnad med ett högt antal celler där celltjockleken var mindre vid randvillkoren och vid övergång mellan olika materialtyper
Tidssteg	1 h (Adaptiv tidsstegskontroll)	Adaptivt tidssteg användes för att tidssteget automatiskt skulle minskas om beräkningarna stötte på numeriska problem

#### 4.1.4.2 Känslighetsanalys

När den första beräkningen ansågs klar i programmet så kördes beräkningen om med ett kortare tidssteg för att analysera känsligheten i resultatet. På så vis kunde en felaktig beräkning, med exempelvis numeriska problem, upptäckas genom ett inkonsekvent resultat vid olika tidssteg.

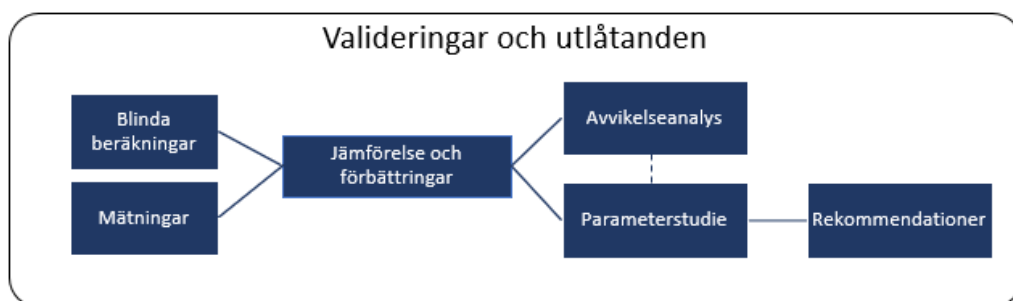
Resultatet bedömdes även utifrån förekomsten av konvergensfel eller andra fel. I synnerhet kan fel uppstå då varierande luftomsättning ansätts i spalten eftersom luftomsättningen räknas som en fuktkälla. Problem kan exempelvis uppstå vid nedkylning av luften i spalten på grund av nattutstrålning eller då den relativa fuktigheten i uteluften är hög samtidigt som luftomsättningen är hög, eftersom fuktkällan vid dessa tillfällen blir stor.

För att undvika dessa fel korrigerades egenskaperna för luften mitt i spalten. I första hand korrigerades fuktöverföringsförmågan för materialet så att maximal fuktnivå inte överstegs för lagret utan fukten istället omfördelades till de intilliggande *kondensationsskikten*. Ifall detta inte räckte (exempelvis för att *kondensationsskikten* redan är fuktmättade) korrigerades i andra hand kondensationsskiktens tjocklek för att tillåta mer fukt att kondensera där. Skälet till att ändra fuktmotståndet för luft är att detta är beroende av exempelvis lufrörelser och typ av intilliggande material vilket inte beaktas i WUFI. För fuktöverföring mellan två intilliggande luftlager är fuktöverföringsförmågan hög på grund av omblandningen, den är även hög när omsättningen är hög.

Att korrigera skiktjockleken medgav att mer fukt kunde lagras i kondensationsskikten. Skälet till denna korrektion var att materialet *luft* i WUFI har tilldelats samma fuktlagringsfunktion som mineralull, med en maximal fukthalt om  $47 \text{ kg/m}^3$  vid 100 % relativ fuktighet (WUFI, 2019). Fritt vatten, vilket ger en fukthalt om  $1000 \text{ kg/m}^3$ , kan förekomma i kondensationsskiktet varför skiktjockleken är godtycklig och kunde varieras inom rimliga gränser, exempelvis har ett 1 mm tjockt mättat kondensationslager ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) samma fuktinnehåll som ett 20 mm tjockt kondensationslager med en maximal fukthalt om  $50 \text{ kg/m}^3$ . Ett alternativt tillvägagångssätt kan vara att istället ändra fuktlagringsfunktionen för *luft* i kondensationsskikten i WUFI.

## 4.2 Beräkningsgång och validering

Studien genomfördes i tre huvuddelar, en inledande del där blinda hygrotermiska beräkningar jämfördes mot mätningar för att undersöka precisionen i och relevansen av att beakta varierad luftomsättning i den hygrotermiska beräkningen. Därefter följde en del som undersökte hur denna modell kunde förbättras och vad avvikelser kunde bero på. Den sista delen undersökte känsligheten i detta förfarande i en parameterstudie. Resultatet av parameterstudien gav en samlad bild av beräkningsmodellen och träffsäkerheten i denna, vilket användes för att ge utlåtande i form av rekommendationer. Förfarandet presenteras grafiskt i *figur 4.3*.



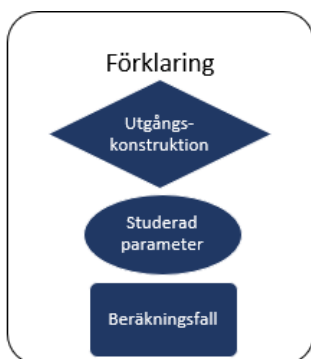
Figur 4.3 – Övergripande beräkningsförfarande

För jämförelse med uppmätta värden i den första delen behövdes indata om mätobjektet och dess omgivande klimat. En beskrivning av mätobjektet återfinns i *avsnitt 3*, det omgivande klimatet inhämtades från närliggande mätstationer enligt förfarandet i *4.1.1*. Luftflödet i takets luftspalt var inte uppmätt utan beräknades utifrån konstruktions- och klimatdata så som beskrivs i *avsnitt 4.1.2*. Denna beräkning byggde på en modell av den termiska drivkraften i parallelltak med sluten nock. Modellen påvisade hur luftrörelser i dessa tak, på grund av termik, kan modelleras vilket var ett resultat av studien som redovisas i *5.1*.

Precisionen i beräkningsförfarandet undersöktes genom att beräkningarna inledningsvis skedde utan tillgång till mätresultatet, det vill säga *blinda beräkningar*. När dessa beräkningar var genomförda och utvärderade överlämnades de till examinatorn och först då lämnades mätningarna ut. Baserat på jämförelse mellan mätningar och beräkningar förbättrades beräkningsmodellen enligt *4.2.1*.

I 4.2.1 undersöktes relevansen av att implementera varierande luftomsättning i hygrotermiska beräkningar. Detta undersöktes genom att jämföra mot beräkningar med konstant luftomsättning samt jämföra mot mätvärden. För en utförlig jämförelse genomfördes här även en avvikelseanalys som i viss mån förbättrade parameterstudien.

Osäkerheter i den förfinade modellen undersöktes i parameterstudien i 4.2.3 varefter modellen användes för att göra utlåtanden om spaltgeometrins inverkan för att undvika att fuktrelaterade skador uppstår, med fokus på insidan av underlagstaket.



Figur 4.4 - Förklaring av symboler i grafiska representationer

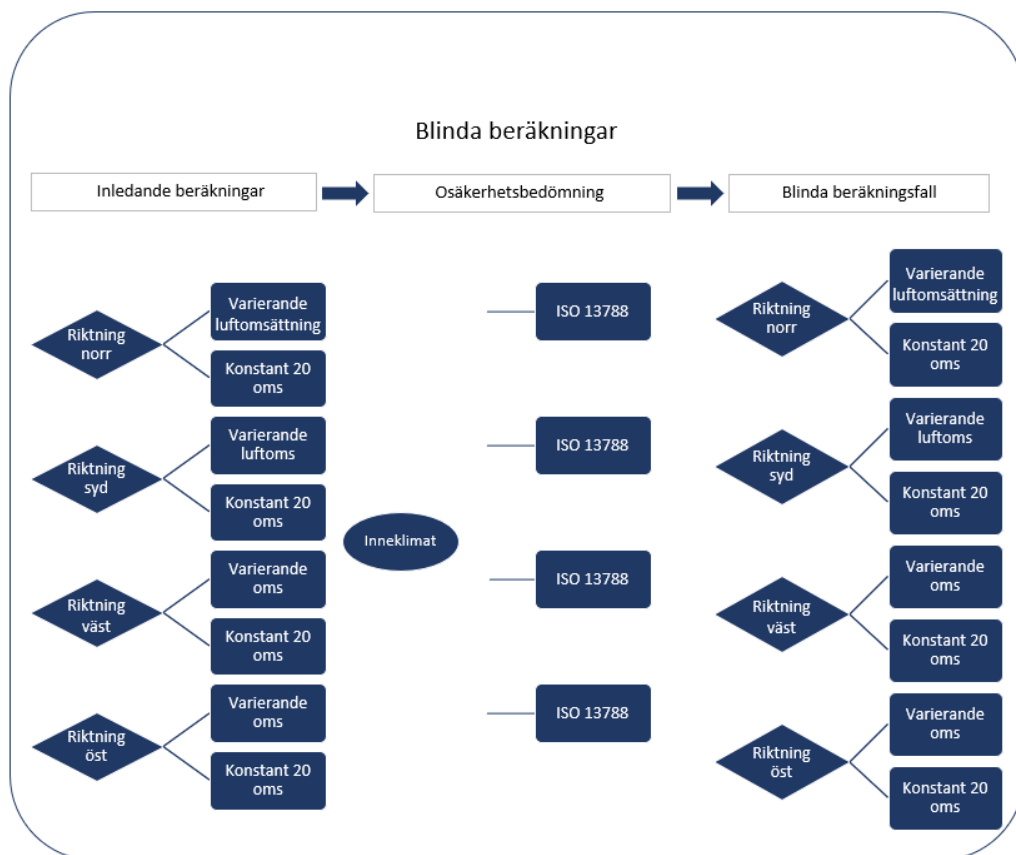
I följande underkapitel används grafiska representationer för att tydliggöra vilka beräkningar som genomfördes, vilka parametrar som undersöktes samt beräkningsgången. I figur 4.4 till vänster förklaras innebörden av symbolerna i dessa figurer.

Varje beräkningsfall innebär en variation av utgångskonstruktionen. På så vis varierades en parameter åt gången i förhållande till utgångskonstruktionen.

### 4.2.1 Blinda beräkningar

Inledande beräkningar skedde för mätobjektet utan att författarna sett resultatet av de praktiska mätningarna. Beräkningarna skedde för mätpositionerna strax ovanför takfot i vardera luftspalt, totalt 4 positioner, en i vardera väderstreck varav två i tak med 45° taklutning och två i tak med 62° taklutning. Mätpositionerna inock har försumrats då dessa kräver en tvådimensionell analys. För varje mätposition genomfördes två beräkningar, en med varierande luftomsättning i spalten (beräknad enligt avsnitt 4.1.2) och en med konstant luftomsättning motsvarande 20 oms/h, vilket är det konstanta värde som rekommenderas i *RäknaF* (Wallentén, 2018).

Samtliga beräkningar skedde enligt 4.1.4.1 med indata enligt samma avsnitt om annat ej anges. Beräkningsfallen tydliggörs i figur 4.5.



Figur 4.5 - Blinda beräkningsfall

Osäkerheter i resultatet analyserades enligt 4.1.4.2 samt utifrån osäkerheter i angivna indata för att försöka precisera resultatet. Många parametrar ansågs låsta på grund av att de har angivna värden från tillverkare eller av annan anledning antar fasta värden. Inneklimatet ansågs vara den parameter som huvudsakligen kunde avvika från antagandet. Resultatets beroende av inneklimatet analyserades genom att variera från inneklimat i standard SS-EN 15026 (2007) (medelstor viktbelastning) till SS-EN ISO 13788 (2013) (fuktklass 1) och jämföra skillnader i resultatet. Inneklimatet valdes i syfte att representera det faktiska inneklimatet för mätobjektet.

#### 4.2.2 Jämförelse, förbättringar och avvikelsetanalys

En jämförelse mellan de blinda beräkningarna och de praktiska mätningarna genomfördes i syfte att undersöka hur konsultmässiga hygrottermiska beräkningar skiljer sig mot praktiska mätningar. Hur väl dessa stämde överens avgjordes dels kvalitativt genom en analys av hur temperatur, relativ fuktighet och fuktkvot varierar över tidsperioden, dels kvantitativt genom bland annat jämförelse av maximala MRD-index över tidsperioden.

Då begynnelsefuktkvoten i den yttre råsponten var en osäker parameter i det blinda beräkningsfallet och som det dessutom finns ett uppmätt värde på undersöktes den i en inledande studie. Då det tydligt kunde konstateras att fel åligger det blinda beräkningsfallet korrigerades detta till ett korrigerat blint beräkningsfall med den nya begynnelsefuktkvoten och användes sedan som jämförelse för vidare avvikelleanalys. Förfarandet illustreras grafiskt under rubriken *Förbättringar* i *figur 4.6*.

Begynnelsefuktkvoten i råsponten analyserades utifrån tre synsätt. Det första synsättet var om det ansatta ursprungliga värdet var rimligt jämfört med mätningarna. Andra synsättet var om begynnelsefuktkvoten var samma som den uppmätta i läkten och om god överensstämmelse då kunde erhållas. Det tredje och sista synsättet var om fuktkvoten vid start kunde ansättas som det beräknade värdet för 1 år fram i tiden. Råsponten bedömdes då vara i jämvikt med sin omgivning redan vid start.

Efter jämförelse mellan mätningar och beräkningar samt eventuella förbättringar avseende begynnelsefuktkvoten i den yttre råsponten analyserades ett antal osäkra parametrar i beräkningsmodellen för att möjligen kunna avgöra vad som avvek mellan beräkningarna och mätningarna. Då beräkningarna genomfördes för ett färdigbyggt parallelltak var de flesta parametrarna fast bestämda. De parametrar som trots detta bedömdes som osäkra och studerades i en avvikelleanalys var

- materialparametrar för trämaterial i råsponten
- metod för hantering av orimliga fuktnivåer i WUFI
- klimatparametrarna
  - vindriktning
  - vindhastighet
- slagregnsinträngning
- luftläckage inifrån
- skuggning på takpartiet i öst-västlig riktning
- val av värde på konstant omsättning.

Hela förfarandet illustreras även grafiskt i *figur 4.6*. Notera att beräkningsförfarandet var iterativt i den mening att eventuella parameterintervall som uppenbart förbättrade resultatet sedan implementerades i det korrigerade blinda fallet. I figuren framgår det slutliga beräkningsförfarandet.

Osäkerheter i materialparametrar för trä i råsponten studerades genom att jämföra det korrigerade blinda beräkningsfallet, där materialet *Spruce radial* ur Fraunhofers materialdatabas (gran med radiell fukt- och värmetransport) användes, mot ett beräkningsfall med *Gran tangentiell* (gran med tangentiell fukt- och värmetransport) från LTH:s materialdatabas i *WUFI Pro* (2019).

Metoden att justera diffusionsmotståndet för vattenånga och skiktjockleken för att undvika numeriska problem i WUFI analyserades genom att jämföra det korrigerade blinda fallet mot beräkningar där programmets standardvärden och rekommenderad skiktjocklek i *RäknaF* (Wallentén, 2018) användes.

Osäkerheter i uppmätt klimatdata undersöktes utifrån två aspekter: vindens riktning och vindens hastighet. Detta eftersom vinden bedömdes ha en stor påverkan på lufthastigheten i luftspalten och viss osäkerhet i inhämtad vindriktning förelåg med hänsyn till variationer för de olika närliggande mätstationerna. För vindhastigheten förelåg det osäkerheter i klimatdatan på grund av skillnader i mikroklimatet vid mätstation och mätobjekt. För vindriktningen undersöktes det om bättre överensstämmelse mot mätningen erhöles när vindriktningen som var uppmätt på mätstationen *Söderarm* användes (i övrigt användes samma klimatdata som för det korrigerade blinda fallet) istället för vindriktningen på Skarpö som användes i det korrigerade blinda fallet.

Osäkerheten i vindhastigheten undersöktes genom att reducera den uppmätta vindhastigheten enligt *ekvation (4.4)* (Awbi, 1991).

$$\frac{v}{v_w} = \frac{\alpha \left(\frac{H}{10}\right)^\gamma}{\alpha \left(\frac{H_w}{10}\right)_w^\gamma} \quad (4.4)$$

Där:

- $v$  är medelvindhastigheten [m/s] på höjden  $H$  [m] ovan mark
- $v_w$  är medelvindhastigheten [m/s] uppmätt vid väderstation på höjden  $H_w$  [m] ovan mark
- $\alpha$  och  $\gamma$  är dimensionslösa justeringsfaktorer som beror av omgivande terräng, värden redovisas i *tabell 4.4* [-]

*Tabell 4.4 - Faktorer för justering av vindhastighet beroende av omgivande terräng (Awbi 1991)*

Terräng	$\gamma$	$\alpha$
Hav eller vatten med minst 5 km utsträckning	0,10	1,30
Platt landskap med enstaka hinder väl separerade från varandra	0,15	1,00
Lantbruksområde med låga byggnader, träd	0,20	0,85
Urban miljö, industri eller skogsområden	0,25	0,67
Storstadscenter	0,35	0,47

Mätningen av vindhastigheten utfördes på 10 meters höjd vilket medförde att  $H_w$  i *ekvation (4.4)* är 10 meter. Då vindtryckscoefficienterna i *ekvation (2.6)* är definierade utifrån vindhastigheten 10 meter ovan mark så ansattes även  $H$  till att vara lika med 10 meter. För framtagning av justeringsfaktorerna i *tabell 4.4* bedömdes den omgivande terrängen vara platt landskap för mätstationen och urban miljö för mätobjektet.

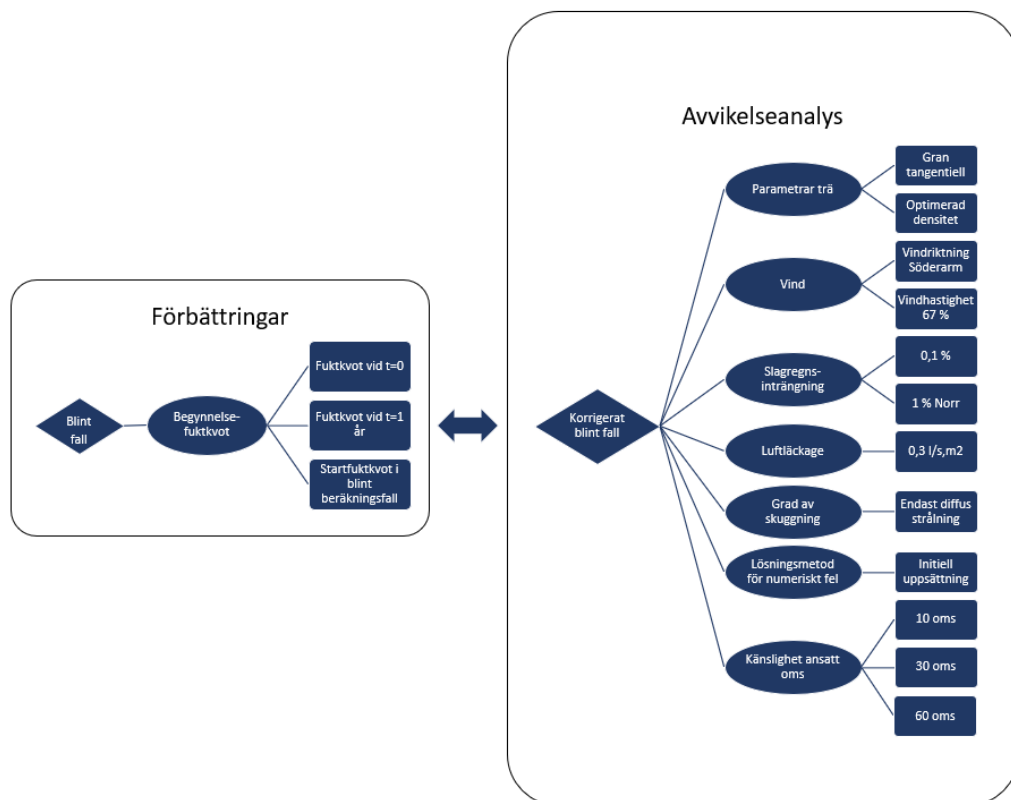
Det undersöktes ifall regnläckage eller luftläckage inifrån kan varit förekommande under mätperioden. Den fuktkälla som regnläckaget gav upphov till ansattes i enlighet med *RäknaF* (Wallentén, 2018) till 0,1 % av regnmängden och placerades på insidan av den yttre råsponten. Anledningen till placeringen på insidan av råsponten var att undvika att vatten stängdes in mellan två täta skikt (takpappen och råsponten) när det i verkligheten

inte var helt tätt mellan dessa material. Ett andra, mer belastande, beräkningsfall tillämpade regnläckage motsvarande 1 % av regnmängden eftersom det motsvarar det högsta läckage som studeras av Eriksson (2017). Luftläckaget beräknades enligt den luftläckagemodell som närmare beskrivs i *avsnitt 4.1.3*.

Osäkerheten i skuggningen för det öst-västliga takpartiet undersöktes genom en beräkning där ingen direkt strålning antogs träffa taket. Detta påverkade såväl den hygrotermiska beräkningen som luftflödesmodellen. För att efterlikna situationen med total skuggning ansattes den globala strålningen i klimatdatan vara lika stor som den diffusa strålningen. Mätningarna antogs visa ett värde som var någonstans mellan dessa beräkningar och föregående beräkningar utan någon skuggning.

Beräkningen med konstant luftomsättning analyserades utifrån osäkerheter i den ansatta omsättningen genom att variera denna.

Samtliga beräkningar i *förbättring* och *avvikelseanalys* illustreras i *figur 4.6*. Beräkningarna utfördes för samtliga väderstreck, med konstant och variabel omsättning, det vill säga totalt 8 beräkningsförfaranden enligt nedan.



Figur 4.6 – Illustrativ beskrivning av beräkningsförfarandet vid förbättringar och avvikelseanalys

### 4.2.3 Parameterstudie

Parameterstudien utgick från en konstruktion och modell som benämndes *Bedömningsfall*. Bedömningsfallet varierades i olika utformningar utifrån undersökta parametrar med utgångsfallet enligt *tabell 4.5*. Fallet avsåg representera ett dimensionerande fall för en vanligt förekommande parallelltakstyp. Skiktjocklek baserades i viss utsträckning på ISOVER:s parallelltak *SL:61*.

Tabell 4.5 – Konstruktions- och modelluppbyggnad för bedömningsfall i WUFI

Material	Material i WUFI	Tjocklek [mm]	Ändrade materialegenskaper
Takplåt	Roof Membrane V13	1	-
Takpapp	Weather resistive barrier (sd=0,2m)	1	-
Råspont	Spruce, radial	22	-
Luftspalt	Air Layer 50 mm	4	-
	Air Layer 50 mm, without additional moisture capacity	45	Diffusionsmotstånd $\mu=0,1$
	Air Layer 50 mm	4	-
Klimatskiva	ISOVER INTEGRA AP Supra - 035	70	Värmelednings-förmåga: 0,035 till 0,033 W/mK
Isolering	ISOVER ULTIMATE Klemmfilz -035	4 skikt á 95 mm	Densitet: 25,2 till 30 kg/m <sup>3</sup> Värmelednings-förmåga: 0,035 till 0,034 W/mK
Ångspärr	Vapour retarder (sd=100m)	1	Diffusionsmotstånd för vattenånga: 100 000 till 75 000
Installationsskikt	Mineral Wool ( $\lambda=0,04$ )	45	-
Gipsskiva	Gypsum Board	12,5	-

Övriga indata för bedömningsfallet var

- utomhusklimat – Dimensionerande 9-års klimat för Stockholm enligt 4.1.1.2
- inomhusklimat – SS-EN ISO 13788 (2013) fuktighetsklass 1, då detta är det inneklimat som representerar svenska förhållanden bäst (Bagge, Johansson & Lindström 2014)
- parametrar för luftflödesmodellen analoga med mätobjektet (se *tabell 4.1*)
- luftläckage enligt 4.1.3 som placerades i den yttersta cellen i klimatskivan
- slagregnsinträning om 0,1 % ansattes i den innersta cellen i råsponten
- begynnelsefuktighet enligt materialvärden i *WUFI Pro* (2019) (ex. 80 kg/m<sup>3</sup> för råsponten)
- spaltbredd 0,545 m, spaltlängd 5,0 m
- utformning av luftintag, luftutsläpp och taknock antogs vara samma som för mätobjektet.



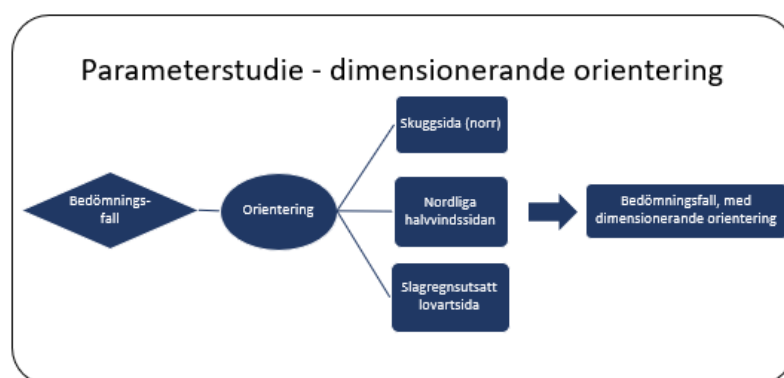
För att undersöka konstruktionen och jämföra beräkningsresultat ur fuktsäkerhets-synpunkt användes *MRD*-index.

### 4.2.3.1 Dimensionerande orientering

I den inledande delen av parameterstudien bestämdes den orientering på konstruktionen som var dimensionerande för det givna utomhusklimatet. De orienteringar som ansågs mest relevanta och således undersöktes var

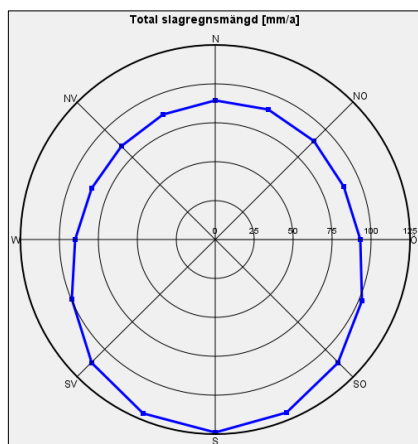
- den mest skuggade orienteringen (d.v.s. tak mot nord)
- orienteringen som gav högst luftomsättning och mest slagregn (d.v.s. tak mot lovartsidan)
- orienteringen som gav lägst luftomsättning och var mest skuggad (d.v.s. tak mot den nordliga utav sidorna som var vinkelräta mot vinden).

Beräkningsförfarandet för den inledande delen presenteras grafiskt i *figur 4.7*.



*Figur 4.7 – Beräkningsfall dimensionerande orientering*

Riktningarna valdes utifrån WUFI:s klimatanalys där total slagregnmängd antogs reflektera ackumulerad vindhastighet för varje väderstreck. Slagregnmängden för ett klimat kan avläsas i WUFI:s klimatanalys. För Stockholmsklimatet presenterar WUFI slagregnmängden enligt *figur 4.8*.



Figur 4.8 – Klimatanalys av slagregns-  
mängd i WUFI Pro för det 9-åriga  
Stockholmsklimatet (WUFI, 2019)

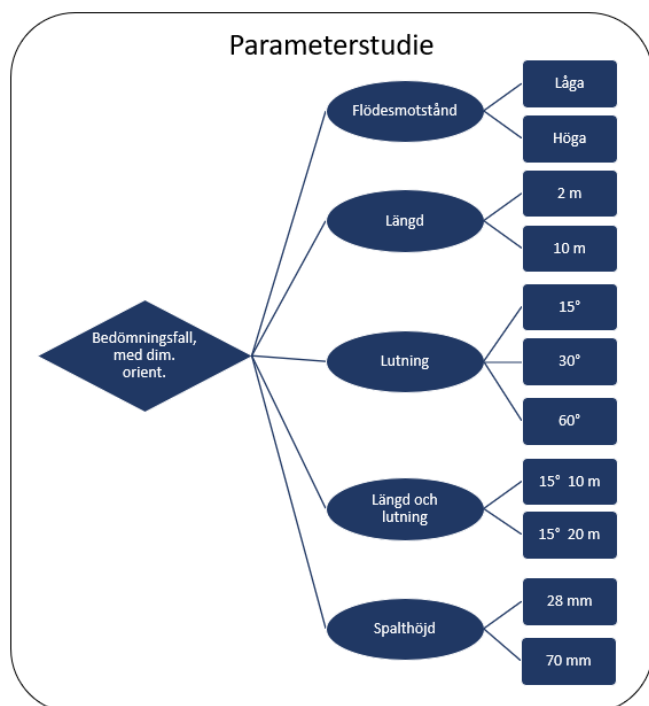
Av figuren noterades att den dominerande vindriktningen för slagregn var vind från syd. Samma riktning antogs dominerande även då nederbörd ej förekommer varför syd var den riktning där högst luftomsättning erhöles för Stockholm.

Den riktning som antogs ge lägst luftomsättning var den riktning som oftast låg 90° från dominerande vindriktning (i detta fall öst-västlig riktning). Riktningen betecknas framöver  $\perp$  Vind. Skuggningen för riktningarna öst och väst var väldigt lika men öst hade något mer slagregn varför öst antogs vara den dimensionerande riktningen av de två.

Eftersom WUFI endast tillät konstruktioner med orientering i någon av 45° intervallen ovan så användes alltid den riktning som var värst utav de närmaste jämna orienteringarna i programmet. I luftflödesmodellen användes rätt riktning.

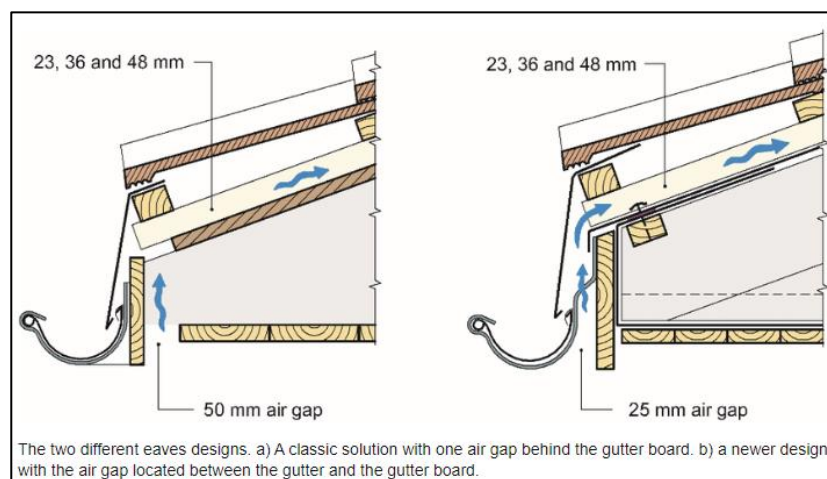
#### 4.2.3.2 Spaltgeometri

Med dimensionerande riktning för Stockholmsklimatet bestämd, analyserades viktiga parametrars inflytande på fuktsäkerheten för detta fall. Viktiga parametrar identifieras i tidigare studier (Mundt-Petersen, 2016; Svantesson & Säwén, 2019; Eriksson, 2017), i denna studie fokuserades på de parametrar som påverkar både fuktsäkerheten och luftflödet i spalten (eftersom dessa inte analyserats simultant i tidigare forskning). Valda parametrar framgår av figur 4.9.



Figur 4.9 – Upplägg parameterstudie

Variationer mellan olika konstruktioner avseende in- och utgångsmotstånd samt motstånd i taknock analyserades genom att ändra samtliga motstånd till det lägre, därefter till det högre, inom ett givet intervall. För in- och utgångsmotstånd användes det intervall som uppmättes av Gullbrekken (2018b), nämligen att förlustfaktorn  $\zeta$  (enligt ekvation (2.11)) för en 48 mm hög spalt varierar mellan 1.5 och 17 (för den höga förlustfaktorn är ett insektsnät inräknat, för den låga antas inget insektsnät). Utformningen av inloppet vid dessa motstånd redovisas i figur 4.10.



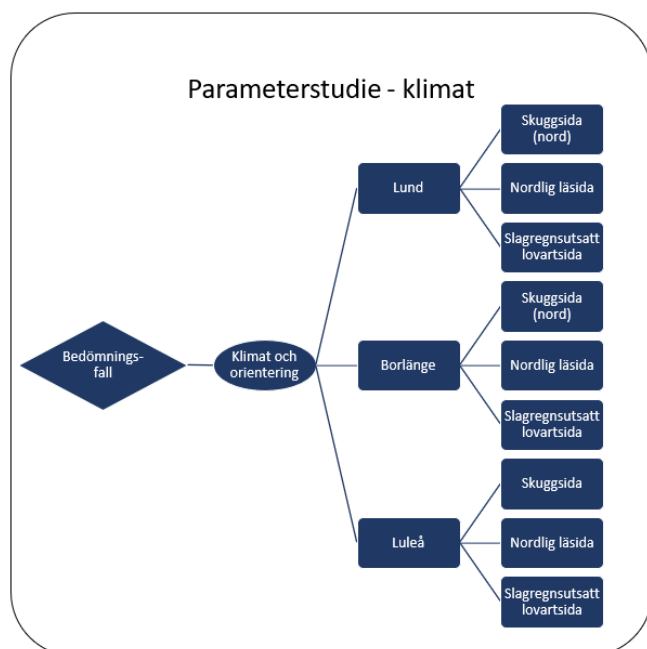
Figur 4.10 - Utformning av inlopp vid låga (vänster) respektive höga motstånd (höger) (Gullbrekken, et al., 2018b)

För motståndet i taknock berodde variationen till stor del på utformandet av taknocken. För detta antogs utformning enligt mätobjektet motsvara det högre motståndet samtidigt som det lägre motståndet motsvarades av en taknock utformad som en 90° böj. Motståndet för en 90° böj beräknades enligt *ekvation (2.16)* och *(2.17)*. Eftersom *ekvationen* för förlustfaktorn (*ekvation (2.17)*) endast var giltig för *Reynolds tal* över 3000 extrapolerades denna beräkning i likhet med Falk (2010) till att förlustfaktorn antog ett konstant värde motsvarande det som beräknades vid *Reynolds tal* om 3500 för alla flöden som var lägre än så. Värdet 3500 valdes av beräkningstekniska skäl och skillnaden mot 3000 var marginell.

Utöver variation av motstånden undersöktes variationer kopplade till spaltens utformning nämligen spaltens längd och höjd samt takets lutning. Dessa varierades var för sig, mellan angivna värden. Värdena baserades på vanligt förekommande utformningar, exempelvis valdes spalthöjder baserat på virkesdimensioner. Slutligen analyserades två fall av låglutande (15°) längre tak, spalllängd 10 och 20 meter som var mer representativa för större byggnader som industribyggnader eller kontor. Notera dock att den modell som användes ej beaktade vindtryckets variation med taklutningen, varför inte heller lägre taklutning än 15° ansågs rimligt i denna modell.

### 4.2.3.3 Klimat

Avslutningsvis undersöktes även klimatets påverkan på fuktsäkerheten genom att studera 3 andra 9-års klimat – Lund, Borlänge och Luleå. För samtliga undersöktes även orienteringen, analogt *avsnitt 4.2.3.1*. Dimensionerande orientering för Stockholm behövde inte nödvändigtvis vara samma som för övriga klimat. Beräkningsfallen redovisas i *figur 4.11*.



Figur 4.11 - Beräkningsfall för klimatdelen av parameterstudien

## 5 Resultat och analys

I detta avsnitt presenteras resultatet av de studier som genomfördes enligt *avsnitt 4*.

### 5.1 Termisk påverkan i luftflödesmodell

Som en del av den luftflödesmodell som redovisas i 4.1.2 modellerades drivkraften på grund av termik i luftspalten. Beräkningen av den termiska drivkraften byggde på Hagentoft (1991) och redovisas i *ekvation (2.3)* som:

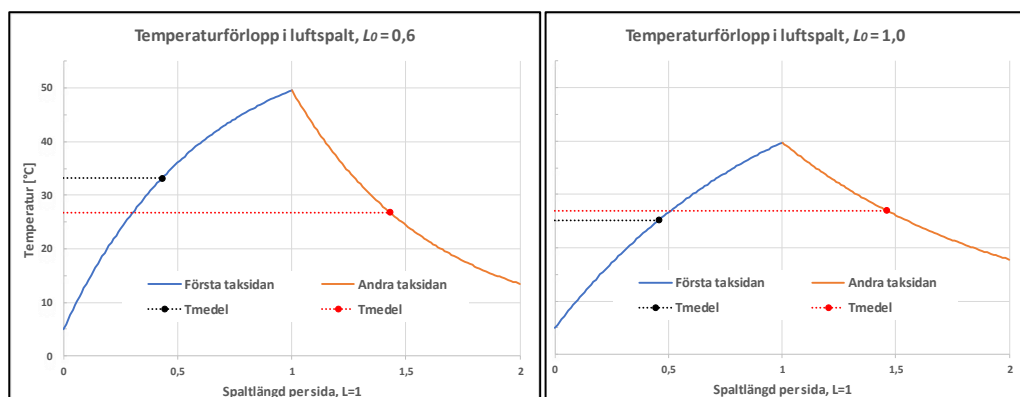
$$\Delta P_{termisk} = g \cdot \rho_{ute} \cdot \sin(\theta) \cdot T_{ute} \int_0^L \frac{1}{T_{spalt\ 2}(l_\theta)} - \frac{1}{T_{spalt\ 1}(l_\theta)} dl_\theta$$

Av detta samband framgår att drivkraften på grund av termik i luftspalten blir positiv (driver på flödet) så länge den första termen i integralen,  $T_{spalt\ 2}$ -delen, är större än den andra termen. Detta kan tolkas som de fall då medeltemperaturen i spalt 2 är lägre än i spalt 1 (eftersom medelvärdet är en integralberäkning). I de fall medeltemperaturen i spalt 2 inte är lägre än i spalt 1 ger termiken en negativ drivkraft, det vill säga termiken agerar som ett flödesmotstånd.

När termiken är den enda drivkraften krävs att denna är positiv för att ett positivt och korrekt flöde ska beräknas i *ekvation (2.1)*. Frågan är således om termiken enkom kan ge upphov till ett flöde. För det fall då ena taksidan utsätts för solstrålning förväntas luften värmas upp och stiga i denna spalt. Luften fortsätter sedan över till spalt 2 och om denna medeltemperatur ska vara lägre än för spalt 1 så måste luften här kylas ned. Detta kan exempelvis ske om endast ena takhalvan utsätts för solstrålning. Intuitivt kan känslan vara att temperaturen vid utloppet måste vara lägre än vid inloppet för att medeltemperaturen vid spalt 2 ska vara lägre än spalt 1, men detta är fel. Temperaturen i spalterna beräknades i modellen enligt *ekvation (2.4)* som:

$$\begin{aligned} T_{spalt\ 1}(l_\theta) &= T_{0,1} - (T_{0,1} - T_{in}) \cdot e^{-l_\theta/L_0} \\ T_{spalt\ 2}(l_\theta) &= T_{0,2} - (T_{0,2} - T_{nock}) \cdot e^{-l_{\theta,nock}/L_0}, \quad \left( \begin{array}{l} T_{nock} = T_{spalt\ 1}(L) \\ l_{\theta,nock} = L - l_\theta \end{array} \right) \end{aligned}$$

Temperaturförloppet över båda spalterna för det fall med solstrålning på ena sidan redovisas principiellt i *figur 5.1*. I figuren framgår att kurvornas utseende är vad som avgör om medeltemperaturen är högre i spalt 1 och en positiv lösning för flödet kan erhållas. De faktorer som huvudsakligen avgör om en positiv lösning erhålls är dels de effektiva längderna  $L_0$ , samt förhållandet mellan de effektiva temperaturerna  $T_0$ . Notera att  $T_0$  för spalt 2 i dessa fall sannolikt aldrig underskrider utetemperaturen (eftersom nattutstrålning oftast inte sker i kombination med solinstrålning), varför de effektiva längderna behöver vara kortare än  $L$  för att termisk drivkraft ska erhållas. I figuren är  $T_{0,2}$  ansatt till lufttemperaturen ute.



Figur 5.1 - Temperaturförloppet över hela luftspaltens längd vid olika effektiv längd  $L_0$

Följande kan således konstateras gällande den, i modellen beräknade, termiska drivkraften för parallelltak med stängdnock:

- Utan vind uppstår ett luftflöde på grund av enkom termisk drivkraft om den effektiva temperaturen på ena taksidan är tillräckligt mycket högre än på den andra sidan.
- Termisk drivkraft i samverkan med drivkraft på grund av vind kan ge upphov till en motkraft om flödet i spalten är tillräckligt högt ( $L_0$  är tillräckligt stor).
- Termisk motkraft erhålls även i samtliga fall då luften inte kyls ned efter passage i taknock.

Termisk drivkraft vid nattutstrålning:

- Nattutstrålningen är normalt lika stor på takets samtliga delar och den termiska drivkraften är således alltid positiv och lika stor, oavsett ansatt flödesriktning.
- Vid avsaknad av vind antas inget flöde uppstå, på grund av att den termiska drivkraften ger en lösning i båda flödesriktningarna.
- Även i samband med vind kan två lösningar erhållas (i de fall då vindens drivkraft är lägre än den termiska drivkraften). I dessa fall förmodas heller inget luftflöde uppstå.

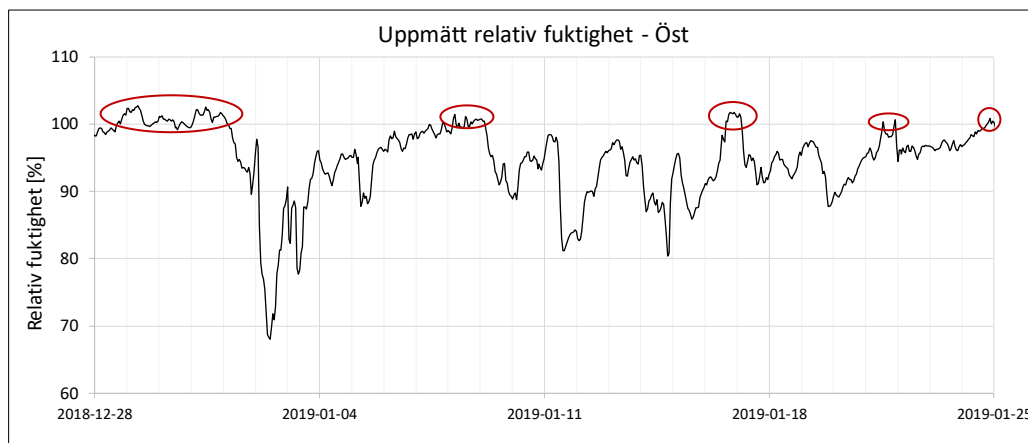
## 5.2 Validering

I detta avsnitt presenteras mätningar tillsammans med resultat av genomförda beräkningar för mätobjektet som tidigare beskrivits i *avsnitt 3*.

### 5.2.1 Mätningar

Vid analys av uppmätta värden konstaterades att inga perioder med avsaknad av data förekommer. Inga perioder med konstanta värden noterades heller. Likaså verkar mätningarna anta rimliga värden under mätperioden med undantag för det fel som upptäcktes i de uppmätta relativa fuktigheterna, nämligen att värdet överstiger 100 % vid ett antal tillfällen. Felet förekommer för det nord-, väst- och östligt orienterade taket. I *figur 5.2* visas en fyraveckorsperiod, för taket med orientering mot öst, där felet

förekommit vid ett antal tillfället (markerat i röd). Ingen åtgärd har vidtagits för att korrigera detta fel. Samtliga mätningar presenteras i *Bilaga C*.



Figur 5.2 – Uppmätt relativ fuktighet i luftspalten för parallelltak mot öst. Tillfällen då relativa fuktigheten överstiger 100 % förtydligas med röd markering

## 5.2.2 Validering av blinda beräkningar

Detta avsnitt har avdelats i en del som redovisar resultatet av de beräkningar som ligger till grund för de blinda beräkningarna och en del där de blinda beräkningarna jämfördes med uppmätta värden. I *avsnitt 5.2.2.1* presenteras de inledande beräkningar som genomfördes innan resultatet av mätningarna mottogs och *avsnitt 5.2.2.2* redovisar en jämförelse mellan de blinda beräkningarna och mätningarna.

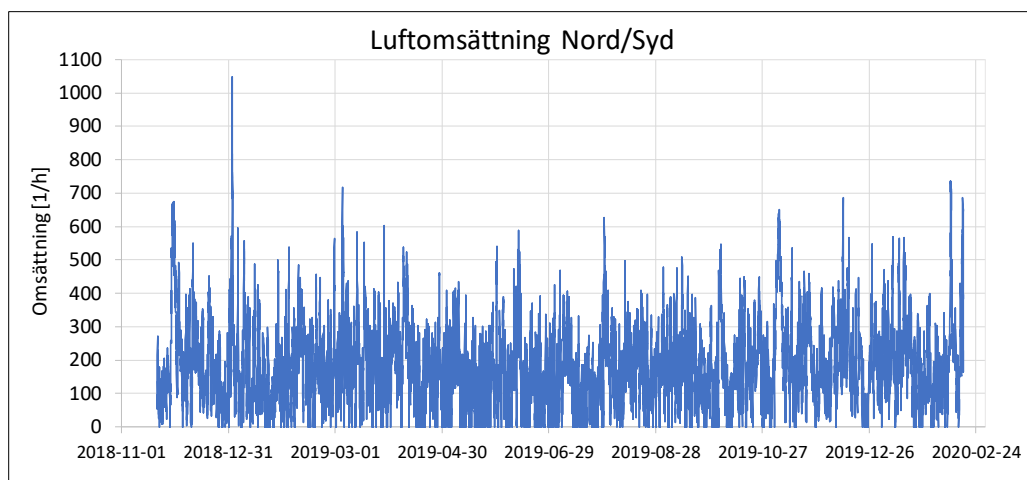
### 5.2.2.1 Beräkningar

För de blinda hygrotermiska beräkningarna beräknades timvisa luftomsättningar med den luftflödesmodell som tidigare beskrivits i *avsnitt 4.1.2*. I *tabell 5.1* redovisas några nyckeltal för luftomsättningen för de aktuella parallelltaken.

Tabell 5.1 - Nyckeltal för luftomsättningar beräknade med luftflödesmodell

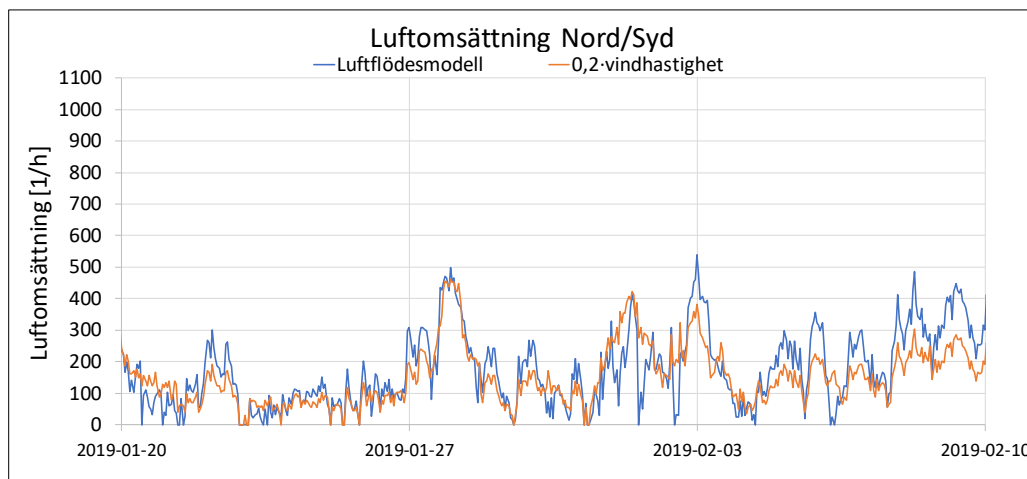
Takparti:	Medianvärde: [1/h]	Medelvärde: [1/h]	Min-värde: [1/h]	Max-värde: [1/h]
Nord-syd	147	182	0	1 047
Öst-väst	232	256	0	950

I *figur 5.3* exemplifieras den beräknade luftomsättningen i luftspalten. Omsättningen för takpartiet i nord-sydlig riktning redovisas. Noterbart i *figur 5.3* är att luftomsättningen överstiger 1000 omsättningar vid ett tillfälle. Den höga luftomsättningen kopplas till de höga vindhastigheter som stormen Alfrida, natten den 2 januari 2019, gav upphov till.



Figur 5.3 - Luftomsättningar för takparti i nord-sydlig riktning beräknade med luftflödesmodell

Jämförelsen mellan omsättningar beräknade med den luftflödesmodell som beskrivs i avsnitt 4.1.2 samt omsättningar beräknade utifrån den lufthastighet i spalten som ges av ekvation (4.3) påvisar god överensstämmelse. I figur 5.4 illustreras jämförelsen över en typisk treveckorsperiod (januari och februari 2019). Skillnaden mellan modellerna är huvudsakligen att vindriktningen och termiken beaktas i luftflödesmodellen.

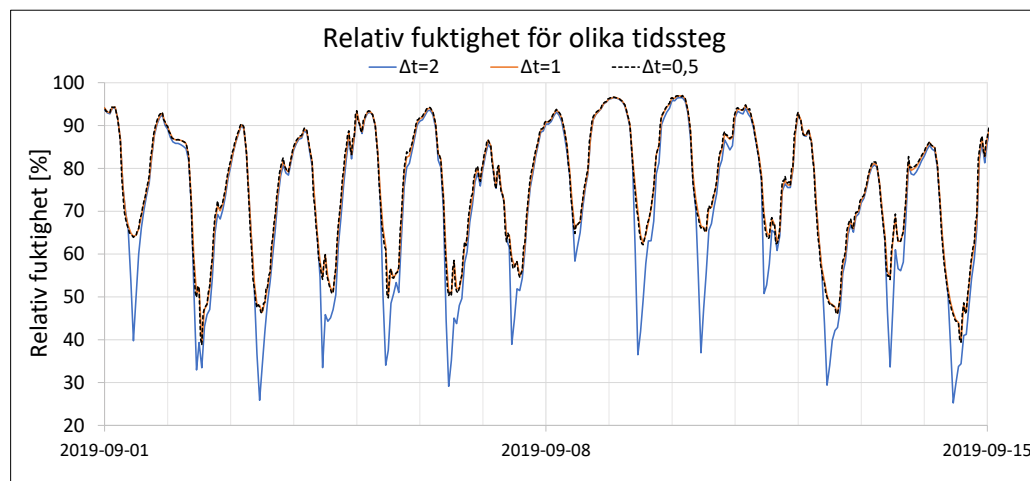


Figur 5.4 - Jämförelse mellan omsättningar för parallelltaket med nord-sydlig orientering beräknade med luftflödesmodell respektive Gullbrekkens, Kvandes & Times (2017) linjära samband

Gällande inneklimatet konstaterades att medelskillnaden i relativ fuktighet och temperatur i luftspalten vid ansatt inneklimat i enlighet med standarden SS-EN 15026 (2007) (medelstor viktbelastning) eller SS-EN ISO 13788 (2013) (fuktclass 1) var liten. Medelvärden för skillnaden var exempelvis 0,04 % för den relativa fuktigheten och 0,01 °C för temperaturen för orienteringen nord. Inneklimatets påverkan på det hygrotermiska klimatet i luftspalten, för ett helt tätt och välisolerat parallelltak, anses därför vara ringa. För den blinda beräkningen tillämpades därför det initiala antagandet om inneklimatet, närmare bestämt SS-EN 15026 (2007) och medelstor viktbelastning.



Tidssteget i de blinda beräkningarna bedömdes utifrån beräknade relativa fuktigheter i spalten. I *figur 5.5* redovisas den relativa fuktigheten över en representativ tvåveckorsperiod för beräkningar med tre olika tidssteg. Som utgångspunkt användes tidssteg om 1 timme då indata i form av klimatdata och beräknade omsättningar var timvisa. Minskning av tidssteget från 1 timme till 0,5 timmar gav ingen väsentlig förbättring av precisionen i resultatet. Halvering av tidssteget till 0,5 timmar avhjälp inte heller problemen med nattutstrålningen som tidigare behandlats i *avsnitt 4.1.4.2*. Då tidssteget istället ökades till 2 timmar försämrades precisionen i resultatet. För fortsatta beräkningar användes därför tidssteg om 1 timme.



Figur 5.5 - Relativ fuktighet i luftspalten för beräkningar med tidsstegen 0,5, 1 och 2 timmar

### 5.2.2.2 Jämförelse

Efter genomförda blinda beräkningar jämfördes resultaten mot de uppmätta värdena. I *tabell 5.2* framgår hur mycket samtliga beräknade resultat skiljer sig mot de uppmätta. Skillnaden redovisas i form av en avvikelsekoefficient som här definierades enligt *ekvation (5.1)*.

$$k_{a,x} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{i,beräknat} - x_{i,uppmätt}|}{n} \bigg/ \bar{x}_{uppmätt} \quad (5.1)$$

Där:

$k_{a,x}$  är avvikelsekoefficienten för parameter  $x$  [%]

$n$  är antalet timmar [h]

$x$  är studerad parameter, i denna studie

- temperatur  $T$  [°C]
- relativ fuktighet  $RF$  [%]
- ånghalt  $v$  [g/m<sup>3</sup>]
- fuktkvot  $FK$  [%]

$\bar{x}$  är medelvärdet av den studerade parametern

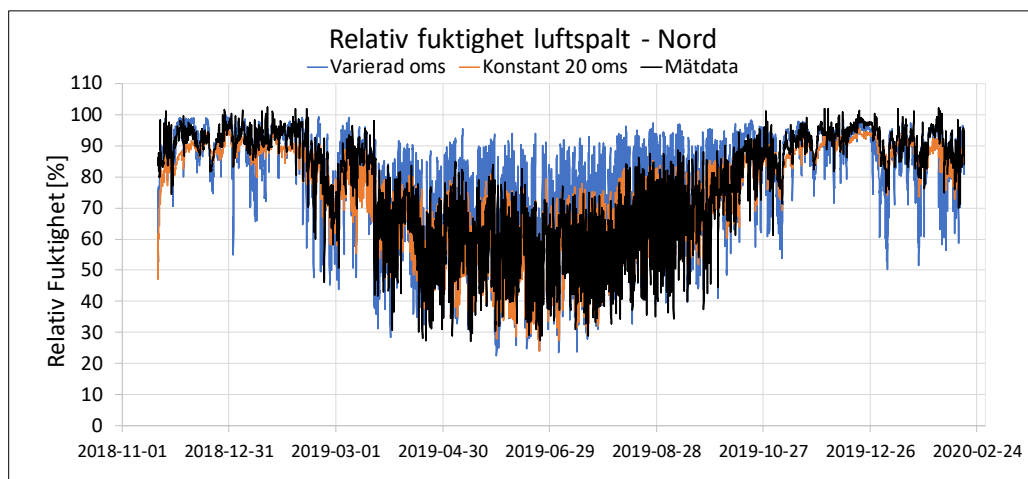
## Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak

Tabell 5.2 – Jämförelse mellan beräknade och uppmätta värden redovisad i form av avvikelsekoefficienter

Orientering	Oms.	$k_{a,T}$ [%]	$k_{a,RF}$ [%]	$k_{a,v}$ [%]	$k_{a,FK}$ [%]
Nord	Var.	21,4	10,3	12,7	14,9
	Konst.	21,6	7,2	10,3	14,7
Syd	Var.	28,8	12,2	11,1	12,1
	Konst.	43,9	14,0	17,6	15,9
Öst	Var.	29,5	10,4	10,5	23,1
	Konst.	58,9	17,1	22,1	28,2
Väst	Var.	21,4	9,3	10,8	25,5
	Konst.	30,1	10,7	15,3	29,8

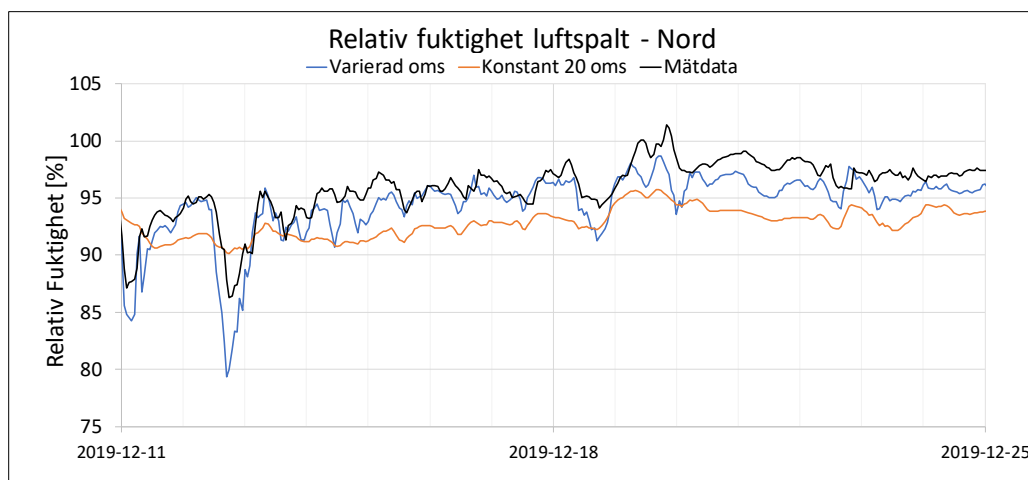
Utifrån avvikelsekoefficienterna i *tabell 5.2* framgår att för takorienteringarna syd, öst och väst gav beräkning med varierad luftomsättning bättre överensstämmelse med uppmätta värden än beräkning med konstant luftomsättning. För nordlig takorientering var resultatet inte lika entydigt då beräkning med konstant luftomsättning gav högre överensstämmelse i de flesta avseenden, förutom för temperatur.

Den relativa fuktighetens förändring över tidsperioden analyserades. Det förekom generella företeelser som gäller för alla fyra orienteringar. Mellan mars och november var amplituden för den relativa fuktigheten, beräknad med varierad luftomsättning, ofta högre än för de uppmätta värdena. Företeelsen redovisas för takpartiet med nordlig orientering, som var representativt för samtliga orienteringar, i *figur 5.6*. Övriga månader, årets kallare månader, gav beräkning med varierad luftomsättning högre överensstämmelse med uppmätta värden, vilket exemplifieras i *figur 5.7*.



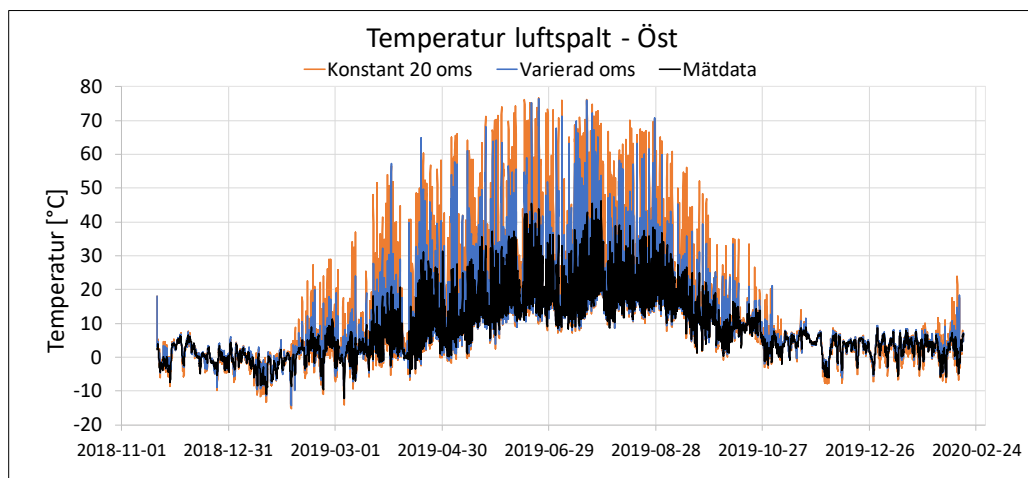
Figur 5.6 - Beräknad och uppmätt relativ fuktighet för nordliga parallelltak

## Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak

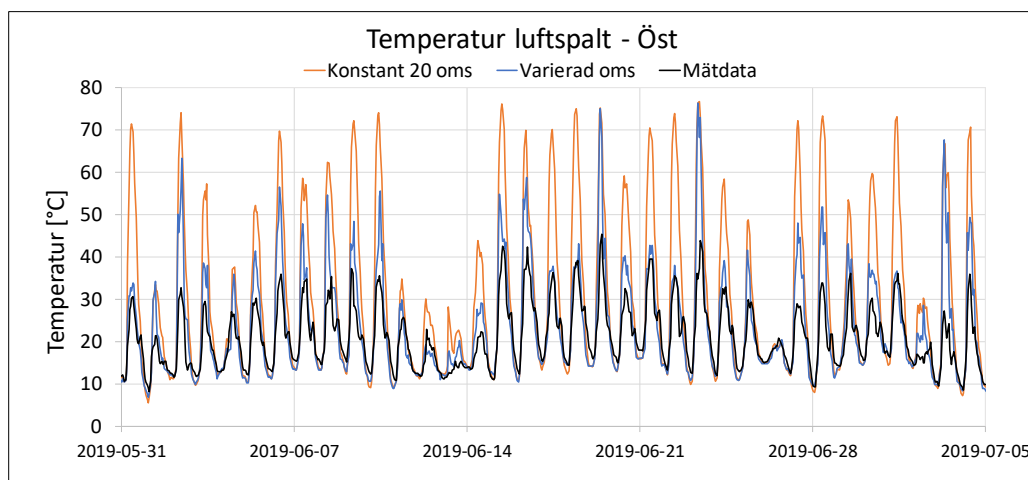


Figur 5.7 - Beräknad och uppmätt relativ fuktighet för en tvåveckorsperiod för nordliga parallelltaket

Vid analys av temperaturens förändring över tid konstaterades att beräknad temperatur för både konstant och varierad luftomsättning var högre än uppmätt temperatur på sommaren för det sydligt och östligt orienterade takpartiet (se *figur 5.8* och *figur 5.9* för temperatur i östra takpartiet). Det konstaterades även att beräkning med konstant omsättning gav högre temperatur under sommaren än beräkning med varierad omsättning. Att den beräknade temperaturen för det östliga takpartiet avvek kraftigt från de uppmätta ansågs i viss utsträckning härleda från osäkerheten i grad av skuggning för takpartiet. Resultatet av avvikelseanalysen med hänsyn till graden av skuggning presenteras i *avsnitt 5.3*. Dock kan skuggningen inte vara den fullständiga förklaringen till avvikelserna eftersom den i så fall borde vara störst för det västra, inte östra, takpartiet då det västra är mer avskärmat (exempelvis av den fyrkantiga tornbyggnaden). En viss avvikelse mellan beräknade och uppmätta temperaturer skulle även kunna bero på skillnad mellan utomhustemperatur vid mätobjektet och den klimatstation som valdes. Avvikelsen bör påverka samtliga takpartier i liknande omfattning.

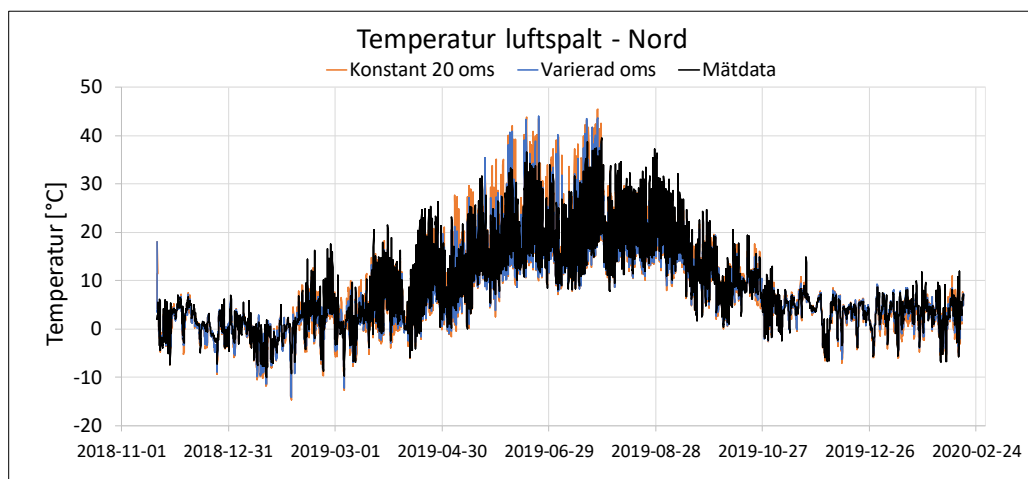


Figur 5.8 - Beräknad och uppmätt temperatur för östra parallelltaket



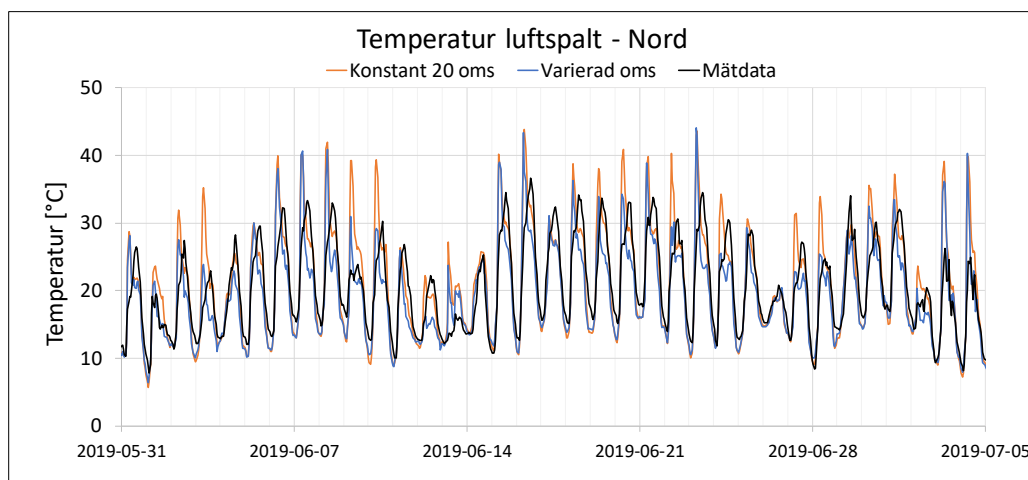
Figur 5.9 - Beräknad och uppmätt temperatur för en femveckorsperiod för östra parallelltaket

Av figur 5.10 framgår att överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta temperaturer för det nordligt orienterade takpartiet var god vilket även gällde för det västligt orienterade takpartiet. Under sommarperioden var temperaturerna beräknade med varierad omsättning ofta något lägre än de uppmätta temperaturerna, medan beräkning med konstant omsättning istället ofta gav en något för hög temperatur (se figur 5.11).



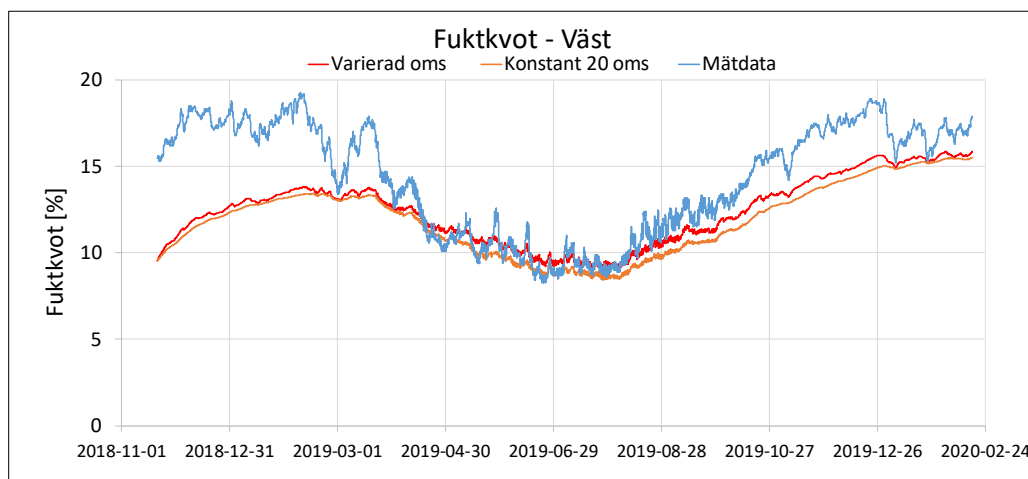
Figur 5.10 - Beräknad och uppmätt temperatur för nordliga parallelltaket

## Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak



Figur 5.11 - Beräknad och uppmätt temperatur för en femveckorsperiod för nordliga parallelltaket

De beräknade fuktkvoterna jämfördes mot de uppmätta. I figur 5.12 redovisas fuktkvoten, för det västligt orienterade takpartiet, vilken var representativ för samtliga takpartier. Av figuren framgår att den antagna begynnelsefuktkvoten avvek kraftigt mot den uppmätta fuktkvoten. Det kan även konstateras att den uppmätta fuktkvoten varierade kraftigare än vad den beräknade fuktkvoten gjorde.

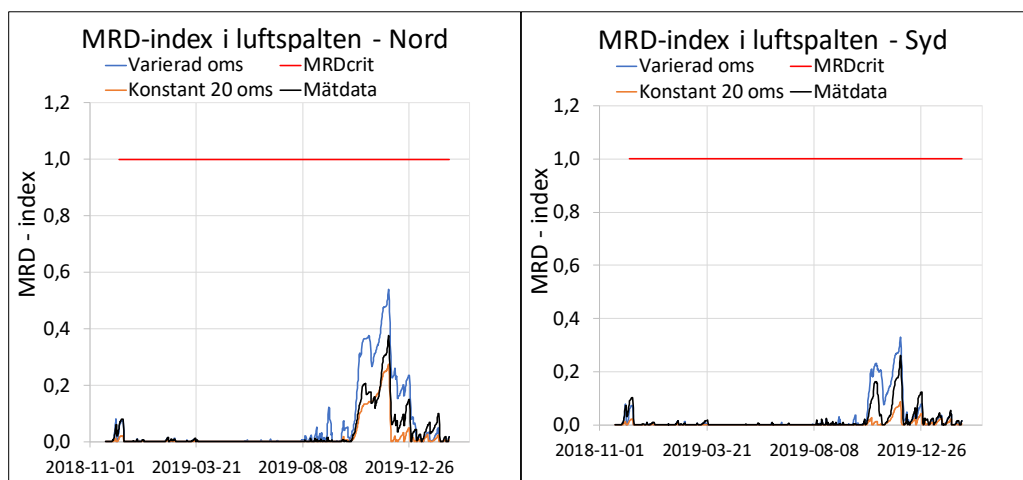


Figur 5.12 - Beräknade och uppmätta fuktkvoter för västra takpartiet

Resultatet jämfördes utifrån beräknad fuktsäkerhet enligt MRD-modellen. Av figur 5.13-5.16 framgår att beräkning med varierad omsättning gav högre MRD-index (d.v.s. större risk för mikrobiell påväxt) än beräkning med konstant omsättning, för samtliga takpartier. För takpartiet med nord-sydlig orientering gav varierad omsättning ett högre MRD-index i luftspalten än samma index för de uppmätta värdena. Det vill säga att den beräknade risken för mikrobiell påväxt var högre än den uppmätta, en beräkning på säkra sidan som kan användas i dimensionerande syften. Beräkning med konstant omsättning gav i sin tur ett lägre MRD-index än de uppmätta värdena. För både öst- och västlig orientering gav beräkning med både konstant och varierad omsättning för låg

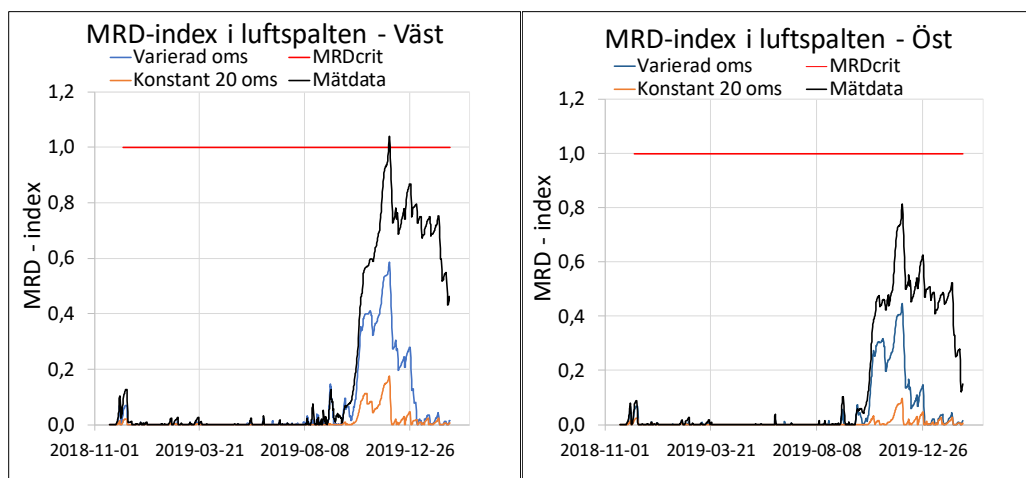
riskbedömning gentemot mätningarna, vilket eventuellt kan bero på graden av skuggning (se *figur 5.26* och *figur 5.27*). Det kan även konstateras att MRD-index för uppmätta värden i samtliga orienteringar, förutom väst, understeg den kritiska nivån och dessa konstruktioner bedömdes därför vara fuktsäkra. Västlig orientering var således dimensionerande för mätobjektet, vilket identifierades av modellen med varierande omsättning. För beräkning med konstant omsättning var resultatet att nord var dimensionerande orientering.

För takpartierna med nord och sydlig orientering var resultatet inte entydigt eftersom beräkning med konstant omsättning efterliknade uppmätta värden mest för den nordliga delen av taket medan beräkning med varierande luftomsättning efterliknade uppmätta värden mest för den sydliga delen.



*Figur 5.13 - MRD-index i luftspalten för nordtaket* *Figur 5.14 - MRD-index i luftspalten för sydtaket*

För de öst- och västligt orienterade takpartierna framgår av *figur 5.15* och *figur 5.16* att MRD-index med varierad- respektive konstant luftomsättning var på osäkra sidan. Den beräkning som mest efterliknade uppmätta värden var med varierad omsättning, för båda orienteringarna. Till sist konstateras att MRD-index för de uppmätta värdena var högre för takpartierna med öst- och västlig orientering än för takpartierna med nord- och sydlig orientering. För västra delen överstegs kritisk MRD-index precis, vilket innebar att viss risk för mikrobiell påväxt beräknades föreligga. Att MRD för västra sidan var högre än för östra sidan stöddes av tidigare beskrivning av mätobjektet där exempelvis ett torn orsakar högre andel skuggning på västra sidan.



Figur 5.15 - MRD-index i luftspalten för västtaket    Figur 5.16 - MRD-index i luftspalten för östtaket

## 5.3 Förbättring av modell och avvikelseanalys

Undersökta parametrar presenteras under respektive underrubrik nedan.

### 5.3.1 Begynnelsefuktkvot

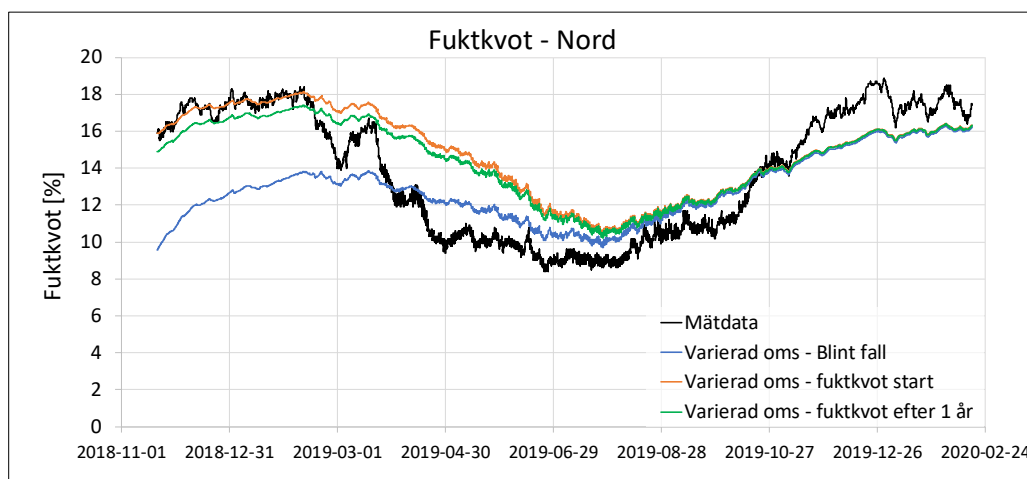
Efter att de blinda beräkningarna jämfördes mot mätningar analyserades begynnefuktkvoten med förhoppning om att öka överensstämmelsen mellan beräkningarna och uppmätta värden. Som tidigare konstaterats i *avsnitt 5.2.2* och som även framgår av blå kurva i *figur 5.17* så avvek begynnefuktkvoten i ursprungsfallet från den uppmätta. Genom att ansätta den uppmätta begynnefuktkvoten som begynnefuktkvot i beräkningen erhöles bättre överensstämmelse med uppmätta värden under den inledande vintern vilket illustreras av orange kurva i *figur 5.17*. Då den uppmätta fuktkvoten vintern 2018/2019 liknade fuktkvoten som uppmättes vintern 2019/2020 antogs att råsponten var i jämvikt med sin omgivning sett till årsperiodiciteten, vilket ger fuktkvoten vid mätningens start. En beräkning med den beräknade fuktkvoten efter ett års tid som ansatt begynnefuktkvot genomfördes därför. Resultatet av den beräkningen gav fuktkvoter under den inledande vintern som var lägre än när den uppmätta begynnefuktkvoten användes. Detta ansågs vara rimligt då den beräknade fuktkvoten vintern 2019 till 2020, oavsett begynnefuktkvot, var lägre än den uppmätta. I den fortsatta avvikelseanalysen korrigerades därför den blinda beräkningen till *korrigerat blind beräkningsfall* med den beräknade fuktkvoten efter 1 år som begynnefuktkvot.

Korrigeringen av det blinda fallet påverkade fuktkvoten i råsponten samtidigt som den hade en minimal påverkan på temperaturen, relativa fuktigheten och ånghalten i luftspalten. I *tabell 5.3* redovisas därför endast hur många procentenheter avvikelsekoeficienterna för fuktkvot sjönk i jämförelse med de blinda beräkningarna. Av tabellen konstateras att korrigeringen gav en bättre överensstämmelse med uppmätt fuktkvot jämfört med de blinda beräkningarna för samtliga orienteringar. Störst förbättring erhöles för det västligt orienterade takpartiet. Slutsatsen är att antagandet om

jämvikt med omgivningen vid mätningens start gav alltför låg begynnelsefuktkvot och ett bättre antagande hade varit att räkna på jämvikt över året.

Tabell 5.3 – Förbättring av avvikelsekoefficienterna för fuktkvot jämfört med de blinda beräkningarna

Orientering	Oms.	$k_{a,FK}$ [%-enheter]
Nord	Var.	-2,7
	Konst.	-3,0
Syd	Var.	-3,1
	Konst.	-3,8
Öst	Var.	-4,6
	Konst.	-5,0
Väst	Var.	-15,4
	Konst.	-18,4

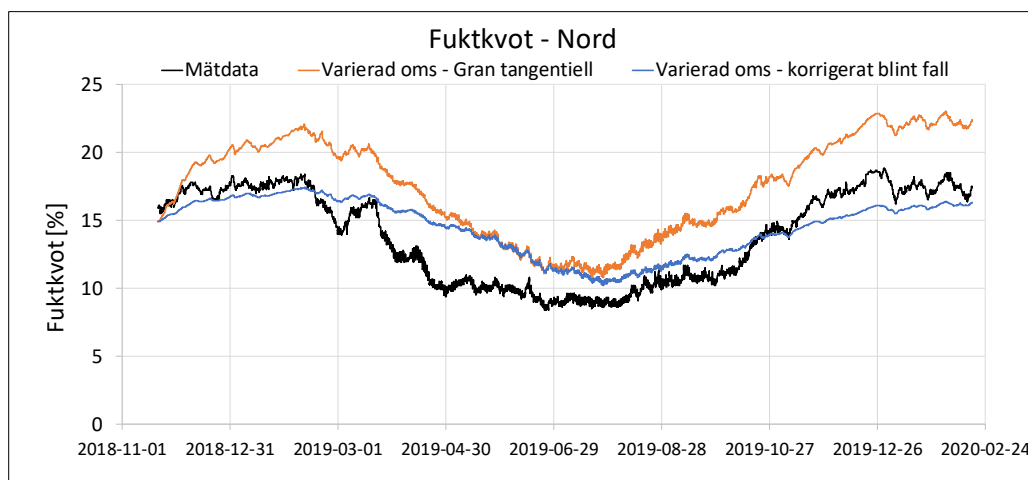


Figur 5.17 - Fuktkvot i nordliga parallelltaket för olika ansatta begynnelsefuktkvoter. Endast beräkningarna med varierade luftomsättningar redovisas då beräkningarna med konstanta luftomsättningar följer beräkningarna med varierade luftomsättningar för samtliga tre fall i enlighet med fuktkvoterna i figur 5.12

### 5.3.2 Materialparametrar för råspont

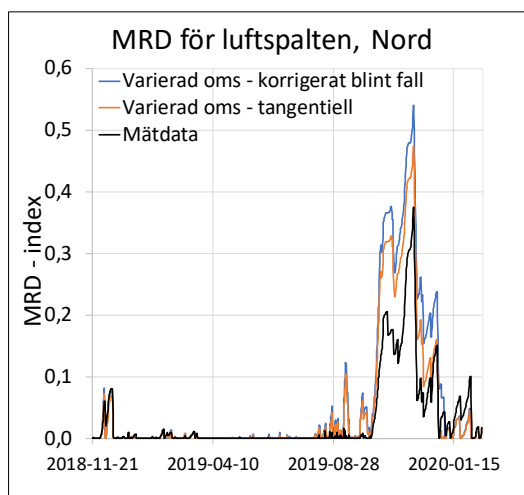
Avvikelsen i fuktkvot mellan beräkningar och mätningar analyserades genom att variera den antagna fuktkvotriktningen i råsponten. Beräkningar där riktning för fuktkvot i råsponten byttes från radiell till tangentiell riktning genomfördes. Beräkningen med tangentiell transportriktning gav en större variation i fuktkvoten vilket framgår av figur 5.18 där fuktkvoten för beräkning med tangentiell respektive radiell riktning och den uppmätta fuktkvoten för parallelltaket med nordlig orientering redovisas. Av figur 5.18 framgår att de variationer som återfanns i de uppmätta värdena efterliknades bättre vid beräkning med tangentiell riktning. Dock var fuktkvoten för beräkning med tangentiell riktning genomgående för hög vilket medförde att skillnaden mot uppmätta värden blev större än för beräkningen med radiell riktning.





Figur 5.18 - Beräknad fuktkvot i råsponten med radiell respektive tangentiell riktning på fuktktransporten och uppmätt fuktkvot för det nordliga parallelltaket

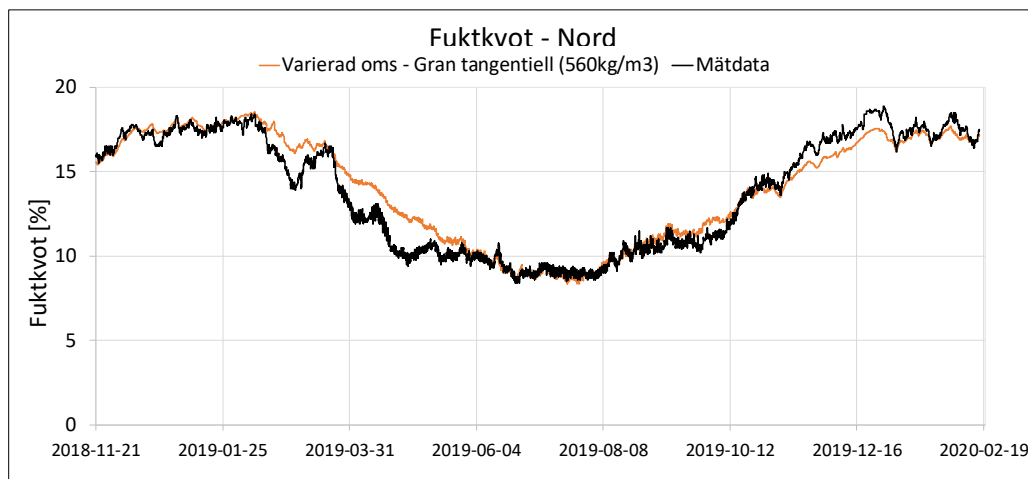
Risken för mikrobiell påväxt i luftspalten vid byte av fuktktransportriktning i råspontsskikten, från radiell till tangentiell, analyserades. Förändringen gav ett lägre MRD-index i luftspalten vilket framgår av den blåa kurvan i figur 5.19. Det kan således konstateras att bytet från radiell till tangentiell riktning på fuktktransporten i råsponten gav en högre fuktkvot samtidigt som MRD-index i luftspalten blev lägre. Lägre MRD-index skulle kunna förklaras av att råsponten har ökad förmåga att buffra fukt i beräkningsmodellen.



Figur 5.19 - MRD-index för luftspalten i nordliga parallelltaket

Som tidigare konstaterades utifrån resultatet i figur 5.18 var fuktkvotskurvan för tangentiell riktning genomgående för hög jämfört med uppmätta värden. Ett sätt att förskjuta kurvan nedåt var att öka skrymdensiteten på materialet. Då skrymdensiteten ökades från  $430 \text{ kg/m}^3$  till  $560 \text{ kg/m}^3$  erhöles en fuktkvot enligt figur 5.20. Skrymdensiteten optimerades utifrån vilken som gav lägst avvikelsekoefficient vid jämförelse med den uppmätta fuktkvoten.  $560 \text{ kg/m}^3$  var den skrymdensitet som gav bäst överensstämmelse med uppmätta värden, för den nordligt orienterade delen av taket, med en avvikelsekoefficient på 4,8 %. Det kan jämföras med det korrigerade blinda fallet där avvikelsekoefficienten var 12,2 %. Trots förbättrad överensstämmelse bedöms en skrymdensitet om  $560 \text{ kg/m}^3$  vara orimligt hög och förbättringen implementerades därför inte i beräkningen. Resultatet kan dock indikera systematiska fel, exempelvis fel i mätningar, felaktiga materialparametrar såsom fuktktransportförmåga eller sorptionsisoterm, eller en något för låg densitet (även om den inte ska vara så hög som

560 kg/m<sup>3</sup>). Resultatet påverkades även av att *WUFI Pro* (2019) inte beaktar hysteres utan räknar med samma sorptionsisoterm vid absorption och desorption.



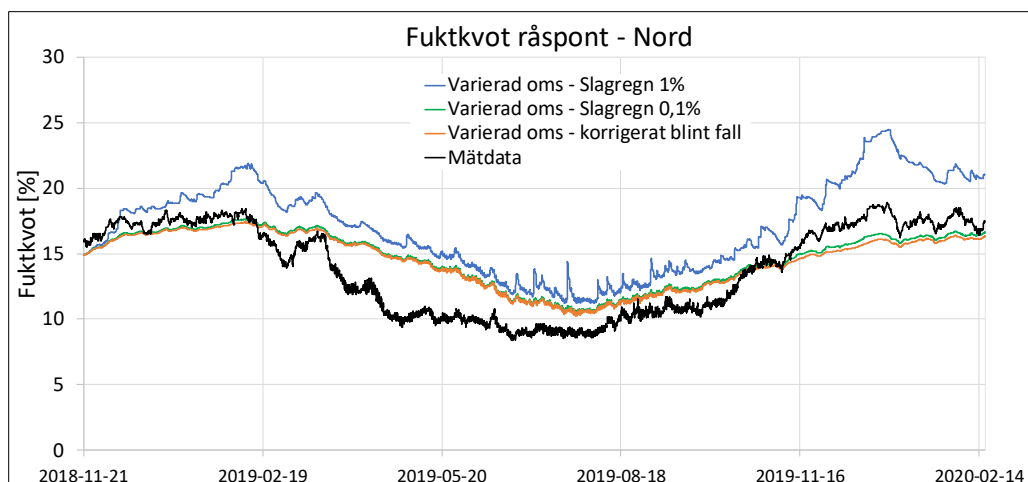
Figur 5.20 – Fuktkvot för beräkning med varierad omsättning och skrymdensitet 560 kg/m<sup>3</sup> för nordliga parallelltaket

### 5.3.3 Vind

Osäkerheten i den ansatta vindriktningen och vindhastigheten analyserades. Då vindriktningen förändrades enligt förfarande i *avsnitt 4.2.2* erhöles ingen precisering av resultatet vilket tyder på att inget systematiskt fel avseende ansatt vindriktning verkade förekomma. Vindhastigheten förändrades med hänsyn till omgivningens påverkan enligt *ekvation (4.4)* vilket gav en reducering av vindhastigheten till 67 % av den som uppmättes vid mätstationerna. Reduceringen av vindhastigheten gav ingen entydig förbättring av resultatet gentemot uppmätta värden. Både ansatta vindriktningar och vindhastigheter förmodas därför vara riktiga i den mening att bättre vinddata ej kan erhållas genom att välja andra mätstationer eller genomgående lägre vindhastigheter.

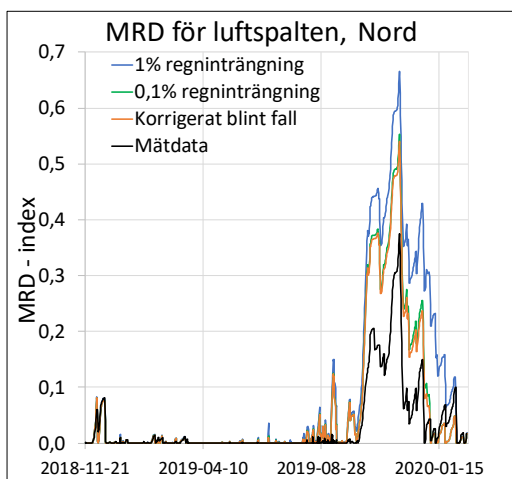
### 5.3.4 Slagregnsinträning och luftläckage inifrån

Slagregnsinträningens påverkan på resultatet analyserades. I *figur 5.21* redovisas fuktkvoten för det nordligt orienterade takpartiet eftersom detta var representativt för övriga orienteringar. Då 0,1 % slagregnsinträning ansattes erhöles en högre fuktkvot i råsponten vilket framgår av *figur 5.21*. En slagregnsinträning om 1 % ansattes också vilket gav en ännu högre fuktkvot och redovisas i *figur 5.21*. Kvalitativt konstateras att utseendet på den uppmätta fuktkvoten efterliknades i stora drag mer av beräkningen med en slagregnsinträning om 1 % än av de övriga beräkningarna.



Figur 5.21 - Fuktkvot i råsponten i nordliga parallelltaket med och utan slagregnsinträngning

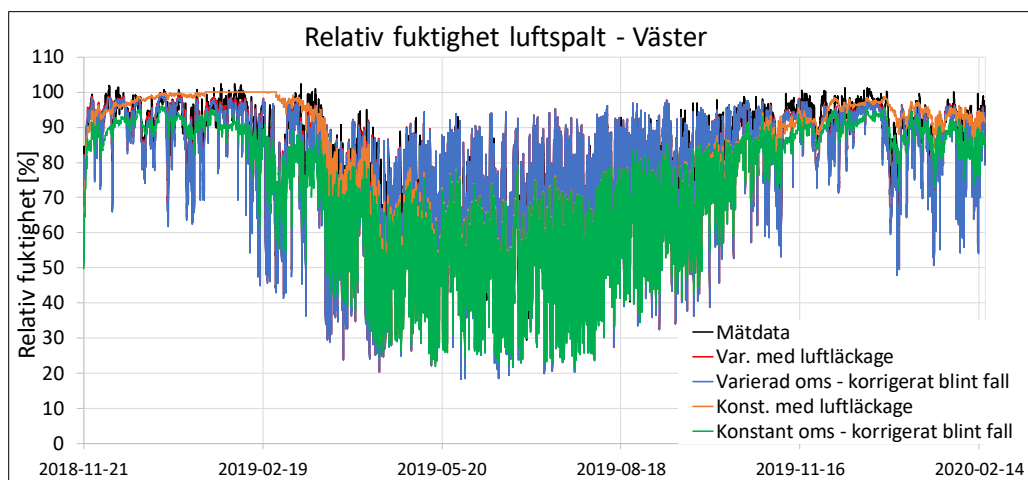
Då en slagregnsinträngning om 0,1 och 1 % ansattes erhöles högre MRD-index för luftspalten vilket framgår av figur 5.22. Topparna i MRD-index erhöles även utan slagregnsinträngning vilket tyder på att dessa berodde på att fuktig utomhusluft ventilerades in i spalten. När slagregnsinträngning ansattes förstärktes dessa toppar ytterligare.



Figur 5.22 - MRD-index för luftspalten i nordliga parallelltaket

Luftläckage inifrån och dess påverkan på resultatet analyserades genom att ett luftläckage ansattes, som beräknades utifrån den modell som beskrivs i avsnitt 4.1.3, i de hygrotermiska beräkningarna. Det luftläckage som togs fram för de båda parallelltaken redovisas i figur 9.12 och figur 9.13 i Bilaga B. Både de timvisa fuktflödena och dygnsmedelfuktflödena redovisas för att illustrera den utjämning av fuktbelastningen som diskuteras i avsnitt 4.1.3.

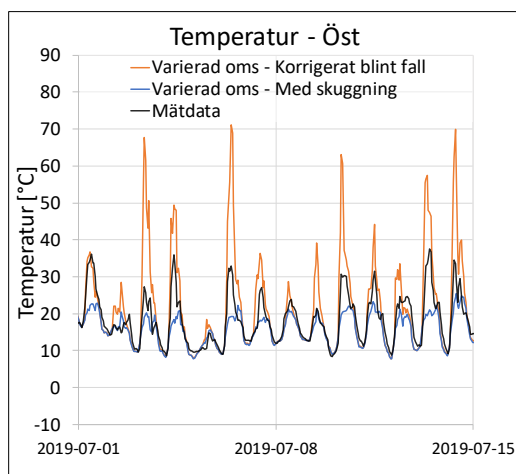
Då ett luftläckage inifrån ansattes i beräkningarna erhöles en något högre relativ fuktighet i luftspalten för beräkningen med varierad luftomsättning. Det gav alltid högre relativ fuktighet och ansågs därför inte vara en precisering av resultatet. För beräkningen med konstant omsättning gav luftläckaget stora konsekvenser i resultatet då spalten blev helt fuktmättad (se orange kurva i figur 5.23) vilket ledde till att fuktkvoten i råsponten blev väldigt hög. Då tak mot väst var representativt för samtliga orienteringar redovisas den relativa fuktigheten för denna orientering i figur 5.23.



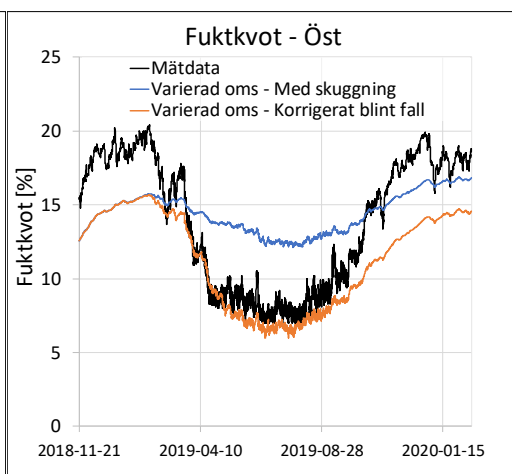
Figur 5.23 - Relativ fuktighet i luftspalten vid ansättning av luftläckage inifrån för parallelltaket mot väst

### 5.3.5 Skuggning

Som komplement till den blinda beräkningen för parallelltaket med öst-västlig orientering, där ingen skuggning av taket ansattes, genomfördes en beräkning med fullständig skuggning. Vid jämförelse mot uppmätta värden konstaterades att beräkningen utan skuggning gav högre temperatur i luftspalten än den uppmätta, medan beräkningen med fullständig skuggning gav lägre temperatur än den uppmätta. Under vinterperioden av året då solstrålningens påverkan på temperaturen i luftspalten är mindre var likheten stor mellan de båda beräkningarnas temperaturer. Störst skillnad i temperatur var det på sommaren vilket framgår av *figur 5.24*. Detta återspeglas även i den relativa fuktigheten då beräkningen med fullständig skuggning gav högre relativ fuktighet på sommaren eftersom temperaturen var lägre. För båda orienteringarna var fuktkvoten i råsponten betydligt bättre representerad av beräkningen utan skuggning (se *figur 5.25* för fuktkvoten i den östra delen av parallelltaket).

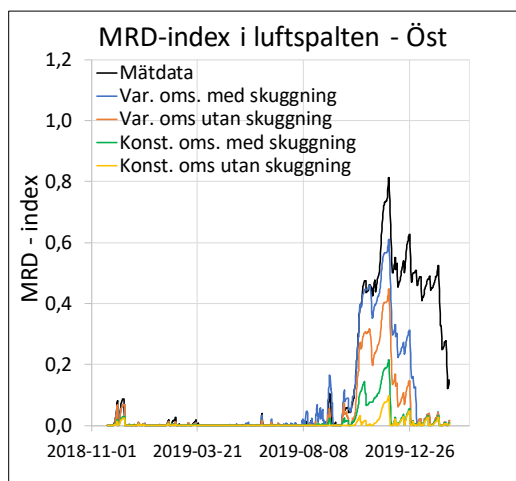


Figur 5.24 - Temperatur i luftspalten för östra parallelltaket

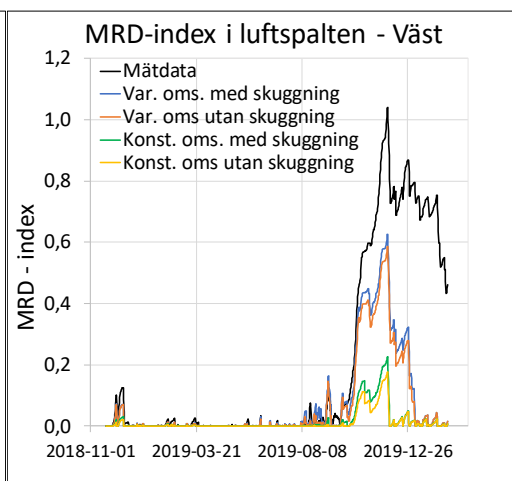


Figur 5.25 - Fuktkvot i råsponten för östra parallelltaket

Då fullständig skuggning ansattes höjdes MRD-indexet för både beräkning med varierad och konstant omsättning vilket framgår av *figur 5.26* och *figur 5.27*. Störst skillnad mellan beräkning med och utan skuggning erhöles för den östra delen av parallelltaket. För båda orienteringarna erhöles bättre överensstämmelse med uppmätta värden vad gäller bedömning av risken för mikrobiell påväxt då fullständig skuggning av taket ansattes. Resultatet är inte nödvändigtvis en indikation att taken var fullt skuggade utan kan bero på andra faktorer, exempelvis var denna luftspalt placerad vid ett hörn vilket ger upphov till en köldbrygga och kallare klimat i spalten. För det västliga takpartiet var förbättringen heller inte särskilt stor.



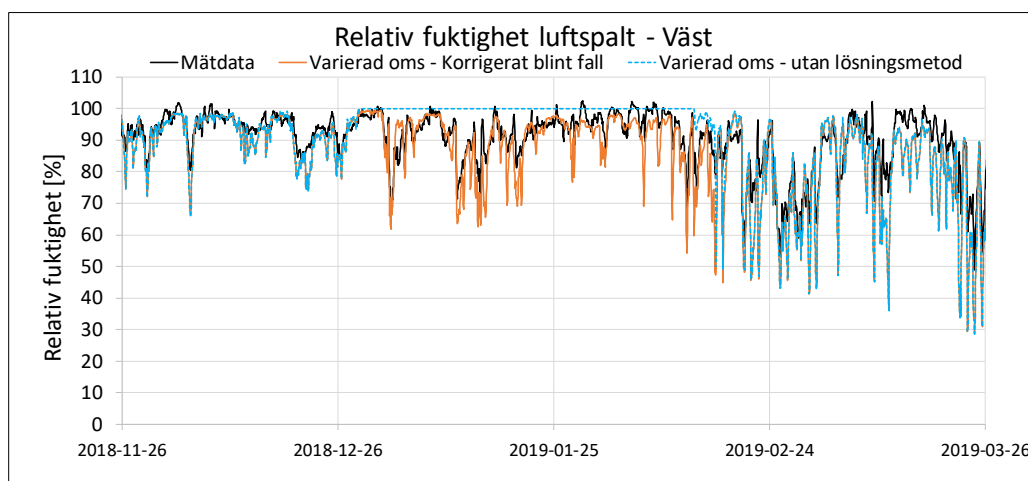
Figur 5.26 - MRD-index för luftspalten i östra parallelltaket med och utan skuggning



Figur 5.27 - MRD-index för luftspalten i västra parallelltaket med och utan skuggning

### 5.3.6 Lösning av numeriskt fel i WUFI

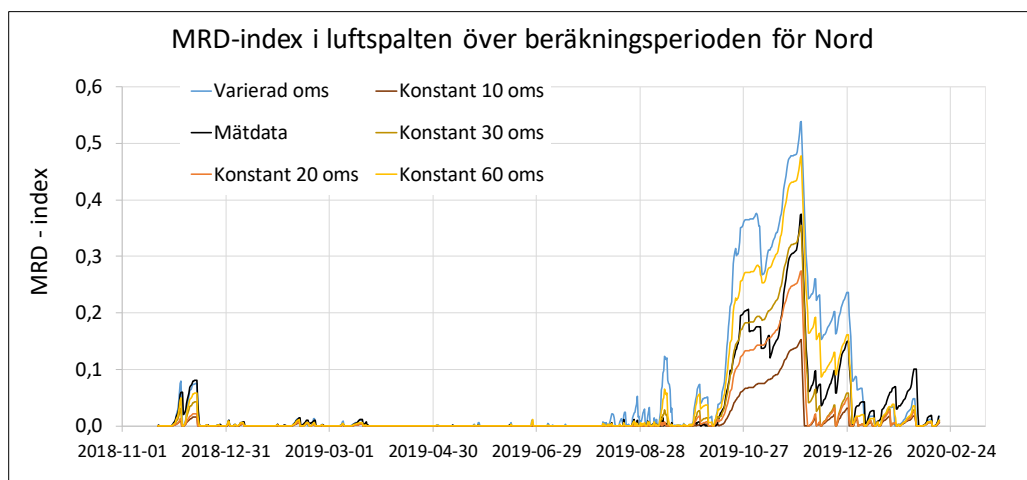
Osäkerheten i den metod som användes för att lösa det numeriska problem som bland annat nattutstrålning kan ge upphov till och som närmare beskrivs i *avsnitt 4.1.4.2* analyserades genom en jämförelse av två beräkningar, en där metoden användes och en där den inte användes (det vill säga att fuktinnehåll för luft ej korrigerades). Resultatet av de båda beräkningarna redovisas i *figur 5.28* där det framgår att beräknad relativ fuktighet var väldigt lika och skiljde sig endast då den numeriska problematiken uppstod (när blå kurva är konstant 100 %). Kurvorna i figuren är så pass lika att där de överlappar syns endast den beräknade relativa fuktigheten utan lösningsmetod (blå kurva). Då den relativa fuktigheten från beräkningen med lösningsmetoden dessutom följde de uppmätta värdena i stora drag under perioden efter problemet uppstod anses lösningsmetoden vara en bra metod att använda vid denna typ av numeriska problem.



Figur 5.28 - Beräknad relativ fuktighet för västra parallelltaket med och utan lösningsmetod för numeriskt fel

### 5.3.7 Konstant luftomsättning

En analys av den ansatta konstanta luftomsättningen genomfördes genom att jämföra beräkningar med olika konstanta luftomsättningar. I *figur 5.29* redovisas MRD-index över beräkningsperioden för de olika beräkningarna tillsammans med MRD-index för beräkning med varierad luftomsättning och MRD-index för de uppmätta värdena. Den beräkning med konstant luftomsättning som gav bäst överensstämmelse med det högst uppnådda MRD-indexet i de uppmätta värdena för det nordliga takpartiet var beräkningen med 30 luftomsättningar.



Figur 5.29 - MRD-index för luftspalten i det nordliga parallelltaket

### 5.3.8 Förändrad isolertjocklek

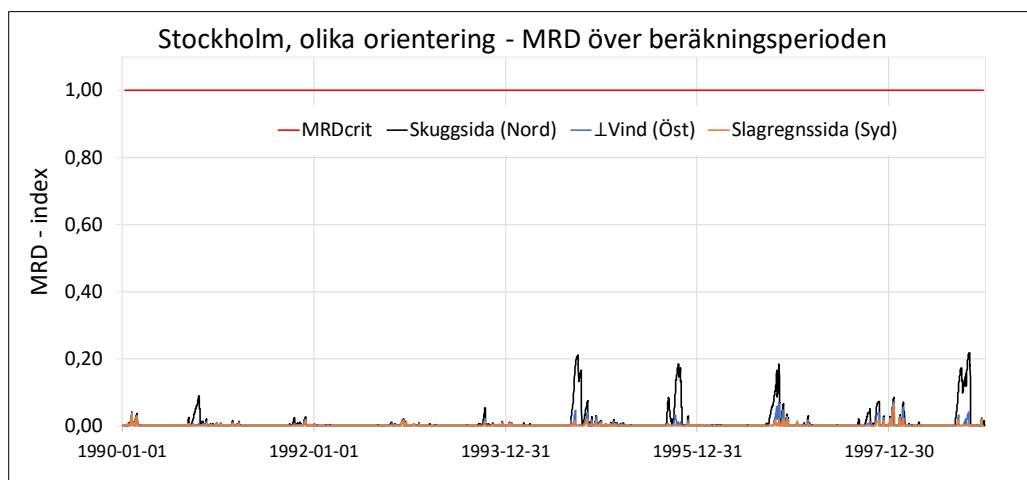
I slutet av studiens genomförande upptäcktes att fel isolertjocklek användes i beräkningarna för parallelltaket med öst-västlig orientering. Isolertjockleken var i verkliga fall 5 skikt à 76 mm istället för de 5 skikt à 90 mm som anges i *tabell 4.2*. För bedömning av felets omfattning jämfördes den blinda beräkningen med en beräkning genomförd med korrekt isolertjocklek och i övrigt oförändrad indata. Jämförelsen visade en medelskillnad i temperatur och relativ fuktighet på 0,1 °C respektive 0,2 procentenheter samt en medelskillnad i fuktkvot om 0,01 procentenheter. Således bedömdes den felaktigt ansatta isolertjockleken ha en liten påverkan på de beräknade resultaten vilket överensstämmer med tidigare forskning om isolertjockleken påverkan på fuktsäkerheten i välisolerade tak (Eriksson, 2017; Mundt-Petersen, 2016).

## 5.4 Parameterstudie

I parameterstudien ändrades utgångsfallet till *Bedömningsfall* varför luftomsättningen i spalten och luftläckaget inifrån ändrades. Dessa redovisas för bedömningsfallet i *figur 9.11* respektive *figur 9.14* i *Bilaga B*. Främst studerades i denna del MRD-index, med skillnad mot avvikelseanalysen därför att MRD-index här var beräknad för råspontens innersta cell (avvikelseanalysen analyserade en punkt i luftlagret).

### 5.4.1 Spaltgeometri och orientering

Den dimensionerande orienteringen för Stockholmsklimatet bestämdes utifrån beräknad risk för mikrobiell påväxt enligt MRD-modellen för de studerade orienteringarna (se *figur 5.30*). I figuren framgår att nordlig takorientering påvisade störst risk för påväxt, varför parameterstudien avseende spaltgeometrin genomfördes för denna riktning. Det kan även noteras att fuktnivåerna var under de kritiska för MRD-index under samtliga år och konstruktionerna bedömdes därför vara fuktsäkra.



Figur 5.30 - MRD för olika orientering i Stockholm

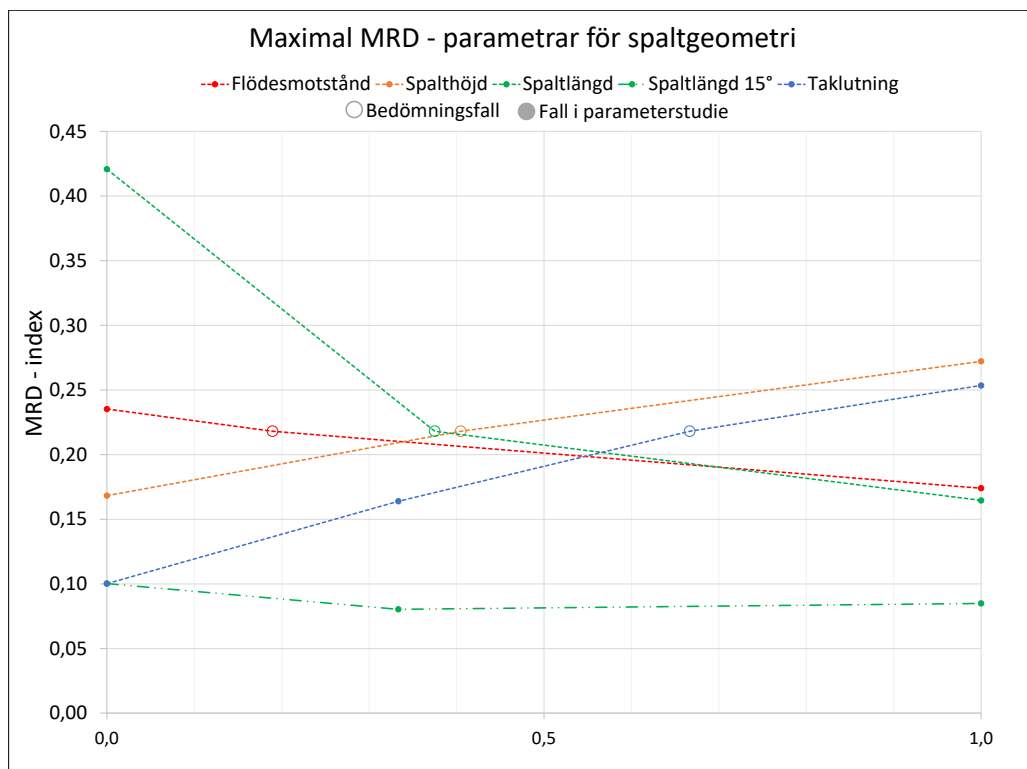
Spaltgeometrin undersöktes utifrån beräkningsfallen i figur 4.9. Resultatet redovisas i en gemensam figur (figur 5.31) där det högsta uppnådda MRD-indexet under respektive beräkning redovisas på y-axeln. På x-axeln redovisas beräkningens normerade värde där 0 representerar det lägsta värdet och 1 representerar det högsta värdet för respektive studerad parameter. Värden mellan högsta och lägsta erhålls genom linjär interpolering. Ett exempel (taklutning) ges i tabell 5.4. För motstånden är dessa x-värden ej fasta utan beror av luftflödet. I grafen förenklas detta genom att anta linjäritet gällande motstånden.

Tabell 5.4 - Exempel på normering

Beräkningsfall	y-värde (max MRD)	x-värde
Taklutning 15°	0,10	0 (lägsta värdet)
Taklutning 30°	0,16	$= \frac{30 - 15}{60 - 15} = 0,33$
Taklutning 45°	0,22	$= \frac{45 - 15}{60 - 15} = 0,67$
Taklutning 60°	0,25	1 (högsta värdet)

Varje beräkningsfall motsvarar en punkt i figuren. Strecken mellan punkterna är raka linjer som avser visuellt förtydliga kopplingen mellan beräkningsfallen. Linjerna avser alltså inte säga något om eventuella beräkningsfall mellan punkterna som inte studerades i denna studie. Notera att skalan på y-axeln är begränsad för att tydliggöra skillnaderna mellan beräkningsfallen. Samtliga av dessa fall var under kritiska fuktnivåer.

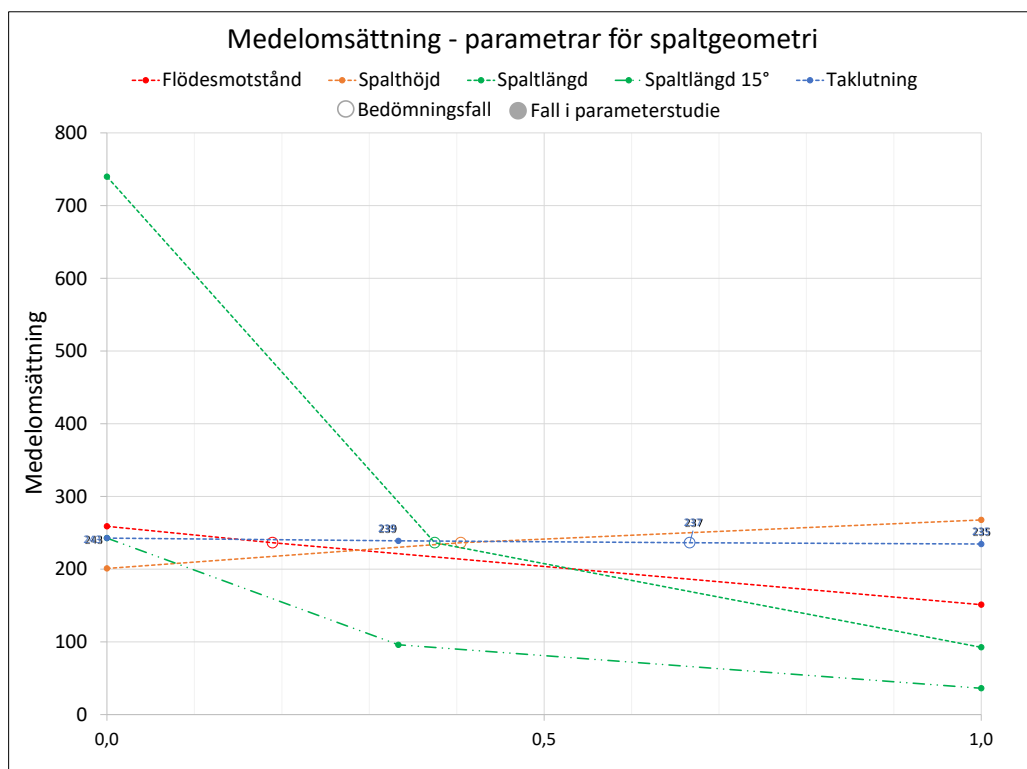




Figur 5.31 - Resultat parameterstudie – spaltgeometri (OBS att skalan på y-axeln är uppförstorad för att tydliggöra skillnader)

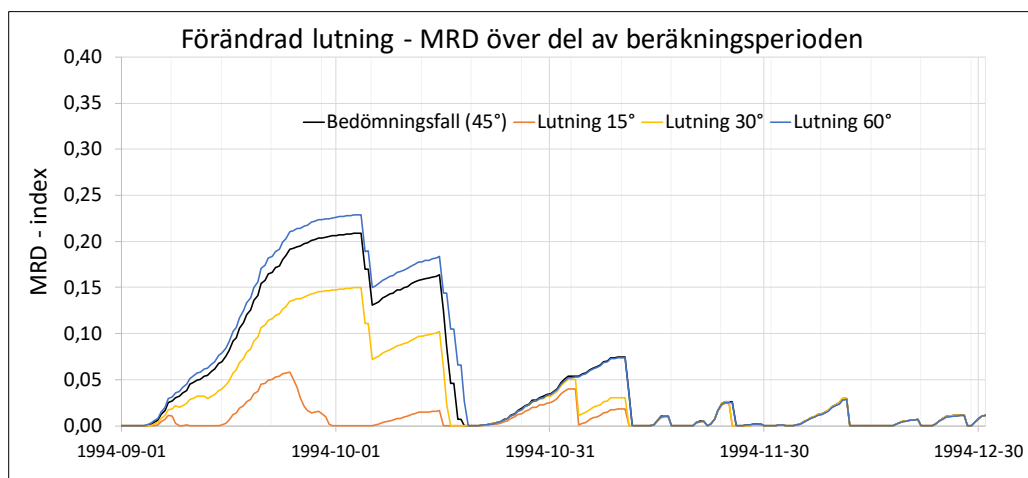
Av figur 5.31 framgår att ökad spaltlängd och ökat motstånd hade en positiv inverkan på fuktsäkerheten. För spaltlängden avtog effekten vid längre längder och för låglutande tak med spaltlängder över 10 meter per sida (nedersta kurvan) avstannade effekten. Övriga parametrar, spalthöjd och taklutning, gav försämrade fuktsäkerhet då parametrarnas storlek ökade. Spaltlängd var den parameter som gav störst inverkan, men det ska påpekas att utfallet var beroende av vilka högsta och lägsta parametervärden som studerades. Exempelvis skulle spalthöjder eller motstånd utanför de beräknade intervallen kunna ge större påverkan på fuktsäkerheten än vad spaltlängden gav ovan.

Resultatet av parameterstudien i *figur 5.31* kan vidare utvärderas genom att studera de luftomsättningar som användes i respektive beräkningsfall. I *figur 5.32* plottas samma punkter med medelluftomsättning i spalten på y-axeln istället för maximalt MRD-index.



Figur 5.32 - Luftomsättningar i spalten för beräkningsfallen i parameterstudien

Då förändringen av luftomsättning och maximalt MRD-index beaktas simultant noterades att för samtliga parametrar, förutom för taklutning, erhöles lägre risk för mikrobiell påväxt när omsättningen minskade. Förändrad spaltlängd verkade påverka omsättningen mer än det beräknade MRD-indexet. Påverkan från övriga parametrar var otydligare i denna aspekt på grund av förändringen i skalan. Taklutning var den parameter som bröt mönstret och lägre luftomsättning (brantare taklutning) ledde till större risk för fuktrelaterade skador. Det ska dock noteras att brantare taklutning ofta ger längre spaltlängd. Detta fall studerades därför närmare i det följande.



Figur 5.33 – Beräknad risk för mikrobiell påväxt vid olika taklutningar, utvald tidsperiod

I figur 5.33 redovisas beräknat MRD-index för de olika taklutningarna under senare delen av ett år (1994). Av grafen framgår att skillnaden mellan beräkningsfallen var som störst på hösten och avtagande eller väldigt liten närmare vintern. Detta tolkas som att skillnaden berodde på att solen kom åt att värma upp den nordliga taksidan på hösten vid låg taklutning varför taklutningen avgjorde hur mycket sol som kunde nå taket. På vintern står solen lägre på himlen och ingen av taklutningarna medgav solinstrålning varför ingen skillnad mellan fallen beräknades uppstå.

## 5.4.2 Klimat

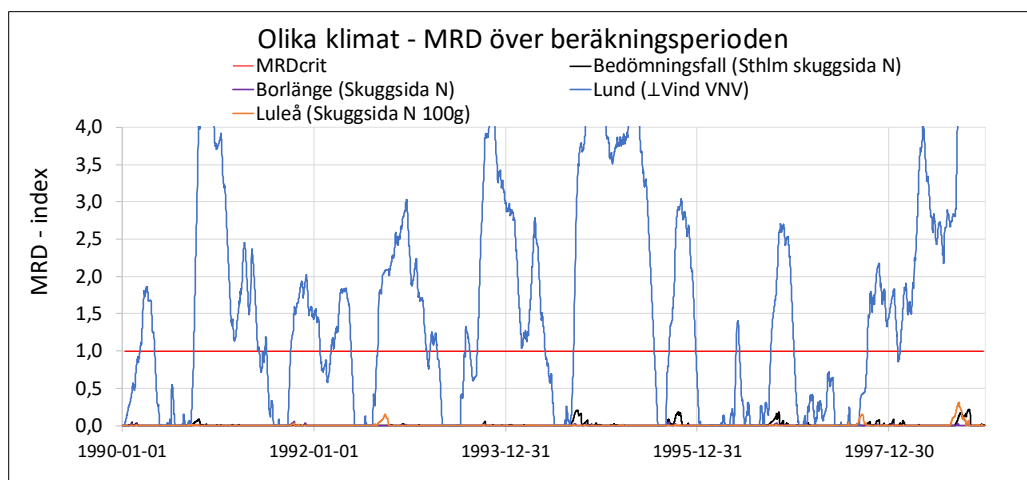
I klimatdelen av parameterstudien togs potentiellt dimensionerande orienteringar fram för de olika klimaterna, enligt 4.2.3.1. Dessa redovisas i tabell 5.5.

Tabell 5.5 - Potentiellt dimensionerande orienteringar (\*orienteringar enligt tidigare)

Benämning -sida	Orientering			
	Stockholm*	Lund	Borlänge	Luleå
Skugg-	Nord	Nord	Nord	Nord
Nordlig ∟Vind-	Öst	Väst nordväst	Nord nordost	Ost nordost
Slagregnsutsatt, lovert-	Syd	Syd sydväst	Ost sydost	Syd sydost

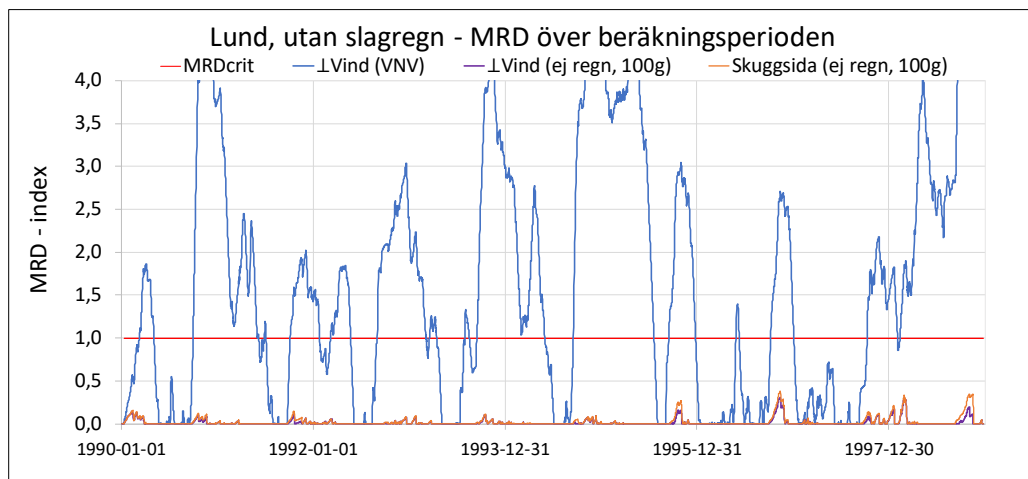
Vid beräkning med de olika klimaten upptäcktes att metoden för att hantera nattutstrålning i Stockholmsklimat (se *avsnitt 4.1.4.2*) ej fungerade för Luleåklimatet. Av den anledningen ändrades metoden, från att öka kondensationslagrets tjocklek över 4 mm, till att istället begränsa mängden fukt i luften genom att ändra värdet på porositeten i *luft utan fuktkapacitet*. Porositeten används i WUFI för att avgöra det maximala fukttinnehållet, motsvarande fukttinnehållet vid relativa fuktigheten 101 %, och tillämpas exempelvis vid nattutstrålning (WUFI, 2019). Det maximala fukttinnehållet  $w_{max}$  beräknas som porositeten multiplicerat med densiteten för vatten, i studien användes  $w_{max}$  som 100 gram eftersom detta ungefär motsvarade det högsta tillskottet av fukt genom luftomsättningen som erhöles för Luleå vid nattutstrålning under den värsta timmen. Porositeten ansattes till 0,0001. De beräkningar där denna metod användes benämndes 100g för att visa för läsaren när så har skett. Analys av denna metod visar att resultatet var identiskt med övriga beräkningar, förutom vid de fall då nattutstrålningen överbelastade konstruktionen och orimliga fuktnivåer, som inte kunde torka ut, uppnåddes. I de fallen gav metoden 100g istället mer rimliga fuktnivåer (se *figur 9.22 i Bilaga E*).

Med den ändrade lösningsmetoden kunde följande MRD-index beräknas för de olika klimaten (se *figur 5.34*). I figuren redovisas endast de, av beräkningar identifierade, dimensionerande orienteringarna för respektive klimat.



Figur 5.34 - MRD för de dimensionerande orienteringarna i de olika klimaten

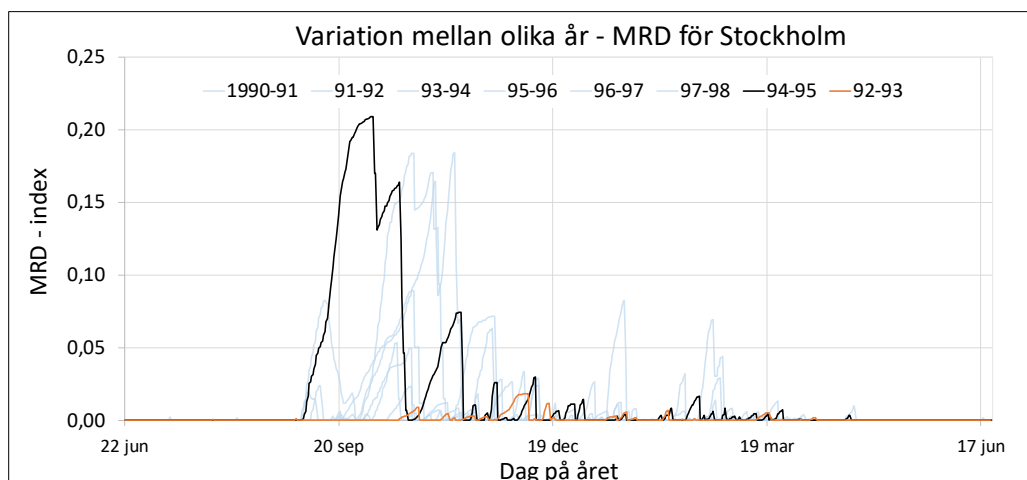
Notera skalan i figuren. Av figuren framgår att klimatet i Lund var kritiskt, övriga klimat underskred det kritiska MRD-indexet. Detta stora utslag i MRD-index för Lunds klimat undersöktes vidare och spårades till bland annat regnmängden för platsen. I *figur 5.35* redovisas beräkningar för samma konstruktion i Lund, även utan slagregnsinträngning.



Figur 5.35 – MRD-index för Lund både med och utan slagregnsinträngning

Utän slagregnsinträngning gav även klimatet i Lund en konstruktion som klarade sig under kritiskt MRD-index, med nivåer i samma storleksordning som övriga klimat. När slagregnsinträngningen inte beaktades ändrades även den dimensionerande orienteringen för konstruktionen till skuggsidan, vilket var samma som övriga klimat (se *figur 5.34*). I samma figur kan även noteras att skuggsidan klarade sig även i det fall då slagregnsinträngning beaktades.

Utöver de skillnader som påvisades mellan de fyra olika 9-årsklimaten fanns det även en skillnad mellan olika år för varje klimat. I *figur 5.36* illustreras skillnaden mellan olika år för bedömningsfallet – Stockholmsklimatet, med nordlig takorientering. Variation i MRD-index över respektive år redovisas i figuren, med start den 22 juni årligen. Det värsta och bästa året är markerat i svart respektive orange, övriga år återfinns i ljusare kulörer i bakgrunden.



Figur 5.36 - MRD-index för de olika åren (Stockholmsklimat, riktning nord)

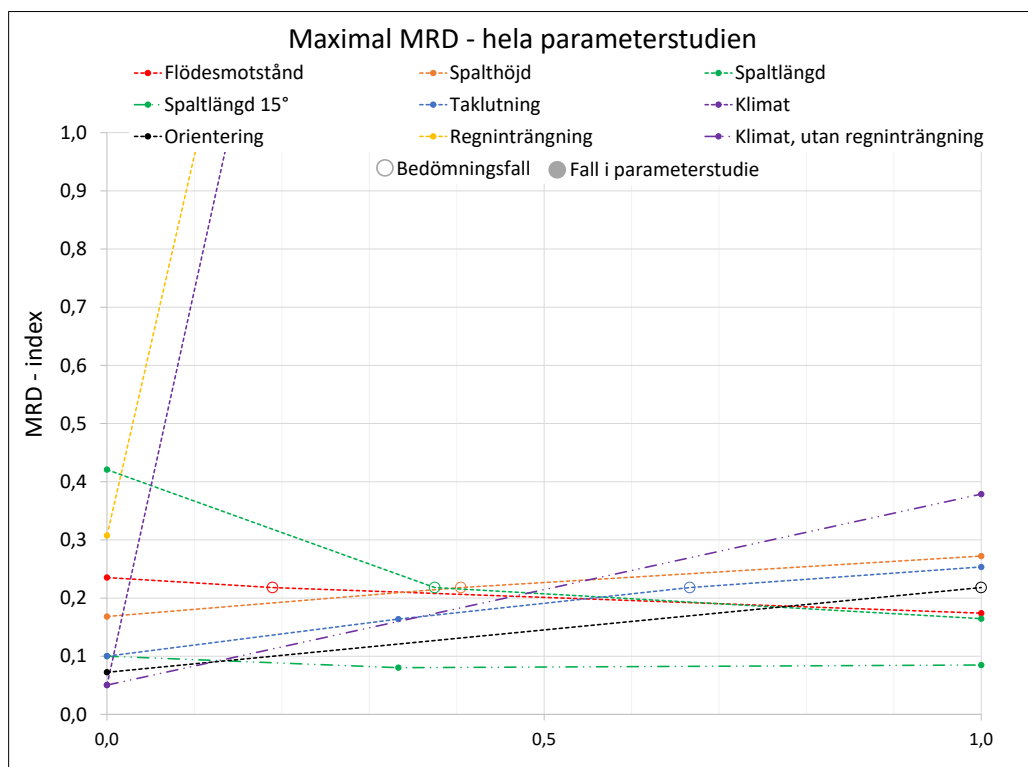
Det framgår av *figur 5.36* att det kan vara stor skillnad i klimat och beräknad risk för mikrobiell påväxt mellan olika år för samma geografiska plats, även om just Stockholmsklimatet inte gav något fall som var över kritiska MRD värden.

Klimatets, orienteringens och regninträngningens påverkan på fuktsäkerheten illustreras vidare genom att lägga till dessa i den samlade parameterstudien för spaltgeometri (*figur 5.31*). Parametrarna läggs till utifrån högsta och lägsta parametervärden enligt *tabell 5.6*.

Tabell 5.6 - Integrering av klimat, orientering och regninträngning i gemensam MRD-graf

Parameter	MRD <sub>max</sub> vid lägsta värde (vid x=0)	Kommentar	MRD <sub>max</sub> vid högsta värde (vid x=1)	Kommentar
<b>Klimat</b>	0,05	Borlänge, skuggsida	6,84	Lund, sida ⊥ vind
<b>Klimat utan regninträngningsproblematik</b>	0,05	Borlänge, skuggsida med regnint.	0,38	Lund, skuggsida utan regnint.
<b>Regn-inträngning</b>	0,31	Lund, sida ⊥ vind utan regnint.	6,84	Lund, sida ⊥ vind med regnint.
<b>Orientering</b>	0,07	Stockholm, sida ⊥ vind	0,22	Stockholm, skuggsida

En gemensam MRD-graf för hela parameterstudien blir då enligt *figur 5.37*.



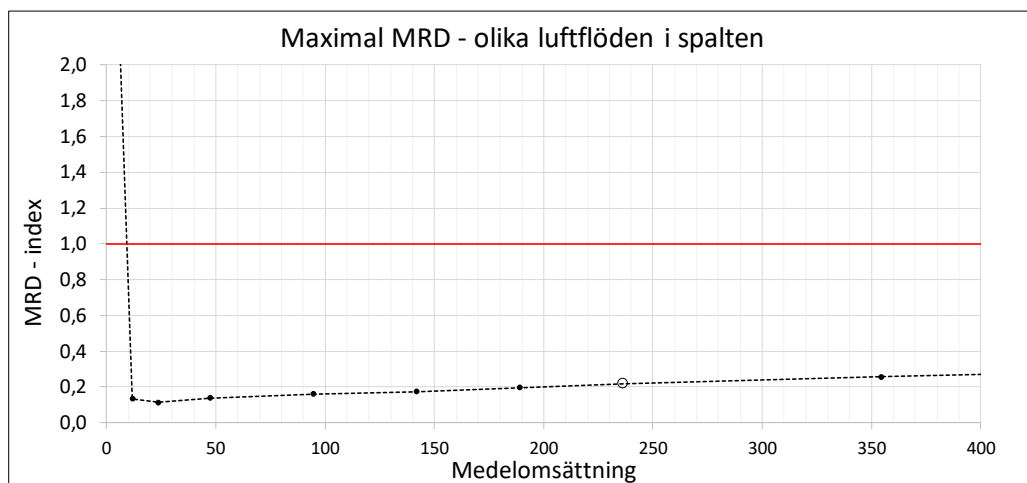
Figur 5.37 - Gemensam presentation av maximala MRD-index för hela parameterstudien

Notera att skalan för y-axeln har ändrats från bilden för spaltgeometri samt att *Klimat* och *Regninträngning* klippts av, de båda parametrarna fortsätter egentligen mot samma punkt (1; 6,84). Av figuren framgår att regninträngning och klimat var dominerande faktorer avseende påverkan på fuktsäkerheten. Vidare framgår att klimat, även utan slagregn (lila streckprickprickad linje) hade större inflytande än många av de spaltgeometriska parametrarna. Orientering påverkade i något lägre utsträckning än klimat.

Vid ytterligare en körning, där fuktläckaget inifrån negligerades istället för regninträngningen, noterades samma fenomen som för regninträngningen, nämligen att konstruktionen i Lund klarade sig väl under kritiska fuktnivåer om fuktläckage ej beaktades. Resultatet av denna körning presenteras i *figur 9.21* i *Bilaga D*. Det verkade därför vara klimatet i Lund som var det kritiska och ytterligare fuktkällor riskerade ge kritiska fuktnivåer varpå MRD-index blev väldigt högt.

### 5.4.3 Optimal omsättning

Vissa tidigare studier påvisar att högre luftomsättningar i spalten ger lägre risk för fuktskador men beräkningsresultatet i denna studie indikerade motsatsen. Därför undersöktes om det finns en optimal luftomsättning som är lägre än de omsättningar som ansattes i denna studie och högre än den som normalt ansåts. Undersökningen utgick från bedömningsfallet i Stockholm, takorientering mot nord med bland annat regninträngning, luftläckage enligt beskrivning i *avsnitt 4.2.3*. Den beräknade timvisa luftomsättningen ur *MatLAB* (2019) ändrades genom multiplikation med talen 5, 1,5, 0,8, 0,6, 0,4, 0,2, 0,1, 0,05, och 0. Maximalt MRD-index för WUFI-beräkningar med de olika luftomsättningarna redovisas i *figur 5.38*.



Figur 5.38 - Luftomsättningens påverkan på MRD-index (bedömningsfallet markerat som ihålig cirkel)

Figuren bekräftar teorin om en optimal luftomsättning, som i detta fall motsvarade 10 % av den som användes i bedömningsfallet. Dock visar figuren framförallt att MRD inte ändrades särskilt mycket med förändrad omsättning varför andra faktorer såsom regninträngning, luftläckage inifrån eller klimat anses vara viktigare än omsättningen i spalten. Trots vändningen vid väldigt låg omsättning visar figuren att en lägre omsättning var gynnsamt för alla fall då omsättningen inte redan var väldigt låg.

Lägre luftomsättning kan erhållas genom förändrad konstruktionsutformning. I *figur 5.39* till *figur 5.41* redovisas exempelfall för hur spaltängd, spalthöjd och engångsmotstånd beräknades påverka den omsättning i spalten som

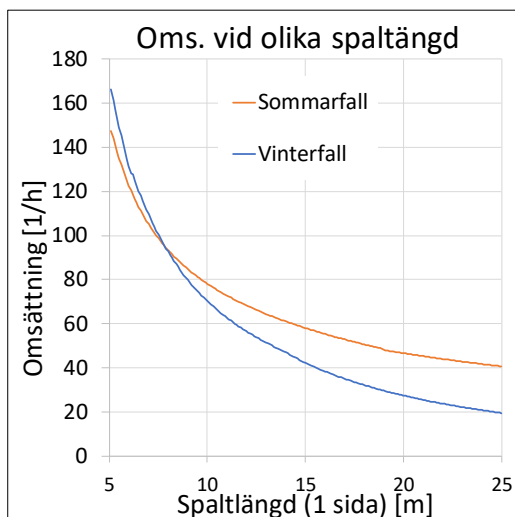
Tabell 5.7 - Sommar- och vinterfall i beräkning

	T <sub>ute</sub>	RF <sub>ute</sub>	Infallande kortvågig strålning	
			Inloppssida	utloppssida
<b>Sommarfall</b>	15 °C	50 %	800 W/m <sup>2</sup>	300 W/m <sup>2</sup>
<b>Vinterfall</b>	0 °C	80 %	0 W/m <sup>2</sup>	0 W/m <sup>2</sup>
<b>Förändringar båda fallen:</b>	Vindriktning mot inlopp $\varphi=60^\circ$ , vindhastighet 2 m/s, infallande långvågig strålning $q_{in}=300$ W/m <sup>2</sup>			

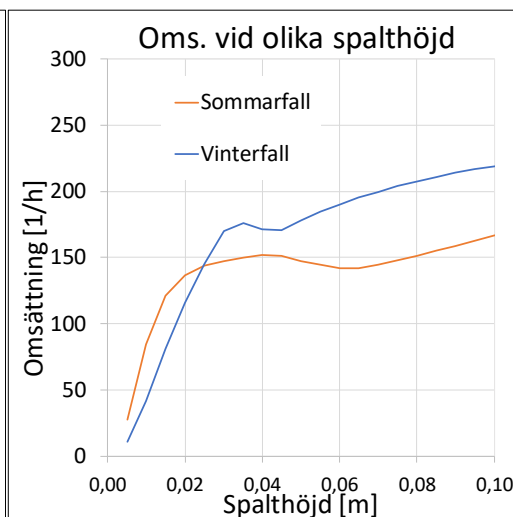
beräknades av luftflödesmodellen. Beräkningarna var genomförda för 1 timme och utgick från bedömningsfallet med justeringar enligt *tabell 5.7*. Lägre luftomsättning



skulle även kunna erhållas genom ökad ytråhet på luftspaltens omgivande ytor. Ytråheten studerades dock inte.

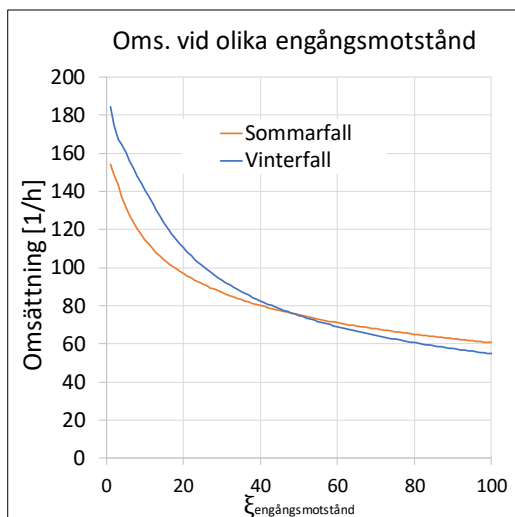


Figur 5.39 - Förändring av luftomsättning vid olika spaltlängder

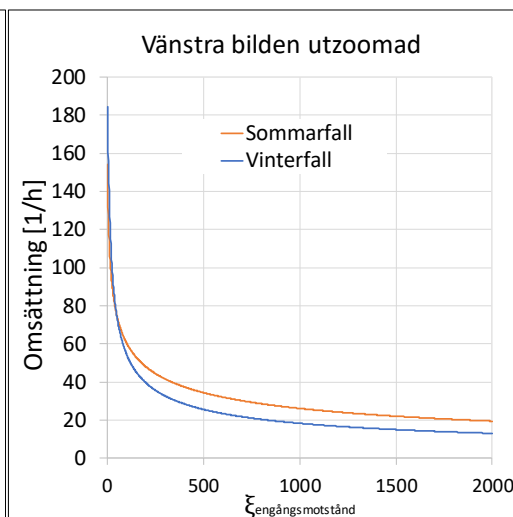


Figur 5.40 - Förändring av luftomsättning vid olika spalthöjder

För engångsmotståndet i figur 5.41 och figur 5.42 varierades förlustfaktorn  $\zeta$  som gav tryckfallet i likhet med ekvation (2.16). Konstruktionen utgick från bedömningsfallet där insektsnätet ersattes med detta engångsmotstånd istället.



Figur 5.41 - Förändring av luftomsättning vid olika engångsmotstånd



Figur 5.42 - Luftomsättning vid större engångsmotstånd

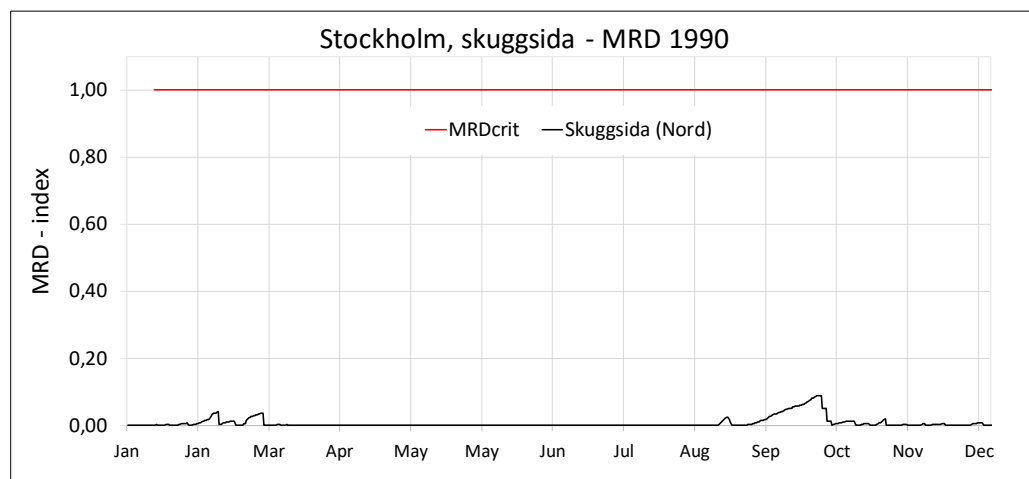
Av figurerna ovan konstaterades att 10 % av medelomsättningen, motsvarande cirka 25 omsättningar per timme, kunde erhållas genom följande åtgärder

- spaltlängd ungefär 25 m per sida
- spalthöjd under 10 mm
- förlustfaktor ungefär 1000.

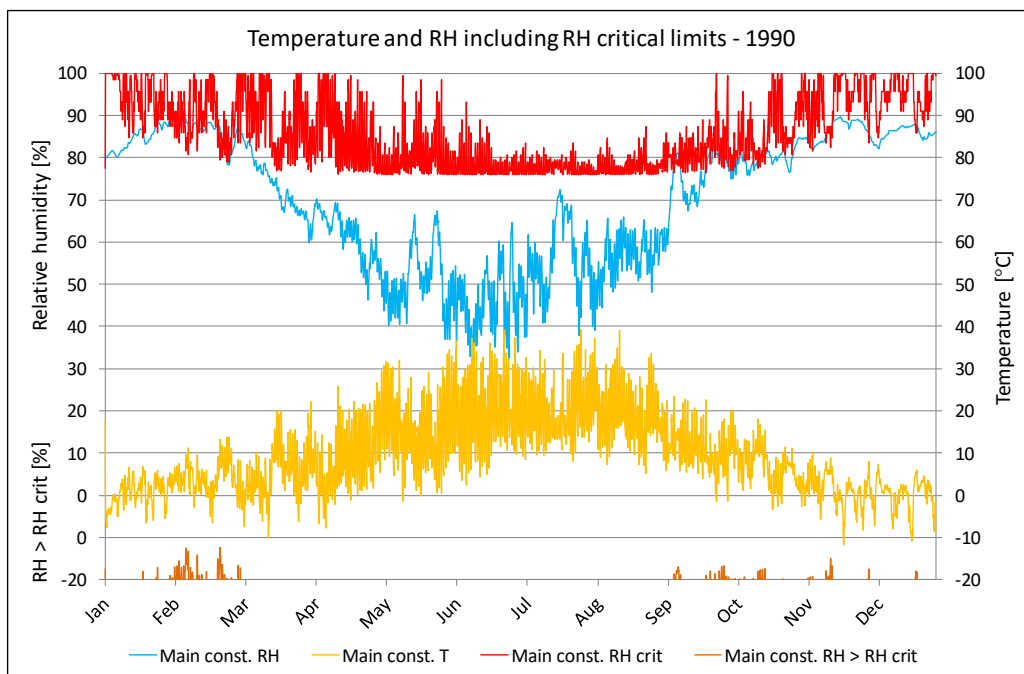
Åtgärderna avslöjar att det var svårt att erhålla så pass låg omsättning eftersom värdena på parametrarna är att anse som extrema. I och med att parametrarna är extrema finns en stor risk att beräkningsmetoden inte är tillämplig och resultatet i denna aspekt alltså är felaktigt eftersom andra faktorer som ej beaktades kan ge större påverkan, exempelvis två- och tredimensionella aspekter. Vidare är det svårt att praktiskt utföra spalthöjder som är så låga och tak som är 50 meter långa. Den mest rimliga av åtgärderna bedöms vara korrigerig av engångsmotståndet, exempelvis genom installation av spjäll vid inlopp. Det kan dock vara svårt att erhålla önskat flöde även då.

## 5.5 Bedömning av MRD-modellen som verktyg

MRD-modellen är en beräkningsmodell för bedömning av risk för mikrobiell påväxt. Vid redovisning av MRD-index framgår därför inte fuktnivåerna i direkt form varför det var av intresse att studera hur MRD modellen förhåller sig till de beräknade fuktnivåerna. Därför jämfördes MRD-beräkningen för bedömningsfallet (skuggsidan i Stockholmsklimat år 1990) med beräknade temperaturer och relativa fuktigheter i ett *Folosdiagram* (Mundt-Petersen, 2015) för samma period. *Folosdiagrammet* visar de beräknade värdena utan beaktande av risk för påväxt. Längst ned i diagrammet redovisas när kritisk relativ fuktighet överskrids och gynnsamma förhållanden för mikrobiell påväxt råder samt med hur mycket kritisk relativ fuktighet överskrids. Den kritiska relativa fuktigheten i *Folosdiagrammet* är temperaturberoende då den följer isopleter framtagna av Sedlbauer (2001), LIM I.



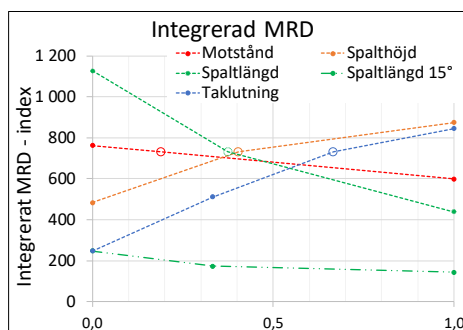
Figur 5.43 - MRD index för bedömningsfallet, Stockholm, nord, år 1990



Figur 5.44 - Foliosdiagram för bedömningsfallet, Stockholm, nord, år 1990

För det beräknade året noterades att kritisk relativ fuktighet överskreds i februari-mars, samt ett antal gånger på hösten. I *Foliosdiagrammet* verkade således perioden på våren vara värst för detta år. MRD-beräkningen visade samma utslag avseende perioderna, men gav högre utslag på hösten. Med tanke på att kurvorna ändå baserar sig på olika modeller var utslaget förhållandevis liknande varför tidigare bedömningar utifrån MRD modellen ansågs giltiga. Vid noggrannare undersökning bedömdes skillnaden på hösten bero på dels att olika gränstillstånd för kritisk relativ fuktighet användes i modellerna, samt att fuktförhållandena var precis över de kritiska varför modellerna avvek i beräkning. Avvikelsen ackumulerades för varje dag nämnda förhållanden förelåg.

När bedömning av risk för fuktskador förenklas till ett enda värde, tidigare maximalt MRD-index, finns en risk att det valda värdet skiljer från övriga och därför inte är representativt för fuktsäkerheten i allmänhet. För att avgöra om värdena i parameterstudien (figur 5.31) var representativa, presenteras resultatet fast med MRD-index integrerat över tid på y-axeln (se figur 5.45). Genom detta mått på fuktsäkerhet beaktades samtliga värden i MRD-graferna.



Figur 5.45 - Parameterstudie, integrerat MRD

Representativiteten i att använda maximalt MRD-index som mått på fuktsäkerheten verkar vara god, vilket framgår av att parametrarnas inflytande var likvärdigt för de två olika angreppssätten.



## 6 Diskussion

Studien har gett svar på frågeställningarna och vidare lärdomar om fuktsäkerheten i välisolerade parallelltak med luftspalt. Gällande luftflödet i spalten konstaterades att stängd nock orsakar svårigheter och osäkerheter kopplade till modellering och erhållna flöden. I synnerhet kopplades denna osäkerhet till hur termiken påverkar luftflödet. Generellt verkar termiken orsaka ett motstånd till luftflödet då detta är högt, vilket också visade sig vara fallet i de flesta beräkningar som senare genomfördes. Flödena var i dessa fall avsevärt mycket högre än den konstanta omsättning som rekommenderas i *RäknaF*. Svårigheterna i modelleringen kopplades till att problemet behöver lösas numeriskt vilket medför instabilitetsproblem och kräver en del beräkningskraft vid längre beräkningsperioder.

Det skiljer mycket mellan de konstanta 20 omsättningar per timme som föreskrivs i *RäknaF* och medelvärdena av de variabla omsättningar som beräknades i denna studie. Trots skillnaden i omsättning var skillnaden i beräknad fuktsäkerhet inte lika stor. För den normalt dimensionerande takorienteringen, nord, gav beräkningen med konstant omsättning bättre överensstämmelse med uppmätta värden än beräkningen med varierande omsättning. Att välja konstant 20 omsättningar per timme verkar därför vara ett representativt konstant värde för den varierade omsättningen i just detta fall även om ännu bättre överensstämmelse erhöles då 30 omsättningar per timme ansattes. För övriga orienteringar gav beräkning med varierad omsättning klart bättre överensstämmelse med uppmätta värden än beräkning med konstant omsättning, samtidigt som en kvalitativ bedömning påvisade att variationerna i de uppmätta värdena bättre efterlevdes vid varierande omsättning. För mätobjektet visade mätningar och beräkning med varierande omsättning att väst, inte nord, var dimensionerande takorientering. Vidare var beräkningen med konstant omsättning relativt känslig för vilken omsättning som valdes och var mer känslig än beräkning med varierande omsättning. Exempelvis klarade beräkningen med 20 omsättningar inte det, i studien, ansatta luftläckaget. Resultatet av beräkningen med konstant omsättning påverkades i studien av vilken omsättning som ansattes, vilket innebär att det gick att erhålla högre överensstämmelse med uppmätta värden genom en lämpligt vald omsättning. I den studie som Mundt-Petersen och Harderup (2011) genomförde för en yttervägg noteras ingen större skillnad i överensstämmelse mot uppmätta värden mellan beräkning med konstant respektive varierad omsättning vilket i viss mån motsäger resultatet av detta arbete.

De blinda beräkningarna påvisade god överensstämmelse för många av de studerade parametrarna, men kanske viktigast för MRD-index och beräknad fuktsäkerhet. Även beräkningen med konstant omsättning påvisade god överensstämmelse för orienteringen nord, men inte för övriga orienteringar. Beräknade fuktkvoter indikerade genomgående felaktigt ansatt begynnelsefuktkvot samt för låga amplituder i kurvorna. Tillförlitligheten i blinda beräkningar intygas av Mundt-Petersen (2015) men avviker från studier av bland andra von Platen och Rikner (2015) samt Johansson och Larsson (2016). Denna avvikelse kan troligen härledas till att utomhusklimatet för den faktiska orten och tidsperioden användes i denna studie istället för det inbyggda normalårsklimatet i WUFI. Dessutom var mätperioden längre än i nämnda studier varför exempelvis påverkan av ansatt byggfukt är lägre.

Beräkningarna förbättrades efter jämförelse mot mätningar. Den enda av de undersökta parametrarna som ansågs rimlig att korrigera i beräkningarna var begynnelsefuktkvoten. Denna korrigering ansågs dock inte vara representativ för det allmänna fallet, utan bara för mätobjektet, med hänsyn till det objektsspecifika byggnationsförloppet. Avvikelseanalysen avslöjade även att materialdatan för råsponten, särskilt fuktransportförmågan och densiteten, är viktig för amplituden på kurvan och var troligen inte korrekt ansatt. Liknande avvikelse kunde noteras vid högt ansatt slagregnsinträngning varför avvikelsen skulle kunna bero på flera olika parametrar och korrigering ansågs därför ej befogad. Graden av skuggning är en ytterligare parameter som kunde förbättra beräkningen i några avseenden, men av samma skäl som för materialdatan i råsponten ansågs korrigering ej befogad. Vidare var det, vid varierad omsättning, viktigt att identifiera eventuella beräkningsfel i WUFI där fuktnivåerna överstiger 100 % i luftspalten, för att precisera sådana beräkningar.

Utvärdering av fuktsäkerheten i parameterstudien visade att samtliga undersökta parametrar påverkar fuktsäkerheten samtidigt som klimatet och fuktkällor såsom regninträngning och luftläckage visade sig vara dominerande faktorer. I Lund var fuktsäkerheten helt beroende av att tätheten i konstruktionen säkerställdes. Vikten av en tät konstruktion styrks av tidigare forskning av både Gullbrekken (2018) och Mundt-Petersen (2015; 2016). Resultatet understryker, i enlighet med Mundt-Petersen (2015), även att klimatdata bör väljas med omsorg. Klimatet i WUFI bör inte utan vidare användas vid dimensionering eftersom detta avser representera ett normalt år.

De undersökta spaltparametrarna ledde inte i något av beräkningsfallen till kritiska fuktnivåer och deras påverkan på den beräknade fuktsäkerheten var, för de undersökta fallen, liten. Det är således inte relevant att föreslå riktlinjer för vilken spaltgeometri som ger en fuktsäker konstruktion. Beräkningarna gav resultat som till viss del motsäger gängse uppfattning; Den beräknade fuktsäkerheten förbättrades i de flesta fall något av en lägre luftomsättning i spalten, det vill säga låg spalthöjd och långa spaltlängder. Undantaget var taklutning där solstrålningen visade sig vara en viktigare faktor än luftflödet och låg taklutning beräknades minska risken för mikrobiell påväxt. Ett försök att optimera luftomsättningen indikerade en mest gynnsam omsättning motsvarande cirka 10 % av den som erhöles i bedömningsfallet i Stockholm för nordlig orientering. För att erhålla denna omsättning bedöms drastiska förändringar av konstruktionen krävas, vilket påverkar beräkningsmodellen som sådan, varför resultatet bör tolkas med stor försiktighet. Den eftersträvade omsättningen kan också vara beroende av enskilda förutsättningar för konstruktionen som exempelvis lufttätheten. En så pass låg omsättning bör därför inte eftersträvas utan stöd i vidare forskning. Det påvisades att även en alltför låg omsättning riskerar fuktsäkerheten i enlighet med tidigare forskning av Latif Aref och Ehsani (2013). Kopplingen mellan flödet i luftspalten och beräknad fuktsäkerhet ligger även i linje med en av slutsatserna i *Fuktsäkra träkonstruktioner II* (Mundt-Petersen, 2016), nämligen att luftflödet bör vara så lågt som möjligt men tillräckligt högt för att möjliggöra bortförsel av tillkommande fukt.

Gällande implementering av varierande luftomsättningar i beräkningsprogrammet WUFI påträffades problem framförallt kopplade till nattutstrålning och nedkylning av luften i spalten, men även kopplade till höga omsättningar vid fuktig utomhusluft. Den lösning som bäst hanterade problemet verkade vara att föreskriva ett rimligt, maximalt fukttinnehåll  $w_{max}$  i luftskiktet där omsättningen är placerad. Åtgärden bör tillämpas med försiktighet eftersom nattutstrålning är ett fenomen som kan orsaka exempelvis kondensproblem och inte bör negligeras.

En mängd antaganden och osäkerheter förekommer i studien. Det första som bör poängteras är att luftflödesmodellen inte validerades i direkt form och de beräknade luftomsättningarna är därför inte validerade även om modellen baserades på tidigare teorier och forskning. I jämförelsen mot mätningar (av T och RF i spalten och fuktkvot i läkten) förelåg osäkerheter bland annat kopplade till mätningarna, materialparametrar och klimatet. Mätningar i luften är osäkra på grund av luftens betingelse att variera avseende uppmätta parametrar och det faktum att timmedelvärden används. Mätningar i läkten är osäkra då de beror av mätdjup och trämateriallets materialparametrar, vilka var okända. Det förelåg osäkerheter gällande luftförelserna i angränsning till taket, exempelvis finns en risk att mätobjektets unika utformning ger vindtryckskoefficienter som avviker från de som användes i studien, samt en risk att luft från fasadens luftspalt fortsätter upp i takkonstruktionen därför att ingen avskärmning förekommer mellan dessa spalter. Utfallet skulle kunna vara att fukt transporteras från väggen upp till taket, eller att luften är förvärmad när den når taket. Fuktransport, på samma sätt, skulle även kunna förekomma mellan takets två sidor.

Studiens tillförlitlighet i ett bredare perspektiv bör betraktas utifrån avgränsningar avseende validering och omfattning av studien. Validering skedde endast för en enskild konstruktion, med vissa variationer i isolertjocklek och orientering. De spalter som undersöktes och validerades är inte nödvändigtvis representativa eller dimensionerande för byggnaden i sin helhet även om de bedöms vara representativa för ett normalt förekommande parallelltak med stängdnock och taktäckning av plåt eller takpapp. Dessutom fokuserade studien på risken för fuktskador i råsponten och i de fall andra material i konstruktionen är fuktkänsliga är resultatet således inte applicerbart.

Trots ovan nämnda osäkerheter bedöms beräkningsmetodiken som pålitlig. De luftflöden som beräknades var påtagligt lika tidigare uppmätta flöden för parallelltak med stängdnock (Gullbrekken, et al., 2017) och i samma storleksordning som uppmätta flöden i luftspalten i väggar (Falk, 2010). Trots varierad beräkningsmetod var resultatet konsekvent för den absoluta majoriteten av beräkningstimmarna. Detsamma konstateras för WUFI-beräkningarna; problemen vid timvisa luftomsättningar löstes med varierande kondensationsskikt och maximalt vatteninnehåll utan förlorad noggrannhet på övriga timmar. Beräkningarna var, till skillnad från beräkning med konstant omsättning, relativt okänsliga för luftläckage inifrån. Detta kan troligen förklaras av att tillkommande fukt från luftläckage kunde evakueras genom det höga, men varierande, flödet i luftspalten. Luftläckage bedöms vara ofrånkomligt och det ansatta läckaget anses vara vanligt förekommande. Att beräkningen med konstant omsättning ger en konstruktion som inte klarar detta luftläckage anses tala emot modeller med konstant luftomsättning. MRD-index över tid (beräknad utifrån uppmätta värden) efterliknades också bättre med den

studerade beräkningsmetodik. Beräkningar med konstant omsättning kräver dock inga externa programvaror utanför WUFI och är betydligt enklare att ta fram och genomföra, svårigheten är istället att bestämma vilken luftomsättning som är lämplig att ansätta. Tillvägagångssättet anses ändå enklare att implementera i konsultmässiga beräkningar.

Parallelltak påvisas i vissa tidigare studier medföra risk för fuktproblematik. Bland andra påvisar Johansson och Larsson (2016) i analyser att mikrobiell påväxt förekom på 3 av 4 provbitar vilket styrker deras resonemang om parallelltak som en konstruktion med risker ur fuktsynpunkt. Den samlade bilden av de simuleringar och mätningar som studerades här indikerade motsatsen, att parallelltak med slutennock har goda förutsättningar att uppföras på ett fuktsäkert sätt. Skillnaden mellan resultaten kan exempelvis komma av att geometri och utformning av taket som studeras av Larsson och Johansson inte anses tillämpliga för jämförelse med resultatet i den här studien. Den kombinerade vinden och parallelltaket i studien ger skillnad i såväl luftflödesmodellen som beräkning i WUFI. Taket med tegelpannor ger enligt tidigare forskning skillnad i beräknad fuktsäkerhet, medan skillnad mellan beräkning för tak med plåt eller papp är liten (Mundt-Petersen, 2016).



## 7 Slutsats

Av genomförda undersökningar kan ett antal slutsatser sammanfattas enligt följande:

- En luftflödesmodell för luftspalten kan implementeras vid blinda hygrotermiska beräkningar och ge god överensstämmelse med mätningar av temperatur, relativ fuktighet och fuktkvot. För beräkning av fuktkvot krävdes i denna studie korrekt materialdata och begynnelsevillkor för representativa beräkningsresultat.
- Används istället konstant luftomsättning i samma beräkningar kan även dessa ge god överensstämmelse vid lämpligt valt värde på omsättningen.
- Implementerad luftflödesmodell gav i de flesta fall bättre överensstämmelse med uppmätta värden än beräkning med den konstanta omsättning som rekommenderas i *RäknaF*.
- Då faktiska förhållanden eftersträvas i blinda beräkningar identifierades i studien begynnelsefuktigheten, materialparametrar för det undersökta materialet samt grad av skuggning som viktiga parametrar. Vidare bör det säkerställas att eventuella numeriska problem vid nattutstrålning hanteras.
- Tätheten i konstruktionen (mot regninträngning och luftläckage inifrån) i kombination med utomhusklimatet var de viktigaste av de undersökta parametrarna för säkerställande av fuktsäkerheten i konstruktionen.
- Undersökta spaltgeometrier indikerade att spaltens utformning var relativt oviktig vid säkerställande av fuktsäkerheten varför inga riktlinjer föreslås. I kontrast mot vissa tidigare uppfattningar indikerade beräkningsresultaten att en lägre omsättning är något mer gynnsam än en högre.



## 8 Vidare forskning

Resultatet av denna studie motsäger vissa tidigare uppfattningar om luftomsättningen i parallelltak. Detta resultat bör vidare utvärderas genom liknande studier där beräknade omsättningar kan valideras mot faktiska mätningar av omsättningen och/eller utvidgas utanför avgränsningarna för denna studie. Utvidgning kan exempelvis ske genom att studera andra takuppbyggnader och andra utformningar som påverkar luftflödesmodellen (så som ventilation genom taknock).

Vidare forskning kan även undersöka och eventuellt utöka applicerbarheten av denna studie genom att studera antingen hur en luftflödesmodell på ett tillämpligt sätt kan appliceras vid hygrotermiska beräkningar, eller vilka val av konstanta omsättningar som ger tillförlitliga resultat för vanligt förekommande konstruktioner i olika fall.



## Referenser

- Arfvidsson, J., Harderup, L.-E., & Samuelson, I. (2017). *Fukthandbok: Praktik och teori* (4 uppl.). Stockholm: AB Svensk byggtjänst.
- Åström, A. (2017). *Täta tak: en guide till skadefria takpannetak*. Stockholm: KTH, Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad (ABE), Bygghälsa, Byggnadsteknik. Hämtat från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-211114>
- Awbi, H. b. (1991). *Ventilation in buildings*. London: Chapman & Hall.
- Bagge, H., Johansson, D., & Lindström, L. (2014). Measured indoor hygrothermal conditions and occupancy levels in an arctic Swedish multi-family building. *HVAC&R Research*, 20(4), ss. 276-383. doi: <https://doi.org/10.1080/10789669.2014.888367>
- BFS. (2014:3). *Boverkets författningssamling*. Karlskrona: Boverket.
- Boverket. (2009). *Så mår våra hus: Redovisning av regeringsuppdrag beträffande byggnaders tekniska utformning m.m.* Karlskrona: Boverket. Hämtat från [https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2009/sa\\_mar\\_va\\_ra\\_hus.pdf](https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2009/sa_mar_va_ra_hus.pdf)
- Ehsani, S., & Latif Aref, H. (2013). *Analys av fuktomlagring i välsisolerade parallelltak*. Stockholm: Stockholms Universitet. Hämtat från <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:643423/FULLTEXT01.pdf>
- Eriksson, O. (2017). *Fuktsäkra parallelltak: En studie av risken för mögelpåväxt i parallelltak med variabel ångbroms*. Lund: Avdelningen för Byggnadsfysik LTH, Lunds Tekniska Högskola. Hämtat från [http://www.byfy.lth.se/fileadmin/byfy/TVBH-5097OE\\_web.pdf](http://www.byfy.lth.se/fileadmin/byfy/TVBH-5097OE_web.pdf)
- Falk, J. (2010). *Ventilerad luftspalt i yttervägg : luftomsättningar och konvektiv fukttransport*. Lic-avh. Lund: Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. Hämtat från <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/4219237/1730985.pdf>
- Fuktcentrum. (2018). *Klimatfiler för fyra svenska städer*. Hämtat från <http://www.fuktcentrum.lth.se/verktyg-och-hjelpmedel/klimatdatafiler-foer-fyra-svenska-staeder/> [2020-04-07]
- Georgsdóttir, T., & Sawirs, E. (2012). *Fuktbelastning i takkonstruktioner med perforerad ångspärr: En undersökning och jämförelse av två snedtakskonstruktioner från Isover*. LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg, Byggnadsfysik. Lund: Lunds Universitet. Hämtat från <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=2797821&fileId=8961464>

- Gullbrekken, L. (2018). *Climate adaption of pitched wooden roofs*. Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Gullbrekken, L., Kvande, T., & Time, B. (2017). Ventilated wooden roofs: Influence of local weather conditions - measurements. Trondheim: Elsevier Ltd.
- Gullbrekken, L., Uvsløkk, S., & Geving, S. K. (2018b). Local loss coefficients inside air cavity of ventilated pitched roofs. *Journal of Building Physics*, 42(3), ss. 197-219. doi: <https://doi.org/10.1177%2F1744259117740506>
- Gullbrekken, L., Uvsløkk, S., Kvande, T., Pettersson, K., & Time, B. (2018). Wind pressure coefficients for roof ventilation purposes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, ss. 144-152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.026>
- Hagentoft, C.-E. (1991). *Air convection coupled with heat conduction in a wall. A thermal analysis. TVBH-7130, (Notes on Heat Transfer 1-91)*. Lund: Building Physics.
- Hägerhed Engman, L., & Samuelsson, I. (2006). Kalla vindar: Problem och förbättringar. *Bygg & Teknik*(nr 4/06), s. 22.
- Idelchik, I. E. (1960). *Translated: Handbook of hydraulic resistance. Coefficients of local resistance and of friction*. Moskva-Leningrad: Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatelstvo.
- Isaksson, T., & Mårtensson, A. (2017). *Byggkonstruktion - Regel och formelsamling* (3:e uppl.). Lund: Studentlitteratur AB.
- Johansson, A., & Larsson, A. (2016). *Riskbedömning för mikrobiell påväxt i ett välisolerat parallelltak*. Halmstad: Högskolan i Halmstad, Akademin för ekonomi, teknik och naturvetenskap. Hämtat från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hh:diva-31771>
- Johansson, P. (2010). Hygrothermal Conditions in Ventilated Cathedral Ceilings. Influences on Roof Ventilation and Emissivity. Field Study and Analysis. *Proceedings of the 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, Clearwater Beach, Florida, December 5-9, 2010*. Hämtat från [http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/132055/local\\_132055.pdf](http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/132055/local_132055.pdf)
- Kronvall, J. (1980). *Air flows in building components*. Lund: Division of Building Technology, Lund Institute of Technology.

- Latif Aref, H., & Ehsani, S. (2013). *Analys av fuktomlagring i välisolerad parallelltak: Analys med simuleringsprogrammet Wufi 2D*. Stockholm: KTH, Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad (ABE), Bygghälsa, Byggteknik och design. Hämtat från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-127027>
- Lindgren, T. (2017). *Parameterstudie i WUFI om fuktsäkra parallelltak*. Karlstad: Karlstad Universitet. Hämtat från <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1129957/FULLTEXT01.pdf>
- MatLAB. (2019). *version 9.7.0.1261785 (R2019b)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Mundt-Petersen, S.O. (2015). *Moisture Safety in Wood Frame Buildings - Blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety*. Diss. Lund: Byggnadsfysik LTH, Lunds Tekniska Högskola. Hämtat från <https://portal.research.lu.se/portal/files/3853018/4937649.pdf>
- Mundt-Petersen, S.O. (2016). *Fuktsäkra träkonstruktioner II: Vägledning för utformning av träbaserade takkonstruktioner*. Avdelningen för byggnadsfysik. Lund: Lunds Universitet. Hämtat från <http://lup.lub.lu.se/record/2d37f3db-9071-4c0e-be87-345bb96c4090>
- Mundt-Petersen, S.O., & Harderup, L.-E. (2010). Importance of a Proper applied Airflow in the Façade Air Gap when Moisture and Temperature are Calculated in Wood Framed Walls. (B. Rosenthal, Red.) *Reader manual: 5th International BUILDAIR-Symposium on Building and Ductwork Air tightness (former "European BlowerDoor-Symposium") October 21-22, 2010, Kgs. Lyngby near Copenhagen, Denmark.*, 37. Energie und Umweltzentrum am Deister GmbH (e.u.[z.]), Germany. Hämtat från <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/5739273/5212015.pdf>
- Mundt-Petersen, S.O., & Harderup, L.-E. (2011). Comparison of measured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the facade air gap. In J. Vinha, J. Piironen, & K. Salminen (Eds.), *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics - NSB 2011*. (Vol. 1, pp. 147-154). Tampere University of Technology. Hämtat från <https://portal.research.lu.se/portal/files/5507623/5218492.pdf>
- Mundt-Petersen, S.O., & Wallentén, P. (2014). Methods for compensate lack of climate boundary data. (M. Quattrone, & J. Vanderley, Red.) *Proceedings XIII DBMC - XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 632-639.
- Nilsson, L.-O. (2006). *Fuktpåverkan på material: Kritiska fuktnivåer*. Stockholm: Formas.

- Rikner, V., & von Platen, H. (2015). *Mätningar och simuleringar av fukt i tak*. Växjö: Linnéuniversitetet, Fakulteten för teknik (FTK), Institutionen för byggt teknik (BY). Hämtat från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:lnu:diva-44058>
- Roil Beto, E., & Rada, D. (2016). *Isolerat parallelltak ur fuktperspektiv*. Växjö: Linnéuniversitetet, Fakulteten för Teknik. Hämtat från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:lnu:diva-61036>
- Sedlbaur, K. (2001). *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. Fraunhofer Institute of Building Physics. Germany: University Stuttgart.
- SMHI. (2020). *Ladda ner meteorologiska observationer*. <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/> [2020-02-17]
- SS-EN. (2007). *SS-EN 15026:2007 Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulations*. SIS, Swedish Standard Institute, SIS Förlag AB, Sweden.
- SS-EN. (2013). *SS-EN ISO 13788:2013 Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods*. SIS, Swedish Standard Institute, SIS Förlag AB, Sweden.
- SS-EN. (2017). *SS-EN ISO 6946:2017 Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods*. SIS, Swedish Standard Institute, SIS Förlag AB, Sweden.
- Svantesson, M., & Säwén, T. (2019). *Ventilation by Thermal Buoyancy in the Air Cavity of Pitched Roofs: An experimental and Numerical Study of Air Cavity Design and Natural Convection in Parallel Roof Constructions*. Division of Building Technology, Department of Architecture and Civil Engineering. Göteborg: Chalmers University of Technology. Hämtat från <https://hdl.handle.net/20.500.12380/300084>
- The landersson, S., Isaksson, T., & Niklewski, J. (2014). *Fuktsäker utformning av klimatavskiljande byggnadsdelar med fukt känsliga material: Vägledning för projektering och riskvärdering*. Lund: Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi.
- Wallentén, P. (2018). *RäknaF 2018*. Institutionen för bygg- och miljöteknologi, Byggnadsfysik, LTH. Lund: Lunds Universitet.
- WUFI. (2009). *Discussion: WUFI-Pro Performance and Limitations*. Hämtat från [https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Discussion:WUFI-Pro\\_PerformanceandLimitations](https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Discussion:WUFI-Pro_PerformanceandLimitations) [2020-03-06]



WUFI. (2019). WUFI Pro (Version 6.4) [programvara]. Fraunhofer IBP. Hämtat från <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>

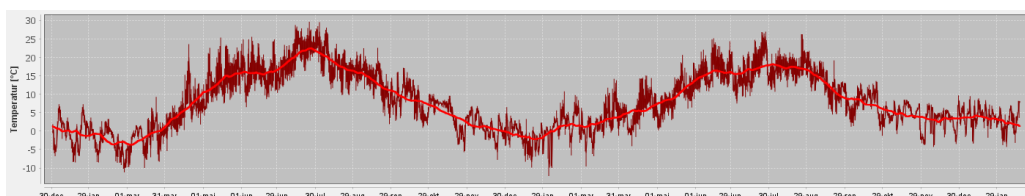
WUFI. (november 2019). WUFI Pro 6.4 online help. Fraunhofer Institute for Building Physics.



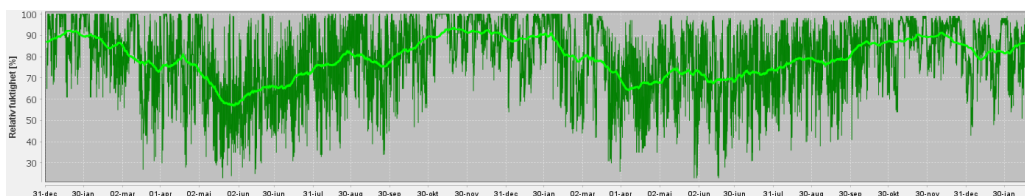
## Bilagor

### Bilaga A - Klimatdata för mätobjekt

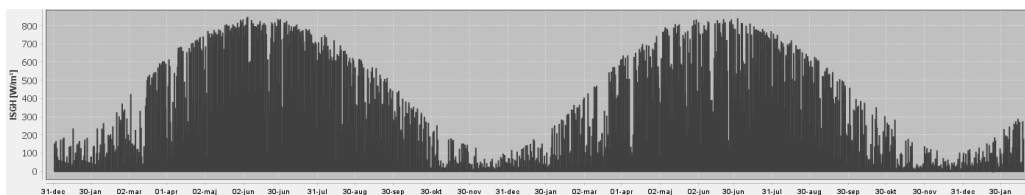
Nedan redovisas hur klimatdatan presenteras i WUFI. Observera att klimat mellan 2018-01-20 och 2020-02-17 redovisas medan den faktiska beräkningsperioden är mellan 2018-11-21 och 2020-02-17.



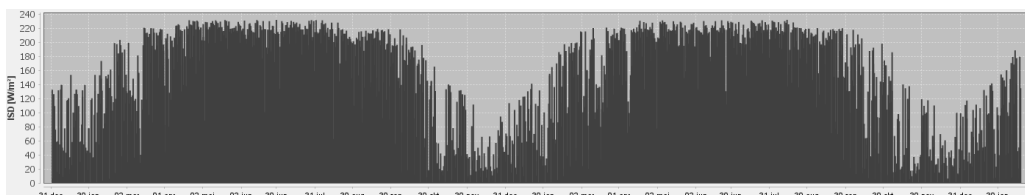
Figur 9.1 - Lufttemperatur i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)



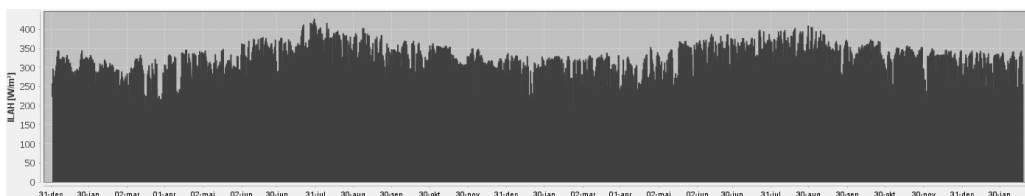
Figur 9.2 - Relativ fuktighet i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)



Figur 9.3 - Global solstrålning i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)

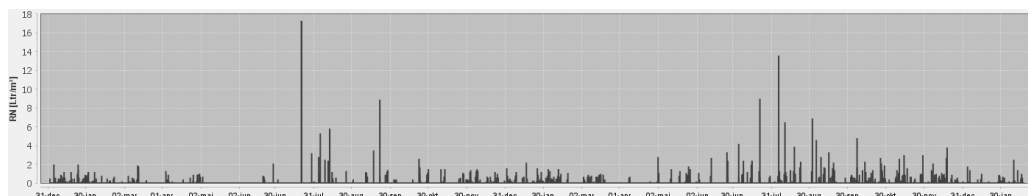


Figur 9.4 - Diffus solstrålning i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)

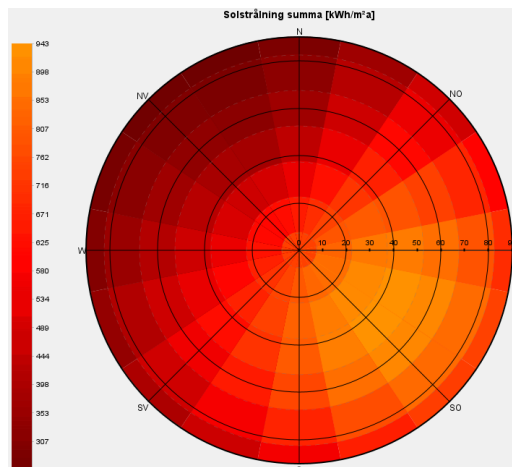


Figur 9.5 - Diffus solstrålning i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)

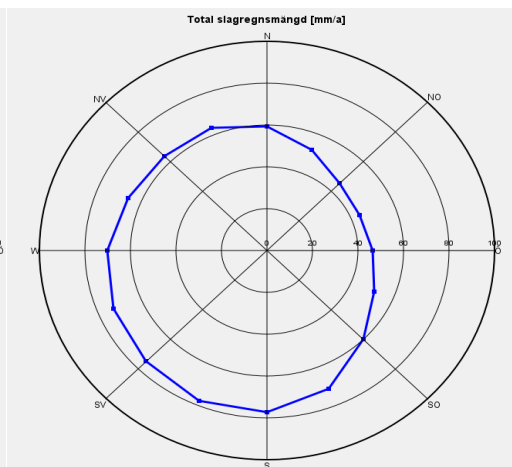
## Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak



Figur 9.6 - Normalregn i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)



Figur 9.7 - Summerad solstrålning i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)

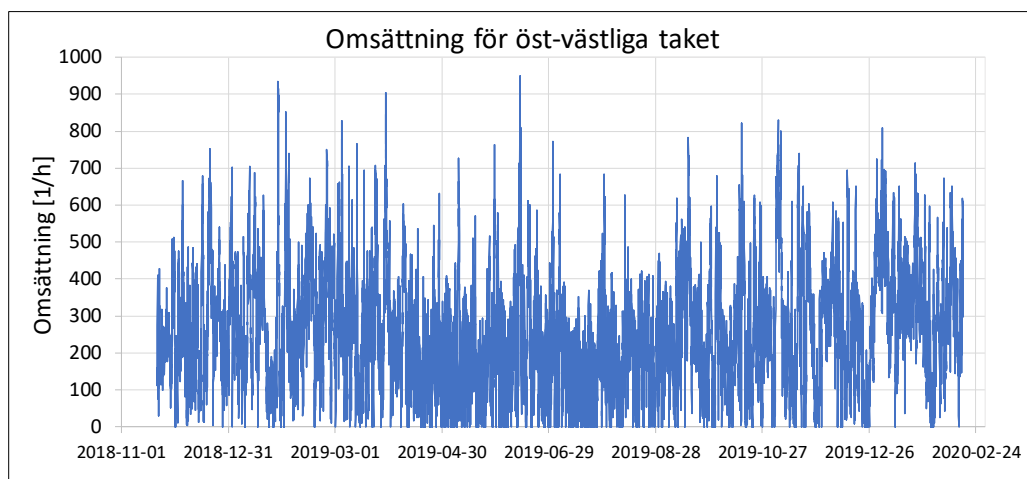


Figur 9.8 - Total slagregnsnsmängd i insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)

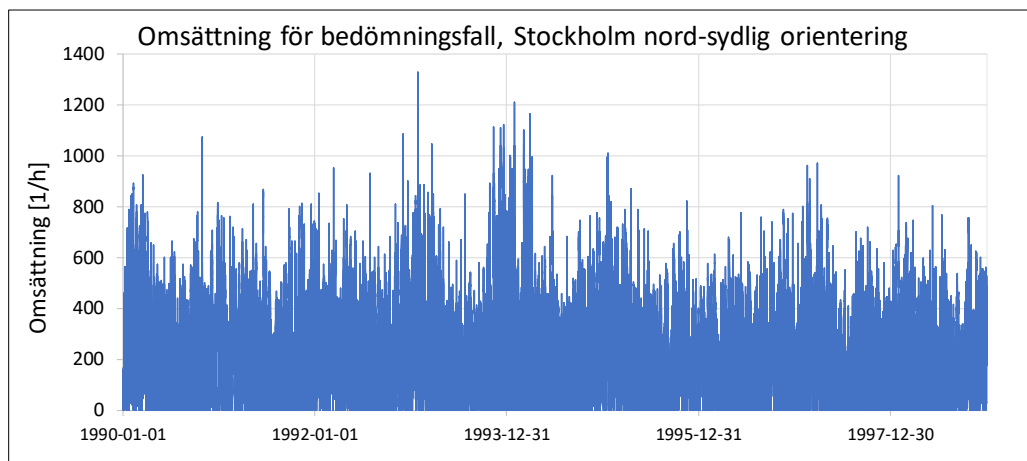
Medelvärde temperatur [°C]:	7,8
Max. temperatur [°C]:	29,6
Min. temperatur [°C]:	-12,1
Summa motstrålning [kWh/m²a]:	1875,4
Medelvärde relativ fuktighet [%]:	79,3
Max. relativ fuktighet [%]:	100
Min. relativ fuktighet [%]:	23
Medelvärde vindhastighet [m/s]:	3,1
Normalregn summa [mm/a]:	282,6

Figur 9.9 - Nyckeltal för insamlad klimatdata för mätobjekt. Bild från WUFI Pro (2019)

## Bilaga B - Indata till beräkningar

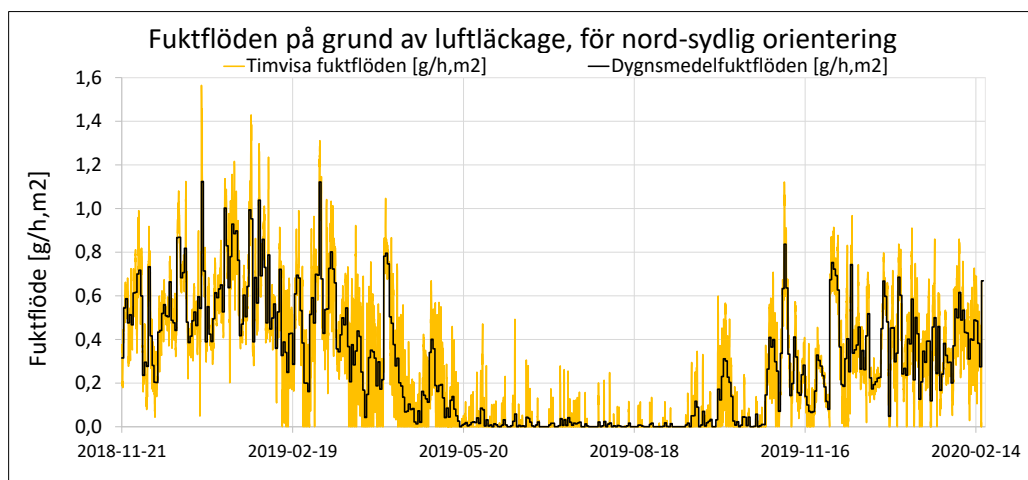


Figur 9.10 - Den beräknade luftomsättningen för mätobjektet, takdelen med öst-västlig orientering

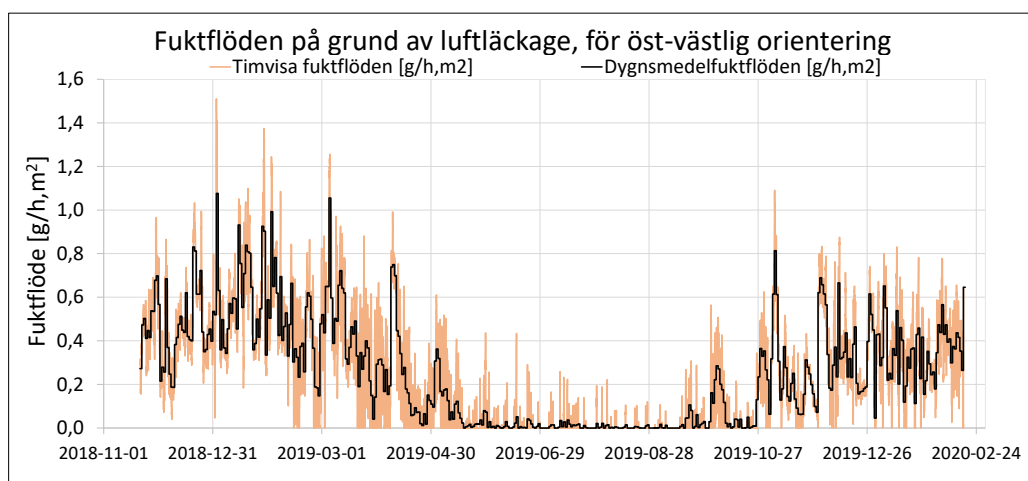


Figur 9.11 - Den beräknade luftomsättningen för bedömningsfallet i parameterstudien. Stockholmsklimat och nord-sydlig orientering

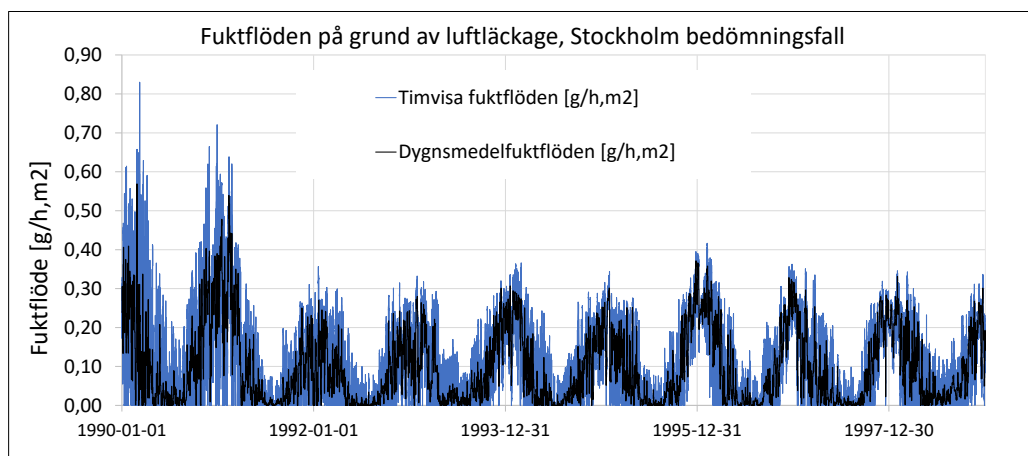
## Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak



Figur 9.12 - Timvisa fuktflöden och dygnsmedelfuktflöden för mätobjektet med nord-sydlig orientering

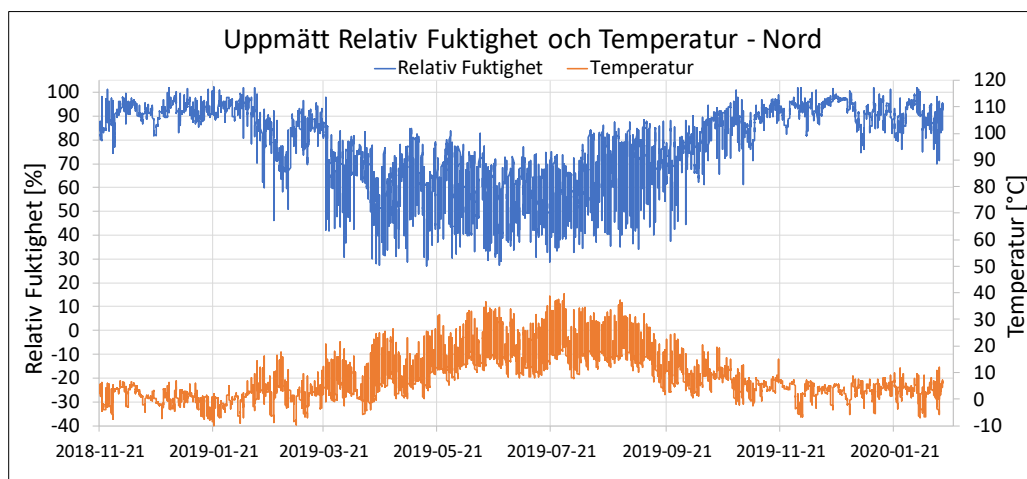


Figur 9.13 - Timvisa fuktflöden och dygnsmedelfuktflöden för mätobjektet med öst-västlig orientering

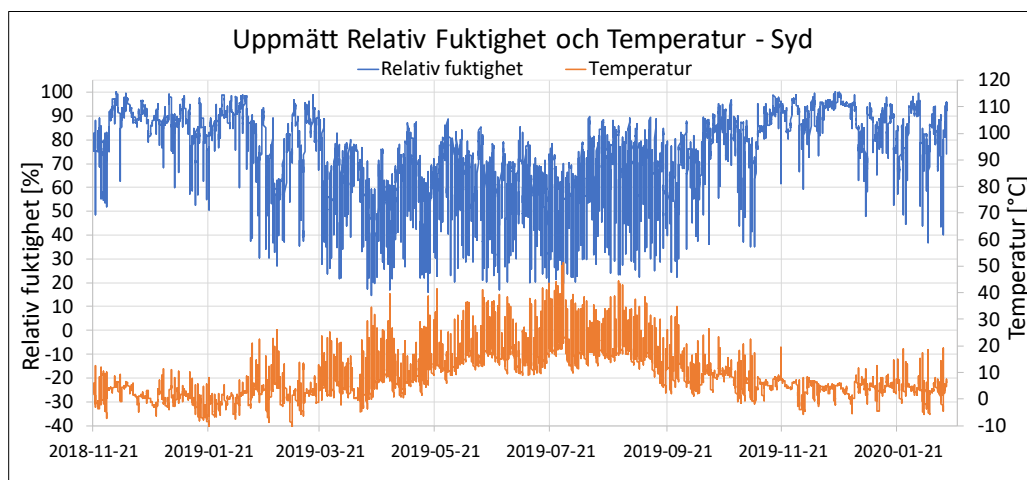


Figur 9.14 - Timvisa fuktflöden och dygnsmedelfuktflöden för bedömningsfallet i parameterstudien. Stockholmsklimat och nord-sydlig orientering

## Bilaga C - Samtliga mätresultat

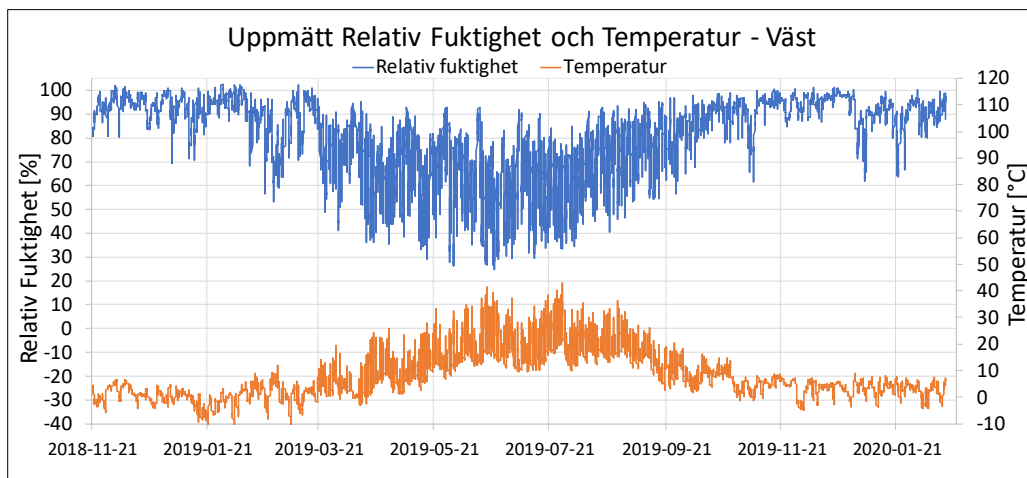


Figur 9.15 - Temperatur och relativ fuktighet för nordlig orientering

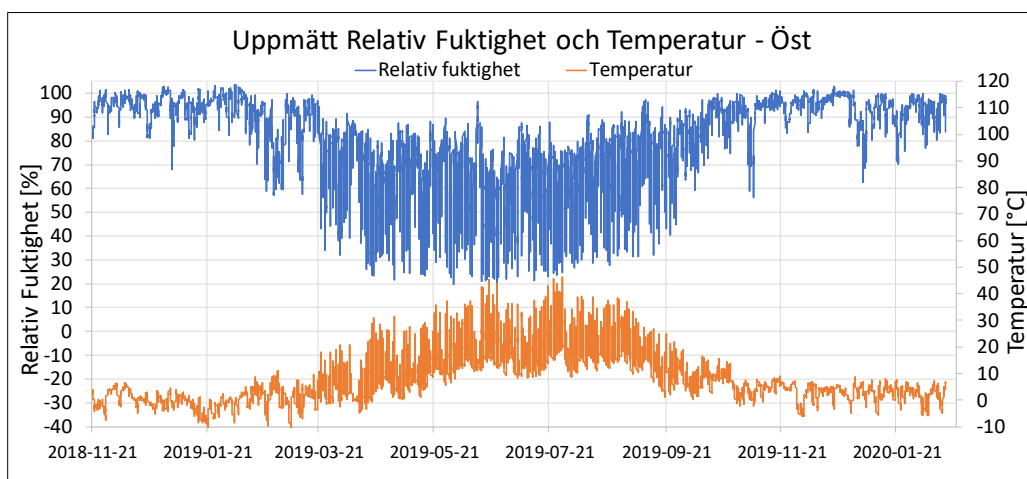


Figur 9.16 - Temperatur och relativ fuktighet för sydlig orientering

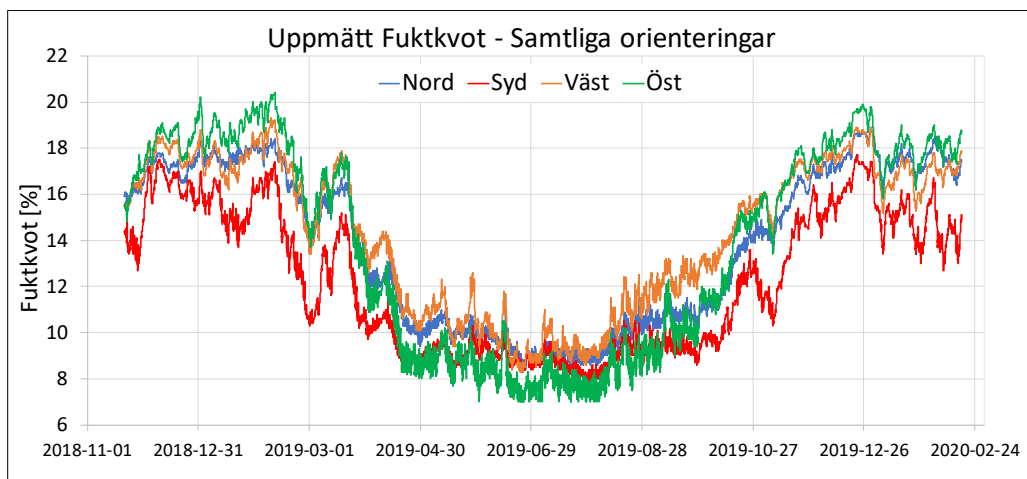
## Fuktsäkerhet i ventilerade parallelltak



Figur 9.17 - Temperatur och relativ fuktighet för västlig orientering



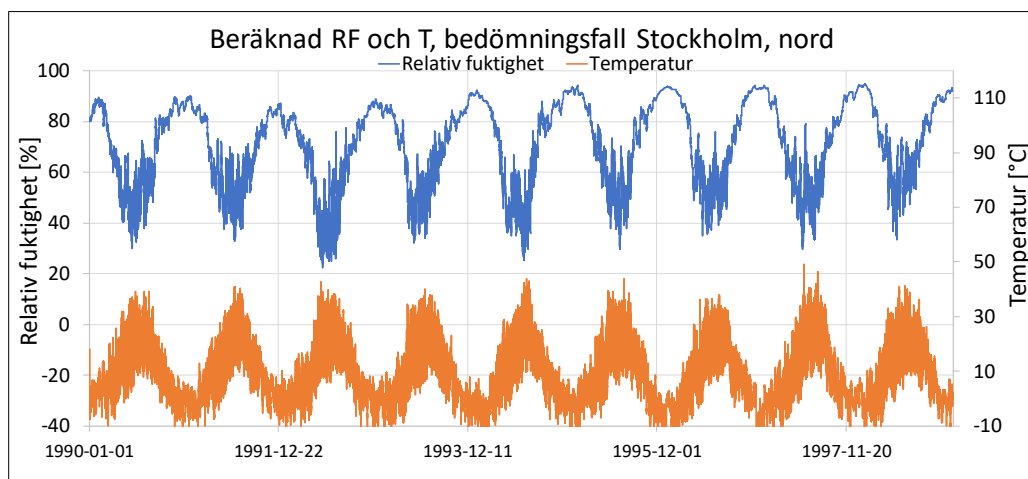
Figur 9.18 - Temperatur och relativ fuktighet för östlig orientering



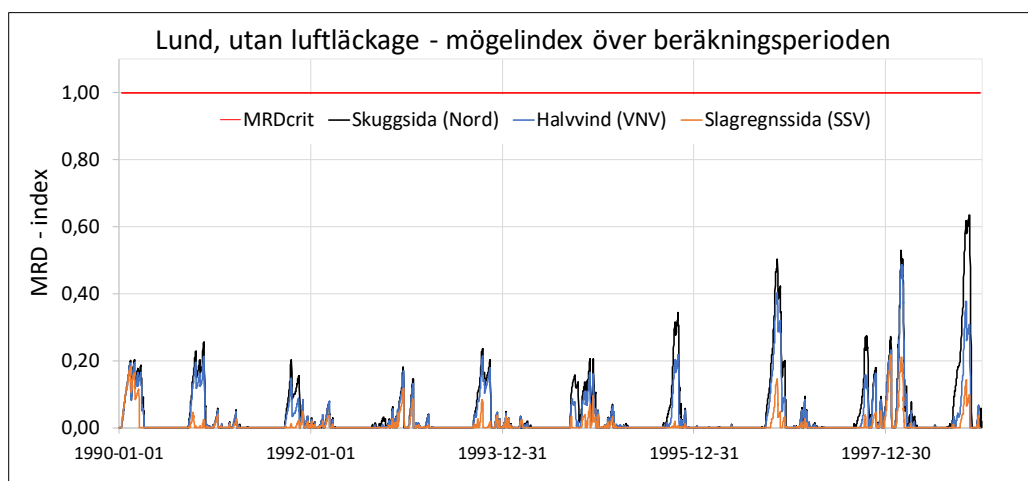
Figur 9.19 - Fuktkvot för samtliga orienteringar



## Bilaga D - Beräkningsresultat parameterstudie



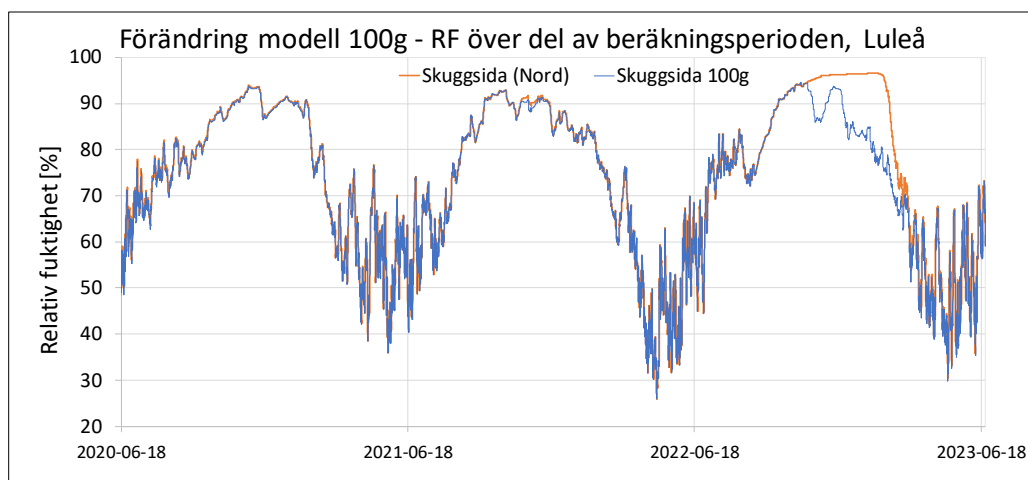
Figur 9.20 - Beräknad temperatur och relativ fuktighet för bedömningsfallet i parameterstudien. Stockholmsklimat med nordlig orientering



Figur 9.21 - Beräkning för bedömningsfall i parameterstudie i Lund, utan luftläckage

## Bilaga E - Resultat vid olika lösningsmetoder i WUFI

I figur 9.22 redovisas skillnaden mellan beräkning med och utan begränsning i porositet för att hantera beräkningsproblematiken vid nattutstrålning. Beräkning med ändrad porositet benämns 100g. De båda metoderna ger väldigt likvärdiga resultat på samtliga timmar då nattutstrålningsproblematiken inte inträffat. 100g antas ge mer trovärdiga resultat eftersom denna hanterar nattutstrålningen vilket vi ser under det tredje året i figuren.



Figur 9.22 - Relativ fuktighet i råspont Luleå vid olika lösningsmetod, dels 4 mm  $m_y=0,1$  dels 100g