

RäknaF 2018

-Stöd för kombinerade värme- och fuktberäkningar i byggnadsdelar

Petter Wallentén

Rapport TVBH-3063 Lund 2018

Byggnadsfysik, LTH



LUNDS
UNIVERSITET

RäknaF 2018

Stöd för kombinerade värme- och
fuktberäkningar i byggnadsdelar

Petter Wallentén

© 2018 Petter Wallentén

ISRN LUTVDG/TVBH—18/3063—SE(57)

ISSN 0349-4950

ISBN 978-91-88722—55-3

Institutionen för bygg- och miljöteknologi

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Box 118

221 00 LUND

Förord

Avdelningen för Byggnadsfysik LTH har i samarbete med Fuktcentrum och projektet Woodbuild sammanställt en vägledning för personer som arbetar med värme- och fuktberäkningsprogram av typen WUFI, baserat på erfarenheter och nuvarande kunskaper i ämnet.

Vägledningen benämns "RäknaF" för att anknyta till ByggaF och utgörs av denna rapport samt stödjande information och data som görs tillgänglig via Fuktcentrums hemsida (www.fuktcentrum.lth.se).

Rapporten innehåller rekommendationer och metoder som är tillämpbara vid ingenjörsmässiga värme- och fuktberäkningar. Den avses att fungera som stöd vid planerandet, genomförandet och presenterandet av fuktberäkningar för byggnadsdelar. Dessutom kan rapporten fungera som stöd för beställare av beräkningar hur de kan ställa rätt krav på beräkningar och redovisning av resultat.

Rekommendationerna innehåller en generell del som är tillämpbar på alla program och en speciell del som riktar sig till användarna av WUFI, det mest använda programmet i dagsläget för värme- och fuktberäkningar.

De som har bidragit med sina erfarenheter är:

Stephen Burke, LTH
Lars-Erik Harderup, LTH.
S. Olof Mundt-Petersen, LTH
Peter Brander, Boverket
Mathias Lindskog, Thyréns
Lars Olsson vid RISE
Anders Kumlin, Anders Kumlin AB

Vidare har erfarenheter från examensarbeten och forskning vid avdelningen för Byggnadsfysik inkluderats.

För antaganden och eventuella fel är det endast författaren som är ansvarig.

Lund, december 2018

Petter Wallentén

Innehållsförteckning

Förord	1
Innehållsförteckning	3
1 Inledning.....	5
1.1 RäknaF	5
2 Introduktion till numeriska lösningar av värme och fukttransport.....	7
2.1 Den verkliga situationen.	7
2.2 Matematiska modell.....	7
2.3 Numerisk formulering av den matematiska modellen	9
2.4 Lösningsmetod.....	13
3 Introduktion till felanalys.....	15
4 Övergripande beräkningsgång	19
4.1 Det praktiska problemet.....	20
4.1.1 Problem och system.....	20
4.1.2 Specifika mål och mätmetoder	20
4.1.3 Existerande förhållanden och information.....	23
4.1.4 Begränsningar och viktiga antaganden	24
4.1.5 Resultat av det praktiska problemet.....	25
4.2 Praktisk grundläggande analys	25
4.2.1 Modellering.....	25
4.2.2 Nyckelparametrar.....	25
4.2.3 Icke nyckelparametrar.....	26
4.2.4 Riskanalys.....	27
4.2.5 Resultat av praktisk analys	27
4.3 Beräkning och analys av resultatet	27
4.3.1 Val av beräkningsmetod	27
4.3.2 Planering av beräkning	27
4.3.3 Beräkningen utförs.....	31
4.3.4 Tillämpning av mål och mätmetoder på utdata.....	32
4.3.5 Resultat av beräkning och redovisning av resultatet.....	32
4.3.6 Känslighetsanalys	32
4.3.7 Felanalys av beräkningen.....	35
5 Allmänna rekommendationer för genomförande och typproblem.....	37
5.1 Slagregn	37
5.2 Läckage från insidan.....	38
5.3 Våtrum	38
5.4 Klimat	39
6 WUFI.....	43
6.1 Stabilitet.....	43
6.2 Material.....	45
6.3 Luft och ventilation.....	46

6.4	Klimatdata.....	46
6.4.1	Randvillkor	47
6.5	Fuktkällor.....	47
6.5.1	Regninträngning.....	48
6.5.2	Luftläckage från insidan.	48
6.6	Exempel på basfall för vissa konstruktioner	48
6.6.1	Kallvind	48
6.6.2	Parallelltak	49
6.6.3	Vägg - skalmur.....	49
6.6.4	Vägg - träpanel.....	50
7	Mall för redovisning av beräkningar och resultat	51
	Referenser	53
	Appendix. Uppskattning av noggrannhet baserat på fel i inparametrar.....	55

1 Inledning

Användningen av byggnadsfysikaliska beräkningsverktyg ökar ständigt i Sverige, främst hos tekniska konsulter. I Sverige är den endimensionella versionen av programmet WUFI 1D (Fraunhofer Institut für Bauphysik) ofta använt för att göra värme och fuktberäkningar i byggnadsdelar, i viss mån även WUFI 2D och Delphin (Bauklimatik-Dresden). Erfarenheter visar att olika användare, som använder samma program, kan få väldigt olika resultat för samma konstruktion vilket lett till viss skepsis om resultaten.

Kan vi lita på resultaten av fuktberäkningar?

- Flera studier visar att man kan få relativt god överensstämmelse mellan mätningar och beräkningar (Mundt-Petersen 2013, Künzel 1995, Bludau 2008, Hansen och Wallenten 2018).
- Ett stort problemet är mängden parametrar som ska uppskattas och som gör att det i viss mån tyvärr är möjligt att få ett i förväg bestämt svar. Det saknas tydliga riktlinjer för vilka parametrar och nivå på indata som ska användas i beräkningsmodeller.
- Prognoser av framtida fuktförhållanden är osäkert på grund av det uppenbart okända framtida klimatet samt hur detta skall väljas.
- Det kan vara svårt att återskapa en historik om man vill analysera ett skadefall.
- Vilka randvillkor bör användas: utomhusklimat, inomhusklimat, slagregn mm?
- Vilka kriterier bör användas för att godkänna en konstruktion?
- Hur jämför man beräkningar gjorda av olika personer?

1.1 RäknaF

RäknaF är namnet på en sammanställning av dokument som är tänkt att vara till stöd för beställaren och utföraren i samband med värme- och fuktberäkningar av klimatskalet. Förutom den här presenterade rapporten kommer mer information göras tillgänglig på fuktcentrums hemsida (www.fuktcentrum.lth.se). En del av materialet är tillämplbart även inom andra områden där beräkningsprogram används.

Strukturen för rapporten RäknaF är:

Introduktion till numeriska lösningar av värme och fukttransport.

Introduktion till felanalys.

Ett flödesschema med rubriker för hur arbetet bör utföras.

Rekommendationer för genomförande och typproblem.

Speciella rekommendationer för vissa beräkningsprogram (för närvarande endast WUFI)

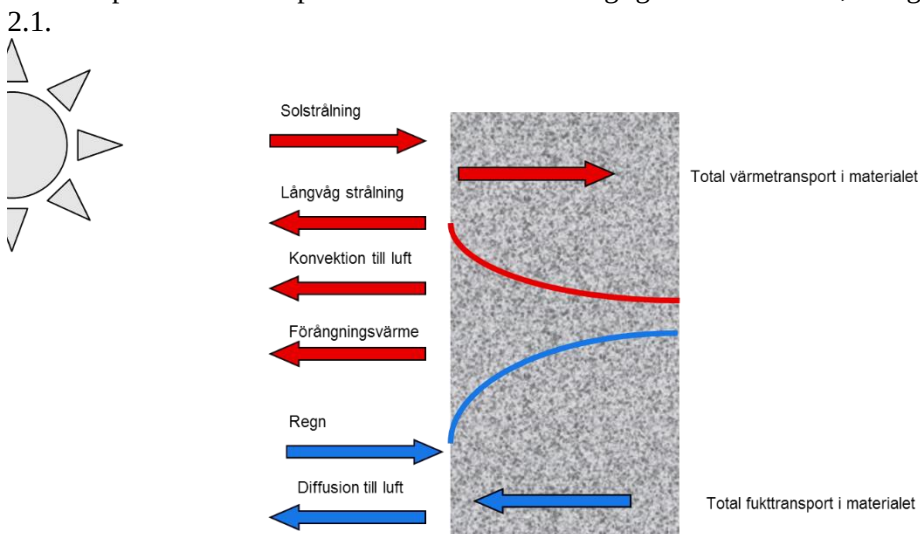
Exempel på basfall för några vanligt förekommande konstruktioner.

Mall för redovisning av beräkningar och av resultat.

2 Introduktion till numeriska lösningar av värme och fukttransport

2.1 Den verkliga situationen.

Den verkliga fysiska situationen är ett material, eller ett antal skikt av olika material som är utsatta för olika klimat och fuktbelastning på in och utsida, dvs olika vindhastighet, temperatur, ånghalt, solstrålning, långvågig strålning och eventuellt fritt vatten (från t. ex. regn) på ytan. Detta leder till en värme- och fukttransport och en temperatur- och fuktfördelning igenom materialet, se figur 2.1.



Figur 2.1. En yta utsatt för utomhusklimat.

Dels sker flera processer vid ytans kontakt med omgivningen, dels sker värme- och fukttransport i materialet.

2.2 Matematiska modell

Värme- och fukttransport modelleras matematiskt oftast som två ekvationer: en för värmetransporten och en för fukttransporten. Eftersom framför allt fukttransport fortfarande inte är utrett i detalj, samt vissa medvetna förenklingar för transportkoefficienterna så finns i dagsläget inget "facit" på hur problemet skall beskrivas. En möjlig formulering är följande för värmetransporten:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_e \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \frac{\partial}{\partial x} (\varphi v_s) \right) \quad (1)$$

Här är:

$T = T(x, t)$	[°C]	temperatur
t	[s]	tid
x	[m]	positionen i materialet
h_e	[J/kg]	ångbildningsvärme (fasomvandling från vätska till ånga)
$\lambda_m = \lambda_m(w)$	[W/m K]	materialets värmeledningsförmåga, beroende av fukthalten
c	[J /kg K]	materialets värmekapacitet (med fukttinnehåll)
ρ	[kg/m ³]	materialets densitet (med fukttinnehåll)
$\varphi = \varphi(t, x)$	[%]	relativ fuktighet i luften i materialet
$v_s = v_s(T)$	[kg/m ³]	mättnadsånghalt i luften, temperaturberoende

För fuktktransporten kan följande formulering användas:

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial w}{\partial x} + \delta_v \frac{\partial}{\partial x} (\varphi v_s) \right) \quad (2)$$

Med

$w = w(t, x)$	[kg/m ³]	materialets fukthalt
$D_w = D_w(w)$	[m ² /s]	fuktdiffusivitet för vätskefas, beroende på fukthalten
$\delta_v = \delta_v(\varphi)$	[m ² /s]	ånggenomsläpplighet, beroende på relativ fuktighet
$v = v(t, x) = \varphi(t, x) \cdot v_s$	[kg/m ³]	ånghalt i luften i materialet
$\frac{\partial w}{\partial \varphi} = \xi(\varphi)$	[kg/m ³ %]	fuktkapaciteten (lutningen på sorptionskurvan)

Notera att i (2) är det fukthalten w och ånghalten v som är potentialerna som styr flödet.

Även om ekvationerna (1) och (2) visar på komplexiteten i kombinerad värme- och fukttransport (i en dimension) så är de baserade på flera förenklingar och antagande. De viktigaste är

- Ingen luftkonvektion.
- Fukttransporten antas kunna delas upp i en ånghaltstransport och en vätsketransport. Det finns inga detaljerade vetenskapliga experiment som stöder detta.
- Inget temperaturberoende för fuktkapaciteten: ξ .
- Inget temperaturberoende för fuktdiffusiviteten: D_w .
- Ingen gravitation.

Ett av de största problemen med modellen (1) och (2) är att relativt få mätningar är gjorda av de ingående materialparametrarna. Det finns många material och det tillkommer ständigt nya. Endast en bråkdel av möjliga fuktillstånd och temperaturer är undersökta för respektive material vilket leder till att många parametrar måste uppskattas baserade på liknande material.

Ekvationerna blir mer komplicerade i två och tre dimensioner men har samma principiella utseende.

Trots dessa förenklingar och antaganden fungerar ovanstående modell tillfredsställande i många fall.

2.3 Numerisk formulering av den matematiska modellen

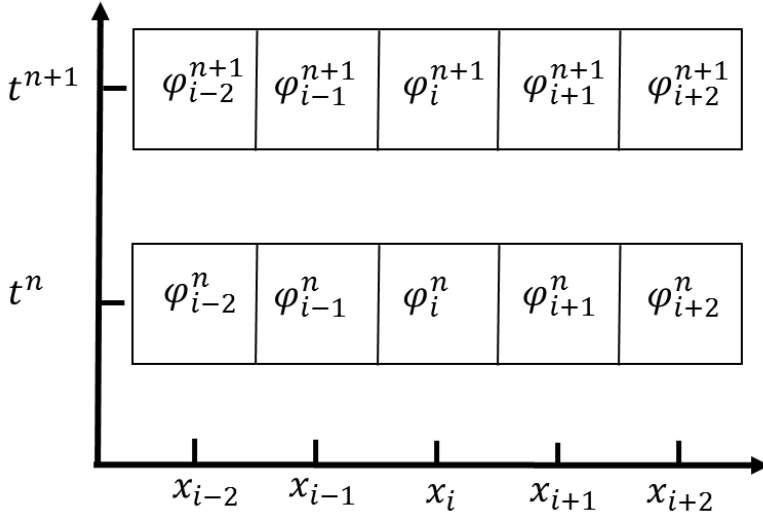
Ekvationerna (1) och (2) måste lösas numeriskt. Det görs genom att diskretisera i tiden och rummet, dvs materialets delas upp i skikt (kallas även celler), som i detta exempel är lika tjocka (Δx):

$$x : x_1, x_2 \dots x_{Nx} \quad x_{i+1} - x_i = \Delta x$$

och tiden delas upp i tidssteg (Δt):

$$t : t^1, t^2 \dots t^{Nt} \quad t^{i+1} - t^i = \Delta t.$$

Figur 2.2 visar detta för den relative fuktigheten (φ) i materialet.



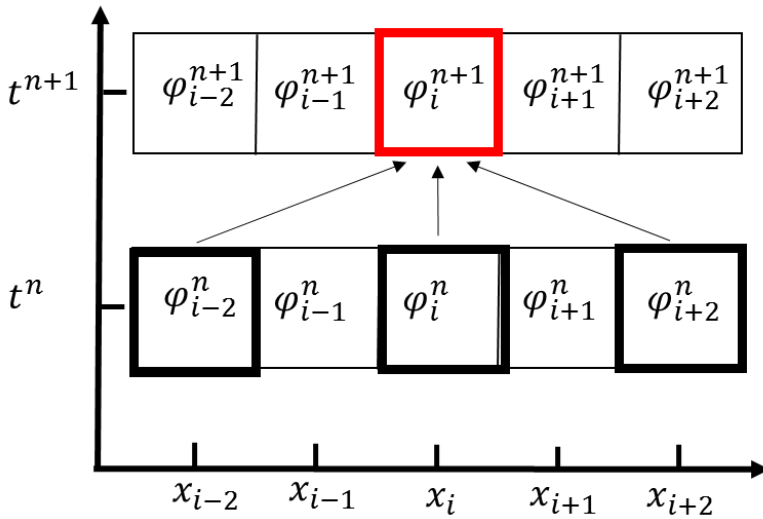
Figur 2.2. Diskretisering i tid (t) och längd (x).

Det enklaste sättet att diskretisera ekvation (1) med hjälp av denna uppdelning blir (efter förenklingar):

$$\xi \frac{\varphi_i^{n+1} - \varphi_i^n}{\Delta t} = D_w \frac{w_{i+2}^n - 2w_i^n + w_{i-2}^n}{\Delta x^2} + \delta_v v_s \frac{\varphi_{i+2}^n - 2\varphi_i^n + \varphi_{i-2}^n}{\Delta x^2}$$

Ur denna ekvation kan den relativa fuktigheten lösas ut för nästa tidssteg φ_i^{n+1} . Detta visas principiellt i figur 2.3 (fukthalten w kan diskretiseras på samma sätt).

$$\varphi_i^{n+1} = \varphi_i^n + \frac{\Delta t}{\xi} \left[D_w \frac{w_{i+2}^n - 2w_i^n + w_{i-2}^n}{\Delta x^2} + \delta_v v_s \frac{\varphi_{i+2}^n - 2\varphi_i^n + \varphi_{i-2}^n}{\Delta x^2} \right] \quad (3)$$



Figur 2.3. Hur cellerna i ett tidigare tidssteg används för att beräkna den relativa fuktigheten vid tiden $t=t^{n+1}$ för cellen $x=x_i$.

Metoden som är beskriven ovan kallas för en *explicit* metod eftersom ingen information används förutom den som finns för ett tidigare tidssteg. Det kan synas lite egendomligt att de närmaste cellerna inte direkt påverkar. Det beror på att det är en andragsradsekvation i x , dvs det är två deriveringar. Metoden är relativt enkel att implementera och lätt att följa. Problemet är att tidssteget inte får bli för stort för då blir lösningen ofysikalisk. Detta styrs av storleken på D_w och δ som bestämmer hur fort en förändring av fukthalt eller relativ fuktighet förflyttar sig igenom materialet. Metoden (3) gör en förutsägning in i framtiden och den blir osäkrare med ett ”snabbare” material. Om diffusionen (δ) är störst blir det den begränsande parametern:

$$\Delta t < \frac{\xi \Delta x^2}{2\delta_v v_s}$$

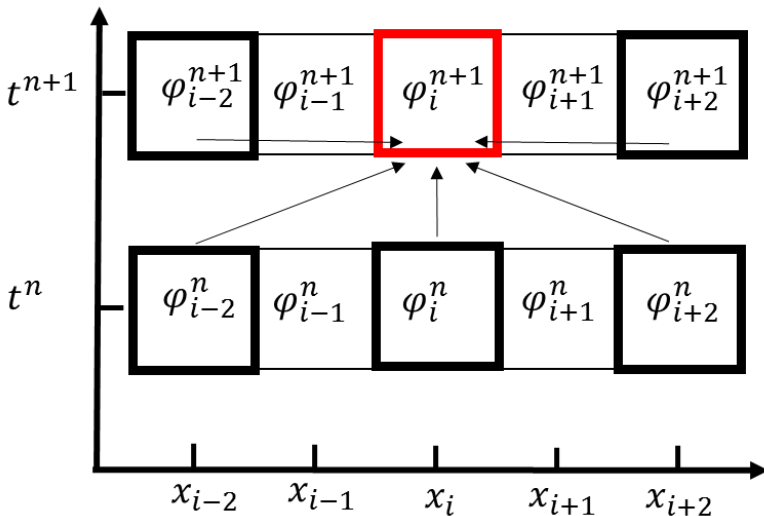
Detta kallas för att tidssteget är stabilt om det håller sig under denna gräns. Ju finare uppdelning i x -led desto kortare stabilt tidssteg. Av ekvationen ovan framgår att om cellerna halveras så blir det stabila tidssteget 4ggr mindre eftersom celltjockleken är i kvadrat. Tidssteget kan bli av storleksordningen sekunder om skikten är tillräckligt små. Om beräkningen skall göras på ett helt år så blir det väldigt många steg innan beräkningen är klar. Vid väldigt små tidssteg kan man dessutom få avrundningsfel på grund av antalet gällande siffror

i datorns system. Fördelen med metoden är att lösningen antingen inte hittas alls om tidssteget är för stort eller också får man en lösning som har relativt god noggrannhet.

För att minska antalet steg och samtidigt försäkra sig om att lösningen är fysikaliskt rimligt används ofta en *implicit* metod istället som innebär att hänsyn tas redan från början till att ekvation (1) och (2) uppfylls även för det framtida tidssteget. Detta kan göras på flera olika sätt, nedan visas en av de vanligaste, Crank-Nicolsons metod (1947):

$$\varphi_i^{n+1} = \varphi_i^n + \frac{\Delta t}{\xi} \left[D_w \frac{(w_{i+2}^n - 2w_i^n + w_{i-2}^n) + (w_{i+2}^{n+1} - 2w_i^{n+1} + w_{i-2}^{n+1})}{2\Delta x^2} + \delta_v v_s \frac{(\varphi_{i+2}^n - 2\varphi_i^n + \varphi_{i-2}^n) + (\varphi_{i+2}^{n+1} - 2\varphi_i^{n+1} + \varphi_{i-2}^{n+1})}{2\Delta x^2} \right] \quad (4)$$

Dvs resultatet beror av medelvärdet av det tidigare och nuvarande tidssteget. Eftersom φ_i^{n+1} finns på både vänster och höger sida i ekvation (4) så kan man inte enkelt lösa ut det, utan ett ekvationssystem måste lösas för varje tidssteg. Metoden visas i figur 2.4.



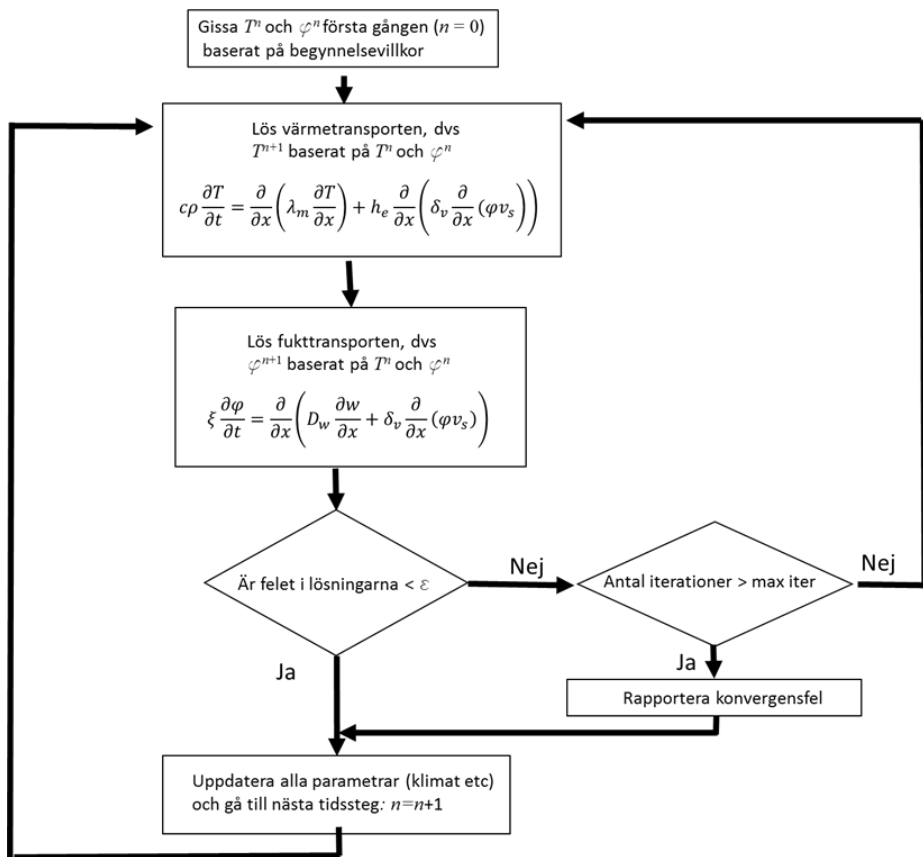
Figur 2.4. Hur cellerna i ett tidigare tidssteg används för att beräkna den relativa fuktigheten vid tiden $t=t^{n+1}$ för cellen $x=x_i$ enligt den implicita metoden.

Nackdelen med metoden är alltså att ett ekvationssystem måste lösas för varje tidssteg. Ekvationssystemet är dock glest eftersom varje cell bara beror på sin omgivning. Fördelen med metoden är tidssteget nu kan väljas fritt. Lösningen kommer alltid att vara fysikaliskt rimlig. En indirekt nackdel med detta stabila tidssteg är att man inte ser om lösningen är korrekt, dvs lösningen kommer alltid att vara ”sund” men kan fortfarande vara felaktig jämfört med en noggrannare räkning. Med noggrannare räkning menas en med kortare tidssteg.

Det innebär att man alltid bör göra beräkningar med olika tidssteg även när en implicit metod används för att få en uppfattning om felet i räkningen. Detta gäller även för den explicita metoden men där är det mer uppenbart. Programmet WUFI använder t ex en implicit metod för att lösa ekvationerna.

2.4 Lösningsmetod

Ytterligare en komplikation är att ekvationerna (1) och (2) måste lösas samtidigt för varje tidssteg. Ofta görs detta genom att först lösa den ena (t ex för temperaturen, T) och med detta resultat, lösa den andra (för relativ fuktighet, φ). Sedan upprepas förfarandet iterativt tills skillnaden blir liten mellan två iterationer. Figur 2.5 visar principen för denna metod.

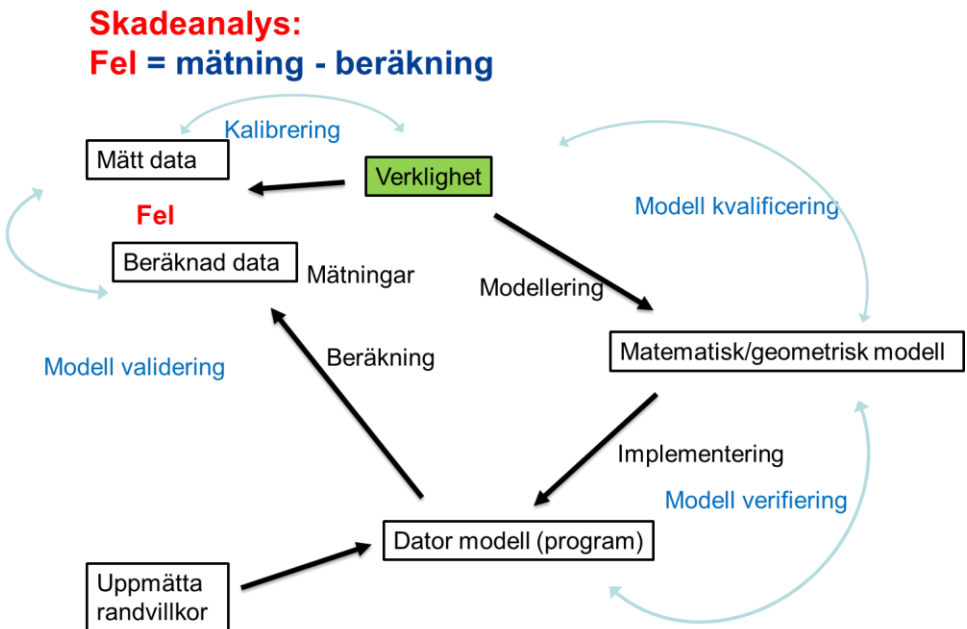


Figur 2.5. Flödesschema för ett lösningsförfarande av ekvation (1) och (2).

Om antalet iterationer i den inre loopen blir för stort ($> \text{max iter.}$) kan man minska tidssteget och göra om beräkningen med reducerat tidssteg. I WUFI kallas detta för *adaptiv tidsstegskontroll*.

3 Introduktion till felanalys

När man gör beräkningar av verkliga förlopp så kan resultaten av beräkningarna skilja sig från vad som händer i verkligheten. Generellt kan man kalla denna skillnad för ett ”fel”. Eftersom orsaken till felet kan bero på principiellt olika källor så bör man skilja på dessa. När en beräkning görs (av ett datorprogram) kan man dela upp de olika stegen i: framtagandet av en matematisk/geometrisk modell, programmering/användandet av denna modell och slutligen själva beräkningen (simuleringen) som använder de framtagna randvillkoren. I beskrivningen ovan är ekvationerna (1) och (2) steget att göra (modellera) en matematisk/geometrisk modell och ekvation (4) är första delen av att implementera en datormodell. Det är skillnaden mellan verkligheten och resultaten från beräkningen som här kallas ”fel”. Se figur 3.1.



Figur 3.1. En modell för de olika stegen vid en simulering (Oberkamp 2002)).

Felet mellan verklighet och beräkning/simulering kan därmed uppstå vid alla tre stegen.

- Framtagning, (Modellering) av den matematiska modellen: Förenkling av verkligheten både när det gäller de fysiska processerna, randvillkor och problemets geometri.
- Implementering av datormodell och beräkning: Programmering av den matematiska modellen och inmatning av data i programmet, se ekvation (4)
- Beräkning: Körandet av programmet och presentation av resultat.

För att säkerställa att den matematiska modellen är tillräckligt bra måste modellen *kvalificeras*, dvs en subjektiv bedömning görs att förenklingarna inte är för stora.

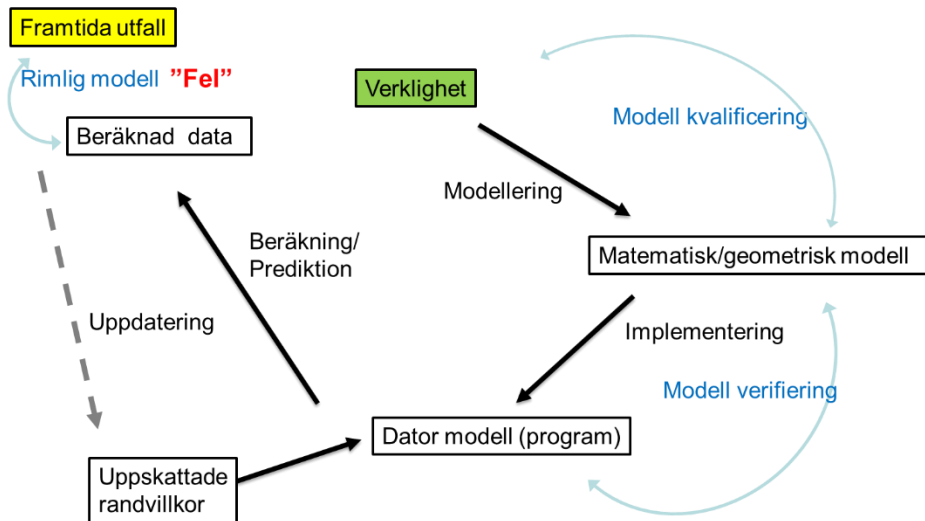
För att säkerställa att den numeriska modellen är tillräckligt bra görs en *verifiering*, t ex genom att jämföra med en analytisk (perfekt) lösning av det matematiska problemet. Det handlar alltså inte om att bevisa den matematiska modellen utan om att säkerställa att diskretiseringen och programmeringen inte innehåller fel samt har önskvärd noggrannhet.

För att säkerställa att simuleringen ger rätt svar (litet fel) så görs en *validering*, dvs en jämförelse mellan uppmätta och beräknade data. Detta innebär dock att samtliga typer av mätfel kommer att påverka valideringen. För existerande datorprogram inom området (IDA-ICE, WUFI, HEAT, VIP+ etc) så har det gjorts många valideringar med mer eller mindre lyckade resultat. Det är tyvärr ovanligt med ”blinda” valideringar, dvs ofta justeras inparametrarna när mätresultaten är kända. Valideringen visar då att programmet har möjligheten att ta fram rimliga värden men visar inte på svårigheten att välja rätt inparametrar. Dock har t ex Mundt-Petersen (2015) visat det går att göra blinda fuktberäkningar och ändå få resultat som är användbara för problemställningen.

I figur 3.1 och i resonemanget ovan så förutsätts det att det är möjligt att göra en jämförelse mellan experiment och beräkning för att kunna göra en validering. Men om man istället vill göra en *prediktering* av ett förlopp som inte hänt än så tillkommer naturligtvis den stora felkällan att vi inte känner randvillkor och de fysiska förlopp som sker (t ex materialets åldrande). Det går därmed inte att göra en validering av de resultaten. Det bästa man kan göra är att göra resultaten *troliga*, se figur 3.2. Detta är då också förknippat med vilken risknivå som kan accepteras. Efter hand som ny mätdata blir tillgänglig kan dock randvillkor och övriga parametrar uppdateras, för att på så sätt förbättra prediktionen.

Prediktion:

"Fel" = framtida utfall - beräkning



Figur 3.2. En modell för de olika stegen vid en prediktering av framtiden.

Förutom att analysera stegen där felen uppkommer kan man dela upp felen enligt följande:

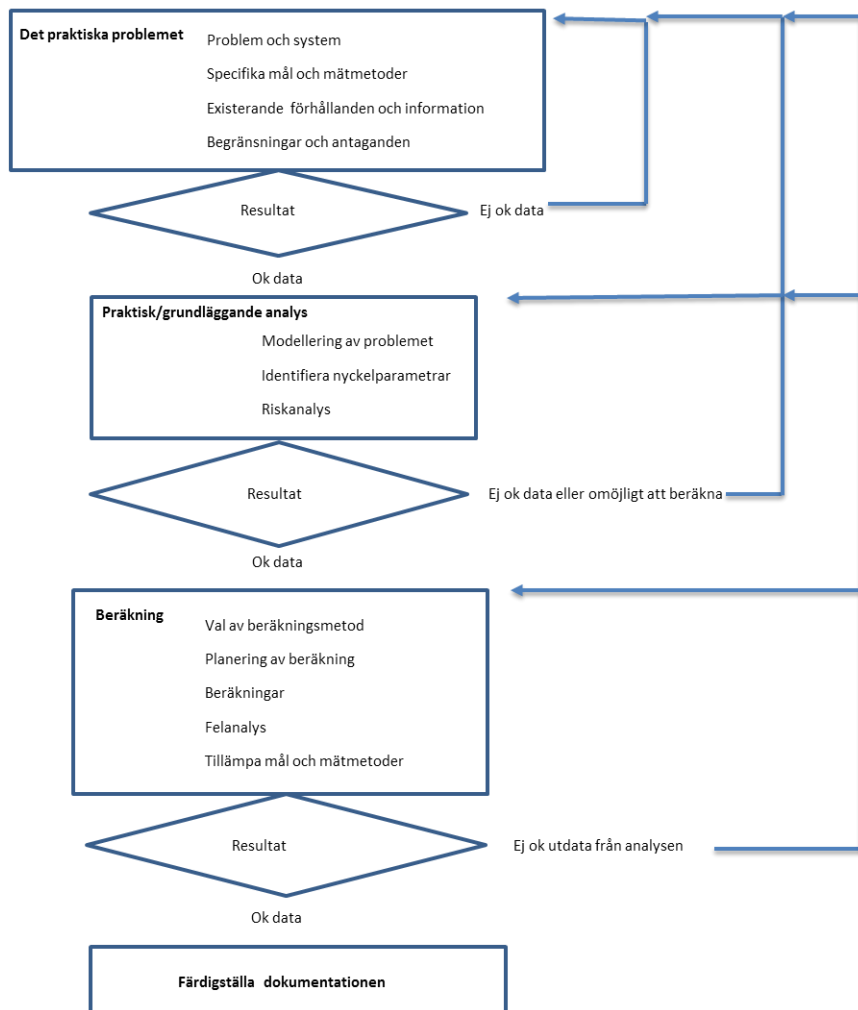
- Slumpmässiga (dvs varierar slumpartat inom ett intervall).
- Scenarioberoende (dvs beror på val: "vad händer om detta sker?").
- Brist på kunskap (vi kan inte göra en bedömning om hur felet beter sig).
- Systematiska (dvs fel som vi kan uppskatta och som har litet slumpartat beteende).

Av texten ovan framgår att man aldrig kan undvika fel vid beräkning/simulering. Alla modeller är en förenkling av verkligheten och alla prediktioner är omöjliga att validera innan de har hänt. Det viktiga är att man är medveten om dessa problem när man analyserar resultat av beräkningar och att den som redovisar det slutliga resultaten och redovisar en uppskattning av det totala felet samt vilka delar som bidrar till mest osäkerhet/fel. En sådan uppskattning är ofta svår att göra men utan detta är det omöjligt att bedöma beräkningens relevans.

4 Övergripande beräkningsgång

Den övergripande beräkningsgången som används i RäknaF är beskriven i figur 4.1. Idén är att dela upp beräkningsgången i tre steg.

- Det praktiska problemet
- Praktisk grundläggande analys
- Beräkningar och analys av resultat
- Färdigställa dokumentation



Figur 4.1. Flödesschema för beräkningsgången.

Nedan går varje steg igenom mer i detalj.

4.1 Det praktiska problemet

Innan något annat görs måste mål och ramar för det praktiska problemet definieras. Det innebär att systemgränserna för arbetet dokumenteras. Existerande förhållanden och information dokumenteras.

Det krävs en kritisk granskning för att bedöma om data räcker för att göra analysen som det är tänkt.

4.1.1 Problem och system

Vad är problemet som skall undersökas? Vad är sammanhanget som gör att ett visst problem tillåter t ex geometriska förenklingar?

Övergripande beskrivning av det praktiska problemet som skall undersökas. Är det en konstruktionsdetalj, en helhetsbedömning, undersökning av specifik parameter m.m.? Vad har beställaren för konkret praktiskt problem?

- Skadeanalys
- Bedömning av konstruktions framtida beteende
- Bedömning om konstruktionen uppfyller BBR's krav
- Undersökning av effekten av specifika parametrar (t ex isolertjocklek)

4.1.2 Specifika mål och mätmetoder

Målet med beräkningen måste beskrivas. Speciellt i jämförelse med övrig fuktsäkerhetsbedömning. Eftersom det i många fall är svårt att göra beräkningar som bevisar att en konstruktion fungerar kan man fokusera på:

- Parameterstudie av konstruktion för ökad förståelse eller bedömning av konstruktionens känslighet/robusthet (betydelsen av färgval, tjocklek m.m.)
- Rangordna olika konstruktioner
- Visa på konstruktioner som inte fungerar.
- Vara en del av en fuktsäkerhetsbedömning (enligt ByggaF). Påvisa händelseförlopp, t ex i samband med skadefall

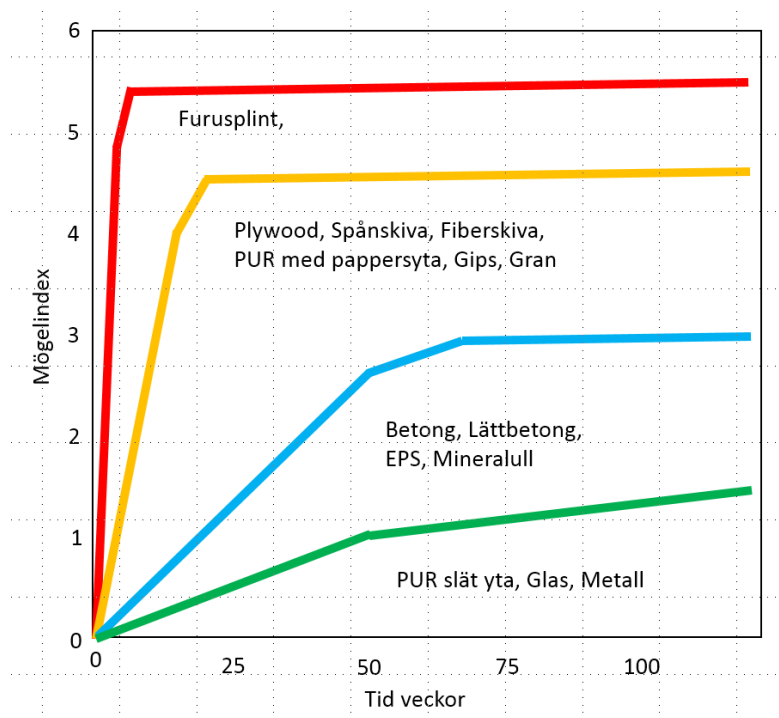
Vilka delparametrar som används för att godkänna eller underkänna en konstruktion måste tydligt definieras. Dessa kan vara:

- Ackumulering av fukt i enskilda material eller konstruktionen som helhet.

- Hög fukthalt i enskilda material vilket kan orsaka: korrosion, ökad värmetransport, röta och frostsprängning.
- Hög relativ fuktighet och temperatur i specifika positioner vilket kan orsaka: mögel, röta, mikrobiell påväxt etc.

Mögelindex

För att bedöma risken för mögel finns det ett antal föreslagna modeller. Gemensamt för dessa är att de tar hänsyn till både relativ fuktighet, temperatur och tid. Eftersom det finns väldigt många olika sorters mögelsorter varav många har olika krav på optimala livsbetingelser så är alla modeller en beskrivning av något slags medelbeteende. Förutom att mögelsorterna är olika är också materialen (substratet) som möglet växer på olika. Vissa material är känsligare än andra. Olika undersökningar har gett delvis olika resultat men i stort sett kan man dela upp materialen i 4 klasser: Mycket känsliga, Känsliga, Måttligt motståndskraftiga och Motståndskraftiga. Figur 4.2 är tagen från Ojanen et al (2010) och visar en möjlig uppdelning av material.



Figur 4.2. Olika känslighet för mögelpåväxt (mätt som mögelindex) när materialen utsätts för RF =97% och T= 23C (Ojanen et al 2010).

Skalan på y-axeln är sk mögelindex som har följande definition hos Ojanen, se tabell 4.1.

Tabell 4.1. Mögelindex enligt (Ojanen 2010), Viitanen(2007).

Mögelindex	
0	Ingen tillväxt
1	Någon tillväxt, kan endast upptäckas i mikroskop
2	Medeltillväxt, flera kolonier, kan endast upptäckas i mikroskop
3	Synlig tillväxt <10% av ytan som kan upptäckas med ögat
4	Synlig tillväxt, <50% av ytan som synligt med ögat
5	Riklig tillväxt, >50% av ytan synligt med ögat
6	Mycket tätt och riklig, 100%.

Det förekommer även andra definitioner av mögelindex, Johansson (2012) använder uppdelningen enligt tabell 4.2 baserat på besiktning med mikroskop med 40x förstoring.

Tabell 4.2. Mögelindex enligt Johansson (2012).

Mögelindex	(40x mikroskop)
0	Ingen påväxt
1	Mycket lite påväxt
2	Tydlig, etablerad påväxt,
3	Kraftig fläckvis påväxt
4	Påväxt över hela ytan.

Det finns många publicerade mögelmodeller som kan användas för att analysera beräkningar, följande är kanske de vanligaste:

- MRD-modellen (Thelandersson och Isaksson 2013),
- M-modellen (Johansson et al 2017),
- VTT modellen (Viitanen 2007).
- WUFI-Bio

De tre översta använder alla någon form av mögelindex som mått och tillåter mögel både att växa och försvinna. WUFI-Bio däremot använder måttet mm mögeltillväxt per år och tillåter inte att möglet försvinner (dör ut under mögelovänliga betingelser). Vilket krav som ställs i form av mögelindex för att en konstruktion skall betraktas som godkänd är en bedömningsfråga. De olika modellerna ger liknande men inte exakt samma svar. Dessutom blir det en fråga

om hur stor säkerhetsmarginal som skall väljas. Det mest konservativa kravet blir att inte tillåta mögelindex ovanför 1. Men Ojanens skala går till 6 så ett värde mellan 1 och 2 kan vara acceptabelt.

Förväntad noggrannhet i resultatet måste enligt tidigare redovisas. Eftersom predikterande fuktberäkningar har en osäkerhet som är svår att uppskatta pga klimatets stora påverkan och osäkerheten i eventuella mögelmodeller så måste kraven på noggrannhet ställas på en rimlig nivå, men någon analys bör ändå göras för att göra resultatet troligt. Valet av godkänd säkerhetsmarginal är inte färdigutrett och måste än så länge göras efter eget huvud.

4.1.3 Existerande förhållanden och information

Baserat på den praktiska problemställningen måste relevanta randvillkor och annan data tas fram. Det kan vara:

- Materialdata.
- Klimatdata.
- Inneklimat.
- Fuktbelastning.
- Ritningsunderlag
- Speciella omständigheter på plats (skuggning, utsatt läge etc).

Materialdata är ofta inte av så hög kvalitet. Men om materialparametrarna för ingående material inte signifikant avviker från de verkliga är detta i regel av mindre betydelse för resultatet. Det viktigaste är att undvika misstag som att välja helt fel material. Förutom att det är svårt att få fram exakt rätt materialdata så finns dessutom en spridning i materialegenskaper. Detta gäller alla vanliga material: mineralull, tegelstenar, gran, furu, betong etc. Detta innebär att beräkningsresultat som är beroende av förhållandevis små ändringar in materialdata bör behandlas med skepsis.

Kraven på kvaliteten på randvillkoren måste sättas i förhållande till den allmänna noggrannheten. Noggrannheten bestäms framför allt av tillgänglig klimatdata, som oftast är den parameter som har störst påverkan på resultatet i de mest fuktkritiska positionerna. Eftersom det inte finns en standard för hur dimensionerande klimat skall tas fram för fuktberäkningar så måste utföraren själv göra en analys. Detta gäller framför allt analys av en konstruktions framtida beteende. Rekommenderat är att inte endast använda s.k. "normaldata" när framtida fuktsäkerhet skall bedömas utan också använde mer extremt klimat. Detta eftersom klimatet är en så varierande parameter att den ensam kan avgöra om en konstruktion är acceptabel eller ej. För känsliga/vissa konstruktioner kan variationerna i utomhusklimat mellan olika år vara skillnaden mellan om en konstruktion inte drabbas av en skada eller drabbas av en skada.

I skadefall är det oftast problem att ”återskapa” en historik om läckage eller motsvarande som orsakat skadan och framför allt, vilka förhållanden som rådde innan skadan. För en skadeanalys är det ofta bättre att göra en beräkning med bra (realistiska) klimatdata som kommer från en annan ort än att använda dåliga klimatdata från exakt rätt plats. Orsaken till detta är den starka kopplingen timme för timme mellan de olika komponenterna i klimatet (temperatur, relativ fuktighet, solstrålning etc.).

Fuktbelastningen utgörs av två delar: den delen som kommer från klimatet och den som kommer av andra faktorer (byggfukt, fukttillskott från de boendes aktiviteter, läckande ledningar etc.)

Ritningsunderlag är nödvändiga men måste analyseras om de verkligen motsvarar den faktiska byggnaden. Speciella omständigheter på plats (skuggning, utsatt läge) kan påverka resultatet mycket och kan också förändras i tiden. Beställaren av beräkningen har ett ansvar att ge relevant information.

En kritisk granskning om data räcker för att göra analysen måste göras. Om informationen bedöms otillräcklig så kan man förmodligen fortfarande göra en praktisk bedömning. Det är inte meningsfullt att genomföra en beräkning om ingångsdata bedöms vara av för låg kvalitet, undantaget är en känslighetsanalys av de data man inte känner.

4.1.4 Begränsningar och viktiga antaganden

Här beskrivs problemets systemgränser och viktiga antaganden. Det innebär att det klart definieras vad som inte är med i analysen. Viktiga begränsningar kan vara:

- Endast endimensionell beräkning (om detta redan är känt här).
- Endast en geografisk ort.
- Resultatet gäller endast vid vissa fuktbelastningar.
- Vad som inte kan beräknas utan skall bestämmas kvalitativt.

När randvillkor och bakgrundsdata tas fram så måste den oftast kompletteras med antagen/uppskattad information. Det är inte nödvändigt att i detta skede beskriva varje enskilt antagande. Dock bör väsentliga antaganden som kan anses ha stor inverkan på resultatet dokumenteras. Detta kan vara:

- Hänsyn till byggfel (läckage).
- Val av speciellt klimat (regn, storm).
- Nedbrytning av material.
- Kvarstående vatten på horisontella ytor.

4.1.5 Resultat av det praktiska problemet

Dokumentation av grundläggande förutsättningar. Om informationen inte är tillräcklig bör fortsatt analys inte göras innan dessa har kompletterats. Mål, ramar samt systemgränser bör godkännas av beställare innan arbetet börjar.

4.2 Praktisk grundläggande analys

Innan beräkningen görs skall en praktisk analys göras, (detta ansluter till ByggaF). Den kommer att visa på konstruktionens svagheter och styrkor. En modell måste göras av det ursprungliga geometriska och praktiska problemet. Det innebär att nyckelparametrar då kan uppskattas. Det är möjligt att den praktiska analysen visar på så stora problem att det inte är meningsfullt att göra en beräkning.

4.2.1 Modellering

I detta steg görs en förenkling av det ursprungliga geometriska problemet. Även förenklingar av randvillkor kan ingå. Detta steg måste vara väldokumenterat då det kommer att ge upphov till systematiska fel och påverka vilka övriga nyckelparametrar som kan undersökas. I detta steg bestäms t ex om det är en 1D, 2D eller 3D modell (som i dagsläget knappast finns tillgängligt) och följaktligen vilket beräkningsprogram som skall användas.

4.2.2 Nyckelparametrar

För varje konstruktion måste de viktigaste parametrarna identifieras. Det är de indataparametrar som påverkar resultatet väsentligt och som kan ha stor variation pga osäkerhet, modell eller konstruktionsval. Om en parameter är osäker men påverkar resultatet endast ringa så är den inte en nyckelparameter.

Typiska nyckelparametrar kan vara:

- Ventilation.
- Luftomsättningar i en ventilerad luftspalt.
- Isolertjocklek.
- Uteklimat.
- Fukttillskott.
- Färg på fasad (ljus, mörk, smuts över tiden).
- Känsliga områden (hörn, sommarkondens på ångspärrens utsida etc).
- Byggfukt.
- Hydrofoba skikt.

- Fuktkonvektion inifrån.
- Regninträngning.
- Luftläckage från insidan.
- Väderstreck.
- Medeltemperatur.
- Startdatum.
- Smuts över tiden.
- Terräng och vegetation (skuggning).
- Tryckfördelning över klimatskalet.

I denna analys ingår även att välja de positioner som skall studeras, dvs de positioner, eller material, som bedöms vara mest fuktkritiska. Viktigt att tänka på är att lokala positioner ej är representativa för medelvärdet i ett skikt.

Om man använder alltför ideala randvillkor fungerar kanske konstruktionen men detta motsvarar då inte verkligheten. Det finns därför ett antal metoder att skapa mer fuktlast. Fuktblastningen kan varieras genom generellt val av klimatdata men även genom mer specifika parametrar överlagrade på en viss klimatfil:

- Ökat slagregn.
- Ändra medeltemperatur eller RF +/- 10%.
- Byggfukt.
- Fuktkälla (våtrum, dusch etc.).

Om solen alltid lyser på en yta (ingen skuggning) bör det motiveras, snarare än tvärt om. Detta eftersom skuggning vanligen förekommer. Man bör alltså oftast göra åtminstone en beräkning i skuggat läge.

Regninträngning av slagregn på 1% innanför fasaden enligt ASHRAE standard 160P är en modell som inte passar så bra för 1D räkningar men som trots allt ger ett mått på robusthet. Mer om det i nästa kapitel.

Fuktläckage inifrån är en realistisk defekt som kan simuleras. Det finns olika sätt att göra detta t ex som en påtvingad omsättning eller som ett tryckberoende flöde. Detta beskrivs mer i kapitlet om WUFI exempel.

4.2.3 Icke nyckelparametrar

Det finns väldigt många parametrar som inte karakteriseras som nyckelparametrar. Dessa bör dock ändå redovisas så att den som skall utvärdera resultatet själv kan ta ställning till om en viss parameter har fått rätt prioritet. Att

använda utgångs- (default) värden utan att reflektera över rimligheten i varje värde kan ge helt fel resultat. All indata måste kunna motiveras.

4.2.4 Riskanalys

Baserat på nyckelparametrar och praktisk analys av konstruktion görs en riskanalys dvs en bedömning om det finns risk för problem av något slag. Detta kommer att utgöra grunden för de hypoteser/beräkningsfall som undersöks vid beräkningen.

4.2.5 Resultat av praktisk analys

Dokumentation av den praktiska analysen. Detta kan leda till omformulering av den problemställningen och/eller de specifika målen eller t o m att den kvantitativa analysen inte skall göras.

4.3 Beräkning och analys av resultatet

I det sista steget görs beräkningen och analysen av resultaten. Notera att ibland behövs ej detta steg om riskbedömningen redan har gett tillräckligt med svar. Det kan inte nog betonas hur viktigt det är att först göra ett antal testberäkningar för att undersöka beroenden och hitta fel i sina indata. Kontrollera rimligheten i beräkningsresultat. Leta även efter parametrar och faktorer som har stor påverkan på resultatet. Om möjligt bör alltid en enklare handberäkning utföras. Detta för att lättare hitta fel i den detaljerade beräkningen samt för att uppskatta storleksordningarna på beräkningsresultaten. Handberäkningen är då typiskt en stationär beräkning där temperatur och ånghalt varierar linjärt genom konstruktionen.

4.3.1 Val av beräkningsmetod

Baserat på modellen av det ursprungliga problemet så väljs beräkningsmetod. I vissa fall är det fullt tillräckligt med en handberäkning. Om ett beräkningsprogram skall användas bör det väljas både med avseende på problemets art och utförarens kompetens. Dvs om kunskapen är bristfällig om ett visst verktyg så bör det inte användas. Bättre då att använda ett enklare verktyg eller metod som utföraren verkligen behärskar.

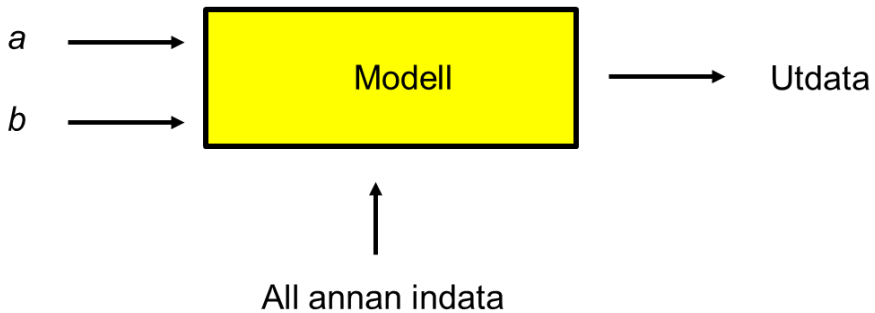
4.3.2 Planering av beräkning

Här väljs hur de valda randvillkoren skall implementeras. Strategi för känslighetsanalys av nyckelparametrar tas fram. Eftersom det är tidskrävande

och producerar mycket data att göra många beräkningar är det viktigt att ha en bra strategi. Det vanligaste är att beräkningarna görs i två steg:

- Stickprov
- Parameterstudie

Det första steget är att göra ett mindre antal beräkningar för att få en uppfattning om extremvärdena i problemet och för att kontrollera sina indata. Om man har två parametrar: a och b som är identifierade som nyckelparametrar kan den övergripande modellen beskrivas som i figur 4.3.



Figur 4.3. En modell av ett system två nyckelparametrar a och b . All annan data hålls konstant då a och b varieras.

Ett beräkningsschema kan då se ut som i figur 4.4 där sex olika beräkningsfall genomförs: ett som referensfall (R), fyra fall (O) för min- och maxvärden av a och b (oberoende av varandra) och ett fall (B) där både a och b maximeras.

		Parameter a								
Parameter b		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	100%					O				
	75%								B	
	50%									
	25%									
	0%	O				R				O
	-25%									
	-50%									
	-75%									
	-100%					O				

Figur 4.4. Exempel på beräkningsfall för två parametrar för att undersöka extremvärden (R är referensfall, O är test som antar oberoende och B testar beroendet mellan a och b). (6 beräkningar)

När man har en grov uppfattning om parametrarnas variation kan man fortsätta med två principiella strategier

1. Man betraktar ingående parametrar som oberoende och linjära och kan därför varieras var för sig.
2. Man betraktar ingående parametrar som beroende och/eller olinjära och varierar dem tillsammans, t ex ökad relativ fuktighet kopplat till ökat regn under ett dygn.

På grund av komplexiteten så väljs oftast strategi 1). Det normala förfarandet är då att skapa ett referensfall (R) som utgör basen för vidare variation. Man varierar därefter sin parameter i stegvis procent av maximal variation. Ett schema för detta visas i figur 4.5.

		Parameter a								
Parameter b		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
	100%					O				
	75%									
	50%					O				
	25%									
	0%	O		O		R		O		O
	-25%									
	-50%					O				
	-75%									
	-100%					O				

Figur 4.5. Exempel på oberoende beräkningsfall för två parametrar a och b. (9 beräkningar)

Om man misstänker att det finns ett beroende eller olinjärt beteende i några parametrar, vilket är den vanliga situationen, måste man välja strategi 2). Detta kan göras t ex genom att ha två eller flera referensfall. Ett exempel på schema där *a* antas påverka mer olinjärt och *b* endast skala resultatet visas i figur 4.6.

		Parameter a								
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
Parameter b	100%			O				O		
	75%									
	50%			O				O		
	25%									
	0%	O		R		O		R		O
	-25%									
	-50%			O				O		
	-75%									
	-100%			O				O		

Figur 4.6.. Exempel på oberoende beräkningsfall för två parametrar a och b där man misstänker ett olinjärt beteende i a. (13 beräkningar).

För att maximera spridningen kan man lägga till extremvärden av nyckelparametrarna, men detta bör användas med försiktighet. Statistiskt sett har man då undersökt ett mycket osannolikt tillstånd (om det rör sig om slumpartade parametrar). Det finns flera olika metoder för att undvika detta problem och för att minska antalet beräkningar. En sådan metod är s.k. Latin Hypercub Sampling. Idén med denna metod är att välja parameterkombinationer som delar upp intervallet i lika stora sannolika områden. Anta att parameter b har liten variation och parameter a har en stor variation eller mer jämn fördelning (eller är ett konstruktionsval som gör alla värden som lika sannolika). Ett schema kan då se ut som i figur 4.7.

		Parameter a								
		-100%	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
Parameter b	100%									
	75%					O				
	50%									
	25%			O		O		O		
	0%	O				R				O
	-25%			O		O		O		
	-50%									
	-75%					O				
	-100%									

Figur 4.7. Exempel på beräkningsfall för två parametrar a och b med LHS där a har mer variation än b . I (11 beräkningsfall).

Strategin enligt figur 4.6 är ofta att föredra då man undersöker mera sannolika kombinationer av parametrar. Som framgår att exemplen ökar antalet beräkningsfall mycket snabbt med antal parametrar och variationer. Eftersom det ofta finns många nyckelparametrar så måste dessa gallras hårt för att antalet beräkningar skall bli rimliga. Detta bör planeras i förväg. Eventuella extra beräkningar blir då färre.

4.3.3 Beräkningen utförs

I detta skede bör planeringen vara klar och alla beräkningar görs.

4.3.4 Tillämpning av mål och mätmetoder på utdata

De valda målen och mätmetoderna används på utdata från beräkningen.

4.3.5 Resultat av beräkning och redovisning av resultatet

Analysen av resultaten är ett mycket viktigt moment, speciellt som det är lätt att producera mycket utdata.

Beräkning bör kompletteras med fuktsäkerhetsbedömning av resultaten. Resultaten måste sammanfattas på ett begripligt ingenjörsmässigt sätt. Om resultaten inte ger svar på ursprungsproblemet måste processen göras om, eller i värsta fall, måste man konstatera att beräkningen inte kan ge svar pga. osäkerhet osv.

4.3.6 Känslighetsanalys

Känslighetsanalys är besläktat med felanalys. Skillnaden är att med känslighetsanalys letar man inte efter noggrannheten i räkningen utan efter hur mycket resultat ändrar sig då indata ändrar sig. Eftersom de olika parametrarna har olika enheter och skalor måste man använda en metod som skalar om känslighetsanalysen så att det går att jämföra de olika parametrarnas påverkan. Det finns flera olika metoder för detta. Till en början kan man tala om en *absolut* känslighet för en viss parameter p_i :

$$S_i^a = \frac{\partial U(p_i)}{\partial p_i} \quad (5)$$

Här är U den valda utparametern och beräkningen görs runt ett ”normalvärde”, oftast referensfallet (R), för alla inparametrar $p_1 \dots p_n$. Om U t ex är relativ fuktighet i en viss punkt i konstruktionen:

$$U = RF(p_1, p_2, p_3, p_4 \dots) \quad [\%]$$

och p_1 är värmeledningen i mineralullen i konstruktionen

$$\lambda = p_1 = 0.04 \quad [\text{W/mK}]$$

då blir absoluta känsligheten S_1^a för värmeledningen:

$$S_\lambda^a = \frac{\partial U(p_1)}{\partial p_1} = \frac{\partial RF(\lambda)}{\partial \lambda} \quad \left[\frac{\% \text{ mK}}{\text{W}} \right] . \quad (6)$$

I vårt fall (kombinerade värme och fukttransportberäkningar) kan denna känslighet inte beräknas analytiskt utan den får uppskattas med t ex :

$$S_i^a \approx \frac{U(p_i + \Delta p_i) - U(p_i)}{\Delta p_i} \quad (7)$$

Här är Δp_i en liten förändring i parametern p_i . Enligt exemplet ovan:

$$S_\lambda^a \approx \frac{RF(\lambda + \Delta\lambda) - RF(\lambda)}{\Delta\lambda} \quad (8)$$

Den absoluta känsligheten har problemet att det är svårt att jämföra betydelsen av olika inparametrar som kan ha väldigt olika skala och får svårtolkade enheter. Det kan då vara bättre att använda en *relativ* känslighet istället:

$$S_i^r = \frac{\partial U(p_i)}{\partial p_i} \frac{p_{i,medel}}{U_{medel}} [-] \quad (9)$$

Här är U_{medel} utdatan för ett normalvärde eller ett valt referensvärde på alla inparametrar. På samma sätt som innan så kan denna känslighet oftast inte beräknas analytiskt utan måste uppskattas:

$$S_i^r \approx \frac{(U(p_i + \Delta p_i) - U(p_i))/U_{medel}}{\Delta p_i/p_{i,medel}} \quad (10)$$

Enligt exemplet ovan:

$$S_\lambda^r \approx \frac{(RF(\lambda + \Delta\lambda) - RF(\lambda))/RF_{medel}}{\Delta\lambda/\lambda_{medel}} \quad (11)$$

Om inparametrarna inte skall hanteras som lokala eller slumpartade och man vill ha ett begrepp om den totala spridningen en viss parameter kan ge kan en dimensionslös intervallskattning användas istället.

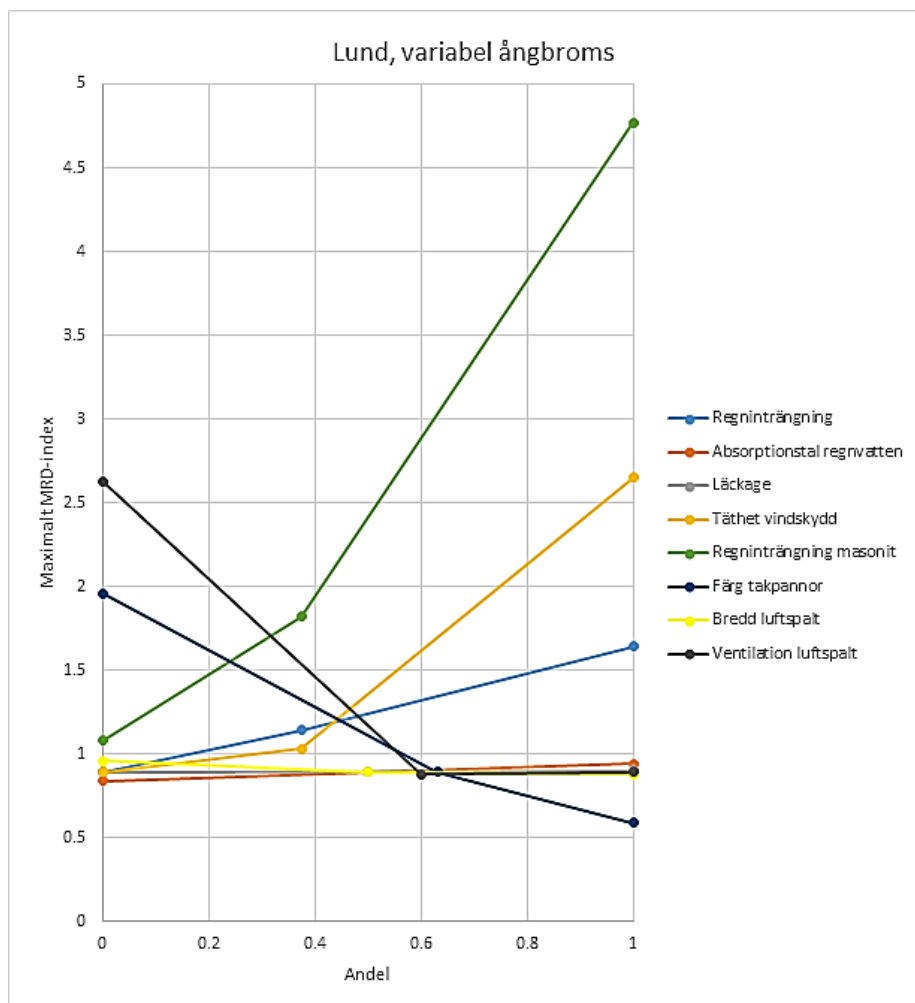
$$I_i = \frac{U(p_{i,max}) - U(p_{i,min})}{U(p_{i,medel})} \quad (12)$$

I figur 4.8 visas en grafisk metod istället. Här är valt att skala om alla parametrarna så att de får ett dimensionslöst värde mellan 0 och 1 för att kunna redovisas på samma x-axel. I figuren är utdata i form av mögelindex (MRD-index), men detta beror förstås på vilket problem som studeras. Skalningen för

en viss parameter, t ex bredd på luftspalt b , beror då på minvärdet och maxvärdet (b_{min} , b_{max}) Det dimensionslösa x värdet, x_b , blir då

$$x_b = \frac{b - b_{min}}{b_{max} - b_{min}}$$

Vilket då används på x-axeln i figuren. Notera att b_{max} och b_{min} måste vara realistiska värden för att jämförelsen skall vara meningsfull. Att välja $b_{min} = 0$ mm är inte realistiskt i detta fall.



Figur 4.8. Exempel på känslighetsanalys med dimensionslös x-axel. (Eriksson 2017)

4.3.7 Felanalys av beräkningen

Som beskrevs i den inledande felanalysen så finns det flera källor till att det beräknade resultatet skiljer sig från verkligheten (uppmätt resultat). Orsaker till olika utfall mellan beräkning och mätning ("fel") kan grovt sorteras enligt följande:

- Slumpmässiga (dvs varierar slumpartat inom ett intervall).
- Scenarioberoende (dvs beror på val: "vad händer om detta sker?").
- Brist på kunskap (vi kan inte göra en bedömning om hur felet beter sig).
- Systematiska (dvs fel som vi kan uppskatta och som har litet slumpartat beteende).

Man kan också se vilka fel som är aktuella vid de olika stegen i beräkningsprocessen:

Modellering

För enkel modell jämfört med verkligheten.

Felaktiga/dåliga antaganden för ett specifika problem.

Tidsberoende kontra stationära problem.

Felaktiga/dåliga nyckelparametrar.

Svagheter i beräkningsprogrammet (1D/2D, behandling av slagregn, m.m).

Programmering/Användande av programmet

FEM kontra finita differenser.

Numeriska problem i beräkningsprogrammet.

Implicita (lägre noggrannhet god stabilitet)

Explicita (hög noggrannhet, lång beräkningstid).

Beräkningen

Noggrannhet för beräkningen

Stabilitetsanalys.

Känslighetsanalys av numerisk noggrannhet

Eftersom värme och fuktberäkning är ett olinjärt problem som oftast måste lösas iterativt finns det alltid risk att lösningen inte är numeriskt stabil, dvs att lösningen ej korrekt löser de ingående ekvationerna eller att lösningen är starkt beroende av de numeriska parametrarna. Man bör därför:

- studera konvergensfel som programmet redovisar,
- genomföra kontrollberäkningar med annat tidssteg

- genomföra kontrollberäkningar med annat beräkningsgitter (uppdelning i x-y-z led).
- om möjligt jämföra med en handberäkningsmetod

Som beskrivet ovan så är prediktioner det mest besvärliga problemet. Speciellt gäller detta valet av klimat. Men även om osäkerheten är stor kan man göra resultatet troligt genom att göra en felanalys baserat på hur programmet tidigare har klarat validering mot uppmätta data.

5 Allmänna rekommendationer för genomförande och typproblem.

Det är lätt att göra många beräkningar av enskilda i detaljer men det är de stora misstagen som bör undvikas. Ibland är det möjligt att göra ett stort antal beräkningar för att få ett statistiskt underlag, s.k. Monte-Carlometoder. Med detta underlag kan man sedan uppskatta risken för att t ex fuktillståndet i ett material överstiger ett visst värde. När det gäller prediktioner kan det dock ifrågasättas om man verkligen har ökat noggrannheten eftersom den dominerande parametern ofta är klimatet som är svår att hantera statistiskt.

När 1D beräkningar används är det svårt att bedöma hur en punktlast, t ex ett läckage skall hanteras, då krävs istället praktiska/kvalitativa bedömningar för att säkerställa en konstruktions fuktsäkerhet, detta gäller även 2D räkningar. Ibland är enbart praktiska analyser möjliga, i andra fall kan en kombination av praktisk analys och beräkningar vara en lösning.

5.1 Slagregn

För att beakta inverkan av slagregn föreslår den amerikanska ingenjörorganisationen ASHRAE att 1% av slagregnmängden ska anses penetrera fasadskiktet i en vägg (ASHRAE 160-2009) och nå reglarna innanför fasadskivan. Det viktiga här är att regn och slagregn beaktas vid fuktberäkningar även om ”korrekta” mängden inte kan ansättas. En penetration genom fasadmaterialet på 1% av totala slagregnmängden är på många sätt en godtycklig siffra eftersom den översätter ett lokalt läckage med en jämn fördelning över en vägg. Problemet är alltså att regninträngning oftast är lokal dvs en 3D effekt. När man använder 1% inträngning på en 1D räkning är det samma sak som att fasaden läcker jämnt över hela ytan vilket är mindre skadligt än motsvarande mängd vatten på en liten yta (hål). Frågan är då om beräkningen är konservativ dvs t ex underskattar risken för uppfuktning eller om beräkningen överskattar risken för uppfuktning. Eftersom det verkliga fallet ofta motsvarar mycket hög lokal fuktbelastning snarare än jämnt fördelad så är det rimligt att anta att räkningen snarast underskattar risken. Att ignorera regnläckage helt kan dock inte rimligen vara en bättre lösning. Vissa undersökningar har gjorts av t. ex. van den Bossche, (2011) som kom fram till att 1% inte var ett orimligt värde men att detta är en nyckelparameter som bör varieras mellan 0 – 10%. För tak bör rimligen en lägre siffra (t. ex. 0.1% - 0.5%) användas om det ej är takläckage som speciellt skall studeras. Undersökningar gjorde av Olsson och Hagentoft (2018) visar på problemet att fasadens höjd ovanför en enskild defekt spelar stor roll.

Sammanfattningsvis kan sägas att läckage av slagregn alltid sker i verkliga konstruktioner och att konstruktionerna därför måste ha en robusthet att klara detta. Siffrorna ovan är medelvärden dvs ett enskilt större hål gör kommer skapa en skada som inte syns i en 1D räkning.

5.2 Läckage från insidan

Läckage från insidan bör studeras, t ex genom att använda täthetskravet på 0,3 l/s m² vid 50 Pa (motsvarande FEBY's passivhuskrav) och sedan göra en uppskattning av verkligt tryckfall över en vägg med hjälp av vind och beräkning av termiska drivkrafter. Detta kan göras på flera olika sätt, t ex med formfaktorer för vind som finns i Fukthandboken (2017). Det allra enklaste sättet är att använda energistandard EN ISO 13789:2008 för beräkning av läckande luftflödet genom en vägg:

$$q_{läck} = q_{50} \cdot 0.07 \quad \left[\frac{\text{liter}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$$

Om beräkningen gäller fukttransport så är frågan hur fukten som tas med från insidan och ut i konstruktionen skall hanteras. Teoretiskt kan luft som läcker inifrån och ut inte vara mer än mättad då den lämnar konstruktion på utsidan, dvs

$$g_{kondens} = q_{läck}(v_i - v_s(T_{utsida}))$$

Men detta är en försiktig (snäll) räkning för luften måste inte vara mättad när den lämnar konstruktionen. En robustare räkning är att anta att hela fuktillskottet hamnar i konstruktionen:

$$g_{kondens} = q_{läck}(v_i - v_u)$$

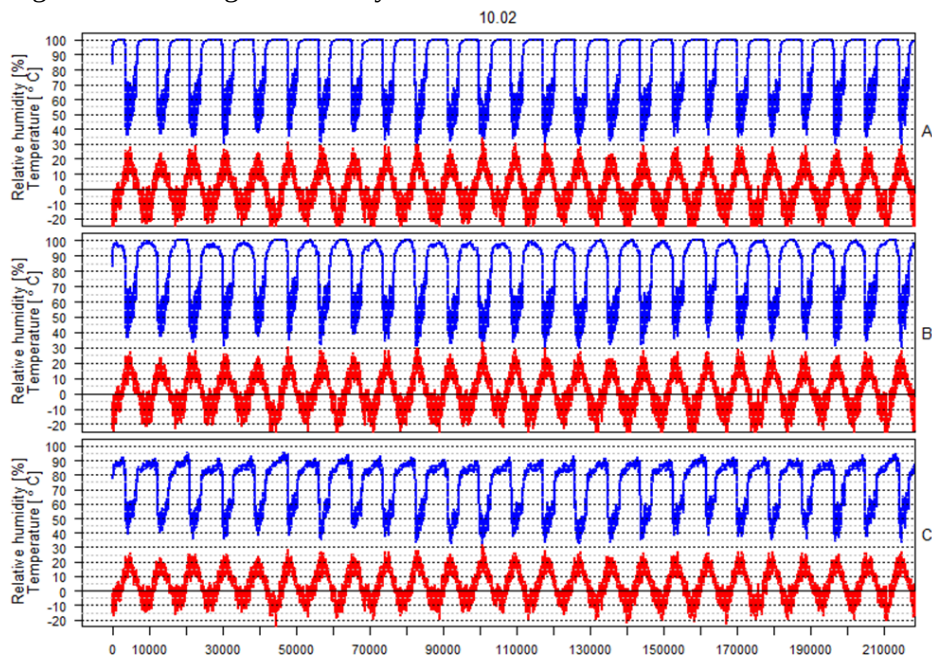
Egentligen kommer denna fukt att fördelas över konstruktionens snitt men för att förenkla och för att göra en robust räkning placeras förslagsvis denna fukt där den gör mest skada, dvs vid/i trä i den kalla delen av konstruktionen.

5.3 Våtrum

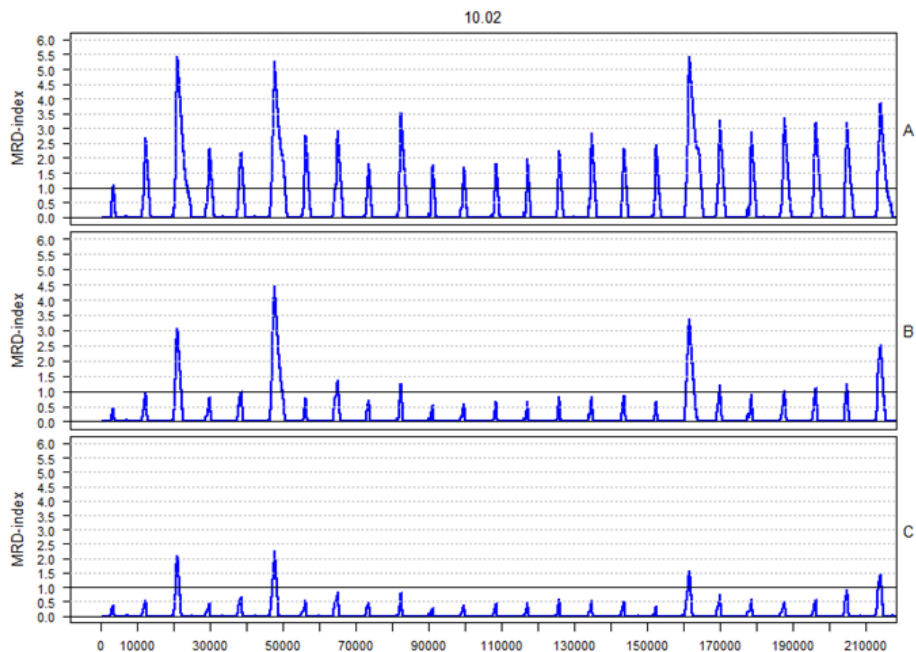
Randvillkor för klimatdata på insidan av badrum eller andra våta utrymmen ska sättas till konstant 100% relativ fuktighet (Jansson, A., 2010). För att undvika beräkningsproblem och konvergensfel kan 99% relativ fuktighet ansättas.

5.4 Klimat

För ögonblicket existerar inte ett allmänt accepterat dimensionerande klimat som kan användas vid dimensionerande (predikterande) fuktberäkningar. Generellt är det bra att använda flera olika år. Klimatet är en nyckelparameter så det måste hanteras så bra som omständigheterna kräver. Figur 5.1 visar simuleringar i ett tak i Gällivare Malmberget under 25 följande år på tre olika positioner i taket. Figur 5.2 visar mögelindexanalys av samma värden.



Figur 5.1. Temperatur och relativ fuktighet på tre olika positioner under 25 år i Gällivare (Hansen, Wallenten 2018). Enheten på x-axeln är timmar.



Figur 5.2. Mögelindex för temperatur och relativ fuktighet från figur 5.1.

Från dessa figurer är det tydligt att valet av år är mycket viktigt för resultatet och man bör försöka att få med flera olika år och detta måste vara med i osäkerhetsanalysen.

Om det inte finns tillgång till flera år måste man upprepa sitt år i minst 5 år. Beroende på byggfukt kan det vara början eller slutet av perioden som utgör fokus för undersökningen. Antal år beror på hur långsamt konstruktionen reagerar vilket syns på resultatet av räkningen. Om sluttillstånd inte har uppnåtts efter 5 år får undersökning utökas med fler år.

Regn/slagregn och relativ fuktighet är problematiska parametrar. Klimatfiler innehåller oftast timvärden vilket gör att slagregnsberäkningar som baseras på kombinationen vind och regn är väldigt osäkra. Det typiska tidsförloppet för slagregn kan vara betydligt kortare än 1 timme. Det gör att den högsta slagregnintensiteten blir underskattad. Detta kan ge både större eller mindre belastning på konstruktionen beroende på vilket problem som studeras. Relativ fuktighet är en svår parameter att mäta och därför har detta värde ofta låg noggrannhet i klimatfilerna. Speciellt kan mätare bottna för tidigt och aldrig ge

riktigt höga värden. Studera klimatfilerna för detta. Även nederbörd underskattas generellt av de flesta mätmetoder som används.

Som en hjälp finns fyra klimatfiler publicerade på Fuktcentrums hemsida för Luleå, Borlänge Stockholm och Lund. Klimatfilerna innehåller 9 olika sammanhängande år. Klimatfilerna är baserade på mätdata men processade för att ge mer av dimensionerande år, dvs val har gjorts för att t ex se till att RF når 100% åtminstone en gång på 3 månader.

En möjlighet är att använda tjänsten Meteonorm (2018) som kan ge klimatfiler för fritt valda platser. Notera dock att Meteonorm använder statistik för att ge s.k. *typiskt* väder. Det är alltså fråga om en sorts *normalår*. Meteonorm erbjuder också tjänsten använda mätdata från enskilda klimatstationer. När denna text skrivs är det ännu ej utrett hur kvaliteten är på sådan data är. Eftersom det alltid är bättre att ha fler år är det möjligt att detta utgör ett bra alternativ.

Framtida klimat är en möjlighet om konstruktionen bedöms känslig för klimatförändringar, bl a erbjuder Meteonorm och SMHI sådan data. Undersökningar som har gjort hittills antyder att det är viktigare att använda klimatdata från flera olika år och/eller olika platser än att använda framtida klimat. Detta gäller inte sådana förändringar som höjning av havsnivån vilket påverkar kustnära konstruktioner på ett unikt sätt.

6 WUFI

Läs manualen som är tillgänglig via hjälpfunktion i programmet. Ytterligare och mer detaljerade studier och information om WUFIs begränsningar och felkällor finns i en rad studier som presenteras på WUFIs hemsida, www.wufi.de. Det finns även ett svenskt användarforum på www.wufi.se.

Som beskrivet i kap 3 innehåller alla beräkningsmetoder begränsningar och förenklingar som kan orsaka fel eller avvikelser jämfört med mätningar av verkligheten, t ex tar WUFIs beräkningsmodell inte hänsyn till detaljerad konvektion samt flöden orsakade av gravitation, vind eller fläktar. WUFIs beräkningsmodell beaktar inte hysteres i sorptionskurvan, dvs det faktum att material kan ha olika fukthalt vid en viss relativ fuktighet beroende på om tillståndet har nåtts via uppfuktning eller uttorkning utan WUFI använder en ”medelkurva” för fukthalten vid en viss relativ fuktighet.

6.1 Stabilitet

Beräkningsmodellen baseras på framåtdifferensekvationer med kopplad fukt- och värmetransport. Programmet använder en implicit metod för tidsderivatan enligt kapitel 2. Detta leder till ökad stabilitet men garanterar inte noggrannheten i lösningen. Därför bör beroende av beräkningsgitter och tidssteg göras:

- Använd Fin, Mellan, och Grov för beräkningsgitter, se figur 6.1.
- Halvera tidssteget och notera om resultatet ändras, se figur 6.2.

Använd Adaptivt tidssteg och ökad noggrannhet under fliken ”Numerik” om det förekommer konvergensfel.

ISOVER GW Integra ZKF - 035 0,14

Utomhus (vänster sida) 0,0220,0,013 0,14 Inomhus (höger sida) 0,3 0,0,013

Materialdata

Källor, Brunnar

Nytt skikt

Duplicera

Radera

Redigera uppbyggnad

☒ Grafisk ☐ Tabell

Tilldelat från databas

Materialdatabas

Konstruktionsdatabas

Gitteruppbyggnad

Automatisk (II)

70 Medel

Kopiera Copy Auto gitter för manuell editering

Total tjocklek Tjocklek: 0,519 m

Total termisk prestanda Värmeegenomgångsmotstånd: 11,95 (m² K)/W U-värde: 0,082 W/(m² K)

Figur 6.1 Val av beräkningsgitter.

Beräkningsperiod / Profiler Numerik

Start, Slut / Profiler

Beräkning	Profiler	Datum	Timme
Start	Profil 1	2009-10-01	00:00:00
Slut	Profil 2	2010-10-01	00:00:00

Ny

Ta bort

Kopiera

Infoga

Tidssteg [h] 1

Figur 6.2 Val av tidssteg.

Balans1 och Balans2 bör inte skilja sig mer än högst 10 procent såvida det inte finns ett läckage eller en kombinerad luft och fuktkälla i konstruktionen då dessa kommer skilja sig mer. Om det är mer, minska tidssteget. I extrema fall kan

tidssteget behöva minskas under 1 minut. Konvergensfel och balanserna redovisas i fönstret som visas här en beräkning är klar.

Filmvisning kan användas för att visa på känsliga konstruktioner. Filmvisning kan även framgångsrikt användas för att hitta de mest kritiska positionerna och materialskikt.

WUFIs beräkningsmodell har påvisat problem att hantera situationer när fritt vatten, 100% relativ fuktighet, förekommer. Tjocka isolermaterial eller andra tjocka material med låg fuktkapacitet kan behöva uppdelas i flera lager eller tunnare (fler) celler för att begränsa risken för beräkningsproblem och konvergensfel. Detta kommer då att förlänga beräkningstiden. Undvik lager tjockare än 100 mm. Ett 270 mm tjockt isolermaterial kan till exempel delas upp i tre lager om vardera 90 mm, dvs $90+90+90=270$.

6.2 Material

Materialdata kommer ifrån flera olika källor som har använt delvis olika mätmetoder, t. ex. finns det material där den kapillära transporten enbart hanteras genom ett varierande ångmotstånd (LTH data), andra material har separata ångtransport- och kapillärparametrar. Detta är inte i sig ett problem men om kapillär transport är en nyckelparameter bör olika material testas. All materialdata från varje enskilt material i WUFIs materialdatabas måste noggrant kontrolleras innan det används. Börja alltid med att läsa informationstexten som ges för respektive material i WUFIs materialdatabas. I denna databas finns det:

- isolermaterial med otydliga uppgifter och definitioner har hittats i WUFIs materialdatabas. Till exempel är materialet ”Mineral insulation board” en form av lättbetongskiva,
- materialdata för tegelstenar finns för enbart tegelstenar av olika slag samt för hela tegelmurar inklusive bruk mellan tegelstenarna.

Sorptionsisotermen består av en kurva och inte av två separata, en absorptionsisoterm och en desorptionsisoterm, hysteres beaktas alltså inte. Detta kan ge kraftiga avvikelser i beräkningsresultat jämfört med verkliga förhållanden. Sorptionskurvans utseende påverkar den numeriska stabiliteten och kan därför påverka resultatet om tidssteget är för stort.

För fuktransport används tre begrepp:

D_{ws}	Fukttransport i vätskefas för kapillär uppsugning. Används vid fritt vatten på ytan i form av regn
D_{ww}	Fukttransport i vätskefas i övriga fall
μ	Ångmotstånd i ett material, beräknas som

$$\mu = \frac{\delta_{luft}}{\delta_{material}}$$

dvs det är en dimensionslös faktor skalad mot luftens
ångdiffusion: $\delta_{luft} = 22,2 + 0,14 T$,
där enheten för T är °C.

6.3 Luft och ventilation

Det finns två olika typer av luftspalter i WUFIs materialdatabas. En inkluderar utökad fuktkapacitet och används företrädesvis i kontakt med ytor. Den andra, med den vanliga (låga) fuktkapaciteten, bör läggas i mitten av luftspalter och inkludera luftflöden samt fukt- och värmekällor. Observera att den totala luftspaltens tjocklek skall användas för varje skikt, skiktets tjocklek är sedan det verkliga. Det kan t ex vara följande fördelning:

2 mm: Air layer 50 mm, (sätt monitor i detta skikt)

46 mm: Air layer 50mm without additional moisture capacity, (om det skall vara ventilation bör detta skikt användas)

2mm: Air layer 50 mm, (sätt monitor i detta skikt)

Om en kallvind skall simuleras så kan det fungera att inte simulera hela den verkliga höjden. Luftomsättningen måste då räknas om så att den avsedda luftvolymen byts ut per timme. Luftflöden i verkliga konstruktioners luftspalter (och kallvindar) beror av hur spalten är utformad och kommer bete sig på olika sätt beroende av konstruktions utformning samt omgivande klimat, främst vindriktning och vindhastighet. För att erhålla rimliga beräkningsresultat måste ansatt luftflöde i beräkningsmodellen motsvara verkliga förhållanden i luftspalten.

6.4 Klimatdata

Nederbörden och relativ fuktighet (RF) som används i klimatdata (från bl.a. SMHI) och används i WUFI beräkningar är normalt ibland lägre jämfört med verklig nederbörd och RF. Detta beror på brister i de mätmetoder som används

för att uppskatta verklig nederbörd samt osäkerheter i mätning av RF. Generellt är de klimatfiler som följer med WUFI av någon sorts *normalår*, dvs de innehåller medvetet inte år med t ex mycket regn. Speciellt klimatet för Göteborg har visat sig vara ganska snällt mot fuktproblem.

Det finns också en möjlighet att importera andra klimatfiler i WUFI, t ex egna mätdata eller filer från andra program.

6.4.1 Randvillkor

S_d -värdet i WUFI motsvarar ett materials totala ångtäthet. Om materialet har tjockleken D , beräknas det som:

$$S_d = \mu \cdot D = \frac{\delta_{luft}}{\delta_{material}} D = \delta_{luft} \cdot Z_{material}$$

Detta kan ansättas på två olika sätt på ytor.

- S_d -värde ansätts för endast ytmaterial
- S_d -värde kan användas för respektive material, inklusive ytmaterial,et,

Undvik att ansätta dubbla ytmotstånd, dvs ett motstånd i materialet och ett på ytan, för samma sak. Om en färg används på ytmaterial kan denna inkluderas som ett S_d -värde eller som ett särskilt materialskikt. Notera att tjockleken och färgval ger olika S_d -värden. Tätheten för alkyd, akrylat, silikat och oljefärger kan variera med en faktor 100.

6.5 Fuktkällor

Vid användandet av transienta källor som hämtas från separata filer för luftflöden, värme och inträngande vatten eller fukt är det viktigt att kontrollera så att beräkningsstart vid sker samma tidpunkt som för den transienta källan. WUFI beräkningen fungerar så att beräkningsstart/ första beräkningstillfället alltid motsvarar första värdet i den transienta källan som hämtas från fil. Detta innebär att beräkningar innehållande transienta källor med start första januari också måste starta första januari och därefter följande värden. Vid andra tidpunkter för beräkningsstart måste det första värdet i den transienta filen för källan anpassas till denna tidpunkt, med därefter följande värden, för att inte generera fel i beräkningsresultatet.

6.5.1 Regninträngning

Enligt tidigare kan flera val göras med utgångspunkt från 1%. Absorptionstalet för regnvatten på själva ytan är dessutom en lika kritisk parameter. Den styr hur mycket av slagregnet som fastnar men påverkar inte läckaget som är baserat på det rena slagregnet utan hänsyn till vattenabsorption. Observera att S_d värdet på en yta inte påverkar regnmängden som träffar en yta eftersom S_d endast påverkar fuktransport i ångfas.

6.5.2 Luftläckage från insidan.

I WUFI finns två huvudsakliga metoder för att hantera läckage från insidan.

- Månadsvis fuktkälla
- Air Infiltration Model IBP

Den andra modellen har i vissa fall gett tveksamt låg belastning. Därför rekommenderas att använda månadsvis fuktkälla för detta.

6.6 Exempel på basfall för vissa konstruktioner

Exempel på basfall/ modeller visas nedan. Flertalet har validerats mot mätningar redovisade i Mundt-Petersen (2015)

6.6.1 Kallvind

Fuktkvot råspont 20%.

Sadeltak åt norr för att simulera skuggning.

Regninträngning kan vara 0,1-0,5% som träffar råsponten.

Läckage inifrån bör vara minst 0,1 - 0,3 l/s m² 50 Pa. Hanteras som en fuktkälla som placeras där den gör mest skada vilket är råsponten om en sådan finns.

Luftomsättning på kallvindar kan variera mellan 1 till 10 oms/h.

Basfall 3 oms/h

Om en kallvind skall simuleras så kan det fungera att inte simulera hela den verkliga höjden. Luftomsättningen måste då räknas om så att den avsedda luftvolymen byts ut per timme. Luftflöden i verkliga konstruktioners luftspalter (och kallvindar) beror av hur spalten är utformad och kommer bete sig på olika sätt beroende av konstruktions utformning samt omgivande klimat, främst vindriktning och vindhastighet. För att erhålla rimliga beräkningsresultat måste ansatt luftflöde i beräkningsmodellen motsvara verkliga förhållanden i luftspalten.

Vid beräkning av låglutande eller horisontella ytor bör sk *Explicit strålningsbalans* användas. Modellen skiljer på energitransport med konvektion till luften och långvågig strålningsutbyte med omgivande ytor och himlen. Om klimatfilen inte innehåller klimatdata för långvågig strålning från himlen använder WUFI en enkel molnindexmodell (WUFI kommer varna för detta), men den modellen är fortfarande bättre än att kombinera konvektion och långvågig strålning genom ett rent värmemotstånd.

6.6.2 Parallelltak

Fuktkvot råspont 20%.

Sadeltak åt norr för att simulera skuggning.

Regninträngning kan möjligen vara 0,1-0,5% som träffar råsponten.

Läckage inifrån bör vara minst 0,1 - 0,5 l/s m² 50 Pa. Hanteras som en fuktkälla som placeras där den gör mest skada vilket är råsponten om en sådan finns.

Luftsättning i en eventuell luftspalt kan variera mellan 10 till 100 oms/h.

Basfall 20 oms/h

6.6.3 Vägg - skalmur

Fuktkonvektion inifrån på 0,1 - 0,3 l/sm² 50 Pa

Regninträngning 1-2% som når regelverket innanför klimatskivan.

Omsättning i luftspalten är beroende på ventilationsöppningarna. Sandin (1991) gav följande medelvärden för omsättningarna, Tabell 6.1.

Norrfasad eller mest slagregnsutsatt blir normalt dimensionerande.

Tabell 6.1 Medelvärden på luftomsättning i skalmur oberoende av klimat.

Spaltbredd (mm)	20	20	50	50	50
Ventilationsöppning	ingen	öppen stötfog ,var fjärde sten	ingen	Galler, var fjärde sten (260x80mm)	sten borttagen
oms /h	2	4	2	7	12

Ventilationsgraden i en ventilerad luftspalt är extremt viktig parameter som samtidigt har stor onoggrannhet. Man kan tänka sig att resultatet av analysen är att konstruktionen bör säkerställa ett minsta flöde. Det är därför lämpligt med en parameterstudie på detta om konstruktionen innehåller en ventilerad luftspalt.

6.6.4 Vägg - träpanel

Precis som för väggen med skalmur är omsättningen i en ventilerad luftspalt bakom en träpanel en viktig parameter som samtidigt har stor onoggrannhet. Falk (2010) redovisade uppmätta värden med olika ställläkt med en spaltbredd på ca 25mm:

- 30-310 oms/h vid utförande med vertikala läkt
- 75-130 oms/h vid utförande med horisontella perforerade läkt

För minskad spaltbredd till 5 mm reducerades omsättningen med en faktor 5.

Detta visar påverkan av horisontella läkt. Det är därför lämpligt med en parameterstudie på detta om konstruktionen innehåller en ventilerad luftspalt. Ett förslag är att studera: 10, 30, 60 och 100 oms/h för träpanel. Mer ventilation ger oftast ett mindre kritiskt fuktillstånd, för att göra en robust räkning rekommenderas därför följande:

Basfall 5 oms/h för liggande läkt

Basfall 30 oms/h för stående läkt som är öppen i ovan- och underkant alternativt väl perforerad liggande läkt.

Fuktkonvektion inifrån på 0,1 - 0,5 l/sm² 50 Pa

Regninträngning 1-2% som når regelverket innanför klimatskivan.

7 Mall för redovisning av beräkningar och resultat

Det finns en internationell standard för hur beräkningar av fukt och värme skall redovisas (EN 15026). Denna standard är dock svåränvänd i de fall då det inte finns så mycket tid tillgänglig samt då mottagararen av resultaten inte är expert i ämnet. Därför föreslås följande enkla checklista för redovisning av resultat.

1	Det praktiska problemet.	
1.1	Beskrivning av problem och system.	Bakgrundsinformation.
1.2	Mål och mätmetod.	Mål med studien och vilket kvantitativt mått som används för att analysera resultatet.
1.3	Existerande förhållanden och information.	Tillgänglig klimatdata, fuktbelastning, materialdata, speciella omständigheter etc.
1.4	Begränsningar och viktiga antaganden.	T ex 1D räkningar, inget läckage.
2	Praktisk grundläggande analys.	
2.1	Modellering.	Förklaring av det förenklade problemet.
2.2	Nyckelparametrar.	Identifiering av nyckelparametrar med motivering
2.3	Icke nyckelparametrar.	Redovisning av samtliga parametrar (typiskt som appendix).
2.4	Riskanalys.	Ingenjörsmässig analys av problemet för att identifiera svagheter.
3	Beräkning och analys av resultatet.	
3.1	Val av beräkningsmetod.	Redovisning av vald metod (t ex WUFI).
3.2	Planeringen av beräkningarna.	Redovisning av hur beräkningarna planerats.
3.3	Redovisning av resultat.	Nödvändiga tabeller, grafer, etc.
3.4	Känslighetsanalys.	Redovisning av hur identifierade nyckelparametrar påverkar resultatet.
3.5	Felanalys.	Uppskattning av felet i beräkningarna.
3.6	Summering, analys och diskussion av resultaten.	

Referenser

Arfvidsson, J. Harderup, L-E., Samuelson, I. *Fukthandbok, Praktik och teori*, Utg 4, ISBN 978-91-7333-823-3, 2017.

ASHRAE standard 160P Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings 2016

Crank, J och Nicolson, P. , A practical method for numerical evaluation of solution of partial differential equations of the heat-conduction type, *Proc. Cambridge Philos. Soc.* Vol 43, sid 50-67, 1947.

EN 15026 *Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation*, 2007.

Eriksson, O., *Fuktsäkra parallelltak, En studie av risken för mögelpåväxt i parallelltak med variabel ångbroms*, Examensarbete Lund Universitet 2017.

Falk, J., *Ventilerad luftspalt i yttervägg – luftomsättningar och konvektiv fukttransport*, Licentiat uppsats, Rapport TVBM-3155, Lund University, ISSN 0348-7911, 2011.

Hansen,T., Wallentén, P. Validation of the MRD mould model by attic case studies in northern Sweden, 2018 (to be submitted)

Johansson, P. *Critical moisture conditions for mould growth on building materials*. Avdelningen för Byggnadsfysik, Lund, Lunds Universitet 2012.

Johansson, P., Wadsö, L., Johansson, S., Svensson, T., Bengtsson, B., Utveckling och validering av modeller för att prediktera mögelväxt i byggnader, RISE, Rapport 2018:167, ISBN: 978-91-88695-51-2, 2017 (SBUF projekt 12894)

Künzel H.M., Simultaneous heat and moisture transport in building components—One- and two-dimensional calculation using simple parameters, IRB Verlag Suttgart 1995, ISBN 3-8167-4103-7, 1995.

Meteonorm, <https://www.meteonorm.com/> 2018.

Mundt-Petersen, O.,: *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*, Lund University, TVBH-1021, 2015.

Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K. Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference*, 2010. Clearwater Beach, Florida.

Olsson, L., Hagentoft, C-E., New algorithm for water leakage flow through rain screen deficiencies, *7th International Building Physics Conference*, IBPC 2018.

Sandin, K., *Skalmurskonstruktionens fukt- och temperaturbetingelser*, Byggeforskningsrådet, Rapport R43:1991, ISBN: 91-540-5360-9.

Thelandersson, S. Isaksson, T., Mould resistance design (MRD) model for evaluation of risk for microbial growth under varying climate conditions, *Building and Environment*, Vol 65 pp 18-25, 2013.

Van Den Bossche, N., Lacasse, M., Janssens, A., Watertightness of Masonry Walls: An Overview, *XII DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Porto, Portugal, 2011.

Viitanen, H., Ojanen, T., Improved model to predict mold growth in building materials, *Proceedings Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X*. Clearwater Beach, USA, 2 - 7 Dec. 2007. CD. ASHRAE, DOE, ORNL. Atlanta, USA , 2007.

Appendix. Uppskattning av noggrannhet baserat på fel i inparametrar.

Om inparametrarna har ett slumpmässigt oberoende beteende som kan anses normalfördelat:

p_i har en normalfördelning $N(\bar{p}_i, \sigma_i)$ med medelvärde $\bar{p}_i$ och standardavvikelsen σ_i ,

kan variansen (känsligheten i utdata) skrivas som:

$$\sigma_{utdata}^2 = \sum_{i=1..n} \left(\frac{\partial U(p_i)}{\partial p_i} \right)^2 \sigma_i^2 = \sum_{i=1..n} (S_i^a)^2 \sigma_i^2$$

Här är n antal olika inparametrar.

Ofta är man intresserad av den procentuella påverkan på utdatan:

$$\frac{\sigma_{utdata}}{|U(p_{medel})|}$$

I de flesta fall går det inte att analytiskt beräkna differentialen.. Den får då skattas med ekvation ovan:

$$\sigma_{utdata}^2 \approx \sum_{i=1..n} \left(\frac{U(p_i + \Delta p_i) - U(p_i)}{\Delta p_i} \right)^2 \sigma_i^2$$

Om inparametrarna inte är normalfördelade (vilket de oftast inte är) så får mer pragmatiska metoder användas. Om inparametrarna kan anses slumpartade men inte normalfördelade kan följande skattning användas:

$$\sigma_{utdata}^2 \approx \sum_{i=1..n} \left(\frac{U(p_i + \Delta p_i) - U(p_i)}{\Delta p_i} \right)^2 \left(\frac{p_{i,max} - p_{i,min}}{3} \right)^2$$