



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Forbedring af energi- og fugtforhold i krybekældre Program for Grøn Teknologi 2013

Miljøprojekt nr. 1867

Juni 2016

Redaktion: Miljøstyrelsen

Tekst: Britt Haker Høegh

ISBN: 978-87-93435-83-4

Ansvarsfraskrivelse

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	5
2.	Sammenfatning	6
3.	Indledning	7
4.	Værktøj til vurdering af fugtforhold i krybekældre	8
5.	Vurdering af energi-forbedrende tiltag i krybekældre	10
5.1	Kritiske fugtforhold	10
5.2	Effekter ved efterisolering af krybekælderens etagedæk	13
5.3	Effekter af ændret ventilation i krybekælderen	15
5.4	Potentiale i SV14 - vedvarende energidreven enhed til ventilation med opvarmet udeluft	16
5.4.1	Teoretisk isoleringsmaksimum	18
5.4.2	Potentiale i SV14 til styring af fugtforhold	19
5.5	Udvikling af enhed til affugtning af den opvarmede ventilationsluft	25
5.5.1	Potentiale i affugtningsenhed til styring af fugtforhold	25
6.	Kravspecifikation til arkitektonisk tilpasning	30
6.1	Tilpasningseksempler	31
7.	Konklusion og perspektivering	33
7.1	Perspektivering	36
8.	Referencer	37
Bilag 1.	Krybekældermodel	38
I.	Den matematiske model	38
II.	Datainput	39
III.	Usikre og variable randbetingelser	40
III.A	Luftskifte i krybekælder	41
III.B	Jordtemperatur og jordfugtighed	41
III.C	Varmekilde i krybekælder	42
III.D	Indeklima over krybekælder	42
III.E	Udendørs temperatur og relativ luftfugtighed	43
IV.	Outputdiagram	44
V.	Kalibrering af krybekældermodellen	45
VI.	Estimering og stød med krybekældermodellen	53
VII.	Konklusion og perspektivering	56
Bilag 2.	Programvejledning	58
Bilag 3.	Udviklingstests	60

1. Forord

Denne rapport indeholder en undersøgelse af muligheder til forbedring af energi- og fugtforhold i krybekældre.

Projektet blev udført af Teknologisk Institut, Indeklima & Bygningsundersøgelser og Beton samt SolarVenti som en del af Miljøstyrelsens Program for Grøn Teknologi 2013 i perioden februar 2014 til april 2016.

Projektet omhandler udvikling af effektiv teknologi til forbedring af fugtforhold i krybekældre med det formål at opnå betingelser, der tillader en efterisolering af krybekældres etagedæk mod stueetage. Herunder udvikling af et matematisk vurderingsværktøj til vurdering af fugt- og temperaturforhold i krybekældre, teknologiudvikling af en affugtningsenhed til soldreven ventilationsteknologi og arkitektonisk granskning af soldrevne løsninger.

Til validering af krybekældermodellen (det matematiske vurderingsværktøj) er der foretaget registreringer og langtidsmålinger i to krybekældre. Tak til bygningsejerne, som har stillet deres krybekældre til rådighed.

Projektet har haft en styregruppe med følgende deltagere:

Helle Winther, Miljøstyrelsen (formand)
Anne Pedersen, Teknologisk Institut, projektleder
Britt Haker Høegh, Teknologisk Institut

Projektets følgegruppe bestod af:

Helle Winther, Miljøstyrelsen
Lasse Kofoed Nielsen, Landsforeningen for Økologisk Byggeri
Allen Leegard, Byggefagenes Samvirke
Hans Jørgen Christensen, SolarVenti
Mikkel Arlien-Søborg, SolarVenti
Carsten Johansen, Teknologisk Institut
Anne Pedersen, Teknologisk Institut
Britt Haker Høegh, Teknologisk Institut
Johannes Rauff Greisen, Teknologisk Institut

Tak til følgegruppen for deres bidrag.

2. Sammenfatning

Krybekælderkonstruktioner er særligt problematiske på grund af store fugtmæssige udfordringer. Samtidig er der samfundsmæssigt fokus på reduktion af energiforbrug, – i dette projekts sammenhæng efterisolering af etagedæk over krybekældre, hvilket øger fugtrisikoen. Projektet omhandler udvikling af effektiv soldreven ventilationsteknologi til forbedring af fugtforhold i krybekældre med det formål at opnå betingelser, der tillader en efterisolering af krybekældres etagedæk mod stueetage. Herunder udvikling af en matematisk krybekældermodel til vurdering af fugt- og temperaturforhold i krybekældre, teknologiudvikling af en affugtningsenhed til soldreven ventilationsteknologi og arkitektonisk granskning af soldrevne løsninger.

Projektet blev udført af Teknologisk Institut, Indeklima & Bygningsundersøgelser og Beton samt SolarVenti, som producerer soldrevne ventilationssystemer. Projektet er en del af Miljøstyrelsens Program for Grøn Teknologi 2013 i perioden februar 2014 til april 2016.

Simuleringer med krybekældermodellen har vist, at luftskifte/ventilation har afgørende indflydelse på fugtforholdene i krybekældre. Ved installation af en tilstrækkelig stor dimensioneret soldreven ventilationsteknologi kan luftskiftet om sommeren sikres, mens dette kan være en udfordring om vinteren, hvor solenergien til at drive ventilationen ofte ikke er tilstrækkeligt. Samtidig har det vist sig, at en ventilation med opvarmet udeluft alene ikke nedbringer fugtniveauet om sommeren i en grad, der tillader en efterisolering af krybekældres etagedæk. Til gengæld viser den i projektets regi videreudviklede affugtningsenhed lovende resultater med henblik på en forbedring af fugtforholdene om sommeren. Der er dermed udpeget to områder til effektiv videreudvikling af soldreven ventilationsteknologi, for målrettet at forbedre de fugttekniske forhold i krybekældre: Sikring af godt luftskifte om vinteren, som producenten sideløbende med projektet arbejder på, og effektiv affugtning af den opvarmede ventilationsluft om sommeren. Når der foreligger nøgletal for den videreudviklede ventilationsløsning og disse er indarbejdet i krybekældermodellen, kan det vurderes, hvilken kapacitet den soldrevne ventilationsløsning skal have, for at et etagedæk i en krybekælder kan efterisoleres med en given isoleringstykkelse. Forholdene i krybekældrene varierer meget, afhængigt af konstruktion, placering mv. Derfor skal vurderingerne foretages på ny for hver konkret krybekælder for sig. Supplerende skal der særskilt udføres en bygningsfysisk analyse (damptæthed, dugpunkt i konstruktionen mv.) af selve etagedækkonstruktionens egnethed til efterisolering.

Den nygenererede viden har vist, at der er behov for større kapacitet af de soldrevne løsninger, hvis der skal kunne opnås forhold, der muliggør efterisolering af etagedæk over krybekældre. Ventilationsløsningernes producent SolarVenti beskriver, at en af barriererne mod anvendelse af soldrevne ventilationsløsninger er æstetikken. Derfor er der foretaget en arkitektonisk betragtning af soldrevne løsninger, som har haft fokus på en integration af solfangerne i bygningsdesign, som tilgodeser både æstetik, kapacitet og funktion. Det er herved udpeget, at en større fleksibilitet i solfangerens form, størrelse og befæstelsespunkter, samt større tilpasningsmuligheder for placering af installationers ind- og udtag vil sikre, at soldrevne ventilations-systemer bliver anvendelig i bred forstand uden at skæmme bygninger. Udfordringen er, at afvigelser fra standardløsninger øger produktionsomkostninger, men generelt oplyser SolarVenti, at de nuværende produktionsfaciliteter tillader sådanne ændringer.

3. Indledning

Der er samfundsmæssigt fokus på reduktion af energiforbruget i det eksisterende byggeri. En af de bygningsdele med stor energibesparelsespotentiale er krybekældre. Samtidig er der stor risiko for fugtskader forbundet med energirenovering af krybekældre. Til forbedring af fugtforhold i kældre har der i de seneste år været vedvarende energidrevne ventilationssystemer på markedet. Virkningskonceptet er at ventilere kældre/krybekældre med opvarmet udeluft og dermed forcere en affugtning af krybekælderens indeluft.

Derfor har projektet beskæftiget sig med at belyse, om og under hvilke forudsætninger, der kan udføres en efterisolering af etagedækket af kolde, ventilerede krybekældre, som er udstyret med vedvarende energidrevne ventilationssystemer, uden at der opstår risiko for skimmel- og svampvækst. Der er undersøgt potentiale i et kendt system af producenten SolarVenti, som er partner i projektet, ved navn SV14. Systemet er baseret på ventilation alene med opvarmet udeluft. Det har vist sig, at potentialet til efterisolering af krybekældre udstyret med dette kendte system er meget lille. Derfor er ventilationssystemet i projektets regi videreudviklet til både at kunne opvarme samt affugte ventilationsluften. Teknologiuudviklingen af affugtningsenheden er ikke afsluttet inden for projektets tidsramme, men der er frembragt indledende indikationer om ydeevnen af en affugtningsenhed (kapitel 5.5). Med udgangspunkt i disse er der foretaget simuleringer for at afdække potentialet for efterisolering af krybekældre, når disse er udstyret med det videreudviklede vedvarende energidrevne ventilationssystem med affugtningsenhed.

Til undersøgelse af de ovennævnte problemstillinger er der i første step udviklet en krybekældermodel til beregning af fugt- og temperaturforhold i krybekældre (kapitel 4). Der er mange ubekendte randbetingelser i krybekældre. Derfor bliver beregningen kalibreret mod empiriske data. Derved skal det sikres, at den matematiske model afspejler de reelle forhold i en given krybekælder. I modellen kan der simuleres tilslutning af SV14-systemet, samt at der er foreberedt simulering af en affugtningsenhed, når det endelige produkt er færdigudviklet.

I næste step anvendes modellen til at simulere forhold i krybekældre efter forskellige ændringer (kapitel 0). Indledende simuleres ændringer af isoleringstykkelse under etagedæk og af luftskifte. Dernæst simuleres effekten af forskellige typer vedvarende energidreven ventilation. Først undersøges ventilation alene med opvarmet udeluft baseret på det kendte system SV14. Der belyses, hvilke effekter systemet har og hvilket potentiale i efterisolering af krybekælderens etagedæk det giver. Derefter simuleres ventilation med det videreudviklede system, der både opvarmer og affugter indblæsningsluften, for at belyse dets effekt og dets potentiale i efterisolering af krybekælderens etagedæk.

Afsluttende er der foretaget en arkitektonisk betragtning af soldrevne løsninger (kapitel 0). Ventilationsløsningernes producent SolarVenti beskriver, at en af barriererne mod anvendelse af de kendte vedvarende energidrevne systemer er æstetikken. Derudover har den nygenereede viden vist, at der er behov for større kapacitet af de soldrevne løsninger, hvis der skal kunne opnås forhold, der muliggør efterisolering af etagedæk over krybekældre. Den arkitektoniske undersøgelse har derfor haft fokus på en integration af solfangerne i bygningers design, som tilgodeser både æstetik, kapacitet og funktion.

4. Værktøj til vurdering af fugtforhold i krybekældre

I projektets regi er der udviklet et værktøj til vurdering af fugtforhold i krybekældre. Værktøjet er en ligevægtsmodel af en krybekælder, som tilpasses de specifikke krybekældre ad to tempi ved:

1. At definere de konstruktive og materialespecifikke egenskaber af den konkrete krybekælder i den matematiske model.
2. At kalibrere modellen til den specifikke krybekælder på baggrund af empiriske data, målt i den konkrete krybekælder.

Derefter kan værktøjet anvendes til at estimere og vurdere konsekvenser af forskellige indgreb i krybekælderens forhold. Det kan fx være ændring af luftskifte, efterisolering af etagedæk, etablering af vedvarende energidreven ventilation med opvarmet og/eller affugtet udeluft.

Indledende er det blevet undersøgt, om man kan simulere krybekældre ved hjælp af tilgængelige computersimulationsprogrammer, som fx BSim. Anvendelse af denne type komplekse, stationære modeller vil gøre det muligt at simulere faseforskydningseffekter på grund af materiales varme- og fugtkapacitet. For nogle programmer vil også andre materialespecifikke fænomener som fx kapillarsugning kunne medtages. Det store antal randbetingelser i krybekældre, som man ikke kender nok til, vil dog gøre beregningerne usikre, samt at simulering af soldrevne ventilationsløsninger eller affugtningsenheder er meget kompleks og muligvis ikke umiddelbart muligt i disse programmer.

Den tilgængelige viden om mange af krybekældrenes randbetingelser er meget begrænset. Der foreligger ikke præcise data eller formler til beregning af:

- De klimatiske randbetingelser i jord/terræn
- Krybekælderens luftskifte, som er afhængigt af ventilationsåbningernes størrelse, udformning og placering
- Varmetilskud fra varmerør eller lignende
- Indeklimaforhold – er individuelle
- Udendørsforhold – kan variere fra år til år

Disse randbetingelser kan kun estimeres. Summen af usikre parametre er dermed meget stor og giver en forholdsvis vag teoretisk basis for at kunne vurdere konsekvenser af indgreb i krybekælderens forhold.

Til den nødvendige bestemmelse af de ukendte parametre er det valgt at kalibrere en matematisk standardmodel for krybekældre til en given krybekælder ved hjælp af måledata fra selve den krybekælder.

Der er valgt anvendelse af en forholdsvis simpel ligevægtsmodel, specifikt udviklet til krybekældre, som beregner forholdene for hver time. Derudover er der lagt vægt på en enkel definition af den givne krybekælder og en overskuelig kalibrering af modellen til dens specifikke forhold/randbetingelser.

Når den matematiske standardmodel er kalibreret til den specifikke krybekælder, kan forskellige indgreb i denne krybekælder simuleres og deres konsekvenser evalueres. Der er i projektets regi tale om konsekvenser af efterisolering af etagedækket og indblæsning af opvarmet og/eller affugtet udeluft. Det er især her fordelene ved anvendelse af en forholdsvis simpel ligevægtsmodel model viser sig. I en sådan model kan der målrettet indføres og styres egnede variabler til simulation af de tiltag, som ønskes evalueret.

Krybekældermodellen er programmeret i Excel 2013. I Bilag 1 Krybekældermodel findes en selvstændig programdokumentation, hvor krybekældermodellens antagelser, forudsætninger, verifikation og anvendelsesområder er beskrevet og i Bilag 2 Programvejledning findes en trinvis beskrivelse af, hvordan modellen anvendes.

5. Vurdering af energiforbedrende tiltag i krybekældre

Energiforbedring af krybekældre kan foretages på forskellig vis. Man kan nedlægge krybekælderen og etablere et terrændæk efter gældende regler. Dette er som regel et bekosteligt tiltag, idet alle de bygningsdele, der hviler på krybekælderen etagedæk, som fx køkken, lette skillevægge, mv, bliver berørt ved et sådant et indgreb. Derudover er det ofte nødvendigt at indskære vandrette fugtspærre i skillevæggsfundamenter for enten at etablere dem eller flytte deres placering. En anden mulighed er at omdanne krybekælderen til en opvarmet konstruktion, der inddrages i bygningens opvarmede volumen. Denne løsning er forbundet med udvendig efterisolering af krybekælderen og kan ligeledes være et dyrt tiltag.

Derfor er der fortsat et ønske om at finde løsninger til energirenovering af krybekældre ved efterisolering af etagedækket. Ved sidstnævnte tiltag er risiko for fugtskader stor. Den grundlæggende årsagssammenhæng for denne risiko er, at energiforbedrende tiltag betyder et temperaturfald på den kolde side af isoleringen, som medfører en tilsvarende stigning af den relative luftfugtighed på den kolde side af isoleringen, dvs. inde i krybekælderen. Derfor frarådes i det gældende almene tekniske fælleseje at efterisolere etagedæk over krybekældre.

Andre energiforbedrende tiltag kan være ventilation med solcelleopvarmet ventilationsluft. Her tilføres krybekælderen energi, for at øge temperaturen og dermed sænke den relative luftfugtighed. Installation af sådanne systemer betyder samtidig en reduktion af den naturlige ventilation. I projektets regi bliver en eksisterende solcelledreven ventilationsløsning af type SV14 undersøgt for dens energiforbedrende og fugtreducerende effekt i krybekældre. Derudover omfatter projektet en videreudvikling af dette ventilationssystem, med henblik på periodisk at kunne affugte den opvarmede indblæsningsluft. Dermed kan affugtningskapaciteten af indblæsningsluften både øges ved en temperaturstigning og ved en affugtning.

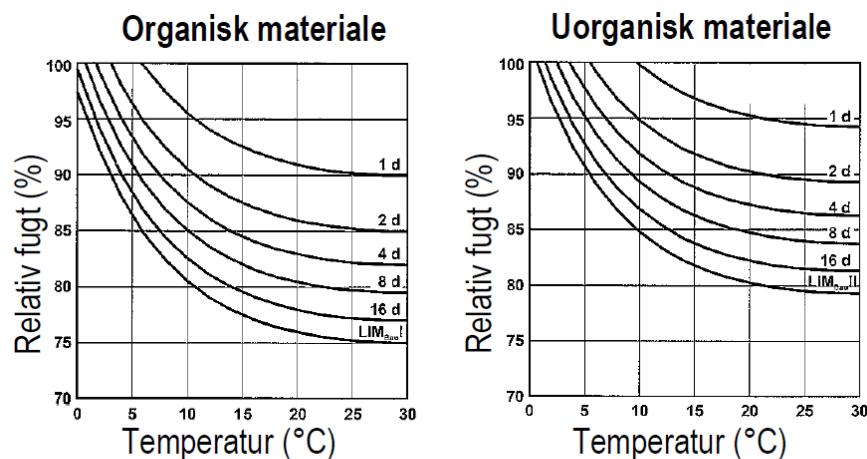
Det bliver ved hjælp af krybekældermodellen (se kapitel 4) i det følgende undersøgt, hvilken indflydelse denne type ventilationssystemer vil have på krybekældre, og om fugtforholdene i krybekældrene vil kunne forbedres i en grad, så krybekældrene kan efterisoleres uden risiko for fugt- eller skimmelproblemer. Til disse undersøgelser anvendes den i programdokumentationen anvendte case 1. For nærmere beskrivelse af casen se Bilag 1. Under anvendelse af den kalibrerede model for krybekælderen beregnes eksempler for konsekvenser af forskellige ændringer i krybekælderen.

5.1 Kritiske fugtforhold

Kritiske fugtforhold opnås, når fugtindhold i materialer når et niveau, der kan medføre skader. Her kan der være tale om risiko for svigt af konstruktioner på grund af korrosion eller angreb af trænedbrydende svampe. Der kan også være tale om skimmelsvampevækst, som kan påvirke indeklimaet. Idet skimmelsvampevækst er den mest fugtfølsomme af de før nævnte skadesformer, vælges betingelser for, at skimmelsvampevækst kan opstå som nederste grænse for acceptable fugtforhold i krybekældre (skimmelkriteriet: $>75\%$ RF (SBI, 2013)). Ud over fugtniveauet afhænger skimmelvækst af tilgængelighed af næringsstoffer, temperatur og tid.

Tilgængelighed af næringsstoffer er god i alle ældre konstruktioner – også i krybekældre, idet der ophober sig støv på overflader og i konstruktioner, som indeholder organisk materiale og

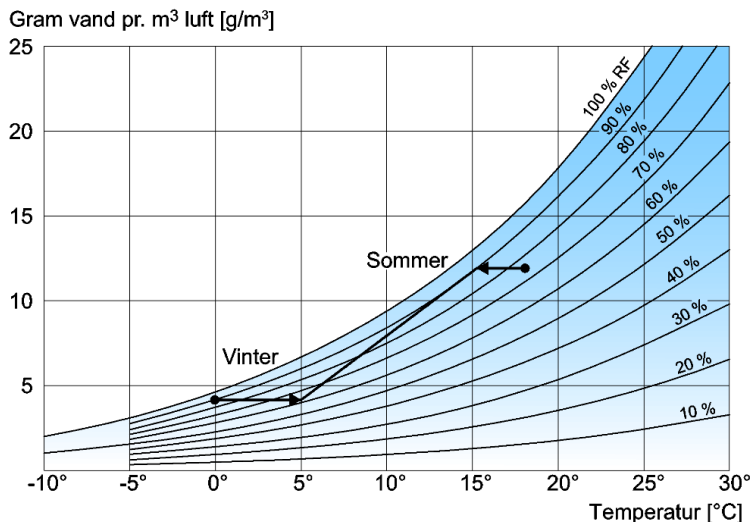
udgør tilstrækkeligt vækstgrundlag. Temperaturer mellem 5 og 40 °C giver vækstbetingelser, med optimale betingelser mellem 20 og 30 °C (By og Byg, 2003 og SBi, 2013). Spiretiden for skimmelvækst er for konstante fugtforhold angivet i Figur 1 (Møller, 2010). Figuren viser, at spiretiden på organisk materiale ved 75 % RF, som er det kritiske fugtniveau for skimmelsvampevækst (SBi, 2013), er længere end 16 dage, mens spiretiden aftager med stigende relativ luftfugtighed. Den relative luftfugtighed i krybekældre kan svinge meget. Der foreligger dog ingen nærmere viden om sammenhængen mellem spiretiden for skimmelsvampe og svingende fugtforhold.



Figur 3. Sammenhæng mellem skimmelsvampevækst, temperatur og relativ fugtighed på forskellige materialer. Figuren viser, hvor mange dage det mindst tager før, der dannes skimmelsporer, når fugtighed og temperatur holdes konstant. Kurverne er tilnærmede værdier, der er baseret på en række forsøg med forskellige materialer og skimmelsporer. Der er i forsøgene forudsat rene materialeoverflader. Den nederste kurve i hvert diagram (lim) beskriver de laveste fugtforhold, hvorved der stadig kan opstå skimmel. Ved organisk materiale forstås lettilgængeligt materiale, f.eks. tapet og mange træarter, mens uorganisk materiale betegner materiale, der er vanskeligt tilgængeligt for skimmelsvampe. Fremstillingen er skematisk og vejledende. Kilde: Sedlbauer, 2001.

Figur 1. Tidsfaktor for udvikling af skimmelsvampevækst på organisk og uorganisk materiale (Møller, 2010).

Nedenstående Figur 2 (SBi, 2013) viser, at forholdene i kolde ventilerede krybekældre er mest kritiske om sommeren, på grund af det såkaldte sommerkondens. Dette fænomen omhandler varm sommerluft med et højt vandindhold, der trænger ind i en kold krybekælder. Luften bliver nedkølet, hvorved den relative luftfugtighed stiger over det kritiske niveau.

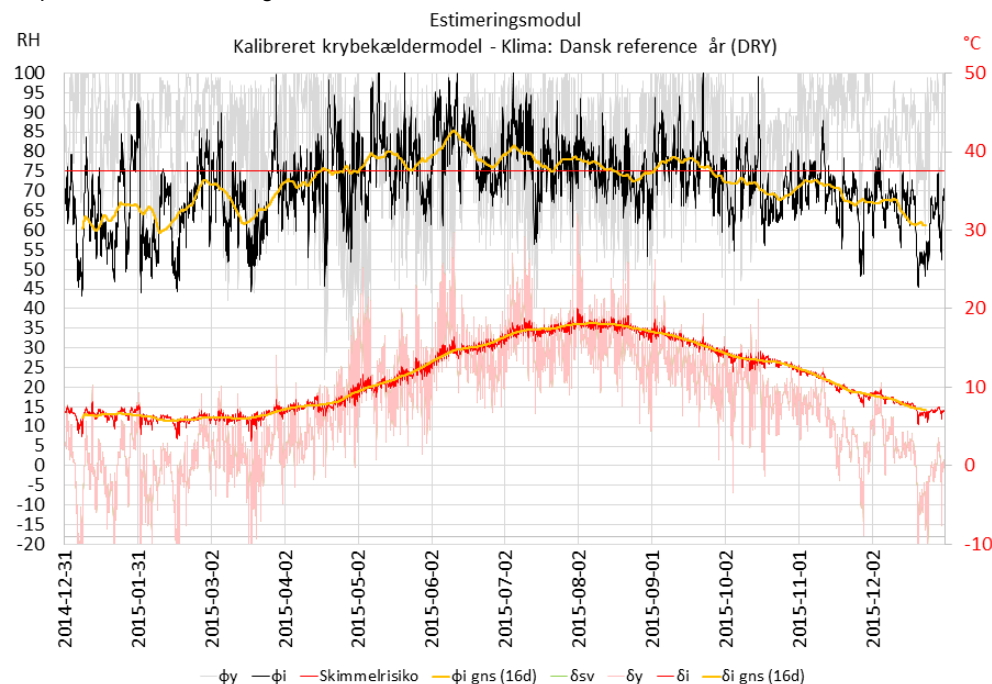


Figur 71. Fugtforholdene i en traditionel kold krybekælder uden fugttilførsel fra jorden. Om vinteren er temperaturen omkring 5 °C, altså højere end ude, på grund af varmetilskud fra bygningen. Ventilationsluften vil blive svagt opvarmet, og den relative luftfugtighed falder på grund af opvarmningen til ca. 60 %. Om sommeren er temperaturen i krybekælderen omkring 15 °C, fordi overfladerne – specielt klaplaget – er kolde. Herved afkøles ventilationsluften, og den relative luftfugtighed stiger til ca. 90 %, af og til endnu højere.

Figur 2. Fugtforhold i kolde, ventilerede krybekældre. Om sommeren stiger den relative luftfugtighed på grund af sommerkondens. (SBI, 2013).

I Figur 3 ses et outputdiagram fra krybekældermodellen, som for krybekælder case 1 viser, hvilke forhold, der estimeres at forekomme under standardiserede danske udendørsforhold (DRY, 2012). Det kritiske fugtniveau på 75 % RF er markeret med en tynd rød linje (Skimmelrisiko).

En nærmere forklaring af, hvilke variabler, der forekommer i outputdiagrammet, og hvordan de er placeret, findes i Bilag 1, IV.



Figur 3. Case 1 – Estimeret relativ luftfugtighed og temperatur under standardiserede udendørsforhold i den eksisterende krybekælder med 150 mm isolering under etagedækket og 1,0 l/h luftskifte.

I grafen findes kurver for den glidende gennemsnit over 16 dage (gns (16d)) for både temperatur og relativ luftfugtighed. Det glidende gennemsnit er vist for at udglatte udsvingene i kurverne og dermed synliggøre de gennemsnitlige forhold i krybekælderen. I det viste estimat ligger det glidende gennemsnit for relativ luftfugtighed mellem 59 og 85 % RF og overstiger det kritiske fugtniveau i en næsten sammenhængende periode på ca. 3,5 måneder om sommeren. Udsving i den relative luftfugtighed er store. De længste sammenhængende perioder med konstant over 75 % RF er på seks dage, hhv. d. 14. til 20. juni og d. 4. til 7. juli. Det glidende gennemsnit over 16 dage for temperatur ligger mellem 6 og 18 °C.

Som nævnt før foreligger der ingen nærmere viden om sammenhængen mellem kortvarige udsving i fugtforhold og spiretiden for skimmelsvampe. På grund af de store og sommetider daglige udsving i den relative luftfugtighed foretages vurderinger i forhold til skimmelkriteriet (75 % RF) på baggrund af den gennemsnitlige relative luftfugtighed i form af et glidende gennemsnit over 16 dage. For denne krybekælder betyder dette, at der vurderes at være risiko for skimmelsvampevækst, idet den gennemsnitlige relative luftfugtighed overskrider det kritiske fugtniveau. Derudover skal det tages med i betragtning, at fugtniveauet er beregnet for indeklimaet og dermed i mindre grad underestimerer forholdene på overfladerne om sommeren. Samtidig vil udsving i realiteten være mindre i begge retninger, idet konstruktionernes materialer har en varme- og fugtkapacitet, der ikke er modelleret (se nærmere Bilag 1).

5.2 Effekter ved efterisolering af krybekælderens etagedæk

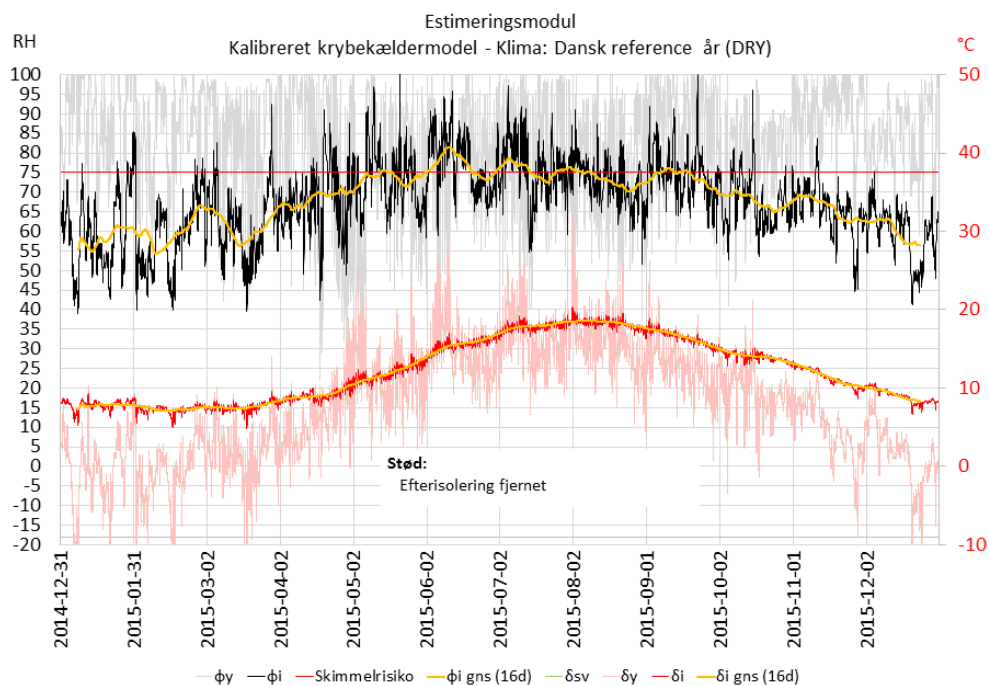
I dette kapitel belyses, hvilke konsekvenser efterisolering af krybekældrens etagedæk har. Der tages udgangspunkt i krybekælder case 1, hvor etagedækkets bjælkelag allerede er efterisoleret med 150 mm isolering (λ -værdi = 0,036 W/(mK)).

I 2008 blev der i den almene tekniske fælleseje (*Byg-Erfa, 2009*) advaret imod efterisolering af kolde ventilerede krybekældre. Hvis der ønskes isolering af etagedækket, blev der anbefalet en maksimal isoleringstykkelse på 150 mm. Med udgivelse af et nyt Byg-Erfa blad om krybekældre sidst i 2012 (*Byg-Erfa, 2012*) og den nye SBI-anvisning 224 om Fugt i bygninger (*SBI, 2013*) ændres den almene tekniske fælleseje, og efterisolering af kolde ventilerede krybekældre frarådes helt. Baggrund for dette er fugttekniske hensyn: Efterisolering mindsker varmetilskud til krybekælderen, hvilket har et temperaturfald og en tilsvarende stigning i den relative luftfugtighed til følge. Samtidig er eksisterende etagedæk som regel ikke luft- og damptætte. Dette indebærer yderligere risici i forhold til dugpunkt og kondensdannelse inde i etagedækkets konstruktion. Ved vurdering af konkrete etagedæks egnethed for efterisolering skal der derfor foretages en særskilt analyse af kondensproblematikken fra gang til gang.

I det følgende undersøges effekten af efterisolering af en krybekælder ved at sammenligne simulering af krybekælder case 1 med 150 mm og uden isolering. Den efterisolerede krybekælder er vist i Figur 3. Den nedenstående Figur 4 viser simuleringen af den oprindelige krybekælder, dvs. uden isolering under etagedækket.

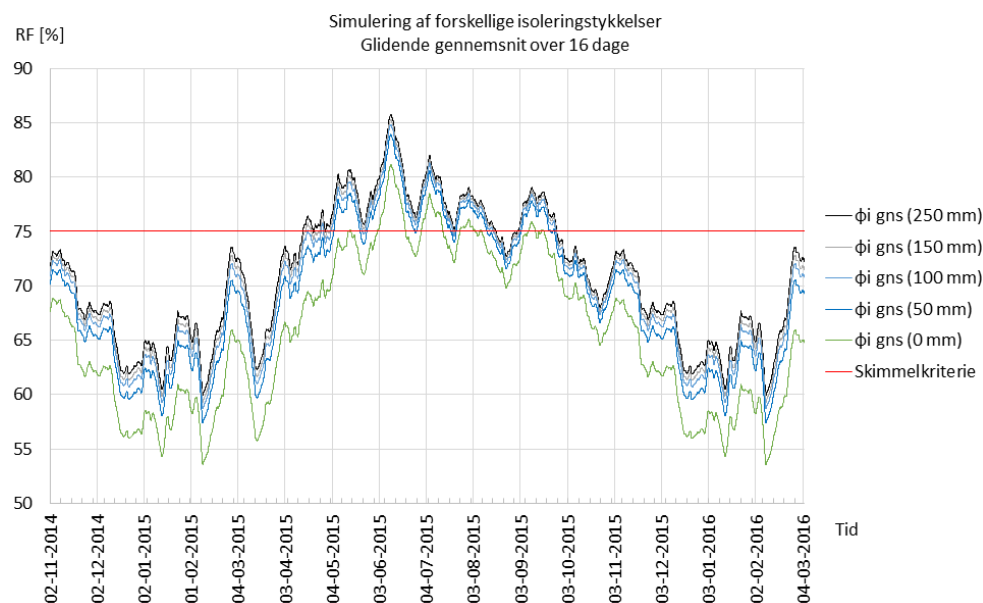
I den uisolerede krybekælder med ellers uændrede randbetingelser viser kurven for det glidende gennemsnit over 16 dage, at den relative luftfugtighed ligger mellem 54 og 82 % RF. Det betyder et fald på hhv. 5 % om vinteren og 3 % om sommeren i forhold til den med 150 mm efterisolerede krybekælder. I en periode på hhv. 19 dage i juni og 15 dage i juli overskrider gennemsnittet af den relative luftfugtighed det kritiske fugtniveau på 75 %. Den relative luftfugtighed svinger meget i løbet af et døgn, og sammenhængende perioder med en relativ luftfugtighed over 75 % omfatter maksimalt 6 dage. Det vurderes, at risikoen for skimmelsvampevækst i krybekælderen er meget mindre, men ikke helt fjernet, i den uisolerede krybekælder.

Det glidende gennemsnit over 16 dage for temperatur ligger mellem ca. 7 og 19 °C. Det vil sige, at den minimale og den maksimale temperatur i krybekælderen ved et uisoleret etagedæk er 1 grad højere end ved et isoleret etagedæk.



Figur 4. Case 1 – Simulering af den oprindelige, uisolerede krybekælder, dvs. ingen isolering under etagedækket.

I Figur 5 er der sammenstillet forhold ved forskellige isoleringstykkelser (λ -værdi = 0,036 W/(mK)) under etagedækket. Figuren viser krybekælderens relative luftfugtighed som glidende gennemsnit over 16 dage ved de forskellige isoleringstykkelser. Det kan ved sammenligning ses, at en efterisolering af krybekælderens med 100 mm medfører en stigning af den gennemsnitlige relative luftfugtighed på ca. 4 % om sommeren, og en næsten konstant overskridelse af det kritiske fugtniveau i 3,5 måneder frem for tre kortere perioder af omkring to ugers varighed i den uisolerede krybekælder.



Figur 5. Case 1 – Relativ luftfugtighed som glidende gennemsnit over 16 dage ved simulering af forskellige isoleringstykkelser på undersiden af bjælkelaget i krybekælder case 1.

Efterisolering forværrer de i forvejen kritiske forhold. Allerede ved de første 50 mm opnås den mest markante effekt, som forværrer fugtforholdene, så det glidende gennemsnit over 16 dage overskrider det kritiske fugtniveau konstant i fem uger. En yderligere forøgelse af isoleringstyk-

kelser er af mindre og mindre betydning. Kort sagt har de første millimeter isolering både den største negative indflydelse på fugtniveauet i krybekælderen samt den største isoleringseffekt.

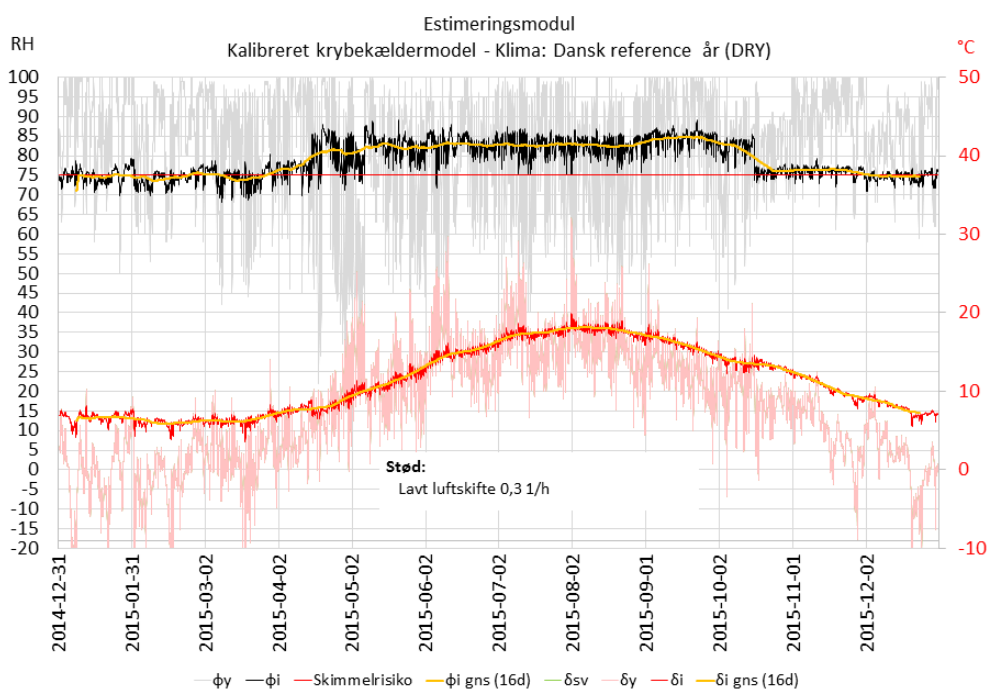
5.3 Effekter af ændret ventilation i krybekælderen

En anden parameter med stor indflydelse på forholdene i krybekælder er luftskiftet. I dette kapitel vises simulationer af krybekælderforhold under forskelligt luftskifte.

Der tages udgangspunkt i de eksisterende forhold af den med 150 mm efterisolerede krybekælder case 1, hvor luftskiftet som udgangspunkt er godt (1,0 1/h), se Figur 3.

I Figur 6 er der vist et eksempel for en simulering med ændret luftskifte. Der er med 0,3 1/h valgt et lavt luftskifte. I forhold til en godt ventileret krybekælder, som vist i Figur 3, viser det glidende gennemsnit for den relative luftfugtighed, at fugtniveauet stiger med 12 % fra 59 % til 71 % om vinteren, mens maksimum om sommeren forbliver på 85 % RF. Ved lavt luftskifte øges den periode, i hvilken gennemsnittet af den relative luftfugtighed overstiger det kritiske fugtniveau, fra ca. 3,5 måneder til knapt 8,5 måneder. Svingninger i den relative luftfugtighed er lille. De sammenhængende perioder med konstant over 75 % RF forlænges til 132 dage, fra d. 6. juni til d 16. oktober, i forhold til perioder af maksimalt seks dages længde i den godt ventilerede krybekælder.

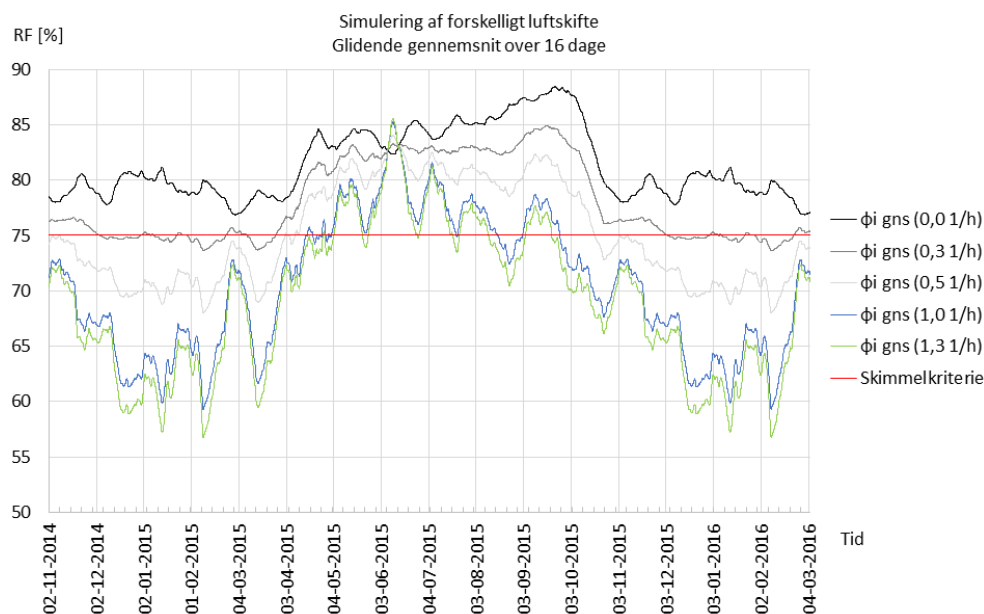
Det glidende gennemsnit for temperatur viser et niveau mellem ca. 6 og 18 °C, dvs. næste uændret i forhold til en krybekælder med godt luftskifte.



Figur 6. Case 1 – Simulering af krybekælderen med lavt luftskifte (0,3 1/h).

I Figur 7 er der sammenstillet simuleringer for intet (0,0 1/h), lavt (0,3 1/h), mellem (0,5 1/h), god (1,0 1/h) og meget højt (1,3 1/h) luftskifte. Figuren viser krybekælderenes relative luftfugtighed som glidende gennemsnit over 16 dage ved de forskellige luftskifter.

For luftskifte under 0,5 1/h bliver udsving i den relative luftfugtighed stærkt dæmpet, og forholdene i krybekælderen bliver påvirket meget mindre af udendørsforholdene, men mere af konstruktions- og jordforholdene. Samtidig kan der ses en betydelig stigning i niveauet af den relative luftfugtighed både sommer og vinter. Ved højt luftskifte er udsving store og den relative luftfugtighed følger, om endt dæmpet, udendørsforholdene.

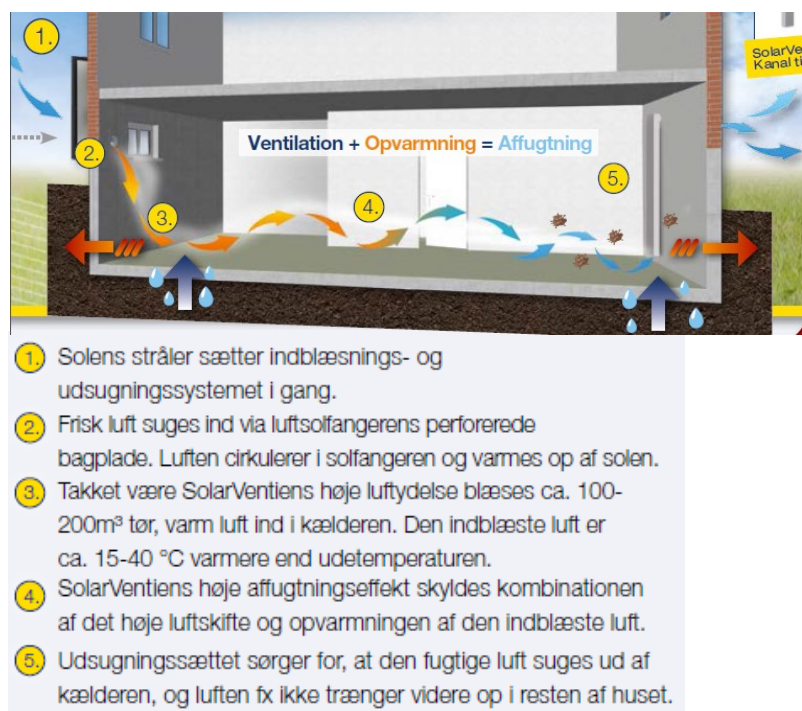


Figur 7. Case 1 – Relativ luftfugtighed som glidende gennemsnit over 16 dage ved simulering af forskelligt luftskifte i krybekælderen.

Dvs. at den relative luftfugtighed i denne krybekælder overstiger næsten hele året det kritiske fugtniveau på 75 % RF ved et lavt luftskifte ($\leq 0,3$ 1/h), mens den relative luftfugtighed i opvarmningsperioden kan holdes tydeligt under de 75 % RF med et godt luftskifte.

5.4 Potentiale i SV14 - vedvarende energidreven enhed til ventilation med opvarmet udeluft

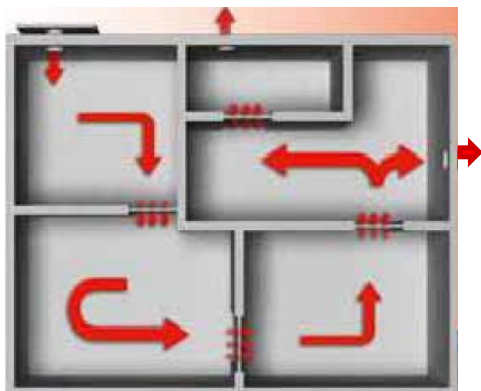
Funktionsprincippet af et soldrevent ventilationsanlæg af type SV14 for montage i en kælder er vist i Figur 8. Anvendelse i en krybekælder er tilsvarende.



Figur 8. Funktionsprincip af et soldrevent ventilationsanlæg SV14. Kilde: SolarVenti.

Producenten beskriver, at det ved installation af systemet er vigtigt, at luftstrømmen bliver forceret til at bevæge sig igennem hele kælderens, for at alle områder bliver ventileret. Derfor lukkes ventilationsåbninger tæt ved indblæsningen, og ventilationsåbninger i den modsatte ende af kælderens holdes åbne.

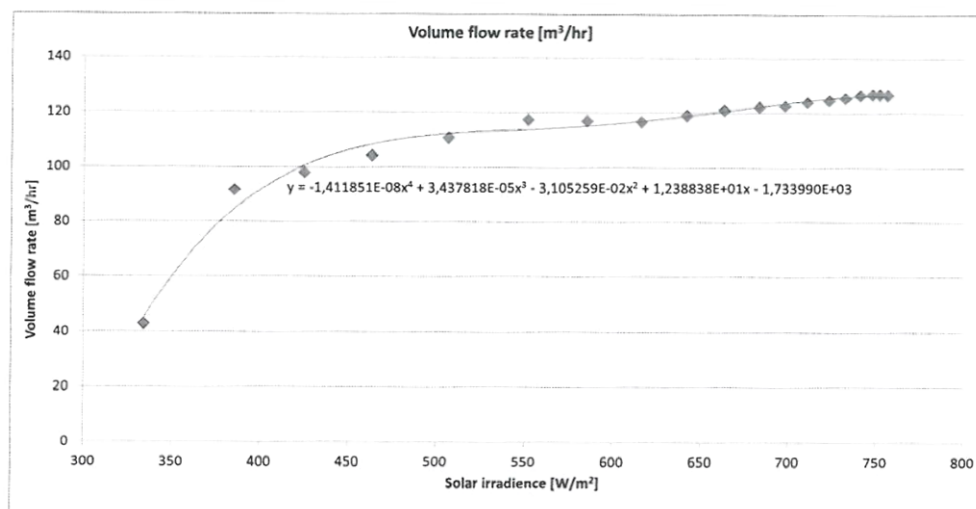
Ved komplicerede grundplan kan det være nødvendigt at montere en mekanisk udsugning og placere ventilationsåbninger kun i de sidste lokaler i rækken, for at der opnås en gennemstrømning af alle områder, se Figur 9.



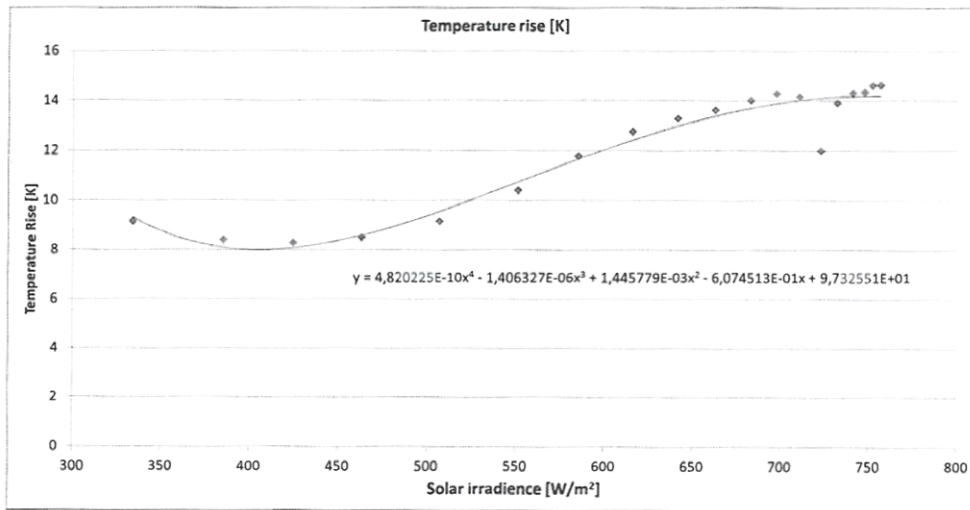
Figur 9. Luftcirkulation i en kælder med soldrevent ventilationsanlæg SV14. Kilde: SolarVenti.

Ved indblæsnings- og udsugningspunkter er den naturlige ventilation delvist blokeret. Jf. producenten kan der ved blæsevejr trække lidt luft igennem solfangeren og indblæsningsåbningen. Det betyder, at baggrundsluftskiftet i en krybekælder, når det soldrevne ventilationsanlæg ikke er aktivt, er reduceret. Der foreligger ikke erfaringstal på det baggrundsluftskifte, der opnås efter montage af systemet.

Det soldrevne ventilationsanlæg er kun aktivt ved tilstrækkelig solstråling. Der foreligger dokumentation af ydeevnen af en SV14 i form af en ETV (DANETV, 2013 og DANETV no. 1201). I projektet er det valgt at anvende nøgletal for SV14 leveret i denne ETV. Producenten har sideløbende i projektperioden arbejdet videre med produktet, som fx indebærer en el-dreven baggrundsventilation og opvarmning af luft, kombineret med en enhed til energieffektiv styring, som ikke er en del af nærværende projekt. Her anvendes de i ETV'en angivne nøgletal for den volumenstrøm og temperaturstigning, som det soldrevne ventilationssystem opnår ved forskellig strålingsintensitet, se Figur 10 og Figur 11.



Figur 10. SV14: Ydeevne volumenstrøm (DANETV no. 1201).



Figur 11. SV14: Ydeevne temperaturstigning (DANETV no. 1201).

De i Figur 10 og Figur 11 viste formler for volumenstrøm og temperaturstigning anvendes i modellen for at simulere en installation af en eller flere SV14-enheder i en krybekælder. Aktiviteten af SV14-enheden starter ved en solstråling på mindst 315 W/m². Informationer om solstrålingens intensitet hentes fra Design Reference Year for Denmark (DRY, 2012).

Derudover skal der ved simulering af installation af SV14-enheder tages hensyn til ændringer i krybekælderens baggrundsluftskifte, når ventilationssystemet ikke er aktivt. Som beskrevet i kapitel 5.4 følger med etablering af en SV14-enhed som regel en reduktion af det naturlige baggrundsluftskifte. For de perioder, hvor ventilationssystemet ikke er aktivt, skal der i modellen derfor vælges et hensigtsmæssigt naturligt luftskifte. Dernæst angives i modellen, hvor mange SV14-enheder, der installeres i den givne krybekælder. Ved valg af antallet af SV14-enheder kan installationens kapacitet styres i modellen. Modellen beregner automatisk, hvornår og med hvilken ydeevne SV14-enheden er aktivt, og hvilket luftskifte det samtidigt resulterer i for den givne krybekælder. For hver time bliver det aktuelle luftskifte beregnet ud fra ventilationssystemets volumenstrøm, se i Figur 10, og krybekælderens volumen. Luftens indblæsningstemperatur bliver beregnet ud fra indblæsningsluftens temperaturstigning, se Figur 11.

Simuleringer til vurdering af potentialet i reduktion af fugtniveauet af en krybekælder ved installation af SV14-enheder er behandlet i kapitel 5.4.2.

I det følgende kapitel 5.4.1 foretages indledende en overslagsmæssig betragtning af størrelsesorden af en SV14-enheds samlede energitilskud og hvilken teoretisk isoleringstykkelse det svarer til.

5.4.1 Teoretisk isoleringsmaksimum

For overslagsmæssigt at beregne det teoretiske isoleringsmaksimum bliver der opstillet en energibalance mellem det hhv. positive og negative bidrag fra ventilation med opvarmet udeluft og isolering af etagedækket. Resultatet af den nedenstående overslagsberegning er, at energitilskuddet i opvarmingsperioden af en SV14-enhed monteret i en 100 m² krybekælder svarer til en efterisolering af etagedækket med ca. 1 mm mineraluldsisolering med en λ-værdi på 0,036 W/(mK). Dvs. at ydeevnen af en SV14-enhed alene ikke giver mulighed for en efterisolering af krybekældres etagedæk på grund af den marginale temperaturstigning, som anlægget kan give i krybekælderen om vinteren.

Til overslagsberegningen tages udgangspunkt i den dokumenterede ydeevne af en SolarVenti SV14-enhed i opvarmingsperioden fra 15. oktober til 15. april med følgende nøgletal (DA-

NETV, 2013):

Energioutput (15. okt. til 15. april): 205 kWh

Gennemsnitlig volumenstrøm (15. okt. til 15. april): 20,4 m³/h

Nøgletallene er beregnet for et år med klimadata af et dansk reference år (DRY, 2012).

Ventilation og varmetilskud ydes ikke jævnt fordelt. Fordi en krybekælder har en vis træghed, antages på forenklet vis et jævnt varmetilskud over den tilskudsgivende periode på 6 måneder. Yderligere antagelser er:

Krybekælderareal: $A = 100 \text{ m}^2$

Krybekælderhøjde: $h = 0,6 \text{ m}$

Krybekældervolumen: $V = 60 \text{ m}^3$

Temperatur i bolig: $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatur i krybekælder, jf. Figur 2: $T_k = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

U-værdi uisolaret etagedæk: $U_e = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Bjælkelag med lerindskud)

Isolans etagedæk: $R_e = 0,89 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Med en SV14-enhed opnås et gennemsnitligt luftskifte på $(20,4 \text{ m}^3/\text{h})/(60 \text{ m}^3) = 0,34 \text{ 1/h}$, hvilket i størrelsesorden svarer til et lavt naturligt luftskifte.

Transmissionstabt gennem etagedækket beregnes jf. Dansk Standard (DS 418, 2011) som

$$\Phi = U_e \cdot A \cdot (T_i - T_k)$$

Varmetilskuddet svarer ved 205 kWh i 6 måneder til

$$\Delta\Phi = 205/4320 = 47,5 \text{ W}$$

Det beregnede varmetilskud svarer til en merisolering af etagedækket på

$$\Delta U_e = 0,032 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Antages, at der udlægges et lag isolering med en λ -værdi på $0,036 \text{ W}/(\text{mK})$, svarer ΔU_e til en tykkelse af merisoleringen på

$$d = 0,9 \text{ mm.}$$

Det vurderes, at ydeevnen og energitilskuddet af en SV14-enhed alene ikke giver mulighed for en efterisolering af krybekældres etagedæk.

5.4.2 Potentiale i SV14 til styring af fugtforhold

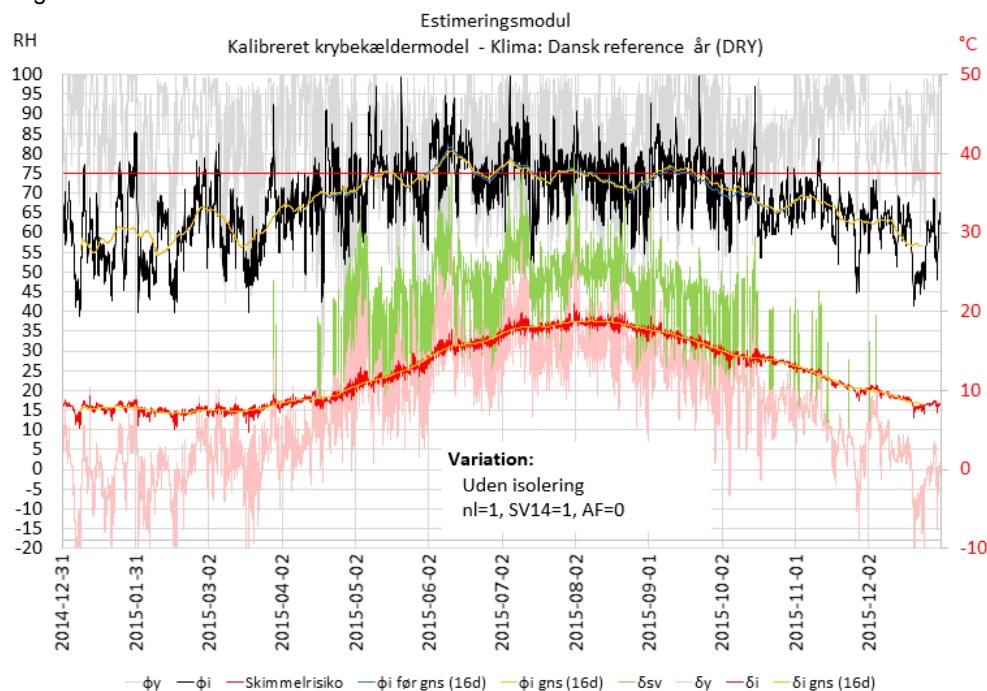
Til undersøgelse af SV14-systemets potentiale til forbedring af fugtforhold i krybekælder tages udgangspunkt i den uisolerede version af krybekælder case 1 som vist i Figur 4. På den måde belyses et tilfælde, hvor en efterisolering kunne komme på tale.

Overslagsberegningen i kapitel 5.4.1 har vist, at en SV14-enhed ikke har potentiale til en efterisolering af krybekælderen uden risiko for fugt- og skimmelproblemer. Derfor fokuseres i dette kapitel på ventilationsløsningens generelle indflydelse på temperatur- og fugtforhold i krybekælder.

Krybekælderen i case 1 har et areal på ca. 94 m^2 og et volumen på ca. 57 m^3 . Som udgangspunkt er det naturlige luftskifte godt (1 1/h). Ved montage af en SV14-enhed bliver det naturlige baggrundsluftskifte i de perioder, hvor ventilationssystemet ikke er aktivt, reduceret, se kapitel 5.4. I en SBI-rapport om midlertidig skimmelreivering af krybekælder (SBI, 2012) er der udført målinger af luftskifte i tre krybekælder. Der er ved målingerne konstateret et naturligt luftskifte på hhv. $0,33 \text{ 1/h}$, $0,5 \text{ 1/h}$ og $1,05 \text{ 1/h}$. Disse værdier vurderes at indikere i hvilken størrelsesorden det naturlige luftskifte kan antages at ligge. På den sikre side antages derfor, at baggrundsluftskiftet efter montage af en SV14-enhed bliver reduceret til et lavt luftskifte ($0,3 \text{ 1/h}$).

For at kunne se ændringerne ved hvert tiltag, vises i det følgende først simulering af den uisoleerede krybekælder, som er udstyret med én SV14-enhed, men stadig har et godt baggrundsluftskifte på 1,0 1/h, når SV14 ikke kører, se Figur 12. Dernæst vises samme simulering, dog med et lavt baggrundsluftskifte på 0,3 1/h, når SV14 ikke kører, se Figur 13.

I forhold til de tidligere figurer fremkommer der i disse figurer en ny kurve (lysegrøn), som viser indblæsningstemperaturen δ_{sv} af den af SV14-enheden opvarmede ventilationsluft. Denne kurve visualiserer, hvornår på året SV14-enheden er aktiv og hvor høj en temperatur indblæsningsluften opnår. Hovedaktiviteten af SV14-enheden ligger fra sidst i april til midt i oktober, dvs. i sommerperioden. Aktiviteten svinger dagligt, da systemet kun får tilstrækkelig solenergi i dagtimerne.



Figur 12. Case 1 – Simulering af den uisoleerede krybekælder, udstyret med én SV14-enhed og med et godt baggrundsluftskifte på 1,0 1/h. Den blå kurve i baggrunden viser samme situation uden SV14.

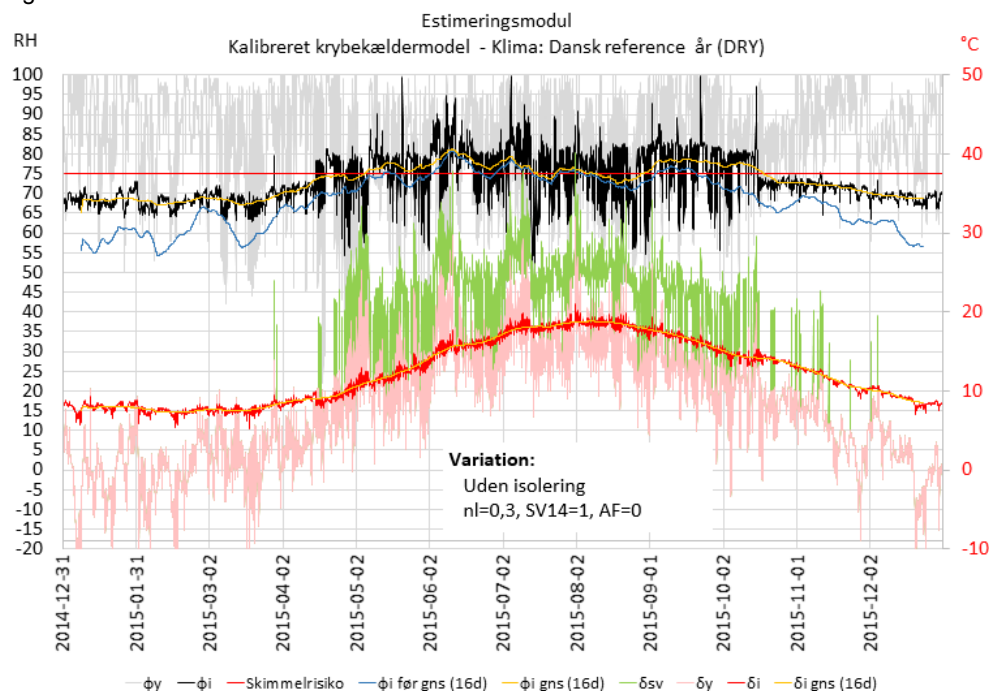
I simuleringen med uændret baggrundsluftskifte (Figur 12) viser det glidende gennemsnit over 16 dage en relativ luftfugtighed mellem 54 og 81 %. Det betyder et fald på 1 % om sommeren i forhold til den uisoleerede krybekælder uden SV14-enhed. Fugtiveauet om vinteren er uændret. Perioden, hvor det glidende gennemsnit af den relative luftfugtighed overskrider det kritiske fugtniveau på 75 %, er næsten uændret. Som i den oprindelige krybekælder svinger den relative luftfugtighed meget i løbet af et døgn. Den gennemsnitlige relative luftfugtighed indikerer ikke umiddelbart, at risikoen for skimmelsvampvækst i krybekælderen er faldet. Det glidende gennemsnit over 16 dage for temperatur ligger mellem ca. 7 og 19 °C, dvs. en temperaturstigning på 1 grad om sommeren.

I Figur 13 er simuleringen af de forventelige forhold med et lavt baggrundsluftskifte på 0,3 1/h vist.

Det glidende gennemsnit over 16 dage viser et niveau af den relative luftfugtighed mellem 65 og 81 %. I forhold til simuleringen med et godt baggrundsluftskifte betyder dette en stigning på 11 % om vinteren, mens maksimummet om sommeren er uændret. Derudover kan det ses, at der opstår to længere perioder, hvor det glidende gennemsnit af den relative luftfugtighed overskrider det kritiske fugtniveau på 75 %. Én periode i maj, juni og juli og én i august, september

og oktober på hhv. 73 og 50 dages varighed. Risikoen for skimmelsvampevækst i krybekælder-
ren er øget på grund af længere perioder med en gennemsnitlig relativ luftfugtighed over 75
%.

Det glidende gennemsnit for temperaturen ligger på et næsten uændret niveau mellem ca. 7
og 19 °C.

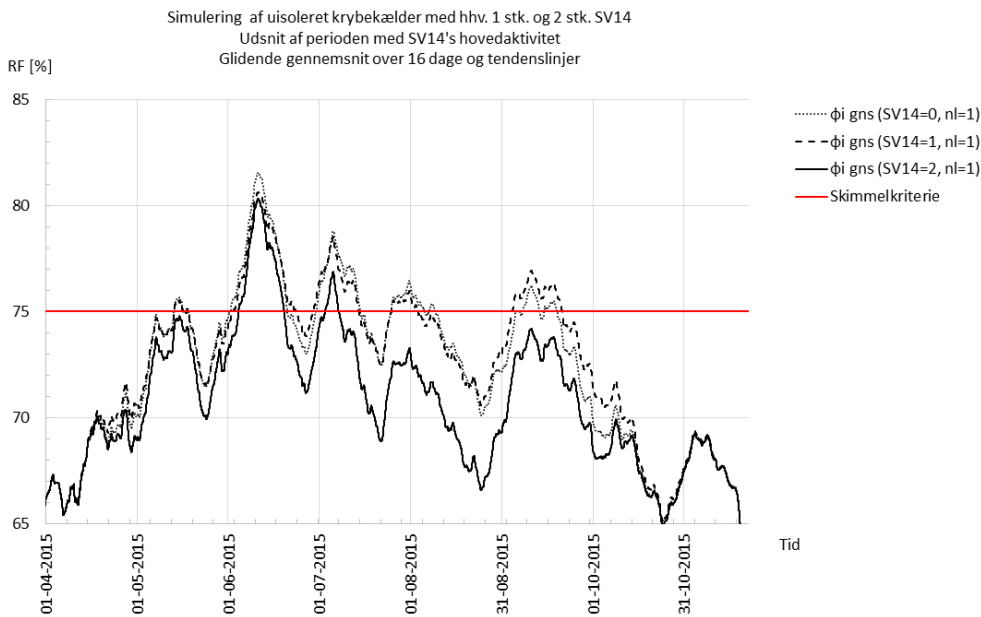


Figur 13. Case 1 – Simulering af den uisolerede krybekælder, udstyret med én SV14-enhed og med et lavt bag-
grundsluftskifte på 0,3 1/h. Den blå kurve i baggrunden viser samme situation med godt luftskifte 1 1/h.

I det følgende skal effekten af en øget SV-kapacitet undersøges. Derfor sammenlignes effek-
ten af ingen, 1 stk. og 2 stk. SV14-enheder nøjere. Sammenligningen foretages for både et
godt (1,0 1/h) og et lavt (0,3 1/h) baggrundsluftskifte. Idet de foregående simuleringer har vist,
at SV14-systemets hovedaktivitet foregår fra midt i april til midt i oktober (se grønne kurve af
δsv i Figur 13), vises i den følgende Figur 14 og Figur 15 kun kurverne for disse måneder.
Figuren viser den relative luftfugtighed som glidende gennemsnit over 16 dage.

I Figur 14 vises simulationer med et baggrundsluftskifte på 1,0 1/h. Sammenligner man i Figur
14 kurven for 1 stk. SV14 med kurven for uden SV14-enhed, kan det ses, at effekten af en
SV14 er ubetydeligt fra maj til august. Fra september måned af kan der ses en kontraproduktiv
effekt. Den gennemsnitlige relative luftfugtighed er 1-2 % højere med 1 stk. SV14 end uden
SV14-enhed på grund af den reducerede baggrundsluftskifte, når SV14 ikke kører.

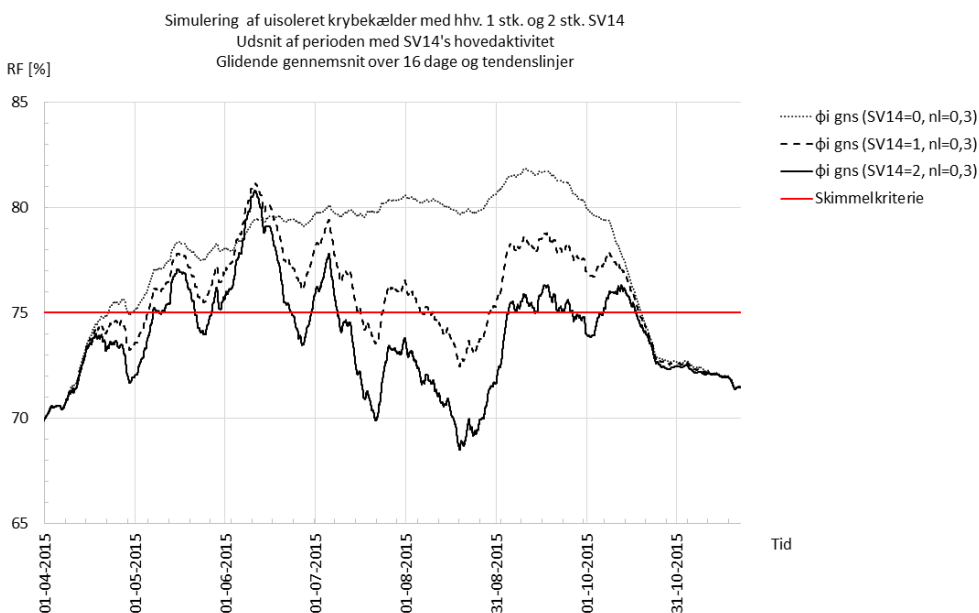
Ved simulering af 2 stk. SV14 i samme krybekælder og ved godt baggrundsluftskifte bliver
niveauet af den relative luftfugtighed generelt tydeligt reduceret (1-3 %). Den kritiske periode,
der kan ses midt i juni, kan ikke afhjælpes, men varigheden er reduceret til 15 dage frem for
21 dage med kun 1 stk. SV14. Den kontraproduktive effekt, som opstod ved installation af kun
1 stk. SV14 forsvinder ved installation af 2 stk. SV14, dvs. tilstrækkeligt stor dimension af det
soldrevne ventilationsanlæg.



Figur 14. Case 1 – Simulering af den uisolerede krybekælder med godt baggrundsluftskifte (1,0 1/h), udstyret med hhv. ingen, 1 stk. og 2 stk. SV14.

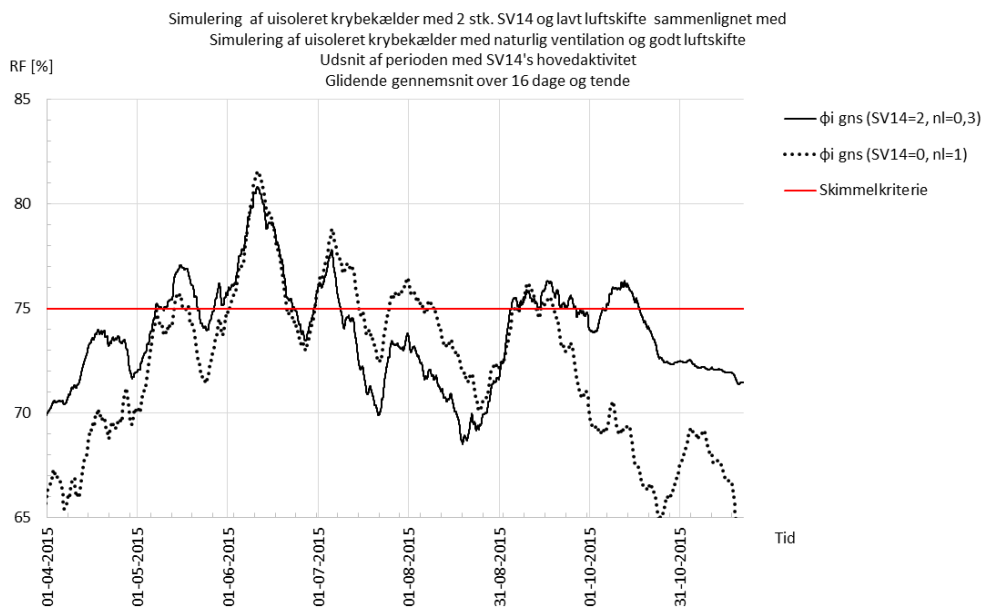
I Figur 15 er baggrundsluftskiftet reduceret til 0,3 1/h i forhold til simulationen før. Her kan det ses, at fugtniveauet er meget højt i den naturligt ventilerede krybekælder. Effekten af 1 stk. SV14 sænker den relative luftfugtighed markant i flere perioder.

Ved tilslutning af 2 stk. SV14 til samme krybekælder bliver niveauet af den relative luftfugtighed yderligere reduceret med 1-4 %. Den kritiske periode, der kan ses midt i juni, kan ikke afhjælpes, men varigheden er reduceret til 27 dage frem for 72 dage med kun 1 stk. SV14.



Figur 15. Case 1 – Simulering af den uisolerede krybekælder med lavt baggrundsluftskifte (0,3 1/h), udstyret med hhv. ingen, 1 stk. og 2 stk. SV14.

I Figur 16 sammenlignes de to yderpunkter fra de foregående figurer. Simulering af en krybekælder uden SV14 med godt naturligt luftskifte og en krybekælder med 2 stk. SV14 og et lavt baggrundsluftskifte.

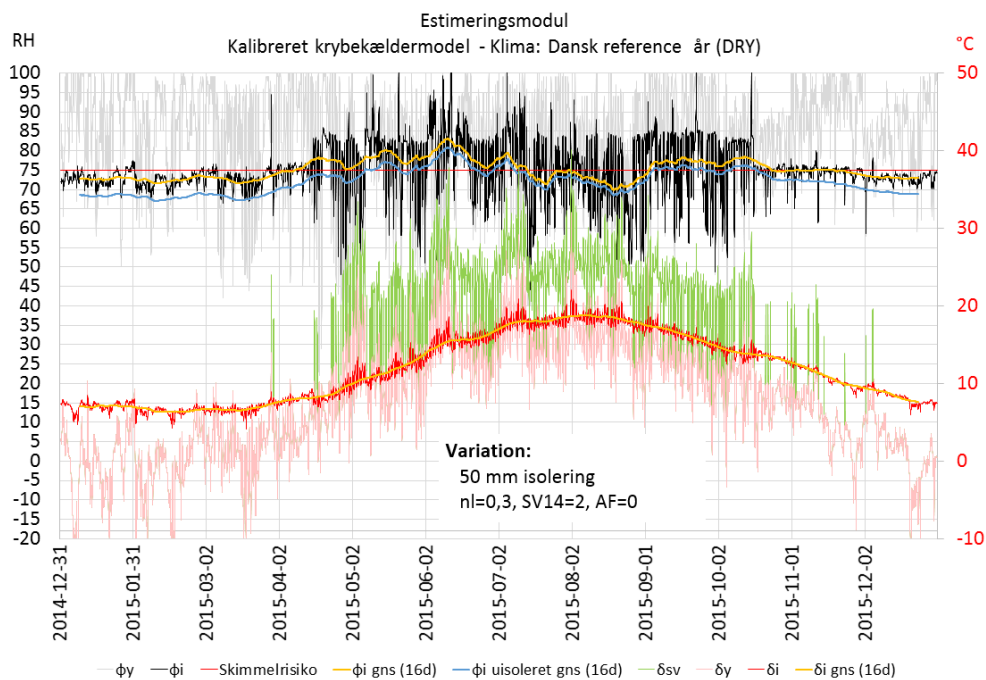


Figur 16. Case 1 – Simulering af den uisolerede krybekælder med naturlig ventilation og godt naturligt luftskifte sammenlignet med simulering af den uisolerede krybekælder udstyret med 2 stk. SV14 og lavt baggrundsluftskifte (0,3 1/h).

Selv ved tilslutning af 2 stk. SV14, som resulterer i et lavt baggrundsluftskifte, er det relative fugtniveau samlet set højere, og skimmelrisikoen større end i en krybekælder uden SV14-enhed, men med et godt naturligt luftskifte. Det kan ses, at baggrundsluftskiftet har en meget stor indflydelse på fugtniveauet i krybekælderen. En installation af 2 stk. SV14, som medfører en reduktion af det naturlige baggrundsluftskifte, betyder, at fugtniveauet er højere i opvarmingsperioden end i samme krybekælder uden SV14 med god naturlig ventilation. Den gennemsnitlige relative luftfugtighed i januar måned stiger fra 39 % i en godt ventileret krybekælder til 64 % i en krybekælder med lavt baggrundsluftskifte efter installation af de 2 stk. SV14. Dette har især betydning for krybekældre, som i forvejen har et forholdsvis højt fugtniveau. Reducerer man i sådanne krybekældre den naturlige baggrundsv ventilation, øges den relative luftfugtighed i opvarmingsperioden, og man kan risikere at presse fugtniveauet over det kritiske fugtniveau.

Vurderes simulerede effekter fra konkrete krybekældre, skal der derudover tages hensyn til, at krybekældermodellen er en simpel ligevægtsmodel, i hvilken der ikke er taget hensyn til hverken fugt- eller varmekapaciteter af materialer eller geometrien i krybekælderen. Faseforskydningseffekter er kun medtaget via årsvariationer i jordtemperaturen. Effekter som fx tilbagekondensering/termisk flytning kan derfor ikke vurderes på baggrund af simuleringer med krybekældermodellen. Under tilbagekondensering forstås den effekt, at indblæsningsluften er varm i starten. I takt med gennemstrømning af krybekælderen optager den opvarmede ventilationsluft fugt, samtidig med den bliver kølet ned. Falder temperaturen inden for krybekælderen under dugpunktstemperaturen, bliver den optagne fugt afsat i krybekælderen i stedet for at bortventileres gennem ventilationsafkastet.

I det følgende vender vi tilbage til spørgsmålet om muligheden for en efterisolering af krybekældre efter installation af en SV14-enhed. Der regnes med en reduktion af baggrundsluftskiftet til et lavt luftskifte på 0,3 1/h. Der tages udgangspunkt i den efter tidligere beregninger fugtteknisk næsten acceptable situation ved en kapacitet af det soldrevne ventilationsanlæg, der svarer til installation af 2 stk. SV14. Den relative luftfugtighed i udgangssituationen er indikeret med den blå kurve (som glidende gennemsnit over 16) i nedenstående Figur 17. Her ligger det glidende gennemsnit over 16 dage af den relative luftfugtighed mellem 67 og 81 %.



Figur 17. Case 1 – Simulering af krybekælder med 50 mm isolering under etagedækket, udstyret med 2 stk. SV14 og et baggrundsluftskifte på 0,3 1/h. Der er samtidig vist det glidende gennemsnit af samme situation dog i en krybekælder med uisolere etagedæk.

Der næst er der under ellers uændrede randbetingelser simuleret en efterisolering af etagedækket med 50 mm. Det glidende gennemsnit over 16 dage af den relative luftfugtighed ligger nu mellem 70 og 83 %. Dvs. at en efterisolering medfører en stigning af fugtniveauet over hele året på hhv. 3 % om vinteren og 2 % om sommeren. Om vinteren ligger fugtniveauet stadig under det kritiske fugtniveau, mens der opstår langvarige perioder med et fugtniveau over 75 % RF fra start april til midt i juli (97 dage) og fra start september til sidst i oktober (52 dage).

Samlet set tyder simuleringerne i dette kapitel på, at luftskiftet i krybekælder har stor indflydelse på det relative fugtniveau i krybekælder, i visse tilfælde endda større indflydelse end installationen af en SV14-enhed. For at påvirke dette ses der umiddelbart to muligheder.

For det ene kan det anbefales at sørge for et så godt baggrundsluftskifte som muligt. Udfordringen er behovet for lukning af friskluftventiler ved installation af SV14-enheder, for at kunne styre gennemstrømningen af krybekælder. Derfor anbefales at videreudvikle SV14-systemet til at kunne levere et forbedret baggrundsluftskifte i de perioder udenfor SV14's hovedaktivitet. P.t. arbejder producenten med en supplerende el-dreven ventilation.

For det andet kan kapaciteten af den soldrevne ventilation tilpasses den specifikke krybekælder ved at øge antallet af SV14-enheder, så deres samlede effekt bliver fugtreducerende, dvs. at SV14-enhederne kan kompensere for effekten af det reducerede baggrundsluftskifte. Dette ligger i tråd med producentens egne erfaringer, som han baserer sin anbefaling på, hvilken er at installere et solfangerareal på ca. 30 m² (ca. 2 stk. SV14) i en 100 m² kælder. Dette kan gøres uden yderligere indblæsnings- eller udsugningsstudse, dvs. uden yderligere reduktion af baggrundsluftskiftet.

Derudover kan det ses, at fugtniveauet i en velfungerende krybekælder om vinteren ligger betydeligt under det kritiske fugtniveau, mens det om sommeren periodevis bliver overskredet. Det betyder, at der om vinteren er et vist potentiale til efterisolering. Denne efterisolering virker kontraproduktiv om sommeren og hæver fugtniveauet således, at perioder over det kritiske fugtniveau bliver for lange. Det soldrevne ventilationssystem er derimod aktivt om sommeren,

men dens fugtreducerende effekt er ikke tilstrækkeligt til at kompensere for efterisoleringens negative effekt. Ved at tilføje ventilationssystemet en affugtende funktion vil der ske en yderligere fugtreduktionen i den kritiske sommerperiode. Dermed kan krybekælderens potentiale til efterisolering påvirkes i den relevante sommerperiode. Disse forhold bliver belyst i det næste kapitel.

5.5 Udvikling af enhed til affugtning af den opvarmede ventilationsluft

Installation af en ventilationsløsning som SV14 medfører, som nævnt i kapitel 5.4 og kapitel 5.4.2, en reduktion af baggrundsluftskiftet. I forestående kapitel er det konstateret, at dette resulterer i en ikke ubetydelig generel stigning af den relative luftfugtighed, samt at både fugtniveauet i den kritiske periode om sommeren bliver øget og at selve perioden bliver forlænget.

Derfor er der i projektets regi arbejdet på teknologiudvikling af en affugtningsenhed, der reducerer fugtindholdet af indblæsningsluften. Dette vil reducere fugtniveauet i den relevante sommerperiode. Udvikling af affugtningsenheden er i gang og der er gennemført forskellige test til bestemmelse af størrelsesorden af ydeevnen af et muligt affugtningsmodul (Se Bilag 3). Senest er et fuldskala testprogram til afprøvning og måling af ydeevnen af en prototype af affugtningsenheden påbegyndt på Danmarks Tekniske Universitet.

Enhedens princip er, at indblæsningsluften bliver ført igennem et fugtabsorberende medium, for at affugte luften. Når mediets fugtkapacitet er nået, vendes luftstrømmen, og den opvarmede udeluft bliver blæst igennem det fugtabsorberende medium og ud i det fri i stedet for ind i krybekælderen. På den måde fjernes den tidligere optagede fugt fra det fugtabsorberende medie. Denne proces kører i cykler.

Teknologiudviklingen af affugtningsenheden er ikke afsluttet inden for projektets tidsramme. Men de før nævnte tests har frembragt indledende indikationer af nøgletal til beskrivelse af ydeevnen af et affugtningsmodul. Disse indikationer kan sammendrages til følgende:

- Opstartstærskel: 315 W/m² (tilsvarende SV14).
- Affugtningseffekt af et affugtningsmodul (fugtabsorberende medie er Silikagel):
Generelt reduktion af vandindhold på ca. 3-4 g/m³ ventilationsluft, dvs. 0,003-0,004 kg/m³ pr. kvadratmeter solfangerareal.
- Affugtningsmønster:
 - o Affugtning i 2 timer med reduktion af vandindhold i luften på 0,003 kg/m³ per kvadratmeter solfanger.
 - o Regeneration i 2 timer. I regenerationsperioden vil den affugtede luft, der er blevet indblæst i timerne før, optage fugt fra omgivelserne. Dvs. at der vil ske en fortsat affugtning af krybekælderen i regenerationsperioden. For at simulere denne effekt antages, at vandindholdet i krybekælderluften i starten af regenerationsperioden svarer til vandindholdet af indblæsningsluften fra affugtningsperioden. Til slut af regenerationsperioden antages, at vandindholdet i krybekælderluften er på det niveau, der opnås i ligevægtssituationen uden at ventilationssystemet/affugtningsenheden er aktivt. Derfor regnes i regenerationsperioden med en gennemsnitlig reduktion af vandindhold af indblæsningsluften på 50 % af den i affugtningsperioden. Luftskiftet i regenerationsperioden svarer til det generelle baggrundsluftskifte.

5.5.1 Potentiale i affugtningsenhed til styring af fugtforhold

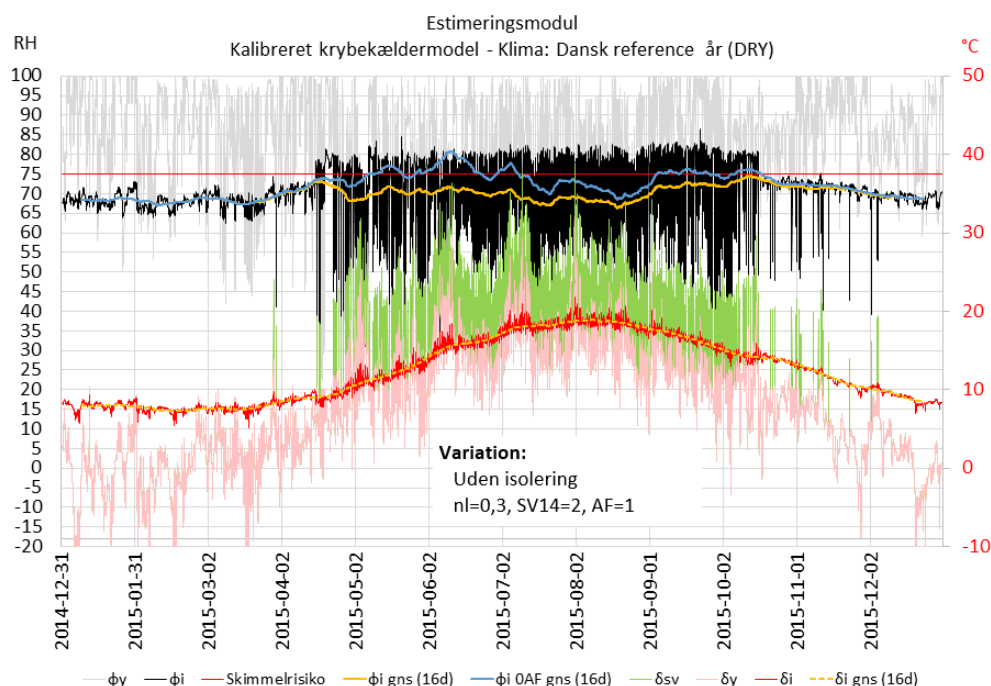
Affugtningsenheden er stadig under udvikling, men enhedens potentiale skal skønnes på baggrund af de i indledende tests frembragte nøgletal for enhedens ydeevne.

Affugtningsenheden er programmeret som en udvidelse af SV14-systemet, dvs. at der kun kan simuleres en affugtningsenhed, hvis der samtidig simuleres en eller flere SV14-enheder. I modsætning til SV14, hvor der angives et styk enhed ad gangen, angives affugtningsenhe-

dens størrelse i kvadratmeter. Tilsvarende programmering af SV14-systemet beregner modellen automatisk, hvornår og med hvilken ydeevne affugtningsenheden er aktiv. Der anvendes de nøgletal, som er sammenstillet sidst i kapitel 5.5.

Idet affugtningsystemet er en udvidelse af SV14-systemet og kun anvendes sammen med en eller flere SV14-enheder, gælder de samme indledende overvejelser om valg af case til simulering, isoleringsforhold og luftskifte som i kapitel 5.4.2. Dvs. at der til simulering af affugtningsmodulets potentiale vælges at anvende den kalibrerede model for den uisolerede variation af krybekælder case 1 som vist i Figur 4. Det antages at baggrundsluftskiftet bliver reduceret ved installation af et affugtningsmodul. På baggrund af resultater af simuleringer i forrige kapitel vælges at simulere installation af 2 stk. SV14-enheder. I Figur 16 er det vist, at det er det antal SV14-enheder, der er nødvendige, for at forbedre fugtforholdene i forhold til den velventilerede udgangssituation.

I Figur 18 vises simulering af krybekælderens forsynet med 2 stk. SV14-enheder og et 1 m² affugtningsmodul, baggrundsluftskiftet er lavt (0,3 1/h). Til sammenligning med forholdene uden affugtningsmodul er der ilagt en blå kurve af den gennemsnitlige relative luftfugtighed i situationen uden affugtningsmodul.



Figur 18. Case 1 – Simulering af den uisolerede krybekælder udstyret med 2 stk. SV14 samt et 1 m² affugtningsmodul og lavt baggrundsluftskifte (0,3 1/h). Den blå kurve viser det glidende gennemsnit over 16 dage i den uisolerede krybekælder med et naturligt luftskifte på 0,3 1/h og med installation af 2 stk. SV14, dog uden affugtningsenhed.

Den optrukne orange kurve viser den relative luftfugtighed som glidende gennemsnit over 16 dage, når 1 m² affugtningsenhed er tilsluttet. I denne simulering ligger den gennemsnitlige relative luftfugtighed hele året under det kritiske fugtniveau på 75 % RF. Med andre ord tyder det på, at det ved hjælp af en affugtningsenhed er muligt at reducere fugtniveauet i den kritiske sommerperiode til under det kritiske fugtniveau. Samtidig kan det ses på graferne, at det generelle fugtniveau er udjævnet og at fugtniveauet gennem hele året holder sig tæt på 70% RF.

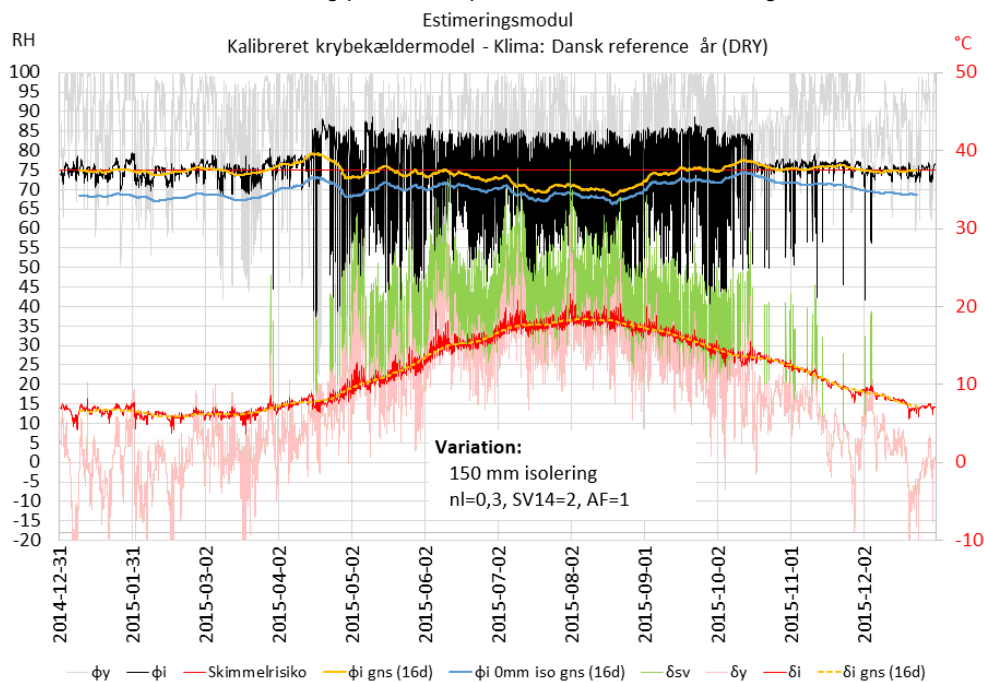
Der er tale om en indikation på baggrund af nøgletal for en affugtningsenhed efter indledende tests. Disse indikationer kan anvendes til dimensionering af en prototype af affugtningsenheden. Når denne er udviklet kan der udføres de nødvendige tests til bestemmelse af det endelige produkts ydeevne og dens respektive nøgletal. Ved hjælp af de endelige nøgletal skal simule-

ringerne gentages. Først på det tidspunkt kan effekten af den endelige affugtningsenhed vurderes for konkrete krybekældre og enhedens modulstørrelse kan dimensioneres.

I det følgende vender vi tilbage til spørgsmålet om muligheden for en efterisolering af krybekældre efter installation af SV14-systemet med affugtningsmodul. For at kunne efterisolere krybekælderen uden at introducere risiko for skimmelsvampeangreb skal fugtniveauet holdes under de 75 % RF.

Indledende vises ændringen ved efterisolering af etagedækket med 150 mm isolering (λ -værdi = 0,036 W/(mK) af den krybekælder, der er simuleret i Figur 18. Krybekælderen har monteret 2 stk. SV14 samt et 1 m² affugtningsmodul og har et lavt baggrundsluftskifte (0,3 1/h). Ændringen kan ses i nedenstående Figur 19, hvor den optrukne orange kurve viser forholdene efter efterisoleringen, og den blå kurve viser forholdene før efterisoleringen.

Ved efterisolering bliver niveauet af den relative luftfugtighed hævet generelt på mellem 68 % til 79 % RF. Stigningen er størst om vinteren med op til 7 %, mens stigningen om sommeren periodisk kun er 2 %. Der forekommer perioder, hvor det glidende gennemsnit over 16 dage overstiger det kritiske fugtniveau. Der er tale om 28 dage i februar, 23. dage i oktober og 23 dage i november. Til sammenligning overskrider den gennemsnitlige relative luftfugtighed i samme situation uden isolering på intet tidspunkt om året det kritiske fugtniveau.

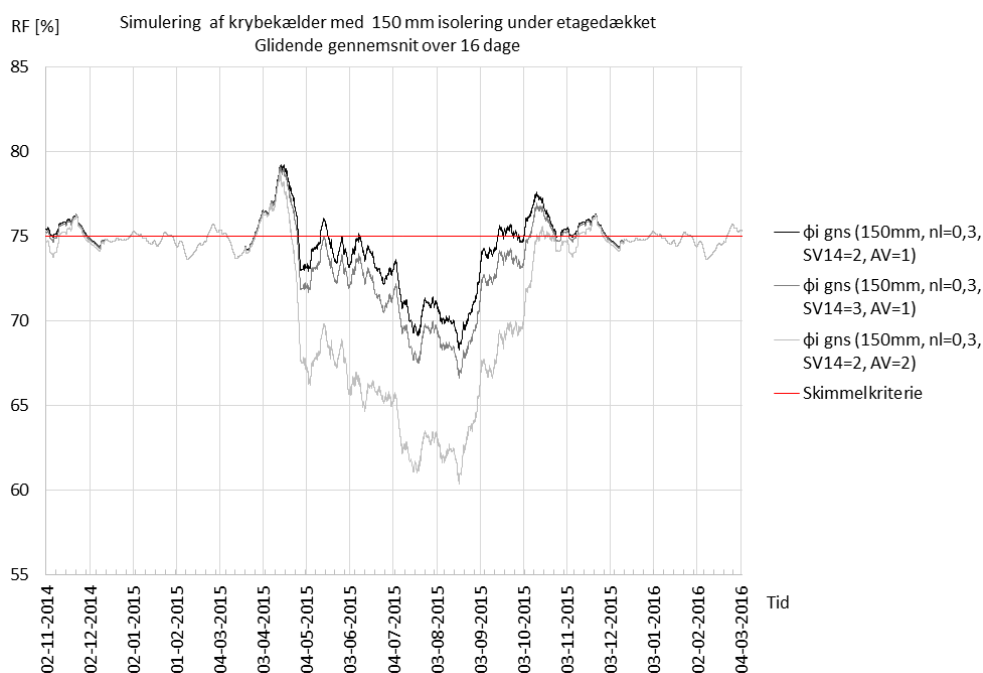


Figur 19. Case 1 – Simulering af en krybekælder med 150 mm isolering under etagedækket udstyret med 2 stk. SV14 samt 1 m² affugtningsenhed og lavt baggrundsluftskifte (0,3 1/h). Den blå kurve viser det glidende gennemsnit over 16 dage i samme situation, dog uden de 150 mm isolering under etagedækket.

I det følgende vises effekter af forskellige tiltag til at nedbringe det relative luftfugtigheds glidende gennemsnit over 16 dage under det kritiske fugtniveau på 75 % RF.

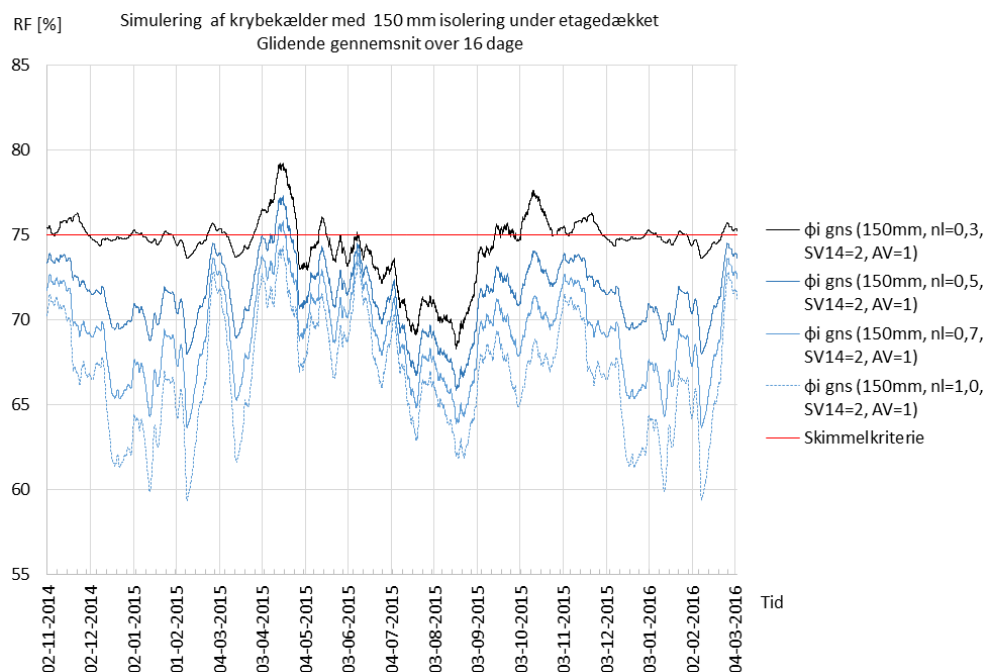
I Figur 20 er der vist effekten af øget kapacitet af den soldrevne ventilationsløsning ved at simulere installation af flere SV14-enheder (grå kurve). Dette reducerer fugtniveauet om sommeren, men har kun begrænset indflydelse på længden af perioder med en gennemsnitlig relativ luftfugtighed over 75 %. Dernæst er der vist effekten af en fordobling af affugtningsmodulets størrelse. Dette tiltag har en stor effekt på reduktion af fugtniveauet om sommeren. Igen er indflydelsen på længden af perioder med en gennemsnitlig relativ luftfugtighed over 75 % i

april og oktober/november begrænset. Begge tiltag har indflydelse på sommerforholdene, mens vinterforholdene forbliver upåvirket.



Figur 20. Case 1 – Sammenligning af effekten af at øge kapaciteten af hhv. SV14-systemet og affugtningsmodulet til reduktion af fugtniveauet i krybekælderen efter efterisolering af etagedækket.

I Figur 21 er effekten af øget baggrundsluftskifte (blå kurver) vist.



Figur 21. Case 1 – Sammenligning af effekten af øget baggrundsluftskifte til reduktion af fugtniveauet i krybekælderen efter efterisolering af etagedækket.

Allerede en mindre stigning i baggrundsluftskiftet presser det gennemsnitlige fugtniveau om vinteren under de kritiske fugtforhold på 75 % RF. Den resterende periode, hvor gennemsnittet af den relative luftfugtighed overstiger 75 % RF, er kort med 11 dage fra 12. til 23. april. Når luftskiftet er over 1,0 1/h overskrides det kritiske fugtniveau ikke længere.

Samlet set vurderes, at øget baggrundsluftskifte i kombination med installation af en soldreven ventilationsløsning med ydeevne svarende til SV14 og en affugtningsenhed kan give mulighed for en efterisolering af en krybekælder. Dette under forudsætning af, at baggrundsluftskifte og kapaciteten af systemerne bliver afstemt til den specifikke krybekælder. Alene at øge kapaciteten af SV14-systemet eller affugtningsenheden vurderes ikke at afhjælpe de fugtproblemer, der følger med en efterisolering af etagedækket. Årsag til det er reduktionen af baggrundsluftskiftet i forbindelse med installation af SV14-systemet og en evt. affugtningsenhed.

6. Kravspecifikation til arkitektonisk tilpasning

Arkitektonisk tilpasning af solventilering er nødvendigt af tre grunde; for det første viser overstående kapitler, at en af løsningerne på udfordringer i krybekældre er at maksimere arealet af soloptaget, dvs. *solfangerens størrelse*, således at den samlede løsning kommer til at fungere optimalt. For det andet er det oplagt, at når *solfangerens form* tilpasses bygningen, kommer den til at fremstå som en integreret bygningsdel, frem for et 'stykke påklistret teknik', og for det tredje er arkitektonisk tilpasning nødvendig, for at få *produktions-flow* og *bygningdetaljer* til at fungere bedst muligt.

Indledningsvist er mulighederne for arkitektonisk tilpasning blevet vurderet. Metoden har været at tage udgangspunkt i en god håndfuld brugssituationer, samt opdele den samlede løsning i faser. Brugssituationer i eksemplerne er alle private boliger, men kunne også være erhverv og industri, da de arkitektoniske greb overordnet er de samme. Det handler om:

- *Velfungerende samlet løsning*, dvs. placering af solfangerarealet, hvor det får maksimalt solindfald og den høstede energi bliver distribueret mest hensigtsmæssigt.
- *Holdbar samlet løsning*, hvor montagen af solfanger ikke skader det eksisterende byggeri og hvor selve solfangeren er udført således, at vedligeholdelsen er minimal og patineringsforegår på en ordentlig måde - både hvad angår detaljer og overflader.
- *Et gennemtænkt visuelt udtryk*, hvor solfangeren oftest søges at fremstå i harmoni med øvrige bygningsdele og flader, men solfangeren kunne også udnyttes som et 'rebelsk element', som bryder med bygningskroppen og på en værdiskabende, æstetisk og overbevisende måde fortæller en ny historie.

Faserne ligner dem, som kendes fra andre bygningsdele og har tilknyttet forskellige aktører, som repræsenterer forskellige tidsmæssige og økonomiske perspektiver. Faserne er; Ordre, Fabrikation, Levering, Montage (*installation*), Levetid (*service/udskiftning/opgradering/leasing*) og Bortskaffelse (*genanvendelse/kildesortering*).

6.1 Tilpasningseksempler

Konkrete registrerede installationer



Skitse af hvordan det kunne se ud.

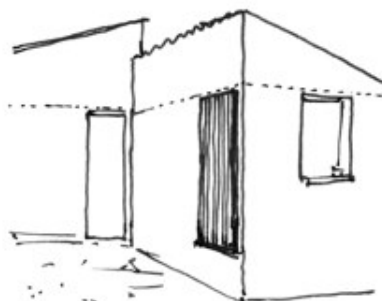


Ændringer og motiv.
(Fase)

Anden placering, således at vindue holdes fri og de to figurer ikke 'gnaver' i hinanden (montage)



Anden placering, så underkant flugter med sålbænk. Tænkes sammen med udestue og let facade-aptering. (Ordre, levering og montage)



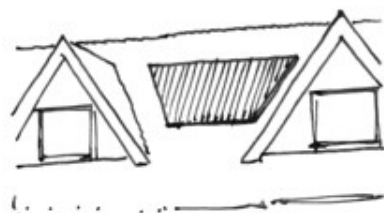
Anden placering, således at overkant flugter med vindueslysning og reces i murværk, evt. højere format giver større solbelyst areal (fabrikation og montage)



Gennemtænkt og integreret. Har dog med den ulempe at lysningen i murværket er fastlåst, og dette stiller krav til eventuel fremtidig udskiftning (levetid)



Anden form, hvor underkant følger tag/skotrenden nedenfor, derved undgås 'underlig' trekant og et større virksomt areal opnås (*fabrikation*)



Anden form og placering giver mere harmonisk tagflade samt muligvis større areal (*fabrikation og montage*).



Bredere format spiller sammen med husets 'skiveskårne' karakter. Får slægtskab med den markante markise og større areal (*fabrikation*).

Kravspecifikation til design i forhold til arkitektonisk tilpasning peger på, at produktet (solfangeren med tilhørende installationer) i stor udstrækning kræver samme tilpasningsmuligheder hvad angår udformning, som vi kender fra fx termoruder. Det skal være muligt at tilpasse solfangerens størrelse og form. Ydermere er det essentielt, at solfangeren har rig mulighed for hensigtsmæssig placering af befæstelsespunkter, således at solfangeren placeres korrekt visuelt på bygningskroppen uagtet, hvor det bygningsteknisk lader sig gøre at befæste. Ofte vil strukturen for bærepunkter være usynlig udefra, fx spær/lægter, som ligger under tagdækningen, og på murpiller, som ligger under pudslag. Hvad angår installationer er det væsentligt, at ind- og udtag kan placeres så frit som muligt i solfangerens bagplade eller side således, at installationen kommer mest hensigtsmæssigt ind i huset. Installationens tilpasning ligner den tilpasning vi finder i meget andet VVS-arbejde.

De skitserede løsninger skal inspirere til en arkitektonisk tilpasning, for maksimal udnyttelse af egnede arealer på bygningerne til installation af soldrevne installationer uden at skæmme bygningerne. Samtidig vil en individuel tilpasning gøre anvendelsen af de soldrevne løsninger mulig på flere bygninger, som ellers ikke umiddelbart har egnede arealer/overflader.

SolarVenti har ad flere omgange produceret paneler med særlige mål og former. Idet dette kræver opmåling, projektering og individuel produktion til det konkrete projekt, medfører de æstetiske tilpasninger en ekstra omkostning, som bygherren skal være villig til at bære.

7. Konklusion og perspektivering

Det viser sig, at det ved anvendelse af krybekældermodellen kan undersøges, hvordan forskellige tiltag påvirker indeklimaet i en krybekælder. Simuleringerne er foretaget ved modellering af en kendt traditionel krybekælderkonstruktion. Der er opstillet en kalibreret model af denne krybekælder, case 1 (se nærmere Bilag 1), hvorefter der er udført simuleringer til vurdering af effekten af forskellige tiltag, såsom

- Efterisolering af krybekælderdekke
- Ændret luftskifte
- Tilslutning af et soldrevent ventilationssystem SV14
- Tilslutning af et soldrevent ventilationssystem SV14 med affugtningsenhed

Simulering af effekten af forskellige tiltag med krybekældermodellen vurderes at være forbundet med visse usikkerheder, som der skal tages med i betragtning, især når der ønskes at vurdere konkrete renoveringsløsninger. Derimod giver modellen en god indikation for, hvilke overordnede effekter de ovennævnte tiltag vil have på forholdene i krybekælder. Disse indikationer kan hjælpe med at vælge, hvilken retning fx soldrevne ventilationssystemer skal udvikles i, for at forbedre fugtforholdene i krybekælder, og hvilke parametre, der er nødvendige at arbejde med, hvis ventilationsløsninger samtidig skal kunne muliggøre en efterisolering af krybekælderdekke uden risiko for fugt- eller skimmelproblemer.

I forhold til usikkerheder i simuleringer med modellen er der udpeget følgende opmærksomhedspunkter:

- Modellen modellerer ikke fugt- og varmekapacitet af materialer og konstruktioner. Dermed er der risiko for,
 - o at faseforskydningseffekter ikke bliver modelleret helt korrekt, hvis der ikke foreligger måledata fra en tilstrækkelig lang periode.
- Modellen er stationær, dvs. forhold, beregnet for en time, påvirker ikke forhold af den næste time. Derudover er geometrien af krybekælder ikke modelleret. Det betyder,
 - o at effekter som fx tilbagekondensering/termisk flytning ikke kan vurderes på baggrund af simuleringer med krybekældermodellen.
 - o at man ikke bliver opmærksom på eventuel årlig akkumulation af ændringer (fx når der sker kondensering af fugt i krybekælder).
- Skimmelkriteriet gælder for konstruktionernes overflader. Den relative luftfugtighed og temperaturen i krybekælder er beregnet for indeklimaet. Det betyder,
 - o at fugtforholdene på overfladerne om sommeren i mindre grad bliver underestimeret og om vinteren i mindre grad bliver overestimeret.

Effekter af efterisolering af krybekælderdekke:

Efterisoleres etagedækket i en traditionel krybekælder med 150 mm mineraluldsisolering, bliver perioden, hvor den gennemsnitlige relative luftfugtighed overskrider skimmelkriteriet (75 % RF), forlænget betydeligt fra 2-3 uger til 3,5 måneder med næsten uafbrudt overskridelse af skimmelkriteriet. En anden pointe er, at stigningen af den relative luftfugtighed ikke kun forekommer om sommeren, men også om vinteren. Samlet set vurderes, at risiko for fugt- og skimmelproblemer øges betragteligt ved efterisolering af etagedæk. Yderligere simuleringer viser, at efterisolering af etagedæk forværrer de i forvejen kritiske forhold allerede ved de første få millimeter, hvorved der opnås den mest markante effekt. Yderligere isoleringstykkelse

ser er af mindre og mindre betydning. Kort sagt har de første millimeter isolering både den største negative indflydelse på fugtniveauet i krybekælderen samt den største isoleringseffekt.

Ved vurdering af konkrete etagedæks egnethed for efterisolering skal der særskilt udføres en vurdering af konstruktionens luft- og damptæthed, samt bygningsfysiske funktion.

Effekter af ændret luftskifte i krybekælderen:

Simuleringerne viser, at ventilation har en afgørende betydning for den relative luftfugtighed både om sommeren og om vinteren. Ved højt luftskifte er udsving af den relative luftfugtighed store og den relative luftfugtighed følger, om end dæmpet, udendørsforholdene. Ved lavt luftskifte bliver udsving i den relative luftfugtighed stærkt dæmpet og forholdene i krybekælderen bliver påvirket meget mindre af udendørsforholdene, men mere af konstruktions- og jordforholdene. Samtidigt er det tydeligt, at den relative luftfugtighed i den undersøgte traditionelle krybekælderkonstruktion ikke kan holdes under det kritiske fugtniveau på 75 % RF uden et godt luftskifte.

Effekter af installation af SV14, soldreven ventilationssystem, i krybekælderen:

Der foreligger nøgletal for ydelsesevnen af SV14. På baggrund af den er der indledende gennemført en overslagsberegning, der viser, at energitilskuddet af en SV14 monteret i en 100 m² krybekælder er meget lille. Om vinteren svarer energitilskuddet til en transmissionsvarmegevinst af et 1 mm tykt isoleringslag (λ -værdi på 0,036 W/(mK)). Dvs. at ydeevnen af en SV14 alene ikke giver mulighed for en efterisolering af en krybekælders etagedæk.

Virkemåden og installationen af SV14-systemet kræver, at visse ventilationsriste i en krybekælder bliver lukket og at nogle af åbningerne bliver blokeret med udstyr til indblæsnings- og eventuel udsugning. Dvs. at der må regnes med et dårligere luftskifte i en krybekælder efter installation af en SV14. I simuleringerne er det antaget, at luftskiftet reduceres fra 1,0 1/h til 0,3 1/h. Dette ringere luftskifte skal der kompenseres for, når SV14-systemet bliver dimensioneret. Simulering af forskellige varianter har vist, at en øget kapacitet af det soldrevne ventilationsanlæg svarende til installation af 2 stk. SV14 i den simulerede krybekælder kan kompensere for det reducerede luftskifte om sommeren, men i opvarmningsperioden øges den relative luftfugtighed betydeligt. For krybekældre, som i forvejen har et højt fugtniveau, betyder dette, at den relative luftfugtighed også om vinteren vil kunne presses over det kritiske fugtniveau på grund af den reducerede baggrundsluftskifte.

Ved yderligere simuleringer er muligheden for en efterisolering af krybekældre med SV14-system undersøgt. Der er taget udgangspunkt i den før omtalte simulering med en soldreven ventilationskapacitet svarende til 2 stk. SV14 og et lavt baggrundsluftskifte. Efterisoleringen medfører en jævn stigning af den relative luftfugtighed over hele året på 2-3 % ved en 50 mm isolering (λ -værdi på 0,036 W/(mK)), og perioden med en gennemsnitlig relativ luftfugtighed over 75 % forlænges betydeligt, især i overgangsperioden. Det vurderes, at en efterisolering – på trods af installation af SV14-systemet – ikke ville kunne gennemføres, uden at der opstår risiko for fugt- og skimmelproblemer, med mindre der gennemføres yderligere tiltag. Disse tiltag kunne være en kombination af øget baggrundsventilation og affugtning af ventilationsluften, som er undersøgt efterfølgende.

Effekter af opkobling af en affugtningsmodul på SV14, installeret i en krybekælder:

I projektets regi er der arbejdet på udvikling af en affugtningsenhed. I den forbindelse er der gennemført indledende test, der indikerer nøgletal for ydeevnen af en affugtningsenhed. Under anvendelse af indikationerne fra de indledende tests er der i krybekældermodellen programmeret en affugtningsenhed. Der er udført simuleringer med denne enhed med udgangspunkt i den i afsnittet før fundne SV14-løsning til en krybekælder uden efterisolering. De gennemførte simuleringer kan bidrage til en hensigtsmæssig dimensionering af en prototype af affugtningsenheden, men ikke til endelig vurdering af en fremtidig affugtningsenhed. Inden det er muligt, skal

enhedens nøgletal nøjere bestemmes og indarbejdes i krybekældermodellen. I den forbindelse er der senest påbegyndt en fuldskalatest af affugtningsenheden på DTU.

Simulering af forskellige varianter med de foreløbige nøgletal af affugtningsenhedens ydeevne viser, at fugtniveauet i den undersøgte krybekælder med 150 mm efterisolering under etagedækket kan, ved installation af soldreven ventilation svarende til 2 stk. SV14 sammen med en affugtningsenhed på 1 m², holdes under det kritiske fugtniveau om sommeren. I vinterhalvåret kan de risikable forhold ikke afhjælpes. Yderligere simuleringer viser, at fugtniveauet kun kan holdes året rundt under det kritiske fugtniveau på 75 % RF, hvis der samtidig sørges for en forbedring af den naturlige baggrundsventilation.

Samlet set vurderes, at øget baggrundsluftskifte, i kombination med installation af SV14 med affugtningsenhed, kan give mulighed for en efterisolering af en krybekælder. Dette under forudsætning af, at baggrundsluftskifte og kapaciteten af systemerne bliver afstemt til den specifikke krybekælder. Det vurderes, at man alene ved at øge kapaciteten af SV14-systemet og/eller affugtningsenheden ikke kan afhjælpe de fugtproblemer, der følger med en efterisolering af etagedækket og/eller reduktion af baggrundsluftskiftet i forbindelse med installation af SV14-systemet (med eller uden affugtningsenhed).

Producenten SolarVenti arbejder sideløbende med projektet med installation af fx supplerende el-dreven baggrundsventilation og opvarmning af ventilationsluft, samt en styringsenhed til energieffektiv drift.

De simuleringer, der er gennemført med krybekældermodellen, viser, at krybekældre er problematiske bygningsdele, uanset om disse er udstyret med et soldrevent ventilationssystem, samt at en efterisolering af krybekældre er meget risikabelt. Samtidig kan der ses potentiale i soldrevne ventilationssystemer, forudsat at der kan sikres den nødvendige baggrundsluftskifte, og at systemerne bliver dimensioneret tilstrækkeligt store. Store solpaneler optager større areal på bygningerne og kan i sidste ende være en hindring for systemets installation. Derfor er de arkitektoniske muligheder for tilpasning af systemerne til den eksisterende bygningsmasse belyst.

Kravspecifikation til arkitektonisk tilpasning:

Der er udpeget tre grunde, hvorfor der er behov for arkitektonisk tilpasning af soldrevne ventilationssystemer. For det første har simuleringerne vist behovet for at maksimere solfangerens størrelse. For det andet kan den æstetiske integration af det soldrevne ventilationssystem forbedres, når solfangerens form kan tilpasses bygningen. For det tredje er tilpasning af solpanelerne i forhold til arkitektoniske randbetingelser nødvendig, for at få produktions-flow og bygningsdetaljer til at fungere bedst muligt.

For at kunne opfylde de forhold, der er udpeget i kravspecifikationen til design i forhold til arkitektonisk tilpasning, kræves der store tilpasningsmuligheder af det soldrevne ventilationssystem, hvad angår form, størrelse og befæstelsespunkter, tilsvarende tilpasningsmuligheder af termoruder. Med henblik på installationer er det væsentligt, at ind- og udtag kan placeres så frit som muligt i solfangerens bagplade eller side således, at installationen kommer mest hensigtsmæssigt ind i huset, tilsvarende tilpasningsmuligheder i VVS-arbejde. Produktion af SolarVentis paneler og systemer er fleksible både i forhold til mål eller form og placering af tilkoblingssteder. Det afgørende er økonomisk at tage højde for afvigelse fra standardformaterne.

Der er skitseret løsninger, som skal inspirere til en arkitektonisk tilpasning, der sikrer, at soldrevne ventilationssystemer bliver anvendelige i bred forstand uden at skæmme bygninger, samt at der også kan opnås æstetiske løsninger ved størst muligt solfangerareal.

7.1 Perspektivering

I nærværende projekt er der i krybekældermodellen indtil videre kun modelleret soldrevne ventilationsløsninger uden affugtningsenhed, supplerende baggrundsventilation eller el-opvarmning, idet der ikke forelå de endelige nøgletal fra disse systemer. Samtidig vurderes, at krybekældermodellens nøjagtighed vil kunne forbedres markant, hvis der forelå bedre kendskab til fugt- og temperaturforhold, samt deres årsvariationer i jorden under krybekælderens. En anden mulighed til forbedring af krybekældermodellens nøjagtighed og reduktion af omfanget af empiriske data til kalibrering af modellen vil være at indarbejde effekter af materialernes fugt- og varmekapaciteter i ligevægtsmodellen.

En videreudvikling af krybekældermodellen med henblik på de ovennævnte emner og en validering mod data fra en soldrevent ventileret krybekælder vil forbedre nøjagtigheden og anvendeligheden af krybekældermodellen. Derefter kan potentialet af de nye soldrevne ventilationsløsninger til forbedring af fugtforhold i krybekældre undersøges igen, også med henblik på efterisolering af krybekælderdek.

8. Referencer

By og Byg, 2003. Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger, By og Byg anvisning 204, 1. udgave 2003. Valbjørn, O., Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 2003.

Byg-Erfa, 2012. Kældre og krybekældre – fugtsikring og varmeisolering. Byg-Erfa (19) 12 11 08, 2012.

Byg-Erfa, 2009. Risiko ved udeluftventilerede krybekældre. Byg-Erfa (19) 09 12 30, 2009.

DANETV, 2013. ETV Verification Statement, SolarVenti SV14, 12.11.2013.

DANETV no 1201. ETV Test Report SolarVenti SV14, Danish Technological Institute, Refrigeration and Heat Pump Technology, J.no. 1201, Test no. 1 - Type-test, Version 1.2,

DRY, 2012. 2001-2010 Design Reference Year for Denmark (DRY), Teknisk Rapport 12-17, Wang, P. R.; Scharling, M.; Nielsen, K. P.; Danmarks Meteorologisk Institut. København 2012.

DS 418, 2011. Beregning af bygningers varmetab. DS 418. København. 7. udgave. 2011.

SBi, 2013. Fugt i bygninger, SBi-anvisning 224, 2. udgave, Brandt, E. m.fl., Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København SV, 2013.

SBi, 2012. Midlertidig skimmelreivering af krybekældre, Undersøgelse af effekten af affugtning og sug i krybekældre med skimmelsvamp, SBi-rapport 2012:07, Møller, E. B.; Gunnarsen, L., Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, Hørsholm, 2012.

Møller, 2010. Møller, E.B. (red.); Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. Hørsholm, 2010.

Zürcher, 1997. Zürcher, C.; Frank, T.. Bauphysik, Bau und Energie. Vdf/Teubner. Zürich. 1997.

Bilag 1. Krybekældermodel

Dette bilag indeholder programdokumentationen af krybekældermodellen, hvilket er et værktøj til vurdering af fugtforhold i krybekældre. Værktøjet er en ligevægtsmodel af en krybekælder, som tilpasses de specifikke krybekældre ad to tempi ved:

1. At definere de konstruktive og materialespecifikke egenskaber af den konkrete krybekælder i den matematiske model.
2. At kalibrere modellen til den specifikke krybekælder på baggrund af empiriske data målt i den konkrete krybekælder.

Derefter kan værktøjet anvendes til at estimere og vurdere konsekvenser af forskellige indgreb i krybekælderens forhold. Det kan fx være ændring af luftskifte, efterisolering af etagedæk, etablering af vedvarende energidreven ventilation med opvarmet og/eller affugtet udeluft.

Udvikling af en model, der standardmæssigt skal kalibreres, har sin begrundelse i, at den tilgængelige viden om mange af krybekældrenes randbetingelser er meget begrænset. Der foreligger ikke præcise data eller formler til beregning af:

- De klimatiske randbetingelser i jord/terræn
- Krybekælderens luftskifte, som er afhængigt af ventilationsåbningernes størrelse, udformning og placering
- Varmetilskud fra varmerør eller lignende
- Indeklimaforhold – er individuelle
- Udendørsforhold – kan variere fra år til år

Disse randbetingelser kan kun estimeres. Summen af usikre parametre er dermed meget stor og giver en forholdsvis vag teoretisk basis for at kunne vurdere konsekvenser af indgreb i krybekælderens forhold.

Til den nødvendige bestemmelse af de ukendte parametre er det valgt at kalibrere en matematisk standardmodel for krybekældre til en given krybekælder ved hjælp af måledata fra selve den krybekælder.

Der er valgt anvendelse af en forholdsvis simpel ligevægtsmodel, specifikt udviklet til krybekældre, som beregner forholdene for hver time. Derudover er der lagt vægt på en enkel definition af den givne krybekælder og en overskuelig kalibrering af modellen til dens specifikke forhold/randbetingelser.

Når den matematiske standardmodel er kalibreret til den specifikke krybekælder, kan forskellige indgreb i denne krybekælder simuleres og deres konsekvenser evalueres. Der er fx tale om konsekvenser af efterisolering af etagedækket, ændret luftskifte eller indblæsning af opvarmet og/eller affugtet udeluft. Det er især her fordelene ved anvendelse af en forholdsvis simpel ligevægtsmodel viser sig. I en sådan model kan der målrettet indføres og styres egnede variable til simulation af de tiltag, som ønskes evalueret.

Krybekældermodellen er programmeret i Excel 2013. I Bilag 2 Programvejledning findes en trinvis beskrivelse af, hvordan modellen anvendes.

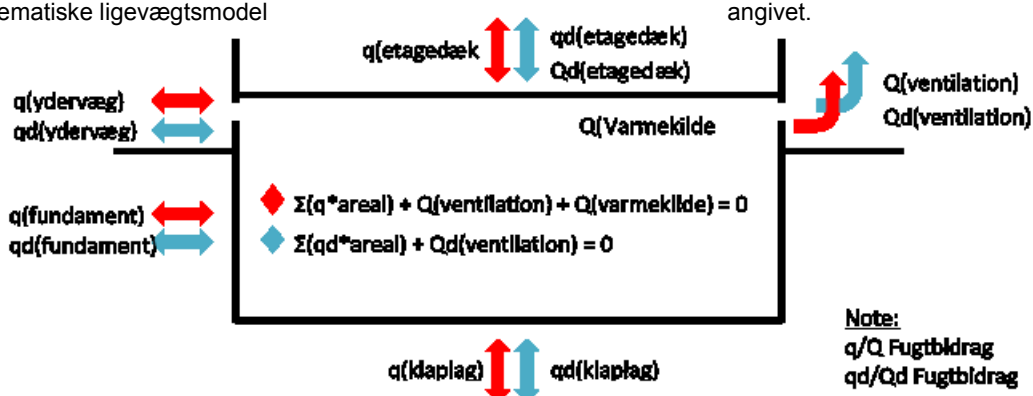
I. Den matematiske model

Krybekældermodellen skal kunne forudsige termiske og fugttekniske forhold i en specifik krybekælder. Derfor er der opstillet en matematisk model til tilnærmelsesvis beregning af disse forhold, baseret på en temperatur- og en fugtligevægt. Der er tale om en stationær beregning, som ikke medtager effekter fra kapillarsugning, materialernes varme- og fugtkapacitet, eller andre mere tidsafhængige forhold.

Til beregning af temperaturligevægten er der medtaget varmemstrømmen gennem de enkelte konstruktionsdele, ventilationens indflydelse og en lokal varmekilde i krybekælderen. Derudover er det muligt at simulere varmetilskud fra en soldreven ventilator til indblæsning af opvarmet udeluft.

Til beregning af fugtligevægten er der medtaget fugttilskud fra diffusionsstrømme gennem bygningsdelene og fugttilskud/reduktion gennem luftskifte. Derudover er det muligt at simulere fugtreduktion fra en soldreven ventilator til indblæsning af affugtet udeluft.

I nedenstående principskitse er de indgående varme- og fugttransportmekanismer i den matematiske ligevægtsmodel angivet.

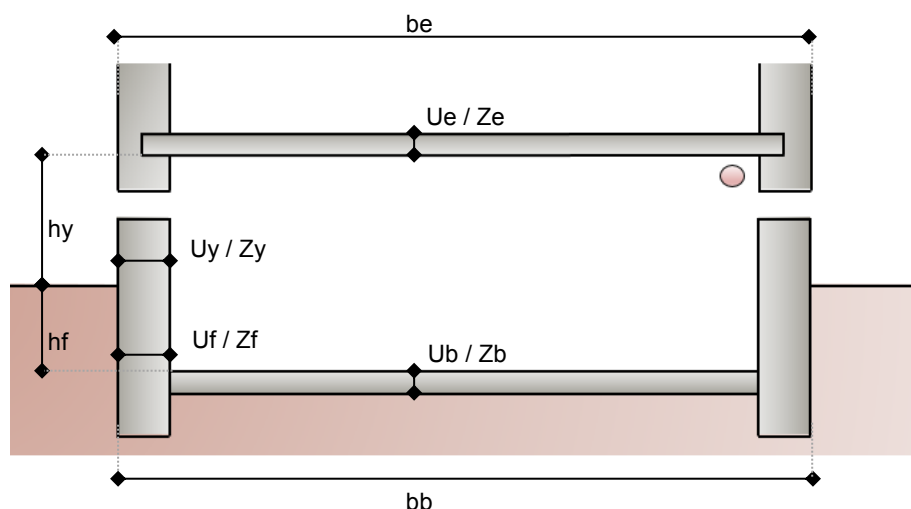


Figur 22. Principskitse over det matematiske model.

II. Datainput

I dette afsnit behandles det datainput, der definerer de konstruktive og materialespecifikke egenskaber af den konkrete krybekælder. Herved tilpasses standardmodellen til den specifikke krybekælder, så den er klar til efterfølgende kalibrering mod måledata.

Indledende er der udført en litteraturgennemgang og gennemgang af erfaringer fra egne undersøgelser i krybekældre, for at definere en standard krybekælder, samt hvilke parametre, der skal angives til beskrivelse af en specifik krybekælder. På baggrund af de forskellige krybekældertyper, som man må regne med at støde på, er det valgt, hvilke bygningsdele der skal beskrives med hvilke konstruktive og materialespecifikke parametre. Disse er vist i nedenstående principskitse:



Figur 23. Krybekældermodellens konstruktions- og materialeegenskaber.

Følgende parametre, skal defineres:

- $be =$ Etagedækkets bredde ($=bb$)
- $Ue/Ze =$ Etagedækkets transmissionskoefficient/vanddampdiffusionsmodstand
- $hy =$ Ydervæggens/soklens højde
- $Uv/Zy =$ Ydervæggens/soklens transmissionskoefficient/vanddampdiffusionsmodstand
- $hf =$ Fundamentets højde
- $Uf/Zf =$ Fundamentets transmissionskoefficient/vanddampdiffusionsmodstand
- $bb =$ Krybekælderbundens bredde ($=be$)
- $Ub/Zb =$ Krybekælderbundens transmissionskoefficient/vanddampdiffusionsmodstand

For at kende disse parametre, er der behov for angivelse af bredde, tykkelse, isolans og diffusionsmodstandstal μ for de fire bygningsdele, der begrænser en krybekælder. Disse er krybekælderens bund, fundamenter, ydervægge og etagedæk mod overliggende opholdsrum. Ved hjælp af disse værdier beregnes de transmissionskoefficienter (U-værdi) og vanddampdiffusionsmodstande (Z-værdi), der indgår i den matematiske model.

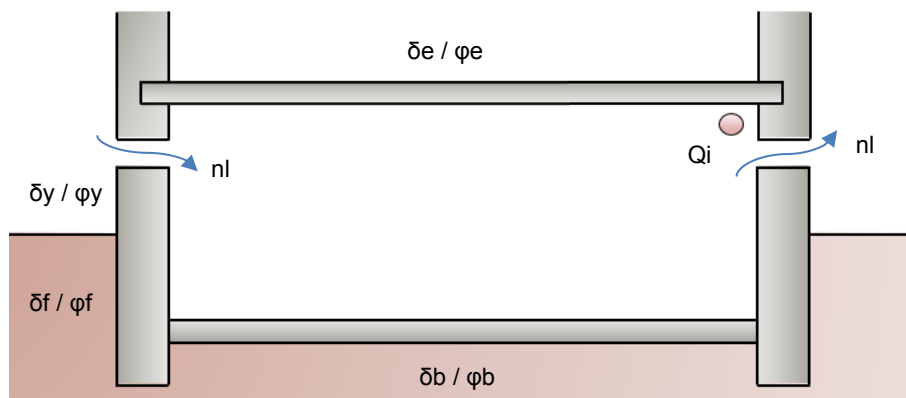
Der udføres i programmet ingen analyse af de enkelte konstruktioners bygningsfysiske funktion. Denne analyse forudsættes udført inden input af data. Dette gælder fx etagedækkonstruktionen og dens luft- og damptæthed.

Krybekælderens simuleres ved én meter brede striber, som repræsenterer krybekælderens. Eventuel indflydelse af skillevejge eller særlig geometri i krybekælderens vil der blive taget højde for ved kalibrering af modellen til en specifik krybekælder på baggrund af empiriske data.

III. Usikre og variable randbetingelser

Ud over krybekælderens konstruktive og materialespecifikke parametre er der en del usikre og variable randbetingelser, såsom

- nl : Luftsiftet i krybekælder
- $\delta b / \varphi b$ og $\delta f / \varphi f$: Jordtemperatur og den relative luftfugtighed i poreluften
- Qi : Varmekilder i krybekælder
- $\delta e / \varphi e$: Indeklimaets temperatur og relativ luftfugtighed i lokaler over krybekælder
- $\delta y / \varphi y$: Udendørs temperatur og relativ luftfugtighed



Figur 24. Parametre til beskrivelse af randbetingelser.

Mange af disse usikre randbetingelser er at betragte som forholdsvis træge (jordtemperatur, varmekilde i krybekælderens, indeklima over krybekælderens) og indgår i modellen som månedlige gennemsnitsværdier. Derimod varierer randbetingelser som udendørs temperatur- og luftfugtighedsforhold kraftigt over korte tidsintervaller, hvorfor disse indgår i modellen på timebasis. Luftsiftet er en parameter med stor usikkerhed, og der foreligger meget lidt teoretisk viden om

det. Denne parameter indgår som fast parameter over hele året.

Randbetingelserne er så vidt muligt beskrevet og valgt på baggrund af dokumenteret viden i litteraturen, som beskrevet i de næste afsnit.

III.A Luftsifte i krybekælder

Naturlige ventilationsforhold i krybekælder er forskellige og afhængige af mange faktorer, som ikke kan beskrives matematisk entydigt. Dermed kan luftsiftet i krybekælder ikke beregnes. Dernæst er det forholdsvis omkostningstungt at måle luftsiftet i specifikke krybekælder. En logning af luftsiftet i en specifik krybekælder anses for at være urealistisk.

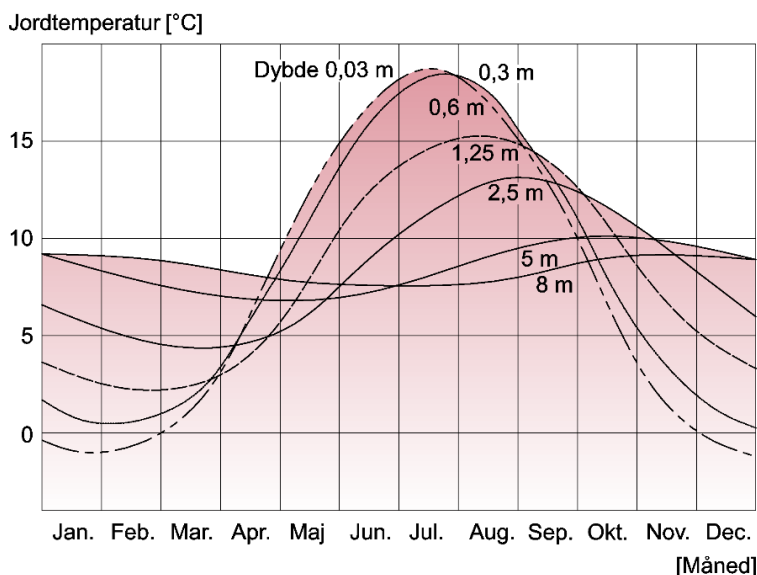
Ved mekanisk ventilerede krybekælder kan luftsiftet bestemmes ved måling af luftbevægelse i kanalerne.

Det er for krybekælder med naturlig ventilation nødvendigt at kende størrelsesordenen for et realistisk luftsifte. I en SBI-rapport om midlertidig skimmelrening af krybekælder (SBI, 2012) er der udført målinger af luftsifte i tre krybekælder. Der er ved målingerne konstateret et naturligt luftsifte på hhv. 0,33 1/h, 0,5 1/h og 1,05 1/h. Disse værdier vurderes at indikere i hvilken størrelsesorden det naturlige luftsifte kan antages at ligge.

Luftsiftet n_l som randbetingelse må derfor antages at ligge mellem 0,3 til 1 1/h for en naturlig ventileret krybekælder, med mindre specielle forhold ved krybekælderens indikerer andet.

III.B Jordtemperatur og jordfugtighed

I SBI-anvisning 224 (SBI, 2013) er der angivet jordtemperaturer afhængigt af årstid og dybde i jorden, se nedenstående figur. De angivne temperaturer er for jord, der direkte er udsat for udeklimaet, dvs. uden overliggende krybekælder/bygning.



Figur 75. Jordtemperaturen gennem året i forskellig dybde. Døgnsvingninger i lufttemperaturen påvirker kun jordtemperaturen ned til knap 0,5 m's dybde. Derimod påvirker årstidsvariationer temperaturen i jorden helt ned til en dybde på ca. 8 m. Temperaturvariationerne i jorden er forsinkede i forhold til lufttemperaturen. Forsinkelsen bliver større med dybden, så den i 8 m dybde er ca. et halvt år. I større dybde ligger jordtemperaturen konstant på ca. 8 °C.

Figur 25. Jordtemperaturer (SBI, 2013).

Jordtemperaturen ved fundamentene δf må antages at følge en lignende kurve og ligge i en tilsvarende størrelsesorden, med mindre specielle forhold ved krybekælderen indikerer andet. Derfor antages, at kurverne for jordtemperatur i de forskellige dybder kan beskrive forholdene uden for fundamentene i tilsvarende dybder med en god tilnærmelse.

Jordtemperaturen under krybekældbunden δb kan ikke umiddelbart beskrives med de ovenstående kurver, idet lufttemperaturen over krybekældbunden ikke svarer til udendørstemperaturen. Samtidig må det antages, at krybekældertemperaturen følger udendørstemperaturen igennem årstiderne, hvorfor faseforskydningen i temperaturforløbet i jordtemperaturkurver af de dybere jordlag antages at ligne faseforskydningen i temperaturforholdene under en krybekældbund. Derfor vælges at anvende jordtemperaturkurverne i de dybere lag som initial overslag/udgangspunkt for temperaturforholdene ved krybekældbunden δb .

Den relative porefugt i jorden kendes heller ikke og vil variere over dage og året alt efter vejrforhold, grundvandsforhold mv. I et Byg-Erfa blad (*Byg-Erfa*, 2012) nævnes, at planternes visnegrænse ligger ved 99 % RF. I andre sammenhæng antages, at jordens porefugt er 100 % RF. Det anbefales, at der som udgangspunkt arbejdes med en jordfugt på 95 – 100 % RF.

III.C Varmekilde i krybekælder

I mange krybekældre er der varmekilder, som har en betydelig indflydelse på krybekælderens indeklima. Ofte vil energitilskuddet fra sådanne varmekilder være forskellige om sommeren og om vinteren. Der kan fx være tale om:

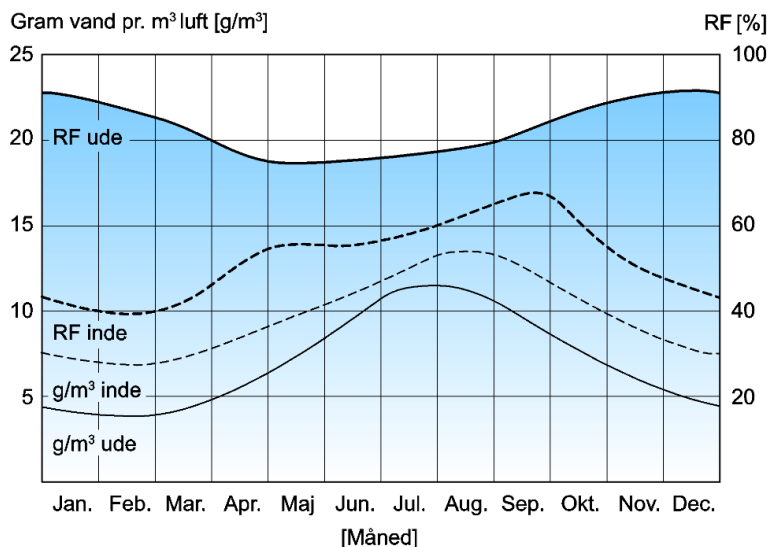
- Centralvarmerør eller varmtvandsrør, som kan være isolerede, eller delvist eller helt uisolerede.
- Procesvarme fra et fyr, placeret i krybekælderen.
- En varmekilde i et lokale ved siden af en partiel krybekælder eller en enkel krybekældervæg, der støder op til en kælder og dermed har et andet energitilskud end de øvrige fundamenter.

Sådanne varmekilder kan ikke umiddelbart modelleres via parametrene, nævnt i afsnit II Data-input. Derfor er der i modellen mulighed for at definere et energitilskud til krybekælderen, som kan angives separat for sommerperioden (15. marts til 15. september) og opvarmningsperioden (16. september til 14. marts).

III.D Indeklima over krybekælder

For forholdene i indeklimaet i lokalerne ovenover krybekælderen antages gennemsnitsværdier for hver måned. Værdier for både indelufttemperatur og relativ luftfugtighed antages jf. nedenstående Figur 26 (*SBi*, 2013).

Disse værdier er som udgangspunktet lagt ind i modellen. Foreligger der logninger af lufttemperatur og relativ luftfugtighed i boligen over den specifikke krybekælder, kan de forudantagne værdier jf. SBI-anvisning 224 (*SBi*, 2013) tilpasses via korrektionsfaktorer per måned. Dvs. at logning af indeklimateforhold ikke er nødvendigt, omend ønskeligt, for anvendelse af modellen.



Figur 28. Typisk variation af den relative luftfugtighed ude og inde gennem året. Den relative fugtighed inde er højest fra august til oktober, lavest fra december til marts. Det er forudsat, at fugttilførslen indendørs medfører et vanddampindhold, som om vinteren er 3 g pr. m³ højere inde end ude. I sommermånederne er der ikke regnet med fugttilskud, fordi der luftes mere ud end i resten af året. Indetemperaturen er regnet til 23 °C i juli og august, 22 °C i juni og september, og 20 °C resten af året. Der kan være betydelige variationer i den relative luftfugtighed udendørs, fx afhængig af om bygningen ligger tæt på eller langt fra kysten. Kurverne gælder for boliger, ikke for kontorer og andre bygninger med lille fugtproduktion.

Figur 26. Fugtforhold i indeklima (SBI, 2013).

III.E Udendørs temperatur og relativ luftfugtighed

Udendørs temperatur og relativ luftfugtighed har en stor indflydelse på temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderen. Der er behov for kendskab til udendørsforholdene i to forskellige tilfælde.

I den fase, hvor modellen kalibreres til en konkret krybekælder, er der behov for at kende de konkrete udendørsforhold. Dette foretages ved logning af konkrete data i udvalgte perioder om året. Ofte vil det kun være muligt at foretage 1-2 ugers logninger, måske 1-2 gange på et år. Det er vigtigt, at disse logninger foretages i signifikante perioder, dvs. dér, hvor man forventer de fugtteknisk mest risikable forhold. Dette vil være i perioder, hvor den årstidsbestemte og nat-dag-faseforskydningen er størst, dvs. om foråret eller om sensommeren/efteråret. Om foråret kan udendørstemperaturer være ganske høje om dagen med et højt vandindhold til følge. Den fugtige luft ventileres ind i den stadig kolde krybekælder, og krybekælderens relative luftfugtighed stiger.

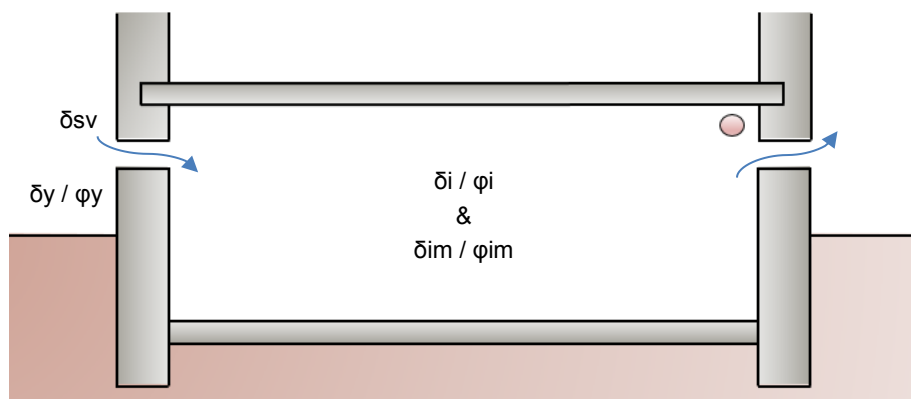
Om sensommeren/efteråret er krybekælderkonstruktionen stadig varm med et tilsvarende højt fugtindhold. Når krybekælderen bliver nedkølet via den kolde natteluft, bliver krybekælderluften kold og den relative luftfugtighed stiger.

I den følgende fase skal den kalibrerede, specifikke model anvendes til vurdering af konsekvenser ved forskellige indgreb i den konkrete krybekælder. I denne fase er der behov for at estimere krybekælderens forhold over hele året, dvs. der er behov for data af udendørstemperatur og relativ luftfugtighed over hele året og ikke kun over de loggede perioder. Samtidig er det hensigtsmæssigt at foretage disse evalueringer på baggrund af standardiserede data af et repræsentativt år i det danske klima. Disse data findes i Design Reference Year for Danmark (DRY, 2012), som er standardiserede årsdata for blandt andet relativ luftfugtighed og temperatur i dansk udeklima.

IV. Outputdiagram

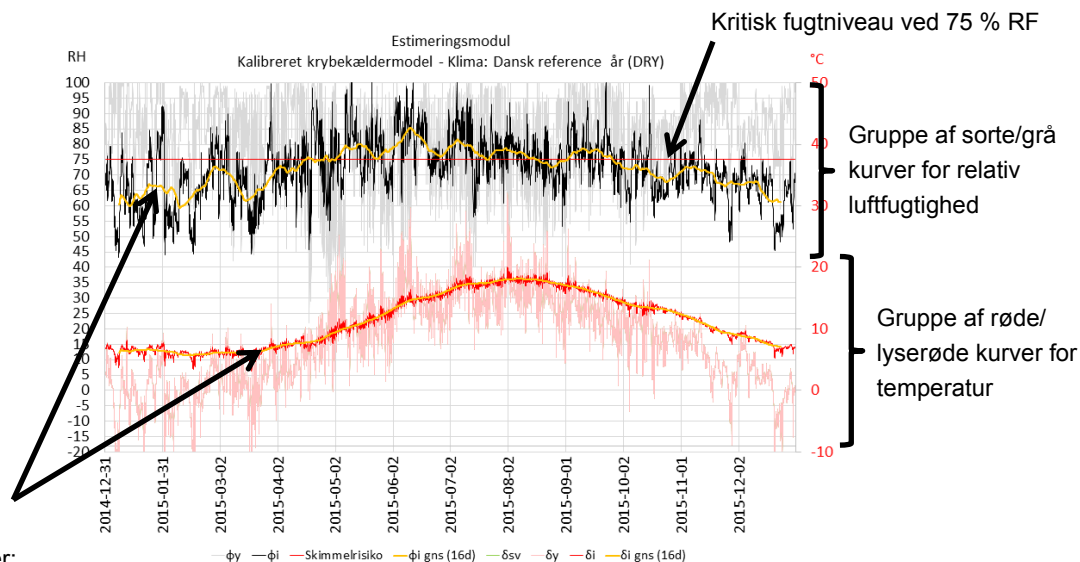
Outputdiagrammerne i både kalibreringsmodul og estimeringsmodul (se afsnit V og afsnit VI i dette bilag) viser kurver af temperatur og relativ luftfugtighed. I principskitsen, vist i Figur 27, er de forekommende variabler i outputdiagrammerne vist og forklaret:

- $\delta y / \varphi y$: Udendørs temperatur og relativ luftfugtighed.
- $\delta i / \varphi i$: Krybekælderens beregnede temperatur og relativ luftfugtighed.
- $\delta im / \varphi im$: Krybekælderens målte temperatur og relative luftfugtighed. Kun relevant i kalibreringsmodulet.
- δsv : Indblæsningstemperatur fra en soldreven ventilator.



Figur 27. Variabler, der forekommer i outputdiagrammer.

I nedenstående Figur 28 er der vist et eksempel på en outputgrafik med en indikation af, hvordan outputvariablenes kurver er arrangeret.



Gule kurver:
Glidende gennemsnit over 16 dage for hhv. temperatur og relativ luftfugtighed.

Figur 28. Outputdiagram fra estimeringsmodulet – visning af outputvariablerne.

Outputkurverne svinger meget, derfor er der anvendt forskellige metoder for at indikere det gennemsnitlige niveau af krybekælderens indvendige temperatur og især den relative luftfugtighed.

En metode er at anvende funktionen "tendenslinjer" fra programmet EXCEL, som kan generere lineære og polynomiske tendenslinjer, hhv. forkortet med:

- Lineær ("variabelnavn"): De lineære tendenslinjer kan være gode ved visning af forholdsvis begrænsede perioder.
- Poly. ("variabelnavn"): Ved de polynomiske tendenslinjer kan der vælges, hvor mange vendepunkter tendenslinjen skal have, for at få den mest realistiske kurve. I det polynomierne er begrænset til 6. potens, er der grænser for anvendelse af disse tendenslinjer. De polynomiske tendenslinjer kan anvendes, hvis der vises perioder med en overordnet svingning, der kan synliggøres med den polynomiske tendenslinje. Dette kan være tilfældet ved afbildning af et helt år, hvor årsvariationer i temperatur og relativ luftfugtighed har en fx sinuslignende udvikling over årene.

En anden mulighed er at vise et glidende gennemsnit, for at udjævne kortvarige (fx daglige) udsving i temperatur og relative luftfugtighed, for at få et overordnet periodisk overblik. Der er af hensyn til den tidsafhængighed, der er kendt for skimmelsvampevækst [#9, figur 3], valgt en periode på 16 dage til beregning af det glidende gennemsnit.

- δ_i gns(16d): Temperaturen δ_i , vist som glidende gennemsnit over 16 dage.
- φ_i gns(16d): Den relative luftfugtighed φ_i , vist som glidende gennemsnit over 16 dage.

V. Kalibrering af krybekældermodellen

Kalibreringen foretages ved at beregne krybekælderforholdene (temp. og RF) på baggrund af målte udendørs- og evt. indendørsforhold. Dernæst kan de usikre randbetingelser varieres, indtil de beregnede krybekælderforhold ligger så tæt op ad de målte krybekælderforhold som muligt. Følgende kalibreringsparametre kan varieres:

- Luftsifte
- Jordtemperatur ved fundament og under krybekældbunden
- Porefugt i jord
- Varmetilskud om sommeren og om vinteren hver for sig
- Temperatur og relativ luftfugtighed indendørs i etagen over krybekælderen.

I det følgende vises to eksempler af konkrete krybekældre, for hvilke der foreligger datalogninger af udendørs-, indendørs-, og krybekælderforhold fra sensommer til vinter. For hver af disse konkrete krybekældre er der udarbejdet en specifik krybekældermodel ved at definere de konstruktive og materialespecifikke egenskaber af den konkrete krybekælder i standardmodellen og derefter at kalibrere den tilpassede model på baggrund af de foreliggende måledata fra datalogningerne ved variation af kalibreringsparametre.

Konstruktionerne af de to krybekældre er forskellige. Case 1 er en ældre konstruktion med stampet lerjord som krybekældbund og et bjælkelag som etagedæk, mens case 2 er en konstruktion fra '70erne med betonklaplæg, isolerede ydervægge og etagedæk i beton.

For hver case diskuteres afsluttende, hvor realistisk de beregnede krybekælderforhold er.

En vejledning i, hvordan kalibreringen udføres, findes i Bilag 2 Programvejledning, pkt. 5.

Case 1

Case 1 er en krybekælder under en patriciervilla fra 1907. Krybekælderen strækker sig under ca. 2/3 dele af længehuset, mens der er et depot, en gang og et fyrrum med vaskekælder under ca. 1/3 del af huset. Kælderen er en høj kælder.

Registreringer vedrørende krybekælderen:

- Krybekælderens er i en god stand uden lugtgener og uden synlige tegn på skimmelsvampangreb.
- Krybekælderens bredde er 5,2 m, den er ca. 18 m lang.
- Krybekælderens højde er $h_y = 0,65$ cm.
- Krybekælderens volumen er ca. 57 m³.
- Stampet jord som krybekælderbund, etableret i terrænniveau. Dvs. ingen terrænberørte vægge. Ingen synlige tegn på fugt på krybekælderbunden.
- Dæk over krybekælderens er et bjælkelag, nedfra efterisoleret med 150 mm mineraluld.
- Krybekælderens ydervæggene er 36 cm tykke, på de nederste 2/3 dele af insitu-støbt beton og på det øverste 1/3 del af gule, udvendigt pudsede mursten.
- Krybekælderens væg mod kælderen er murede 1/2 stens vægge.
- Varmerørene til forsyning af huset er ført igennem krybekælderens og er delvist isolerede.
- Ventilation:
Krybekælderens er forsynet med ventilationsriste. Der er placeret 8 riste på 27 lbm (løbende meter) facade. Det betyder, at der er et nettoventilationsareal på ca. 25 cm²/m³ krybekældervolumen. Der er placeret en rist for lidt i forhold til anbefalingerne i teknisk fælleseje. Inden målingen er ventilationsåbningerne blevet renset. I krybekælderens skillevægsgfundamenterne er der store åbninger under stueetagens døre, som tillader tværvæntilation af krybekælderens.
- Luftsiftet skønnes at være godt, dvs. omkring 1,0 1/h.

Valg af korrektionsfaktorer til kalibreringen:

- Luftsifte: 1 1/h (godt luftsifte).
- Jordtemperaturkurven: 1,25 m under terrænniveau.
- Varmetilskud:
 - o 60 W pr 1 m bred stribe af krybekælderens om sommeren.
 - o 100 W pr 1 m bred stribe af krybekælderens om vinteren.
- Jordfugt: 100 % RF.

Under anvendelse af disse korrektionsfaktorer er krybekælderens temperatur og relativ luftfugtighed beregnet. I de følgende figurer vises de beregnede mod de loggede data, samt lineære tendenslinjer (prikkede linjer) og i Figur 30 et glidende gennemsnit over 16 dage (stiplede linjer). Tendenslinjerne og det glidende gennemsnit angiver, hvor god en kalibrering af modellen der opnås med de ovennævnte korrektionsfaktorer. Figur 29 viser uddrag af kalibreringskurverne over hhv. to uger i august og to uger i november, mens kalibreringskurven for hele loggerperioden er vist i Figur 30.

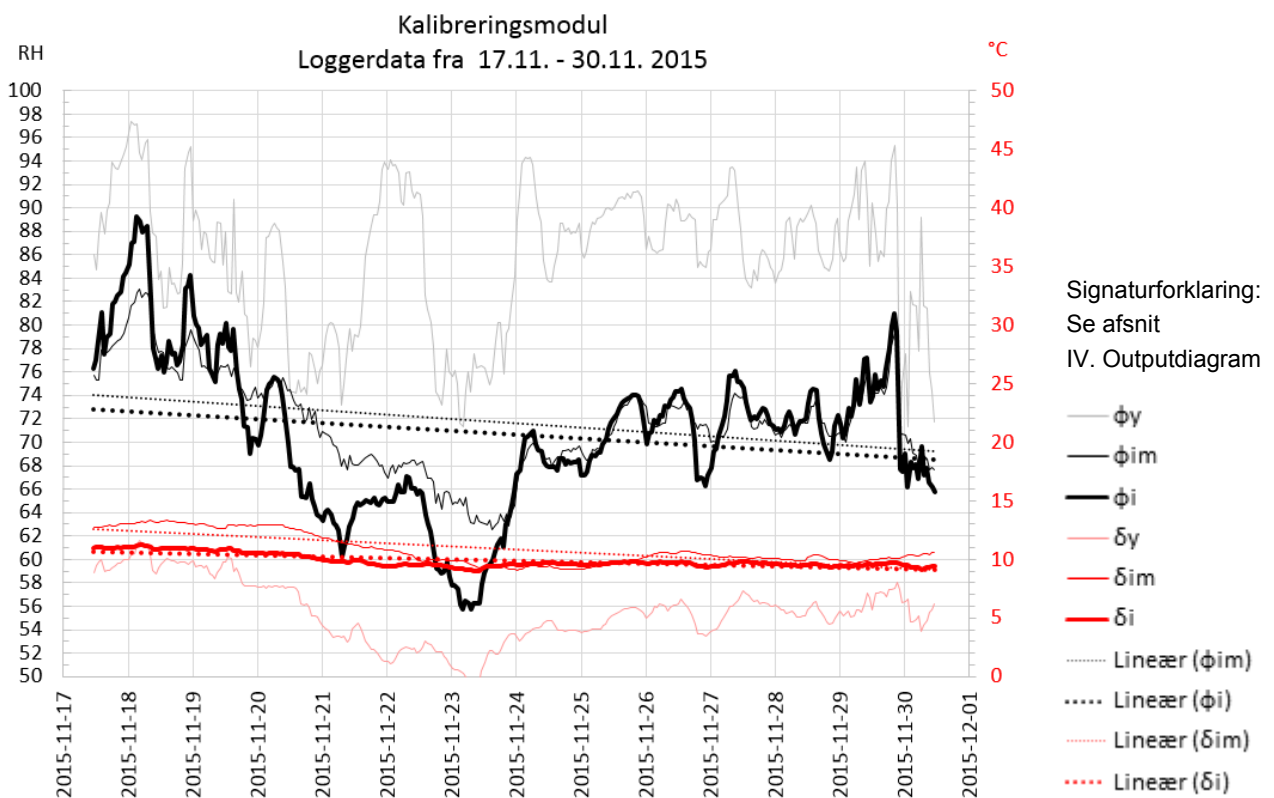
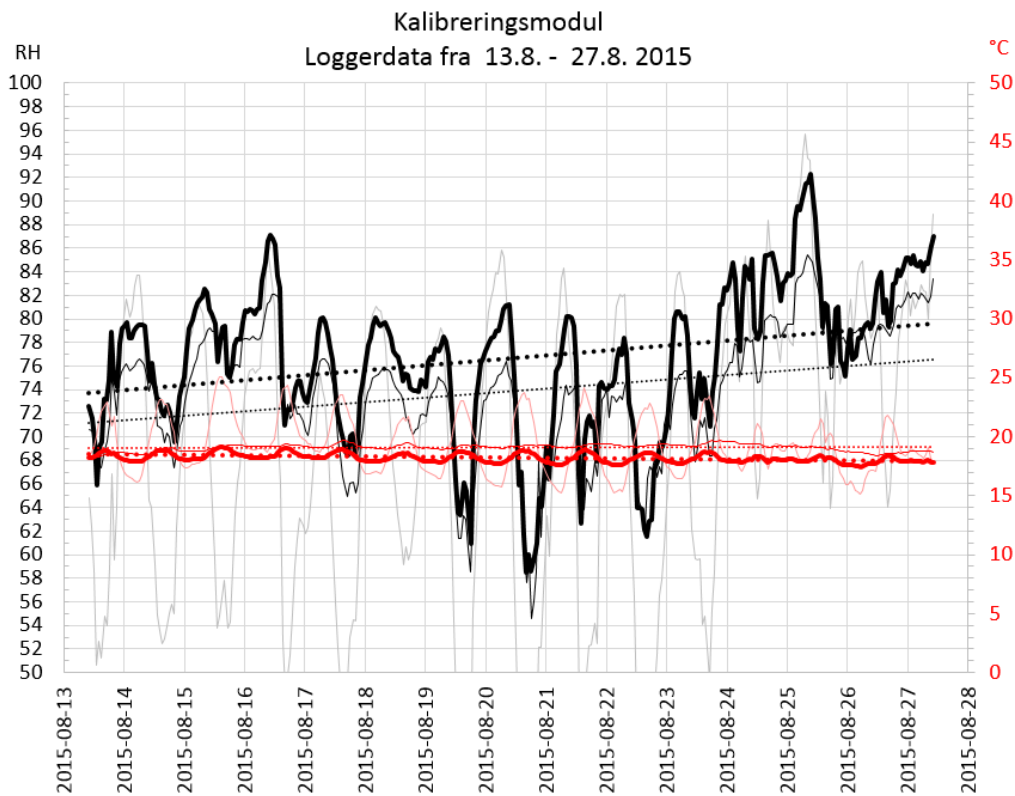
For de to uger i august 2015 viser tendenslinjerne en beregnet:

- Relativ luftfugtighed, der er ca. 2,5 % højere end den målte.
- Temperatur, der er ca. 1 grad lavere end den målte.

For de to uger i november 2015 viser tendenslinjerne en beregnet:

- Relativ luftfugtighed, der er ca. 1 % lavere end den målte.
- Temperatur, der er mellem 0 og 2 grader lavere end den målte.

Det kan af Figur 29 ses, at den målte og den beregnede temperaturkurve næsten er parallelle. Det er valget af jordtemperaturen, der har størst indflydelse på dette. Dvs. at amplituden af den jordtemperatur, der er valgt via korrektionsfaktorerne, afspejler temperaturvariationen i jorden over året godt.



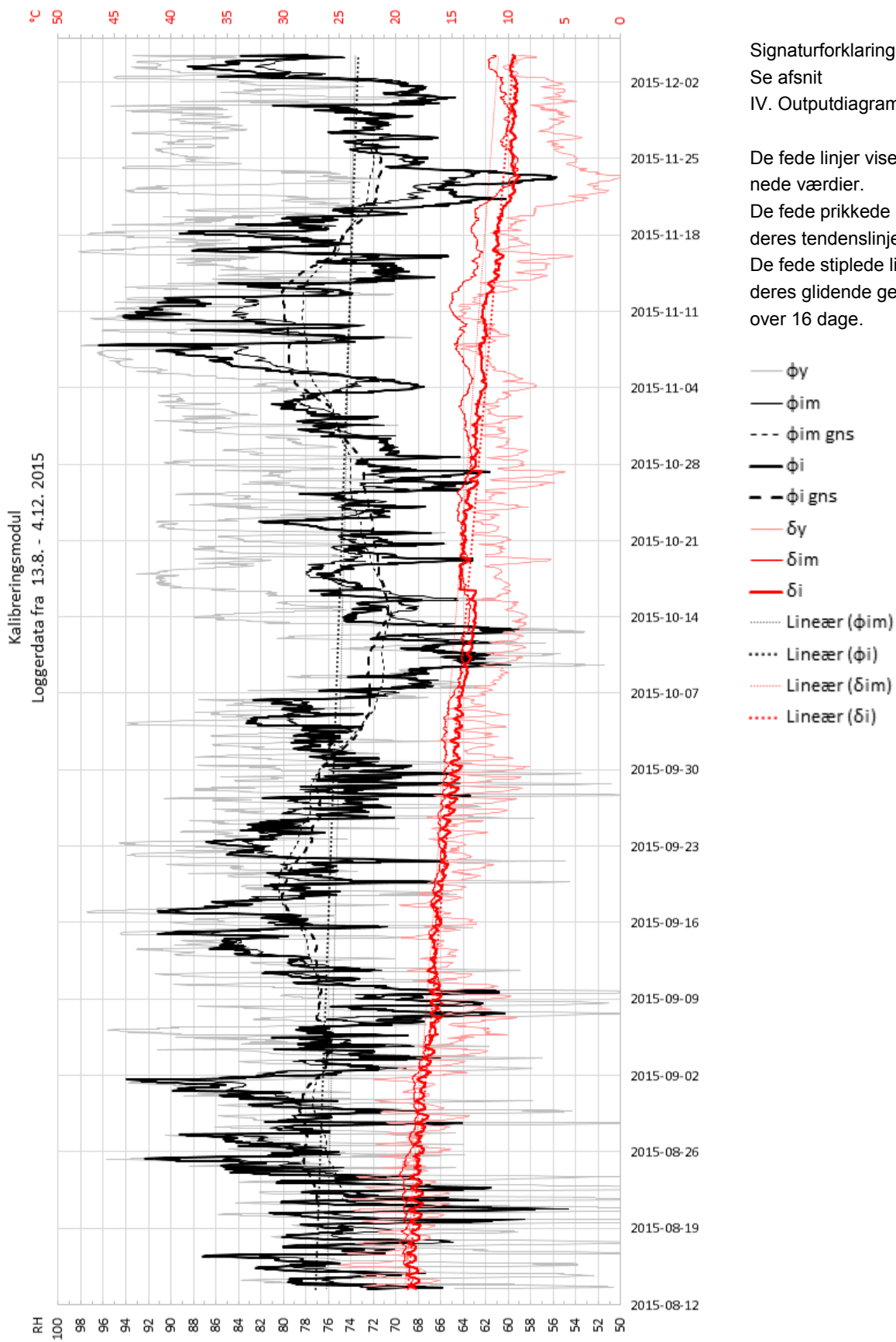
Figur 29. Case 1 – Målte mod beregnede temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderen.

Øverst en to ugers periode i august måned.

Nederst en to ugers periode i november måned.

Temperatur (røde grafer): målte værdier med den tynde, optrukne graf og dens lineære tendenslinje med den tynde, prikkede graf. I baggrunden udendørstemperaturen med den lyserøde graf.

Relativ luftfugtighed (sorte grafer): målte værdier med den tynde, optrukne graf og dens lineære tendenslinje med den tynde, prikkede graf. I baggrunden udendørstemperaturen med den lysegrå graf.



Figur 30. Case 1 – Målt mod beregnet temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderen over hele loggerperiode.

Samtidig er der både om sommeren og om vinteren behov for at korrigere med et varmetilskud på hhv. 60 og 100 W per 1 m bred stribet krybekælder. At det er nødvendigt at korrigere med et højere varmetilskud om vinteren vurderes at være plausibelt, idet varmerør og afkastvarme fra fyret påvirker krybekælderen. At der er behov for en korrektion med et varmetilskud om sommeren vurderes at hænge sammen med, at jordtemperaturkurverne jf. SBI-anvisning 224 (SBI, 2013) er for fritliggende jord, mens jorden i krybekælderen er mere beskyttet af overliggende bygning. Derudover kan der være et varmetilskud fra eventuelle varmtvandsrør.

Det kan ses, at amplituden af svingninger i både den beregnede temperatur og den beregnede relative luftfugtighed er større end i den målte. Dette vurderes at hænge sammen med, at der i den foreliggende stationære model ikke tages højde for materialernes varme- og fugtkapacitet.

Case 2

Case 2 er en krybekælder under en tilbygning af et parcelhus fra 1965 med en tilbygning fra 1975. Hovedhuset er med fuld, høj kælder. Der er krybekælder under tilbygningen.

Registreringer vedrørende krybekælderen:

- Krybekælderen er i en god stand uden lugtgener og uden synlige tegn for skimmelsvampangreb.
- Krybekælderens bredde er 5,07 m, den er ca. 6,3 m lang.
- Krybekælderbund som ca. 15 cm tykt betonklaplag, etableret lidt under terrænniveau. Ingen synlige tegn på fugt på krybekælderbunden.
- Dæk over krybekælderen er et betondæk, nedfra isoleret med 50 mm træbeton. På betondækket er der etableret strøgulv med 50 mm isolering mellem strøerne.
- Krybekælderens højde er $h_y = 0,69$ cm.
- Krybekælderens ydervæggene er af en formur af 12 cm mangelhulsten, 10 cm mineraluld og 12 cm mangelhulsten som bagmur, 33 cm i alt.
- Krybekælderens fundament/sokkel er ca. 8 cm høj og nedgravet i terrænet. Det er en betonsokkel af en tykkelse på ca. 33 cm.
- Krybekælderens væg mod kælderen er en helstensvæg.
- Varmerørene til forsyning af tilbygningen er ført igennem krybekælderen og er delvist isolerede.
- Ventilation:
Krybekælderen er forsynet med ventilationsriste. Der er placeret 6 riste på 16 lbm facade. Dog er tre riste fuldstændig stoppede og en rist er halv stoppet af blandt andet hvepsebo.
- Luftskiftet skønnes at være dårlig, dvs. tæt på 0,3 1/h.

Valg af korrektionsfaktorer til kalibreringen:

- Luftskifte: 0,25 (dårligt luftskifte).
- Jordtemperaturkurven under krybekælderbund: 2,5 m under terrænniveau.
- Varmetilskud:
 - o 40 W pr 1 m bred stribet af krybekælderen om sommeren.
 - o 110 W pr 1 m bred stribet af krybekælderen om vinteren.
- Jordfugt under betonklaplaget: 99 % RF.

Under anvendelse af disse korrektionsfaktorer er krybekælderens temperatur og relativ luftfugtighed beregnet. I de følgende figurer vises de beregnede mod de loggede data, samt lineære tendenslinjer (prykkede linjer) og i Figur 32 et glidende gennemsnit over 16 dage (stiplede linjer). Tendenslinjerne og det glidende gennemsnit angiver, hvor god en kalibrering af modellen der opnås med de ovennævnte korrektionsfaktorer. Figur 31 viser uddrag af kalibreringskurverne over hhv. to uger ved månedsskiftet august/september 2015 og to uger ved månedsskiftet januar/februar 2016, mens kalibreringskurven for hele loggerperioden er vist i Figur 32. I Figur 31 udregnes tendenslinjerne på baggrund af de to-ugers målinger, i Figur 32 på baggrund af hele perioden. Derfor varierer tendenslinjernes hældning i Figur 31 og Figur 32.

For de to uger ved månedsskiftet august/september 2015 viser tendenslinjerne en beregnet:

- Relativ luftfugtighed, der i starten af perioden er ca. 6 % højere og i slutningen af perioden er ca. 7 % lavere end den målte.
- Temperatur, der i starten af perioden er ca. 2 grader lavere og i slutningen af perioden på samme niveau som den målte.

For de to uger ved månedsskiftet januar/februar 2016 viser tendenslinjerne en beregnet:

- Relativ luftfugtighed, der er ca. 4-7 % højere end den målte.
- Temperatur, der er mellem 1 og 2 grader lavere end den målte.

Sammenfald af de lineære tendenslinjer er ikke særlig god.

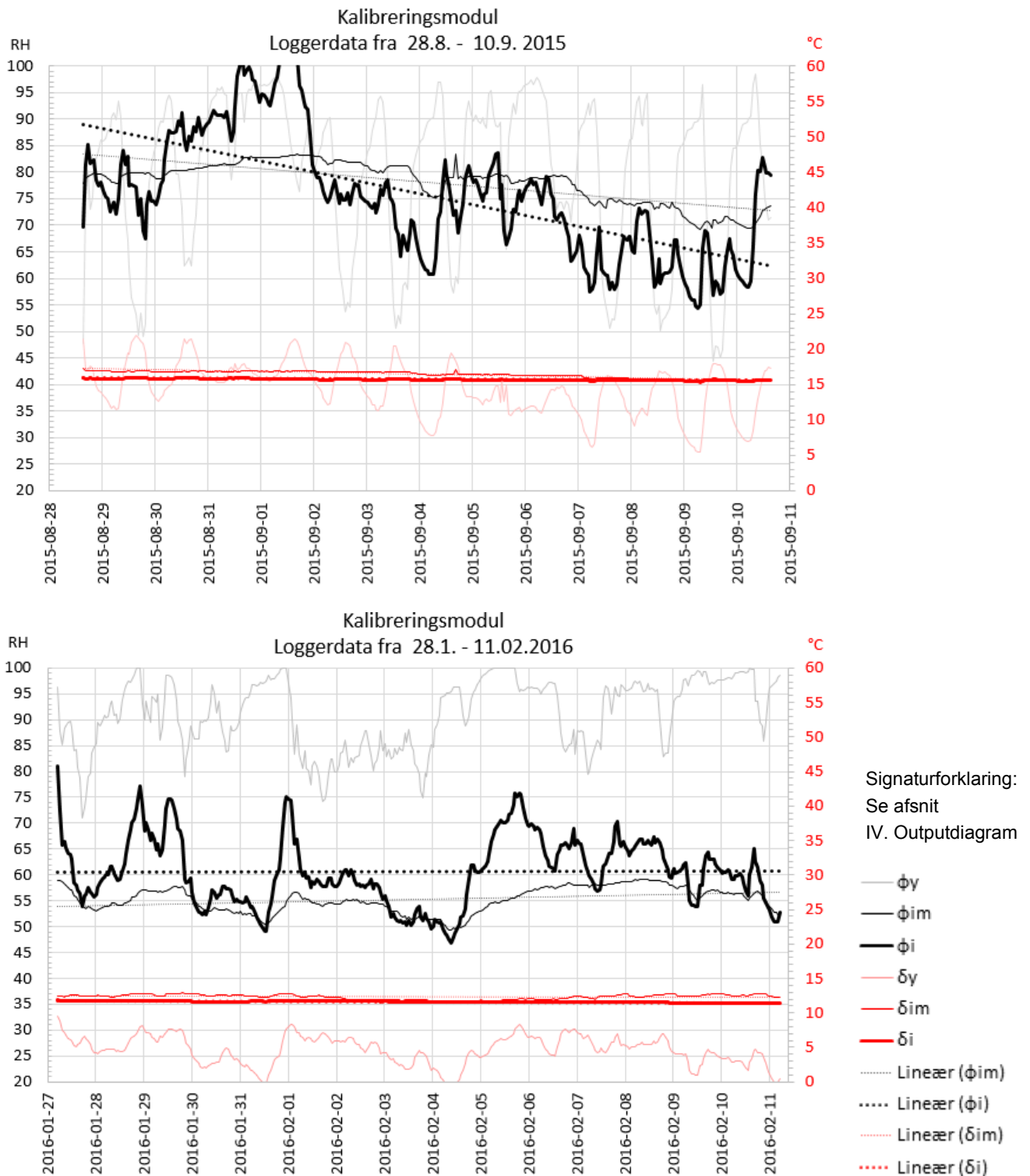
Ved at sammenligne de målte og beregnede temperaturkurver, kan man se, at den beregnede temperatur har færre udsving end den målte. Dette hænger sammen med den meget gode isoleringsevne af krybekælderens ydervægge. Afvigelsen af tendenslinjerne for den målte og beregnede krybekældertemperatur er kun 1 til 2 grader.

I Figur 32 kan det ses, at der er to spring i temperaturkurven. Det første spring forekommer på det tidspunkt, hvor varmeanlægget bliver tændt. I de beregnede værdier ses dette straks og som et spring, fordi modellen regner stationært. De målte værdier viser, at stigningen i virkeligheden foregår gradvist over en periode. Det andet spring er ved årsskiftet. Her er der et spring i jordtemperaturkurverne, dvs. at dette er ligeledes et modelteknisk spring.

Ved sammenligning af den målte og den beregnede relative luftfugtighed ses, at der er større udsving i de beregnede værdier end i de målte. Dette vurderes at hænge sammen med fugtbufferkapaciteten i den forholdsvis tunge krybekælderkonstruktion med betongulv og betondæk. De lineære tendenslinjer er ikke parallelle og antyder, at den beregnede relative luftfugtighed i krybekælderen bliver underestimeret om sommeren (7 % i starten af perioden) og overestimeret om vinteren (7 % i slutningen af perioden). Til gengæld viser det glidende gennemsnit, at den beregnede og den målte relative luftfugtighed i en vis grad følges ad, selvom amplituden af det glidende gennemsnit af de beregnede værdier er større end af de målte værdier. I starten af kalibreringsperioden om sommeren krydser kurverne for det glidende gennemsnit af de målte og beregnede værdier hinanden, i slutningen af kalibreringsperioden er afvigelsen på 5 %. Dvs. at kurverne af det glidende gennemsnit over 16 dage af den relative luftfugtighed indikerer et bedre sammenfald af de beregnede og de målte værdier.

Årsag til afvigelsen af de målte og beregnede værdier vurderes at hænge sammen med den tunge konstruktion, som har en stor varme- og fugtkapacitet. Det betyder, at konstruktionen er træg og at faseforskydningseffekter derfor vurderes at være større, end i den traditionelle konstruktion i case 1. Der kan kompenseres for en del af faseforskydningen ved valg af jordtemperaturkurven, men i en tung konstruktion som denne krybekælder ikke af den hele. Det vurderes derfor, at modellen ikke kan kalibreres til et parallelt forløb af de lineære tendenslinjer, når måledata stammer fra en periode, hvor faseforskydningen har stor indflydelse, og når måleperioden fra sommeren er betydelig kortere end den fra vinteren. Det vurderes samlet set, at der for kalibrering af modellen til case 2 er behov for empiriske data (loggerdata) fra en længere periode.

Som ved case 1 er der både om sommeren og om vinteren behov for at korrigere med et varmetilskud. I denne case 2 er tilskuddet på hhv. 40 og 110 W per 1 m bred stribe krybekælder. At det er nødvendigt at korrigere med et højere varmetilskud om vinteren end om sommeren vurderes at være plausibelt, idet varmerør og afkastvarme fra den tilstødende kælder påvirker krybekælderforholdene især om vinteren. At der er behov for en korrektion med et varmetilskud om sommeren vurderes at kunne hænge sammen med eventuelle brugsvandsrør, der er ført igennem krybekælderen og afgiver varme også om sommeren, eller at jordtemperaturkurverne jf. SBI-anvisning 224 (SBI, 2013) er for fritliggende jord, mens jorden i krybekælderen er mere beskyttet af den overliggende bygning.



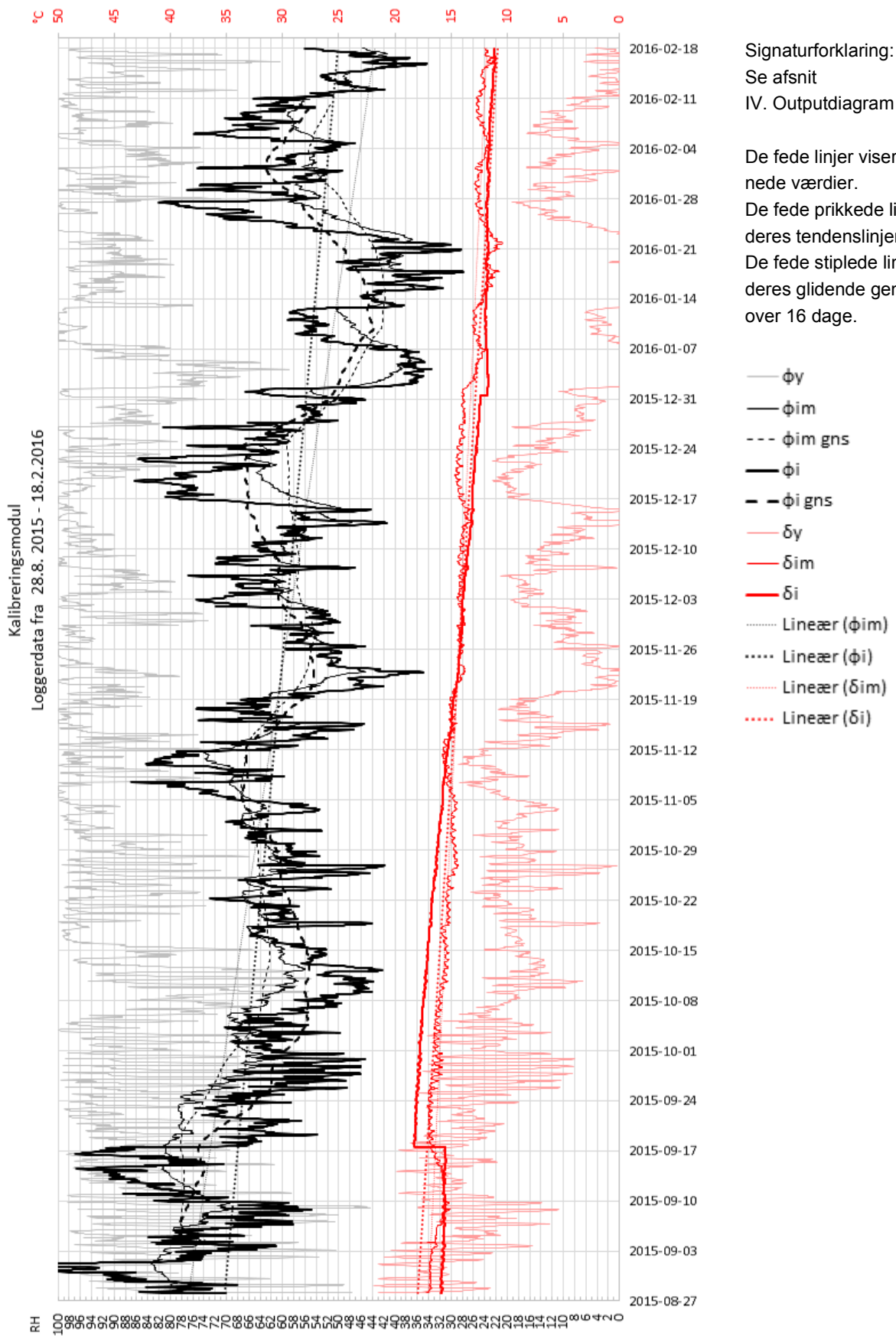
Figur 31. Case 2 – Målte mod beregnede temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderen.

Øverst en to ugers periode i august/september måned.

Nederst en to ugers periode i januar/februar måned.

Temperatur (røde grafer): målte værdier med den tynde, optrukne graf og dens lineære tendenslinje med den tynde, prikkede graf. I baggrunden udendørstemperaturen med den lyserøde graf.

Relativ luftfugtighed (sorte grafer): målte værdier med den tynde, optrukne graf og dens lineære tendenslinje med den tynde, prikkede graf. I baggrunden udendørstemperaturen med den lysegrå graf.



Figur 32. Case 2 – Målt mod beregnet temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderen over hele loggerperiode.

VI. Estimering og stød med krybekældermodellen

Når standardmodellen er kalibreret til den specifikke krybekælder, kan de generelle forhold i den specifikke krybekælder estimeres, ved at udføre en beregning af krybekælderforholdene på baggrund af standardiserede udendørsforhold af et dansk reference år (*DRY, 2012*).

For at vurdere, hvilken indflydelse ændrede randbetingelser vil have på den specifikke krybekælder, kan der med udgangspunkt i standardestimatet udføres "stød" i modellen, som simulerer forholdene under de ændrede randbetingelser.

I det følgende vises for hver af de to omtalte cases først standardestimatet på baggrund af den kalibrerede model. Dernæst vises for hver af de to cases et eksempel på et stød, dvs. en beregning af krybekælderforholdene efter ændring af randbetingelserne.

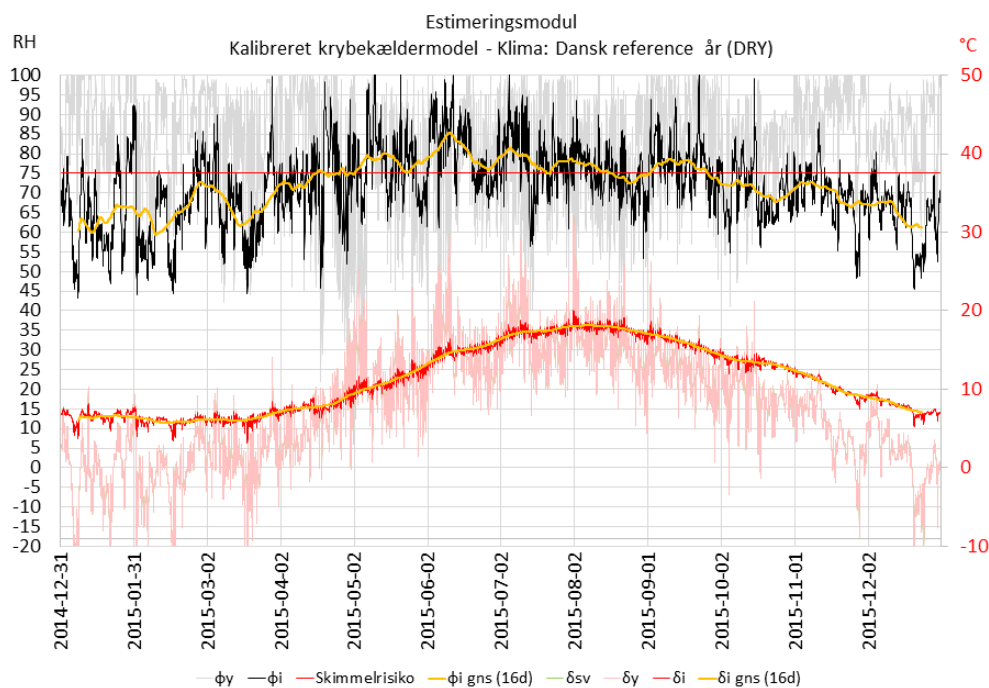
Simulering af effekten af forskellige tiltag med krybekældermodellen vurderes at være forbundet med visse usikkerheder, som der skal tages med i betragtning, især når der ønskes at vurdere konkrete renoveringsløsninger. Der skal udvises agtpågivenhed omkring følgende opmærksomhedspunkter:

- Den relative luftfugtighed og temperatur i krybekælderens er beregnet for indeklimaet og ikke på konstruktionernes overflader. Det betyder, at fugtforholdene på overfladerne om sommeren i mindre grad bliver underestimeret og om vinteren i mindre grad bliver overestimeret. Årsag til dette er, at jordtemperaturen om sommeren er koldere end udendørs-temperaturen, hvorfor de indvendige overflader i krybekælderens vil være lidt koldere end indeluften, og den relative luftfugtighed på overfladerne vil tilsvarende være lidt højere. Om vinteren vil dette være omvendt for jordberørte bygningsdele og etagedækket. Dette er relevant, når krybekældrens fugtniveau skal vurderes i forhold til skimmelkriteriet (75 % RF) (*SBi, 2013*), som gælder for konstruktionernes overflader.
- Modellen modellerer ikke fugt- og varmekapacitet af materialer og konstruktioner. Dermed er der risiko for, at faseforskydningseffekter ikke bliver modelleret helt korrekt, hvis der ikke foreligger måledata fra en tilstrækkelig lang periode.
- Modellen er stationær, dvs. forhold, beregnet for en time, påvirker ikke forhold af den næste time. Derudover er geometrien af krybekælderens ikke modelleret. Det betyder,
 - o at effekter som fx tilbagekondensering/termisk flytning ikke kan vurderes på baggrund af simulationer med krybekældermodellen.
 - o at man ikke bliver opmærksom på eventuel årlig akkumulation af ændringer (fx når der sker kondensering af fugt i krybekælderens).

Case 1

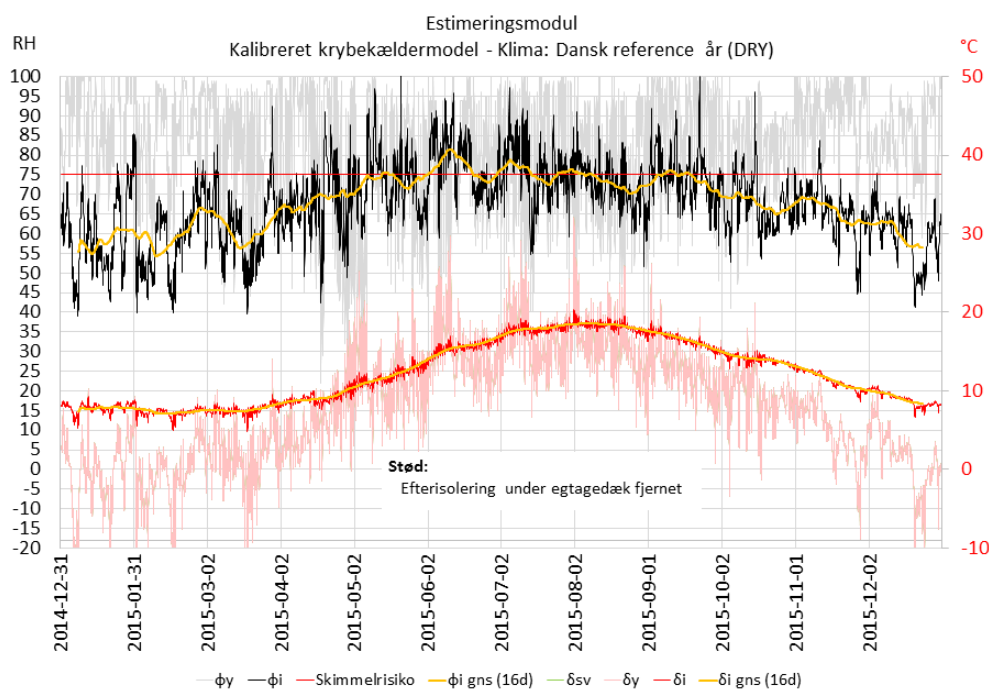
I Figur 33 vises den under standardiserede udendørsforhold estimerede temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderens af case 1.

Der er ilagt kurver for det glidende gennemsnit over 16 dage (gns (16d)), der indikerer det gennemsnitlige niveau for både temperatur og relativ luftfugtighed. Det glidende gennemsnit for relativ luftfugtighed ligger mellem 59 og 85 % RF. Det glidende gennemsnit for temperatur ligger mellem 6 og 18 °C.



Figur 33. Case 1 – Estimerede forhold i krybekælder under standardiserede udendørsforhold. For signaturforklaring se afsnit IV. Outputdiagram.

Dernæst bliver der ændret i krybekælderens randbetingelser. Det er valgt at simulere den oprindelige krybekælderkonstruktion, dvs. at udføre et stød uden isolering på undersiden af krybekælderens etagedæk. Krybekælderforholdene under disse randbetingelser er vist i Figur 34.



Figur 34. Case 1 – Simulation / stød af krybekælderforholdene uden efterisolering på undersiden af etagedæk. For signaturforklaring se afsnit IV. Outputdiagram.

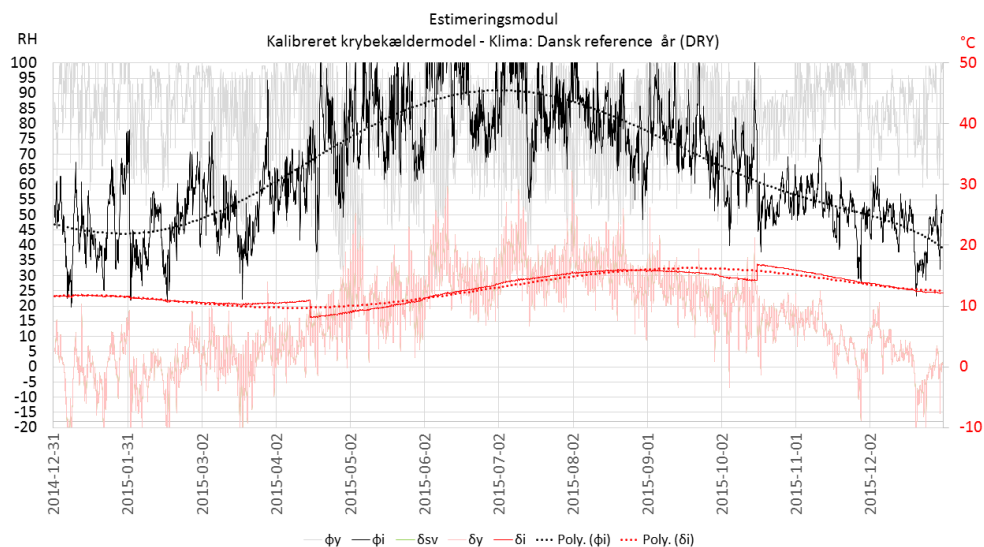
Sammenligner man de beregnede krybekælderforhold før og efter stødet, kan der ses et fald i den relative luftfugtighed. Gennemsnittets maksimum af den relative luftfugtighed om sommeren falder med ca. 4 % fra ca. 85 % til ca. 81 % og gennemsnittets minimum om vinteren falder

med ca. 5 % fra ca. 59 % til ca. 54 %.

Det glidende gennemsnit af temperaturen om sommeren er uændret, mens dens minimum stiger om vinteren fra ca. 5 °C til ca. 7 °C.

Case 2

I Figur 35 vises den under standardiserede udendørsforhold estimerede temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderen af case 2.



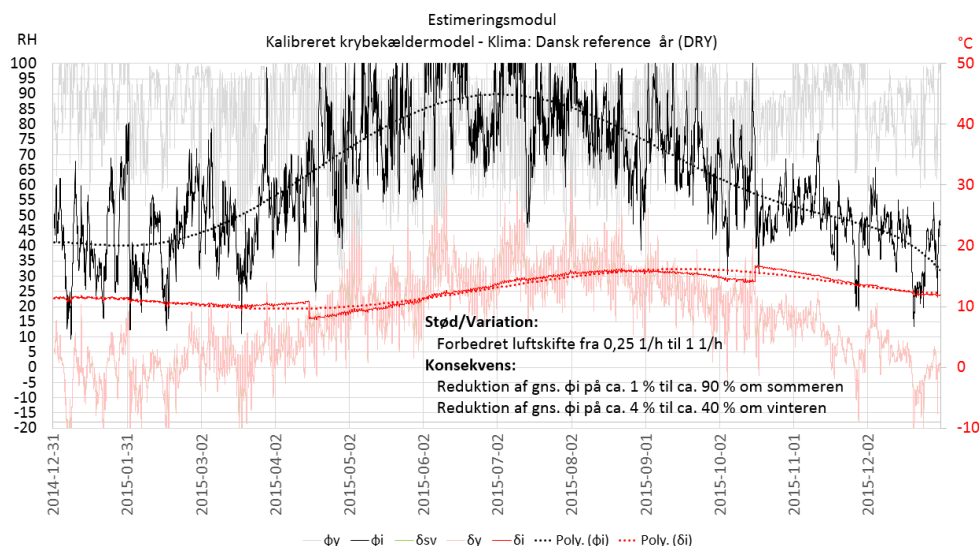
Figur 35. Case 2 – Estimerede forhold i krybekælderen under standardiserede udendørsforhold. For signaturforklaring, se afsnit IV. Outputdiagram.

Der er ilagt polynomiske tendenslinjer, der indikerer det gennemsnitlige niveau for både temperatur og relativ luftfugtighed. Tendenslinjen for relativ luftfugtighed viser, at niveauet ligger mellem 44 og 91 % RF med højeste niveau i juli måned. At tendenslinjen af den relative luftfugtighed sidst på året er nedadpegende er begrundet i, at diagrammet ikke fortsætter til næste forår. Dette minimum er derfor misvisende. Dette kan rettes ved enten at forlænge diagrammet ved at gentage værdierne fra begyndelsen af året eller ved anvendelse af et glidende gennemsnit over 16 dage. Tendenslinjerne for temperatur viser, at niveauet ligger mellem ca. 10 og 16 °C.

Dernæst bliver der ændret i krybekælderens randbetingelser. Det er valgt at simulere et bedre luftskifte, dvs. et luftskifte på ca. 1 1/h. Krybekælderforholdene under disse randbetingelser er vist i Figur 36.

Sammenligner man de beregnede krybekælderforhold før og efter stødet, kan der ses et fald i den relative luftfugtighed. Tendenslinjens maksimum af den relative luftfugtighed om sommeren falder med ca. 1 % fra 89 % til ca. 90 % og tendenslinjens minimum om vinteren falder med ca. 4 % fra 44 % til ca. 40 %.

Tendenslinjen af temperaturen er stort set uændret.



Figur 36. Case 2 – Simulation / stød af krybekælderforholdene uden efterisolering på undersiden af etagedækket. For signaturforklaring, se afsnit IV. Outputdiagram.

VII. Konklusion og perspektivering

Det viser sig, at den forholdsvis simple ligevægtsmodel kan anvendes til at beregne forhold i den traditionelle krybekælder, case 1, hvor krybekældbunden er af stampet lerjord og etagedæk er et bjælkelag. Det viser sig samtidig, at der er behov for inputdata fra logninger i både sommer- og vinterperioden, idet varmetilskuddet varierer fra sommer til vinter og har en stor indflydelse, samt at der skal vælges den rigtige jordtemperaturkurve, for at ramme faseforskydningseffekter fra årsvariationer i jordtemperaturen korrekt. Under forudsætning af, at der foreligger måledata for både sommer- og vinterperioden vurderes, at den kalibrerede model kan anvendes til at estimere krybekælderens forhold over et år, samt at der kan foretages simulering af krybekælderforhold efter ændring af randbetingelser, som fx ændringer i luftsifte eller efterisolering af etagedæk.

I forbindelse med vurdering af en krybekælders egnethed til efterisolering af etagedækket, skal der særskilt udføres en vurdering af konstruktionens luft- og damptæthed, samt en analyse af konstruktionens bygningsfysiske funktion.

I case 2, som er en tung krybekælder med både terrændæk og etagedæk i beton, samt hulmursisolerede ydervægge, har varme- og fugtkapaciteter af byggematerialer sandsynligvis stor indflydelse. Derudover dækker de foreliggende loggerdata fra sensommeren over en forholdsvis kort periode. Disse to forhold vurderes at være grunden til, at der ved kalibrering ikke kan opnås de samme gode sammenfald mellem målte og beregnede værdier. De ilagte lineære tendenslinjer tyder på at vise, at den relative luftfugtighed undervurderes om sommeren og overvurderes om vinteren.

Det glidende gennemsnit over 16 dage viser, at de beregnede og de målte værdier svinger i samme takt med forskellig amplitude, samt et bedre sammenfald af de beregnede og de målte værdier. I starten af kalibreringsperioden krydser kurverne for det glidende gennemsnit af de målte og de beregnede værdier hinanden, i slutningen af kalibreringsperioden er afvigelsen 5 % i modsætning til de 7% afvigelse ved de lineære tendenslinjer ved både start og slut af kalibreringsperioden.

Det vurderes samlet set, at krybekældermodellen ikke kan kalibreres tilstrækkeligt til case 2, idet de foreliggende måledata dækker over for kort en periode. Det vurderes derfor, at estimering af krybekælderforholdene for et helt år og simuleringer efter ændringer af randbetingelser i den foreliggende krybekælderkonstruktion ikke vil være retvisende. Det vil være nødvendigt

med supplerende måledata for tilstrækkeligt at kunne kalibrere krybekældermodellen til case 2 og derefter at kunne foretage pålidelige simuleringer.

Idet ligevægtsmodellen ikke tager højde for fugt- eller varmekapaciteter af de forskellige byggematerialer, vil der altid være større svingninger i de beregnede frem for de målte værdier. Derudover vurderes, at simulering af effekten af forskellige tiltag med krybekældermodellen er forbundet med visse usikkerheder, som der skal tages med i betragtning, når der ønskes at vurdere konkrete renoveringsløsninger. I forhold til usikkerheder i simuleringer med modellen er der udpeget følgende opmærksomhedspunkter:

- Modellen modellerer ikke fugt- og varmekapacitet af materialer og konstruktioner. Dermed er der risiko for,
 - o at faseforskydningseffekter ikke bliver modelleret helt korrekt, hvis der ikke foreligger måledata fra en tilstrækkelig lang periode.
- Modellen er stationær, dvs. forhold, beregnet for en time, påvirker ikke forhold af den næste time. Derudover er geometrien af krybekælderens ikke modelleret. Det betyder,
 - o at effekter som fx tilbagekondensering/termisk flytning ikke kan vurderes på baggrund af simulationer med krybekældermodellen.
 - o at man ikke bliver opmærksom på eventuel årlig akkumulation af ændringer (fx når der sker kondensering af fugt i krybekælderens).
- Skimmelkriteriet (75 % RF) gælder for konstruktionernes overflader, mens den relative luftfugtighed og temperatur i krybekælderens bliver beregnet for krybekælderens indeluft. Det betyder,
 - o at fugtforholdene på overfladerne om sommeren i mindre grad bliver underestimeret og om vinteren i mindre grad bliver overestimeret.

Samlet set vurderes, at anvendelse af krybekældermodellen kræver sammenhængende loggerdata over helst et helt år. For krybekældre med en traditionel konstruktion kan der eventuelt vælges en loggerperiode på et halvt år, under forudsætning af, at logninger strækker sig over både vinter- og sommermåneder.

Det vurderes, at modellens nøjagtighed vil kunne forbedres markant, hvis der forelå bedre kendskab til fugt- og temperaturforhold, samt deres årsvariationer i jorden under krybekælderens, og hvis der indarbejdes effekter af materialernes fugt- og varmekapaciteter i ligevægtsmodellen.

Bilag 2. Programvejledning

Programvejledningen leverer i punktstilling en vejledning i anvendelse af den i Bilag 1 beskrevne krybekældermodel fra input af data, kalibrering over estimering og stød. Krybekældermodellen er programmeret i et Excel 2013 regneark. Der udføres følgende skridt ved anvendelse af modellen:

1. Tag en kopi af regnearket og navngiv den med den konkrete sag.
2. Fane 1_1 Definition af krybk
Her defineres krybekælderens ved at definere de nævnte variabler (lysegrønne felter). Der er yderligere variabler nødvendige til beregningen, som enten er fast defineret eller beregnes ud fra de givne oplysninger.
3. Fane 1_2 Ue
Her kan etagedækkets diffusionsmodstand og U-værdi beregnes ved hjælp af Glaser-metoden. Det er også muligt at isætte værdier for etagedækkets diffusionsmodstand og U-værdi direkte på fane 1_1 def krybk.
4. 2_1 Loggerdata
I denne fane isættes rådata fra in-situ målingerne. Loggerdata skal tilpasses således, at de har et format, der direkte kan ilægges i fane 2_2.
DRY-data foreligger én gang i timen og tidsangivelsen er i sekunder. Loggerdata skal altså tilpasses, så tidsangivelsen er i sekunder og med én måling per time.
5. 2_2 Kalibreringsmodul
 - a. Der ilægges de tilpassede loggerdata (δy og ϕy , samt δim og ϕim) i kalibreringsmodul i de grå felter. Tiden mellem loggerdata og kalibreringsmodul vil kunne afvige op til 30 min, dvs. 1.800 sekunder. Den mindre tidsforskydning det kan medføre, kan accepteres.
 - b. Dernæst kalibreres modellen til den specifikke krybekælder ved at variere korrektionsfaktorer i tabellerne øverst til højre (grønne felter). Indledende vælges faktorerne over hele deres realistiske båndbrede, for derved at afgøre, hvilke faktorer der har størst indflydelse. Dernæst inddrages observationer fra stedet, for at afgrænse, hvilke værdier der er realistiske for faktorerne at antage. Der kan fx være tale om hvilke mulige varmekilder, der er i krybekælderens eller hvor kraftigt en fugtafgivelse af jordberørte bygningsdele, der kan tænkes.
Når de faktorer med størst indflydelse er bestemt og defineret, kan der finjusteres med de øvrige faktorer.
Formålet er at indstille korrektionsfaktorerne således, at den målte temperatur og relativ luftfugtighed i krybekælderens falder bedst muligt sammen med de beregnede værdier. Det er en hjælp at anvende tendenslinjer eller glidende gennemsnit over 16 dage for både de målte og de beregnede værdier, for at finde det bedst mulige sammenfald. Det skal prioriteres, at tendenslinjerne eller kurver for det glidende gennemsnit over 16 dage ligger så parallelt og dernæst så tæt på hinanden som muligt.
 - c. Korrektionsfaktorerne bliver automatisk overført i 3_1 Estimeringsmodul DRY og Out i tabellen over korrektionsfaktorer øverst til højre, hvor man kan se dem som baggrundsinformation (lyserøde felter). Korrektionsfaktorer for indelufttemperatur og relativ luftfugtighed i boligen over krybekælderens bliver ikke overført til Estimeringsmodul, da beregningen foretages med DRY-data, som er baseret på standardværdier for indelufttemperatur og relativ luftfugtighed.
6. 3_1 Estimeringsmodul DRY og Out
Dette er outputmodul. Når kalibreringen til den specifikke krybekælder er afsluttet, kan der i dette modul foretages beregning af forholdene i krybekælderens med udgangspunkt

i standardiserede udendørsforhold (*DRY, 2012*).

Derefter kan der udføres variationer af krybekælderens randbetingelser i tabellen over korrektionsfaktorer øverst til højre. Der varieres ved at angive tal i de grønne felter. Til sammenligning vises korrektionsfaktorer fra kalibreringen i de lyserøde felter ved siden af.

Variation af randbetingelser kaldes for "stød", og beregning efter stød viser konsekvenser af disse variationer for krybekælderforholdene. Formålet med at beregne stød er at kunne vurdere, om eller hvilke indgreb i krybekældrene, der er hensigtsmæssige eller uhensigtsmæssige.

Fanen "Baggrund Jord Temp" leverer baggrundsinformation om temperaturforløb af jordtemperaturen jf. SBI-anvisning 224 (*SBI, 2013*). Der er ikke brug for fanen i forbindelse med almindelig brug af modellen.

Bilag 3. Udviklingstests

Projektpartner og udvikler SolarVenti beskriver i det følgende logbog de tests, der har frembragt indledende indikationer af nøgletal til beskrivelse af ydeevnen af et affugtningsmodul:

I øjeblikket bygger vi en speciel testkasse, så det er muligt at teste hhv. befugtning og affugtningen af en plade med SiO₂. Vi skal kunne variere på mange parametre for at finde den bedste kombination:

- 1) Tykkelse af SiO₂-laget
- 2) Påvirkning i watt/m² plade med varme (kunstigt tilsat konstant med el for test)
- 3) Luftflow varieres
- 4) Fugtpåvirkningens indflydelse under alle drift typer.

Jeg foretog nogle foreløbige målinger i sommeren 2014 med en 10 mm tyk plade med silicagel.

Fx prøvede jeg så at se evnen til at affugte luft i et varmt og fugtigt drivhus:

Kl 15.10 (ventilator med 14Volt)

Tind = 30,9 grader RH = 57% (AH = 17 gr/m³) (luftstrøm = ca. 100 - 120 m³/H – ikke målt her)

Tud = 49 grader RH = 13% (AH = 10 gr/m³)

Dette for at kunne simulere fx troper – eller varm fugtig sommer i Europa.

Efter 20 minutter dækkes solfanger for direkte lyspåvirkning

Tind = 29,2 grader RH = 61% (AH = 18 gr/m³) (luftstrøm = ca. 100 m³/H – ikke målt her)

Tud = 39 grader RH = 29% (AH = 14 gr/m³)

Her er SiO₂ let mættet med vand så affugterevnen nedsættes noget

Kl 18.00

Tind = 26 grader RH = 62% (AH = 16 gr/m³) (luftstrøm = ca. 80 – 100 m³/H – ikke målt her)

Tud = 32 grader RH = 43% (AH = 13 gr/m³)

Noget tyder på, at jeg kan uddrive 3-400 gram vand i timen med 1 m² solfanger (1 cm SiO₂ lag)

Ved en test foretaget den 3.9.2014 vejede jeg solfanger kl 10.20 og kl 12.50 med affugtning af SiO₂.

Vægt ved start: 22,7 kg

Vægt ved slut: 21,7 kg

Altså en fordampning af 1 kg vand på 2½ time = 400 gram vand/time.

Den næste ½ time fordampedes yderligere 100 gr. vand.

Herefter konstruerede jeg en box, som solfanger sad på og hvor jeg kunne tilføre fugt og varm luft fra bagsiden af solfanger.

Her har jeg haft kørsler som indimellem viser meget kraftig affugtning af luften – især når den er meget fugtholdig som udgangspunkt.

Fx luft med 20-25 gram vand/m³ kan tørres ned til ca. 4-5 gram i en periode på ca. 1 time.

Der er brug for mere systematiske målinger. som vi nu går i gang med.

Når du arbejder på en simuleringsmodel, kan forskellige ting ændres, men noget af det vigtigste må være, at solfangeren kører i cyklusser.

Dvs. den kører fx 1-2 timer og affugter sig selv uden at blæse luft ind i kælder.

Derefter kan den med ekstra kraftig kapacitet køre luft ind i kælderen en periode – måske også 1-2 timer, hvor både lufttemperatur får et ekstra løft på fx 6 grader og den absolutte fugt sænkes med fx 5 – 15? gram/m³.

Jo højere fugtindholdet er i luften, jo mere trækker vi ud, hvilket jo også er heldigt.

Vi kan sikkert tilpasse hastighed på ventilator, så vi undgår tilbagekondensering i et tykkere lag SiO₂.

Forbedring af energi- og fugtforhold i krybekældre

Krybekælderkonstruktioner er særligt problematiske på grund af store fugtmæssige udfordringer. Samtidig er der samfundsmæssigt fokus på reduktion af energiforbrug, – i dette projekts sammenhæng efterisolering af etagedæk over krybekældre, hvilket øger fugtrisikoen. Projektet omhandler udvikling af effektiv soldreven ventilationsteknologi til forbedring af fugtforhold i krybekældre med det formål at opnå betingelser, der tillader en efterisolering af krybekældres etagedæk mod stueetage. Herunder udvikling af en matematisk krybekældermodel til vurdering af fugt- og temperaturforhold i krybekældre, teknologiudvikling af en affugtningsenhed til soldreven ventilationsteknologi og arkitektonisk granskning af soldrevne løsninger.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk