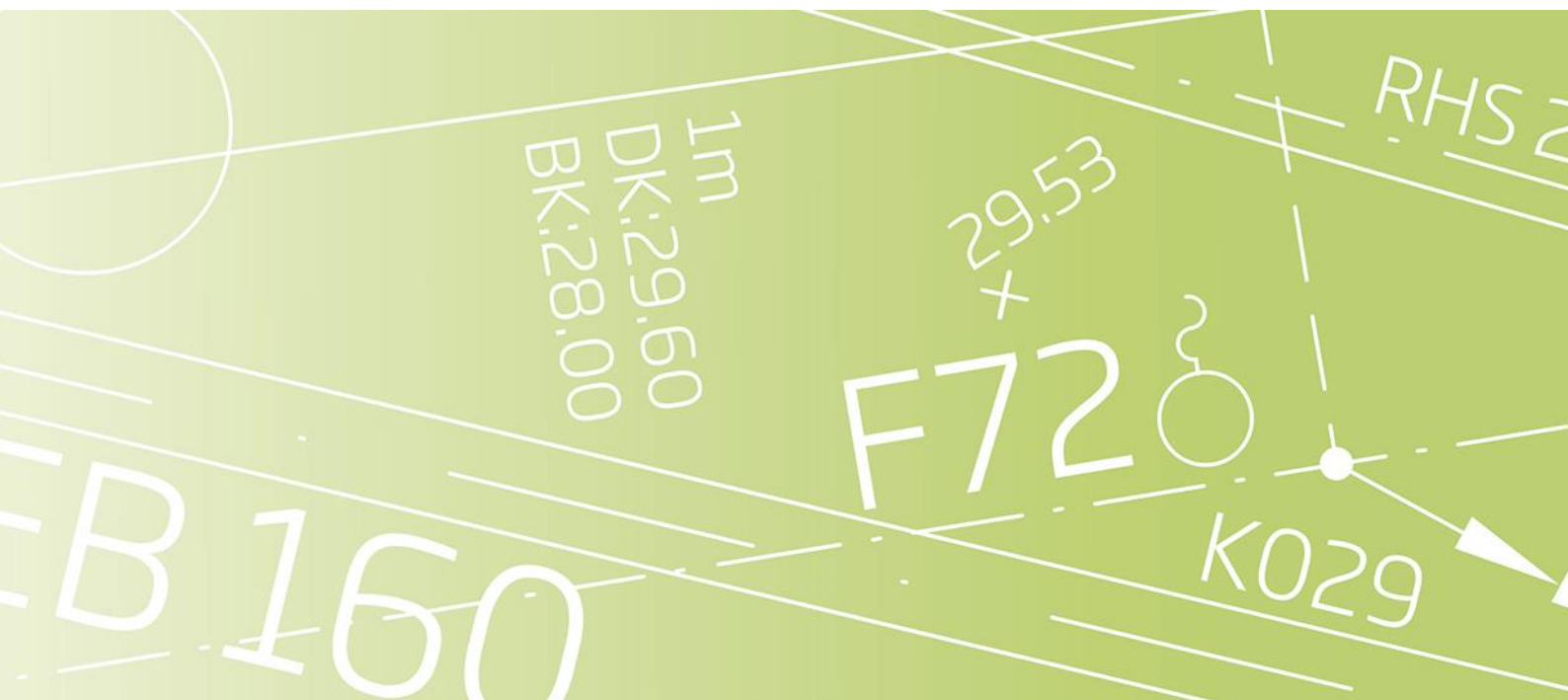


# Optimering af bygningers energibehov, indeklima og robusthed ved brug af generiske rumtype og Machine Learning

Projektdeltagere: MOE, Aalborg University

Projektperiode: 1. marts 2020 – 28 februar 2022



Dette projekt er medfinansieret af ELFORSK programmet  
Projektnummer: 352-046

Udarbejdet af: Torben Østergård  
Martin Veit  
Nanna Dyrup Svane  
Rasmus Lund Jensen

Kontrolleret af:

Godkendt af: Steffen E. Maagaard

Dato: 18.08.2022

Version: 1. udgave

Finansieret af: ELFORSK, MOE og AAU

Projekt nr.: Elforsk 352-046

<b>1</b>	<b>Indholdsfortegnelse</b>	
<b>1</b>	<b>Indholdsfortegnelse</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Projektets formål</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Resumé</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Summary</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Baggrund: Problemstilling og idé</b> .....	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Litteraturstudium</b> .....	<b>12</b>
6.1	Generisk rum.....	12
6.2	Bygningssimuleringer og machine learning .....	12
6.3	Robusthed og usikkerheder .....	13
6.4	Udvalgte softwareapplikationer / Software økosystem .....	13
6.5	Potentielle udfordringer .....	14
6.6	Bibliografi .....	15
<b>7</b>	<b>Definition af generiske rumtyper</b> .....	<b>16</b>
7.1	Koncept .....	16
7.2	Udvælgelse af vigtigste rum.....	18
7.3	Identifikation af designparametre og simplificering af disse.....	19
7.3.1	Beskrivelse af generisk kontorrum med vinduer i én facade .....	20
7.3.2	Eksempler på faste inputs for kontorrum.....	22
7.3.3	Eksempler på designparametre for kontorrum .....	22
7.4	Udvælgelse af outputs / performance-kriterier.....	22
7.5	Case Alfa Laval .....	23
<b>8</b>	<b>Udvikling af metamodeller fra bygningssimuleringer</b> .....	<b>24</b>
8.1	Introduktion .....	24
8.2	Resultater .....	24
8.2.1	Håndtering af usikkerhed.....	25
<b>9</b>	<b>Optimering af energibehov i samspil med indeklima</b> .....	<b>27</b>
<b>10</b>	<b>Test på virkelige cases</b> .....	<b>28</b>
10.1	Energirigtig afhjælpning af indeklimate problemer på AAU, Rengsborgsgade .....	28
10.2	Kontorbyggeri – Lerchesgade, Odense .....	28
<b>11</b>	<b>Håndtering af robusthed</b> .....	<b>34</b>
11.1	Afgrænsning .....	34
11.2	Konkret håndtering.....	34

<b>12</b>	<b>Konklusion</b> .....	<b>37</b>
12.1	Fremtidigt arbejde .....	37
<b>13</b>	<b>Perspektivering</b> .....	<b>39</b>
<b>Bilag A – Formidlingsaktivitet</b> .....		<b>40</b>
<b>Bilag B – Definition af inputs for generiske rum</b> .....		<b>41</b>
B.1	Variable inputs .....	41
B.1.1	Geometry – Orientation .....	41
B.1.2	Geometry – Room height .....	41
B.1.3	Geometry – Room Depth .....	42
B.1.4	Shades – Horizon .....	42
B.1.5	Shades – Overhang .....	43
B.1.6	Shades – Types of side fins .....	44
B.1.7	Shades – Horizontal angle .....	45
B.1.8	Shades – Vertical angle .....	46
B.1.9	Windows – Window-wall-ratio/percentage .....	46
B.1.10	Windows – Frame Factor .....	47
B.1.11	Windows – Recess .....	47
B.1.12	Brugstider .....	47
B.1.13	Facadetykkelse .....	48
B.1.14	Windows – Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) .....	48
B.1.15	Windows – Shading Coefficient .....	50
B.1.16	Windows – Shading Activate .....	51
B.1.17	Loads – People .....	52
B.1.18	Loads – Equipment .....	52
B.1.19	Loads – Equipment Standby .....	53
B.1.20	Loads – Lighting .....	53
B.1.21	Loads – Infiltration .....	53
B.1.22	Ventilation – Cooling type .....	53
B.1.23	Ventilation – Max. Air Change .....	54
B.1.24	Ventilation – VAV Factor .....	54
B.1.25	Ventilation – Night Cooling Factor .....	54
B.1.26	Ventilation – Specific Fan Power .....	54
B.1.27	Ventilation – Heat Recovery Efficiency .....	55
B.1.28	Ventilation – Moist Recovery Efficiency .....	55
B.1.29	Set points – Cooling .....	55
B.1.30	Set points – Inlet Air, Summer .....	55
B.1.31	Set points – Inlet Air, Winter .....	55
B.1.32	Set points – Heating, Summer .....	55
B.1.33	Set points – CO <sub>2</sub> -level .....	55
B.2	Fastsatte inputs .....	55
B.2.1	Brugstider .....	56

**MOE A/S**

B.2.2 Facadetykkelse .....	56
<b>Bilag C – Udvikling af prototype .....</b>	<b>57</b>

## 2 Projektets formål

Dette projekt er medfinansieret af ELFORSK programmet med projektnummer 352-046.

Formålet er at udvikle metamodeller for generiske rumtyper til at vurdere energibehov og indeklima for et utal af designmuligheder og dermed gøre datadrevet viden let tilgængeligt for beslutningstagere under deres søgen efter et robust bygningsdesign med godt indeklima og lavt energibehov. Adgang til "altomfavnende" metamodeller imødekommer udfordringen ved de store usikkerheder samt det tidskrævende modellerings- og simuleringsarbejde, hvilke er de primære årsager til at man i dag er nødsaget til at basere de overordnede, vigtige tidlige designvalg på mavefornemmelse og erfaring – eller simuleringer af få stikprøver af designmulighederne. Ved brug af metamodeller vil designteamet hurtigt kunne vurdere mange flere designmuligheder samt håndtere de store variationer og usikkerheder i tidligt design. Derved kan teamet afdække utallige muligheder og nemmere prioritere passive tiltag i form af optimerede vinduesstørrelser, skygger, solafskærmning, termisk masse, natkøling, osv., hvilket reducerer energibehovet til ventilation, køling, opvarmning og belysning.

### 3 Resumé

I dette projekt, medfinansieret af ELFORSK, er der undersøgt anvendelsen af generiske rum i stedet for rum med komplekse geometrier, hvorved der kan trænes metamodeller på de simple generiske modeller. Undersøgelsen af de generiske rum viste at de i høj grad kan erstatte de komplekse geometrier, med minimalt fald i præcision.

Da de generiske rum har vist høj sammenlignelighed med de komplekse geometrier, er der yderligere undersøgt anvendeligheden af machine learning til at træne metamodeller, som kan anvendes fremfor faktiske simuleringer, så man tidligt i designfasen, og igennem projektføreløbet, kan tage informerede beslutninger der har en påvirkning på energibehovet og indeklimaet. Disse metamodeller har vist stor anvendelighed, da de med tilstrækkelig stor præcision kan beregne resultater for energibehov og indeklima.

Ved afprøvning er det vist at man ved brug af værktøjet kan opfylde kravene til indeklima, samtidig med at man kan opnå et energiforbrug på ned til det halve af energiramens krav.

Værktøjet er afprøvet i udvalgte cases, hvor anvendeligheden og værdien af det har været fremhævet. Afslutningsvis er håndtering af robusthed undersøgt suppleret af følsomhedsanalyse.

## 4 Summary

In this project, co-financed by ELFORSK, the use of generic rooms has been investigated as a replacement for rooms with complex geometries, such that meta-models can be trained based on the generic models. The investigation of the generic rooms showed that they can replace models with complex geometries, with a minimal reduction in precision.

As the generic rooms showed a high similarity with the complex geometries, there has further been investigated the usage of machine learning to train meta-models, which can be used instead of actual simulations. This makes it possible to make informed decisions, that have an impact on the energy use and indoor environment, early in the design phase and throughout the project. These metamodels have shown great potential, as they can, with high precision, calculate results for the indoor environment and energy use.

When testing the tool, it has been shown that the requirements for the indoor environment can be fulfilled, and at the same time achieve operational energy use that is half the requirement from the Building Code.

The tool has been tested on specific cases, where the applicability and the value have been highlighted. Lastly, the handling of robustness has been investigated, supplemented with sensitivity analysis.



## 5 Baggrund: Problemstilling og idé

I tidligt bygningsdesign fastlægges en lang række vigtige designparametre relateret til bygningens form, facadeopbygning og systemer, som har afgørende betydning for den endelige bygnings energibehov, performance og pris. Programmer til simulering af energibehov, termisk komfort og dagslys kræver hundredvis af detaljerede inputs og evaluerer kun ét design ad gangen, hvilket passer dårligt til informationsniveauet og usikkerhederne i tidligt design. Derfor baseres beslutninger typisk på erfaring og tommelfingerregler, som hurtigt forældes grundet de hurtigt foranderlige og stigende krav til energiforbrug, indeklima og bæredygtighed.

Disse krav opstår blandt andet fra Bygningsreglementet, certificeringsordninger og andre aktører, som stiller krav til bygningen, som både kan være sat lovmæssigt og af bygherre. For at eftervise disse krav, anvendes forskellige programmer. Dette er eksempelvis Be18, som bruges til at eftervise krav til driftsenergi på bygningsniveau og BSim til at eftervise krav med fokus på termisk og atmosfærisk indeklima på rumniveau. Derudover kan kravet til dagslys eftervises med 10%-reglen eller den mere beregningstunge 300 lux regel. Afslutningsvis, så er der snarligt krav til at der udføres en Livscyklus vurdering ift. indlejret energi.

Særligt i forhold til energi er der en problemstilling i at energirammen ofte først vurderes sent i projektet. En typisk designproces kan bestå af følgende trin:

1. Eftervis at de termiske krav kan overholdes for kritiske rum.
2. Eftervis at daglyskrav kan overholdes på plantegning, med enten 300 lux metoden, eller 10%-reglen.
3. Energiramme itereres i mål, hvilket typisk gøres ved at skrue på isoleringstykkelse, tæthed, g-værdier mm. Hvis man stadigvæk ikke kan opnå kravet til energirammen, kan der "købes" tilstrækkeligt aflad med vedvarende energi.

En anden typisk designproces, er hvor daglyskravet først eftervises, hvorefter man efterviser de termiske krav. Ingen af de to designprocesser sætter fokus på energi i facaden eller indretningsdesignet. I stedet eftervises energikravet blot med en energirammeberegning, som er en idealiseret 1-zone model.

Disse designprocesser medfører problemstillinger ift. usikkerhed og robusthed. Usikkerhed er i denne kontekst den usikkerhed der er på de designparametre som bruges som inputs til bygningsmodellen. Særligt i de tidlige faser er der stor designfrihed, og der sker mange ændringer i arkitektens model, og mange forskellige tekniske løsninger overvejes.

Når der i projektet skal eftervises at kravene er opfyldt, blandt andet i forhold til indeklimaet, foretages en bygningssimulering. En bygningssimulering er deterministisk, dvs. der kræves fastdefinerede inputs, og ens resultater bliver ligeledes entydige uden usikkerhed.

I gængs praksis foretager ingeniøren typisk en simulering og vurderer resultaterne for energi og indeklima, og såfremt disse ikke opfylder kravene, foretages der ændringer i en eller flere inputs, hvorefter en ny simulering køres. Dette er en manuel og tidskrævende proces, da den gentages indtil der findes en eller flere potentielle løsninger. Tidligere forskning har konkluderet at dette i bedste fald medfører få suboptimale løsninger, og der er desuden større risiko for at lave fejl.

I stedet blev der påvist potentiale for at afdække langt flere designusikkerheder, få mere varierede

løsninger, forudse udfordringer, og identificere betydningsfulde inputs vha. en Monte Carlo baseret tilgang.

I forlængelse heraf kan man udvide konceptet ved ikke blot at se på variationen i designparametre ift. vinduesprocenter, skyggeudformning, glastyper, setup af systemer, men også inkludere usikkerheder på ellers fastlagte forudsætninger såsom personantal, eksterne skygger og vejrforhold ved også at variere på disse. Herved undersøges det om designet er robust overfor ændringer i vejr, bygningens brug eller brugen af systemer.

Disse overvejelser medførte en idé vedrørende brug af generiske rum suppleret med machine learning. Idéen opstod i forbindelse med udførelsen af et tidligere erhvervsPhD-projekt mellem MOE og Aalborg Universitet. Under PhD-projektet udvikledes ligeledes et online værktøj benævnt SommerkomfortTool, som skulle adressere lignende problemstilling.

Ved indførelsen af et nyt krav i Bygningsreglementet, om evaluering af termisk komfort på rumniveau for kritisk rum, opstod behovet for en hurtig og simpel metode til at evaluere kritiske rum. Da der kan være mange potentielt kritiske rum i en bygning, og det først kendes efter beregning og kan skifte ved nye designvalg, kan det være vanskeligt at afdække kravet, særligt ved brug af komplekse simuleringsværktøjer.

Udfordringen var således at evaluere betydning af facadedesign på rumniveau. SommerkomfortTool anvender beregningskernen fra programmet Be18, som er langt hurtigere og simpel at anvende. I det der kun er 15 designparametre og kun fokus på overtemperaturer. Ved hjælp af følsomhedsanalyse, hvor metoden Morris blev anvendt, kunne de 15 designparametre reduceres til 10. Dette begrænsede antal designparametre, sammenlignet med eksempelvis BSim, medførte at der kunne udføres 12 millioner beregninger for at afdække det 10-dimensionelle "designrum" til en sådan grad at næsten alle scenarier kunne forudsiges.

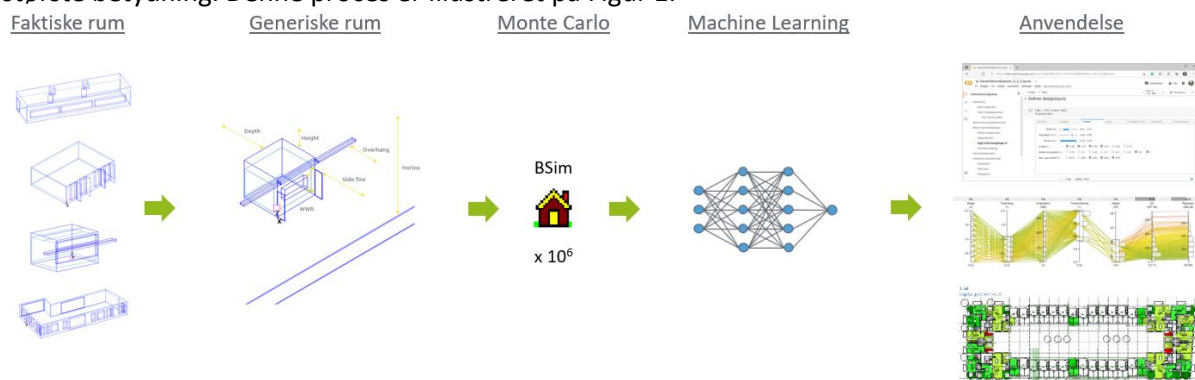
Værktøjet blev vel modtaget og er særligt nyttigt i tidlige designfaser, til at træffe "rigtige" og robuste designvalg, samt til at undgå uhensigtsmæssige designvalg. Idéen for nærværende projekt udsprang fra dette. Som nævnt tidligere, opbygges der i dag detaljerede simuleringsmodeller på rumniveau for at evaluere det termiske indeklima, fugtforhold, dagslys og energibehov. Den geometriske detaljeringsgrad af disse er høj, men med undtagelse af dagslys, har den høje detaljeringsgrad af skygger, vinduesplacering og rumgeometri begrænset betydning. I stedet er det primært den samlede søllast og de interne laster, der har betydning for hvor belastet rummet er, og den geometriske betydning har ingen betydning for indstillingerne af HVAC-systemerne.

Hypotesen er således at det må være muligt at tilnærme de meget detaljerede, tidskrævende modeller med en simpel geometri, så længe laster og tiltag matcher hinanden. Dette kunne eksempelvis være ved at nøjes med et rektangulært rum med et vindue i facaden, som kan tilpasses alle mulige variationer af eksterne og interne laster og tiltag.

Bygningssimuleringer med BSim og lignende har dog langt flere inputs end førnævnte SommerkomfortTool-beregningen. Mængden af inputs kan reduceres ved standardisering, for at promovere ensartethed og konsistent i branchen, så forskellige ingeniører ikke får vidt forskellige resultater på samme grundlag. På trods af dette, er der stadigvæk en lang række designparametre og forudsætninger, der kan variere fra projekt til projekt, og rum til rum. Det er således ikke muligt på forhånd at simulere de uendeligt mange design- og inputkombinationer. Denne udfordring kan løses ved brug af machine learning, såfremt der foretages et tilstrækkeligt stort antal simuleringer af de store designrum igennem faktiske simuleringer. Ved brug af disse simuleringer, kan disse data anvendes til at træne præcise "metamodeller" ved brug af machine learning.

Metamodeller kan give lynhurtige estimater på de trænede indeklimeparametre samt energibehov, og kan således bruges i stedet for de egentlige bygningssimuleringer, som er tidskrævende at modellere. Brugen af metamodeller medfører dog en usikkerhed på resultatet, da det er en model af en model.

Dette projekt vil undersøge muligheden for at danne simplificerede generiske rum og vise, at disse kan fungere som erstatning for højt-detaljerede geometriske rum, med et acceptabelt tab i præcision ift. de relativt store usikkerheder der er i de tidlige designfaser. Derudover undersøges muligheden for at danne hurtige og præcise metamodeller med machine learning algoritmer, baseret på tusindvis af simuleringer af disse generiske rum. Dette kan vise potentialet af de lynhurtige generiske metamodeller ift. at reducere tidsforbrug til modelopbygning, samt at vurdere størstedelen af bygningen fremfor enkelte kritiske rum. Afslutningsvis undersøges muligheden for at inkludere usikkerheder og spænd på inputs, og dermed udforske langt flere designmuligheder, og identificere de inputs der har største betydning. Denne proces er illustreret på Figur 1.



Figur 1. Arbejdsproces for værktøjet i rapporten.

Det skal understreges at de generiske metamodeller ikke skal erstatte myndighedsberegninger, men i stedet for benyttes til at lave langt grundigere undersøgelser for en større del af bygningen i løbet af de kritiske tidlige designstadier, som har stor betydning for formgivning, materialevalg, indretning og systemvalg. Fokus vil være på den termiske komfort og energibehov, samt på bygningstyper og rumtyper med det største fodaftryk. Der afgrænses fra komplekse og sjældent forekommende systemer, som fx dynamiske facader og brugen af PCM i bygningen.

## 6 Litteraturstudium

I dette afsnit beskrives det udførte litteraturstudie, for at afdække hvad der er gjort inden for dette område med generiske rum, machine learning og robusthed i byggebranchen. Derudover vil der beskrives hvilket software der anvendes på baggrund af hvad der anvendes i branchen, og til sidst potentielle udfordringer i projektførelsen.

### 6.1 Generisk rum

Med generiske rum, menes der rum der er forsimplet ift. eksempelvis geometri og bygningssystemer, men som stadig opnår en sådan præcision at de kan sammenlignes med faktiske simuleringer udført på rum med komplekse geometrier og systemer. Brugen af generiske rum, samt litteratur omhandlende dette, er meget begrænset. På baggrund af et sideløbende erhvervsPhD-projekt i MOE kan der dog fastlægges hvilke typer af rum der bør dannes generiske rum af, samt identificere hvilke inputs der er mere eller mindre betydende for resultatet af simuleringen. Herved kan fastlægges ikke-signifikante systemer, som har begrænset betydning for ens output.

I Svane et al. (Svane, Østergård, & Jensen, 2021) blev der udført en historisk undersøgelse af 1.320 antal simuleringer udført i MOE, hvorfra det blandt andet kunne konkluderes at 24,6 % af de udvalgte modeller bestod af kontorrum. På baggrund af dette, er det nærliggende at fokusere på denne rumtype, for at udvikle et værktøj der kan anvendes mest muligt i projekter internt i MOE. Derudover er der lavet grundlag for at fastlægge nogle standardværdier for brugsprofiler, da der er fastlagt et spænd der inkluderer 10-90 % fraktile og derfor indeholder de mest anvendte brugsprofiler. Disse er desuden dem der er anvendt i Branchevejledningen for Indeklimaberegninger (Vorre, et al., 2017).

Det er dog ikke altid muligt at gøre brug af generiske rum, da der i nogle tilfælde gøres brug af komplekse systemer, såsom dynamiske facader, PCM og lignende. Disse mere avancerede bygningssystemer ligger uden for dette projekts fokus.

Brugen af generiske rum er ikke udbredt i branchen, baseret på dette litteraturstudie, men der ses potentiale i at forsimple komplekse rum, hvis man herved kan opnå tilnærmelsesvis samme resultater hvis man sammenligner relevante performance-kriterier. Herved ville man kunne bruge generiske rum som grundlag for metamodeler, da disse er langt nemmere at variere på.

### 6.2 Bygningssimuleringer og machine learning

Brugen af machine learning i forbindelse med bygningssimuleringer er ikke et ukendt fænomen. Det er tidligere set, og forskellige metoder er anvendt til at tilnærme resultater opnået fra faktiske simuleringer. I et omfattende studie udført af Østergaard et al., er anvendelsen af forskellige metoder sammenlignet, for at undersøge hvilke metoder der opnår resultater der tilnærmer faktiske simuleringer bedst muligt. I studiet er metoder som eksempelvis Random Forest, Linear Regression, Support Vector Regression og Neural Networks undersøgt, for at evaluere hvilke metoder der bedst egner sig til at lave en stor mængde metamodeler med høj præcision. Metoderne blev vurderet i forhold til præcision, effektivitet, nemhed af brug, robusthed og evnen til at fortolke resultatet. (Østergård, Jensen, & Maagaard, 2017) I studiet blev det konkluderet at Gaussian Process Regression præsterede bedst, men blev ineffektivt på større datasæt, hvorfor Neural Networks i stedet kan bruges med minimalt fald i præcision og en bedre håndtering af store datasæt.

#### MOE A/S

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
DK-8000 Aarhus C  
+45 8750 8700  
CVR: 64 04 56 28  
www.moe.dk

På baggrund af dette vurderes det, at Neural Networks, og variationer heraf, kan anvendes til at opnå metamodeler med høj præcision.

### 6.3 Robusthed og usikkerheder

Med robusthed menes der bygningens sensitivitet og modstandsevne over for chokbegivenheder. Dette involverer hvordan bygningen, inklusiv dens systemer og brugere, justerer og tilpasser sig til pludselige ændringer. (Attia, et al., 2021)

Robusthed er derfor nødvendigt når bygningen udsættes for pludselige ændringer, som eksempelvis ændring i vejr og brugsprofiler. I en undersøgelse udført i 2020, blev det konkluderet at der kan være en markant forskel mellem de anvendte brugsprofiler og de faktiske brugsprofiler for blandt andet brugeradfærd, som kan medføre forskel i bygningens performance. (Carpino, Loukou, Heiselberg, & Arcuri, 2020) Grundet at de brugsprofiler der ofte bliver brugt i rådgivende ingeniørvirksomheder afviger fra de faktiske brugsprofiler, understøtter det udsagnet om at robusthed i bygninger er vigtige, da bygningens performance ellers kan falde ved store afvigelse af disse antagelser.

Ændringer i brugsprofiler og vejr introducerer usikkerheder, som kan anses som støj tidligt i designfasen, og (Moazami, Carlucci, & Geving, 2019) anbefaler derfor at man opnår et design, hvis performance er mindst sensitiv over for denne støj.

Der er i tidligere studier givet bud på hvordan robusthed kan kvantificeres i byggebranchen, herunder max-min, best-case and worst-case, minimax regret og Taguchi metoden. Disse metoder giver bud på forskellige måder man kan vurdere robustheden af bygninger, således at man kan vælge et robust bygningsdesign. (Kotireddy, Loonen, Hoes, & Hensen, 2019) Der er dog mindre litteratur til at understøtte undersøgelsen af robusthed i multi-variabel designkontekst. En af de foreslåede metoder er med Hurwicz-kriteriet, som anvender de tidligere nævnte metoder og laver en vægtning af de forskellige performancekriterier på baggrund af en beregning af dette Hirwicz-kriterie (Homaei & Hamdy, 2020). Dette er en måde at vurdere robustheden af en bygning, når der skal tage beslutninger på mere end ét performancekriterie i betragtning.

Det er derfor vigtigt at medtage nogle af de usikkerheder der er i byggeprojekterne, samt at opnå et robust bygningsdesign. I dette litteraturstudie er der angivet mulige løsninger til at vurdere denne robusthed.

### 6.4 Udvalgte softwareapplikationer / Software økosystem

Som valg af Building Performance Simulation software, vil værktøjet i første omgang anvende BSim, som er udviklet af SBI. Dette simuleringsværktøj anvendes, da det har været brugt i branchen i mange år og der derfor er kendskab til simuleringsværktøjet. Derudover er det relativt nemt at anvende, i forhold til andre simuleringsværktøjer på markedet.

I ErhvervsPhD-projekt (Svane, Østergård, & Jensen, 2021) er der i samarbejde mellem MOE og Build udviklet et værktøj til simulering af BSim modeller på Cloud, således at simuleringstiden drastisk er reduceres og det dermed er muligt at simulere mange modeller på kort tid.

På baggrund af ovenstående, vil BSim blive anvendt som BPS-software i dette projekt.

Derudover anvendes Python til at implementere machine learning i projektet, da Python er gratis, har mange pakker til at anvende machine learning og har dokumentation der gør det nemt at anvende. Særligt pakker som Tensorflow er særligt anvendeligt inden for machine learning, og har gjort Python til et af de mest udbredte programmer til at anvende machine learning.

## 6.5 Potentielle udfordringer

I dette afsnit vil nogle af de potentielle udfordringer som der kan opstå i projektet adresseres.

En af udfordringerne er kompleksitet og variationen i skyggegivere, som kan bestå af omkringliggende bygninger, træer eller andet. Grundet variationen i den geometriske udformning af potentielle skyggegivere, er det besværligt at generalisere og simplificere dette til anvendelse i metamodellerne.

En anden udfordring er variationen i HVAC-systemerne og forskelligheden i sub-inputs. Da der på virksomhedsbasis er mange forskellige ingeniører og rådgivere der udfører simuleringer, vil der naturligt være forskel i hvordan dette håndteres i modellerne. Dette er ofte baseret på 'mental models' (Svane, Østergård, & Jensen, 2021), hvor erfaring fra individuelle eksperter danner grundlag for hvordan de håndterer disse inputs. Derfor er der i MOE (Svane, Østergård, & Jensen, 2021) udført en grundig undersøgelse, som har dannet grundlag for en standardisering af modeller i BSim, hvorfor denne udfordring er adresseret.

Der har været lagt et stort arbejde i at udvikle DataExplorer, som vi udnytter, men der er også et stort arbejde i at udvikle et værktøj der kan understøtte brugen af metamodeller i de tidlige designfaser. Som en fleksibel prototype, er benyttet Google Colab. Derudover ligger der en udfordring i at visualisere mange rum samtidigt, når værktøjet er taget i brug på bygningsbasis.

## 6.6 Bibliografi

- Attia, S., Levinson, R., Ndongo, E., Holzer, P., Kazanci, O. B., Homaei, S. Z., . . . Heiselberg, O. (Marts 2021). Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition. *Energy & Buildings*.
- Carpino, C., Loukou, E., Heiselberg, P., & Arcuri, N. (Januar 2020). Energy performance gap of a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Denmark: The influence of occupancy modelling. *Building Research & Information*.
- Homaei, S., & Hamdy, M. (April 2020). A robustness-based decision making approach for multi-target high performance buildings under uncertain scenarios. *Applied Energy*.
- Johnsen, K., & Lumbye, A. (2019). *Bygningsreglementets vejledning om korrektioner til 10 pct.-reglen for dagslys*. Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen.
- Kotireddy, R., Loonen, R., Hoes, P. J., & Hensen, J. L. (August 2019). Building performance robustness assessment: Comparative study and demonstration using scenario analysis. *Energy & Buildings*.
- Moazami, A., Carlucci, S., & Geving, S. (2019). Robust and resilient buildings: A framework for defining the protection against climate uncertainty. *Materials Science and Engineering*.
- Senberga, A., Krastina, L., Matuleviciute, V., Jensen, R. L., & Østergård, T. (2019). *Office Building Simulations: Zoning and Internal Loads*. Aalborg Universitet.
- Svane, N. D., Østergård, T., & Jensen, R. L. (2021). Consistency in early simulation inputs with statistical analyses of historical models: Reducing the impact of mental models and simulation settings. *17th Conference of International Building Performance Simulation Association*.
- Sørensen, M. J., Myhre, S. H., Jensen, R. L., & Østergård, T. (2017). *Occupancy and weather: How these influence robustness and building design*. Aalborg Universitet.
- Vorre, M. H., Wagner, M. H., Maagaard, S. E., Noyé, P., Lyng, N. L., & Mortensen, L. (2017). *Branchevejledningen for Indeklimaberegninger* (1. udg.). Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Østergård, T., Jensen, R. L., & Maagaard, S. E. (November 2017). A comparison of six metamodeling techniques applied to building performance simulations. *Applied Energy*.



## 7 Definition af generiske rumtyper

I dette afsnit vil vi først uddybe konceptet ”generiske” rum og hvad det dækker over, hvorefter vi vil identificere de rumtyper, for hvilke der skal opbygges generiske rum. Dette baseres på hvor betydningsfulde de er for brugen af bygningen og deres betydning for facadedesign og indretning samt systemernes opbygning.

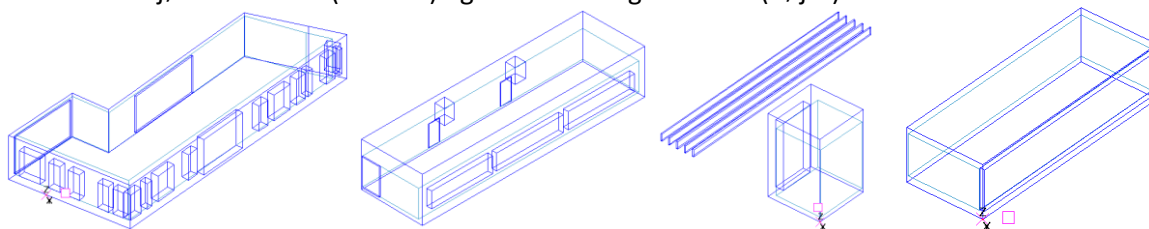
For et udvalgt generisk rum, storrumskontoret, gennemgås de overvejelser der skal til for at finde de vigtigste designparametre og hvordan disse skal generaliseres for at opnå et næsten altomfavnende generisk rum.

Endeligt sammenlignes simuleringresultater fra generiske rum med tilsvarende resultater opnået med simuleringer af geometriske detaljerede modeller. Disse skal være tilstrækkeligt ensartede til at generiske rum kan anvendes som erstatning for højt detaljerede rum i de tidlige faser af projektførelset.

### 7.1 Koncept

En af de primære opgaver i dette projekt er at identificere de parametre, der skal være frihed til at variere på og som har tilstrækkelig betydning for rummets performance.

I Danmark er det gængs praksis<sup>1</sup> at udvælge et antal kritiske rum, som modelleres præcist og simuleres med simuleringværktøjer. Disse rum udvælges typisk ved en manuel, subjektiv vurdering, hvor ingeniøren skønner hvilke rum der er har størst termisk belastning ved visuel betragtning af skyggeforhold og vinduesstørrelser i tegningsmateriale sammenholdt med interne laster vurderet ud fra rumindretningen. Figur 2 herunder viser eksempler på de geometriske repræsentationer dannet med det danske simuleringværktøj BSim. Den geometriske kompleksitet kan variere betragteligt som illustreret ved hjørnekontoret (venstre) og lokalet med glasfacade (højre).



Figur 2. BSim modeller af kontorrum for forskellige projekter.

Den førnævnte hypotese beror på, at de fleste geometriske variationer, og potentielt høje detaljeringsgrader, kan simplificeres til et rektangulært rum med et vindue i én facade (eller et vindue i hvert af facaderne ved hjørnerum). Lameller, udhæng, egenskygger og eksterne bygninger vil ligeledes

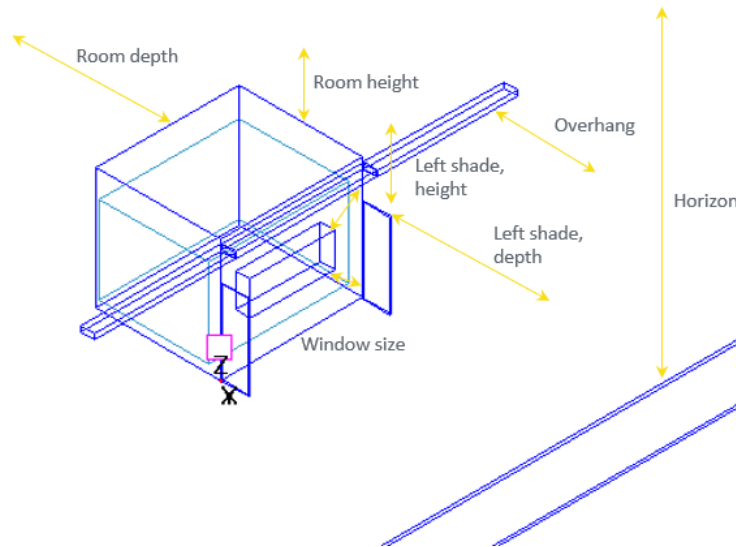
---

<sup>1</sup> Nogle virksomheder, nok i højere grad uden for Danmark, modellerer hele bygninger med udgangspunkt i arkitektens BIM-modeller. Dette muliggør evaluering af alle rum, typisk ved anvendelse af rumtype-afhængige ”inputskabeloner”. Dog bliver BIM-modellerne først tilgængelig på et relativt sent tidspunkt i designprocessen hvor mange vigtige designvalg allerede er truffet. Derudover er det med sådanne store modeller vanskeligt at variere på en lang række designparametre (vinduesstørrelse og -placering, lameludformning, konstruktionstyper, osv.), hvilket er lettere foretages på udvalgte rum i egne modeller.



skulle begrænses til få rektangulære skyggende objekter – dvs. to sideskygger, et udhæng og en horisontskygge.

For at det generiske rum kan repræsentere variationen af faktiske rum, skal det være muligt at variere størrelsen på det rektangulære rum, det vindue(r), samt udstrækningen af skyggerne. Figur 3 illustrerer dette koncept. Hvor meget disse variable skal kunne variere for at kunne dække størstedelen af virkelig rum, baseres på geometriske betragtninger samt en omfattende analyse af 11.000 tidligere BSim modeller.



Figur 3. Konceptuel illustration af hvordan geometrien af rum, vindue og skygger kan variere for en generisk model.

Det er dog ikke kun den geometriske repræsentation, der skal generaliseres. Simulering forudsætter en række valg for systemer og styringsprincipper, som hver kræver yderligere specificering af setpunkter, brugsprofiler, mm. Hertil kommer definitionen af interne laster og brugstider. Således kræves detaljerede inputs og valg for personer, udstyr, belysning, infiltration, opvarmning, ventilation og køling.

Mange inputs relateret til systemer og brugstider kan dog med fordel standardiseres på branche- eller virksomhedsniveau for at få mere sammenlignelige, konsistente simuleringer, som er mindre afhængige den enkelte ingeniørs erfaring. Branchevejledning for indeklimategninger er netop sat i verden for at sikre mere sammenlignelige modeller på tværs af branchen, så man ikke sammenligner projekter på forskelligt grundlag i konkurrenceprojekter og generelt får et passende udgangspunkt, der øger kvaliteten og letter kvalitetssikring. I et sideløbende erhvervsPhD-projekt undersøges særligt betydningen af standardisering af simuleringindsstillinger og inputværdier, hvilket bidrager til disse generiske modeller. Et uddrag af dette arbejde er beskrevet i de kommende afsnit.

Selv ved ensartning af specifikke, detaljerede inputs og fravalg af sjældne styringsstrategier (fx for solafskærmning eller ventilation) vil der være en lang række inputs, som ingeniøren skal kunne variere på. Identifikation af disse inputs og disses spænd vil blive baseret på anbefalinger i branchevejledningen, historiske variationer i fornævnte studie af 11.000 modeller, samt ekspertvurderinger.

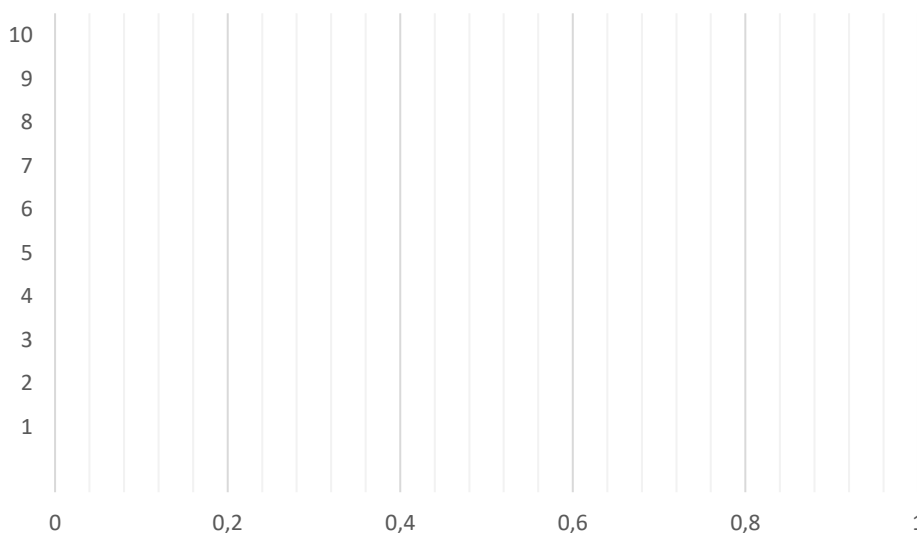
Desuden skal inputs omregnes til mere generelle enheder, så inputs er mindre afhængige af rummet geometri og størrelse.

Med forståelse for konceptet, vil vi i de efterfølgende afsnit finde frem til hvilke typer rum, der bedst lader sig repræsentere og simplificere til generiske rum og hvordan designparametrene skal kunne variere for at dække flest mulige designvariationer.

## 7.2 Udvalgelse af vigtigste rum

Ikke alle rumtyper er relevante eller egnede til at danne de førnævnte generiske rum ud fra. Kantiner og atrier bliver ofte udvalgt til simuleringer, men de er ikke de primære arbejds- eller beboelsesområder, og er desuden så forskelligartede at de ville kræve særskilt modellering. Desuden fylder de ikke en stor del af det samlede benyttede areal. Teknikrum, toiletter og gangarealer kan derimod have et væsentlig arealmæssigt aftryk. Disse har dog ikke relevans ift. arbejdsmiljø, og det er typisk heller ikke områder hvor indeklima er problematisk.

I et studie af 11.000 BSim modeller i MOE, er det blevet kortlagt hvilke rum der historisk set er modelleret i MOE. Figur 4 viser fordelingen af de rum, der er blevet udvalgt til simulering, hvoraf det fremgår at kontor, efterfulgt af hospitalsstuer, møderum og beboelsesrum hyppigst er blevet udvalgt. Grundet projekteringen af to supersygehuse i den pågældende periode, anses omfanget af hospitalsrum til at være markant mindre i fremtiden.



Figur 4. Fordeling af historisk simulerede rum baseret på historisk analyse internt i MOE. (Svane, Østergård, & Jensen, 2021)

På baggrund af ovenstående, anses kontorrum som den primære rumkategori for dette projekt, efterfulgt af mødelokaler. Disse er også de vigtigste rum i kontorbygninger, og har ligeledes et stort arealmæssigt aftryk.

Udover disse rum, er skolebyggeri også af særlig interesse, grundet klasselokalers store potentiale, hvorfor rumtyper prioriteres som nedenfor:

1. Storrumskontorer
2. Mødelokaler
3. Klasselokaler

### MOE A/S

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
DK-8000 Aarhus C  
+45 8750 8700  
CVR: 64 04 56 28  
www.moe.dk

Hver af de ovenstående rumtyper kan resultere i flere generiske modeller, hvilket skyldes at man ved træning af metamodellen skal have et fast antal af ens designparametre, som uddybes i det følgende.

Der betragtes et mødelokale, hvilket både kan have vinduer eller være indeliggende uden vinduer. I førstnævnte tilfælde skal man definere en lang række designparametre for vinduet, skygger og facaden. Derimod er der for det indeliggende mødelokale langt færre parametre at ændre på, hvorfor der skal defineres en generisk model for begge af disse tilfælde.

Kontorrum kræver dagslys, men rummet kan have vinduer i én eller flere facader. Hvis der haves vinduer i to facader, skal man angive adskillige designparametre og skyggeforhold for hvert vindue. Figur 5 viser antallet af facader med vinduer for de historisk modellerede rum i MOE. Det fremgår af figuren, at 63 % af modellerne har vinduer til én facade, men ser man på ensidige rums repræsentation af det samlede areal, vil denne være langt højere.

Som opsummering af ovenstående, skal de enkelte rumtyper underopdeles i forskellige generiske rum. Fokus vil i første omgang være på storrums kontor med vinduer i én facade, som vil kunne repræsentere langt størstedelen af kontorbygningers fodaftryk.

$$\frac{221}{0} \frac{23}{0}$$

Figur 5. Fordeling af antal facader med vinduer for kontorer baseret på historisk analyse internt i MOE. (Svane, Østergård, & Jensen, 2021)

### 7.3 Identifikation af designparametre og simplificering af disse

Det mest omfattende arbejde ved nærværende projekt ligger i at identificere designparametre og deres mulige spænd, samt fastlæggelse af nødvendigt detaljeringsniveau for disse. Dette er undersøgt, hvor der på generelt niveau, og uanset rumtype, er foretaget en manuel gennemgang af alle inputs i BSim for et subjektivt udvalg af modeller, opbygget af forskellige ingeniører på forskellige projekter. De førnævnte historiske modeller er undersøgt ift. hvilke inputs der er varieret på, samt i hvilke spænd. På baggrund af dette, har projektgruppen diskuteret hvilke systemer der skal benyttes og hvilke parametre, der skal kunne varieres.

Udover ovenstående, er der udført yderligere analyser, som eksempelvis standardisering af inputs ift. Branchevejledningen, gunstige spænd baseret på historiske modeller, erfaringer fra eksperter, samt begrænsninger og muligheder ved brug af machine learning.

I det følgende tages der udgangspunkt i et storrumskontor, hvor der gives eksempler på fastlagte og variable inputs, mens bilag B indeholder mere fyldestgørende dokumentation. Disse variable designparametre afspejler det generiske rum der er anvendt til prototypen, som er brugt til at afprøve konceptet på faktiske projekter. Erfaringer herfra har identificeret potentielle optimeringer af variable, samt muligheder der endnu ikke er tilgængelige, hvorfor værdier og muligheder beskrevet i bilag B skal opdateres ved fremtidige iterationer.

### **7.3.1 Beskrivelse af generisk kontorrum med vinduer i én facade**

Som tidligere nævnt, er det valgt at fokusere på kontorrum med vinduer i én facade, da denne kategori har det største arealmæssige aftryk, samt det i MOE er den hyppigst forekommende rumtype udtaget til simulering. På baggrund af den iterative proces, med valideringer og test, er der bestemt en generisk model med 37 variable designparametre. En kort beskrivelse af disse fremgår i tabel 1.

Tabel 1. Beskrivelse af 37 variable designparametre for et generisk konturrum med vinduer i én facade

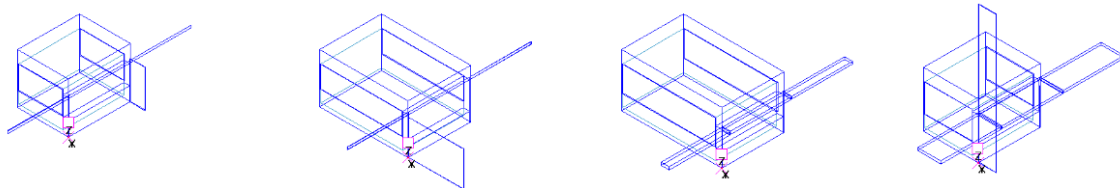
Category	#	Design variable	Description
<i>Geometry</i>	1	Orientation	Orientation of facade
	2	Room height	Average internal room height
	3	Room depth	Average internal room depth
<i>Shades</i>	4	Horizon	Angle to top of uniform horizontal obstruction
	5	Overhang	Angle to tip of overhang
	6	Type of side fins	Categorical description of side fin or obstruction, e.g. None, Left, Right or Both
	7	Horizontal angle	Horizontal angle to tip of side fin or obstruction
	8	Vertical angle	Vertical angle to top side fin or obstruction
<i>Windows</i>	9	Window-wall-ratio	Internally measured ratio between window opening and wall
	10	Frame factor	Glass-frame ratio of opening
	11	Recess	Distance from facade to the glazing's retraction
	12	SHGC	Solar heat gain coefficient of glazing
	13	Shading, coeff.	Shading coefficient of solar shading
	14	Shading, activate	Desired amount of active solar shading during in-use hours
<i>Loads</i>	15	People	People load per floor area
	16	Equipment	Equipment load per floor area
	17	Equip. Standby	Percentage of standby load during out-of-use hours
	18	Lighting	Lighting load from general lighting
	19	Infiltration @50Pa	Desired maximum infiltration level at 50 Pa pressure test
<i>Ventilation</i>	20	Cooling type	Categorical choice of cooling: None, Cooling coil, or Chilled beam
	21	Max. air change	Maximum ventilation air change rate
	22	VAV max. factor	Ratio between minimum and maximum air change rates
	23	Night cooling factor	Categorical choice of night cooling: None, Minimum air change, or Maximum possible air change
	24	Specific fan power	Specific fan power (SFP) of ventilation
	25	Heat recovery eff.	Heat recovery efficiency of air handling unit
	26	Moisture recovery eff.	Moisture recovery efficiency of air handling unit
<i>Set points</i>	27	Cooling	Desired setpoint for cooling if present
	28	Inlet air, summer	Setpoint of inlet air during summer
	29	Inlet air, winter	Setpoint of inlet air during winter
	30	Heating, summer	Setpoint point of heating during summer. Setpoint during winter is set 1 °C lower
	31	Nighttime	Setpoint of nighttime cooling for ventilation and heating
	32	CO2-level	Setpoint for desired CO2-level
<i>Constructions</i>	33	U-value, roof	U-value of roof. Includes option of adiabatic construction
	34	Thermal mass, roof	Categorical choice thermal mass, e.g. light and heavy
	35	Thermal mass, back wall	Categorical choice thermal mass, e.g. light and heavy
	36	Thermal mass, floor	Categorical choice thermal mass, e.g. light and heavy
	37	Thermal mass, facade	Categorical choice thermal mass, e.g. light and heavy

De 37 variable parametre kan kombineres på utallige måde, hvilket nødvendiggør anvendelse af Monte Carlo metoden, som bruges til at lave et stort antal tilfældige designkombinationer, som

efterfølgende kan anvendes til at træne metamodeler ved brug af machine learning. Disse metamodeler kan derefter bruges til at estimere energibehov og indeklime for de generiske rum med dertilhørende designkombinationer.

Definitionen af designparametrene skal gøres, så den generiske model kan repræsentere flest mulige variationer, men samtidig med hensyn til realistiske spænd, så der kan trænes en præcis metamodel. Dette medfører blandt andet at man ikke kan lade rumdybden variere fra 1 til 20 meter, da man så vil lave en lang række urealistiske scenarier. I stedet defineres spænd som vurderes at dække størstedelen af scenarierne, og for diskrete inputs, såsom glastyper og konstruktionstyper, nøjes med de hyppigst forekommende typer.

Figur 3 illustrerer konceptuelt hvordan designparametre kan variere, hvor der således kan varieres på rumhøjde, rumdybde, vinduernes størrelse og skyggernes udstrækning. Figur 6 viser eksempler på geometriske variationer, som dannes med Monte Carlo metoden, på baggrund af de definerede variationer på designparametrene. Uendelige kombinationer af disse kan genereres ved hjælp af metamodeler, som derefter benyttes som tilnærmelse af faktiske variationer, som eksemplificeret på Figur 2.



Figur 6. Geometriske modeller for fire tilfældigt udvalgte variationer fra Monte Carlo simuleringerne af det generiske storrumskontor (uden modstående bygning).

### 7.3.2 Eksempler på faste inputs for kontorrum

I Bilag B ses en liste over de vigtigste, fastlagte inputs, samt en beskrivelse af disse.

### 7.3.3 Eksempler på designparametre for kontorrum

Se alle definitioner i bilag B.

## 7.4 Udvalgelse af outputs / performance-kriterier

For at vurdere simuleringernes performance, er der opsat en række performance-kriterier. Disse er udvalgt for at vurdere indeklime og energiforbruget, så man kan vurdere kvaliteten af en model i bygningsmæssig forstand. Hertil er valgt følgende performance-kriterier:

- Timer over 26 °C
- Timer under 25 % relativ luftfugtighed
- Maksimal værdi for CO<sub>2</sub>-indholdet i luften
- Energiforbrug

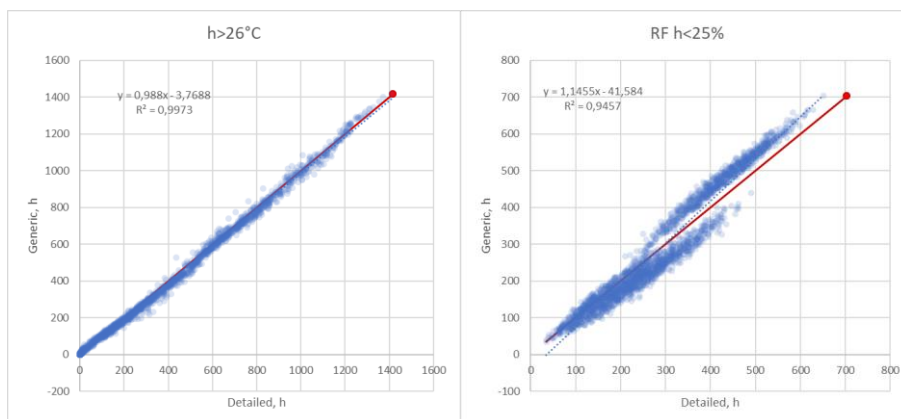
Disse kriterier vurderer derfor det termiske indeklime, det atmosfæriske indeklime og energibehovet til driftsenergi. Disse er ofte anvendt, da man hurtigt kan danne sig et overblik over kvaliteten af indeklime, og mængden af energi der er behov for til driftsenergi.

#### MOE A/S

## 7.5 Case Alfa Laval

For at undersøge validiteten af anvendelsen af generiske rum, er simuleringer af generiske rum undersøgt ift. faktiske simuleringer af rum med komplekse geometrier. Hertil er undersøgt antallet af timer over 26 °C og antallet af timer under 25% relativ luftfugtighed, som er anvendt som performancekriterier som beskrevet tidligere.

Resultater af dette kan ses på Figur 7, hvor der ses en god overensstemmelse mellem simuleringerne af de generiske rum og simuleringerne af rum med komplekse geometrier. Særligt i undersøgelsen af termisk komfort ligger resultaterne tæt på ideallinjen. Dette er yderligere understøttet af en høj  $R^2$ -værdi.



Figur 7. Resultat for simulering for generiske rum som funktion af simulering af tilsvarende kompleks geometri. Termisk komfort (t.v.), relativ luftfugtighed (t.h.)

På baggrund af denne pilot case, hvor brugen af generiske rum var hovedformålet for undersøgelsen, kan det konkluderes at generiske rum kan opnå en god tilnærmelse ift. simuleringer med komplekse geometrier. Derfor bør der ligeledes være muligt at bruge disse generiske rum som datasæt til træning af metamodeller, og stadig opnå en god præcision fra metamodellerne ift. faktiske simuleringer af modeller med komplekse geometrier.

## 8 Udvikling af metamodeller fra bygningssimuleringer

### 8.1 Introduktion

BPS er en "model af virkeligheden" som bruges i forbindelse med at vurdere løsningsforslag på en række kriterier. Modellen vil aldrig afspejle virkeligheden fuldstændigt grundet de mange komplekse systemer, men det er et brugbart værktøj til at opnå en tilnærmelsesvis forståelse af hvordan et rum eller en bygning præsterer. Som nævnt tidligere, er disse modeller tidskrævende at lave, særligt når mange modeller bliver dannet i designprocessen.

For at afhjælpe denne problemstilling, kan der anvendes metamodeller som er "model af en model". De anvendes som en tilnærmelse for de faktiske simuleringer, og er markant hurtigere at danne en stor mængde simuleringer med. Der er dog brug for en stor mængde data til at træne metamodel-lerne, og desto flere variable designparametre der er, desto mere data er påkrævet for at træne præcise metamodeller.

Til at træne metamodellerne, er der anvendt Artificial Neural Network (ANN), samt Bayesian Neural Network (BNN). Disse er anvendt på baggrund af litteraturstudiet, som angiver at Neural Networks har opnåede den højeste præcision blandt forskellige metoder til at danne metamodeller af BPS. Anvendelsen af BNN skyldes inddragelsen af usikkerheder, da man herved kan få en værdi med en usikkerhed på.

For at evaluere hvor godt metamodellerne performer, anvendes den såkaldte  $R^2$ -værdi, som er et udtryk for korrelation. En værdi tæt på 1 er i denne forstand et udtryk for høj korrelation, hvor en værdi på 0 er et udtryk for ingen korrelation.

Når man træner en metamodel, baseret på tusindvis af simuleringer, laver man en opdeling af sit træningssæt. Dette gøres for at have data man kan træne sin metamodeller på, men samtidigt også for at kunne eftervise at ens model er velfungerende på andet data end det den er trænet på. Herved kan bestemmes en  $R^2$ -værdi på for både træningssæt og valideringssæt. Denne opdeling er sket typisk ved et 80-20 % split til henholdsvis træningssæt og valideringssæt.

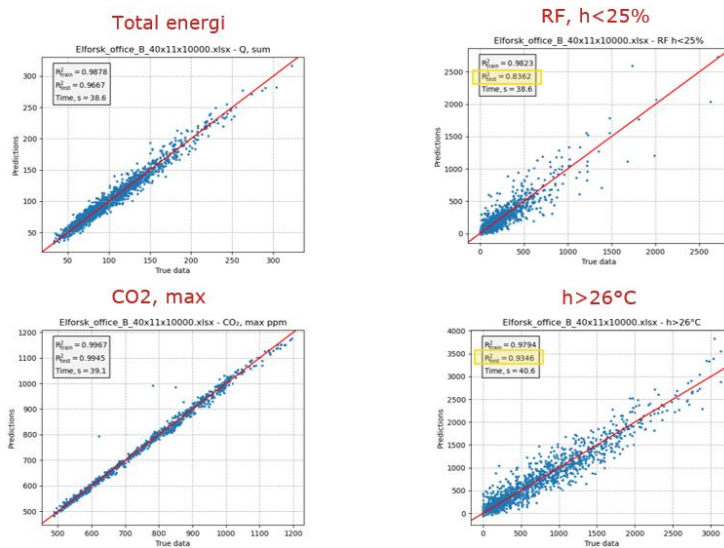
### 8.2 Resultater

På baggrund af de dannede metamodeller, ved brugen af machine learning, er værktøjet anvendt til at danne metamodeller af de generiske rum og er derefter sammenlignet med faktisk data fra faktiske simuleringer. Som performance-kriterier for simuleringerne, er valgt energibehov, timer under 25% relativ luftfugtighed, maksimalt opnået værdi af  $CO_2$  samt antal timer over 26 °C.

På baggrund af disse performance-kriterier, er resultaterne for metamodellerne plottet som en funktion af de reelle værdier fra faktiske simuleringer, for et kontor. Dette er illustreret på Figur 8.

Som det fremgår på figuren, så opnås der generelt en høj overensstemmelse mellem metamodellerne og de faktiske simuleringer. Dette understreges af at  $R^2$ -værdien er relativt høj for alle performancekriterier, hvor den laveste opnåede  $R^2$ -værdi er på 0.83 for den relative luftfugtighed.





Figur 8. Resultater af metamodeller som funktion af resultater fra faktiske simuleringer.

### 8.2.1 Håndtering af usikkerhed

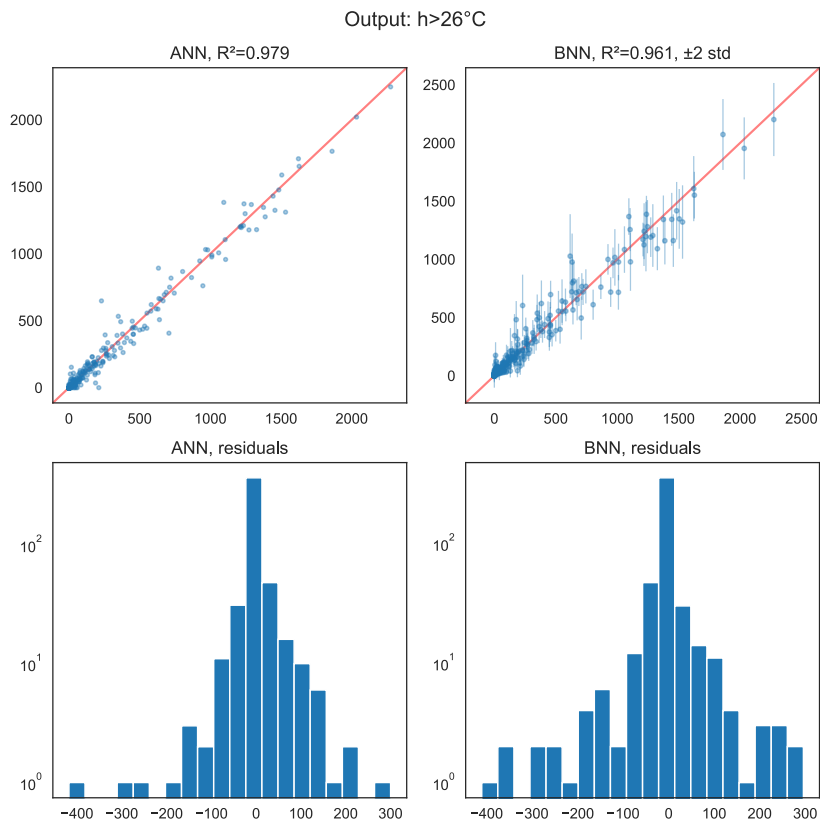
Når der anvendes neurale netværk, dannes der en forudsigtelse af ens outputparametre som punktmåling, hvor man kan kvantificere usikkerheden af ens model som helhed. Det er dog ikke muligt at kvantificere usikkerheden på hver punktmåling, og det er derfor usikkert hvor præcis disse punkter er.

For at håndtere denne usikkerhed, på hver punktmåling, kan man gøre brug af et Bayesian Neural Netværk (BNN), som ligeledes beregner en usikkerhed på ens forudsigtelse, dog med tab i præcision for de enkelte estimater. På Figur 9 er der sammenlignet et Artificial Neural Network (ANN) med det Bayesian Neural Network, hvor der er sammenlignet metamodeller med faktiske simuleringer.

Som det fremgår på Figur 9, så fås der en højere præcision af modellen for ANN, hvor BNN har en lidt lavere præcision. Til gengæld fås der en usikkerhed på ens forudsigtelse, således at man har en idé om hvor sikker man kan være på resultatet. Bemærk ligeledes at størstedelen af målingerne har få overtemperaturtimer, og modellen derfor har mindst usikkerhed i dette område. I områder med få simuleringer, er der tilknyttet en større usikkerhed.

Derudover er der lavet en beregning af 'residuals', som angiver fejlen mellem metamodellerne og de faktiske simuleringer, med en logaritmisk skala på ordinataksen. På disse plots, fremgår det at fordelingen af residuals for ANN ligner en normalfordeling, med få høje værdier for disse. For BNN er denne fordeling lidt bredere, hvor man får flere tilfælde af høje residuals, grundet den lavere præcision af modellen.

Brugen af BNN er derfor illustreret at kunne anvendes til at håndtere usikkerheder på ens forudsigtelser med metamodeller, som alternativ til punktmålinger som ellers fås fra et artificial neural network.



Figur 9. Sammenligning af ANN (tv.) og BNN (th.).

## 9 Optimering af energibehov i samspil med indeklima

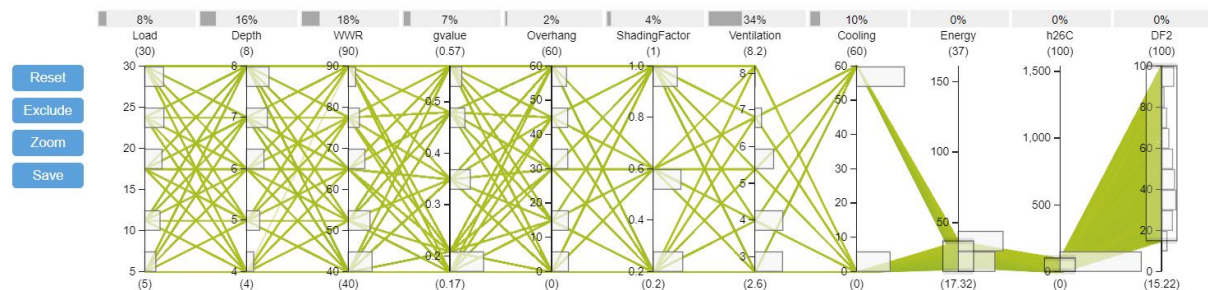
For at illustrere potentialet for værktøjet, og vise hvordan man kan optimere energibehøvet for bygninger uden at gå på kompromis med indeklimaet, er der undersøgt 93.750 BSim simuleringer, hvor der er varieret på 8 designparametre samt 3 performance-kriterier: Energiforbrug, termisk indeklima og dagslys.

Ud fra de simuleringer, kan man sætte nogle grænser på ens performance-kriterier, således at visse krav skal overholdes. Hvis man skal overholde kravene til termisk indeklima, på maksimalt 100 timer over 26 °C, reduceres antallet af løsninger til 76.126, svarende til 81 % af de oprindelige simuleringer. Hvis man samtidig vil overholde kravet med minimum 15 % korrigeret glas-gulv areal, reduceres antallet af løsninger til 69.819 simuleringer, svarende til 74 %.

Herved har man fjernet de simuleringer der ikke overholder kravene til indeklimaet, hvorved man afslutningsvis kan fokusere på løsningerne ift. energiforbruget. Hvis man til sidst vil undersøge de løsninger der overholder en energiramme på 37 kWh/(m<sup>2</sup> år), så har man 25 % af løsningerne tilbage. Af de løsninger er der en spredning mellem 17,32 kWh/(m<sup>2</sup> år) til 37 kWh/(m<sup>2</sup> år). Det er altså muligt for beslutningstagere at overholde kravene til de nævnte performancekriterier, men opnå løsninger der har det halve energiforbrug ift. energirammekravet. Dette viser, at værktøjet kan være med til at reducere driftsenergien af bygninger væsentligt.

En illustration af en filtrering af de 93.750 antal simuleringer er illustreret på Figur 10, hvor det tidligere udviklede værktøj DataExplorer er anvendt.

23798/93750 (25.38%)



Figur 10. Parallellakseplot af filtrerede løsninger på baggrund af energiforbrug, termisk indeklima og dagslys, ved brug af DataExplorer.

## 10 Test på virkelige cases

I følgende afsnit beskrives de cases hvor værktøjet har været anvendt, for at undersøge anvendeligheden af værktøjet, samt hvilke områder det kan optimeres og forbedres. En beskrivelse af værktøjet fremgår i

### 10.1 Energirigtig afhjælpning af indeklimaproblemer på AAU, Rengsborgsgade

Værktøjet blev anvendt på en undervisningsbygning, hvor der var problemer med indeklimaet, bl.a. på grund af en fortætning på +70% i forhold til designkriterierne. Der blev analyseret på flere forskellige rum, bl.a. et kontor beregnet til fire personer, benævnt "HUM", samt et hjørnerum, hvor der i begge tilfælde er en tendens til et dårligt termisk indeklima. Værktøjet blev anvendt til at undersøge muligheden for brug af forskellige tiltag, herunder passive tiltag som reduktion af interne laster, øget solaf-skærmning og brug af solfilm. Derudover blev muligheden for øget natkøling undersøgt, samt installation af en adsorptionskøleflade.

På baggrund af disse rum, hvor værktøjet blev anvendt, kunne der for "HUM" konkluderes at det uden brug af natkøling eller mekanisk køling er problematisk at forbedre det termiske indeklima, på trods af brugen af solafskærmning og tilsyneladende lav window-wall ratio, mens det for de øvrige rum var muligt at opnå et meget forbedret indeklima der vil kunne opfylde dagens krav til termisk komfort.

Efter anvendelsen, kom deltagerne med feedback og en vurdering af værktøjet, hvor de mente at der er en stor tidsbesparelse i at undgå modellering og simulering i BSim, det er nemt at inddrage usikkerheder og det er nemt at vurdere konsekvenser for energibehovet ved de forskellige alternativer. På baggrund af analyserne og diskussionerne til præsentationsmødet besluttede bygningsejer at iværksætte udbygning og isolering af kanalsystem, samt opgradering af ventilationsanlægget med køling.

Det at anvende værktøjet på en renoveringscase giver anledning til at udvide spændende på nogle af inputtene, fx U-værdi og g-værdi af vinduer, infiltration og effekt af installeret belysning, så det er muligt også at beregne for eksisterende rum og derefter undersøge forbedringspotentialer ved de renoveringsforslag der er i spil.

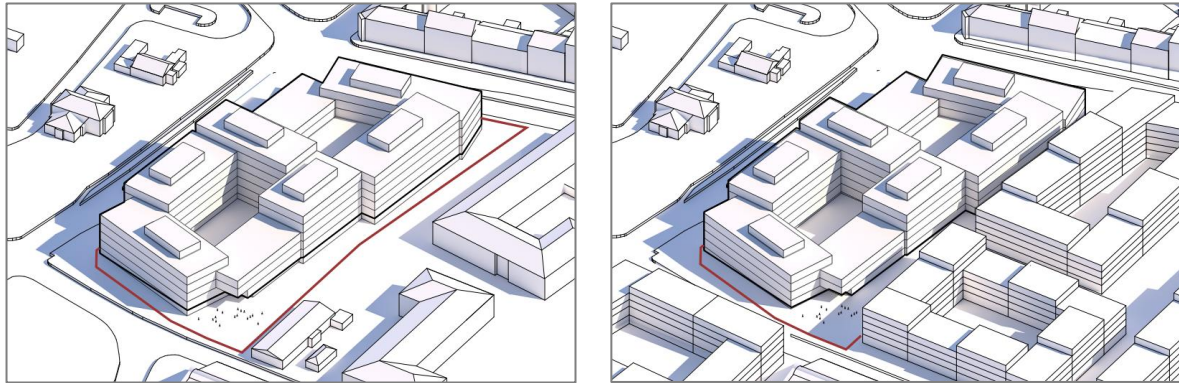
### 10.2 Kontorbyggeri – Lerchesgade, Odense

Lerchesgade er et kontorbyggeri Odense Bymidte, som er formet som et 8-tal med varierende antal etager, samt uensartet omkringliggende skyggegivere. Der er således 4 facader udadtil, samt 8 facader mod gårdrummet, hvor alle er udsat for varierende skyggeforhold. Bygningen kan ses på Figur 11, hvor der er vist med nuværende skyggeforhold, samt de fremtidige skyggeforhold. Fra 1. til 5. etage består etagearealet 75% af kontor- og mødelokaler. Et eksempel på et kontor er illustreret på Figur 12.

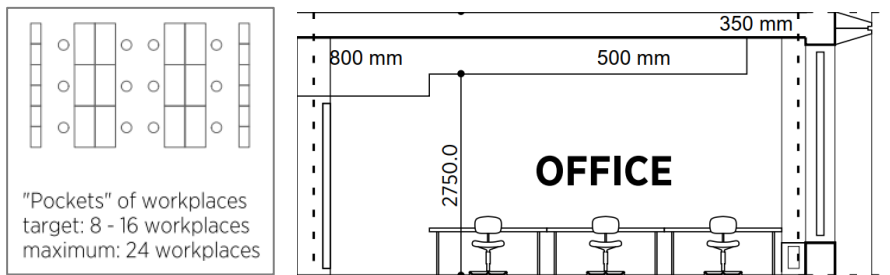
I projektet er der fra bygherre stillet særlige betingelser til byggeriet, herunder at der skal være en køleflade i ventilationsanlægget, der må ikke være udvendig solafskærmning, og det skal være muligt at differentiere facadeudtrykket.

#### MOE A/S

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
DK-8000 Aarhus C  
+45 8750 8700  
CVR: 64 04 56 28  
www.moe.dk



Figur 11. Skitse af kontorbyggeriet fra konkurrencematerialet. Til venstre med nuværende skyggegivere og til højre med forslåede fremtidige skyggegivere. Illustration C.F. Møller.



Figur 12. Venstre) Princip for indretning af kontorpladser. Højre) Tværsnit af åbent kontorområde. Illustration C.F. Møller.

Den nuværende, og traditionelle, tilgang til projektet kommer fra et konkurrenceprojekt, hvor prioriteringen i designprocessen har været dagslys, termisk komfort i formodede kritiske rum og til sidst energirammen, i den rækkefølge.

Tilgangen med brug af kritiske rum er et alternativ til at undersøge hele bygningen, og der kan derfor argumenteres for at man i stedet blot bør simulere hele bygningen. Dette er dog tidskrævende og dyrt, og grundet de mange usikkerheder tidligt i designfasen forekommer der sandsynligvis ændringer senere i projektforsløbet. Ved brugen af kritiske rum, særligt tidligt i designfasen, kan man hurtigere foretage beslutninger og yde bedre rådgivning, da responstiden er markant hurtigere.

Dagslyset er simuleret på baggrund af 300 lux metoden og det termiske indeklima er undersøgt for kritiske kontorudsnit i hver udvendig facade. De nødvendige luftmængder er fundet på baggrund af forskellige g-værdier for hver facade. Disse luftmængder er derefter antaget tilstrækkelige for tilsvarende orienteringer i gårdrum, på trods af forskelle i facadeudtryk. Udvalgte kritiske rum er illustreret på Figur 13.



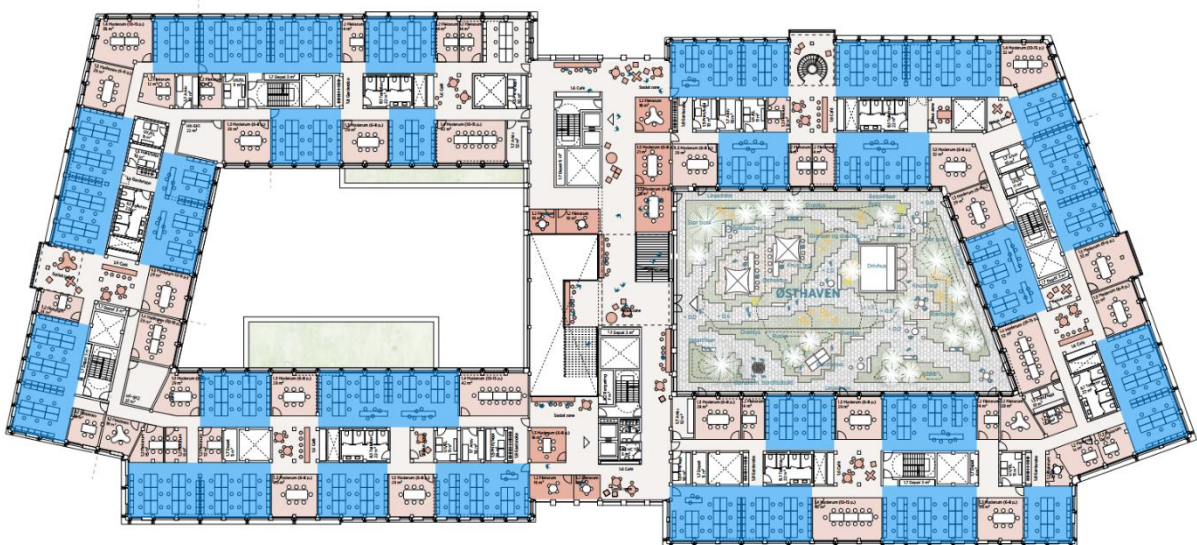


Figur 13. Udvalgte kritiske rum til vurdering af termisk komfort i konkurrencefasen.

I stedet for den traditionelle tilgang, med manuel undersøgelse af enkelte kritiske rum, kan tidligere nævnte generiske rum bruges med supplerende af metamodeller. Fokus har været på at reducere energibehovet, ved samtidig overholdelse af indeklimakrav. Denne case udføres på traditionel vis, hvor der sideløbende anvendes værktøjet til at se hvilken forskel det ville have gjort samt hvilken påvirkning det ville have på de beslutninger der er taget undervejs.

Ved brug af metamodeller er det muligt at undersøge en langt større kombination af designparametre, og samtidigt tage forskellige skyggeforhold i betragtning. Det muliggør opdagelsen af kombinationer der fører til mere optimale løsninger end den traditionelle tilgang der typisk kun fører til sub-optimale løsninger.

I øjeblikket er værktøjet afgrænset til at undersøge en udvalgt facade mod gårdrum, se Figur 15, for at illustreret potentialet. I fremtidige versioner vil det være muligt at regne på alle kontorområder og mødelokaler, som illustreret på Figur 14.



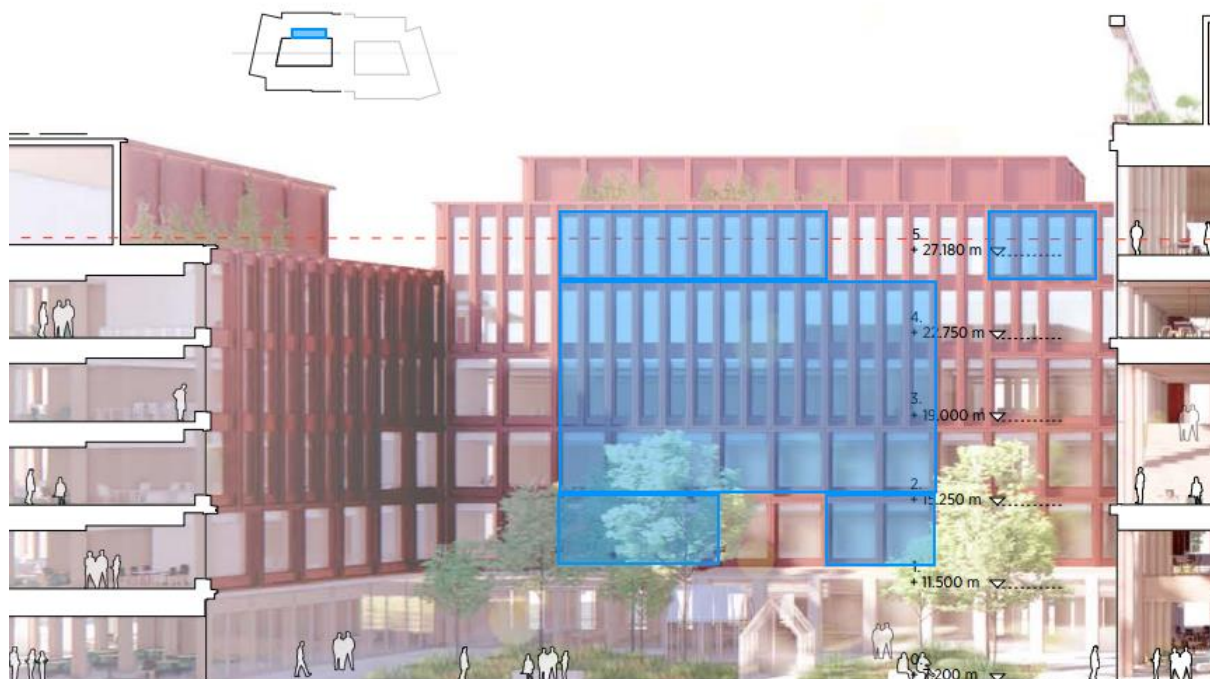
#### MOE A/S

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
DK-8000 Aarhus C  
+45 8750 8700  
CVR: 64 04 56 28  
www.moe.dk

Figur 14. Plantegning for 1. sal, hvor kontorområder (blåt) og mødelokaler (lyserød) er anbragt langs facaden. Overordnet samme tankegang for 2. til 5. sal, hvor placering af møderum og åbne landskaber dog varierer. Illustration C.F. Møller.

På baggrund af værktøjet blev der udført en designanalyse, hvor det er undersøgt hvordan man kan balancere vinduesprocenten og g-værdier for de sydvendte kontorområder mod gårdrummet, hvor skyggeforholdene varierer betragteligt. Øvrige designparametre består af luftskifte, natkøling og setpunkter, men kan nemt udvides til flere variable.

Selve løsningsrummet, som udgør de mulige løsninger, er afgrænset af krav til det termiske indeklime samt krav til dagslys. Krav til det termiske indeklime er opfyldt, hvis simuleringen medfører færre end 100 timer med over 26 °C, og dagslyset estimeres vha. 10%-reglen. For at gøre metoden mere sammenlignelig med 300 lux metoden, anvendes i stedet for et minimum på 15% korrigeret glas-gulv areal.



Figur 15 Placering af sydvendte kontorområder mod gårdrum. Illustration: C.F. Møller.

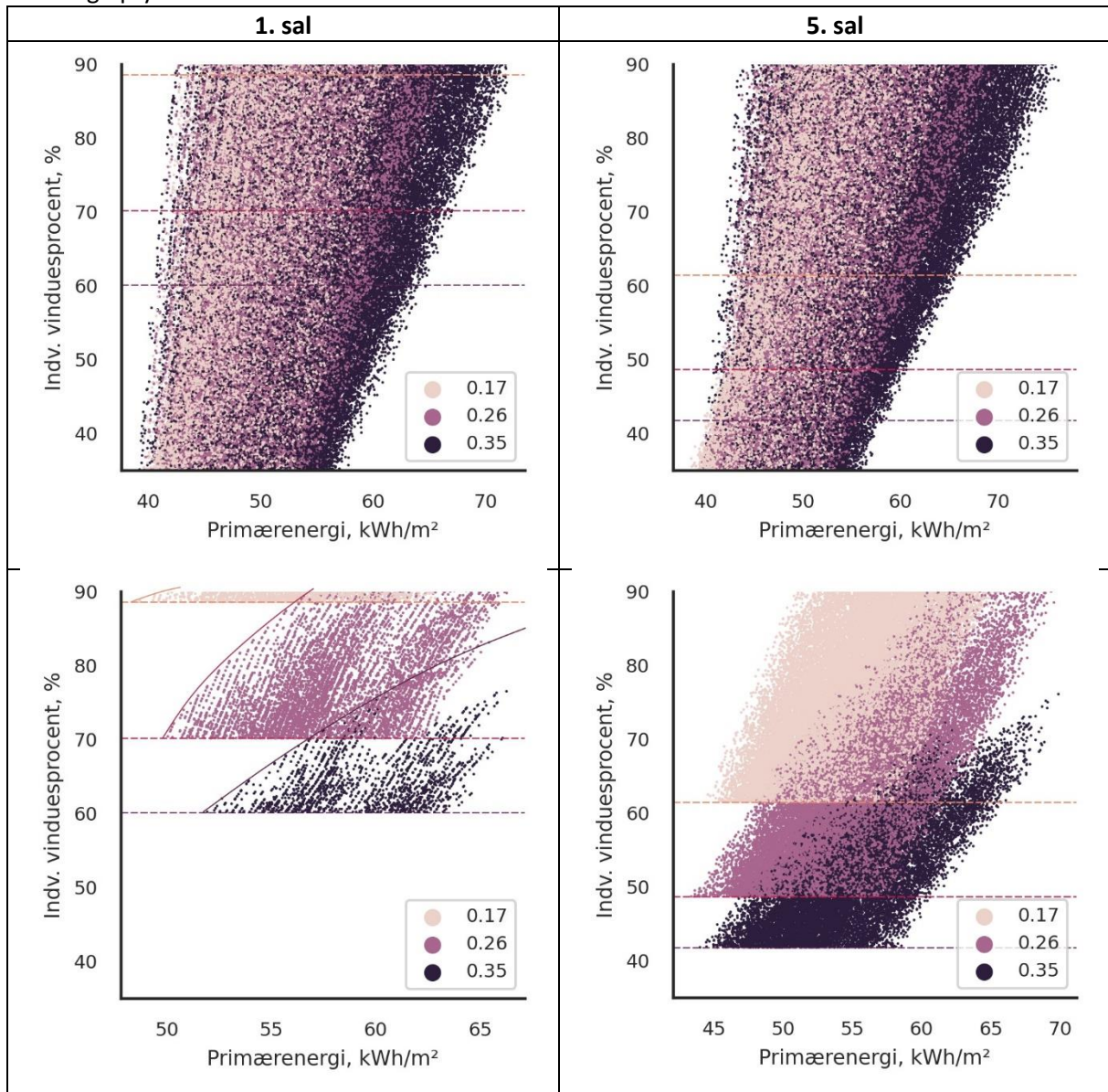
På baggrund af værktøjets anvendelse i dette projekt, er sammenhængen mellem energibehovet og vinduesprocent ved forskellige g-værdier undersøgt. Da ønsket er at reducere det samlede energibehov, er målet at værktøjet kan belyse løsningsrummet for beslutningstagerne.

På Figur 16, er en brug af værktøjet vist. Her fremgår vinduesprocenten som funktion af primær-energi, for tre forskellige g-værdier.

Øverst på figuren ses resultater af alle simuleringer med metamodellen. Nederst på figuren er angivet hvilke løsninger der både opfylder krav til dagslys og termisk indeklime, markeret med henholdsvis stiplet og fuldtoptrukken linje. Mange af simuleringerne er filtreret fra, og man er efterladt med løsninger der opfylder kravene. Hertil fremgår det at man kan opfylde kravene med alle tre forskellige g-værdier, ved forskellige løsninger af vinduesprocenter med forskellige energibehov. Disse resultater kan bruges af beslutningstagerne, og man kan fravælge løsninger med højt energibehov, men som samtidig overholder de krav der sættes af beslutningstagerne og lovgivning. Potentialet af dette



er derfor at man har et bedre grundlag for at vælge løsninger der medfører et lavt energibehov, men samtidig opfylder krav til indeklimaet.



Figur 16. Sammenhæng imellem energibehov og vinduesprocent ved forskellige g-værdier. Stiplede linjer angiver grænse ved 15 % korrigeret glas-gulv %, mens fuldtotrukne linjer angiver grænse ved termisk krav på 100 h > 26 C.

Selve værktøjet blev brugt sideløbende i dette projekt, og beslutningerne er derfor taget uafhængigt af overvejelser man har fået fra værktøjet. Selve værdien og den nye tilgang med værktøjet er dog blevet belyst.



På baggrund af brugen af værktøjet, er interessenterne kommet med feedback. I værktøjet er der i øjeblikket anvendt symmetriske venstre- og højreskygger. I fremtidige versioner bør det være muligt med ikkesymmetriske venstre- og højreskygger.

## 11 Håndtering af robusthed

I projektet er det undersøgt hvordan robusthed skal håndteres på projektniveau (bygningens sensitivitet på usikkerhed). Eksempler på dette er eksempelvis brugeradfærd, afvigelse mellem projekteringsforudsætninger og faktiske forhold, samt vejrforhold.

Ved brugeradfærd menes der parametre som brugerne af bygningen har indflydelse på. Dette kan eksempelvis være fravigelse fra setpunkter antaget i projektet, hvor der kan være en tilbøjelig til at overstyre setpunkter på radiatorer, solafskærmning mm. samt anvende naturlig ventilation. Dette gøres ofte i korte perioder af tid, og kan derfor være suboptimalt for indeklimaet på længere sigt, og samtidig have en negativ påvirkning på energiforbruget af bygningen.

Derudover foretages der nogle antagelser i projekter, blandt andet baseret på Branchevejledningen for Indeklimaberegninger, hvor der blandt andet antages en samtidighed for personer og interne belastninger, samt standby-forbrug. Det er derfor vigtigt at undersøge robustheden af bygningen når der fraviges fra disse antagelser, da der altid vil være tilknyttet en usikkerhed på sådanne parametre. Dette indebærer blandt andet personlast, interne belastninger, vejrforhold, setpunkter og skyggeforhold. Ved anden anvendelse af bygningen, eller ændring i omgivelserne, kan der ske en markant ændring i disse antagelser der er foretaget i projektet og bygningen skal derfor være robust over for sådanne ændringer.

Afslutningsvis foretages der antagelser på vejrforhold, som er bestemt ved lovgrundlag for energirammeberegninger og indeklimaberegninger. Når disse beregninger laves, dimensioneres der på baggrund af et DRY standardår. Da der i virkeligheden aldrig forekommer et standardår, vil der altid være afvigelser for en simulering og de faktiske forhold.

Robustheden af bygningen kan vurderes på baggrund af ovenstående forhold, enten hver for sig eller en kombination heraf.

### 11.1 Afgrænsning

Ved undersøgelse af robusthed, afgrænses der blandt andet fra stokastiske brugsprofiler og komplekse bruger-overstyrede styringsstrategier. I et afgangsspeciale fra Build, blev det konkluderet at stokastisk tilstedeværelse på dags- og månedsniveau ikke betyder noget når der aggregeres på årsniveau, når den totale last holdes konstant (Sørensen, Myhre, Jensen, & Østergård, 2017). Branchevejledningen vil derfor fortsat stadig anvendes som grundlag for fastsættelse af brugsprofiler, og simuleringer vil i forvejen ikke kunne anvendes til at forudsige faktisk performance, men bruges i stedet for som et hurtigt værktøj til at sammenligne forskellige designmuligheder.

### 11.2 Konkret håndtering

Ved brugen af en multi-variabel tilgang, er vi allerede et stort skridt imod robuste bygninger, da vi i højere grad undersøger spændet for mulige løsninger, samt hvilke tiltag der har en markant effekt på de bestemt outputparametre.

Derudover muliggør værktøjet at man nemt kan omsætte de anbefalinger som der foreslås i Branchevejledningen til blandt andet samtidighed af personbelastning, og det er generelt nemt at

trykprøve ens design med variation på inputs og forudsætninger, som eksempelvis de tidligere nævnte antagelser der kan foretages i løbet af projektet.

Hvis vejret betragtes som en variabel, kan man se længere end den indtil videre forudsatte DRY 2013 vejrfil, og inkludere undersøgelser af fremtidige vejrforhold. Da der i stigende grad opleves mere ekstremt vejr, og ens bygninger typisk dimensioneres med en levetid på 50 år, kan fremskrevet vejrforhold bruges til at give indblik i disses indflydelse på overtemperaturer og samlet energiforbrug. Såfremt vejråret har en væsentlig indflydelse, kan dette ændre på ens designvalg, for at opnå en mere robust og fremtidssikret bygning.

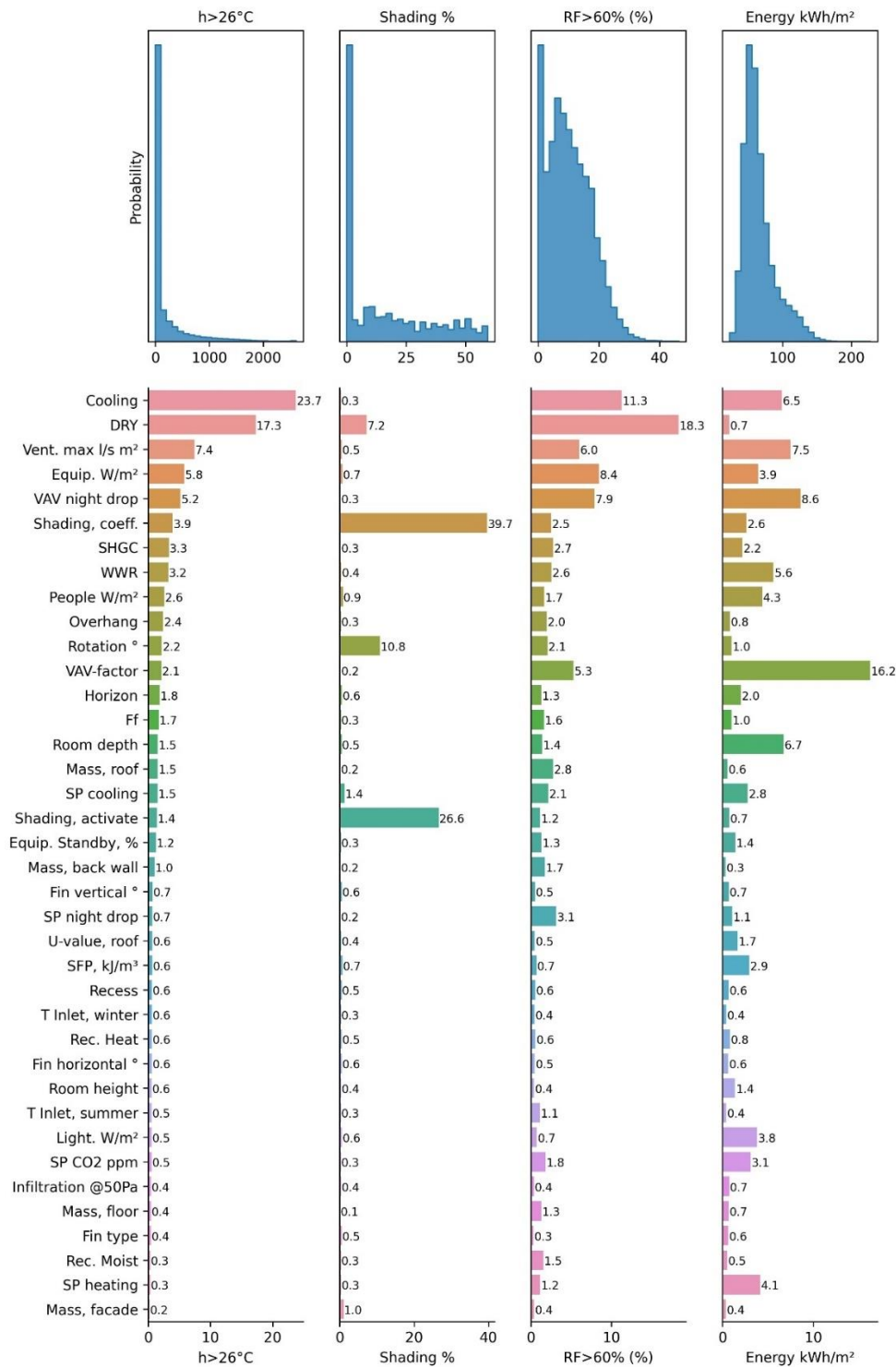
I litteraturstudiet blev der undersøgt hvordan man kunne håndtere robusthed ved at kvantificere det med forskellige metrikker, samt at bruge disse metrikker i en multi-variabel designkontekst, hvor flere outputs er relevante og af betydning.

I nærværende projekt er det fraviget fra disse metrikker, og der er i stedet for anvendt den stokastiske tilgang, hvor et designrum undersøges og hvilken indflydelse en ændring i designparametrene har på ens performance-kriterier.

På denne måde, er det nemt at få et indtryk at hvilken indflydelse forskellige designparametre har på hvert performance-kriterie. I forlængelse af den stokastiske tilgang, kan der anvendes følsomhedsanalyse, således at man kan kvantificere hvilke parametre der har en stor betydning for ens performance-kriterier, både på hvert enkelt kriterie eller på samtlige på én gang. Dette giver ligeledes en fornemmelse af robustheden af ens design, da man kan skrue på dem der har en høj følsomhed, eller undgå at skrue på disse hvis de har en negativ indvirkning på ens performance-kriterier.

I den forbindelse er det vigtigt ikke at vælge designforslag, som kun lige overholder minimumskravene for bygningen. Ved en ændring af ens designparametre, og særligt de meget følsomme parametre, kan man ende med at overskride disse krav.

Denne tilgang er undersøgt og afprøvet, hvor der eksempelvis er lavet en følsomhedsanalyse på datasættet med generiske rum på de 37 parametre nævnt i Tabel 1, se Figur 17. Følsomhedsanalysen viser at særligt visse parametre er vigtige ift. blandt andet den termiske komfort, som eksempelvis køling, ventilationsmængden og de interne belastninger.



Figur 17. Følsomhedsanalyse for forskelligartede outputs ved inklusion af vejrdata-år som variabel "DRY".

MOE A/S

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
 DK-8000 Aarhus C  
 +45 8750 8700  
 CVR: 64 04 56 28  
 www.moe.dk

## 12 Konklusion

Formålet med projektet var at udvikle metamodeller for generiske rumtyper, til at vurdere energibehov og indeklima.

I dette projekt er der defineret hvad der menes med generiske rumtyper, samt eftervist at disse opnår sammenlignelige resultater som fås fra faktiske simuleringer af komplekse geometrier. Derudover er der eftervist at machine learning kan anvendes til at træne metamodeller på disse generiske rum, og opnå resultater der tilnærmelsesvis er de samme resultater som opnået fra de faktiske simuleringer. Disse metamodeller har en høj  $R^2$ -værdi, og er derfor vurderet at kunne anvendes til at danne en stor mængde metamodeller til at træffe beslutninger tidligt i designfasen, hvorved bedre løsninger for bygninger opnås.

På baggrund af denne tilgang, med generiske rum og metamodeller, er der udviklet et værktøj i Google Colab, se Bilag C – Udvikling af prototype, som kan bruges af rådgivende ingeniører til hurtigt at danne tusindvis af metamodeller. Dette muliggør at man hurtigt kan viderefremde påvirkningen af ens designparametre, hvorved beslutningstagere nemmere kan foretage bedre beslutninger igennem hele projektførelsen.

Hvor man tidligere har brugt tommelfingerregler og mavefornemmelser, muliggør dette projekt at man kan optimere energiforbrug og indeklima i samspil med hinanden.

Det udviklede værktøj er anvendt på virkelige cases, hvor værktøjet er brugt til at træffe beslutninger der har en indflydelse på energibehovet og indeklimaet på rummene der blev undersøgt. Feedback for interessenter har været positiv, og de har kunne se værdien som dette værktøj har og kan skabe.

Afslutningsvis er håndteringen af robusthed undersøgt, hvor der er brugt den stokastiske tilgang, hvor man har sine simuleringer og nemt kan visualisere hvad der sker når man skruer på forskellige parametre, samt sætter restriktioner herpå. Hertil er brugen af følsomhedsanalyse anvendt, hvor det kan bruges som værktøj til at identificere de designparametre der har størst indflydelse på sine performance-kriterier. Med denne information, og den stokastiske tilgang, til man opnå løsningsforslag der er robuste over for ændringer i ens bygning, hvis man ved hvilke designparametre man kan skrue på og hvilken og hvor stor indflydelse denne ændring har.

### 12.1 Fremtidigt arbejde

Udover det der er lavet i dette projekt, har værktøjets udvikling og feedback fra interessenter givet anledning til fremtidigt arbejde der kan skabe kvalitet og øget værdi af værktøjet. Dette vil i det følgende beskrives.

Dannelsen af en API vil gøre det muligt at bruge værktøjet direkte i andre programmer, som eksempelvis Revit, Excel, Dynamo, Grasshopper og PowerBI. Dette vil gøre det muligt for blandt andet arkitekter at få hurtigt feedback på ændringer. Da man tidligt i designfasen er præget af stor usikkerhed, vil det gøre det muligt for arkitekten at hurtigt danne løsningsforslag. Ved brug af værktøjet kan man derfor få respons på ændringernes effekt. Dette vil spare tid, da ingeniøren traditionelt set ellers skulle lave en ny simulering på baggrund af arkitektens ændringer.

Tidligere i rapporten blev det beskrevet at værktøjet i øjeblikket ikke kan medtage alle rum, og der blev derfor fokuseret på et enkelt rum i de udvalgte cases. Dette skal i fremtiden udvides, således at

værktøjet kan fungere på samtlige rum, og ikke blot enkelte ad gangen. Herved vil det være muligt at vurdere indeklimaet for hele bygningen ved brug af metamodeller.

Fremtidigt bør værktøjet opdateres til at følge med udviklingen af og brug af BPS-software, da MOE i fremtiden vil anvende BSim mindre og i højere grad anvende EnergyPlus. Derudover er der stigende fokus i forskellige BPS-sofwares på at inkludere parametervariation og det bliver derfor mere tilgængeligt og lettere. Dette kan værktøjet gøre brug af, og det skal derfor fremtidssikres ift. dette aspekt. Afslutningsvis skal der medtages flere performance-kriterier for bygningen, herunder dagslys og LCA, for at medtage endnu flere kriterier for indeklimaet, samt at medtage bæredygtighed som kriterie, da man i fremtiden skal dokumentere LCA'en for nybyggeri, og overholde krav til dette.

### 13 Perspektivering

I dette projekt har der været positiv feedback fra interessenter og samarbejdspartnere, hvilket illustrerer forretningspotentialer i værktøjet, og at det kan bruges effektivt i et byggeprojekt. Værktøjet skaber værdi i form af at det kan bruges til at tage bedre og informerede beslutninger løbende i processen, og inkludere flere løsningsforslag end hidtil muligt med traditionelle tilgange.

Under projektførelsen, og særligt i casen vedrørende Rengsborgsgade, blev potentialer for at anvende værktøjet til renoveringsopgaver belyst. I starten var tanken med værktøjet at det skulle anvendes til nybyggeri, men i form af at værktøjet kan undersøge langt flere designmuligheder og løsningsforslag end hvad er rentabelt ved manual gennemgang af simuleringer, kan løsningsforslag hurtigt undersøges samt hvad der skal til for at opfylde performance-kriterierne. Mulighederne for anvendelse af værktøjet til renoveringsopgaver bør derfor undersøges.

Afslutningsvis muliggør værktøjet at inkludere nogle af de mange usikkerheder der opstår i projektet, så man kan undersøge hvordan disse usikkerheder påvirker projektet, og derved undgå nogle af de faldgruber som man ellers er tilbøjelig til at falde i.

**Bilag A – Formidlingsaktivitet**

Publicerede videnskabelige artikler skrevet i projektperioden

NMA	Ultimo 2022	IBPSA
NMA	01-09-2021	Consistency in early simulation inputs with statistical analyses of historical models: Reducing the impact of mental models and simulation settings

Artikler med angivelse af i hvilke magasiner (med datering)

KER	24-06-2021	ING/FacilityTech 24. juni 2021
KER	11-06-2021	MOE hjemmeside
KER	11-06-2021	Elforsk hjemmeside

Øvrige formidlingsaktiviteter.

TOD	21-04-2021	AAU Rengsburgsgade
TOD	15-10-2021	Endelig præsentation for afdeling
TOD	04-02-2021	MOE C-BIM Erfamøde
TOD	26-02-2021	MOE Artelia - Sustainable expertise workshop - Parametric design

and simulations

TOD	23-11-2020	Følgegruppemøde
TOD	15-10-2021	Introduktion og opdatering til EBI-kolleger

Dette projekt er gennem forskellige aktiviteter blevet formidlet til diverse interessenter. Den primære formidling er gennem artikler både i forskningshenseende og formidling til branchen. Hertil kan nævnes to forskningsartikler af Nanna Dyrup Svane, hvor den ene, "Consistency in early simulation inputs with statistical analyses of historical models: Reducing the impact of mental models and simulation settings", er blevet udgivet og den anden forventes udgivet ultimo 2022.

Derudover er projektet formidlet til branchen igennem Ingeniøren/FacilityTech, MOE's egen hjemmeside og på ELFORSK's hjemmeside.

Øvrige formidlingsaktiviteter indebærer blandt andet interne formidlinger i MOE, hvor der har været introduktion til projektet, følgegruppemøde, workshop, erfaringsmøde samt en endelig præsentation for de relevante afdelinger i MOE.

Viden tilegnet under, og anvendt i projektet, har ligeledes været anvendt i undervisningen på Aalborg Universitet, på uddannelserne indenfor Byggeri og Anlæg, Building Energy Design og Arkitektur og Design med i alt cirka 200 studerende per år.

Projektparterne planlægger på baggrund af de positive resultater for dette projekt, at søge et erhvervsPhD-projekt der vil bygge videre på de opnåede resultater.

**MOE A/S**

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
DK-8000 Aarhus C  
+45 8750 8700  
CVR: 64 04 56 28  
www.moe.dk

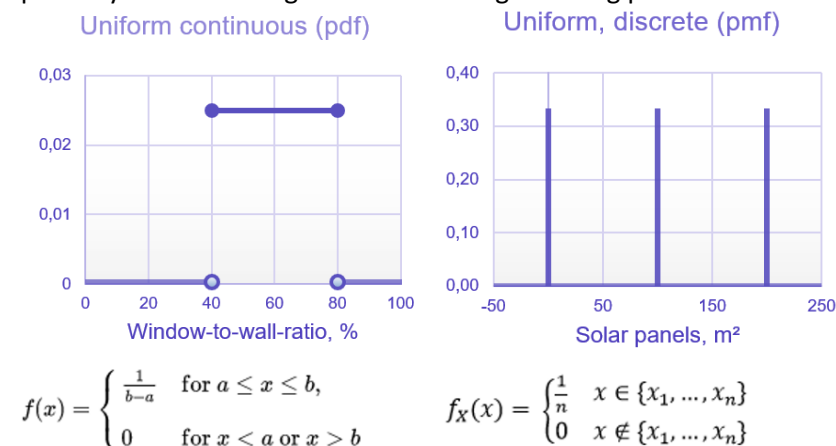


## Bilag B – Definition af inputs for generiske rum

Dette bilag beskriver hvorledes de variable inputs er defineret i forbindelse med Monte Carlo simuleringerne af det generiske kontorrum med vinduer i én facade. Hertil kommer beskrivelser af udvalgte fastlagte inputs. De beskrevne værdier og variationer har været anvendt til at lave den nuværende prototype. Brugen af værktøjet har afsløret mulige ændringer og forbedringer af designvariablene. Derfor vil der for nogle inputs være angivet forslag til ændringer til næste iteration af simuleringer og dermed forbedrede generiske modeller.

### B.1 Variable inputs

De variable inputs er enten defineret ved lineære, kontinuerte frekvensfunktioner (probability density functions) eller vægtede, diskrete funktioner (probability mass functions), se Figur 18. Mange variable er defineret med, til tider vægtede, diskrete værdier. Det er typisk for at lave træningssættet til machine learning algoritmen på en måde, så træningssættet dækker over de mest sandsynlige værdier i virkelige cases. Der er i en undersøgelse af metamodellerne konkluderet at der godt kunne interpoleres imellem de diskrete værdier, så anvendelse af diskrete værdier frem for kontinuerte spænd synes ikke at begrænse anvendeligheden og præcisionen af metamodellerne.



Figur 18 Venstre) Eksempel på kontinuert, lineær frekvens funktion, der beskriver en variabel, der kan variere uniformt fra 40 til 80. Højre) Diskret funktion som beskriver en variabel, der kan antage værdierne 0, 100 og 200 med lige stor sandsynlighed (vægt). Højden angiver "vægten" af de mulige variable. Nedenfor ses de teoretiske definitioner.

#### B.1.1 Geometry – Orientation

Orientering af facaden kan variere fra 0 til 350° i trin af 10°, hvor 0° svarer til sydvendt facade. Grunden til at orientering foregår i skridt og ikke kontinuert, skyldes samspillet med setpunkter for aktivering af solafskærmningen. Se "Shading, activate" for detaljer.

#### B.1.2 Geometry – Room height

Rumhøjden er varieret fra 2,7 m til 3,3 m i trin af 0,1 m. Afrundet til 0,1 m trin, da "opløsningen" sjældent vil være mere præcist end det.

Baseret på historisk studium af BSim modeller. (Svane, Østergård, & Jensen, 2021)

#### Ændringsforslag

Det foreslås at øge den øvre grænse til 3,5 m og evt. i trin af 0,05 m.

### B.1.3 Geometry – Room Depth

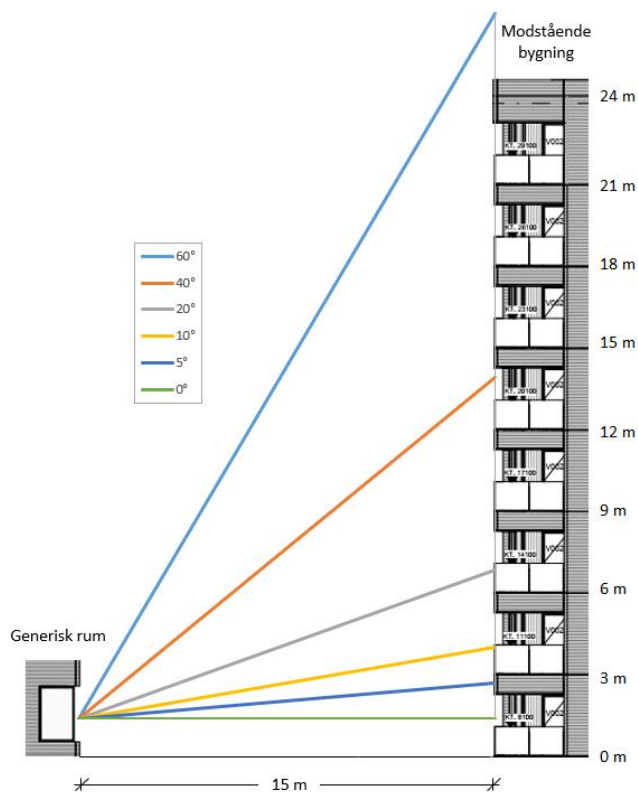
Rumdybden er varieret kontinuert fra 3 til 8 m.

#### Ændringsforslag

Det foreslås at ændre den øvre grænse til 10 m.

### B.1.4 Shades – Horizon

Modstående bygninger og andre modstående skyggegivere er modelleret som en lang bygning med lige overkant. Skyggen er defineret ved en vinkel målt midt fra vinduet, jf. Figur 19. Følgende værdier er anvendt: 0, 5, 10, 20, 40 og 60°. Den øvre grænse på 60° er større end de maksimalt 56° grader, som solen kan stå på himlen i Danmark. Højere værdier vil derfor ikke have nævneværdig betydning.

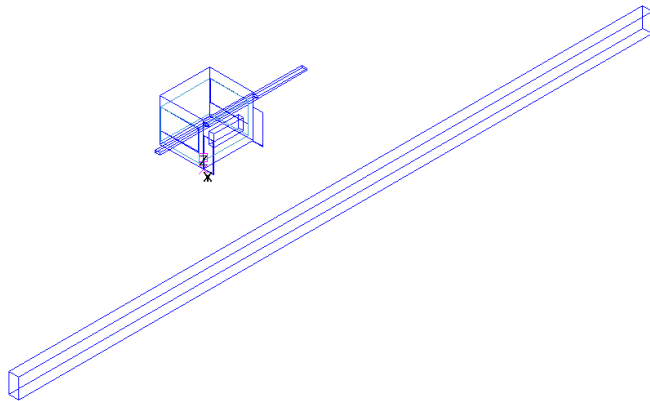


Figur 19. Eksempel på hvad vinklerne svarer til, hvis der er en 8 etagers høj bygning 15 m væk.

Skyggen er i modellen placeret 10 m væk og er 75 m bred. De 10 m giver plads til at lave sideskygger for vinduet på 75°, hvilket svarer til 9,33 m. Vinklen er målt fra centrum af vindue placeret midt i 5,1 m (inklusive 0,05 m sidevægge).

#### MOE A/S

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
DK-8000 Aarhus C  
+45 8750 8700  
CVR: 64 04 56 28  
www.moe.dk

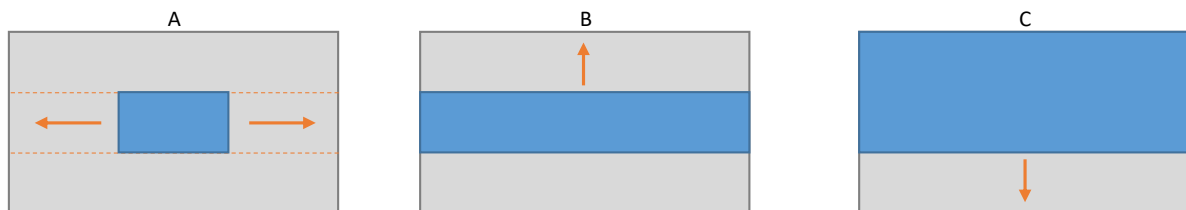


Figur 20. Eksempel på lavt udhæng - her  $0^\circ$  ift. vinduets center.

### B.1.5 Shades – Overhang

Udhænget er modelleret med vægtet, diskret fordeling med følgende værdier:  $0, 0, 0, 0, 0, 20, 30, 40, 50$  og  $60^\circ$ . Således bliver halvdelen af de Monte Carlo genererede simuleringer uden udhæng ( $0^\circ$ ), og den anden halvdel varierer så fra  $20$  til  $60^\circ$ .

Vinklen er igen målt midt fra vinduet, men vinduets højde kan variere (se variabelen "Window-wall-ratio" og Figur 21). Det er således ikke entydigt, hvor dybt et udhæng disse vinkler vil svare til. Udhænget vil desuden også kunne ligge ved vinduet overkant eller i en ukendt afstand længere oppe end vinduets overkant. Grænserne på  $20$  og  $60^\circ$  er fastlagt ved at betragte udhæng på  $0,5$  til  $1,5$  m liggende lige over vinduet, som så har kunne variere fra minimumshøjde til makshøjde. Som vist i Tabel 2 varierer vinklen i disse til fra ca.  $15,1$  til  $68,2^\circ$ .



Figur 21. Udbredelsen af det variable, centrerede vindue.

Tabel 2. Eksempler på sammenhæng mellem udhængsdybde og vinkel, når udhænget ligger ved vindueshullets overkant.

Udhæng	Udhæng	Vinkel
0,6	0,00	0,0
0,6	0,25	22,6
0,6	0,50	39,8
0,6	1,00	59,0
0,6	1,50	68,2
1,85	0,00	0,0
1,85	0,25	7,7
1,85	0,50	15,1
1,85	1,00	28,4
1,85	1,50	39,0
1,05	0,00	0,0
1,05	0,25	13,4
1,05	0,50	25,5
1,05	1,00	43,6
1,05	1,50	55,0

### Ændringsforslag

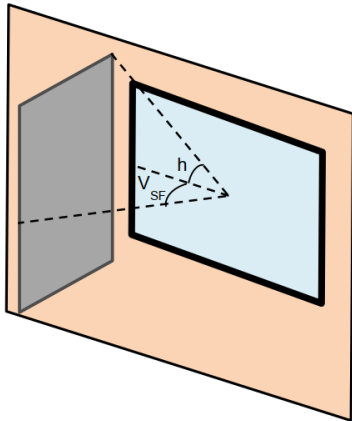
I et sideløbende erhvervsPhD-projekt, er det vist at man nøjes med modellere et simpelt udhæng frem for en masse vandrette lameller. Når sådanne lameller omregnes til udhængsvinkler, skal den øvre grænse nok øges.

#### B.1.6 Shades – Types of side fins

”Side fins” kan dække over lodrette lameller, sideskygger og egenskygge fra bygningen selv. ”Type of side fins” er et kategorisk valg imellem følgende:

- Ingen sideskygger: Vægtet 50%, så halvdelen af simuleringerne laves uden sideskygger
- Højreskygge: Vægtet 1/6-del
- Venstreskygge: Vægtet 1/6-del
- Begge sider: Vægtet 1/6-del. Både venstre og højreskygge med ens udstrækning.

Såfremt der er sideskygge(r), skal udstrækningen af denne/disse beskrives ved to vinkler, vertikal og horisontal, på samme måde som ved beregning af dagslys efter 10%-reglen (Johnsen & Lumbye, 2019).

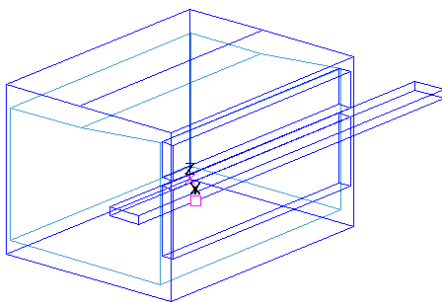


Figur 22. Sideskyggens udstrækning defineres ved henholdsvis en vertikal vinkel fra midten af vinduet til overkanten af sideskyggen og horisontal skygge fra midten af vinduet til sideskyggens forkant. (Johnsen & Lumbye, 2019)

Sideskygger er altså afgrænset til at være "rektangulære" størrelser, hvilket eksempelvis ikke vil være retvisende, hvis man har en "sidefacade", der trapper ned med etagerne. Sådanne tilfælde er dog sjældne, og en detaljeringsgrad på niveau med anvisningen for 10% dagslys synes at være en passende tilnærmelse.

### Ændringsforslag

En mulig tilpasning kan være at kunne variere venstre- og højreskygger uafhængigt af hinanden, så man mere retvisende kan angive disse for rum, der vender ud mod et bredt gårdrum. Se eksempelvis de dele af facaden på Figur 15, der er placeret længst mod venstre og højre. Dog vil sådanne to uafhængige sideskygger hver have to vinkler, hvorved der skal defineres yderligere to inputs til træningssættet. Det vil besværliggøre træningen af metamodelerne, da det kan blive nødvendigt at træne særskilte metamodel for denne case, hvilket synes at være for omfattende. Det vurderes således passende at beskrive sådanne rum med enten den største sideskygge eller kritiske sideskygge ift. orientering (+ evt. horisontvinkel) eller ved at anvende ens vinkler ved brug af ovennævnte "Begge sider" variant.

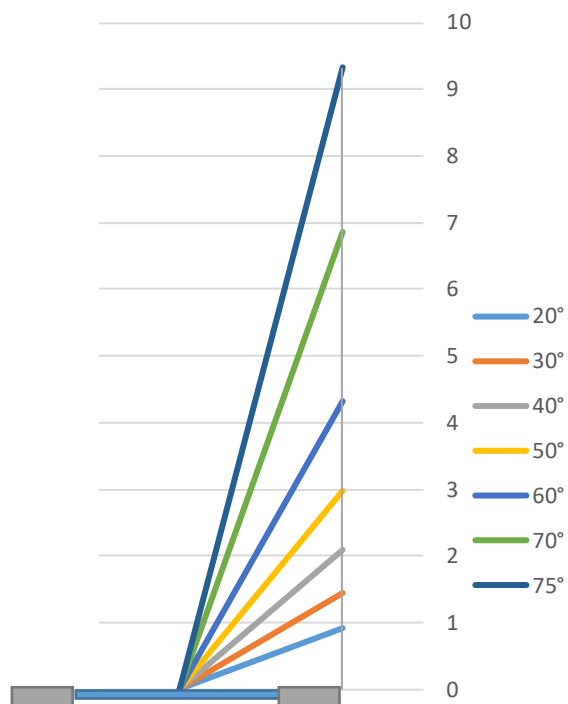


Figur 23. Eksempel på model med to vinduer hhv. med/uden udhæng.

### B.1.7 Shades – Horizontal angle

Den horisontale vinkel for sideskyggen/rne kan variere kontinuert og uniformt i intervallet 20 til 75° (se Figur 22). Dog vil disse ikke bliver modelleret for de Monte Carlo samples hvor "Type of side fins" er "None". Dvs. prøvetagningen for "Type of side fins" har førsteprioritet og sideskyggenes vinkler sættes til 0°, når "Type of side fins" er "None".

Variationen af sideskygger vist på Figur 24.



Figur 24. Horisontalt snit af 5 meter bred facade med illustration af forskellige sideskyggers udstrækning målt i meter og grader.

### Ændringsforslag

Det foreslås af udvide spændets grænser mere for at omfatte rum i midten af lange facader (nedre grænser) og rum i hjørnet af lukket gårdrum eller åbent 3-sidet gårdrum (øvre grænse).

#### B.1.8 Shades – Vertical angle

Den vertikale vinkel for sideskyggen/rne kan variere kontinuert og uniformt i intervallet 20 til 80° (se Figur 22). På samme vis som den horisontale vinkel, vil disse ikke bliver modelleret for de Monte Carlo samples hvor "Type of side fins" er "None".

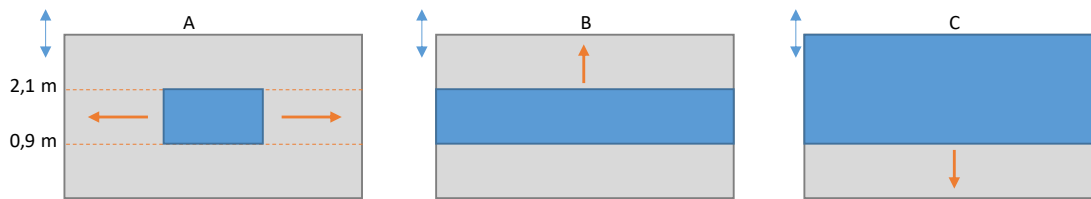
#### B.1.9 Windows – Window-wall-ratio/percentage

Der modelleres kun ét centralplaceret vindue for det generiske rum, selv om det skal kunne repræsentere mange forskellige kombinationer af vinduesantal og placeringer. Denne forsimpning vil næppe give god overensstemmelse ved dagslyssimuleringer, men i forhold til soltilskud og dermed termisk komfort og energibehov, har det begrænset betydning. Valideringen med faktiske cases indikerer i al fald at denne simplificering er acceptabel.

Vinduets placering i facaden afhænger af størrelsen på "Window-wall-ratio" og rumhøjden (se Figur 25). For de mindste vindueshuller modelleres vinduet med en underkant på 0,9 m og overkant på 2,1 m (scenarie A). Herefter vurderes det mest sandsynligt at man øger opad for at få lyset dybere ind i rummet (scenarie B). Endeligt udvides rummet nedad (scenarie C).

#### MOE A/S

Mariane Thomsens Gade 1C, 1.  
DK-8000 Aarhus C  
+45 8750 8700  
CVR: 64 04 56 28  
www.moe.dk



Figur 25 Udbredelsen af det variable, centrerede vindue.

### Ændringsforslag

I sideløbende erhvervsPhD-projekt foretages igangværende analyser om forskellige måder at variere vinduets placering og udbredelse på og hvordan det passer med faktiske rum med ét vinduer og flere vinduer. Erfaringen fra disse studier kan indarbejdes i fremtidige modeller.

Der kan i realiteten forekomme rum med vinduer, der har særligt differentierede skygger, eksempelvis to vandrette bånd med og uden udhæng. Dette vurderes igen at være et fåtal i det store billede og man vil formentlig kunne få nogenlunde tilnærmede estimater ved at angive skyggeforhold for det største vindue. Men ellers kunne der trænes en særskilt model med to vinduer, som man kunne angive flere detaljer for.

#### B.1.10 Windows – Frame Factor

Glassets andel af vindueshullets angives med "Frame factor", som kan variere fra 0,65 til 0,9 i trin af 0,01.

Bemærk: I tidligere iterationer anvendtes "karmbredde" som variabel, hvilket dog er misvisende, når der skal generaliseres for ét til flere vinduer, hvis højde-bredde forhold ligeledes ikke kan overføres til generisk model.

### Ændringsforslag

I test på de virkelige cases blev der fundet værdier på ca. 0,93. En analyse af fem projekter med i alt 90 forskellige typer vinduer, blev der fundet værdier fra 0,64 til 0,94. Denne analyse kan udvides til at omfatte langt flere projekter, hvorved der kan laves en fordeling på et større grundlag. Ud fra denne kan karmfaktorens spænd forfines, og evt. tilpasses en anden frekvensfunktion end den uniforme, hvis dataene giver grundlag for dette.

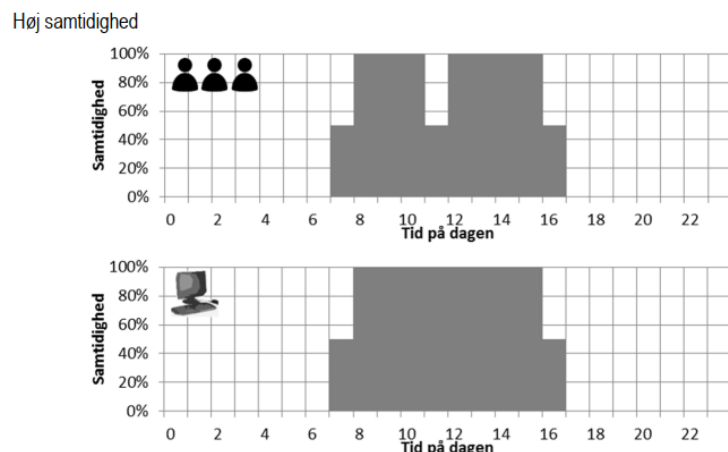
#### B.1.11 Windows – Recess

Glassets tilbagetrækning ift. til facaden er sat til at kunne variere med følgende ens-vægtede, diskrete værdier: 0,001, 0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,3 og 0,4. Det er således indenfor grænsen for vægtykkelsen som er fastsat til 0,5.

#### B.1.12 Brugstider

I Branchevejledningen fremgår anbefalinger til fastsættelse af brugstider, med lav, middel og høj samtidighed. I dette projekt anvendes disse anbefalinger derfor, således at denne parameter kan fastsættes. I nærværende projekt er anvendt høj samtidighed, hvilket vil sige 100% i de mest ekstreme tilfælde. Brugsprofilen med en høj samtidighed er illustreret på Figur 26.

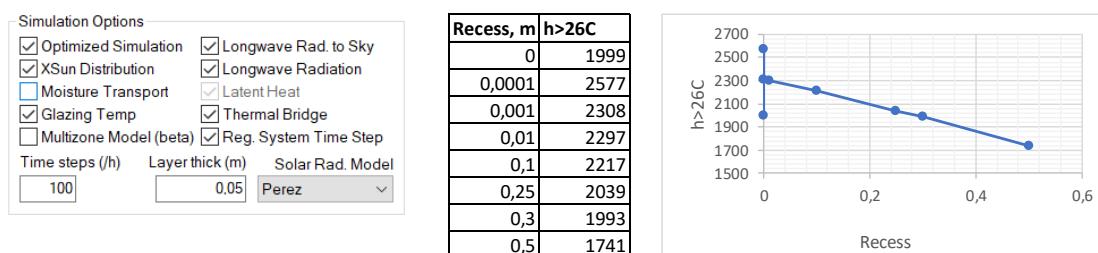




Figur 26. Brugsprofiler for personer og udstyr, med høj samtidighed. (Vorre, et al., 2017)

### B.1.13 Facadetykkelse

En kort analyse har afsløret, at meget lave værdier for recess i BSim kan give misvisende resultater, som illustreret med Figur 27.

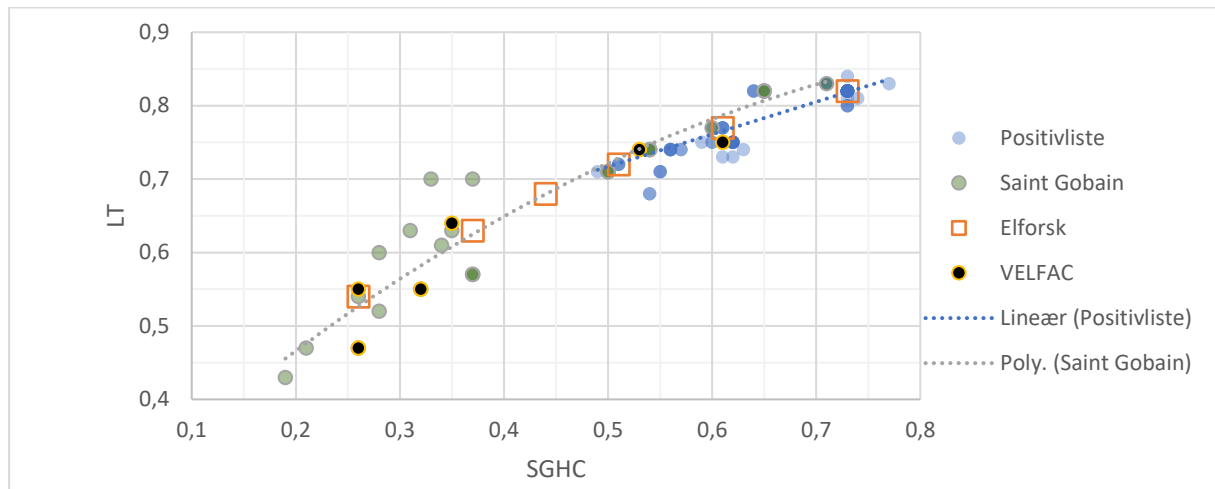


Figur 27. Analyse af tilbagetrækningens betydning for antal timer med overtemperaturer for enkelt case.

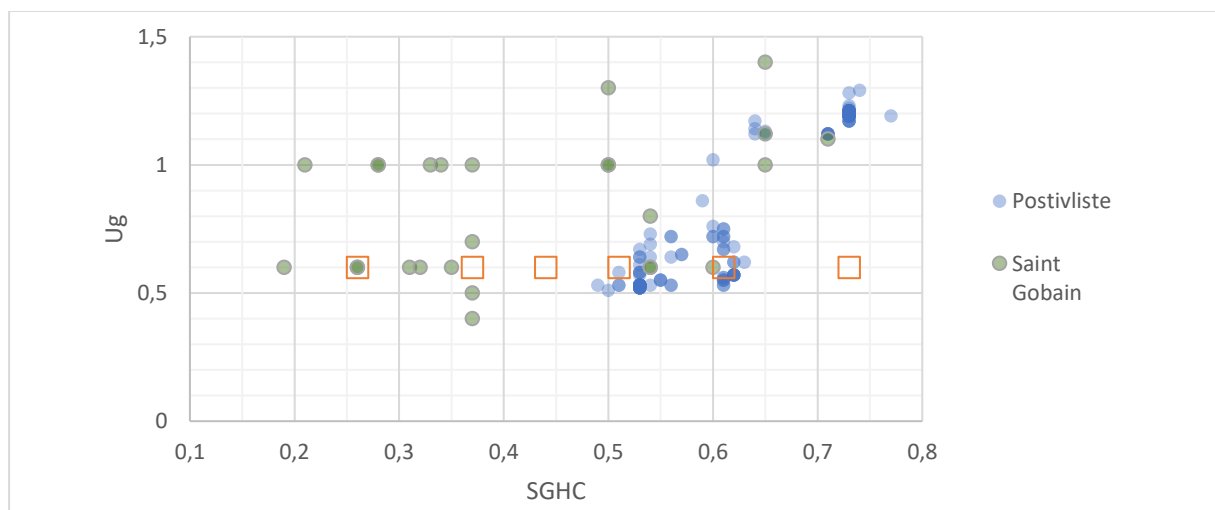
### B.1.14 Windows – Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

I BSim defineres vinduer i en databasefil, der er særskilt fra den XML-fil, som ellers beskriver modellens inputs. Det er kun XML-filen, der bliver varieret i Monte Carlo simuleringerne, mens databasen forbliver uændret. Konstruktioner og vinduer skal således fastdefineres, og det er kun referencerne til disse, der ændres i XML-filerne. Der skal således laves et forudbestemt antal konstruktionstyper og vinduestyper.

Vinduets g-værdi (SHGC) har væsentlig betydning for energibehovet og indeklimaet, men det er vanskelig at definere altomfavnende glastyper på forhånd, grundet g-værdiens korrelation med lystransmittans og Ug-værdi. Figur 28 og Figur 29 viser sammenhænge for i alt 162 glastyper, som stammer fra den danske "Positivliste" samt producentdata fra Saint Gobain og Velfac.



Figur 28. Sammenhæng imellem g-værdi (SHGC) og lystransmittans (LT) for 162 vinduer.



Figur 29. Sammenhæng imellem g-værdi (SHGC) og glassets U-værdi (Ug) for 162 vinduer.

Ud fra ovenstående sammenhænge har vi defineret seks forskellige rudetyper, hvis egenskaber er vist på Tabel 3. Egenskaber for udvalgte ruder Der skal bemærkes følgende:

- g-værdien omkring 0,44 er ikke fundet blandt de undersøgte vinduer, men er taget med af to årsager: 1) i en lang facade vil der kunne være to forskellige vinduer, 2) der undgås et stort spring, hvilket potentielt vil gøre metamodelen bedre til at interpolere imellem de mere reelle værdier på 0,37 og 0,51.
- U-værdien er fastholdt, da det er den samlede U-værdi for vindueshullet, der er relevant. Denne vil afhænge af flere faktorer (f.eks. karmen og linjetab). Der vælges i dag oftest 3-lags glas ved kontorbyggeri, hvor Ug vil være tættere på 0,6 end 1,1, som ellers optræder ofte. U-værdien har ubetydelig indflydelse på risikoen for overtemperaturer, men kan have lidt betydning ift. opvarmningsbehovet, hvilket dog også er beskedent for et kontorbyggeri, hvor de interne laster typisk er relativt høje. Ønskes variation på varmetabet for det generiske rum, kan der i stedet justeres på U-værdien for taget.

- Lystransmittansen har primært betydning for dagslyset, og vil i denne sammenhæng kunne have begrænset betydning ift. dagslysstyring, hvis SF-faktorer opdateres i det enkelte simuleringer.

Tabel 3. Egenskaber for udvalgte ruder

<i>g-værdi</i>	<i>LT-værdi</i>	<i>Ug</i>
0,26	0,54	0,6
0,37	0,63	0,6
0,44	0,68	0,6
0,51	0,72	0,6
0,61	0,77	0,6
0,73	0,82	0,6

### Ændringsforslag

Med Lerchesgade-casen sås et behov for at teste lavere g-værdier (ned til 0,17).

Ved gennemgang af Be18-modeller for alle MOE projekter kan der laves en fordeling over hvor hyppigt de forskellige værdier anvendes. Derved vil ovenstående kunne vægtes, så de mest sandsynlige værdier samples oftere.

I seneste setup er SF-faktorer ikke blevet opdateret løbende, hvilket bør gøres og formentlig vil forbedre præcisionen ift. særligt energiforbruget til belysningen.

#### B.1.15 Windows – Shading Coefficient

Afskærmningsfaktoren er modelleret med vægtes, diskret fordeling med følgende værdier:

0,15 – 0,2 – 0,25 – 0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,8 – 1 – 1 – 1 – 1 – 1 – 1 – 1

Således bliver halvdelen af de Monte Carlo genererede simuleringer uden solafskærmning, da 1 svarer til at 100 procent af lysets transmitteres. De øvrige værdier er baseret på branchevejledningen for indeklimasimuleringer.

### Ændringsforslag

I nuværende version laves halvdelen af simuleringerne ved at sætte Shading coefficient til 1 i halvdelen af prøvetagningen, mens Shading Activate kan antage en værdi fra 85 til 97, selv om Shading Coefficient er 1. Metamodellen vil således fitte til Shading Activate og laver estimer på baggrund af disse, selv om Shading Coefficient i en given case er 1 (dvs. ingen solafskærmning). I sådanne tilfælde vil metamodellen stadig kunne tro at Shading Activate har betydning for performance, og vil derfor kunne skønne lavere overtemperaturer ved Shading Activate er 85% end 97% selv om der ikke er solafskærmning i nogen tilfælde. Alternativt kunne man prøve at "slukke for" solafskærmningen ved at køre Shading Activate til 100% (dvs. den aldrig når at blive aktiveret). Det vil dog nok resultere i det samme blot for Shading Coefficient synes at have betydning selv om den aldrig bliver aktiveret. Et yderligere alternativ kunne være at lave endnu en selvstændig "tænd/sluk" variabel for solafskærmningen.

### B.1.16 Windows – Shading Activate

Solafskærmningen kan i BSim reguleres med fire forskellige systemer, men det er virksomhedens praksis at benytte den såkaldte "SensorCtrl". Afskærmningen bestemmes af lux-niveauet udvendigt på facaden, og denne styringsstrategi vurderes at være mest retvisende og udbredte ift. nybyggeri. Ved denne styring indstilles et lux-niveau for aktivering af afskærmningen (der køres ned) og endnu et lux-niveau for at deaktivere afskærmningen. Disse niveauer skal ikke ligge for tæt, da det vil resultere i hyppige ændringer af afskærmningen.

Med branchevejledningen for indeklimasimuleringer lægges op til at definere et maksimalt ønsket brug af solafskærmningen, så solafskærmningen primært kun er aktivt i det varmeste og/eller mest belastede perioder, så man bevarer udsynet og øger dagslyset mest muligt. Der lægges op til, at solafskærmningen kun er aktiv i enten 12% (ambitiøs), 20% (standard) og 30% (minimum) af brugstiden.

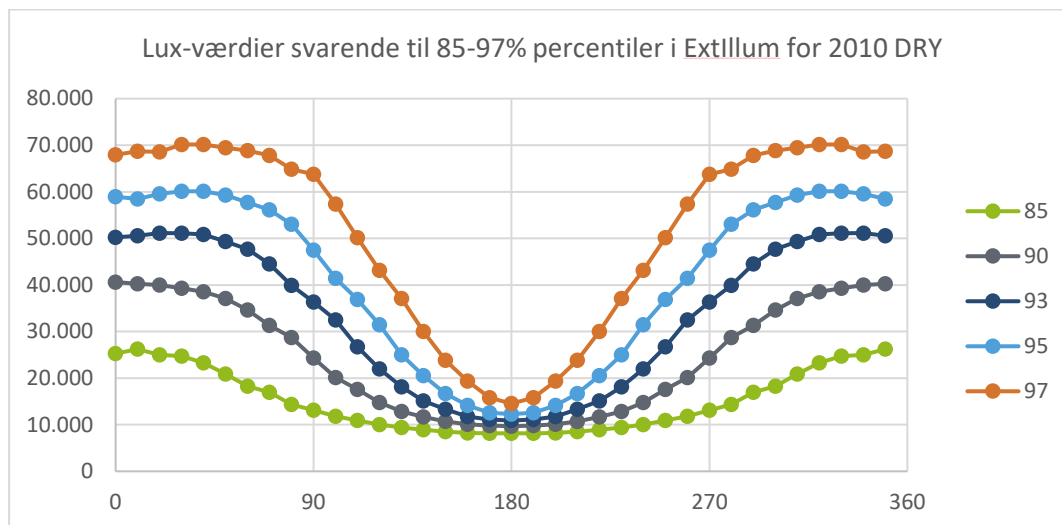
Hvis man ønsker at ramme f.eks. 12% af brugstiden med aktiv solafskærmning, vil modelløren kunne indstille på følgende parametre:

- Lux-niveau for aktivering
- Lux-niveau for deaktivering
- Brugstiden (for personer)
- Orientering, da lux-niveauet i høj grad afhænger af mængden af direkte sol
- Eksterne skygger (udhæng, sideskygger, modstående bygninger)

Ved bygningsdesign ønsker man typisk at vurdere effekten af solafskærmning ved forskellige ambitionsniveauer, som evt. vil være fastlagt af bygherre. For de generiske rum skal man således definere en designvariabel, der repræsenterer andelen af brugstiden, hvori solafskærmningen er aktiv. Dette er dog vanskeligt grundet de adskillige designvariable, som påvirker den aktive andel. Tilgangen er at definere lux-niveauerne med hensyntagen til de øvrige variable – særligt orienteringen. Brugstiden er fastsat, hvorfor den i dette projekt ikke får indflydelse. Omvendt kan de eksterne skygger variere på så mange måder, at lux-niveauet for en bestemt ønsket brugstid (f.eks. 12%) ikke kan bestemmes entydigt. Der ses i stedet bort fra eksterne skygger i første omgang. Dette håndteres i stedet for ved at kunne variere på omfanget at aktiv solafskærmningen som et "output" for simuleringerne (som der skal trænes en metamodel for). Under disse forudsætninger kan man definere passende lux-niveau for aktivering af solafskærmningen ved at se på fordelingen af lux-niveauer på facaden afhængig af dennes orientering. En analyse af disse har vist, at percentilen af lux-niveauet i brugstiden kan bruges til at ramme fastdefinerede andele med aktiv brugstid. Lux-niveauet til aktivering solafskærmningen bliver fastlagt som følger (hvor deaktivering sker ved den halve værdi):

- Med 97%-percentilen er solafskærmningen aktiv i ca. 12% af brugstiden
- Med 95%-percentilen er solafskærmningen aktiv i ca. 20% af brugstiden
- Med 93%-percentilen er solafskærmningen aktiv i ca. 30% af brugstiden
- Med 90%-percentilen er solafskærmningen aktiv i ca. 40% af brugstiden
- Med 85%-percentilen er solafskærmningen aktiv i ca. 50% af brugstiden

De sidstnævnte scenarier er medtaget for at kunne se effekten af at "pine" solafskærmningen. Figur 30 viser hvorledes percentilerne for lux-niveauerne varierer ift. orientering. For en given orientering og ønsket %-del af brugstid kan lux-niveauet for aktivering (og dermed også deaktivering) af denne sammenhæng.



Figur 30. Udvalgte percentiler af lux-niveau på facaden for det danske DRY-år inden for en brugstid fra 7.00 til 17.00 på hverdage.

Ved brug af værktøjet skal der naturligvis tages hensyn til eksterne skygger. Dette gøres så ved at stille krav til outputtet "Afskærmning i brugstid, %", hvor man så kan vælge f.eks. maksimalt 20%.

#### Ændringsforslag

I næste batch skal der samples uniformt i mellem 85 og 97% percentilerne (for given orientering). Så får man et mere kontinuert output, som man så kan betragte som krav.

#### B.1.17 Loads – People

Personlasten varieres uniformt i intervallet 10 til 25 W/m<sup>2</sup>. Grænserne svarer til hhv. 10 og 4 m<sup>2</sup>/person ved 100 W fri varmeafvigelse per person. I Branchevejledningen foreslås 6 til 10 m<sup>2</sup> pr. arbejdsplads inkl. gangarealer. Den historiske gennemgang af virksomhedens modeller har dog vist adskillige eksempler på større tæthed, og spændet er tilpasset herefter.

#### B.1.18 Loads – Equipment

Varmelasten fra udstyr varieres uniformt i intervallet 0 til 30 W/m<sup>2</sup>.

Branchevejledningen foreslår, at hver arbejdsplads inkluderer:

- 1 PC. Der kan regnes med 10 W for tablet, 30 W for bærbar, og 60 til 100 W for beregnings-PC
- 1 til 2 skærme á 25 W
- Evt. arbejdslampe på 5 til 15 W

Den mindste kombination af disse giver 35 W/arbejdsstation og den højeste giver 165 W/arbejdsstation. I sammenhæng med førnævnte variation på 4 til 10 m<sup>2</sup>/arbejdsstation, fås i ekstremerne hhv. 3,5 og 41,25 W/m<sup>2</sup>. Denne øvre grænse er dog vurderet at være urealistisk høj, hvilket også understøttes af de historiske modeller (hvor effekterne for det enkelte udstyr ofte har været højere). Den valgte grænse på 30 W/m<sup>2</sup> svarer til 165 W/arbejdsstation ved en tæthed på 5,5 m<sup>2</sup>/arbejdsstation, hvilket er en mere realistisk øvre grænse.

### **B.1.19 Loads – Equipment Standby**

Standby-effekten uden for brugstiden er modelleret med vægtet, diskret fordeling med følgende værdier:

1 – 1 – 1 – 5 – 10 – 25 %

Ofte er der ikke medregnet standby forbrug i simuleringerne, hvilket heller ikke tilskyndes af branchevejledningen. Derfor dannes halvdelen af simuleringerne uden standby-forbrug (1% er anvendt af praktiske årsager, da det kræver mere omfattende ændringer af BSim's disxml-fil at fjerne standby-effekten helt).

I praksis vil der dog altid være standby-forbrug, hvorfor det anbefales at kunne medregne dette. Dette bidrager også til at vurdere robustheden af bygningen overfor f.eks. uhensigtsmæssig brugeradfærd, når bruger ikke slukker for deres PC'er eller mere legitimt lader dem stå tændt for at kunne tilgå dem fra hjemmearbejdspladsen, som vinder frem. I et kandidatstudium blev elforbrug og standby-forbrug undersøgt for et storrumskontor, hvor elforbruget var fordelt på fire bi-målere. I den ene af disse var standby-forbruget op til 25%.

Således bliver halvdelen af de Monte Carlo genererede simuleringer uden standby-forbrug, da 1 svarer til at 100 procent af lysets transmitteres. Den øvre grænse på 25% virker høj, men et kandidatprojekt vist for et åbent storrumskontor med fire bi-målere, at standby-forbruget varierede for 20% og helt op til 49%. (Senberga, Krastina, Matuleviciute, Jensen, & Østergård, 2019)

### **B.1.20 Loads – Lighting**

Varmelasten fra belysning varieres uniformt i intervallet 3 til 6 W/m<sup>2</sup>.

Disse grænser er baseret på samtaler med elingeniører i virksomheden.

#### **Ændringsforslag**

De ovennævnte grænser er baseret på erfaring med at sikre 300 lux på arbejdspladsen. Der ses dog flere eksempler på ønske om 500 lux, hvor for den øvre grænse bør øges til 7 eller 8 W/m<sup>2</sup>.

Såfremt den generiske model skal omfatte både nybyg og renovering skal grænserne tilpasses herefter.

### **B.1.21 Loads – Infiltration**

Infiltrationen angives på samme vis som i Be18, dvs. ved trykprøvning på 50 Pa. Variablen kan her variere fra 0,4 til 1,0 l/s m<sup>2</sup>. Den øvre grænse svarer til BR18-grænsen.

#### **Ændringsforslag**

Trykprøver har vist endnu lavere værdier, så den nedre grænse kan evt. reduceres lidt. Men tvivlsomt om det kan retfærdiggøre så lave værdier i tidligt design. Infiltrationen har for belastede kontorrum dog kun en smule betydning for opvarmningsbehovet, og er helt ubetydelig ift. termisk komfort i nybyggeri.

Såfremt den generiske model skal omfatte både nybyg og renovering skal den øvre grænse hæves.

### **B.1.22 Ventilation – Cooling type**

Der kan angives følgende kølemuligheder:

1. Ingen køling
2. Køleflade på ventilationsanlægget med maksimaleffekt på 200 W/m<sup>2</sup>

### 3. Kølebafler med maksimaleffekt på 200 W/m<sup>2</sup>

De høje maksimaleffekter bygger på antagelsen om, at man ved brug af køl sikrer tilstrækkelig stor køleflade til at opretholde kølesætpunktet. Dog vil kølefladen (valgmulighed 2) være begrænset af den maksimale luftmængde, som også kan varieres.

Den maksimale effekt ændres således ikke som "input", men de maksimalt afsatte effekter for hhv. køleflade og kølebafler medtages som "output" fra simuleringerne, og der trænes metamodeller for disse. Man kan således i en given designsituation vurdere om de maksimalt benyttede effekter er acceptable. Man kan altså bortfiltrere de designkombinationer, hvor effekten overstiger f.eks. 60 W/m<sup>2</sup>, hvis dette under de givne forhold vil medføre træk eller på anden vis være for vanskelig at tilvejebringe.

#### B.1.23 Ventilation – Max. Air Change

Den maksimale ventilationsmængde kan varieres uniformt fra 2 til 8 l/s m<sup>2</sup> svarende til ca. 2,9 til 11,5 gange luftskifte i timen ved en rumhøjde på 2,5 m. Grænserne er ekstreme, men netop denne designparametre er en af de vigtigste, og det skal være muligt at undersøge ekstreme tilfælde.

#### B.1.24 Ventilation – VAV Factor

VAV-faktoren kan variere med følgende værdier: 1, 3, 4 og 5. Førstnævnte værdier svarer til "CAV" (constant air volumen).

Denne faktor har stor betydning for energiforbruget til ventilation – særligt grundet samspillet med natkølingen, hvor VAV-faktoren angiver en grænse for hvor langt ned ventilation kan køre.

#### Ændringsforslag

For at sample mere repræsentativt ift. faktiske byggerier kunne man give muligheden 1 (CAV) mindre vægt, da dette princip sjældent anvendes.

#### B.1.25 Ventilation – Night Cooling Factor

Ved anvendelse af NightCoolCtrl i BSim skal brugeren angive hvor stor del af luftmængden, der kan benyttes. Der er anvendt følgende valgmuligheder med lige stor vægt:

1. Ingen natkøling
2. Minimum ventilationsmængde (dvs. Max. Air Change divideret med VAV Factor)
3. Maksimum ventilationsmængde (dvs. samme Max. Air Change)

#### Ændringsforslag

Følsomhedsanalyserne viste, at denne variabel har stor betydning for både termisk komfort og energiforbrug. Dette kan til dels skyldes muligheden for styring i BSim, da luftmængden ved natkøling kører ved en fast værdi, hvis den er aktiv. Det er uvist om denne styring er retvisende ift. faktisk brug, og om udviklerne af BSim arbejder på alternative styringsstrategier.

#### B.1.26 Ventilation – Specific Fan Power

Det specifikke elforbrug til lufttransport kan variere uniformt i spændet 1,5 til 1,8 kJ/m<sup>3</sup>. Den øvre grænse svarer til BR18-kravet.

#### MOE A/S



### **Ændringsforslag**

Såfremt den generiske model skal omfatte både nybyg og renovering skal den øvre grænse hæves. Den nedre grænse kan evt. også reduceres til at imødekomme særligt energieffektivt ventilation.

#### **B.1.27 Ventilation – Heat Recovery Efficiency**

Varmegenvindingens virkningsgrad kan variere uniformt fra 0,8 til 0,9. Den øvre grænse forekommer nok sjældent i virkelige scenarier, men så er der plads til teknologisk fremskridt.

### **Ændringsforslag**

Såfremt den generiske model skal omfatte både nybyg og renovering skal den nedre grænse reduceres væsentligt.

#### **B.1.28 Ventilation – Moist Recovery Efficiency**

Fugtgevindingen kan varieres med følgende værdier med lige vægt:

- 0 dvs. ingen fugtgevinding, som ved krydsveksler
- 0,6 svarende til 60% fugtgevinding
- 0,7 svarende til 70% fugtgevinding

### **Ændringsforslag**

- Faktiske værdier for fugtgevinding vil kunne antage mere varierede værdier, men grænserne på 60 og 70% er passende. Man kunne godt sample halvdelen af simuleringer uniformt, kontinuert imellem disse grænser. Men i en designsituation vil brugeren ofte antage en afrundet skønnet værdi for fugtgevindingen.

#### **B.1.29 Set points – Cooling**

Setpunktet for køling varieres i spændet 24-26 °C, i trin af 0.5 °C.

#### **B.1.30 Set points – Inlet Air, Summer**

Setpunktet for indblæsningsluft om sommeren varieres i spændet 15-17 °C, i trin af 1 °C.

#### **B.1.31 Set points – Inlet Air, Winter**

Setpunktet for indblæsningsluft om vinteren varieres i spændet 18-20 °C, i trin af 1 °C.

#### **B.1.32 Set points – Heating, Summer**

Setpunktet for opvarmning om sommeren varieres i spændet 22-24 °C, i trin af 1 °C.

#### **B.1.33 Set points – CO<sub>2</sub>-level**

Setpunktet for ventilation efter CO<sub>2</sub>-niveau om sommeren varieres i spændet 800-1200 ppm, i trin af 100 ppm.

### **B.2 Fastsatte inputs**

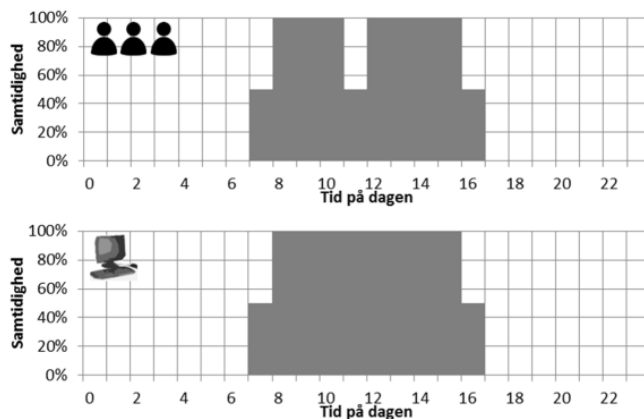
Som en del af at promovere sammenlignelige og konsistente simuleringer, som er mindre afhængige af den enkelte ingeniørs erfaringer, har MOE udgivet Branchevejledningen for Indeklimaberegninger, som er sat i verden for at sikre sammenlignelige modeller på tværs af branchen. På baggrund af

denne, er det muligt at anvende nogle af de anbefalinger til at fastsætte nogle af de mange inputs, således antallet af designparametre ligeledes kan reduceres.

### B.2.1 Brugstider

I Branchevejledningen fremgår anbefalinger til fastsættelse af brugstider, med en lav, middel og høj belastning. I dette projekt anvendes disse anbefalinger derfor, således at denne parameter kan fastsættes. I nærværende projekt er anvendt en høj samtidighed, hvilket vil sige 100% i de mest ekstreme tilfælde. Brugsprofilen med en høj samtidighed er illustreret på Figur 31.

Høj samtidighed



Figur 31. Brugsprofiler for personer og udstyr, med høj samtidighed. (Vorre, et al., 2017)

### B.2.2 Facadetykkelse

Facadens tykkelse er fastsat til 0,5 meter for at lette modelleringen og da facadens tykkelse varierer betragteligt, mens det er U-værdien og den termiske masse (inderst ift. isoleringen), der har interesse. U-værdien og termisk masse kan altså varieres, men uden ændring af modellens facadetykkelse. Den samlede tykkelse (dvs. inkl. lag udenfor isolering) har negligeabel betydning, da soltilskudet afhænger af Recess og skyggeforhold.

### Ændringsforslag

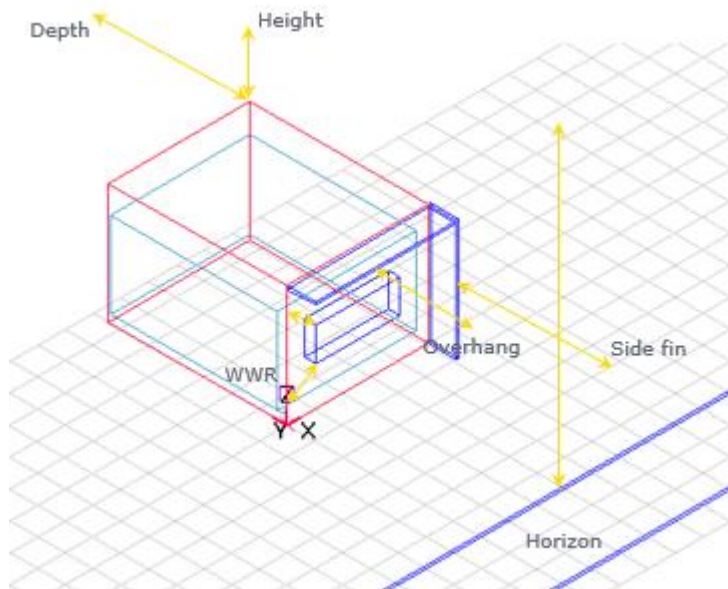
Skyggernes vinkler bør varieres ift. glassets tilbagetrækning og ikke ift. ydersiden af facaden.

## Bilag C – Udvikling af prototype

Til udvikling af prototypen, har der først skulle dannes mange tusinde Monte Carlo simuleringer, således at der har kunnet trænes en machine learning model af et generisk rum, i første omgang et kontor, til herefter at kunne danne metamodeller.

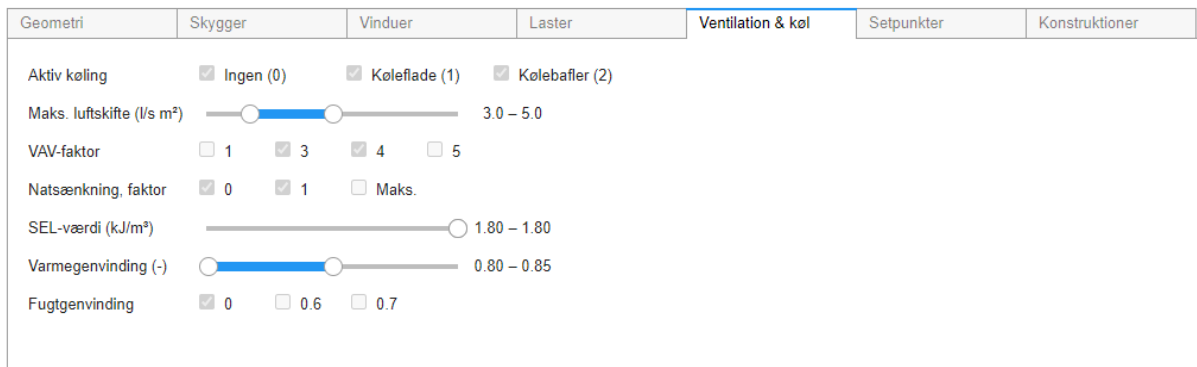
Værktøjet baseres derfor på disse machine learning modeller, hvorefter de kan bruges til at danne mange tusinde metamodeller af kontorer. Når dette er gjort, kan ens modeller gemmes som en ny fil, og herefter anvendes på DataExplorer, som er et værktøj der er udviklet på baggrund af et tidligere erhvervsPhD-projekt.

Selve værktøjet er baseret på kode i Google Colab, hvor rådgiveren blot skal trykke på en knap for hver kode-blok. Først er selve de generiske rum visualiseret, samt nogle af de parametre der kan justeres for rumgeometri. Dette er illustreret på Figur 32.



Figur 32. Illustration af generisk rum og geometriske parametre.

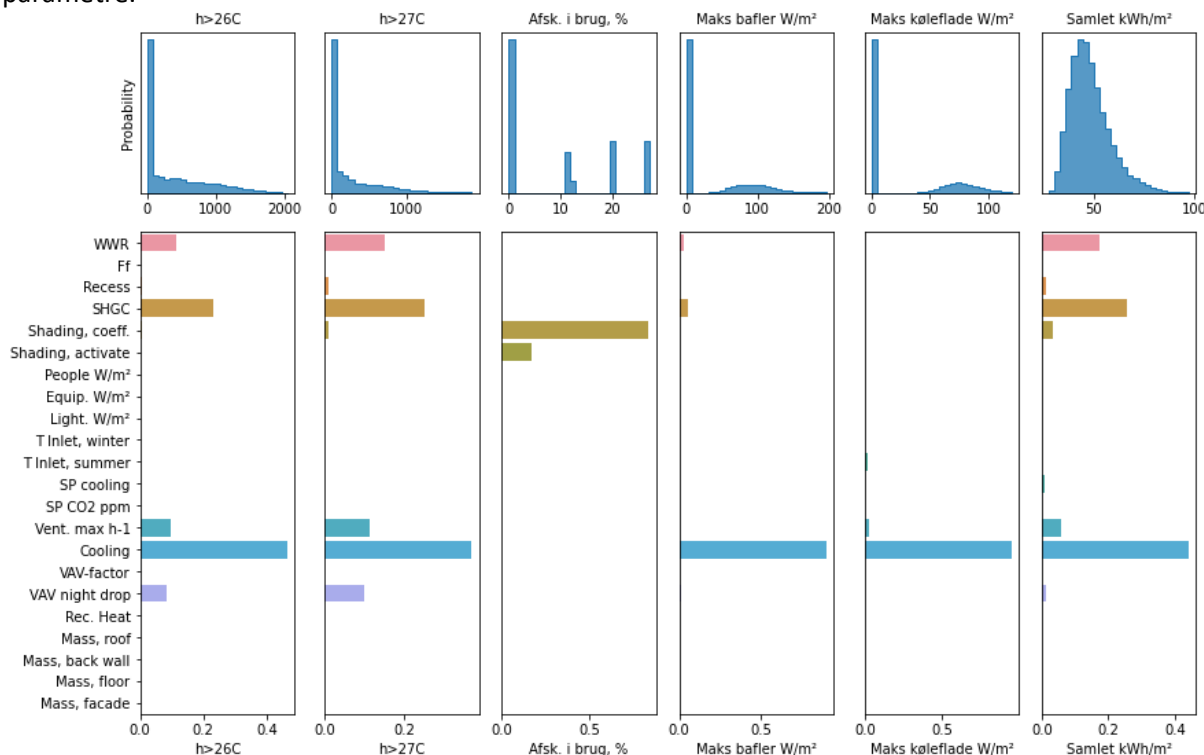
Til ændring af variable parametre, er dette visualiseres med sliders og afkrydsningsbokse, således at det er relativt nemt og hurtigt at ændre spændet af på designparametrene for ens metamodeller. Dette er opdelt i forskellige overkategorier, for nemt at kunne danne sig et overblik. Et eksempel på ét af fanebladene er givet på Figur 33.



Figur 33. Eksempel på faneblad til justering af parametre for metamodeller.

Herefter vælges antallet af metamodeller der skal dannes, så man hurtigt kan danne tusindvis af metamodeller med et enkelt klik. Disse metamodeller er herefter udgangspunktet for ens analyse.

Da der ligeledes er inkorporeret følsomhedsanalyse, er det muligt at danne sig et overblik over indflydelsen af sine parametre, så man kan iterere sig i mål og man har en idé om hvilke parametre man skal ændre på. Dette muliggør at man har en form for interaktiv udforskning ved hjælp af værktøjet. Et eksempel på en følsomhedsanalyse der er udviklet i værktøjet, er vist på Figur 34. Her fremgår det, at der vurderes på overtemperaturtimer, hvor stor del af tiden solafskærmning er i brug, samt flere parametre.



Figur 34. Eksempel på følsomhedsanalyse.

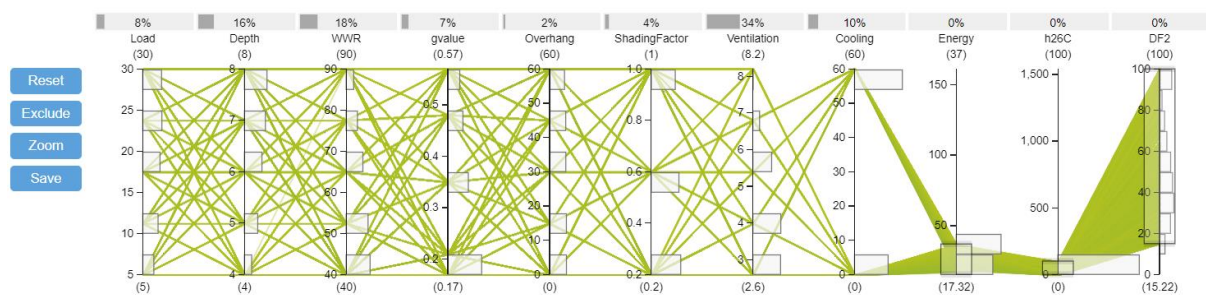
For hver følsomhedsanalyse, gives der ligeledes et udtryk for hvor præcis den machine learning model er, som er brugt til analysen.

**MOE A/S**

Denne proces muliggør at man i løbet af kort tid kan danne sig et beslutningsgrundlag om valg af forskellige inputs, samt visualisering af konsekvenserne for sine beslutninger. Dette kan bruges i møder med interessenter i projektet, og muliggør en dialog med folk der ikke er eksperter på området.

Afslutningsvis er der forskellige muligheder for interaktive visualiseringer, såsom scatterplots, violin plots, histogrammer, og parallelakseplot, som alt sammen kan bruges på forskellig vis til at tage informerede beslutning i designfasen og til beslutningsmøder. Et eksempel på et parallelakseplot er vist på Figur 35.

23798/93750 (25.38%)



Figur 35. Eksempel på parallelakseplot.