



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

Titel på masterprojekt:

Kuldebroer ved stålbeslag

Projektperiode:

1. februar til 31. maj 2019

Vejleder:

Hovedvejleder: Jørgen Rose

Bivejleder: Martin Morelli

Studerende:

Thomas Jahr

Antal normalsider: 57,7

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 31.05.2019

Resume:

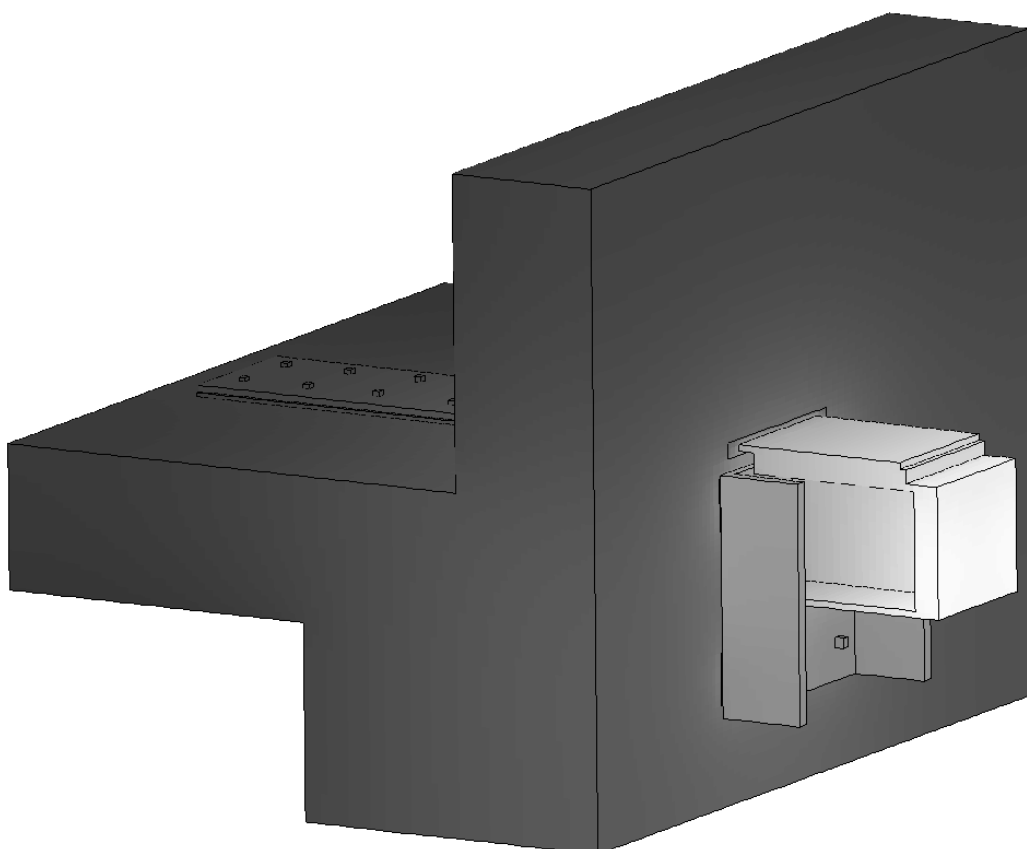
Nærværende rapport behandler kuldebroerne ved stålbeslag, i grænsefladen mellem arkitekten og ingeniøren. Gennem 3 cases behandles 3 forskellige typiske stålbeslag monteret ind i klimaskærmen, stålbeslagene anvendes typisk til at bære konstruktioner som altaner, svalegange og trapper. Kuldebroeffekten afleder lokalt koldere overflader hvorved forskellige problemer eller gener kan opstå, rapporten undersøger hvilke problemer og gener der kan opstå samt hvornår de optræder.

Gennem de 3 cases undersøges betydningen af variationer i de omkringliggende bygningsdele. Første case består af et stålbeslag monteret på dækforkanten, med et stålbånd monteret inden på oversiden af betondækket. Casen behandler variationer i de forskellige omkringliggende bygningsdele, som gulvkonstruktionen, facaden og bagvæggen. Det primære fokus er her risiko for skimmelvækst.

Anden case behandler en let klimaskærmskonstruktion hvori der er placeret gennemgående stålsøjler, fra fundament til tag, stålkonstruktionen er fastgjort til hver dækforkant. Denne case vil have fokus på både skimmelvækst og sortsværtning.

Tredje case behandler et større stålbeslag, monteret på ydersiden af en tung bagmur, denne case behandler den koldere overflader på den indvendige side af bagmuren der er synlig, i denne case behandles risikoen for gener ved sortsværtning. Fælles for alle 3 cases undersøges kuldebroernes betydning for varmetabet i form af U-værdier og den økonomiske omkostning der er forbundet med et varmetab. Ligeledes undersøges muligheden for at reducerer kuldebroerne, ved mindre designændringer og ved anvendelse af færdigproduceret kuldebrosbrydende moduler.

Kuldebroer ved stålbeslag



Dato 2019.05.31
Modtager Jørgen Rose & Martin Morelli

Indholdsfortegnelse

1. RESUME IN ENGLISH	3
2. INDLEDNING	4
2.1 PROBLEMFELT	6
2.2 PROBLEMFORMULERING	7
2.3 AFGRÆNSNING	7
3. INTRODUKTION TIL KULDEBROER OG DE AFLEDTE PROBLEMER	8
3.1 HVAD ER EN KULDEBRO	8
3.1.1 Statiske virkemåder	9
3.2 HVAD KAN EN KULDEBRO GIVE AF PROBLEMER	10
3.2.1 Fugtbelastning	10
3.2.2 Svampevækst	13
3.2.3 Oxidering	14
3.2.4 Sortsværtning og støvfigurer	15
3.2.5 Kuldenedfald og strålings asymmetri	16
4. METODE	18
5. RESULTATER FRA DE 3 CASES	25
5.1. BESLAG PÅ DÆKFORKANTER MED TRÆKBÅND IND UNDER GULV.	25
5.1.2 Termografi	27
5.1.3 Beregnings model	30
5.1.4 Original detalje	32
5.1.5 Varianter over den originale detalje	42
5.1.6 Forsøg ved ændring af isolansen i klimaskærmen	46
5.1.7 Original detalje (V1) beregnes med Isokorb kuldebro afbryder	47
5.1.8 V3 og V2(G) detalje beregnes med Isokorb kuldebro afbryder	49
5.1.9 Deldiskussion	51
5.2 LISENER I FACADEN, FASTGJORT TIL DÆKFORKANTER	57
5.2.1 Beregningsmodel	57
5.2.2 Original detalje	59
5.2.3 Deldiskussion	65
5.3 HYLDEKNÆGTE UDEN TRÆKBÅND	68
5.3.1 Beregningsmodel	68
5.3.2 Original detalje	70
5.3.3 Deldiskussion	75
6. DISKUSSION	76
7. KONKLUSION	77
8. LITTERATURLISTE	78

1. Resume in English

This report deals with the cold bridges of steel brackets, at the interface between the architect and the engineer. Through 3 cases, 3 different typical steel brackets mounted in the climate shield are treated, the steel brackets are typically used to carry constructions such as balconies, galleries and stairs.

The cold bridge effect derives locally cooler surfaces, whereby different problems or nuisances can arise, the report examines which problems and genes can occur and when they occur.

Through the 3 cases, the significance of variations in the surrounding building parts is examined.

The first case consists of a steel bracket mounted on the edge of the concrete deck, with a steel band mounted on the top of the concrete deck. The case deals with variations in the various surrounding building parts, such as the floor construction, the facade and the back wall. The primary focus here is the risk of mold growth.

The second case deals with a lightweight cladding structure in which there are steel columns, from foundation to roof, the steel structure is attached to each edge of the concrete deck. This case will focus on both mold growth and blackening.

The third case deals with a larger steel bracket, mounted on the outside of a heavy rear wall, this case deals with the colder surfaces on the inside of the back wall that is visible, in this case the risk of nuisances like blackening.

Common to all 3 cases is the importance of the thermal bridges to the heat loss in the form of U-values and the economic cost associated with a heat loss. Likewise, the possibility of reducing the cold bridges, by minor design changes and by using cold bridge disconnectors is examined.

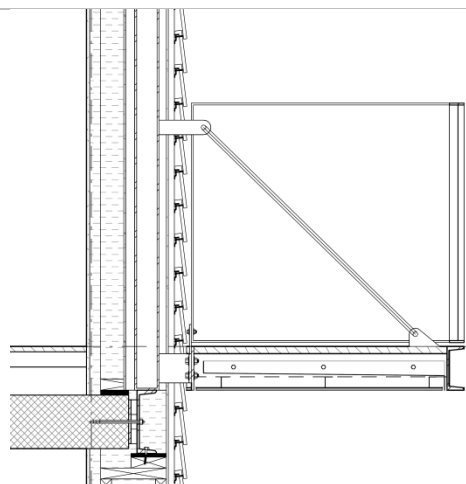
2. Indledning

Denne rapport undersøger betydningen af kuldebroer omkring stålbeslag, og den potentielle risiko forbundet med ændringer af de omkringliggende konstruktioner, som gulvopbygningen, facaden og bagvæggen. Grunden til at dette emne er valgt, er ligeledes grunden til, at jeg startede på at læse en master i bygningsfysik. Grunden er at jeg i forbindelse med mit job som projekteringsleder og baggrund som konstruktionsingeniør, har ledt mig til at fokusere på grænsefladen mellem arkitekten og ingeniøren. I denne grænseflade mellem arkitekten og ingeniøren, støder jeg ofte på kuldebroer, og i særdeleshed stålbeslag, som ingen tager et rigtigt ejerskab over i forbindelse med projekteringen. Derfor har jeg valgt at fokusere på kuldebroerne i grænsefladen mellem ingeniøren og arkitekten, for at undersøge hvor, hvorfor og hvornår forskellige risici opstår i forbindelse med stålbeslag i klimaskærmen.

Designprocessen og grænsefladerne vedrørende denne type kuldebro, er oftest meget fragmenteret. Selve stålbeslaget designes af konstruktionsingeniøren, det primære fokus på designet i denne fase, omhandler beslagets styrke og stivhed. Derudover er der oftest krav eller begrænsninger til geometrien af beslaget, enten i form af pladskrav i selve facaden, måden fastgørelsen skal udføres på, eller måden beslaget skal modtage og fastholde den bygningsdel der skal bæres.

Der er oftest arkitekten der har ansvar for at koordinere og vælge bygningsdele, som facadetyper og gulvopbygningen. I arkitektens valg indgår oftest, overvejelser i form af udseende, form, holdbarhed, geometri og funktion. Disse betragtninger foregår ofte i dialog med rådgiveren, der har ansvar for energiberegningen og en rådgiver der sidder med de akustiske beregninger samt eventuelle leverandører. Der er derfor mange faktorer der har indvirket på valget af disse bygningsdele og de endelige valg foretages oftest meget sent i projekteringsfasen.

Designet af selve stålbeslaget foretages derfor inden for en given geometrisk ramme, og dimensioneres derfor ofte tidsmæssigt uafhængigt af valgene for facaden og gulvet. Der er derfor meget sjældent, et samlet overblik over alle bygningsdelene omkring kuldebroen tidligt i projekteringsforløbet.



Figur 1 – Eksempel på stålbeslag i henholdsvis let- (th) og tungfacade (tv). (Wissenberg, 2017)

Det er almindeligt kendt at ingeniøren med ansvar for energiberegningerne skal medtage alle kuldebroerne i beregningen, men hvem har det egentlige ansvar for selve kuldebroen og dokumentationen af kuldebrosseffekten ud over energitabet?

Det kan være et tidskrævende arbejde at beregne alle kuldebroerne i et større byggeri, derfor anvendes ofte erfaringstal og tilnærmede værdier, for at holde projekteringsomkostningerne nede.

Før det blev obligatorisk at vedlægge energirammeberegningen til byggeandragende i 2008, blev det skønsmæssigt vurderet at kuldebroerne udgjorde 10-20 % af den samlede U-værdi. Denne vurdering er nu 10 år gammel, samtidig med at energikravene er blevet strammet. Aktuelle eksempler fra publikationen Kuldebroer og deres indflydelse på klimaskærmens varmetab, viser i nogle tilfælde at bygningens samlede U-værdi skal forøges med op til 80 %. (Wagner, et al., 2018)

Under vejledningen til §250-§298 i bygningsreglementet for 2018 er der oplyst, at for moderne velisolerede bygninger, udgør kuldebroer en så stor andel af det samlede varmetab, at hvis alle kuldebroerne medtages i beregningen vil transmissionstabet være 50-70 % højere, end hvis bidraget fra kuldebroerne udelades af beregningen. (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018)

Kuldebroernes andel af det samlede varmetab er derfor betragteligt, og det er på tide at der tages et større ejerskab af kuldebroerne i projekteringen.

Endvidere står der under §335 i bygningsreglementet for 2018, at kuldebroer i klimaskærmen ikke må medføre problemer med skimmelvækst eller kondensdannelse, som følge af akkumulering af fugt fra indeklimaet. (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018)

Under vejledningen til §334-§339 er der udspecificeret at ved projektering af både renoveringer og nybyggeri, bør den forventede eller aktuelle fugtbelastning medtages i betragtningen af, om der er det nødvendige luftskifte i alle rum, således at der ved dimensionering og valg af ventilationsstrategi, materialer og bygningsdele tages hensyn til den fugtproduktion, temperatur og luftudskiftning, der kan forekomme i bygningen, under udførelses og brugsfasen. Derved kan det sikres at et sundt indeklima kan opretholdes, og de valgte materialer og konstruktioner ikke nedbrydes eller at der opstår skimmelvækst. (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018)

Bestemmelserne i bygningsreglementet suppleres af vejledninger, der blandt andet omfatter fugthåndtering og –dokumentation. Vejledningerne beskrives som et værktøj til bygherren, til at vurdere behovet, for at få tilknyttet en fugtsagkyndig til det aktuelle projekt. Den fugtsagkyndige skal vurdere, om fugtforholdene er håndteret på fornuftigt vis. Det kan fx være relevant med en fugtsagkyndig, til at vurdere om kuldebroerne, som beskrevet under §335 er håndteret korrekt. (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018)

En af vejledningerne til bygherren er Krav til fugtteknisk dokumentation samt fugtsagkyndiges kompetencer og virke (Aagaard, Emcon, & Møller, 2011), her beskrives den fugtsagkyndiges virke som henholdsvis projekterende og som kontrollant. Der henvises endvidere til Vejledningen om håndtering af fugt i byggeriet (Møller, Eva B. (Red.), December 2010), i denne vejledning står der under afsnit 3.3.1 at almindelige fugtdimensioneringsopgaver, bl.a. dækker over, at det skal udføres en vurdering af byggeriet i brugsfasen, hvor forhold som om der er benyttet luft-, fugt- og damp-tætte løsninger og lukninger de nødvendige steder, samt at der skal udføres en vurdering af overfladetemperaturer ved kuldebroer.

Bygningsreglementet og vejledningerne, beskriver at det er bygherrens ansvar at de nødvendige beregninger og vurderingen foretages.

Når bygherren indgår en kontrakt med den valgte rådgiver, forventes det som regel at "alt" er med og bygherren får den fulde pakke. Ydelsesbeskrivelsen nævner en række punkter hvor rådgiveren skal leverer en ydelse for at overholde bygningsreglementet, herunder de almindelige ingeniør og arkitekt discipliner, samt krav til de mere specialiserede discipliner som rådgivning ift. brand og det akustiske og optiske indeklima.

Det kan derfor være lidt svært at finde frem til hvilken rådgiver der har ansvaret for at foretage fugttekniske beregninger, er det arkitekten, energirådgiveren eller konstruktionsingeniøren og hvem har den fornødne kompetence. Det kan være at dette område nogle gange negligeres fordi kompetencerne ikke ligger helt inden for de forskellige fag og at de udførte løsninger sjældent resulterer i store problemer. Men det er som sagt på tide at der tages et ordenligt ejerskab over kuldebroerne i projekteringen, således at alle aspekterne forbundet med kuldebroer følges til ende.

Som nævnt har denne rapport til formål, at undersøge om forskellige designvalg og efterfølgende designændringer kan have af betydning for kuldebroeffekten for en given kuldebro.

Der tages udgangspunkt i en case, hvor der i projekteringen ikke har været foretaget beregninger af den aktuelle kuldebro eller vurdering af risiko for fugtproblemer. Først behandles den originale detalje, og efterfølgende behandles forskellige realistiske designændringer i facade- og gulvkonstruktioner, for at undersøge hvor meget ændringer i disse bygningsdele har af indflydelse på kuldebroen. Derefter behandles to andre cases, hvor fokus ligger på andre typer af kuldebroer fra stålbeslag og de deraf afledte gener i de konstruktionstyper.

2.1 Problemfelt

Ved nybyggeri og renoveringer, er der ofte en udfordring i at ophænge og bære bygningsdele, uden på bygningens klimaskærm, dette løses som regel ved at montere stålbeslag og konsoller i klimaskærmen, men hvad betyder dette for konstruktionens varme- og fugttekniske egenskaber.

Konkret vil projektet undersøge konstruktive kuldebroer, med fokus på de stålbeslag som benyttes i nybyggeri og ved renovering, særligt omkring fx altaner, svalegange og udvendige trapper, men også andre steder hvor stålbeslag anvendes udvendigt.

Der findes færdige løsninger som fx Isokorb (Schöck Ltd., 2019) der er udviklet af producenten Schöck. Disse løsninger betragtes dog oftest som dyre og anvendelsen er derfor ikke almindeligt udbredt, men hvilket effekt har de på begrænsningen af kuldebroeffekten.

2.2 Problemformulering

Udvalgte typiske situationer hvor stålbeslag og konsoller anvendes, 3 stk. vurderes i forhold til kuldebroseffekter og dermed risiko for negativ påvirkning af indeklimaet samt fugtrelaterede skader.

- Hvor stor skal kuldebroen være, for at der er risiko for henholdsvis gener eller skader som fx kuldenedfald, støvkondens, risiko for skimmelvækst eller kondens.
- Hvis der er gener eller skader, kan løsningerne så forbedres, under forudsætning af at den statiske formåen bevares.
 - Første prioritet er at der ikke opstår gener eller skader.
 - Anden prioritet er at varmetabet reduceres.

I forhold til ovenstående inddrages konsekvensen af at følgende parametre ændres.

- Har facadens isolans betydning for størrelsen af kuldebroen i forhold til risiko for gener eller skader.
- Følsomhed overfor ændring i fugtbelastningsklasser.
- Følsomhed overfor varierende materialeparametre.
- Særlige forhold når stålet bryder det damptætte lag.
- Hvis muligt termografi, af udførte beslag.
- Undersøgelse af hvornår en kuldebro kan vurderes som acceptabel, i forhold til de afledte gener eller risiko for skader.

2.3 Afgrænsning

Denne rapport begrænses til at undersøge 3 cases, ved stationære beregninger og en teoretisk tilgang i vurderinger og konklusioner, med baggrund i den tilgængelige faglitteratur.

Der foretages ikke deciderede felt- eller laboratoriestudier.

Fokus ligger ikke på de energi- eller miljømæssige betragtninger som bygningens samlede varmetab eller CO₂ udledninger.

3. Introduktion til kuldebroer og de afledte problemer

Det forventes at alle bygninger har kuldebroer, de mest almindelige kuldebroer fx samlinger mellem vægge og søjler med fundamentet, overgange mellem ydervægge, vinduer og døre, er alle reguleret via lovkrav i bygningsreglementet. Øvrige kuldebroer skal indregnes i bygningsdelenes samlede u-værdier grundet kuldebroernes mere unikke karakter.

3.1 Hvad er en kuldebro

Kuldebroer er områder i klimaskærmen hvor det isolerende lag reduceres eller brydes, hvorved varmetabet lokalt er større end det omgivende areal.

I bygningsreglementet stilles der krav til dokumentation af konstruktionernes U-værdier. Alle kuldebroer (linjetab og punkttab) skal indregnes konstruktionernes U-værdier, på nær få udvalgte bygningsdele, hvor der stilles specifikke krav til linjetabet. (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018)

Der skelnes imellem 3 definitioner ved varmetab i forbindelse med varmeledning. Det er henholdsvis fladetab, linjetab og punkttab. Kuldebroer er varmetab der forekommer ved linje og punkttab. Ved kuldebroer foregår varmetabet 2 og 3 dimensionalt, ved henholdsvis lineær kuldebro og punktkuldebro, i modsætning til varmetabet fra en flade, hvor varmestrømmen kun foregår i én dimension.

- Fladetabet er bestemt ved en U-værdi (W/m^2K), er varmestrømmen i en endimensionel retning, fx varmetab fra midten af ydervægge, tag og dæk.
- Linjetabet er bestemt ved Ψ (W/mK), er varmetabet fra lineær kuldebro, fx samlinger mellem ydervæg og terrændæk.
- Punkttab er bestemt ved χ_k (W/K), er varmetabet fra en punktkuldebro hvor konstruktive elementer gennembryder eller formindsker isoleringen i klimaskærmen, fx søjlefundamenter i et terrændæk.

Der findes mange forskellige former for kuldebroer, typisk opdeles de i følgende fire undergrupper: (Dansk Standard, 2011, s. 8 & 9)

Geometriske kuldebroer

De geometriske kuldebroer opstår, når konstruktionens udvendige og indvendige geometri er forskellig, der vil derved opstå indadvendte eller udadvendte hjørner, hvilket resulterer i 2-dimensionale varmestrømme. Fx samlinger mellem bygningsdele som ydervæggsfundamenter samt murkroner og hjørnesamlinger i ydervæggene. Efter DS418 (Dansk Standard, 2011), kan geometriske kuldebroer regneteknisk også være negative, det gælder ved indadvendte hjørner.

Konstruktive kuldebroer

Konstruktive kuldebroer fremkommer hvor isoleringen i klimaskærmen helt eller delvist gennembrydes af bygningsdele med højere varmeledningsevne. Fx stålbeslag ved altanbæring og fundamenter under bærende skillevægge. De konstruktive kuldebroer kan altså både være lineære- og punktkuldebroer. (Wagner, et al., 2018)

Systematiske kuldebroer

De systematiske kuldebroer opstår på samme måde som de konstruktive kuldebroer. Kuldebroen er ofte i sig selv af mindre betydning, dog optræder kuldebroen i et større antal, hvorved det samlede varmetab kan være af stor betydning. Det kan være bygningsdelselementer som murbindere og regler i skelet konstruktioner. (Wagner, et al., 2018)

Konvektive kuldebroer

Konvektive kuldebroer har ikke noget at gøre med varmeledningsevnen af de materialer der bruges i byggeriet, men den byggetekniske udførelse af byggeriet.

De konvektive kuldebroer er utilsigtede luftstrømninger igennem isoleringslaget eller luftbevægelser i konstruktionerne generelt. Under Anneks A i DS418 (Dansk Standard, 2011), kan korrektionsværdier ved luftspalter i isoleringslaget findes.

Derudover medregnes de konvektive kuldebroer normalt ikke i projekteringen, fordi kuldebroen opstår som følge af udførelse fejl. (Wagner, et al., 2018).

3.1.1 Statisk virkemåder

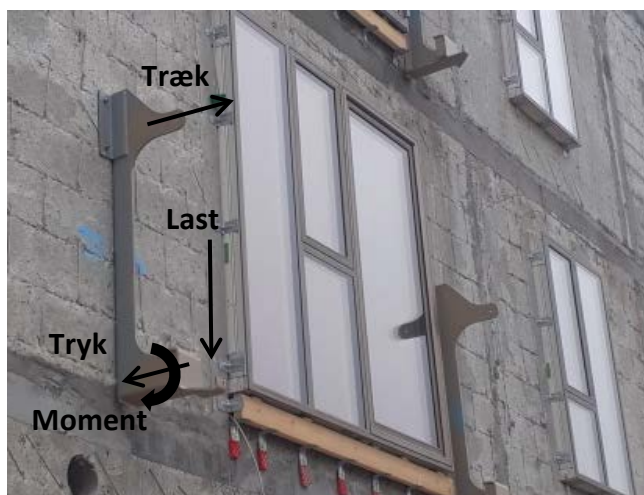
De kræfter der ofte skal optages og videreføres, når der anvendes beslag på facader til bæring af trapper og altaner mv. er en kombination af vandret udadrettet træk og lodret nedadrettet tryk.

Ofte vil det nedadrettede tryk, skulle optages i en afstand fra fastgørelsespunktet til bygningen, hvilket resulterer i at der opstår et moment, mellem punktet hvor lasten bæres, og kraften afleveres til bygningen. Et moment er et udtryk for den rotationskraft der derved opstår. Momentet kan deles op i et vandret udadrettet træk og et vandret indadrettet tryk, og afleveres til fastgørelsespunkterne, såfremt beslagets interne styrke tillader dette.

Når momentet deles op, vil størrelsen af de kræfter der skal tillægges den oprindelige last, afhænge af den lodrette afstand mellem fastgørelsespunkterne, der skal optage de resulterende træk og tryk kræfter, se figur 2 herunder. Oftest vil trykkræften ikke være et problem i det kræften direkte kan afleveres til bagmuren eller dækket ved simpelt kontaktryk. Derimod er det resulterende bidrag fra trækkræften være en udfordring.

Det er derfor en fordel at etablere hyldeknægte, der tillader en stor afstand mellem hvor træk og trykkræften afleveres. Dette kan dog kun lade sig gøre hvis der er en tung bagmur eller en tværgående mur der går ud til facade.

I de situationer hvor trækkræften bliver for stor, ofte fordi beslagets geometri ikke tillader en stor nok afstand mellem fastgørelsespunkterne. Er det en mulighed at indlægge et trækbånd, ind oven på etagedækket, hvor det fastgøres ned i etagedækket, der oftest er af betondæk.



Figur 2 – Altanbeslag på tung bagmur, med forklaring af kræfter.

Fordelen ved at indlægge et sådan trækbånd, er at det er muligt at optage store træk. Det er ofte nødvendigt at indlægge trækbånd i dækoversider, når der arbejdes med lette facader og etagedæk af beton, hvilket nødvendiggør at stålbeslagene monteres til dækforkanter.

I situationer hvor det ikke er muligt eller tilstrækkeligt at indlægge trækbånd på dækoversider. Kan løsningen være at etablere søjler eller lisener i facaden. Det kan ofte være ved renoveringer eller tilbygninger, hvor der er lette facader eller teglfacader i kombination med etagedæk af træbjælkelag.

Lisener et gennemgående søjler, ofte helt fra fundamentet til øverste etagedæk. Lisenerne er placeret i facaden, mellem regn skærmen og den indvendige beklædning eller bagmur. Lisenerne er ved hver etage fastgjort til etagedækket, for at overføre de vandrette træk- og trykkræfter. Kræfterne der skal overføres vil være begrænset, fordi det her er muligt at etablere en stor afstand mellem fastgørelsespunkterne.

Det er også muligt at etablere udvendige søjler, både i forside og bagsiden af eventuelle altaner. Det eliminerer naturligvis ovenstående problemstilling, men er ofte ikke muligt grundet pladsforhold og er ligeledes ikke ønsket af arkitektoniske årsager.

3.2 Hvad kan en kuldebro give af problemer

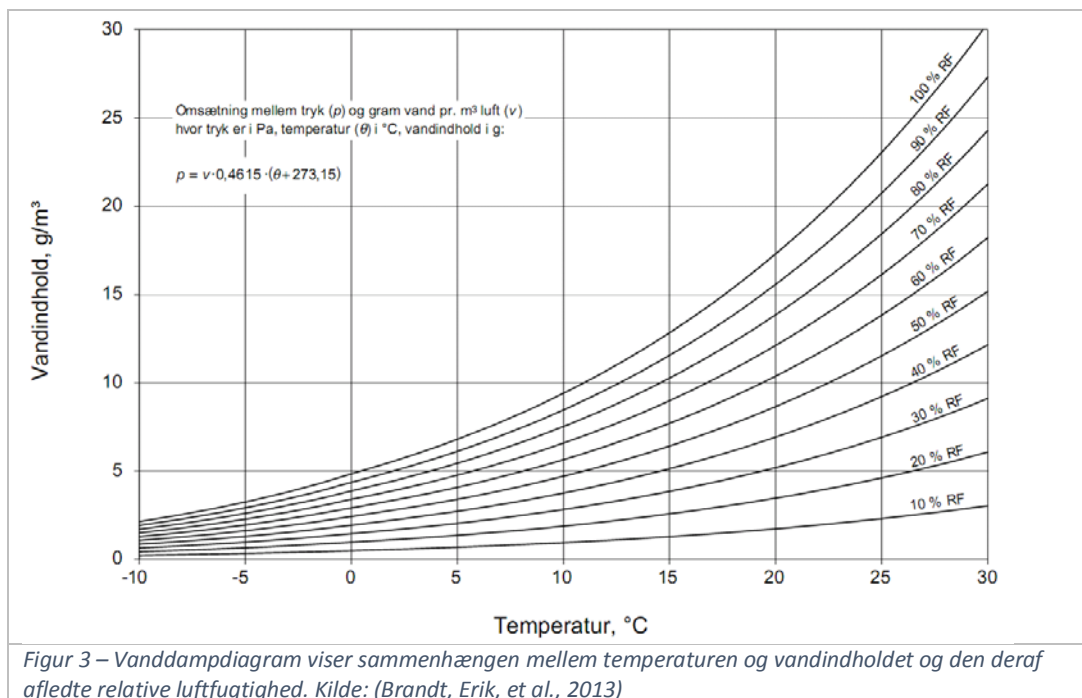
Problemerne skyldes at varmestrømmen er større ved kuldebroen end ved den omgivende bygningsdel, det afleder at materialerne og luften tæt ved materialernes overflader er lavere end ved de omgivende overflader.

Den øgede varmestrøm forårsager et problem i sig selv samt det afleder også en lokal øgede relativ luftfugtighed.

I de efterfølgende afsnit introduceres en række afledte konsekvenser af den lavere overfladetemperatur og den øgede luftfugtighed.

3.2.1 Fugtbelastning

Hen over året vil mængden af fugt i udeluften variere, der er ligeledes forskel på mængden af fugt der er i luften indendørs og udendørs. Fugten i luften består af vanddamp, denne vanddamp vil skabe et vanddamptryk, der er afhængig af temperaturen. Begrebet relativ luftfugtighed, beskriver andelen af vanddamp der potentielt kan være i luften ved en given temperatur. Varm luft kan indeholde mere vanddamp end kold luft, derved vil den relative luftfugtighed stige, hvis temperaturen sænkes når luften indeholder den samme mængde vanddamp. Når den relative luftfugtighed stiger til 100 % vil vanddampen fortættes, og afsættes som kondens på overflader eller falde som tåge. (Brandt, Erik, et al., 2013)



Mængden af vanddamp i udeluften er størst om sommeren, udetemperaturen er generelt væsentligt højere og derfor kan luften indeholde mere vanddamp end om vinteren. Den relative luftfugtighed varierer hen over døgnet afledt af temperaturvariationerne. Om vinteren indeholder luften væsentligt mindre vanddamp dog er den relative luftfugtighed højere end om sommeren, den relative luftfugtighed ligger gennemsnitligt omkring 90 % om vinteren og omkring 70% om sommeren. Der er dog tale om at luften er meget tør om vinteren, idet luften kun indeholder omkring 5 g vand pr. m^3 , i modsætning til om sommeren hvor luften indeholder omkring 12 g vand pr. m^3 . (Brandt, Erik, et al., 2013)

Mængden af vanddamp i inde luften påvirkes af andre faktorer, end der gør sig gældende i udeluften. Temperaturen i indeklimaet varierer i langt mindre grad end det gør sig gældende i udeklimaet. Indendørs ligger temperaturen oftest omkring 20-22 $^{\circ}C$. Indeklimaet ventileres med udeluft, samtidig med at der tilføjes vanddamp til indeklimaet fra de mennesker og dyr der bruger bygningen, samt aktiviteter som rengøring, tøjvask og madlavning. Mængden af vanddamp i indeklimaet, er derfor en kombination af udeluftens vanddampindhold, mængden af tilført udeluft, mængden af den vanddamp der produceres i bygningen og bygningens volumen. Jævnfør ovenstående vil inde luften altid indeholde mere vanddamp end udeluften, derfor vil udluftning altid fjerne vanddamp fra indeklimaet, og derved sænke den relative luftfugtighed i indeklimaet. Dog skal udluftningen om vinteren gøres i korte intervaller for at undgå af de indvendige overflader i bygningen ikke køles for meget ned. (Brandt, Erik, et al., 2013)

Ovenstående viden anvendes til at fastsætte fugtbelastningsklasser der anvendes ved fugtteknisk dimensionering. DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) benytter 5 fugtbelastningsklasser, betegnet fugtbelastningsklasse 1 til 5.

I tabellen herunder vises fugtbelastningsklasserne afledt efter bygningens funktion.

Tabel 1 – Kilde: Tabellen og tabelteksten herunder stammer fra SBI 224 (Brandt, Erik, et al., 2013, s. 65), tabellen indeholder eksempler på rum i fugtbelastningsklasserne i henhold til DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) modificeret i overensstemmelse med danske erfaringer.

Fugtbelastningsklasse	
1	Ubenyttede bygninger, tørre lagerhaller, idrætshaller uden tilskuere, industribygninger uden fugtproduktion
2	Kontorer, forretninger, boliger med normal beboelsestæthed og ventilation*
3	Boliger med ukendt beboelsestæthed**, idrætshaller med mange tilskuere***
4	Storkøkkener, kantiner, bade- og omklædningsrum
5	Specielle bygninger, fx vaskerier, bryggerier, svømmehaller
* I Danmark anses en bolig for at have normal ventilation, hvis bygningsreglementets krav om ventilation er opfyldt.	
** Beboelsestætheden kan fx være ukendt i lejeboliger.	
*** I Danmark henregnes idrætshaller med mange tilskuere til fugtbelastningsklasse 3.	

Det specifikke vanddampindhold i indeklimaet afhænger af temperaturen i udeklimaet, idet for forudsættes at luftskiftet øges med en stigende temperatur i udeklimaet, derved bortventileres fugttilskuddet til indeklimaet fra bygningens brug. Det antages at ved en månedsmiddeltemperatur i udeklimaet på 20 °C og derover, vil fugttilskuddet til indeklimaet være lig 0, grundet et meget stort luftskifte.

I tabellen herunder vises en teoretisk beregnet relativ luftfugtighed, for hver måned fordelt på de 5 fugtbelastningsklasser.

Tabel 2 – Kilde: Tabellen herunder stammer fra SBI 224 (Brandt, Erik, et al., 2013, s. 66). Tabellen indeholder fugtbelastningsklassegrænser (% RF) i henhold til DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) beregnet på grundlag af månedsgennemsnittene for udeluftens temperatur og relative fugtighed iht. referenceåret TRY.

Måned	Luft-temperatur	RF _{ude}	Inde-temperatur	Fugtbelastningsklassegrænser ved 20 °C			
	TRY			% RF			
	°C			1-2	2-3	3-4	4-5
januar	-0,6	94	20	35	46	58	69
februar	-1,1	91	20	35	46	58	69
marts	2,6	91	20	39	49	58	69
april	6,6	82	20	45	53	58	69
maj	10,6	78	20	50	56	60	69
juni	15,7	67	22	55	59	64	69
juli	16,4	74	23	59	62	66	69
august	16,7	71	23	61	64	66	69
september	13,7	85	22	58	62	65	69
oktober	9,2	87	20	51	57	63	69
november	5	91	20	45	53	61	69
december	1,6	88	20	38	49	59	69

3.2.2 Svampevækst

Når grænseværdier og designkriterier for kuldebroer skal findes, er det nødvendigt at betragte sammenhæng mellem temperaturen og den relative luftfugtighed, i forhold til grænserne for vækst af skimmel og andre former for svampe.

Skimmelsvampe er meget udbredt i naturen, og der findes skimmelsvampesporer overalt. Der vil derfor altid være risiko for at skimmelsvampe vil gro når de rette vækstbetingelser er til stede. For at skimmelsvampe kan vokse, skal der være 4 betingelser til stede, fugt, næring, varme og tid. Den vigtigste vækstbetingelse er fugt, der behøves ikke være vand tilstede, det er nok med en høj relativ luftfugtighed. Når skimmelsvampesporerne spirer dannes mycelium, det er det vi kan se som skimmel eller mug. Skimmelsvampe vokser som regel på overfladen af et materiale, og vokser bedst på organiske materialer. Skimmelsvampe er meget effektive, de behøver ikke lys og kan næres ved støv der sidder på overfladen af uorganiske materialer.

Grænsen for skimmelvækst på organiske materialer, ligger ved 75 % relativ luftfugtighed, og ca. 80 % relativ luftfugtighed for vækst på uorganiske materialer. Vækstbetingelserne er bedst ved temperaturer mellem 20 °C og 30 °C, ved temperaturer derunder, går væksten langsommere og væksten går ofte i stå under ca. 5 °C.

Skimmelsvamp kan være generende for mennesker, det er både når skimmelsvampene vokser og udskiller svampesporer, afgiver flygtige stoffer og når svampen dør og tørre ud. De aktive stoffer svampene udskiller, kan trænge gennem nogle bygningsdele hvorimod svampedele og –sporer, transporteres med luften. Skimmelsvampe kan derfor godt være til gene, når svampen vokser i lukkede bygningsdele.

Oftest optræder de afledte gener fra skimmelsvampe i form af hovedpine og slimhindeirritation, derudover kan skimmelsvampe give allergiske reaktioner hos nogle personer. Der er ikke fastsat grænseværdier for mængden af svampedele, svampesporer eller de flygtige stoffer svampene udskiller, der må være i indeklimaet. Det er forskelligt hvordan forskellige personer påvirkes af tilstedeværelsen af skimmelsvampe. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, & Ebbehøj, 05 12 31)

Af ovenstående kan det udledes, at skimmelsvampevækst er en indikator for et fugtigt miljø. Skimmelsvampen er ikke skadelig for konstruktionen i sig selv, dog er et fugtigt miljø skadeligt for de organiske konstruktionsmaterialer. Det fugtige miljø giver mulighed for at der opstår råd eller vækst af trænedbrydende svampe.

Ny vækst af trænedbrydende svampe sker normalt først, når fugtindholdet i træ kommer over 20 %, svarende til en ligevægt med 87 % RF i den omgivende luft. (Koch, Larsen, Lund-Johansen, & Munck, 03 07 24)

3.2.3 Oxidering

Stål der anvendes til bygningsbeslag indeholder alle jern, jern oxideres spontant af luftens dioxygen og danner salte med helt andre egenskaber. Oxidation af jern med dioxygen er et stort problem i byggeriet, fordi metallet nedbrydes idet det dannede oxidlag, der i daglig tale kaldes for rust, falder af i flager hvorved metaloverfladen blotlægges igen, så oxidationen kan fortsætte på ny.

En poleret jernoverflade er stabil i tør luft, jernet vil langsomt ødelægges, når den relative luftfugtighed overstiger 50 % (www.Systime.dk) . Den relative luftfugtighed vil almindeligvis overstige 50 %, både udendørs og indendørs det meste af året.

Når stål anvendes i byggeriet er der ofte to former for tiltag mod korrosion, rustfrit stål anvendes i udemiljø, der er svært tilgængeligt efter opførelsen, i resten af byggeriet er det normalt at anvende galvaniseret stål, graden af galvaniseringen afhænger af det klima stålet befinder sig i efter montage.

Oxideringsprocessen fremskyndes ved en højere relativ luftfugtighed, dog vil de bygningsbeslag der normalt anvendes, være modstandsdygtige overfor den øgede relative luftfugtighed en kuldebro vil aflede, grundet den almindelige galvanisering. I nedenstående tabel (Jensen, 99 11 30), ses hvilket klimatiske faktorer, stålbeslag normalt galvaniseret efter. Stålbeslag der anvendes ved altanophæng mv. galvaniseret som regel til C3 og gerne højere, hvis stålbeslagene monteres i forbindelse med murværk, grundet saltindholdet i teglstenene og de meget svære adgangsforhold for besigtigelse. Det ses ved C2 forventes kondensation at forekomme, derved vil levetiden af beslagene ikke forringes, grundet kuldebroeffekten.

Tabel 3 – Kilde: Tabellen herunder stammer fra BYG-ERFA erfaringsblad 99 11 30 2. udgave. (Jensen, 99 11 30). Tabellen beskriver korrosionskategorier efter DS/EN 12944-2 med miljøeksempler.

Korrosionskategorier	Miljøeksemper
C1 meget lav	Indendørs i opvarmede bygninger med neutral atmosfære, f. eks. kontorer, butikker, skoler mv.
C2 Lav	Udendørs atmosfære med lav forurening , landområder. Indendørs i uopvarmede bygninger, hvor kondensation kan forekomme f.eks. depoter og sportshaller.
C3 Middel	Udendørs i by- og industriatmosfære med moderat svovldioxidforurening eller kystområder med lav saltholdighed. Indendørs i produktionslokaler med høj luftfugtighed og nogen luftforurening, f.eks. fødevareindustri, vaskerier, bryggerier, mejerier.
C4 Høj, C5-I meget høj (industri), C5-M Meget høj (marine)	De 3 klasser er alle tiltagende fugtige og aggressive atmosfærer, som industri, kystnære og marine miljøer.

3.2.4 Sortsværtning og støvfigurer

Sortsværtning er partikler i luften der afsættes på overflader, det kan både være over et større areal eller i et mindre og mere koncentreret areal, af de indvendige overflader på bygningsdele.

Partiklerne i luften kan både være organiske og uorganiske partikler. Partiklerne kan stamme fra brugen af bygningen og være husstøv, tobaksrøg, sod fra stearinlys, sod og fedt fra madlavning mv. Partiklerne kan også stamme udefra og være pollen, mikroorganismer eller være partikler fra udstødningen fra biler. Nogle af partiklerne i rumluften kan nedbrydes til sod, ved kontakt med varme overflader som radiatorer, komfuret og dele på hårde hvidevarer (Chritensen & Koch, 12 12 29).

Partiklerne fra gulv og overflader hvirvles op i rumluften, og kan flyttes over store afstande, partiklerne kan opholde sig i luften over længere tid ved normale luftbevægelser. Partiklerne i luften foretager konstant små tilfældige bevægelser, såkaldte "Brownske molekylebevægelser", som skyldes atomers og molekylers varmebevægelse. Over det absolutte nulpunkt vil partiklerne være i konstant bevægelse. Partiklernes bevægelser skyldes indbyrdes tilfældige sammenstød. Fx vil en støvpartikel i luften som følge af sammenstød med luftens molekyler udføre brownske bevægelser. Partiklernes bevægelser i luften nedsættes ved lavere temperaturer (Mouritsen, 2019).

Når en partikel fra rumluften kommer nær ved en kold overflade, vil luften og derved partiklen i luften nedkøles, det sker fx ved en kuldebro på en væg. Partiklen vil så ofte sætte sig fast på den kolde overflade, hvorved overfladen bliver mørkere.

Partiklerne i rumluften afsættes altså oftere ved koldere overflader, derfor ses den såkaldte termiske sortsværtning også kaldet støvfigurer, ved kuldebroer hvor temperaturen varierer 2-3 °C eller mere i overfladen hen over kuldebroen (Chritensen & Koch, 12 12 29). Det er oftest på ydervægge og ved samlingen mellem ydervæggen og loftet sortsværtning ses. Som eksempel kan nævnes at der ved efterisoleringer af gamle hulmure, kan opstå støvfigurer ud for de faste bindere i ydermuren. Ved indvendige efterisoleringer kan støvfigurer i nogle tilfælde ses langs reglerne og ved skruhovederne. Sortsværtning langs samlingen mellem ydervægge og lofter, ses ved altanløsninger hvor der er anvendt en gennemgående betonplade eller ført stålbjælker fra altanen ind i etagedækket.

3.2.5 Kuldenedfald og strålings asymmetri

Hvis der etableres en kuldebro der i udbredelse påvirker et større areal, af den indvendige overflade, vil der i de tilfælde hvor kuldebroen er kraftig, være en risiko for at overfladetemperaturen på den indvendige side kan give gener i form af kuldenedfald eller strålingsasymmetri.

Erfaringer viser at der skelnes mellem lodret og vandret strålingsasymmetri, i forhold til hvornår temperaturforskellen opleves genererende. Der arbejdes således med vandret og lodret strålingsasymmetri, med to forskellige tolerancekrav.

I Indeklimahåndbogen (Valbjørn, Laustsen, Høwisch, Nielsen, & Nielsen, 2000), er grænsen ved vandret strålingsasymmetri sat til 10 °C, for kortere ophold og 6 °C ved længere ophold.

Af nedenstående graf fra DS 474 (Dansk standard, 1995), kan det findes at en temperaturforskel på 10 °C, kan aflede gener for ca. 4 % af de forespurgte personer.

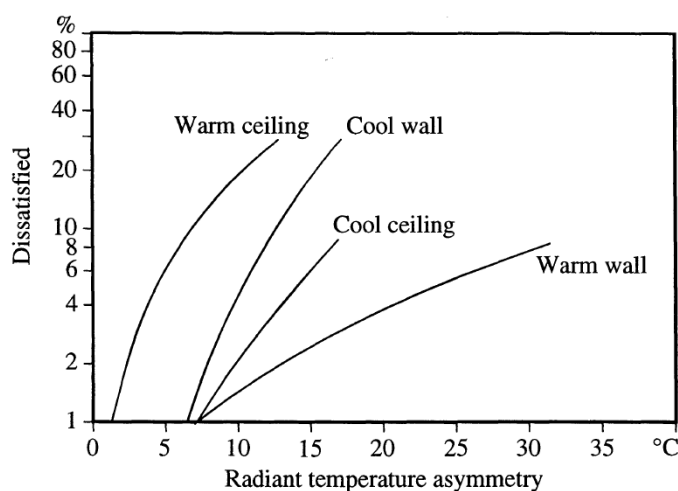


Figure A 1 b – The relation between the predicted number of dissatisfied and local discomfort caused by asymmetrical radiation.

Figur 4 – Kilde: Grafen stammer fra DS474 . (Dansk standard, 1995, s. 16). Grafen viser sammenhængen mellem det forventede antal utilfredse personer ved påvirkning af forskellige scenarier asymmetrisk stråling.

Strålingsasymmetri kan beregnes efter formlen fra Indeklimahåndbogen formel 13 (Valbjørn, Laustsen, Høwisch, Nielsen, & Nielsen, 2000).

Herunder vises et regne eksempel, for at finde den aktuelle overfladetemperatur ved en kuldebro, der vil aflede en strålingsasymmetri på 6 °C.

$$\Delta\theta_{as} = F_f |\theta_i - \theta_x|$$

Hvor:

F_f er vinkelforholdet for en flade til den kolde flade

$|\theta_i - \theta_x|$ er den numerisk positive værdi for forskellen mellem de øvrige rums overflade- og lufttemperatur og den kolde flade.

I et eksempel fra indeklimahåndbogen, fremgår det at vinkelforholdet for en person der sidder 1 m fra en glasfacade der er 5-6 m bred er 0,8, hvis personen rykkes 4 m fra samme facade, bliver vinkelforholdet 0,3. Vinkelforholdet kan maksimalt blive 1,0. (Valbjørn, Laustsen, Høwisch, Nielsen, & Nielsen, 2000).

Kolde overflader afledt af kuldebroer ved stålbeslag, vil sjældent udbredes over større arealer. Det vælges at antage et vinkelforhold på 0,8, for at regne på den sikre side, det vil i praksis betyde at der skal sidde mange stålbeslag tæt sammen på en facade. De øvrige overflader og lufttemperaturen er 20 °C.

$$\Delta\theta_{as} = 0,8 * |20^{\circ}\text{C} - 12,5^{\circ}\text{C}| = 6^{\circ}\text{C}$$

Det ses af ovenstående beregning, at overflade temperaturen skal være 12,5 °C ved kuldebroen, før der opleves gener fra asymmetrisk kuldestråling. Ved en så lav overfladetemperatur vil risiko for støvfigurer, kondens og skimmelvækst også være til stede.

Kuldenedfald fra større arealer af kolde overflader opleves oftest ved dårligt isolerede gavle eller ved vinduespartier. For at kuldenedfald kan skabe gener skal den kolde overflade have en vis højde, idet lufthastigheden er afgørende for komforten. Af figur 25.1. i Indeklimahåndbogen, vises sammenhængen mellem forskellige vinduers U-værdier, udetemperaturen, samt grænsen for højden af vinduerne før der er risiko for afledte gener fra kuldenedfald. Figuren er beregnet således at temperaturen giver et kuldenedfald med en hastighed på 0,27 m/s ved den kolde flades underkant. Beregningen er foretaget ved opholdszonen, defineret som en afstand på 0,6 m fra den kolde flade, hvor lufthastigheden normalt forventes at være aftaget til ca. 0,18 m/s. (Valbjørn, Laustsen, Høwisch, Nielsen, & Nielsen, 2000)

Det er muligt at udlede overfladetemperaturen som den anvendte U-værdi vil resultere i når det forudsættes at temperaturen indendørs er 20 °C. Det er således muligt at anvende figuren, til at finde grænseværdierne for overfladetemperaturen ved større kuldebroer, hvorved der vil være risiko for kuldenedfald.

Tabel 4 – Tabellen viser den beregnede overfladetemperatur, der er afledt af u-værdierne fra figur 25.1. i indeklimahåndbogen (Valbjørn, Laustsen, Høwisch, Nielsen, & Nielsen, 2000). Den beregnede overfladetemperatur anvendes som grænseværdi ved vurdering af risiko for gener afledt af store kuldebroer.

Højde af kold overflade (M)	Oveflade temperatur (°C)
1,8	12,4
2,5	14,6
3,2	15,8
4,4	16,9

Af ovenstående tabel kan det udledes, at før en kuldebro afleder gener fra kuldenedfald, skal kuldebroen bredes ud over et større areal, samtidig med at kuldebroen skal påvirke væggen i minimum 1,8 m højde, dog også muligt ved 2,5 m højde ved normale geometriske rumforhold. En indvendig overflade temperatur under 14,6 grader afleder samtidig risiko for støvfigurer.

4. Metode

Til vurdering af om der kan være risiko for gener eller problemer med sortsværtning, oxidering, kuldenedfald, strålingsasymmetri og svampevækst, ved kuldeboer forårsaget af stålbeslag, anvendes termiske 3 dimensionale stationære beregninger i programmet HEAT3 (Blomberg, 2019).

Herunder beskrives hvordan resultaterne er fremkommet og hvordan resultaternes vurderes.

Vurdering af risiko for gener som støvkondens, strålingsasymmetri og kuldenedfald

Fælles for støvkondens, kuldenedfald og strålingsasymmetri, er at alle tre problemer er afledt af temperaturforskelle over den indvendige overflade og ikke afhænger af den relative luftfugtighed.

Jævnfør afsnit 3.3.4 vedrørende støvkondens, sættes den nedre temperaturgrænse til 2-3 °C temperaturforskel. Der er formentligt forskel på overfladematerialet i forhold til hvornår risikoen kan opstå, det er dog valgt at anvende den nedre grænse i denne rapport, for at være på den sikre side. Hvis den almindelige overfladetemperatur er 20 °C, sættes grænsen for støvfigurer ved kuldebroen ved en overfladetemperatur under 20 °C -1,9 °C = 18,1 °C, det vil altså sige at der ved en overfladetemperatur på 18 °C, vil vurderes som begyndende risiko for støvfigurer, stigende mod en overfladetemperatur på 17,1 °C, hvorefter det vurderes som meget høj risiko for støvkondens.

Ved strålingsasymmetri og kuldenedfald, skal arealet være større og overfladen koldere før end der opleves gener end ved forholdene for støvkondens.

Jævnfør afsnit 3.3.5 vil grænsen for overfladetemperaturen, ved normale geometriske rumforhold, ligge ved 14,6 °C før end der opleves gener fra kuldenedfald og 12,5 °C før der opleves gener fra strålingsasymmetri.

Temperaturvariationerne hvorved der kan opstå støvkondens, er derfor den sikre nedre grænse i forhold til vurdering af de afledte gener fra kolde overflader.

Vurdering af risiko for skimmel, råd, svamp og korrosion

Fælles for skimmelvækst, råd og korrosion, er at alle tre problemer er forårsaget af en kombination af temperatur og fugtighed. Der er dog forskellige grænseværdier for de 3 problemer før de opstår.

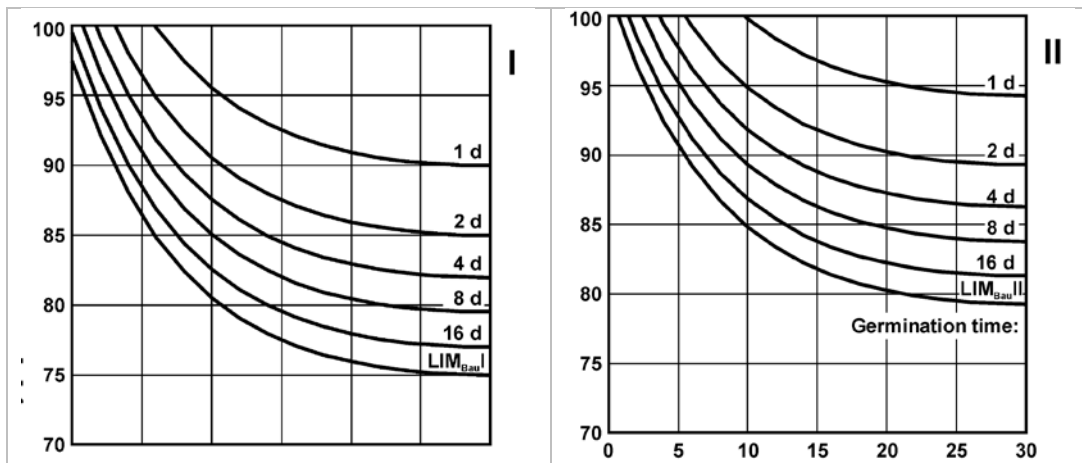
Korrosion kan opstå i overfladen af ubehandlet jern ved en relativ luftfugtighed over 50 %, hvilket der oftest vil være i et almindeligt indeklima det meste af sommerhalvåret.

Derfor overfladebehandles stålbeslag, således at levetiden sikres at være tilstrækkelig til opgaven hvor stålet anvendes. Korrosion vil derfor ikke være et emne der behandles i nærværende rapport.

Vækst af råd og trænedbrydende svampe, sker normalt først, når fugtindholdet i træ kommer over 20 %, svarende til en ligevægt med 87 % relativ luftfugtighed i den omgivende luft (Koch, Larsen, Lund-Johansen, & Munck, 03 07 24).

Vækstbetingelserne for skimmel er en del lavere, derfor anvendes vækstbetingelserne for skimmel, som den nedre grænse når designparametrene bestemmes.

Vurderingen i forhold til risiko for skimmelvækst, foretages efter de to nedenstående figurer (Sedelbauer, 2001). Figurerne repræsenterer tilnærmede værdier, gældende for en lang række skimmelsvampearter, resultatet er fremkommet ved forsøg, med vækst at skimmelvamp på byggematerialer. Den nederste linje betegnet LIM, viser den laveste grænse hvor der forventes skimmelvækst på byggematerialer, den næste grænse betegnet 16 d, angiver vækstbetingelserne hvorved de første tegn på skimmelvækst er fundet efter 16 dage, når konstante temperatur og fugt forhold opretholdes.



Figur 5 – Kilde: (Sedelbauer, 2001) figure 34.

Værdier på de lodrette akser er % relative luftfugtighed og værdierne på de vandrette akser er temperatur i grader celsius. Grafen markeret med "I" viser væksthastigheden på organiske materialer, grafen markeret med "II" viser væksthastigheden på uorganiske materialer.

De to grafer viser, hvor mange dage fugtigheden og temperaturen skal holdes konstant, før der kan dannes skimmelvækst. Den nederste kurve i de to figurer (LIM) er den nederste grænse for temperatur og fugtforhold, hvorved der kan opstå skimmelvækst. Det er oplyst at figurerne er tilnærmede og skematiske, hvorfor de kan bruges som vejledende.

Ved at aflæse grafen (I), der angiver vækstbetingelser for skimmel på organiske materialer, ses det at ved 20 °C er grænsen for skimmelvækst ved 76 % RF, ved 15 °C er grænsen for skimmelvækst 78 % RF og ved 10 °C er grænsen for skimmelvækst 81 % RF. Det ses derved at det er meget vigtigt at temperaturen og den relative luftfugtighed betragtes samtidig.

Ved at sammenholde vækstbetingelserne for skimmelsvamp og de tidligere nævnte fugtbelastningsklasser, er det muligt at udregne den kritiske overfladetemperatur, fugtbelastningsklasserne for de forskellige måneder. Dette er gjort herunder.

Tabel 5 - Nærværende skema er udarbejdet ved at kombinere fugtbelastningsklasse 2 og 3, fra SBI 224 (Brandt, Erik, et al., 2013) og derefter beregne den relative luftfugtighed ved en given overfladetemperatur successivt. Den nedre grænse for skimmelsvampes vækstbetingelser, er her bestemt ved at sammenligne kombinationen af temperatur og relativ luftfugtighed, med de to grafer fra figur 5.

Organisk materiale	Randbetingelser i henhold til SBI 224 tabel 4.				Fugtbelastningsklasse 2		Fugtbelastningsklasse 3	
Måned	Ude (°C)	Inde (°C)	Inde % RF klasse 2	Ude % RF klasse 3	Kritisk overflade temperatur (°C)	% RF	Kritisk overflade temperatur (°C)	% RF
Januar	-1,1	20	46	58	11,5	78,3	15,5	77,0
Februar	-0,6	20	46	58	11,5	79,3	15,5	77,0
Marts	2,6	20	49	58	12,5	79,0	15,5	77,0
April	6,6	20	53	58	13,5	80,1	15,5	77,0
Maj	10,6	20	56	60	14,5	79,3	16,0	77,2
Juni	15,7	22	59	64	17,5	78,0	19,0	77,0
Juli	16,4	23	62	66	19,5	76,8	20,5	76,9
August	16,7	23	64	66	20,0	76,9	20,5	76,9
September	13,7	22	62	65	18,5	77,0	19,0	78,2
Oktober	9,2	20	57	63	15,0	78,2	16,5	78,5
November	5,0	20	53	61	13,5	80,0	16,0	78,4
December	1,6	20	49	59	12,5	78,0	15,5	78,3

Beregningen er foretaget ved bestemmelse af mætningsdamptrykket efter følgende formel (Brandt, Erik, et al., 2013, s. 109).

$$640,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}}$$

Ved at anvende randbetingelserne for temperatur og fugtforhold i henhold til SBI 224 tabel 4 (Brandt, Erik, et al., 2013), er det muligt med ovenstående formel, til at beregne fugtforholdene ved en given temperatur for en kold overflade i indeklimaet.

Det er muligt at finde den mindste tilladelige overfladetemperatur i indeklimaet i hver måned, for henholdsvis fugtbelastningsklasse 2 og 3, ved at sammenholde resultaterne, med de vejledende vækstbetingelser for skimmelsvamp fra Sedelbauers forsøg (Sedelbauer, 2001). Resultaterne vises herover i tabel 5.

Det er ligeledes muligt at beregne dugpunktstemperaturen, for en kold overflade i indeklimaet efter følgende formel (Brandt, Erik, et al., 2013, s. 114):

$$\frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_m}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_m}{610,5}\right)}$$

I nærværende rapport foretages vurderingen for skimmel efter ovenstående betragtninger. Det er valgt at vurdere risikoen for skimmelsvamp i de 5 koldeste måneder af året, samt oktober måned. De 4 koldeste måneder er valgt, fordi det derved er muligt at vurdere, i hvor lang en periode overfladen ved kuldebroen vil være kold. Oktober og November måned er valgt, fordi det er kolde måneder med en forholdsvis høj relativ luftfugtighed. Sammenlignes de to måneder med forårmåned April, der er en koldere måned end Oktober, dog har Oktober en meget højere relativ luftfugtighed, November måned er koldere ved samme relative luftfugtighed sammenlignet med April. Det vurderes derfor relevant at medtage de to måneder ved en vurdering af risiko for skimmelvækst. De varme måneder medtages ikke i vurderingen, fordi indendørstemperaturen tit er højere samtidig med at der oftere er åbne vinduer og døre. Temperaturvariationen mellem nat og dag er ofte meget større om sommeren, end den vil være om vinteren, hvorved forholdet mellem temperatur og relativ luftfugtighed vil være meget svingende over et døgn. Det er derfor meget svært at sammenligne med vækstbetingelserne fra figur 4 (Sedelbauer, 2001).

Ved at anvende randbetingelser svarende til månedsmiddel for temperatur og relativ luftfugtighed (Brandt, Erik, et al., 2013), kan resultaterne ikke direkte sammenlignes med vækstbetingelserne for skimmelsvamp (Sedelbauer, 2001).

Månedsmiddelværdierne er et gennemsnit af en højere og en lavere temperatur og fugtforhold gennem timerne i døgnet og dagene i måneden. Det er derfor muligt at der er gode vækstbetingelser for skimmelsvamp 8 timer i døgnet eller hvert andet døgn, og ikke den mellemliggende periode, ligesom der kan være gode vækstbetingelser, for skimmel over 15 sammenhængende døgn, ved samme månedsmiddelværdier. Ved at anvende randbetingelser som er en middelværdi over 30 dage, og den nedre grænse for vækstbetingelserne for skimmel er lagt ved 16 dage, vurderes det på den sikre side at anvende denne vurderingsmetode. Hvis forholdene over en måned hele tiden skifter mellem gunstige og ugunstige vækstbetingelser, vil det ikke betyde at der er risiko for at skimmelvækst opstår. Derfor er vurderingen af risiko for skimmelvækst, i denne rapport ikke udtryk for at der med sikkerhed vil opstå skimmelvækst, men blot at der kan være risiko for skimmelvækst.

Termografi

Bygningen i case 1, har været i brug siden sommeren 2018. Der har ikke været klager fra brugerne af bygningen, over gener fra temperaturforskelle omkring stålbeslagene, gennem den seneste vinter.

I forbindelse med nærværende rapport, er der foretaget en termografisk undersøgelse af de indvendige overfladetemperaturer, omkring det omtalte stålbeslag i case 1. Undersøgelsen blev foretaget en morgen i februar måned, ved en udetemperatur på ca. 2 °C og en inde temperatur på ca. 20 °C. Facaden er orienteret mod nordvest, der har derfor ikke været sol på facaden inden undersøgelsen.

Varmetab

Varmetabet gennem kuldebroerne behandlet i nærværende rapport, vurderes ved at beregne et økonomisk tab. Det økonomiske tab vurderes mod prisen for varmetabsbesparende tiltag, fx ved at anvende et kuldebrosbrydende Isokorb modul. Efterfølgende beregnes tilbagebetalingstiden for tiltaget, for at se om investeringen kan tilbagebetales.

U-værdier

De korrigerede U-værdier for facaden beregnes efter vejledningen i DS 418 afsnit 6.7. (Dansk Standard, 2011, s. 26)

Generelle randbetingelser for de 3 cases behandlet i denne rapport

Fælles for de efterfølgende resultater er at beregningerne foretaget i HEAT3 og manuelle damptryksberegninger, er foretaget ved randbetingelser svarende til forholdene beskrevet i SBi 224 tabel 4 (Brandt, Erik, et al., 2013).

Tabel 6 – I denne tabel vises randbetingelserne for temperatur og relative luftfugtighed, som anvendes ved beregninger af overfladetemperatur og den afledte relative luftfugtighed ved kuldebroerne i de 3 efterfølgende cases. Randbetingelserne i denne tabel er udvalgte værdier fra tabel 2. Oprindelig kilde (Brandt, Erik, et al., 2013)

Randbetingelser ved beregninger	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Ude Temperatur (°C)	9,2	5,0	1,6	-1,1	-0,6	2,6
Fugtbelastningsklasse 2, relativ luftfugtighed indendørs (% RF)	57	53	49	46	46	49
Fugtbelastningsklasse 3, relativ luftfugtighed indendørs (% RF)	63	61	59	58	58	58

Beregning af udførelsestolerancer i den modellerede beregningsmodel.

I nærværende rapport dækker udførelsestolerancer, over at der forventes luft mellem bygningsdelene. Luften eller hulrummet mellem bygningsdelene modelleres som et materiale i HEAT3, der har samme materialeparametre som hulrum beskrevet i DS418 (Dansk Standard, 2011, s. 24). Materialeværdierne kan ses herunder.

Case 1 beregningsmodel

Stålbetaget og konstruktionen omkring stålbetaget modelleres i HEAT3. Der modelleres et 1m x 1m x 1m felt af facaden og bagvedliggende konstruktioner.

Materialerne og bygningsdelenes dimensioner i den aktuelle detalje er som følger, bagmur 180 mm beton, isolering 240 mm mineraluld, betondæk 220 mm, isolering i gulv polystyren 45 mm, afretningslag 50 mm beton, trægulv 22 mm med linoleum fuldklæbet, stålbånd 10x180mm, gennemgående stålprofil er HE200A.

Mineraluld = 0,037 W/mK		
Beton = 2,5 W/mK		
Trægulv = 0,19 W/mK		
Termorude= 0,04 W/mK		
Stål = 55 W/mK		
Hulrum/luft under gulv= 0,21 W/mK		
Polystyren = 0,041 W/mK		
Hulrum/luft = 0,15 W/mK		
Gips = 0,25 W/mK		
KST16 (Isokorb 200mm) = 0,57 W/mK		

Figur 6 - Varmeledningsevner og farveangivelse anvendt i HEAT 3 til case 1.

Case 2 beregningsmodel

Stålbetraget og konstruktionen omkring stålbetraget modelleres i HEAT 3. Der modelleres et 1m x 1m x 1m felt af facaden og bagvedliggende konstruktioner. Dimensionerne for de forskellige bygningsdele er som følger, stålbetragerne er HE160A, samlet isolerings i facaden er 350 mm, indvendig beklædning 25mm gips, 220mm betondæk, 22mm trægulv på strøer med 80mm hulrum.

Mineraluld = 0,037 W/mK		
Beton = 2,5 W/mK		
Trægulv = 0,19 W/mK		
Hulrum/luft under gulv= 0,21 W/mK		
Stål = 55 W/mK		
Gips = 0,25 W/mK		
KST22 (Isokorb 160mm) = 1,06 W/mK		
Figur 7 – Varmeledningsevner og farveangivelse anvendt i HEAT 3 til case 2.		

Case 3 beregningsmodel

Stålbetraget og konstruktionen omkring stålbetraget modelleres i HEAT 3. Der modelleres et 1m x 1,8m x 1m felt af facaden og bagvedliggende konstruktioner. Dimensionerne for de forskellige bygningsdele er som følger, stålbetragerne er HE200B, 150mm bagmur, isolerings 350 mm, 220mm betondæk, 22mm trægulv på strøer med 80mm hulrum.

Mineraluld = 0,037 W/mK		
Beton = 2,5 W/mK		
Trægulv = 0,19 W/mK		
Hulrum/luft under gulv= 0,21 W/mK		
Stål = 55 W/mK		
KST22 (Isokorb 200mm) = 0,852 W/mK		
Hulrum/luft = 0,15 W/mK		
Figur 8 – Varmeledningsevner og farveangivelse anvendt i HEAT 3 til case 3.		

Programmet HEAT3

Programmet anvendes til at beregne varmestrømme gennem materialer ved numerisk kalkulation. Derved kan man bestemme U-værdier, linjetab (Ψ -værdier) og punkttab (χ_k -værdier). Det er altså muligt at beregne, vurdere og minimere varmetabet der kan opstå som følge af kuldebroer.

Programmet kan også anvendes til at beregne overfladetemperaturer, der anvendes til at vurdere, om der opstår temperatur- og deraf fugtforhold som kan være kritiske for konstruktionen eller bygningens brugere.

HEAT3 anvendes ved at definere en geometrisk model. Herefter tilknyttes geometrien materialeegenskaber i form af varmekapacitet og varmeledningsevne, og til sidst defineres de randbetingelser der gør sig gældende for overfladerne.

HEAT3 genererer resultater efter en iterativ proces, defineret af en manuel eller autogenereret celleinddeling, ligesom det er muligt at fortætte celleinddelingen i de knudepunkter hvor der opstår flerdimensionale varmestrømme, hvorved den største beregningsnøjagtighed opnås. Beregningstiderne forøges med mængden af iterationer og celler, det er dog oftest kun et problem ved dynamiske beregninger og ikke stationære beregninger. Ved dynamiske beregninger opnås et retvisende resultat med en rimelig beregningstid, ved at undgå unødvendige og forkert placerede celler. Cellestørrelserne defineres ved forsøg, og justeres således, at resultatet mellem to beregninger, hvor den ene beregning har dobbelt så mange celler som den anden, ikke medfører en forskel i den samlede varmestrøm ind i det modelleret objekt på mere end 1%. Er det tilfældet, gentages forsøget med en yderligere fordobling af cellerne indtil forskellen er mindre end 1% (Dansk Standard, 2017, s. 46)

For modellen beskrevet i afsnit 5.1, blev der foretaget en kontrolberegning. Først blev varmestrømmen beregnet, med en jævnt fordelt celleinddeling, på 60 celler i hver af modellens 3 retninger og en efterfølgende fordobling af cellerne til 76 celler i hver retning. Hvilket resulterede i en ændring af den samlede varmestrøm ind i modellen på 1,02 %. Antallet af celler fordobles igen, der anvendes 96 celler i hver retning forskellen i den samlede varmestrøm, sammenlignet med den forrige er nu 0,29 %. Der er ikke problemer med beregningstiden, derfor anvendes minimum 150 celler i hver retning, for at opnå et mere nøjagtigt resultat.

5. Resultater fra de 3 cases

Case 1 anvendes hovedsageligt til at undersøge risikoen for vækst af skimmelsvamp.

Case 2 og 3 anvendes hovedsageligt til at undersøge risikoen for sortsværtning.

5.1. Beslag på dækforkanter med trækbånd ind under gulv.

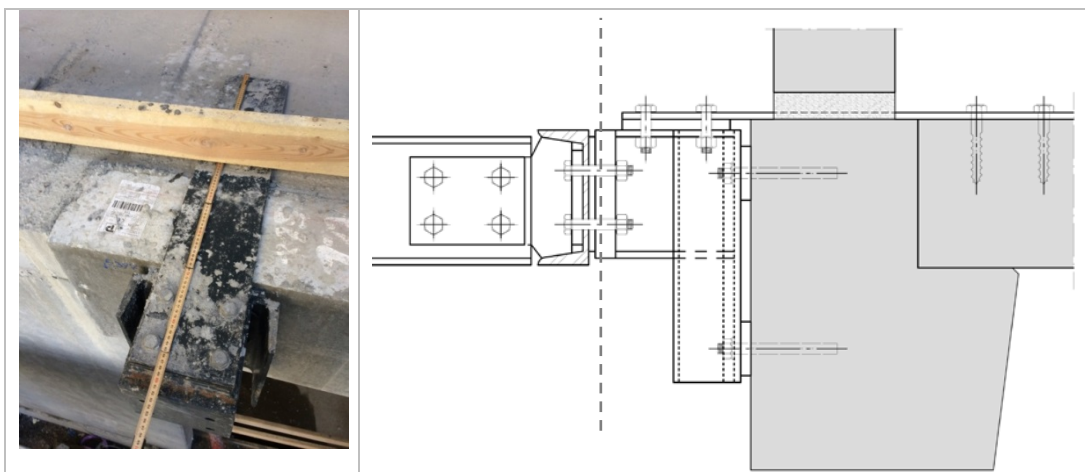
Første case i denne rapport tager udgangspunkt, i en konstruktionsdetalje der er udarbejdet som en del af projekteringen, til en ny skolebygning. Den aktuelle konstruktionsdetalje er et stålbeslag, monteret på siden af en betonbjælke, der ligger i facadeflugten af bygningen. Stålbeslagene bærer en terrasse i første sal, terrassen hviler på søjler i forkanten, se figur 10.

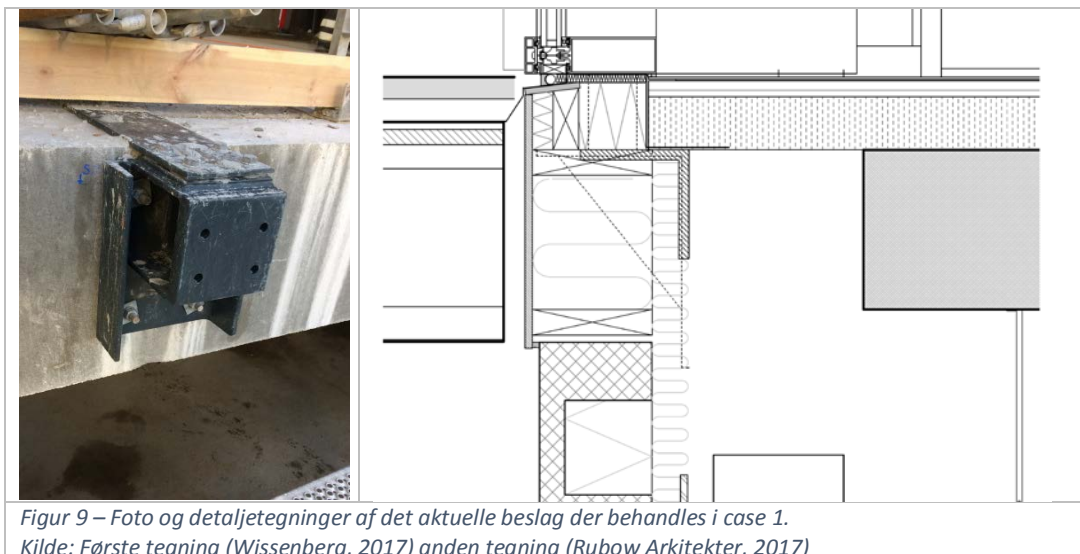
Denne case er udvalgt, fordi der ikke i forbindelse med projekteringen har været foretaget beregninger eller vurderinger, af kuldebroseffekten eller risiko for fugtproblemer af denne detalje. Denne case er også udvalgt, fordi valget af facade- og gulvtype varierer meget gennem byggeriet. Det er derfor muligt, at den aktuelle konstruktion omkring stålbeslagene, kunne have været anderledes valgt. Der udføres derfor en række beregninger, af variationer af forskellige bygningsdele omkring stålbeslaget. Beregningerne er interessante at foretage, for at undersøge i hvilken grad, variationerne af de forskellige bygningsdele påvirker kuldebroseffekten. Variationerne beskrives under afsnit 5.1.5.

Der er anvendt 8 stålbeslag, som ses herunder, for at bære den store terrasse.

Beslaget er anvendt ved både tung bagmur og ved vinduespartier.

Nedenstående tegninger og foto, er materiale fra den aktuelle case, som konstruktionen er udført på stedet.





Figur 9 – Foto og detaljetegninger af det aktuelle beslag der behandles i case 1.

Kilde: Første tegning (Wissenberg, 2017) anden tegning (Rubow Arkitekter, 2017)

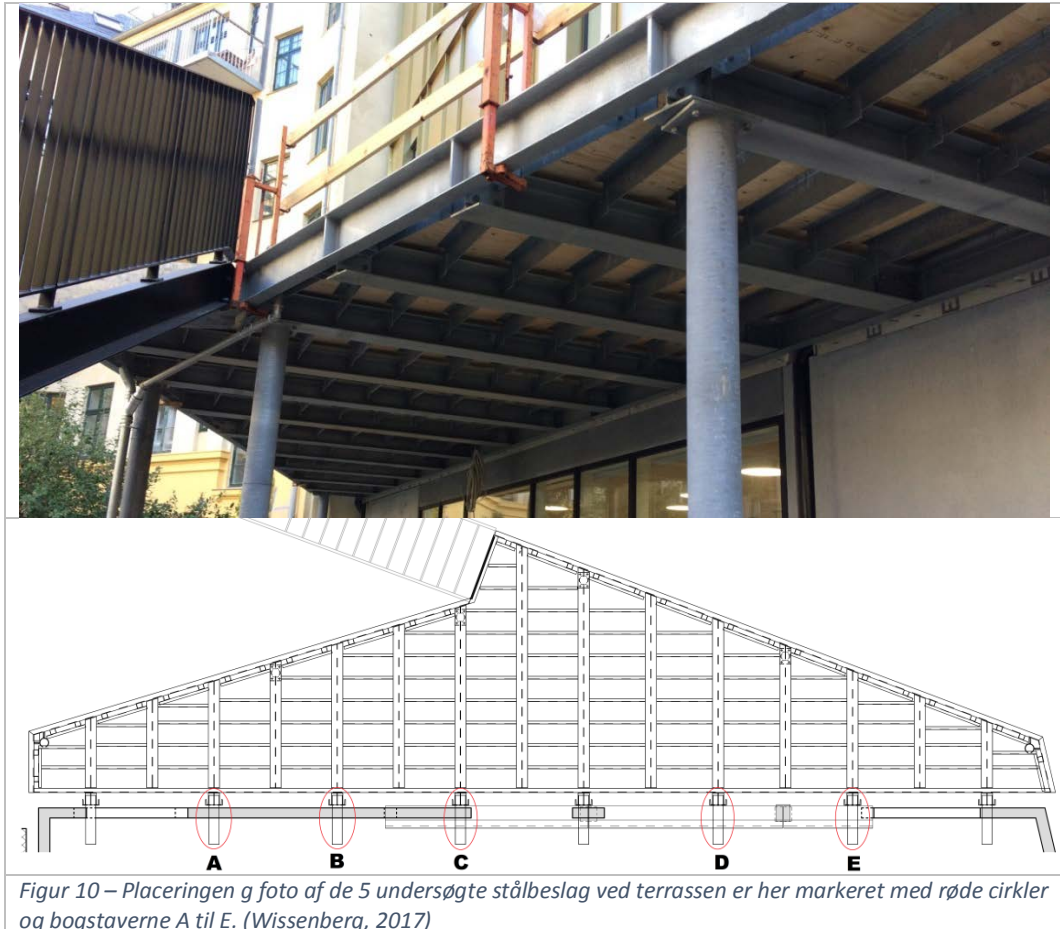
Stålbreslaget er designet ud fra den givne geometri og ikke efter en vurdering af varmetab eller kolde overflader. Geometrien er afgrænset af betonbjælken, bagmuren og facaden. Det er særligt vinduespartierne i stueetagen og på første salen der afgør hvordan stålbreslaget designes. Når et stålbreslag til montage i facaden, skal designes, er det oftest den lodrette afstand mellem fastgørelsespunkterne der er afgørende for bæreevnen. Den aktuelle situation har ved en stor del af breslagene, både vinduespartier over og under stålbreslaget, som det ses på figur 6 herover, hvilket begrænser den lodrette afstand mellem fastgørelsespunkterne, dette resulterer i et stort træk i de øverste fastgørelser. der er derfor behov for at stålbreslaget suppleres, med et stålbånd, der fastgøres til dækoverkanten.

Den tykke lodretstående plade, der ses på figur 6 øverst til højre, er placeret i overgangen til facaden der er markeret med den stiplede linje, pladen er tilføjet for at det er muligt at etablere en lufttæt samling mellem det vindtætte lag og stålprofilet, i dette tilfælde i form af en vindspærreplade.

5.1.2 Termografi

Undersøgelsen blev foretaget en morgen i februar måned, ved en udetemperatur på ca. 2 °C og en inde temperatur på ca. 20 °C. Facaden er orienteret mod nordvest, der har derfor ikke været sol på facaden inden undersøgelsen.

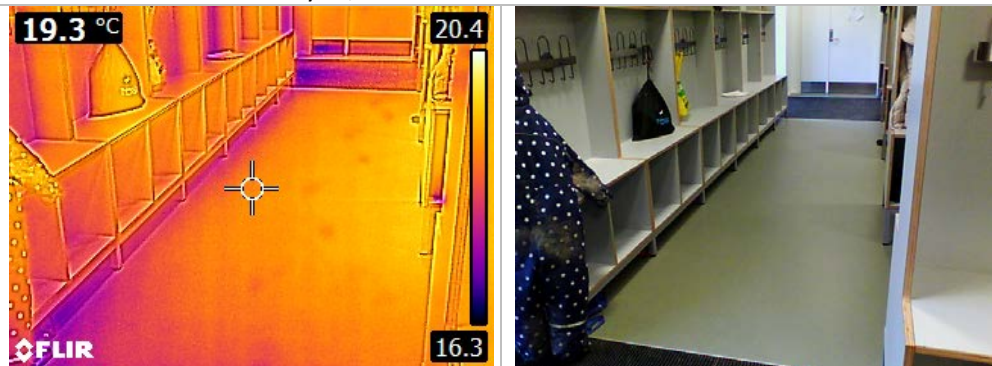
Af nedenstående plantegning, kan 5 af de i alt 8 stålprofiler ses markeret med røde cirkler og et bogstav, således at placeringen kan følges af nedenstående fotos.



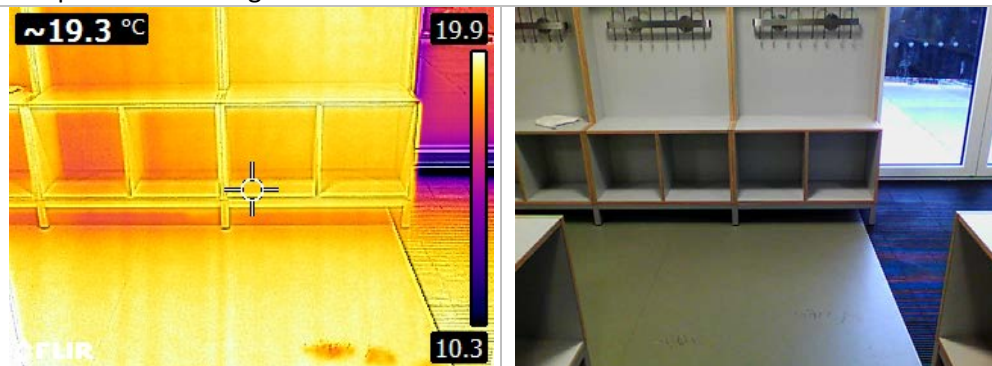
Herunder er den termografiske undersøgelse, opsat parvis i foto med henholdsvis et almindeligt foto og et termografisk foto der viser overfladetemperaturen i det givne område.

A-C

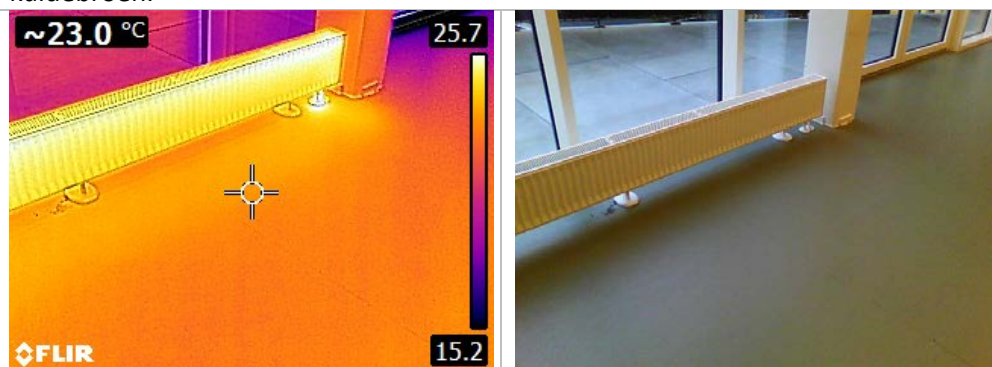
Der kan ikke registreres en temperaturforskel hen over gulvet i garderoben. Skabene er cirka 40 cm dybe, de dækker altså for en del af stålbåndene.

**C**

Ved at stå lige ud for stålbåndet markeret med C, kan der ikke registreres en temperaturforskel i gulvoverfladen.

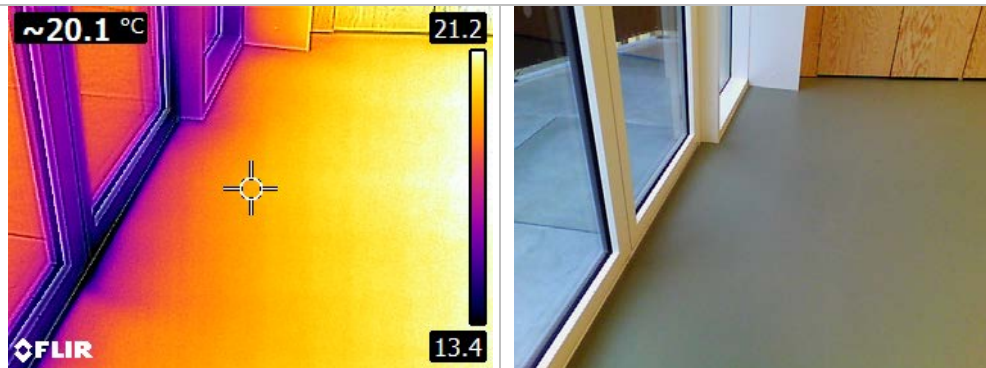
**D**

Ved markering D, er der placeret en radiator foran vinduespartiet, det er her ikke muligt at registrere en temperaturforskel i gulvoverfladen, forårsaget af kuldebroen.



E

Lige under glaspartierne er der placeret et stålband, markeret med placering E, på plantegningen. Det er her ikke muligt at registrere en temperaturforskel, forårsaget af kuldebroen.



Figur 11 – Termografisk undersøgelse, placeringen af hvert foto A til og med E, kan findes på oversigtstegningen oven over. Hvert område er afleveret med et almindeligt foto og et termografisk foto, hvorefter overfladetemperaturen fremgår.

Af ovenstående registrering, har det ikke været muligt, at finde en temperaturforskel på gulvoverfladen forårsaget af kuldebroen ved stålbeslagene.

I det afsnit 5.1.4, beregnes den aktuelle detalje ved de samme randbetingelser, der var gældende ved den termografiske undersøgelse. Dette gøres for at undersøge sammenhængen mellem den teoretiske beregning og termograferingerne.

5.1.3 Beregnings model

Der er naturligvis forskel på en teoretisk beregningsmodel, og hvad der udføres i praksis. Derfor gennemføres der beregning af 2 varianter af den grundlæggende model, hvor der medtages små ændringer i de udførelsesmæssige forhold.

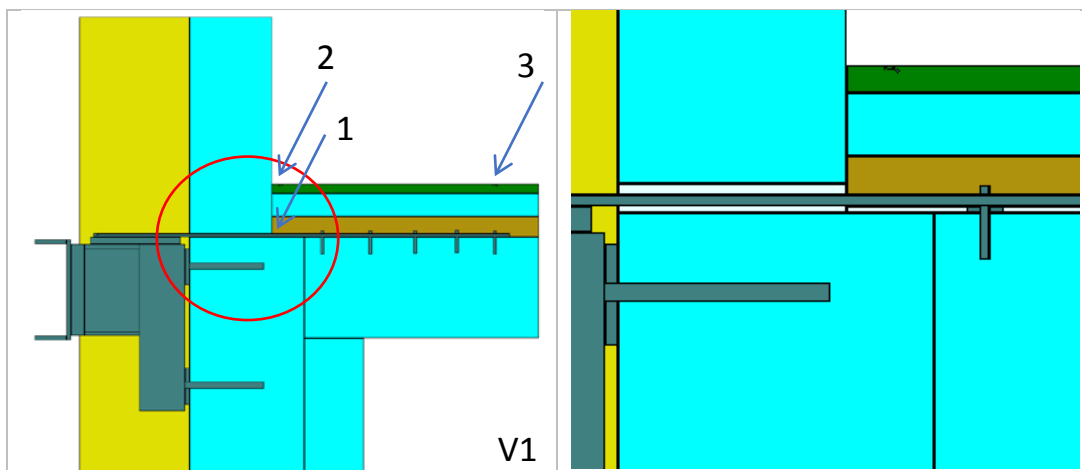
I den grundlæggende model er alle materialer i fuld termisk kontakt, men i praksis vil dette naturligvis aldrig forekomme. Der laves derfor variationer hvor kontakten mellem stålbeslaget, isoleringen og dækket varieres.

Den første afvigelse er at stålbandet ikke har fuld kontakt til underlaget, fordi betondæk vil som regel aldrig ligge helt lige eller vandret. Hullet under betonbagmuren vil altid laves større end stålbandets geometri, ligeledes vil stålbeslag og stålband, monteres efter alt betonen er monteret og alle understopningerne er hærdet.

Denne variation vil have lille kontakt mellem stålbandet og betondækket, hullet hvor stålet gennembryder betonvæggen, er der 6 - 8 mm hulrum/luft omkring stålbandet. Der er lagt 30 mm x 30 mm x 6 mm afstandsklodser af stål, mellem stålbandet og betondækket ved hver fastgørelse, således at der er 6 mm hulrum/luft under stålbandet, se figur 12.

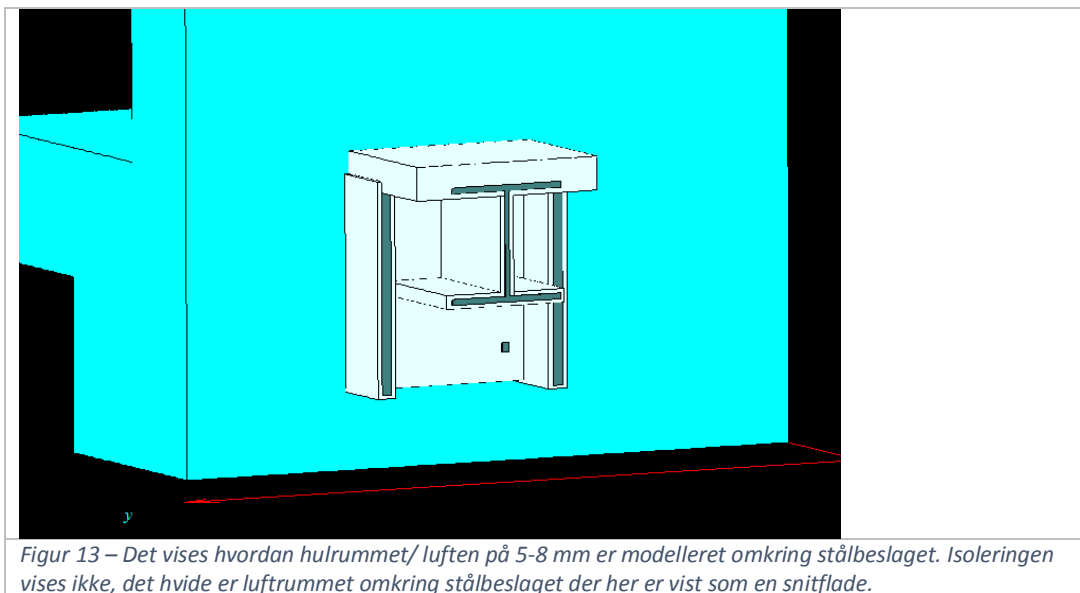
Den anden afvigelse er at isoleringen i facaden ikke monteres helt tætsluttende omkring stålprofilerne. Det vurderes at denne afvigelse næsten kan elimineres, ved at anvende bød isolering og bruge lidt tid på tilskæringer. Afvigelsen er modelleret efter værste tænkelige scenarie. Afvigelsen vil betyde at der skabt et 5-8mm luftlag omkring stålprofilerne, se figur 13.

Der beregnes altså 3 modeller, henholdsvis en model med fuldkontakt, en model med afstand under stålbandet, og en model med luft omkring stålprofilerne og luft under stålbandet.



Figur 12 - HEAT 3 (Blomberg, 2019) model opbygget med henholdsvis stor og lille termisk kontakt mellem stålbandet og beton.

Figuren til venstre herover er modelleret med stor termisk kontakt, figuren til højre er opbygget med lille termisk kontakt. Den røde cirkel markerer hvor i modellen der er zoomet ind. Pile markerer hvor temperaturen i de efterfølgende resultater er vist.



Figur 13 – Det vises hvordan hulrummet/ luften på 5-8 mm er modelleret omkring stålbeslaget. Isoleringen vises ikke, det hvide er luftrummet omkring stålbeslaget der her er vist som en snitflade.

5.1.4 Original detalje

De første beregninger af den originale detalje som beskrevet herover, har til formål at finde hvilken en, af de 3 beregningsmodeller der skal anvendes i denne case. Herefter vises resultaterne for det originale stålbeslag beregnet ved glaspartierne.

Fælles for disse resultater er, at beregningerne er foretaget ved randbetingelser, svarende til forholdene hvor de termografiske undersøgelser blev foretaget, altså 2 °C ude og 20 °C inde.

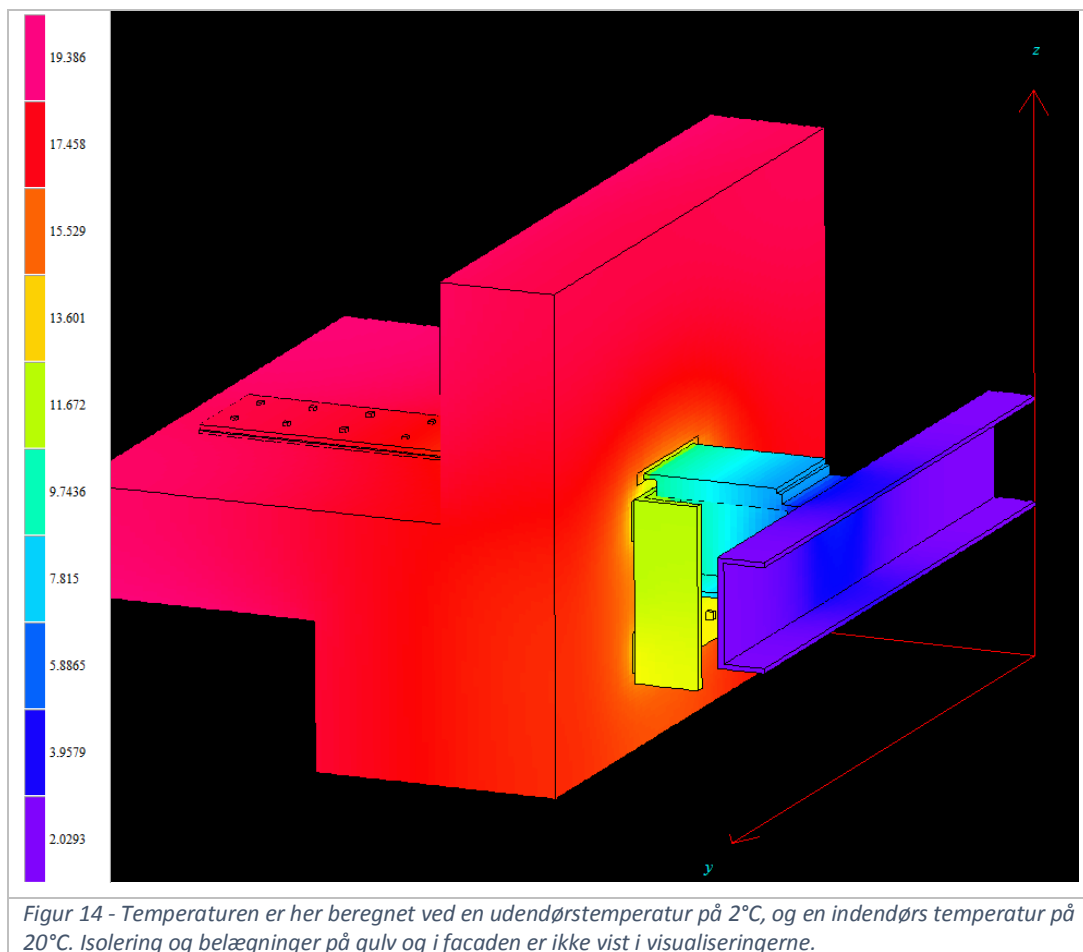
Derefter vises resultaterne fra beregninger af originaldetaljen, hvor randbetingelserne er lig tabel 6, for de 6 udvalgte måneder af året.

Ligeledes vises resultaterne fra beregninger af varianterne, hvor randbetingelserne er lig tabel 6, for de 6 udvalgte måneder af året.

Overfladetemperatur

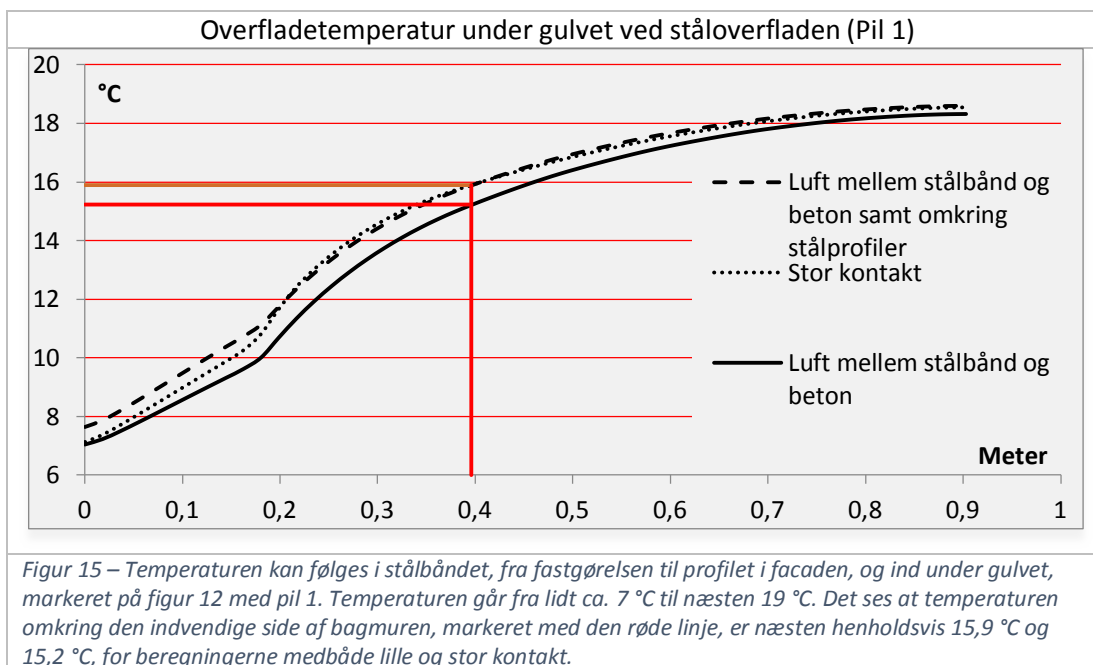
I de efterfølgende resultater vises overfladetemperaturen ved 3 udvalgte placeringer, henholdsvis ved overfladen af stålbeslaget, ved gulvoverfladen tæt på ydermuren og gulvoverfladen for enden af stålbandet, se placeringerne markeret med pile på figur 12.

Af figuren herunder ses hvordan varmestrømmen bevæger sig gennem stålprofilet.



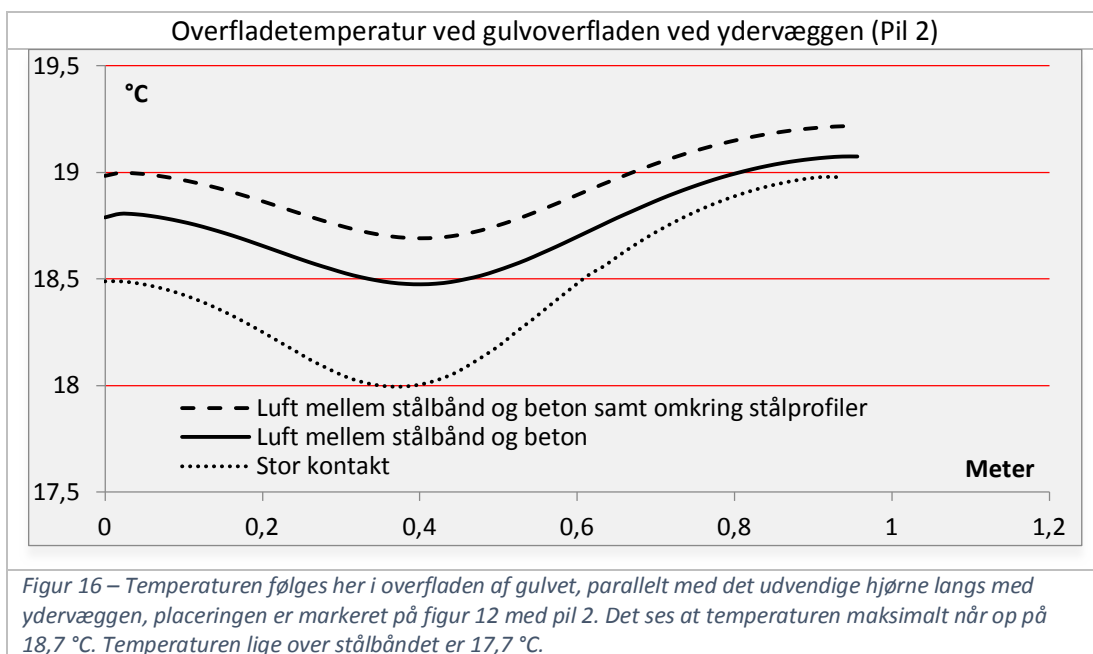
Simulering af 3 scenarier for udførelsestolerancer

Herunder præsenteres temperaturen ved 3 udvalgte placeringer, henholdsvis i overfladen af stålbeslaget, ved gulvoverfladen tæt på ydermuren og gulvoverfladen for enden af stålbandet.

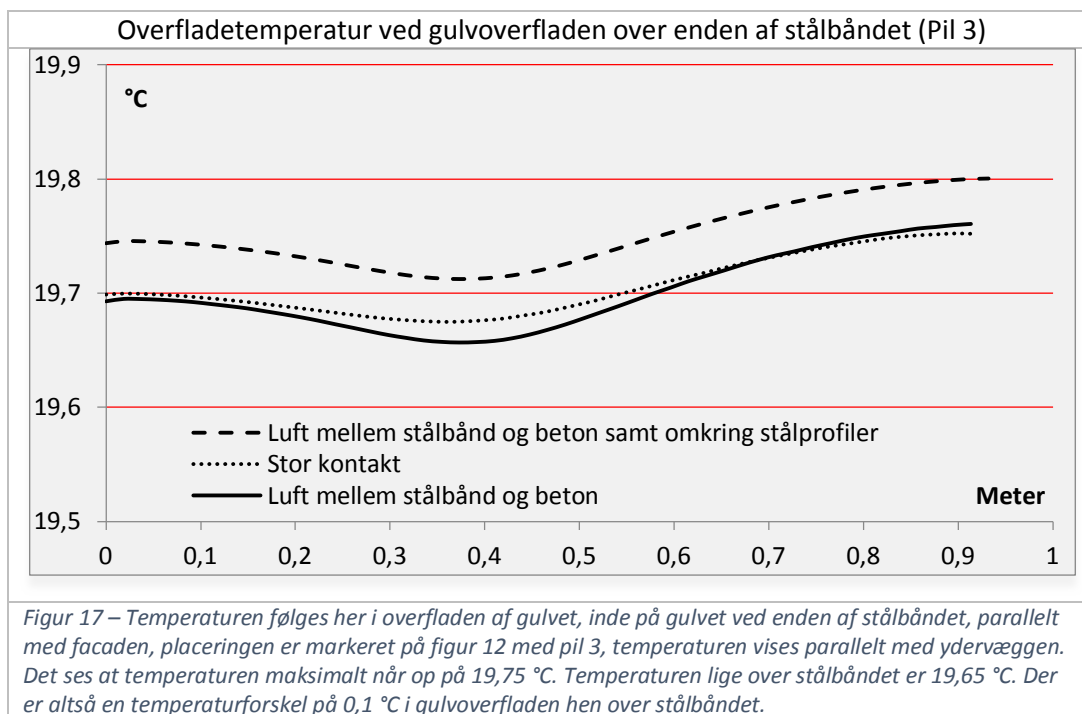


For scenariet hvor modellen opbygges med luft mellem stål og beton, samt luft omkring stålbeslaget, ses det at temperaturen nærmest er identisk med det "perfekte" scenarie med fuld kontakt mellem stål, beton og isolering.

Scenariet med luft mellem stål og beton, den fuldt optrukne linje, opnår generelt en lavere temperatur i stålprofilet. Ved indersiden af betonvæggen, markeret med den røde streg, er temperaturen 0,7 °C lavere for scenariet med luft mellem stål og beton, sammenlignet med de to øvrige scenarier.



På figur 16 undersøges temperaturen i gulvoverfladen tættest på ydervæggen, generelt ligger temperaturene meget tæt på hinanden, i de tre scenarier. Temperaturvariationen er som forventet størst for det scenarie med størst termiske kontakt.



På figur 17 undersøges temperaturen i gulvoverfladen, længst fra ydervæggen ved enden af stålbandet. Den variation som beregnes er negligerbar i praktisk betydning.

Resultatet af ovenstående beregninger, viser at temperaturen er koldest i stålprofilet, ved det scenarie hvor der er luft mellem stålbandet og betondækket samtidig med at det forudsættes at isoleringen er tætsluttende omkring stålprofilet i facaden. Det vurderes realistisk, at ved en grundig udførelse med tilskæringer og blød isolering, vil det være muligt at opnå en næsten tætsluttende isolering omkring stålprofilerne. For at arbejde med det mest realistiske og samtidig med det værste scenarie, anvendes dette scenarie i de efterfølgende beregninger.

Resultaterne i dette afsnit diskuteres yderligere under diskussionen i afsnit 5.1.9.

Behandling af overfladetemperatur ved gulv, sammenligning med termografi

Nedenstående overfladetemperatur er beregnet ved randbetingelserne svarende til forholdene ved den termografiske undersøgelser, 2 °C ude og 20 °C inde. Ved de udvalgte områder omkring stålbandet, henholdsvis over og under gulvoverfladen, beregnes den afledte relative luftfugtighed, ved både fugtbelastningsklasse 2 og 3, ved en indvendig relativ luftfugtighed svarende til februar måned, se tabel 6.

Tabel 7 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved temperaturforskellene omkring stålbandet, henholdsvis over og under gulvoverfladen, ved 3 forskellige placeringer, se figur 11.

	Ståloverflade ved væg	Gulvoverflade ved væg	Gulvoverflade Inde
Overfladetemperatur (°C)	15,2	18,5	19,7
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	62,3	50,5	46,9
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	78,5	63,7	59,1

De indvendige overfladetemperaturer er forholdsvis høje, deraf vil den relative luftfugtighed også være tilsvarende lav. Derimod er temperaturen omkring stålbandet en del lavere, hvilket også resulterer i en højere relativ luftfugtighed. Dette forhold behandles yderligere under diskussionen.

Behandling af overfladetemperatur under gulv

Ved de efterfølgende resultater er den samme model anvendt, som ved de ovenstående beregninger. Randbetingelserne ændres således at indendørs og udendørs temperaturene følger værdier i tabel 6. Overfladetemperaturen anvendes til at beregne den resulterende relative luftfugtighed ved overfladen af stålprofilet.

Den resulterende relative luftfugtighed, beregnes herunder for de 6 udvalgte måneder af året, for den indvendige overflade på stålbandet tæt ved ydervæggen.

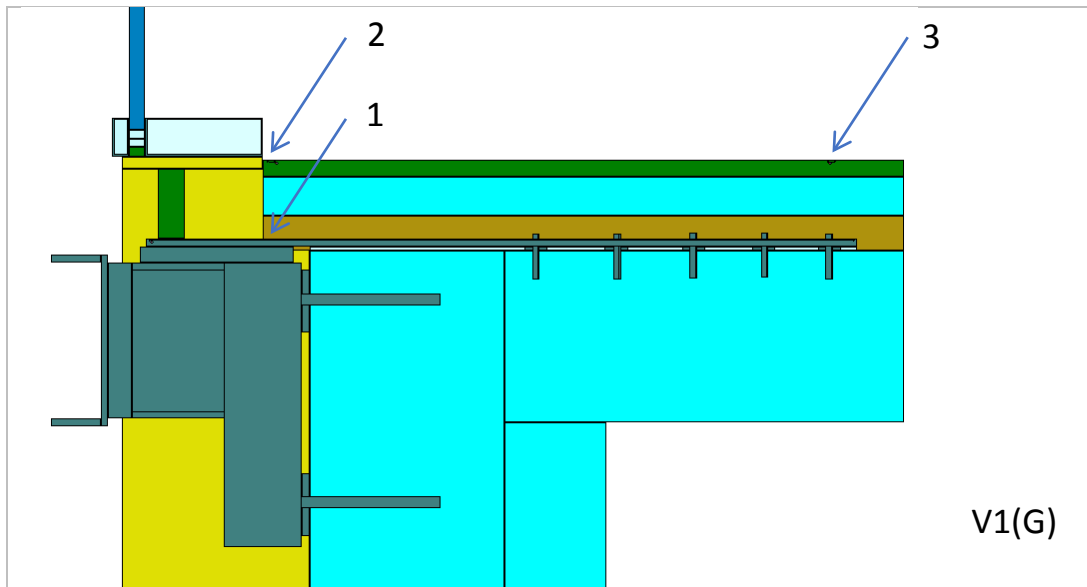
Tabel 8 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved ydervæggen. Placeringen ses på figur 12 pil 1.

Ståloverflade ved væg	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	17,1	16,0	15,1	14,5	14,4	15,4
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	68,2	68,1	66,7	65,0	65,4	65,5
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	75,4	79,4	80,3	81,9	82,5	77,6

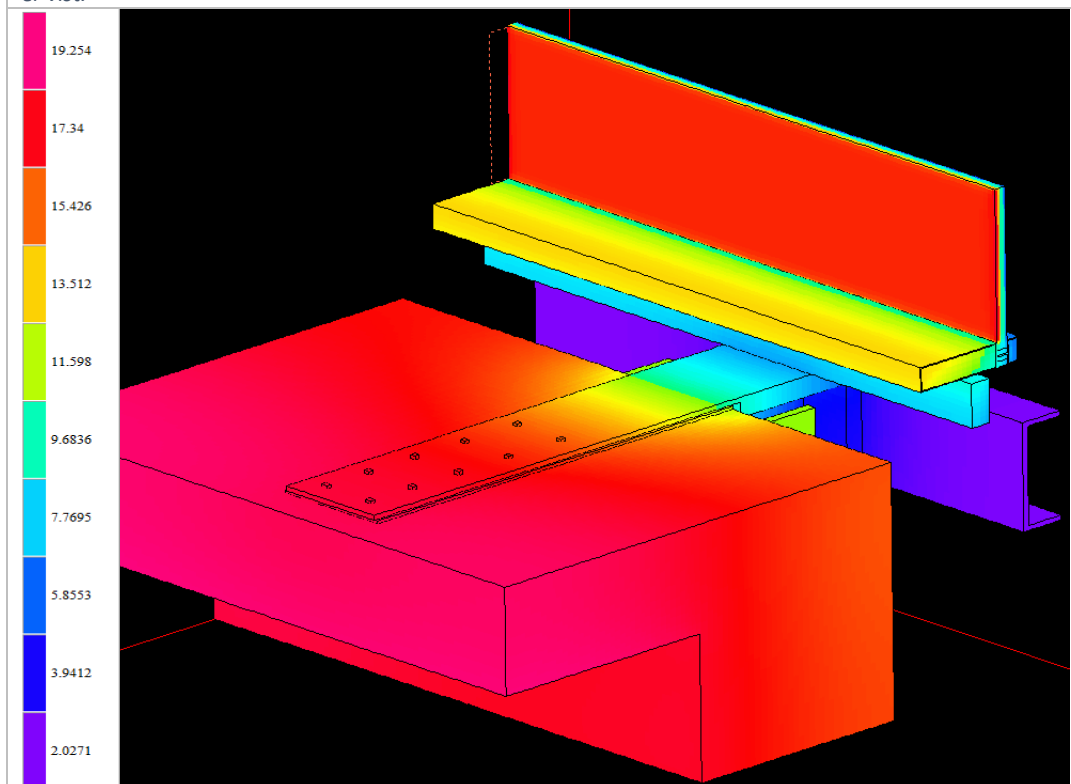
Af ovenstående tabel, fremgår det at månedsmiddelværdien for den relative luftfugtighed, for fugtbelastningsklasse 2 ligger under 75 % alle de 6 udvalgte måneder. For fugtbelastningsklasse ligger alle 6 måneder over 75 % og over 80 % de 3 koldeste måneder. I introduktionen under afsnittet vedrørende svampevækst, er grænsen for vækstbetingelser lagt omkring 75 % og 80 % relativ luftfugtighed på henholdsvis organisk og uorganisk materiale. Ovenstående behandles yderligere under diskussionen.

Simulering ved glasfacade

Herunder vises resultaterne af overfladetemperaturen, de 3 samme steder og samme randbetingelser som ved den indledende beregning. Disse resultater bruges ved sammenligning med termografiundersøgelsen.

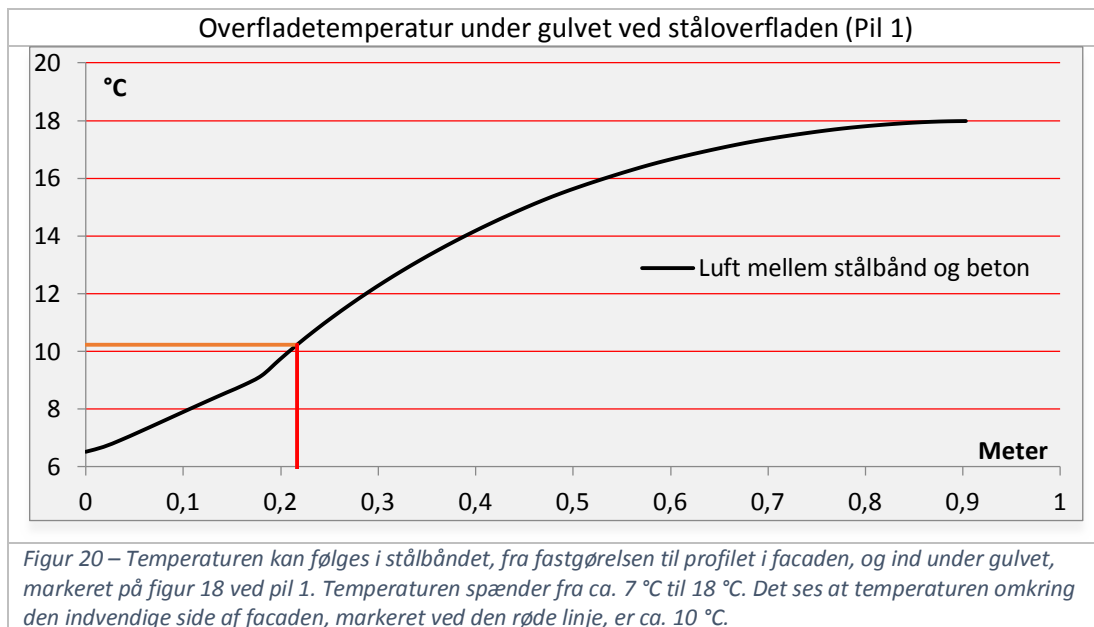


Figur 18 - Denne figur viser modelopbygningen i HEAT 3, modellen er tilnærmet de faktisk udførte forhold omkring stålbeslaget ved glaspartierne. De 3 pile markerer hvor temperaturen i de efterfølgende resultater er vist.

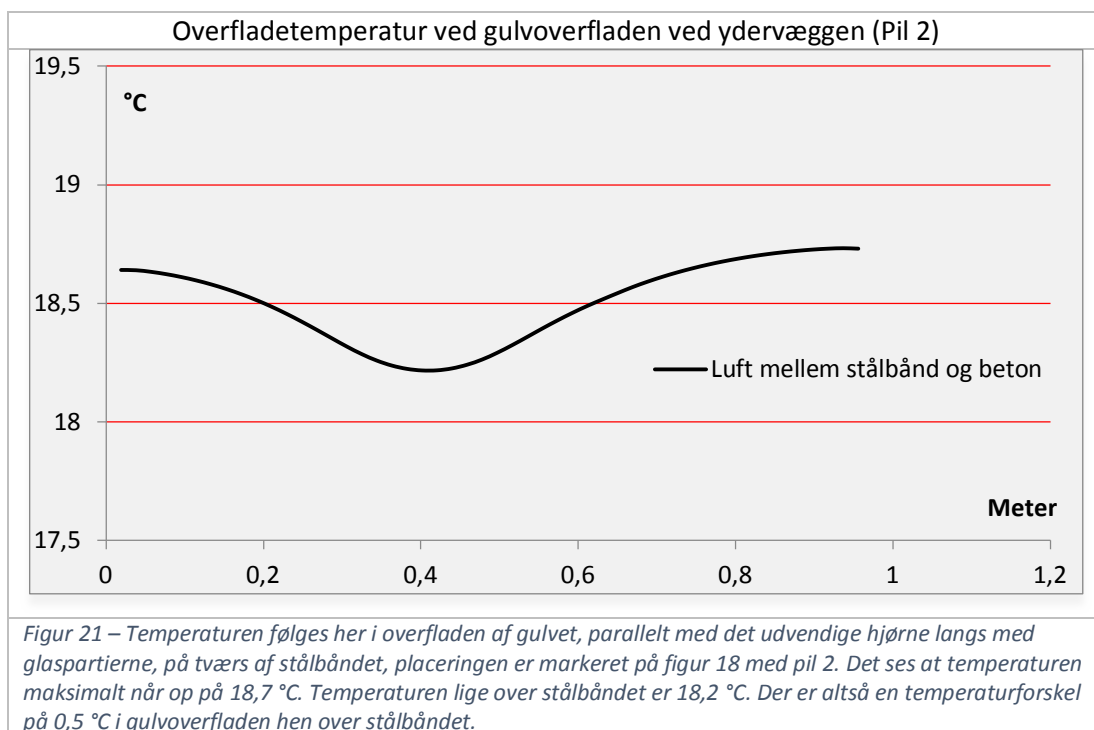


Figur 19 – Temperaturen er her beregnet ved en udendørstemperatur på 2 °C, og en indendørs temperatur på 20 °C. Isolering og belægninger på gulv og i facaden er her ikke vist i visualiseringen.

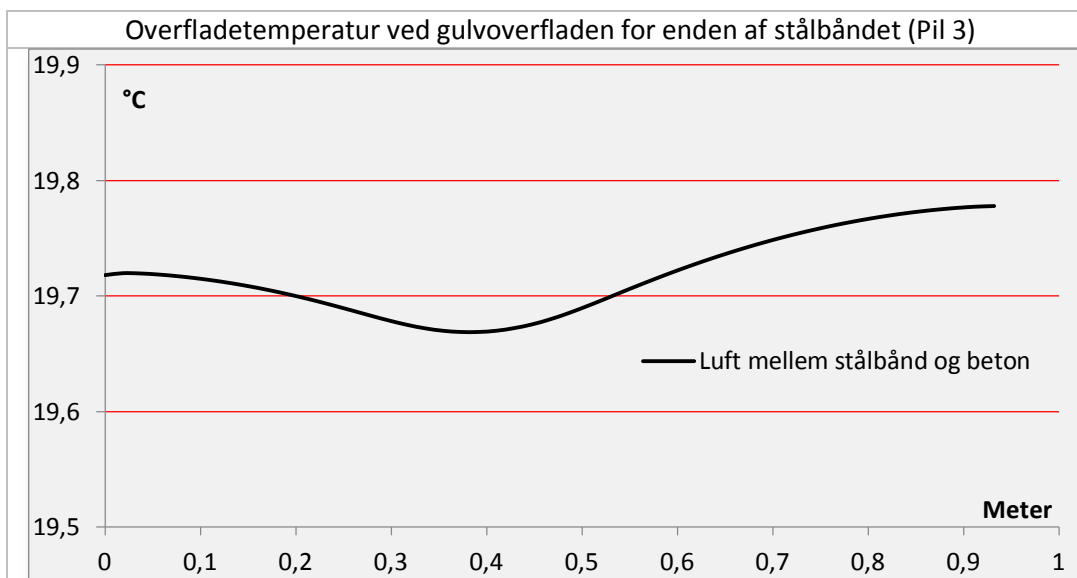
Temperaturen vises ved 3 udvalgte placeringer, henholdsvis i overfladen af stålbeslaget (pil 1), ved gulvoverfladen tæt på glaspartiet (pil 2) og gulvoverfladen for enden af stålbandet (pil 3).



Ved vinduespartierne er klimaskærmens tykkelse mindre end den øvrige facade med bagmur, se figur 12. Derudover er stålbeslaget og stålprofilerne ikke omgivet af samme isoleringstykkelse over og under beslaget. Som forventet ses det at temperaturen i oversiden af stålprofilet, ved den indvendige side af klimaskærmen, markeret med den røde linje, vil blive meget lav. Dette forhold behandles under diskussionsafsnittet.



Af figur 21 ses det at temperaturen generelt på overfladen af gulvet er høj, og temperaturvariationen hen over stålprofilet er i praksis negligerbar.



Figur 22 – Temperaturen følges her i overfladen af gulvet, inde på gulvet parallelt med glasfacaden, for enden af stålbandet, placeringen er markeret på figur 18 ved pil 3. Det ses at temperaturen maksimalt når op på 19,78 °C. Temperaturen lige over stålbandet er 19,67 °C. Der er altså en temperaturforskel på 0,1 °C i gulvoverfladen hen over stålbandet.

Det ses ligeledes af figur 22 at temperaturen på overfladen af gulvet er høj, og temperaturvariationen hen over stålprofilet er i praksis negligerbar.

Behandling af overfladetemperatur ved gulv, sammenligning med termografi

Af figur 21 og 22 ses det at temperaturforskellen ude ved glaspartierne og midt på gulvet er 1,5 °C. Temperaturen lige under gulvbelægningen vil være 0,5 grader lavere end ved overfladen. Ved temperatur omkring 18 °C, er der ingen risiko for hverken skimmel eller kondens, jf. metodeafsnittet.

Ovenstående overfladetemperaturer fra figur 20, 21 og 22, kan genfindes i den nedenstående tabel. Overfladetemperaturen er brugt til at beregne den afledte relative luftfugtighed, ved henholdsvis fugtbelastningsklasse 2 og 3. Randbetingelsen for den indvendige relative luftfugtighed, svarende til februar måned jf. tabel 6.

Tabel 9 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved temperaturforskellene omkring stålbandet, henholdsvis over og under gulvoverfladen, placeringerne kan ses på figur 18.

	Stålprofil i gulv	Gulvoverflade ved væg	Gulvoverflade Inde
Overfladetemperatur (°C)	10,2	18,2	19,7
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	86,3	51,4	47,0
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	>100	64,8	59,2

Det ses af tabel 9, at der er risiko for kondens omkring stålprofilet, i fugtbelastningsklasse 3. Det er derfor meget vigtigt at det damptætte lag, i samlingen mellem facaden og undergulvet er damptæt.

Behandling af overfladetemperatur ved gulv

Ved de efterfølgende resultater er den samme model anvendt, som ved de ovenstående beregninger. Randbetingelserne ændres således at indendørs og udendørs temperaturen følger værdierne fra tabel 6. Overfladetemperaturen anvendes til at beregne den resulterende relative luftfugtighed ved overfladen af stålprofilen, markeret på figur 18 pil 1.

Tabel 10 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved ydervæggen. Placeringen ses på figur 18 pil 1.

Ståloverflade ved væg	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	14,1	11,9	10,0	8,8	8,6	10,6
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	82,6	89,2	93,2	94,8	96,3	89,9
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	91,3	>100	>100	>100	>100	>100

Af ovenstående tabel, fremgår det at den relative luftfugtighed ligger over 80 % alle 6 måneder og over 90 % de 3 koldeste måneder. I introduktionen under afsnittet vedrørende svampevækst, ligger grænsen for vækstbetingelser omkring 75 % og 80 % relativ luftfugtighed på henholdsvis organisk og uorganisk materiale. Ved fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der er risiko for kondens 5 ud af de 6 udvalgte måneder. Ovenstående behandles yderligere under diskussionen.

Varmetab

Ud over at foretage beregninger af kuldebroeffekten, for at foretage sammenligninger med termiske undersøgelser og fugtvurderinger, er det ligeledes interessant, at undersøge i hvilken grad kuldebroen har af indflydelse på opvarmningen af bygningen og deraf det økonomiske driftsregnskab.

Den konstruktive kuldebro andrager følgende varmetab. Beregninger er her foretaget ved den tunge ydermur, ved at anvende modellen med lille termisk kontakt, se figur 12.

Varmetab i Watt gennem ydermuren med stålprofilet og stålbandet: 0,771 W

Varmetab i Watt gennem ydermuren uden stålprofilet og stålbandet: 0,148 W

Beregningen er foretaget ved 1 Kelvins temperaturforskel over klimaskærmen, varmetabet for stålprofil og stålband alene andrager derfor 0,624 W/K.

Graddagene for et normalår er defineret som 2906 graddage. (Teknologisk Institut, 2019). Graddage er forskellen på gennemsnits udetemperaturen pr. 1 °C og en inde temperatur på 17 °C pr døgn. Et eksempel kunne være ved 17 °C inde og -1 °C ude beregnes således, $17 - (-1) = 18$ graddøgn.

Det betyder at for et år vil varmetabet, være $2906 \text{ graddage/pr. år} \times 0,624 \text{ W/K} \times 24 \text{ timer} = 43.492 \text{ Wh}$

Prisen for fjernvarme er omkring 540 kr./MWh eksklusiv moms (HOFOR, 2019).

Prisen for altanen vil derfor andrage omkring: $540 \text{ kr./MWh} \times 0,044 \text{ MWh} = 23,5$ kroner pr. beslag om året.

Der er anvendt 8 beslag, den samlede pris er derfor som gennemsnit 187,9 kroner pr. år. eksklusiv moms.

Beregninger op mod DS 418

Den danske standard for beregning af bygningers varmetab (DS 418), giver mulighed for at foretage en simplificeret beregning, af varmetabet af forskellige konstruktive kuldebroer uden at anvende et simuleringsprogram. Beregningen er en overslagsberegning der er designet til at give et resultat der ligger på den sikre side.

Ved at følge vejledningen i afsnit 6.7.6 i DS 418 (Dansk Standard, 2011), kan den konstruktive kuldebro beregnes efter følgende antagelse.

Jævnfør tabel 6.7.5 (Dansk Standard, 2011), beregnes transmissionskoefficienten X_j i $\text{W/m}^2\text{K}$ for gennemgående bjælker og søjler af beton, tegl eller stål.

Ved stålprofiler beregnes X_j således $= 170 \times A$.

A er profilets tværsnitsareal i m^2 , men kan dog ikke regnes som mindre end $X_j = 10 \times A_0$ hvor A_0 , er arealet af mindste omskrevne rektangel.

Arealet for det anvendte stålprofil er $0,00486 \text{ m}^2$.

Varmetabet beregnes således til $0,00486 \times 170 = 0,8262 \text{ W/K}$

Arealet for A_0 beregnes til $0,036 \text{ m}^2$.

Varmetabet beregnes således til $0,036 \times 10 = 0,36 \text{ W/K}$

Det beregnede varmetab for stålprofilet, er således over beregningen for minimum arealet.

Sammenlignes det netop beregnede varmetab med, beregningen fra HEAT3, hvor varmetabet blev beregnet til 0,624 W/K, er der således næsten 32 % højere varmetab, ved beregnings modellen i DS 418 (Dansk Standard, 2011), der regnes altså på den sikre side.

U-værdier

Den danske standard for beregning af bygningers varmetab (DS 418), foreskriver ligeledes at ved bestemmelsen af den samlede transmissionskoefficient, for en bygningsdel skal der medregnes kuldebroer

Ved beregning af ydervæggens samlede U-værdi foretages følgende antagelser.

Der er kun 1 terrasse med de omtalte 8 stålbeslag, bygningen er i 4 etager, men for eksemplets skyld, beregnes den samlede U-værdi for facaden for kun denne ene etage.

Der medregnes derfor 2 facadearealer af 18 meters bredde og 3,5 meters højde. Det forudsættes at facaden består af 30 % glas.

Facadens U-værdi beregnes til 0,15 W/m²K.

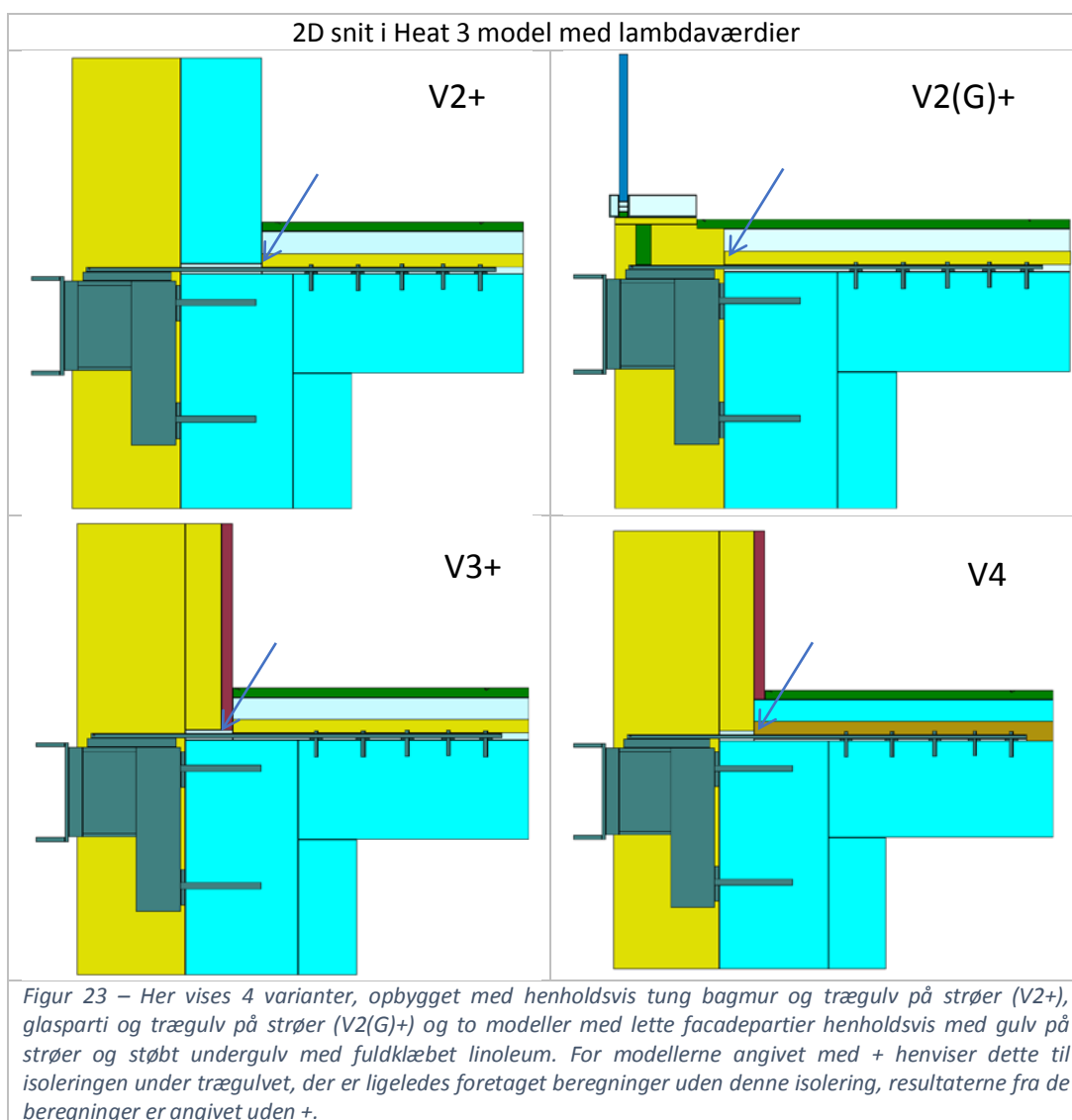
Den korrigerede U-Værdi beregnes til 0,21 W/m²K, svarende til en forøgelse på 38 %.
(Dansk Standard, 2011, s. 26)

5.1.5 Varianter over den originale detalje

I dette afsnit undersøges samme stålbeslag som i de ovenstående afsnit, forskellen her er at gulvet og facaden er udskiftet, henholdsvis med et trægulv på strøer og en let facade i forskellige kombinationer.

Følgende varianter er udvalgt, på baggrund af det vurderes realistisk, at udføre varianterne under samme forudsætninger der gør sig gældende i det aktuelle byggeri. Dette gøres for at undersøge om der kan være andre kombinationer af konstruktioner hvor problemstillingen bliver værre.

Ved beregningerne anvendes scenariet for udførelsestolerancer, hvor stålbandet friholdes af betonoverfladerne med afstandsskiver, jf. afsnit 5.1.3.



Ved de 4 ovenstående varianter, er det overfladetemperaturen af stålbandet, ved den indvendige side af klimaskærmen, der vurderes til at være det kritiske område, markeret med pilen på figur 23. Resultaterne anvendes til at vurdere de fugtrelaterede problemer kuldebroseffekten kan medføre.

Alle varianterne med trægulv på strøer, er beregnet to gange, henholdsvis med og uden isolering under trægulvet.

Fælles for alle nedenstående resultater, er at den resulterende relative luftfugtighed, er beregnet for de 6 udvalgte måneder og at forholdet mellem temperaturen og den relative luftfugtighed der afgør risikoen for skimmelvækst, behandles under diskussionsafsnittet.

V2 – Tung bagmur og trægulv på strøer.

Varianten er interessant fordi der potentielt kan være risiko for skimmelvækst, i hulrummet under trægulvet.

Tabel 11 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved ydervæggen, for modellen med gulv på strøer uden isolering under gulv. Se figur 23 hvor pilen markerer placeringen.

Ståloverflade ved væg	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	17,2	16,0	15,2	14,6	14,5	15,5
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	68,1	68,1	66,4	64,7	65,1	69,6
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	75,2	78,4	80,0	81,6	82,1	82,4

Af ovenstående tabel, fremgår det at for fugtbelastningsklasse 2 vil den relative luftfugtighed være under 70 % i alle udvalgte måneder af året. For fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der er omkring 80 % relativ luftfugtighed 5 af de 6 udvalgte måneder af året.

Når beregningen foretages med 30 mm isolering over stålprofilet (V2+), sænkes temperaturen ved stålprofilet omkring 0,2 °C, de tre koldeste måneder. Den lavere temperatur betyder at den relative luftfugtighed stiger omkring 1 % point.

V3 – Let bagmur og trægulv på strøer

Bagmuren er her udskiftet med 80 mm regelopbygning og isolering med to gipsplader som indvendig afslutning. Samlet isolering tykkelse er 240 mm + 80 mm = 320 mm.

Varianten her er ligeledes interessant på grund af trægulvsopbygningen på strøer, dertil kommer risikoen for skimmelvækst i gipspladerne under gulvet.

Tabel 12 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved ydervæggen uden isolering under gulv. Se figur 23 hvor pilen markerer placeringen.

Ståloverflade ved væg	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	15,3	13,5	12,0	11,0	10,9	12,4
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	76,7	80,2	81,7	81,7	82,7	79,4
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	84,7	92,3	98,4	>100	>100	94,0

Af ovenstående tabel, fremgår der at for fugtbelastningsklasse 2 vil være omkring 75 % relativ luftfugtighed alle de beregnede 6 måneder. For fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der er kondens i januar og februar og over 80 % relativ luftfugtighed de resterende 4 måneder.

Når beregningen foretages med 30 mm isolering over stålprofilet (V3+), sænkes temperaturen ved stålprofilet omkring 0,3 °C, de tre koldeste måneder. Den lavere temperatur betyder at den relative luftfugtighed stiger omkring 1,5 % - 2 % point.

V2(G) – Glasparti og trægulv på strøer

Denne variant har potentielt en meget stor risiko for skimmelvækst i hulrummet under trægulvet, særligt fordi klimaskærmen er smallere og tillader mindre isolering omkring stålbeslaget.

Tabel 13 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved ydervæggen uden isolering under gulv. Se figur 22 hvor pilene markerer placeringen.

Ståloverflade ved væg	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	14,3	12,0	10,3	9,1	8,9	10,8
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	81,7	88,3	91,5	92,8	94,1	88,3
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	90,3	>100	>100	>100	>100	>100

Af ovenstående tabel, fremgår det at for fugtbelastningsklasse 2 vil være en spredning i den relative luftfugtighed mellem 80 % op til 94 % relativ luftfugtighed i de 6 udvalgte måneder. For fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der er risiko for kondens i 5 af de 6 måneder. Denne høje risiko for kondens, vil potentielt skabe andre problemer en bare skimmelvækst, hvilket behandles under diskussionen.

Når beregningen foretages med 30 mm isolering over stålprofilet (V2G+), sænkes temperaturen ved stålprofilet omkring 0,3 °C, de tre koldeste måneder. Den lavere temperatur betyder at den relative luftfugtighed stiger omkring 1,5 % - 2 % point.

V4 – Let bagmur og støbt undergulv med fuldklæbet linoleum

Denne detalje er særligt interessant når temperaturen betragtes omkring placeringen af dampspærren, ved overgangen fra gulv til regelopbygningen.

Tabel 14 – Den afledte relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved ydervæggen. Se figur 23 hvor pilen markerer placeringen.

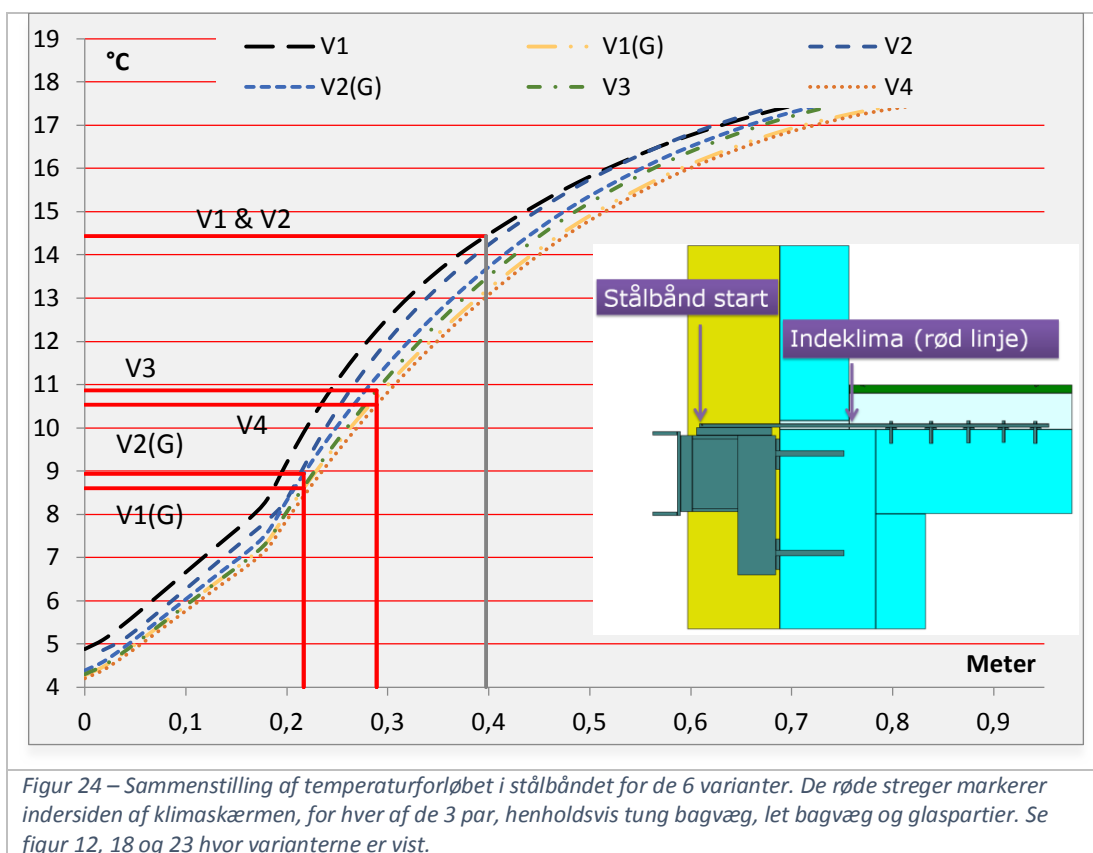
Ståloverflade ved væg	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	15,0	13,0	11,5	10,5	10,3	12,0
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	78,1	82,7	84,5	84,9	85,9	81,9
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	86,3	95,2	>100	>100	>100	97,0

Af ovenstående tabel, fremgår det at for fugtbelastningsklasse 2 vil være en spredning i den relative luftfugtighed mellem 78 % op til 96 % relativ luftfugtighed. For fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der er risiko for kondens i 3-4 de udvalgte 6 kolde måneder. Denne høje risiko for kondens, vil potentielt skabe andre problemer en bare skimmelvækst, hvilket behandles under diskussionen.

Sammenligning af resultater ift. valg af klimaskærmem

Resultaterne fra de forrige afsnit, omhandler alle varianter over facaden og gulvopbygningen, i sammenhæng med stålbeslaget.

I dette afsnit sammenlignes temperaturen gennem stålbåndet, for alle 6 varianter. De 6 varianter fordeler i sig i 3 par, henholdsvis tung bagvæg, let bagvæg og glaspartier. Fælles for de 3 par, varierer gulvtypen mellem trægulv på strøer og fuldklæbet linoleum på et støbt undergulv. Når facadetyper varierer, betyder det også af tykkelsen på facaden ændres, afstanden fra indeklimaet til udeklimaet ændres, hvilket har betydning for temperaturen i stålbåndet, idet stålbåndet både har kontakt til udeklimaet og indeklimaet. I nedenstående graf er temperaturen gennem stålbåndet, vist for alle 6 varianter beregnet ved randbetingelserne svarende til februar måned.



De røde linjer markerer indersiden af bagvæggen for V1 og V2, samt placeringen af det damp-tætte lag, for V3, V4, V1(G) og V2(G).

Ved at sammenligne temperaturen i stålbåndet, ved den indvendige side af klimaskærmen, for V1 og V2, fremgår det at gulvtypen, henholdsvis trægulv på strøer og støbt undergulv, ikke har betydning for temperaturen i stålprofilet.

Ved at foretage samme sammenligning for henholdsvis V3 og V4 samt V1(G) og V2(G), ses det at temperaturforskellen i begge tilfælde er 0,3 °C. Det er altså ikke udslagsgivende og der anvendes trægulv på strøer eller et støbt undergulv, når temperaturen betragtes alene. Derimod vil betydningen af om gulvet er en åben eller lukket konstruktion, have betydning for tilføjes af rumluft, til den kolde overflade, og derved betydning for risikoen af skimmelsvamp, dette behandles yderligere under diskussionen.

Fælles for alle 6 varianter ligger temperaturen ved stålbandets begyndelse ude i klimaskærmen, se figur 24, mellem 4,2 °C og 4,8 °C. Temperaturvariationen mellem de 6 varianter, stiger til henholdsvis 11 °C for V4 og 12,7 °C for V1 efter 0,3 meter. Valget af facadetype har derfor en større betydning for temperaturen i stålbandet.

Den største forskel i overfladen temperaturen af stålbandet, ses når de 3 facadetyper sammenlignes, det er synliggjort i tabellen herunder.

Tabel 15 – Sammenligning overfladetemperaturen i stålbandet når varianterne opdeles efter de 3 anvendte facadetyper, henholdsvis tung facade, let facade og glaspartier. Se figur 12, 18 og 23 hvor varianterne er vist.

Facadetype for de 6 varianter.	Afstand fra stålbandets begyndelse til den indvendige side af klimaskærmen	Overflade temperatur
V1 og V2 Tung bagmur	0,4 m	14,5 °C
V3 og V4 Let bagmur	0,29 m	10,7 °C
V1G og V2 G	0,22 m	8,9 °C

Det ses tydeligt af tabel 15, at temperaturen falder i takt med, at den længde varmestrømmen skal gennemføre i stålprofilen gøres kortere, ved at flytte indersiden af klimaskærmen længere ud.

5.1.6 Forsøg ved ændring af isolansen i klimaskærmen

Det undersøges i hvilken grad, den samlede varmeisoleringssevne af klimaskærmen, påvirker temperaturen i stålprofilen. Beregningen er foretaget ved samme randbetingelser og aflæst ved samme sted som vist i figur 24. Første resultat i skemaet herunder kan derfor genfindes i figur 24.

For at kunne sammenligne resultaterne reduceres varmeledningsevnen for isoleringslaget, derved fastholdes geometrien og den direkte effekt af ændringen i varmeledningsevnen kan findes ved at sammenligne overfladetemperaturen ved stålprofilen.

Tabel 16 – Sammenligning overfladetemperaturen i stålbandet for af hver af de 6 varianter, beregnet ved anvendelse af samme geometri og to forskellige isolanser over klimaskærmen.

Ståloverflade ved væg (Februar)	V1	V2	V3	V4	V1(G)	V2(G)
Overfladetemperatur (°C) ($\lambda = 0,037$)	14,44	14,50	10,87	10,53	8,60	8,93
Overfladetemperatur (°C) ($\lambda = 0,032$)	14,48	14,54	10,90	10,56	8,63	8,96
Temperaturforskel (°C)	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03

Ved at ændre varmeledningsevnen for isoleringslaget, fra 0,037 W/mK til 0,032 W/mK, svarende til en forbedring på ca. 14 %, ses det at temperaturen i stålbandet hæves marginalt. Den beregnede temperaturstigning på 0,04 °C, vil i praksis være negligerbar.

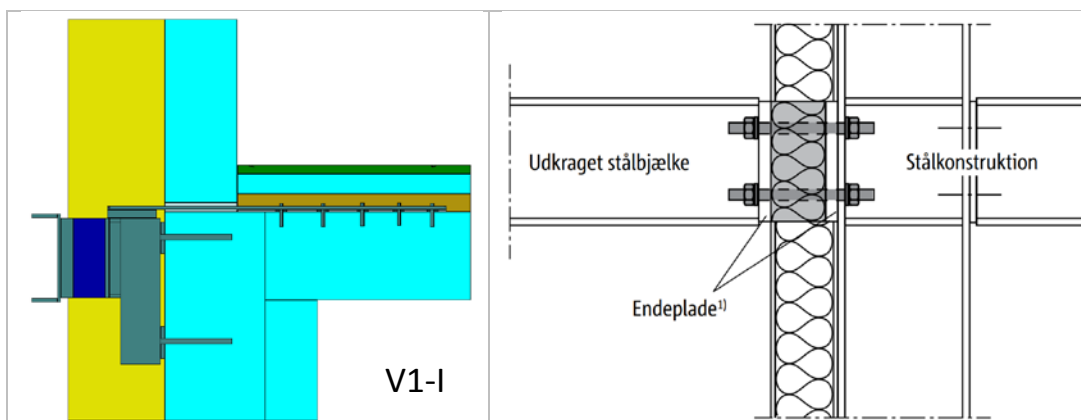
5.1.7 Original detalje (V1) beregnes med Isokorb kuldebro afbryder

Der er forskellige måder at forbedre eller reducere en kuldebro, som resultaterne viser i de forrige afsnit, er en af løsningerne at ændre geometrien, så afstanden mellem udeklima og indeklima forøges så meget som muligt. En anden mulighed er at optimerer geometrien for selve stålbeslaget eller stålbandet, så der anvendes så lidt stål som muligt, og derved reducere tværsnitsarealerne, hvorved varmetabet reduceres.

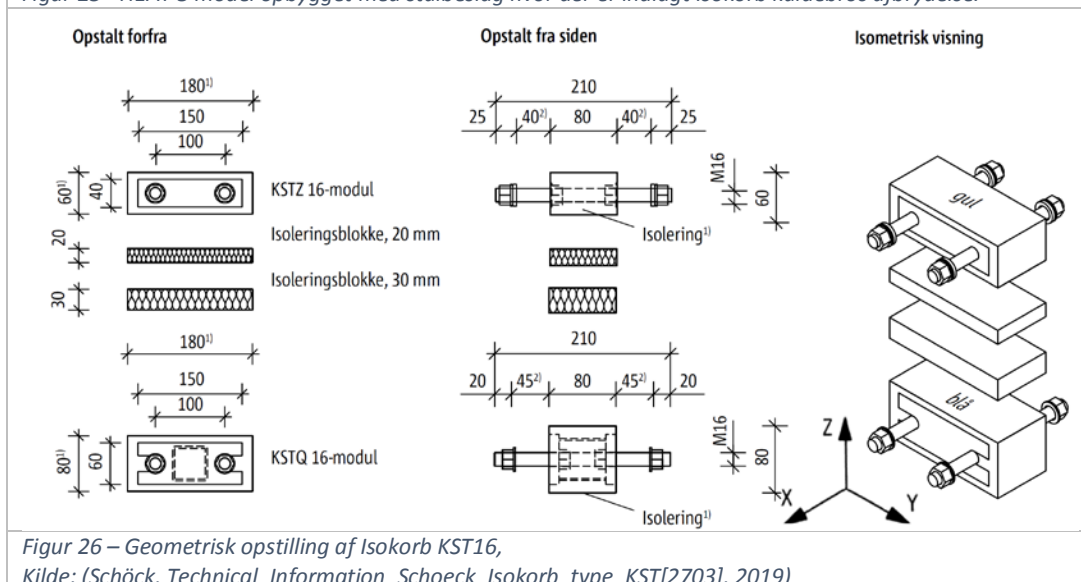
Når geometrien for facaden og de øvrige bygningsdele er fastlagt og stålbeslaget er optimeret, således at der ikke anvendes mere stål end nødvendigt, er det svært at gøre mere for at reducere varmetabet gennem kuldebroen.

Der findes en producent på markedet, der har specialiseret sig i at udvikle løsninger til forbedring af kuldebroer. Det er et tysk firma kaldet Schöck, (Schöck Ltd., 2019) de har udviklet en serie løsninger kaldet Isokorb til at bryde kuldebroer, i samlinger mellem beton/beton, beton/stål og stål/stål.

I dette afsnit beregnes effekten af produktet fra Schöck, beregnet til at bryde kuldebroen i samlinger mellem stål/stål. Beregningen foretages ud fra et økonomisk aspekt, idet løsningen i variant V1, ikke er problematisk ud fra et bygningsfysisk aspekt i forhold til holdbarhed, gener eller fugt.



Figur 25 - HEAT 3 model opbygget med stålbeslag hvor der er indlagt Isokorb kuldebros afbrydelse.



Figur 26 – Geometrisk opstilling af Isokorb KST16,

Kilde: (Schöck, Technical_Information_Schoeck_Isokorb_type_KST[2703], 2019)

Isokorb modulet mindsker varmetabet gennem kuldebroen, ved at reducere tværsnitsarealet af stålprofilet. Løsningen består af forskellige boltesamlinger i moduler, der hver især er beregnet, til enten at overføre, træk, tryk eller forskydning. Isoleringsmaterialet der indgår i modulerne, er hårdskum (Neopor®) med en varmeledningsevne på 0,031 W/(mK).

Modulerne der indgår i samlingen, har forskellige samlede varmeledningsevner, fordi mængden, typen og placeringen af stål varierer i hvert modul. Derfor er den samlede varmeledningsevne, afhængig af hvilken samlingstype der er behov for og hvilke kræfter der skal overføres gennem samlingen (Schöck Ltd., 2019).

Til nedenstående samling benyttes modulet KST-basistype, det består af et KSTZ modul, et KSTQ modul, 2 isoleringsblokke med tykkelse på 30 mm og en isoleringsblok på 20mm. Med disse moduler er det muligt at opnå en vertikal boltafstand på op til 150 mm ($60/2 + 30 + 20 + 30 + 80/2$). Større bolteafstande kan opnås ved at isætte flere isoleringsblokke.

KSTZ modulet benyttes til at overføre trækkræfter via genvindstænger. KSTQ modulet benyttes til at overføre tryk, træk og forskydning. Modulet er designet med rektangulære rørprofiler, der er påsvejst endeplader, samtidig med at der er gennemgående gevindstænger. Rørprofilet overfører forskydningskræfterne. KSTQ modulet placeres i trykzonen. (Schöck, TA-Isokorb-KST-Varmeledningsevne-DK, 2019)

Modulerne fås i forskellige styrker, når den korrekte kombination af moduler er beregnet, kan den samlede gennemsnitlige varmeledningsevne findes. I nærværende tilfælde anvendes en samlet gennemsnitlig varmeledningsevne på 0,57 W/mK. (Schöck, TA-Isokorb-KST-Varmeledningsevne-DK, 2019)

Isokorb mellem læg koster i mindre partier 1300 kr. pr. stk. i indkøb eks. moms. (Petersen, 2019). Dertil skal lægges arbejdstid for håndtering og montage samt påsvejsning af en ekstra endeplade, dette vurderes lavt sat til 600 kr. Dertil kommer dækningsbidrag og moms.

$(1300 \text{ kr.} + 600 \text{ kr.}) \times 1,1 \times 1,25 = 2613 \text{ kr.}$

Beregning af varmetab og besparelse.

Varmetab i Watt gennem ydemuren med stålprofilet og stålbandet: 0,332 W

Varmetab i Watt gennem ydemuren uden stålprofilet og stålbandet: 0,148 W

Det betyder at for et gennemsnitsår vil varmetabet, være 12.833 Wh

Prisen for altanen vil derfor andrage omkring: 6,9 kroner pr. beslag om året.

Der er anvendt 8 beslag, den samlede pris med tilkøb af Isokorb er derfor som 55,4 kroner pr år. eksklusiv moms.

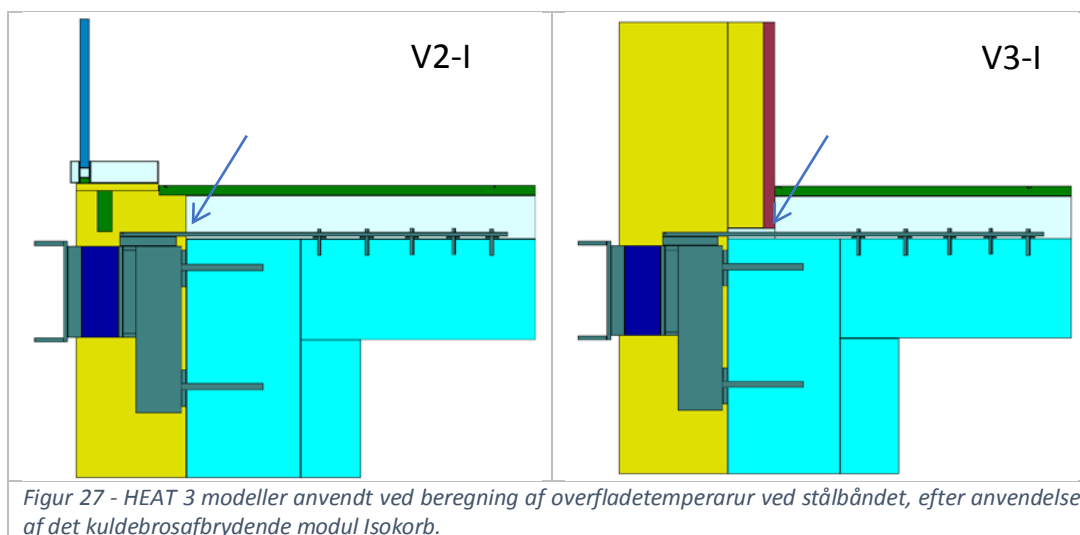
Under afsnit 5.1.4 blev prisen for terrassen beregnet til 187,9 kr. pr. år. Besparelsen udregnes derfor til 132,5 kr. pr. år. Tilbagebetalingstiden for 8 beslag vil være ca. 158 år.

Ligeledes falder kuldebroens bidrag til den samlede U-værdi til 11,1 %

5.1.8 V3 og V2(G) detalje beregnes med Isokorb kuldebro afbryder

I forlængelse af forrige afsnit, undersøges det om det er muligt at forbedre en kritisk kuldebro, ved anvendelse af Isokorb modulet til stålprofiler.

Varianterne V3 og V2(G) anvendes til denne beregning, fordi de to varianter er mest sårbare over for lave temperaturer i stålbandet, under gulvet og ikke kun i samlingen mellem gulv og ydervæg.



I den aktuelle situation skal geometrien af stålbeslaget tilpasses således at den kuldebrosafbrydende Isokorb, kan monteres. Det betyder at stålbandet og topppladen der er monteret til HE200A profilet, ikke kan have samme længde som i det originale design. Der er derfor ikke plads til 4 bolte, når der samtidig skal være plads til et Isokorb modul. Udnyttelsesgraden af de 4 bolte's bæreevne, er i den aktuelle situation ca. 12% for hulrandsbæreevne og 21 % for overlipping. Ved at udskifte de 4 M14 bolte med 2 M16 bolte, bliver udnyttelsen ca. 22% for hulrandsbæreevne og 32 % for overlipping. Det er således stadig muligt at opfylde de statiske krav der er til samlingen.

Ved at beregne modellen for scenarie V3, med den forkortede topplade og stålband, og sammenligne resultaterne med den originale V3 model, se figur 18. Ses det at ændringen bidrager med 0,5 til 1,0 °C, fordelt over de 6 måneder af året der beregnes, den største forskel ses ved beregninger for de to koldeste måneder af året.

Resultaterne fra beregningen af model V3-I, vises herunder i skemaet.

Tabel 17 – Den relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved ydervæggen uden isolering under gulv, ved anvendelse af det kuldeafbrydende modul fra Isokorb.

Ståloverflade ved væg (V3-I)	Okt.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	18,3	17,7	17,1	16,8	16,7	17,3
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	63,3	61,3	58,6	55,3	56,5	58,1
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	70,0	70,6	70,6	70,9	71,2	68,7

Resultatet viser at den relative luftfugtighed, for både fugtbelastningsklasse 2 og 3, alle er under grænsen hvor skimmelvækst kan forekomme. Sammenligningen med resultaterne fra V3 gøres under diskussionen.

Resultaterne fra beregningen af model V2(G)-I, vises herunder i skemaet.

Tabel 18 – Den relative luftfugtighed, beregnes her ved overfladetemperaturen, på den indvendige overflade af stålbandet ved glasparket uden isolering under gulv, ved anvendelse af det kuldeafbrydende modul fra Isokorb.

Ståloverflade ved væg (V2(G)-I)	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	18,0	17,3	16,6	16,2	16,2	16,8
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	64,5	63,0	60,5	59,3	58,6	59,9
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	71,3	72,5	72,9	73,6	73,9	70,9

Resultatet viser at den relative luftfugtighed, for både fugtbelastningsklasse 2 og 3, alle er under grænsen hvor skimmelvækst kan forekomme. Sammenligningen med resultaterne fra V2(G) gøres under diskussionen.

5.1.9 Deldiskussion

Indledende beregninger og termografi

Resultaterne fra de 3 modeller beskrevet under afsnit 5.1.3, henholdsvis modellen med fuld kontakt mellem alle materialerne, modellen med luft mellem stålbandet og modellen med luft under stålbandet og luft omkring stålprofilerne, viser at modelopbygningen har en betydning for varmetabet gennem kuldebroen.

Tabel 19 – sammenligning af varmetabet gennem de 3 scenarier ift. udførelses tolerancer som beskrevet under afsnit 5.1.3

Model	Varmetab	Varmetab i %	Afvielser fra mindste
Uden stål	0,148 W		
Fuld kontakt mellem alle materialerne	0,786 W	532 %	+ 1,88 %
Luft mellem stålband og betondæk	0,771 W	522 %	mindste
Luft mellem stålband og betondæk samt omkring stålprofilerne	0,793 W	537 %	+ 2,76 %

Resultater i tabel 19 viser at varmetabet er størst ved det scenarie hvor der er de største udførelsestolerancer. Varmeledningsevnen er højere i luften omkring stålprofilerne, derved ledes der mere varme ud omkring stålet, hvorved stålet bliver varmere. Kuldebroen taber derfor mere varme, men temperaturen i stålet er højere hvorved risikoen for fugtrelaterede problemer er lidt lavere.

Beregningerne i afsnit 5.1.4 viser at temperaturen er koldest i stålprofilet, ved det scenarie hvor der er luft mellem stålbandet og betondækket, samtidig med at det forudsættes at isoleringen er tætsluttende omkring stålprofilet i facaden. Dette scenarie er også det scenarie med det mindste varmetab, idet der ikke ledes varme ud omkring stålprofilet og der overføres ikke varme fra betondækket til stålprofilet.

Det vurderes realistisk, at ved en grundig udførelse med tilskæringer og blød isolering, vil det være muligt at opnå en næsten tætsluttende isolering omkring stålprofilerne.

Samtidig vurderes det at være meget sandsynligt at stålbandet ikke monteres tætsluttende til betondækket, grundet udførelsestolerancer. Afvigelseerne i ovenstående tabel, viser at varmetabet mellem de 3 scenarier er meget små, hvilket ikke vil have en reel betydning i praksis hvis det vurderes ud fra et økonomisk synspunkt. Resultaterne fra afsnit 5.1.4 viser også mindre afvigelser i overfladetemperaturen på stålet.

Afvigelseerne i overfladetemperaturen, vil have en større indflydelse på den relative luftfugtighed, selvom temperatúrafvigelsen kun er 1 °C kan det have en indflydelse på den relative luftfugtighed på over 5 % point, hvilket kan betyde forskellen på om der er risiko for skimmelvækst eller ej.

Derfor vælges det at arbejde videre med scenariet hvor der er luft mellem stålbandet og betondækket samt tætsluttende isolering omkring stålprofilerne.

Kuldebroen der skabes ved at montere stålbeslaget på dækforkanten, og placere et stålband på oversiden af dækket, resulterer i at det koldeste område vil være langs stålbandet under gulvet. Den lavere temperatur under gulvet, kan også resultere i en lavere temperatur ved gulvoverfladen, ved at beregne temperatur variationer i gulvoverfladen ved og omkring placeringen af stålbandene og sammenligne resultaterne med termografiundersøgelsen var det dog ikke muligt at eftervise denne temperaturvariation ud fra termograferingen.

Den teoretiske temperaturvariation ved gulvoverfladen, vurderes ikke til at være tilstrækkelig til at der opstår anledning til gener, hverken i form af strålingsasymmetri, skimmel eller støvfigurer.

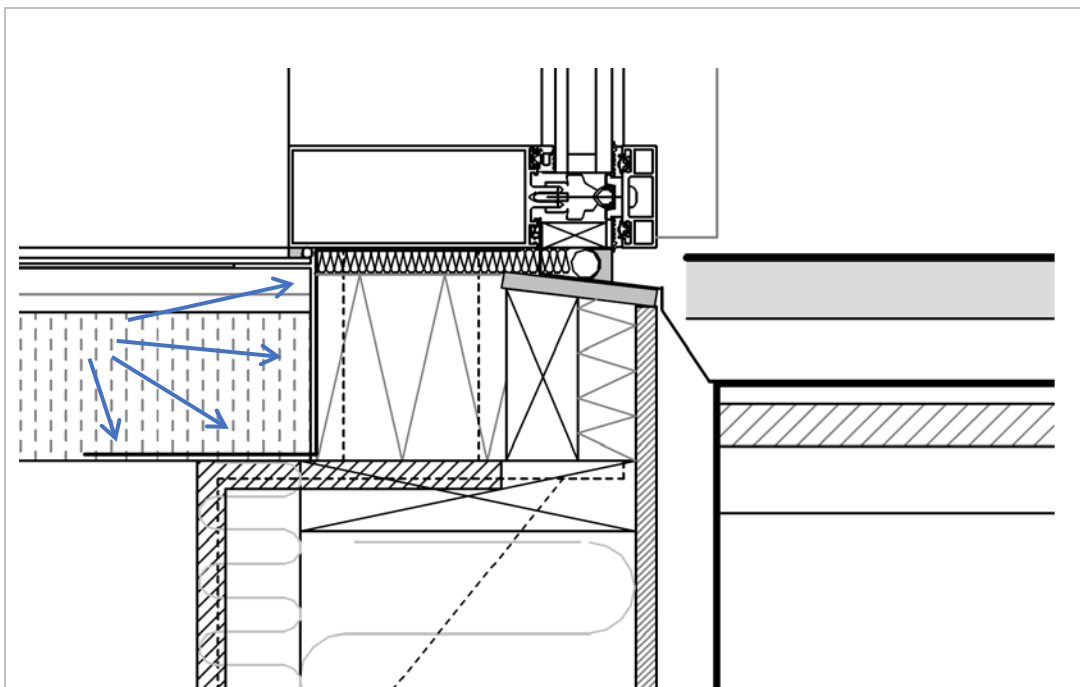
Temperaturvariationerne er i teorien omkring grænsen hvor støvfigurer kan opstå, det vurderes dog højst urealistisk at støvfigurer, vil forekomme på et gulv, hvor der vil være daglig trafik og rengøring af overfladen.

Resultaterne fra afsnit 5.1.4 og 5.1.7, hvor de originale detaljer beregnes, viser at der ikke er risiko for afledte gener eller problemer med den udførte detalje, økonomisk set vil en investering i en Isokorb kuldebrosafbrydelse, ikke betale sig idet tilbagebetalingstiden er længere en bygningen forventede levetid.

Når detaljen foran vinduet betragtes i afsnit 5.1.4, viser resultaterne fra beregningen, at der kan opstå problemer med skimmel og kondens, hvis det damptættelag i klimaskærmen ikke er tilstrækkeligt tæt. Gulvkonstruktionen i den aktuelle case, er en lukket konstruktion af uorganisk materiale. Problemet vil derved opstå på baggrund af udførelsen, enten på grund af lav bygbarhed eller en utilstrækkelig grundighed i udførelsen. Det ses af figur 28 herunder at samlingen er designet til at blive sikret ved at montere en damptæt membran.

Monteringen af den damptætte membran foretages forholdsvis tidligt i byggeprocessen, den skal monteres før der udlægges isolering og støbes undergulv. Det sværeste område vurderes til at være tætningen af dampspærren omkring stålbåndene, stålbåndene vil være monteret først og højst sandsynligt med luft mellem stålbåndene og betondækket. Damptætningen skal derfor fuges under stålbåndene samt fuge/klæbe membranen til siderne og toppen af stålbåndet. Denne tætning vurderes ikke til at være nem at udføre og kan potentielt være utæt.

Den færdige gulvbelægning er i dette tilfælde fuldklæbet linoleum, der er samtidig fuget under vinduespartierne, det er derfor nogenlunde tæt samling mellem gulvet og vinduesprofilet. Det vil derfor være en meget begrænset mængde fugt der vil diffundere ned gennem samlingen ved det støbte undergulv. Generelt vurderes denne detalje til at have en lille risiko for fugtrelaterede skader, hvis alle samlingerne udføres tilstrækkelig tætte.



Figur 28 – Det ses at det damptætte lag sikres ved en damptæt membran, angivet med farvede pile.
Kilde: Tegning fra det faktisk udførte byggeprojekt, (Rubow Arkitekter, 2017)

Gulvtypen er ikke valgt af hensyn til kuldebroen, men udelukkende på baggrund af geometri og akustik. Det vides at der i den aktuelle case i forbindelse med projekteringen har været særligt fokus på trinlyd. Det vurderes realistisk, at gulvtypen kunne have været valgt anderledes, fordi der er andre steder i byggeriet hvor der er valgt gulv på strøer.

Varianter og forsøg med kuldebrosafbrydelse

I den aktuelle byggesag, er stålbeslagene monteret i forbindelse med to forskellige facadetyper, henholdsvis tung bagmur med isolerede facadekassetter og en facade bestående af glaspartier. Der er stor forskel på temperaturen, omkring stålbandet når resultaterne sammenlignes fra de to facadetyper.

Det er tydeligt at isoleringen omkring stålbeslaget i facaden er reduceret, samtidig med at den indvendige side af facaden er rykket tættere på udeklimaet, hvorved længden af stålbandet reduceres før varmemstrømmen når indeklimaet, hvilket øger kuldebroseffekten betragteligt, se tabel 15.

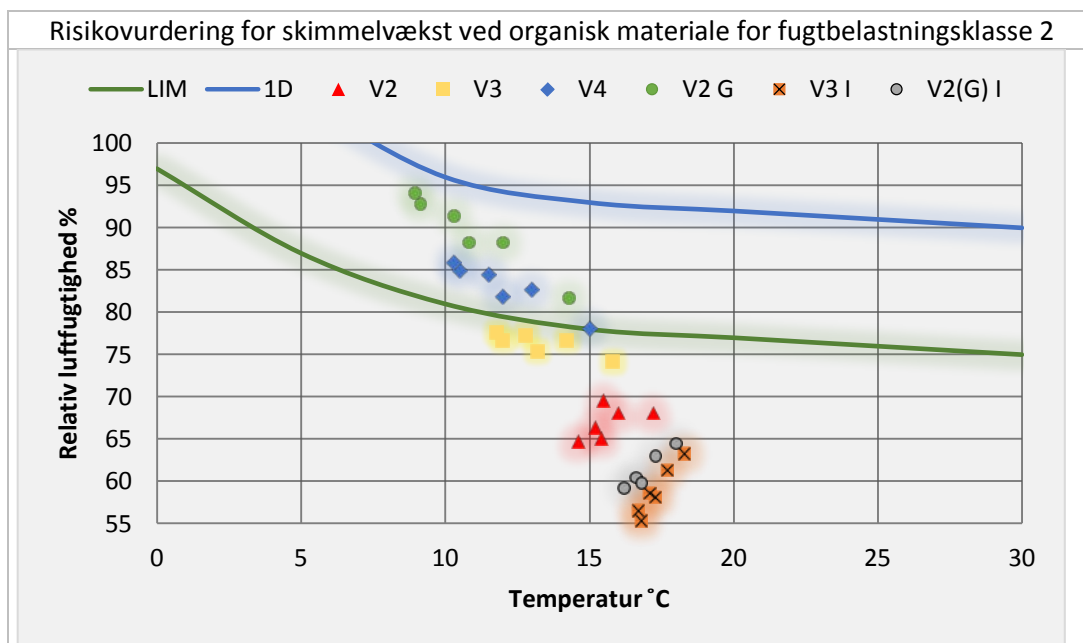
Hvis der i tilfældet ved det aktuelle byggeri havde været udført gulv på strøer i denne etage, hvor stålbeslagene er monteret, ville der være meget stor risiko for, at konstruktionen kunne konkluderes som behæftet med projekteringsfejl, grundet problemer med skimmelsvamp og kondens under gulvet.

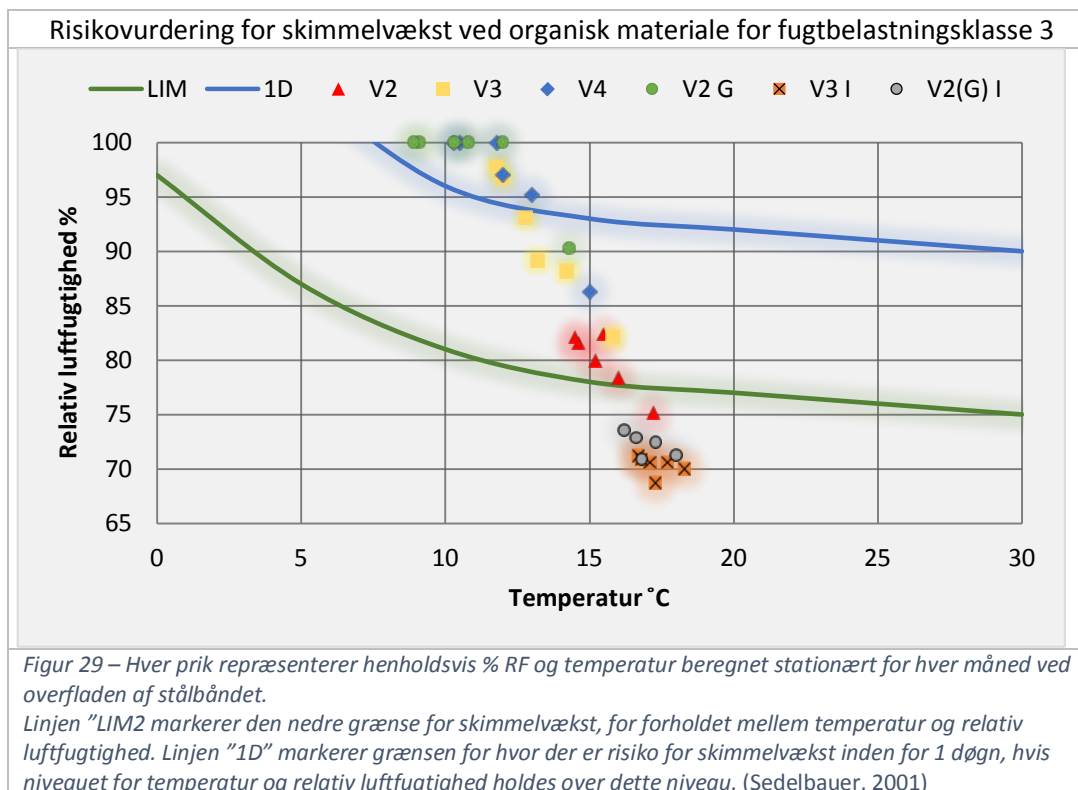
Den afgørende forskel på de to gulvkonstruktioner, er at gulvet på strøer tillader at den varme og fugtige luft fra indeklimaet, kan komme i kontakt med den kolde overflade ved stålbandet, derudover er der muligheden for at der samles organisk støv under gulvet, hvilket tilsammen giver gode betingelser for skimmelvækst.

Vækstbetingelserne for skimmelsvampen, vurderes væsentligt mindre, ved den aktuelt udførte løsning med den lukkede gulvkonstruktion. Muligheden for tilføjelsen af organiske materiale mellem betondækket og polystyrenen er meget lille, idet der samtidig støbes et 50mm undergulv. Støbelaget forhindrer luft og derved konvektive strømninger mellem luften omkring stålbeslaget og rumluften fra indeklimaet. Derved kan der ikke transporteres støv og vanddamp ned omkring stålbeslaget.

Herunder sammenlignes risikoen for skimmelvækst ved stålbandet, på den indvendige side af konstruktionen. Se afsnit 4 for hvordan den grundlæggende vurdering foretages. Det er valgt at medtage varianterne V2, V3, V4, V2(G) og V3-I, for henholdsvis fugtbelastningsklasse 2 og 3. Det er valgt at udelade varianterne V1 og V1G, dette gøres fordi begge varianter består af en uorganisk lukket gulvkonstruktion. Varianten V4 består ligeledes af den lukkede uorganiske gulvkonstruktion, dog i kombination med en let facadeopbygning, bestående organiske træregler og gipsplader.

Risikoen for skimmelvækst vurderes som et gennemsnit af temperaturen og den relative luftfugtighed over en måned, hvilket betyder at der ikke konstant er vækstbetingelser for skimmelvækst hele den pågældende måned, men der vil samtidig være perioder med mere gunstige betingelser end gennemsnitsbetragtningen. Vurderingen siger derfor ikke om der vil opstå skimmel, men blot at risikoen kan være til stede for skimmelvækst.





For varianten V4 ligger 3 af de 6 resultater over dugpunktet og for varianten V2(G) ligger 5 af de 6 resultater over dugpunktet. I grafen herover, er resultaterne vist 100 % RF.

Varianten V2 er opbygget med tung bagmur og trægulv på strøer, er markeret med røde trekanter. Denne variant vil ikke have risiko for skimmelvækst i fugtbelastningsklasse 2, dog vil løsningen være risikobehæftet under forhold svarende til fugtbelastningsklasse 3.

Varianten V3 er klimaskærmen opbygget af lette facadekassetter samt trægulv på strøer. Denne variant vurderes til at have lille risiko for skimmelvækst, hvis temperatur og relativ luftfugtighed holdes inden for fugtbelastningsklasse 2. Hvis forholdene er nærmere fugtbelastningsklasse 3, vil der være stor risiko for skimmelvækst og endda kondens dannelse.

Løsningen for variant V3 er beregnet med det kuldebrosafbrydende isokorb modul, resultaterne vises som V3-I. Beregningen viser at temperaturen og den relative luftfugtighed, alle ligger under grænsen for skimmelvækst. Endvidere er forholdene meget stabile når spredningen sammenlignes med variant V3 hvilket også viser at det er en mere sikker løsning.

Varianten V4 er ligeledes opbygget med lette facadekassetter, gulvet er en lukket uorganisk konstruktion bestående af polystyren og et støbt afretningslag. I teorien bør der ikke være risiko for skimmelvækst omkring stålbandet i denne konstruktion. Resultaterne viser også at der ikke risiko for skimmel omkring trægulvet. Det damptætte lag, bør ligge ved indersiden lige bag pladebeklædningen, for at undgå risiko for skimmelvækst i regelopbygningen.

Denne detalje er dog meget svær at udføre i praksis, uden utætheder i den damptætte lukning under og omkring stålbandet. Endvidere skal det undgås at der kommer organisk materiale ned omkring stålbeslaget, der skal derfor støbes op mod en uorganisk plade, eller selve dampspærren, hvilket er en meget tvivlsom løsning, når det samtidig skal sikres at der er en lufttæt samling mellem det støbte afretningslag og det damptætte lag i facaden. Det vurderes derfor risikofyldt at udføre denne detalje i praksis, både i fugtbelastningsklasse 2 og i særdeleshed i fugtbelastningsklasse 3, hvor utætheder i det damptætte lag, vil kunne føre til kondens og derfor svampevækst som kan være trænedbrydende eller toksiske.

Varianten V2(G) er samlingsdetaljen ved glasfacaden i kombination med trægulv på strøer. Resultaterne for denne model er meget kritiske, både i fugtbelastningsklasse 2 og i fugtbelastningsklasse 3, vil der være en stor risiko for kondens i 5 af de 6 måneder. Kondens vil føre til meget høje fugtniveauer i trækonstruktionen, hvorfor svampevækst som kan være trænedbrydende eller toksiske kan få mulighed for at gro.

Løsningen er her ligeledes beregnet ved at indarbejde det kuldebrosafbrydende Isokorb modul, varianten kaldes V2(G)-I i figur 29. Resultaterne viser at løsningen kan udføres i praksis, for både fugtbelastningsklasse 2 og fugtbelastningsklasse 3, uden risiko for skimmelvækst.

Den ækvivalente varmeledningsevne for Isokorb løsningen, afhænger af størrelsen på det anvendte profil og den nødvendige kraftoverførelse, værdierne varierer mellem 0,42 W/mK og 1,1 W/mK. Det er derfor meget forskelligt hvilke resultater der kan opnås, afhængigt af den aktuelle detalje.

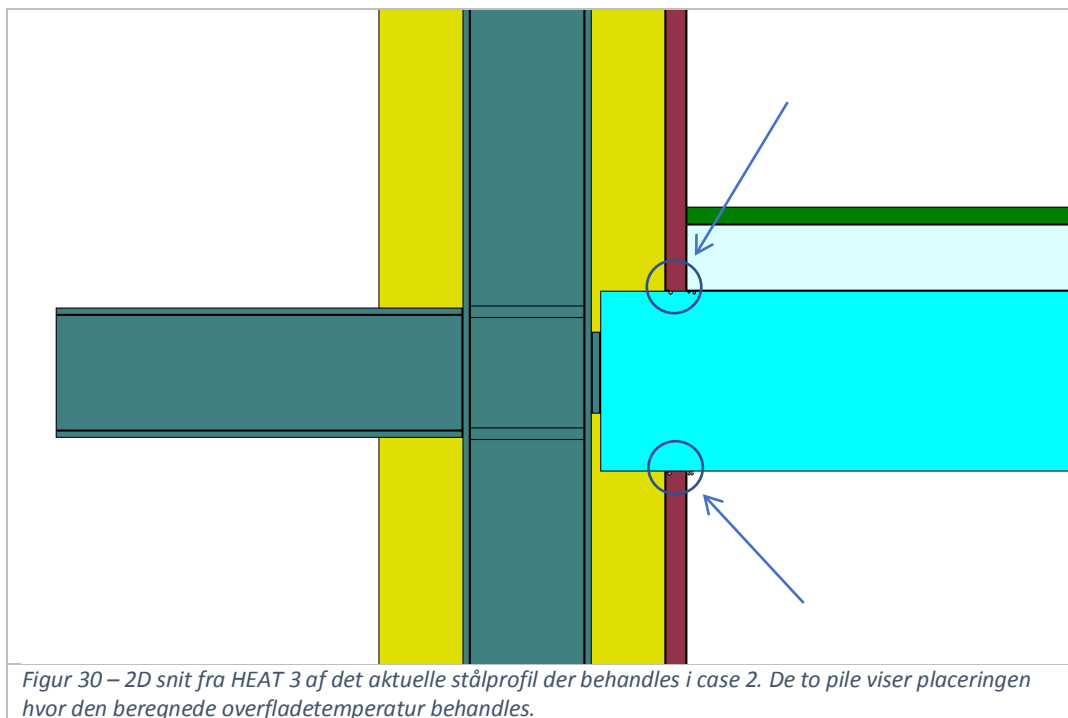
5.2 Lisener i facaden, fastgjort til dækforkanter

Denne case er et teoretisk eksempel, inspirationen stammer fra forskellige byggesager hvor lette facadekassetter anvendes som udfyldningselementer. Kassetterne hviler på den bagerste 80 mm regelopbygning, der har vederlag på dækforkanterne. Stålprofilerne i facaden er gennemgående søjler der hviler på fundamentet og fastholdes til hver etage ved montage til dækforkanterne. De udragende stålprofiler kan enten bære udvendige trapper, svalegange eller altaner. Denne case vælges for at undersøge om overfladetemperaturen, på selve vægoverfladen giver anledning til støvfigurer eller om overfladetemperaturen ved betondækket giver anledning til fugtrelaterede problemer som fx skimmelsvamp.

5.2.1 Beregningsmodel

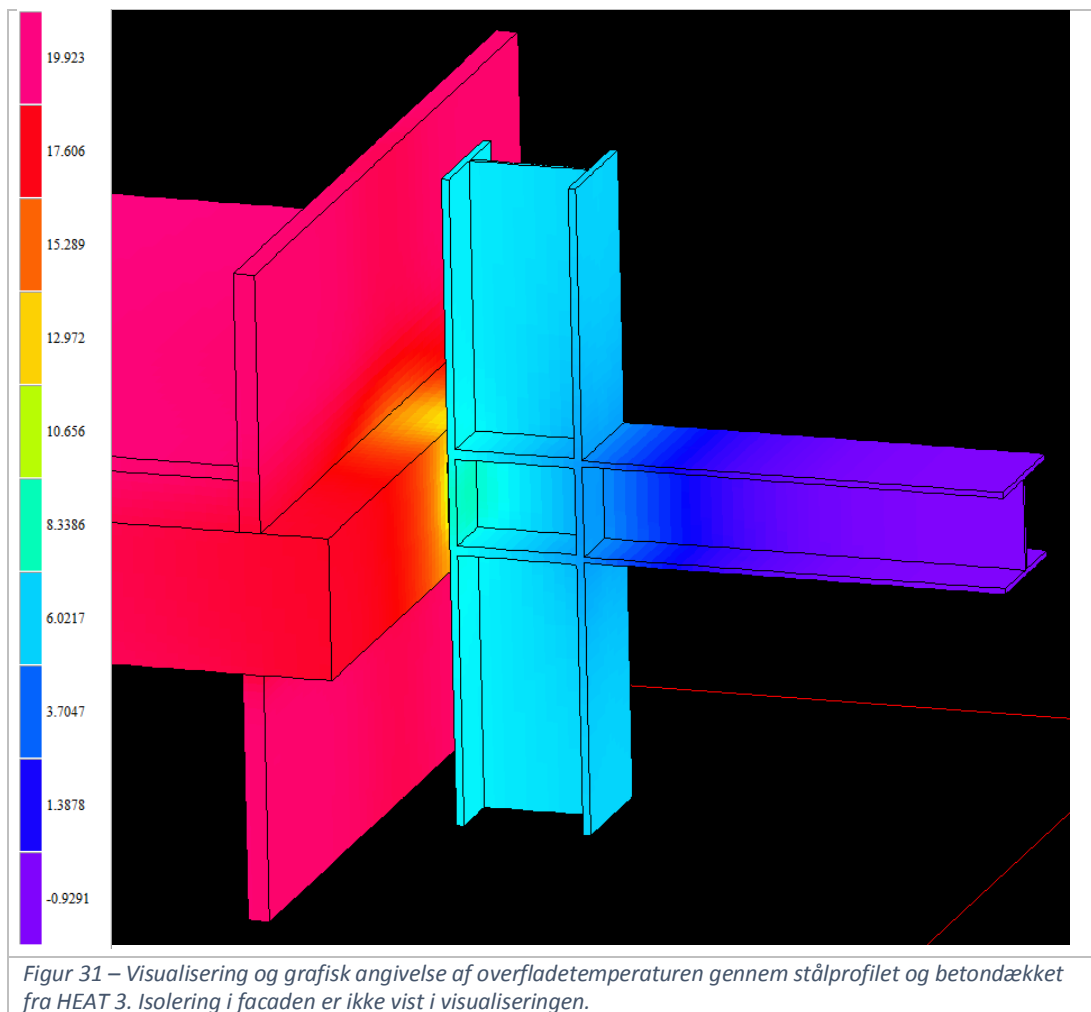
Herunder forklares hvordan modellen er opbygget, og hvilke forudsætninger der gøres i forbindelse med beregningsresultaterne.

Modellen opbygges efter forudsætningerne hvor der anvendes afstandsskiver mellem stålprofilerne og dækforkanterne, det forudsættes at isoleringen tilskæres, således at den er så godt som tætsluttende omkring stålprofilerne. Forudsætningerne er bestemt ud fra en vurdering af hvad der realistisk udføres i praksis, samt resultatet fra beregningerne vist i afsnit 5.1.4.



I de efterfølgende resultater vises overfladetemperaturen ved først 4 udvalgte placeringer, henholdsvis overfladetemperaturen af betondækket i overside og underside, bag gipspladerne over og under betondækket, derefter undersøges den indvendige overfladetemperatur af væggen og loftet i en parallel linje med stålprofilet over og under betondækket.

Af figuren herunder ses hvordan varmestrømmen bevæger sig gennem stålprofilet og ind i betondækket.



5.2.2 Original detalje

Resultaterne i de to afsnit herunder, er alle fra den samme model i HEAT3 (Blomberg, 2019) beregnet ved de randbetingelserne for februar måned beskrevet i tabel 6. Resultaterne i det tredje afsnit, hvor varmetabet beregnes med stålprofilerne, helt uden stålprofiler og med stålprofilerne hvor kuldebroen brydes ved anvendelse af Isokorb modul, er beregnet ud fra den samme model hvor ændringerne er foretaget successivt.

Overfladetemperatur og relativ luftfugtighed

Herunder præsenteres temperaturen ved 4 udvalgte placeringer. Det er overfladetemperaturen på bagsiden af gipspladerne, henholdsvis over og under betondækket, samt overfladetemperaturen i oversiden og undersiden af betondækket, helt ude ved ydervæggens indvendige overflade, se markeringen med pile på figur 30. Temperaturen der vises er den laveste temperatur, der opnås i bygningsdelen ud fra stålprofilernes placering.

Resultaterne fra beregningerne over og under betondækket adskiller sig, ved at der på oversiden af betondækket er etableret en gulvkonstruktion, ellers havde resultaterne været ens, over og under betondækket. Gulvkonstruktionen gør at temperaturen i bygningsdelene er lidt lavere, fordi gulvet og hulrummet under gulvet, har en isolerer effekt og derved begrænser temperaturen fra rummet i at trænge ned i og ud gennem betondækket.

Temperaturen på bagsiden af gipspladerne anvendes til at vurderer risikoen for skimmelvækst. Overfladetemperaturen i oversiden af betondækket bruges til at vurderer risikoen for skimmelvækst under gulvet. Overfladetemperaturen i undersiden af betondækket, er valgt for at vurderer risikoen for støvfigurer, i forlængelse af dette resultat arbejdes der videre i næste afsnit.

Overfladetemperatur på bagsiden af gipspladerne, ved undersiden af betondækket.

<i>Tabel 20 – Den relative luftfugtighed, beregnes her ved bagsiden af gipspladerne ved undersiden af betondækket, se den nederste pil på figur 30.</i>						
Temperatur bag gipsplader, undersiden betondæk.	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	17,7	16,8	16,1	15,7	15,6	16,3
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	65,7	64,6	62,5	60,5	60,8	61,7
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	72,6	74,4	75,2	76,2	76,6	73,0

Af ovenstående tabel, fremgår det at for fugtbelastningsklasse 2 vil være under 70 % relativ luftfugtighed alle 6 måneder. For fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der for 3 måneder vil være lidt over 75 % relativ luftfugtighed.

Overfladetemperatur på bagsiden af gipspladerne, ved oversiden af betondækket.

Tabel 21 – Den relative luftfugtighed, beregnes her ved bagsiden af gipspladerne ved oversiden af betondækket, se den øverste pil på figur 30.

Temperatur bag gipsplader, overside betondæk.	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	17,8	16,3	15,4	14,8	14,7	15,6
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	65,3	66,9	65,6	63,8	64,2	64,5
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	72,2	77,0	79,0	80,5	80,1	76,4

Af ovenstående tabel, fremgår det at for fugtbelastningsklasse 2 vil være under 70 % relativ luftfugtighed i alle 6 måneder. For fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der for 5 måneder vil være lidt over 75 % relativ luftfugtighed og for 2 af månederne vil være 80 % relativ luftfugtighed. Risikoen for skimmelvækst bearbejdes under diskussionen.

Overfladetemperatur i oversiden af betondækket (under gulv).

Tabel 22 – Den relative luftfugtighed, beregnes her for oversiden af betondækket, se den øverste pil på figur 30.

Temperatur i oversiden af betondækket.	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	17,7	16,8	16,1	15,6	15,5	16,3
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	65,9	64,8	62,8	60,7	61,0	61,9
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	72,8	74,6	75,6	76,6	77,0	73,3

Af ovenstående tabel, fremgår det at for fugtbelastningsklasse 2 vil være under 70 % relativ luftfugtighed i de 6 måneder. For fugtbelastningsklasse 3 viser resultatet at der for 3 måneder vil være lidt over 75 % relativ luftfugtighed.

Overfladetemperatur i undersiden af betondækket.

Tabel 23 – Den relative luftfugtighed, beregnes her for undersiden af betondækket, se den nederste pil på figur 30.

Temperatur i undersiden af betondækket.	Okt.	Nov.	Dec.	Jan	Feb.	Mar.
Overfladetemperatur (°C)	18,0	17,3	16,7	16,3	16,2	16,9
Fugtbelastningsklasse 2 (% RF)	64,5	62,8	60,4	58,1	58,4	59,7
Fugtbelastningsklasse 3 (% RF)	71,3	72,3	72,7	73,3	73,6	70,7

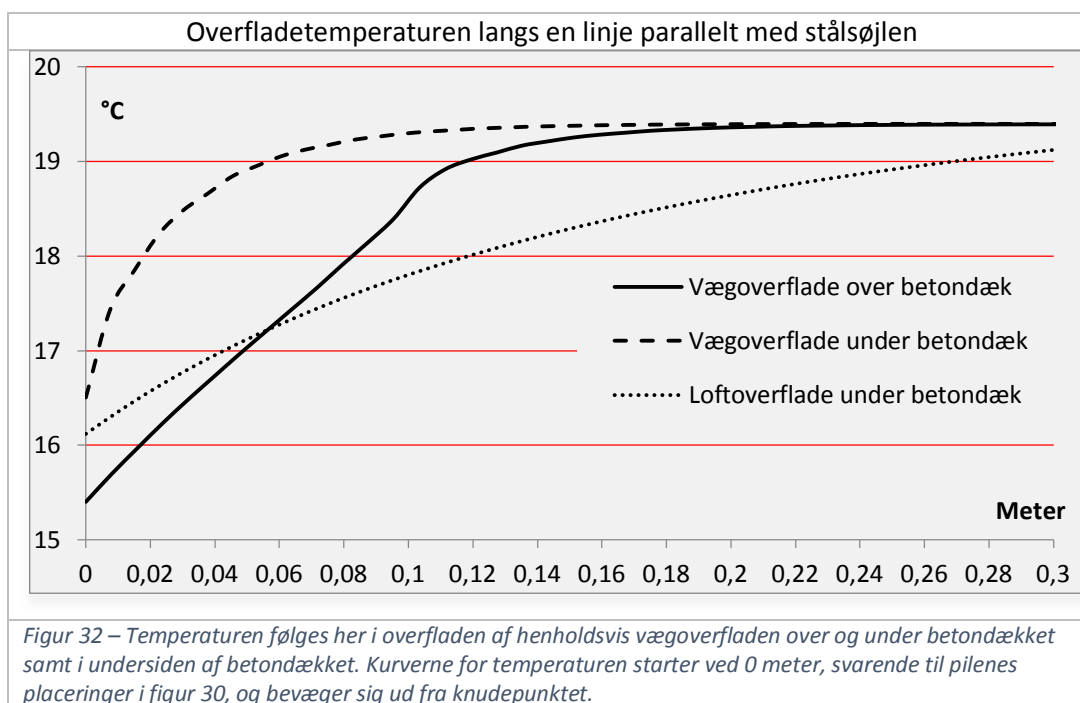
Overfladen hvor ovenstående resultater er beregnet er en indvendig overflade i konstruktionen og er derfor en synlig overflade. Det er derfor ikke kun risikoen for skimmel der er interessant at vurderer, men også risikoen for støvfigurer.

Det ses at overfladetemperaturen er tæt på 16 °C, der vil derfor være en forskelstemperatur tæt på 4 °C hen over overfladen. Dette behandles yderligere under næste afsnit.

Af ovenstående tabel, fremgår det at for henholdsvis fugtbelastningsklasse 2 og 3 vil være under 70 % og 75 % relativ luftfugtighed i alle 6 måneder.

Overfladetemperatur og støvfigurer

Resultaterne i dette afsnit er alle overfladetemperaturer, på den synlige overflade af henholdsvis ydervæggen og betondækket. Temperaturen vises for 3 udvalgte placeringer, henholdsvis i vægoverfladen over og under betondækket samt i overfladen af undersiden af betondækket. Resultaterne anvendes til at vurdere risikoen for støvfigurer afledt af forskellen i overfladetemperaturen på overfladen af bygningsdelene. Randbetingelserne anvendt ved nærværende beregninger svarende til en udendørstemperatur for februar måned og en indendørstemperatur på 20 °C, jf. tabel 6.



Vægoverfladen over betondækket – fuldt optrukket linje, figur 32.

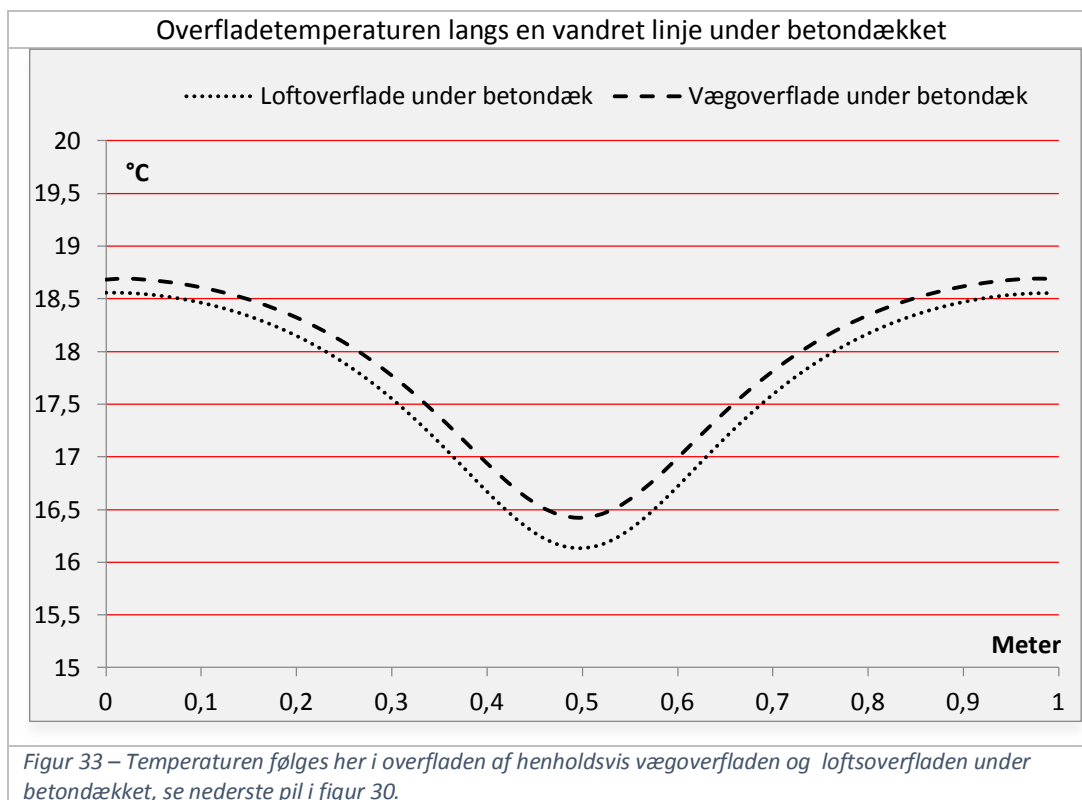
Overfladetemperaturen på den indvendige side af ydervæggen, følges her fra hjørnet mellem betondækket og gipspladerne. Det ses at temperaturen starter omkring 15,5 °C og stiger til næsten 19,5 °C. Gulvopbygningen der består af trægulv på strøer med 80 mm hulrum, fylder 102 mm i alt. Det ses af grafen at temperaturen for den synlige del af ydervæggen, altså den del af væggen der er over gulvniveauet, starter ved 18,7 °C. Temperaturforskellen er derfor mindre end 1 °C.

Vægoverfladen under betondækket – stiple linje, figur 32.

Overfladetemperaturen på den indvendige side af ydervæggen, følges her fra hjørnet mellem undersiden af betondækket og gipspladerne. Det ses at temperaturen starter omkring 16,5 °C og stiger til næsten 19,5 °C efter 110 mm, hvorefter temperaturen er stabil.

Loftoverfladen under betondækket – prikket linje, figur 32.

Temperaturen i dette område er en forlængelse af resultaterne fra sidste tabel 23 i forrige afsnit. Her følges temperaturen dog langs en linje ind i rummet. Overfladetemperaturen på loftoverfladen, følges her fra hjørnet mellem undersiden af betondækket og gipspladerne. Det ses at temperaturen starter omkring 16 °C og stiger til næsten 19,5 °C efter 400 mm, hvorefter temperaturen er stabil.



Vægoverfladen under betondækket – stiplede linje, figur 33.

Overfladetemperaturen på den indvendige side af ydervæggen, følges her langs hjørnet mellem undersiden af betondækket og gipspladerne parallelt med ydervæggen. Det ses at temperaturen starter omkring 16,5 °C, lige ud fra stålsøjlen og stiger til lige over 18,5 °C efter 400 mm, hvorefter temperaturen er stabil. Det ses at temperaturen er lavere i et bredere areal end temperaturen langs med søjlen i figur 32. Dette behandles yderligere under diskussionen.

Loftoverfladen under betondækket – prikket linje, figur 33.

Overfladetemperaturen på loftoverfladen, følges her langs hjørnet mellem undersiden af betondækket og gipspladerne parallelt med ydervæggen. Det ses at temperaturen starter omkring 16 °C lige ud fra stålsøjlen og stiger til lige over 18,5 °C efter 400 mm, hvorefter temperaturen er stabil.

Fælles for ovenstående resultater vedrørende temperaturvariationerne behandles vurderingen af risikoen for støvfigurer under diskussionen.

Varmetab

Ud over at foretage beregninger af kuldebroeffekten, for at foretage sammenligninger med termiske undersøgelser og fugtvurderinger, er det ligeledes interessant, at undersøge i hvilken grad kuldebroen har af indflydelse på opvarmningen af bygningen og deraf det økonomiske driftsregnskab.

Varmetab i Watt gennem ydemuren med stålprofilet: 0,392 W
Varmetab i Watt gennem ydemuren uden stålprofilet: 0,113 W
Varmetabet for stålprofil alene andrager derfor 0,279 W/K.

Det betyder at for et år vil varmetabet være omkring 19.459 Wh.
Prisen pr. stålprofil vil derfor andrage omkring 10,5 kroner om året.
Det skal bruges 2 stålprofiler pr. boligenhed, hvis man antog at stålprofilerne skal bære altaner. Derfor vil besparelsen være 21 kroner om året.

U-værdier

Den danske standard for beregning af bygningers varmetab (DS 418), foreskriver at ved bestemmelsen af den samlede transmissionskoefficient, for en bygningsdel skal der medregnes kuldebroer

Hvilken betydning har de 2 stålbeslag for ydervæggens samlede U-værdi.

Der er forudsættes 1 altan pr. boligenhed, for eksemplets skyld, beregnes den samlede U-værdi for facaden pr. boligenhed.

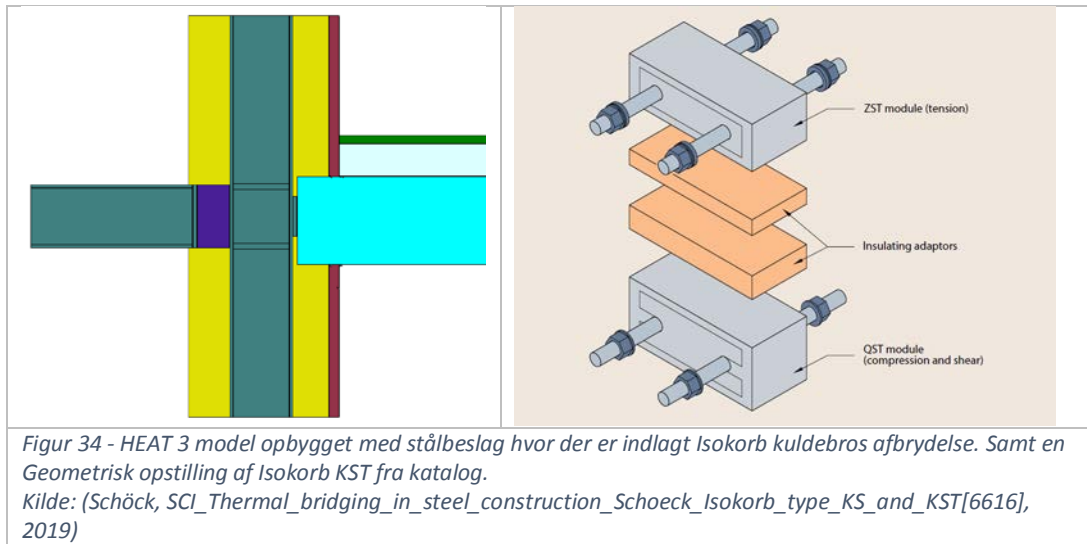
Der medregnes derfor 2 facadearealer af 6 meters bredde og 3,5 meters højde. Det forudsættes at facaden består af 30 % glas.

Facadens U-værdi beregnes til 0,1 W/m²K. (Dansk Standard, 2011, s. 26)

Den korrigerede U-Værdi beregnes til 0,12 W/m²K, svarende til en forøgelse på 19 %.

Kuldebrosafbryder

Når kuldebrosafbrydelsen fra Isokorb skal indarbejdes i nærværende scenarie, vil forudsætninger være som vist af figurerne herunder.



Muligheden for at reducerer varmetabet gennem kuldebroen ved anvendelse af et isokorb modul, er mindre i dette scenarie, end scenarierne fra case 1. Dette skyldes at stålprofilet der gennembryder isoleringslaget er mindre, hvorved den samlede varmeledningsevne af modulerne fra Isokorb vil være højere, fordi det altid er nødvendigt at anvende modulerne ZST og QST som vist i figuren herover, derved vil der være mindre plads til afstandsmodulerne der primært består af isolering.

Derved opnås følgende varmetab, når kuldebrosafbrydelsen fra Isokorb indarbejdes i nærværende scenarie.

Varmetab i Watt gennem ydemuren med stålprofilet og Isokorb: 0,276 W

Varmetab i Watt gennem ydemuren uden stålprofilet: 0,113 W

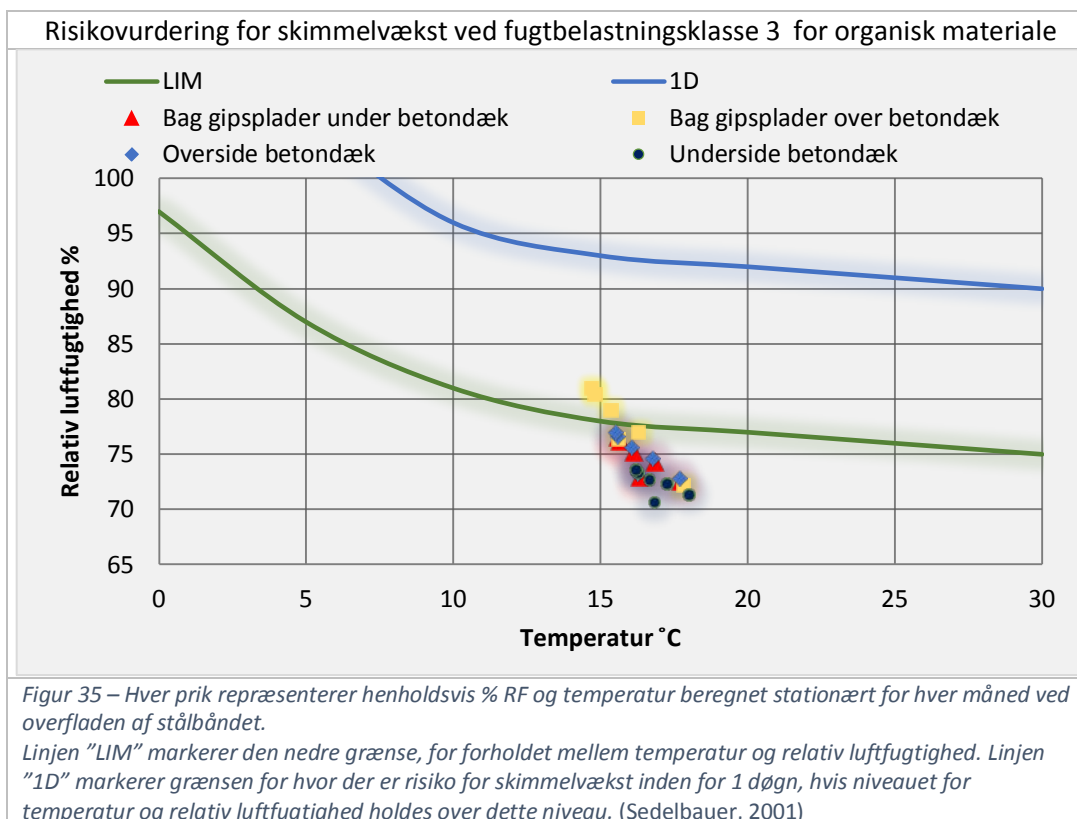
Varmetabet gennem kuldebroen reduceres til 0,166 W/K, hvilket vil betyde en besparelse på 8,6 kroner pr. par om året.

Ligeledes falder kuldebroens bidrag til den samlede U-værdi til 11,3 %

5.2.3 Deldiskussion

Risiko for skimmelsvamp

Risikoen for skimmelvækst vurderes som et gennemsnit af temperaturen og den relative luftfugtighed over en måned, hvilket betyder at der ikke konstant er vækstbetingelser for skimmelvækst hele den pågældende måned, men der vil samtidig være perioder med mere gunstige betingelser end gennemsnitsbetragtningen.



Ovenstående graf viser sammenhængen, mellem temperaturen og den relative luftfugtighed, for de 4 udvalgte placeringer, hver markering repræsenterer en af de 6 måneder. De 4 udvalgte placeringer har hver deres markering, henholdsvis kvadrat, cirkel, trekant og et roteret kvadrat.

Resultaterne for undersiden af betondækket, bør vurderes efter vækstgrænserne på uorganiske materialer, hvor grænsen "LIM" for den relative luftfugtighed sættes til 80 %. Der er dog ingen risiko for skimmelvækst i dette område.

Resultaterne ligger alle meget tæt, det er dog muligt at udlede at risikoen for skimmelsvamp under gulvet, ligger lige under grænsen for 3 måneder om året. Derved vil der være perioder i hver af de 3 måneder, hvor forholdene for skimmelvækst vil være til stede, risikoen for at perioderne er sammenhængende, vurderes til at være lav. Forholdene for skimmelvækst bag gipspladerne under betondækket, ligger ligeledes under grænsen for 3 af de 6 beregnede måneder. Derimod viser resultaterne bag gipspladerne over betondækket, at der i 3 af månederne er forhold, der ligger over den nedre grænse for vækstbetingelserne for skimmelsvamp.

Det kan være muligt at løse de termiske forhold ved at optimerer lidt på stålarealerne, hvis de statiske forudsætninger tillader dette. En reduktion af stålarealet i det vandrette profil, der bryder isoleringslaget på 15 %, resulterer i at temperaturen hæves 0,6 °C, hvorved temperatur og relativ luftfugtighed i de 3 omtalte måneder, falder til lige under den nedre grænse for risikoen for skimmelvækst.

Det er derimod svært at finde en løsning ved at justerer lidt i placeringen af facadeelementerne eller placeringen af stålsøjlerne. Ved ændring af stålsøjlernes placering, således at søjlerne flyttes tættere på udeklimaet, skal man samtidig være opmærksom på, at det afleder problemer med geometrien og kuldebroer ved fundament og sokkelløsningen. Ved at flytte stålsøjlernes placering 50 mm ud i facadekonstruktionen, sænkes overfladetemperaturen for de 3 kolde måneder med 0,1 °C, hvilket ikke er formålstjenstledigt.

Det samme gør sig gældende ved at ændre på facadekassetternes placering. Her skal man ligeledes være opmærksom på, at hvis kassetterne flyttes ud af, opstår der problemer vederlaget for kassetterne.

Fra forrige case blev det forsøgt at ændre på facaden samlede isolans, resultatet viste at det ikke gav den store effekt. I dette scenarie er en af løsningerne at hæve facadens samlede isolans med 23 % svarende til 80 mm mere isolering. Således hæves temperaturen 0,6 °C, hvorved risikoen for skimmelvækst i de 3 omtalte måneder, falder til lige under den nedre grænse. En forøgelse af isoleringstykkelsen med 80 mm, vurderes dog til at være ren forholdsvis stor forøgelse, som ikke er særlig realistisk.

De termiske problemer kan også løses ved at anvende det kuldebrosafbrydende modul fra Isokorb. Temperaturen hæves 1,8 °C ved bagsiden af gipspladerne og der er derved ingen risiko for skimmelvækst ved denne løsning.

Risiko for støvfigurer

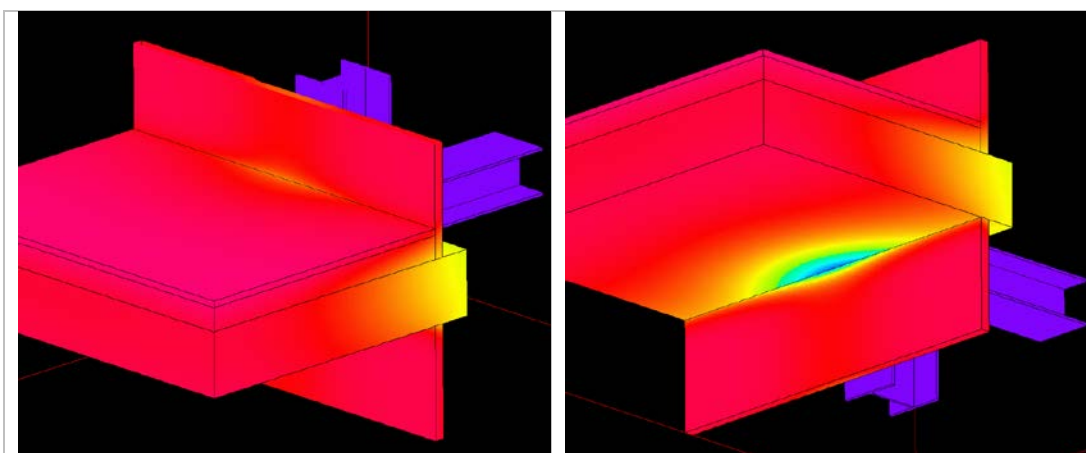
Jævnfør afsnit 4 skal temperatur variationen over en overflade være min. 2 °C.

For ydervæggen udregnes det areal hvor der kan være risiko for støvfigurer, ved at den generelle overflade temperatur på ydervæggen kendes til 19,4 °C. Arealet hvor overfladetemperaturen er mindre end 17,5 °C, vurderes derfor til at være indenfor risikoområdet hvor der kan opstå støvfigurer.

Arealet hvor temperaturforskellen på den synlige del af vægoverfladen under betondækket er min. 2 °C, er omkring 30 x 8 mm, i en halv ellipseform på ydervæggen, som vist på figur 36.

For loftet udregnes arealet ved at den generelle overflade temperatur på loftet kendes til 19,6 °C. Arealet hvor overfladetemperaturen er mindre end 17,7 °C, vurderes derfor til at være indenfor risikoområdet hvor der kan opstå støvfigurer.

Arealet hvor temperaturforskellen på den synlige del af loftoverfladen under betondækket er min. 2 °C, er omkring 400 x 90 mm, i en halv ellipseform på ydervæggen, som vist på figur 36.



Figur 36 – I de to visualiseringer herover ses henholdsvis modellen skråt oppefra og skråt nedefra, således at det er muligt at se de indvendige overflader. Temperaturskalaen er begrænset til at vise 15 °C som blå hen over gul til at vise rød ved 20 °C. Således er det muligt at se de små temperaturvariationer i overfladerne.

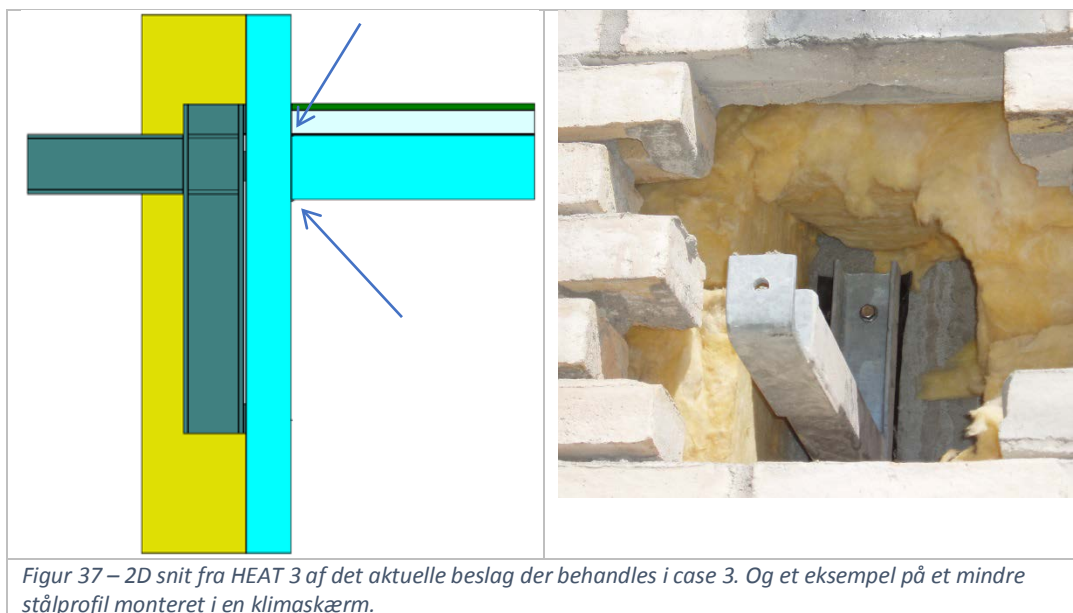
De termiske problemer kan reduceres ved at anvende det kuldebrosafbrydende modul fra Isokorb. Temperaturen hæves 1,4 °C således at den laveste overfladetemperatur på loftoverfladen er 17,5 grader. Risikoen for støvfigurer på ydervæggen fjernes og risikoen for støvfigurer på loftet reduceres til et areal på 10 x 10mm, hvor temperatur variationen er mellem 2 °C og 2,1 °C, hvilket vurderes at være negligebart.

5.3 Hyldeknægte uden trækbånd

Denne case er ligeledes et teoretisk eksempel, inspirationen stammer fra forskellige byggesager hvor ydervæggene opføres af betonelementer med en klimaskærm af henholdsvis lette facadekassetter eller skalmur. På ydersiden monteres der ofte stålbeslag af forskellig karakter og størrelse til forskellige formål. Det er ofte af de udragende stålprofiler enten bærer udvendige trapper, svalegange eller altaner. Denne case vælges for at undersøge om overfladetemperaturen på den indvendige side af vægoverfladen giver anledning til støvfigurer. Fokus i denne case er ikke at vurdere risikoen for vækst af skimmelsvamp, fordi det forventes at temperaturen og den deraf afledte relative luftfugtighed, ikke vil skabe forhold for vækst. Det er med bevidst valgt at de anvendte stålprofiler er af en kraftig karakter og facaden er velisoleret, for at undersøge om denne type konstruktionsopbygning vil aflede risiko for kuldebrosrelaterede gener eller problemer for bygningens brugere.

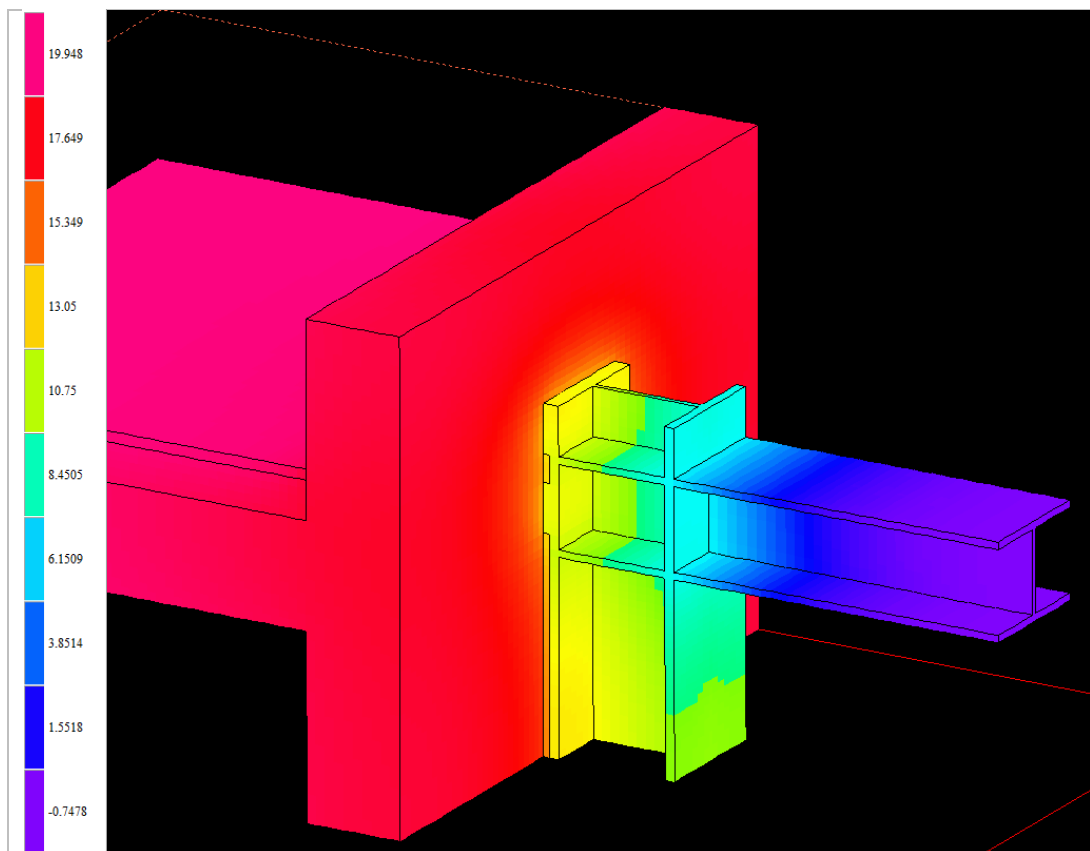
5.3.1 Beregningsmodel

Herunder forklares hvordan modellen er opbygget og hvilke forudsætninger der gøres i forbindelse med beregningerne. Modellen opbygges efter forudsætningerne hvor der anvendes afstandsskiver og luft mellem stålprofilerne og betonbagemuren, det forudsættes at isoleringen tilskrives så den er så godt som tætsluttende omkring stålprofilerne. Forudsætningerne er bestemt ud fra en vurdering af hvad der realistisk udføres i praksis. Samt resultaterne fra afsnit 5.1.4.



I de efterfølgende resultater vises overfladetemperaturen ved 4 udvalgte placeringer, henholdsvis den indvendige overfladetemperatur af væggen og dækket i en parallel linje med stålprofilet over og under betondækket.

Af figuren herunder ses hvordan varmestrømmen bevæger sig gennem stålprofilet og bagmuren.



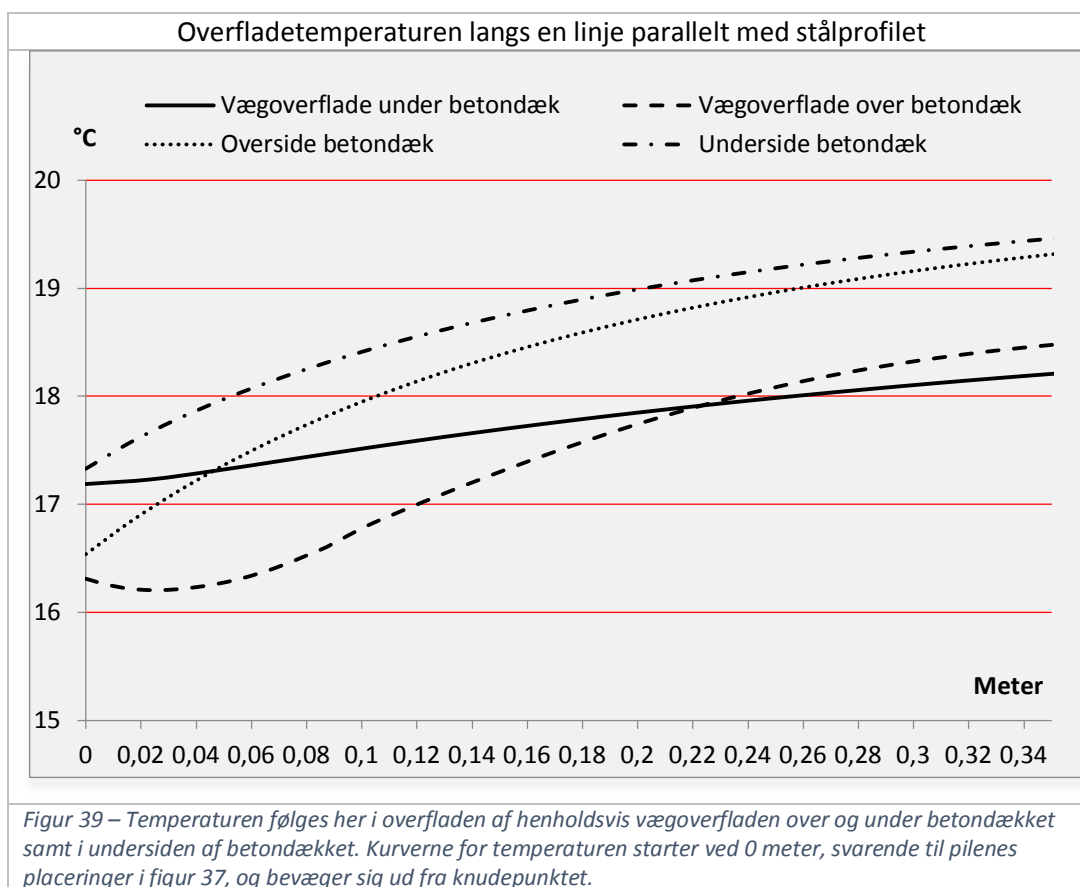
Figur 38 – Visualisering og grafisk angivelse af overfladetemperaturen gennem stålprofilet og betondækket fra HEAT 3. Isolering i facaden er ikke vist i visualiseringen.

5.3.2 Original detalje

Resultaterne i de to afsnit herunder, er alle fra den samme model i HEAT3 (Blomberg, 2019) beregnet ved de randbetingelserne for februar måned beskrevet i tabel 6. Resultaterne i det tredje afsnit, hvor varmetabet beregnes med stålprofilerne, helt uden stålprofiler og med stålprofilerne hvor kuldebroen brydes ved anvendelse af Isokorb (Schöck Ltd., 2019), er beregnet ud fra den samme model hvor ændringerne er foretaget successivt.

Overfladetemperatur og støvfigurer

Resultaterne i dette afsnit er alle overfladetemperaturer, på den synlige overflade af henholdsvis ydervæggen og betondækket. Temperaturen vises for 4 udvalgte placeringer, henholdsvis i vægoverfladen over og under betondækket samt i oversiden og undersiden af betondækket. Resultaterne anvendes til at vurdere risikoen for støvfigurer afledt af forskellen i overfladetemperaturen på overfladen af bygningsdelene.



Vægoverfladen under betondækket – fuldt optrukket linje figur 39.

Overfladetemperaturen på den indvendige side af ydervæggen, følges her fra hjørnet mellem betondækket og bagmuren, parallelt med stålprofilet. Det ses at temperaturen starter lige over 17 °C, ved knudepunktet, markeret med den nederste pil i figur 37, hvorefter temperaturen stiger til lidt over 18 °C.

Vægoverfladen over betondækket – stipleet linje, figur 39.

Overfladetemperaturen på den indvendige side af ydervæggen, følges her fra hjørnet mellem betondækket og bagmuren, parallelt med stålprofilet. Det ses at temperaturen starter lidt over 16,5 °C og stiger til næsten 18,5 °C.

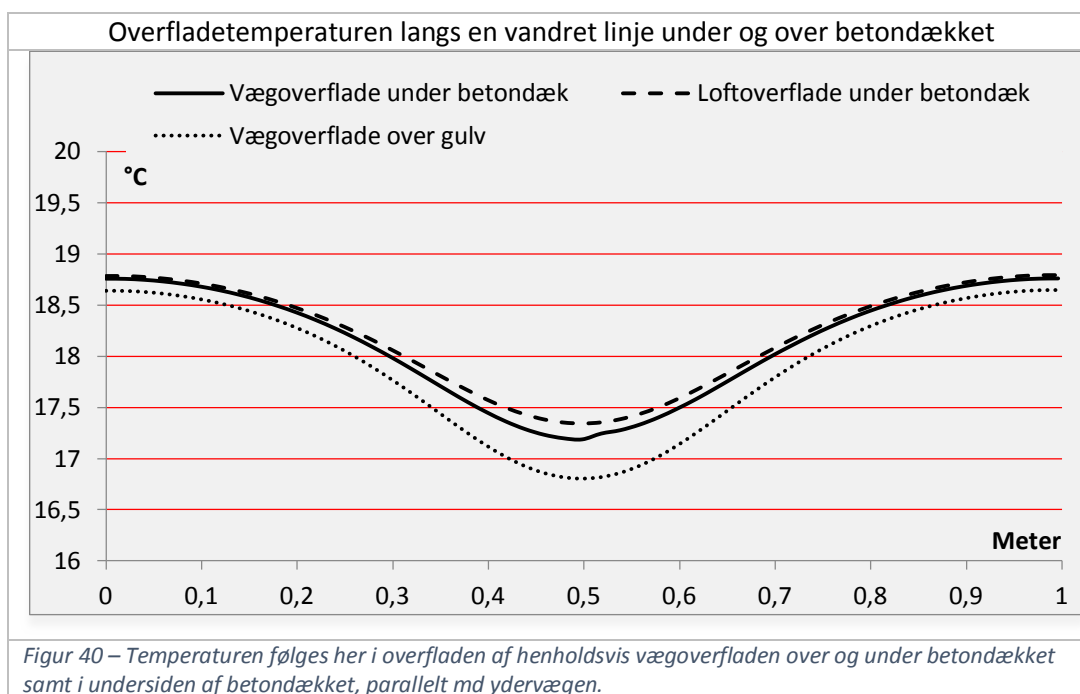
Gulvopbygningen der består af trægulv på strøer med 80 mm hulrum, fylder 102 mm i alt. Det ses af grafen at temperaturen for den synlige del af ydervæggen, altså den del af væggen der er over gulvniveauet, starter ved 16,8 °C. Temperaturforskellen er derfor mindre end 2 °C.

Loftoverfladen under betondækket – streg og prik linje, figur 39.

Overfladetemperaturen på loftoverfladen, følges her fra hjørnet mellem undersiden af betondækket og bagmuren, parallelt med stålprofilet. Det ses at temperaturen starter lige over 17 °C og stiger til lidt over 19,5 °C efter 350 mm, hvorefter temperaturen er stabil.

Overfladerne under gulvet - stipleet og prikket linje, figur 39.

Resultatet her bruges ikke til at vurdere risikoen for støvfigurer, idet dette område er under gulvet og derved ikke synligt. Resultatet anvendes som kontrol for at der ikke er vækstbetingelser for skimmelsvamp. Den laveste temperatur er dog ved vægoverfladen over betondækket, omkring 0,2 meter over dækoversiden. Temperaturen lige over 16 °C resulterer i at den relative luftfugtighed ligger ved 59 % for fugtbelastningsklasse 2 og 74 % ved fugtbelastningsklasse 3.



Vægoverfladen under betondækket – fuldt optrukket linje, figur 40.

Overfladetemperaturen på den indvendige side af ydervæggen, følges her langs hjørnet mellem undersiden af betondækket og bagmuren. Det ses at temperaturen starter lidt over 17 °C, lige ud fra stålprofilet og stiger til lige over 18,5 °C efter 400 mm, hvorefter temperaturen er stabil. Det ses at temperaturen er lavere i et bredere areal end temperaturen langs med stålprofilet, fra figur 39.

Loftoverfladen under betondækket – stiple linje, figur 40.

Overfladetemperaturen på loftoverfladen, følges her langs hjørnet mellem undersiden af betondækket og bagmuren. Det ses at temperaturen starter lidt under 17,5 °C og stiger til lige over 18,5 °C efter 400 mm, hvorefter temperaturen er stabil.

Vægoverfladen over gulvet – prikket linje, figur 40.

Overfladetemperaturen på den indvendige side af ydervæggen, følges her langs hjørnet mellem gulvet og bagmuren. Det ses at temperaturen starter lidt under 17 °C og stiger til 18,5 °C efter 400 mm, hvorefter temperaturen er stabil.

Fælles for alle ovenstående resultater vedrørende temperaturvariationerne, foretages vurderingen af risikoen for støvfigurer under diskussionen.

Varmetab

Det undersøges også i denne case hvilken grad kuldebroen, har af indflydelse på opvarmningen af bygningen og deraf det økonomiske driftsregnskab.

Varmetab i Watt gennem ydemuren med stålprofilet: 0,479 W

Varmetab i Watt gennem ydemuren uden stålprofilet: 0,103 W

Varmetabet for stålprofil alene andrager 0,376 W/K.

Det betyder at for et år vil varmetabet være 26.220 Wh

Prisen pr. gennemlydende stålprofil vil derfor andrage omkring 14,2 kroner om året.

Det skal bruges 2 stålprofiler pr boligenhed, hvis man antog at stålprofilerne skal bære altaner. Derfor vil besparelsen være 28,4 kroner om året.

U-værdier

Den danske standard for beregning af bygningers varmetab (DS 418), foreskriver at ved bestemmelsen af den samlede transmissionskoefficient, for en bygningsdel skal der medregnes kuldebroer

Hvilken betydning har de 2 stålbeslag for ydervæggens samlede U-værdi.

Der er forudsættes 1 altan pr. boligenhed, for eksemplets skyld, beregnes den samlede U-værdi for facaden pr. boligenhed.

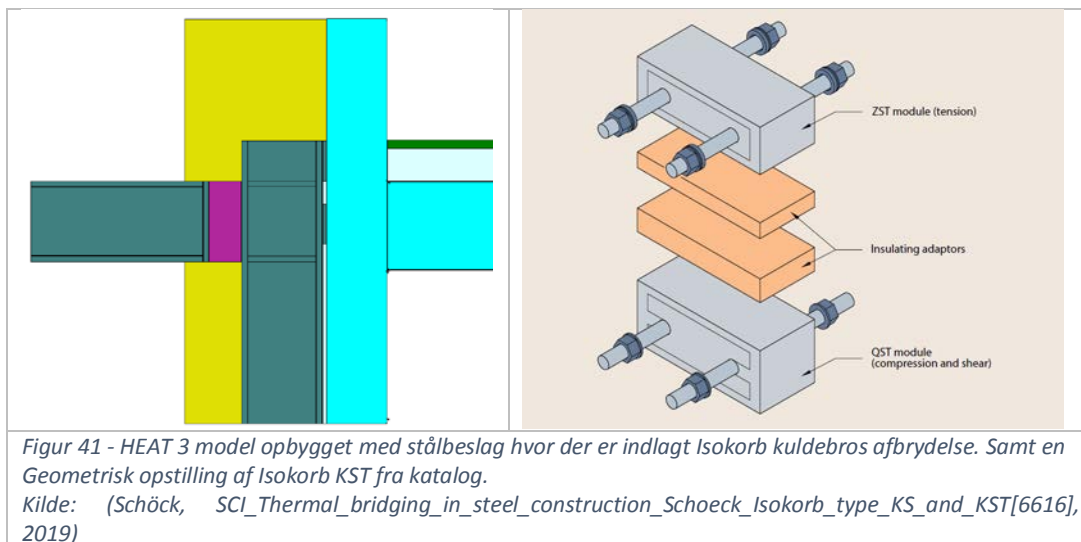
Der medregnes derfor 2 facadearealer af 6 meters bredde og 3,5 meters højde. Det forudsættes at facaden består af 30 % glas.

Facadens U-værdi beregnes til 0,1 W/m²K. (Dansk Standard, 2011, s. 26)

Den korrigerede U-Værdi beregnes til 0,13 W/m²K, svarende til en forøgelse på 26 %.

Kuldebrosafbryder

Når kuldebrosafbrydelsen fra Isokorb skal indarbejdes i nærværende scenarie, vil forudsætninger være som vist af figurerne herunder.



Muligheden for at reducerer varmetabet gennem kuldebroen ved anvendelse af isokorb modulet, er gode i dette scenarie. Dette skyldes at stålprofilet der gennembryster isoleringslaget er kraftigt og i en stor geometri, hvorved den samlede varmeledningsevne af modulerne fra Isokorb vil være lave, fordi der er plads til flere afstandsmoduler der primært består af isolering mellem de kraftoverførende moduler, henholdsvis ZST og QST som vist i figuren herover.

Derved opnås følgende varmetab, når kuldebrosafbrydelsen fra Isokorb indarbejdes i nærværende scenarie.

Varmetab i Watt gennem ydemuren med stålprofilet og Isokorb: 0,0,266 W
Varmetab i Watt gennem ydemuren uden stålprofilet: 0,103 W

Varmetabet gennem kuldebroen reduceres til 0,163 W/K, hvilket vil betyde en besparelse på 12,3 kroner pr. par om året.
Ligeledes reduceres kuldebroens bidrag til facadens samlede U-værdi til 11,1 %.

5.3.3 Deldiskussion

For at vurdere temperaturvariationen henover overfladerne for henholdsvis væggen og loftet, skal udgangspunktet bestemmes. Det er beregnet at overfladetemperaturen generelt for ydervæggen er 19,5 °C, hvorimod den generelle overfladetemperatur for loftet er 19,8 °C. Udgangspunktet for temperatursammenligningen vælges til at være lig den for loftet, idet lufttemperaturerne i området omkring kuldebroen, vil være tæt på rumlufttemperaturen ved 20 °C.

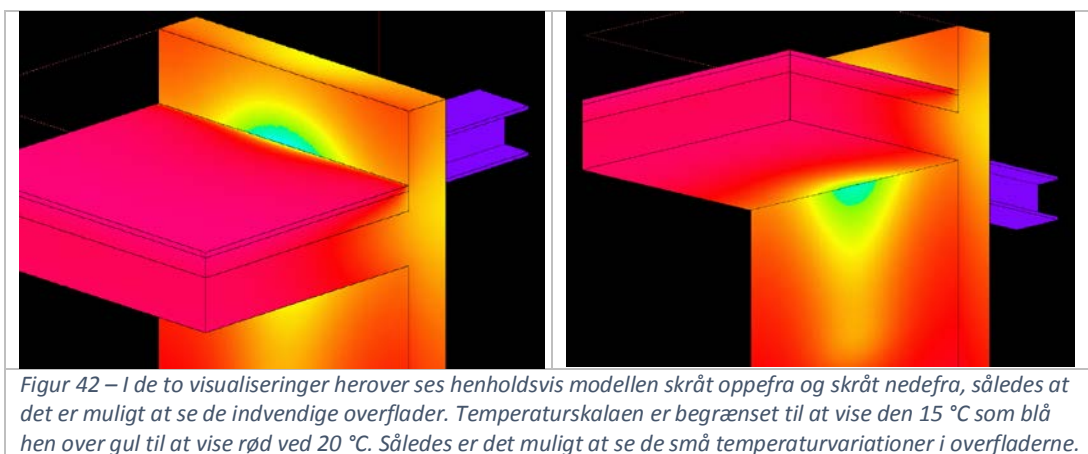
For ydervæggen udregnes arealet således ved at den generelle overflade temperatur sættes til 19,8 °C, temperatur variationen skal være min. 2 °C. Arealet hvor overfladetemperaturen er mindre end 17,9 °C, vurderes derfor til at indenfor risikoområdet hvor der kan opstå støvfigurer, jævnfør metodeafsnittet.

Arealet hvor temperaturforskellen på den synlige del af vægoverfladen under betondækket er min. 2 °C, er omkring 320 x 210 mm, i en halv ellipseform på ydervæggen, som vist i figur 42.

Arealet hvor temperaturforskellen på den synlige del af vægoverfladen over gulvet er min. 2 °C, er omkring 430 x 110 mm, i en halv ellipseform på ydervæggen, som vist i figur 42.

For loftet udregnes arealet ved at den generelle overflade temperatur på loftet kendes til 19,8 °C. Arealet hvor overfladetemperaturen er mindre end 17,9 °C, vurderes derfor til at indenfor risikoområdet hvor der kan opstå støvfigurer.

Arealet hvor temperaturforskellen på den synlige del af loftoverfladen under betondækket er min. 2 °C, er omkring 320 x 30 mm, i en halv ellipseform på ydervæggen, som vis på figur 42.



De termiske problemer kan fjernes ved at anvende kuldebrosafbrydelsen fra Isokorb. Temperaturen hæves 1,7 °C, derved bliver den laveste temperatur 18,1 °C og der vil dermed være mindre end 2 graders temperaturvariation på overfladerne af henholdsvis væggen og loftet.

6. Diskussion

I de indledende afsnit under afsnit 3.2, medtages problemområderne svampevækst, oxidering, sortsværtning, kuldenedfald og strålingsasymmetri. Problemområderne behandles yderligere under afsnit 4, hvor grænseværdierne for de forskellige problemområder fastlægges. Her blev det hurtigt klart, at der ikke vil være risiko for oxidering, grundet den almindelige galvanisering af konstruktionsstål. Ligeledes blev det klart at risikoen for strålingsasymmetri og kuldenedfald vil være meget begrænset, grundet de meget lave overfladetemperaturer og store arealer det kræver, før end der opstår gener.

Det er nævnt flere gange at metoden for vurdering af risiko for skimmelvækst, ikke er en eksakt vurdering, fordi der ikke arbejdes med sammenhængende time- eller døgn værdier. Randbetingelserne består af månedsmiddelværdier hvorved der selvsagt vil være en del udsving i temperaturen og den relative luftfugtighed, inden for den pågældende måned. Ligeledes er grænseværdierne for skimmelvækst, tilnærmede værdier bestemt ved forsøg. Samlet set siger vurderingen altså noget om, at der kan være en risiko for skimmelvækst, ikke at der vil opstå skimmelvækst.

Gennem case 1 blev det tydeligt at stålbandet under gulvet var den største årsag til problemer, og at det største problem i første omgang er risiko for skimmelvækst, og efterfølgende i de værste tilfælde, risiko for kondens og deraf vækst af andre svampe, der potentielt kan være trænedbrydende eller toksiske.

Som forventet har facadens tykkelse og placering en meget afgørende betydning for størrelsen af kuldebroseffekten. Ved at ændre på gulvkonstruktionen, påvirkes temperaturen ikke særligt meget, men det faktum at en åben gulvkonstruktion, tillader rumluft at komme i kontakt, med den kold overflade er afgørende. I alle variationerne i case 1, er der ikke risiko for sortsværtning, hverken på indervæggen eller loftet. Det skyldes at stålbeslagets primære kontaktflade, er ved oversiden af betondækket.

I case 2 er stålprofilen hovedsageligt placeret inde i klimaskærmen med en lille kontakt til dækforkanten. I denne case er der potentielt risiko for skimmelvækst og gener i form af risiko for sortsværtning.

For case 3 er scenariet anderledes ved at hele stålprofilen, er placeret på ydersiden af en tung bagmur, stålprofilen har en forholdsvis stor kontakt til bagmuren. I denne case opstår der kun risiko for støvfigurer, dog i et forholdsvis stort areal, som kan være visuelt generende for bygningens brugere.

Fælles for alle 3 cases, vil det være muligt at fjerne de forskellige risici, ved at anvende det kuldebrosbrydende modul Isokorb (Schöck Ltd., 2019). Det er ligeledes ikke direkte rentabelt at investere i denne løsning, for alle 3 cases set ud fra et økonomisk perspektiv.

Der kan være situationer hvor en forøgelse af isoleringstykkelsen eller en reduktion af isoleringens varmeledningsevne, for en hel bygning vil være nødvendigt for at nå et energiramme mål. I de tilfælde kan det være økonomisk fordelagtigt at investere i Isokorb moduler, for at opnå en ønsket energiramme.

I nogle tilfælde hvor der skal opsættes mange altaner som i case 2 og 3, vil det kunne betale sig at bruge nogle projekteringstimer på at optimerer stålkonstruktionen, således at der ikke vil være risiko for skimmel eller sortsværtning, frem for at købe Isokorb moduler. I en tilsvarende sag som case 1, hvor der kun skal bruges få stålbeslag, kan det nok ikke betale sig at bruge ret mange timer på at optimerer kundebroen, frem for at investerer i nogle Isokorb moduler, for at undgå risiko for skimmelsvamp eller opnå en ønsket energiramme.

7. Konklusion

Det kan konkluderes at i grænsefladen mellem arkitekten og ingeniøren, hvor de omtalte stålprofiler og stålbeslag befinder sig, er de afledte problemer grundet kuldebroseffekten meget påvirket af de omkringliggende bygningsdele.

Som forventet er det muligt at designe fugt sikre løsninger, ved at bruge uorganiske og lukkede konstruktioner som betonbagemure og støbte undergulve. Selv ved disse løsninger kan der være risiko for gener som sortsværtning, eller forholdsvis store energitab. Sortsværtning er selvfølgelig et mindre problem, i kraft af at det i de fleste tilfælde kun er visuelt, men i nogle tilfælde kan det have hygiejnisk betydning, som ved hospitaler og køkkener.

Det er ikke altid muligt at anvende materialer som beton, og når der anvendes de mere åbne og lette konstruktioner i organiske materialer, som træelementkassetter, bliver valget at konstruktionerne og geometrien meget vigtige. Særligt ved detaljen omkring kundebroen og det damptætte lag skal designes og udføres korrekt. Derfor er det også ligeså vigtigt at alle designbeslutninger eller designændringer der foretages i en projekteringsperiode, følges til ende ved analyser af overfladetemperatur og fugtforhold, så det sikres at der ikke opstår problemer. Ligesom det er vigtigt at den korrekte fugtbelastningsklasse bestemmes og anvendes som randbetingelse, idet der er stor forskel på, om en given løsning er risikobehæftet eller ej ved henholdsvis fugtbelastningsklasse 2 eller 3.

Det er nærmest umuligt at designe bygninger beregnet til mennesker uden kundebroer, og i takt med de øgede isoleringskrav, stiger kundebroernes bidrag til det samlede varmetab. Det ses under alle 3 cases at kundebroens bidrag til facadens samlede U-værdi er forholdsvis stor. Kundebroernes økonomiske konsekvenser beregnet i denne rapport er meget små, det er derfor naturligt at den økonomiske gevinst, ved at optimerer på kundebroerne er tilsvarende små.

Fælles for alle løsninger er det muligt at undgå risiko for problemer med både sortsværtning og skimmelsvamp eller forhøjede energitab, ved at designe stålbeslagene med et kuldebrosbrydende modul fra Isokorb, frem for at ændre på isolansen eller bruge mange timer på konstruktionsoptimeringer. Selvom investeringen ikke kan betale sig direkte gennem en varmebesparelse, vil investeringen let være tjent tilbage, ved at undgå risikobehæftede konstruktioner, hvor det efterfølgende bliver nødvendigt med udbedringer.

8. Litteraturliste

- Blomberg, T. (Januar 2019). HEAT3 Version 9.0. Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics.
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., Hansen, M. Ø., & Ebbenhøj, N. (05 12 31). *Skimmel i bygninger*. BYG-ERFA.
- Brandt, Erik, et al. (2013). *SBi 224 Fugt i bygninger*. Statens byggeforskningsinstitut.
- Chritensen, G., & Koch, A. P. (12 12 29). *Sortsværtning og støvfigurer*. BYG-ERFA.
- Dansk standard. (1995). *DS 474 Norm for specifikation af termisk indeklima*. Dansk Standard.
- Dansk Standard. (2011). *DS 418 Beregninger af bygningers varmetab*.
- Dansk Standard. (2013). *DE/EN ISO 13788 Byggekomponenters og -elementers hygrotermiske ydeevne - Indvendig overfladetemperatur for at undgå kritisk overfladefugtighed og kondensdannelse i hulrum - Beregningsmetoder*.
- Dansk Standard. (2017). *DE/EN ISO 10211 Kuldebroer i bygningskonstruktioner - Varmestrømme og overfladetemperaturer - Detaljerede beregninger*. Dansk Standard.
- HOFOR. (2019). *Prisen på fjernvarme 2018 for privatkunder*. Hentet fra HOFOR: <https://www.hofor.dk/privat/priser-paa-forsyninger-privatkunder/prisen-paa-fjernvarme-2018-privatkunder/>
- Jensen, T. (99 11 30). *Korrosionsbeskyttelse af bygningsbeslag*. BYG-ERFA.
- Koch, A. P., Larsen, H. J., Lund-Johansen, B., & Munck, O. (03 07 24). *Svampevækst i trækonstruktioner*.
- Mouritsen, O. G. (2019). *Den Store Danske, Gyldendal*. Hentet fra Brownske bevægelser i Den Store Danske, Gyldendal.: <http://denstoredanske.dk/index.php?sideId=51412>
- Møller, Eva B. (Red.). (December 2010). *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet*. Statens Byggeforskningsinstitut, SBi, Aalborg Universitet.
- Petersen, T. (04. 03 2019). www.haucon.dk. (T. Jahr, Interviewer)
- Rubow Arkitekter. (2017). I1639_K01_H5_A_EX_N524. *Detaljetegning*.
- Schöck Ltd. (2019). *Schöck*. Hentet fra Schöck: www.schoeck.co.uk
- Schöck, *SCI_Thermal_bridging_in_steel_construction_Schoeck_Isokorb_type_KS_and_KST[6616]*. (2019). *SCI_Thermal_bridging_in_steel_construction_Schoeck_Isokorb_type_KS_and_KST[6616]*. Hentet fra Schöck: www.schoeck.co.uk
- Schöck, *TA-Isokorb-KST-Varmeledningsevne-DK*. (2019). *TA-Isokorb-KST-Varmeledningsevne-DK*. Hentet fra Haucon: www.haucon.dk
- Schöck, *Technical_Information_Schoeck_Isokorb_type_KST[2703]*. (2019). *Technical_Information_Schoeck_Isokorb_type_KST[2703]*. Hentet fra Shöck: www.schoeck.co.uk
- Sedelbauer, K. (2001). *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Teknologisk Institut. (2019). *Teknologisk Institut*. Hentet fra Graddage - Pressemeddelelse: <https://www.teknologisk.dk/graddage/pressemeddelelse/492>
- Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2018). *Bygningsreglement*.
- Valbjørn, O., Laustsen, S., Høwisch, J., Nielsen, O., & Nielsen, P. A. (2000). *Indeklimahåndbogen*. SBi.

- Wagner, M. H., Maagard, S. E., Worm, S. S., Kjeldsen, P., Thamdrup, J., Weitzmann, P., . . . Kamper, M. G. (2018). *Kuldebroer og deres indflydelse på klimaskærmens varmetab*.
- Wissenberg. (2017). I1639_K09_H4_XA_EX_N24-1_Trappe+Terrasse. *Detaljetegning*. Wissenberg.
- www.Systime.dk. (u.d.). Hentet fra 5.5 Korrosion:
<https://isisc.systime.dk/index.php?id=1389>
- Aagaard, N.-J., Emcon, K. H., & Møller, E. B. (2011). *Krav til fugtteknisk dokumentation samt fugtsagkyndiges kompetancer og virke*. SBI Afdeling for byggeri og sundhed.