

Slutrapport för projektet:

Risikanalyser för ventilerade kallvindskonstruktioner SBUF-projekt 12438, Formas-BIC 11 (Ettapp III)

| | |
|--------------------|--|
| Projektledare: | Carl-Eric Hagentoft, Chalmers Byggnadsfysik |
| Projektsamordnare: | Pär Åhman, BI |
| Utredare: | Angela Sasic, Chalmers Byggnadsfysik |
| Projektgrupp: | förutom ovanstående: Kajsa Flodberg, NCC Rolf Jonsson, Wäst Bygg Charlotte Svensson-Tengberg, Skanska |
| Referensgrupp: | företagen inom FoU-Väst |

Innehållsförteckning

| | sida |
|---|------|
| Sammanfattning | 3 |
| Kompletterande sammanfattning för specialister | 6 |
| 1. Introduktion | 7 |
| 1.1 Bakgrund | 7 |
| 1.2 Kontrollerad ventilation – Resultat från Etapp I och II | 7 |
| 1.3 Projektbeskrivning Etapp III | 8 |
| 2. Riskbedömningsmetodik | 9 |
| 3. Skadedefinition för mögelrisk | 12 |
| 4. Studerade fall | 13 |
| 5. Övriga risker och hinder | 19 |
| 6. Kostnadsanalyser | 22 |
| 7. Diskussion | 27 |
| 8. Slutsatser | 28 |
| 9. Framtida forskning | 28 |
| Referenser | 29 |

Bilaga 1: Luftflödesmodell för huset och kallvind

Bilaga 2: Kvalitativ riskbedömning av mögelpåväxt för alternativa tekniska lösningar för kallvindskonstruktioner

Bilaga 3: Probabilistisk riskbedömning av mögelpåväxt i kallvindskonstruktion med isolering i yttertak

Bilaga 4: SimpleColdAttic

Sammanfattning

Traditionella kallvindar kan klassas som en riskkonstruktion ur fuktsynpunkt!

En tidigare kartläggning med provtagning i småhus i Västra Götalands län har visat att minst 60 % av alla traditionella kallvindar kan antas ha riklig förekomst av mögelsvamp. Tidigare statistik från Anticimex uppger att minst 50 % av landets alla kallvindar är i riskzonen för att utveckla eller redan har utvecklade fuktproblem. En rapport från Boverket, (Så mår våra hus, Boverket, 2009), visar siffror på att problem med mögel och mögellukt kopplat till kallvindar har ökat de senaste 15 åren. Kallvindar och krypgrunder pekas ut som de två värsta konstruktionerna i det befintliga byggnadsbeståndet med stora existerande och kommande mögelproblem.

Varför är traditionella kallvindar inte fuktsäkra?

Fuktrelaterade problem uppstår då det finns fuktkällor, såsom regngenslag (läckage) genom yttertak, byggfukt i material i nyare hus samt fukten som finns i omgivande luft. Att ha ett vattentätt tak som förhindrar regnvatten att komma in är självklart. Regnläckage ger normalt missfärgningar lokalt och man brukar se att vatten runnit längs takstol och undertak, eller att vatten droppat ner på isoleringen på vindsbjälklaget.

De andra fuktkällorna är däremot svårare att hantera, speciellt luftfukten. Luften för med sig fukt i form av varm fuktig inomhusluft, vilken tar sig upp genom vindsbjälklaget samt genom ventilationen av uteluft vid takfot. Under långa perioder av året uppstår hög relativ fuktighet, vilket kan leda till mögelpåväxt på undertaket av t.ex. plywood eller råspont.

Det är inte alltid att man ser mörka mögelfläckar. Vid mykologisk analys konstateras ofta riklig förekomst av aktiva mögelsporer trots att möglet inte är synligt. Ett annat problem är att den biologiska aktiviteten leder till elak lukt i vindsutrymmet och som ibland sprider sig ner i huset. Läckage av fuktig inneluft upp på vinden och utstrålning av värme från taket upp mot himlen förvärrar situationen avsevärt. Luftfukten kan kondensera och bilda vattendroppar på undertaket. Dessa sugs in och ansamlas i ytmaterialet. Även problem med röta kan då uppstå.

Hitintill har det givits mycket vaga råd till byggindustrin för hur kallvindsproblematiken ska lösas. Rådet att bygga helt lufttäta vindsbjälklag är bra, men svårt att uppnå. I moderna kallvindar skapar uteluften mer problem än det löser, genom vattenångan som ventileras in och "underkyls" pga. nattutstrålning från taket. Att ta bort ventilationen helt, i fall fukt trots allt kommer upp på vinden från bostaden genom vindsbjälklaget, via byggfukt eller på annat sätt, går inte. Något råd som hjälper till att tekniskt skapa "lagom" ventilation på kallvinden genom passiv teknologi kan inte ges.

Riskbedömning av alternativa tekniska lösningar för kallvindar

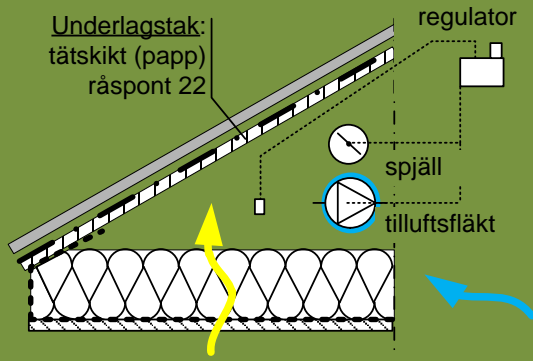
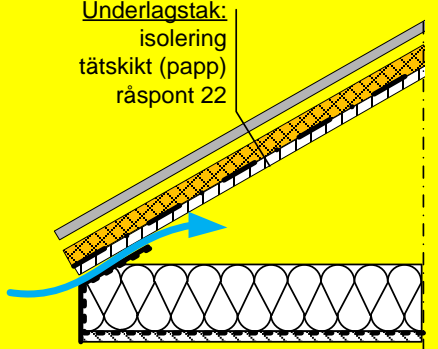
Forskning vid Chalmers har gjort det möjligt att bedöma vilken risk det är att bygga kallvindar utnyttjande alternativa tekniska lösningar. I första hand bedöms risken för mögelpåväxt. Även vilken robusthet eller brist på sådan avseende det yttre klimatet, lufttätethet, orientering mm har bedömts samt livscykelkostnad.

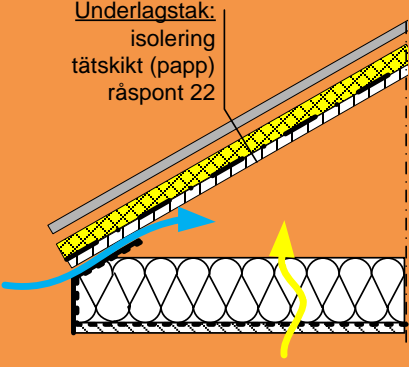
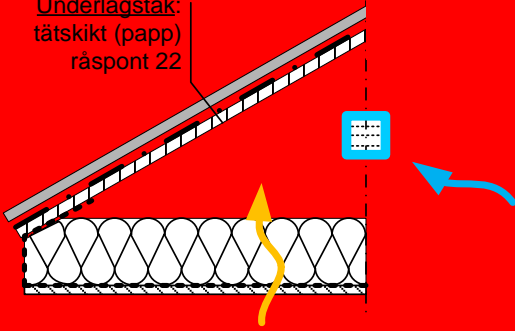
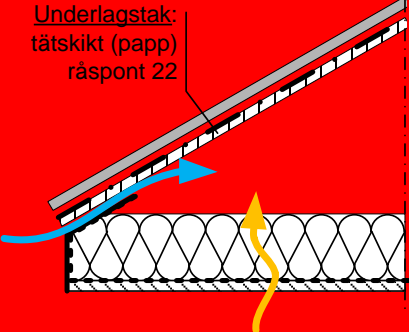
Tabellen nedan visar schematiskt vilken riskkategori olika tekniska lösningarna för kallvindar bedömts ha: *Risikfri (grön)*, *Låg risk (gul)*, *Medelhög risk (orange)*, *Hög risk (röd)*.

Riskbedömningen är tänkt att vara stöd i val av teknisk lösning vid projektering av nya byggnader samt renovering av gamla.

Riskerna med mögelpåväxt är generellt lägre i Stockholm än i Göteborg. Isolerat tak ger lägre risk än oisolerat tak. Styrd ventilation ger en säker kallvind även då framtida klimat räknas in. Ett lågt fukttillskott inomhus och ett lufttätt hus och vindsbjälklag ger lägre risk. Isolerat tak ger ingen helt fuktsäker teknisk lösning. Den kan dessutom fungera olika bra och säkert i olika delar av landet och för olika orientering på byggnaden.

Kostnadsmässigt är det inte stora skillnader mellan de studerade alternativen. Detta är speciellt fallet då drifts- och skadeåtgärdskostnaderna räknas in.

| <i>Kallvindskonstruktion</i> | <i>Krav/Känslighet</i> |
|--|---|
|  <p>Underlagstak: tätskikt (papp) råspont 22</p> <p>regulator</p> <p>spjäll</p> <p>tilluftsfläkt</p> <p>Styrd/Kontrollerad mekanisk ventilation</p> | <p>För att ha kontroll på ventilationen krävs en viss lufttätning av kallvinden motsvarande ca 10 l/h@50Pa. Ska igångsättas i byggskedet för att eliminera byggfukt. Kräver installationsteknisk lösning och någon form av övervakning/larmfunktion. Billigaste tekniska lösningen när livscykelkostnaden bedöms.</p> |
|  <p>Underlagstak: isolering tätskikt (papp) råspont 22</p> <p>Isolerat tak – god lufttätthet i bjälklaget</p> | <p>Kräver långsiktigt god lufttätthet på bjälklaget. Fungerar bättre vid lågt fukttillskott i byggnaden (välventilerad bostad – helst frånluft, F-System). Känslig för byggnadens orientering. Viss känslighet för lokalklimat (var i landet) samt framtida klimat. Ska kompletteras med byggavfuktare i byggskedet för att eliminera byggfukt.</p> |

| | |
|---|---|
|  <p>Underlagstak: isolering tätskikt (papp) råspont 22</p> <p>Isolerat tak - sämre lufttätethet i bjälklaget</p> | <p>Fungerar bäst vid lågt fukttillskott i byggnaden (välventilerad bostad – helst frånluft, F-System). Känslig för lokalklimat (var i landet) samt framtida klimat. Ska kompletteras med byggavfuktare i byggskedet för att eliminera byggfukt.</p> |
|  <p>Underlagstak: tätskikt (papp) råspont 22</p> <p>Reducerad ventilation, tät takfot och gavelfventiler</p> | <p>Extra känslig för bristande lufttätethet och högt fukttillskott i bostaden. Ska kompletteras med byggavfuktare i byggskedet för att eliminera byggfukt. Känslig för framtida klimat.</p> |
|  <p>Underlagstak: tätskikt (papp) råspont 22</p> <p>Traditionell kallvind</p> | <p>Extra känslig för bristande lufttätethet och högt fukttillskott i bostaden. Känslig för framtida klimat. Dyraste tekniska lösningen när livscykelkostnaden bedöms.</p> |

Kompletterande sammanfattning för specialister

Den teoretiska analysen i projektet har gjorts med hjälp av validerade simuleringsmodeller med vilka vi med god precision kan bedöma en konstruktions hygrotermiska funktion. Modellerna är deterministiska dvs. de simulerar verklighetens fysik där ingångsdata, t.ex. materialegenskaper och vädret, är givna.

Så kallad Monte-Carlo metodik har använts för de probabilistiska beräkningarna. Detta betyder att ett stort antal simuleringar av årliga förlopp har genomförts. Följande spridningar i indata har tagits hänsyn till:

- Ort (Göteborg, Stockholm,...) och väderår 1975 till 2005 / 1990 till 2020 (klimatscenario)
- Fukttillskott inomhus: låg $1 \pm 0,5 \text{ g/m}^3$, medel $3 \pm 1 \text{ g/m}^3$ med normal fördelning
- Lufttäthet/Arbetsutförande
- Byggnaders orientering: dvs. N, Ö, V och S.

Med hjälp av den beskrivna probabilistiska modelleringstekniken kan sannolikheten för oacceptabla fuktnivåer och mögelpåväxt bedömas. Vid bedömning av mögelpåväxt har finska dynamiska modeller använts vilka baseras på den hygrotermiska historien, dag för dag, på träets (råspontens) yta. Ett mögelindex som överskrider värdet ett har betraktats som skada. Den extra kostnaden mögelpåväxten ger upphov till, och sannolikheten för detta, kan därmed kvantifieras. I kostnadsanalysen av olika kallvindslösningar har skadefrekvensen från de ovan nämnda fallen använts. För investerings-, drift- och åtgärdekalkyl har både ett större flerfamiljshus och en tvåplansvilla analyserats.

1. Introduktion

I denna rapport beskrivs resultat från ett 2-årigt forskningsprojekt (Etapp III) vid Byggnadsfysik, Chalmers. Inom projektet bedöms fuktsäkerheten för kallvindskonstruktioner utifrån riskanalyser bl.a. baserade på avancerade beräkningsmodeller. I projektet kombineras erfarenheterna från två tidigare SBUF-finansierade projekt (Etapp I/II) som presenterats i en FoU-Väst rapporten (Hagentoft, Sasic 2009) samt i två Bygg&Teknik artiklar (Hagentoft och Sasic 2007, 2009). I denna nya etapp (Etapp III) har ett antal alternativa tekniska lösningar analyserats. Analysen visar spridning i teknisk funktion, speciellt avseende risk för fukt- och mögelskador samt kostnader baserade på sannolikheten för skador. Forskningsarbetet ingår också i ett internationellt IEA projekt (EBC-Annex 55, RAP-RETRO) se t ex. artikel i Bygg&Teknik (Stein, Hagentoft et.al, 2011).

Ytterst syftar arbetet till att identifiera tekniska lösningar med låg risk och livscykelkostnad. Resultat av denna studie kan användas som ett riskbaserat beslutsinstrument vid projektering, renovering eller vid utveckling av nya tekniska lösningar.

Projektet har finansierats av SBUF/FoU-Väst samt Formas-BIC. Projektgruppen innefattar deltagare från Chalmers, Wäst Bygg, Skanska och NCC.

1.1 Bakgrund

Boverksrapporten, (Så mår våra hus, Boverket, 2009), visar siffror på att problem med mögel och mögellukt kopplat till kallvindar har ökat de senaste 15 åren. Kallvindar och krypgrunder pekats ut som de två värsta konstruktionerna i det befintliga byggnadsbeståndet med stora existerande och kommande mögelproblem. Studier har visat att mögelförekomsten är riklig i kallvindar i minst 60 % av det befintliga byggnadsbeståndet (Ahrmens C & Borglund E, 2007).

Välisolerade vindsbjälklag bidrar till problemet med höga fukttillstånd pga. den sänkta temperaturen på vinden. Vi kan förvänta oss allt mer problem i kallvindar i takt med krav på ökad energieffektivisering och annalkande klimatförändringar (Sasic et. al. 2009). Det är självklart att den situation som råder idag, där vi vid introduktion av nya tekniska lösningar med stor sannolikhet bygger in förväntade skador, är helt oacceptabel och att något måste göras!

1.2 Kontrollerad ventilation – Resultat från Etapp I och II

Det är svårt eller omöjligt att byggnadstekniskt skapa rätt ventilation för en kallvind som täcker både tidigt driftskede (byggfukt) och kontinuerlig drift. Varje kallvind har varierande lufttäthet och värmeisoleringsgrad av vindsbjälklaget. Ett sätt att lösa detta är att använda en installationsteknisk lösning med kontrollerad ventilation. För att ha kontroll av ventilationen krävs en reduktion av okontrollerad luftinfiltration. Detta betyder att utrymmet varken har ventilöppningar vid takfot eller vidnock, samt att kallvindens tak görs så lufttät som möjligt. Effekten av den kontrollerade ventilationen blir allt bättre ju tätare angränsningsytorna är.

Genom Etapp I och II har vi demonstrerat hur hygrotermiska modeller kan användas för att bedöma och jämföra den tekniska funktionen för konventionellt byggda kallvindar och kallvindar med kontrollerad/styrd ventilation. Resultaten och modellerna har validerats genom fältförsök i Etapp II. Genom att kombinera beräknade fukt- och temperaturlstånd på kallvinden över året med existerande mögelmodeller har kvantitativa mått på förväntad grad av mögelpåväxt alternativt ett mått för möglets tillväxtpotential kunnat ges.

Beräkningsresultaten för fuktillståndet och temperaturen på kallvindar visar tydligt på en kraftigt reducerad eller helt eliminerad risk för mögelpåväxt vid kontrollerad ventilation. Som utgångspunkt för denna slutsats har medeltillståndet på yttertakets norra insida och kännedom om mögelrisker använts.

Fältmätningar gjorda på fyra kallvindar i småhus i Stockholmstrakten visar att den styrda ventilationen ger stabilare och lägre relativ fuktighet under vinterhalvåret än kallvind som är traditionellt ventilerad med hjälp av luftspalter längs takfoten. Torrare klimat uppnås och risken för mögelbildning minskar drastiskt. De studerade installationerna, med varierande teknik för lufttätning av kallvinden antyder att tillräcklig lufttätningen inte verkar vara svår att uppnå.

Fältmätningar gjorda på ytterliga fyra kallvindar i flerfamiljshus i Göteborg visar också på att ett torrt klimat uppnåtts (max RF på strax lite drygt 80% under kort tid på vintern) och att risken för mögelbildning är marginell.

1.3 Projektbeskrivning Etapp III

I projektet görs riskanalyser av fem alternativa tekniska lösningar. Speciellt analyseras funktionsuppfyllelse avseende mögelpåväxt och livscykelkostnad. Följande fem tekniska alternativa lösningar har studerats:

1. Konventionellt naturligt ventilerad kallvind med varierande storlek på ventilöppningar
2. Isolering av yttertak
3. Kontrollerad ventilation
4. Diffusionsöppna undertak
5. Fuktbuffrande isoleringsmaterial

Riskbedömningarna baseras på sannolikhetsbedömningar utifrån datorsimuleringar. I denna rapport redovisas framförallt analys av de tre första alternativa tekniska lösningarna.

Som utgångspunkt för riskanalyserna studeras ett 5-plans hus med en 220 m² stor vindsbjälklagsarea, taklutning mellan 10 till 30 grader och ventilationsöppningar längs takfoten med spaltbredden 0,02 m.

Husets ventilationssystem utgörs av mekanisk frånluft som ger 0,5 oms/h. Lufttätheten för husets klimatskal är 0,6 l/m²/s vid 50 Pa.

Takkonstruktionen består av takpapp/takpannor på ett ångtätt skikt samt 0,022 m råspont innerst.

Vindsbjälklagskonstruktionen har följande två alternativ:

- Betongbjälklag: 200 mm betong, ångtätt skikt, 400 mm isolering av mineralull
- Träbjälklag: Gipsskiva, ångtätt skikt, 400 mm isolering av mineralull

Vindsbjälklagets lufttäthet har följande tre alternativ:

- Absolut tätt: 0 oms/h vid 50 Pa tryckskillnad över vindsbjälklag
- Tätt (som betongbjälklag): 0.06 oms/h vid 50 Pa (specifik läckagearea $6,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2$)
- Otätt (som ett äldre träbjälklag): 0.3 oms/h vid 50 Pa (specifik $3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{m}^2$)

I begreppet oms/h avses luftvolymen för den övre lägenheten i byggnaden, den närmast taket.

I de probabilistiska beräkningarna har följande spridningar i indata tagits hänsyn till:

- Ort (Göteborg, Stockholm,...) och väderår 1975-2005 / 1990-2020 (klimatscenario)
- Fukttillskott inomhus: låg $1 \pm 0.5 \text{ g/m}^3$; medel $3 \pm 1 \text{ g/m}^3$ med normal fördelning
- Lufttäthet/ Arbetsutförande alternativ enligt ovan
- Byggnaders orientering: Alla orienteringar dvs. N, Ö, V, S

I kostnadsanalysen av olika kallvindslösningar har skadefrekvensen från de ovan nämnda fallen använts. För investerings-, drift- och åtgärdskalkyl har både ett större flerfamiljshus och en tvåplansvilla analyserats.

2. Riskbedömningsmetodik

Det är helt uppenbart att vädret ändrar sig slumpmässigt inom en orsts klimatramar. Vid byggnation uppstår variationer beroende på imperfektioner och arbetsutförande. Materialegenskaper är inte konstanta utan de varierar inom vissa intervall, dessutom åldras materialen och täthetslösningarna. Människans brukarpåverkan och hur byggnader underhålls skapar slumpvisa variationer.

Idag har vi tillgång till validerade hygrotermiska modeller med vilka vi med god precision kan bedöma en konstruktions hygrotermiska funktion. Modellerna är deterministiska dvs. de simulerar verklighetens fysik där ingångsdata, t.ex. materialegenskaper och vädret, är givna. Med hjälp av ny utvecklad probabilistisk modelleringsteknik kan vi bedöma sannolikheten för oacceptabla fuktnivåer och mögelpåväxt. Den extra kostnaden detta ger upphov till, och sannolikheten för detta, kan därmed bedömas.

Vilka fall är värda att simulera? Hur mycket kan vi ta reda på om mögelrisken innan vi börjar datorsimuleringar? Hur väl förstår vi problem med olika byggtekniker för kallvindar? Låt oss testa det med hjälp av ett exempel på ett möjligt flödesschema. Detta hjälper oss att visualisera problemställningen och se förutsättningar och händelser som är gynnsamma för mögelpåväxt. Den grafiska strukturen består av rektanglar och ovaler med villkor och förklaringar, samt pilar och logiska grindar som leder analysen genom schemat. Flödesschemat ska läsas upp och nedvänt, men det går även att läsa den i omvänd riktning. För att passera en "OCH"-grind ska alla villkor eller förutsättningar vara uppfyllda (alla svar är 'ja'). Ett eller flera "ja" svar räcker emellertid för att passera en "ELLER"-grind.

Eftersom flödesschemat börjar med en oönskad händelse, att mögel växer på ett underlagstak i en kallvind, ska man sträva efter att bryta 'flödet' vid OCH-grindarna. Ju närmare den oönskade händelsen man bryter flödet, desto robustare blir den tekniska lösningen. Man kan t.ex. att välja behandla underlagstaket av råspont med mögelgifter. Lyckas man säkerställa

effektiviteten av mögelgiftet, behöver man inte ta hänsyn till andra faktorer såsom relativ fuktighet och temperatur av underlagstaket. Eftersom man av olika hälso- och miljöskäl inte ska sträva efter att använda gifter i byggnadsmaterial, har vi endast studerat obehandlad råspont. Man kan också tänka sig byta ut råsponten mot något annat material som inte är mögelkänsligt. Vårt motiv i projektet har varit att behålla den traditionella byggtekniken. Studien fokuseras därmed på att förstå kallvindens klimatförhållanden och att testa kompletterande tekniker, vilka som kan förebygga mögelpåväxt i en traditionellt byggd kallvind.

Låt oss titta på den översta OCH-grunden. Det är ganska vanligt med höga relativa fuktigheter i uteluft i Sverige, dvs. att *RH ligger mellan 75 och 100 %*. Därmed håller byggnadsdelar utan uppvärmning såsom uteluftsventilerade vindsutrymmen denna RH-nivå. Det är därför svårt att sänka relativa fuktigheten i en kallvind under 75 % utan att tillföra värme. Även om solen hjälper till att höja temperaturen, vet vi av erfarenhet att detta inte räcker till. Därför blir svaret 'ja' på den första frågan.

Uteklimatet har även en stor inverkan på temperaturen på vinden. Det är ganska vanligt med *temperaturer mellan 0 och 50 grader*. Lägre temperaturer än 0 grader förekommer oftare i norra delar av landet och varar där under längre tid. Däremot är temperaturen ofta runt noll vintertid i de södra delarna av landet. Temperaturer högre än 50 grader förekommer väldigt sällan. Här finns en viss osäkerhet i hur man ska svara på frågan. Svaret är någonstans mellan 'kanske' och 'ja', men definitivt inte ett tydligt 'nej'.

Det blir ett liknande svar vid den sista fråga, hur lång tid varar de *gynnsamma RF och temperaturförhållandena för mögelpåväxt*. Det är värt att stanna här innan vi går vidare. Vi behöver först undersöka hur de olika klimatförhållandena i landet påverkar mögelpåväxten. Kriterier för mögelrisk redovisas nedan.

3. Skadedefinition för mögelrisk

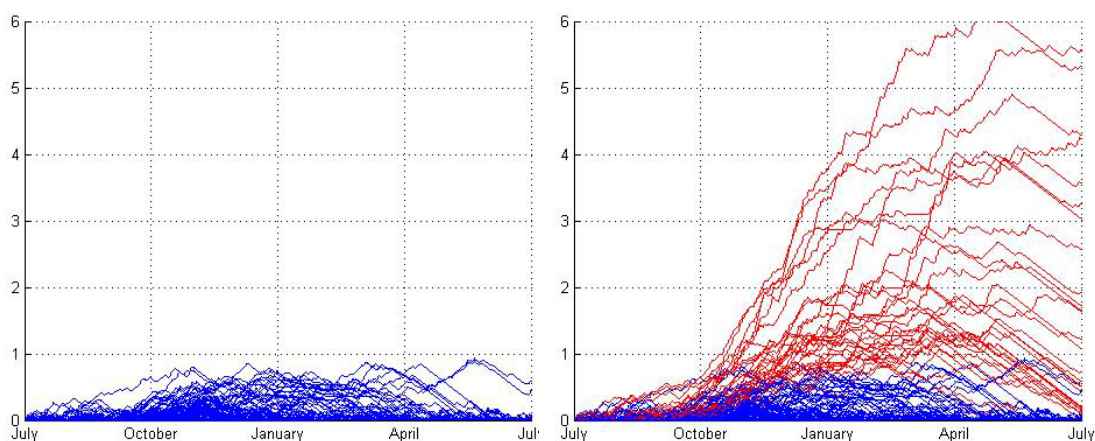
Forskning visar att mögel kan finnas på en yta även om det inte syns med blotta ögat, dvs. det krävs ett mikroskop för att upptäcka den. Detta motsvarar ett mögelindex (MI) högre än 1. I praktiken (om man inte skickar in prover till ett labb) upptäcker man mögel först när man kan se det. Enligt tabell 1 motsvarar detta mögelindex 3. Det är svårt att bestämma ett lämpligt gränsvärde för mögelrisk. Beroende på vilken gräns man väljer, kan samma kallvind beskrivas både som riskfylld och riskfri. Genom att välja mögelindex 1 som gränsvärdet, tillför man en viss säkerhetsmarginal till analysen. Att MI är större än ett betyder också att RH och temperaturer har överskridit de gränsvärden som existerar för mögelpåväxt, dvs gynnsamma förhållanden har funnits under vissa tider. Det valda gränsvärdet kan eventuellt uppfattas som strängt, vilket illustreras i figur 2 och 3. Till vänster i figur 3 visas det beräknade MI för 111 olika kallvindar av samma typ och i samma klimat, men under något varierande förhållande avseende initial byggfukt, läckagearea i vindsbjälklag, inomhusklimat, mm. Alla dessa kallvindar har ett MI som är lägre än 1 och kan därför klassas som riskfria. I bilden till höger visas de 111 riskfria kallvindarna tillsammans med övriga 17 av de totalt 128 simulerade. För dessa 17 fall kan man konstatera en mögelrisk eftersom var och en av dem ger ett MI som överskrider 1. Observera att i några av de 17 kallvindar går MI bara lite över 1 (1,2) och under en kort tid (värdet i slutet av året är lägre än 1). För att kunna använda den valda gränsen konsekvent, klassas även dessa vindar som riskabla. Resultat blir då att i 17 av 128 kallvindar kan uppstå en risk för mögelpåväxt; d.v.s. risken är 13 % för att denna typ av kallvind ska drabbas av mögelpåväxt.

Tabell 1 Definition av mögelindex (MI).

| Index | Mögeltillväxt / påväxt | |
|-------|-----------------------------------|--|
| 0 | Ingen | Sporer har ej börjat gro |
| 1 | Någon - kan upptäckas i mikroskop | Initialt stadium med tillväxt av hyfer |
| 2 | Medel - kan upptäckas i mikroskop | Täcker mer än 10% av ytan |
| 3 | Någon – kan upptäckas med ögat | Nya sporer bildas |
| 4 | Tydligt- synligt med ögat | Täcker mer än 10% av ytan |
| 5 | Rikligt - synligt med ögat | Täcker mer än 50% av ytan |
| 6 | Mycket rikligt och tätt | Täcker nästan hela ytan |



Figur 2 Olika grader av mögelpåväxt på underlagstak av plywood. Tv: MI < 3, mitten: MI ca 4, högra bilden: MI ca 6 (fri tolkning). Bilder tagna på testkallvindar på SP i Borås, höst 2012. Foto: A Sasic.



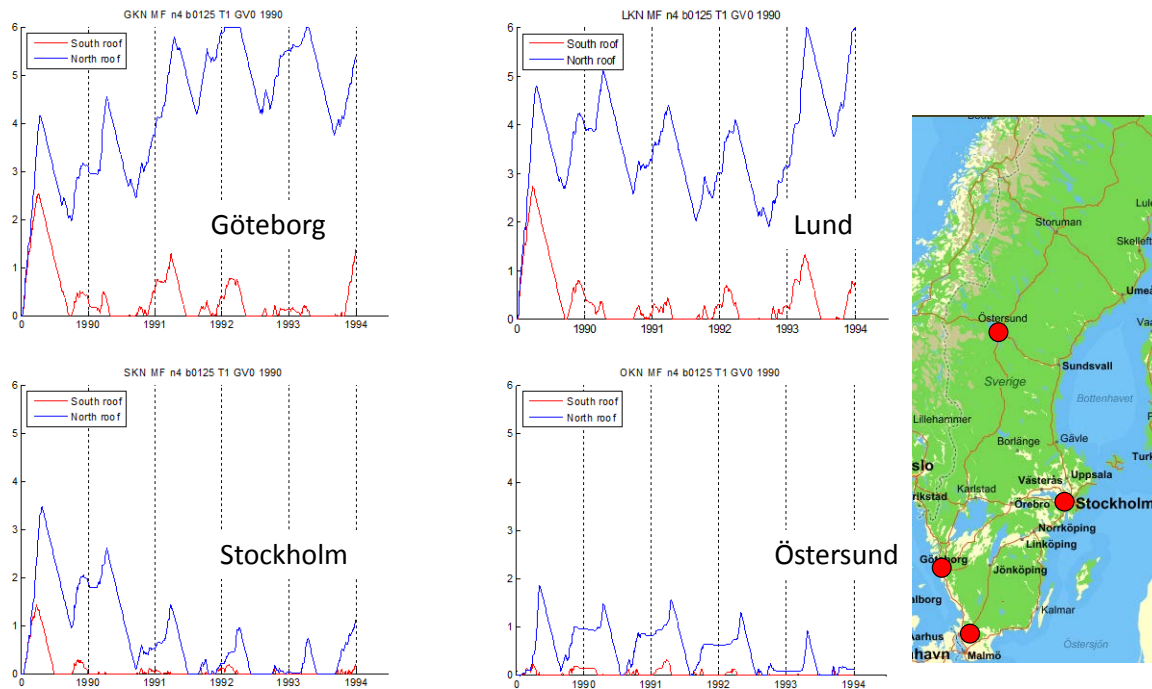
Figur 3 Exempel på riskbedömningsmetodik. Riskfria kallvindar (vänstra bilden; blå) vars mögelindex är lägre än 1 under första året. Riskfria tillsammans med riskabla kallvindar (högra bilden; blå/röd).

Vid val av riskkriterier bör också vädrets variation år från år tas med. Det kan konstateras att det är svårt att garantera en riskfri kallvind på lång sikt baserat på en bedömning av ett års simulering, vilken ger ett mögelindex underskridande ett. Av praktiska skäl har vi utgått från korttidsanalyser (ettårssimuleringar) vid sortering av olika fall. Vi kan då få en relativ bedömning, indikation på hur riskabel en konstruktion är jämfört med alternativen.

Framtida klimatförändringar talar för att risken för mögelrisk kommer att öka. Detta har dock inte tagits med i analysen. Denna risk i sig motiverar också en konservativ riskvärdering enligt ovan.

4. Studerade fall

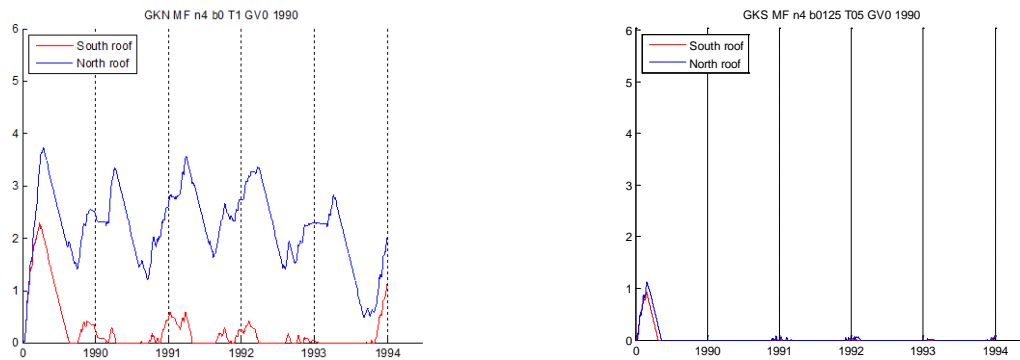
Med hjälp av mögelindexberäkningar kan vi testa hur de olika klimatförhållandena i landet påverkar mögelpåväxt i en traditionell kallvind. Resultaten som redovisas i figur 4 indikerar att risken minskar ju kallare klimat är. Göteborgs och Lunds milda klimat är mest gynnsamma för mögelpåväxt. Om vi lyckats identifiera en kallvindskonstruktion som klarar Göteborgs klimat, även med en takyta orienterad mot norr, kommer den med stor sannolikhet att klara de övriga klimatförhållandena i landet.



Figur 4 Inverkan av de olika klimatförhållandena i landet på mögelpåväxt i en traditionell kallvind.

Låt oss återgå till flödesschemat ovan i figur 1. För att kunna stanna vid *nästa OCH-grind i schemat*, behöver vi antingen eliminera alla vindsutrymmets fuktkällor eller säkerställa att det fukttillskott som tillförs inte leder till fuktackumulering i underlagstaket. Vi behöver alltså ett 'nej' på åtminstone en av dessa ingångsfrågor.

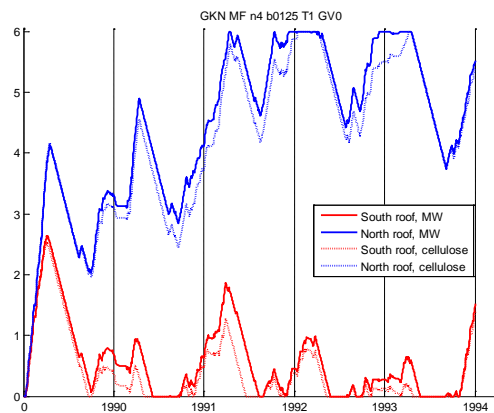
Tidigare forskning har bekräftat att det finns tre allvarliga fuktkällor: infiltration av inomhusluft, uteluftsventilation och byggfukt. Till skillnad från de två första fuktkällorna, har man inte i någon högre grad uppmärksammat den tredje fuktkällan - byggfukt. Man har länge trott att en uteluftsventilation av kallvinden kan ta hand om alla fuktkällor. Det är lätt att glömma av att den naturliga ventilationen som drivs av vindkrafter och temperaturskillnader, inte tar hänsyn till kallvindens faktiska behov av ventilation. T ex är ventilationen i gång även när uteluften har högre ånghalt än vindsutrymmets luft, vilket bidrar till en uppfuktning av vinden istället för en uttorkning. De som har erfarenhet av naturligt ventilerade hus vet att det krävs ett visst engagemang från husets brukare för att få det rätta inneklimatet – t ex att stänga eller öppna fönster när det finns behov. Man kan i analogi med detta inte förvänta sig att naturlig ventilation ska fungera felfritt i uteluftsventilerade vindar. Resultat som visas i figur 5 (vänstra bilden) bekräftar att naturlig ventilation inte är tillräckligt effektiv. Här studeras samma kallvind i Göteborg som i Figur 4. Skillnaden är att en av fuktkällorna är eliminerad, den som motsvarar luftinfiltration från bostaden. I den högra bilden visas resultat för samma kallvind som i figur 4 med både byggfukt och luftinfiltration. Kallvinden ventileras mekanisk med hjälp av en fläkt, och endast när ventilationen verkar uttorkande. Styrd eller kontrollerad mekanisk ventilation har visat sig vara ett effektivt sätt att föra bort fukttillskottet på en kallvind. Vi återkommer till kallvinden senare och vänder oss nu till huvudfrågan i denna gren av flödesschemat – är det möjligt att eliminera alla fuktkällor på en kallvind i praktiken? Det skulle innebära att ingen vattenånga kommer in på vinden från huset eller utifrån, och att all byggfukt ska vara uttorkad.



Figur 5 Vänster bild: Mögelindex i en traditionell kallvind i Göteborg (samma som i figur 4) utan luftinfiltration från bostaden. Höger bild: mögelindex i en kallvind med styrd mekanisk ventilation, också i Göteborg, med både byggfukt och luftinfiltration från bostaden.

Vi antar att svaret är 'ja' vid denna ingång till grinden och tittar på den andra ingången för att undersöka om det är möjligt förebygga att fukttillskott ansamlas i underlagstaket.

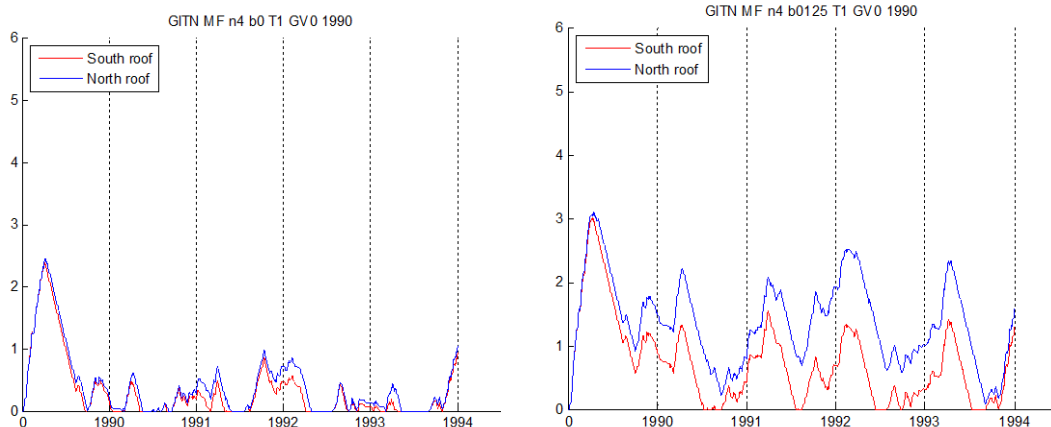
Ångan i luften kondenserar på kalla ytor vars temperatur är lägre än daggpunkt för luften. Taket och därmed underlagstaket är ofta den kallaste ytan nattetid eftersom den är mest exponerad mot nattkylan. Under dagen, och särskilt under soliga timmar när temperatur av underlagstaket höjs, är det kallast på vindsbjälklagets isolering. Fuktbuffringskapaciteten i isoleringsmaterial är dock inte tillräckligt för att buffra fukt och förebygga fuktsamling i underlagstaket. Detta illustreras med beräkningsresultat i figur 6 motsvarande samma kallvind i Göteborg som i figur 4.



Figur 6 Inverkan av vindsbjälklagsisoleringens fuktbuffringskapacitet på beräknat mögelindex. Heldragna linjer visar resultat för mineralull och prickade linjer för cellulosa. Klimatort: Göteborg.

Enligt diskussionen ovan, är kallvindsventilation med uteluft effektiv om den är kontrollerad. En välfungerade mekanisk styrd ventilation med rätt kapacitet, liksom ett avfuktningsslag, kan effektivt eliminera fukttillskott i vindsutrymmet och förebygga fuktsamling i underlagstaket. Svaret är då "nej" för denna grindning och flödet i schemat kan brytas. Vill man ha kvar naturlig ventilation blir svaret "ja" och "OCH" grinden kan då dessvärre passeras.

Sista möjlighet att stanna vid denna grind är att höja temperaturen på underlagstaket, dvs. att skydda taket från nattkyla. Isolering av taket blir då ett naturligt val. Resultat av beräkningar i figur 7 visar en god potential för denna metod, särskilt i kombination med en lufttät vindsbjälklag (vänstra bilden).

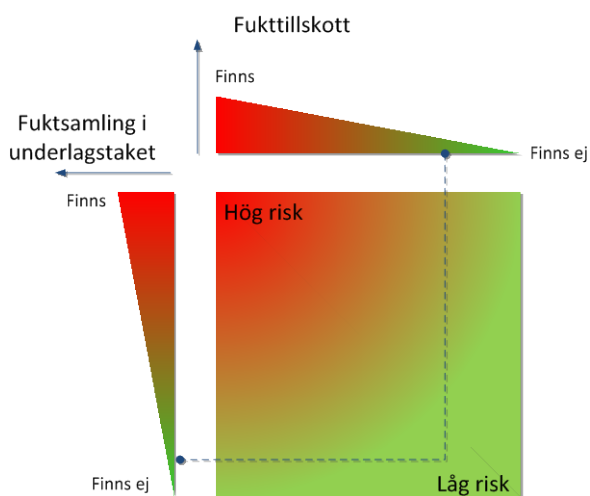


Figur 7 Inverkan av 7 cm isolering ovanpå råsponten. Vänster bild: samma kallvind som i figur 4 och utan luftinfiltration från bostaden. Höger bild: – med luftinfiltration av inomhusluft. Klimator: Göteborg.

Alla de genomförda analyserna har hjälpt oss att identifiera nödvändiga förändringar i den traditionella kallvindskonstruktionen, som minskar risken för mögelpåväxt på underlagstaket. Flödesschemat i figur 1 har använts för att få en struktur i tänkandet, dvs. identifiera relevanta förutsättningar och händelser. De gissningar och uppskattningar som gjordes har bekräftats med hjälp av hygrotermiska beräkningar. Hela denna process, att leda tankarna och frågorna med hjälp av schemat, utgör en viktig del i en riskanalys. Den representerar en kvalitativ riskbedömning eftersom den ger indikationer på hur risken utvecklas (ökar eller minskar; om den är hög eller låg), men inte hur stor risken är i procent (andel skadade kallvindar av alla möjliga fall med dessa).

För att kunna gå igenom flödesschemat på ett korrekt sätt krävs god kunskap. Man kan säga att det delvis illustrerar hur en expert tänker i frågan. Schemat kan göras på olika sätt, bl. a med hjälp av tabeller eller texter. Viktigast är att säkerställa ”genomströmning” och undvika förvirrande korsningar. T ex, man ska alltid studera en konstruktion i taget.

Sammanfattningsvis har den kvalitativa analysen hjälpt oss identifiera två huvudsakliga faktorer som leder till mögelpåväxt i en traditionell kallvindskonstruktion: fuktillskott till vindsutrymmet samt den låga temperaturen av underlagstaket. Genom att minska/öka den ena eller den andra, minskar risken för mögelpåväxt. Detta sammanfattas schematiskt i figur 8.



Figur 8 Strategi för att minska risken för mögelpåväxt på underlagstaket. Trianglarna illustrerar två huvudsakliga orsaker till mögelpåväxt: fukttillskott i vindsutrymmet (vågrätt) och fuktsamling i råspont pga. kallt yttertak och kondensbildning (lodrätt). Ju mindre av den ena och den andra, dvs. en rörelse mot den grönare delen, desto mindre risk för mögelpåväxt.

De nödvändiga ändringar som krävs för få en fungerande kallvindskonstruktion med råsponten i underlagstaket är:

- Styrd/Kontrollerad ventilation med uteluft
- Naturlig ventilation i kombination med isolering ovanpå råsponten och god lufttäthet för vindsbjälklaget

Med en väl dimensionerad och fungerande styrd ventilation, och i en väl utförd kallvind (utan ventilation i takfoten) är risken för mögelpåväxt väldigt låg. Därför görs uppskattning att denna lösning inte behöver någon ytterligare kvantitativ riskbedömning.

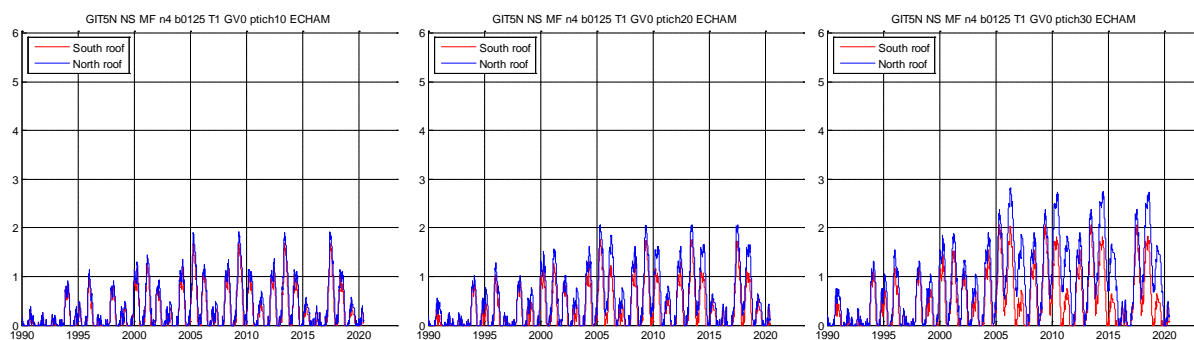
Isolering av råsponten minskar risken av mögelpåväxt väsentligt (Figur 7), men inte alltid tillräckligt lågt. Den goda effekten av isoleringen minskar t.ex. när infiltration av inneluften ökar. Därför krävs en kvantitativ riskbedömning. Riskbedömningarna baseras på sannolikhetsberäkningar med hjälp av validerade simuleringsmodeller. Varje fall simuleras under ett slumpvis valt kalenderår. Gränsen för mögelrisk antas vara 1 (MI=1). Resultaten sammanfattas i tabell 2 och anges som antalet riskabla fall (i procent) av ett stort antal studerade fall (som i figur 3). Med hjälp av dessa resultat kan vi bedöma att effekten av isoleringen mest beror på vindsbjälklagets lufttäthet. I ett vanligt otätt hus, är risk för mögelpåväxt på någon av taksidorna mellan 25-50 % (vänstra kolumnen) och varierar med takets orientering samt uteklimat. Det är tydligt att uppvärmningen som solen ger upphov till hjälper till att minska risken trots isoleringen ”ligger i vägen”. Risken är lägre på ett låglutande tak som vetter mot öst/väst (Ö-V) än mot syd. Anledning till denna skillnad hittas i ventilationsgraden – den är något högre i kallvinden i Göteborg med Ö-V orientering, än med S-N. Den skillnaden minskar dock när takets lutning ökar p.g.a. minskad soluppvärmning på det Ö-V taket. Beräkningar visar att i ett lufttätt hus, som följer passivhusstandarderna, är risken för mögelpåväxt mellan 0 till 9 % i Göteborg och nära noll i Stockholm.

Tabell 2 Resultat av probabilistiska simuleringar – MI och risk för mögelpåväxt på de två takytorna med taklutningen 10 respektive 20 grader. Taket är isolerat med 100 mm cellplast, orienteringen på byggnad varierar och orten är Göteborg alternativt Stockholm.

| | Otätt vindsbjälklag | | | | Tätt vindsbjälklag | | | |
|---------------------------|---------------------|------|------|------|--------------------|------|------|------|
| | N | S | Ö | V | N | S | Ö | V |
| Göteborg, taklutning 10° | | | | | | | | |
| Medel av max MI* | 1.40 | 1.09 | 0.81 | 0.83 | 0.28 | 0.23 | 0.08 | 0.10 |
| Risk att max MI* >1, % | 41 | 33 | 24 | 25 | 8 | 5 | 0 | 0 |
| Göteborg, taklutning 20° | | | | | | | | |
| Medel av max MI* | 1.74 | 1.07 | 0.95 | 1.09 | 0.34 | 0.25 | 0.11 | 0.08 |
| Risk att max MI* >1, % | 50 | 33 | 30 | 29 | 9 | 5 | 0 | 0 |
| Stockholm, taklutning 10° | | | | | | | | |
| Medel av max MI* | 0.55 | 0.38 | 0.70 | 0.50 | | | | |
| Risk att max MI* >1, % | 17 | 12 | 17 | 13 | | | | |
| Stockholm, taklutning 20° | | | | | | | | |
| Medel av max MI* | 0.68 | 0.38 | 0.54 | 0.57 | | | | |
| Risk att max MI* >1, % | 20 | 9 | 12 | 14 | | | | |

* max MI avser det maximala MI som förekommer under ett år; medel av max MI är medel värdet för alla simulerade kallvindar.

Som det har påpekats tidigare, finns det en stor osäkerhet med den valda gränsen för mögelrisk. Alla resultat bör tolkas som relativa och helst jämföras mot ett referensfall. En mer detaljerad simulering av ett sadeltak med syd-norr orientering och isolering i taket visar att MI är mellan 0 och max 3 (figur 9).



Figur 9 Inverkan av taklutning på mögelpåväxt (beräknat MI) (Från vänster: 10, 20 respektive 30 graders lutning). MI ökar något med taklutningen. Resultat avser traditionella kallvindar i Göteborg med 5 cm isolering i taket.

Resultaten från de probabilistiska simuleringarna i Tabell 2 gäller för kallvindar med 10 cm isolering ovanpå råsponen. Liknande probabilistisk studie av kallvindar, där man även varierat isoleringstjockleken i taket mellan 0-10 cm, har visat att risken minskar ju mer isolering man använder.

5. Övriga risker och hinder

Olika typer av risker med de alternativa konstruktionsutförandena framförallt isolering på råsponen, har ställts upp av projektgruppen. Här anges också eventuella hinder för införandet av denna teknik. Synpunkterna återges utan speciell riskvärdering.

Synpunkter på 100mm isolering på råspons

Synpunkter och frågeställningar avseende isolering på råsponsundertak redovisas nedan sorterade under ett antal rubriker. En del av frågeställningarna har belysts i tidigare kapitel.

Estetik

- Takfoten upplevs som klumpig. Arkitekter eftersträvar ofta smäckra konstruktioner med synlig bärning under råsponen. Då blir detta en ganska tjock hatt. Vi har i något projekt diskuterat att ta bort isoleringen ovanför takfoten, men tror att detta kanske både ser konstigt ut och dessutom medför risker för utvändigt tätskikt. Gäller både pannor och papptak.
- Var placeras hängrännan (underkant/ovankant isolering)?

Brand

- Cellplastisolering ovanpå råspons kan uppfattas av räddningstjänsten som en riskkonstruktion. I så fall kan mineralullsisolering krävas på ytan närmast fasaden och ovanför lägenhetsskiljande väggar (radhus, flerbostadshus). Detta innebär ytterligare ett material och en materialövergång. Att endast använda mineralull upplever vi kräver en duk utanpå isoleringen, vilket ställer flera nya frågor. Gäller panntak.

Kommentar:

Enligt gällande brandregler ska takfötter vara brandskyddsklassade. Detta innebär att uppdelning av vindar i brandceller måste göras. Detta har dock inte någon betydelse för villor, som utgör endast en brandcell. Däremot har det betydelse för radhus och flerfamiljshus.

Cellplastisolering på taket är tillåtet så länge som det finns en brandokänslig takbeläggning, tex tegelpannor. Dock bör cellplasten ersättas med mineralull över entréer för att undvika att smält plast rinner ner på personer vid brand.

Konstruktion

- Det blir större moment än normalt på infästningarna av ströläkten. Dessa behöver alltså vara ganska kraftiga. Ju större taklutning, desto mer framträdande problem.
- Taknocken kräver nya lösningar för att knyta ihop de två sidorna av taket.
- Ströläkten kan behöva vara kraftigare,

Fukt

- Ströläktens infästningar kommer inte direkt mot fast material (råspons) utan mot ett mer eftergivligt material (cellplast). Detta innebär att man måste hitta lösningar för att

se till att det inte blir läckage i infästningar. Dessutom kan det större momentet i långa skruvar innebära större risk för läckage över tid.

- Innebär infästningen av ströläkten uppkomst av köldbryggor som kan orsaka lokal kondens i vindsutrymmet?
- I takfot måste kilar och hängrännor utformas på speciellt sätt för att få det bra.
- Vid ev användande av sk Mögelstoppers t.ex. i parallelltak krävs en mer genomtänkt lösning (för att inte läckage ska uppstå).
- Speciallösningar för infästning av taksäkerhet, uppstigningsluckor etc. kan krävas
- Vanliga rekommendationer kring krav på fuktkvot i råspont, väderskydd, bra val av takpannor etc. Men detta kan ev vara mer kritiskt?!
- Någon form av membran på råsponten krävs för att klara läckagevatten. Över eller under isolering?
- Detalj för att dränera ut vatten säkert från membranet.
- Var placeras hängrännan (underkant/ovkant isolering)?
- Skall isolerskiktet skyddas av ett membran för att förhindra att det fylls med pollen, löv mm i skivskarvarna. Skulle det kunna börja växa något i detta i så fall (RFkrit 75% istället för 95%)?
- Är tanken att detta system skall kombineras med en tät takfot? Hur tar vi då hand om byggfukt. Behöver vi utföra ngn form av avfuktning av vindsutrymmet i något skede under byggtiden?
- Kan det bli så att tiden för gynnsamt klimat för påväxt förlängs med denna konstruktion? Råsponten/vinden kommer nu inte bli så kall som tidigare! Detta skulle då kunna vara aktuellt vid uttorkning av byggfukt. Eller om det skulle vara ett läckage i form av konvektion från innemiljön.
- Blir det dubbla tätningskragar vid genomföringar, dels mot ev membran mot råspont och dels vid ev membran över isoleringen?

Arbetsmiljö/Produktionsteknik

- Arbetsmiljörisker med att gå på isoleringen i läggningsskedet.
- Vinden är ett stort problem på vissa orter, svårt att lägga?

Synpunkter på plastfolie på vindsbjälklag av betong

Den tidigare riskanalysen visar på riskerna med byggfukt från betongbjälklaget. För att minska belastningen under byggtid och tidigt driftsskede kan en ångspärr läggas ut mot betongbjälklaget. Alternativt kan extra ventilation eller avfuktare användas.

- Utan plastfolie blir det en hel del byggfukt som skall ventileras bort från vindsutrymmet
- Vid HDF bjälklag kan plastfolien förhindra konvektion via sprickor i elementskarvar.
- Möjlighet att lägga remsor under takstolar som gör att betongen är fri fram till dess att råsponten läggs på. Man kan då gå på betongytan fram till och med råspontläggning. Beroende på taklutning kan delar av betongytan hållas öppen fram till isoleringsskedet om det finns tillräckligt utrymme under råsponten att lägga ut plastfolien i det skedet.
- Är det möjligt att ha avfuktare på vinden, om bjälklaget utförs utan plastfolie, fram till dess att bjälklaget isoleras? Finns tillgänglig tid i projekten att utföra en uttorkning av

bjälklaget till en nivå då den fortsatta uttorkningen går så långsamt att det går att ventilera ut fukten på ett betryggande sätt med självdrag?

- När vi nu förhindrar uttorkningen uppåt för bjälklaget så hamnar vi väl i samma situation som mellanbjälklagen där vi lägger en tät plastfolie under parketten och låter uttorkningen endast ske nedåt. Då måste vi ha god betongkvalitet på vindsbjälklaget
- Hur kombineras detta med ev tält /tak under byggtiden för att hantera övriga fuktfrågor i samband med vårt byggande. Kan ett byggsätt med tält/tak göra att vi kan eliminera plastfolien på vindsbjälklagen i vissa konstruktioner?

Vad kan påverka beslut om ny (säkrare) lösningar?

Att förändra byggnadstekniken kräver inte bara tydliga funktionstekniska eller ekonomiska avgörande. Nedan listas annat som kan påverka beslutet om att ändra teknik eller ej:

- Det råder en vag förståelse för problembilden. Det upplevs ibland som ett teoretiskt problem eller som ett problem i gamla hus där man tilläggsisolerar bjälklaget.
- Ofta leder skador inte till dyra åtgärder utan inträffar i oinspekterbara konstruktioner, eller där det leder till dyra åtgärder finns det speciella förutsättningar som gör att vi tror att det händer inte oss. Eller upplevs eventuell skada vara långt fram i framtiden.
- Erkännande av problembilden medför att vi byggt riskkonstruktioner tidigare. Det kan vara tungt att ta in detta. Dessutom kan vi kanske vara rädda att väcka liv i en fråga som kan skapa förtroendekris gentemot kund, dvs. att byta konstruktion innebär att vi har byggt riskkonstruktioner till kunden (eller kundens kompis) tidigare.
- Kostnaden för byggdelen överstiger tidigare kostnad (i byggskede).
- Det innebär kostnader att utarbeta nya lösningar.
- Det innebär kostnader att implementera nya lösningar.
- Det finns risk för barnsjukdomar, vi kan ha svårt att överblicka konsekvenserna till fullo av en förändring. Better the devil you know!
- Motvilja att förändra en väl inarbetad teknik.

- Motvilja att vara den som först ändrar sig. Så långa ”alla andra” gör på ett sätt, kan det inte vara så fel.
- Arbetsmiljöaspekter
- Inköp/logistik
- Fuktsäkerhet under byggtid
- Möjligheter till förtillverkning
- Informationsdelen om varför vi ändrar blir mkt viktig! Vanans makt är stor.
- Det måste vara ett branschgemensamt beslut som åtminstone de stora aktörerna i branschen blir eniga om
- HUS-AMA bör vara med på tåget
- Hur hanteras konstruktioner som byggs idag? Information till de som nu håller på att bygga sitt hus och när de träder in i huset läser om att deras tak imorgon är en risk?

6. Kostnadsanalyser

Kostnadsanalysen i denna studie är kraftigt förenklad. Avsikten med den är framförallt att visa på de olika kostnadsdelarna på ett likvärdigt sätt och få en uppfattning av helheten.

Investeringskostnaden har tagits fram av kalkylatorer verksamma i projektets medverkande företag. Investeringskostnaden är bedömd utifrån att tekniken är väl inkörd.

En kalkylränta på 5 % på grundinvesteringen har antagits vid beräkning av den årliga kostnaden. Hänsyn till inflation är ej gjord. Kostnader är angivna utan mervärdesskatt.

Det är svårt att värdera de ekonomiska fördelarna av att ha en frisk vind. Det ses som självklart att en ny byggnad ska vara felfri. En eventuell upptäckt av mögelpåväxt och/eller mögellukt kan skapa stora problem för de boende som är svår att värdera ekonomiskt. En byggnad med en frisk vind representerar också ett klart högre marknadsvärde om de i övrigt är jämförbara.

Kostnader förknippade med ”ill-will” på de producerande företagens varumärke har ej värderats.

Taket är byggt med råspont på trätakstolar. Vindsbjälklaget är isolerat med 400 mm lösfallnadsisolering. Inomhustemperaturen är 22 °C. I energiberäkningarna, som görs som ett enkelt överslag, bedöms luftomsättningen på vinden vara 10 l/h för alla naturligt ventilerade fall medan den är 2 l/h för den kontrollerade/styrda ventilationen, och utetemperaturen är i snitt 1 °C under eldningssäsongen. Priset för 1 kWh har satts till 1 SEK.

För att undvika direkta skador första året måste uttorkning av byggfukten ske under byggtiden, detta belastar alternativet med begränsad ventilation och isolering på taket med en extra kostnad.

Följande alternativa fall har studerats:

Alt. 1 – Standard, råspont, diffusionsöppen underlagspapp betongpannor

Alt. 2 – 100 mm takisolering, råspont, diffusionsöppen papp, begränsad ventilation, avfuktning under byggskedet

Alt. 3 – Styrd ventilation, standard (råspont, duk)+styrd ventilation, betongpannor, tät takfot

För fallet med styrd ventilation antas att denna installeras tidigt och därmed fungerar som avfuktare av byggfukt.

Kostnadsanalysen baseras på att då mögelpåväxt förekommer tillkommer kostnad för sanering, och växling till styrd ventilation.

Kostnadsanalys av villa

En villa i två våningar med en boyta på 140 m² och en bjälklagsyta på 104 m² analyseras först.

Grundinvestering:

Alt 1: 76 380:- , 734:- /m² bjälklagsyta

Alt 2: 89 135:- , 857:-/ m² bjälklagsyta
Alt 3: 88 427:- , 850:- /m² bjälklagsyta

Engångskostnaden för byggfuktsuttorkning (Alt 2.) är satt till 5 000:-. Det totala spannet i grundinvesteringskostnad mellan konventionell kallvind med råspont och alternativet med isolering på taket är 17 755:- (94 135-76 380). Skillnaden mellan isolerat tak och styrd ventilation är 5 708:- (94 135-88 427).

För alternativ 3 ingår installationen av den styrda ventilationen i grundinvesteringen lika med 12 000:-. Därav utgör delkostnaden för utrustningen som bedöms kräva utbyte vart 15 år vara 7 500:-.

Kostnadsanalysen baseras på en bedömning av hur stor risken är för att mögelpåväxten uppnår en viss nivå, mögelindex större än 1, under ett slumpvis valt väderdataår och fuktillskott utifrån en fördelning för högt respektive lågt medelvärde och orterna Stockholm alternativt Göteborg. Detta har diskuterats tidigare i rapporten. Byggfukten är uttorkad innan byggnaden tas i drift. Nivån på mögelindex för skada är satt något konservativt, å andra sidan inkluderas inte ackumulativa effekter av flera års exponering samt framtida klimat.

Tabell 3 redovisar grundinvesteringen och den årliga kostnaden för de tre alternativen. Riskbedömningen görs för en kallvind med 20 graders taklutning i nord sydlig riktning (N-S). Kallvinden bedöms som skadad om en eller båda takytorna får mögelpåväxt.

Kostnadsanalysen baseras på att då mögelpåväxt förekommer tillkommer kostnad för sanering/slipning, lufttätning och växling till styrd ventilation. Denna kostnad är satt till 38 400:- och är bedömt av ett saneringsföretag. Siffran är eventuellt satt något lågt, enstaka fall som rapporterats av byggföretagen i projektet talar dock om kostnader som är upp till 40% högre.

Kostnaden för skada slås ut på alla byggnader. Då risken är 100% tillkommer en kapitalkostnad på 38 400:- på all byggnader. Detta är en slags extra *skadeinvesteringskostnad* som kan läggas på den övriga investeringskostnaden för att bygga kallvinden. Alternativt kan man se på effekten utifrån en årlig driftskostnad motsvarande räntan på grundinvesteringen och på detta extra belopp.

Driftskostnad för el är satt till 100 kr/år för fallet med styrd ventilation. För konstruktion med ett direkt användande av styrd ventilation, bedöms livslängden på utrustningen vara 15 år. Kostnadsmissigt leder detta till en avskrivningskostnad på utrustningen på 500:-/år.

Ser man på resultaten där skadeinvesteringskostnaden i snitt läggs till grundinvesteringen ligger totalen på 114 780:- för den konventionella kallvinden (Alt 1.), 97 975-113 335:- för isolerat tak i Göteborg, , 94 135-101 815:- för isolerat tak i Stockholm, och 88 427:- för styrd ventilation på båda orterna.

Då driftskostnaden istället analyseras ger den styrda ventilationen lägst årskostnad på 4 639:- med ett spann upp till 5 739:- för den konventionella vinden.

Tabell 3: Totalkostnad för vindsbjälklag och tak (104 m²) för villafallet. Alternativet med dagens konventionella taklösning (Alt 1.), begränsad ventilation av vind och 100 mm isolering på taket (Alt 2.) respektive fallet med styrd ventilation (Alt 3.). Analyserna är gjorda för både Göteborg (GBG) och Stockholm (STO). Bjälklagets täthet, fuktillskott inomhus varierar. Taklutningen är 20 grader och orienteringen är nord sydlig (N-S). Kallvinden bedöms som skadad om en eller båda takytorna får mögelpåväxt.

| Alternativ | Grund- Investering | Drifts- kostnad | Ort | Täthet Fuktill- skott | Risk MI>1 | Skade- investering | Reduktion i energibehov (kWh) | Årlig kostnad (kr) |
|------------------------|-----------------------|--------------------|-----|-----------------------------|--------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1 Standard | 76380 | 0 | GBG | - | 100 | 38400 | 0 | 5 739 |
| 2 Isolerat tak | 94135 | 0 | GBG | God lågt | 10 | 3840 | 10 (1%) | 4 889 |
| 2 Isolerat tak | 94135 | 0 | GBG | Ej god högt | 50 | 19200 | 10 | 5 657 |
| 2 Isolerat tak | 94135 | 0 | STO | God lågt | 0 | 0 | 10 | 4 697 |
| 2 Isolerat tak | 94135 | 0 | STO | Ej god högt | 20 | 7680 | 10 | 5 081 |
| 3 Styrd ventilation | 88427 (80927) | 600 | - | - | 0 | 0 | 7 (1%) | 4 639 |

Tabell 4: Kostnad per kvadratmeter (SEK/m²) för vindsbjälklag och tak för villafallet. Standardalternativet med dagens konventionella taklösning (Alt 1.), Begränsad ventilation av vind (gavelventiler) och 100 mm isolering på taket (Alt 2.) respektive fallet med styrd ventilation (Alt 3.). Analyserna är gjorda för både Göteborg (GBG) och Stockholm (STO). Bjälklagets täthet, fukttillskott inomhus varierar.

| Alternativ | Grund- Investering kr/m ² | Drifts- Kostnad kr/m ² | Ort | Täthet Fukttill- skott | Risk MI>1 | Skade- investering | Reduktion i energibehov kWh/m ² | Årlig kostnad Kr/m ² |
|------------------------|--|---|-----|------------------------------|--------------|-----------------------|--|---------------------------------------|
| 1Standard | 734 | 0 | GBG | - | 100 | 369 | 0 | 55 |
| 2 Isolerat tak | 905 | 0 | GBG | God lågt | 10 | 37 | 0,10 | 47 |
| 2 Isolerat tak | 905 | 0 | GBG | Ej god högt | 50 | 185 | 0,10 | 54 |
| 2 Isolerat tak | 905 | 0 | STO | God lågt | 0 | 0 | 0,10 | 45 |
| 2 Isolerat tak | 905 | 0 | STO | Ej god högt | 20 | 74 | 0,10 | 49 |
| 3 Styrd ventilation | 850 (778) | 6 | - | - | 0 | 0 | 0,07 | 45 |

Kostnadsanalys av flerfamiljshus i fyra våningar

Det kostnadsanalyserade flerfamiljshuset i fyra våningar har en bjälklagsyta på 10x40=400 m². Grundinvesteringen för produktionen av taket inklusive vindsbjälklaget i betong och isolering är 1 Mkr, dvs 2 500:- /m² bjälklag.

Engångskostnaden för byggfuktsuttorkning bedöms till 58 000:-, 145 SEK/m².

| | |
|--|---------------------------------------|
| Renovering/sanering motsvarar en kostnad på: | 754 100 SEK, 1 885 SEK/m ² |
| Installation av kontrollerad ventilation: | 70 000 SEK, 175 SEK/m ² |
| Tilläggsisolering 10 cm cellplast utvändigt | 48 000 SEK, 120 SEK/m ² |
| Drift av styrd ventilation | 400 SEK 1 SEK/m ² |

Kostnaden för byggnadskonstruktionen för kallvind med styrd ventilation från början bedöms, för enkelhets skull, vara samma som i Alt 1. Till detta kommer kostnaden för styrd ventilationsutrustning.

Grundinvesteringen för:

| | |
|--|--------------------------------|
| Alt 1: 1 000 000:- | 2 500:- /m ² takyta |
| Alt 2: 1 000 000+ 120*400+58 000=1 106 000:- | 2 765:-/ m ² takyta |
| Alt 3: 1 000 000+70 000=1 070 000:- | 2 675:- /m ² takyta |

I kostnaden för taket ingår vindsbjälklaget i betong samt isolering.

Tabell 5: Totalkostnad för vindsbjälklag och tak för flerbostadshuset. Standardalternativet med dagens konventionella taklösning (Alt 1.), begränsad ventilation av vind (gavelventiler) och 100 mm isolering på taket (Alt 2.) respektive fallet med styrd ventilation (Alt 3.). Analyserna är gjorda för både Göteborg (GBG) och Stockholm (STO). Bjälklagets täthet, fukttillskott inomhus varierar.

| Alternativ | Grund- Investering kkr | Drifts- kostnad | Ort | Täthet Fukttill- skott | Risk MI>1 | Skade- investering kkr | Reduktion i energibehov kWh | Årlig kostnad kkr |
|------------------------|------------------------------|--------------------|-----|------------------------------|--------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1 Standard | 1 000 | 0 | GBG | - | 100 | 754 | 0 | 88 |
| 2 Isolerat tak | 1106 | 0 | GBG | God lågt | 10 | 75 | 25 | 59 |
| 2 Isolerat tak | 1106 | 0 | GBG | Ej god högt | 50 | 377 | 25 | 74 |
| 2 Isolerat tak | 1106 | 0 | STO | God lågt | 0 | 0 | 25 | 55 |
| 2 Isolerat tak | 1106 | 0 | STO | Ej god högt | 20 | 151 | 25 | 63 |
| 3 Styrd ventilation | 1070 (1000) | 5,1 | - | - | 0 | 0 | 28 | 54 |

Tabell 6: Totalkostnad per kvadratmeter (SEK/m²) för vindsbjälklag och tak för flerbostadshuset. Standardalternativet med dagens konventionella taklösning (Alt 1.), begränsad ventilation av vind (gavelventiler) och 100 mm isolering på taket (Alt 2.) respektive fallet med styrd ventilation (Alt 3.). Analyserna är gjorda för både Göteborg (GBG) och Stockholm (STO). Bjälklagets täthet, fukttillskott inomhus varierar.

| Alternativ | Grund- Investering kr/m ² | Drifts- Kostnad kr/m ² | Ort | Täthet Fukttill- skott | Risk MI>1 | Skade- investering kr/m ² | Reduktion i energibehov kWh/m ² | Årlig kostnad kr/m ² |
|------------------------|--|---|-----|------------------------------|--------------|--|--|---------------------------------------|
| 1 Standard | 2 500 | 0 | GBG | - | 100 | 1 885 | 0 | 219 |
| 2 Isolerat tak | 2 765 | 0 | GBG | God lågt | 10 | 188 | 0,06 | 147 |
| 2 Isolerat tak | 2 765 | 0 | GBG | Ej god högt | 50 | 942 | 0,06 | 185 |
| 2 Isolerat tak | 2 765 | 0 | STO | God lågt | 0 | 0 | 0,06 | 138 |
| 2 Isolerat tak | 2 765 | 0 | STO | Ej god högt | 20 | 377 | 0,06 | 157 |
| 3 Styrd ventilation | 2 575 (2 500) | 12,7 | - | - | 0 | 0 | 0,06 | 135 |

7. Diskussion

Det teoretiska analyserna ovan visar att riskerna med mögelpåväxt är generellt lägre i Stockholm än i Göteborg. Isolerat tak ger lägre risk än oisolerat tak. Styrd ventilation ger en säker kallvind. Ett lågt fukttillskott inomhus och ett lufttätt hus och vindsbjälklag ger lägre risk.

Kostnadsmissigt är det inte stora skillnader mellan de studerade alternativen. Detta är speciellt fallet då drifts- och skadeåtgärds kostnaderna räknas in. De direkta investeringskostnaderna är som störst 905 kr/m² och som lägst 734 kr/m² i villafallet. För fallet med flerbostadsfallet är spannet 2500-2765 kr/m², innefattande även betongbjälklaget och isolering.

Det är rationellt att satsa på en enkel lösning som är säker. Med styrd ventilation kan uttorkningen av byggfukt klaras utan ytterligare installationer. Den ger en klimatsäker framtidslösning. Den är okänslig för beständighetsproblem med lufttäthet samt bruket av byggnaden. Självfallet förutsätter detta att systemet ska larma vid driftsavbrott t ex då fläkten slutar fungera och att detta åtgärdas tämligen omgående.

Isolerat tak ger ingen helt fuktsäker teknisk lösning. Den kan dessutom fungera olika bra och säkert i olika delar av landet och för olika orientering på byggnaden, se Bilaga 3.

8. Slutsatser

Från projektet kan följande slutsatser dras:

- För att öka fuktsäkerheten ska kallvindskonstruktionen generellt utformas enligt: lufttäta vindsbjälklag, byggfukten ska torkas ut så fort som möjligt under byggtiden, väl ventilerade bostäder, helst undertryck i bostaden relativt kallvinden.
- Dagens konventionella lösning med självdragsventilation vid takfot alt med gavelventilation är inte fuktsäker, ej heller den med reducerad takfotsspalt. Den är dock säkrare längre norrut i landet.
- Isolerat tak ger en något fuktsäkrare teknisk lösning än den konventionella kallvinden med råspont utan ovanliggande isolering. Den fungerar dock olika bra i olika delar av landet och för olika orientering på byggnaden.
- Styr ventilation utgör en robust teknisk lösning som kan klara spridning i arbetsutförande och fuktillskott inomhus samt framtida klimat.
- Det är rationellt att behålla merparten av den tekniska lösningen med klassisk kallvinden som bygger på råspont och tätskikt enbart och därmed slippa förändra takets arkitektoniska kvaliteter eller konstruktionstekniska fördelar.
- Styr ventilation är den säkraste och mest ekonomiska tekniska lösningen utifrån de analyser som gjorts, speciellt för Göteborg och orter söderut.
- För flerfamiljshus är det rationellt med en styr ventilation av brandtekniska skäl.

9. Framtida forskning

De tekniska lösningar som studerats i denna rapport lämnar ett antal ytterligare frågor att studera framöver, t.ex.:

- Hur fungerar cellplast på taket rent hållfasthetsmässigt, beständighet, fuktsäkerhet mm. ?
- Hur ska membranlösningar riskbedömas – vattenackumulation, avrinning mot takstolar, mögelrisk mm.?
- Hur kan man klassa olika klimat för att veta om konstruktionslösningarna är säkra? Vi har sett skillnader mellan Göteborg och Stockholm, men vad beror det på? Räcker årsmedeltemperaturen som förklaring? Hur inverkar vindriktningen?
- De något märkliga resultat som visar att det kan bli sämre i Göteborg med tjockare isolering på taket –Varför?
- ...

Referenser

Ahrenens, C., Borglund E. 2007. Fukt på kallvindar. Master thesis 2007:11. Chalmers, Building Physics.

Boverket, the National Board of Housing, Building and Planning. 2009. Så mår våra hus. Available on www.boverket.se

Hagetoft C-E, Sasic Kalagasidis A. Ahrens C., Borglund E. Effekter på funktion och kostnad av styrd ventilation av kallvindar. Bygg&Teknik, No 4, 2007.

Hagetoft C-E, Sasic Kalagasidis A. 2009. Effekter å funktion och kostnad av styrd ventilation av kallvindar. FoU-Väst Rapport 0906.

Hagetoft C-E, Sasic Kalagasidis A. Styrd ventilation av kallvindar – Uppföljning av fältförsök. Bygg&Teknik, No 4, 2009.

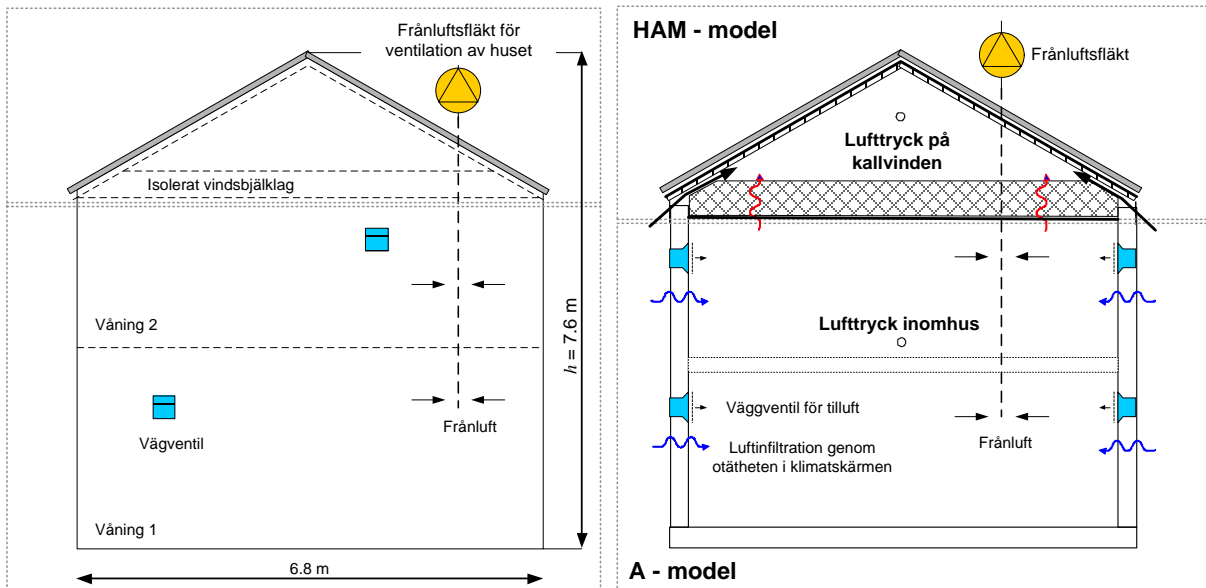
Stein, Hagetoft et al. Energieffektiviseringar – vilka risker finns och hur ska de hanteras. Bygg&Teknik, No 2, 2011.

Sasic Kalagasidis A., Moussavi Nik V., Kjellström E., Nielsen A. Hygro-thermal response of a ventilated attic to the future climate load in Sweden. 4th International Conference on Building Physics. June, 2009. Istanbul, Turkey.

Bilaga 1: Luftflödesmodell för hus med kallvind

1. Husmodell från Etapp II

Husmodellen bygger på en tvåplansvilla med kallvind med sadeltak. Husets dimensioner samt ventilationssystem visas i figur 1. Kallvindsmodellen i Simulink består av två delar: HAM-modell och A-modell. Den första beräknar temperatur och fukthalt i alla ytor och material, samt i luft som tillhör kallvinden. Den andra modellen beräknar lufttrycket inomhus, varav innetemperatur och ånghalt antas som standardvärden enligt EN 15206. Samma modelleringstillvägagångssätt används vid simulering av flerbostadshus (se bilaga 3).



Figur 1 Husmodell från Etapp II. Komponenter i husets ventilationsystem.

2. Luftflöde i huset och på kallvinden

2.1. Luftflöde genom fläkt

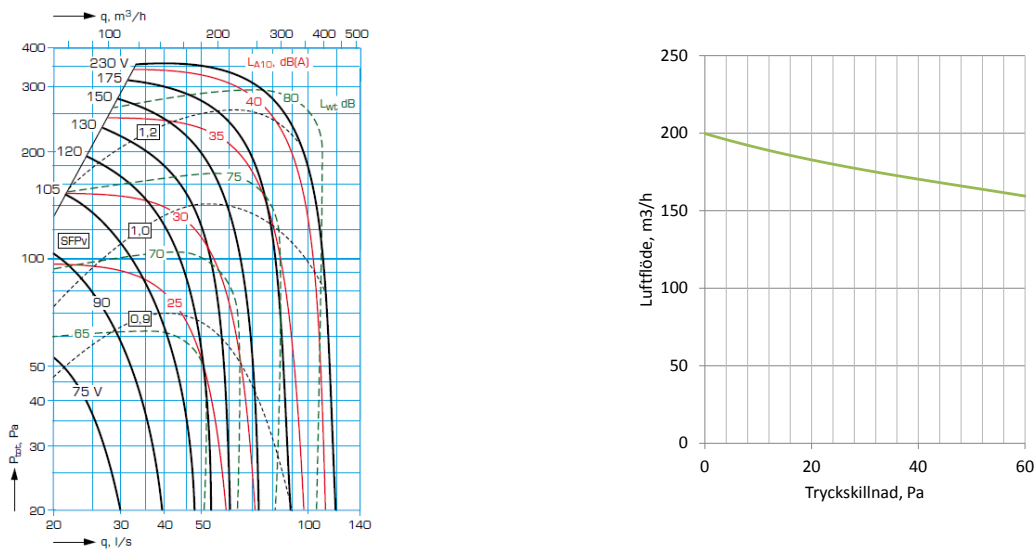
En mekanisk frånluftsventilationssystem antas i bostaden. Fläkten för ut $165 \text{ m}^3/\text{h}$ luft vid 50 Pa^1 tryckskillnad. Fläktens flödeskaraktistik baseras på takfläktsmodell "JBFG" från FläktWood med $\text{SFP}_v = 1.1 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, (se Figur 2).

2.1. Luftflöde genom luftventiler

Frisk luft till bostaden tillförs genom åtta väggventiler av typ FRESH 90 (Fresh AB). Det finns fyra ventiler i varje vägg, två per våning, enligt Figur 1. Luftflödet genom ventilen beräknas enligt:

$$Q_{vent} = 8 \cdot \Delta P^{0.5} \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

¹ när utomhus- och inomhustemperatur är lika och det är vindstilla



Figur 2 Tv: FläktWood JFBG flödeskaraktistik. Th: Fläktens flödeskaraktistik som används i simuleringarna baseras på FläktWood JFBG med SFP=1.1 kW/(m³/s).

2.2. Luftinfiltration genom luftläckage i klimatskärmen

Klimatskärmens lufttätet beskivs med ett n_{50} värde, vilket visar antalet luftomsättningar vid 50 Pa tryckskillnad mellan inom- och utomhusluft. Utifrån n_{50} värdet beräknas klimatskärmens genomsnittliga läckagekoefficient enligt:

$$\bar{k} = \frac{n_{50} \cdot V}{50^\beta \cdot A \cdot (3600)}, \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}) / (\text{Pa}^\beta \cdot \text{m}^2) \quad (2)$$

med

V – husets volym, m³

A – klimatskärmens area, m²

n - flödesexponent, med ett standard värde på 0.65

n_{50} mäts normalt med hjälp av Blower door teknik, vilken är en bra och relativ enkel teknik för att mäta husets lufttätet. Nackdelen med metoden är att den inte säger någonting om hur otätheterna fördelas i klimatskärm, vilket behövs i simuleringarna för att kunna beräkna luftinfiltration genom klimatskärm. Man måste alltså anta en fördelning av otätheterna i klimatskärm genom att t ex dela upp det totala n_{50} värdet för huset i andelen som strömmar genom ytterväggar och tak, n_{50-w-i} och n_{50-c} :

$$n_{50} = \sum_i n_{50-w-i} + n_{50-c}, \text{ oms/h} \quad (3)$$

Vidare kan man beräkna genomsnittliga läckagekoefficienter för varje del av klimatskärm (ytterväggar och tak):

$$k_{w-i} = \frac{n_{50-w-i} \cdot V}{50^\beta \cdot A_{w-i} \cdot (3600)} \text{ och } k_c = \frac{n_{50-c} \cdot V}{50^\beta \cdot A_c \cdot (3600)} \quad (4)$$

Observera att följande gäller

$$A \cdot \bar{k} = \sum_{i=1-4} A_{w_i} \cdot k_{w_i} + A_c \cdot k_c \quad (5)$$

$$A = \sum_{i=1-4} A_{w_i} + A_c \quad (6)$$

För att underlätta av ingångsdata i modellen, används koefficienter b_i :

$$A \cdot \bar{k} = k_{w_1} \cdot \left(\sum_{i=1-4} A_{w_i} \cdot b_i + A_c \cdot b_5 \right) \quad (7)$$

Koefficienterna b visar hur genomsnittliga luftläckagekoefficienter av delar av klimatskärmen förhåller sig till k_{w_1} :

$$k_{w_2} = b_2 \cdot k_{w_1}, \quad k_{w_3} = b_3 \cdot k_{w_1}, \quad k_{w_4} = b_4 \cdot k_{w_1}, \quad k_c = b_5 \cdot k_{w_1} \quad (8)$$

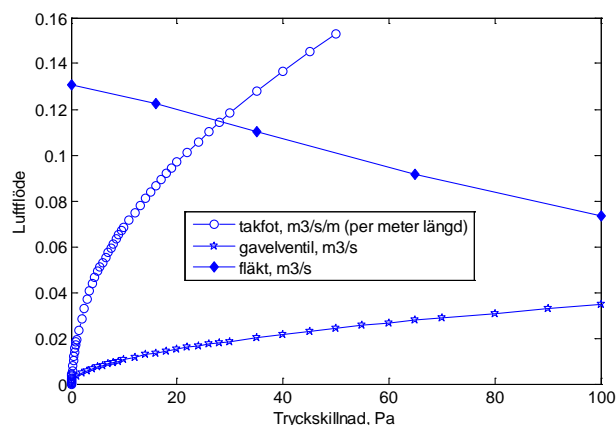
När b_i ändras, ändras också k_{w_i} och k_c , varav \bar{k} förblir densamma. Den senare ändras först när man ändrar n_{50} värdet för hela huset. Med hjälp av b_i kan effekterna av en varierande lufttäthet hos innertaket/vindsbjälklaget undersökas oberoende av husets totala lufttäthet. Om man antar lägre luftläckage i innertaket än i ytterväggarna, blir $b_5 < 1$. Det är dock möjligt att tilldela värden större än 1, i det fall innertaket har visat sig vara mer otät än ytterväggarna. Ett exempel på hur b_i och n_{50} värdena antas i simuleringar visas i tabellen nedan:

Tabell 1

| E vägg | N vägg | V vägg | S vägg | Innertak / Vindsbjälklag | Total |
|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|----------|
| b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0.25 | |
| $n_{50_w_1}$ | $n_{50_w_2}$ | $n_{50_w_3}$ | $n_{50_w_4}$ | n_{50_c} | n_{50} |
| 0.35 | 0.56 | 0.35 | 0.56 | 0.18 | 2 |

2.3. Luftflöde genom kallvinden

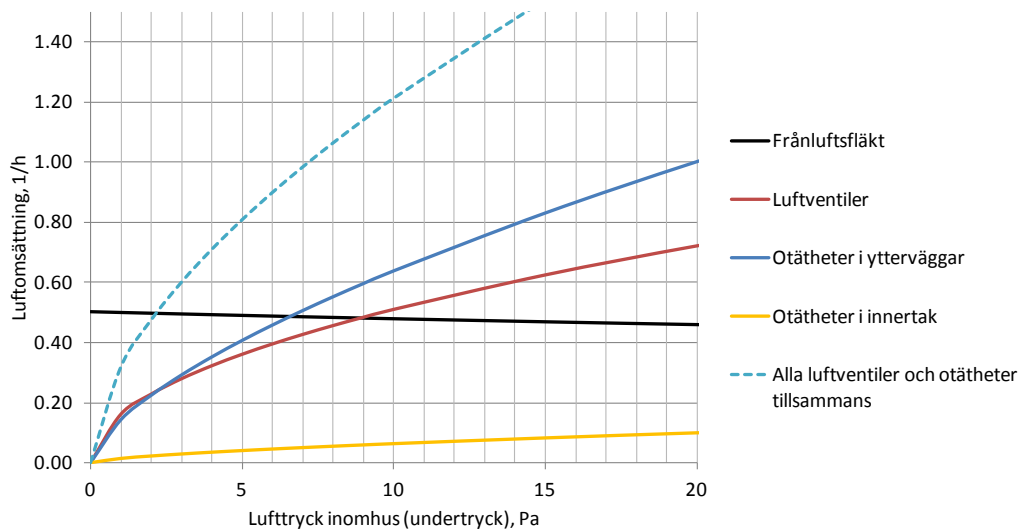
Kallvindsventilation sker genom ca 20 mm breda öppningar längst takfoten. Luftflödet genom dessa öppningar har ett icke-linjärt samband mot tryckskillnaden över öppningarna, som visas i Figur 3.



Figur 3 Luftflödeskaraktäristik av ventilationsöppningar längs takfot och genom gavelventil, enligt mätningarna av Mattsson (2007). Flödeskaraktäristik av fläkten i kallvindar med styrd ventilation (ett exempel).

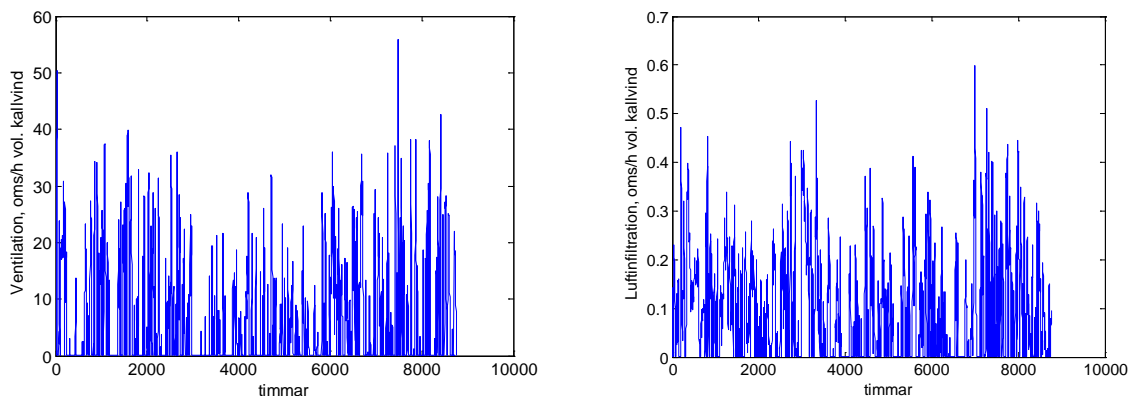
3. Luftryck inomhus och på kallvinden

Luftrycket inomhus är ett resultat av det mekaniska ventilationssystemet i huset, vindpåverkan på huset, temperaturskillnader mellan ute och inne samt av luftrycket i angränsande områden såsom kallvind. Luftryck beräknas utifrån en massbalans baserade på alla luftflöden till eller ifrån huset. Diagrammet i Figur 4 visar en grafisk metod för att hitta luftrycket inomhus. Skärningspunkten mellan fläktens och luftventilernas flödeskaraktistik ligger på 9 Pa, vilket är ett undertryck då det råder en massabalans mellan luftflödena (ca 0.48 oms/h). Det är undertrycket som skulle vara i ett absolut lufttät hus och när det är samma temperatur ute och inne. Tar man hänsyn till flödeskaraktistiken av otätheterna i klimatskärmen, flyttas skärningspunkten till 2 Pa undertryck, vilket betyder att fläktens kapacitet räcker till att hålla ett mindre undertryck i huset.



Figur 4 Sammanställning av luftflödeskaraktistik av fläkten, luftventilerna och otätheterna i klimatskärmen

Vid blåsig väder kan det hända att fläktens kapacitet inte räcker till för att hålla ett större undertryck inomhus än det som skapas av vinden mot kallvinden. Då går det ut en del av frånluften som luftläckage till vindsbjälklaget, dvs. luftexfiltration från bostaden till kallvinden. För att kunna "fånga" sådana moment i simuleringar, hanteras otätheterna i klimatskärmen som en del av husets ventilationssystem. På liknande sätt beräknas luftryck på kallvinden.



Figur 5 Tv: Beräknad luftomsättning på en kallvind med ventilation genom takfot. Th: Beräknad luftexfiltration genom vindsbjälklag till samma kallvind

Den mest komplexa delen i luftmodellen refererar till luftflödet genom klimatskärmens otätheter och på grund av temperaturskillnader mellan ute och inne (skorstenseffekt) eftersom den kräver särskilda matematiska modeller och programmeringsrutiner som tar hänsyn till nollnivåns läge i huset. Mer detaljer om modellen kan hittas i (Hagentoft, Sasic Kalagasidis, 2012).

Referenser

FläktWoods 2009. Frånluftsfläkt JBFG, tekniska data. 8500 SE 2009.09.

Fresh AB. www.fresh.se. Augusti 2013.

Hagentoft CE, Sasic Kalagasidis A. 2012. Chapter: Hygrothermal Conditions and Mould Growth Potential in Cold Attics: Impact of Weather, Building System and Construction Design Characteristics in *Building Pathology and Rehabilitation*. Editors: Freitas, V. Peixoto de, Costa, Anibal, Delgado, João M.P.Q. Springer.

Mattsson, B.2007: Studies on building air leakage—a transient pressurisation method, measurements and modelling. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Building Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg .

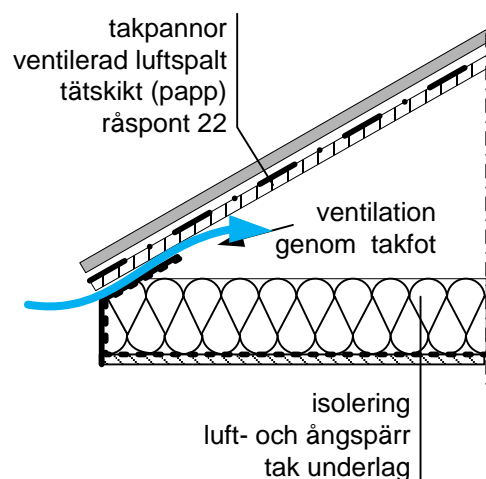
Bilaga 2: Kvalitativ riskbedömning av mögelpåväxt för alternativa tekniska lösningar för kallvindskonstruktioner

Syftet med funktionsanalyser avseende fukt som presenteras nedan är att ge en uppfattning om risken för mögelpåväxt på underlagstak i olika kallvindskonstruktioner vid olika driftsförhållanden.

Bedömning av risken för mögelpåväxt görs med hjälp av mögel index, MI, och genom jämförelser av MI för olika kallvindskonstruktioner. En kallvindskonstruktion anses riskabel om MI på ett eller flera underlagstak betydligt överstiger värdet 1 och/eller visar tendens i att öka i värde över tid. Vid varje jämförelse anges en kallvindskonstruktion som referenskonstruktion och dess MI används som referensvärde. Om MI i en alternativ kallvindskonstruktion är högre än MI i referenskallvindskonstruktion, anses den alternativa kallvindskonstruktionen mer riskabel och rekommenderas därför inte som en bättre teknisk lösning. Däremot om en alternativ teknisk lösning sänker MI under värdet 1, rekommenderas den som en säker teknisk lösning. Lovande tekniska lösningar kompletteras med ytterligare analyser, vilka visar risken vid t ex olika orienteringar eller andra luftläckage genom vindsbjälklaget (se bilaga 3).

Konventionell naturligt ventilerad kallvind med sadel tak, med takytor som lutar mot norr och söder, 20 mm bredd ventilationsöppning längs takfötter, 22 mm råspont i underlagstak och minerallull som isolering i vindsbjälklaget, används som referenskonstruktion.

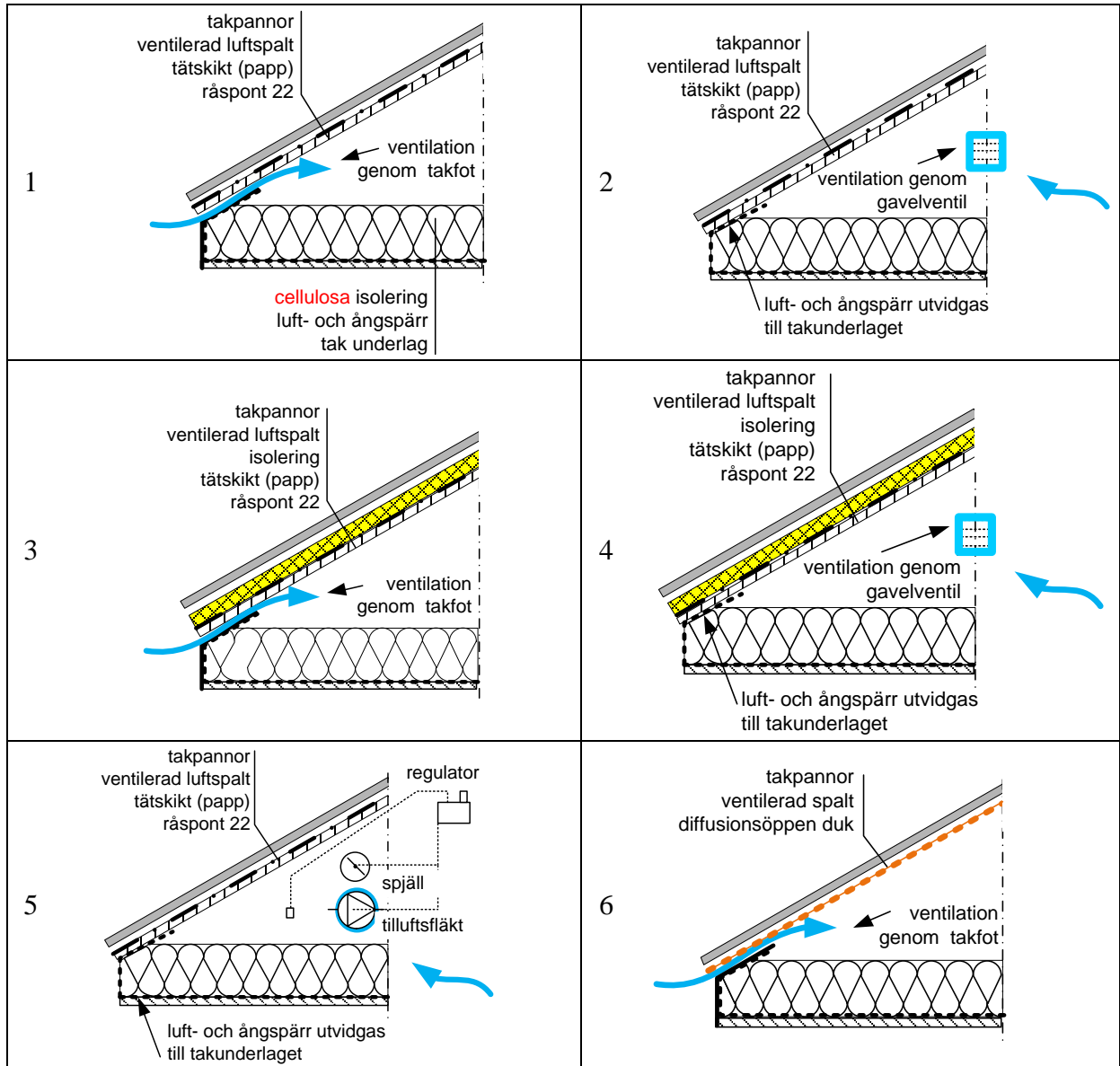
Referenskonstruktion



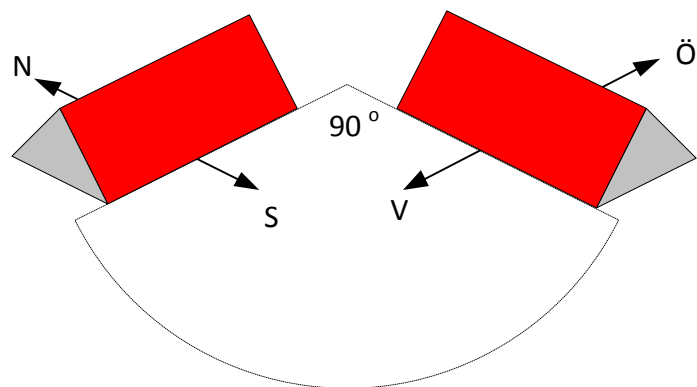
Figur 1 Princip skiss av referenskonstruktion

Följande tekniska alternativ har studerats:

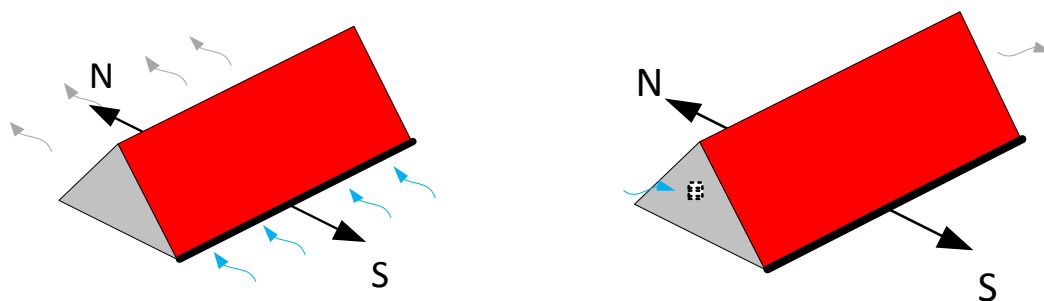
1. Konventionell naturligt ventilerad kallvind med fuktbuffrande isoleringsmaterial (cellulosa)
2. Konventionell naturligt ventilerad kallvind med ventilation genom gavelventiler
3. Isolering av yttertak med ventilation genom takfötter
4. Isolering av yttertak med ventilation genom gavelventiler
5. Mekaniskt ventilerad kallvind med kontrollerad ventilation
6. Konventionell naturligt ventilerad kallvind med diffusionsöppet undertak



Figur 2 Principskisser av alternativa tekniska lösningar



Figur 3 Definition of takets riktning.



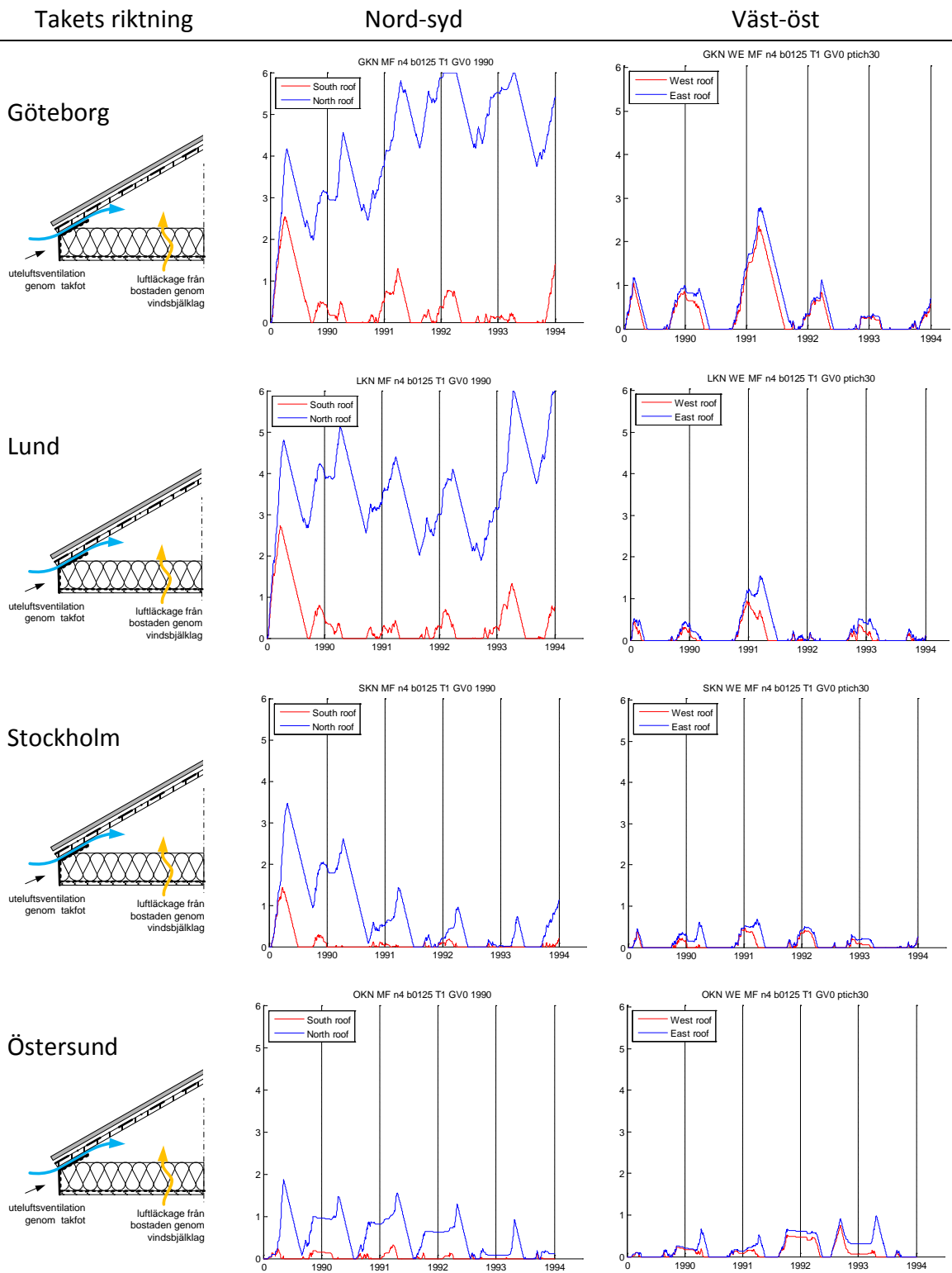
Figur 4 Flödesväg för ventilationsluft genom kallvinden: (t.v.) vid ventilation genom takfot, (t.h.) vid ventilation genom gavelventil.

Innehåll

| | |
|---|----|
| 1. Fuktanalys av referenskallvindskonstruktion..... | 5 |
| 1.1. Effekt av geografiskt läge | 5 |
| 1.2. Effekt av klimatår..... | 9 |
| 1.3. Effekt av luftläckage genom taket | 10 |
| 2. Alternativ 1: fuktbuffrande isoleringsmaterial i vindsbjälklag | 11 |
| 3. Alternativ 2: uteluftsventilation genom gavelventiler..... | 12 |
| 4. Alternativ 3: isolering i yttertak | 13 |
| 4.1. Effekt av geografiskt läge | 14 |
| 4.2. Effekt av isolerings tjocklek i yttertak | 14 |
| 4.3. Effekt av framtida klimat ändringar..... | 15 |
| 5. Alternativ 4: isolering i yttertak vid naturlig ventilation genom gavelventiler..... | 16 |
| 6. Alternativ 5: kontrollerad mekanisk ventilation..... | 17 |
| 7. Alternativ 6: diffusionsöppen duk som underlagstak..... | 18 |
| 7.1. Effekt av reducerad ventilation och luftläckage | 19 |
| 7.2. Effekt av takets orientering och geografiskt läge..... | 20 |
| 7.3. Effekt av luftläckage | 21 |

1. Fuktanalys av referenskallvindskonstruktion

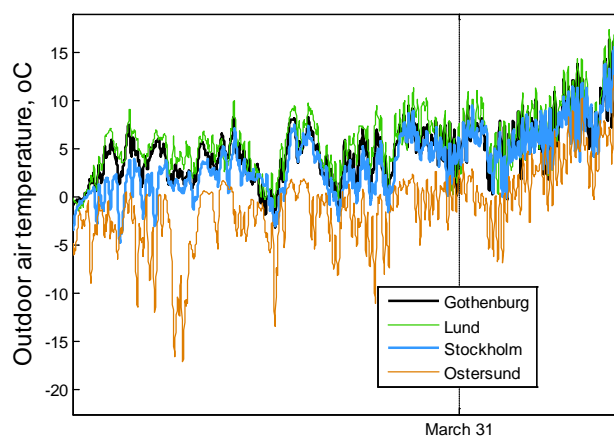
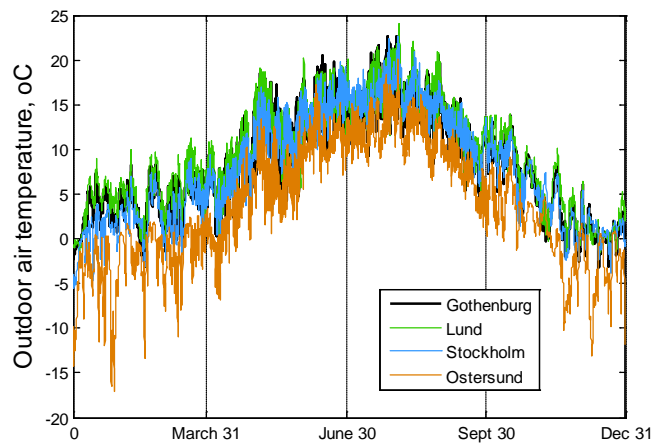
1.1. Effekt av geografiskt läge



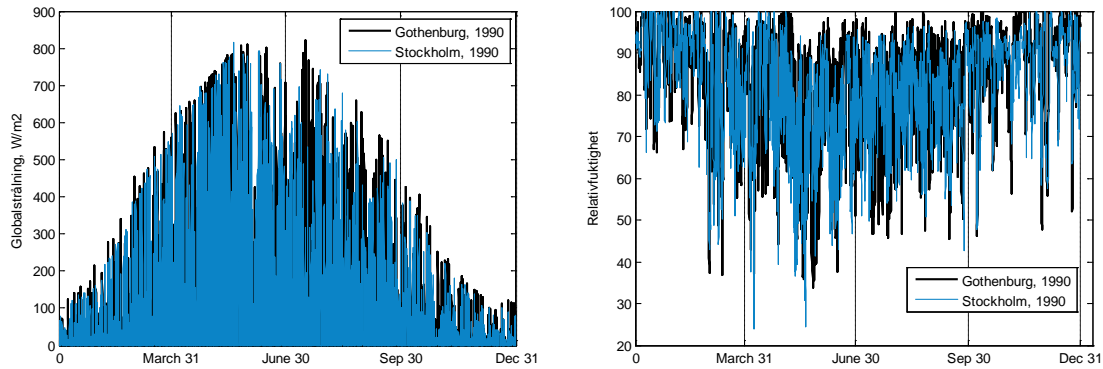
Figur 5

Det råder ett tydligt samband mellan klimatförhållanden i olika delar av landet och fuktnivåerna på en kallvind. I södra och sydvästra Sverige (Lund och Göteborg) är fuktnivåerna inte tillfredsställande eftersom MI för det norra taket kraftigt överstiger värdet 1. Dessutom, fungerar kallvindar med väst-öst takriktning bättre än dem med norr-syd orientering, oavsett geografiskt läge.

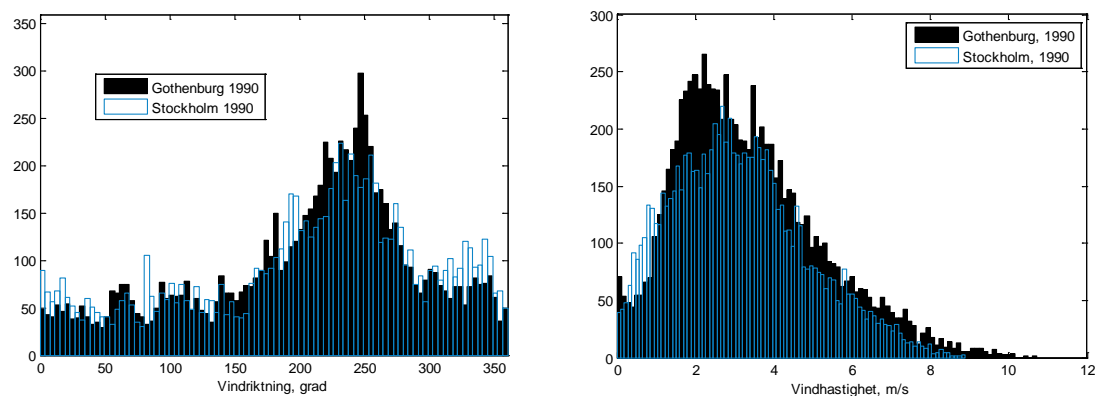
En närmare titt på klimatparametrarna i Göteborg och Stockholm såsom utetemperatur (figur 6), solstrålningsintensitet, relativ fuktighet (figur 7), samt vindhastighet och vindriktning (figur 8) visar att största skillnaden mellan orten beror av utetemperaturen. Övriga klimatparametrar ger ungefär samma påverkan både avseende intensitet och fördelning över året. I figur 8 kan man se att vindar med väst och sydväst riktning dominerar i båda orten. Detta ger en bättre ventilation av kallvindar med väst-öst orientering och med ventilation genom takfot, eftersom takfoten ligger ofta på den anblåsta sidan, dvs. vinkelrätt mot vindriktning (se i figur 4).



Figur 6 T.v. Geografiskt läge av de fyra studerade klimatförhållanden. T.h.: utomhustemperatur för 1990 i de fyra studerade klimatområdena.

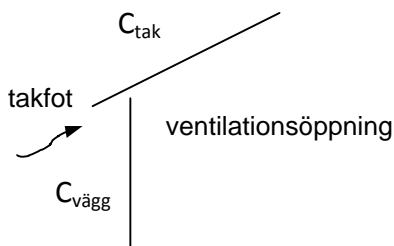


Figur 7 T.v. Relativ fuktighet i Göteborg och Stockholm i 1990. T.h. Global strålning i Göteborg och Stockholm i 1990.



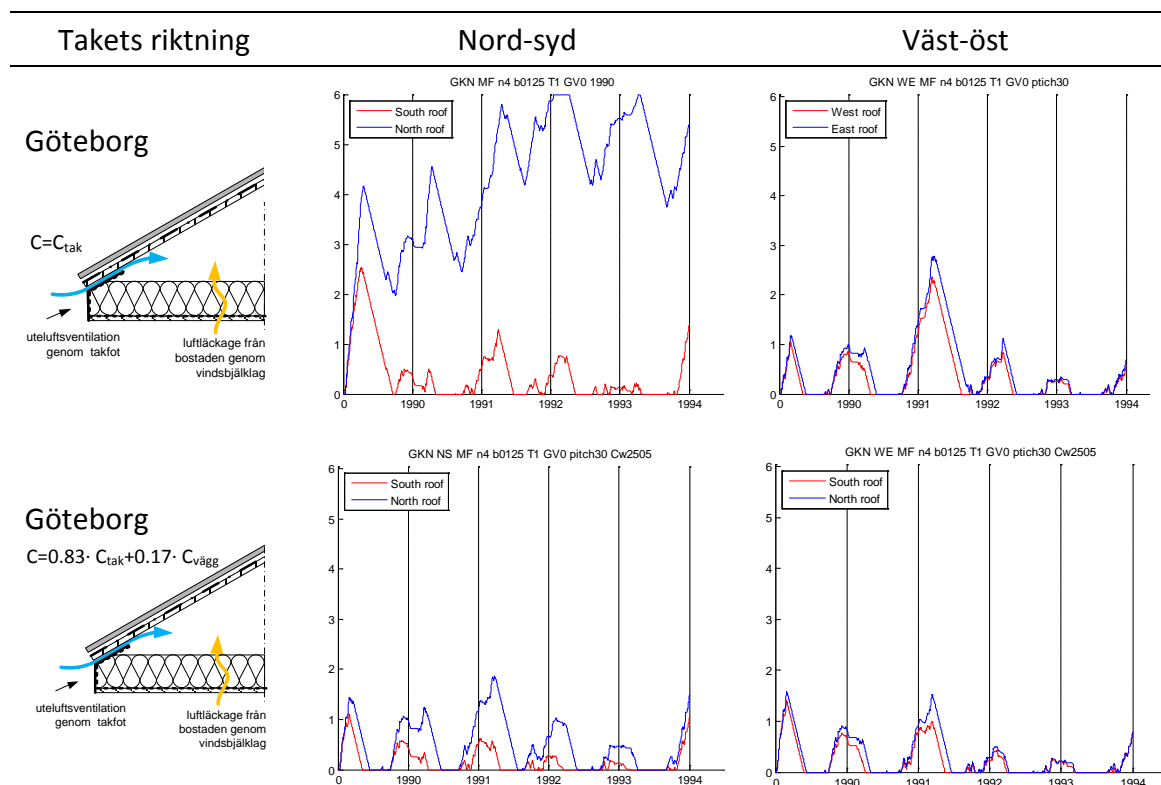
Figur 8 Histogram av vindriktning i Göteborg och Stockholm i 1990. 0 grad = syd, 180 grad = norr, 90 grad = öst, 270 grad = väst.

Följande resultat hjälper också till att förstå betydelsen av kallvindsventilationen. Det råder en viss osäkerhet i modellering av lufttrycket vid takfoten. Lufttryck framför fasaden och yttretaket bestäms med hjälp av vindtryckscoefficienter. I litteraturen redovisas vindtryckscoefficienter för vertikala, horisontella och sneda ytor. Takfoten ligger mellan en sned yta (takyta) och en vertikal yta (vägg), såsom visas i figur nedan.



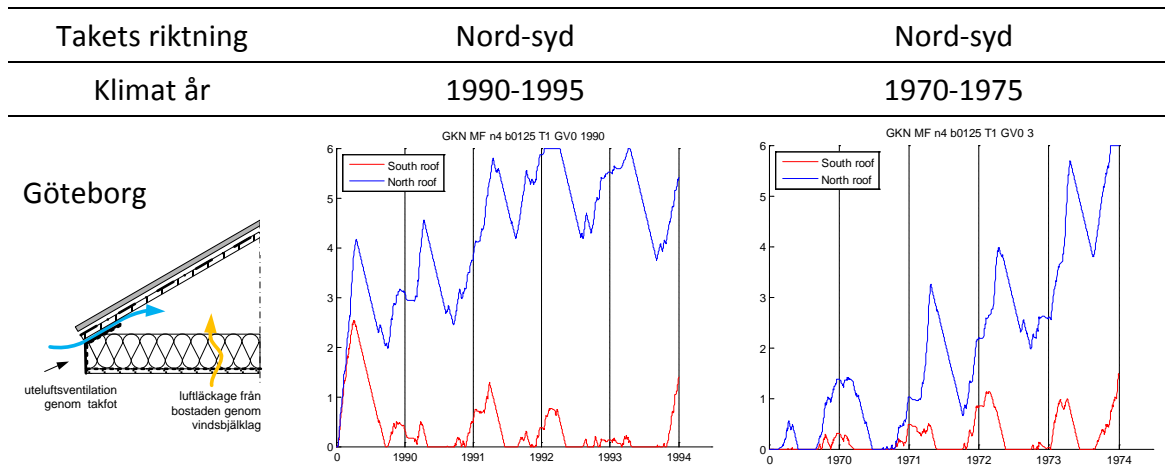
Vindtryckscoefficienter för sneda ytor (C_{tak}) är som regel lägre än för vertikala ytor ($C_{vägg}$) och då blir lufttrycket framför en anblåst sned yta lägre än framför en anblåst vertikal yta. Eftersom takfoten i de flesta fall täcker ventilationsöppningen, antas det i simuleringen att vindtryckscoefficienter för takfoten är samma som för en sned yta, d.v.s. $C = C_{tak}$. Vid en annan bedömning av vindtryckscoefficienten, t ex. genom uttrycket $C = 0.83 \cdot C_{tak} + 0.17 \cdot C_{vägg}$, ökar den beräknade ventilationen genom kallvinden. Detta antagandet ger ett annat beräkningsresultat avseende mögelrisk, vilket illustreras nedan. Effekt av

vindtryckscoeffienterna är viktigare för kallvindar med norr-syd orientering. För att erhålla en säkerhetsmarginal, tillämpas i simuleringar $C=C_{\text{tak}}$.



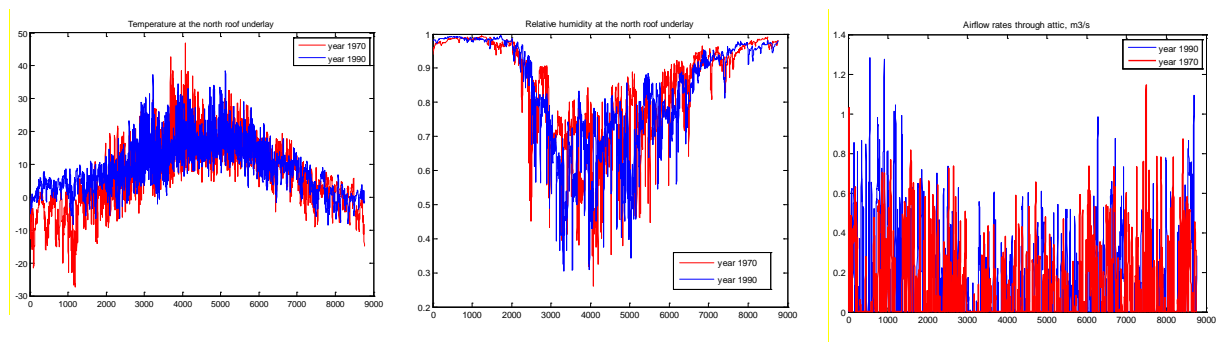
Figur 9 Beräknad MI i kallvindar vid olika antagningar för vindtryckscoeffienter.

1.2. Effekt av klimatår



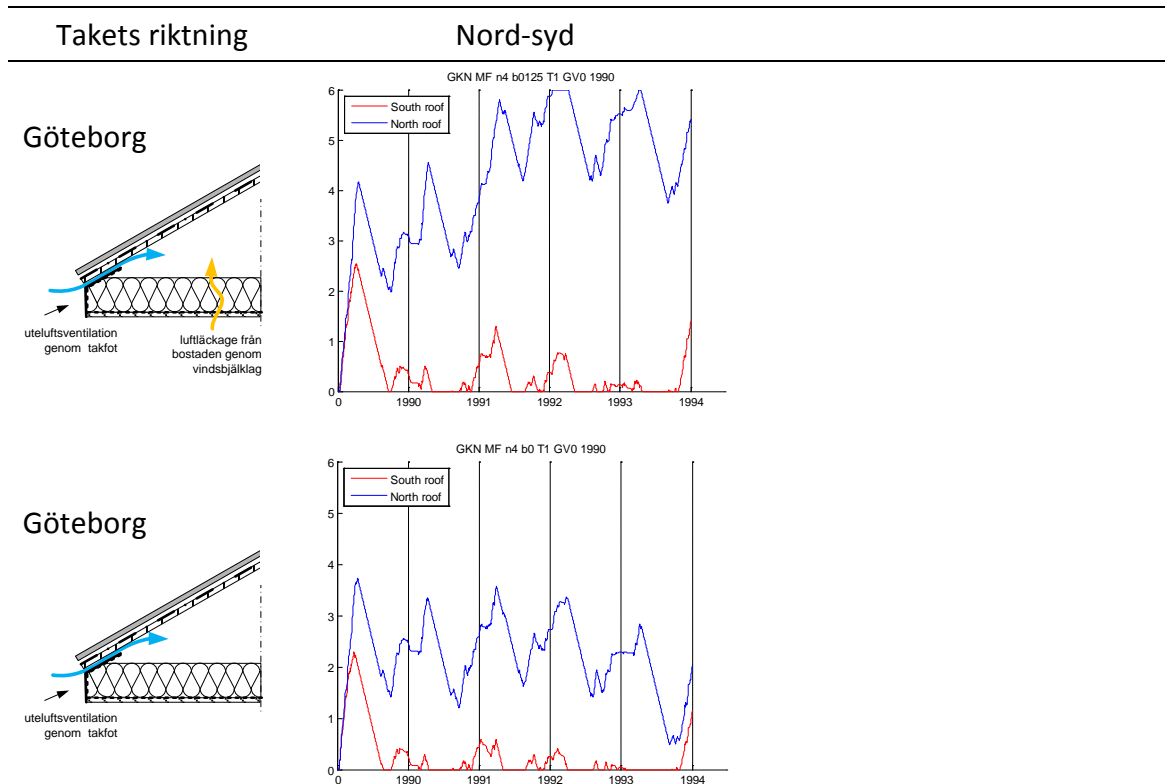
Figur 10 Beräknad MI i kallvindar för olika klimat år.

Det låga MI i början av 70-talet tyder på väsentligt olika klimatförhållanden som antingen bidrar till en effektiv uttorkning av byggfukten eller förhindrar mögelpåväxt. En närmare analys av beräkningsresultaten för de studerade fallen, figur 10, avslöjar att MI håller sig till låga värden mest p.g.a. låga utomhustemperaturer. Vid samma tillfällen är relativ fuktighet vid underlagstaket approximativt lika i båda fallen vilket tyder på samma mängd fukt i underlagstaket. Även ventilationsflödet genom kallvinden är något lägre i början av 70-talet än under 90-talet.



Figur 11 T.v. och i mitten: Temperatur och relativ fuktighet vid ytan av underlagstaket, på norra taksidan, under 1970 och 1990. T.h.: totalt ventilationsflöde genom kallvinden under 1970 och 1990.

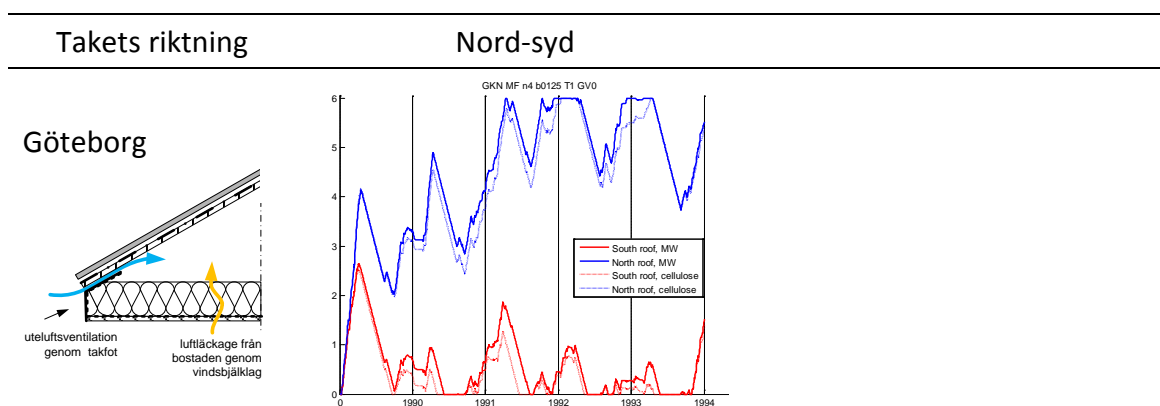
1.3. Effekt av luftläckage genom taket



Figur 12 Beräknad MI i kallvindar med och utan luftläckage i vindsbjälklag (ovan/under).

Resultat i Figur 12 visar att en kallvind med ett lufttät vindsbjälklag har lägre MI än en likadan kallvind med ett otätt vindsbjälklag. Dock är inte fuktnivåerna på den norra taksidan tillfredställande eftersom MI är ca 2 i snitt. Analysen i kapitel 1.1 visar att uteluftsventilationen kan vara en avgörande faktor för kallvindens fuktsäkerhet i Göteborgsklimat. Byggfukt samt fuktomfördelning mellan södra och norra taket i kombination med otillräcklig uteluftsventilation förklarar dessa något sämre resultat än man kanske förväntat sig.

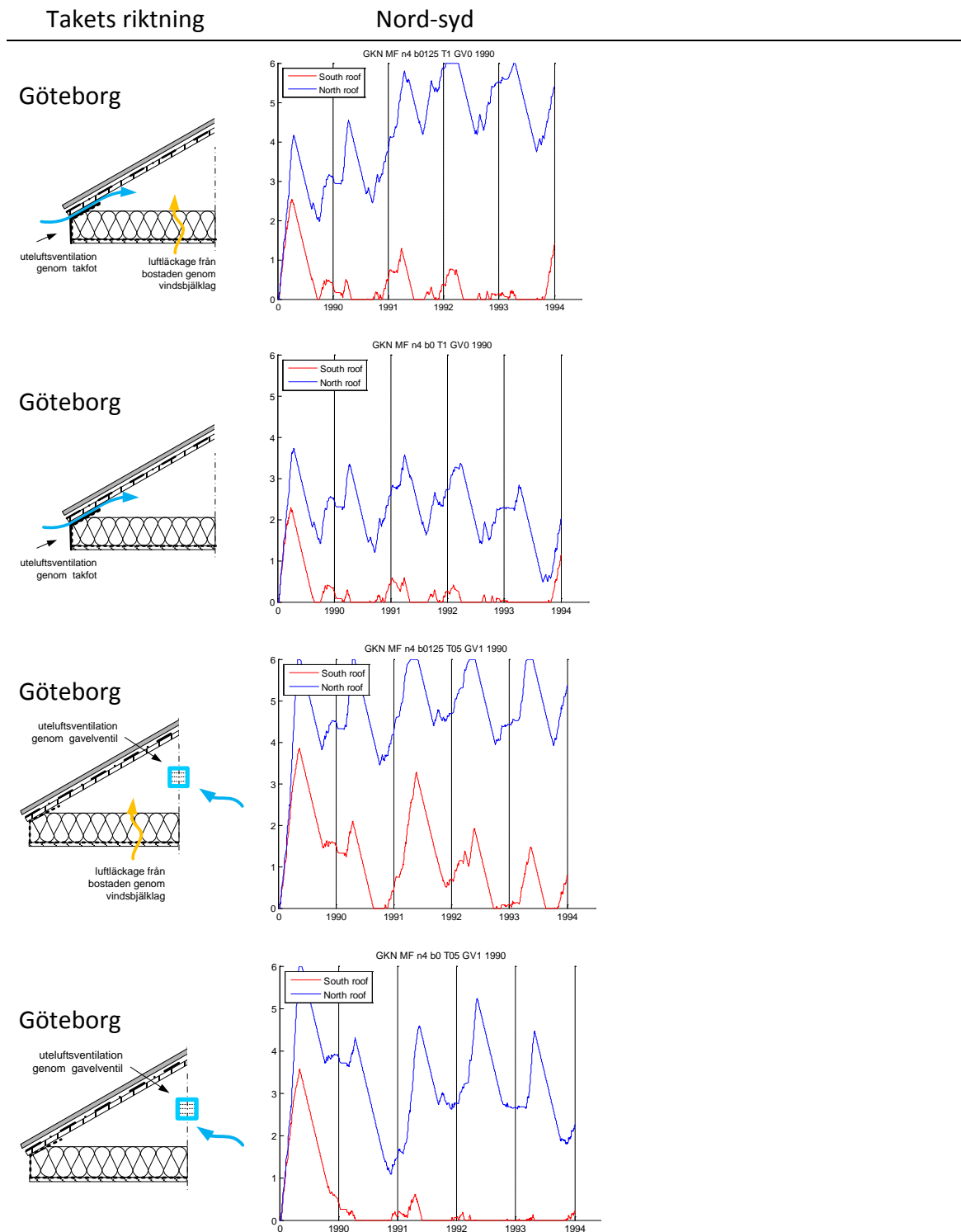
2. Alternativ 1: fuktbufferande isoleringsmaterial i vindsbjälklag



Figur 13 Beräknad MI i kallvinden med cellulosa (prickad linje) och minerallull (heldragen linje) som isoleringsmaterial i vindsbjälklaget.

Resultat i Figur 13 visar att en högre fuktbufferingskapacitet av isoleringsmaterial i vindsbjälklaget, t ex cellulosa i jämförelse med minerallull, sänker MI något men inte tillfredsställande mycket.

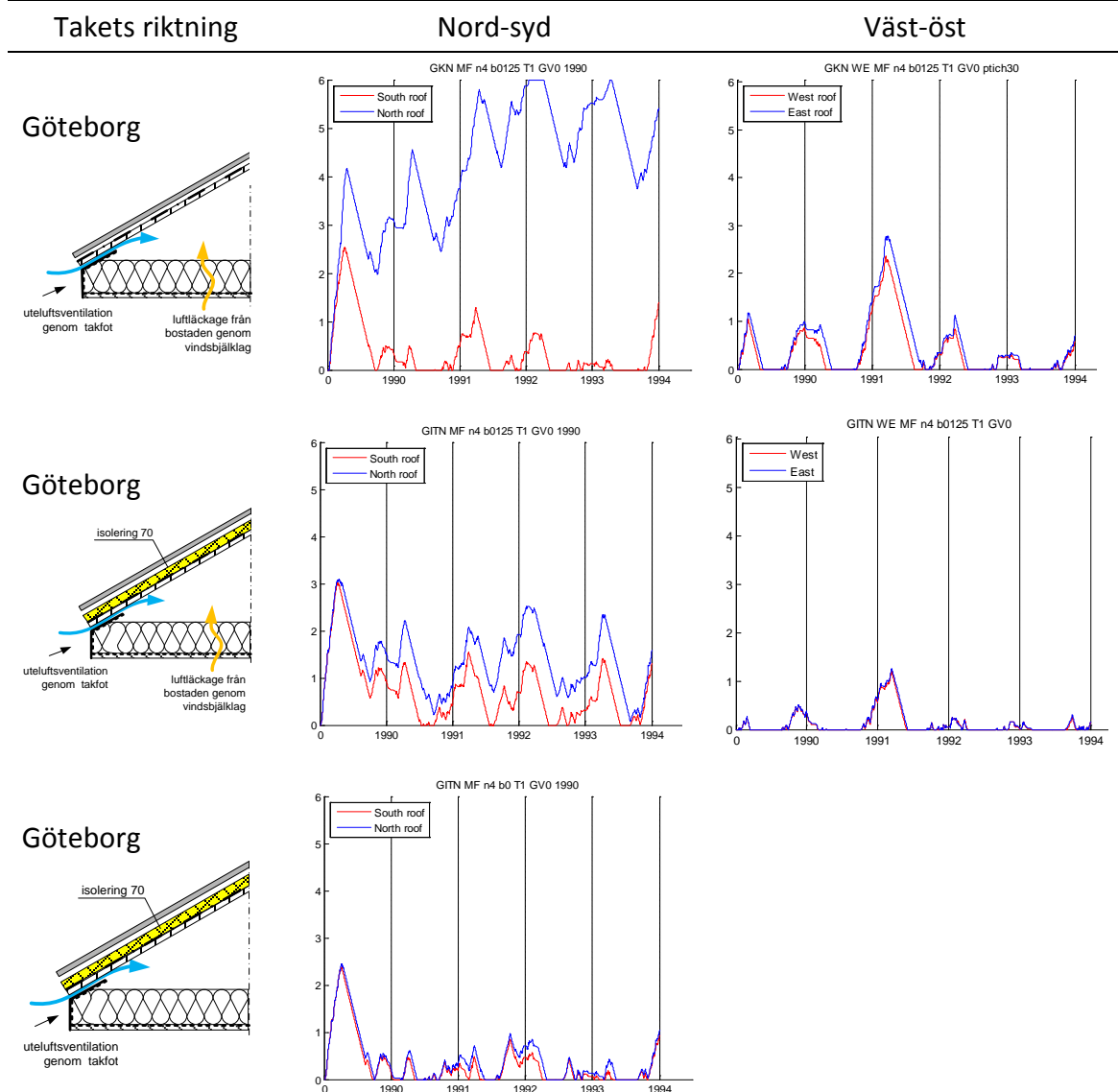
3. Alternativ 2: uteluftsventilation genom gavelventiler



Figur 14 Beräknad MI i kallvindar med ventilation genom takfot alternativt genom gavelventiler.

Luftomsättning genom kallvindar med gavelventiler är betydligt lägre (ca 20 ggr) än i samma kallvindar med ventilation genom takfot. I enlighet med resultat i kapitel 1.1 och 1.3 har kallvindar med gavelventiler högre MI huvudsakligen pga. otillräcklig ventilation.

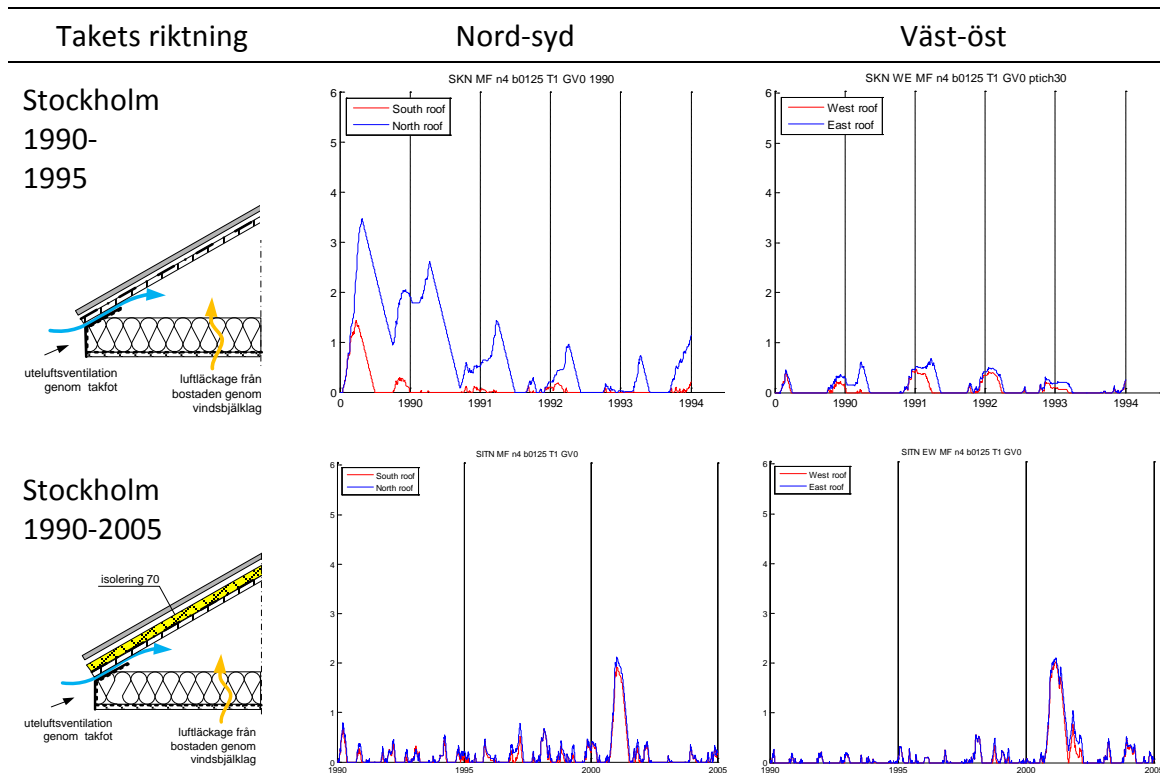
4. Alternativ 3: isolering i yttertak



Figur 15 Beräknad MI i kallvindar med 70 mm isolering (EPS) i yttertak, och med hänsyn till luftläckage i vindsbjälklaget.

Syftet med isolering i yttertaket är att skydda taket från nattkyla, en effekt som bekräftar med resultat i figur 15. MI för ett isolerat norrtak är avsevärdigt lägre än för ett oisolerat tak med samma orientering. Samtidigt ökar MI något för det isolerade södra taket jämför med oisolerat tak vilket tyder på taket har blivit kallare eftersom isoleringen skyddar taket från solvärme. Mycket bra resultat kan uppnås med isolering i yttertak med norr-syd orientering om vindsbjälklaget görs lufttät. Uppmärksamhet bör dock ägnas uttorkning av byggfukt. När det gäller kallvinden med väst-öst orientering som, enligt kapitel 1.1 har en större ventilationsgrad med uteluft, uppnås mycket bra resultat med isolering i yttertak och hela konstruktionen blir robustare mot luftläckage i vindsbjälklaget.

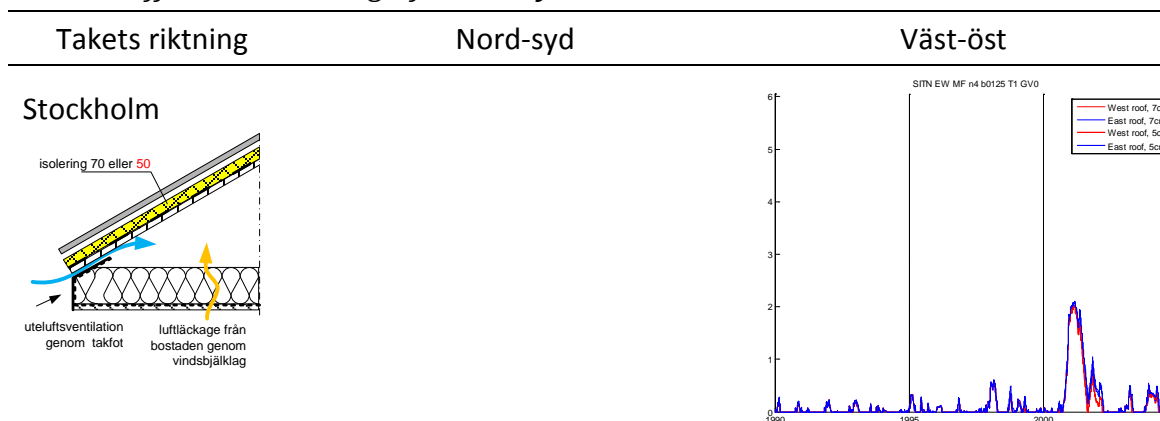
4.1. Effekt av geografiskt läge



Figur 16 Beräknad MI i kallvindar med 70 mm isolering (EPS) i yttertak, och med hänsyn till takets orientering och geografiskt läge.

Isolering i yttertaket ger ett mycket bra resultat för kallvindar i Stockholm. Jämfört med samma kallvinskonstruktion i Göteborg, blir hela konstruktionen mer robust mot både takets orientering samt luftläckage genom vindsbjälklaget.

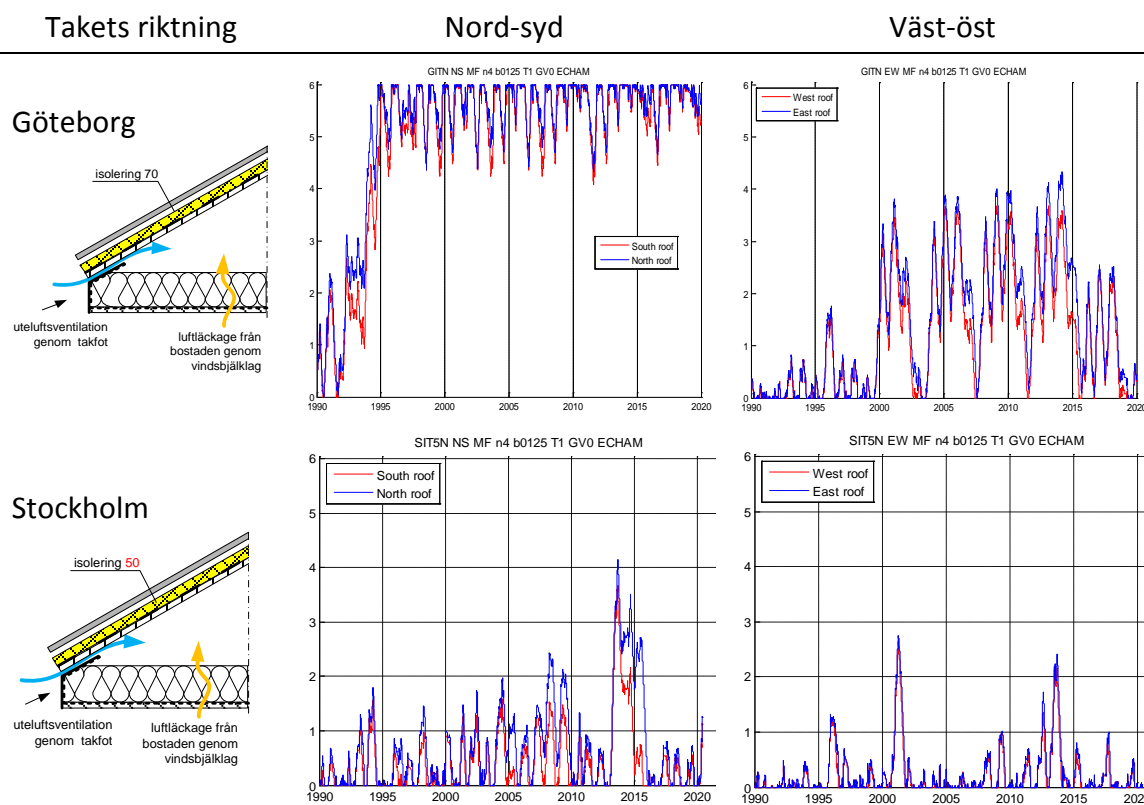
4.2. Effekt av isoleringstjocklek i yttertak



Figur 17 Beräknad MI i kallvindar med 50 mm och 70 mm isolering (EPS) i ytter tak.

Både 50 mm och 70 mm isolering i ytter tak ger mycket bra resultat för kallvindar i Stockholm.

4.3. Effekt av framtida klimatändringar



Figur 18 Beräknat MI för kallvindar i Göteborg med 70 mm EPS isolering i ytter tak och i Stockholm, med 50 mm EPS isolering i yttertak. Klimatdata är från klimatmodell ECHAM, klimatscenario A1B1.

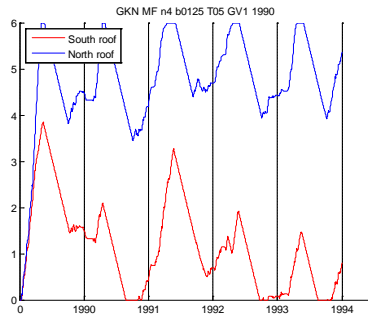
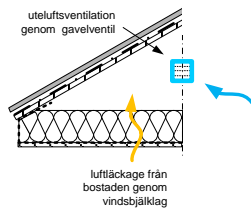
Tidigare analyser med historiska klimatdata har visat att isolering i yttertak ger mycket bra resultat för kallvindar i Stockholm, och med vissa förutsättningar (lufttät vindsbjälklag eller bra ventilation) även i Göteborg. Resultat i Figur 18 visar dock att robusthet av denna kallvindskonstruktion bör tas med en viss reservation. För en kallvind i Göteborg uppnås högsta MI värden om kallvinden inte ventileras tillräckligt (norr-syd orientering). En ökad ventilation (väst-syd orientering) sänker MI avsevärt men inte tillräckligt. Resultaten visar att MI kan gå upp även efter en längre period av ”vila”. Jämfört med Göteborg, uppnås betydligt bättre resultat med isolerat tak om kallvinden finns i Stockholm. Även här visas det att en god ventilation av kallvinden är mycket viktig för effekt av takets isolering.

5. Alternativ 4: isolering i yttertak vid naturlig ventilation genom gavelventiler

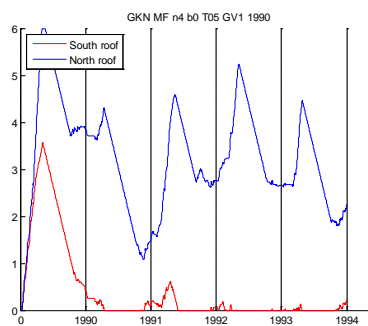
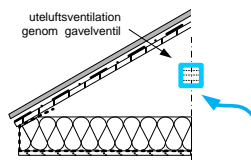
Takets riktning

Nord-syd

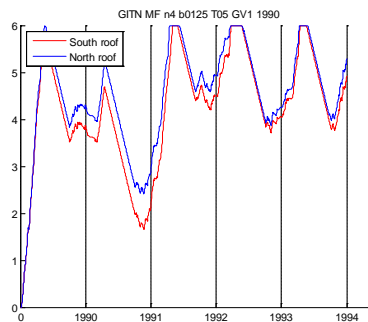
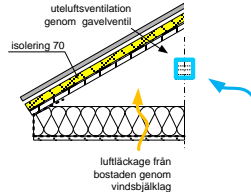
Göteborg



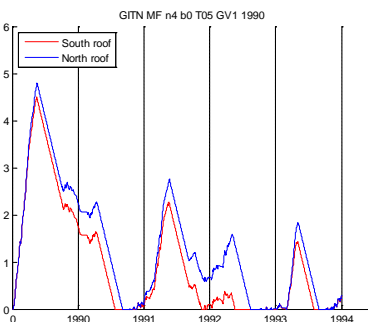
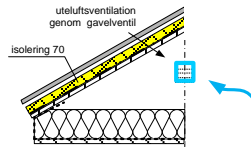
Göteborg



Göteborg



Göteborg



Figur 19 Beräknad MI i kallvindar med 70 mm EPS isolering i yttertak, och med hänsyn till ventilation genom gavelventiler.

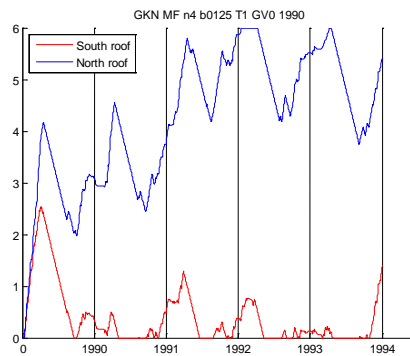
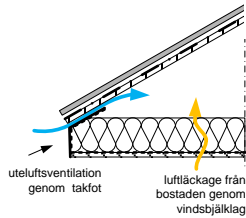
Luftomsättning genom kallvindar med gavelventiler är betydligt lägre (ca 20 ggr) än i samma kallvindar med ventilation genom takfötter. I enlighet med resultat i föregående kapitel kan inte isolering av yttertak antas som robust i sig utan den bör kombineras med en stor uteluftsventilation.

6. Alternativ 5: kontrollerad mekanisk ventilation

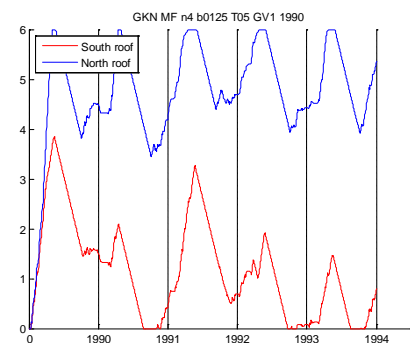
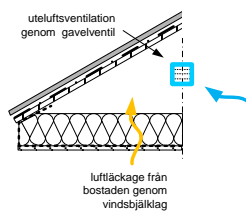
Takets riktning

Nord-syd

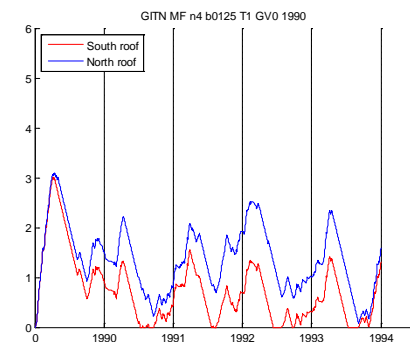
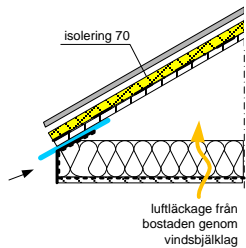
Göteborg



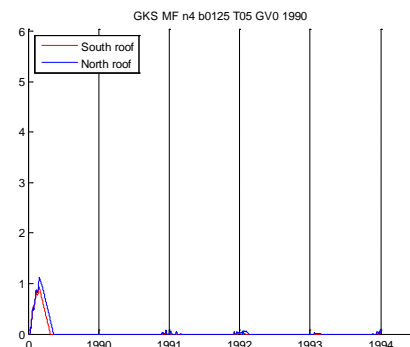
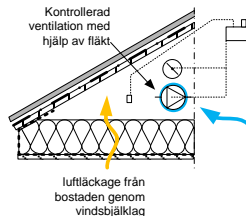
Göteborg



Göteborg



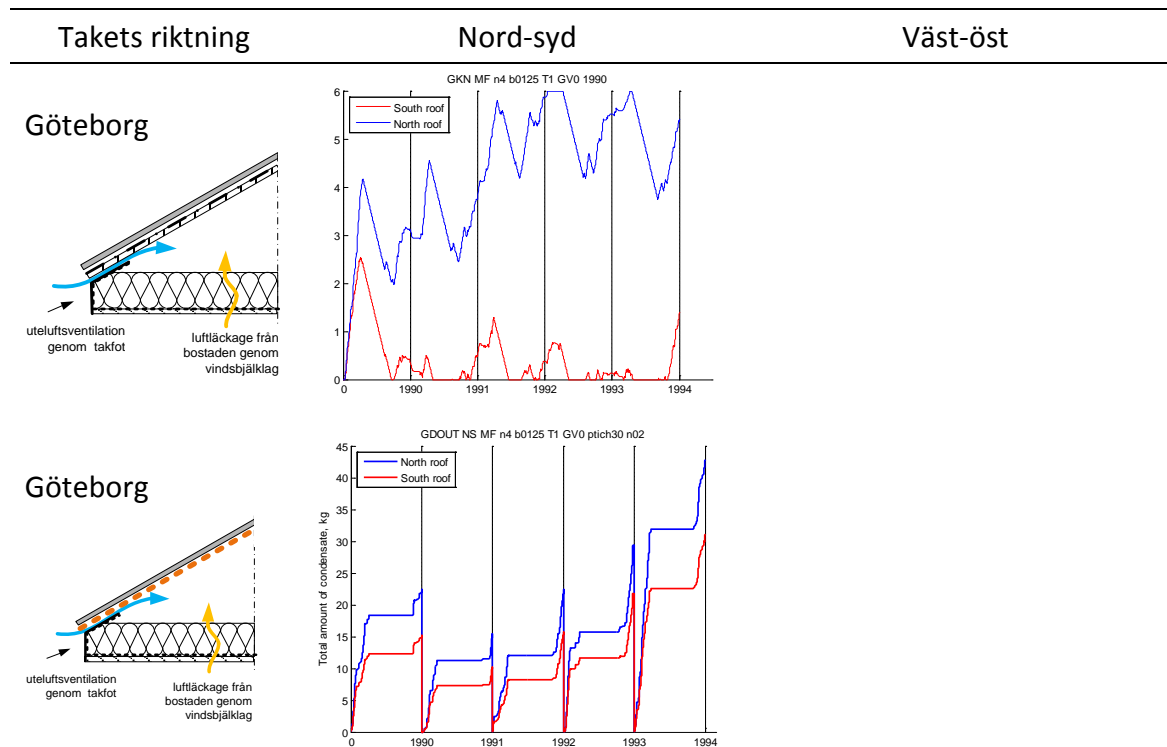
Göteborg



Figur 20 Beräknad MI för referenskonstruktionen och de alternativa kallvindskonstruktionerna.

Resultaten i figur 20 visar att styrd ventilation är mycket effektiv mot mögelpåväxt. Jämfört med de övriga alternativa kallvindskonstruktionerna, är styrd ventilation den mest effektiva metoden (lägsta MI värden) för att uppnå en mögelfri kallvind.

7. Alternativ 6: diffusionsöppen duk som underlagstak



Figur 21 Mängd vatten som kondenserar på underlagstaket av diffusionsöppen duk. Sd värdet hos duken varierar mellan 4-0.6 m vid RF mellan 20-70%.

För närvarande är det inte känt huruvida diffusionsöppna dukar är resistent mot mögelpåväxt och därför lämpar sig inte MI som prestandakriterium vid bedömning av kallvindar. I stället beräknas den totala mängd vatten som kondenserar på duken under ett år. Enligt resultat i Figur 21, varierar kondensmängden mycket mellan olika år, från ca 2 kg till ca 45 kg, och som regel är den större på det norra taket än på det södra.

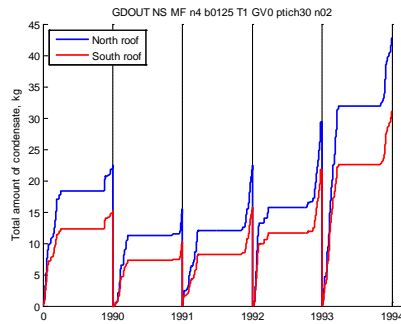
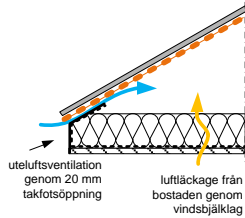
Det är svårt att bedöma vilket betydelse denna kondensmängd har för kallvindens fuktsäkerhet. Mindre kondensmängder kommer sannolikt att torkas ut med uteluftsventilation, vid gynnsamma klimatförhållanden. Större kondensmängder kan däremot samlas i droppar som kan rinna ner längs duken eller droppa ner, och på detta sätt leda till fuktskador i takstolarna eller i vindsbjälklaget. Man kan tänka sig att gränsvärdena för bildning av vattendroppar på duken beror på taklutning och ytegenskaper hos duken. Eftersom gränsvärdena för droppbildning inte varit tillgängliga när denna studie gjordes, har det inte varit möjligt dra slutsatser om eventuella fuktskador hos kallvindar då diffusionsöppenduk används i underlagstaket. I stället görs endast en relativ jämförelse mellan den totala årliga kondensmängd från fall till fall.

7.1. Effekt av reducerad ventilation och luftläckage

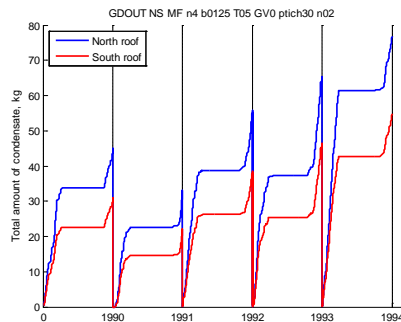
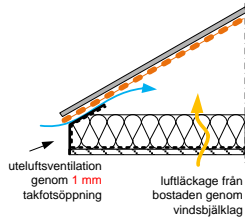
Takets riktning

Nord-syd

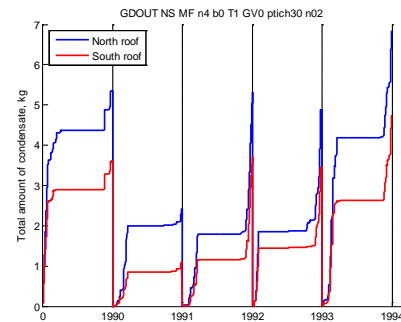
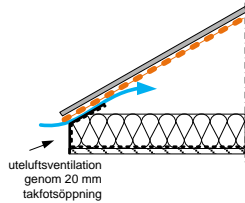
Referens
ventilationsgrad
Göteborg



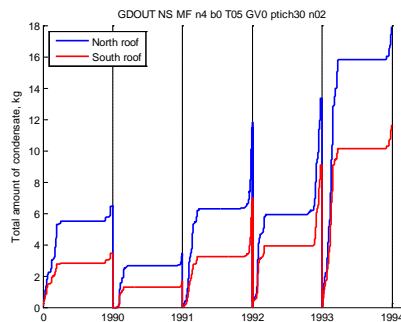
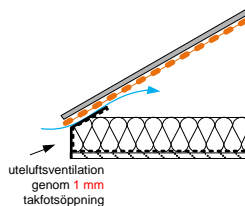
Reducerad
ventilationsgrad
Göteborg



Inget luftläckage
Göteborg



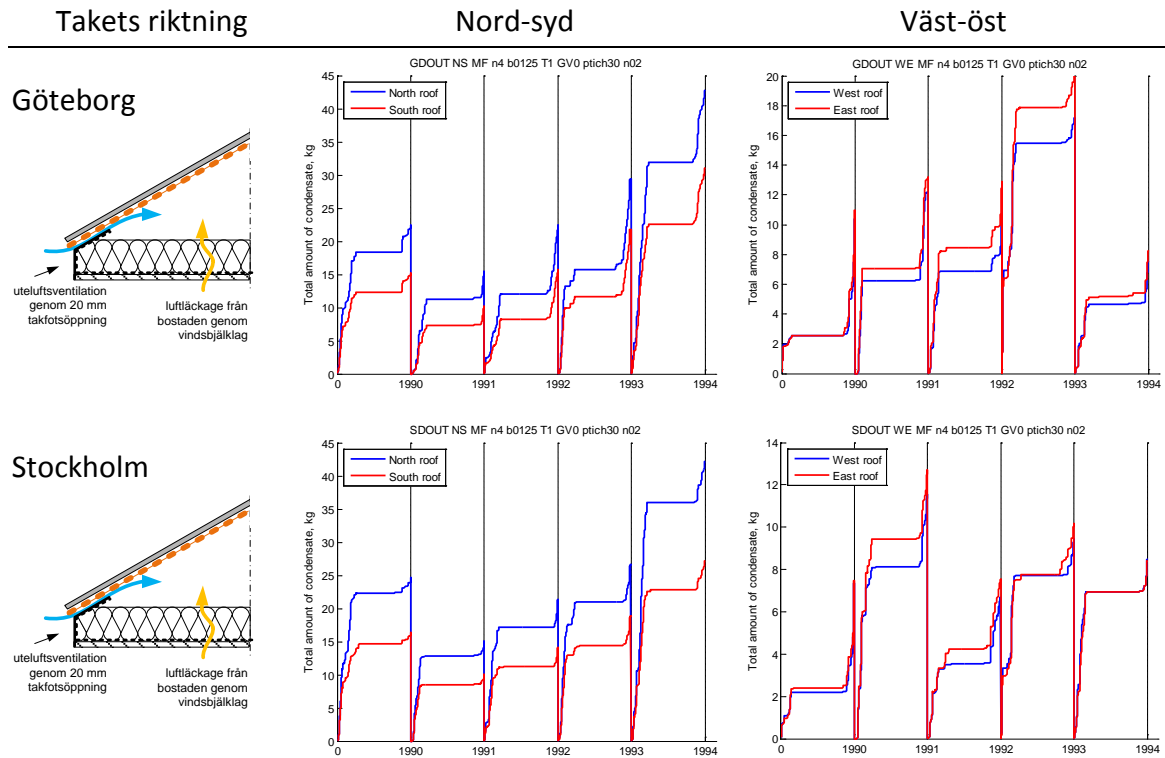
Inget luftläckage
Göteborg



Figur 22 Mängd vatten som kondenserar på underlagstaket av diffusionsöppen duk, med hänsyn till ventilationsgrad och lufttäteten hos vindsbjälklaget.

Reducerad ventilation genom takfoten leder till väsentlig större kondensmängder på underlagstaket vid ett otätt vindsbjälklag. Däremot för ett lufttätt vindsbjälklag minskar kondensmängderna på duken väsentligt. Reducerad ventilation i kombination med lufttätt vindsbjälklag leder till väsentligt större kondensmängder på underlagstaket.

7.2. Effekt av takets orientering och geografiskt läge



Figur 23 Mängd vatten som kondenserar på underlagstaket av diffusionsöppen duk, med hänsyn till ventilationsgrad och geografiskt läge.

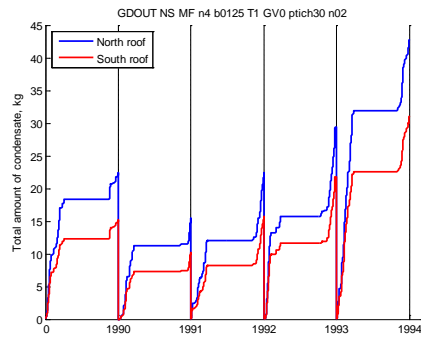
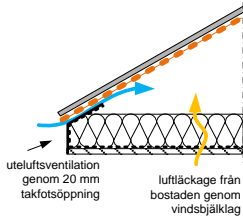
Kondensmängd på underlagsduken ändras med takets orientering på grund av olika solinstrålningens intensitet och ventilationsgrad. Resultat för Göteborg visar att kondensmängden på underlagsduken som regel är mindre vid väst-öst orientering av taket än vid norr-öst, vilket är i enlighet med den bättre ventilationen i väst-öst riktning (se kapitel 1.1). Samma slutsats gäller även för resultat för Stockholm

7.3. Effekt av luftläckage

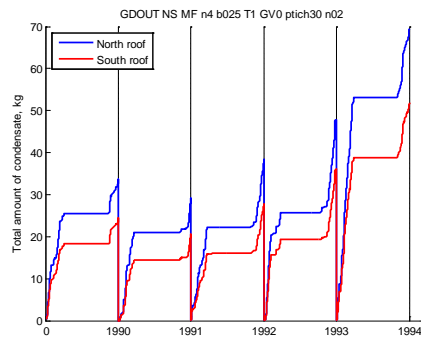
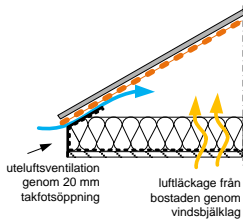
Takets riktning

Nord-syd

Referens luftläckage
Göteborg



Ökat luftläckage
Göteborg



Figur 24 Mängd vatten som kondenserar på underlagstaket av diffusionsöppen duk, med hänsyn till luftläckage genom vindsbjälklaget.

Ett ökat luftläckage leder till större kondensmängder på underlagsduken.

Bilaga 3: Probabilistisk riskbedömning av mögelpåväxt i kallvindskonstruktion med isolering i yttertak

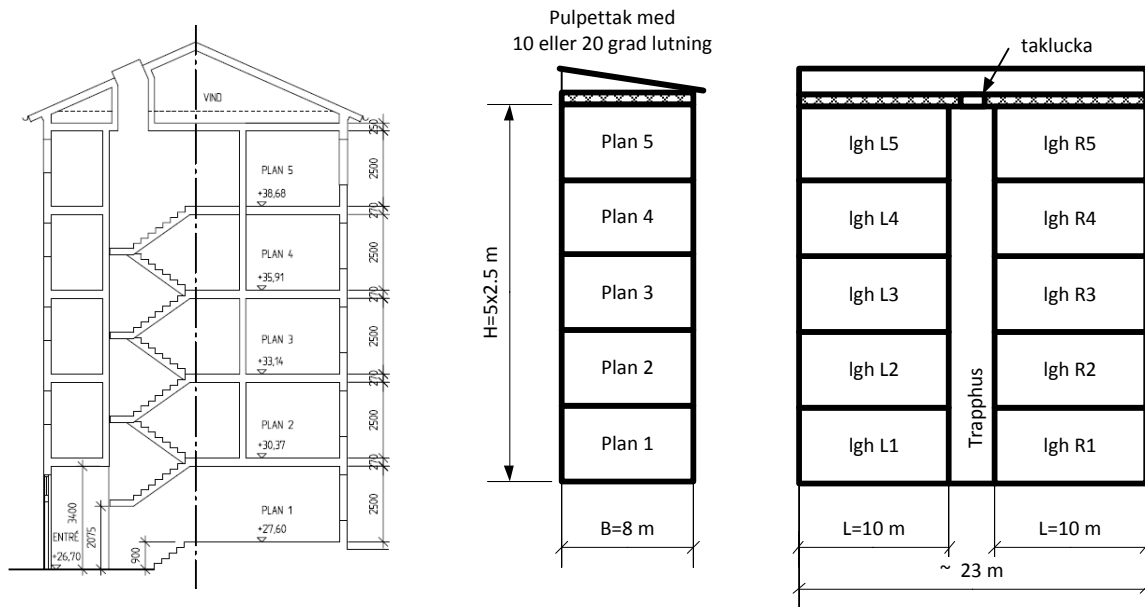
Många små- och flerbostadshus i Sverige kan anses lämpliga för renovering i syfte att uppfylla nationella mål om låg energianvändning i byggnader. I de fall där energianalyser visar att tilläggsisolering av byggnadens klimatskal är nödvändigt åtgärd för att uppfylla de uppställda energimålen, kommer renoveringen troligen inkludera tilläggsisolering av vindsbjälklaget.

I den kvalitativa riskbedömningsanalysen som presenteras i bilaga 2, har kallvindskonstruktion med isolering i yttertaget identifierats som ett lovande alternativ till den konventionella kallvindskonstruktionen utan takisolering. Det beräknade mögelindexet för den isolerade takkonstruktionen har visat sig vara låg under ett antal olika driftsförhållanden. Denna konstruktion anses då av intresse för ytterligare studier i syfte att kvantifiera risken, vilket görs med hjälp av en probabilistisk riskbedömning.

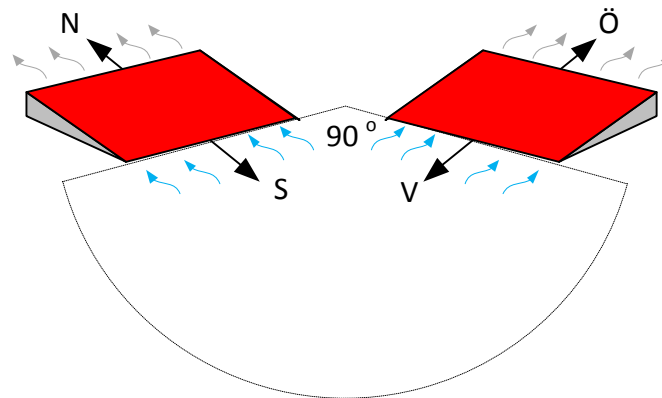
I en probabilistisk riskbedömning beräknas mögelrisk för alla möjliga driftsförhållanden som kan förekomma vid användning av en kallvind. Antal simuleringar i en probabilistisk riskbedömning kan vara stor. För att få tillförlitliga siffror krävs många simuleringar. I syfte att hålla simuleringstid inom rimliga gränser, används en enklare och snabbare beräkningsmodell av kallvind i den probabilistiska riskbedömningen som presenteras nedan. Beräkningsmodellen har tidigare testats med den mer komplexa HAM-Tools modellen för kallvind (Hagetoft och Sasic Kalagasidis 2011), såsom inom forskningsprojektet RAP-RETRO IEA/EBC-Annex 55 där den använts i ett antal fallstudier.

Den enklare beräkningsmodellen kan användas till dynamiska studier för beräkning av temperatur- och fuktförhållanden i underlagstaket i byggnader med pulpettak. Fuktomfördelning mellan taktytor som kan inträffa i ett sadeltak blir då inte möjliga att förutse med den enklare modellen. Dock anses det som en rimlig förenkling eftersom fuktomfördelning kan vara av större betydelse först vid svagt ventilerade kallvindar. Andra förenklingar i jämförelse med HAM-Tools modellen avser antal fuktbuffrande material på kallvinden samt luftläckage genom vindsbjälklaget. Trots att dessa förenklingar har betydelse för fuktsäkerheten på kallvinden, ger båda modeller en liknande uppskattning av risk för mögelpåväxt vid probabilistisk riskbedömning (mer i Hagetoft och Sasic Kalagasidis 2011).

Den analys som presenteras här fokuserar på mögelrisker relaterade till tilläggsisolering av kallvindar i flervåningshus. Ett exempel på ett flerfamiljshus med kallvind under ett sadeltak visas i figur 1. Utifrån denna byggnad, har en modellbyggnad tagits fram för riskanalysen. Utseendet och dimensionerna av modellbyggnaden förenklas så att hänsyn tas endast till de mest relevanta parametrarna för kallvinden såsom husets geometri, kallvindens konstruktion samt husets ventilationssystem. Såsom visas i figur 1, är bredden och längden av modellbyggnaden 8 m respektive 23 m, samt höjden till takfoten 12.5 m. Tjockleken av den befintliga isoleringen i vindsbjälklaget antas 200 mm. Vidare antas takets konstruktion vara utförd som en konventionell kallvind, dvs. med naturlig ventilation genom öppningar längs takfötter och med råspont som underlagstak (mer i bilaga 2). Slutligen antas att byggnaden ventileras med mekanisk frånluftsventilation.



Figur 1: Till vänster: en sektion genom en befintlig byggnad. Till höger: den modellbyggnad



Figur 2: Definition av takets orientering och flödesriktning

Innehåll

| | |
|--|----|
| Ramverket för probabilistisk riskbedömning | 4 |
| 1. Bakgrund | 4 |
| 1.1. Vad ska tilläggsisoleras? | 4 |
| 1.2. Vad är syfte med tilläggsisolering? | 4 |
| 1.3. Vilka prestandakriterier ska uppfyllas? | 4 |
| 1.4. Vilka är konsekvenser om en eller flera prestandakriterier inte uppfylls? | 5 |
| 1.5. Tillgänglig och relevant information om den befintliga konstruktionen | 5 |
| 2. Alternativa konstruktionslösningar | 6 |
| 2.1. Utveckling av renoverings strategier | 6 |
| 2.2. Antaganden och begränsningar | 6 |
| 3. Analys | 7 |
| 3.1. Befintlig kunskap om de valda renoveringsstrategierna | 7 |
| 3.2. Parametrar som avgör utfallet av renoveringen | 7 |
| 3.3. Förklaring av prestandakriteriet MI | 9 |
| 3.1. Numerisk analys | 10 |
| 4. Utvärdering | 15 |
| 4.1. Hur väl möter renoverings strategin syftet med renoveringen? | 15 |
| 4.2. Innebär rekommenderande renoverings strategin begränsningar? | 15 |
| 4.3. Motsvarar lösningen strategin prestanda kriterierna? | 15 |
| 5. Tillämpliga lösningar | 15 |

Ramverket för probabilistisk riskbedömning

Probabilistisk riskbedömning handlar om ett antal numeriska analyser som utförs i syfte att förutsäga en konstruktions prestanda vid möjliga variationer och spridningar i material- och konstruktionsegenskaper, arbetsutförandet samt driftsförhållande. Varje nytt arbetsutförande och driftsförhållande, eller ny kombination av dessa kallas för driftsscenario. Probabilistisk riskbedömning är vanligtvis ett omfattande jobb eftersom antalet driftscenarier som ska studeras brukar vara stort.

Pålitlighet av probabilistisk riskbedömning beror på noggrannheten av både beräkningsmodellen och ingångsdata, men också på kunskapen hos personen som utför analysen. Denna typ av analys bör göras av personer med god erfarenhet av den studerade konstruktionen eftersom de har kunskap att definiera möjliga driftscenarier inklusive de kritiska.

De numeriska analyser som ingår i en probabilistisk riskbedömning kan utföras på olika sätt, beroende på beräkningsverktyg, antal parametrar som ingår i studien, noggrannhet av beräkningar, mm. Motivation till och tydliga avgränsningar av vad som omfattas och inte omfattas med studien är viktigt att ta ställning till och gemensamma för alla riskbedömningar. Av praktiska skäl kan det vara lämpligt presentera ett riskbedömningsarbets sätt i ett ramverk, som är en typ av flödesschema. Ramverket fungerar då som en resurs som beskriver vilken information som bör insamlas och hur den ska dokumenteras så att den beslutfattande processen vid riskbedömning görs transparent.

Ett ramverk för probabilistisk riskbedömning av renoverade byggnadskonstruktioner kan organiseras i fyra huvudsakliga arbetssteg som samlas under följande rubriker:

1. Bakgrund
2. Utveckling av renoveringsstrategier
3. Analys
4. Resultatutvärdering

Under varje rubrik finns ett antal steg som börjar med en fråga. Varje fråga bör besvaras på bästa möjliga sätt, dvs. grundat på fakta och pålitliga data, innan man fortsätter till nästa steg. Detta illustreras nedan och som exempel används renovering av kallvindskonstruktion.

1. Bakgrund

1.1. Vad ska tilläggsisoleras?

Ett antal kallvindar i flerbostadshus med pulpettak anses ska tilläggsisoleras.

1.2. Vad är syfte med tilläggsisolering?

Tilläggsisolering ska tillämpas främst på vindsbjälklaget i syftet att minska värmeförlusten genom denna.

1.3. Vilka prestandakriterier ska uppfyllas?

Värmeförluster genom vindsbjälklaget efter renoveringen, under uppvärmningssäsong, bör minskas med minst 50 % av värdet före renoveringen. Dessutom ska renoveringen leda till en kostnadsfri användning av kallvinden under byggnadens livstid, dvs. utan mögelpåväxt på underlagstaket. Som referens i energiberäkningarna används värmeförluster genom

vindsbjälklaget den kallaste månaden under året, vanligtvis januari. Angående kallvindens fuktprestanda, ska mögelindex MI för underlagstaket, enligt definitionen i Hukka och Viitanen (1999), vara mindre än 1. Båda prestandakriterierna ska uppfyllas oavsett om byggnaden ligger i Stockholm eller Göteborg.

1.4. Vilka är konsekvenserna om en eller flera prestandakriterier inte uppfylls?

Från ett energibesparingsperspektiv, utgör renoveringen av kallvindar den billigaste renoveringsåtgärden jämfört med renovering av övriga delar av byggnadens klimatskal, se Tabell 1. Dessutom är den enklaste att genomföra. Om man misslyckats med att minska värmeförlusten genom vindsbjälklaget efter renoveringen, kan byggnaden placeras i en sämre "energikategori". Högre energikostnader och dåligt rykte kan vara några konsekvenser för husägaren/byggaren.

Enligt statistiken (Boverket) utgör vattenläckor genom taket och mögelpåväxt på underlagstaket en av de mest förekommande fuktskadorna i kallvindar i Sverige. Den första kan förebyggas genom ett korrekt utfört (vattentät) tak. För det senare, bör den rätta åtgärden beslutas utifrån kallvindskonstruktion, geografiskt läge, driftsförhållande, mm. Enligt den kvalitativa riskbedömningen som visas i Bilaga 2, kan tilläggsisolering av vindsbjälklaget i kombination med isolering av yttertakets kan anses som en lämplig lösning för byggnader i Stockholmstrakten. Om den åtgärden misslyckas leder detta till extra kostnader för sanering av mögel eller ombyggnad av kallvinden kan hittas i kapitel 8 i rapporten

Tabell 1 Kostnad för energibesparande åtgärder (från Mata, 2011)

| Renoveringsåtgärd | ränta | livstid | Underhålls-kost | Specifik kostnad per golvare | Specifik kostnad per fasadare | Specifik kostnad per takare | Specifik kostnad per fönsterare | Enhets-kostnad |
|---|-------|---------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------|
| | % | år | SEK/år | SEK/m ² | SEK/m ² | SEK/m ² | SEK/m ² | SEK/enhet |
| Förändring av U-värdet av golv / källare | 4 | 40 | 0 | 1306 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Förändring av U-värdet av fasader (olika typer) | 4 | 40 | 0 | 0 | 1508 | 0 | 0 | 0 |
| Förändring av U-värdet av kallvindar / tak (olika typer) | 4 | 40 | 0 | 0 | 0 | 410 | 0 | 0 |
| Byte av fönster | 4 | 40 | 7 | 0 | 0 | 0 | 2629 | 0 |
| Uppgradering av ventilationssystem med värmeåtervinning, hos flerbostadshus | 4 | 20 | 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44652 |

1.5. Tillgänglig och relevant information om den befintliga konstruktionen

Det finns en fungerade ångspärr i vindsbjälklaget som förhindrar fuktdiffusion. Underlagstaket antas mögelfritt före renoveringen.

Luftläckaget igenom vindsbjälklaget innan renoveringen är däremot okänd. Ett betongbjälklag kan användas som en modell av ett lufttätt vindsbjälklag, och ett vindsbjälklag med träreglar som en modell av otätt vindsbjälklag. Luftläckagearea för den förra uppskattas till $6.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2$ och till $3.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{m}^2$ för den senare, vilket ger ca 0.06 oms/h respektive 0.3 oms/h vid 50 Pa tryckprov (där omsättningen relateras till bostadens luftvolym).

2. Alternativa konstruktionslösningar

2.1. Utveckling av renoveringsstrategier

Ett tjockt lager isolering och ett lufttätt vindsbjälklag är det mest effektiva sättet att minska värmeförluster genom taket. Även om luftläckaget upp till vinden representerar en mindre del av den totala värmeförlusten, är det viktigt att ta den med i analysen på grund av dess stora inverkan på kallvindens fuktsäkerhet. Luftinfiltration från bostaden till kallvinden leder till ett överskott av vattenånga på vinden och följaktligen till fuktansamling i underlagstaket.

Ett lufttätt vindsbjälklag är en nödvändig men inte tillräcklig förutsättning för att förhindra ansamling av fukt i underlagstaket. Fukt i utomhusluften som kommer in i kallvinden genom ventilation, kan under vissa omständigheter också kondensera på underlagstaket. Detta inträffar när underlagstaket är kallare än uteluften, vilket sker på grund av nattkyla från himlen. Eftersom det yttre taket och underlagstaket är de mest utsatta delarna mot himlen, är de också mest känsliga för kondensansamling i en kallvind.

Isolering av yttertaket kan göra taket varmare vid nattkyla och på detta sätt minska fuktansamling i underlagstaket. En cm av isolering i yttertaket höjer takets temperatur med cirka 0.25 °C vid nattkylning. Samma åtgärd sänker underlagstaket temperatur på motsvarande sätt under soliga timmar, vilket gör kallvinden kallare och mottagligare för ansamling av fukt. Det slutliga resultatet av denna åtgärd beror på balansen mellan kalla och varma perioder, och på förekomsten av fuktkällor på kallvinden.

Reducerad ventilation med uteluft är effektivt endast när fukt i utomhusluften är en dominerande fuktkälla på kallvinden. I motsatta fall, dvs. vid mycket byggfukt eller vid luftinfiltration från bostaden, kan denna åtgärd istället leda till mer fuktansamling i underlagstaket.

De fyra ovan nämnda åtgärderna kan tillämpas separat eller i kombination på en kallvind. Således kan man identifiera sex olika konstruktionslösningar för kallvindskonstruktion, såsom sammanfattas i tabell 2 och illustreras i figur 3. Den huvudsakliga grupperingen av konstruktionslösningar sker avseende vindsbjälklagets lufttätethet.

Tabell 2 Alternativa konstruktionslösningar för kallvinden.

| Renoveringsåtgärder | Vindsbjälklag med god lufttätethet | | | Vindsbjälklag med dåligt lufttätethet | | |
|--|------------------------------------|----|----|---------------------------------------|----|----|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
| Isolerings tjocklek i vindsbjälklaget ¹ | X | X | X | X | X | X |
| Isolering i yttertaket | | X | X | | X | X |
| Normal ventilation av kallvind ² | X | X | | X | X | |
| Reducerad ventilation av kallvind ³ | | | X | | | X |

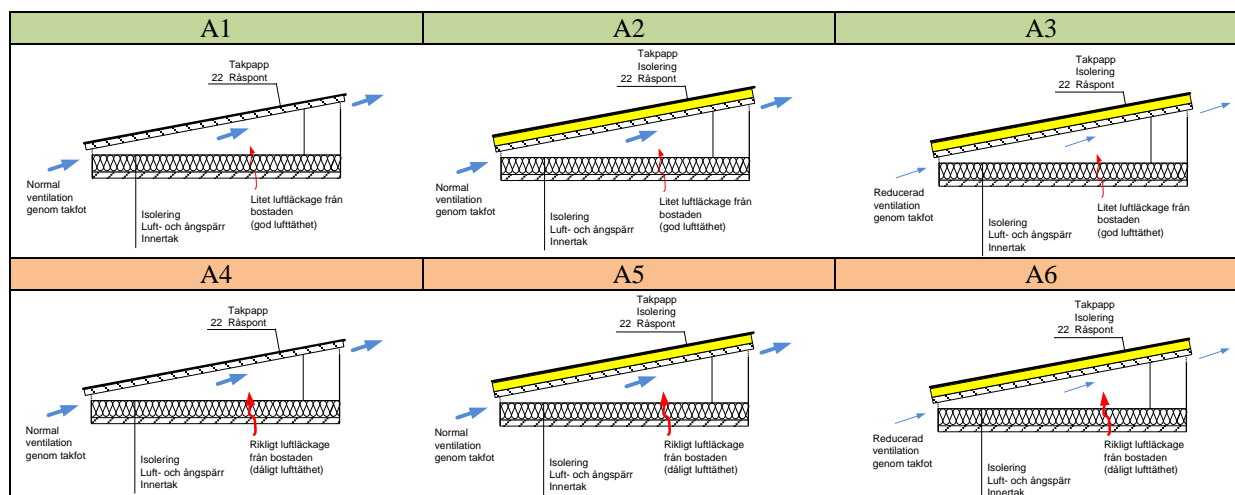
2.2. Antaganden och begränsningar

Denna analys gäller endast kallvindar. Det antas att taklutning inte förändras med renoveringen. Det antas vidare att det inte finns några vattenläckor genom yttertaket eller från eventuella servisledningar inuti kallvinden. Slutligen antas det att det inte finns luftläckage från luftkanalerna som eventuellt kan finnas på kallvinden.

¹ Minst 400 mm

² Genom 20 mm spalt längs takfötter

³ Ca. 10-20 gånger mindre luftflöde jämfört med luftflödet genom 20 mm spalt i takfötter



Figur 3: Alternativa konstruktionslösningar.

3. Analys

3.1. Befintlig kunskap om de valda renoveringsstrategierna

Omkring 88 % av byggnaderna i det svenska byggnadsbeståndet har en takkonstruktion med en kallvind av typ A1 eller A4 och mögel syns i ca 15-30 % av dem (Boverket, 2010). Därför anses kallvindar vara en riskkonstruktion. Mögelpåväxt förekommer i både äldre och nyare kallvindskonstruktioner. Enligt Ahrnens C & Borglund E. (2007), finns det en viss korrelation mellan förekomst av mögel på kallvindar och följande driftförhållande:

- byggnader med naturlig ventilation, eller med mekanisk ventilation där ventilationssystemet skapar ett positivt lufttryck inomhus
- byggnader med värmesystem utan förbränning
- vid en stor fuktproduktion inomhus i kombination med lufttätt vindsbjälklag
- i kallvindskonstruktioner med underlagstak av träskiva såsom plywood
- vid en ökad isoleringstjocklek i vindsbjälklag
- vid luftinfiltration genom ett lufttätt vindsbjälklag
- uteluftventilerade kallvindar i kallt och maritimt klimat

Kallvindar av typ A2-A3 och A5-A6 är sällsynta och därför finns det ingen tillförlitlig statistik om deras fuktprestanda och mögelrisk.

Majoritet av de förutnämnda driftförhållandena kan gälla för byggnader i Sverige. Enligt slutsatser i Hagentoft och Sasic (2012), bör en lämplig renoveringsstrategi för kallvindar bestämmas utifrån kallvindskonstruktion, geografiskt läge samt driftförhållande.

3.2. Parametrar som avgör renoveringsresultat

Nedan listas femton olika parametrar som har ett potentiellt inflytande på resultatet av renovering. För tydlighetens skull är dessa parametrar grupperade i ett antal kategorier. Vid varje parameter anges ett standardvärde.

Byggnadens geometri

1. Höjd: 12.5 m
2. Längd: 20 m
3. Vindsbjälklagsarea: $20 \cdot 11 = 220 \text{ m}^2$
4. Takets orientering (se förklaring i Figur 2): W-E
5. Underlagstaket trätjocklek: 0.022 m

Hygrotermiska egenskaper av underlagstaket i trä

6. Värmeledningsförmåga: 0.13 W/mK
7. Ånggenomsläpplighet: $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
8. Initial relativ fuktighet: 70 %

Isolering i vindsbjälklaget och i yttertaket

9. Värmegenomgångskoefficient hos vindsbjälklag U_c : 0.2/0.1/0.07 W/m²K vilket motsvarar 200/400/600 mm isolering i vindsbjälklaget

$$U_c \approx \frac{0.04}{x}$$

där 0.04 W/mK är värmekonduktivitet hos isolering och x är isoleringstjocklek för vindsbjälklaget.

10. Yttertaketets värmemotstånd: 0.8/1.25/2.5 m²K/W vilket motsvarar 0.02/0.050/0.1 m isolering i yttertaket

$$R_r \approx \frac{y}{0.04}$$

där 0.04 W/mK är värmekonduktivitet hos isolering och y är isoleringstjocklek av yttertaket.

Ventilation och luftinfiltration på kallvinden

11. Tvärsnittsarean hos ventilationsöppning per meter längd av vindsbjälklag: 0.02/0.001 m²/m, där den första gäller för kallvindar med 20 mm breda ventilationsöppningar längs takfötter och den andra för kallvindar med ventilation genom gavelventiler.
12. Luftläckage area per m² av vindsbjälklagsarean: $6.4 \cdot 10^{-6} / 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{m}^2$, där den första antas för kallvindar med lufttätt vindsbjälklag ($n_{50_tak} = 0.05 \text{ oms/h}$ när $n_{50_hus} = 2.5 \text{ oms/h}$), och den andra gäller för kallvindar med otätt vindsbjälklag ($n_{50_tak} = 0.3 \text{ oms/h}$ när $n_{50_hus} = 2.5 \text{ oms/h}$).

Inomhusförhållandena i den bebodda ytan nedanför kallvinden

13. Inomhus temperatur: 22 °C
14. Fukttillskott inomhus: 3 g/m³

Väderförhållanden i Göteborg och Stockholm

15. Väderår: 1975-2005

De ovan listade parametrarna är inte lika inflytelserika på renoveringsutfallet och det är önskvärt att klassificera dem i viktiga och mindre viktiga. I brist på annan kunskap, kan klassificeringen ske genom numeriska simuleringar där värdena på parametrarna varieras inom förväntade intervall, en i taget eller flera på en gång, och genom att analysera hur dessa variationer påverkar resultatet av renoveringen. Parameterklassificering med hjälp av sunt förnuft är också mycket praktiskt. De olika metoderna av klassificering demonstreras nedan.

Många av flerbostadshusen i Sverige, som är i renoveringsbehov, har massproducerats inom Miljonprogrammet, och det kan förväntas att geometrin och hygrottermiska egenskaper hos byggmaterial som används i kallvindar inte varierar mycket mellan byggnader. Därför kan parametrarna 1-6 och 8 sättas fast till standardvärdena genom hela analysen. Byggfukten dvs. fukthalt initialt i underlagstaket före renovering (parameter 7) skiljer sig sannolikt väsentligt mellan hus, delvis pga. olika klimatförhållande i olika delar av landet, men också pga. att husen använts på olika sätt. Alltså, parameter 7 bör variera i analysen.

Isolering av vindsbjälklag och yttertak, ventilation genom kallvinden såsom luftläckage genom vindsbjälklaget (parametrarna 9-12) kommer att ändras väsentligt under renoveringen, och man ska noga undersöka hur deras variabilitet påverkar resultat av renoveringen. En särskild uppmärksamhet bör ägnas åt vindsbjälklagets lufttäthet (12), eftersom det kan ändras (försämrats) även i bruk skede pga. sättningar, materialåldring, nya genomföringar i taket, mm. De övriga parametrarna såsom värmekomfort och fuktillskott inomhus (13-14) och väderförhållandena efter renoveringen (15) kommer inte påverkas av renoveringen. Dock kan de ha en stor inverkan på resultat av renoveringen och bör därför också varieras i analysen.

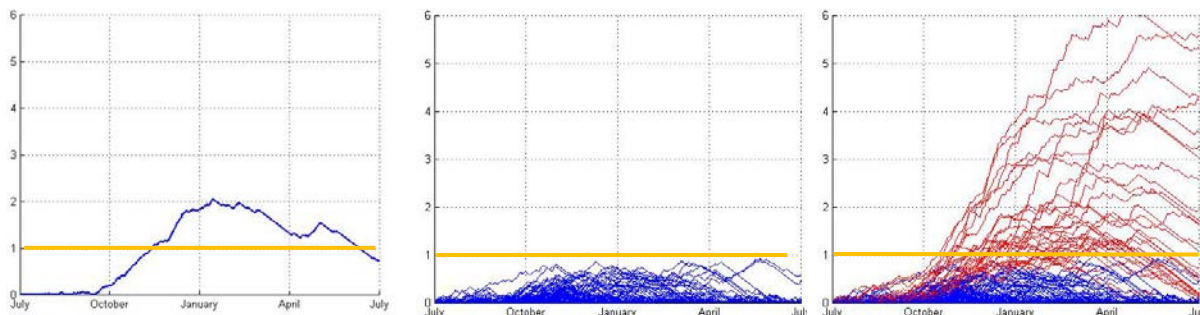
Sammanfattningsvis, åtta av femton parametrar behöver varieras i analysen. Om varje parameter kan anta två olika värden, t ex det lägsta och det högsta, krävs det $2^8 = 256$ körningar för att utforska alla möjliga kombinationer av dessa värden. Det rekommenderas starkt ha en bra strategi för att variera parametrarna i de numeriska simuleringar, så att varje resultat kan stödja en kunskapsuppbyggnad om hur risken ändras med varje körning. Dessutom kommer en bra simuleringstrategi identifiera fallen med höga och låga risker, vilka kan då uteslutas från vidare analys och därmed det totala antalet simuleringar minskas.

3.3. Förklaring av prestandakriteriet MI

Numeriska beräkningar som presenteras nedan har utförts med beräkningsverktyget ”SimpleColdAttic”, som finns öppet tillgängligt för allmänheten och kan laddas ner tillsammans med denna rapport. En kort beskrivning av modellen finns i bilaga 4.

Som nämnts tidigare, ett mått på energieffektiviteten för kallvinden ges av den totala värmeförlusten genom vindsbjälklaget i januari månad. Den totala värmeförlusten omfattar både värmeledningsförluster och exfiltrationsförluster (luftläckage genom vindsbjälklaget). Risken för mögelpåväxt uppskattas utifrån det högsta MI-värdet som nås på underlagstaket under första året efter renoveringen. Proceduren beskrivs nedan.

Det finns flera antaganden vid användning av MI. För det första antas det att kallvinden är mögelfri direkt efter renoveringen ($MI = 0$). För det andra antas det att renoveringen är klar under sommaren, sista dagen i juni. Vidare antas det att kallvind har risk för mögelpåväxt om det högsta MI-värdet överstiger 1 redan under det första året efter renoveringen, vilket illustreras i Figur 4. Slutligen, beräknas risken för mögelpåväxt genom att dividera antalet fall med $MI > 1$ med det totala antalet fall som undersökts. Figur 4 visar t ex 128 olika utfall för en kallvind med en viss konstruktion där variationerna i resultaten erhålls genom att variera parametrarna 12-15. Eftersom i 17 fall är $MI > 1$ blir risken för mögelpåväxt $17/128 = 13\%$.



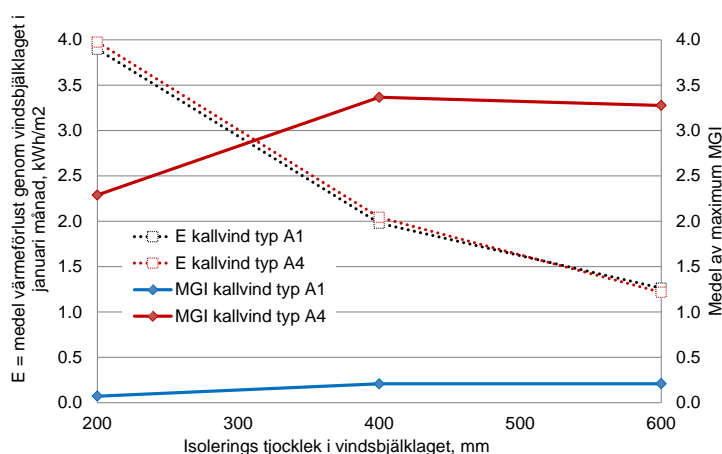
Figur 4 Till vänster: beräknat MI för ett underlagstak under det första året efter det att kallvinden tagits i bruk. Det högsta MI når värdet 2 och kallvinden klassas som riskabel. I mitten och till höger: Probabilistisk riskbedömning baserat på 128 simulerade kallvindar. I mitten: 111 kallvindar utan mögelrisk, dvs. $MI < 1$. Till höger: De 111 kallvindarna utan mögelrisk (i blått) tillsammans med 17 kallvindar med mögelrisk (i rött, med $MI > 1$).

3.1. Numerisk analys

Undersökningen börjar med att analysera resultatet av ökad isoleringstjocklek i vindsbjälklaget. Isoleringens tjocklek varieras på ett diskret sätt, från 200 mm, till 400 mm och 600 mm. Kallvindskonstruktion är konventionell, dvs. typ A1 eller A4, med bra respektive dåligt lufttätethet i vindsbjälklaget. Klimatförhållande varieras slumpmässigt varav övriga parametrarna hålls konstanta, enligt Tabell 3.

Resultaten i Tabell 3 visar att den mest avgörande parametern för värmeförlusten genom taket är isoleringstjockleken. Värmeförlusten halveras efter att isoleringstjockleken fördubblats. Läger man på ännu mer isolering, 600 mm, minskar värmeförlusterna ytterligare. En liten skillnad mellan de framräknade värmeförlusterna för kallvindarna A1 och A4 uppstår pga. ett större luftläckage genom vindsbjälklaget för typ A4.

Från Tabell 3 framgår det att det finns ett tydligt samband mellan mögelrisken och vindsbjälklagets lufttätethet. Ett tillräckligt lufttätt vindsbjälklag (typ A1) kommer att förhindra luftexfiltration till kallvinden och följaktligen blir risken för mögelpåväxt på underlagstaket låg under det första året efter reoveringen. Eftersom mögelrisken är mycket stor i kallvinden typ A4, kan den bortsorteras (som ointressant) från ytterligare undersökningar. Dessa observationer sammanfattas i figuren nedan.



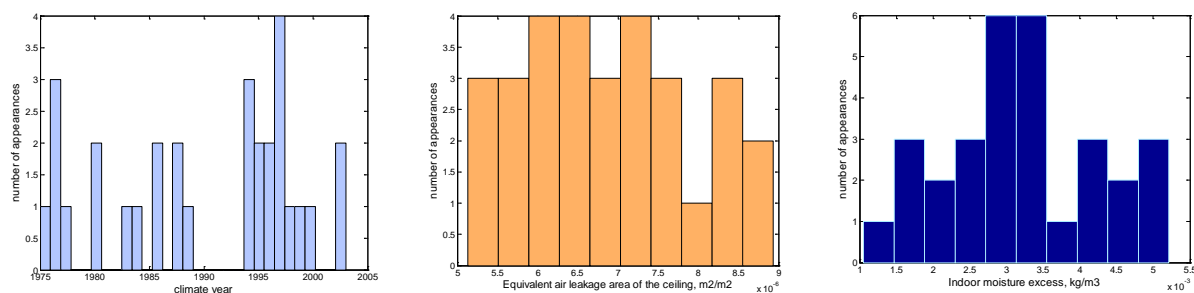
Figur 5 En sammanfattning av resultaten från Tabell 3

Tabell 3 Preliminär analys med avseende på vindsbjälklagets lufttätet.

| Typ av kallvinds konstruktion | | A1 | | | A4 | | |
|---|---|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fall | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Byggnadens geometri | | | | | | | |
| 1 | Höjd, m | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 2 | Längd, m | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 3 | Area av vindsbjälklag, m ² | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| 4 | Takets orientering | Väst | Väst | Väst | Väst | Väst | Väst |
| 5 | Tjocklek av underlagstaket, mm | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Hygrotermiska egenskaper av und. taket | | | | | | | |
| 6 | Värmelednings förmåga, W/mK | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| 7 | Ånggenomsläpplighet, m ² /s | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 |
| 8 | Initiell relativ fuktighet, % | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Isolering i vindsbjälklaget och i yttertaket | | | | | | | |
| 9 | Isoleringstjocklek i vindsbjälklag, mm | 200 | 400 | 600 | 200 | 400 | 600 |
| 10 | Isoleringstjocklek i yttertaket, mm | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ventilation och luftinfiltration | | | | | | | |
| 11 | Ventilationsöppning i takfot, mm | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 12 | Lufttätet i vindsbjälklag | god | god | god | dålig | dålig | dålig |
| Inomhus förhållandena | | | | | | | |
| 13 | Inomhus temperatur, oC | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| 14 | Fukttillskott inomhus, g/m ³ | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 15 | Väderår 1960-1990, Stockholm | * slumpmässigt | | | | | |
| RESULTAT | | | | | | | |
| | Medel energiförlust i januari, kWh/m ² | 3.89 | 1.98 | 1.26 | 3.97 | 2.04 | 1.22 |
| | Medel maximum MGI | 0.07 | 0.21 | 0.21 | 2.29 | 3.37 | 3.28 |
| | Risk för MGI>1, % | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 77 |

* väderåret väljs slumpmässigt i intervallet 1975-2005

Varje beräknat fall 1-6 i Tabell 3 involverar 30 olika simuleringar, där utomhusklimat (väderåret) väljs slumpmässigt. Ett exempel på hur väderåren valts i simuleringen visas i Figur 6. Vissa år har valts ut mer än andra, och några har inte valts ut alls. Det skulle vara att föredra att varje år väljs ca lika många gånger eftersom det inte finns någon anledning för att prioritera vissa år. Alla resultat är därför preliminära och tjäna som riktlinjer för ytterligare undersökningar.



Figur 6 Exempel på slumpmässigt utvalda parametrar. Till vänster: väderår. I mitten: läckagearea i vindsbjälklaget. Till höger: fukttillskott inomhus. Det totala antalet fall är 30 i varje exempel.

Undersökningen fortsätter genom att samtidigt variera läckagearean och isoleringstjockleken i kallvindens yttertaket med god lufttätet i vindsbjälklaget, dvs. A1-A3, såsom visas i Tabell 4. Fallet 2 från Tabell 3 används som referens och konstruktionsskillnader i förhållande till referensfallet markeras med grått. Förutom skillnaderna i kallvindskonstruktion, varieras även lufttätet i vindsbjälklaget samt fuktproduktion inomhus. Lufttätet varieras utifrån en

rektangulär sannolikhetsfördelning från $5 \cdot 10^{-6}$ till $9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2$, dvs. i närheten av referensvärdet $5 \cdot 10^{-6}$ till $9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2$. Fukttillskottet inomhus varierar kring referensvärdet $3 \text{ g}/\text{m}^3$ och genom att följa en normalfördelning med standardavvikelse $1 \text{ g}/\text{m}^3$, vilket illustreras i Figur 6.

Resultatet i Tabell 4 visar att när lufttätheten i vindsbjälklaget samt fuktproduktion inomhus varierar inom förväntade gränser (se fall 21 och 25), ändras inte mögelrisken påtagligt i jämförelse med referensfallet, även om en minskning av MI kan observeras. Det visas också att 30 mm isolering på taket minskar värmeförlusterna genom vindsbjälklaget med ytterligare 10%. Dessutom bidrar den minskade ventilationen av kallvinden till något lägre MI på underlagstaket, men utan ett betydande inflytande på värmeförlusten. Slutligen, visas det lägsta MI uppnås vid en minskad ventilation av kallvinden tillsammans med att yttertakets isoleras.

Tabell 4 Effekter av isolering av yttertak och en minskad ventilation av kallvinden med en god lufttäthet i vindsbjälklaget

| | Typ av kallvinds konstruktion | Referensfall | A1 | A2 | A3 | |
|--|---|--------------|----------------|----------|---------|---------|
| | Fall | 2 | 21 | 23 | 24 | 25 |
| Byggnadens geometri | | | | | | |
| 1 | Höjd, m | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 2 | Längd, m | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 3 | Area av vindsbjälklag, m ² | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| 4 | Taketets orientering | Väst | Väst | Väst | Väst | Väst |
| 5 | Tjocklek av underlagstaket, mm | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Hygrotermiska egenskaper av und. taket | | | | | | |
| 6 | Värmelednings förmåga, W/mK | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| 7 | Ånggenomsläpplighet, m ² /s | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 |
| 8 | Initiell relativ fuktighet, % | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Isolering i vindsbjälklaget och i yttertakets | | | | | | |
| 9 | Isoleringstjocklek i vindsbjälklag, mm | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 10 | Isoleringstjocklek i yttertak, mm | 0 | 0 | 30 | 30 | 0 |
| Ventilation och luftinfiltration | | | | | | |
| 11 | Ventilationsöppning i takfot, mm | 20 | 20 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | Lufttäthet i vindsbjälklag | god | * god ± | * god ± | * god ± | * god ± |
| Inomhus förhållandena | | | | | | |
| 13 | Inomhus temperatur, oC | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| 14 | Fukttillskott inomhus, g/m ³ | 3 | 3 | ** 3 ± 1 | 3 ± 1 | 3 ± 1 |
| 15 | Väderår 1960-1990, Stockholm | slumpmäss. | * slumpmässigt | | | |
| RESULTAT | | | | | | |
| | Medel energiförlust i januari, kWh/m ² | 1.98 | 1.98 | 1.77 | 1.78 | 1.97 |
| | Medel maximum MGI | 0.21 | 0.17 | 0.08 | 0.03 | 0.11 |
| | Risk för MGI>1, % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

* 'god ±' innebär att lufttäthet varierar likformigt i intervallet $(5-9) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^2$

** fukt produktion inomhus 3 ± 1 varierar med en normalfördelning, med ett medelvärde på $3 \text{ g}/\text{m}^3$ och en standardavvikelse $1 \text{ g}/\text{m}^3$

En liknande analys kan göras för kallvindar med dålig lufttäthet i vindsbjälklaget, dvs. kallvindar av typ A4-A6. Fallet 4 från Tabell 3 används som referens i denna undersökning, och skillnaderna i förhållande till referensfallet markeras med grått (se Tabell 5). Resultaten visar att isoleringen i yttertakets väsentligt minskar risken för mögelpåväxt från 100 % såsom i referensfallet till 17 %, förutsatt att 100 mm isolering appliceras på yttertakets. Samtidigt minskar värmeförlusten genom vindsbjälklaget med 23 %. Vidare kan man se att en reducerad ventilation av kallvinden (fall 45) minskar risken för mögelpåväxt något men inte tillräckligt i jämförelse med referensfallet. Slutligen kan man se att reducerad ventilation inte bör kombineras med isolerat yttertak (fall 44), eftersom det ökar risken för mögelpåväxt.

Tabell 5 Effekter av isolering av yttertaket och en minskad ventilation av kallvinden med en dålig lufttäthet i vindsbjälklaget

| Typ av kallvinds konstruktion | | Referensfall | A4 | | A5 | | A6 | | |
|---|---|--------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Fall | | 4 | 41 | 42 | 43 | 431 | 432 | 44 | 45 |
| Byggnadens geometri | | | | | | | | | |
| 1 | Höjd, m | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 2 | Längd, m | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 3 | Area av vindsbjälklag, m ² | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| 4 | Takets orientering | Väst | Väst | Väst | Väst | Väst | Väst | Väst | Väst |
| 5 | Tjocklek av underlagstaket, mm | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Hygrotermiska egenskaper av und. taket | | | | | | | | | |
| 6 | Värmelednings förmåga, W/mK | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| 7 | Ånggenomsläpplighet, m ² /s | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 | 1.0E-06 |
| 8 | Initiell relativ fuktighet, % | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Isolering i vindsbjälklaget och i yttertaket | | | | | | | | | |
| 9 | Isoleringstjocklek i vindsbjälklag, mm | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 10 | Isoleringstjocklek i yttertaket, mm | 0 | 0 | 0 | 30 | 50 | 100 | 30 | 0 |
| Ventilation och luftinfiltration | | | | | | | | | |
| 11 | Ventilationsöppning i takfot, mm | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 1 | 1 |
| 12 | Lufttäthet i vindsbjälklag | dålig | * dålig ± | * dålig ± | * dålig ± | * dålig ± | * dålig ± | * dålig ± | * dålig ± |
| Inomhus förhållandena | | | | | | | | | |
| 13 | Inomhus temperatur, oC | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| 14 | Fukttillskott inomhus, g/m ³ | 3 | 3 | 3 ± 1 | 3 ± 1 | 3 ± 1 | 3 ± 1 | 3 ± 1 | 3 ± 1 |
| 15 | Väderår 1960-1990, Stockholm | sluppmäss. | * sluppmässigt | | | | | | |
| RESULTAT | | | | | | | | | |
| | Medel energiförlust i januari, kWh/m ² | 2.04 | 1.96 | 1.94 | 1.76 | 1.69 | 1.57 | 1.67 | 1.97 |
| | Medel maximum MGI | 3.37 | 2.91 | 2.6 | 1.47 | 1.14 | 0.52 | 4.45 | 3.73 |
| | Risk för MGI>1, % | 100 | 87 | 67 | 43 | 37 | 17 | 87 | 77 |

* 'dålig ±' innebär att lufttäthet varierar likformigt i intervallet $(1-6) \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{m}^2$

Ett större antal varierande parametrar i kombination med en bättre provtagningsteknik leder till något annorlunda resultat jämfört med referensstudien. Genom att variera t ex fem parametrar (initial relativ fuktighet, lufttäthet i vindsbjälklag, innetemperatur, fukttillskott inomhus och klimatår) i stället för tre (lufttäthet i vindsbjälklag, fukttillskott inomhus och klimatår) med hjälp av så kallad Sobol teknik, vilken är en kvasisluppmässig teknik, blir mögelrisken för kallvinden typ A5 13 % i stället för 17 %. Detta sammanfattas i Tabell 6. Den skillnaden i resultaten är inom rimliga gränsen med hänsyn till de olika antagandena vid simuleringarna. Observera att antal simuleringar med Sobol teknik är 128 istället för 30 som används i Monte-Carlo tekniken. Observera också att resultatet för värmeförlusten genom vindsbjälklag ändras marginellt.

Tabell 6 Resultat för kallvind typ A5 med olika provtagningstekniker.

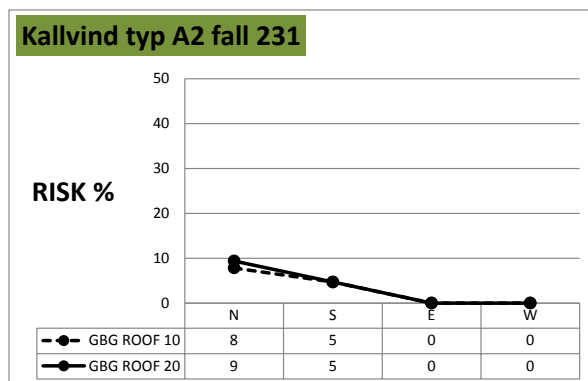
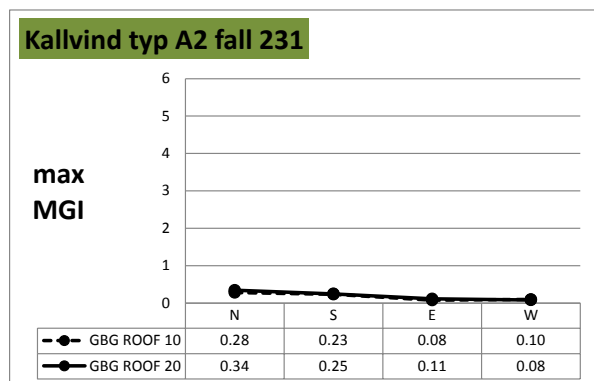
| | | | |
|----|---|-------------|-----------|
| | Typ av kallvinds konstruktion | A5 | A5 |
| | Fall | 432 | 4321 |
| | Provtagningsteknik | Monte-Carlo | Sobol |
| | Antal simuleringar | 30 | 128 |
| | Byggnadens geometri | | |
| 1 | Höjd, m | 5 | 5 |
| 2 | Längd, m | 20 | 20 |
| 3 | Area av vindsbjälklag, m ² | 220 | 220 |
| 4 | Taketets orientering | Väst | Väst |
| 5 | Tjocklek av underlagstaket, mm | 22 | 22 |
| | Hygrotermiska egenskaper av und. taket | | |
| 6 | Värmelednings förmåga, W/mK | 0.13 | 0.13 |
| 7 | Ånggenomsläpplighet, m ² /s | 1.0E-06 | 1.0E-06 |
| 8 | Initial relativ fuktighet, % | 70 | ***60-90% |
| | Isolering i vindsbjälklaget och i yttertak | | |
| 9 | Isoleringstjocklek i vindsbjälklag, mm | 400 | 400 |
| 10 | Isoleringstjocklek i yttertak, mm | 100 | 100 |
| | Ventilation och luftinfiltration | | |
| 11 | Ventilationsöppning i takfot, mm | 20 | 20 |
| 12 | Lufttäthet i vindsbjälklag | dålig ± | dålig ± |
| | Inomhus förhållandena | | |
| 13 | Inomhus temperatur, oC | 22 | ****22± 1 |
| 14 | Fukttillskott inomhus, g/m ³ | 3 ± 1 | 3 ± 1 |
| 15 | Väderår 1960-1990, Stockholm | | |
| | RESULTAT | | |
| | Medel energiförlust i januari, kWh/m ² | 1.57 | 1.59 |
| | Medel maximum MGI | 0.52 | 0.5 |
| | Risk för MGI>1, % | 17 | 13 |

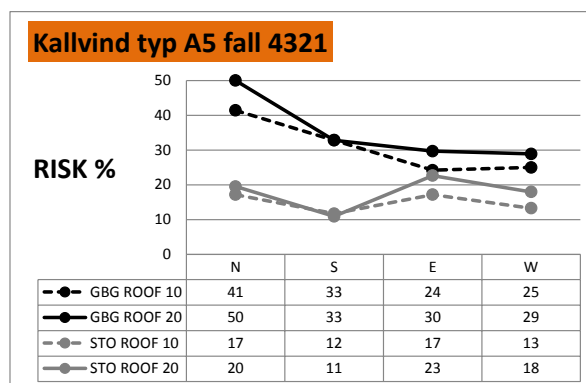
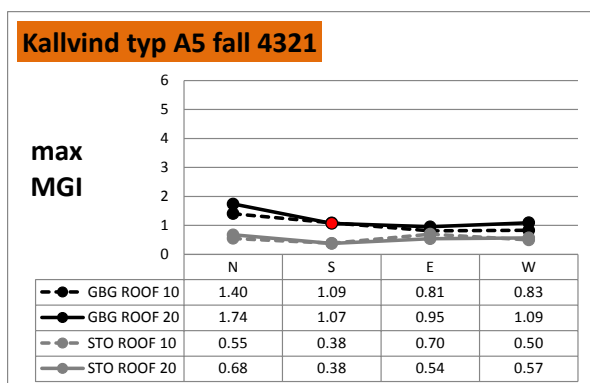
*** initial relativ fuktighet varierar uniformt mellan 60 – 90 %

**** innetemperatur varierar med en normalfördelning med ett medelvärde på 21 °C och en standardavvikelse 1 °C

Sobolteknik med fem varierande parameterar (enligt Tabell 6) och 128 körningar har använts för en noggrannare undersökning av kallvindarna typ A2 och A5. Resultat för olika klimatort (Göteborg och Stockholm), taklutningar (10 och 20 grader), samt tak orienteringar redovisas i figuren nedan.

Enligt resultaten ligger mögelrisken i kallvind typ A5 över 10 % i alla studerade fall, vilket anses som stor risk och därför rekommenderas inte den typen av renoveringen. Däremot renoveringen typ A2, som ger en väldigt låg mögelrisk i Stockholm (enligt Tabell 4), och ganska låg i Göteborg kan anses som än bra alternativ.





Figur 7 Resultat för kallvindar typ A2 och A5 med Sobol teknik.

4. Utvärdering

4.1. Hur väl möter renoveringsstrategin syftet med renoveringen?

Från den preliminära numeriska analysen som presenterats ovan, kan man dra slutsatsen att alla renoveringsstrategier A1-A6 minskar värmeförlusten genom vindsbjälklaget. Det finns dock betydande skillnader mellan dessa kallvindar i förhållande till mögelrisk:

A1-A3 risken är låg och dessa lösningar rekommenderas

A4 & A6 risken är mycket hög och dessa strategier rekommenderas inte

A5 + 10 cm är risken mer än 10% och rekommenderas inte

4.2. Innebär rekommenderande renoveringsstrategin några begränsningar?

En mögelfritt kallvind ett år efter renoveringen innebär inte att mögelrisk kan uteslutas i de kommande åren. Enligt resultaten är lufttätheten hos vindsbjälklag den mest avgörande parametern för mögelrisk. Om lufttätheten försämras, kan risken för mögel öka.

4.3. Motsvarar renoveringsstrategin prestandakriterierna?

För att uppfylla prestandakriterierna bör renoveringsstrategierna A1-A3 utföras med minst 400 mm isolering på vindsbjälklaget.

5. Tillämpliga lösningar

Tillämpliga lösningar är A1-A3.

Referenser

BBR 19 (2011:26). Building regulations. BOVERKET - The Swedish National Board of Housing, Building and Planning

Boverket 2010. God bebyggd miljö – förslag till nytt delmål för fukt och mögel. Resultat om byggnaders fuktskador från projektet BETSI. Tillgänglig på www.boverket.se

Hagentoft CE, Sasic Kalagasidis A. 2012. Chapter: Hygrothermal Conditions and Mould Growth Potential in Cold Attics: Impact of Weather, Building System and Construction Design Characteristics in *Building Pathology and Rehabilitation*. Editors: Freitas, V. Peixoto de, Costa, Anibal, Delgado, João M.P.Q. Springer.

Hagentoft CE, Sasic Kalagasidis A. 2011. Probabilistic analysis of hygrothermal conditions and mould growth potential in cold attics. Nordic Symposium in Building Physics. Tampere, Finland.

Harderup L-E and Stein J. Presentation of the case Sigtuna. IEA-Annex 55 meeting in Holzkirchen, April 14-15, 2010. Department of Building Physics, Lund University.

Hens H., Zehng R., Janssens A., Does performance based design impacts traditional solutions? Metal roofs as an example. In the proceedings of the 2nd international conference on building physics, 2003, Belgium.

Hukka E., Viitanen H.A., 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* 33, Springer-Verlag.

Just Johnston C., Juhl L. Test of suggested Framework. Annex 55 work meeting in Leuven, October 2012.

Ljungquist, K. A probabilistic approach to Risk Analysis – A comparison between undesirable indoor events and human sensitivity. Doctoral thesis. Luleå University of Technology, Sweden, 2005.

Mata E. Energy efficiency and carbon dioxide mitigation in building stocks. Development of methodology using the Swedish residential stock. Licentiate thesis. Chalmers University of Technology, 2011.

Bilaga 4: SimpleColdAttic

SimpleColdAttic är en fristående programversion av den kallvindsberäkningsmodell som har använts för probabilistiska simuleringar i bilaga 3. Den bygger på en förenklad matematisk modell av värme- och fuktbalansen för en kallvind. Mer detaljer om modellen finns i Hagentoft (2011) and Hagentoft och Sasic Kalagasidis (2011).

Ingångsdata till modellen definieras genom ett användargränssnitt. Mer detaljer om standardvärden för ingångsdata finns i bilaga 3. I nuvarande version, kan man ange ett värde för varje parameter och starta antingen 'deterministiska' eller 'slumpmässiga' (random) simuleringar. Den deterministiska simuleringen ger resultat för ett scenario som bygger på de angivna ingångsdata. I resultatet ingår temperatur, relativ fuktighet och MI för underlagstaket under ett år, samt värmeförluster genom vindsbjälklaget i januari månaden. Vid den slumpmässiga simuleringen ska man ange ett antal önskade simuleringar samt intervaller och fördelningen för varje ingångsparametern. Programmet väljer då lika många slumpmässiga värden till varje parameter, med referens i värdena som anges i gränssnittet, och kombinera dem i lika många simuleringsscenarioer – simuleringår.

The screenshot shows the 'Attic Calculation' software window. It is divided into two main sections: 'Deterministic Simulation' and 'Probabilistic Simulation'. The 'Deterministic Simulation' section contains a list of parameters with input fields and buttons for 'Load the Weather Data' and 'Run the Attic Model'. The 'Probabilistic Simulation' section contains a list of parameters with input fields, a 'Number of Simulations' field set to 100, and a 'Run the Attic Model' button. A legend indicates that 'U' stands for Uniform distribution and 'N' for Normal distribution. The bottom of the window displays the text 'Building Physics Research Group - Chalmers University of Technology'.

| Deterministic Simulation | | Probabilistic Simulation | |
|---|-------|--|---|
| Height of building [m] | 5 | U (4 , 8) [m] | Number of Simulations 100 |
| Area of ceiling and roof A [m ²] | 220 | U (50 , 200) [m ²] | Run the Attic Model |
| Venting area per meter eave Ave [m ²] | 0.02 | U (0.001 , 0.05) [m ²] | |
| Length of building (eave side) L [m] | 20 | U (7 , 20) [m] | U: Uniform distribution N: Normal distribution |
| Thickness of wooden underlay d [m] | 0.022 | U (0.01 , 0.02) [m] | |
| Vapour diffusion coefficient of wood v [m ² /s] | 1e-6 | N (1e-6 , 2e-7) [m ² /s] | |
| Initial relative humidity of wood RHwi [-] | 0.7 | U (0.5 , 0.9) [-] | |
| Thermal conductivity of roof wood [W/mK] | 0.13 | N (0.13 , 0.02) [W/mK] | |
| Thermal resistance of roof insulation Rr [m ² K/W] | 0 | U (0 , 1) [m ² K/W] | |
| Leakage area per m ² of ceiling Ac [m ² /m ²] | 3e-5 | U (0.001 , 0.05) [m ² /m ²] | |
| U-value of the ceiling Uc [W/m ² K] | 0.2 | U (1 , 5) [W/m ² K] | |
| Indoor temperature Ti [°C] | 21 | N (20 , 1.5) [°C] | |
| Indoor moisture supply [kg/m ³] | 0.002 | N (0.005 , 0.002) [kg/m ³] | |
| Orientation of one of eave sides (0-180) [deg] | 90 | U (0 , 180) [deg] | |
| Year of climate data (1-30) [-] | 30 | U (1 , 30) [-] | |

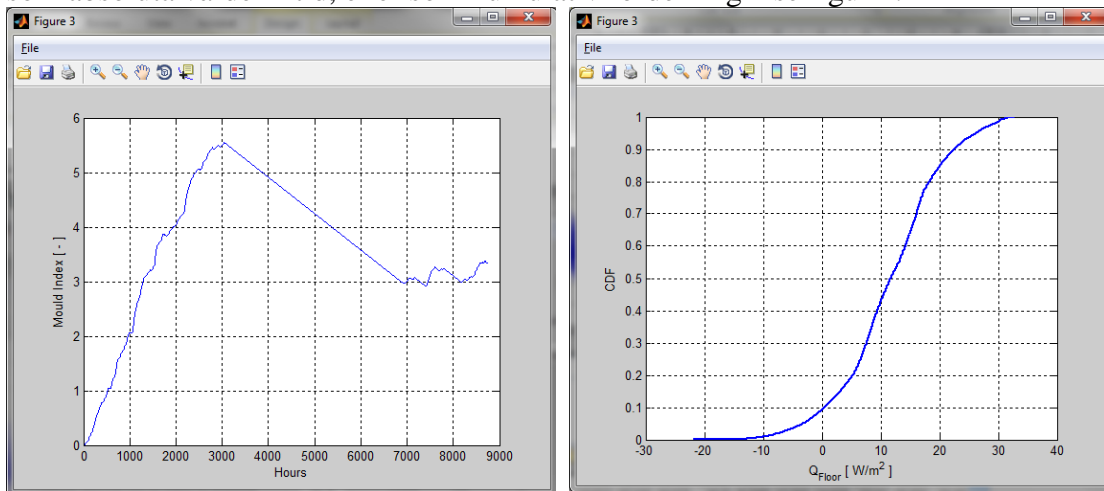
Simuleringen startar efter att man trycker på knappen 'Run the Attic Model'. Resultatet av simuleringen sparas automatisk i en Excel-fil och i en textfil. Excel-filen sammanfattar ingångsdata, total värmeförlust genom vindsbjälklaget i januari månaden samt maximum MI (på engelska MGI – Mould Growth Index) för underlagstak, enligt figur 1. Textfilen innehåller timvärdena för temperatur och RF i luften och på ytan av underlagstaket.

| | |
|-------------------------------|----------|
| Ingångsdata | 1 |
| | 5 |
| | 220 |
| | 90 |
| | 0.02 |
| | 20 |
| | 0.022 |
| | 0.000001 |
| | 0.7 |
| | 0.13 |
| | 0 |
| | 0.00003 |
| | 0.2 |
| | 21 |
| | 0.002 |
| | 30 |
| max MGI | 0.248777 |
| total värmeförlust, kWh/månad | 3.962484 |

| | | | |
|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 2.4877698e-01 | 3.9624842e+00 | 0.0000000e+00 | 1.2000000e+00 |
| 1.5106878e+01 | 7.2572606e-01 | 0.0000000e+00 | -1.2442492e+00 |
| 2.7110907e+01 | 6.6844114e-01 | 0.0000000e+00 | -1.4652136e+00 |
| 2.8196715e+01 | 6.6846551e-01 | 0.0000000e+00 | -1.1014360e+00 |
| 2.6409607e+01 | 6.7211822e-01 | 0.0000000e+00 | -5.2106940e-01 |
| 2.3559213e+01 | 6.8547512e-01 | 0.0000000e+00 | 2.9759389e-03 |
| 2.0985382e+01 | 7.0045647e-01 | 0.0000000e+00 | 5.0589647e-01 |
| 1.8515546e+01 | 7.1747725e-01 | 0.0000000e+00 | 9.9071210e-01 |
| 1.6135197e+01 | 7.3470011e-01 | 0.0000000e+00 | 1.2779230e+00 |
| 1.4725579e+01 | 7.4686796e-01 | 0.0000000e+00 | 1.3927199e+00 |
| 1.4162270e+01 | 7.5374290e-01 | 0.0000000e+00 | 1.4435579e+00 |
| 1.3913042e+01 | 7.5460796e-01 | 0.0000000e+00 | 1.4572693e+00 |
| 1.3846090e+01 | 7.5341952e-01 | 0.0000000e+00 | 1.4902750e+00 |
| 1.3684114e+01 | 7.5470160e-01 | 0.0000000e+00 | 1.4777728e+00 |
| 1.3745537e+01 | 7.5419902e-01 | 0.0000000e+00 | 1.4723667e+00 |
| 1.3772124e+01 | 7.5408956e-01 | 0.0000000e+00 | 1.4452578e+00 |
| 1.3904905e+01 | 7.5461730e-01 | 0.0000000e+00 | 1.1909454e+00 |
| 1.5153129e+01 | 7.3797386e-01 | 0.0000000e+00 | 9.0104335e-01 |
| 1.6576190e+01 | 7.2207849e-01 | 0.0000000e+00 | 6.1291800e-01 |
| 1.7990496e+01 | 7.1022422e-01 | 0.0000000e+00 | 4.4433359e-02 |
| 2.0781803e+01 | 6.8719901e-01 | 0.0000000e+00 | -7.1251947e-01 |
| 2.4499277e+01 | 6.6788614e-01 | 0.0000000e+00 | -1.9079708e+00 |
| 3.0370810e+01 | 6.4942206e-01 | 0.0000000e+00 | |

Figur 1 Innehåll av resultatfiler. Tv.: Excel fil. Th.: Textfil.

Övriga knappar i gränssnittet kan användas för att plotta ut resultat av simuleringen, antingen som absoluta värden i tid, eller som kumulativ fördelning – se figur 2.



Figur 2 Tv: MGI för underlagstak. Th: värmeförlust genom vindsbjälklaget, i kumulativ fördelning.

Resultatpresentation från slumpmässiga beräkningarna är under utvecklingen. I nu läget kan man få en sammanfattning av ingångsdata, värmeförlust genom vindsbjälklaget i januari månaden samt maximum MI för underlagstak, enligt figur 3. I framtiden ska det vara möjligt plotta ut diagram med alla resultat samt generera en textfil med detaljerade resultat.

| | |
|-------------------------------|----------|
| Ingångsdata | 1 |
| | 5 |
| | 220 |
| | 90 |
| | 0.02 |
| | 20 |
| | 0.022 |
| | 0.000001 |
| | 0.7 |
| | 0.13 |
| | 0 |
| | 0.00003 |
| | 0.2 |
| | 21 |
| | 0.002 |
| | 30 |
| max MGI | 0.248777 |
| total värmeförlust, kWh/månad | 3.962484 |

| G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 6.824184 | 4.127331 | 5.107692 | 4.184686 | 4.388527 | 7.293831 | 6.779314 | 5.268398 | 7.800888 | 4.137784 |
| 115.8117 | 107.2338 | 164.8275 | 169.28 | 78.03089 | 123.4647 | 116.8379 | 146.947 | 156.4047 | 163.203 |
| 49.68451 | 122.3465 | 117.9176 | 29.27011 | 21.41958 | 89.70553 | 172.7539 | 61.26943 | 105.3482 | 40.28615 |
| 0.037812 | 0.0135 | 0.025792 | 0.035255 | 0.044654 | 0.048005 | 0.027814 | 0.007793 | 0.008315 | 0.013618 |
| 17.92932 | 10.30567 | 17.5857 | 10.16582 | 19.08043 | 11.54979 | 9.555738 | 10.26409 | 15.00858 | 13.15276 |
| 0.013517 | 0.018308 | 0.015853 | 0.015497 | 0.019172 | 0.012858 | 0.017572 | 0.017537 | 0.013804 | 0.015678 |
| 7.67E-07 | 7.7E-07 | 1.02E-06 | 1.14E-06 | 1.52E-06 | 8.67E-07 | 1.04E-06 | 9.84E-07 | 6.13E-07 | 9.12E-07 |
| 0.564873 | 0.817714 | 0.624486 | 0.711413 | 0.566259 | 0.740793 | 0.605189 | 0.761632 | 0.775686 | 0.799261 |
| 0.126118 | 0.087233 | 0.113208 | 0.157092 | 0.108557 | 0.149219 | 0.132481 | 0.158734 | 0.090782 | 0.126046 |
| 0.106653 | 0.961898 | 0.004634 | 0.77491 | 0.817303 | 0.868695 | 0.084436 | 0.399783 | 0.25987 | 0.800068 |
| 0.216275 | 0.455413 | 0.091742 | 0.132638 | 0.073624 | 0.068898 | 0.434777 | 0.290273 | 0.27538 | 0.073332 |
| 4.412124 | 3.488221 | 2.40381 | 3.052998 | 2.607232 | 1.303867 | 1.959665 | 1.493276 | 1.735631 | 1.95981 |
| 19.19966 | 16.99605 | 21.44634 | 20.78009 | 19.96996 | 19.94784 | 18.80275 | 21.52803 | 19.80017 | 18.9282 |
| 0.007703 | 0.00455 | 0.003822 | 0.004412 | 0.003304 | 0.00276 | 0.010052 | 0.008311 | 0.005615 | 0.002486 |
| 8 | 11 | 25 | 1 | 2 | 6 | 20 | 22 | 20 | 14 |
| 6.000162 | 6.000141 | 1.695094 | 1.446294 | 0.09337 | 0.051438 | 6.000115 | 6.00079 | 6.000347 | 0.20328 |
| 35.89275 | 13.63357 | 29.03762 | 10.85961 | 9.543153 | 3.597852 | 18.57498 | 9.427916 | 11.96948 | 7.655008 |

Figur 3 Innehåll av resultatfil för slumpmässiga simuleringar. Tv.: Excel fil med ingångsdata till deterministiska simuleringar. Th.: Excelfil med ingångsdata till slumpmässiga simuleringar.

Programmet SimpleColdAttic är tillgänglig för nedlagning genom:
<http://www.byggnadsteknologi.se/downloads.html>.

Referenser

C.-E. Hagetoft, Probabilistic analysis of hygrothermal conditions and mould growth potential in cold attics. Impact of weather, building system and construction design characteristics. XII DBMC, April 2011, Porto, Portugal.

Hagetoft CE, Sasic Kalagasidis A. 2011. Probabilistic analysis of hygrothermal conditions and mould growth potential in cold attics. Nordic Symposium in Building Physics. Tampere, Finland.