



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København
Statens Byggeforskningsinstitut
A. C. Meyers Vænge 15
2450 København SV
Danmark

Studiesekretær: Silpa Stella Rondón Pinto
Telefon: 9940 2285
master@sbi.aau.dk

Studenterrapport

Uddannelse: Master i
bygningsfysik

Semester: 4. Semester F19

Titel på masterprojekt:

Kuldebroers betydning

Projektperiode:

01.02.2019 – 03.06.2019

Vejleder:

Jørgen Rose & Martin Morelli

Studerende:

Kenneth M. Nielsen

Kenneth M. Nielsen

Antal normalsider: 38

**Vedlagt kvittering fra Digital
Eksamen**

Afleveringsdato: 28.05.2019

Resume:

Kuldebroer i klimaskærmen er gennem de seneste 50 år gået fra blot at blive omtalt med ganske få ord i datidens bygningsreglement, til i dag at være et alment kendt begreb med egne målrettede paragraffer i Bygningsreglement 2018. Endvidere stilles der helt klare krav til, hvordan kuldebroerne skal håndteres rent energiteknisk, mens den fugttekniske del er mere funktionsbaseret. Betyder dette så at kuldebroerne i højere grad er en energiteknisk problemstilling, end det er en fugtteknisk problemstilling? Dette er et af de områder, der behandles gennem nærværende rapport.

Gennem nærværende rapport lægges der fokus på indbyggede kuldebroer, der indbygges forsætteligt i klimaskærmen. Dette er for eksempel indbyggede stålprofiler, der indbygges for at efterkomme den ønskede udformning i det enkelte byggeri, som følge af nutidens arkitektoniske udtryk.

De indbyggede kuldebroer analyseres gennem tre forskellige analysemetoder, hvorved der opnås et fuldt nuanceret billede af de teoretiske forhold omkring de indbyggede kuldebroer. Endvidere udføres fysiske undersøgelser i praksis for at underbygge og verificere de teoretiske resultater.

Resultaterne fra de udførte undersøgelser viser, at de indbyggede kuldebroer medfører både energitekniske og fugttekniske problemstillinger.

Energiteknisk medfører de indbyggede kuldebroer en relativ lille stigning i det samlede energibehov. I nærværende tilfælde medfører stigningen dog at kravene til maksimalt energibehov netop overskrides, hvorfor den energitekniske konsekvens ikke kan negligeres trods sin beskedne størrelse. Fugtteknisk medfører de indbyggede kuldebroer, at der opstår ændrede temperatur- og fugtforhold ind gennem den pågældende konstruktion. De ændrede forhold medfører i nærværende tilfælde, at der opstår risiko for skjult skimmelvækst ved indbygning af stålprofiler tæt op af konstruktionens dampspærrende lag. Endvidere synliggøres det, at indeklimaets fugtpåvirkning har en direkte betydning for risikoen for skimmelvækst i forbindelse med kuldebroerne.

For at undgå risikoen for skimmelvækst kan man indledningsvist navigere efter 1/3-reglen, hvor der maksimalt må forefindes 1/3 af kuldebroens samlede isoleringstykkelse på den varme side af dampspærren. 1/3-reglen kan dog kun bruges som pejlemærke, og bør derfor altid suppleres med yderligere analyse inden endeligt valg af konstruktionsopbygning.

Aalborg Universitet, København

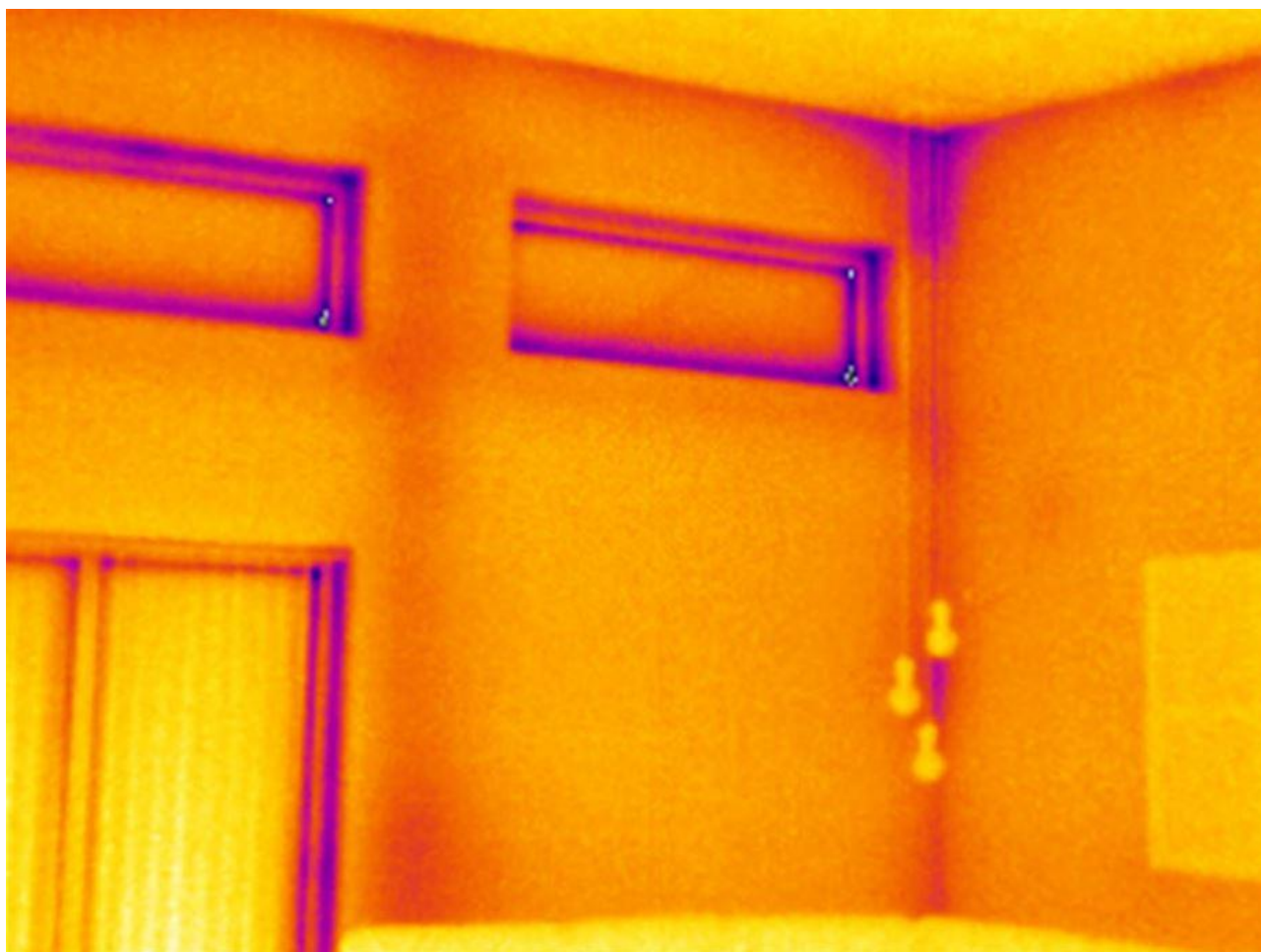
Master i bygningsfysik

4. semester F19



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Kuldebroers betydning



28.05.2019

Kenneth M. Nielsen

Vejledere: Jørgen Rose og Martin Morelli

Resumé

Kuldebroer i klimaskærmen er gennem de seneste 50 år gået fra blot at blive omtalt med ganske få ord i datidens bygningsreglement, til i dag at være et alment kendt begreb med egne målrettede paragraffer i Bygningsreglement 2018. Endvidere stilles der helt klare krav til, hvordan kuldebroerne skal håndteres rent energiteknisk, mens den fugttekniske del er mere funktionsbaseret. Betyder dette så at kuldebroerne i højere grad er en energiteknisk problemstilling, end det er en fugtteknisk problemstilling? Dette er et af de områder, der behandles gennem nærværende rapport.

Gennem nærværende rapport lægges der fokus på indbyggede kuldebroer, der indbygges forsætteligt i klimaskærmen. Dette er for eksempel indbyggede stålprofiler, der indbygges for at efterkomme den ønskede udformning i det enkelte byggeri, som følge af nutidens arkitektoniske udtryk.

De indbyggede kuldebroer analyseres gennem tre forskellige analysemetoder, hvorved der opnås et fuldt nuanceret billede af de teoretiske forhold omkring de indbyggede kuldebroer. Endvidere udføres fysiske undersøgelser i praksis for at underbygge og verificere de teoretiske resultater.

Resultaterne fra de udførte undersøgelser viser, at de indbyggede kuldebroer medfører både energitekniske og fugttekniske problemstillinger.

Energiteknisk medfører de indbyggede kuldebroer en relativ lille stigning i det samlede energibehov. I nærværende tilfælde medfører stigningen dog at kravene til maksimalt energibehov netop overskrides, hvorfor den energitekniske konsekvens ikke kan negligeres trods sin beskedne størrelse.

Fugtteknisk medfører de indbyggede kuldebroer, at der opstår ændrede temperatur- og fugtforhold ind gennem den pågældende konstruktion. De ændrede forhold medfører i nærværende tilfælde, at der opstår risiko for skjult skimmelvækst ved indbygning af stålprofiler tæt op af konstruktionens dampspærrende lag. Endvidere synliggøres det, at indeklimaets fugtpåvirkning har en direkte betydning for risikoen for skimmelvækst i forbindelse med kuldebroerne.

For at undgå risikoen for skimmelvækst kan man indledningsvist navigere efter 1/3-reglen, hvor der maksimalt må forefindes 1/3 af kuldebroens samlede isoleringstykkelse på den varme side af dampspærren. 1/3-reglen kan dog kun bruges som pejlemærke, og bør derfor altid suppleres med yderligere analyse inden endeligt valg af konstruktionsopbygning.

Abstract

Over the past 50 years, thermal bridges in the building envelope has gone from just being mentioned with a few words in the building regulations of the time, to be a commonly known term with its own specific rules of today's building regulations. There are specific guidelines how to deal with the thermal bridges in relation to the energy aspect, whereas the moisture aspect is more function based. Does this mean that the thermal bridges are more a problem associated to energy consumption than a problem associated to moisture accumulation? This is one of the subjects there are being discussed in this report.

The report is focused on thermal bridges, which is built into the building envelope by purpose. This is for example built in beams or columns of steel to achieve the wanted design as a result of today's architecture.

The built in thermal bridges are analyzed by three different methods to achieve a full overview of the theoretical surroundings to the thermal bridges. Furthermore, there are made studies in practice to verify the theoretical results.

The results from the theoretical and physical studies shows, that the thermal bridges cause problems related both to energy consumption and moisture accumulation.

Related to the energy aspect, the built in thermal bridges cause the energy needs to increase a little. It is a relatively small increase, but just enough so the demands to maximum energy needs is being exceeded. As a result of this, the built in thermal bridges cannot be ignored despite the relatively small size of it.

Related to the moisture aspect, the built in thermal bridges causes a change in temperature and moisture content through the construction. The changed surroundings around the thermal bridges cause in this case, a risk for hidden mold growth when the beams or columns of steel is being placed close to the vapor barrier. Furthermore, it is shown how the indoor climate affects the risk of mold growth related to the thermal bridges.

A way to avoid the risk of mold growth is initially to use the 1/3-rule, where only 1/3 of the insulation by the thermal bridge is placed at the interior side of the vapor barrier. However, the 1/3-rule can just be used as a guideline, and it should always be complemented with further analyses before finally choose of building method.

Indhold

Resumé	2
Abstract	3
1 Indledning	6
2 Baggrund	7
2.1 Problemformulering	8
2.2 Afgrænsning	8
3 Varmeteorologi	9
3.1 Hvad er en kuldebro	9
3.1.1 Geometriske kuldebroer	10
3.1.2 Konstruktive kuldebroer	10
3.1.3 Systematisk kuldebro	11
3.1.4 Konvektive kuldebroer	11
3.2 Varmetransport	12
3.2.1 Varmeledning	12
3.2.2 Konvektion	12
4 Fugtteori	14
4.1 Fugttransport	14
4.1.1 Diffusion	14
4.1.2 Konvektion	15
4.1.3 Kapillarsugning	15
4.1.4 Tryk	15
4.2 Betegnelser for fugtindhold	16
4.2.1 Relativ fugtighed	16
4.2.2 Absolut fugtindhold	17
4.2.3 Vægtprocent	18
4.3 Kondens og skimmelvækst	18
4.3.1 Skimmelvækst	18
4.3.2 Kondens	20
5 Metode	23
5.1 Energiteknisk redegørelse	24
5.2 Fugtteknisk redegørelse	25
6 Beregningsforudsætninger	26
6.1 Energiberegning – Be18	26

6.1.1	Forandrede data i de 3 energiberegninger.....	26
6.1.2	Uforandrede data der benyttes i alle 3 beregninger.....	27
6.2	Fugttekniske beregninger.....	28
6.2.1	WUFI Pro.....	29
6.2.2	HEAT2	32
6.2.3	WUFI 2D.....	34
7	Resultater	39
7.1	Energiberegning – Be18.....	39
7.2	Fugtteknisk beregning – HEAT2 og WUFI Pro.....	42
7.2.1	Ydervæg.....	42
7.2.2	Tagkonstruktion.....	47
7.2.3	Opsummering.....	53
7.3	Fugtteknisk beregning – WUFI 2D	54
7.3.1	Ydervæg.....	54
7.3.2	Tagkonstruktion.....	58
7.3.3	Opsummering.....	62
8	Validering og tolkning af resultater	63
8.1	Termografi.....	63
8.1.1	Ydervæg.....	63
8.1.2	Tagkonstruktion.....	64
8.2	Middelværdier vs. timeværdier.....	65
8.3	Skimmelrisiko.....	67
8.4	Parameterstudie.....	69
8.5	Indeklimaets påvirkning	73
8.5.1	Konsekvens ved ændret fugtbelastningsklasse.....	76
8.6	Perspektivering.....	76
9	Konklusion	78
10	Bilag	79
11	Litteraturliste.....	80

1 Indledning

Kuldebroer – et udtryk de fleste inden for byggebranchen kender til, men også et udtryk måske kun de færreste kender den fulde betydning af. Begrebet 'kuldebro' er et begreb, der har været kendt i byggebranchen i over 50 år. Begrebet blev anvendt i et bygningsreglement første gang tilbage i 1966. I bygningsreglement 1966 beskrives det med en enkelt sætning at, *"Bygningsdele, der skal varmeisoleres i henhold til kravene i det følgende, må kun indeholde kuldebroer i uvæsentligt omfang"* (Boligministeriet, 1966). På daværende tidspunkt fik kuldebroerne dermed ikke meget opmærksomhed, og blev som udgangspunkt kun anset som værende en energiteknisk problemstilling. I 1998 sker der en ændring i hvordan kuldebroerne omtales, og ikke mindst så bliver det uddybet, hvorfor kuldebroerne kun må fremgå i uvæsentligt omfang. I Bygningsreglement for småhuse 1998 uddybes det, at effekten af kuldebroerne skal indregnes som en del af varmetabet gennem den pågældende konstruktion. Det vil sige, at man nu har indset, at kuldebroerne er af en sådan størrelse, at de ikke længere kan negligeres, og udgør måske et større energiteknisk problem end tidligere antaget. Dette er i sig selv en spændende udvikling i, hvordan man betragter kuldebroerne, men mindst lige så vigtigt, så beskrives der nu også 3 grunde til, hvorfor kuldebroerne skal holdes på et uvæsentligt niveau – mindske risiko for kondens, mindske risiko for skimmelvækst og begrænse varmetab gennem konstruktionen (Trafik, Bygge og Boligstyrelsen, 1998). Det fremgår dermed af daværende Bygningsreglement for småhuse 1998, at kuldebroerne ikke længere kun betragtes som en energiteknisk problemstilling, men også en fugtteknisk problemstilling. At kuldebroer både medfører energitekniske og fugttekniske problemstillinger er også måden, hvorpå kuldebroerne bliver betragtet og omtalt i nutidens litteratur. I Bygningsreglement 2018 omtales kuldebroerne nu i langt højere grad end i tidligere bygningsreglementer. Men betyder dette, at alle byggebranchens aktører nu har indgående kendskab til kuldebroerne og de bygningsfysiske forhold omkring dem? Dette er næppe tilfældet.

For at anskueliggøre betydningen af kuldebroernes tilstedeværelse, udarbejdes nærværende rapport som en del af studiet, Master i Bygningsfysik udbudt af Aalborg Universitet, København. Rapporten udføres hovedsageligt som en teoretisk rapport indeholdende data fra tilhørende beregnings- og simuleringsværktøjer understøttet af enkelte feltmålinger som verificering af teorien i praksis. Rapporten henvender sig til byggebranchens aktører, der har interesse inden for den bygningsfysiske del af emnet. Gennem rapporten vil der blive behandlet energitekniske- såvel som fugttekniske problemstillinger, således der skabes et overblik over, hvilke konsekvenser kuldebroerne medfører inden for de to områder. I det rapporten henvender sig til fagfolk inden for byggebranchen, forudsættes det at læser har en grundlæggende viden inden for bygningskonstruktioner, og er bekendt med de dertilhørende fagtermer.

2 Baggrund

Siden Bygningsreglement for småhuse 1998 har man vidst og gjort opmærksom på, at kuldebroer både medfører energitekniske og fugttekniske problemstillinger. Dette fremgår ligeledes af nuværende gældende Bygningsreglement 2018, hvor kuldebroer både omtales i kapitel 11 'Energiforbrug' og kapitel 14 'Fugt Og Vådtrum', samt tilhørende vejledningstekster (Hansen E. J., 1. udgave 2018). Kuldebroer omtales ligeledes i vidt omfang blandt anerkendte litteratursamlinger som for eksempel SBI-anvisninger og BYG-ERFA erfaringsblade. Man må derfor antage, at problematikkerne vedrørende kuldebroer er en almindelig kendt problemstilling. Dette er dog langt fra ens betydende med, at kuldebroerne ikke stadig giver udfordringer i det danske byggeri. I 2018 resulterede et tæt samarbejde blandt fire af byggebranchens store aktører i en rapport, der redegør for kuldebroers indvirkning på varmetab gennem klimaskærmen (MOE A/S, Arkitema Architects, NCC Danmark A/S, & VIA Byggeri, Energi & Miljø, 2018). I rapporten fremgår eksempler på, at kuldebroerne, der uundgåeligt vil være tilstede i en vilkårlig bygningsdel, ikke indregnes som en del af bygningsdelens samlede U-værdi. Dette til trods for at det fremgår direkte af Bygningsreglement 2018 §256, at kuldebroerne skal indregnes i den samlede U-værdi. Som følge af at kuldebroerne ikke indregnes i bygningsdelens U-værdi, fremstår denne lavere i den efterfølgende energiberegning, end det reelt er tilfældet. Undersøgelser viser at nye parcelhuse generelt har et højere faktisk energiforbrug end beregnet teoretisk forbrug (Hansen & Hansen, 3. udgave 2016). En mulig årsag hertil kunne måske ligge gemt i den manglende indregning af de tilstedeværende kuldebroer.

Fugtteknisk omtales kuldebroer i adskillige anerkendte litteraturserier som en risikofaktor for kondens- og skimmelproblemer. I Bygningsreglement 2018 fremgår det desuden direkte af §335, at kuldebroer i klimaskærmen ikke må medføre problemer med kondens og skimmelvækst. Dette er i sig selv en ganske fornuftig formulering, og ikke mindst et overkommeligt krav at efterleve ved traditionelt byggeri. Byggebranchen er dog gennem en lang årrække gået mere og mere væk fra det traditionelle byggeri, der bygger på erfaringer, og mere over mod det ukendte, nye og unikke byggeri. Dette bevirker, at der i langt højere grad bygges på beregninger, simuleringer og forudsigelser, end på traditionel erfaring opbygget gennem mange år. Denne tendens medfører således, at de projekterende i byggebranchen skal opfinde nye sammenbygningsdetaljer ved hvert nyt projekt, idet hvert projekt i mange tilfælde skal fremstå unikt. Vejen mod at få hvert projekt til at fremstå unik medfører ofte inddragelse af ikke gennemprøvede sammenbygningsdetaljer, herunder hyppigt brug af indbygning af stålprofiler som en del af klimaskærm. Netop det at bygge mod det ukendte med ikke gennemprøvede detaljer, kan ofte skabe oversete problematikker – herunder oversete kuldebroer eller blot kuldebroer, der ikke har fået den nødvendige opmærksomhed.

2.1 Problemformulering

Med afsæt i de nævnte problemstillinger i forrige afsnit vil nærværende rapport belyse en række relevante problemstillinger omhandlende kuldebroer. Problemstillingerne der belyses, er følgende:

- I hvor stor en grad medfører kuldebroer et energiteknisk problem? Eller er det primært en fugtteknisk problematik der er tale om?
- Hvilke problematikker medfører tilstedeværelsen af en kuldebro?
- Hvilken indvirkning har indeklimaet for kuldebroens betydning?
- Giver indbygning af stålprofiler i klimaskærmen anledning til bekymringer? Og i givet fald, hvordan tages der i så fald hånd om disse bekymringer?
- Hvor avancerede analysemetoder skal der til, for at vurdere hvorvidt en kuldebro skaber problemer?

2.2 Afgrænsning

Nærværende rapport behandler de energitekniske og fugttekniske problemstillinger, der fremkommer som følge af kuldebroer i klimaskærmen i forbindelse med danske enfamiliehuse. Der ses således bort fra bygningsgrupper som etagebyggeri, sommerhuse, udhuse mv. Rapportens beregninger og simuleringer tager desuden udgangspunkt i kuldebroer, der fremkommer i forbindelse med nybyggeri. På dette område findes en del litteratur, der foreskriver løsningsmuligheder for at mindske de traditionelle linjetab, der forekommer i forbindelse med opførelsen af en ny bolig. Dette være sig linjetab langs ydervægsfundamenter samt samling mellem vinduer/døre til de tilstødende bygningsdele. Disse områder vil derfor kun blive berørt overfladisk.

Det præciseres at der i stedet fokuseres på kuldebroerne, der indbygges som en del af den enkelte bygningsdel, hvorved tværsnittet for den pågældende bygningsdel ændres. Ændringen af tværsnittet ændrer unægtelig varmetransporten i og omkring konstruktionen, som ønskes nærmere undersøgt. Et eksempel herpå ses på billede 1, der viser en tagkonstruktion med synlige aftegninger af indbyggede kuldebroer.



Billede 1 - Eksempel på synlige aftegninger af indbyggede kuldebroer i en tagkonstruktion. Aftegningerne fremstår med områder uden rimfrost på tagbeklædningen.

3 Varmeteori

For at forstå hvordan kuldebroer påvirkes af sine omgivelser, og ikke mindst hvordan denne påvirkning forplanter sig i den omkringliggende konstruktion, er det nødvendigt at forstå, hvilke forskellige typer af kuldebroer der forefindes, samt hvilke kendetegn og egenskaber de hver især besidder. I de følgende afsnit vil den nødvendige varmeteori blive gennemgået for at sikre fuld forståelse af den resterende del af rapporten.

3.1 Hvad er en kuldebro

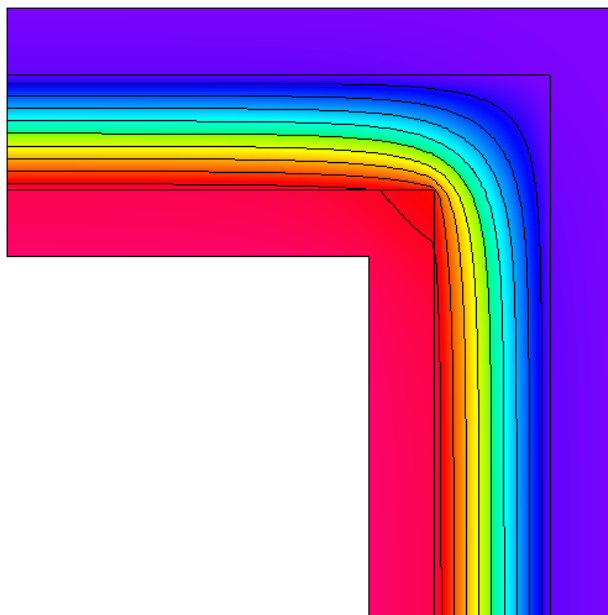
Begrebet 'kuldebro' har været kendt i byggebranchen i over 50 år (Boligministeriet, 1966), men hvad dækker begrebet reelt over? En kuldebro defineres som et område i en vilkårlig bygningsdel, hvor isolansen fremstår ringere end i den resterende del af konstruktionen (Møller, 1. udgave 2016). Kuldebroen medfører dermed en forringelse af isoleringsevnen lokalt i bygningsdelen, hvorved den indvendige overfladetemperatur reduceres lokalt ud for den pågældende kuldebro. Reduceringen af overfladetemperaturen kan således opleves som trækgener ved ophold tæt op af overfladen. Endvidere kan den lavere temperatur give anledning til højere fugtighed lokalt på overfladen med tilsmudsning eller fugtskader til følge. De nærmere bygningsfysiske forhold omkring temperaturændringen på overflade og i konstruktion behandles yderligere i de følgende teoriansnit.

Grundlæggende kan man opdele kuldebroer i 4 grupper med hver sine kendetegn:

- Geometriske kuldebroer
- Konstruktive kuldebroer
- Systematiske kuldebroer
- Konvektive kuldebroer

3.1.1 Geometriske kuldebroer

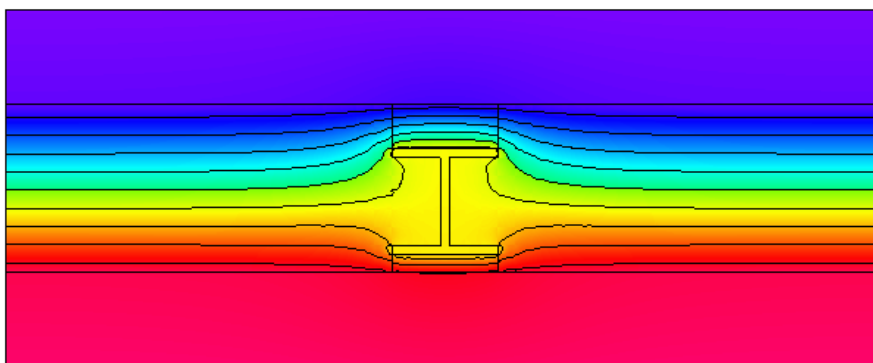
Geometriske kuldebroer optræder i alle typer byggeri og fremkommer typisk som følge af sammenbygning mellem bygningsdele. Dette kan for eksempel være i forbindelse med hjørnesamlinger i en ydervæg. På eksemplet her ses et udvendigt hjørne af en ydervæg. Farveskala og isotermer angiver, at der er koldere på den indvendige overflade helt inde i hjørnet af væggen end på den resterende del. Dette skyldes den øgede mængde af udvendigt overfladeareal på væggen i forhold til det indvendige overfladeareal, og dermed opstår den geometriske kuldebro.



Billede 2 - HEAT2 opstilling af geometrisk kuldebro ved udvendigt hjørne af en ydervæg

3.1.2 Konstruktive kuldebroer

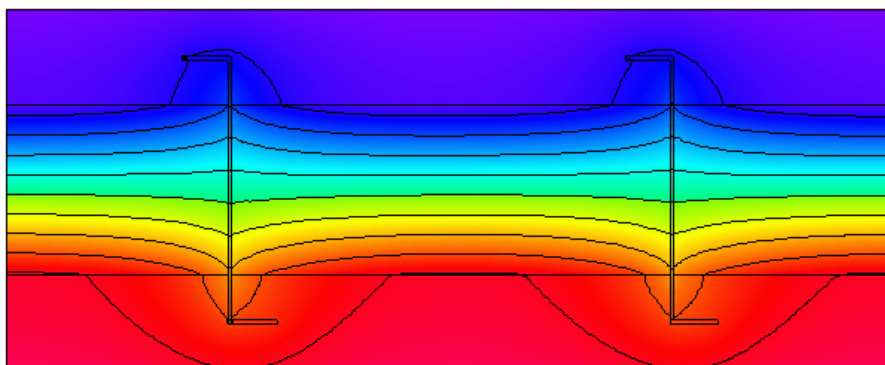
Konstruktive kuldebroer optræder i alle tilfælde, hvor isoleringen af den pågældende bygningsdel brydes eller reduceres. Dette ses ofte i forbindelse med altanudkragninger eller for eksempel ved indbygning af et stålprofil i ydervæggen fungerende som en vindsøjle. På eksemplet ses hvordan stålprofilet transporterer kulde ind gennem isoleringslaget i ydervæggen.



Billede 3 - HEAT2 opstilling af konstruktiv kuldebro ved indbygning af stålprofil i en ydervæg

3.1.3 Systematisk kuldebro

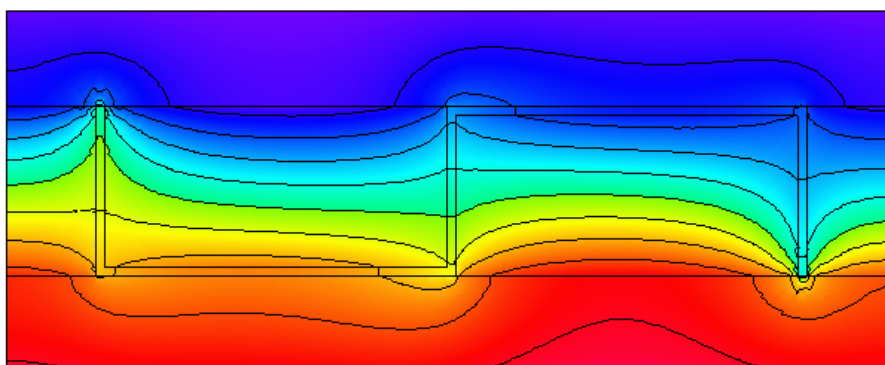
Systematiske kuldebroer optræder ved gentagne mindre konstruktive kuldebroer. De systematiske kuldebroer er ofte relativt små af størrelse, men omfanget bevirker, at deres samlede effekt kan få indflydelse. Systematiske kuldebroer kan for eksempel udgøres af murbindere i murværk eller de bærende reglar af træ eller stål i et stolpeskellet. På eksemplet ses, hvordan murbindere udgør adskillige små kuldebroer gennem isoleringslaget, med lokale fald i den indvendige overfladetemperatur som følge.



Billede 4 - HEAT2 opstilling af systematisk kuldebro ved trådbindere mellem for- og bagmur i en ydervæg

3.1.4 Konvektive kuldebroer

Konvektive kuldebroer optræder som følge af luftspalter i isoleringslaget eller som følge af gennemblæst isolering – for eksempel ved tagfod udført uden vindbræt. I projekteringsøjemed forudsættes det altid, at isoleringslaget udføres uden luftspalter indbyrdes mellem de enkelte batts, ruller eller plader, hvorfor de konvektive kuldebroer kun i sjældne tilfælde tages i regning. På eksemplet ses, hvordan små luftspalter forringer isoleringseven af ydervæggen. Det bemærkes her, at opstillingen kun tager højde for den højere varmeledningsevne for luftspalten og dermed ikke det egentlige konvektive bidrag. Det konvektive bidrag vil blot forværre isoleringsevnen yderligere.



Billede 5 - HEAT2 opstilling af konvektiv kuldebro som følge af luftspalter i isoleringslaget i en ydervæg

3.2 Varmetransport

Varmetransport kan som udgangspunkt forekomme på 3 forskellige måder – som ledning, stråling eller konvektion. I forbindelse med de fire forskellige kuldebroer nævnt i forrige afsnit, vil der være tale om ledning som varmetransportform for henholdsvis de geometriske, de konstruktive og de systematiske kuldebroer mens de konvektive kuldebroer fremkommer som følge af konvektiv varmetransport.

3.2.1 Varmedledning

Varmedledning er som nævnt den hyppigst forekommende varmedledningsform, når der tales om kuldebroer. Varmedledning forekommer i et fast stof som følge af molekulære bevægelser, der overfører energi fra molekyle til molekyle og dermed leder varme fra ét punkt til et andet – i bygningssammenhæng vil dette være fra den ene side af konstruktionen til den anden side. Mængden af varme, der ledes gennem et materiale, er direkte afhængig af tre faktorer – materialets varmedledningsevne, materialets tykkelse og temperaturdifferensen over materialet. Dette kan opstilles således (Nielsen & Møller, 2017).

$$q = \lambda * \frac{\Delta\theta}{d}$$

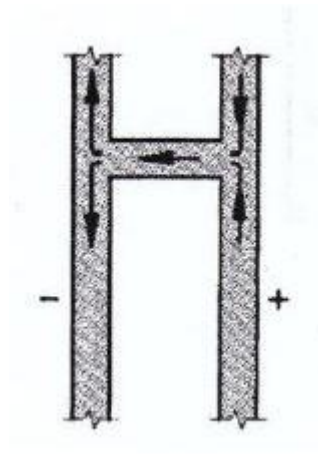
Hvor,

q = Varmestrøm angivet i W/m^2

λ = Varmedledningsevne i W/mK

d = materialets tykkelse i m

$\Delta\theta$ = temperaturdifferens over materialet i $^{\circ}C$



Billede 6 - Princip for varmedledning gennem et fast stof

3.2.2 Konvektion

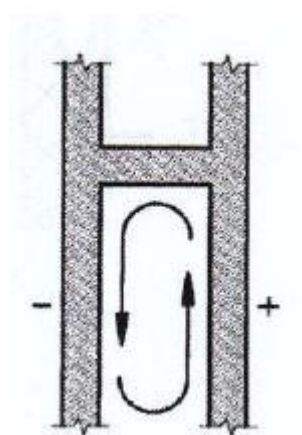
Konvektion som varmetransportform optræder som følge af et strømmende stof, der flytter energien med sig fra ét punkt til et andet. I bygningssammenhæng vil dette stof typisk være luft, der cirkulerer som følge af naturlig- eller tvungen konvektion.

Naturlig konvektion opstår i luftfyldte hulrum, hvor der optræder en temperaturdifferens mellem hulrummets modstående flader. Temperaturdifferensen medfører forskellig densitet på luften i den varme

og den kolde side, hvorved der opstår en cirkulær strømning i hulrummet. Denne strømning overfører nu varme fra den ene side af hulrummet til den modstående, hvorved varmestrømmen øges.

Tvungen konvektion opstår som følge af udefrakommende påvirkning, der driver luften gennem et hulrum eller en konstruktion. Dette vil for eksempel være tilfældet ved etableringen af en traditionel tagfod udført uden vindbræt. I så fald vil udeklimaets påvirkning presse vind gennem isoleringslaget, og den tvungne konvektion med dertilhørende reduceret isoleringsevne er dermed en realitet.

Hvor stor varmetransport konvektionen bidrager med, kan være vanskelig at fastlægge entydigt. Dette skyldes, at i hulrummene, hvor den naturlige konvektion forekommer, ligeledes vil forefindes varmeledning og varmestråling. Ydermere indvirker hulrummets geometriske udformning, ruhed af fladerne samt luftens viskositet ligeledes på resultatet. For den tvungne konvektion vil de ydre påvirkninger ligeledes variere med store udsving, hvorved konvektionen igen vil være vanskelig at fastlægge (Nielsen & Møller, 2017).



Billede 7 - Princip for konvektion mellem 2 modstående flader

Idet nærværende rapport har til hensigt at undersøge forholdene omkring kuldebroer indbygget forsætteligt i klimaskærmens bygningsdele, antages det, at der ikke opstår utilsigtet konvektion. Som følge heraf undersøges konvektionsbidragets størrelse ikke yderligere.

4 Fugtteori

For at forstå hvordan kuldebroer påvirker forholdene i og omkring en konstruktion, kræves grundlæggende viden omkring, hvordan fugt arter sig, hvordan det kan transporteres fra ét punkt til et andet, og ikke mindst hvordan fugten reagerer på temperaturudsving. I det følgende gennemgås den nødvendige fugtteori, som en nødvendighed for forståelsen af den resterende del af rapporten.

4.1 Fugttransport

Fugttransport kan som udgangspunkt inddeles i 4 forskellige grupper – Diffusion, konvektion, kapillarsugning og tryk. Fælles for dem alle er, at den drivende kraft defineres som potentialeforskelle, der forsøger at skabe ligevægt. Det vil sige, at fugten vil vandre fra områder med højt fugtindhold til områder med lavere indhold. Denne vandring kan både ske på væskeform og på dampform, og med forskellige drivkræfter som virkemiddel. Hvornår hvilke transportformer finder sted, vil blive behandlet i de kommende afsnit.

4.1.1 Diffusion

Diffusion er en transportform, hvor fugten transporteres på dampform og kan finde sted både i luft og i materialer. For at diffusionen kan finde sted, er der behov for en drivkraft i form af forskellige vanddampindhold eller damptryk. Vanddampen vil i sådanne tilfælde forsøge at skabe ligevægt, og dermed vandre fra områder med højere vanddampindhold til områder med lavere vanddampindhold, indtil forskellen er udlignet, og ligevægten dermed er opnået. I luft kan diffusionen foregå forholdsvis uhindret, mens diffusion i materialer foregår i materialets porer. Materialets porestruktur og størrelserne heraf er dermed meddefinierende af hastigheden og mængden af vanddamp, det pågældende materiale kan optage eller afgive – jo grovere poresystem der er tale om, jo større er potentialet for fugttransporten (Brandt, 2. udgave 2013).

Et eksempel på hvor diffusion indtræder vil være ved typiske vinterforhold, hvor vanddampindholdet ude oftest er lavere end vanddampindholdet inde i en opvarmet bolig. Som følge heraf vil vanddampen inde i boligen forsøge at diffundere ud gennem klimaskærmen for at udligne forskellen i vanddampindholdet, der forefindes hen over klimaskærmens konstruktioner. En sådan diffusion gennem klimaskærmens isoleringslag vil medføre uhensigtsmæssigt høje fugtigheder ud gennem konstruktionen, hvorfor diffusionen forsøges standset. Dette gøres ved indbygning af et dampstandsende lag med en høj diffusionsmodstand svarende til en Z-værdi på minimum $50 \text{ GPa m}^2 \text{ s/kg}$.

4.1.2 Konvektion

Ved konvektion transporteres fugten ligeledes på dampform, men foregår til gengæld kun i luft, og dermed ikke i materialers poresystemer. Konvektionen drives som følge af trykforskelle, hvorved fugten i luften transporteres med den pågældende luftstrøm. Trykforskellene i luften kan for eksempel opstå som følge af vindpåvirkning, temperaturforskelle eller ventilationsanlæg (Brandt, 2. udgave 2013).

Et eksempel herpå kan være ved vindpåvirkning af en bygning. Læsiden af bygningen vil i så fald medføre et undertryk. Klimaskærmen på læsiden af bygningen vil dermed blive udsat for et højere lufttryk på indvendig side end på udvendig side. Konsekvensen heraf vil være, at indeluften vil søge ud gennem revner og sprækker i konstruktionen med dertilhørende høje fugtigheder gennem konstruktionen til følge. For at imødegå sådanne scenarier, indreguleres boligers mekaniske ventilationsanlæg typisk med en smule undertryk for at hindre den udadrettede fugttransport.

4.1.3 Kapillarsugning

Kapillarsugning adskiller sig fra diffusion og konvektion ved at fugttransporten nu foregår på væskeform, og fugtmængden der kan transporteres øges betragteligt. Kapillarsugning opstår inde i materialers poresystemer, når disse opnår høje fugtigheder eller kommer i direkte kontakt med vand. Derved fyldes porerne med fugt på væskeform i stedet for dampform, og forudsætningerne for kapillarsugning er en realitet (Brandt, 2. udgave 2013).

Kapillarsugning ses typisk i forbindelse med konstruktioner mod jord som for eksempel terrændæk og kælderydervægge. Her vil der være risiko for kapillarsugning som følge af terrænets høje fugtighed. For at standse denne kapillarsugning indbygges enten et fugtstandsende lag eller et kappilarbydende lag, hvorved fugttransporten hindres.

4.1.4 Tryk

Tryk som transportform forekommer som følge af ydre påvirkninger, der presser fugt gennem materialers poresystemer. Dette forekommer typisk i form af vand- eller vindtryk.

Et eksempel herpå vil være ved en kælderydervæg, hvor grundvandsspejlet står højere end kælderydervæggens bund. Her vil kælderydervæggen være udsat for et konstant vandtryk, der vil forsøge at presse vand ind i konstruktionen, såfremt der ikke udføres en vandtættende lag. Et mere almindeligt eksempel er ved facader, der udsættes for slagregn. Her vil kombinationen af vand, der løber på facaden, og

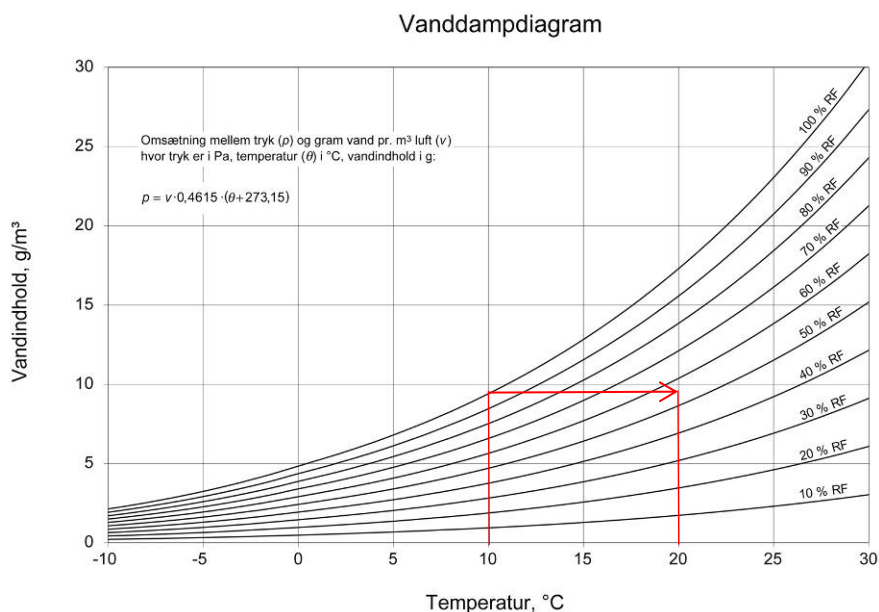
vindtryk på facaden, bevirke af transportformen overgår fra almindelig kapillarsugning til decideret trykpåvirkning ind gennem facadematerialets poresystem.

4.2 Betegnelser for fugtindhold

Fugtindhold i byggematerialer, såvel som i luften, kan angives på flere forskellige måder – relativ fugtindhold, absolut fugtindhold og vægtprocent. De tre forskellige fugtangivelser er tæt forbundet til hinanden, idet det er muligt at regne sig fra den ene angivelse til den anden. Det er derfor vigtigt at kende forskellen på de enkelte betegnelser, og ikke mindst i hvilken sammenhæng de benyttes.

4.2.1 Relativ fugtighed

Relativ fugtighed er det hyppigst benyttede begreb af de tre betegnelser, og benyttes ligeledes som indikator for, hvornår skimmelvækst bliver en risikofaktor. Skimmelvækst behandles i et særskilt afsnit senere i rapporten. Relativ fugtighed skal ses som den procentvise udnyttelse af den maksimale kapacitet – med andre ord, hvor meget fugt der er tilstede af det maksimalt mulige. Luft kan indeholde forskellige mængder fugt – også kaldet vanddamp – alt efter temperaturen på luften. Det maksimale vanddampindhold kaldes mætningsindholdet, og defineres som 100% relativ fugtindhold. Det maksimale vanddampindhold ved en defineret temperatur kan findes ved tilnærmede formler, tabelopslag eller via grafer (Brandt, 2. udgave 2013). I dette tilfælde vises et eksempel på, hvordan den relative luftfugtighed på 100% ved 10 °C falder til cirka 55%, når temperaturen hæves til 20 °C, selv om der er tale om det samme absolutte fugtindhold.



Figur 1 - Vanddampdiagram der illustrerer, hvordan samme fugtmængde medfører lavere relativ fugtighed ved stigende temperatur

4.2.2 Absolut fugtindhold

Det absolutte fugtindhold er et udtryk for den aktuelle tilstedeværende fugtmængde i et pågældende materiale angivet i gram fugt – eller gram vanddamp, såfremt der er tale om luftfugtighed. I materialesammenhæng findes det absolutte fugtindhold mest præcis ved en veje-tørre-veje prøve. Her vejes en materialeprøve, hvorefter prøven udtørres, for til sidst at blive vejlet igen. På denne måde findes den absolutte fugtmængde, der var tilstede i materialeprøven forud for vejningen. Ved luftfugtighed findes det absolutte fugtindhold ved hjælp af den relative luftfugtighed med tilhørende temperatur. Igen kan det absolutte fugtindhold findes ved tilnærmede formler, tabelopslag eller via grafer (Brandt, 2. udgave 2013). I dette tilfælde vises et eksempel med tabelopslag, hvor det absolutte fugtindhold ønskes fastlagt ved 55% relativ fugtighed og 20 °C.

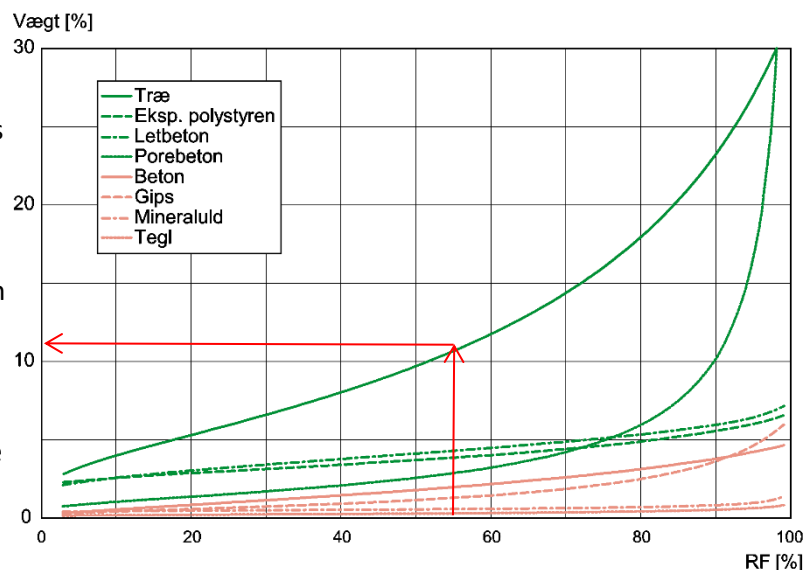
I figur 2 aflæses mætningsindholdet ved 20 °C til 17,28 gram vanddamp pr. m³ luft. Det absolutte fugtindhold fastlægges derfor som 55% af de 17,28 gram, svarende til 9,5 gram/m³.

Temperatur	Vanddampindhold	Damptryk
°C	g/m ³	Pa
7	7,747	1002
8	8,266	1073
9	8,814	1148
10	9,396	1228
11	10,01	1312
12	10,66	1402
13	11,34	1497
14	12,06	1598
15	12,82	1705
16	13,62	1818
17	14,47	1937
18	15,36	2063
19	16,29	2197
20	17,28	2338
21	18,32	2487
22	19,41	2643
23	20,55	2809

Figur 2 - Tabelopslag til bestemmelse af mætningsindhold af vanddamp ved en given temperatur

4.2.3 Vægtprocent

Vægtprocent benyttes i tæt samspil med den relative fugtighed. Men hvor den relative fugtighed måles i luft, måles vægtprocenten i et pågældende materiale. Vægtprocenten i et materiale sammenholdes med den relative luftfugtighed, som materialet er i ligevægt med, ved hjælp af materialets tilhørende sorptionskurve (Brandt, 2. udgave 2013). Tages der igen udgangspunkt i en omgivende luftfugtighed på 55% relativ fugtighed, svarer dette til en vægtprocent for træ pålydende 11%.



Figur 3 - Sorptionskurve til bestemmelse af sammenhæng mellem betegnelsen 'vægtprocent' og relativ fugtighed

Mængden af indlejret fugt i et materiale kan på samme vis omsættes fra vægtprocent til relativ fugtighed, og dermed give en indikator for mulig risiko for skimmelvækst.

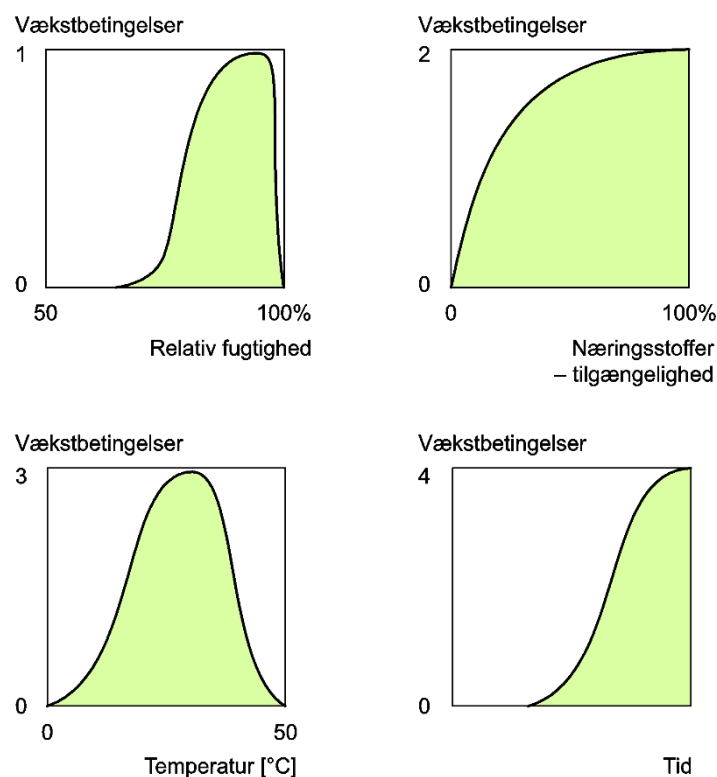
4.3 Kondens og skimmelvækst

I henhold til bygningsreglement 2018 beskrives det, at kuldebroer skal udføres således, at der ikke opstår risiko for kondens og skimmelvækst. Dette er et funktionsbaseret krav, og det kan dermed ikke entydigt defineres, hvordan et sådant forhold efterleves. Grænsen for hvornår, der er risiko for kondens og skimmelvækst tilstede, er nemlig afhængig af en række faktorer, som vil blive nærmere berørt i de kommende afsnit.

4.3.1 Skimmelvækst

Som tidligere angivet benyttes betegnelsen 'relativ fugtighed' ofte i forhold til vurdering af risiko for skimmelvækst i en konstruktion. Den relative fugtighed er dog kun en af de faktorer, der er krav til, før skimmel har sine vækstbetingelser opfyldt. Ud over fugtigheden stilles der nemlig også krav til tilgængeligheden af næringsstoffer, den omgivende temperatur og tiden hvori vækstbetingelserne er opfyldt. Idet der er 4 faktorer der er afhængig af hinanden, er det vanskeligt at give et entydigt billede af,

hvornår der er risiko for skimmelvækst. I hvilket omfang de forskellige faktorer indvirker på risikoen for skimmelvækst kan illustreres således.



Figur 4 - Oversigt over hvilke vækstbetingelser der skal være opfyldt før skimmelvækst kan forekomme

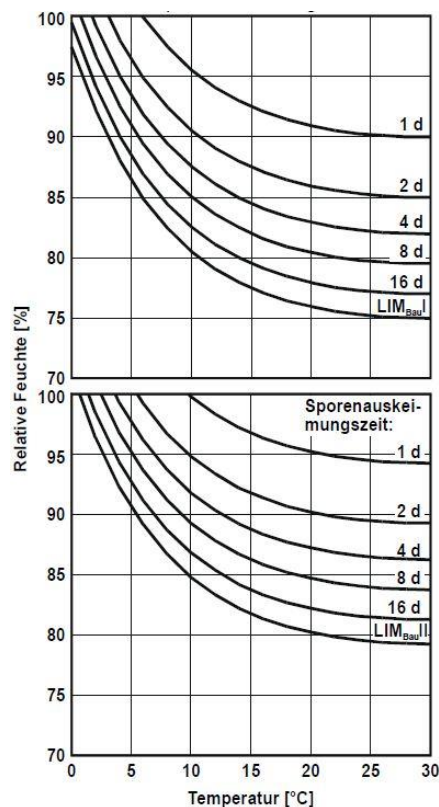
Relativ fugtighed – For at skimmel kan udvikle sig, kræves der først og fremmest høj relativ fugtighed. For træbaserede produkter kræves en relativ fugtighed op over 75% svarende til cirka 16% træfugt (Valdbjørn, 2003). Vækstbetingelserne stiger i takt med stigende relativ fugtighed, og aftager først ved fugtigheder tæt på 100% relativ fugtighed.

Næringsstoffer – Tilstedeværelsen af næringsstoffer vil næsten altid være opfyldt. Næringsstofferne vil oftest optræde i form af organiske materialer, men også støv og smuds er nok til, at der er næring nok, for skimmelvæksten kan forefindes. Skimmel kræver ikke adgang til dagslys, hvorved udbredelsen af skimmel kan blive ganske omfattende i skjulte hulrum, uden der er synlige tegn på angrebets tilstedeværelse (Valdbjørn, 2003).

Temperatur – Optimale vækstbetingelser for skimmel forefindes ved temperaturer omkring 20-30 °C med aftagende effekt ved temperaturer både over og under, til helt at gå i stå ved temperaturer omkring frysepunktet som nedre grænse og ved 50 °C som øvre grænse.

Tid – Tid er en forholdsvis udefinerbar faktor. Jo længere tid de øvrige 3 faktorer er tilstede, jo større er risikoen for skimmelvæksten. Men præcis hvor lang tid der er tale om, er stærkt afhængig af, hvor gode vækstbetingelserne er før skimmelvæksten optræder – dette kan være alt fra få dage til flere måneder (Brandt, 2. udgave 2013).

Ovenstående faktorer kan sammensættes til en mere brugbar opstilling, for hvor lang tid hvilke vækstbetingelser skal være opfyldt, før der er risiko for skimmelvækst. Øverste opstilling viser varigheden af vækstbetingelsernes tilstedeværende inden skimmelrisikoen opstår for organiske materialer, mens den nederste opstilling viser tilsvarende for uorganiske materialer (Sedlbauer, 2001). Og som det fremgår, så har hver af de 4 faktorer indflydelse.



Figur 5 - Opstilling af hvornår der kan forventes skimmelvækst ud fra relativ fugtighed, temperatur og tilgængeligheden af organisk materiale

4.3.2 Kondens

Hvorvidt der opstår kondens eller ej, er mere håndgribeligt at definere, end om der er risiko for skimmel. Som udgangspunkt opstår kondens, når den relative fugtighed når 100%, og dermed når sin maksimale kapacitet. Den relative fugtighed er dog et produkt af den tilstedeværende absolutte fugtighed og den omgivende temperatur, hvorfor disse er vigtige faktorer, for hvornår der er risiko for kondens.

Temperaturen i boliger kan man med god sikkerhed definere som 20 °C. Den forventede absolutte luftfugtighed varierer dog alt efter udeforhold, samt brugen af den pågældende bolig – dette udtrykkes via følgende fugtbelastningsklasser (Brandt, 2. udgave 2013):

- | | |
|----------|---|
| Klasse 1 | Ubeboede bygninger, tørre lagerbygninger, idrætshaller uden tilskuere |
| Klasse 2 | Kontorer, butikker, boliger med lav beboelsestæthed |
| Klasse 3 | Boliger med ukendt beboelsestæthed, idrætshaller med mange tilskuere |

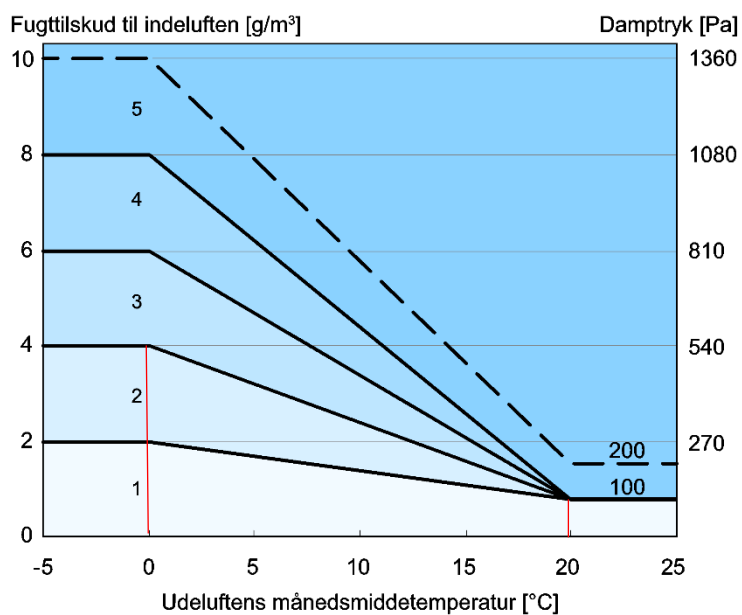
Klasse 4 Storkøkkener, kantiner, bade- og omklædningsrum

Klasse 5 Specielle bygninger med høj fugtbelastning f.eks. vaskeri, bryggeri, svømmehal

Hver fugtbelastningsklasse antages at bidrage med et fugttilskud til indeluften, svarende til forholdene i det følgende.

Ved et traditionelt enfamiliehus indplaceret i fugtbelastningsklasse 2 fremgår det, at der forventes et fugttilskud til indeluften varierende fra 1 gram/m³ til 4 gram/m³ alt efter udetemperaturen. Variationen skyldes antagelsen om, at beboerne vil lufte mere ud ved udetemperaturer over 20°C end ved temperaturer under 0°C (Brandt, 2. udgave 2013).

Som et eksempel for ved hvilken temperatur, der vil være risiko for overfladekondens på den indvendige side af klimaskærmen, tages der udgangspunkt i et enfamiliehus og ved



Figur 6 - Oversigt over fugttilskud til indeluften som følge af fugtbelastningsklasse i henhold til DS/EN ISO 13788

stationært udeklima for februar måned i henhold til referenceåret TRY svarende til -1,1°C og 94% relativ fugtighed. Det er nu muligt at bestemme det absolutte fugtindhold og dermed også det tilstedeværende damptryk inde i boligen. Damptrykket inde i boligen defineres som (Brandt, 2. udgave 2013):

$$p_i = p_u + p_t$$

Hvor,

p_i = damptryk inde i Pa

p_u = damptryk ude = 560,7 Pa

p_t = damptryk tilført som følge af fugtbelastningsklasse = 540 Pa

Ligningen udfyldes og resulterer i:

$$1100,7 \text{ Pa} = 560,7 + 540$$

Ud fra det tilstedeværende damptryk er det nu muligt at udregne den kritiske overfladetemperatur, hvor kondensdannelse vil opstå på indvendig side af klimaskærmen. Den kritiske temperatur for 100% relativ fugtighed – også kaldet dugpunktstemperaturen – defineres som:

$$\theta = \frac{237,3 \ln(\frac{p_m}{610,5})}{17,269 - \ln(\frac{p_m}{610,5})}$$

Hvor,

θ = Dugpunktstemperatur i °C

p_m = Mætningsdamptryk = 1100,7 Pa

Ligningen udfyldes og resulterer i:

$$\theta = \frac{237,3 \ln(\frac{1100,7}{610,5})}{17,269 - \ln(\frac{1100,7}{610,5})} = 8,39^\circ C$$

Ved de opstillede forhold vil der således kræves en overfladetemperatur på 8,39°C på den indvendige side af klimaskærmen, før der opnås en relativ fugtighed på 100% og dermed kondensdannelse. Det er dog vigtigt at påpege i denne sammenhæng, at vækstbetingelserne for skimmel i visse tilfælde starter allerede ved 75% relativ fugtighed. Ønskes temperaturen herfor bestemt, reduceres det indvendige damptryk til kun at udgøre 75% af mætningsdamptrykket:

$$p_{m.krit} = \frac{1100,7}{0,75} = 1467,6 Pa$$

Det udregnes nu ved hvilken temperatur mætningsdamptrykket svarer til 1467,6 Pa:

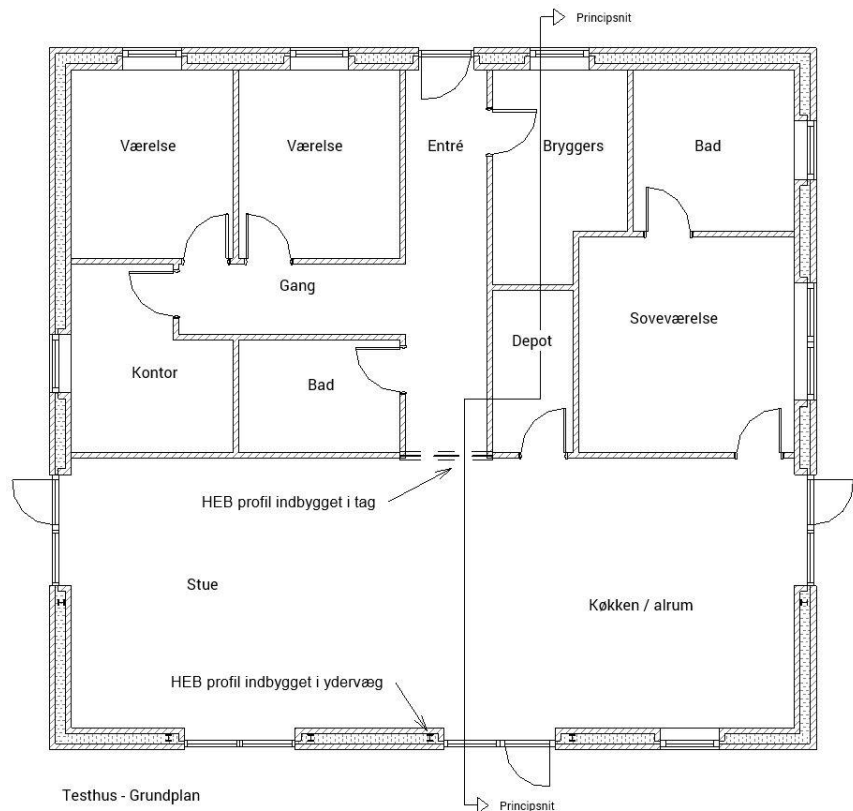
$$\theta_{krit} = \frac{237,3 \ln(\frac{1467,6}{610,5})}{17,269 - \ln(\frac{1467,6}{610,5})} = 12,70^\circ C$$

Ved de opstillede forhold kræves således en overfladetemperatur på 12,7°C for at sikre, at den relative fugtighed ikke overstiger 75%.

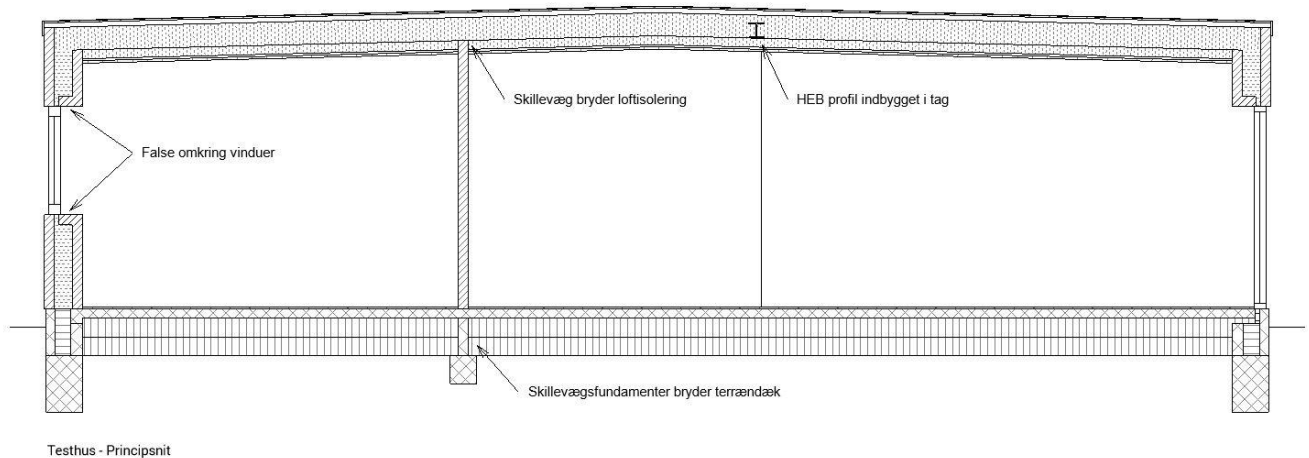
5 Metode

Som tidligere angivet behandles kuldebroerne både ud fra et energiteknisk og et fugtteknisk aspekt, for at kunne belyse forholdene omkring kuldebroerne og dermed besvare den opstillede problemstilling. I de følgende afsnit vil der blive redegjort for de anvendte metoder i bestræbelsen på at belyse de relevante forhold.

Til at vurdere kuldebroernes indflydelse tages der udgangspunkt i et testhus, der repræsenterer en typisk dansk enfamiliebolig. Boligen udgør 185,7 m² og er opbygget traditionelt med tunge ydervægge, flad tagkonstruktion og støbt terrændæk.



Billede 8 - Grundplan for testhus der danner grundlag for beregninger og simuleringer i nærværende rapport



Billede 9 - Principsnit for testhus der danner grundlag for beregninger og simuleringer i nærværende rapport

Boligens konstruktioner er opbygget som følger:

Tagkonstruktion:

- 2 lag tagpap
- 18 mm tagkrydsfinér
- 50 mm luftspalte
- 245 mm isolering – klasse 34
- Diffusionstæt dampspærre
- 95 mm isolering – klasse 34
- 22 mm spredt forskalling
- 25 mm træbetonplader

Vinduer/døre:

- 3 lags træ/aluminium partier
- 50 mm kuldebrosisolering

Terrændæk:

- 15 mm gulvbelægning
- 100 mm beton med gulvvarme
- 2 x 200 mm trykfast isolering – klasse 31

Fundamenter:

- 390 mm letklinkeblok med isolering
- Armeret beton

Ydervægge:

- 108 mm tegl
- 2 mm luftspalte
- 190 mm isolering – klasse 34
- 108 mm tegl

Skillevægsgfundamenter:

- 2 x 100 mm letklinkeblokke
- Armeret beton

5.1 Energiteknisk redegørelse

For at belyse hvorvidt kuldebroerne i klimaskærmen udgør en energiteknisk problematik, tages der udgangspunkt i det førnævnte testhus med indbyggede kuldebroer i klimaskærmen. Boligen gennemarbejdes rent energiteknisk ved at udføre tre forskellige energiberegninger, hvor kuldebroerne indgår på hver sin vis. De tre beregningsmetoder er som følger:

Beregning 1: Beregning hvor klimaskærmens konstruktioner indregnes som 'rene' U-værdier uden der tages højde for de indbyggede kuldebroer.

Beregning 2: Beregning hvor de indbyggede kuldebroer i klimaskærmens konstruktioner indregnes som en del af den samlede konstruktion, hvorved de enkelte konstruktioners U-værdier korrigeres for kuldebroerne.

Beregning 3: Beregning hvor de indbyggede kuldebroer indregnes særskilt som selvstændige linjetab og de 'rene' U-værdier på klimaskærmens konstruktioner bibeholdes.

Ved at udføre de tre ovennævnte energiberegninger kan det synliggøres, hvor stort bidrag de indbyggede kuldebroer medfører til boligens samlede varmetab, samt hvilket udslag dette giver for boligens samlede energibehov.

Til at udføre energiberegningerne benyttes beregningsprogrammet Be18, version 10.18.6.7.

5.2 Fugtteknisk redegørelse

For at belyse de fugttekniske problemstillinger omkring indbygning af kuldebroer i klimaskærmens konstruktioner, tages der igen udgangspunkt i det førnævnte testhus repræsenterende en typisk enfamiliebolig. Den fugttekniske analyse begrænses til kun at omfatte indbygningen af stålprofiler i klimaskærmen, da stålprofilerne er yderst varmeledende, og der ofte kun er mulighed for begrænset isolering omkring disse. I dette tilfælde vil analysen omfatte indbygning af stålprofiler i tagkonstruktion og ydervæg. Den fugttekniske redegørelse udføres med to forskellige fremgangsmetoder. Dette gøres for at skabe et komplet billede af problematikken, samt for at belyse hvor komplekse beregningsprogrammer, der er behov for, for at kunne vurdere de fugttekniske forhold. De to metoder er som følger:

Metode 1: Analyse af fugtigheden ind gennem konstruktionen beregnet som 1-dimensionel på konstruktionens 'rene' tværsnit. Dette forsøges udført idet stålprofilerne ikke i sig selv transporterer fugt med sig ind gennem konstruktionen som følge af det manglende poresystem i stålet (Brandt, 2. udgave 2013). Fugtigheden i konstruktionen fastlægges med beregningsprogrammet WUFI Pro, version 6,3. Temperaturforløbet i konstruktionen omkring de indbyggede stålprofiler beregnes som den 2-dimensionelle varmestrøm med beregningsprogrammet HEAT2, version 10.12. De fremkomne temperaturforløb, som følge af de indbyggede stålprofiler, sammenholdes med fugtigheden ind gennem konstruktionen fra WUFI Pro. Idet stålprofilerne medfører ændrede temperaturforløb, end det er tilfældet i WUFI simuleringen, fremkommer der ligeledes ændrede relative fugtigheder ind gennem konstruktionerne.

Metode 2: Simulering af både temperatur- og fugtforhold ind gennem konstruktionen som 2-dimensionel simulering. Der er her tale om en mere detaljeret og tidskrævende metode til vurdering af temperatur- og fugtforhold. Til at udføre simuleringerne benyttes beregningsprogrammet WUFI 2D, version 4,1.

6 Beregningsforudsætninger

I det følgende gennemgås hvilke beregningsforudsætninger, der er anvendt i de enkelte simuleringsprogrammer. De enkelte afsnit er opdelt programvis, og giver derfor et overblik over hvilke forudsætninger, der er benyttet i hvert enkelt program.

6.1 Energiberegning – Be18

Idet der udføres 3 separate energiberegninger, benyttes ligeledes 3 separate sæt input data. De 3 datasæt ligger dog kun med enkelte variationer til hinanden. Da det er de indbyggede kuldebroer, der ønskes undersøgt, er der også kun her der fremtræder variationer mellem de enkelte beregninger. I alle tilfælde er U-værdier, linjetabskoefficienter, B-faktorer, transmissionsarealer mv. fastlagt i henhold til DS 418, 7. udgave, samt SBI Anvisning 213, 6. udgave.

6.1.1 Forandrede data i de 3 energiberegninger

U-værdier – konstruktioner:

Detaljeret beregning af U-værdier er udført i bilag 1 og bilag 2

Position	Beregning 1	Beregning 2	Beregning 3
Tagkonstruktion	0,11 W/m ² K	0,11 W/m ² K	0,11 W/m ² K
Ydervægge	0,16 W/m ² K	0,18 W/m ² K	0,16 W/m ² K
Terrændæk	0,07 W/m ² K	0,08 W/m ² K	0,07 W/m ² K

Det bemærkes her, at U-værdien for tagkonstruktionen er uændret, til trods for der er korrigeret for det indbyggede stålprofil. Årsagen hertil er, at stålprofilet udgør en så lille del af tagkonstruktionen, at det ikke giver sig til kende ved U-værdier oplyst med to decimaler. Såfremt U-værdierne skulle indregnes med tre decimaler, havde de været henholdsvis 0,106 W/m²K for beregning 1 og 3 samt 0,107 W/m²K for beregning 2.

Linjetabskoefficienter:

Detaljeret beregning af linjetabskoefficienter for beregning 3 er udført i bilag 3

Position	Beregning 1	Beregning 2	Beregning 3
Linjetab ved ydervægsgfundamenter under ydervæg	0,12 W/mK	0,12 W/mK	0,12 W/mK
Linjetab ved ydervægsgfundamenter under vinduer/døre	0,15 W/mK	0,15 W/mK	0,15 W/mK
Samling omkring vinduer/døre ved ydervæg	0,01 W/mK	0,01 W/mK	0,01 W/mK
Negativt linjetab ved udvendige hjørner af ydervæg	-0,08 W/mK	-0,08 W/mK	-0,08 W/mK
Negativt linjetab ved samling mellem tag og ydervæg	-0,07 W/mK	-0,07 W/mK	-0,07 W/mK
Udmuret false omkring vinduer/døre			0,04 W/mK
Skillevægge der bryder isolering i loft			0,01 W/mK
Skillevægsgfundamenter der bryder isolering i terrændæk			0,02 W/mK
Indbygget HEB120 profil i ydervæg			0,04W/mK
Indbygget HEB160 profil i tagkonstruktion			0,02 W/mK

6.1.2 Uforandrede data der benyttes i alle 3 beregninger

U-værdier – vinduer/døre:

For vinduer og døre i klimaskærmen er energidata oplyst direkte fra producent med følgende værdier.

Position	U-værdi – W/m ² K	G-værdi - %	Glasandel - %
Vindue i væg	0,85	53	69
Vindue til gulv	0,71	53	86
Terrassedør	0,86	53	62
Facadedør	0,89	53	62

Tekniske installationer:

I Be18 beregningerne medtages tekniske installationer til boligen med energidata oplyst direkte fra producent. De tekniske installationer omfatter følgende:

- Opvarmning som fjernvarme uden varmeveksler.
- Ventilationsanlæg med varmegenvinding. Temperaturvirkningsgrad på 0,88 og specifikt elforbrug pålydende 1,0 kJ/m³.
- Fordelingspumpe til gulvvarmeanlæg med nominel effekt pålydende 34 W
- Gennemstrømningsvandvarmer til varmt brugsvand med varmetab pålydende 0,6 W/K

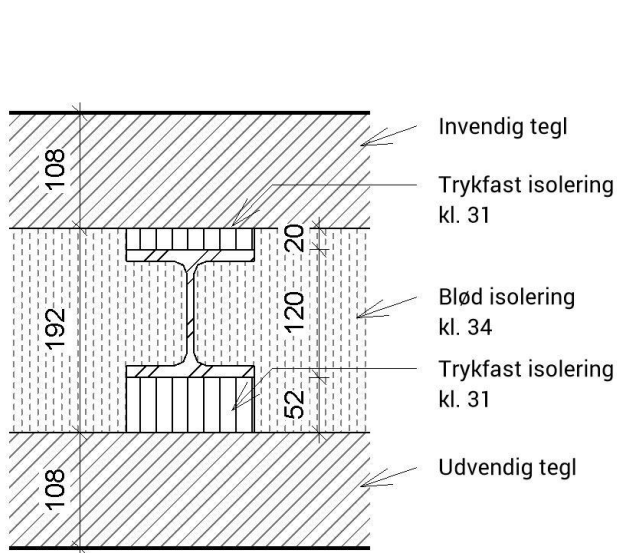
Boligen indregnes desuden med en lufttæthed pålydende 1,0 l/s pr. m² svarende til kravet i Bygningsreglement 2018.

6.2 Fugttekniske beregninger

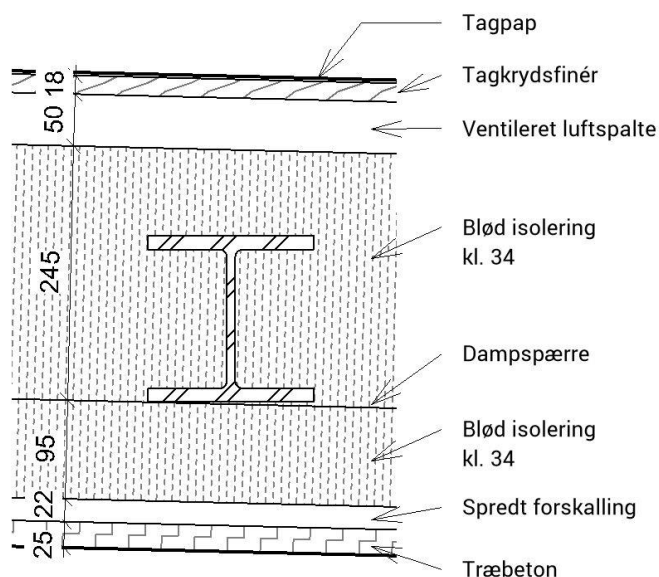
De fugttekniske beregninger begrænses til at omfatte følgende to udvalgte kuldebroer:

- Indbygning af HEB120 profil i ydervæg
- Indbygning af HEB160 profil i tagkonstruktion

Dimensionerne på stålprofilerne er valgt ud fra en erfaringsmæssig betragtning idet de pågældende dimensioner ofte ses anvendt i enfamilieboliger. De fugttekniske beregninger tager dermed udgangspunkt i en virkelighedstro situation. De følgende beregninger og simuleringer er udført ud fra placering af stålprofilerne som angivet på billede 10 og 11.



Billede 10 - Vandret snit i ydervæg ved indbygget HEB120 profil



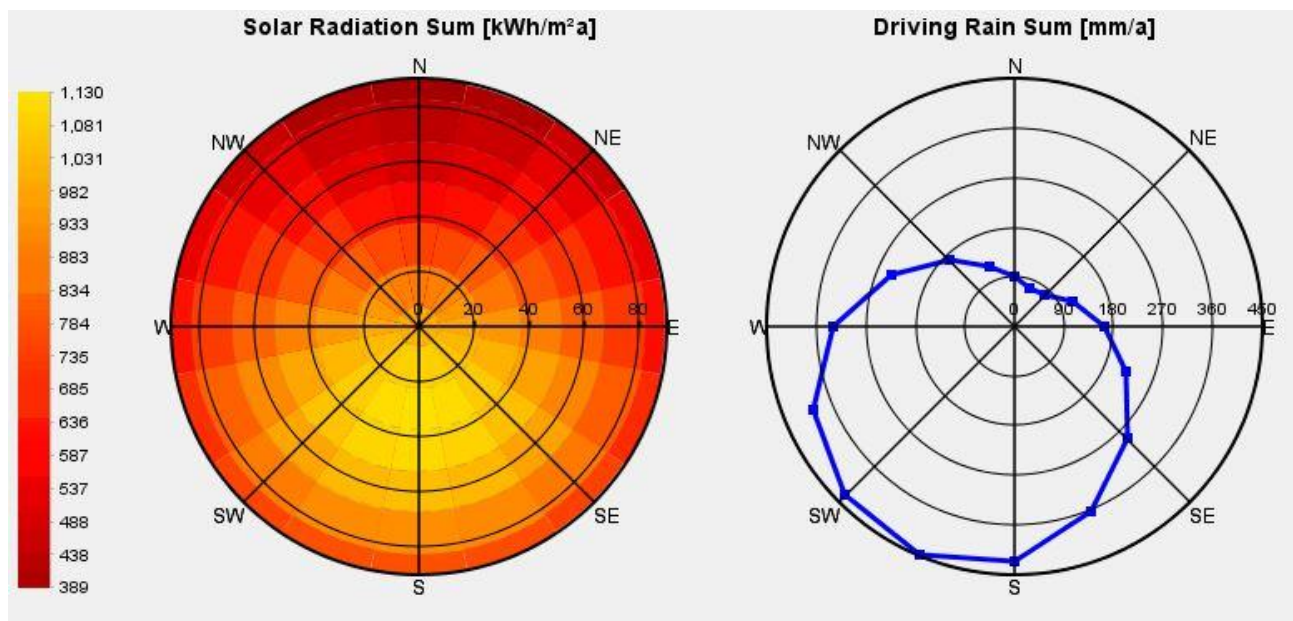
Billede 11 - Lodret snit i tagkonstruktion ved indbygget HEB160 profil

6.2.1 WUFI Pro

Til at bestemme den 1-dimensionelle fugtvandring gennem konstruktionerne – henholdsvis ydervæg og tagkonstruktion benyttes simuleringsprogrammet WUFI Pro. I simuleringerne er der benyttet følgende datasæt for ude- og indeklima.

Udeklima for Lund, Sverige med følgende data (Frauenhofer, v. 6.3):

- Middeltemperatur 9,2 °C
- Maksimum temperatur 28,3 °C
- Minimum temperatur -10,1 °C
- Middel relativ fugtighed 81%
- Maksimum relativ fugtighed 97%
- Minimum relativ fugtighed 25%
- Middel vindhastighed 3,5 m/s
- Nedbørsmængde 817,5 mm

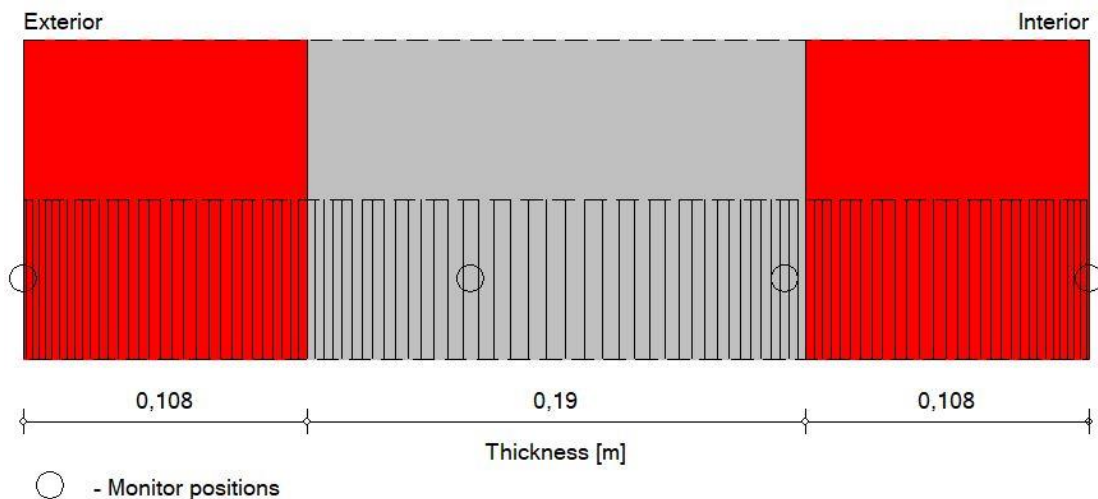


Billede 12 - Vejrpåvirkning fra udeklimaet i forhold til orientering

Indeklimaet indregnes som fugtbelastningsklasse 2 i henhold til DS/EN ISO 13788, hvorved indeklimaets fugtniveau bestemmes ud fra udeklimaet med tilhørende fugttilskud. Indvendig middeltemperatur indregnes som 20,0 °C

Simuleringen af henholdsvis ydervæg og tagkonstruktion foretages over 3 år med beregningsinterval på én time. Resultaterne, der benyttes i de efterfølgende sammenstillinger, udgør det 3. af simuleringsårene, hvorved fugtniveauerne ind gennem konstruktionerne er stabiliseret, og den angivne startfugtighed i konstruktionen ikke påvirker resultaterne.

6.2.1.1 Ydervæg



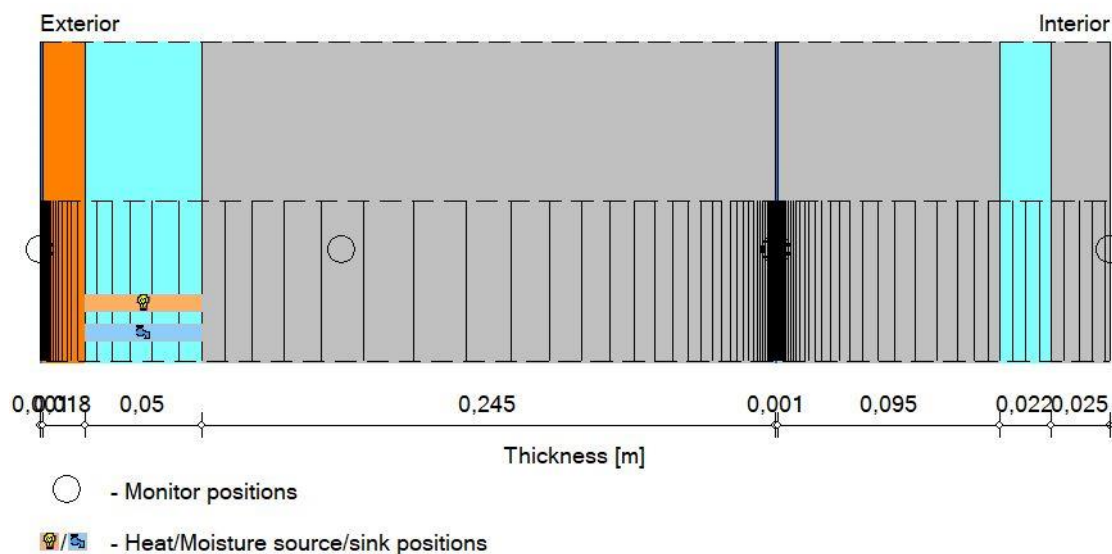
Billede 13 - Model af ydervæg opbygget i WUFI Pro

Materiale	Densitet Kg/m ³	Varmekapacitet J/kgK	Varmeledningsevne W/mK	Vanddampdiffusions- Modstandsfaktor μ
Tegl inde og ude	1900	850	0,6	10 (Z-værdi = 6)
Blød isolering	40	850	0,034	1,3

Væggen indregnes som lodretstående facade orienteret mod nord med slagregnsværdierne R1=0 og R2=0,07. Overfladeegenskaberne på væggen er indregnet som følger:

- Indvendig overgangsisolans 0,13 m²K/W
- Udvendig overgangsisolans 0,04 m²K/W
- Absorberet andel af kortbølgestråling 0,68
- Andel af reflekteret kortbølgestråling fra omgivelserne 0,20
- Blivende andel af regn på facaden 0,70

6.2.1.2 Tagkonstruktion



Billede 14 - Model af tagkonstruktion opbygget i WUFI Pro

Materiale	Densitet Kg/m ³	Varmekapacitet J/kgK	Varmeledningsevne W/mK	Vanddampdiffusions- Modstandsfaktor - μ
Tagpap	2400	1000	0,5	100000
Tagkrydsfinér	500	1400	0,1	700
Ventileret spalte (30h ⁻¹)	1,3	1000	0,28	0,32
Blød isolering	40	850	0,034	1,3
Dampspærre	130	2300	2,3	50000 (Z-værdi = 263)
Blød isolering	40	850	0,034	1,3
Spredt forskalling	1,3	1000	1,55	0,51
Træbeton	420	1400	0,07	5,7

Taget indregnes med 0 graders hældning og med slagregnsværdierne R1=1 og R2=0. Overfladeegenskaberne på taget er indregnet som følger:

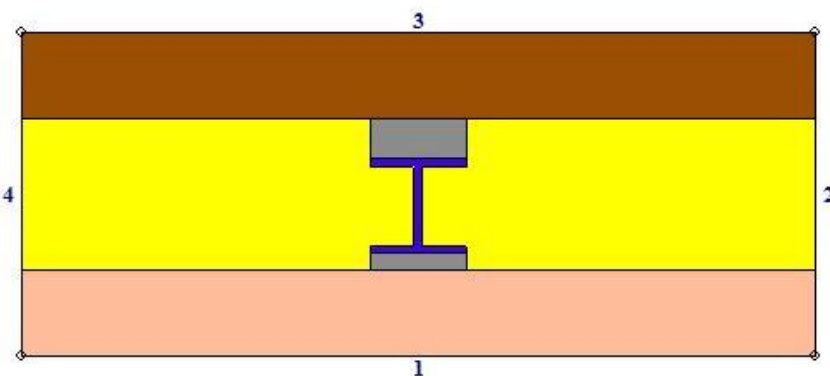
- Indvendig overgangsisolans 0,10 m²K/W
- Udvendig overgangsisolans 0,04 m²K/W
- Absorberet andel af kortbølgestråling 0,88
- Andel af reflekteret kortbølgestråling fra omgivelserne 0,20
- Blivende andel af regn på taget 1,00

6.2.2 HEAT2

Til at bestemme temperaturforholdene omkring de indbyggede stålprofiler i HEAT2 er der anvendt data som angivet i det følgende.

Beregningerne gennemføres med månedsvise stationære forhold, og temperatursættet for henholdsvis indvendig og udvendig side af konstruktionerne er taget ud fra simuleringerne udført i WUFI Pro. Temperatursættet fra WUFI Pro er anvendt for at have et sammenligneligt grundlag, når resultaterne skal sammenholdes med den senere simulering i WUFI 2D. Temperatursættet fra WUFI Pro angiver overfladetemperaturene på konstruktionerne og dermed ikke lufttemperaturen. Som følge heraf indregnes der ikke overgangsisolanser i HEAT2 beregningen. Det benyttede temperatursættet for ydervæg og tagkonstruktion er angivet i de følgende afsnit.

6.2.2.1 Ydervæg



Billede 15 - HEAT2 opstilling af HEB120 profil i ydervæg

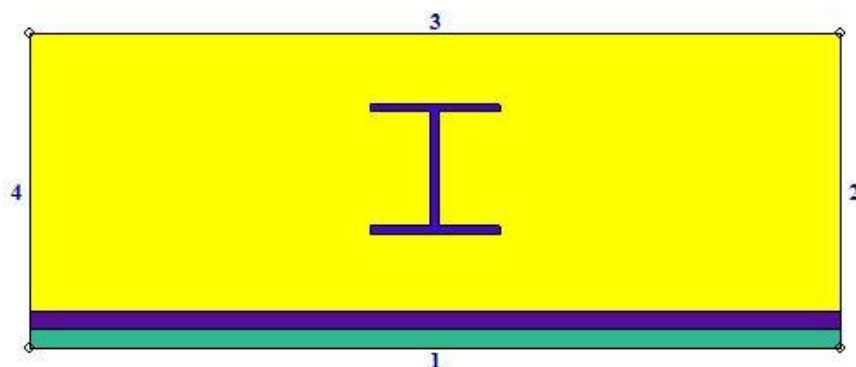
- Indvendig tegl 0,62 W/mK
- Udvendig tegl 0,74 W/mK
- Blød isolering 0,034 W/mK
- Hård isolering 0,031 W/mK
- Stålprofil 55,0 W/mK

Beregningsnettet er inddelt i kvadrater med maskestørrelser på ca. 10 mm – dog sammenpresset omkring HEB120 profilet.

Temperatursæt for indvendig og udvendig overflade er benyttet som følger:

Måned	Temp. ude	Temp. inde	Måned	Temp. ude	Temp. inde
Januar	3,10	19,64	Juli	20,68	20,07
Februar	2,85	19,63	August	18,65	19,96
Marts	4,25	19,66	September	17,29	19,91
April	9,02	19,77	Oktober	9,88	19,70
Maj	12,84	19,87	November	5,50	19,66
Juni	17,48	19,99	December	2,75	19,62

6.2.2.2 Tagkonstruktion



Billede 16 - HEAT2 opstilling af HEB160 profil indbygget i tagkonstruktion

- Blød isolering 0,034 W/mK
- Stålprofil 55,0 W/mK
- Spredt forskalling 0,16 W/mK
- Træbeton 0,076 W/mK

Beregningsnettet er inddelt i kvadrater med maskestørrelser på ca. 10 mm – dog sammenpresset omkring HEB160 profilet.

Idet der indgår et ventileret lag i tagkonstruktionen, ses der bort fra de lag i konstruktionsopbygningen, der ligger uden for det ventilerede lag. Overfladetemperaturen der er benyttet udvendig, er derfor temperaturen på oversiden af isoleringslaget.

Temperatursæt for indvendig og udvendig overflade er benyttet som følger:

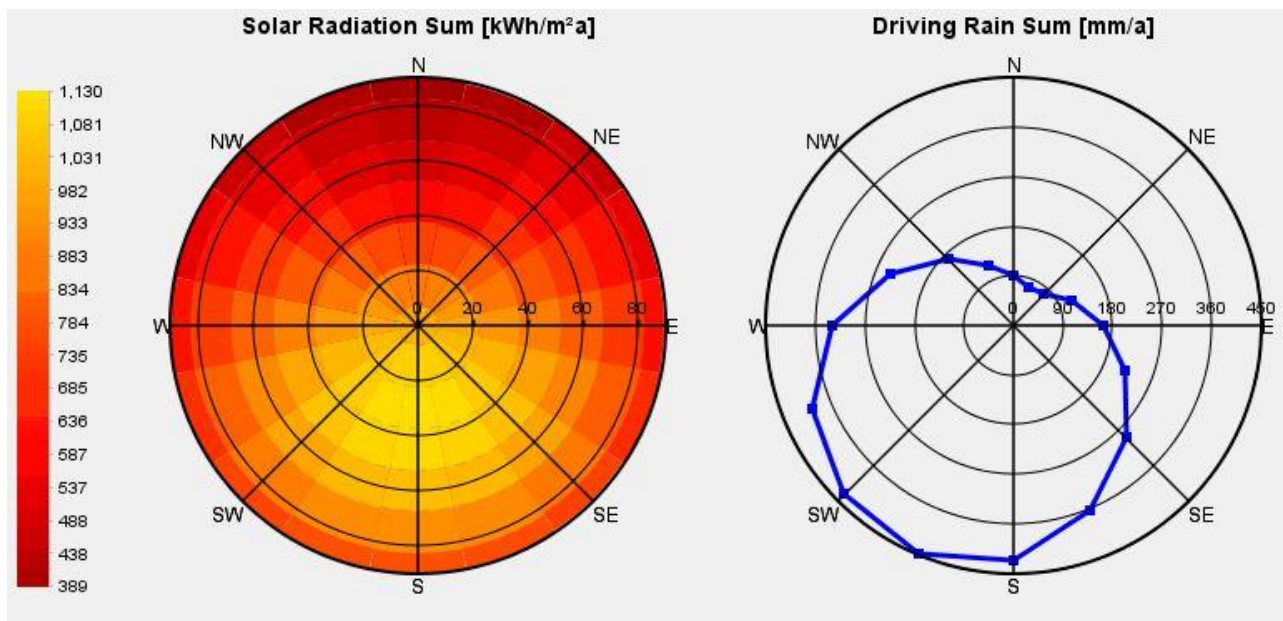
Måned	Temp. ude	Temp. inde	Måned	Temp. ude	Temp. inde
Januar	3,99	19,85	Juli	25,43	20,07
Februar	4,76	19,85	August	22,30	20,03
Marts	6,21	19,87	September	20,36	20,00
April	12,77	19,73	Oktober	11,40	19,89
Maj	17,41	19,99	November	6,45	19,86
Juni	22,11	20,04	December	3,60	19,84

6.2.3 WUFI 2D

Til at bestemme de 2-dimensionelle strømninger af både varme og fugt, er der benyttet simuleringsprogrammet WUFI 2D. WUFI 2D giver mulighed for at modellere henholdsvis ydervæg og tagkonstruktion som en 2-dimensionel model med de indbyggede HEB profiler, hvorved både fugt- og varmetransport analyseres sideløbende internt i programmet. I simuleringerne er det benyttet samme datasæt for ude- og indeklima som i WUFI Pro simuleringerne. Datasættet er som følger:

Udeklima for Lund, Sverige med følgende data (Fauenhofer, v. 4.1):

- Middeltemperatur 9,2 °C
- Maksimum temperatur 28,3 °C
- Minimum temperatur -10,1 °C
- Middel relativ fugtighed 81%
- Maksimum relativ fugtighed 97%
- Minimum relativ fugtighed 25%
- Middel vindhastighed 3,5 m/s
- Nedbørsmængde 817,5 mm

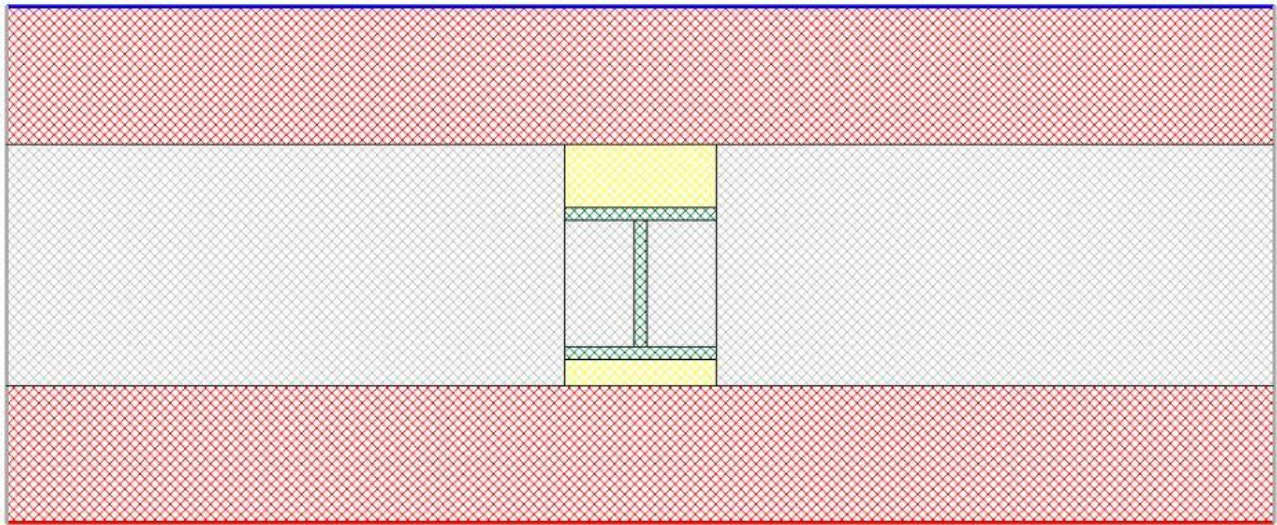


Billede 17 - Vejrpåvirkning fra udeklimaet i forhold til orientering

Indeklimaet indregnes som fugtbelastningsklasse 2 i henhold til DS/EN ISO 13788, hvorved indeklimaets fugtniveau bestemmes ud fra udeklimaet med tilhørende fugttilskud. Indvendig middeltemperatur indregnes som 20,0 °C

Som det også var tilfældet ved simuleringerne i WUFI Pro foretages simuleringerne på henholdsvis ydervæg og tagkonstruktion over 3 år med beregningsinterval på én time. Resultaterne, der benyttes i de efterfølgende sammenstillinger, udgør det 3. af simuleringsårene, hvorved fugtniveauerne ind gennem konstruktionerne har stabiliseret sig, og den angivne startfugtighed i konstruktionen ikke påvirker resultaterne.

6.2.3.1 Ydervæg



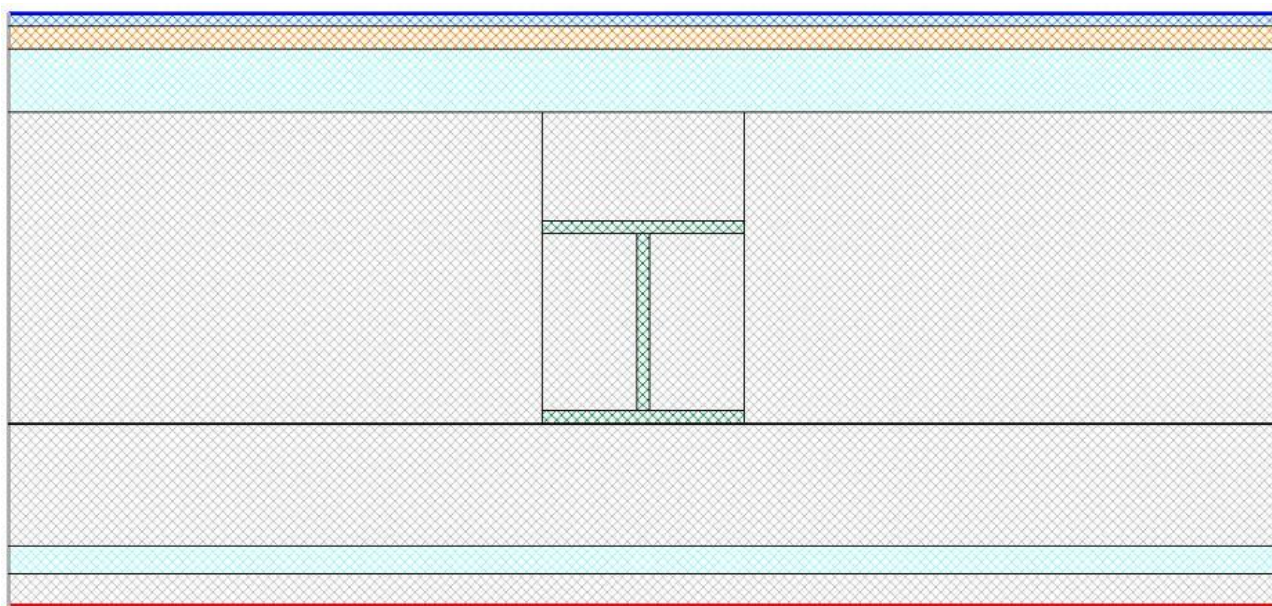
Billede 18 - Model af ydervæg opbygget i WUFI 2D

Materiale	Densitet Kg/m ³	Varmekapacitet J/kgK	Varmeledningsevne W/mK	Vanddampdiffusions- Modstandsfaktor - μ
Tegl inde og ude	1900	850	0,6	10 (Z-værdi = 6)
Blød isolering	40	850	0,034	1,3
Hård isolering	15	1500	0,038	1,5
HEB profil	7800	500	55,0	50000

Væggen indregnes som lodretstående facade orienteret mod nord med slagregnsværdierne $R1=0$ og $R2=0,07$. Overfladeegenskaberne på væggen er indregnet som følger:

- Indvendig overgangsisolans 7,7 W/m²K (0,13 m²K/W)
- Udvendig overgangsisolans 25 W/m²K (0,04 m²K/W)
- Absorberet andel af kortbølgestråling 0,68
- Andel af reflekteret kortbølgestråling fra omgivelserne 0,20
- Blivende andel af regn på facaden 0,70

6.2.3.2 Tagkonstruktion



Billede 19 - Model af tagkonstruktion opbygget i WUFI 2D

Materiale	Densitet Kg/m ³	Varmekapacitet J/kgK	Varmeledningsevne W/mK	Vanddampdiffusions- Modstandsfaktor - μ
Tagpap	2400	1000	0,5	100000
Tagkrydsfinér	500	1400	0,1	700
Ventileret (30h ⁻¹)	spalte 1,3	1000	0,28	0,32
Blød isolering	40	850	0,034	1,3
HEB profil	7800	500	55,0	50000
Dampspærre	130	2300	2,3	50000 (Z-værdi = 263)
Blød isolering	40	850	0,034	1,3
Spredt forskalling	1,3	1000	1,55	0,51
Træbeton	420	1400	0,07	5,7

Taget indregnes med 0 graders hældning og med slagregnsværdierne R1=1 og R2=0. Overfladeegenskaberne på taget er indregnet som følger:

- Indvendig overgangsisolans	10 W/m ² K (0,10 m ² K/W)
- Udvendig overgangsisolans	25 W/m ² K (0,04 m ² K/W)
- Absorberet andel af kortbølgestråling	0,88
- Andel af reflekteret kortbølgestråling fra omgivelserne	0,20
- Blivende andel af regn på taget	1,00

7 Resultater

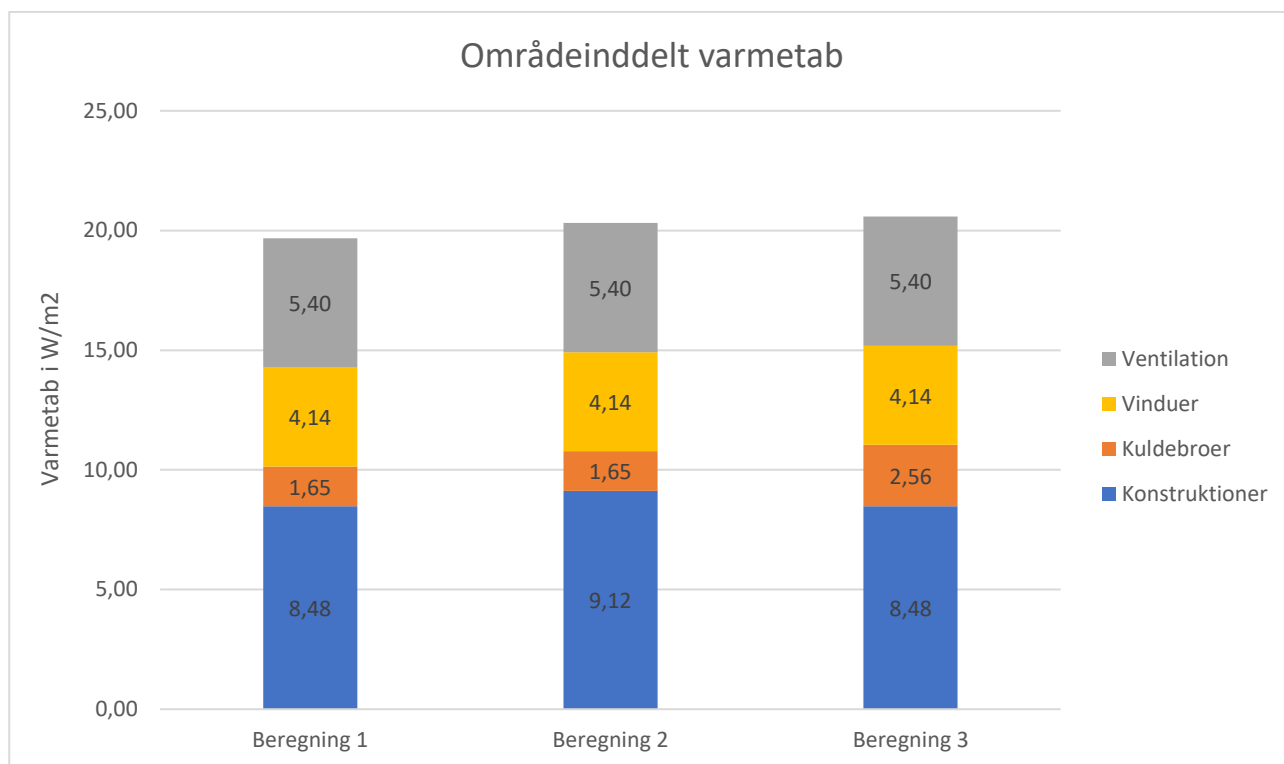
I de følgende afsnit gennemgås resultaterne fra de udførte beregninger og simuleringer. Resultaterne er opdelt således, der først fokuseres på den energimæssige indvirkning af kuldebroerne, hvorefter der fokuseres tilsvarende for den fugttekniske indvirkning. I hvert afsnit opgives de fremkomne resultater med en tilhørende delkonklusion.

7.1 Energiberegning – Be18

For at belyse den energimæssige indvirkning af indbyggede kuldebroer i klimaskærmens konstruktioner, er der udført 3 separate energiberegninger. De 3 energiberegninger adskiller sig fra hinanden på følgende vis:

<u>Beregning 1:</u>	Beregning hvor klimaskærmens konstruktioner indregnes som 'rene' U-værdier uden der tages højde for de indbyggede kuldebroer.
<u>Beregning 2:</u>	Beregning hvor de indbyggede kuldebroer i klimaskærmens konstruktioner indregnes som en del af den samlede konstruktion, hvorved de enkelte konstruktioners U-værdier korrigeres for kuldebroerne.
<u>Beregning 3:</u>	Beregning hvor de indbyggede kuldebroer indregnes særskilt som selvstændige linjetab og de 'rene' U-værdier på klimaskærmens konstruktioner bibeholdes.

For at belyse den energimæssige indvirkning af kuldebroerne ses der i følgende opstilling nærmere på boligens samlede varmetab ved de 3 beregninger.



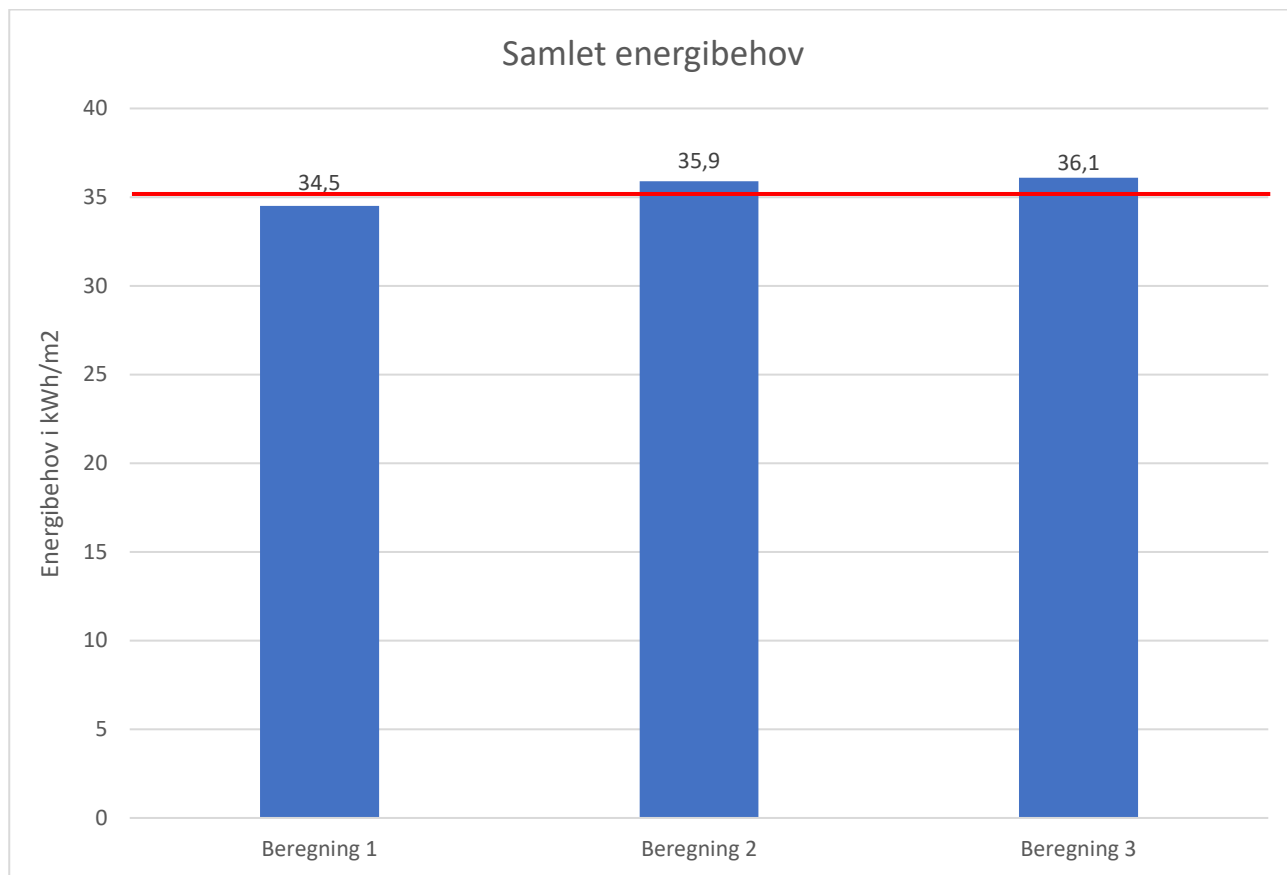
Figur 7 - Overblik over testhusets varmetab fordelt ud på de 4 væsentlige områder. Varmetab fra varmeveksler i ventilationsanlæg, samt fra varmerør indgår ikke i nærværende opstilling, idet de udgør så lille en del af det samlede varmetab, at de anses som værende uvæsentlige.

Som forventet giver indregningen af kuldebroerne et udslag på boligens samlede varmetab. På det pågældende testhus bevirker indregningen af kuldebroerne, at det samlede varmetab stiger med 4,6% fra 19,67 W/m² til 20,58 W/m². Disse tal er dog inklusiv varmetabene som følge af transmissionstab gennem vinduer samt ventilationstab ved luftskifte.

Ses der i stedet kun på tallene for varmetab som følge af transmissionstab gennem konstruktioner samt transmissionstab som følge af kuldebroer, så bevirker indregningen af kuldebroerne, at varmetabet stiger med 9,0% fra 10,13 W/m² til 11,04 W/m². Hvorvidt denne stigning kan betegnes som stor eller lille beror på et subjektivt udsagn. Dog kan det konkluderes, at varmetabet gennem de indbyggede kuldebroer i testhuset ikke er så stort som de anslåede værdier, der findes i litteraturen. Heri defineres det, at man bør forøge de 'rene' U-værdier med 50-70%, såfremt de indbyggede kuldebroer ikke indregnes (Hansen E. J., 1. udgave 2018). Ligeledes viser undersøgelser i en nyligt udgivet rapport omhandlende kuldebroers betydning for varmetabet i etagebyggeri, at U-værdierne på de faste konstruktioner i visse tilfælde burde have været øget mod op mod 80% i forhold til de 'rene' U-værdier (MOE A/S, Arkitema Architects, NCC Danmark A/S, & VIA

Byggeri, Energi & Miljø, 2018). De angivne kuldebroer i testhuset udgør altså en væsentlig mindre del af det samlede varmetab, end det kunne frygtes.

Om det øgede varmetab anses som værende stort eller småt beror som sagt på et subjektivt udsagn, men hvorvidt det øgede varmetab er væsentlig eller ej, kan defineres helt præcist i dette tilfælde.



Figur 8 - Samlet energibehov for testhuset afhængig af metode for indregning af de indbyggede kuldebroer. Den røde markering angiver maksimalt tilladt energibehov.

I og med det samlede varmetab stiger som følge af de indbyggede kuldebroer, så medfører kuldebroerne også et øget energibehov på boligen. Kravet for maksimalt tilført energi til en nyopført bolig betegnes som:

$$\text{Maksimalt årligt energibehov i kWh/m}^2 = 30,0 + \frac{1000}{\text{opvarmet etageareal}}$$

I testhuset bevirker dette et maksimalt tilladt energibehov pålydende 35,4 kWh/m² pr. år. Som det ses i figur 8, bevirker indregningen af kuldebroer, at det samlede energibehov stiger fra 34,5 kWh/m² til 36,1 kWh/m² – i sig selv en relativ beskedne stigning på 4,6%, men netop nok til at kravet til boligens energibehov ikke længere efterleves. I dette tilfælde vil det øgede varmetab fra kuldebroerne dermed ikke kunne betragtes som værende uvæsentligt, til trods for den relativt beskedne størrelse.

7.2 Fugtteknisk beregning – HEAT2 og WUFI Pro

For at belyse den fugttekniske indvirkning af indbyggede stålprofiler i klimaskærmen, er der fokuseret på 2 udvalgte områder i testhuset.

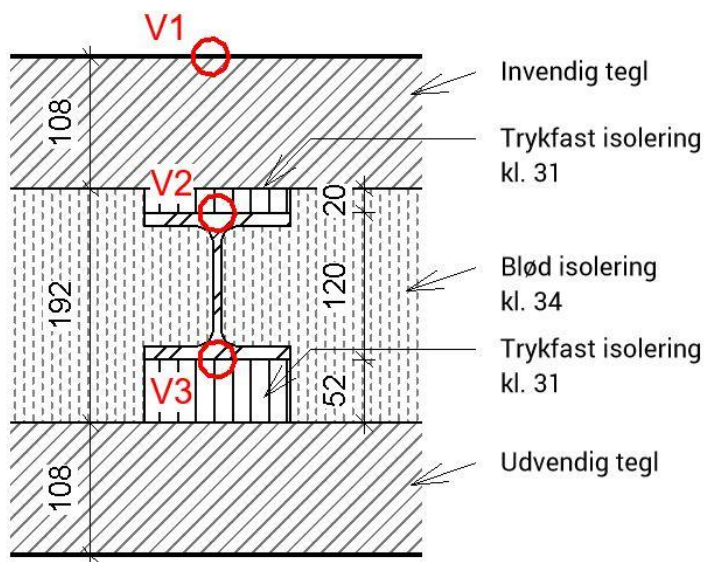
- Indbygning af HEB120 profil i ydervæg
- Indbygning af HEB160 profil i tagkonstruktion

Begge områder er analyseret gennem simuleringsprogrammerne HEAT2 og WUFI Pro med følgende resultater.

7.2.1 Ydervæg

For at vurdere de fugttekniske forhold i ydervægskonstruktionen, er der udvalgt 3 målepunkter, hvor fugt-, og temperaturforhold studeres nærmere. De 3 målepunkter fastsættes som:

- V1 - Indvendig overflade på bagmur
- V2 - Indvendig side af HEB profil
- V3 - Udvendig side af HEB profil

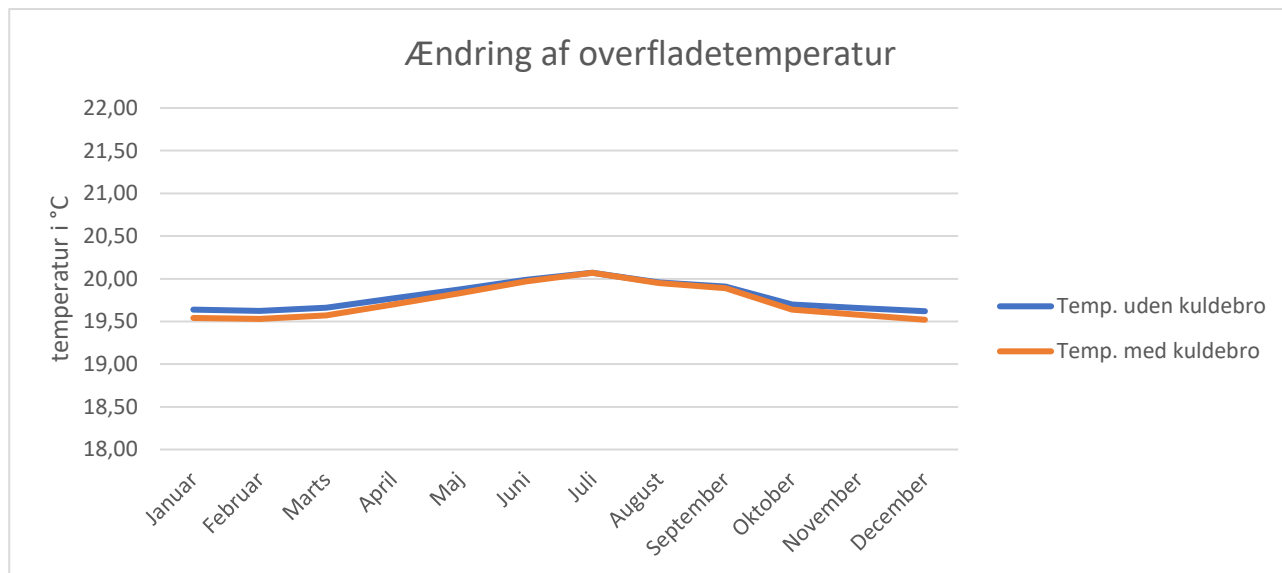


Billede 20 - Visuel fremstilling af de 3 målepunkter, der studeres nærmere. De 3 målepunkter er markeret med cirkler

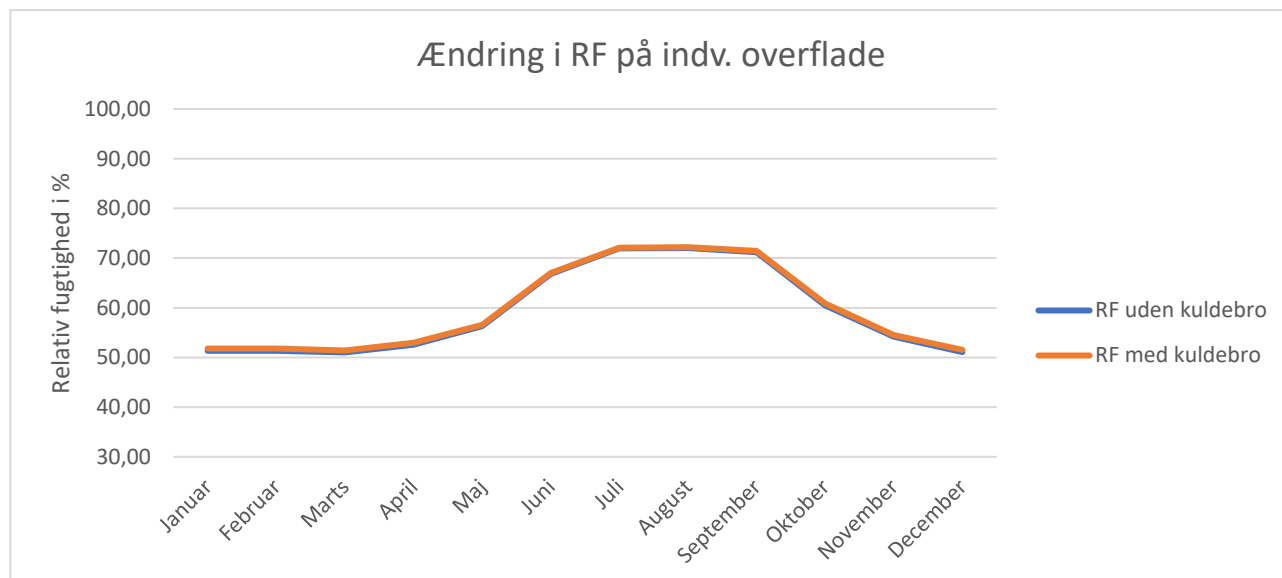
Målepunkt V1

Indledningsvis undersøges det, hvorvidt indbygningen af HEB profilet giver sig til kende som en målbar ændring af temperatur eller fugtforhold på den indvendige overflade ved målepunkt V1. Temperaturer uden den indbyggede kuldebro indgår som direkte data fra simulering med WUFI Pro på det 'rene' konstruktionstværsnit, mens temperaturer med indbygget kuldebro indgår som data fra HEAT2 beregning. Det bemærkes her, at temperaturerne fra HEAT2 er registreret 10 mm inde i konstruktionen. Dette gøres for at få et mere reelt billede af kuldebroens påvirkning. I og med der ikke er indregnet overgangsisolans i HEAT2

beregningen ville en registrering på overfladen vise samme temperatur som indetemperaturen uden synligt udslag fra kuldebroen.



Figur 9 - Overfladetemperatur på den indvendige side af ydervæggen (målepunkt V1) som følge af indbygget HEB120 profil

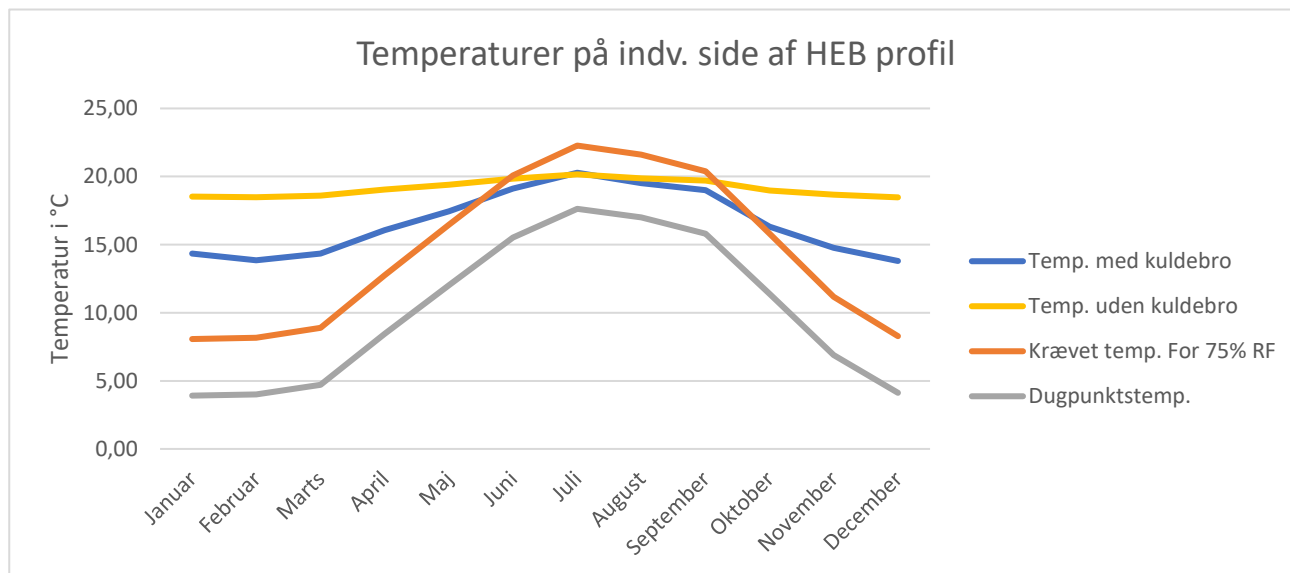


Figur 10 - Relativ fugtighed på den indvendige overflade af ydervæggen (målepunkt V1) som følge af indbygget HEB120 profil

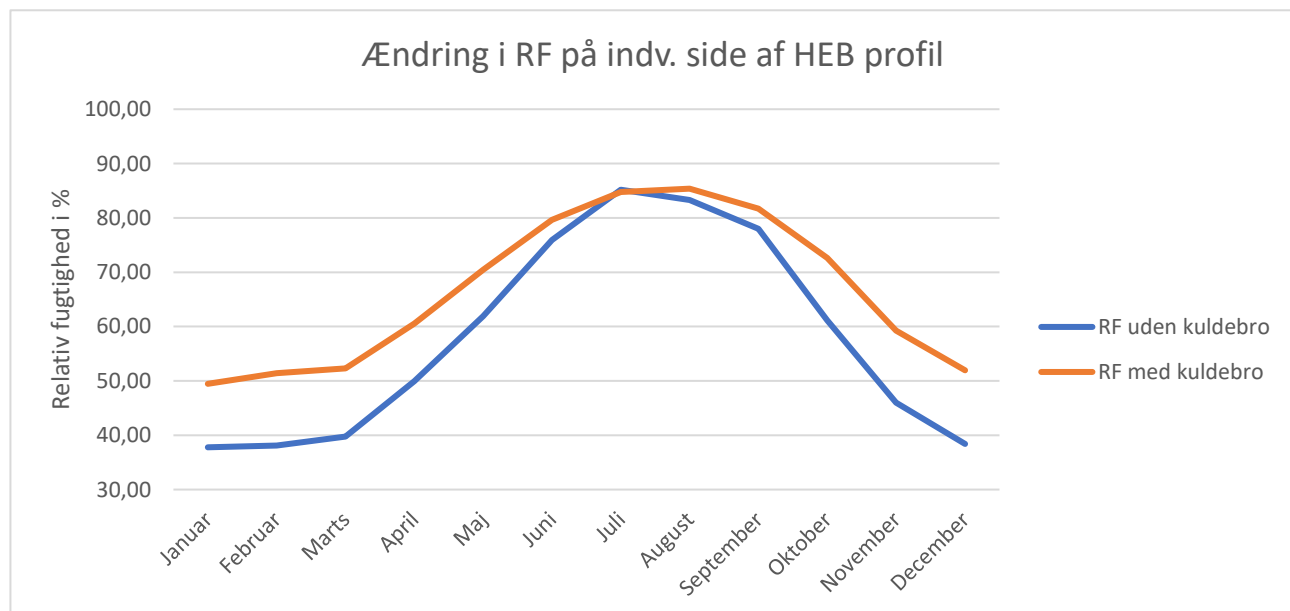
Nærværende opstillinger viser, at temperaturen på den indvendige overflade ændres minimalt i årets kolde måneder, mens der er helt sammenfaldende temperaturer i de varme måneder. Størst udslag forefindes i februar måned med et temperaturfald på 0,1 °C. Temperaturfaldet bevirker ikke nævneværdige ændringer i den relative fugtighed på overfladen.

Målepunkt V2

De to målepunkter inde i ydervæggen undersøges på tilsvarende vis. Igen fremkommer temperaturer uden den indbyggede kuldebro som følge af simulering med WUFI Pro på det 'rene' konstruktionstværsnit, mens temperaturer med indbygget kuldebro fremkommer som følge af HEAT2 beregning.



Figur 11 - Ændrede temperaturforhold i ydervæggen ved målepunkt V2, som følge af indbygget HEB120 Profil



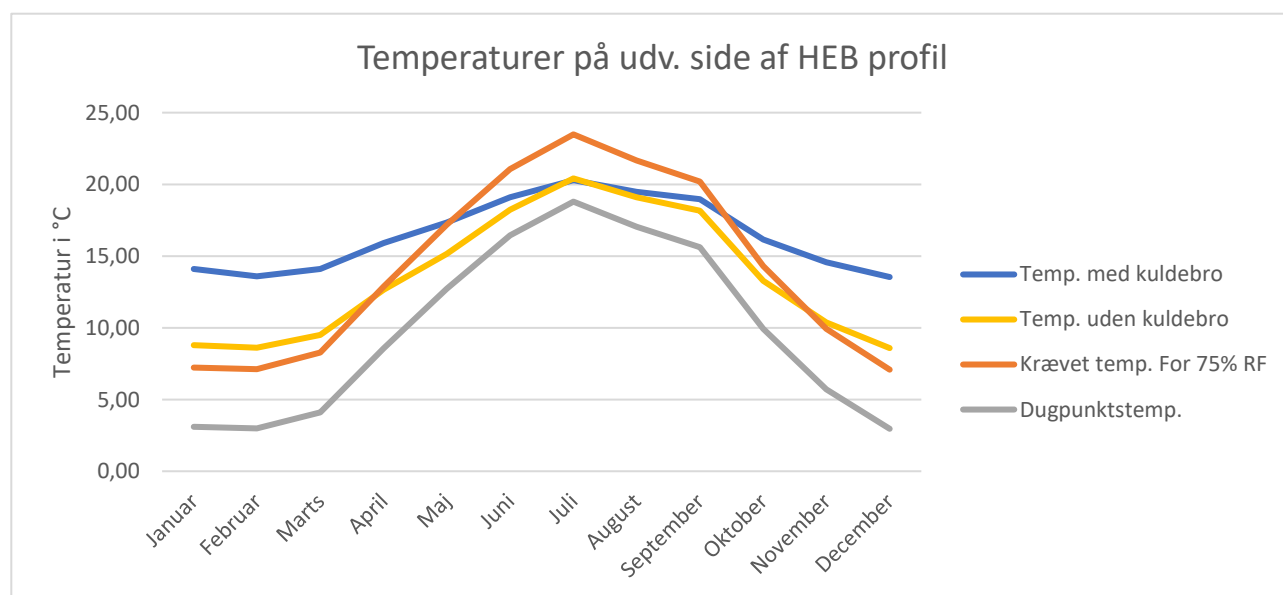
Figur 12 - Ændret fugtighed i ydervæg ved målepunkt V2, som følge af indbygget HEB120 profil

I modsætning til den indvendige overflade på ydervæggen sker der en temperaturændring og dermed også en ændring i fugtforholdet i ydervæggens hulmur ved målepunkt V2. HEB profilet medfører en generel lavere temperatur i målepunktet over hele året. Kun i juli måned er der sammenfaldende forhold mellem ydervæggen med og uden HEB profilet. Dette skyldes, at differensen mellem ude- og indetemperatur kun udgør 0,5°C i juli måned, mens den i januar og december er helt oppe på henholdsvis 16,5°C og 16,9°C. Der er dermed en direkte sammenhæng mellem størrelsen af temperaturdifferencen over ydervæggen og fugtniveauet omkring HEB profilet ved punkt V2.

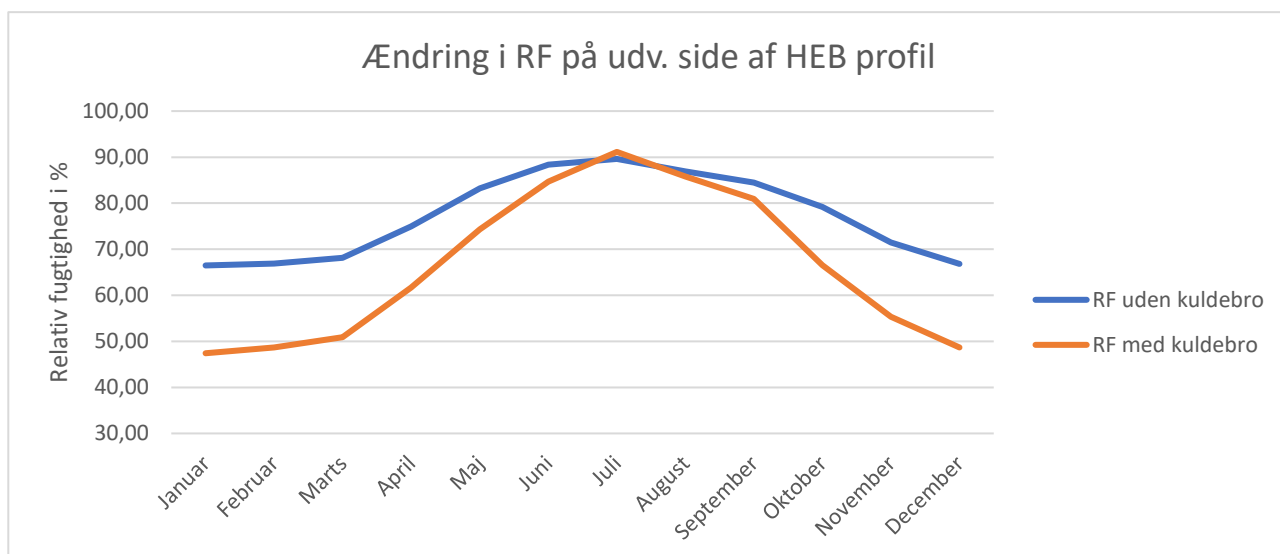
Fugtniveauet i målepunkt V2 viser samme tendens som temperaturændringen – blot i modsat retning. Mens temperaturen i målepunkt V2 generelt er lavere over hele året med den indbyggede kuldebro, er fugtniveauet tilsvarende højere. Dette viser den tætte sammenknytning mellem temperatur og relativ fugtighed som beskrevet i afsnit '4.2 Betegnelser for fugtindhold'. Det er her vigtigt at påpege, at det absolutte fugtindhold antages som værende uændret idet stålprofilet ikke bidrager med et reelt fugttilskud. Den øgede relative fugtighed er dermed en direkte effekt af luftens mindskede fugtkapacitet som følge af temperaturfaldet omkring HEB profilet.

Målepunkt V3

Målepunktpunkt V3 befinder sig 120mm længere mod den kolde side af konstruktionstværsnittet, hvorfor de tilstedeværende forhold adskiller sig fra forholdene i målepunkt V2. Dog kan der alligevel trækkes paralleller mellem de 2 målepunkter.

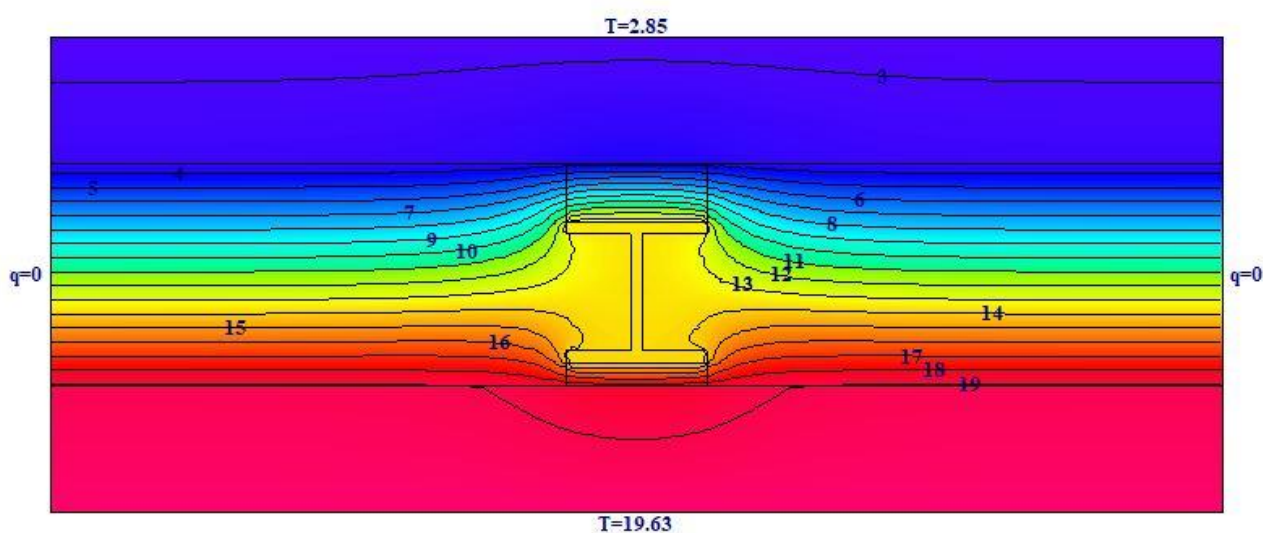


Figur 13 - Ændrede temperaturforhold i ydervæggen ved målepunkt V3, som følge af indbygget HEB120 Profil



Figur 14 - Ændret fugtighed i ydervæg ved målepunkt V3, som følge af indbygget HEB120 profil

I målepunkt V3 ses et parallelt billede af resultaterne fra målepunkt V2 – men med modsat fortegn. På samme vis som det indbyggede HEB120 profil bevirker, at de kolde temperaturer fra udeklimaet kan trænge længere ind i konstruktionen, så bevirker det også, at de varme temperaturer fra indeklimaet kan trække længere ud i konstruktionen. Der opstår således en passage gennem isoleringslaget, hvor ledning af kulde/varme kan ske uhindret i forhold til ledning igennem den omkringliggende isolering. Den øgede varmeledning ud igennem HEB profilet medfører derfor en generelt øget temperatur i målepunkt V3 over året med dertilhørende lavere relativfugtighed til følge.

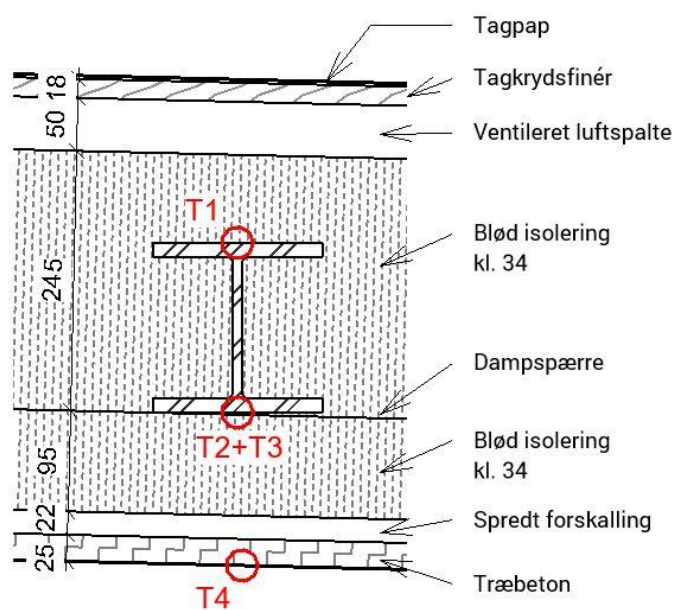


Billede 21 - HEAT2 opstilling af ydervæggen med indbygget HEB120 profil. Det ses hvordan HEB profilet udligner temperaturforskellen over isoleringslaget. Opstillingen er vist med overfladetemperaturer for februar måned.

7.2.2 Tagkonstruktion

For at vurdere de fugttekniske forhold i tagkonstruktionen er der udvalgt 4 målepunkter hvor fugt-, og temperaturforhold studeres nærmere. De 4 målepunkter fastsættes som:

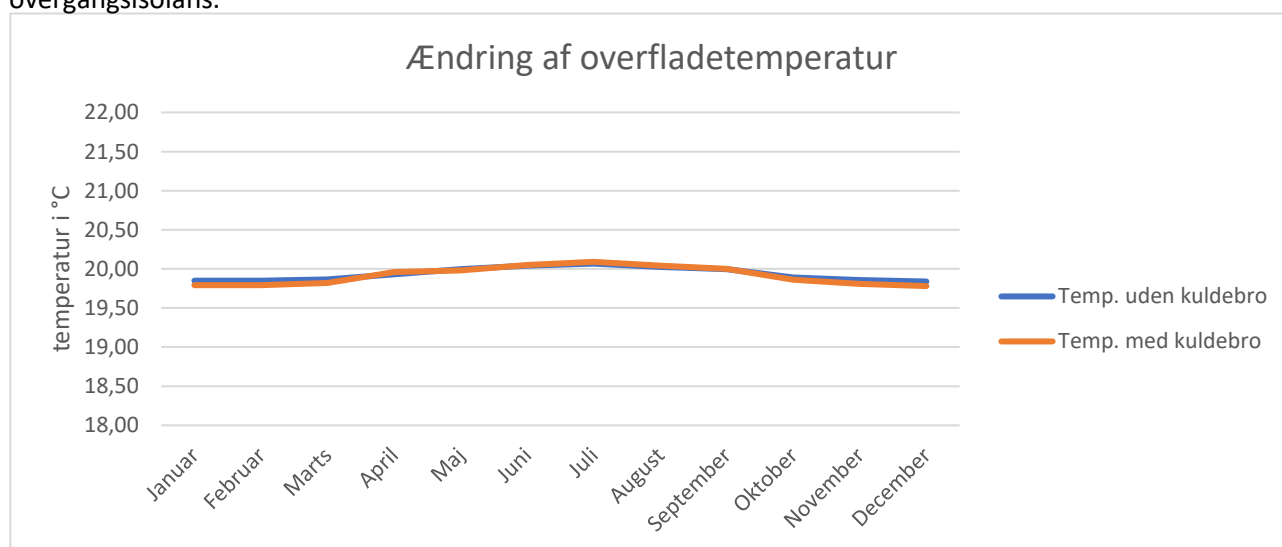
- T1 - Udvendig side af HEB profil
- T2 - Indvendig side af HEB profil, på den kolde side af dampspærre
- T3 - Indvendig side af HEB profil, på den varme side af dampspærre
- T4 - indvendig overflade på loft



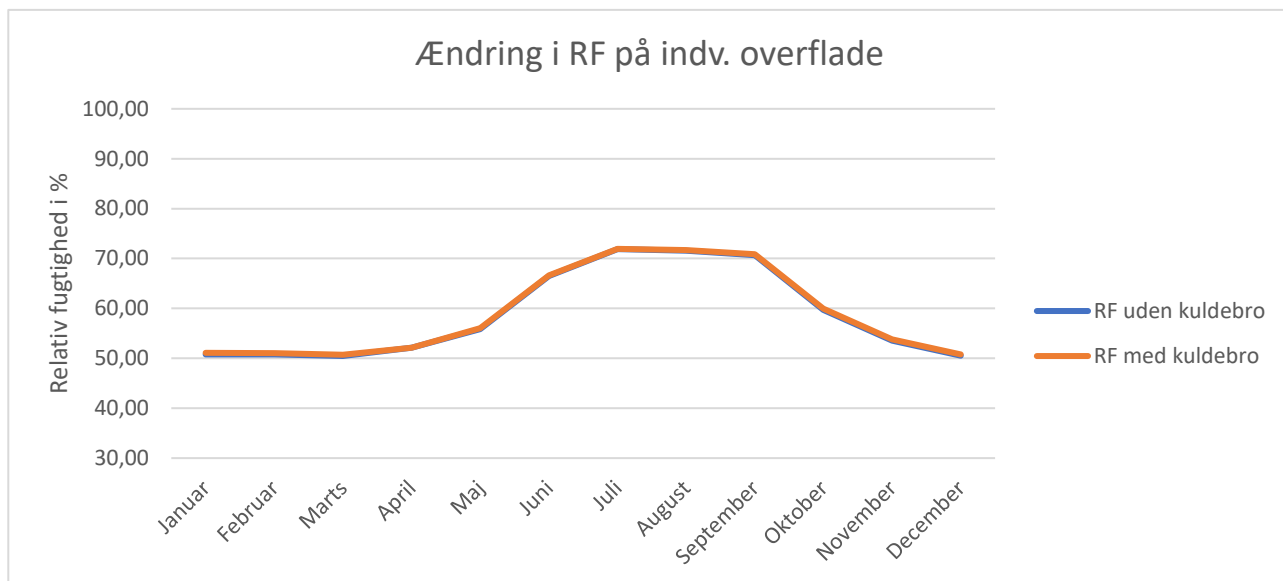
Billede 22 - Visuel fremstilling af de 4 målepunkter, der studeres nærmere. De 4 målepunkter er markeret med cirkler

Målepunkt T4

På samme vis som ved ydervæggen, undersøges det indledningsvis om indbygningen af HEB160 profilet giver sig til kende som en målbar faktor på den indvendige overflade i form af ændrede temperatur- eller fugtforhold. Temperaturforløbet for konstruktionen uden det indbyggede HEB profil er hentet som direkte data fra simulering i WUFI Pro på det 'rene' konstruktionstværsnit, mens temperaturforløbet med det indbyggede HEB profil er fremkommet som følge af HEAT2 beregninger. Som det også var tilfældet ved ydervæggen registreres temperaturen i HEAT2 umiddelbart under overfladen grundet den manglende overgangsisolans.



Figur 15 - Overfladetemperatur på den indvendige side af tagkonstruktionen (målepunkt T4) som følge af indbygget HEB160 profil

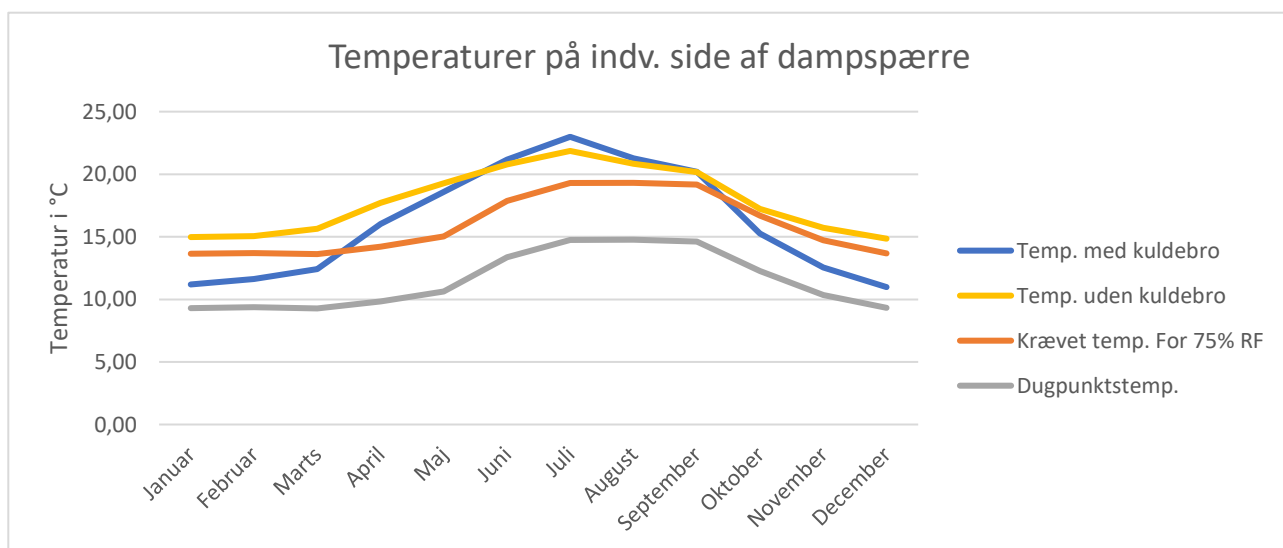


Figur 16 - Relativ fugtighed på den indvendige overflade af tagkonstruktionen (målepunkt T4) som følge af indbygget HEB160 profil

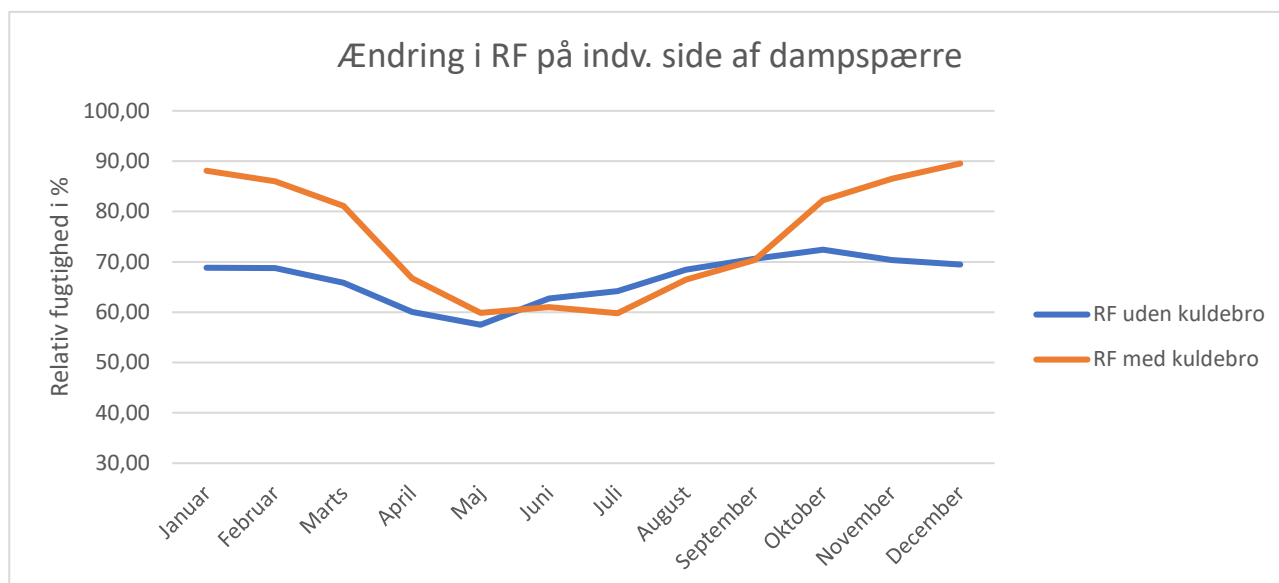
Opstillingerne viser, at indbygningen af HEB160 profilet kun giver sig meget begrænset til kende i form af ændrede temperatur eller fugtforhold på den indvendige overflade i målepunkt T4. Det største udslag ses på temperaturen i december måned med et temperaturfald på overfladen på 0,05°C

Målepunkt T3

De tre målepunkter inde i tagkonstruktionen undersøges på tilsvarende vis. Igen fremkommer temperaturer uden det indbyggede HEB profil som følge af simulering med WUFI Pro på det 'rene' konstruktionstværsnit, mens temperaturer med indbygget kuldebro fremkommer som følge af HEAT2 beregning.



Figur 17 - Ændrede temperaturforhold i tagkonstruktionen ved målepunkt T3, som følge af indbygget HEB160 Profil



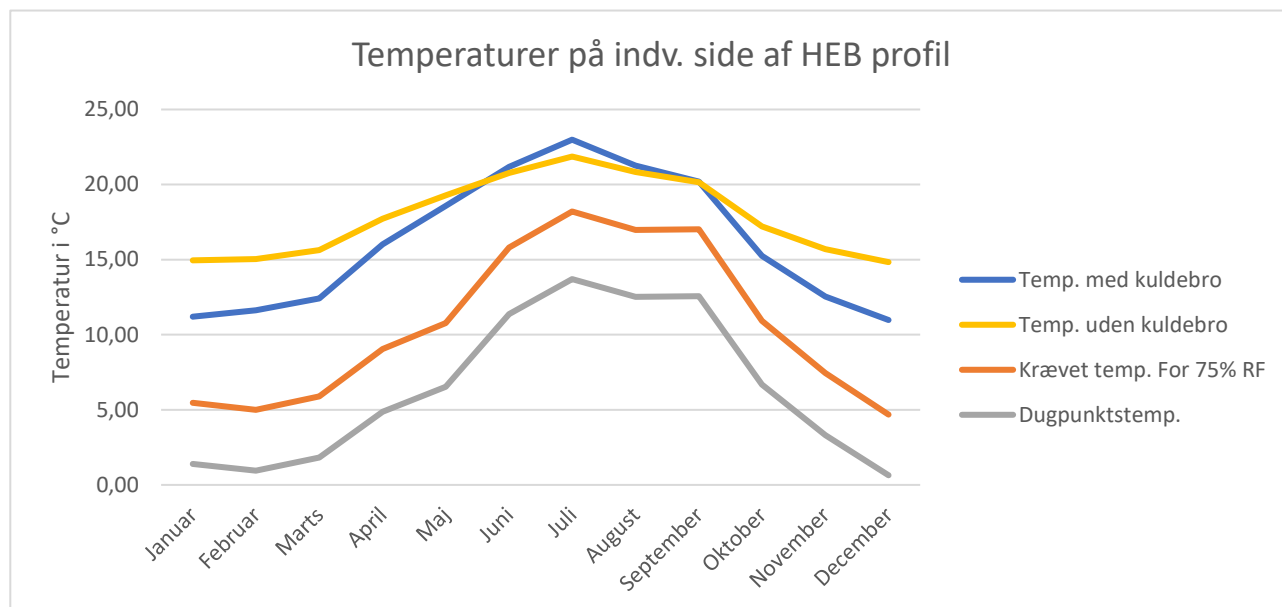
Figur 18 - Ændret fugtforhold i tagkonstruktionen ved målepunkt T3, som følge af indbygget HEB160 Profil

Ligesom ved ydervæggen, sker der også i tagkonstruktionen en ændring i temperaturforholdene så snart målepunkterne flyttes ind konstruktion og væk fra den indvendige overflade. Resultaterne viser, at temperaturen i målepunkt T3 falder i hovedparten af årets måneder – dog med undtagelse af de varmeste måneder fra juni til september. Årsagen findes i, at udetemperaturen i disse måneder er højere end indetemperaturen. Som følge heraf trækker HEB profilet nu højere temperaturer ind gennem tagkonstruktionens isoleringslag, i stedet for lavere temperaturer, som det ellers er tilfældet i den resterende del af året.

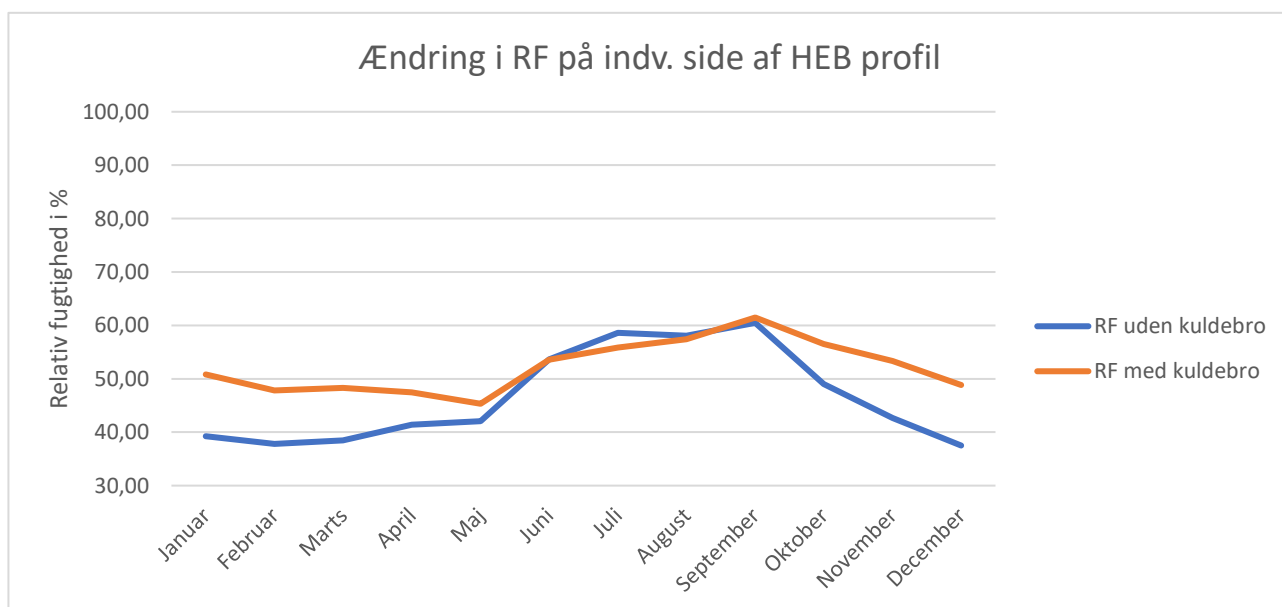
Ændringen i hvorvidt HEB profilet medfører højere eller lavere temperaturer i målepunkt T3, giver sig til kende som højere relative fugtigheder i de kolde måneder – helt op mod 20 %-point – og lavere relativ fugtighed i de varme måneder.

Målepunkt T2

Målepunkt T2 er placeret kun få millimeter fra målepunkt T3, men hvor punkt T3 er lokaliseret på den varme side af dampspærren er T2 lokaliseret på den kolde side.

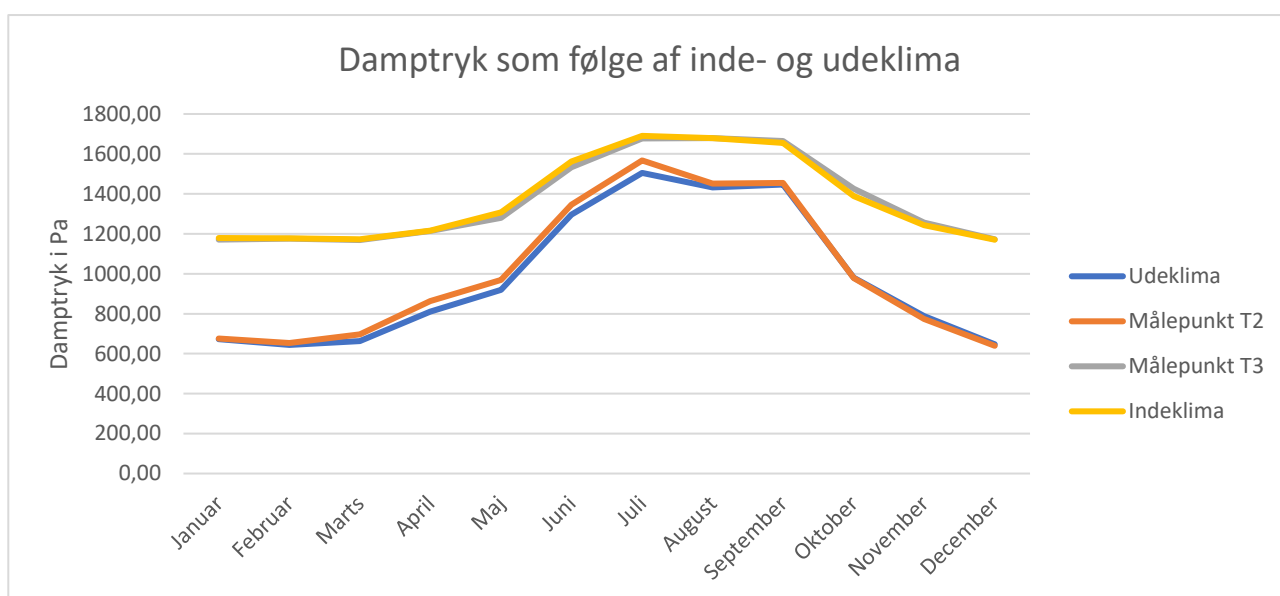


Figur 19 - Ændrede temperaturforhold i tagkonstruktionen ved målepunkt T2, som følge af indbygget HEB160 Profil



Figur 20 - Ændret fugtforhold i tagkonstruktionen ved målepunkt T2, som følge af indbygget HEB160 Profil

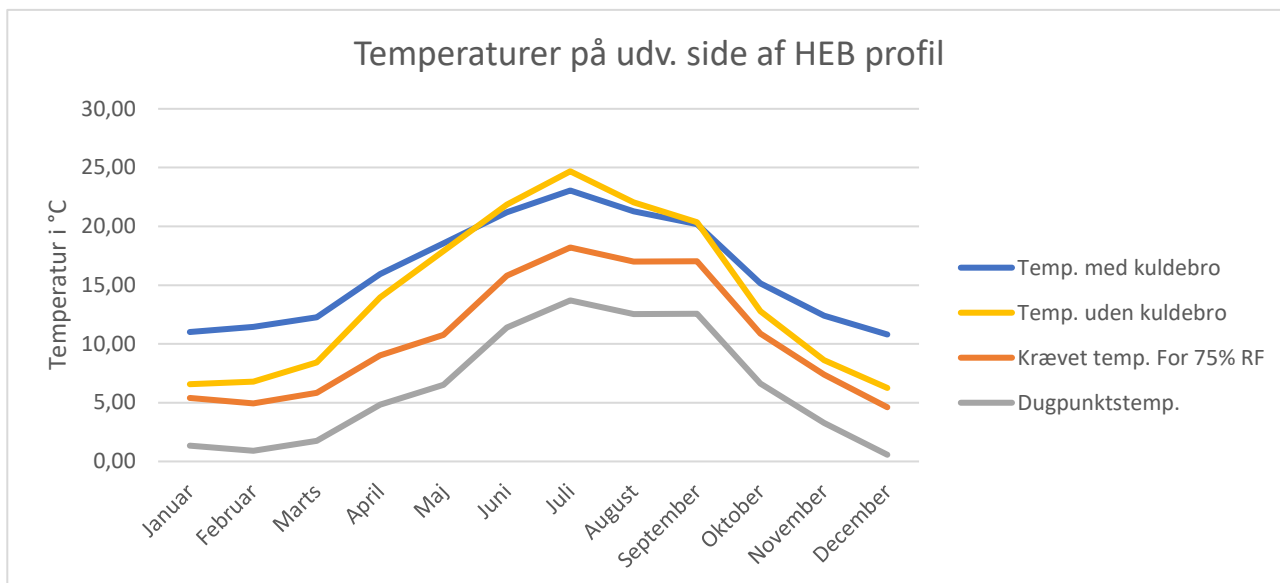
Som forventet er der identiske temperaturforhold ved målepunkt T2 som ved punkt T3 – fugtforholdene er derimod væsentligt ændrede. Årsagen hertil sker som følge af den indbyggede dampspærre. Dampspærren er indregnet med en vanddampdiffusionsmodstandsfaktor pålydende 50.000 og med en indregnet tykkelse på 1,0 mm svarer dette til en Z-værdi på 263 GPa m² s/kg. Dampspærren hindrer dermed fugtpåvirkning fra indeklimaet i at trække ud til målepunkt T2. Det absolutte fugtindhold ved målepunkt T2 følger derfor udeklimaets fugtindhold, hvorimod fugtindholdet i målepunkt T3 følger indeklimaets fugtindhold. Dette ses i følgende opstilling.



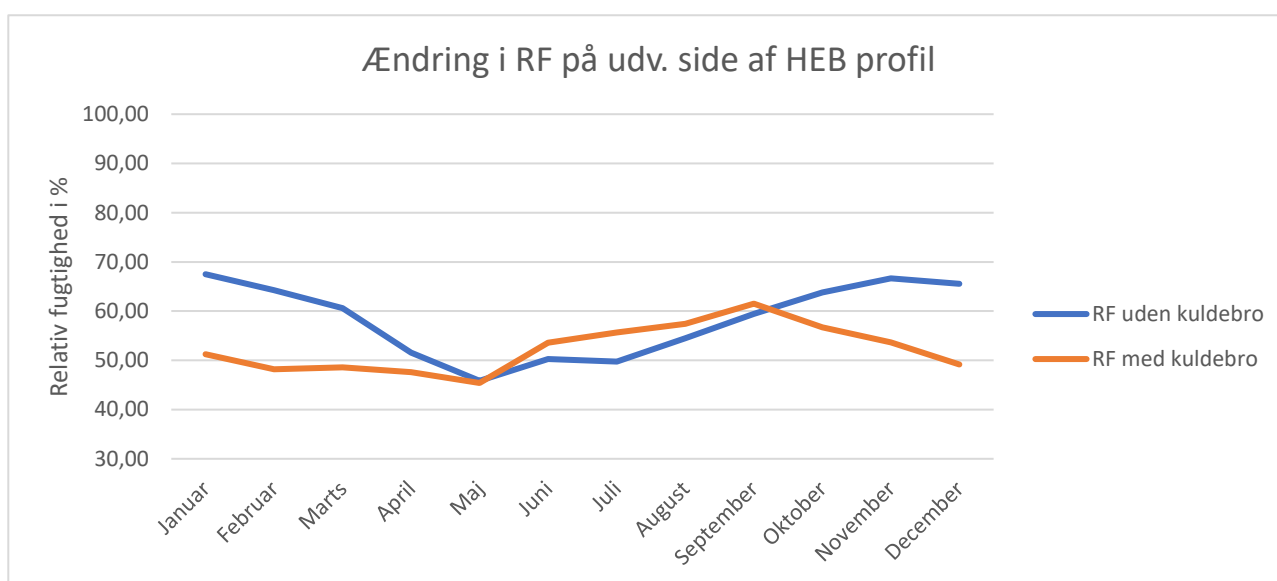
Figur 21 - Visuelt billede af det absolutte fugtindhold i målepunkt T2 og T3 der følger henholdsvis ude- og indeklimaet

Målepunkt T1

Målepunktpunkt T1 lokaliseres 160mm længere mod den kolde side af konstruktionstværsnittet end Målepunkt T2. Det absolutte fugtindhold ved de to målepunkter er tæt på identiske, idet isoleringslaget ikke hindrer vanddampdiffusion i væsentligt omfang. Det er derfor her temperaturvariationen i forhold til målepunkt T2, der medfører forskelle i resultaterne.

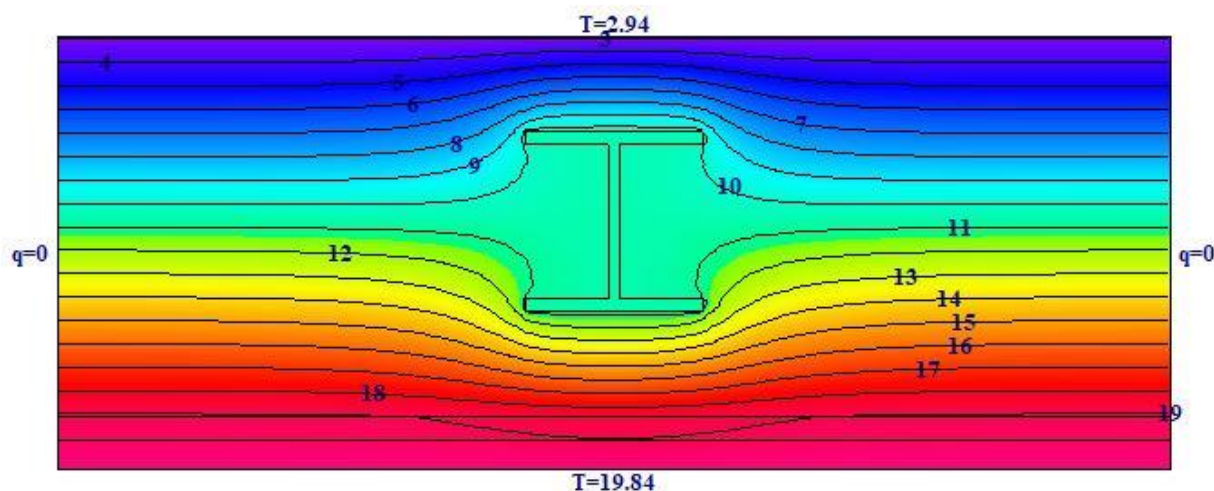


Figur 22 - Ændrede temperaturforhold i tagkonstruktionen ved målepunkt T1, som følge af indbygget HEB160 Profil



Figur 23 - Ændret fugtforhold i tagkonstruktionen ved målepunkt T1, som følge af indbygget HEB160 Profil

På samme vis som med ydervæggen ses et parallelt billede mellem de to målepunkter på HEB profilet i tagkonstruktionen (T1 og T2) – blot med modsat fortegn. Ligesom ved ydervæggen skyldes det parallelle billede, at det indbyggede HEB profil leder kulde/varme langt bedre end den omkringliggende isolering. Som følge heraf forplanter den samme temperatur sig gennem HEB profilet og fordeler sig over en langt større andel af konstruktionstværsnittet, end ved det omkringliggende svagt ledende isoleringsmateriale.



Billede 23 - HEAT2 opstilling af tagkonstruktion med indbygget HEB160 profil. Det ses hvordan samme temperatur fordeler sig over en større andel af konstruktionstværsnittet gennem HEB profilet end ved den omkringliggende isolering. Opstillingen er vist med overfladetemperaturer for december måned.

7.2.3 Opsummering

De opstillede resultater viser at indbygningen af stålprofilerne i henholdsvis ydervæg og tagkonstruktion, som udgangspunkt kun i begrænset omfang giver sig til kende som en målbar faktor på konstruktionens overflader. Inde i begge konstruktioner medfører stålprofilerne derimod væsentligt ændrede fugttekniske forhold. I begge tilfælde er det ændringerne i målepunktet på den indvendige side af HEB profilerne, der giver størst anledning til bekymring. Værst står det til for tagkonstruktionen, hvor den relative fugtighed i målepunkt T3 ligger på 80-90% i sammenhængende periode fra oktober til marts. Til sammenligning ligger den relative fugtighed for samme målepunkt på intet tidspunkt over 75%, såfremt HEB profilet ikke indbygges. Årsagen til at det netop er målepunktet på den indvendige side af HEB profilerne, der giver størst udslag, skal findes i en kombination af temperatur og damptryk. Som det ses i Figur 21 er damptrykket på den indvendige side af konstruktionen højere end på den udvendige side. Der vil derfor være en fugtvandring ud gennem konstruktionen, indtil der indbygges et dampstandsende lag – i dette tilfælde en dampspærre i tagkonstruktionen og teglsten i ydervæggens bagmur. Som det ses på billede 21 og 23 medfører indbygningen af HEB profilerne et lokalt temperaturfald. Når dette temperaturfald sker i nærheden af det dampstandsende lag, så medfører det en reduktion i luftens fugtkapacitet og dermed en fortætning af fugten, der igen resulterer i de højere relative fugtigheder. Resultaterne må derfor betragtes som værende et direkte billede af vigtigheden af at bryde kuldetransporten ind gennem HEB profilerne, inden de kolde temperaturer når det dampstandsende lag i konstruktionen.

7.3 Fugtteknisk beregning – WUFI 2D

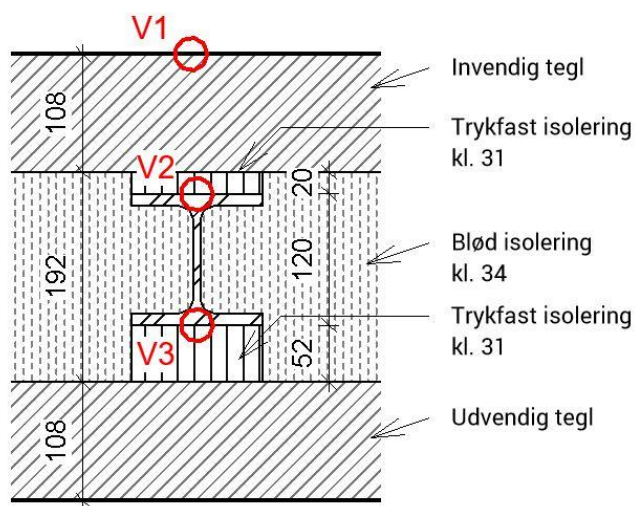
Ligesom det var tilfældet i simuleringerne med WUFI Pro og HEAT2 er der i nærværende tilfælde fokuseret på de to udvalgte områder i klimaskærmen med indbyggede HEB profiler i ydervæg og tagkonstruktion.

Simuleringerne i WUFI 2D er foretaget for at skabe et komplet billede af de fugttechniske forhold omkring de indbyggede kuldebroer. Samtidig opstår muligheden for at sammenholde resultaterne fra 2 forskellige fremgangsmetoder, der begge tager udgangspunkt i samme forhold. Det vil således også være muligt at vurdere rigtigheden af resultaterne fra de 2 fremgangsmetoder. Resultaterne fra de 2 fremgangsmetoder er sammenholdt i det følgende.

7.3.1 Ydervæg

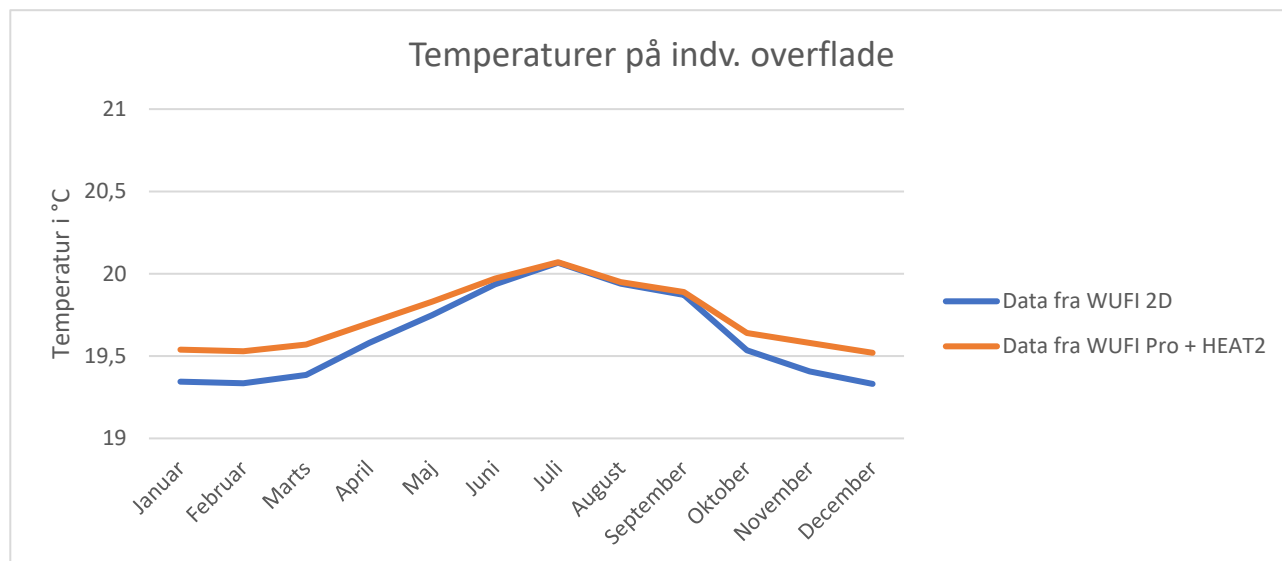
I ydervæggen er der udtaget data fra de 3 samme målepunkter som det var tilfældet i simuleringerne med WUFI Pro og HEAT2. De 3 målepunkter er som følger:

- V1 - Indvendig overflade på bagmur
- V2 - Indvendig side af HEB profil
- V3 - Udvendig side af HEB profil

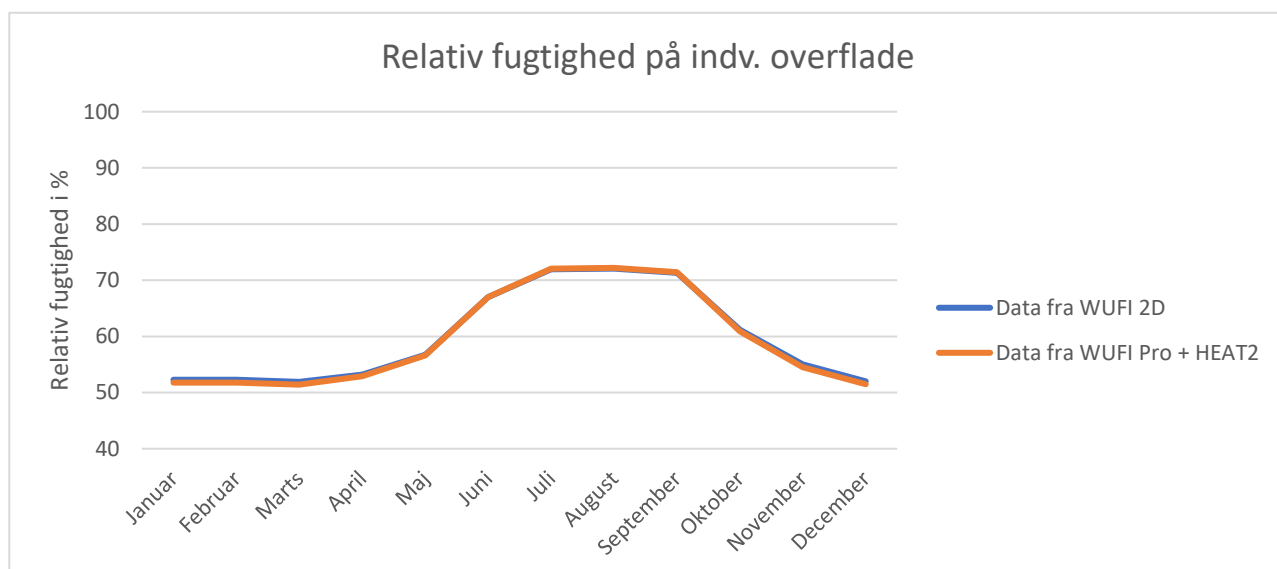


Billede 24 - Visuel fremstilling af de 3 målepunkter der er samlet data fra. De 3 målepunkter er markeret med cirkler

Målepunkt V1



Figur 24 - Sammenligning af temperaturer i målepunkt V1

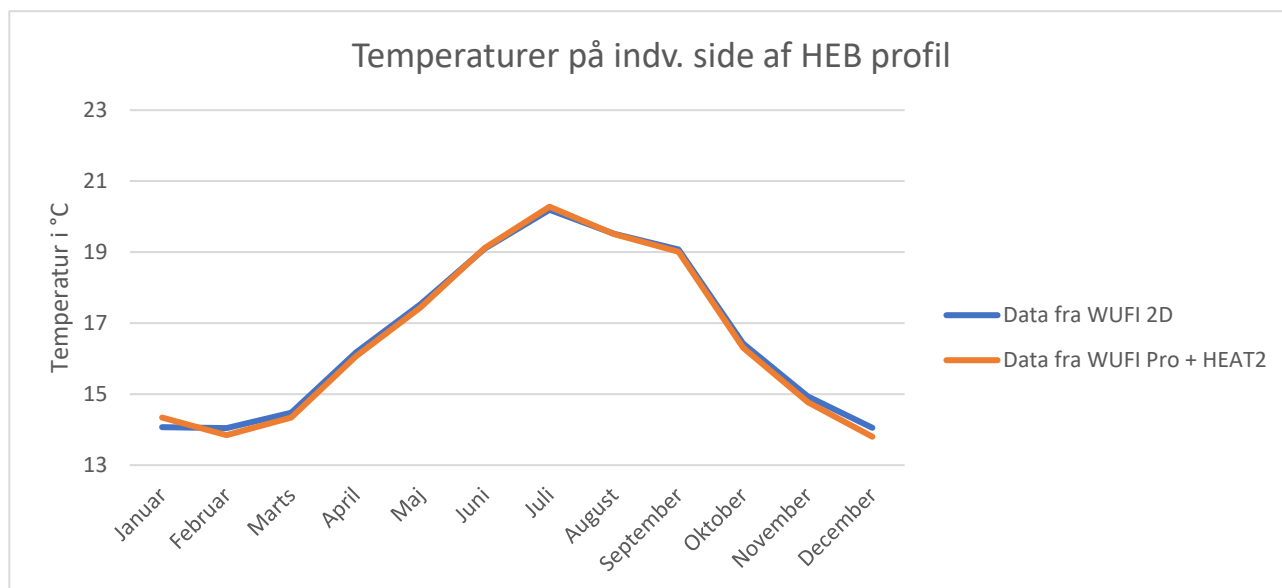


Figur 25 - Sammenligning af relativ fugtighed i målepunkt V1

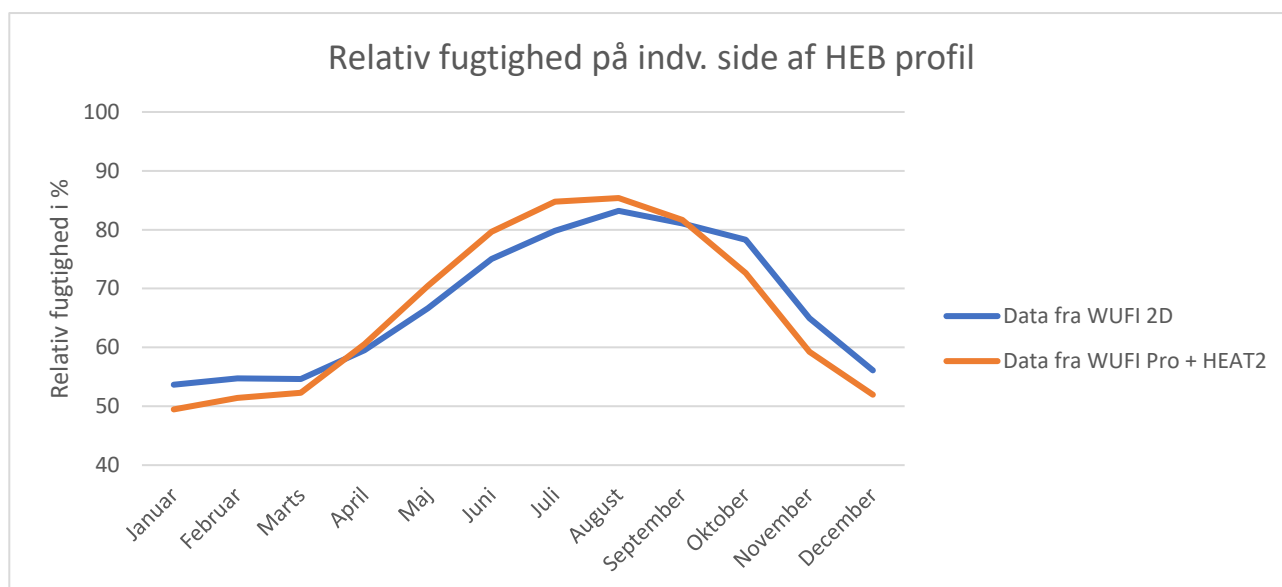
På den indvendige overflade af ydervæggen ses der en mindre afvigelse i temperaturen. Afvigelsen varierer hen over året fra 0°C til 0,2°C – altså i en størrelsesorden, der ikke vil give mærkbare udslag på den relative fugtighed såfremt det absolutte fugtindhold antages at være ens som følge af samme indeklimadata.

Som forventet giver afvigelsen i temperaturen ikke de store udslag på resultaterne af den relative fugtighed. Der er her kun tale om ganske få %-point i årets kolde måneder.

Målepunkt V2



Figur 26 - Sammenligning af temperaturer i målepunkt V2

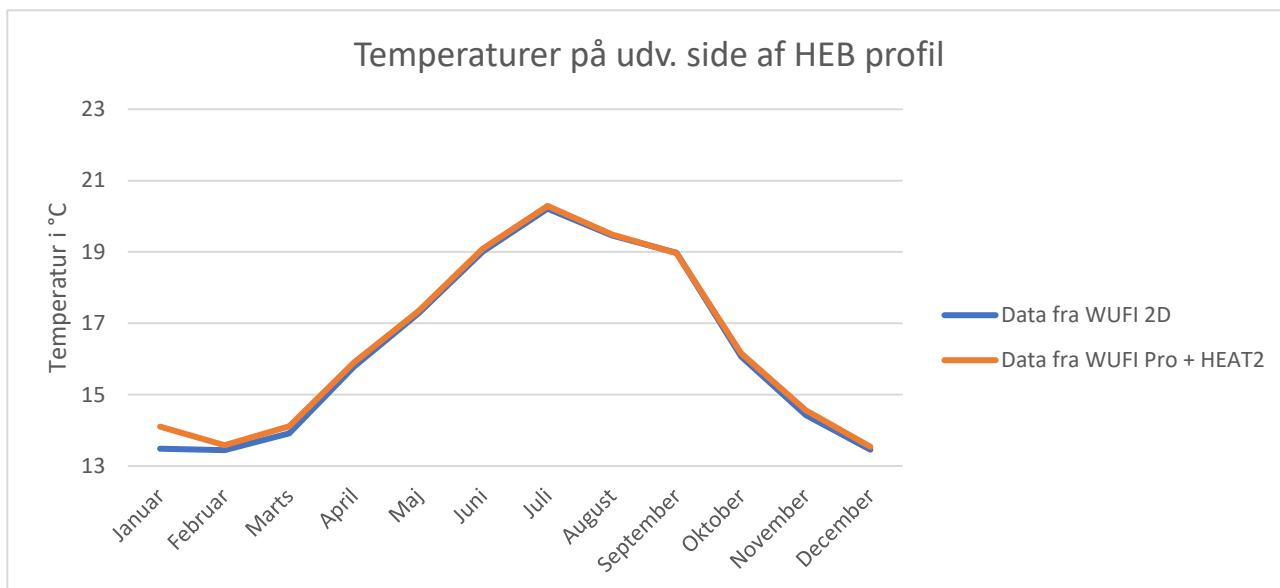


Figur 27 - Sammenligning af relativ fugtighed i målepunkt V2

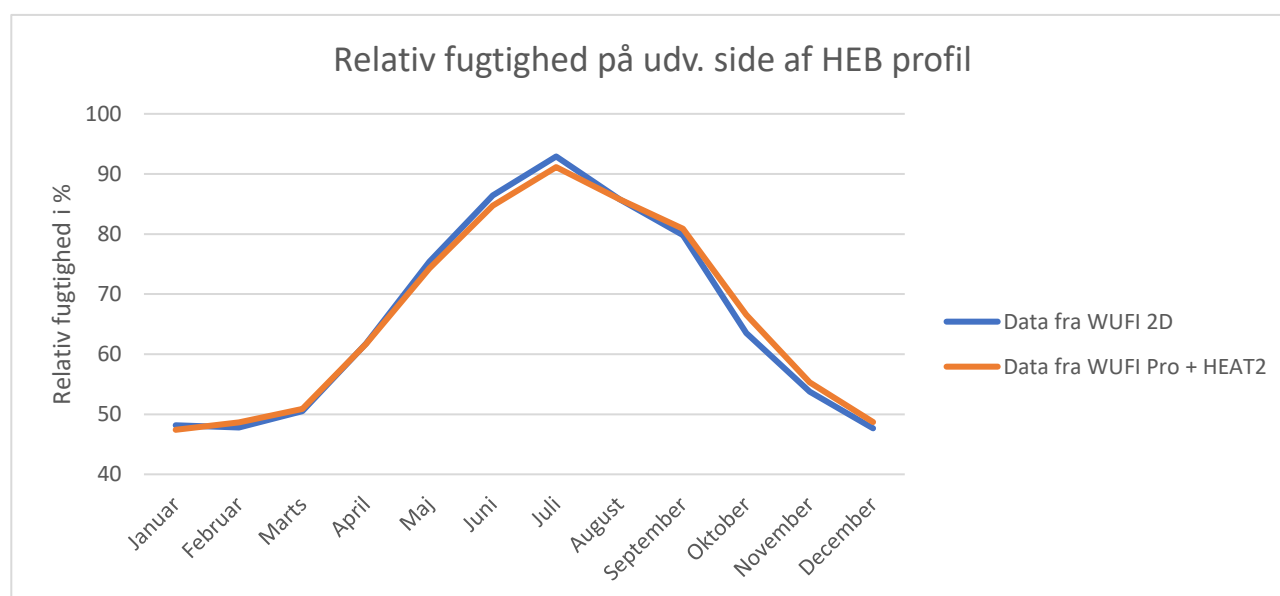
I målepunkt V2 på den indvendige side af HEB profilet, er der god overensstemmelse i temperaturerne i de 2 simuleringsmetoder. Den relative fugtighed giver dog et varierende udslag på 0-5 %-point i skiftende favør. Det er undersøgt om en mulig årsag hertil kan være, at der i WUFI 2D modellen er indregnet hård isolering mellem HEB profil og bagmur, mens der i WUFI Pro modellen kun indgår blød isolering i ydervæggens hulmur. Den hårde isolering er indregnet med en højere vanddampdiffusionsmodstandsfaktor på 1,5 mod 1,3 for den

bløde isolering. Det har dog ikke været muligt at fastlægge, hvorvidt dette er årsagen til den mindre afvigelse, idet der også er benyttet hård isolering i forbindelse med målepunkt V3 – her dog uden tilsvarende udslag.

Målepunkt V3



Figur 28 - Sammenligning af temperaturer i målepunkt V3



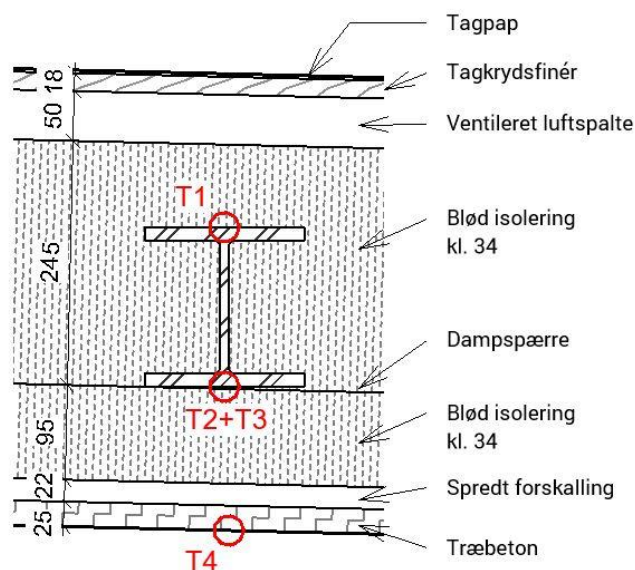
Figur 29 - Sammenligning af relativ fugtighed i målepunkt V3

I målepunkt V3 på den udvendige side af HEB profilet er de fremkomne resultater fra de to simuleringsmetoder tæt på identiske både hvad angår temperatur og relativ fugtighed.

7.3.2 Tagkonstruktion

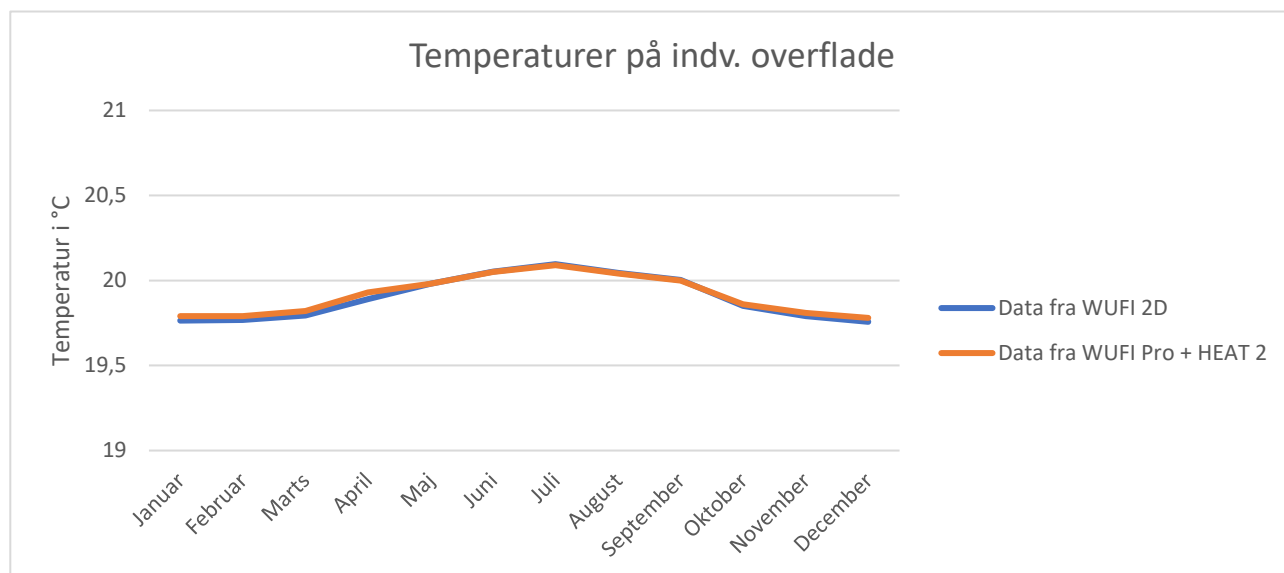
Også i tagkonstruktionen er der udtaget data fra de samme 4 målepunkter, som det var tilfældet i simuleringerne med WUFI Pro og HEAT2. De 4 målepunkter er som følger:

- T1 - Udvendig side af HEB profil
- T2 - Indvendig side af HEB profil, på den kolde side af dampspærre
- T3 - Indvendig side af HEB profil, på den varme side af dampspærre
- T4 - indvendig overflade på loft

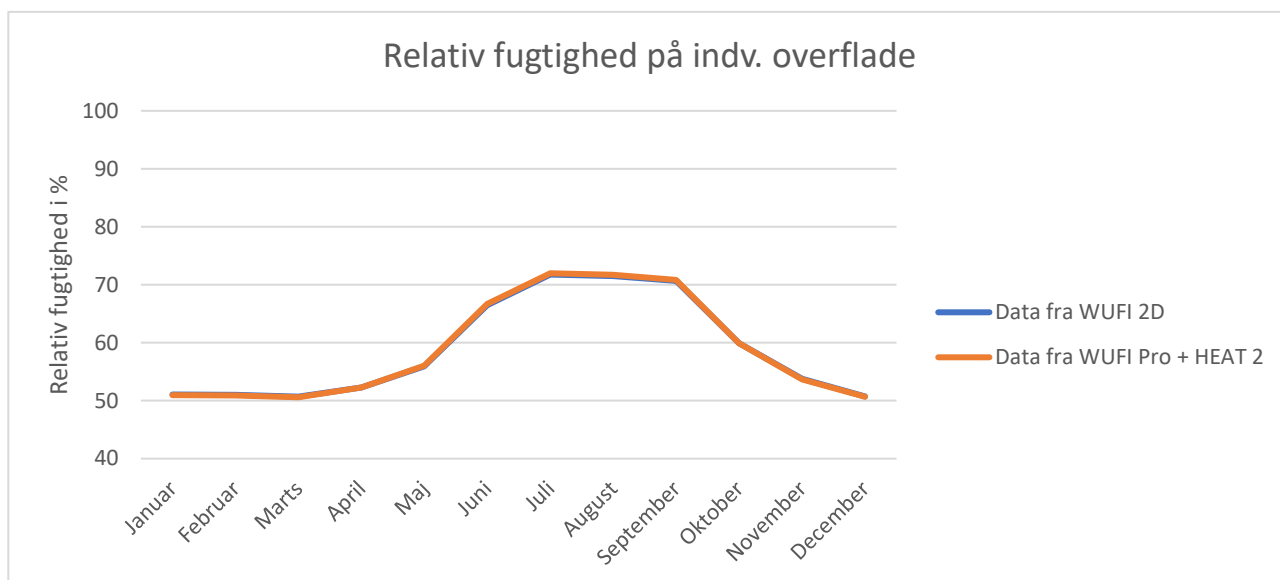


Billede 25 - Visuel fremstilling af de 4 målepunkter, der er samlet data fra. De 4 målepunkter er markeret med cirkler

Målepunkt T4



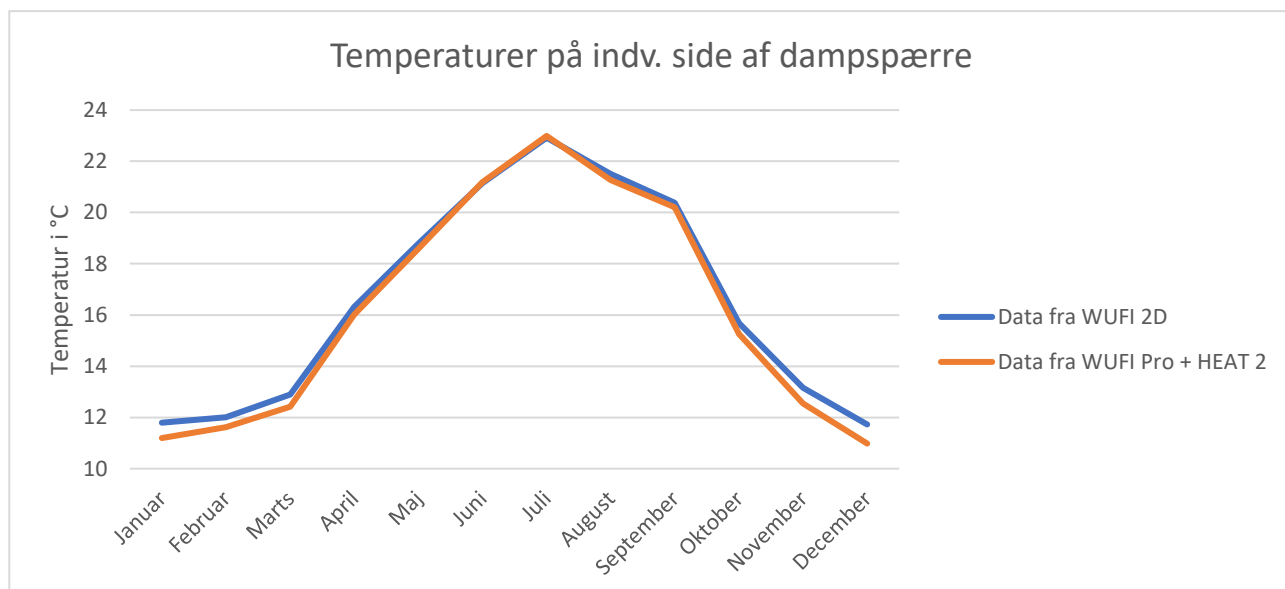
Figur 30 - Sammenligning af temperaturer i målepunkt T4



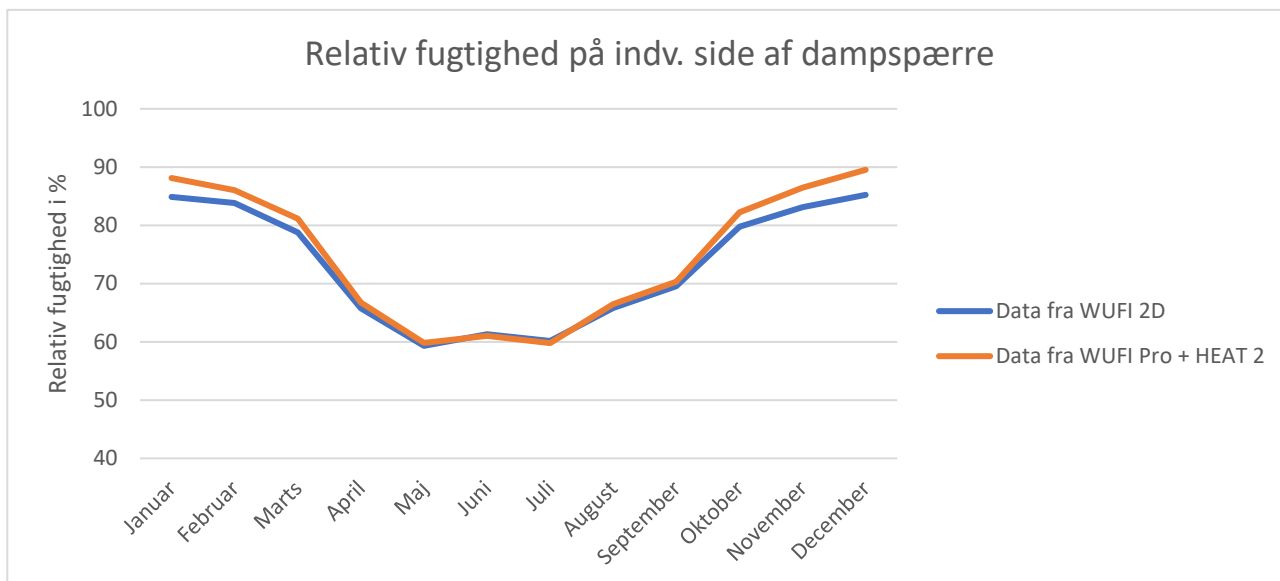
Figur 31 - Sammenligning af relativ fugtighed i målepunkt T4

På tagkonstruktionens loftoverflade er der næsten identiske temperatur- og fugtforhold imellem de to simuleringsmetoder. Temperaturforskellen udgør $<0,05^{\circ}\text{C}$ og har således heller ingen betydende faktor på resultaterne for relativ fugtighed.

Målepunkt T3



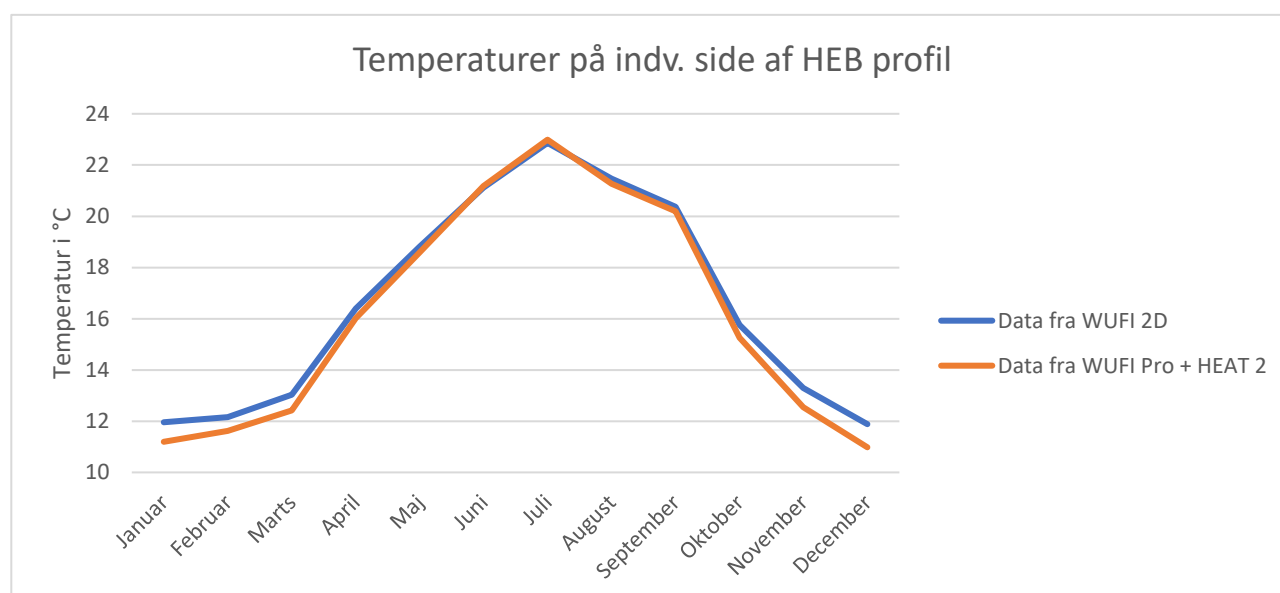
Figur 32 - Sammenligning af temperaturer i målepunkt T3



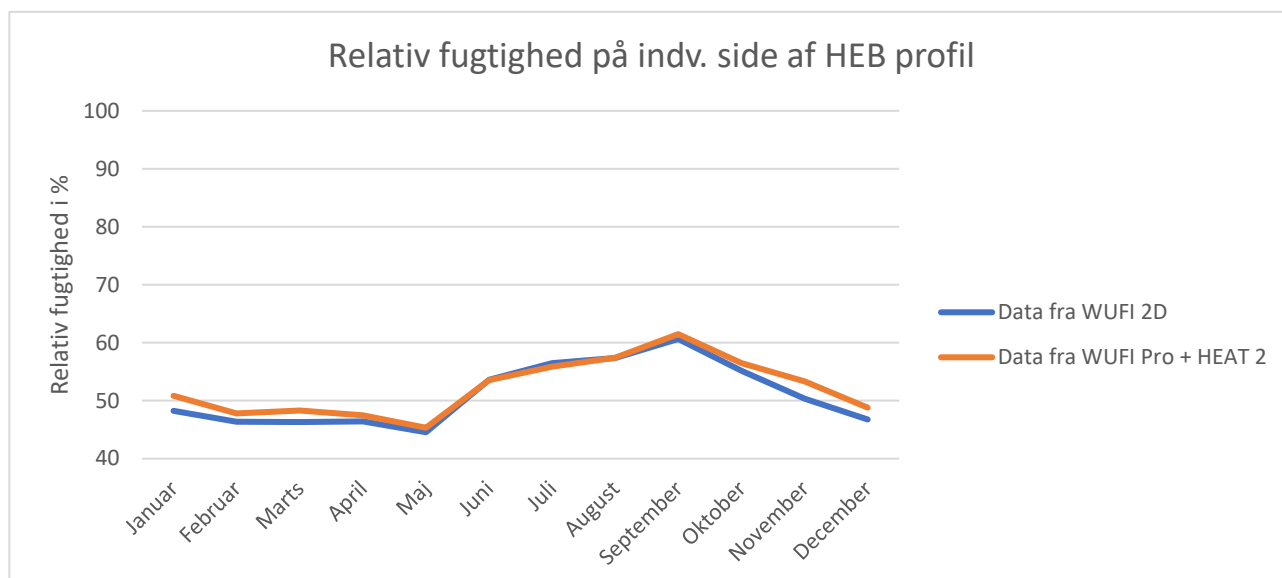
Figur 33 - Sammenligning af relativ fugtighed i målepunkt T3

Generelt er der god overensstemmelse for både temperatur og relativ fugtighed over hele året. De største forskelle viser sig i årets kolde måneder, hvor temperaturerne i målepunkt T3 ligger 0-1°C højere i simuleringerne med WUFI 2D. Dette giver sig ligeledes til kende på den relative fugtighed, der ligger 0-5 %-point lavere i samme periode.

Målepunkt T2



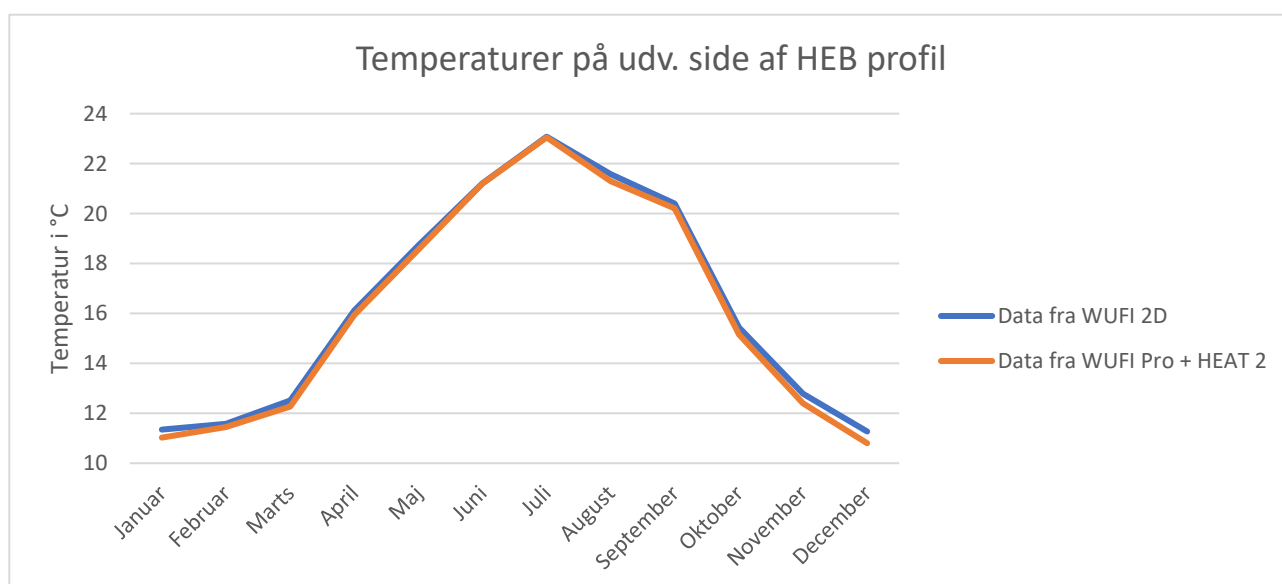
Figur 34 - Sammenligning af temperaturer i målepunkt T2



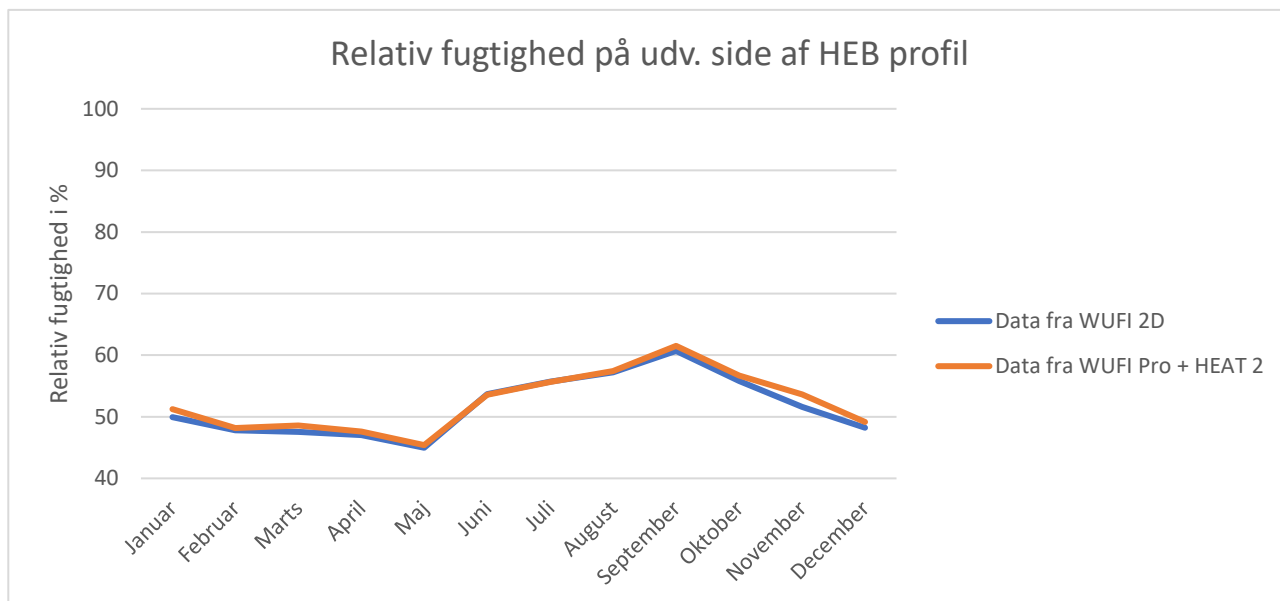
Figur 35 - Sammenligning af relativ fugtighed i målepunkt T2

Tendensen fra målepunkt T3 går igen ved målepunkt T2. Igen viser temperaturerne i WUFI 2D simuleringen sig 0-1°C højere i de kolde måneder med en tilsvarende lavere relativ fugtighed på 0-5 %-point til følge. Som det også var tilfældet ved simuleringerne i WUFI Pro og HEAT2 ses den markante ændring i relativ fugtighed mellem målepunkt T3 og T2 som følge af den indbyggede dampspærre.

Målepunkt T1



Figur 36 - Sammenligning af temperaturer i målepunkt T1



Figur 37 - Sammenligning af relativ fugtighed i målepunkt T1

Ved målepunkt T1 i tagkonstruktionen viser de to simuleringsmetoder tæt på identiske resultater – både temperatur- og fugtforhold.

7.3.3 Opsummering

Generelt er der rigtig god overensstemmelse mellem simuleringsresultaterne fremkommet med WUFI Pro og HEAT2 og resultaterne fra WUFI 2D. Resultaterne ligger med ganske få variationer fra hinanden, og der ses en helt klar og tydelig lighed mellem de to simuleringsmetoder. Det er dog værd at bemærke, at de to simuleringsmetoder adskiller sig væsentlig fra hinanden i måden hvorpå de udføres - dette især i tidsforbrug. For hvor WUFI Pro og HEAT2 simuleringerne overstås på ganske få minutters computersimulering, kræves der et markant højere tidsforbrug for simulering med WUFI 2D. Resultaternes ganske få uoverensstemmelser taget i betragtning, er det derfor værd at overveje, hvorvidt den ene simuleringsmetode er at foretrække frem for den anden. I dette studie er gennemførelsen af begge simuleringsmetoder dog ganske brugbart. I og med, at resultaterne fra de to uafhængige simuleringer har så store ligheder, som det er tilfældet, må det antages, at rigtigheden af resultaterne er overhængende sandsynlig. Rent teoretisk er der derfor fremkommet dokumenteret og brugbart data, der viser, at der er en fugtteknisk risiko forbundet med indbygning af HEB profilerne i klimaskærmen.

8 Validering og tolkning af resultater

Som det fremgår af de opstillede resultater, opnås der ganske god overensstemmelse mellem de to fugtberegningsmetoder. Rigtigheden af resultaterne anses dermed som værende sandsynlige. Dog ønskes denne sandsynlighed undersøgt nærmere. I det følgende udføres derfor feltmålinger i praksis samt supplerende teoretiske undersøgelser for at underbygge rigtigheden af de tidligere opstillede resultater.

8.1 Termografi

8.1.1 Ydervæg

Det fremgår at figur 9 at indbygningen af HEB profilet i ydervægskonstruktionen medfører et temperaturfald på den indvendige overflade pålydende $0,1^{\circ}\text{C}$ ved en temperaturdifference mellem inde og ude på $16,5^{\circ}\text{C}$. Det må derfor forventes, at der er mulighed for at registrere dette temperaturfald i praksis. For at omsætte teori til praksis, er der udført termografiske undersøgelser af en ydervæg i et dansk enfamiliehus med tilsvarende konstruktionsopbygning som den simulerede ydervægskonstruktion. De termografiske undersøgelser er udført med termografikamera model Testo 872. Endvidere er termografibilledet taget ved emissionsgrad 0,95.



Billede 26 - Termografi af indvendig side af ydervæg med indbygget HEB120 profil (tv) samt tilhørende realbillede af ydervæggen (th). $M1=23,8^{\circ}\text{C}$. $M2=24,2^{\circ}\text{C}$.



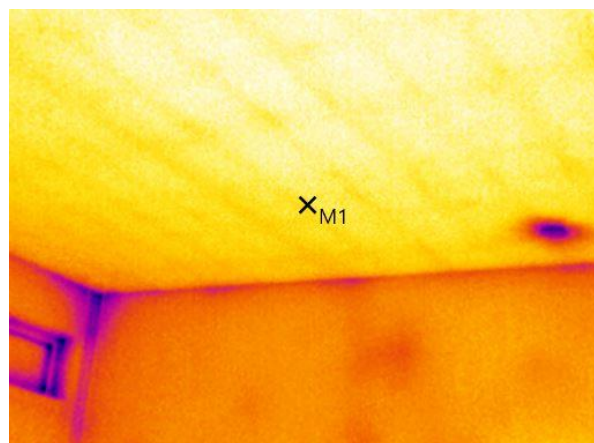
Billede 27 - Termografi af udvendig side af ydervæg med indbygget HEB120 profil (tv) samt tilhørende realbillede af ydervæggen (th). M1=-4,6°C.

Den termografiske undersøgelse af ydervæggen viser på samme vis som de teoretiske simuleringer, at det indbyggede HEB profil medfører et målbart temperaturfald. I dette tilfælde er temperaturfaldet målt til 0,4°C. Her er undersøgelserne udført om formiddagen med overfladetemperaturer henholdsvis inde og ude på 24,3°C og -4,6°C – altså en temperaturdifference pålydende 28,9°C. Indsættes disse data i HEAT2 fremkommer et resultat, der viser, at det indbyggede HEB profil rent teoretisk bør medføre et temperaturfald på 0,38°C. Som følge heraf må det konkluderes, at der er ganske overbevisende overensstemmelse mellem resultaterne fra de teoretiske undersøgelser og resultaterne fremkommet ved praktisk termografering.

8.1.2 Tagkonstruktion

Det fremgår af figur 15 at indbygningen af HEB profilet i tagkonstruktionen kun medfører et temperaturfald på den indvendige overflade på <0,5°C. Det forventes derfor ikke at være muligt at registrere temperaturfaldet i praksis. For at eftervise dette, er der udført termografiske undersøgelser af en tilsvarende konstruktionsopbygning i samme danske enfamiliehus, som det var tilfældet med ydervæggen.

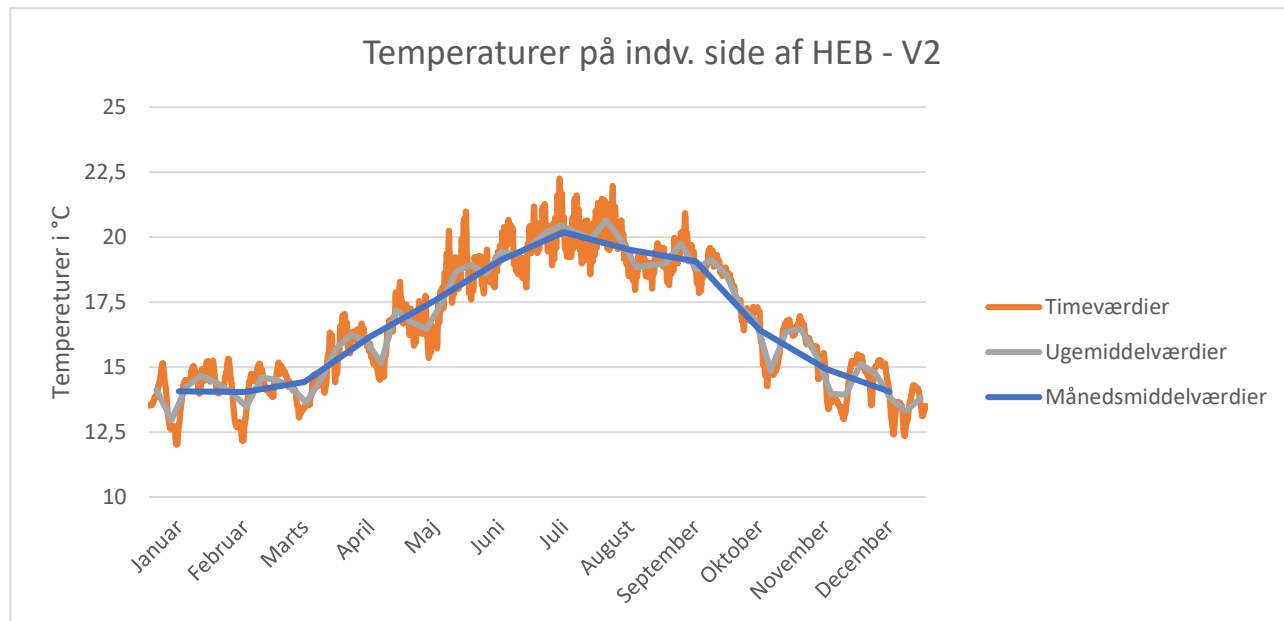
Som forventet viser termograferingen intet temperaturfald på loftoverfladen som følge af indbygningen af det bagvedliggende HEB160 profil.



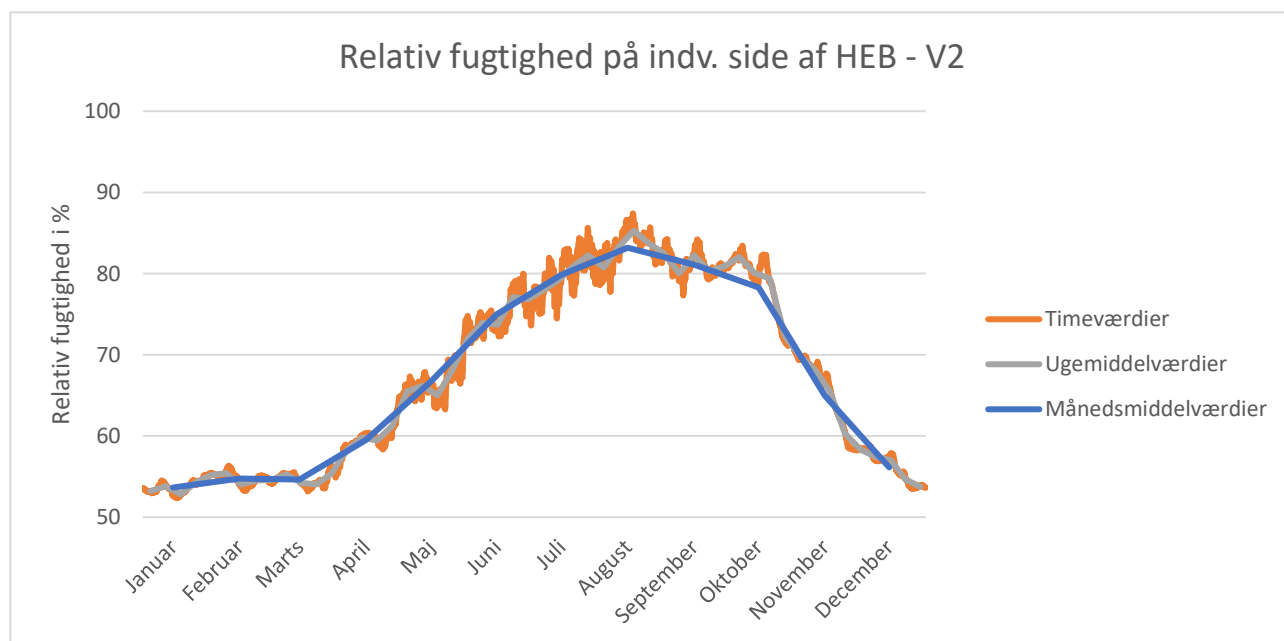
Billede 28 - Termografi af indvendig loftoverflade med bagvedliggende HEB160 profil. HEB profilet medfører ingen målbart temperaturændring på loftoverfladen

8.2 Middelværdier vs. timeværdier

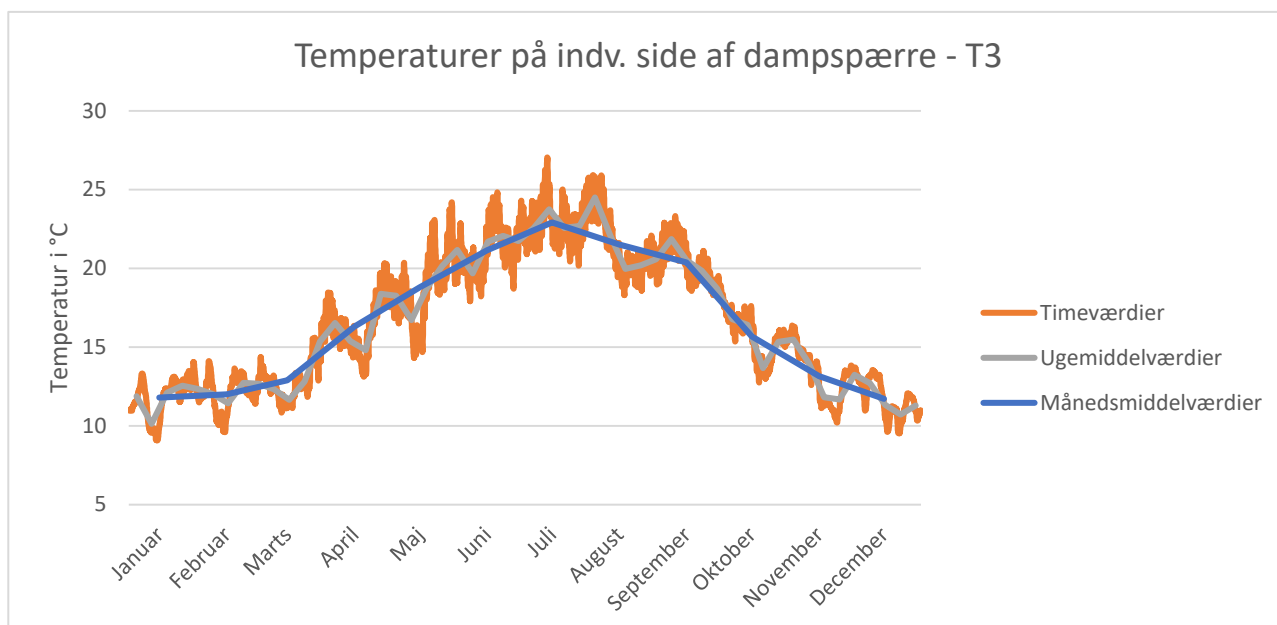
Alle resultater i afsnit 7.2 og afsnit 7.3 er oplyst som månedsmiddelværdier. Det oplagte spørgsmål hertil vil være, hvorvidt disse middelværdier giver et andet billede, end hvis der var tale om timeværdier. For at afdække dette, er der i det følgende taget udgangspunkt i målepunkt V2 og T3. Målepunkt V2 og T3 er udvalgt, da det er her, der sker den største forværring af forholdene som følge af de indbyggede HEB profiler.



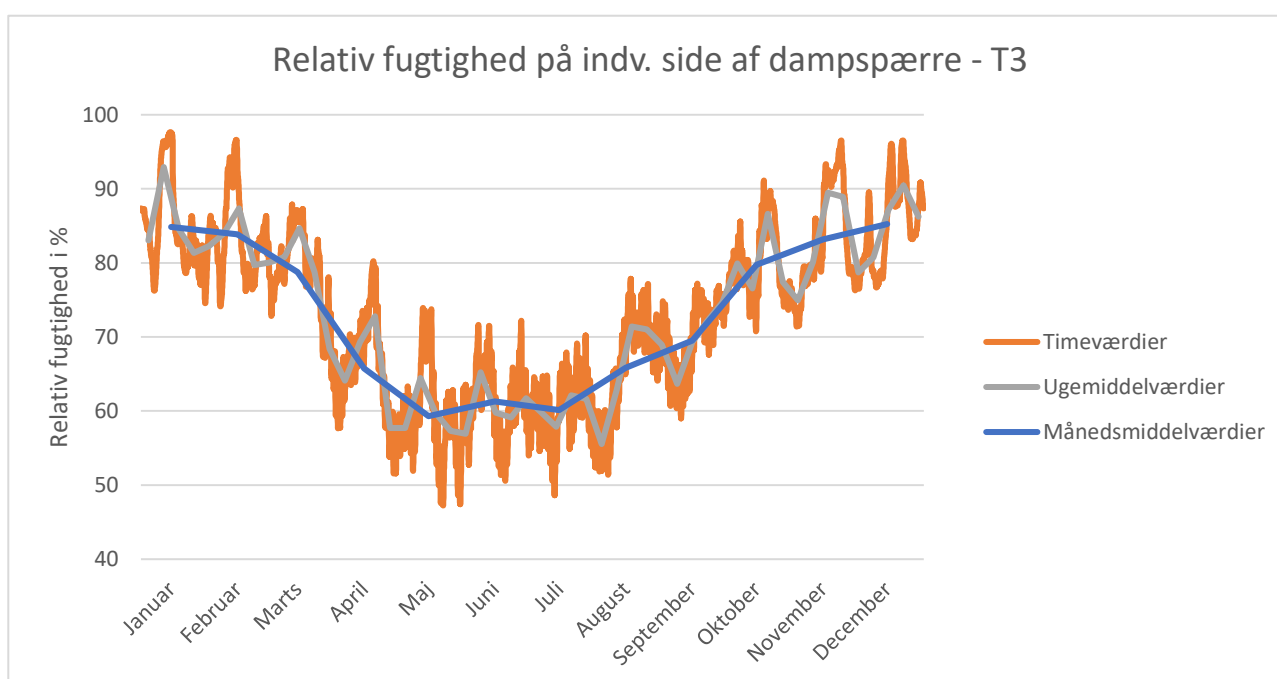
Figur 38 - Sammenligning af temperatur som timeværdier, ugemiddelværdier og månedsmiddelværdier. Værdierne er udtaget fra WUFI 2D i målepunkt V2



Figur 39 - Sammenligning af relativ fugtighed som timeværdier, ugemiddelværdier og månedsmiddelværdier. Værdierne er udtaget fra WUFI 2D simuleringen i målepunkt V2



Figur 41 - Sammenligning af temperatur som timeværdier, ugemiddelværdier og månedsmiddelværdier. Værdierne er udtaget fra WUFI 2D i målepunkt T3

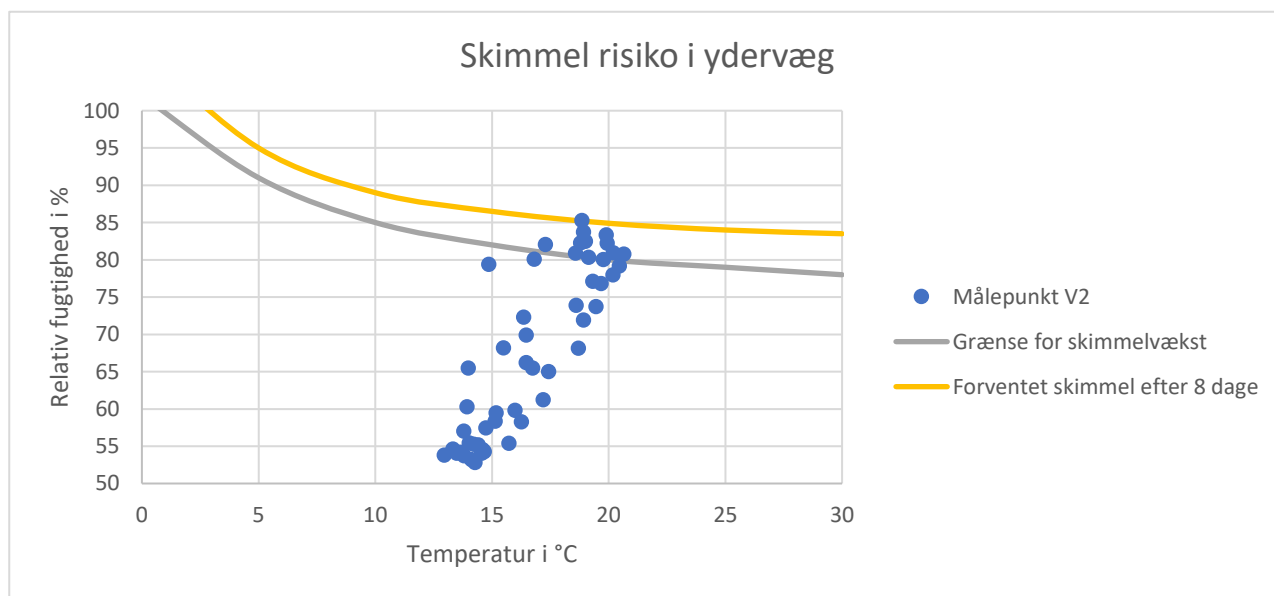


Figur 40 - Sammenligning af relativ fugtighed som timeværdier, ugemiddelværdier og månedsmiddelværdier. Værdierne er udtaget fra WUFI 2D simuleringen i målepunkt T3

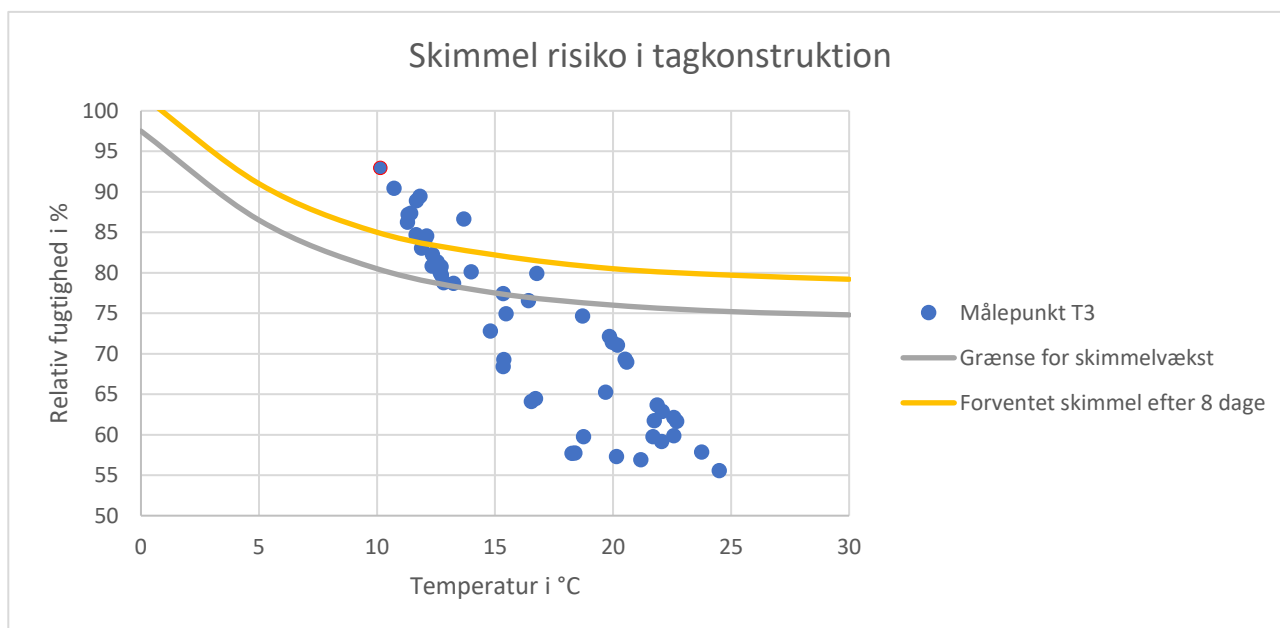
Det ses af nærværende opstilling at månedsmiddelværdierne udjævner timeværdiernes peaks ganske kraftigt. Timeværdiernes mere nuancerede tendenser giver sig dermed ikke til kende på samme vis, når der benyttes månedsmiddelværdier. Ugemiddelværdierne udjævner ligeledes timeværdiernes peaks – dog i noget mindre grad. Ugeværdierne viser dermed stadig tendenserne fra timeværdierne, uden kurven bliver for urolig og ulæsbar. Man kan derfor argumentere hen mod, at ugeværdierne giver det bedste visuelle billede af forholdene i de enkelte målepunkter, mens månedsmiddelværdierne giver et vejledende billede af tendensen i de enkelte målepunkter.

8.3 Skimmelrisiko

Gennem de opstillede resultater i afsnit 7 synliggøres det, at indbygning af HEB profilerne i henholdsvis ydervæg og tagkonstruktion medfører ændrede fugtforhold. De ændrede fugtforhold giver sig primært til kende inde i selve konstruktionen i områderne tæt op af HEB profilerne. Fælles for både ydervæg og tagkonstruktion er, at den værste ændring i fugtforhold finder sted i målepunkterne på den varme side af HEB profilerne – henholdsvis målepunkt V2 og T3. Som beskrevet i afsnit 7.2.3, skyldes dette, at HEB profilerne i hovedparten af året transporterer kulde fra udeklimaet ind gennem konstruktionernes isoleringslag og tæt ind mod konstruktionernes dampspærrende lag. Som følge af nedkølingen af konstruktionens dampspærrende lag, sker der en fortætning af luftfugtigheden og dermed øget relativ fugtighed. I det følgende synliggøres de nye relative fugtigheder i målepunkt V2 og T3 for at kunne vurdere om indbygningen af HEB profilerne medfører forhold, der giver anledning til fugtteknisk bekymring.



Figur 42 - Skimmelrisiko på den varme side af HEB profilet i ydervæg (målepunkt V2). De angivne måledata er angivet som ugemiddelværdier fra WUFI 2D simulering. Risikogrænser er angivet i henhold til (Sedlbauer, 2001)



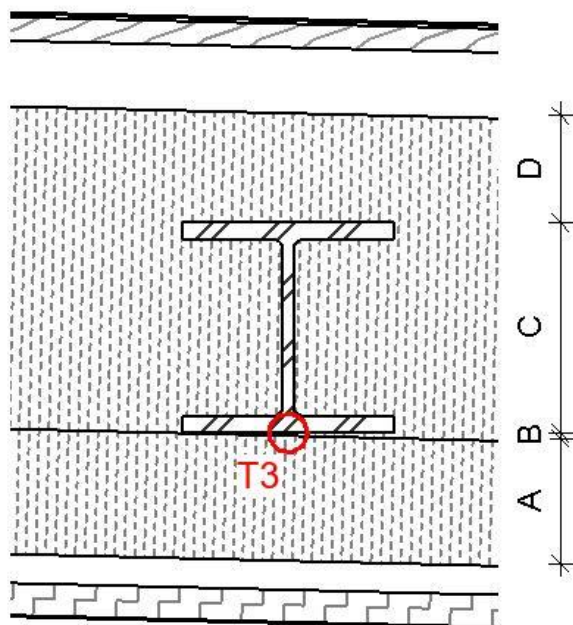
Figur 43 - Skimmelrisiko på den varme side af dampspærre tæt op ad HEB profilet i tagkonstruktion (målepunkt T3). De angivne måledata er angivet som ugemiddelværdier fra WUFI 2D simulering. Risikogrænser er angivet i henhold til (Sedlbauer, 2001)

De angivne datapunkter i de nærværende opstillinger er angivet som ugemiddelværdier, hvorved det er muligt at aflæse direkte i forhold til den gule linje om indbygningen af HEB profilerne medfører fugtforhold, der medfører skimmelvækst. Det er her værd at bemærke, at de angivne skimmelgrænser ikke er ens i de to opstillinger. Skimmelgrænserne for ydervæggen er angivet ud fra betragtningen om, at der ikke forefindes organisk materiale ved målepunktet, mens der i tagkonstruktionen forudsættes tilstedeværende organisk materiale i form af træspær, reglar, forskalling mv.

Opstillingerne viser, at indbygningen af HEB profilet i ydervæggen kun i mindre grad medfører risiko for skimmelvækst. Ganske vist er der placeret datapunkter over grænsekurven for skimmelvækst, men der er her kun tale om få tilfælde. Ligeledes er datapunkterne indplaceret som ugemiddelværdier, og der er ingen af værdierne der overskrider grænseværdierne, hvorved der kan forventes skimmelvækst inden for 8 dage. Værre står det til i forbindelse med tagkonstruktionen. Her er adskillige målepunkter indplaceret over grænsekurven for skimmelvækst efter 8 dage. Det kan i dette tilfælde dermed konkluderes, at indbygningen af HEB profilet i tagkonstruktionen medfører en overhængende risiko for skjult skimmelvækst. Skimmelvæksten vil i dette tilfælde være at finde på den indvendige side af dampspærren og dermed i direkte forbindelse med indeklimaet med risiko for spredning af skimmelsporer til de underliggende opholdsrum.

8.4 Parameterstudie

Det fremgår af figur 43, at de indregnede forhold omkring HEB profilet i tagkonstruktionen giver anledning til skimmelvækst. Det er derfor oplagt at undersøge nærmere, hvad der skal til for at undgå denne risiko. For at undersøge dette vil et mindre parameterstudie være en nødvendighed. Parameterstudiet vil i dette tilfælde indeholde parametervariationer på placering af HEB profil, hvorved isoleringstykkelse omkring HEB profil samt afstand til dampspærre varierer. De analyserede parametervariationer er som følger:



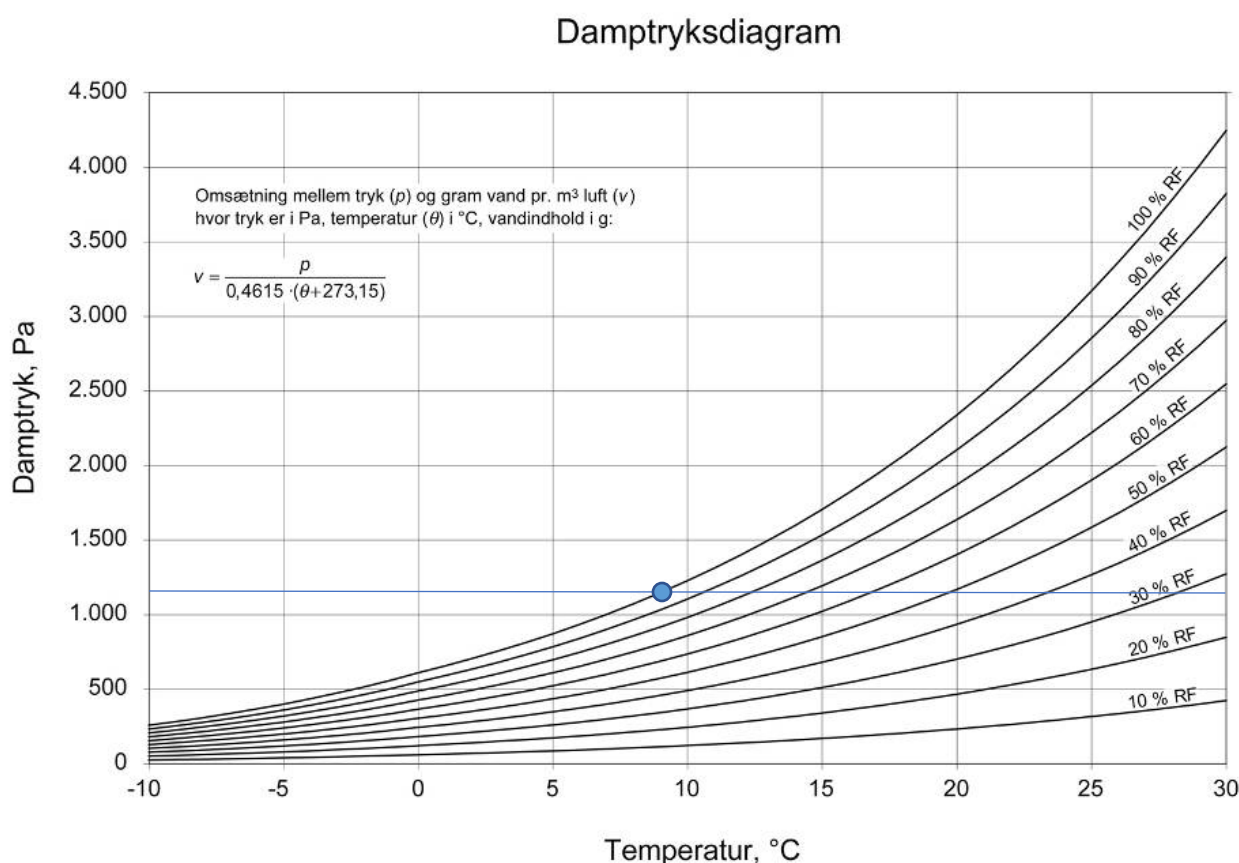
Billede 29 - Angivelse af ændrede parametre i parameterstudie på tagkonstruktionens målepunkt T3 på indvendig side af dampspærre

Variant-nummer	Isolering på indv. side af dampspærre - A	Isolering mellem HEB og dampspærre - B	Højde af HEB - C	Isolering mellem HEB og ventilationsspalte - D
1 - original	95 mm	0 mm	160 mm	85 mm
2	45 mm	0 mm	160 mm	85 mm
3	0 mm	0 mm	160 mm	85 mm
4	95 mm	40 mm	160 mm	45 mm
5	95 mm	85 mm	160 mm	0 mm
6	95 mm	85 mm	160 mm	85 mm
7	45 mm	40 mm	160 mm	45 mm

For at optimere analyseprocessen er det undersøgt, hvorvidt det er muligt at variere de enkelte parametre via en relativ simpel analysemetode frem for at benytte de tidligere anvendte simuleringsmetoder. Det er derfor forsøgt, hvorvidt det er muligt at frembringe brugbare resultater blot ved anvendelse af varmesimulering i HEAT2 og aflæsning i damptrykdigram (Brandt, 2. udgave 2013).

Indledningsvis udtages data for randtemperaturer og damptryk i den tidligere anvendte WUFI 2D simulering. I tilfældet her er uge 2 udvalgt, idet det er denne uge, hvor datapunktet i figur 43 ligger længst fra grænsekurven for skimmelvækst (markeret med rød cirkel). Middeloverfladetemperaturen for uge 2 ligger på henholdsvis 19,72°C på indvendig side og -0,84°C på udvendig side, mens det indvendige damptryk ligger på 1175 Pa. Det skal her bemærkes, at det forudsættes at damptrykket ved målepunkt T3 er tilsvarende det indvendige damptryk. Denne forudsætning beror på de tidligere undersøgelser vist i figur 21.

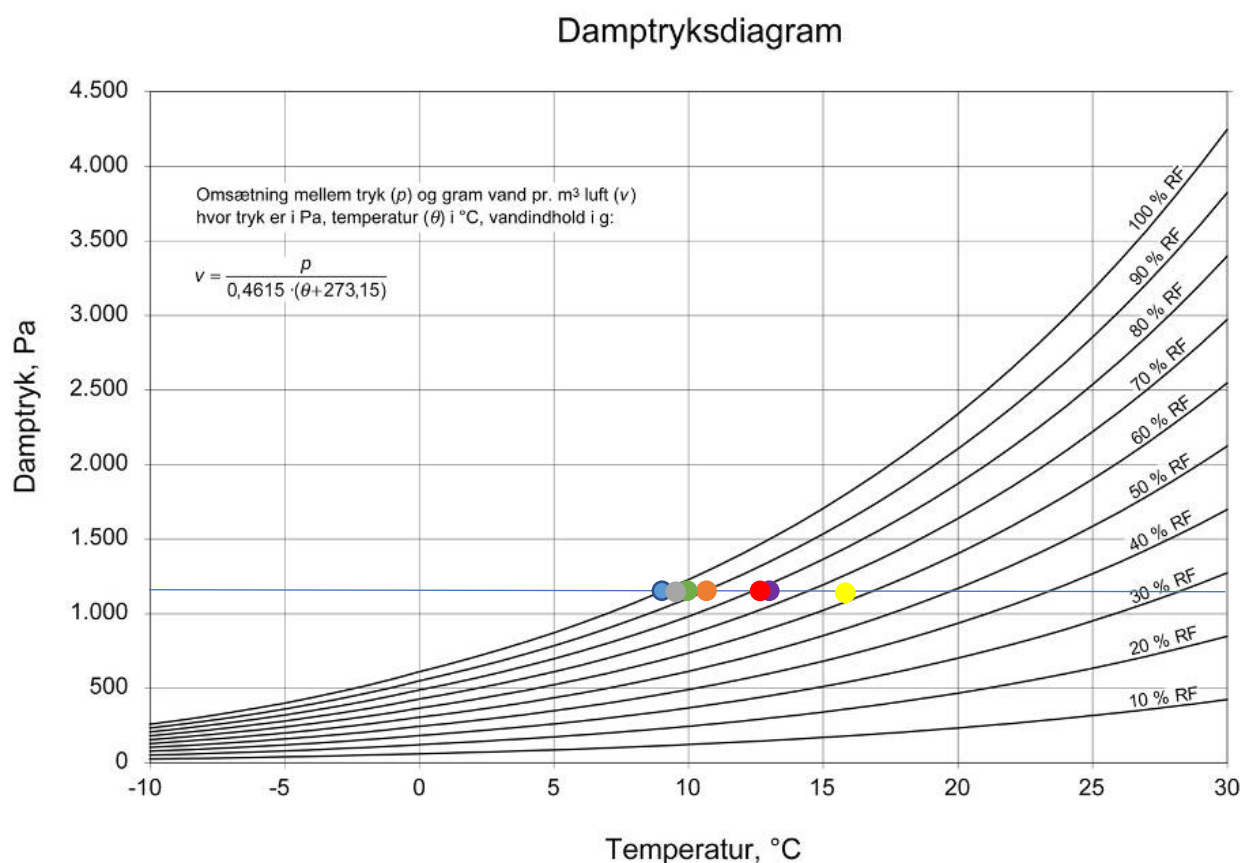
Ved at benytte randtemperaturene i HEAT2, fremkommer beregnet temperatur i målepunkt T3, og det er nu muligt at aflæse den relative fugtighed som funktion af det tilstedeværende damptryk.



Figur 44 - Damptryksdiagram benyttet til simpel analyse af relativ fugtighed som funktion af udregnet temperatur i målepunkt T3.

Beregning i HEAT2 bevirker en temperatur i målepunkt T3 pålydende 8,75°C, hvilket medfører en relativ fugtighed på 95-100 % ved indplacering i damptryksdiagrammet. Samme punkt fremgår af figur 43 som værende 10,0°C og 93 % relativ fugtighed. Idet der er tale om simpel diagram aflæsning vil nærværende metode være forbundet med en vis usikkerhed. Resultaterne stemmer heller ikke 100 % overens med resultaterne fra de tidligere udførte simuleringsmetoder. Resultater fremkommet ved nærværende forsimplede metode kan dermed blot ses som et pejlemærke og dermed ikke som endelig resultat.

Pejlemærkerne kan i første omgang vise sig at være tilstrækkeligt til at vurdere forskelligheden i de angivne parametervariationer. De enkelte variantnumre er indplaceret i følgende damptryksdiagram.



Figur 45 - indplacering af data fra målepunkt T3 ved de 7 parametervariationer.
1=blå. 2=orange. 3=gul. 4=grøn. 5=grå. 6=lilla. 7=rød.

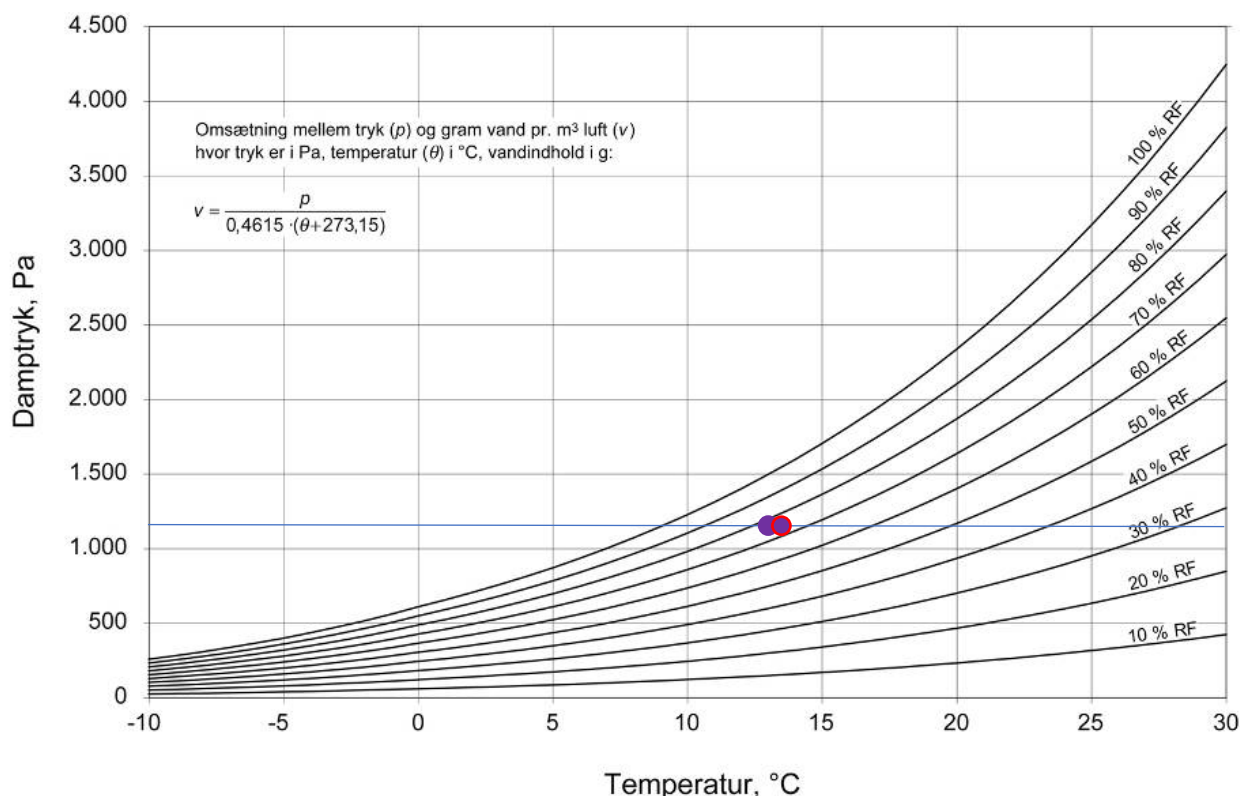
Parameterstudiet viser, at der er betydelige forskelle mellem de enkelte variantnumre. Generelt viser opstillingen, at de 3 varianter, der ligger fra 75-80% relativ fugtighed og nedefter, alle har dampspærren placeret således, at 1/3 eller mindre af konstruktionens isoleringstykkelse er placeret på den varme side af dampspærren. Dette giver i sig selv god mening idet 1/3-reglen beskrives hyppigt i anerkendte litteraturserier. Det skal her bemærkes, at isoleringstykkelsen er målt ud for kroppen af HEB profilet.

I tilfældet her bevirker variantnummer 2 – angivet som orange – dog at der opstår en relativ fugtighed i målepunktet pålydende 85-90%. Dette til trods for at dampspærren også her er placeret 1/3 inde i isoleringen. Det indikerer således, at 1/3-reglen ikke er en garanti for en sund konstruktionsopbygning, hvorfor 1/3-reglen ikke bør benyttes som enkeltstående beslutningsgrundlag.

Som nævnt er nærværende analysemetode forbundet med en vis usikkerhed, og kan derfor kun benyttes som pejlemærke, og eksempelvis benyttes til at vurdere hvorvidt én variant er bedre end en anden. Forud for et endelig valg af konstruktionsopbygning, bør der altid udføres en komplet simulering af fugtforholdene for at kunne vurdere de fugttekniske forhold i konstruktionen til fulde. En sådan simulering vil i givet fald enten indbefatte simuleringsmetoden med HEAT2 og WUFI Pro eller simuleringsmetoden med WUFI 2D.

I følgende tilfælde efterprøves brugbarheden af variant nummer 6 (lilla markering) ved simulering i WUFI 2D. Variant nummer 6 udvælges, idet der ved denne metode opretholdes 95 mm isolering på den indvendige side af dampspærren. I udførelsen sikrer dette muligheden for trækning af føringsveje til tekniske installationer uden af bryde dampspærren. Således mindskes også risikoen for utilsigtede utætheder i dampspærren.

Damptryksdiagram



Figur 46 - Forskel på simpel analysemetode med HEAT2 og damptrykstabel samt fuld simulering i WUFI 2D (markeret med rød cirkel). De angivne data er for variant nummer 6.

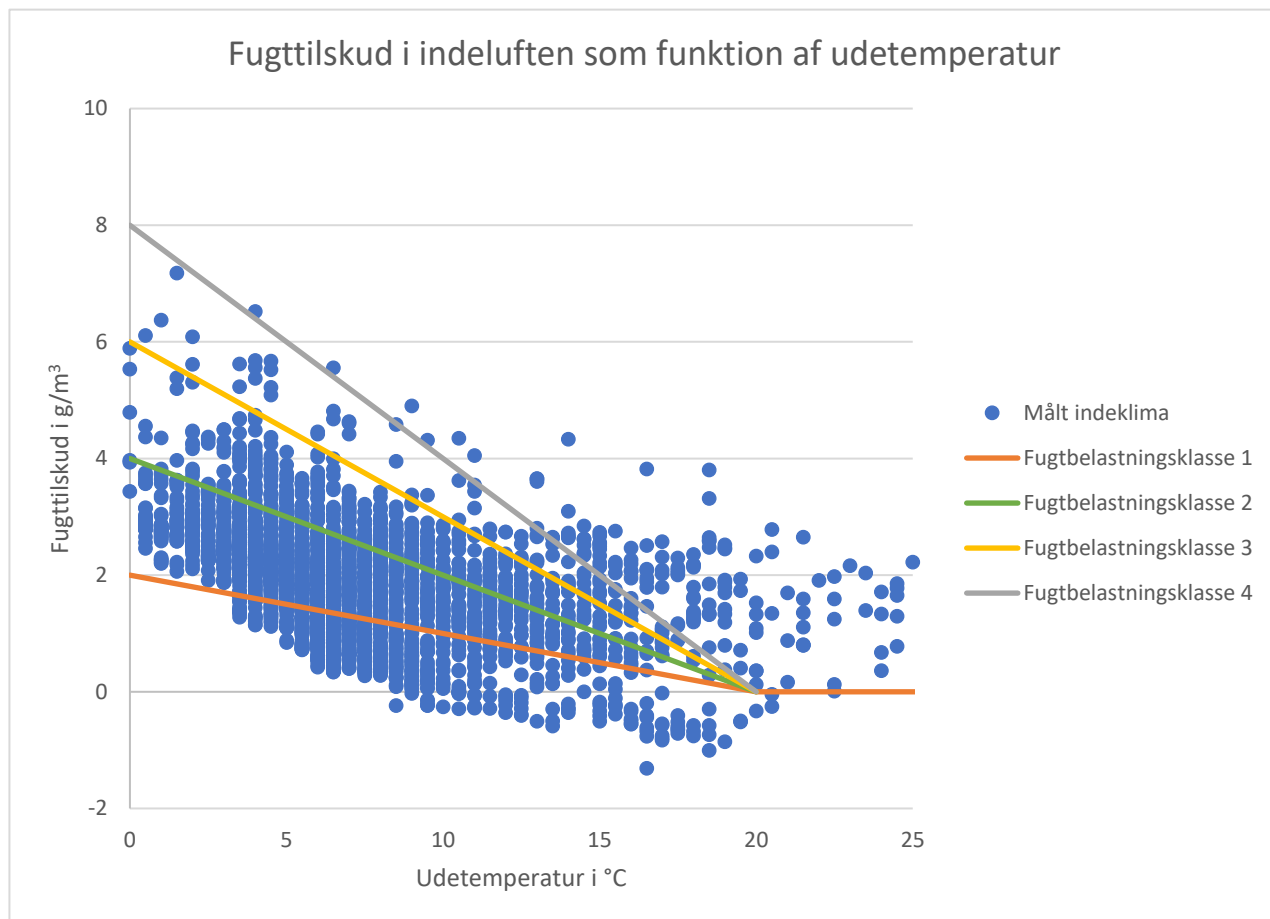
Som det ses af ovenstående figur, er der igen en mindre afvigelse fra den simple analysemetode foretaget med HEAT2 og damptryksdiagram i forhold til fuld simulering med WUFI 2D. Afvigelsen udgør dog kun ~5 %-point, hvorved den simple analysemodel må betragtes som værende et brugbart værktøj til de indledende analyser i beslutningsprocessen frem mod det endelige valg af konstruktionsopbygning.

8.5 Indeklimaets påvirkning

Det fremgår af figur 21, at damptrykket ved målepunkt T3 i tagkonstruktionen følger damptrykket, der er tilstede i indeklimaet. Indeklimaets fugtindhold er dermed en direkte betydende faktor for den fugttekniske tilstand inde i konstruktionen. Alle simuleringer i nærværende rapport er udført med indeklima svarende til fugtbelastningsklasse 2 i henhold til DS/EN ISO 13788. Dette er en teoretisk fremstilling af et forventet fugttilskud til indeluften som følge af brugsmønstre, beboertæthed og anvendelse.

Da indeklimaets fugtbelastning har en så direkte indflydelse på den påviste fugtproblematik for målepunkt T3, er det undersøgt, hvorvidt den foruddefinerede fugtbelastningsklasse 2 er en passende antagelse for

forholdene i indeklimaet. Undersøgelserne er udført i det samme danske enfamiliehus, hvori termograferingen i afsnit 8.1 blev foretaget. Enfamiliehuset har 2 faste beboere og lejlighedsvis besøgende. Undersøgelserne er udført i en periode fra medio februar 2019 til ultimo april 2019. Målingerne er udført indendørs i 3 forskellige rumtyper og én målestation udendørs under en overdækket terrasse. De målte data fra indeklimaet er udført i alrum, soveværelse og badeværelse, hvorefter gennemsnitsværdierne er benyttet til at vurdere fugttilskuddet i forhold til udeklimaet. Fugttilskuddet fremgår af følgende opstilling.



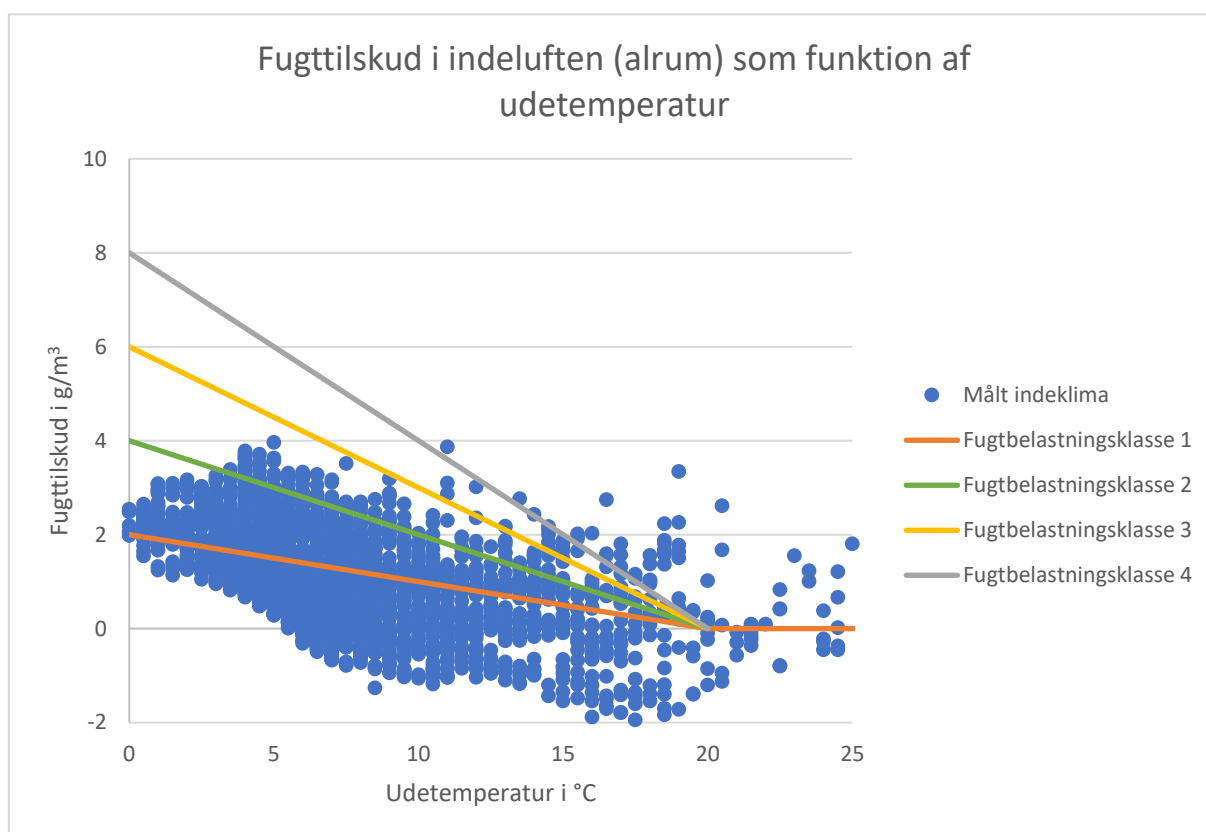
Figur 47 - Registreret fugttilskud i indeklimaet i et dansk enfamiliehus sammenlignet med fugtbelastningsklasser i henhold til DS/EN ISO 13788

Som det fremgår, er der en betydelig spredning af de registrerede data. Det er dermed vanskeligt at sige om fastlæggelsen af indeklimaet som fugtbelastningsklasse 2 er retvisende.

I en artikel fra 2017 er det undersøgt mere dybdegående, om hvorvidt fugtbelastningsklasse 2 er en passende antagelse for det forventede indeklima i danske enfamiliehuse. Undersøgelserne viste ligeledes en stor spredning i de målte data og konkluderer således, at der ikke entydigt kan forventes indeklima i henhold til fugtbelastningsklasse 2 (Jan de Place & Møller, 2017).

Som følge af ovenstående resultatopstilling, samt den nævnte artikel fra 2017, må der påregnes en langt større spredning i fugttilskuddet end anført i fugtbelastningsklasse 2.

Ovenstående opstilling viser som nævnt det gennemsnitlige fugttilskud for boligens 3 undersøgte rum. Ses der i stedet kun på boligens alrum, hvori det indbyggede HEB profil i tagkonstruktionen er lokaliseret, er fugttilskuddet mere ensartet.

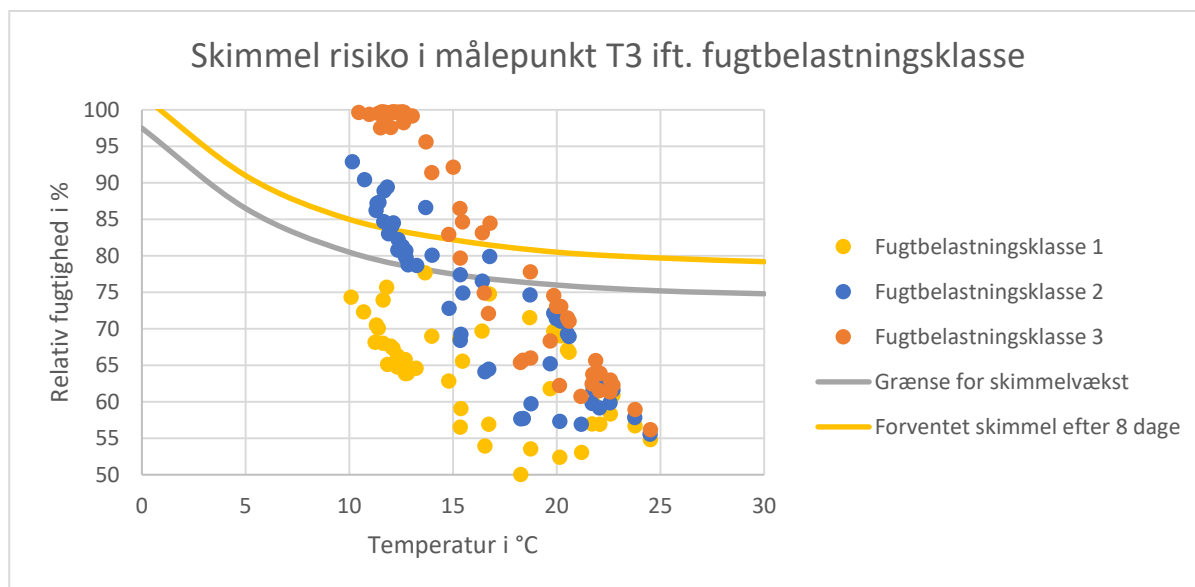


Figur 48 - Registreret fugttilskud i et dansk enfamiliehus sammenlignet med fugtbelastningsklasser i henhold til DS/EN ISO 13788. Registreringen er foretaget i alrum hvor der er indbygget HEB profil i tagkonstruktionen

Her ses det, at langt hovedparten af målepunkterne i alrummet ligger placeret i fugtbelastningsklasse 2 eller derunder. I nærværende tilfælde må fugtbelastningsklasse 2 derfor anses som værende en passende forudsætning i forbindelse med de udførte simuleringer.

8.5.1 Konsekvens ved ændret fugtbelastningsklasse

Som følge af den registrerede spredning i fugttilskuddet til indeklimaet, må det forventes at det foruddefinerede fugttilskud i fugtbelastningsklasse 2, i mange tilfælde enten under- eller overvurderer det reelle fugttilskud. Idet indeklimaet har direkte indvirkning på forholdene i målepunkt T3, medfører dette også væsentlig ændrede forhold alt efter hvilken fugtbelastningsklasse der forefindes.



Figur 49 - Skimmelrisiko på den varme side af dampspærren i målepunkt T3 alt efter tilstedeværende fugtbelastningsklasse.

Som det ses i nærværende opstilling, har fugtbelastningsklassen væsentlig indvirkning på forholdene i målepunkt T3. Mens fugtbelastningsklasse 1 kun medfører ét enkelt målepunkt på grænsen til gunstige vækstbetingelser for skimmel, medfører fugtbelastningsklasse 3 lange perioder med relativ fugtighed pålydende 95-100%. Det må dermed konkluderes, at fastlæggelsen af fugtbelastningsklassen er yderst vigtig i forbindelse med simulering af de fremtidige forhold omkring de indbyggede kuldebroer.

8.6 Perspektivering

De gennemførte undersøgelser i nærværende rapport samt resultaterne heraf, viser generelt god overensstemmelse i forhold til hinanden. Dette være sig både indbyrdes mellem de teoretiske simuleringer, men også sammenhængen til de udførte undersøgelser i praksis.

Undersøgelserne i praksis har dog kun omfattet ikke-destruktive metoder, hvorved det kun er konstruktionernes overflade, der har været udsat for test. De teoretiske undersøgelser har derimod vist, at de mest kritiske forhold er lokaliseret et stykke inde i konstruktionen i tæt forbindelse med de indbyggede HEB profiler. Det ville derfor være oplagt at udføre en destruktiv test for at undersøge forholdene tæt inde omkring HEB profilerne. En sådan testmetode ville i givet fald kunne have omfattet indbygning af dataloggere for at følge de tilstedeværende forhold over en længere periode i konstruktionernes blivende udformning.

Det har dog ikke været muligt at udføre de destruktive testmetoder i forbindelse med tilblivelsen af nærværende afhandling, idet det testede enfamiliehus allerede står færdigopført og beboet. Det har derfor heller ikke været muligt at verificere de teoretiske resultater vedrørende forholdene inde i henholdsvis ydervæg og tagkonstruktion.

9 Konklusion

Kuldebroer kan ikke udelukkende betragtes som enten et energiteknisk eller et fugtteknisk problem. Det er derimod vigtigt at betragte kuldebroerne fra begge perspektiver sideløbende, idet begge områder påvirkes af tilstedeværelsen af en kuldebro.

Energiteknisk har de gennemførte undersøgelser vist, at de indbyggede kuldebroer ikke udgør så stort et energiteknisk problem, som der ellers lægges op til i bygningsreglement 2018. I bygningsreglement 2018 lægges der op til, at man bør forøge en konstruktions 'rene' U-værdi med 50-70%, såfremt de indbyggede kuldebroer ikke indregnes. Resultaterne fra testhuset i nærværende rapport viser dog, at transmissionstabt gennem klimaskærmen kun øges med 9% ved indregning af de indbyggede U-værdier. Kuldebroerne i nærværende testhus er dermed ikke så stort et energiteknisk problem, som man kunne frygte. Indregningen af kuldebroerne bevirker dog, at testhusets samlede energibehov stiger 4,6%. Dette er i sig selv en relativ lille stigning, men i dette tilfælde er det netop nok til, at kravet til maksimalt tilladt energibehov overskrides. Det må derfor konkluderes, at kuldebroerne i visse tilfælde kan vise sig som værende en betydende energimæssig faktor.

Fugtteknisk er kuldebroer et mere uhåndgribeligt begreb. Der beskrives i Bygningsreglement 2018, at kuldebroer i klimaskærmen ikke må medføre problemer med kondens og skimmelvækst. Der findes dog ingen retningslinjer for, hvordan dette skal vurderes på samme vis, som der findes vejledning til, hvordan det energimæssige aspekt skal vurderes. Der er gennem rapporten derfor udført 3 forskellige analyse- og simuleringsmetoder for at give et fuld og nuanceret billede af det fugttekniske aspekt. De 3 analysemetoder er:

- **HEAT2 i kombination med damptryksdiagram.** Denne metode er den simpleste metode og resultaterne herfra må betragtes som værende vejledende. Metoden er hurtig at benytte, og egner sig til at udføre simple parameterstudier, for at sammenligne hvorvidt én konstruktionsopbygning er bedre end en anden.
- **HEAT2 i kombination med WUFI Pro.** Denne metode er mere retvisende i sine resultater, idet der benyttes simuleringsprogrammer til både den varmetekniske- og fugttekniske del af kuldebroen. Metoden er benyttet til at give månedsmiddelværdier, hvorved kortere udslag ikke kommer til syne. Der er dermed risiko for at kortere udslag med negativ effekt ikke opdages.
- **WUFI 2D.** Denne metode er den mest detaljerede og derfor også den mest nøjagtige af de 3 metoder – dog også den mest tidskrævende. Her er der mulighed for at vise resultater hel ned på timebasis for et vilkårligt sted i konstruktionen, hvorfor denne metode også er den foretrukne, såfremt der er

tale om konstruktionsopbygninger 'der ligger lige på grænsen', eller hvor forhøjet fugtighed vil have særlige konsekvenser.

Fælles for de 3 benyttede analysemetoder er, at indbygningen af stålprofiler i testhusets klimaskærm medfører ændrede fugtforhold, der kræver skærpet opmærksomhed. I nærværende testhus medfører indbygningen af HEB profiler i ydervæg og tagkonstruktion i begge tilfælde forhøjede fugtigheder i forhold til, hvis profilerne ikke indbygges. Det er dog kun HEB profilet i tagkonstruktionen, der medfører øget fugtighed i en sådan grad, at der opstår væsentlig risiko for skjult skimmelvækst.

For at give et pejlemærke for hvordan man undgår skimmelvækst i forbindelse med indbygningen af kuldebroer i klimaskærmen, er der udført et simpelt parameterstudie for HEB profilet i testhusets tagkonstruktion. Parameterstudiet viser, at man med fordel kan navigere efter 1/3-reglen, hvor der kun må forefindes 1/3 af den samlede isoleringstykkelse på den varme side af dampspærren målt ud for HEB profilets krop. Der er dermed ikke isoleringstykkelsen på det 'rene' tværsnit, der regnes ud fra. Resultaterne viser dog også, at efterlevelse af 1/3-reglen ikke er en garanti for en sund konstruktionsopbygning. Det er derfor vigtigt, ikke at benytte 1/3-reglen som enkeltstående beslutningsgrundlag ved indbygning af de pågældende HEB profiler. I stedet bør der udføres en decideret fugtsimulering forud for det endelige valg af konstruktionsopbygning.

Undervejs i nærværende rapport behandles det ligeledes, hvorvidt indeklimaet i testhuset har betydning for kuldebroernes betydning. Og resultaterne viser, at indeklimaet har stor indvirkning. I testhusets tagkonstruktion ses der en direkte sammenhæng mellem den benyttede fugtbelastningsklasse til simuleringerne, og risikoen for skimmelvækst i forbindelse med det indbyggede HEB profil. Endvidere konkluderes det, at de reelle fugtforhold i testhuset varierer væsentlig mere end blot forholdende for den foruddefinerede fugtbelastningsklasse 2. Man skal derfor være opmærksom på, at forholdende i praksis kan variere meget alt efter brugsmønster og dermed afvige fra de resultater, der fremkommer ved simulering.

10 Bilag

Bilag 1 – 'Rene' U-værdier

Bilag 2 – Korrigerede U-værdier

Bilag 3 – Indbyggede kuldebroer som selvstændige linjetab

11 Litteraturliste

- Aggerholm, S. (6. udgave 2018). *Bygningers energibehov (SBI-anvisning 213)*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Boligministeriet. (1966). *Bygningsreglement for købstæderne og landet*.
- Brandt, E. (2. udgave 2013). *Fugt i bygninger (SBI-anvisning 224)*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- BYG-ERFA. (2011). *Termografiske undersøgelser - kuldebroer, isoleringsevne og fugt i bygningskonstruktioner (Erfaringsblad (99) 111230)*.
- Dansk Standard. (7. udgave 2011). *Beregning af bygningers varemetab (DS418)*.
- Fauenhofer, I. (v. 4.1). *Brugervejledning, WUDI 2D*.
- Frauenhofer, I. (v. 6.3). *Brugervejledning, WUFI Pro*.
- Hansen, E. J. (1. udgave 2018). *Anvisning om Bygningsreglement 2018 (SBI-anvisning 272)*.
- Hansen, K. G., & Hansen, R. A. (3. udgave 2016). *Forskellen mellem målt og beregnet energiforbrug til opvarmning af parcelhuse (SBI 2016:09)*.
- Jan de Place, E., & Møller, E. (2017). *Moisture supply in Danish single-family houses - the influence of building style*.
- MOE A/S, Arkitema Architects, NCC Danmark A/S, & VIA Byggeri, Energi & Miljø. (2018). *Kuldebroer og deres indflydelse på klimaskærmens varmetab*.
- Møller, E. (1. udgave 2016). *Småhuse - Klimaskærmen (SBI-anvisning 267)*.
- Nielsen, A., & Møller, E. (2017). *Mater i Bygningsfysik - Varmelære Teori*.
- Sedlbauer, K. (2001). *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in bauteilen*.
- Trafik, Bygge og Boligstyrelsen. (1998). *Bygningsreglement for småhuse*. Hentet fra https://historisk.bygningsreglementet.dk/brs98_11/0/42
- Valdbjørn, O. (2003). *Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger (By og Byg Anvisning 204)*.