



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

Sekretær: Lene Wenstrøm Jørgensen
Telefon: 99 40 97 34
Lene Wenstrøm Jørgensen

Studenterrapport

Uddannelse: Master i Bygningsfysik

Semester: 4. Semester forår 2022

Titel på projekt: Bygningsudformning

Kritiske parametre for dagslys, energibehov og klimapåvirkninger

Projektperiode: Marts 2022- Juni 2022

Vejleder: Kim B. Wittchen og Leonora C. Malabi Eberhardt

Forfatter: Johan Rooijackers

Studienummer: 20206626

Resumé:

How we build buildings has an impact on our climate and environment and vice versa. The shape we give to our buildings through design is heavily dictated by National building regulations.

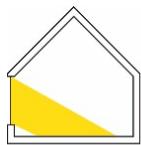
Under certain conditions it can be hard to comply to levels for daylight by calculations with climate-based daylight metrics. Especially for building types with narrow and deep spaces, contradicting demands to energy needs, often complicates this.

Will the coming new compliance laws to Global Warming Potential give room for new solutions or will it further restrict design possibilities? That is the main topic of this paper.

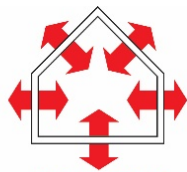
The aim is to highlight the critical parameters for daylight, energy need and GWP. This is done based on a case building designed by Rørbæk & Møller Arkitekter, in accordance with Danish building regulations and standards.

Antal normalsider: 54

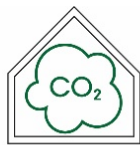
Afleveringsdato: 09.06.2022



DAGSLYS



ENERGIBEHOV



KLIMAPÅVIRKNING

Bygningsudformning

Kritiske parametre for dagslys, energibehov og klimapåvirkning

Johan Rooijackers

Master i bygningsfysik - Aalborg Universitet - 2022

Nomenklatur

Ag	Glasareal (m ²)
ASE	Årlig sollys eksponering (%)
BR, BR18	Bygningsreglement
bre	Building Research Establishment, UK
BREEAM	Certificerings metode for bæredygtigbyggeri af bre
CLT	Krydslamineret træ, konstruktionstræ i plade form
DF	Dagslysfaktor (%)
DGNB	Certificeringsmetode for bæredygtigt byggeri af Green Building Council Danmark
DGP	Sandsynlighed for blænding af dagslys (%)
Ei	Belysningsstyrke indvendigt i et punkt af et givet plan (lux)
Eu	Belysningsstyrke målt udvendigt på et vandret plan (lux)
ERC	Udvendig reflekteret komponent (%)
EPD	Miljøvaredeklaration
FBK	Den Frivillige Bærdygtighedsklasse
g	Rudens strålingstransmittans
GH	Grashopper, programmeringsværktøj til Rhono 3D
GWP	Klimapåvirkning i forhold til drivhuseffekten
LM-83-12	IES, Illuminating engineering society's akkrediteret metode til beregning af sDA og ASE
LEED	Certificeringsmetode for bæredygtigt byggeri af U.S. Green Building Council
Lt	Lystransmittans af ruden, T_{viz}
IR	Indvendig reflekteret komponent (%)
SC	Himmelkomponenten (%)
sDA	Rumlig dagslys autonomi (%)
Vh	Vinkel af horisontskygge (°)
Voh	Vinkel af overhæng (°)
U	U-værdi af bygningsdel (W/m ² K)
WF	Forhold mellem glas- og gulvareal (%)
WWF	Forhold mellem vinduesareal og brutto facadeareal (%)

θ	Himmelvinkelen
Φ	Transmission
ψ	Linjetab
Σ	Sum
Δ	Forskel

Indhold

1.	Indledning	1
1.1	Case	2
1.2	Opgaveformulering	4
1.3	Afgrænsning	5
2.	Baggrund og teori	5
2.1	Bygningssimulering	5
2.2	Dagslys	8
2.3	Energibehov og termisk komfort	10
2.4	Klimapåvirkning	12
2.4.1	Systemgrænser	13
2.4.2	Funktionel Lighed	14
2.4.3	Datagrundlag	16
2.5	Teori og Standarder	16
2.5.1	Beregningsprogrammer	16
2.5.2	Standarder og anvisninger	17
3.	Metoder og materialer	18
3.1	Beregningsmodeller- generelle forudsætninger	18
3.1.1	Modelopbygning	18
3.1.2	Dagslys	19
3.1.3	Energibehov og termisk komfort	23
3.1.4	Klimapåvirkning	27
3.1.5	LCA bygningsdele	29
4.	Resultater	41
4.1	Strategi	41
4.2	Dagslysniveau	42
4.2.1	Omgivelser	42
4.2.2	Vinduesudformning	44
4.2.3	Rummets udformning	45
4.3	Energibehov og Sommerkomfort	47
4.3.1	Be18 justering	48
4.3.2	Sommerkomfort bolig	50
4.4	Klimapåvirkning	51
4.5	Analyse af resultater	58

4.5.1 Dagslys resultatanalyse	59
4.5.2 Optioner 1-3 for Vestvendt opholdsrum	60
4.5.3 Dagslys analyse af parameter	61
4.5.2 Energibehov analyse af parametre	62
4.5.3 Klimapåvirkning analyse af parametre	63
5. Diskussion	69
5.1 Dagslys	69
5.2 Energibehov og Sommerkomfort	71
5.3 Klimapåvirkninger	74
6. Konklusion	75
7. Bilag	77
8. Referencer	80

1. Indledning

Ved design af bygninger og deres klimaskærme, er kravene til dagslys og energiforbrug i høj grad med til at bestemme den endelige udformning. Især ved bygningstyper med forholdsvis små rum, kan det være svært at holde sig indenfor af kravene i bygningsreglementet.

Undersøgelser af byggematerialers indlejrede energi, og bygningers samlede klimabelastning, tyder på, at fremtidige grænser til CO₂ aftryk, og stramninger af disse frem til 2029, kommer til at sætte en ændring i gang af hvilke byggematerialer, der anvendes.

Dette speciale fokuserer på en sammenhæng mellem dagslys, energiforbrug og byggematerialernes indlejrede energi, i den tidlige designfase.

Opgaven tager afsæt i et antal etageboligbyggerier, som tegnestuen Rørbæk og Møller Arkitekter i løbet af de sidste 4 år har tegnet sammen med EKJ rådgivende ingeniører, i regi af en rammeaftale med Københavns Kommune.

Formålet er at bestemme de kritiske parametre, som bidrager mest til indeklimate og miljøpåvirkning, samt at komme med anbefalinger til potentiale forbedringer.

Projektet indeholder:

- Beregninger af bygningernes energibehov, ved anvendelse af Be18.
- Detaljeret dokumentation af dagslystilgang ved beregning af belysningstyrker.
- Dynamiske simuleringer af det termiske indeklimate.
- Vurderinger af byggematerialernes indlejrede energi og CO₂-aftryk.
- Oversigt af relevante designparametre, med fokus på nuværende og fremtidige krav.
- Forslag til reduktion af den samlede klimapåvirkning for de undersøgte cases.

1.1 Case

Anledning for undersøgelsen er tre projekter fra tegnestuen, hvortil jeg har lavet dagslysdokumentation iht. 10%-reglen. Disse tre projekter er alle tre botilbud bebyggelser, med stor lighed i funktion og disponering deraf. Projekterne er:

Lindeallé



Figur 1, Visualisering af Linde Allé projekt

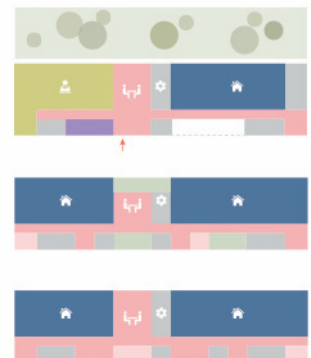


Figur 2,
Etagedisponering

Søflygade



Figur 3, Visualisering af Søflygade projekt

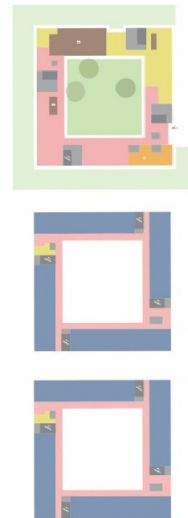


Figur 4, Etagedisponering

Granvej



Figur 5, Visualisering af Granvej projekt



Figur 6, Etagedisponering

Disse tre projekter har deres disponering til fælles, med fællesfunktioner på stueetagen og boliger på 1.- og 2. sal. Dertil har alle en mindre kælderetage til teknik.

Det er dog Granvej projektet, der tjener som case til denne rapport. Klimapåvirkningen og energibehovet er beregnet for bygningen som helhed, mens dagslysniveau og sommerkomfort begrænser sig til boligerne på de øverste etager.

Granvej er en karré bygning, beliggende på en naturlig grund mellem fredede træer. Da alle boliger er ens, er det muligt at få indblik i de forskellige orienteringers påvirkning på de beregnede resultater. Derved håbende at kunne øge forståelsen af relation mellem bygning og kontekst.

Gennem tegnestuen har jeg haft adgang til alt tegningsdokumentation, både som pdf og i form af Revit og Autocad filer. Jeg har også haft adgang til mængdeopgørelser og Be18 beregninger fra teknisk rådgiver EKJ.

Det betyder at de fleste input har været baseret på virkelige kilder fra praksis. Det betyder også, at de undersøgte parametre er baseret på projekternes præmisser og hypotetisk kunne anvendes til den videre udvikling af disse.

1.2 Opgaveformulering

I denne rapport beskrives grundlaget for en overordnet vurdering af udformningen af case bygningen i relation til kravene til dagslystilgang, energibehov samt klimapåvirkninger, som forventes at blive indført i det kommende bygningsreglement.

Aftalen om trinvist at indføre grænseværdier til bygningernes klimapåvirkning er indgået 5. marts 2021, og bliver indført næste år, i 2023 [1]. Det er også i 2023, at den igangværende prøveperiode for den frivillige bæredygtighedsklasse (FBK), ophører. Det er planlagt, at bygningsreglementets nuværende frivillige lavenergiklasse bliver ændret til en frivillig bæredygtighedsklasse. Også kravene til klimapåvirkning i FBK er endelig aftalt den 5. marts 2021. Krav om detaljeret dagslys dokumentation som kendes fra FBK er ikke fastlagt endnu.

Fra EU's side, skifter fokus efter mange år fra energibesparelse til en mere holistisk indsats som yderligere skal modvirke de klimapåvirkning byggeri har. Jeg antager derfor, at de nuværende energikrav bibeholdes som i BR18, og at skærpelsen som blev indført ved FBK, ligeledes bibeholdes.

Ved indførelse af BR18, er der kommet en væsentlig skærpelse af krav til dagslystilgang som medfører, at den, ifølge førende eksperter [2] upræcise størrelse, dagslysfaktor (DF), er blevet erstattet af klimabaseret belysningsstyrke beregning. I den nuværende FBK kan dagslystilgang kun dokumenteres ved hjælp af denne detaljerede eftervisning [3]. På case bygningen efterviser jeg dagslystilgang med denne detaljerede metode.

På et tidligt tidspunkt i et projekteringsforløb træffes der ofte væsentlige beslutninger. Dette kan vedrøre bygningens placering, orientering og form, samt størrelse af vinduer og hvilke materialer bygningen tænkes udført i. Disse valg er afgørende for bygningens udnyttelse af dagslys, energibehov og klimapåvirkningen.

Hele projekteringsforløbet, også de tidlige faser, foregår nu til dags digitalt og der bliver brugt mange ressourcer på at integrere beregninger og simuleringer (ingeniør), som traditionelt bliver brugt til eftervisning, i designprocessen (arkitekt) [4].

Formålet med denne rapport er at gøre det muligt at inddrage hensynet til dagslys, energibehov og klimapåvirkning, tidligt i projekteringsforløbet. Traditionelt ville man gøre det på baggrund af generel viden, erfaringer og overslag - uden at foretage endelige beregninger [5]. Men med en digital arbejdsmetode er det oplagt at drage nytte af de informationer der er indarbejdet i de 3D-modeller man arbejder med.

Sammen med at computere har væsentlig mere regnekraft end for 30 år siden, skaber det mulighed for at simulere effekterne af disse tidlige trufne valg, uden at det tager mere tid end at anvende overslagsmetoder. Og så øger det chancen for retvisende resultater, da kompleksitet og mængde af krav i stigende grad er vokset.

1.3 Afgrænsning

Med rapporten forsøger jeg at gennemføre en integreret dagslys-, energi- og klimapåvirkningsanalyse, på en retvisende og metodisk måde. Hensigten er at belyse de kritiske parametre, der påvirker bygningens udformning. Kravene til dagslys, energibehov og klimapåvirkning dokumenteres iht. det på nuværende tidspunkt gældende BR18, samt FBK (og eventuelt lavenergiklasse).

Den valgte case, som rapporten tager udgangspunkt i, er et dispositionsforslag af Rørbæk & Møller Arkitekter A/S og EKJ Rådgivende ingeniører A/S, udarbejdet for Københavns Kommune, i regi af DSPPLUS rammeaftale og er nævnt Granvej.

2. Baggrund og teori

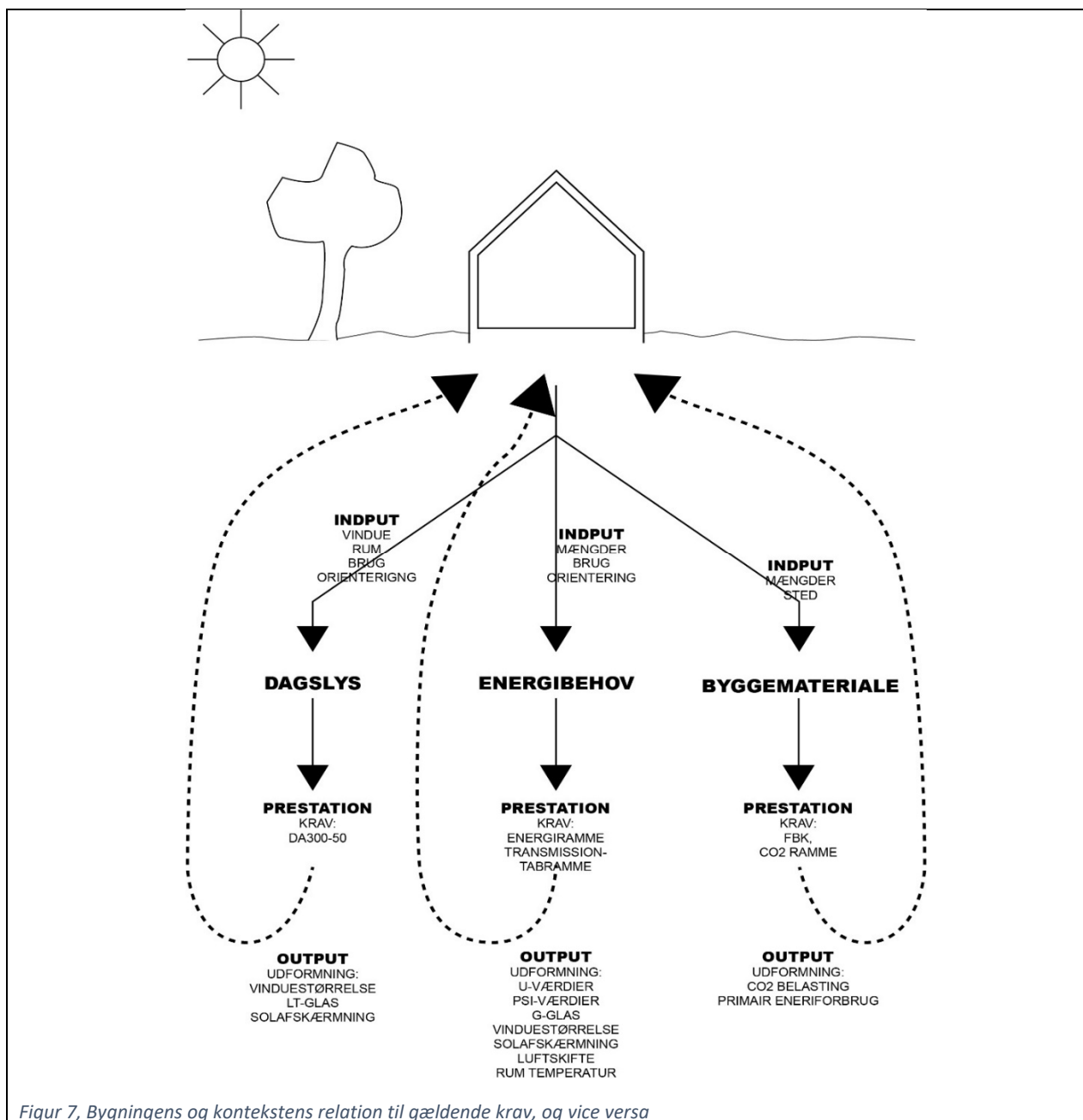
2.1 Bygningssimulering

En bygnings udformning er et resultat af en design proces, hvor der skal findes rum og materialitet til forskellige funktioner og funktionelle sammenhæng, og om muligt skabes en enhed. Der skal bl.a. også tænkes over hvordan bygningen forholder sig til sine omgivelser og hvad skal den udtrykke [6], samt hvordan kvaliteten af rummene, hvor menneskene skal opholde sig i, bliver. Når det lykkes at skabe denne helhed, skal bygningen også helst være smuk, så man kan holde af den i lang tid.

Ud over at være æstetiske, kulturelle enheder, er bygninger også systemer. De klimatiserer rum, og gør dem mere komfortable end udeklimaet. Dette system medierer mellem de udvendige påvirkninger, omgivelser og klima, og den indvendige præstation af rummet.

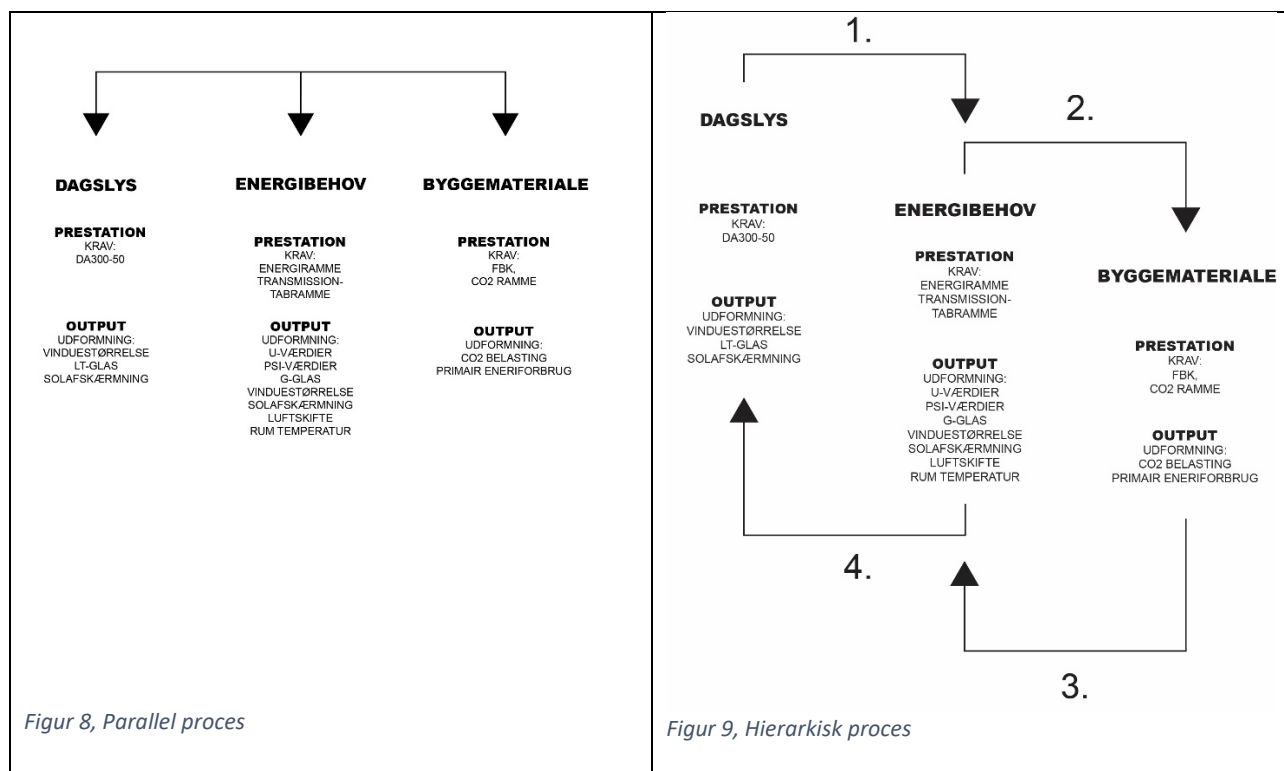
Minimumsniveauet af rummenes præstation, og systemet selv, er fastlagt i de funktionelle lovkrav i bygningsreglement (BR18).

Det er klimaskærmen, der medierer mellem inde og ude. Den skal holde regn og vind ude, holde temperaturen behagelig, sikrer udsyn og slippe dagslys ind. Samtidig står den for bygningens fremtræden i sin omgivelser. Relation mellem bygning, sin omgivelser og krav om relation mellem krav og bygning, er vist i et diagram i Figur 7 herunder.



Samspillet mellem hvordan dette system opfylder kravene, og *udformes* i henhold til kravene, dvs. under hensyn til dagslys, energibehov og klimapåvirkning, er det, der undersøges med rapportens beregninger og simuleringer. For at opfylde BR18, laves der eftervisningsberegninger eller -målinger af dagslys, energibehov og klimapåvirkning for den samlede case bygning.

For at kunne drage nytte af disse beregninger mens bygningen designes, laves der normalt indledende versioner af disse beregninger i de tidlige faser. Procesmæssigt kan det gøres ved hjælp af to forskellige metoder.



Se Figur 8, Metoden vist er en parallel simulering, som er en integreret simulering, hvor forskellige parametre, f.eks. vinduesstørrelse, U-værdi for lukkede bygningsdele, vindues U-værdi sammen med rudens Lt, lystransmittans og strålingstransmittans, g og sideskygge, varieres og analyseres for at danne et overblik over de løsninger, der tilsammen overholder krav til f.eks. dagslysniveau og energibehov.

Der findes også eksempler på undersøgelser, der laver integrerede simuleringer, der analyserer energibehov og klimapåvirkningskrav. Adskillige af disse internationale forsøg er udført på basis af det meget tilgængelige 3D program Rhino med Grasshopper. I en Dansk kontekst skal nævnes MOE's indsats for at udvikle simuleringsværktøjer, der baserer sig på bl.a. 10 %-reglen, Be18 og BSim beregninger [4].

Den anden metode, se Figur 9, er en serie af beregninger. Den er mere lavpraktisk, så den kan nemt udføres med de programmer man kender fra de gældende krav til dokumentation. Men den har også den ulempe, at den er mere arbejdsintensiv. Hvis den blev en del af den normale arbejdsgang, kunne systematisering dog løfte en del af de gentagelser, der laves ved parametervariationer.

2.2 Dagslys

Vibeke Clausen skriver i SBI rapport 230 [7], 'Lyset indvirker på den menneskelige organisme, dels gennem huden dels gennem øjnene. Lyset påvirker os såvel biologisk som fysisk og psykisk og betyder derfor meget for trivslen. Lys har desuden stor indflydelse på vores mulighed for at arbejde og for sikkerheden'.

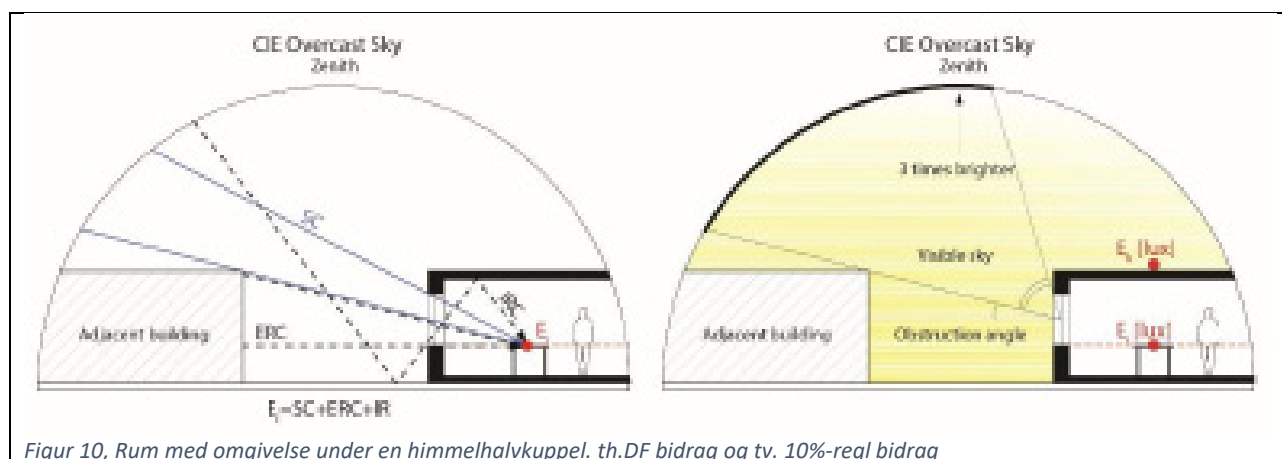
Adgang til dagslys og udsyn giver os mennesker oplevelsen af døgnrytme og sæsonernes skiften. Hvor meget dagslys menneskene modtager på deres arbejdsplads, i deres opholdsstue eller når de f.eks. skal orientere sig i en ankomsthal, bliver bestemt af udformningen af rummet og de transparente og translucente åbninger i klimaskærmen. Også rummets orientering og dets omgivelser har indflydelse på både farve og intensitet af dagslyset. Når man vurderer dagslys i bygninger, er det derfor vigtig både at tage bygningen og dens omgivelse i betragtning.

Ved indføring af BR18 er der kommet et skærpet fokus på hvordan kravene til dagslystilgang skal dokumenteres. I kapitel 18, §379 stk.2, er BR15s dokumentationsmetoden der beregner dagslysfaktor, ændret til med metoden der beregner belysningsstyrker (sDA).

Den anden måde at dokumentere tilstrækkeligt dagslys tilgang, forhold mellem glas og gulvareal, (WF) 10 %-reglen, har fået en opdateret, bindende vejledning der sikrer en ensartet måde at regne skyggende faktorer på [8].

I den frivillige bæredygtighedsklasse har man valgt udelukkende at godkende dokumentation ved belysningsstyrker. Valg af en sDA-beregning, frem for en 10%- eller DF-beregning, er i trend med international forskning og standarder. Udvikling af den europæiske norm, DS/EN 17037 [9] hos CEN, er forløbet parallelt med indførelsen af sDA krav i BR18. Den del af normen, der handler om dagslysadgang, har stor lighed med den amerikanske norm, LM-83-12, udviklet af IES [2].

Både 10%-reglen og DF er baseret på statiske forhold. Derfor kan disse ikke tage højde for variationer over et døgn, sæson eller år.



Dagslysfaktor (DF), Figur 10, står for forholdet mellem den indvendige belysningsstyrke på en horisontal flade, E_i , og belysningsstyrke på en fritliggende, udvendig horisontal flade, E_u , betragtet ved en overskyet himmel (CIE Overcast Sky) [10] [8]. Lyset, der lander på den indvendige flade, har tilbagelagt tre forskellige veje, tre komponenter, SC=Sky component ERC=External reflection component og IR=Indirect reflection component.

Som en deduktion af dette, betragter 10%-reglen kun effekten af SC, dvs. den del af himmelhalvkuglen, der er fritliggende efter der er taget højde for udvendigt skyggende objekter, for standardiserede rum med standardiserede vinduesudformninger.

Påstanden er, at ved udelukkende at se på en overskyet himmel, betragter man den værste periode af døgnet, hvilket derved burde resultere i tilstrækkeligt dagslys gennem hele året. Det er denne påstand, man har bevæget sig væk fra. Nu prøver man at være mere præcis i at fange dagslysets dynamiske kvaliteter ved hjælp af klimabaserede beregninger.

Dagslys har dynamiske kvaliteter, og metoderne til at dokumentere det med, skal derfor udføres over tid. Den årlige dagslyspræstation integrerer variationer over et helt år, med både dags- og sæsonvariationer. Da dagslys afhænger kraftigt af det lokale klima, især den daglige balance mellem perioder med fri himmel og perioder med skyer, er det vigtigt også at tage højden for klimaet [2]. Dette gøres ved at basere sine beregninger på standardiserede klimadata i en klima-fil. For dokumentation iht. BR18 skal man i lighed med energiberegninger, basere det på DRY2001-2010, Danish Reference Year udgivet i 2013 [11].

Beregning af belysningsstyrke i rum opnået ved dagslys, kaldes for spatial daylight autonomy, sDA. Det er et tal, der beskriver den årlige tilstrækkelighed af omgivelseslys-niveauer for rum. Det er defineret som den del af et analyseareal (det relevante gulvareal), der opfylder en minimum dagslys-belysningsstyrke, for en fastlagt del af den årlige brugstid (dagslystimerne). Niveauet er normalt inkluderet i tallet, som f.eks. sDA₃₀₀₋₅₀, der står for den del af arealet der opfylder 300lux i 50% af betragtningsperioden.

For en sDA-beregning iht. LM-83-12 [2], som er den beregningsmetode, der bl.a. skal bruges ved LEED bæredygtighedscertificeringer, er standardkriteriet følgende: Belysningsstyrken skal være 300 lux per analysepunkt og baseret på TMY-klimadata for en analyseperiode fra kl.8.00 til kl. 18.00 (10 timer om dagen). Eventuelle solafskærmninger er styret per time til at skærme direkte solstråling ind i rummet, når mere end 2 % af analysepunkterne er direkte belyst.

Det skal bemærkes at for LM-83-12 beregninger, 300 lux for 50 % af betragtningsperioden, giver en absolut periode af 1825 timer hvor dagslys er over 300 lux i det beregningspunkt. I BR18's vejledningen om dagslys, er betragtningsperioden defineret som dagslystimerne. Dagslystimerne er den del af årets timer, hvor der er mest dagslys, skrives der. Hvor mange timer vi så taler om, og om det så kun er sommerhalvåret eller i overgangssæsonerne, der må tages højde for, er uklart. Hertil skal man finde entydighed udenfor bygningsreglement.

Et sted, man kunne se nærmere på, er selveste klimafil DRY2001-2010. Når man tager DRY-filens timeværdier for den samlede horisontale illuminans, og filtrerer alle værdier fra hvor den er 0 lux, så finder man ud af, at klimafilen indeholder 4396 timer om året med dagslys, altså lidt over halvdelen af årets timer. For at opfylde kravets grænser på 300 lux for 50 % af betragtningsperioden, giver det en absolut periode af 2198 timer, hvor dagslys skal være over eller lig med 300 lux i dette beregningspunkt.

Men er det nu virkelig, hvad er menes? Nej, det er det ikke, der skrives nemlig at metoden er baseret på DS/EN17037 standard norm. Her er man mere præcis omkring hvordan betragtningsperiode defineres [9]. Betragtningsperiode er halvdelen af årets timer med mest dagslys, hvor man filtrerer den halvdel af klimafilens 8760 timeværdier fra, som har de højeste lux værdier for den samlede horisontale illuminans.

Betragtningsperioden er derved 4380 timer og ikke 4396. For nogen områder i Europa kan det være at disse timer indeholder værdier med 0 lux. Selvom det svarer til 12 timer om dagen i gennemsnit, er det ikke dagens klokketimer, der afgrænser perioden. Denne filtreringsmåde kombinerer det meste lys fra de lange dage om sommeren, med de skyfrie dage om vinteren.

Af DRY filens timeværdier filtreres der så 16 timer ekstra fra, alle værdier som har mere end 86 lux, for at ende på en 4380 timer lang betragtningsperiode. 300 lux for 50% af den periode er derved 2190 timer hvor dagslys skal være lige med eller over 300 lux i beregningspunktet inde i rummet.

LM-83-12 er udviklet for arbejdsrum, kontorer, undervisningsrum og biblioteker. Perioden fra 8-18 korresponderer efter sigende med den normale brugsperiode af disse funktioner. BR18 og DS/EN17037 er gældende for både boliger og andre funktioner. Man kan spørge sig selv, om der er nogen, og i så fald hvor stor, forskel på at bruge en betragtningsperiode, der tager afsæt i en arbejdsdag, eller en der tager afsæt i alle timer hvor der er dagslys?

Ud fra definition af sDA størrelsen, som man bruger til at opgøre dagslys i rum, giver det god mening at tænke betragtningsperioden sammen med brugen af rummene. Det skyldes ordet autonom i sDA, spatial Daylight Autonomy, dvs. at det belsningsniveau man har brug for til rummets anvendelse, er autonom. Altså opfyldt uafhængigt af elektrisk belysning.

Se BR18 kap. 18, §377, stk.2: Kravet beskriver lys og udsyn ud fra en helhedsbetragtning, der indeholder sikkerhed, sundhed og komfort. Det opnås ved at projektere med hensyntagen til at;

1. Dagslys udnyttes bedst muligt som lyskilde.
2. Unødigt energiforbrug undgås.
3. Unødig varmetilførsel til rummene undgås.
4. Gener ved direkte solstråling kan undgås.
5. Gener ved blænding minimeres.

Pkt. 2 og 3 er følgevirkninger af hvordan vinduerne, og rummet de forsyner, er udformet. Det belyses nærmere i følgende afsnit 2.3. Pkt.1 påstås at være overholdt når man opfylder sDA beregningen iht. kravene. Pkt. 4 og 5 kan ses opfyldt, når der anbringes en form for afskærmning indvendigt eller udvendigt. For at estimere, om det er påkrævet, kan man også bruge DS/EN17037 eller LM-83-12. DS-metoden opgør blænding ved hjælp af DGP, Daylight Glare Probability. Grænsen, $DGP_{5\%-0,45}$, er niveauet af blænding (0,45) hvor det for en arbejdsplads tit er forstyrrende for mere end 5 % af brugstiden (arbejdstiden). Niveau for blænding er en empirisk fundet værdi, som kan være svær at eftervise.

LM-metoden opgøres blænding på sin vis med et tal, der forholder sig til direkte solstråling, ASE, Annual Sunlight Exposure. Den beskriver potentialet for visuelt ubehag i et (arbejds)rum. Den er defineret af den procentdel af betragtningsarealet (det relevante gulvareal), der overskrider en grænseværdi for belysningsstyrke med direkte sollys, for mere end et fastlagt antal timer om året.

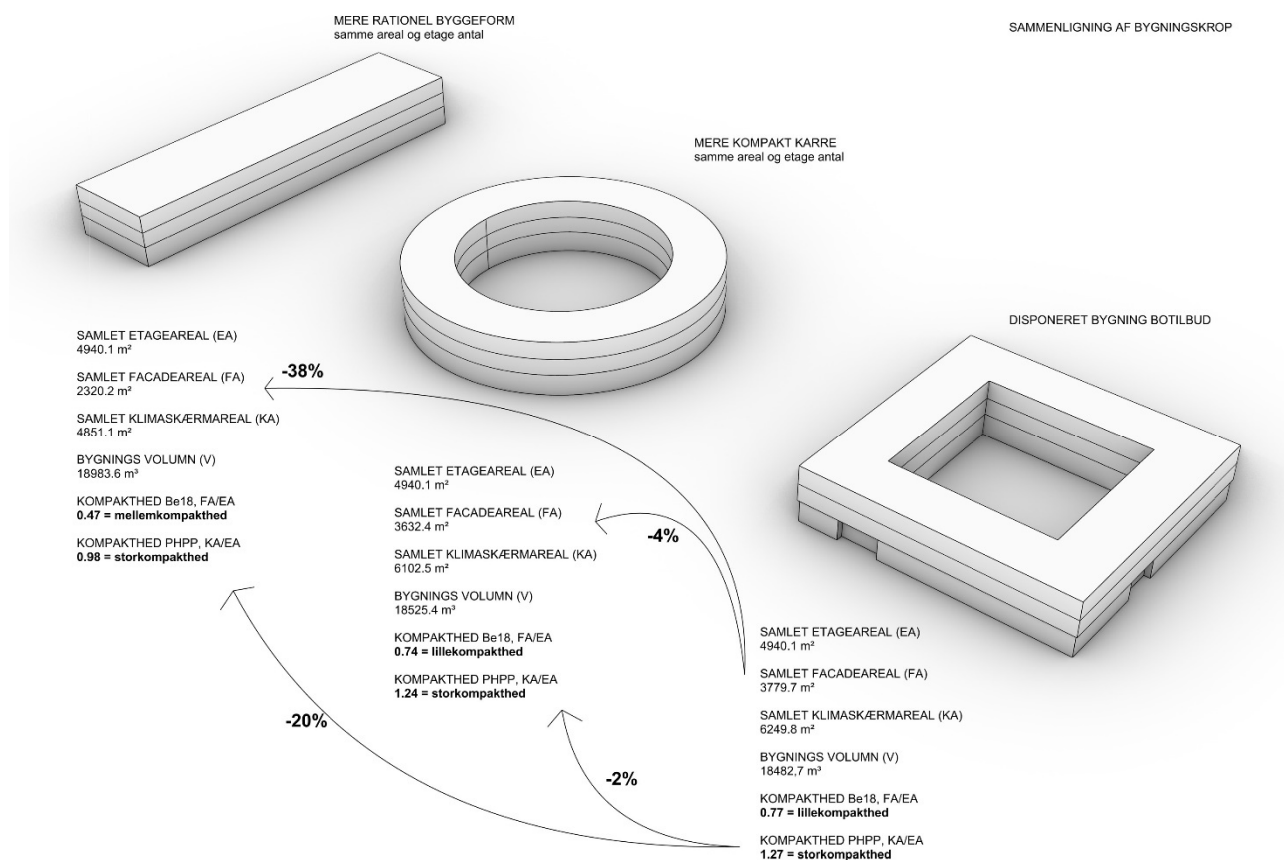
Typisk er det $ASE_{1000,250h}$, en opgørelse af hvor mange, i %, beregnings punkter modtager mere end 1000 lux direkte sollys for mere end 250 timer per år (1½ time per dag i gennemsnit mellem 8 og 18). Denne beregning udføres uden solafskærmning, eller før en solafskærmning, der blokerer for den direkte solstråling, er aktiv. Rum med mere en 10 % $ASE_{1000,250h}$ er anslået som at være visuelt ubehageligt, hvor en 7 % $ASE_{1000,250h}$ normalt er acceptabelt og 3 % $ASE_{1000,250h}$ er klart acceptabel [2].

2.3 Energibehov og termisk komfort

Bygningens energibehov kan opfattes som en sammenkædning af tre led. Først er der det passive led, som er bygningen selv og dens omgivelser. Andet led er bygningens anvendelse, hvad der sker inde i den, og som tredje og sidste led er der de tekniske systemer, som er med til at i opretholde de krav, der stilles til indeklimaet.

For de passive led er modtagelse af solstråling en parameter. Den bliver, lige som med dagslys, bestemt af bygningens orientering og dens omgivelser, samt udformning af de translucente bygningsdele, dvs. vinduer, døre og ovenlys. Om et eventuel modtaget varmetilskud fra solstråling bliver udnyttet, er også en passiv egenskab af bygningen. Udnyttelse hænger sammen med rummets volumen ift. den tilførte mængde varme, hvilken type materialer rumluften er i kontakt med, samt størrelsen af rummets overflade ift. rummets volumen.

Hvor godt klimaskærmen er isoleret, er også en passiv egenskab. Transmissionstabsberegning gør det muligt at få indblik i hvilke bygningsdele, der præsterer bedst og hvilke dårligst. Bygningens geometri har en direkte indflydelse på størrelsen af transmissionsarealerne. Se Figur 11. Hvis det samme opvarmede etageareal udformes som de viste tre forskellige typologier, kan man regne ud, at en mere kompakt udformning resulterer i betragteligt mindre tag, terrændæk og facadeareal.



Figur 11, Varianter af bygningsvolumener med samme brutto etageareal men med mindre facadeareal

Hvordan en bygning bliver anvendt bestemmer hvilken krav der bliver stillet til indeklimaet. Derefter er de interne tilskud fra mennesker, belysning og apparater normeret. Ligeledes normeret er mængderne af frisklufttilførsel og den ønskede rumtemperatur. Valg af ventilation og varmesystemer, samt belysning og hvilke energikilder disse drives af, er afgørende for hvor effektivt denne klimatisering kan tilvejebringes.

Se BR18 kap. 11, §257 til 266. Minimumpræstation af klimaskærmen for bygninger er sikret gennem bl.a. minimumskrav til isolering af bygningsdele og linjetab af kritiske samlinger mellem bygningsdele, krav til lufttæthed og transmissionstabsrammen. For vinduer og døre med glas, som isolerer meget dårligere end ikke-translucente bygningsdele, gælder der en energibalance mellem tabt transmissionsenergi og tilskudsenergi af solstråling, opgjort over et år. Som for vinduer og døre i vertikale facader er $0 \text{ kWh/m}^2\text{år}$.

Ved nybyggeri, for hvilket der gælder energiramme-krav, skal den dimensionerende transmissionstab per m^2 etageareal ikke overstige $12+6/E+300/A$. Energirammen for boliger er $30 \text{ kWh/m}^2+ 1000/A$ og for andre funktion end bolig, $41 \text{ kWh/m}^2+ 1000/A$. Energiforbrug beregnes iht. Sbi-anvisning 213 [12], med programmet Be18.

Hensyntagen til at undgå unyttigt energiforbrug fra BR kap. 18 §377, er svært at definere inde for disse rammer. Men hvis man kan optimere sit energiforbrug ved passive midler, skal det gøres, før der anvendes vedvarende energikilder i ens beregning. Iht. dagslys og energiforbrug må f.eks. vinduesstørrelse eller orientering ikke resultere i et øget el-forbrug til belysning eller ventilation. Hvor det første kunne tyde på for små vinduer og det sidste på for meget tilskud af solstråling.

Det er BR kap. 19 §386, som stiller krav til termisk komfort, og som for boliger kan det beregnes forenklet i Be18. Vejledende værdier er en operativ temperatur (T_{opt}) om vinteren mellem $20-23^\circ\text{C}$ og mellem $23-26^\circ\text{C}$ om sommeren [13]. Om sommeren må T_{opt} for boliger ikke overstige 27°C i mere end 100 timer og 28°C ikke mere end 25 timer årligt.

For de fleste andre bygninger, der har tilsvarende brugstid som kontorer, er vejledende grænsen maksimalt 100 timer over 26°C og maksimal 25 timer over 27°C . For arbejdspladser er der dog andre lovkrav der også skal overholdes som definerer termisk komfort mere omfattende [13]. Hvor der blandt andet bliver set på forskelle i strålingsvarme af rummets overflader, som typisk er størst ved vinduerne hvor der også ses på træk af kuldenedfald.

2.4 Klimapåvirkning

Set i lyset af samfundets mål om at omstille vores vaner og nå frem til på sigt at være klimapåvirknings-neutrale, er det vel undersøgt, at nuværende fokus på energibesparelser burde skifte over til et styrket fokus på at mindske klimapåvirkningen af anvendte materialer og produkter.

Dels fordi det forventes, at der er nået en grænse for mulighederne for at gøre vores bygninger mere energieffektive, og dels fordi der ligger et større potentiale i at mindske klimapåvirkningen ved at optimere måden, vi bygger på og hvilke materialer vi bygger med. I rapporten fra BUILD hvori 60 bygninger bliver undersøgt for klimapåvirkning, kan der ses at materialernes andel ift. til den samlede klimapåvirkning kan spænde et sted fra 55 % til 95 % af bygningens samlede klimapåvirkning [14]. Med en overvægt af projekter med en andel til den høje side af det spænd.

Vurdering af bygningers klimapåvirkning udføres ved at lave en livscyklusvurdering, en LCA. LCA-beregningen omhandler ikke kun bygningers og byggematerialernes levetid. Den er en helhedsvurdering, der spænder fra udvinding af råstofferne, over fremstilling af produkterne til byggeriet, til bortskaffelse af affaldet når bygningen rives ned ved end levetid [15]. Og det betragtes over en fast periode af typisk 50 eller 80 år.

Hvad angår energikilder, er vi efterhånden blevet bevidste om, at nogen kilder er fornybare, som sol, vind og biomasse, og øvrige er ikke-fornybare, som olie, gas, kul og atomkraft. På samme måde findes der fornybare og ikke-fornybare byggematerialer.

Man kan opdele grundstoffernes oprindelse i mineralske, vegetabiliske, animalske og syntetiske, hvoraf vegetabiliske og animalske (biogene) stoffer er fornybare, og de syntetiske og mineralske er ikke-fornybare. Det er almindelig kendt viden, at fossile, organiske råstoffer er endelige i deres natur [16].

Når man udvinder fossile, organiske råstoffer, frigiver man det kulstof, der har været lagret i millioner af år, ud i atmosfæren, hvilket derved fører til drivhuseffekten.

Livscyklussen for produkter med fossil råstofprofil er også behæftet med mange andre risikable effekter. Her er det iøjefaldende, at den ekstremt lange holdbarhed af de syntetiske stoffer, modvirker genbrug og tilbageføring ind i det naturlige økosystem. Modstandsdygtigheden bliver ofte opnået ved brug af giftige stoffer (UV-stabilisatorer, blødgørere), som på et tidspunkt bliver frigivet til miljøet (jord, vand, luft) og derved forgifter mennesker og deres fødevarer.

Planter og træer omdanner CO₂ i luften til saccharum, sukker, ved hjælp af solstråling og fotosyntese. Det er grundelementet i dannelsen af cellulose, hvilket eksempelvis træfibre bygges op af. Fornybare råstoffer har en lav klimapåvirkning, udtrykt i et lavt primærenergiforbrug og en lav udledning af drivhusgasser. Men jo mere råstofferne forarbejdes med maskiner, og jo flere hjælpestoffer, som syntetisk lim, der anvendes, jo hurtigere aftager den fordel.

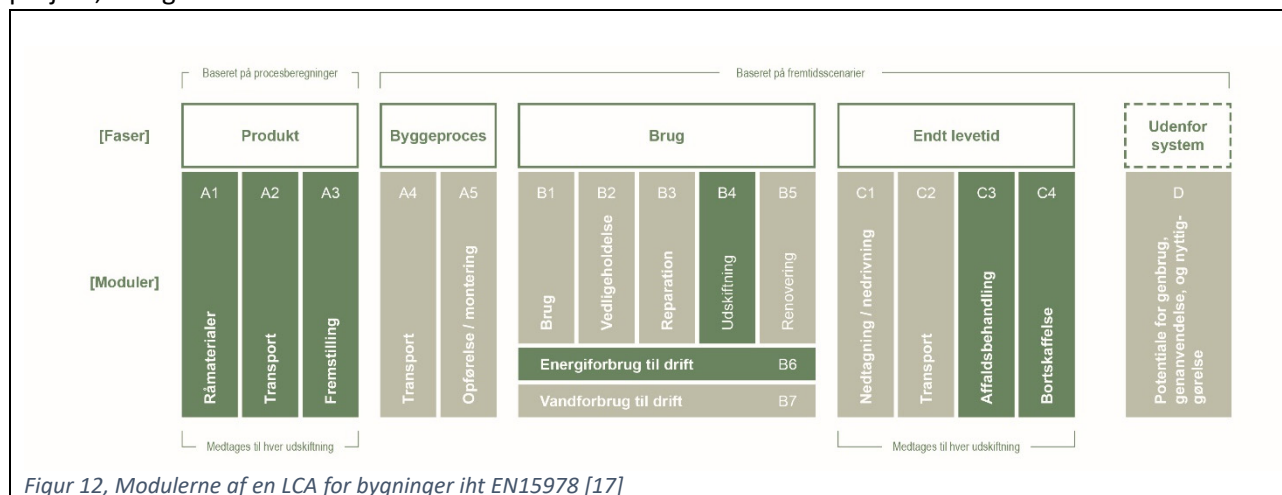
En LCA af bygninger består af to dele: materialekredsløb og energibalance. Bygget op omkring en opgørelse af ressource- og primærenergibehov, samt en opgørelse af miljøpåvirkningsindikatorer. Disse opgørelser og indikatorer er ofte angivet med deres engelske betegnelser;

Global Warming Potential **GWP**, Ozone Depletion Potential **ODP**, Photochemical Ozone Creation Potential **POCP**, Acid Potential **AP**, Eutrophication Potential **EP**, Abiotic Depletion Potential Elements **ADPe**, Abiotic Depletion Potential Fossil fuel **ADPf**. Total Primary Energy **PE_{tot}**, Secondary Energy **Sek**.

For at kunne lave en LCA-beregning, der er sammenlignelig med beregninger af andre bygninger, er følgende referencepunkter vigtige: Systemgrænserne for hvad der er beregnet, den funktionelle lighed, hvilken kvaliteter har den beregnede genstand, samt datagrundlag for de indeholdte byggevarer.

2.4.1 Systemgrænser

Bygningens livcyklusvurdering er opdelt i fem faser, produkt, byggeproces, brug, endt levetid og udenfor projekt, se Figur 12.



Figur 12, Modulerne af en LCA for bygninger iht EN15978 [17]

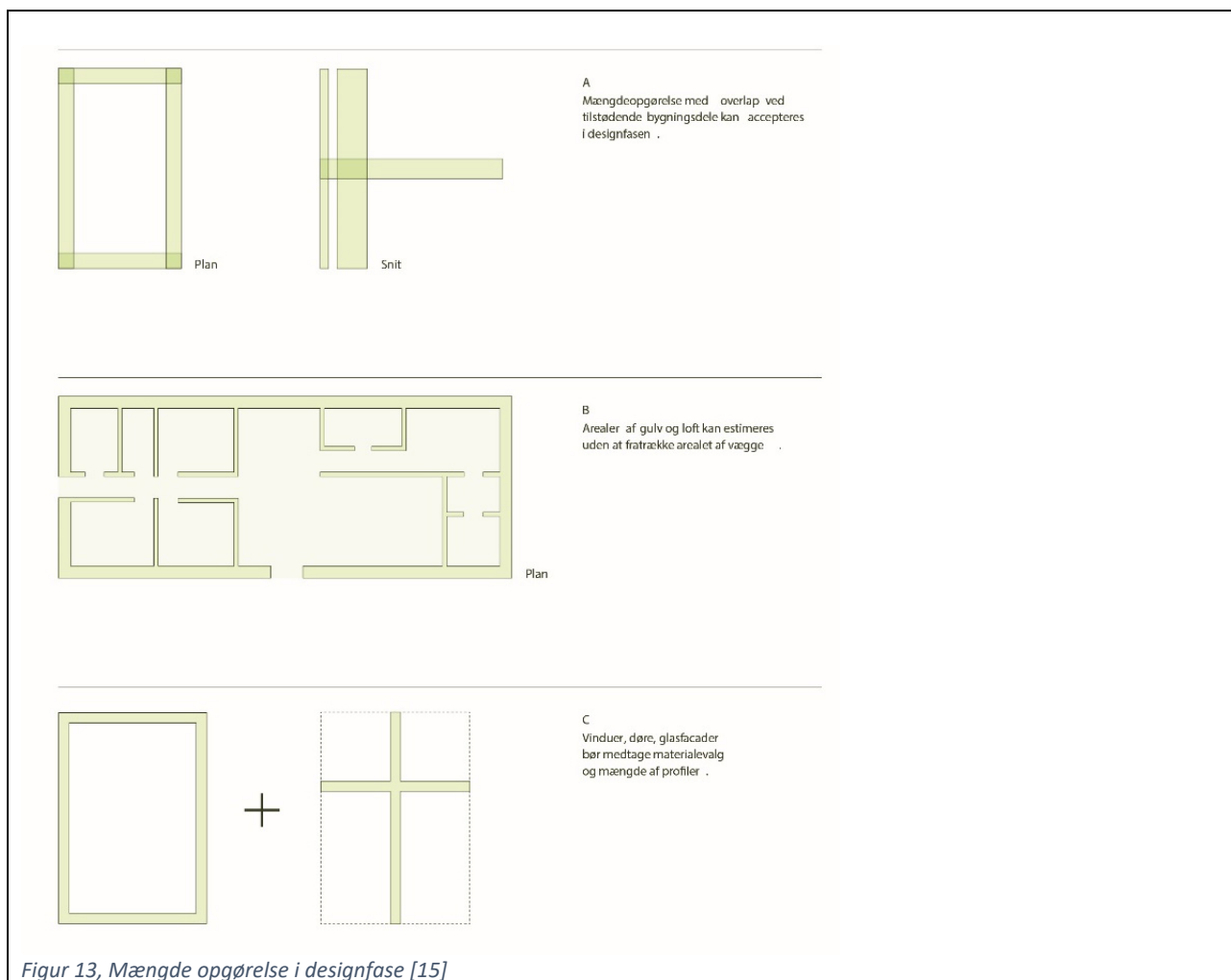
Denne opdeling er iht. EN15978, og indeholder samlet hvad der kaldes 17 moduler. Normalt er det de 7 mørkegrønne moduler, der er med i en LCA-beregning. For en LCA til den frivillige bæredygtighedsklasse skal der medtages yderlige tre moduler, A4 og A5 i byggeprocesfasen og D udenfor projekt. I designfasen estimeres A4 og A5 og ved færdigmelding af byggeriet dokumenteres de faktiske opgørelser [15].

I en standard LCA-vurdering her en betragtningsperiode af 50 år. 6 moduler, A1-3, B4, C3-4 og D er relateret til bygningsdelene og de materialer, de er lavet af. De betragter alt fra udvinding af råstoffer, tilhørende transport og fremstilling, udskiftning af bygningsdele med en kortere levetid end 50 år, samt affaldshåndtering og bortskaffelse ved endt levetid. Modul D er ikke en del af standard opgørelse med betragtes særskilt. Modul B6 betragter energiforbrug til bygningens drift [17].

Især for de ikke-fornybare råstoffer, er det relevant at betragte modul D, potentialet for videreføring ind i et materialekredsløb. Det passer i det, der kaldes en cirkulær tankegang eller cirkulært byggeri. Det er også nærliggende, at en byggevare der har en oprindelse langt fra den lokation hvor bygningen bliver opført, er mere miljøbelastende end en tilsvarende vare, som er produceret lokalt. Ved at lave en LCA iht. den frivillige bæredygtighedsklasse, er det nu muligt at medtage disse påvirkninger.

2.4.2 Funktionel Lighed

En LCA er en lineær beregning, som starter med A modulerne og slutter ved modul C og en særskilt betragtning efter end levetid i Modul D. Der skal opgøres mængder af byggevarer, som produkter eller rå byggevarer. I designfasen opgøres der mængder fra en model, tegning eller f.eks. fra en tilbudsliste. Der må i designfasen regnes med overlap i hjørnerne, og samlingerne mellem bl.a. dæk og facade, samt lagdelte bygningsdele må regnes med det samme areal for hvert lag. Se Figur 13, Her viser øverst A, overlap ved samlinger og lag. B midterste illustration viser overlap mellem indervægge og gulvareal. Og nederst viser C at karm og sprosseareal til vinduer og døre skal opgøres.



Figur 13, Mængde opgørelse i designfase [15]

Der skal også fastlægges hvilken bygningsdele, der skal beregnes. Jo mere komplet listen med bygningsdele bliver, jo mere retvisende er LCA vurderingen til sidst. I en standard LCA er der taget udgangspunkt i DGNB, ENV1.1. Nedenstående elementer er også indført i beregningsprogram LCAByg:

1. Bygningsbasis
2. Ydervægge
3. Indervægge
4. Dæk, trapper, ramper altaner, lofter
5. Tage
6. Varme-, køle- og ventilationsanlæg
7. Andre byggetekniske anlæg

For FBK er der tilføjet yderligere bygningsdele og materialer til de bygningsnære udeområder. Opdelingen er også gjort forskelligt, i alt 16 grupper med undergrupper, som hver for sig er defineret iht. Sfb-kodering, så de hænger sammen med beskrivelser, tilbud- og bestillingslister, der bliver brugt ved projektering og udførelse af byggeri.

Når LCA-vurderingen afleveres som dokumentation, er der også aftaler for hvordan alle materialer bliver opgjort i en rapport. LCAByg håndterer den del i programmet selv.

Når man har opgjort alle bygningsdele og deres mængder, tilknytter programmet selv de pågældende miljøpåvirkninger på basis af en database med miljøvaredeklarationer. Ønsker man at sammenligne forskellige alternativer for en enkelt bygningsdel, er det vigtigt at alternativet opfylder det samme funktionskrav til bl.a. lyd, u-værdi, brandmodstand og styrke.

Så man kan ikke umiddelbart udskifte en bærende facade med en ikke-bærende facade, eller et vindue med 3-lagsglas med et med 2-lagsglas. Ønsker man alligevel at gøre dette, skal man kompensere for de manglende funktioner ved at ændre flere andre bygningsdele også. Inklusiv et eventuel ændret energibehov. Ved udskiftning af en bærende facade med en ikke-bærende facade, skal man tilføje et konstruktionssystem, der kan kompensere for den fjernede bæreevne med f.eks. søjler og bjælker. Det kan være svært at gøre nøjagtigt, uden at beregne styrke i det nye konstruktive system med samme detaljeringsgrad som det man havde som udgangspunkt.

Ved andre funktionelle krav kan det være nemmere. Når det omhandler isoleringsevne, kan man kompensere for en forringelse i én bygningsdel, som f.eks. når man skifter 3-lags glas ud med 2-lags glas, med en forbedring af en anden bygningsdel, så længe den samlede transmissionstab forbliver ens.

2.4.3 Datagrundlag

Miljøpåvirkning af bygningsmaterialer og produkter bliver opgjort i form af et særligt produkt datablad, en EPD, Environmental Product Declaration, eller miljøvaredeklaration. Disse produkt EPD'er er samlet i databaser, og i forskellige lande bruges forskellige databaser. LCAbyg 5.2 anvender den frit tilgængelige Tyske database, ÖkobaDat 2020.

Her skal man være opmærksom på, at der er generiske data der gælder for en produkttype, som f.eks. stenuld. Disse er generelt dækkende og bruges når producenten af det specifikke byggevare ikke kendes, før bygningen er opført. Efterhånden har mange producenter indset, at deres produkters miljøpåvirkning kan være et konkurrenceparameter. Derfor er EPD-databasen voksende med produkt specifikke EPD'er, og bliver opdateret jævnligt.

Det er derfor vigtigt at angive hvilken database man bruger i sin LCA-vurdering, samt at angive om man anvender produktspecifikke EPD'er, da der kan være større forskelle mellem specifikke og generiske data.

2.5 Teori og Standarder

Metoderne og resultaterne i kapitel 3 og 4, er udregnet ved hjælp af beregningsprogrammerne oplistet i det følgende afsnit, samt på baggrund af data indtastet ved hjælp af faglitteraturen.

2.5.1 Beregningsprogrammer

Resultaterne beskrevet i kap. 4. er baseret på beregninger og simuleringer udført med følgende programmer:

Rhino 3D og Grasshopper

I Rhino laves der en 3D model af projektet i designfase. Den bliver dels brugt til mængdeudtræk til både Be18 (iht DS418) og LCAbyg, men også til dagslys- og indeklimasimulering og beregning af skygger til Be18.

Be18

For at kunne forstå og analysere på bygningens varme- og kølebehov iht. BR18 krav, anvendes programmet Be18. Resultaterne af energibehov bliver indført ind i LCAByg.

LCAByg

Klimapåvirkningen af case bygningen bliver beregnet med en livscyklusvurdering i LCAByg-programmet.

ClimateStudio

Dette plug-in til Rhino 3D og Grasshopper er brugt til at lave dagslys- og indeklimasimuleringer. ClimateStudio er en brugerflade, som gør det muligt at lave Radiance dagslys- og EnergyPlus energisimuleringer, direkte i Rhino og Grasshopper. Radiance er en akkrediteret beregnings-kerne til dagslys. Og EnergyPlus er en akkrediteret beregnings-kerne til bygnings indeklima og energisimulering, svarende til IDA-ICE og BSim. Hvor BSim den fordel har at den kan overføre resultaterne til Be18.

Microsoft Excel

Excel er anvendt som et opsamlingsværktøj til at forbehandle data, så det kan udveksles mellem disse programmer. Excel er også brugt til at lave grafer, som muliggør analyse af parametervariationer.

www.ubakus.de/u-wert-rechner

Ubakus hjemmesiden er brugt som beregner af u-værdien for alternative bygningsdele, hvor u-værdien ikke var angivet i forvejen. Metoden på hjemmesiden er iht. til DIN 6946, men kan justeres i hånd så den er i overensstemmelse med beregninger iht. DS418 [18]. Materialeegenskaberne er baseret på ökobaudat produktdata. Ubakus er også brugt til at indhente klimapåvirkningen for de byggematerialer, som ikke fandtes i LCAByg som standard.

2.5.2 Standarder og anvisninger

Alle beregninger er iht. gældende standarder, anvisninger og vejledninger, og danner grundlag for rapportens beregninger og sætpunkter. Herunder er de vigtigste listet op:

SBi Rapport 2013:20, Dagslysberegninger i Praksis

SBi Anvisning 219, Dagslys i rum og bygninger

DS/EN 17037, Dagslys i bygninger

IES LM-83-12, Spatial Daylight Autonomy an Annual Sunlight Exposure
bre, BR209, Site layout planning for daylight and sunlight [19]

SBi Anvisning 213 Bygningers energibehov beregningsvejledning

DS418:211, Beregning af bygningers varmetab

SBi Anvisning 182, Indeklimahåndbogen

SBi Anvisning 190, Bygningsudformning og varmebehov

SBi Rapport 230, Indeklimaets påvirkninger

LCA i tidlig bygningsdesign

LCA i Praksis

Vejledning om den frivillige bæredygtighedsklasse

3. Metoder og materialer

I dette kapitel beskrives hvorledes bygningens dagslysadgang, dimensionerende varmetab, energibehov, sommerkomfort samt klimapåvirkninger, er beregnet. Herunder hvilke inputparametre, der er anvendt og hvorfor.

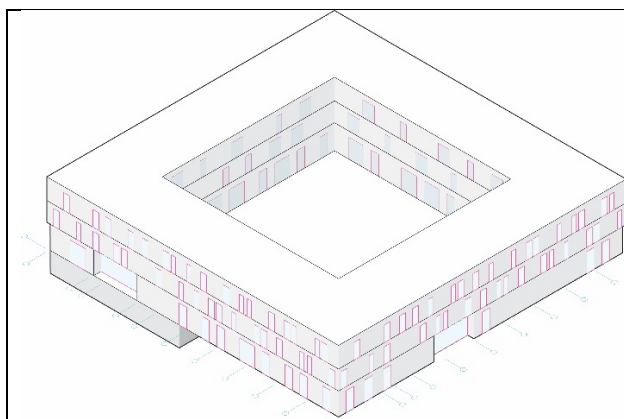
I et kapitel 4 præsenteres og analyseres resultaterne af beregningerne. Her beskrives også hvilke kritiske parametre der kan reduceres, og hvilke forbedringer de kan skabe.

3.1 Beregningsmodeller- generelle forudsætninger

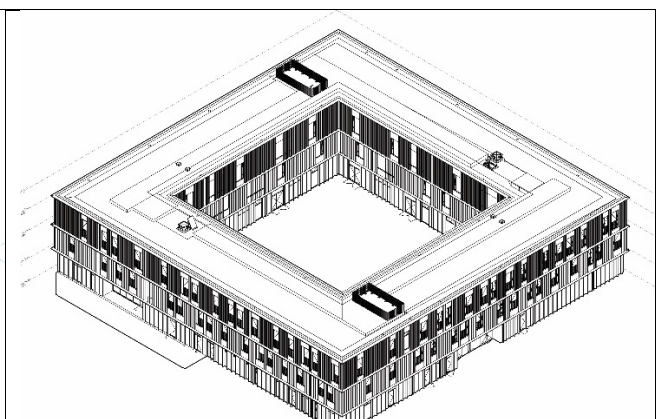
3.1.1 Modelopbygning

Basis for alle beregninger og simuleringer er hvad der kaldes en massemodel. Det er en repræsentation af bygningen i sin udvendige brutto størrelse, med sammensatte, plane overflader. Det er første skridt til en videre bearbejdning til en energimodel og en dagslysmodel.

Dette er en form, hvori der nemt kan laves justeringer uden at det tager meget tid at modellere det manuelt eller bygge det parametrisk op. For mængde udtræk til Be18, skal der tages højde for at massen er modelleret så de indeholder de korrekte størrelser af transmissionsarealerne og linjetab.



Figur 14, Massemodel af Granvej case baseline

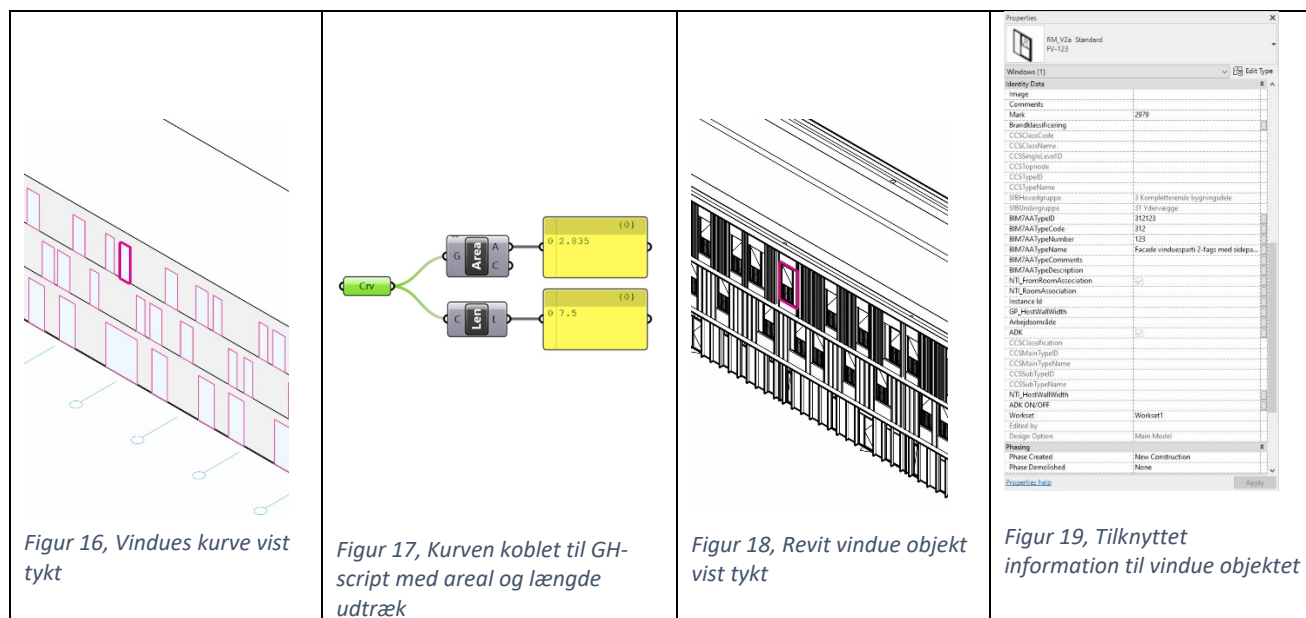


Figur 15, Arkitekt model af casebygningen

Forskellen mellem en projekteringsmodel, en BIM-model, og en massemodel er vist i hhv. Figur 15 og Figur 14. Man kan tydeligt se forskellen i detaljeringsgraden. Der er også forskel på hvilken information, der er tilknyttet modelobjekterne. Objekterne i massemodellen har i udgangspunkt kun geometrisk information og objektidentitet.

Disse informationer kan fremkaldes gennem programkommandoer eller ved visuel programmering eller 'scripting', i dette tilfælde med Rhino plug-in Grasshopper (GH). Modelobjekter linkes her til scriptet via nogle prædefinerede 'code blocks', der som byggesten samles til et større script.

Se Figur 16 og Figur 17, Her er det modelkurven, der bliver linket ind og efterfølgende analyseret på areal og længde, som bliver vist i et gult notitspanel. Der er metoden at fremkalde geometriske informationer i en massemodel i Rhino, Figur 16, med hjælp af Grasshopper, Figur 17. I BIM-modellen, Figur 18, er der ud over de geometriske egenskaber, også tildelt kodering iht. f.eks. BIM7AA, Figur 19, som kobler oplysningerne af model objekter videre i projekteringsforløb til beskrivelser og tilbudslisters.



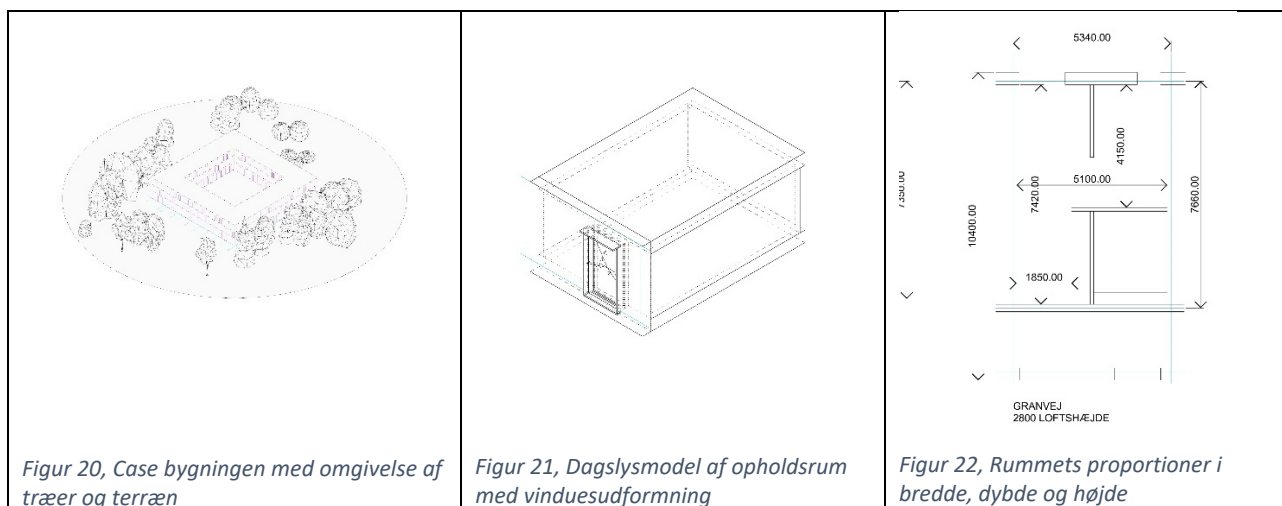
Til dagslysberegninger, og øvrige mængdeudtræk til LCA-beregning samt indeklimasimuleringer, er der anbragt større detaljeringsgrad og tilføjet relevante data, der hvor det skønnes nødvendig. Samtidig er der lavet variationer på parametervariationer og undersøgelser i forskellige modeller. Disse parametervariationer vil blive uddybet i de følgende afsnit.

3.1.2 Dagslys

En dagslysberegning indeholder, som beskrevet i afsnit 2, tre kritiske dele, der påvirker mængde og kvalitet af lyset som falder ind i rummet. Det er:

1. Himlen (Klimadata)
2. Omgivelserne, Figur 20
3. Vinduesudformning, Figur 21
4. Rummets udformning, Figur 22

For at kunne analysere på effekten af forskellige parametervariationer, er det nødvendigt at kunne ændre på del 2, 3 og 4 hver for sig. Del 1 kan man ikke ændre på for beregninger der tjener dokumentation til byggeandragende.



1. Effekten af solstråling, der rammer jordens overflade som årsag af himmelhælvets variationer over tid, er fastlagt for alle årets timer i en klimafil. Den fil, der skal bruges til dokumentation, er lavet af DMI i 2013 og er en sammensætning af data, der spænder over en måleperiode fra 2001 til 2010. Der hvor rapporten omhandler bygninger i Danmark, er det DRY2001-2010 der skal bruges, men for andre geografiske lokationer kan man anvende andre klimafil, så man er i stand til at simulere dagslys der.

2, **Figur 20.** Omgivende terræn skal som en håndregel mindst være 2 gange så stor som den scene man simulerer [20] ved brug af Radiance beregningsprogram. Det har at gøre med præcision og oplysningsindstillinger. For øvrige omgivelse er det vigtigt, at alt der kan give skygge tages med som defineret i vejledning om 10 %-reglen [8], det gælder såvel nabobygninger som træer.

Konform LM-83-12, skal man modellere alle bygninger og ikketransparente objekter inden for mindst 30 meter fra de rum man undersøger. Hvis der ikke er nogen objekter inden for den afstand, skal man regne med en fiktiv nabobygning, der har samme højde som den bygning man undersøger, med en afstand der er lig med størrelsen af bygningen man undersøger.

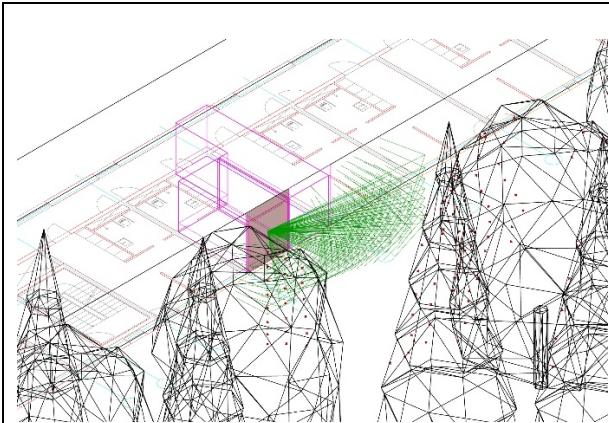
Det giver god mening i byplanlægningsfaser, hvor man ikke kender den endelige udformning af nabobygninger endnu. Man sikrer herved, at man til en vis grad tager højde for mulige fremtidige ændringer i omgivelserne. Her kan man trække en parallel til himmelgrænseplanet [10], hvor der generelt kan antages, at hvis højde vinkel fra midten af vindue til overkant af nabobygning er mere end 20° så vil dagslysadgangen være væsentligt forringet. Som minimum burde man modellere omgivende bygninger, der resulterer i et himmelgrænseplan af den størrelse.

For case bygning Granvej er det fredede træer inden for de nærmeste 30 meter, der danner omgivelserne. Disse er modelleret iht. opmålinger fra landskabsarkitekt med den rigtige højde, størrelse af trækrone og form efter trætype. Reflektansen af træerne er 10 % iht. tabel 1. i vejledning til BR18 kap. 18 §379-381 [11]. Effekten af disse omgivelser er undersøgt ved at undersøge tre varianter af modellering, se resultater 4.2.1.

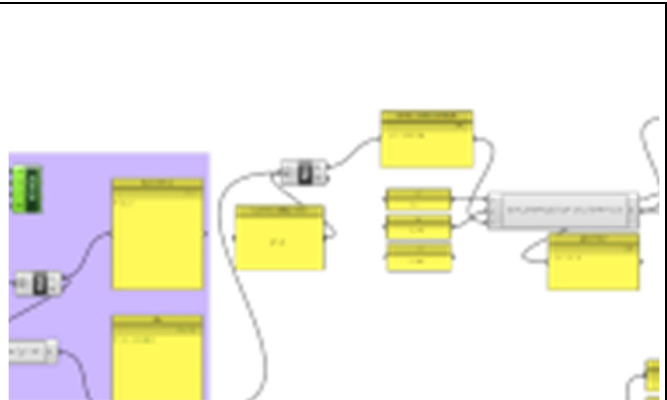
3, **Figur 21.** Vindues udformning har primært haft størrelsen af glasareal som fokusområde. Indflydelsen af detaljeringsgraden af vindueskarm og lysningsdybde, samt LT af glasset, er undersøgt som parametervariation. Glasarealet er bestemt på iterativt vis, hvor udgangsstørrelse er bestemt efter følgende håndregel:

$$WWR > \frac{DF}{10 \times \tau_{vis}} \frac{90^\circ}{\theta}$$

Hvor WWR står for Window to Wall Ratio, DF for Dagslys Faktor, T_{vis} for glassets lystransmitans og θ for Sky angel som kan omskrives til $90^\circ - (V_h + V_{oh})$ [8] [21]. Se tidligere viste Figur 10. V_h står for horisontvinkel og V_{oh} for vinkel af overhæng.



Figur 23, Rhino, GH-model med vektor opmåling af V_h af træerne

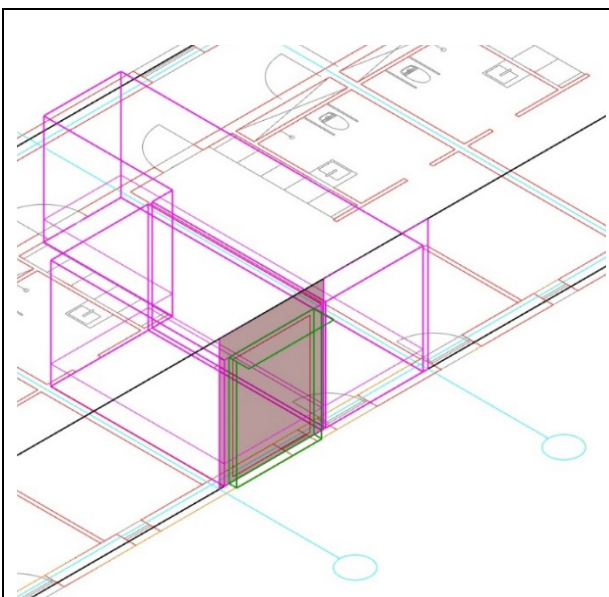


Figur 24, Udklip af GH-script med WWR formul

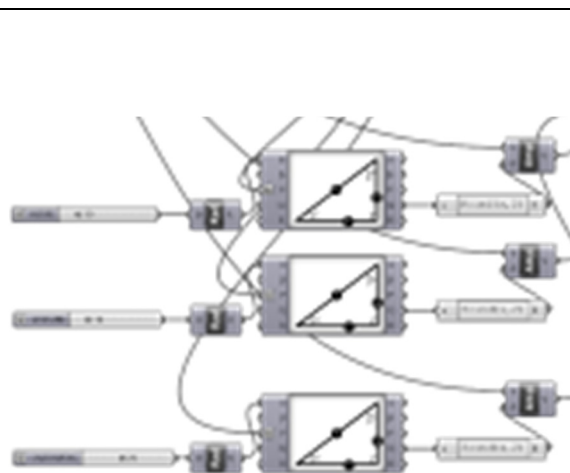
Fra facaden af det undersøgte rum er der beregnet V_h ved hjælp af vektorberegning og optælling af sammenskæringer med omgivende træer, iht. metoden beskrevet i vejledning om 10 %-reglen, Figur 23 og Figur 24.

V_{oh} , vinkel af overhæng, er valgt ifølge arkitektprojektet, hvori der er artikuleret en horisontal lagdeling af bygningen ved hjælp af vandrette facadeprofiler. Vinklen fra midten af vinduet, som disse bånd resulterer i, er målt på arkitekttegningerne. Gennem in kap. 4 forklarede parametervariationer er dybde på disse bånd undersøgt,

Figur 26.



Figur 25, Parametrisk vindue siddeskygge og overhæng i grøn linje



Figur 26, Udklip af GH-script med variabel sideskygge og overhæng, bestemt i vinkler målt fra midt vindue

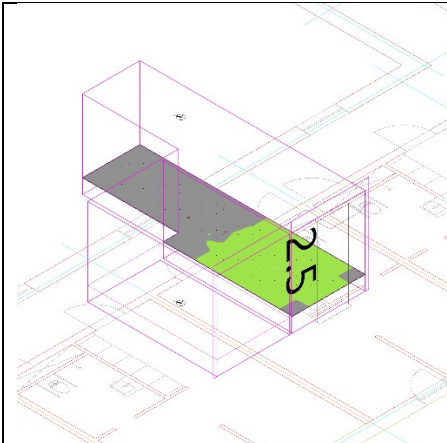
Efter bestemmelse af θ = Sky angel er WWR regnet ud med $DF=2,1$ og $LT=0.75$. Ved en variabel glashøjde er glasbredden udregnet.

Der er antaget, at der som minimum er en vindueskarm og gående ramme på hver 50 mm i bredden, som derved tegner vindueshullet i ydervæggen. Sideskygge udadtil, samt overhæng, er bestemt ud fra en variabel vinkel iht. hhv. vinduets bredde og højde, Figur 25. Indvendig lysningsdybde er antaget at være 300 mm, iht. arkitekttegningerne og er holdt som et minimum [2] og en fast værdi.

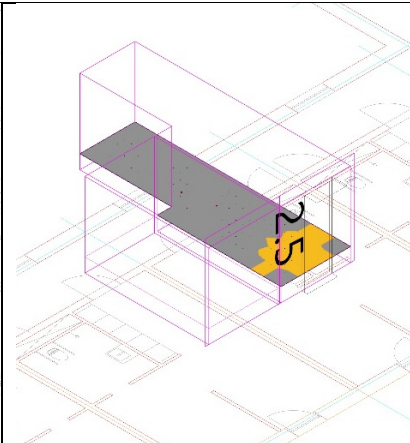
4, Figur 22. Nu er alt klar til at blive overført til ClimateStudio, hvormed der beregnes de faktiske belysningsstyrker. Her bliver der tildelt materialeegenskaber til rummets indvendige overflader, samt omgivelserne. Overfladereflektanser for væg, gulv og loft mm. er standardværdier, som angivet i BR18, og er de samme iht. DS/EN17037 og LM-83-12. Til glasset er der tildelt 2 variationer, en 2-lagsrude med en LT på 0.80 og en 3-lagsrude med en LT på 0.71. Det er de ruder fra programmets bibliotek, der er tættest på lagerførte ruder på markedet. Se bilag glassolutions.

Beregningspunkterne er sat med udgangspunkt i en afstand på 500 mm, med en kontrolsimulering med en afstand på 250 mm. Radiance følsomhed er der ikke varieret på, den er holdt på programmets standard ($as=6400$, ab 7). I programmets version 1.7.8145.24039 er det ikke muligt at lave GH simuleringer iht. DS/EN17037. Der er derfor i stedet valgt at lave disse iht. LM-83-12, som har den forskel at betragtningsperioden er mellem kl. 8.00 og 18.00. For BR18 svarer det til at man har dokumenteret sin dagslysadgang efter en dokumenteret anden beregningsmetode. Se BR kap. 18 §379 [11]. Effekten af den forskellige betragtningsperioder er ikke dokumenteret i rapporten. Jeg har lavet én kontrolsimulering med DS/EN17037 betragtningsperiode og fundet resultatet næsten ens.

Resultat af simuleringen er herunder grafisk repræsenteret ved at farve det areal grøn, der overholder $sDA_{300,50\%}$ regnet ud som andel af det betragtede areal, Figur 27.



Figur 27, sDA areal i grøn samt glasareal (2.5) i m²



Figur 28, ASE areal i gul

Metrics

LEED daylight credits
1

Spatial Daylight Autonomy [fraction of area]
0.5028

Annual Sunlight Exposure [% area]
0

Mean illuminance [lux]
1284.8751

Fraction of time operable blinds are up or EC
-1

Figur 29, Udklip af GH-script med beregnede sDA og ASE, samt gennemsnits belysningsstyrke og status på solafskærmning

Også $ASE_{1000,250h}$ bliver regnet ud og gengivet grafisk med et gult areal, hvorved behovet for at indføre en form for solafskærmning bliver belyst, Figur 28. Både sDA og ASE er også gengivet med et tal, Figur 29.

3.1.3 Energibehov og termisk komfort

Bygningens energibehov bliver beregnet med Be18, idet der er lavet en indledende transmissionstabsberegning. Formålet med den er at bestemme bygningsdelenes gennemsnits U-værdi samt linjetab og vinduernes U-værdi, ud fra rammekrav i BR18 kap. 11 §264 [11]. Det giver indsigt i designets passive kvaliteter, og bruges som startværdier til Be18 beregning. Derudover er det tanken, at det kunne være til nytte for at holde styr på den del af funktionskravene til klimaskærmen, når der skal laves parametervariationer ved LCA-beregning.

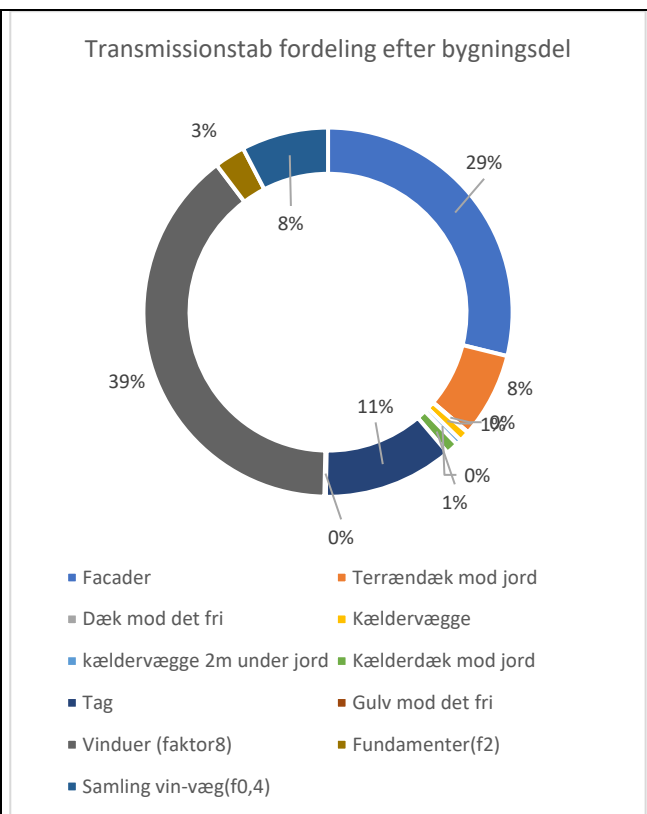
Beregningen substituerer størrelser fra transmissionstabsramme og transmissionstabsberegning:

$$\Phi = 12,0 + 6,0/E + 300/A = \Sigma A \cdot U \cdot \Delta T$$

Nederst i Figur 30 kan man se oplyst faktor (f) ind for vinduer, linjetab ved fundament og samlinger mellem ydervæg og vinduer, fordi disse talmæssigt afviger fra de lukkede bygningsdeles U-værdi. Faktoren er variabel og kan justeres så resultaterne er realistiske.

RAMME TRANSMISSION					
12,0+6,0/E+300/A	= Φ	=		14,06 W/m²	
TOTAL				70703 W	
Σ A*U*ΔT	= Φ				
	AREAL				
Ydervægge, tage og g	Areal (m²)	dT	A*dT	U (W/m²K)	W
Facader	4233,0	32	135456		20381
Terrændæk mod jord	1594,0	22	35068		5276
Dæk mod det fri	7,0	32	224		34
Kældervægge	131,0	32	4192		631
kældervægge 2m und	98,0	22	2156		324
Kælderdæk mod jord	236,0	22	5192		781
Tag	1673,0	32	53536		8055
Gulv mod det fri	18,0	32	576		87
Vinduer (faktor8)	964,0	32	185088		27848
Fundamenter(f2)	330,0	32	12672		1907
Samling vin-væg(f0,4)	1862,0	32	35750		5379
subtotal			469910		70702,8
dU=				0,15	
f vindue U	6			0,90	0,92
f fundament ψ	1,2			0,18	0,12
f samling vinψ	0,6			0,09	0,01

Figur 30, Udklip fra Excel-ark der beregner gennemsnits u.værdi.



Figur 31, Diagram af beregning

Transmissionsarealerne er trukket ud ad 3Dmodellen som angivet i afsnit 3.1.1 Derefter er beregning lavet i Excel, hvor også cirkel-diagram er fremstillet, Figur 31. Det viser sig at transmissionstabsramme giver plads til en gennemsnits-U for lukkede bygningsdele af $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ i kombination af vinduer med $U=0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$, ψ -fundament på $0,18 \text{ W/mK}$ og ψ -samling mellem vindue og væg på $0,09 \text{ W/mK}$.

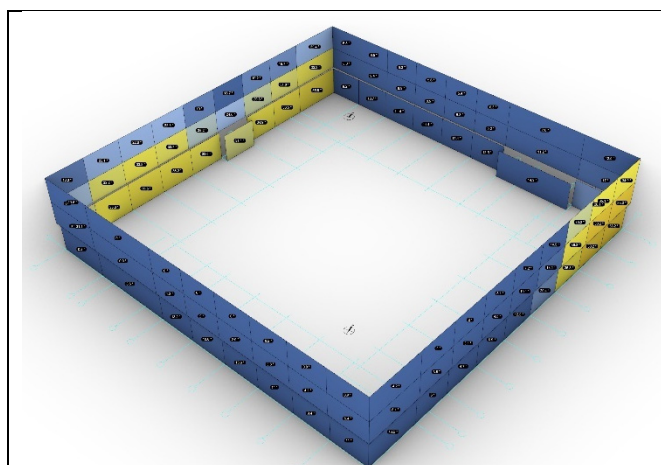
Til beregning af energibehov har jeg haft adgang til 2 sæt Be18 beregninger. Det 1. sæt har jeg været medforfatter på i semesteropgaven til Nybyggeri. Det andet sæt er lavet af EKJ rådgivende ingeniører i dispositionsforslagsfasen. EKJ's beregning er, efter sammenligning med semesteropgavens beregning, vurderet som at være mere retvisende.

Be18 beregningen er opdelt i to, der case bygningen som nævnt er sammensæt af 2 boligetager og en etage med andet program. For at anvende rådgiverens beregninger i rapporten er der lavet ændringer til:

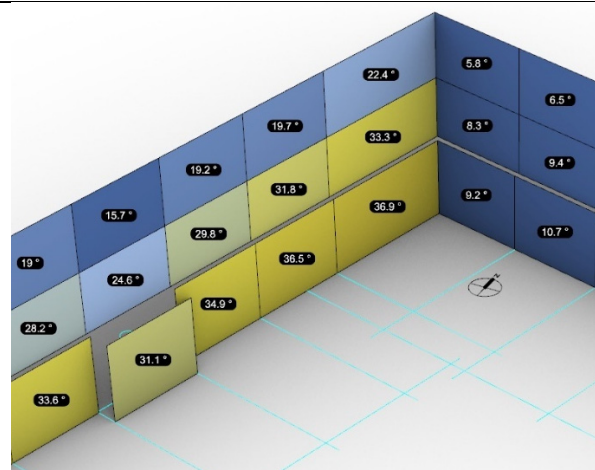
1. Transmissionsarealer, linjetab og u-værdierne
2. Skyggende faktorer
3. Overtemperatur

Her er det de samme transmissionsarealer fra massemodellen, der er overført til Be18, så der konsistens mellem beregningerne. I massemodellen er også omgivelserne modelleret, og beregning af størrelser til afsnit skygger er også baseret på massemodellen, Figur 20.

Det samme GH script som brugt til beregning af Vh til dagslysberegningen, er brugt til beregning af horisontskygger. I Be18 kaldes Vh for horisontvinkel, disse er grundet omgivelse, forskellig for hver facadeorientering, position og etage. Resultaterne er samlet op som tal og gengivet med en farveskala, Figur 32. Højre og venstre skygge er antaget til at være domineret af dybden af lysningen og de lodrette profiler ved siden af vinduerne, iht. arkitekttegningerne.



Figur 32, Syd-Øst isometri af modul og etage opdelt ydrer facaden



Figur 33, Udklip af Nord-Vest hjørnet

Straffe-tillæg i energibehov pga. overtemperatur har jeg så vidt muligt undgået ved anvendelse af naturlig ventilation. Dertil er den maksimale ventilationsrate ved vinduernes oprindelige størrelse (ud fra arkitektprojektet) beregnet iht. SBi 213 afsnit 6.4 Ventilation om sommeren. Se Figur 34, Figur 35, Figur 36.

A vindue	2x 2,5m2=	5 m2
Ff	0,74	
½ karm=Aåbning	0,87	4,35 m2
Aef 60%	0,6	2,61 m2
Arum/Aåbning 4%	2,61/29,7	8,8 %
	(8,8/4)*0,9	
Maks nat vent		1,98 l/sm2

Figur 34, Udklip af Excel-ark der regner maksimum ventilationsrate ud.

Mest solbelastede rum (kun boliger)

Gulvareal, m²

Ventilation, l/s m²

Vinter

Sommer, dag nat

Antal timer over

27 °C 28 °C

100 19

Figur 35, Udklip af Be18 sommerkomfort for sydvendt bolig

Bidrag til energibehovet	
Varme	30,6
El til bygningsdrift	23,6
Overtemp. i rum	0,0

Figur 36, Udklip af Be18 der viser 0,0kWh/m² tillæg for overtemperatur

Tabel 1, Beregning af casebygningens energibehov, energiramme og transmissionsramme

EB.01

ENERGIBEHOV

CASEBYGNING

	AREAL	TID	BEHOV	VÆGTET	U. SOLC.	VÆGT U.C.
BOLIG	3497	168	24,8	16,8	48,9	33,1
ANDET	1669	168	84,6	27,3	109,2	35,3
REFERENCE			29,7	9,6		
BEBYGGET	1673					
SAMLET	5166			44,1	kWh/m ²	68,4 kWh/m ²
RAMME TILLÆG				17,7	kWh/m ²	

	AREAL	Φ	VÆGTET
BOLIG	3497	9,5	6,4
ANDET	1669	11,4	3,7
TRANSMISSION			10,1 W/m ²

NORMAL RAMME UDEN TILLÆG

	AREAL	RAMME	MELLEM	VÆGTET
BOLIG	3497	30	1000	30,3
ANDET	1669	41	1000	41,6
SAMLET	5166			33,9 kWh/m ²
RAMME MED TILLÆG				51,7 kWh/m ²

$$E = 3,087866$$

$$12,0 + 6,0/E + 300/A = \Phi = \mathbf{14,00 \text{ W/m}^2}$$

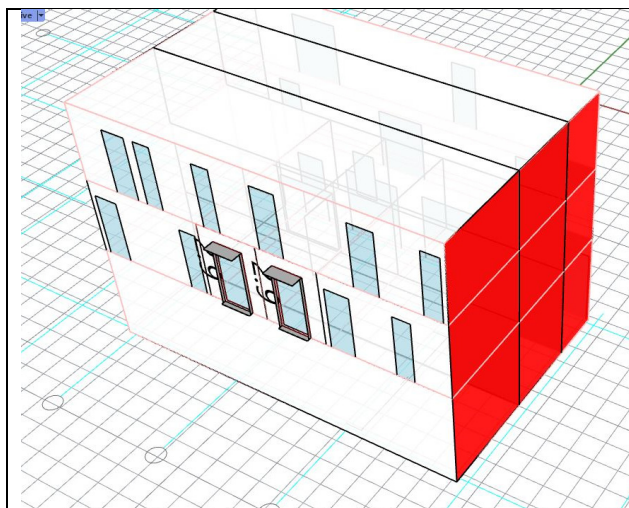
LAVENERGI RAMME UDEN TILLÆG

	AREAL	RAMME	MELLEM	VÆGTET
BOLIG	3497	27	0	27,0
ANDET	1669	33	0	33,0
SAMLET	5166			28,9 kWh/m ²
RAMME MED TILLÆG				28,9 kWh/m ²

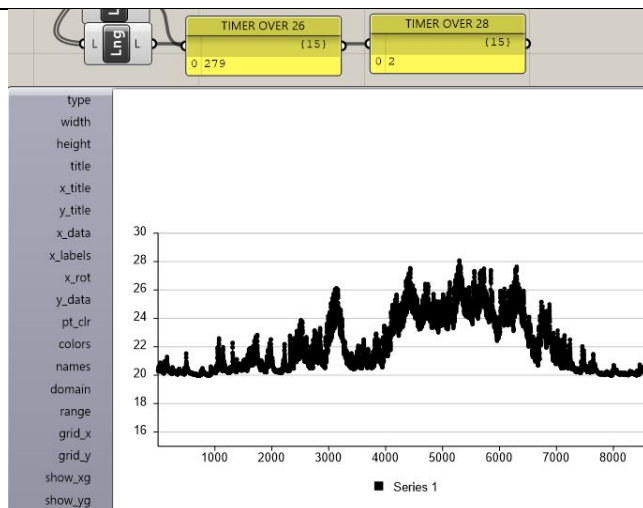
$$11,0 + 6,0/E + 300/A = \Phi = \mathbf{13,00 \text{ W/m}^2}$$

Det samlede beregnede energibehov for case bygningen er opsamlet her i Tabel 1.

For parametervariationen, der udregner påkrævede glasarealer, er der ved hjælp af en dynamisk simulering i ClimateStudio. Her er 80 % af den parametriske det samme som dagslysberegning og er på den måde nemt tilpasset. GH-scriptet er justeret for at kunne beregne den operationelle temperatur T_{opt} i boligen efter man har beregnet et vis glasareal i dagslysberegningen.



Figur 37, Isometri af energimodel i Rhino



Figur 38, Udklip af GH-script med opsamlede overtemperatur timer og årlig temperaturgraf

Der er valgt at modellere et lodret udsnit af bygningen i tre etager, med bredde af tre boliger, så naboboligerne til den undersøgte bolig er medtaget, Figur 37. Naboerne til den undersøgte bolig er set som termiske zoner med konstant temperatur. Og der er ingen 'mixing' imellem zonerne. Der er både simuleret med og uden naturlig ventilation, og resultaterne er opsummeret som temperaturgraf og optælling af antal timer over grænseværdi af hhv. 27 og 28 °C, Figur 38.

Der må bemærkes at disse simuleringer kun er brugt vejledende i designfase. Dokumentation af sommerkomfort til boliger laves med Be18 som vist i Figur 34, Figur 35 og Figur 36.

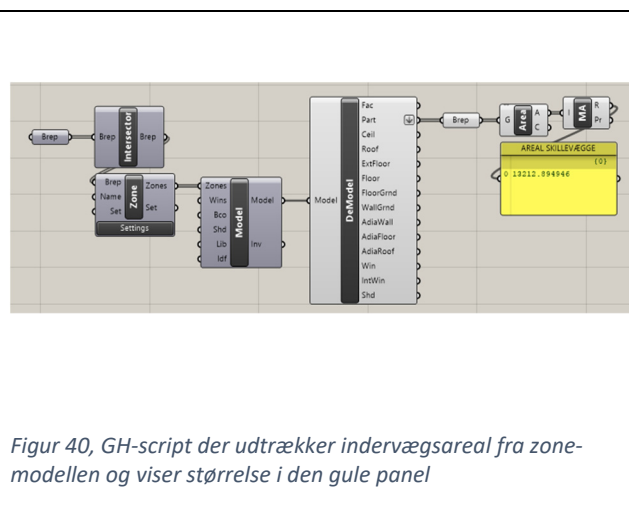
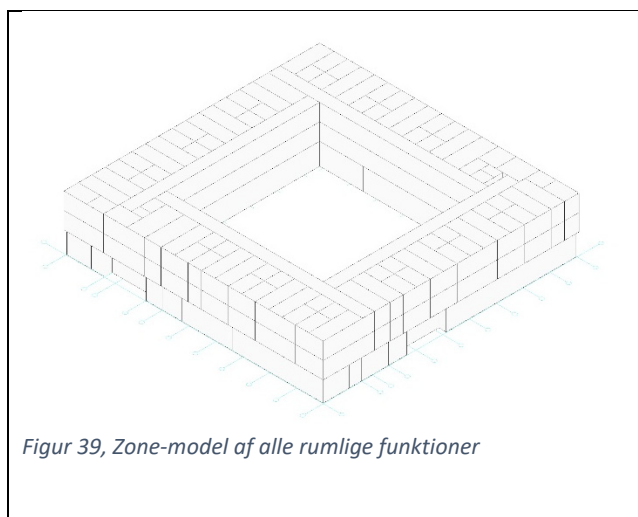
3.1.4 Klimapåvirkning

Bygningens energibehov beregnet med Be18 danner grundlag for modul B6 (se Figur 12), energi til drift i LCA-beregningen. Før tallene fra Be18 kan indføres, skal der laves to mellemregninger. Da case bygningen indeholder to forskellige funktioner, bolig og andet, er der, grundet forholdet mellem disse, lavet to Be18 beregninger. Tallene fra disse to skal sammenlægges ved at lave et vægtet gennemsnit.

Den anden mellemregning skal fratrækkes 13,2 kWh/m²år fra den producerede energi fra solcellerne, og et eventuelt positivt tal overføres til 'eksporteret energi' [22]. Derudover skal et eventuelt tillæg i energiramme ikke medregnes i LCA-beregningen, som de foreliggende ændringer til bygningsreglement ser ud på nuværende tidspunkt. [1].

I LCAByg programmet har min fokus været på at oprette hvad der betegnes som en bygningsmodel. Her er der oprettet de bygningsdele som er krævet for en beregning iht. til Den Frivillige Bæredygtighedsklasse (FBK). Der er, for den største del, oprettet prædefinerede bygningsdele og konstruktioner hvis de var det samme som bygningsdele i arkitekt-tegningerne. Ved afvigelse af f.eks. lagtykkelse af et materiale, er der lavet en kopi af den prædefinerede bygningsdel og der efter justeret mængderne.

Arealerne af klimaskærmen er indført med de samme bruttoarealer som Be18 beregningen, som er et udtræk fra massemodellen. Da arealet af indervægge ikke findes i massemodellen eller i Be18 beregning, er massemodellen forfinet ved at modellere alle rum som rumzoner, en såkaldt 'Zone Model', Figur 39.

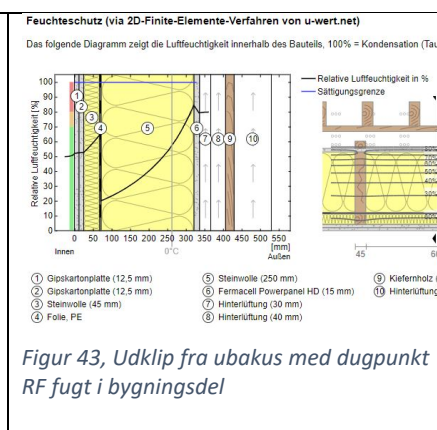
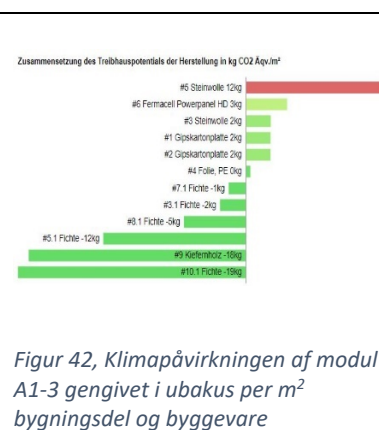
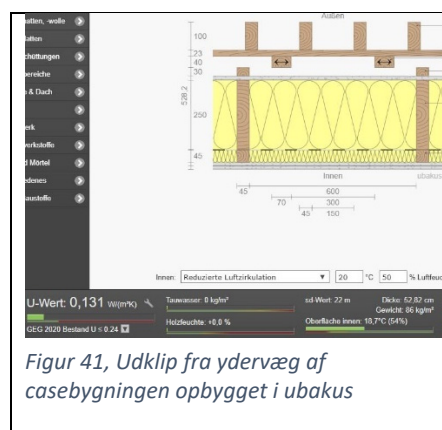


Skillevægsarealet er regnet ud ved hjælp af en ClimateStudio standardfunktion, som selv finder skillevæggene ud fra zonemodellen, Figur 40. 1/3-Del af alle skillevægge er antaget at være bærende, da hver anden tværvæg og ingen af langsvæggene er bærende, iht. plantegningerne. Der er antaget, at hvert rum har én dør og at 25 % af rummene har et loft der kun er loft i gangarealerne og dele af stueetage. Ved senere projekteringsfaser skal disse antagelser tilpasses virkelige mængder.

For de tekniske anlæg, elevatorer og solceller, er der ingen prædefinerede data i LCAbyg. For disse er der oprettet bygningsdele med data fra produkt EPD-er. Se bilag EPD-er af Sunpower og KONE.

Resultatet af beregningerne er opgjort per bygningsdel og opsamlet i Excel. I Excel er der også lavet parametervariationer, hvor nogen af bygningsdelene er udskiftet med alternativer, hvorefter disse er sammenlignet ved hjælp af grafer.

For at garantere funktionsligheden af disse alternativer, er alle bygningsdele indført i ubakus online u-værdiberegner, og for lyd- og brandkrav er der valgt konstruktioner efter leverandørens anvisninger. Sidegevinsten ved denne arbejdsgang er, at modul A1-3 også er opgjort per kvadratmeter, samt at der er lavet en Glaser-beregning. Sidstnævnte giver mulighed for at lave en overordnet vurdering af konstruktionens robusthed over for fugttransport. Se Figur 41, Figur 42 og Figur 43. Som er vigtig når der sammensættes alternative bygningsdele som skal have funktionslighed.



Her skal det bemærkes, at i ubakus C3 modul, bortskaffelse, ikke er med - ved træ er det forbrænding. Derfor er i en Excel-ark ubakus-værdierne tillagt modul C klimapåvirkningen.

Krydslamineret byggevare af CLT frigiver 1,80183 kg CO₂ per kg (træ+lim) ved forbrænding. Det bliver modregnet den negative klimapåvirkning (GWP) af træproduktets produktion. Hvor meget CO₂ der frigives per kg af andre træsorter, har jeg ikke undersøgt det nærmere.

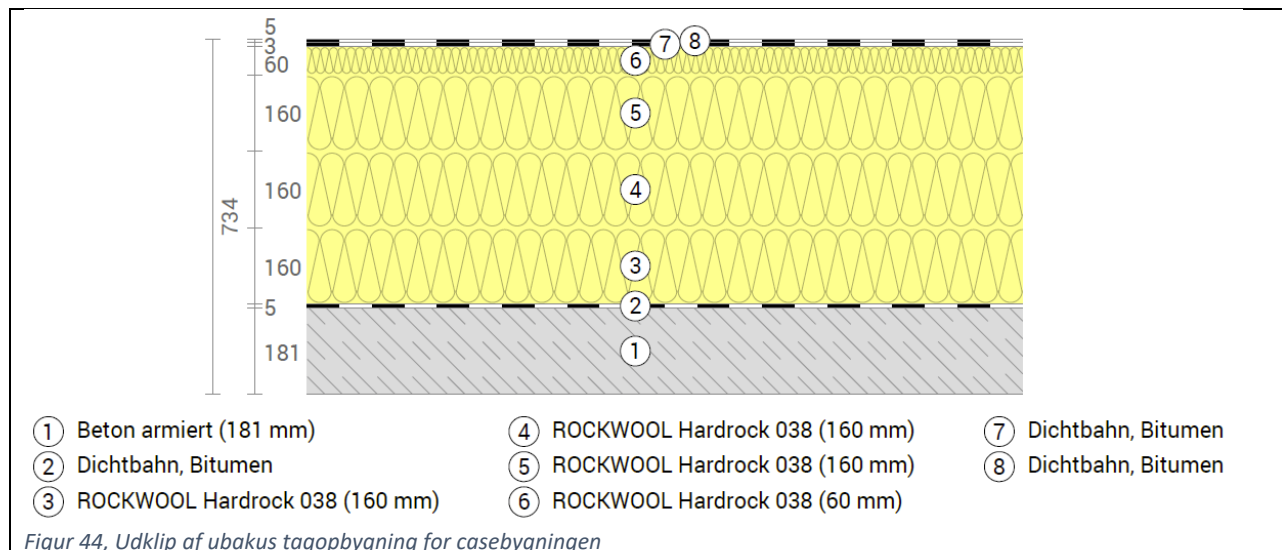
Da sammenligningen af konstruktioner / byggematerialer er på overslagsniveau, har jeg valgt at antage at denne udledning er det samme for alle træprodukter. Da de fleste træsorter til case bygningen, og variationer til bygningsdel er fyrretræ, ligesom CLT er lavet af fyrretræ, antog jeg at en ligestilling af andre træprodukters udledning ved forbrænding med CLT-ets udledning ved end levetid. Grundet CLT-ens indhold af lim er det sandsynligvis højere end ved rent tømmer. På den måde er der indbygget en vis fejlmargen til den sikre side.

Når man laver en endelig livscyklusvurdering til dokumentation, bør man oprette alle materialer i sit beregningsprogram, i dette tilfælde LCAByg.

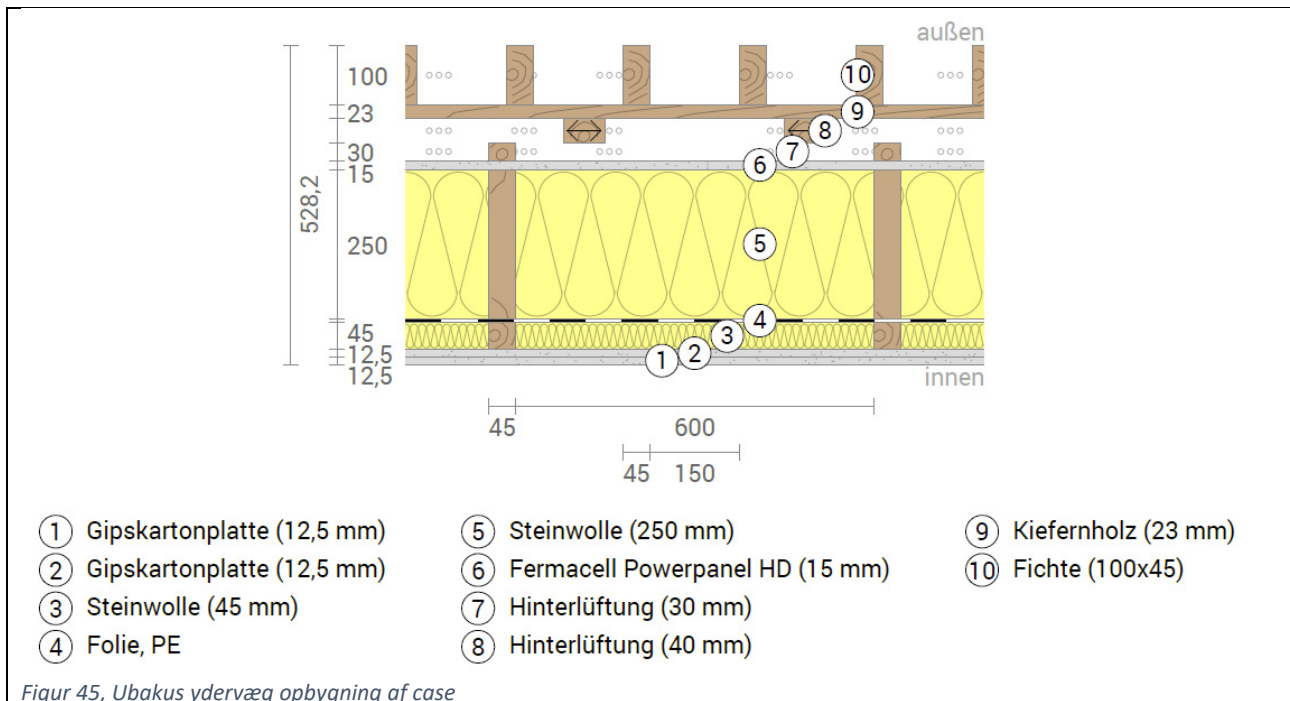
3.1.5 LCA bygningsdele

Som skrevet i afsnittet 'Baggrund', foretages en livscyklusvurdering på baggrund af materialer og drift. Til LCA-beregning er det bygningsdelene, og de byggevarer de er sammensat af, der er grundstenen. Liste over bygningsdele og deres opbygning ser således ud:

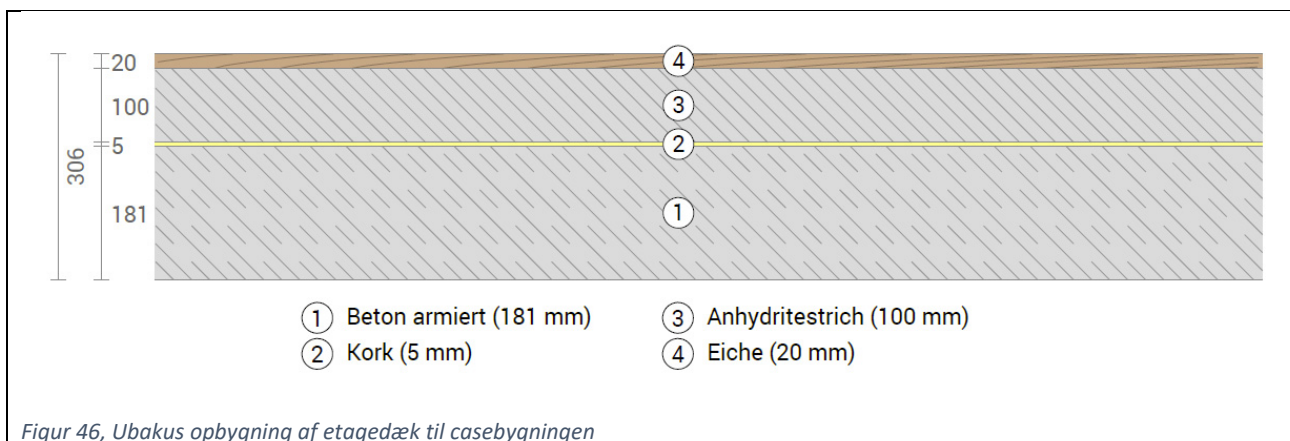
- **Tag**, Se Figur 44, lag 1 er en forenklet fremstilling af et 320 mm huldæk.



- **Ydervægge**, Se Figur 45, i lag 8 antyder pilene, at laget er tværgående. De små cirkler angiver en ventilationsspalte med udeluft.

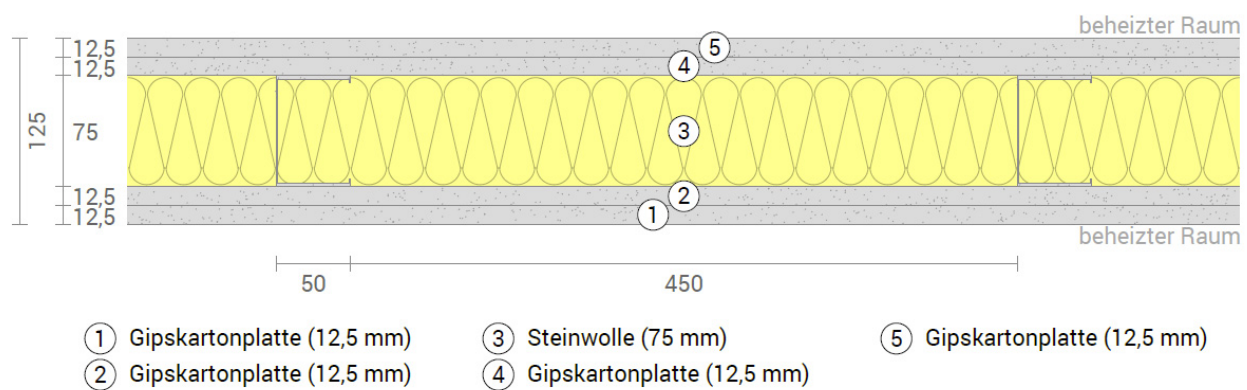
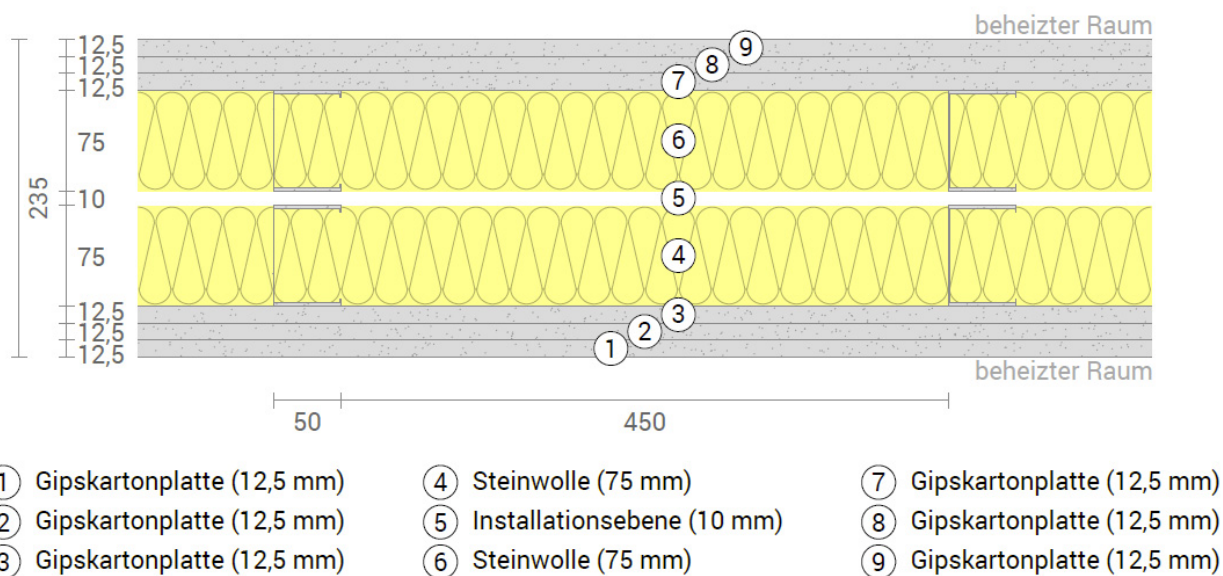


- **Dæk**, Se Figur 46, også her er lag 1 en huldæk på 320 mm, hvor et snit uden kanalformede huller svarer til en massiv plade på 181 mm.



- **Terrændæk**, Som etagedæk, men bærende lag er 200 mm armeret beton. Samt 400 mm EPS-isolering og en damp/radonspærre.
- **Vinduer, døre, glasfacader**, Træ-alu. karm og ramme, 3-lags energirude

- **Indervægge**, Disse er delt i tre typer, boligskillevægge se Figur 47, bærende vægge se Figur 48 og øvrige skillevægge se Figur 49.



- **Søjler og bjælker**, Søjler er kvadratiske, armeret beton 360x360 mm, bjælker IPE, 300
- **Fundamenter**, Regnet som standard linjefundamenter med samme længde som bærende skillevægge og omkreds af terrændæk.

- **Trapper og ramper**, Her er der skønnet gennemsnitstykkelse og areal af præfabrikerede beton elementtrapper.
- **Altaner og altangange**, disse er der ingen af i projektet
- **Ventilation og køl**, Her er der medtaget to anlæg og ét til- og ét fraluft strækning med længde bestemt midt på plan, samt er der medtaget lodrette føringer for hver bolig.
- **Varme**, For varme er der medtaget én installation og ét frem og ét retur stræk per etage.
- **Vand**, For vand rørstrækning er der medtaget samme længde som for ventilationskanalerne.
- **El- og mekaniske anlæg**, Her er der medtaget et EL-anlæg, to elevatorer og solcelleanlæggene.
- **Afløb**, Til afløb er kun faldstammerne med taget.
- **Udendørs areal** Her er der medtaget belægningsreal ind i gården.
- **Andet**, der er ikke medtaget nogle andet.

Ved at gennemføre parameter variationer fra energibehov og dagslys varianter, er de første beregning justeret. Derfor er det model 'KB.01' kaldt for baseline. Disse justeringer har primært været på driftsenergi, ydervægsareal og vinduesareal.

Ud over at gennemføre dagslys- og energiændringer, er der også beregnet materialevariationer. Disse er baseret på udførte referencebygninger, fundet i tidskriften DETAIL nr. 11.2020 [23] og 12.2021 [24]. Jeg har valgt tre bygninger med delvis funktionslighed, også bygget i flere etager og alle med fladt eller næsten fladt tag. Derved kan man med rimelighed påstå at have en funktionslighed af bygningsdele, selvom disse ikke er beregnet.

Disse bygninger er følgende:

- Blandet bolig og kontorbygning, 2226 **Emmenweid**, CH, arkitekt Baumschlager Eberle
- Blandet bolig og erhvervsbygning, Oslo, NO, arkitekt **Alliance** architecture studio
- Kontorbygning for **Küng** Holzbau, Alpnach, CH, arkitekt Seiler Linhart Architekten



Figur 50, 2226 Emmenweis, Baumschlager Eberle ude fra. Facade i kalkpuds, vinduerne i egetræ.



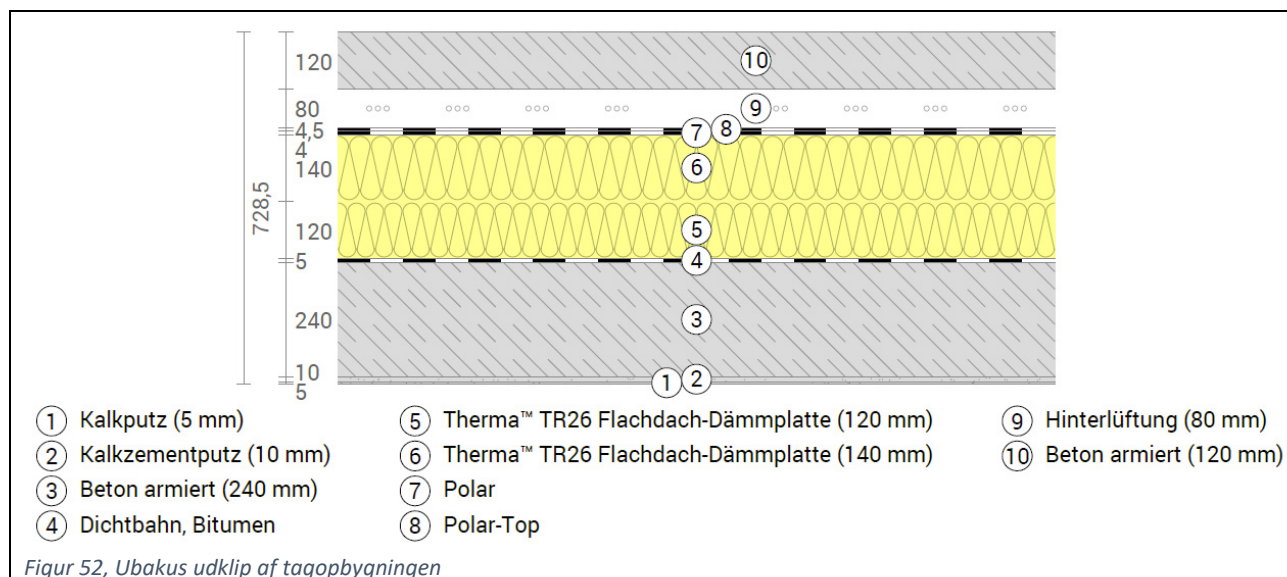
Figur 51, Opholdsrum inde fra. Loft og vægge i kalkpuds, gulv i poleret beton

Emmenweid, Figur 50 og Figur 51, er bygget med tunge materiale med en høj varmekapacitet, og der er ingen varme- eller ventilationsinstallation til at justere hverken udluftning eller temperatur af indeklimaet. Opvarmning sker ved interne tilskud og tilskud fra solstråling. Frisk luft bliver indtaget gennem gående rammer i vinduerne i facaden, som er automatisk styret og aktiveret med CO₂ følere.

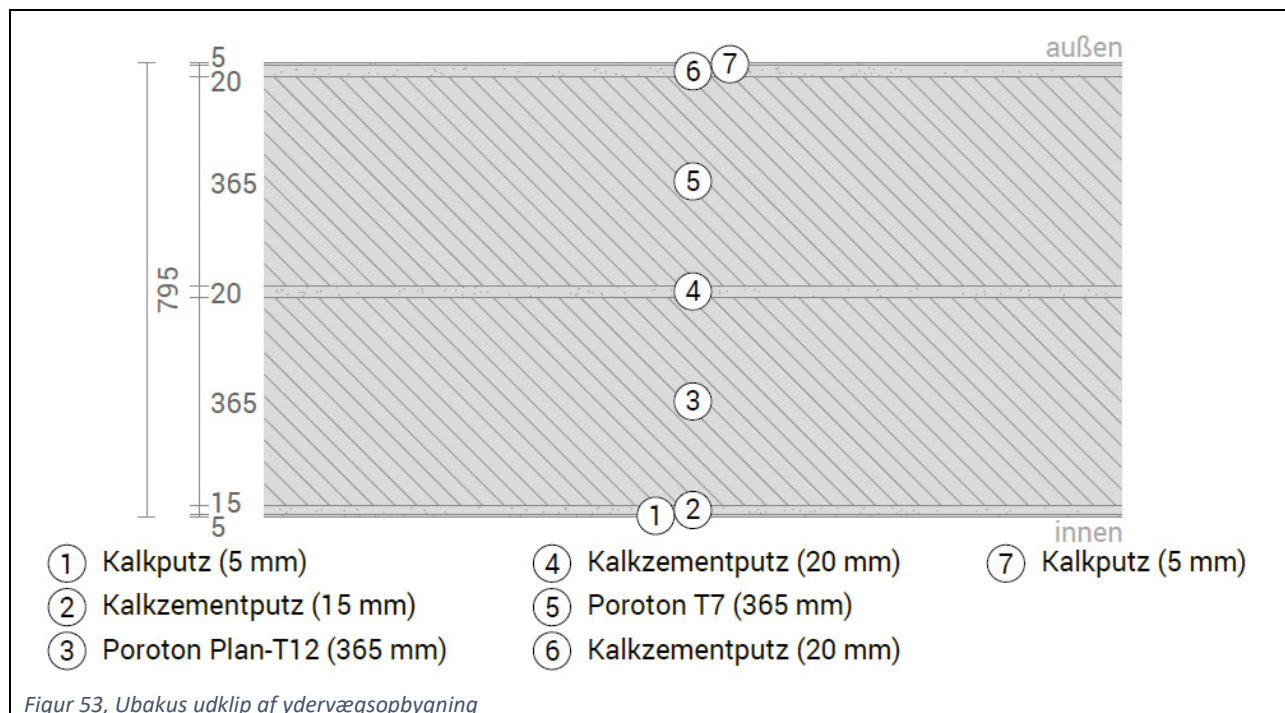
Mangel på installationer er medtaget i LCA-beregningen ved at fjerne ventilationsafsnit fra bygningsdele. Driftsenergi er justeret ved at justere varmekapacitet i Be18 iht bygningsdelenes varmekapacitet. Der er ikke fjernet varme- eller ventilationsinstallation i Be18, da det formentlig kræver en dispensation fra reglerne, og en dynamisk bygningssimulering der dokumenterer overholdte indeklimakrav.

Bygningsdele ser følgende ud:

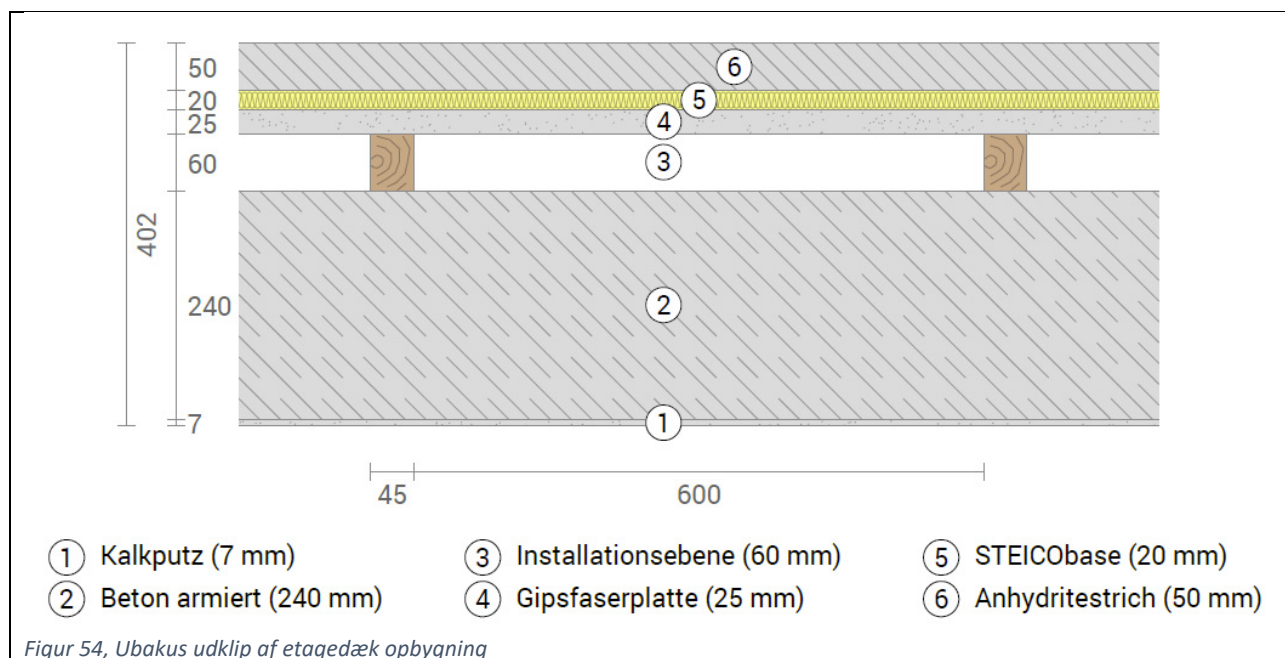
- Tag



- Ydervæg



- Dæk





Figur 55, Gadefacade boliger Oslo, Alliance Architecture studio

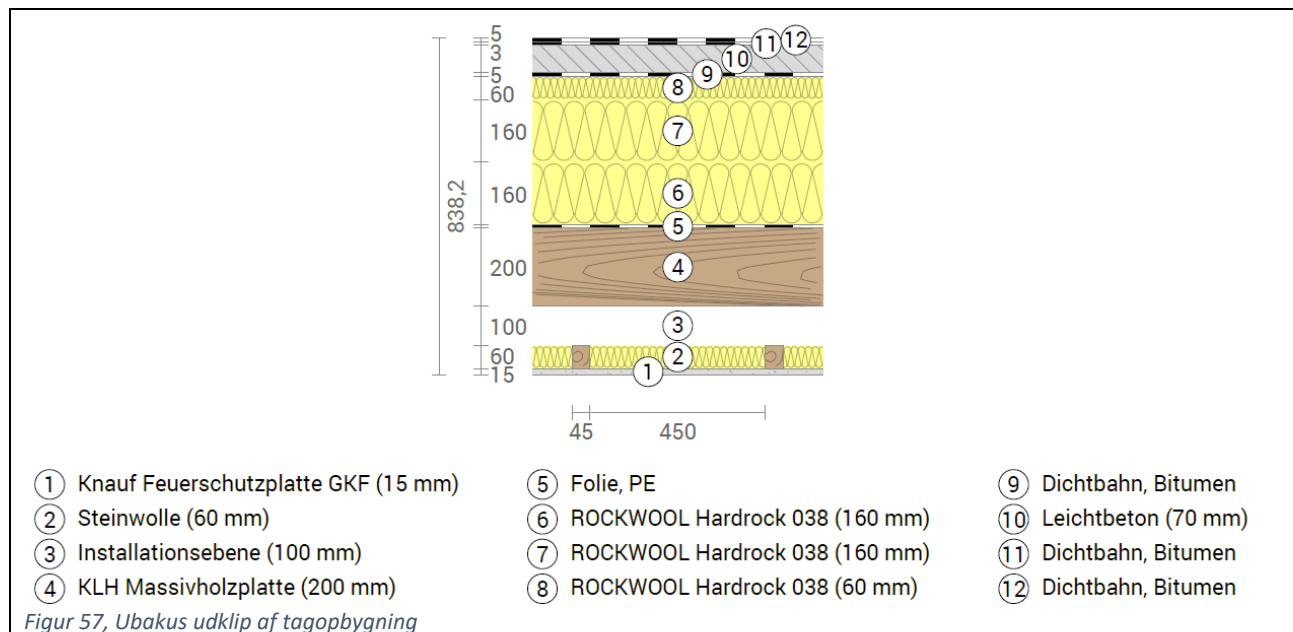


Figur 56, Gårdfacaden

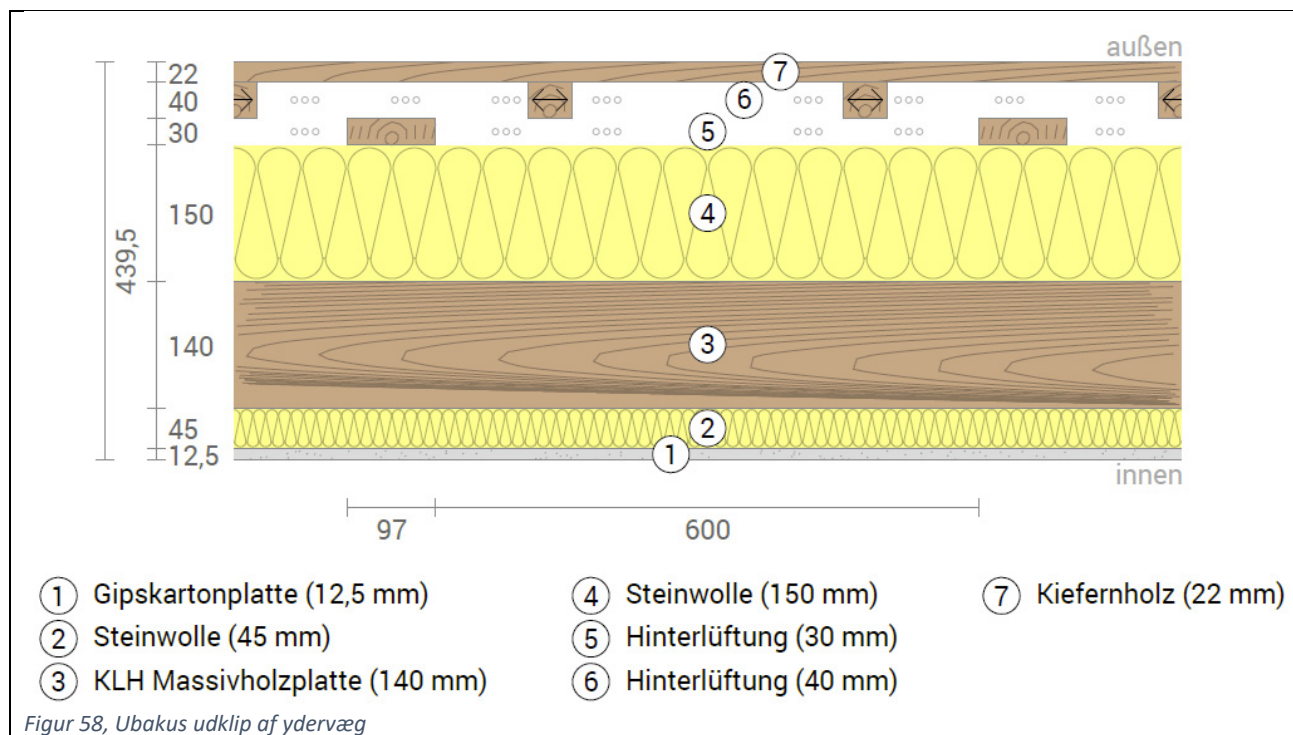
Alliance Figur 55 og Figur 56, Er bygget med en bærende konstruktion i CLT, og ligesom ved Granvej projektet er stueetagen højere, og huser erhverv. På de øvre etager er der boliger. Facaden har også lighed da den er udført med profilerede brædder.

Bygningsdelene ser således ud:

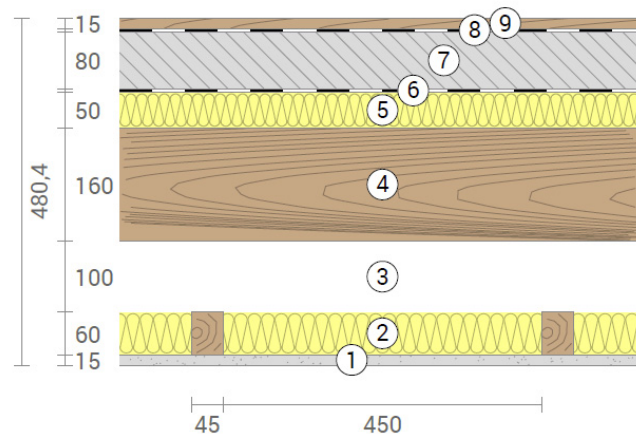
- Tag



- Ydervæg



- Dæk



- | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| ① Knauf Feuerschutzplatte GKF (15 mm) | ④ KLH Massivholzplatte (160 mm) | ⑦ Anhydritestrich (80 mm) |
| ② Steinwolle (60 mm) | ⑤ Steinwolle (50 mm) | ⑧ Folie, PE |
| ③ Installationsebene (100 mm) | ⑥ Folie, PE | ⑨ Eiche (15 mm) |

Figur 59, Ubakus udklip af dækopbygning



Figur 60, Kung Alpnach, Seiler Linhart Architekten

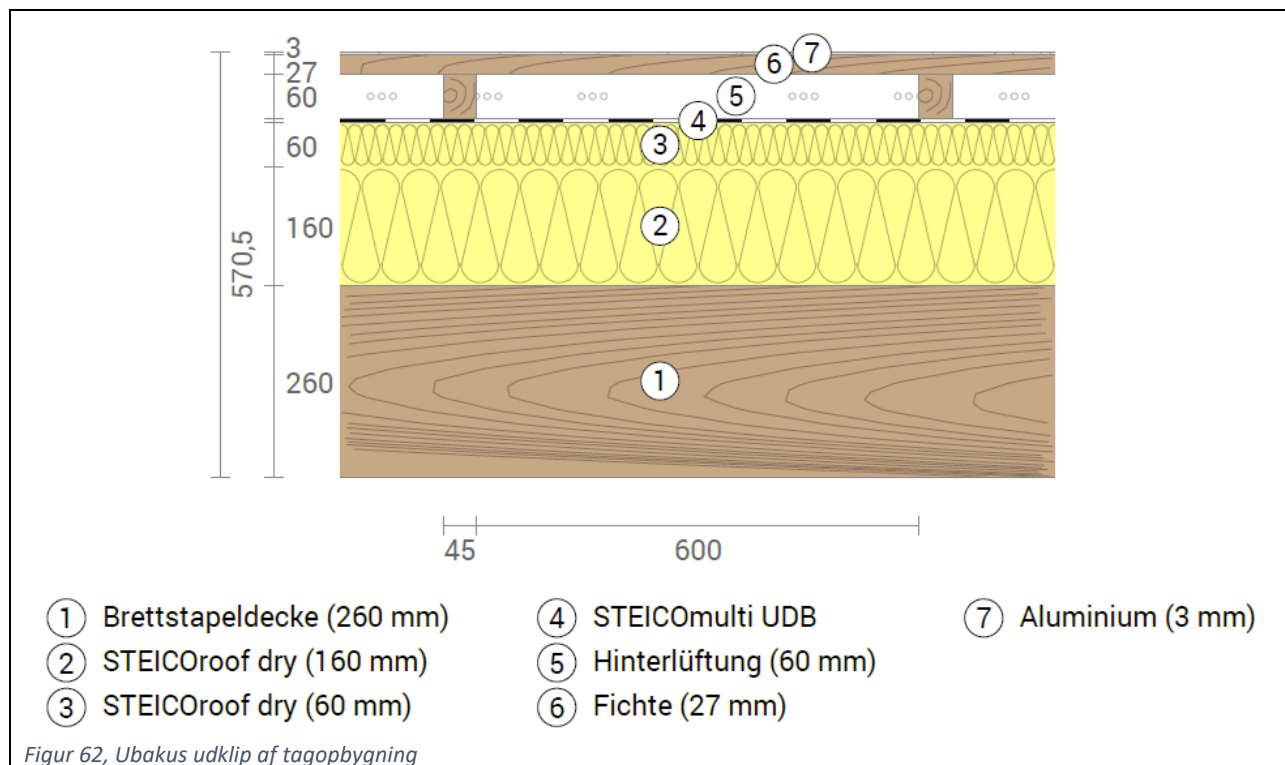


Figur 61, Interiør af personale spisesal

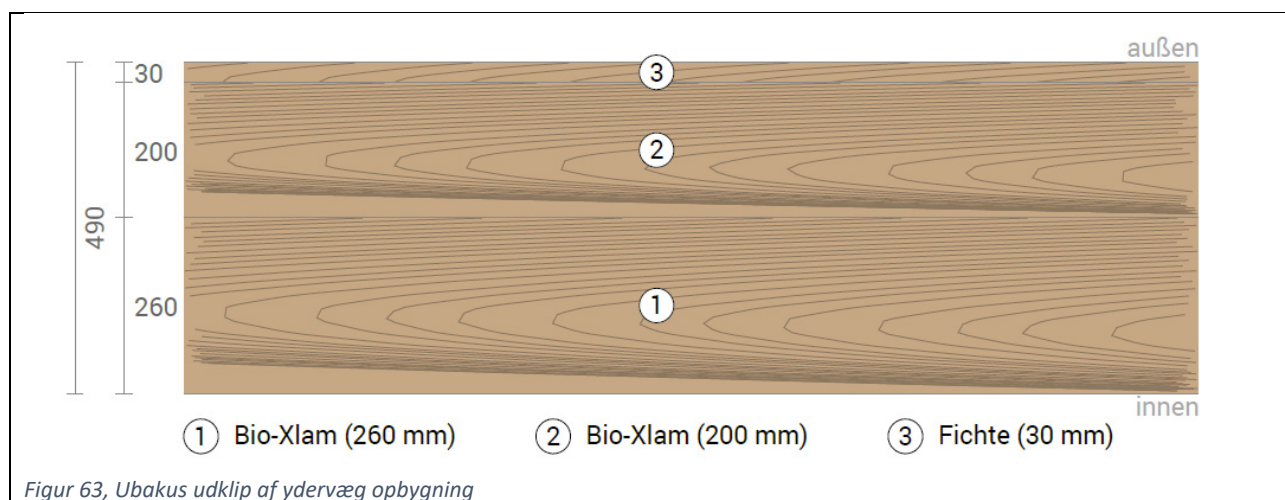
Kung, Figur 60 og Figur 61, Er bygget i et hybridsystem, med pladsstøbt betonkælder og trappekernen placeret centralt i planen. Omkring kernen er resten bygget op i massivtræ. Væg- og dækelementerne er bygherrens egenudviklede produkter. Disse elementer er, lige som med CLT, bygget op af flere krydsende bræddelag. Men der er ikke brugt lim til at holde på dem, men bøjetræsdyvler. Dækelementerne er konstrueret delvis som åbne riste hvor i der er på oversiden er placeret tungt ballastmateriale, og på undersiden lydabsorptionsmateriale.

Bygningsdelene ser således ud:

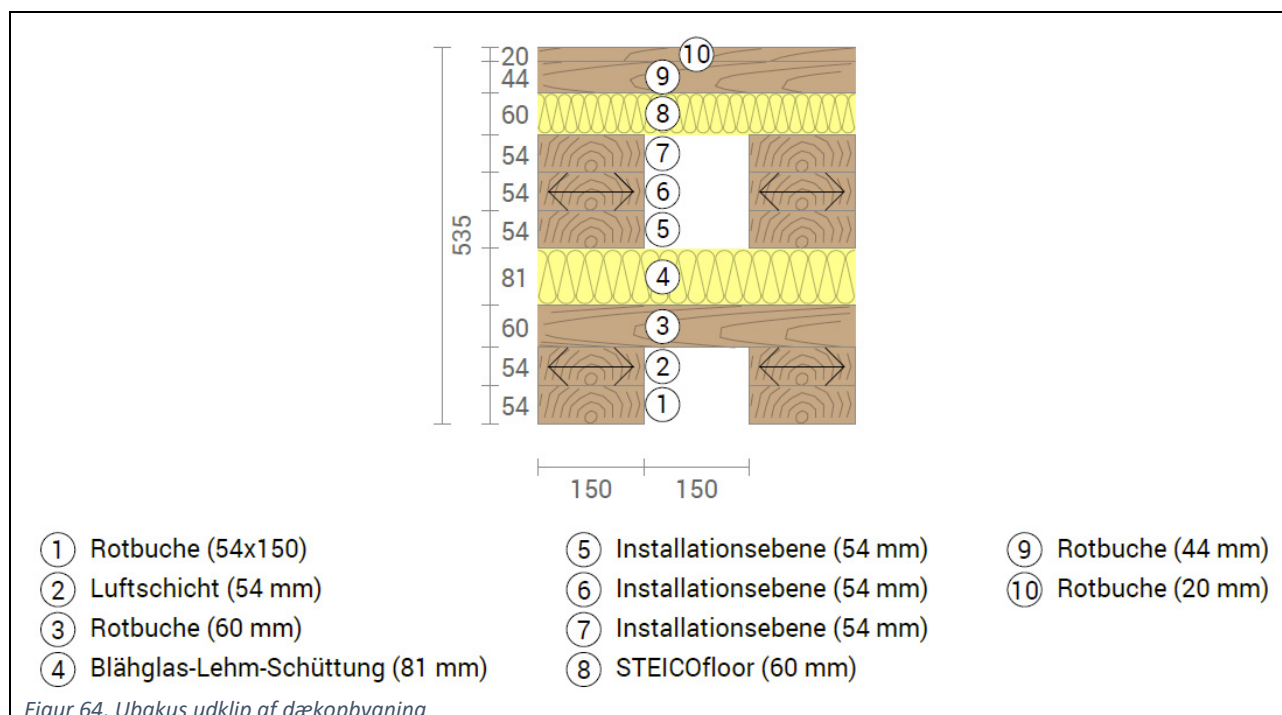
- Tag



- Ydervæg



- Dæk



For alle reference bygningsdelene gælder, at de er sammensat i ubakus webværktøj. Materialerne er overført fra detaljetegningerne i DETAIL og indført, hvor muligt med specifikke produkter. Dermed sikrende at produkterne til tætning og isolering er anvendt rigtigt iht. til funktion.

Det betyder også, at de valgte produkter ikke svarer til dem referencebygningerne er bygget med. Det skyldes at de publicerede detaljer er beskrevet generisk, og at nogen beskrivelser ikke direkte findes som produkt i ökobaudats database.

Fra ubakus er der udskrevet en rapport for alle disse bygningsdele, bla. med GWP for modulerne A1-3 oplyst. For en standard LCA-beregning betyder det, at klimabelastning for de øvrige materialemoduler C3-4 skal tilføjes. Det er gjort i Excel for alle træbaserede produkter, da de frigiver en stor del af deres indlejrede CO₂ efter de bliver brændt, ved end levetid. Ved hjælp af LCAByg er der fundet følgende tillæg for C3-4:

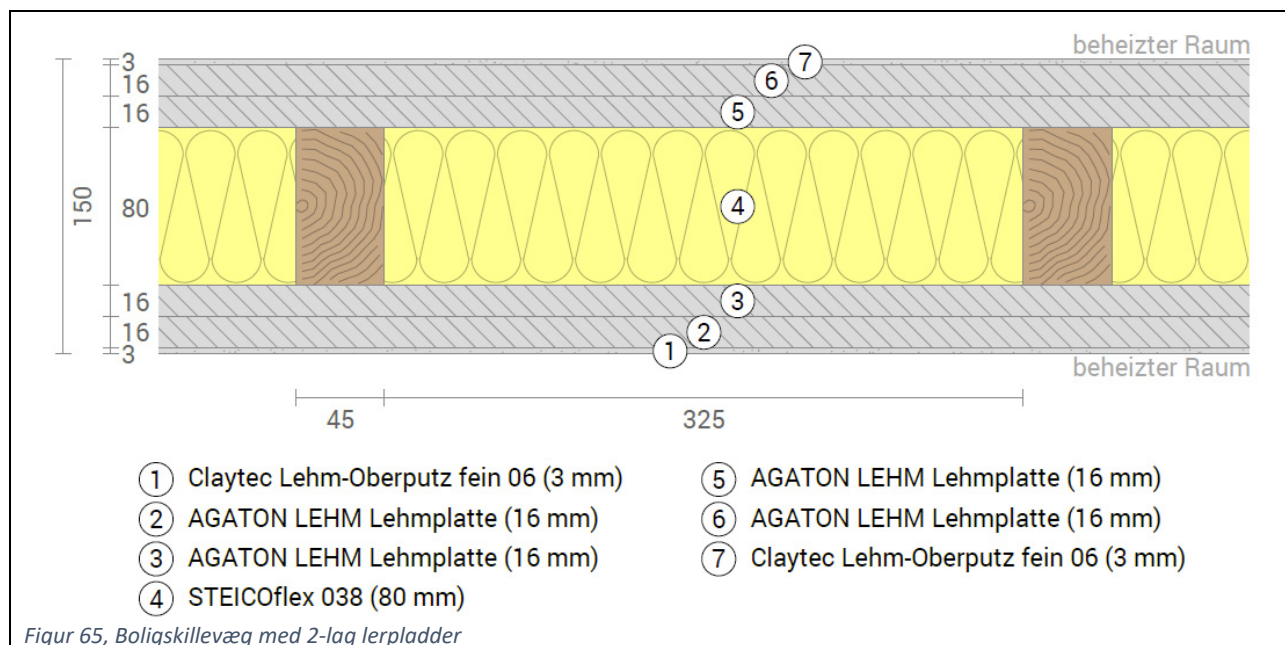
- CLT, 1,80183 kgCO₂/kg produkt
- Træfiberisolering, 1,51247698266556 kgCO₂/kg produkt

Ubakus-rapporterne oplyser vægt fra alle indførte materialer hvor med det samlede kg CO₂ tillæg per bygningsdele er fastlagt. Alle træprodukter er ligestillet med CLT, da de fleste er fyrretræ lige som i CLT-en. Limens ekstra belastning er beholdt som en sikkerhedsmargen.

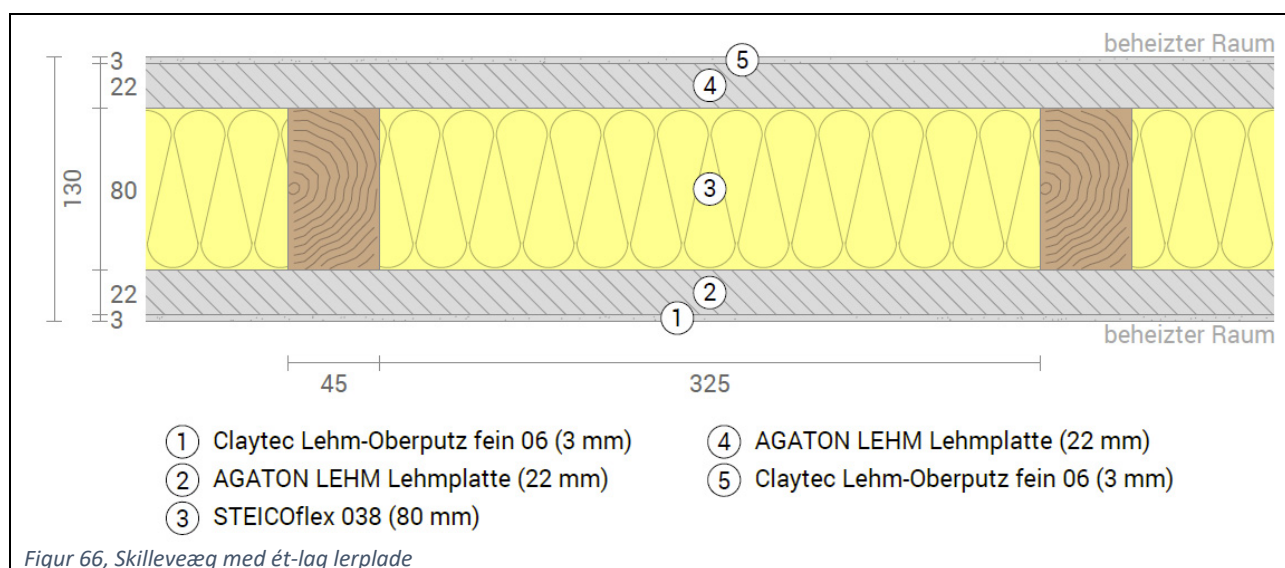
Udover de alternative bygningsdele fra Emmenweid, Alliance og Kung referencer, har jeg også valgt at samle nogen alternative skille vægskonstruktioner. Dels fordi de ikke er belyst i referenceprojektet, og dels fordi de er meget funktionsbestemte iht til lyd og brand i bolig og erhvervsbyggeri.

Her er der bygget følgende to varianter:

- Boligskillevæg med 58dB, EI120



- Generiskskillevæg, 52dB, EI90



Disse skillevægge er byggeteknisk meget lig en gængs skillevæg, dog er de opbygget med en biogen kerne beklædt med ler, hvilken kan gå tilbage til jorden efter end levetid uden særbehandling. Leret i disse skillevægge har meget højere masse end gipsplader, og derved også en bedre varmekapacitet. Hermed kan den kompensere for en eventuel tab af masse når tunge materiale erstattes af lette materialer pga. klimabelastningen. Ler har også en bufferende virkning på indeluftens relative luftfugtighed [16].

4. Resultater

4.1 Strategi

Ulempen ved at lave håndholdte parametervariationer i en bygningssimulering er at der er en grænse for hvor mange der kan undersøges. En erfaren professionel kan iht. T. Østergård, R.L. Jensen og S.E. Maagaard [4], klare omkring 40 parametervariationer, over en realistisk tidsperiode. Kvaliteten af resultaterne afhænger af vedkommendes erfaring. Rent statistisk er der meget større sandsynlighed for at en automatiseret simulering, med millioner af kombinationer af analyse parametre, finder en mere optimal løsning [4].

I den samme rapport om bygningsdesign i de tidlige projektfaser [4], beskriver han en arbejdsmetode i enkle, konkrete trin:

1. Lav en base-line model
2. Tildel grænser for parametervariationerne
3. Lav en matrix med kombinationerne heraf
4. Lav en simulering
5. Kontroller resultaterne ved hjælp af en lønsomhedsanalyse
6. Undersøg resultaterne og test designvalg

Her vil jeg fremhæve hvad der står som 5. trin, 'lav en lønsomhedsanalyse'. Efter at man har gennemført sine beregninger med en variabel parameter, skal man analysere dens effekt. Dette fordi, at hvis dens effekt er minimal i forhold til det samlede mål, så kan man 'låse' den parameter og fokusere på andre, der har en udslagsgivende effekt.

Især når man laver manuelle beregninger er det vigtigt at undersøge effekten på den enkelte parameter, før man fortsætter med at lave mange variationer af den. Når man prøver at simulere et komplekst system, med interne og eksterne faktorer, er der høj sandsynlighed for, at en eller flere håndregler eller erfaringsmæssige størrelser for f.eks. forholdet mellem vindue og facade, eller forhold mellem glasareal og gulvareal, som ikke resulterer i en optimal løsning.

Det andet jeg vil fremhæve er, at beregningsforløbet er iterativt, og bevæger sig fra en grov simulering til en mere præcis simulering til slut. Hvor der undervejs vælges nogen parametre frem for nogen andre der derved kommer til at udforme ens design.

Det er også meget sandsynligt, at en parameter med stor effekt på én af bedømmelseskriterierne dagslys, energibehov eller miljøpåvirkning, ikke har den store effekt på en af de andre kriterier. Derfor har jeg forsøgt at analysere resultaterne af min beregninger på effektbasis, fra generelle parametre til specifikke parametre, med en afprøvning af enkelte samlede forslag til slut.

4.2 Dagslysniveau

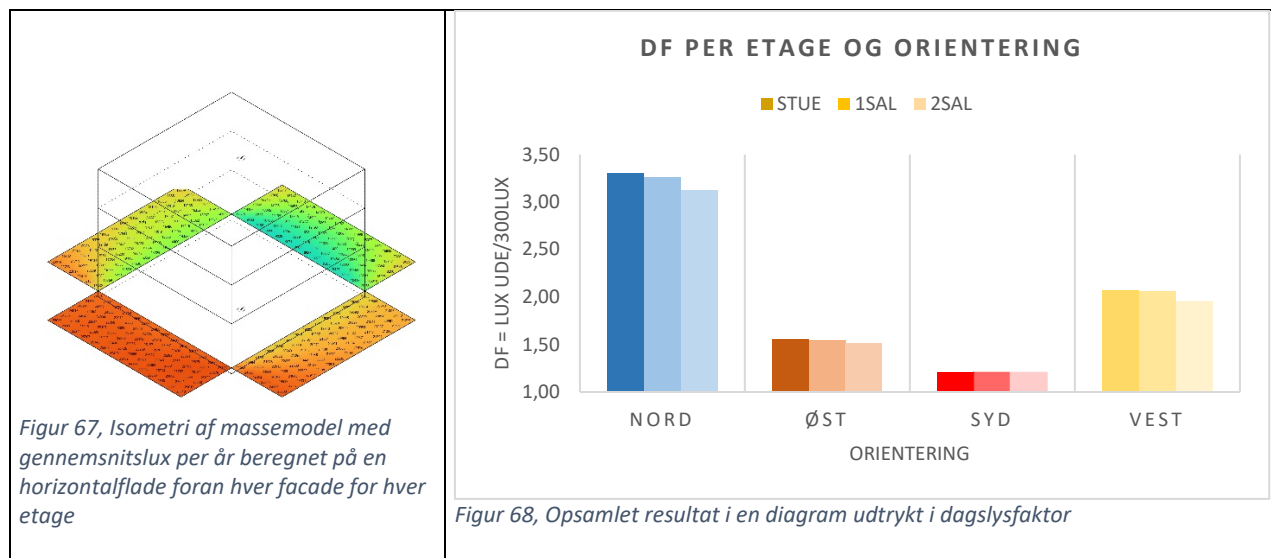
Som beskrevet i 'Baggrund' i afsnit 2, er der tre hovedparametre, der har indflydelse på den beregnede belysningsstyrke i et rum, dens $sDA_{300,50\%}$. Disse parametre er:

- Omgivelser (OR.01-OR.07)
- Vinduesudformning (VU.01-VU.05)
- Rummets udformning (RU.01-RU.05)

For hver hovedparameter er effekten af flere underparametre analyseret. 6 For omgivelser, 7 for vinduesudformning og 3 for rummets udformning. Flere af disse parametre er undersøgt for hver kompas orientering af facade. Hermed er det indledende antal simuleringer på 45. Disse er vurderet på effekten af sDA , energibehov og klimapåvirkning.

4.2.1 Omgivelser

OR.01. En af de mest basale betragtninger af omgivelser, er orientering. Der er forskel i mængde af solstråling mellem Nord, Øst, Syd og Vest-facader [10]. Det kan findes oplyst i SBI-Anvisning 219, og kan også afledes ud fra E_{ref} beregning for vinduer [25]. DF er indikator af forholdet mellem belysningsstyrken ind og ud, E_u/E_i . Hvor E_i er fast på 300 lux, er belysningsstyrken ind direkte afhængig af E_u . Beregning OR.01 beregner E_u på en vandret flade lige foran Nord-, Øst-, Vest- og Syd-facade af massemodellen, hvor det kun er bygningskroppen selv der laver skygge.



Se Figur 67 og Figur 68, det er teoretisk situation men den gengiver den passive kvalitet af orientering iht. mulighed for at opnå 300 lux ind i et rum for case bygningen.

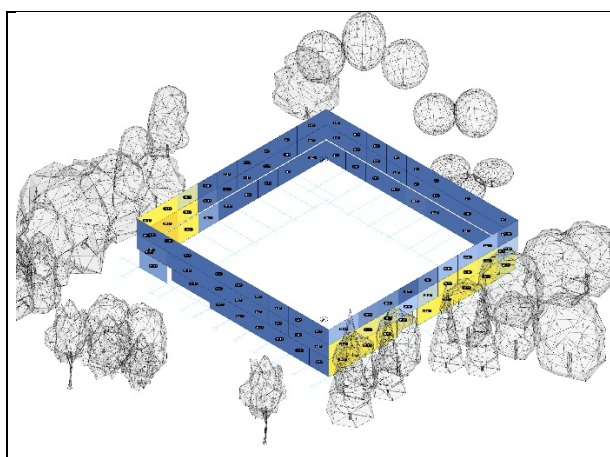
Forholdet mellem det største og mindste krævede DF er per etage mellem 0,4 og 5,8 % punkt. Her har det, procentvis, mindst effekt om et rum ligger på stueetage eller 2.sal ved en Sydvendt orientering, og størst effekt ved en Vestvendt orientering. Den største DF er kravet for Nordvendte orienteringer og er med $DF=3,2$, 1.6 gange større end gennemsnit på $DF=2$. For Sydvendte orienteringer er $DF=1,2$, 0.6 gange gennemsnit. Det er en forskel på **26 7%**.

Da forskellen mellem orienteringerne er så stor, og Granvej (case bygningen) er udformet som en karré, med en næsten lige fordeling af boliger over Nord, Øst, Syd og Vest, har jeg besluttet at beregne flere parametre for alle fire hovedorienteringer.

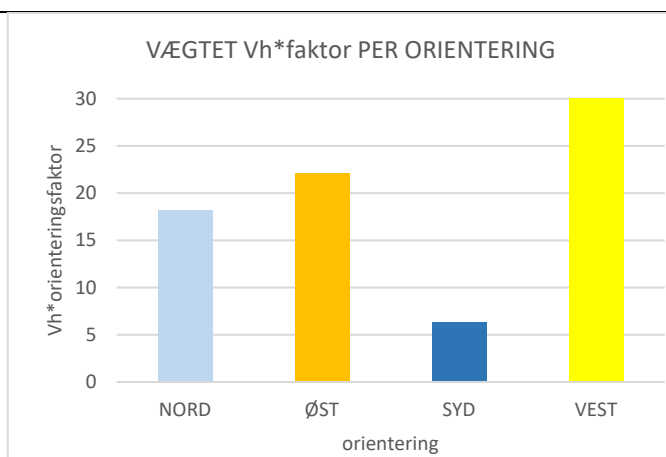
Hermed bliver det muligt at tolke resultaterne mere generelt, så det også gælder for bygninger som ikke er karré formet. Hvis man stadig kan bestemme funktionernes hoveddisponering, burde sådan en analyse også laves så man kan drage fordel af de forskelle der er mellem orienteringerne.

OR.02 Granvej har dog, som nævnt, kendte omgivelser, som der skal tages højde for. De består af mange fredede træer, som er placeret tæt på den færdige bygnings facader.

Hvordan man modellerer træerne på en retvisende måde, er i Danmark ikke metode bestemt, ud over at man skal tage højde for skyggende objekter i den undersøgte bygnings omgivelser. Fordi der er metode frihed, kan der forventes at være en vis variation i måden træerne bliver modelleret på, hvis de overhovedet bliver modelleret. OR.02 til OR.06 varierer i måden at modellere træer og analysere effekten deraf, på den indvendige belysningsstyrke opgjort som $sDA_{300,50\%}$.



Figur 69, Nord-Vest isometri af yderfacade med fredede træer



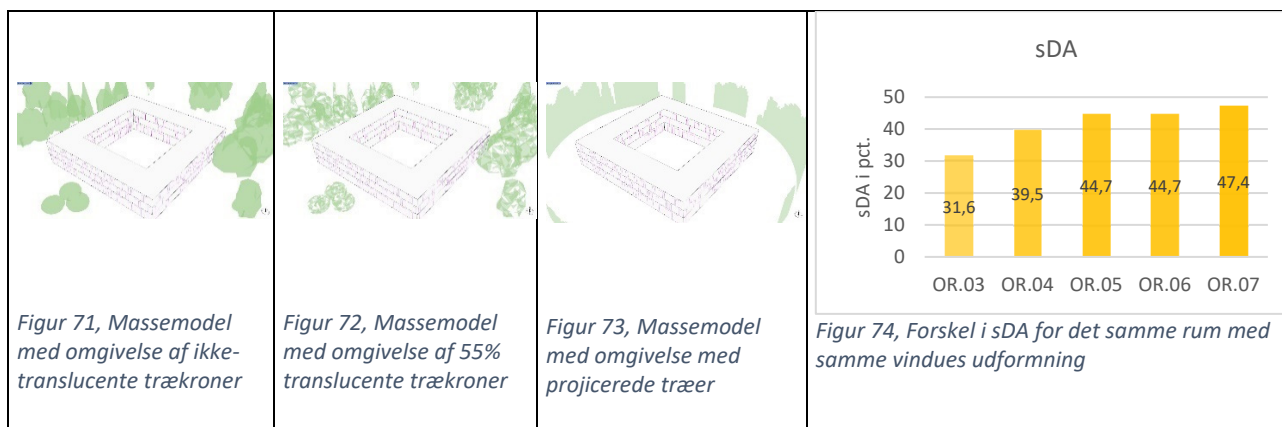
Figur 70, Diagram med vægtet Vh per orientering

Se Figur 69. Effekten af omgivelserne kan udtrykkes med Vh. Jo større Vh jo større skyggevirkning har overstående objekter på vinduerne i facaden. De højeste Vh findes en Nordlige tredjedel af Øst facaden og Vest facaden som helhed. Effekten af træerne skal kombineres med effekterne fra OR.01 for at få en samlet effekt af effekten af bygningskroppens udformning og dens omgivelserne.

Det viser Figur 70. På Vest facade har Vh sammen DF den største effekt. Derfor vil også forskelle i hvordan omgivelserne er modelleret være størst her, især når der tages højde for orienteringsforskelle iht OR.01.

OR.03-OR.07 Er derfor beregnet for et opholdsrum á 17,5 m² beliggende midt på Vest facade, på 1. sal. Følgende omgivelsesvariationer er beregnet:

- OR.03, Modelleret uigennemsigtig trækrone iht. LM-83-12, reflektants iht. BR18 10 %
- OR.04, Modelleret 20 % gennemsigtig trækrone iht. BRE sommer, reflektants 10 %
- OR.05, Modelleret 55 % gennemsigtig trækrone iht. BRE vinter, reflektants 10 %
- OR.06, Modelleret uigennemsigtig trækrone, transparent materiale LT 55 %
- OR.07, Cylindrisk projicering af i OR.03 modellerede træer iht. ClimateStudio, reflektants 10 %



Det er tydeligt, at de mest ugenomsigtige træer resulterer i det mindst belyste gulvareal over et år. Det er logisk, men det er godt at kende effekten det har på dagslystilgang for rummene. Når forskellen bliver regnet om til dybde fra facaden, resulterer det i dagslys er opfyldt til **2,2 m** ind i rummet for OR.03 og til **3,3 m** for OR.07. Så lyset kommer 50% længere ind i rummet fra det mest konservativt tegnede træer til de mest translucente og projicerede træer.

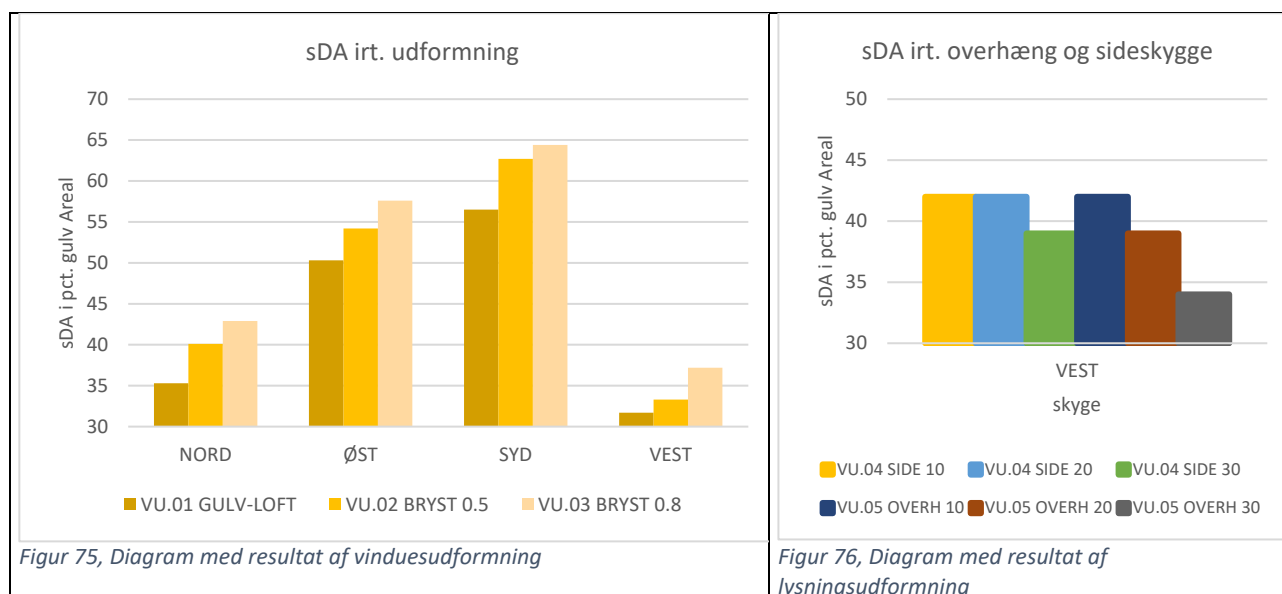
De i Figur 74 viste sDA_{300,50%} andele er alle under minimumskravet på 50% [11]. Hvis dette skulle have været opfyldt for OR.03-OR07, ville det skulle omsættes til et større glas areal for OR.03 end for OR.07.

4.2.2 Vinduesudformning

Der er beregnet 6 variationer af vinduesudformning for alle 4 hovedorienteringer for VU.01-VU.04 og ved VU.05 og VU.06 er der for Vest facaden beregnet tre vinkler. Samlet giver 18 parametervariationer disse er kort beskrevet følgende:

- VU.01, Vindue udformet iht. arkitekttegning fra gulv til loft.
- VU.02, Vindue udformet til loft med en brystning på 500mm
- VU.03, Vindue udformet til loft med en brystning på 800mm
- VU.04, Vindue med en højre og venstre skygge på 10°, 20° og 30°
- VU.05, Vindue med et overhæng på 10°, 20° og 30°

Glasarealet er beregnet iht. WWR håndregel, som relaterer sig til Vh, DF og LT. Opholdsrum er det samme for hver variant og for VU.01-03 er højre og venstre skygge hold på 10° og overhæng på 20° som svarer til arkitekttegningerne. Ved VU.04 og 05 er vinduet som VU.01 fra gulv til loft.



Se Figur 75. Her ser man sDA opgjort for en bolig med angivet orientering og et fast glasareal iht til nævnt WWF udgangsstørrelsen. Resultaterne er opgjort efter orientering, og hver variant er indfarvet med sin egne gule nuance. Da glasarealet er ens uanset om der er brystning eller ej, og vinduesoverkant er holdt på samme position, direkte under loft, bliver vinduet bredere ved en højere brystning. Procentvis gavner Nord og Vest vendte vinduer mest, når vinduer bliver udformet med en brystning på 800 mm. For Nord og Syd facade giver vinduer udformet med en brystning på 500 mm procentvis den største forbedring i sDA.

Men for alle orienteringer gælder det, at det samme glasareal forøger det belyste del af rummet jo højere det bliver anbragt i facaden, og det er i dette tilfælde ved VU.03 med en brystning på 800 mm. Der er ikke undersøgt højere brystninger end disse lave og normalhøje brystninger. Højere brystninger ville begrænse udsynet på omgivelserne betragteligt for siddende beboere, og man kan overveje om en højde på ca. 500 ikke burde være maksimum for soveværelser i case bygningens kontekst.

Se Figur 76. Sideskygge forringer $sDA_{300,50\%}$ fra 20° til 30° med 4% og overhæng foringer $sDA_{300,50\%}$ fra $10-30^\circ$ med 4% for hvert 10° forøgning.

4.2.3 Rummets udformning

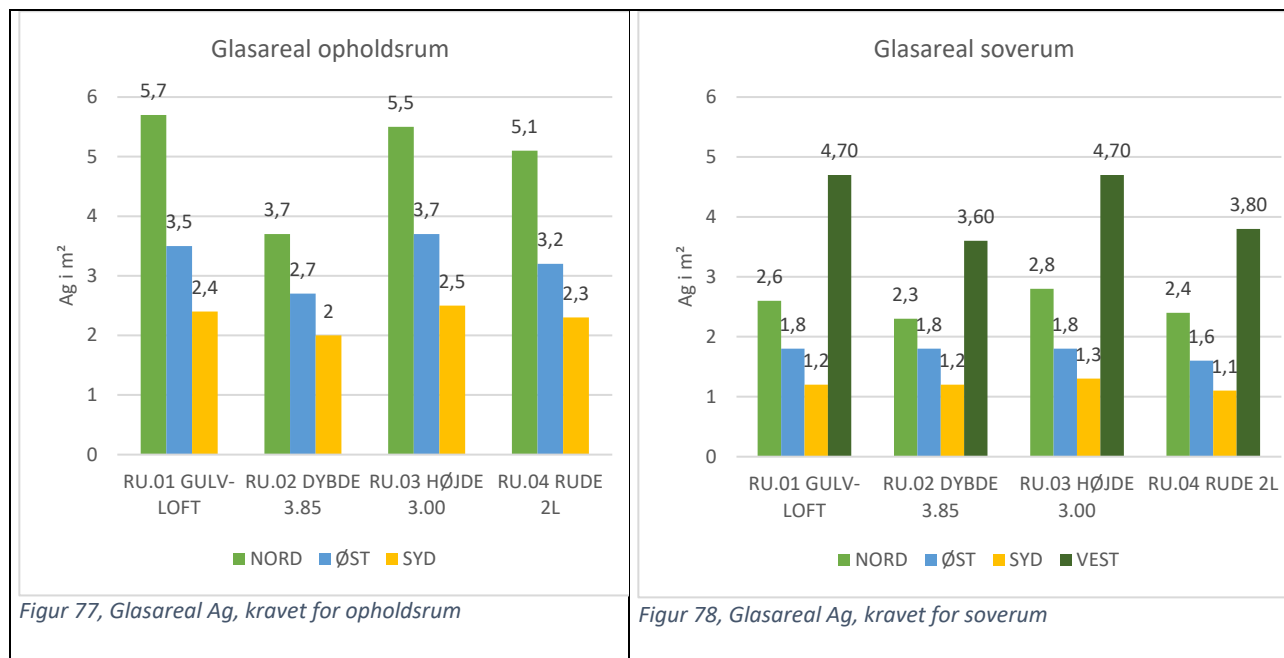
Opholdsrum og soverum i Granvejs boliger har en optimeret proportion iht. rummets brug. Plads omkring møbler og døre er udlagt efter behov ved pleje af beboerne og ønskede tilgængelighed for fysisk handicappede. Bygningshøjde er bestemt i lokalplanen for området. Der er derfor kun plads til små justeringer når det gælder både rumhøjde og rumdybde.

Overfladereflektans af rummets vægge, gulv og loft bør i designfasen holdes på de vejledende værdier [11] [2]. I senere faser, hvor farve og materiale er kendt, kan man bruge realistiske værdier, men så skal man også modellere såvel fast som løst inventar ind i rummene.

I beregning RU.01 til RU.04 er der varieret på følgende for hver facadeorientering:

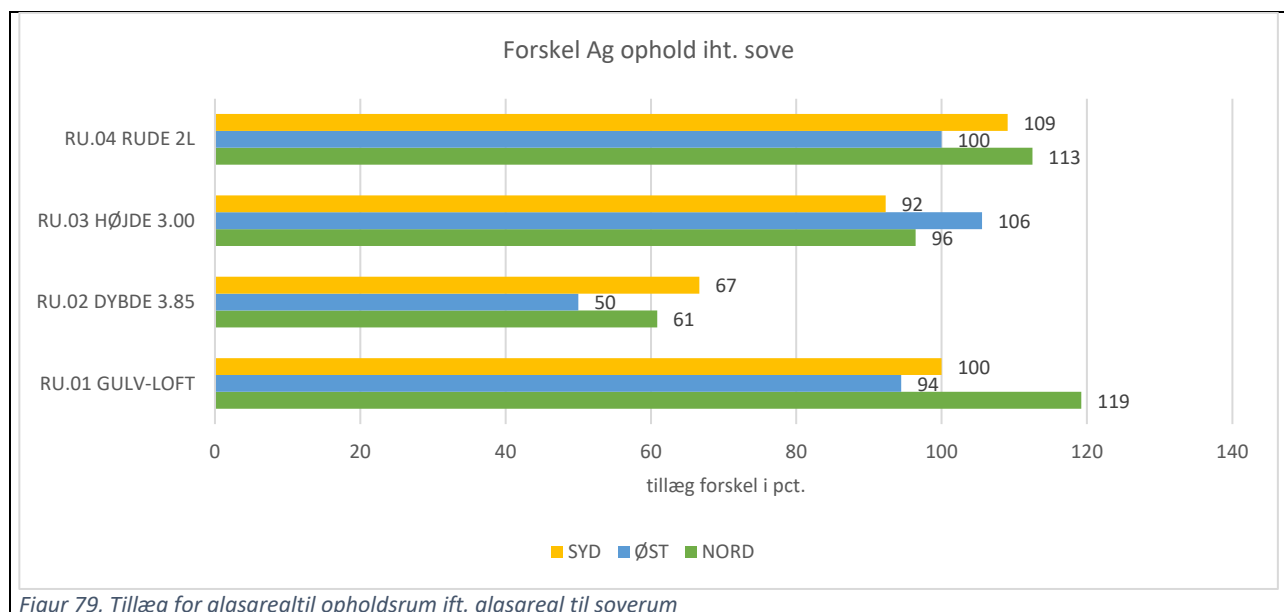
- RU.01, Rumhøjde på 2800 mm iht. arkitekttegning
- RU.02, Rumdybde er reduceret til 3850 mm, med samme brutto areal og loftshøjde som RU.01
- RU.03, Rumhøjde øget til 3000 mm, hvor rumbredde og rumdybde er behold som RU.01
- RU.04, Rum som RU.01 men 2-lagsrude i stedet for 3-lagsrude, med LT på 0,80

Det giver samlet 32 beregninger. Her har jeg, i modsætning til omgivelser- og vindues parametervariationer ikke beregnet sDA effekt, men i stedet krav til glasareal. Omgivelserne er som modelleret som OR.05 og vinduesudformning er som VU.01, med en lysningsudformning som VU.04 på 10° og VU.05 på 20°, da det kommer tættest på arkitekttegningerne. Resultaterne er vist i Figur 77 og Figur 78.



Med de overnævnte forudsætninger skal det fremhæves, at opholdsrummet på vestfacaden ikke kan overholde sDA_{300,50%} krav på 50%, selvom vinduet blev modelleret som et vindue, der fylder hele rummets indvendige facade. Derfor er den ikke vist i Figur 77.

Se Figur 77 og Figur 78. Man kan se at tendensen fra beregning OR.02 og VU.01-03, fortsætter ved bestemmelse af glasarealet. Jo dybere rummet er, jo sværere bliver det at lande på en kravet sDA_{300,50%} for halvdelen af guldarealet.



Diagrammet ovenover, Figur 79, viser den forskel mellem glasareal til opholdsrum og soverum. Rummene er hhv. 4,3m dybt (sove) eller 7,2m dybt (ophold). Jo mindre dybt opholdsrum bliver jo tættere dens påkrævede glasareal kommer til det til soverum. Intentionen med facadeudtrykket var at give opholdsrummet et større vindue end soverummet, hvilket afspejler forskel i rumdybde og anvendelse. Det passer med resultaterne af de rumlige udformninger. Vinduet i opholdsrum er mellem 50% og 119% større end vindue til soverummet.

For begge rum gælder det, at RU.03 og RU.04 resulterer i det mindste glasareal, hvor effekten af tiltagene er mindst for Øst- og Sydvendte rum, Figur 78.

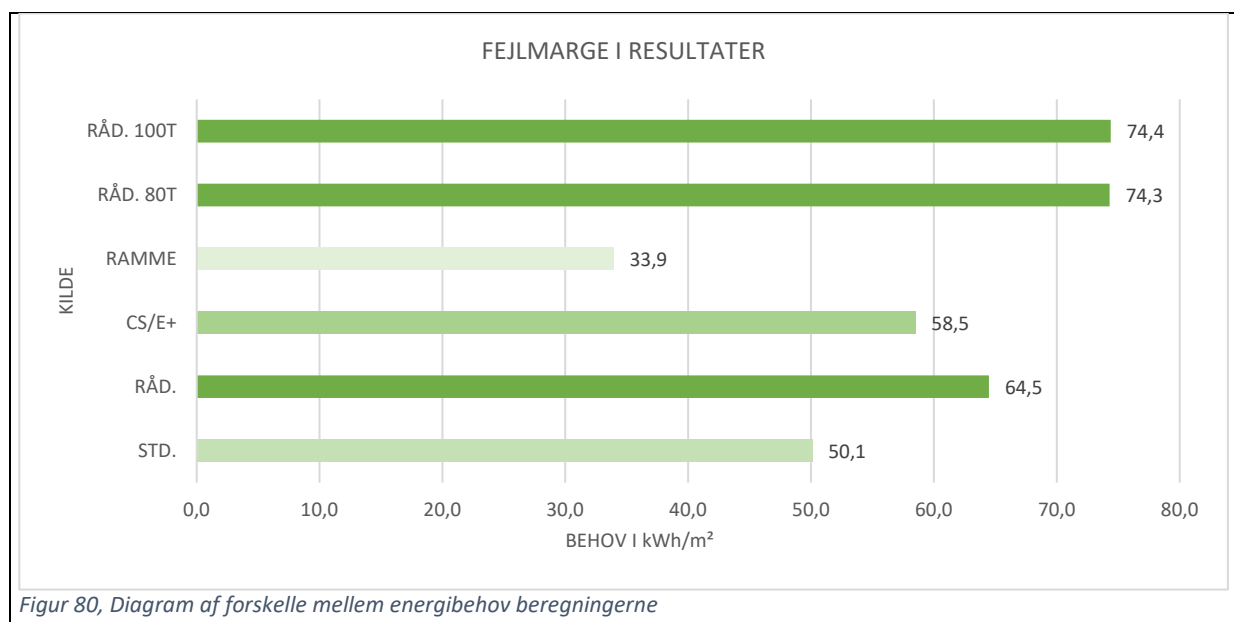
Se Figur 77 og Figur 78 ovenover. Her kan man se, at hvis man ønsker at gå efter det mindste glasareal der opfylder kravene, så er tiltagene forskellige per rumtype og orientering. RU.04 med 2-lags glas virker bedst for soverum mod Syd, mens den næsten ikke nogen forbedring viser for opholdsrum med samme orientering.

En optimale løsning for hele bygningen ville resultere i forskellige typer glas per rum og per orientering. Om sådan en løsning er optimal under hensyntagen til energibehov og klimapåvirkning, undersøges i de kommende afsnit.

4.3 Energibehov og Sommerkomfort

Indledningsvis har jeg lavet en sammenligning mellem Be18 beregning fra semesteropgaven (student), rådgiverberegningen og en dynamisk simulering med ClimateStudio/EnergyPlus. Selvom dynamisk simulering ikke kan bruge som dokumentation af energibehov eller data til LCAByg, bliver disse brugt til den tidlige designfase, og derved opstår en del af de fejl og forskelle pga. metode, se Figur 80.

Dertil er der i afsnit 4.3.1 udført et Be18 beregninger for en del af de foregående parametervariationer til dagslysberegning. De sidste dagslysberegninger, der handlede om glasareal, er også beregnet for sommerkomfort, da glasarealet her en væsentlig effekt på det termiske indeklima.



Her i Figur 80 vises forskellen mellem energiramme for Granvej uden tillæg (RAMME) ift. Energibehov uden indregning af energiproduktion på stedet i form af solceller. Hermed kan man se, at den passive bygning med sine systemer, har et energibehov som er mellem 48 % og 90 % større end standard i BR18.

Forskellen mellem student (STD.) beregningen og rådgiverberegningen (RÅD.) er større end mellem rådgiverberegningen og et resultat fra en dynamisk simulering (CS/E+). Den samlede forskel i resultaterne er mellem **17 %** og **29 %**, for beregninger i Be18 af det samme projekt ved brug af de samme anvisninger [12] og overholdelse af BR18 krav.

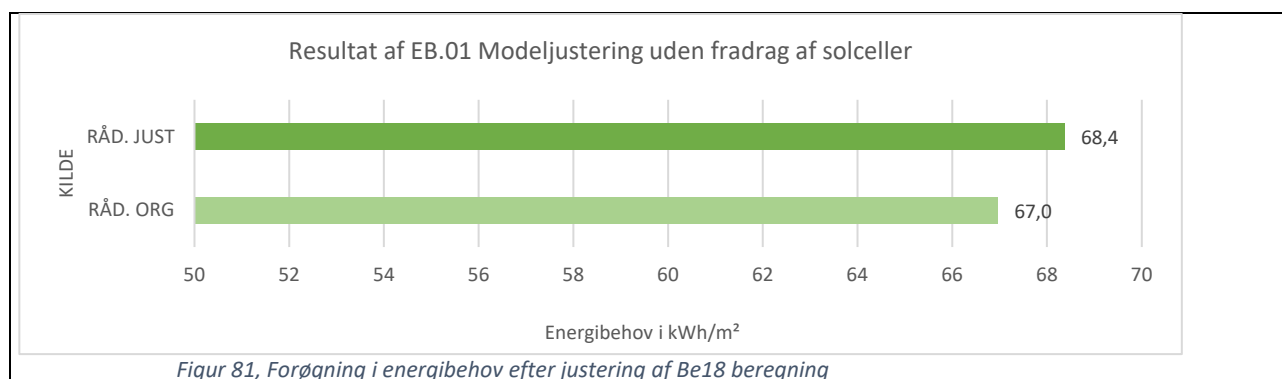
Student-beregningen går ud fra 55 % transparente træer (vinter). Hvis man skal regne dem som fulde skygger eller sommertræer af 80 % (RÅD.80T og RÅD.100T), så stiger energibehovet yderligere med **15 %**. Det vil resultere i, at den fulde energiramme med tillæg ville blive benyttet, medmindre man øger arealet af solcelle anlæg.

4.3.1 Be18 justering

Som beskrevet i afsnit 3, er der lavet en modeljustering i rådgiverberegningen, så den er baseret på den samme massemodel i Rhino. Og som nævnt er påvirkningen af parametervariationer i dagslys-beregningerne også beregnet i Be18. Hermed kan der listes følgende energibehovsberegninger op:

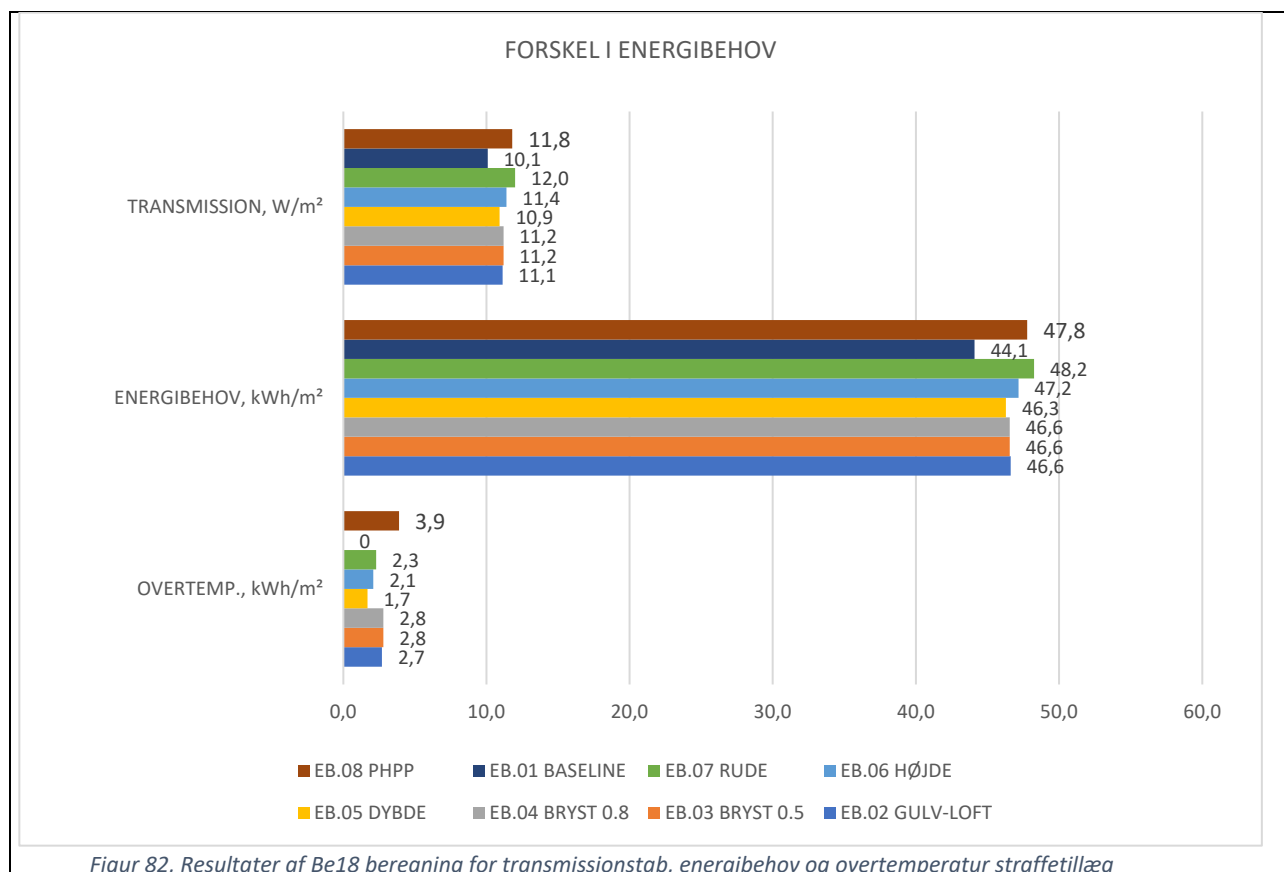
- EB.01, Modeljustering
- EB.02, Vinduer fra VU.01 fra gulv til loft.
- EB.03, Vinduer fra VU.02 med 500 mm brystning.
- EB.04, Vinduer fra VU.03 med 800 mm brystning.
- EB.05, Rum som i RU.02 på 3850 mm dyb.
- EB.06, Rum som i RU.03 på 3000 mm høj.
- EB.07, Vinduer som i RU.04 med 2-lags rude.

EB.01-EB.07 Er justeringen af rådgiverberegningen. Hvor belysning, ventilation, varme og varmtvand er iht. rådgiverberegningen og alle transmissionsarealer og linjetab iht. student beregningen. Også varmekapacitet er justeret, ved brug af arealerne fra energimodellen. Værdier, der lå uden for de vejledende talrækker, er ekstrapoleret. Der er nødvendig fordi case bygningens kompakthed er beregnet på 0,77 som er mindre en 'lille'. Samtidig er rum størrelserne beregnet på 2,53 mindre end 'små' [12].

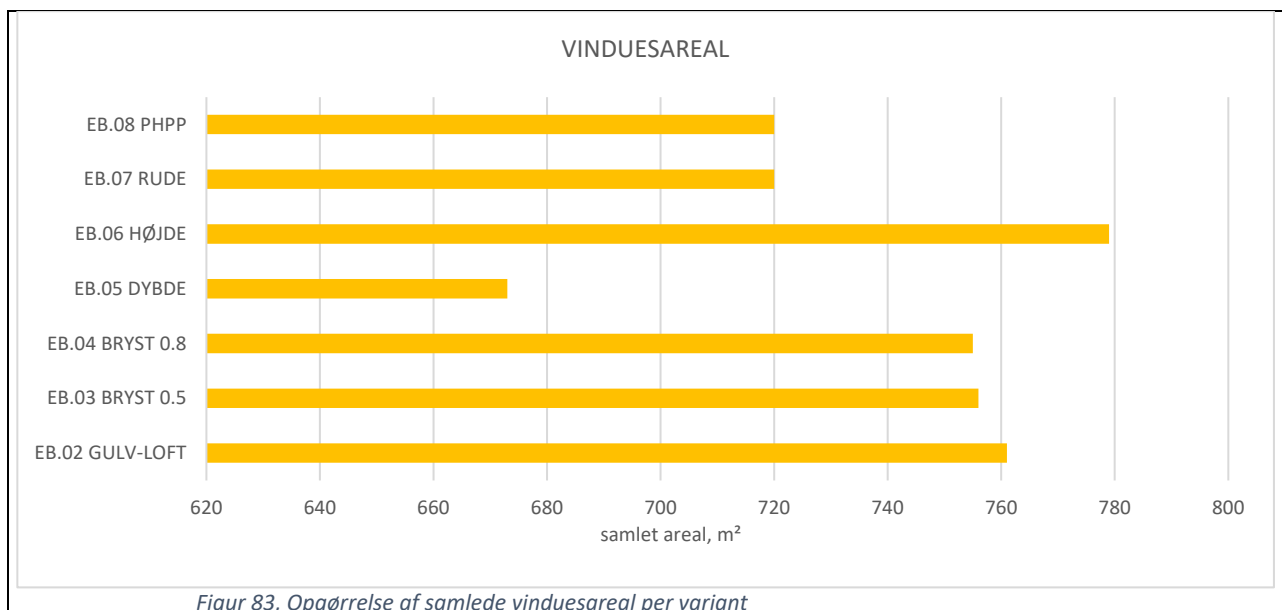


Se Figur 81. Justeringen af bygningsmodellen ændrer det beregnede behov med kun 2 %. Det vil sige, at forskellen på at bygningssystemerne er årsagen til størstedelen af de 29 % forskel i energibehov mellem rådgiver og student som vist i Figur 80.

Energirammen for Granvej med tillæg på 17,7 kWh/m²m er **51,7 kWh/m²** for BR18 krav og **28,9 kWh/m²** for lavenergiklasse, se den tidligere viste Tabel 1. Transmissionsramme er hhv. **14,0 W/m²** og **13,0 W/m²** for normal og lavenergiklasse krav. For EB.01 til og med EB.07 er derved både energirammen og transmissionstabsrammen overholdt, Figur 82.



Selvom vinduesstørrelsen har en stor betydning for opfyldelsen af dagslys krav, så er effekten af parameterændringerne ikke særlig stor iht. energiforbrug som kan aflæses i Figur 82. Forskellen mellem det højeste og laveste energibehov er 5 %.



Figur 83, Opgørelse af samlede vinduesareal per variant

Det skal fremhæves, at udgangs-vinduesstørrelse iht. arkitekttegninger er vurderet til at være for lille. Her skal arealet øges mellem **29% og 49%**, se Figur 83. Det medfører en forøgelse af energibehovet på mellem **4% og 9%**, se Figur 82.

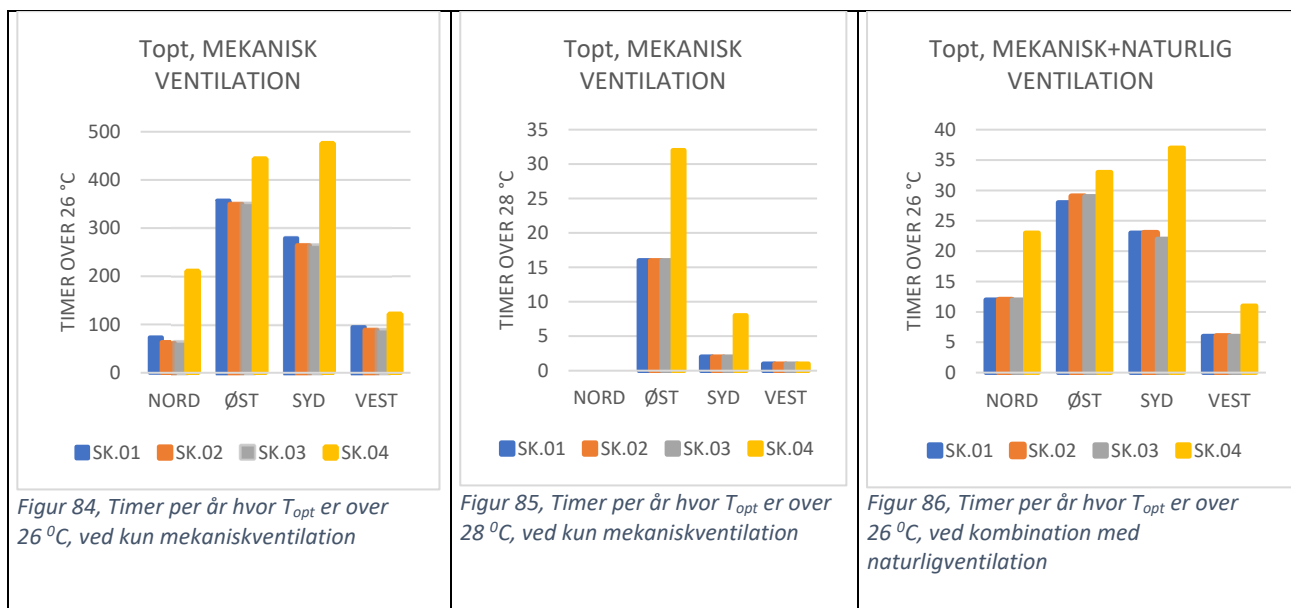
Vinduesarealer varierer en del per orientering for vinduer uden brystning og med brystning. Men samlet set, over alle facader, er forskellen minimal, hvilket afspejler sig i et næsten ens energibehov for disse tre vinduesløsninger, med en lille fordel for vinduer med en brystning mellem 500 og 800 mm, se Figur 82. Forskellen er så små at det grundet afrunding vises som ens.

4.3.2 Sommerkomfort bolig

Ved variationerne EB.02 til EB.07 er ventilationsraten holdt ens. Ved EB.01, udgangsberegningen, var der ingen 'køle straf' pga. overtemperatur. Angivet i Figur 82 ovenover kan man ud fra stigning i overtemperatur konkludere, at mængden af tilført solvarme er øget. I den anledning, er der derfor også udført følgende dynamiske simuleringer:

- SK.01, Vinduer fra VU.01 fra gulv til loft.
- SK.02, Vinduer fra VU.02 med 500mm brystning.
- SK.03, Vinduer fra VU.03 med 800mm brystning.
- SK.04, Vinduer som i RU.04 med 2-lags rude.

SK.01-03 er udført for alle 4 orienteringer. Den operationelle temperatur, T_{opt} , er beregnet med kun mekanisk ventilation, med standard ventilationsrater og i en kombination med naturlig, ensidig ventilation gennem vinduerne. Der er antaget en fast ratio mellem vinduestørrelse og åbningsareal på ca. 64%, svarende til 80% af glasareal.



Det er øst- og sydvendte boliger der har den højeste operationelle temperatur, både med eller uden naturlig ventilation, se Figur 84 og Figur 85. Diagram, Figur 86, for naturligventilation men så med $T_{opt} > 28^{\circ}\text{C}$ i stedet, er ikke tegnet da det aldrig forekommer.

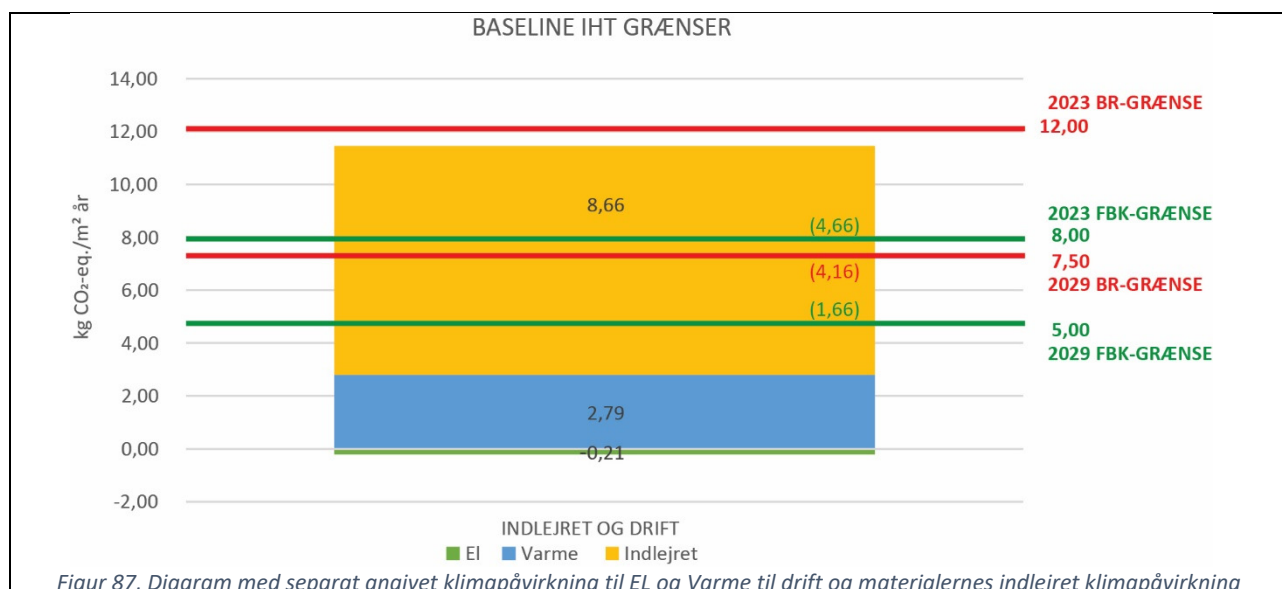
Timer med en indetemperatur $T_{opt} > 27^{\circ}\text{C}$ er ved naturlig ventilation alle under 100 timer, derfor er der for sammenligningens skyld vist timer med $T_{opt} > 26^{\circ}\text{C}$. I de nordvendte boliger kommer den operationelle temperaturen aldrig over 26°C , her er der vist timer over 24°C og 26°C som grænse.

At skifte 3-lags energiruder ud med en 2-lags energiruder, forøger timerne over 26°C (og 24°C for Nord) mellem **15 %** og **83 %** ved naturlig ventilation, og mellem **26 %** og **77 %** ved kun mekanisk ventilation. Absolut set er det kun Øst boligen, der overskrider vejledende timegrænse for $T_{opt} > 28^{\circ}\text{C}$ med 8 timer med kun mekanisk ventilation, se Figur 85.

Der har ikke været set nærmere på overholdelse af overtemperaturs timerne. Hvis man ønsker at finde det minimale åbningsareal af den gående ramme, eller om overtemperatur også om natten er inden for de tilladte grænser, skal der laves yderlige beregninger. Da det er en videre detaljering af vinduesudformningen, hører sådan en beregning til i en senere projektfase.

4.4 Klimapåvirkning

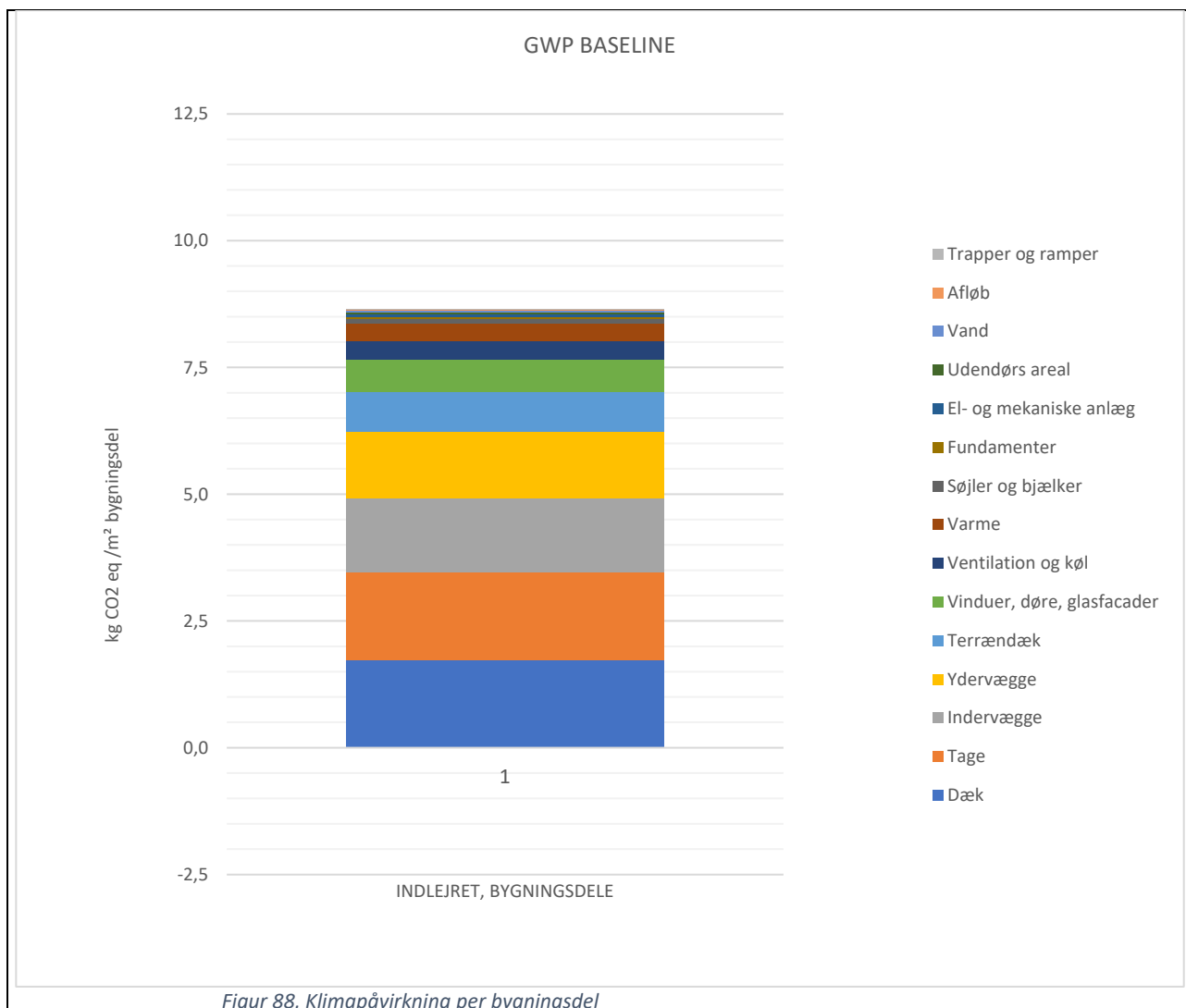
Ved de udformningsvariationer, der er beregnet på iht. dagslys og energibehov, er både materialemængde og energibehov varierende. Begge har indflydelse på bygningens klimapåvirkning. Derfor er nogen af disse variationer også beregnet i LCAByg. Her er udgangspunkt været Be18 model EB.01, fra afsnit 4.3.



Se Figur 87. Baseline af klimabelastningen, KB.01, lander med 11,24 kgCO₂-eq./m²år, lige under det kommende bygningsreglements grænse for 2023, på 12 kgCO₂-eq./m²år. **8,66** er indlejret i byggematerialerne, **2,79** i varme og **-0,21** i EL. Når man fastholder i påstanden om, at bygninger ikke kan energioptimeres mere, ville der ved fremskrivning til 2029 med overholdelse af FBK grænse på 5 kgCO₂-eq./m²år, kun være 1,66 kgCO₂-eq./m²år dvs. **19 %** af den oprindelige materialeandel på 8,66 tilbage.

Dvs. at materialernes indlejrede klimapåvirkning skal nedbringes med **81%** for case bygningen. Kan man opnå dette? Det er undersøgt ved at beregne bygningsdelsoptioner, der er sammensat iht. de i afsnit 3.1.5 viste referencebygninger. Samtidig er også indflydelsen af enkelte vinduesvarianter og rumvarianter beregnet. De beregnede parametervariationer opsummeres følgende:

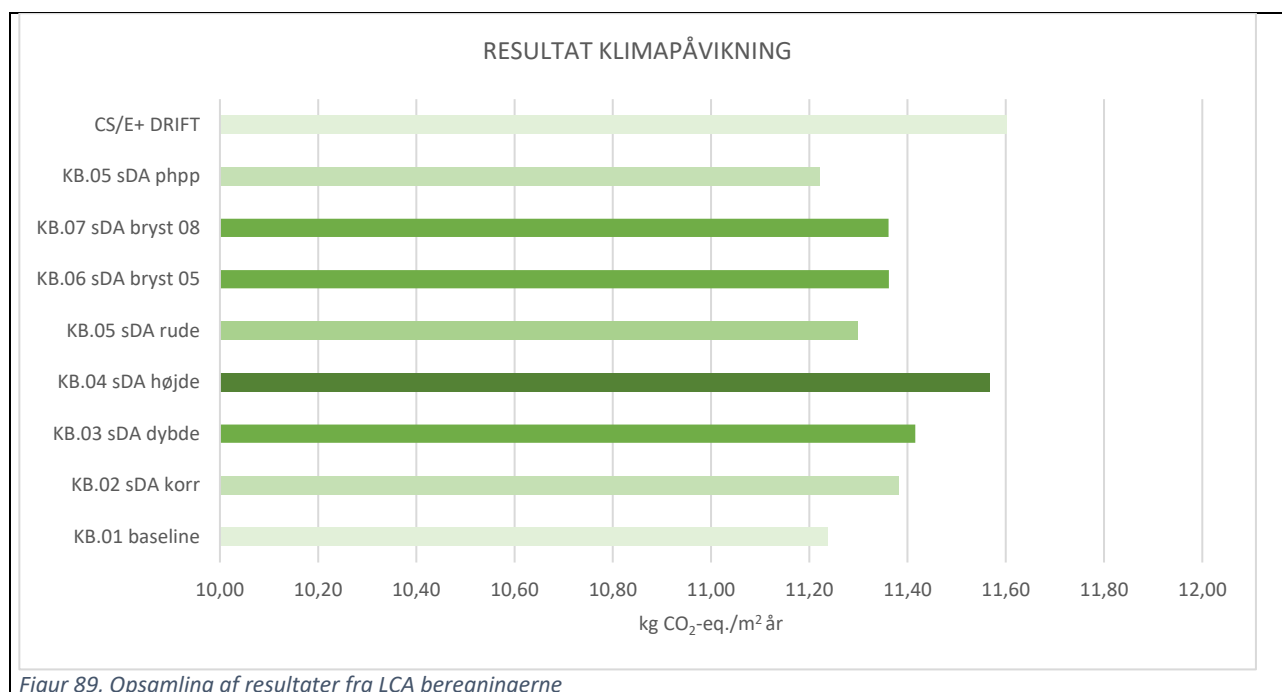
- KB.01, Baseline som Be18 beregning EB.01.
- KB.02, Med vinduer fra VU.01 fra gulv til loft.
- KB.03, Med rum som i RU.02 på 3850mm dyb.
- KB.04, Med rum som i RU.03 på 3000mm høj.
- KB.05, Med vinduer som i RU.04 med 2-lags rude.
- KB.06, Med vinduer fra VU.02 med brystning på 500mm.
- KB.07, Med vinduer fra VU.03 med brystning på 800mm.
- KB.08, Bygningsdele fra referenceprojekt, 2226 Emmenweid, CH.
- KB.09, Bygningsdele fra referenceprojekt, Alliance Oslo, NO.
- KB.10, Bygningsdele fra referenceprojekt, Kung Alpnach, CH.



Overstående Figur 88 viser baseline, KB.01, udspecificeret per bygningsdel, organiseret fra den største klimabelastning i bunden til den mindste klimabelastning øverst. Der skal gøres opmærksom på, at installationer til varme, vand, el og ventilation kun udgør omkring 10% af den samlede materialebelastning.

Det er et estimat, og iht. analyser fra SBi ligger det på den lave side af normalen, som er 10-20% [17]. Hvis man fordobler varme- og ventilationsandelen, begynder også denne kategori at være en af de mest belastende bygningsdele, på lige fod med vinduer og terrændæk. Men, som vist i figuren, er det Etagedæk, Tage, Indervægge, Ydervægge, Terrændæk og Vinduer der har den største klimabelastning.

Se Figur 89. KB.01-05, viser beregninger af effekten af bygningsudformningen iht. dagslys. Det er kun variationen med 2-lags ruder, der lander på en næsten lige påvirkning som baseline der ikke overholder dagslyskrav. Forøgelse af klimaskærmens areal pga. ændret rumdybde i KB.03, og ændret rumhøjde i KB.04, resulterer i en større klimabelastning end KB.02, selvom selve vinduesarealet er større end i KB.03. I KB.04 er både vinduer og facadeareal større end for KB.02.

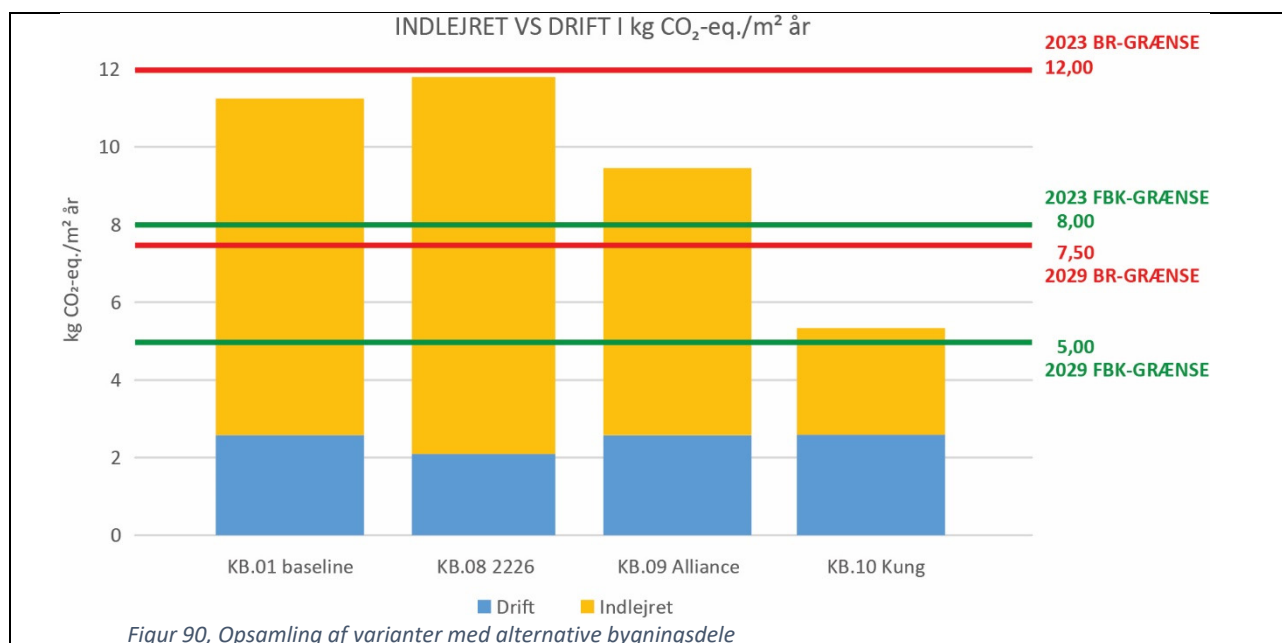


KB.01, E+ DRIFT og STD. DRIFT er indvirkningen af fejlmargenen i Be18-beregning i LCA-beregning. Her falder den samlede klimapåvirkning **2 %-10 %** lavere ud, pga. energibehovsberegningen. Det er for både BR og FBK næsten nok til at komme fra 2030 til 2025 grænseværdi. 10% Lavere beregnet drift, er også nok til at flytte variant KB.10 under FBK 2029-grænse på 5,00 kgCO₂-eq./m²år uden at lave faktiske forbedringer, se Figur 90.

Se følgende Figur 90. Ved varianter KB.08-10 er de største materialesyndere ændret, ved at udskifte disse bygningsdele med bygningsdele iht. referenceprojekter. Det er typisk hele byggesystemet, som er anderledes end i case bygning (baseline). Følgende bygningsdele er udskiftet:

- Dæk
- Tage
- Indervægge
- Ydervægge

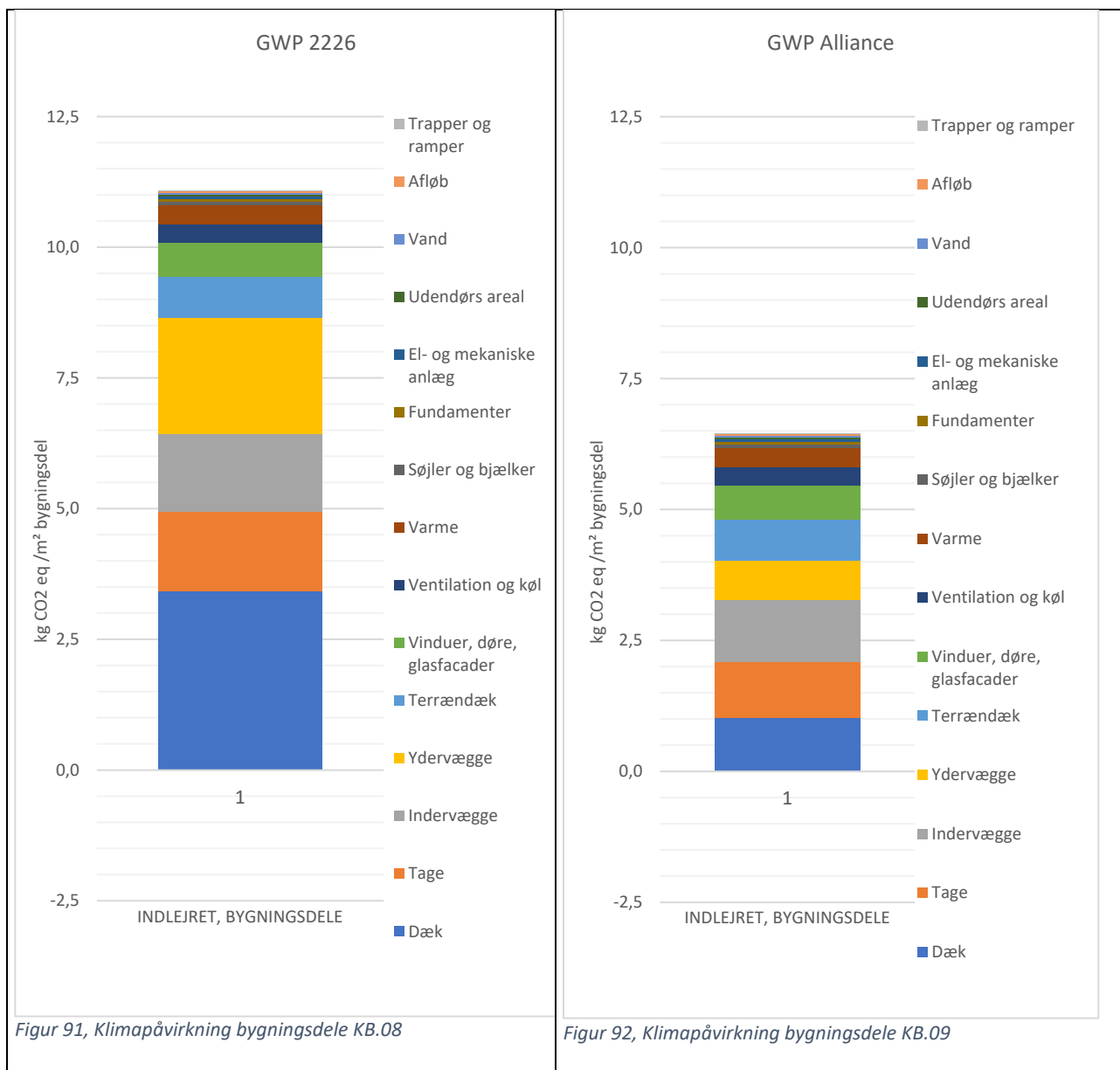
I KB.08 er også varmekapacitet i Be18 ændret, for at tage højde for et eventuelt reduceret energibehov, da referencebygningen er bygget udelukkende af tunge materialer.

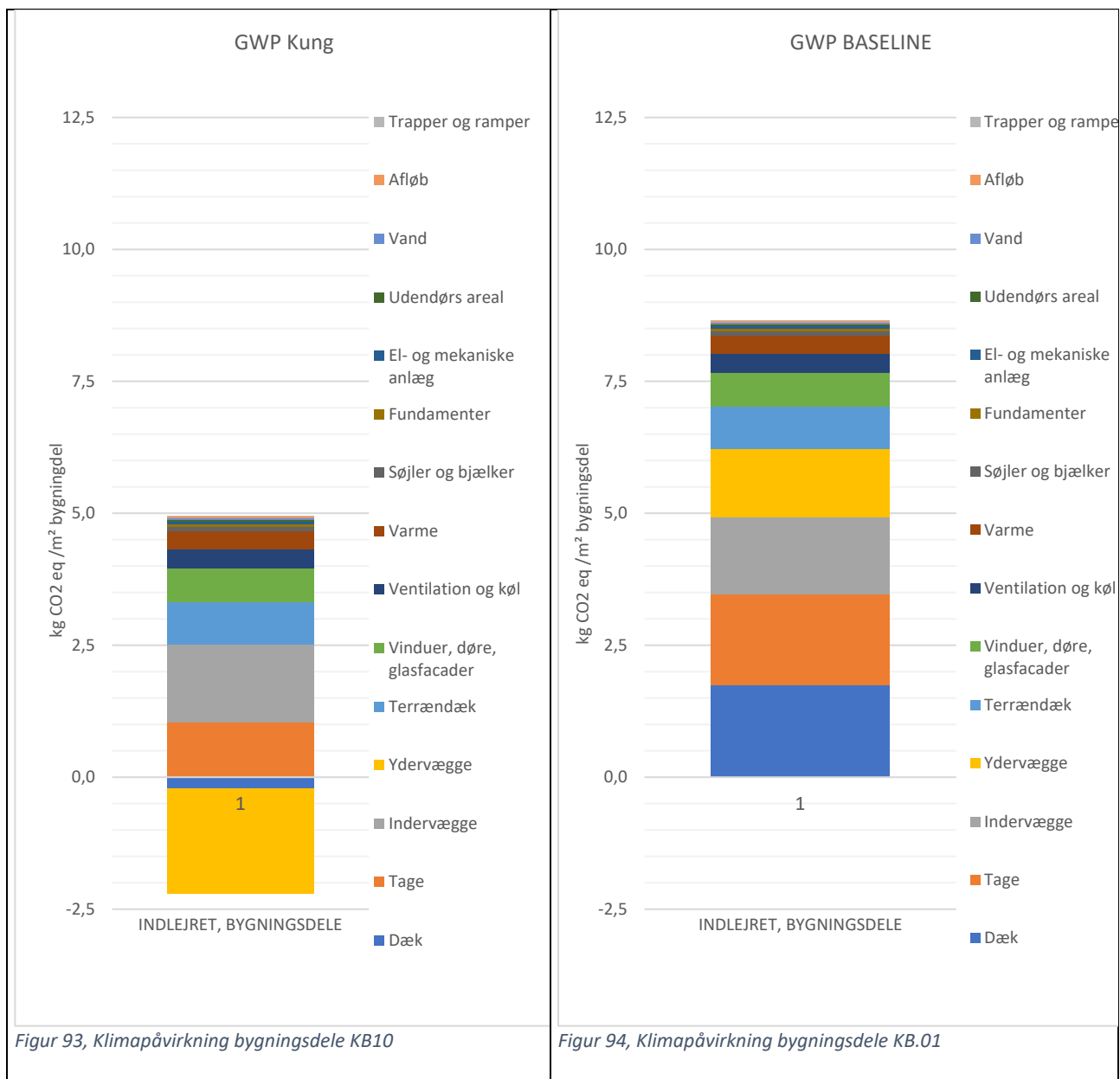


Figur 90 ovenover sammenligner udgangspunktet med varianterne KB.08, 09 og 10. Heraf kan man se at, et 100% mineralsk byggesystem ikke sparer nok på driften til at kompensere for øgningen i materialernes indlejrede klimapåvirkning. Man kan også se, at der er meget at hente ved at ændre byggesystemet til et, hvor der er anvendt mere træ i de bærende konstruktioner. KB.07 sparer **21%** og KB.08 **68%** af materialernes indlejrede klimapåvirkning.

Her må der gøres opmærksom på, at disse beregninger er ikke funktionsneutrale, dvs. at funktionelle krav til bygningsdele som styrke, lydisolering, brandmodstand og isoleringsevne ikke er kontrolleret og holdt ens, eller kompenseret for, i bygningen som en helhed. Dette vil blive belyst mere dybdegående senere.

Når man sammenligner de enkelte bygningsdele i case bygningen med de tre referenceprojekter, har man vise om man yderlige kunne bespare nogle ved at lave en ny kombination, eventuel ved hjælp af andre forbedringer i bygningsdele.



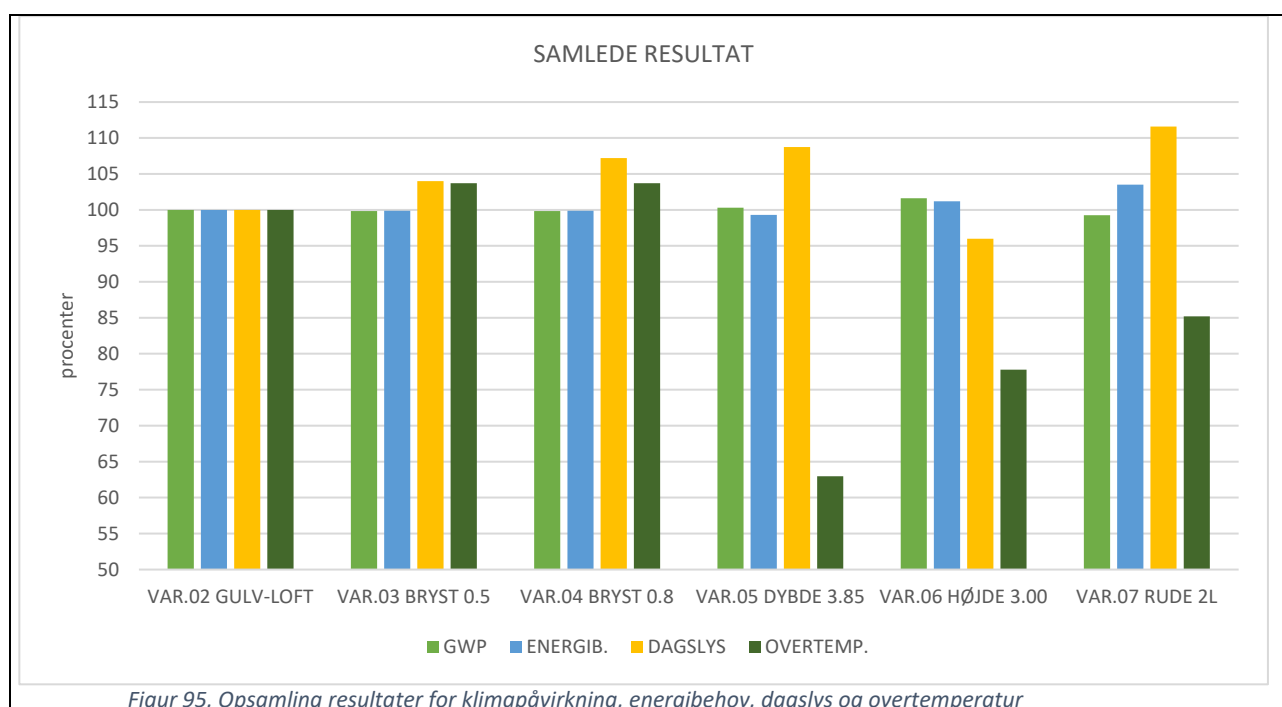


Der må gøres opmærksom på at kun de bærende indervægge er ændret i forhold til baseline projektet. Da deres resultat er næsten ens for de viste varianter, se Figur 91, Figur 92, Figur 93 og Figur 94.

4.5 Analyse af resultater

I resultaterne af de foregående beregninger af dagslys, energibehov, overtemperatur og klimapåvirkning har der været beregnet 6 parametervariationer der er gennemgående for dem alle, og derfor er brugt til at lave en samlede betragtning. Et godt resultat for f.eks. dagslys behøver ikke at give et godt resultat for klimapåvirkningen også. Det er heller ikke nødvendigvis en af disse 6 varianter, der er den mest optimale løsning samlet set. Her er det f.eks. især for dagslys at orienteringen er udslagsgivende. Herunder samler jeg op på disse gennemgående variationer som er følgende:

- VAR.01, Modeljustering, baseline
- VAR.02, Vinduer fra VU.01 fra gulv til loft.
- VAR.03, Vinduer fra VU.02 med 500mm brystning.
- VAR.04, Vinduer fra VU.03 med 800mm brystning.
- VAR.05, Rum som i RU.02 på 3850mm dyb.
- VAR.06, Rum som i RU.03 på 3000mm høj.
- VAR.07, Vinduer som i RU.04 med 2-lags rude.



Figur 95, Opsamling resultater for klimapåvirkning, energibehov, dagslys og overtemperatur

Se Figur 95 ovenover. Det er variationer med vinduesudformning, rummets udformning og rudetype, der er gennemgående i klimapåvirkning (GWP), energibehov (ENERGIB.), dagslys og overtemperaturberegningerne. For dagslys er værdier højere end 100% en forbedring og for GWP, Enerigibehov og overtemperatur er det værdier mindre end 100% der er en forbedring. Reference variant er VAR.02, med vinduer fra gulv til loft, justeret iht. dagslys. Baseline er ikke taget med, da den ikke overholder detaljerede dagslyskrav.

Det bedste resultat iht. til GWP og dagslys er VAR.07 med 2-lagsenergirude, som samtidig har det højeste energibehov. VAR.05, med rumdybde på 3.85 m, har det bedste resultat iht. energibehov og overtemperatur, mens den er næstbedst for dagslys og har en næsten uændret klimapåvirkning. VAR.03 og 04 har næsten uændret klimapåvirkning og energibehov, mens de ender dårligere iht. overtemperatur og

minimalt bedre iht. dagslys. Med ringeste resultat ender VAR.06 med højre rumhøjde, som kun ender med en forbedret overtemperatur mens dagslysniveau er ringere og klimapåvirkningen og energibehov større.

Selvom forbedringer i energibehov kan påvirke regnskab af klimabelastningen positivt (VAR.05), kan der ved hjælp af f.eks. rudevalg, blevet kompenseret for et dårligere energibehov for et lavere klimabelastning (VAR.07).

Hvad vinduesudformning angår, er der næsten ingen forskel ift. energibehov og klimapåvirkning. Selvom vinduesstørrelsen per facadeorientering er forskellige, ender de samlede transmissionsarealer på næsten det samme. At øge loftshøjde fra 2,8 til 3 meter viser ingen positiv effekt på hverken klimapåvirkning, energibehov, dagslys eller overtemperatur (VAR.06).

Hvis ikke det var fordi ingen af de overnævnte varianter kan overholde den detaljerede dagslyskrav for de vestvendte opholdsrum i boligerne, ville alle varianter (VAR.02-07) overholde krav til dagslys, energibehov, termisk indeklima og 2023 GWP-grænseværdi. Der er derfor behov for at se nærmere på en løsning for de vestvendte rum først.

4.5.1 Dagslys resultatanalyse

Angående dagslys er orientering, i kombination med repræsentation af omgivelserne, den parameter med den største indflydelse på det påkrævede glasareal.

Udformning af selve vinduets geometri har meget lidt indflydelse på resultaterne, men hvor meget afhænger stærkt af orienteringen. Det vil sige at vinduesudformning kan bruges til at lave små optimeringer, hvis det gavner en bestemt rumorientering. Ændringer i rummets proportioner har en klar større effekt, hvor det gavner mere at lave rummet mindre dybt end det gavner at lave rummet højere.

Alle disse parametre kan kombineres med i udgangspunkt en 3-lags eller 2-lags energirude. Da 2-lagsrudens lystransmittens er bedre, vil det resultere i at glasarealet kan reduceres. Det har dog indflydelse på rummets termiske komfort og energibehov. Også dybden af sideskygge og overhæng er en justering, der kan anvendes i kombination med de forskellige vindues- og rumudformninger, samt rudetype.

Ud fra sDA_{300,50%} beregningerne kom det frem, at vestvendte opholdsrum i boligerne ikke overholder kravene med kombinationen af de valgte parametre. Det betyder at der skal laves en ny iteration af beregningen for boligerne i vest facaden. Muligheden for at finde en løsning til disse rum også, kan findes inden for de allerede beregnede løsninger, eller ved at udvide søgefeltet. Inden for de beregnede parametervariationer ligger option 1. Her vælges en kombination af de bedste parametre for den pågældende orientering, ud af følgende beregninger af afsnit 4.2.2 og 4.2.3:

- VU.01 til VU.05
- RU.01 til RU.04

Her handler det om justeringer af VU, vinduesudformning og RU, rummets udformning.

Option 2 er en sidste mulighed, som kan tages i brug når 1. option ikke fører til en løsning. Denne option handler om fortolkningen, og er et forsøg på at følge BR vejledning [11] ved at betragte boligenheden som en helhed samtidig med hensyntagen til rummets anvendelse. Her udvider vi søgefeltet i en retning, der måske kræver myndighedsgodkendelse, men iht. LM-83-12, som er en anerkendt metode, er det tilladt at opgøre dagslys beregning for bygning som helhed, funktionszoner som helhed eller på rumniveau.

Formål med helhedsbetragtningen er at nedbringe den negative indflydelse som køkkenet har på opholdsrummet. Køkken og ophold er disponeret i en åben planløsning, med køkkenbordet opstillet i boligens indgangsareal. Sammen med at indgangsdøren er forbundet til en fordelingsgang, medfører det at opholdsrummene bliver meget dybe og énsidigt belyste.

Dagligdagen i et botilbud er sådan, at alle måltider som regel spises i fællesspiserummet, i stueplan. Så køkkenet har ikke den samme funktion, som det normalt har i en bolig. En nedprioritering af dagslysniveauet i køkkenet er, i lys af dette et legitimt argument.

Vejledningen til 10% reglen har for boliger en lempeligere korrektion for dybe rum end for arbejdsrum. Her korrigeres der ikke yderligere, for rum der er dybere end 6 meter. Dette ville i dette tilfælde udgøre en nedprioritering af køkkenets belysningsniveau. Kravet til option 2 ville kunne formuleres ved at $sDA_{300,50\%}$ skal være opfyldt for en dybde på op til 6 meter fra facaden.

Tredje mulighed, option 3, udvider også søgefelt. Her kan man se på reflektanser af rummets overflader. I de første beregninger er der anvendt de vejledende overfladereflektanser fra BR18s vejledning, som er ens for både LM-83-12 og DS/EN17037 også. Disse reflektanser er bla.:

- Indervægge, 0.50
- Lofter, 0.70
- Gulvflader, 0.20

Som nævnt anbefaler LM-83-12 at modellere rummene meget detaljeret, og hvis muligt med de rigtige materialernes reflektanser. DS/EN17037 anbefaler en minimum-maksimum spænd hvor i reflektanser burde ligge.

- Indervægge, 0.50-0.80
- Lofter, 0.70-0.90
- Gulvflader, 0.20-0.40

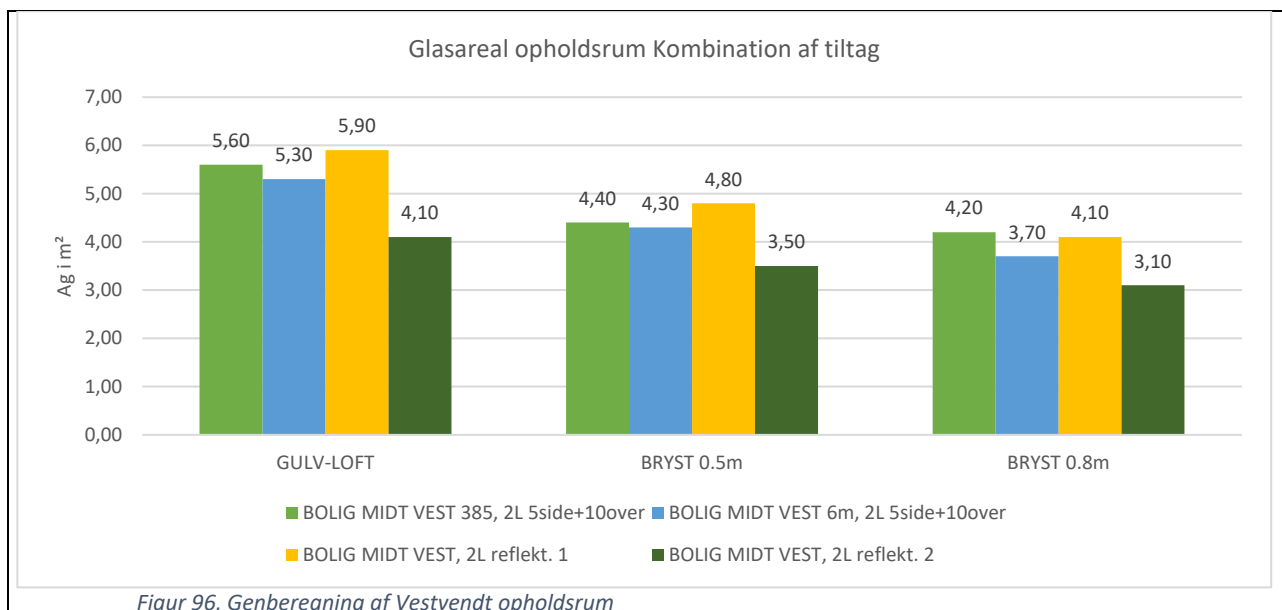
Man skal ved ændring af reflektanser holde for øje, at det er en beregning der hører til i en senere projekteringsfase, hvor der er kendskab til flere detaljer omkring rummets materialer, overflader og indretning. Disse detaljer skal der alle tages højde for. Men da de typisk ikke er kendt i en tidlig designfase, bør man anvende de mere konservative, anbefalede værdier.

For option 3 skrues der trinvis op for reflektanser med udgangspunkt tagen i DS/EN17037 spænd. Som følgende:

- Indervægge, øget til, 0.65 og 0.80
- Lofter, øget til, 0.80 og 0.90
- Gulvflader, øget til, 0.30 og 0.40

4.5.2 Optioner 1-3 for Vestvendt opholdsrum

For **option 1**, tages der udgangspunkt i VAR.05, med en rumdybde på 3.85 meter, med en optimering med en 2-lagsrude af VAR.07. Dette viste sig ikke at have en stor nok effekt til at kravene kunne overholdes. Derfor er der yderligere reduceret i både sideskygge og overhæng. Sideskygge er reduceret fra 10^0 til 5^0 og overhæng fra 20^0 til 10^0 . De beregnede glasarealer er vist i Figur 96 ned under.



Option 2, som regner dagslys krav til maksimalt 6 meter dybde, skal også kombineres med en reduceret sideskygge og overhæng, samt 2-lagsrude for at opnå $sDA_{300,50\%}$ krav på 50%. **Option 3** beholder de oprindelige rumproportioner og kombinerer 2-lagsrude og reduceret sideskygge og overhæng med en øget reflektans på loft, gulv og vægge. Ved denne option ender de beregnede glasarealer på det maksimale, hvor vinduet fylder hele rummets bredde i facaden.

Når reflektansen skrues op til maksimum, svarer det til hvidmalede vægge og loft, samt en lysegrå gulvbelægning. Det er nok en teoretisk ideel situation, som ikke repræsenterer virkeligheden på en retvisende måde, når møblering og materialisering ikke er afklaret.

Som resultaterne viser i Figur 96, giver det hellere ikke mening at kun at justere en smule på reflektanser. Og da option 1, som er baseret på de indledende beregningerne, opfylder kravene uden at fortolke bygningsreglement som i option 2, ville jeg anbefale at man vælger option 1. Det har en gennemgribende følgevirkning på bygningens hoved udformning. Om man ændrer rumdybde for hele karré eller kun for vest og nord delene hvor den har mest effekt på dagslys, er en design beslutning der skal laves.

4.5.3 Dagslys analyse af parameter

Tabel 2, Opgørelse af resultater med relation til belysningsstyrke

	NORD	ØST	SYD	VEST	GENNEMSNI
VINDUERESULTAT					
$sDA_{300-50\%}$ i %					
VAR.02 GULV-LOFT	35,3	50,3	56,5	31,7	
VAR.03 BRYST 0.5	40,1	54,2	62,2	33,3	
ÆNDRING	4,8	3,9	5,7	1,6	4,0 %
VAR.04 BRYST 0.8	42,9	57,6	64,4	37,7	
ÆNDRING	7,6	7,3	7,9	6	7,2 %
VAR.08 SIDESK.	42	42	0	39	-3 %
VAR.09 OVERH.	42	39	-3	34	-8 %
	ÆNDRING		ÆNDRING		

Se Tabel 2. For alle orienteringer er det vinduer med en brystning på 800mm der har det højeste dagslys udbytte ind i rummet. Ligeledes giver den mindste sideskygge og overhæng bedre dagslysudbytte.

Tabel 3, Opgørelse af resultater med relation til glasareal

RUMRESULTAT Ag i m ²	NORD	ØST	SYD	VEST	
VAR.02 GULV-LOFT	2,6	1,8	1,2	4,7	
VAR.05 DYBDE 3.85	2,3	1,8	1,2	3,6	
ÆNDRING	-11,5	0,0	0,0	-23,4	-8,7 %
VAR.06 HØJDE 3.00	2,8	1,8	1,3	4,7	
ÆNDRING	7,7	0,0	8,3	0,0	4,0 %
VAR.07 RUDE 2L	2,4	1,6	1,1	3,8	
ÆNDRING	-7,7	-11,1	-8,3	-19,1	-11,6 %

Se Tabel 3. Ændring af rumdybde forbedrer kun rummene med orientering mod Nord og Vest, mens en 2-lags energirude har den største effekt for vestvendte rum, men også giver forbedringer for de andre orienteringer.

4.5.2 Energibehov analyse af parametre

Tabel 4, Opgørelse af Be18 resultater

	EB kWh/m ²	TR W/m ²	OT kWh/m ²	
RESULTAT EB				
VAR.02 GULV-LOFT	46,62	11,13	2,7	
VAR.03 BRYST 0.5	46,56	11,97	2,8	
ÆNDRING	-0,1	7,5	3,7	%
VAR.04 BRYST 0.8	46,56	11,97	2,8	
ÆNDRING	-0,1	7,5	3,7	%
VAR.05 DYBDE 3.85	46,29	10,93	1,7	
ÆNDRING	-0,7	-1,8	-37,0	%
VAR.06 HØJDE 3.00	47,17	11,40	2,1	
ÆNDRING	1,2	2,4	-22,2	%
VAR.07 RUDE 2L	48,25	12,01	2,3	
ÆNDRING	3,5	7,9	-14,8	%

For energibehov giver den reducerede rumdybde det laveste behov, samt transmissionstab og overtemperaturstraf, se Tabel 4.

Tabel 5, Opgørelse af resultater for den operationelle temperatur

RESULTAT Topt >26°C	NORD	ØST	SYD	VEST	GENNEMSNI
VAR.02 GULV-LOFT	73	357	279	96	
VAR.03 BRYST 0.5	63	349	264	90	
ÆNDRING	-13,7	-2,2	-5,4	-6,3	-6,9 %
VAR.04 BRYST 0.8	64	349	263	89	
ÆNDRING	-12,3	-2,2	-5,7	-7,3	-6,9 %
VAR.07 RUDE 2L	211	444	476	122	
ÆNDRING	189,0	24,4	70,6	27,1	77,8 %

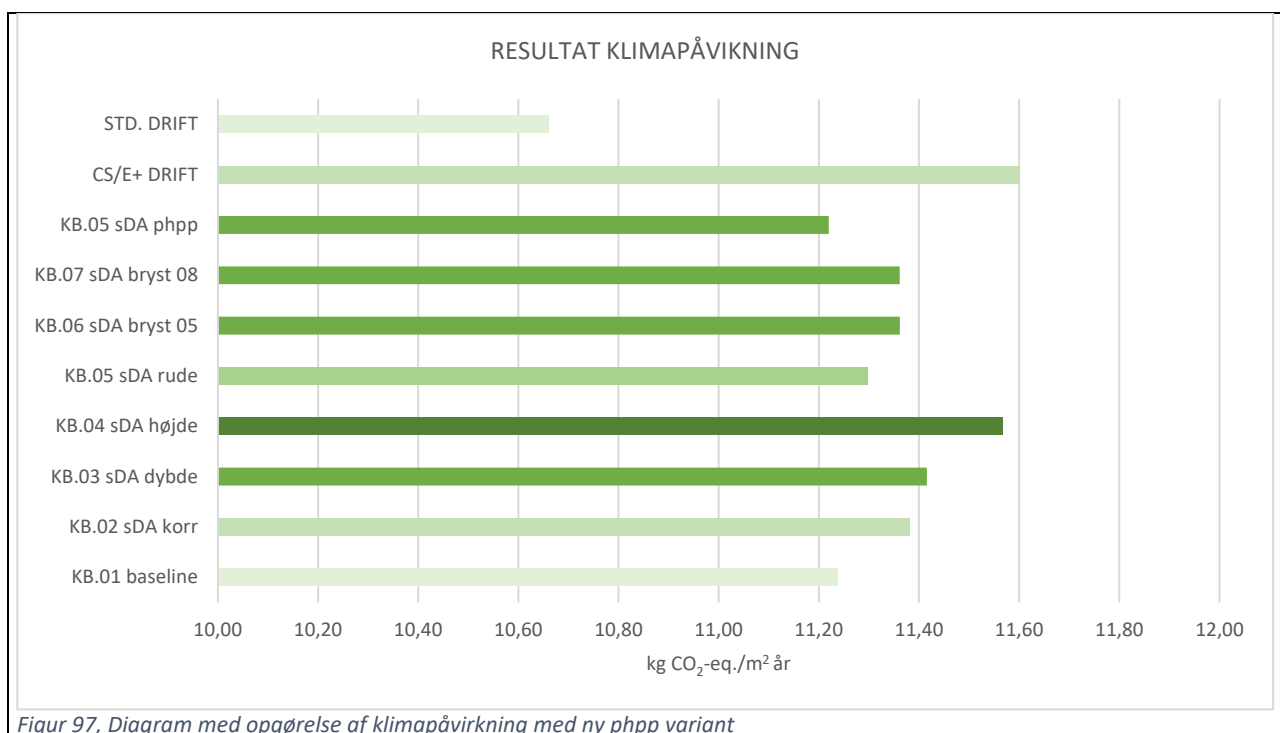
Se Tabel 5. Det er Nord og Vestvendte rum der har færreste timer over 26°C. Samtidig reducerer vinduesudformning med en brystning mest i netop det antal timer, for disse orienteringer. 2-Lagsrude øger rumtemperaturen mest for syd- og nordvendte rum, hvor den er over grænseværdien for både øst og syd, med hybridventilation (ikke vist). En brystning på 500mm eller 800mm har i gennemsnit den samme reduktion af overtemperatur.

Nordvendte rum har generelt den laveste rumtemperatur, så det giver ikke mening at reducere det yderligere ved 2-lagsruder. Dertil vil i en Nordvendt rum opholde sig nærmere på vinduet på grund af den lavere belysningsstyrke der generelt er ved den orientering. En trelagsrude ville i det tilfælde give mindre kuldenedfald og dermed en bedre komfort.

4.5.3 Klimapåvirkning analyse af parametre

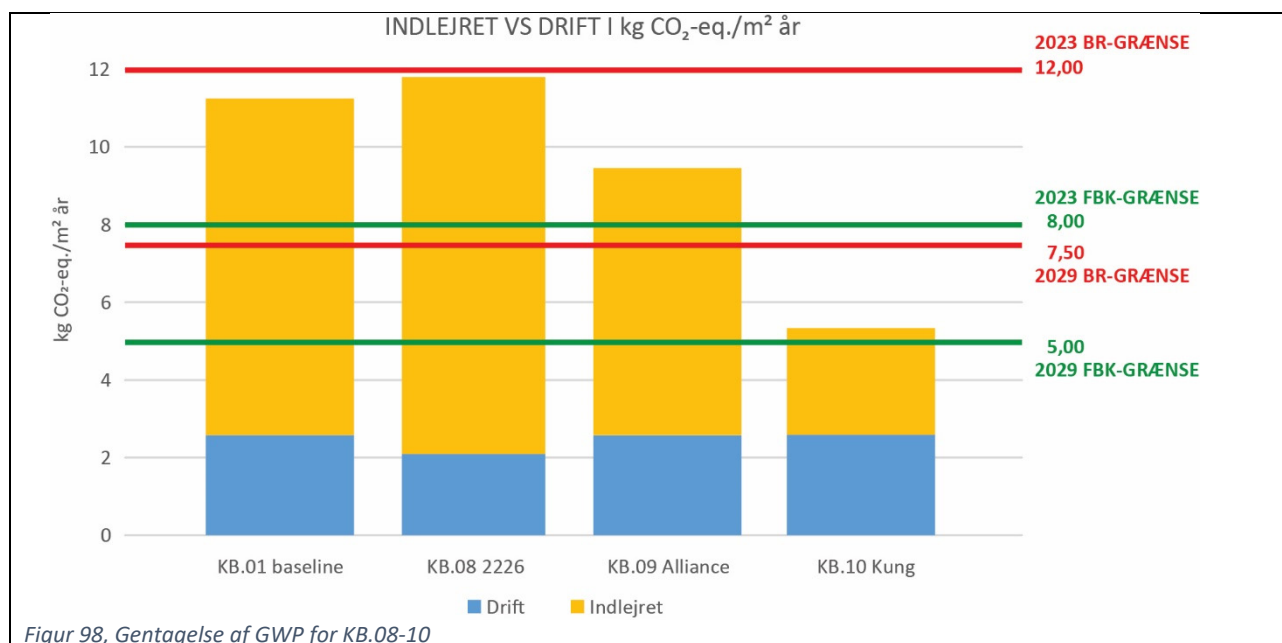
Tabel 6, Opgørelse af resultater af klimapåvirkninger	
RESULTAT LCA	GWP i kg CO ₂ eq/m ² år
VAR.02 GULV-LOFT	11,38
VAR.03 BRYST 0.5	11,36
ÆNDRING	-0,17 %
VAR.04 BRYST 0.8	11,36
ÆNDRING	-0,18 %
VAR.05 DYBDE 3.85	11,42
ÆNDRING	0,30 %
VAR.06 HØJDE 3.00	11,57
ÆNDRING	1,62 %
VAR.07 RUDE 2L	11,30
ÆNDRING	-0,73 %

Se Tabel 6. Klimapåvirkningen er for alle parametre rigtig tæt på hinanden. 2-lagruden giver det største reduktion i klimapåvirkning ift. de andre 5 parametre. Samtidig har denne det højeste energibehov. Parametervariation med reduceret rumdybde har det højeste klimabelastning. Brystningen på 800mm reducerer klimabelastning pga. afrunding lige så meget som en brystning på 500mm.



Se Figur 97. Det er dog beregningsmargenen på energibehovet, der giver et større reduktion i klimapåvirkningen. Større end udformning af vindue og rum iht. til dagslys krav. Det lavest beregnede energibehov reducerer klimabelastning med 0,7 kgCO₂eq/m²år. Det svarer til **6%** af grænseværdi til 2023 og **14%** af FBK-grænseværdi for 2029.

KB.05 sDA phpp, er et forsøg i at lave en besparelse i energibehov for varianten med 2-lagsenergirude. Det er gjort ved at beregne vinduerne med en passivhus-standard vindueskarm. Disse isolerer markant bedre end en standard træ-alu. karm. De må bemærkes at på den måde KB.05 for beregnet det laveste klimapåvirkning af alle varianter.

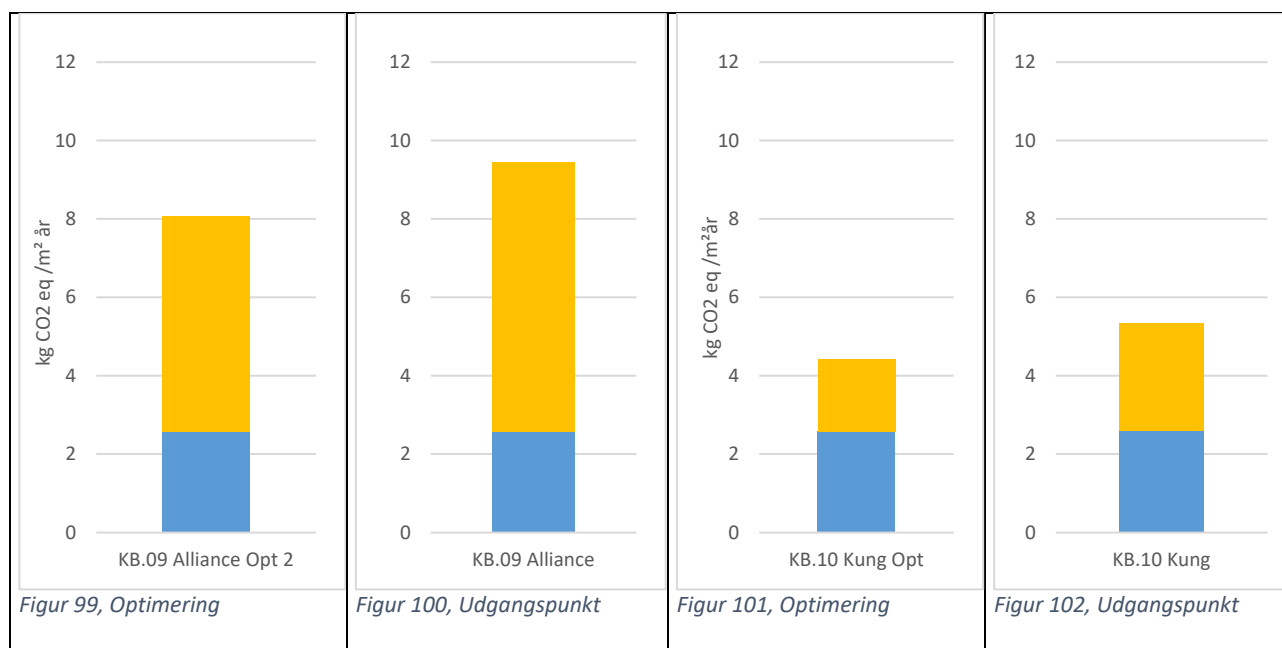


For at komme ned på 2029-krav, vil bygning er som designet med de samme materialer som KB.01 baseline modellen, ikke kunne overholde grænseværdierne. Her vil en ændring af byggemateriale være afgørende. Figur 98 viser at KB.10 med bygningsdele udført som Kung referenceprojekt ville kunne klare bygningsreglement grænseværdi på 7,50 kgCO₂eq/m²år og måske også FBKs grænse på 5. KB.09 med byggematerialer fra Alliance reference projekt har potentiale til at nå BR grænse på 7,50 kgCO₂eq/m²år. Både at få KB.10 under FBK2029 grænse og KB.09 under BR2029 grænse, kræver en yderligere optimering af byggematerialerne.

Den store forskel mellem KB.10 og KB.09 er at Kung projektet anvender træfiber isoleringsmateriale på tag og i gulv og ydervægskonstruktion, mens Alliance projekt er opgjort med stenuldsisolering. Begge varianter anvender den samme lette indervægsopbygning som KB.01 baseline modellen.

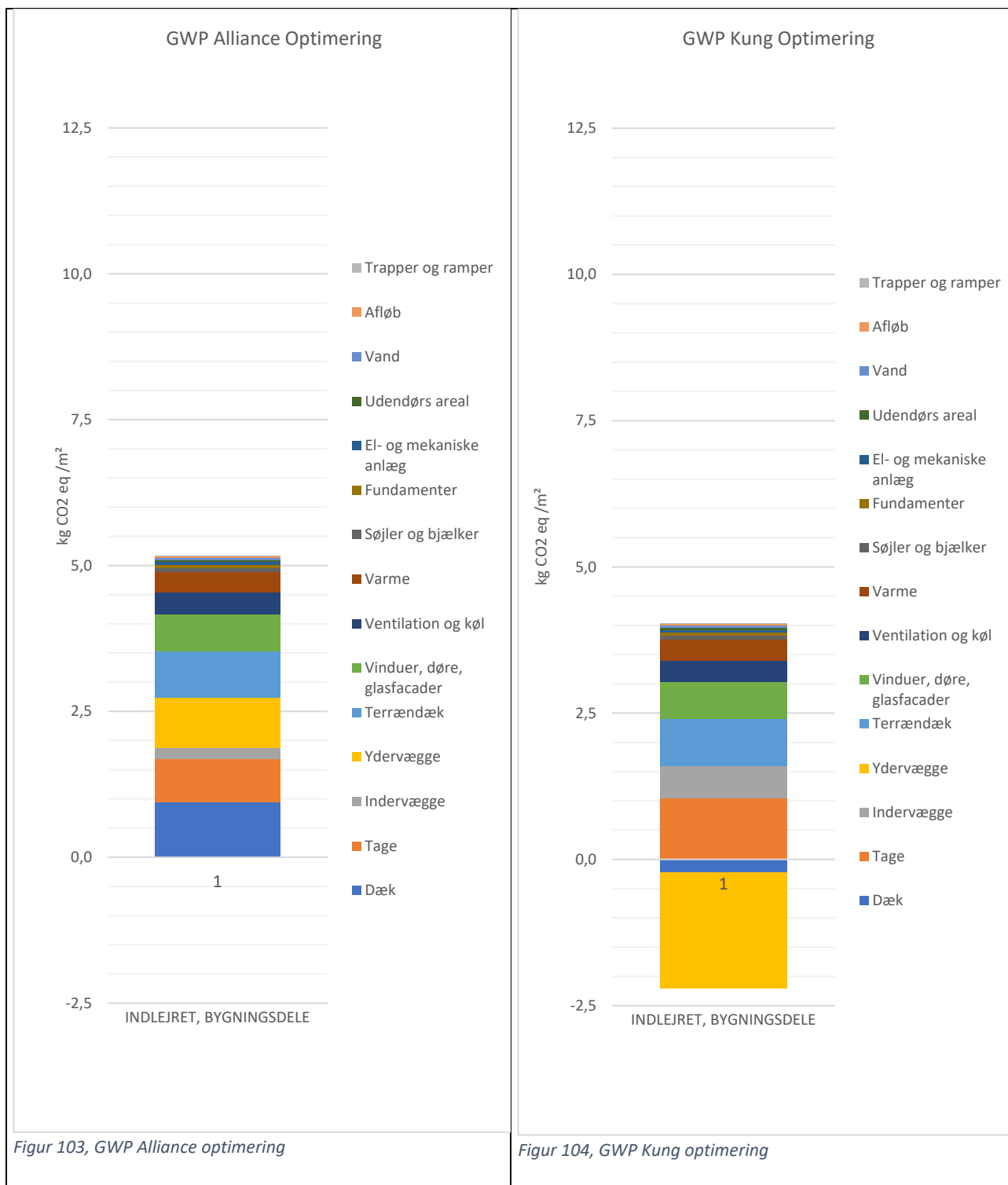
Der laves en ny beregning, hvor for KB.09 ændres, først på isoleringsmateriale i tag, gulv og vægopbygningerne. Hvis målet ikke er opnået, justeres der også i skillevægsopbygning fra metalskelet til træskelet beklædt med lerplader istf. gipskartonplader. For KB.10 justeres direkte på skillevægsopbygningen på denne måde.

Se Figur 99, Figur 100, Figur 101 og Figur 102 nedenfor: Alliance optimeringen tager 1,35 kgCO₂eq/m²år af den indlejrede klimapåvirkning. Det er dog ikke nok til at nå BR2029 grænsen på 7,50 men lander på FBK2023 grænse på 8,00 kgCO₂eq/m²år. Kung optimeringen tager 0,91 kgCO₂eq/m²år af den indlejrede klimapåvirkning. Hermed er den mere end 10% under KBK2029 grænseværdi.



Se Figur 103 og Figur 104. Det er især på ydervæg- og dækkonstruktion at KB.10, Kung referencen præsterer bedre end KB.09, Alliance reference. Man undrer sig over at forskellen er så stor. Her kan det bemærkes, at KB.10s dæk opbygning har 100% let og tør byggeproces. Der anvendes ingen beton eller cementholdelig afretningslag, istf. bruges der løsfyld af knuste kalksten som ballast til lydisolering. Om denne konstruktion kan overholde lydkrav til boliger, har jeg ikke kunne finde oplysningerne på. Men det burde dog undersøges nærmere.

Den anden markante forskel ligger i ydervæggene. Her er de begge baseret på massivtræ, dog bruger KB.10 en variant uden lim, hvor delene i stedet er samlet med trædyvler. Der er hellere ingen isoleringsmateriale i vægopbygningen. Det giver en u-værdi som er dårligere end den for baseline modellen, 0,19W/m²K i forhold til 0,15W/m²K (inkl. kuldebroer ved samlingerne). Her har KB.09, Alliance reference den samme termiske funktion med en u på 0,15W/m²K.



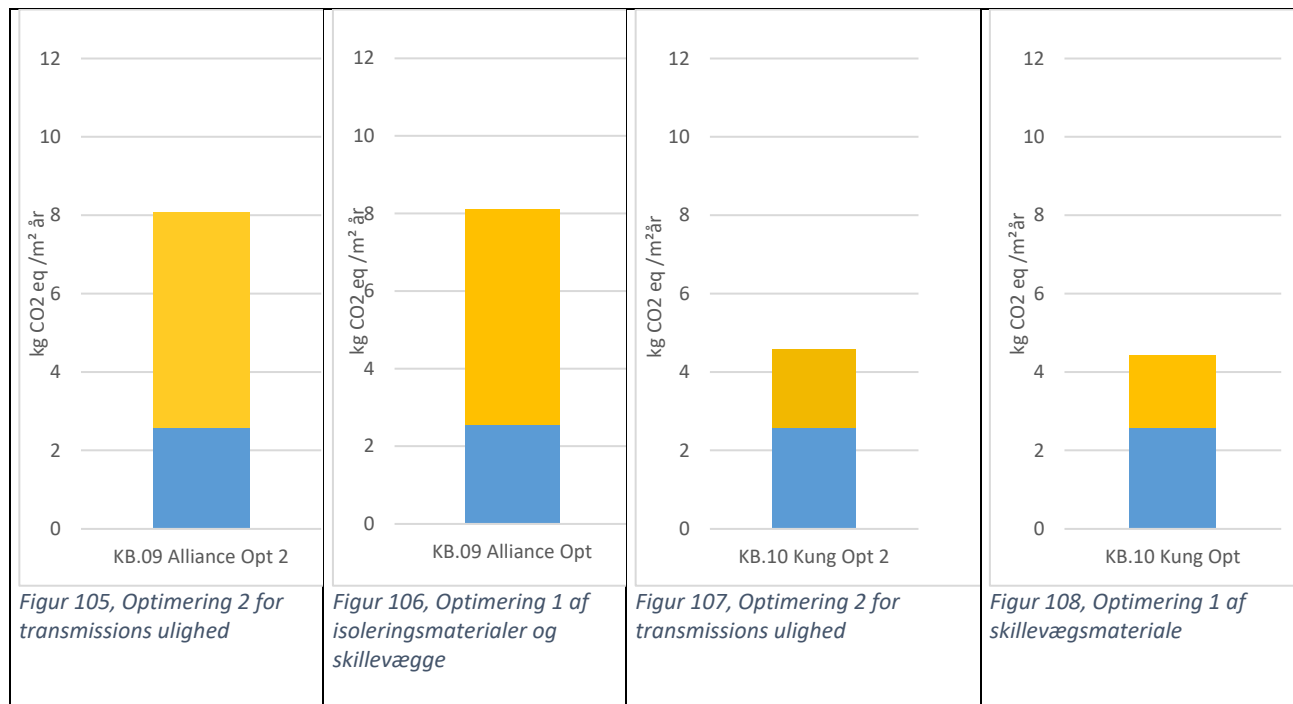
KB.10, Kungs dårligere termiske isolering for ydervæg skal der derfor korrigeres for, inden sammenligningen er retvisende. Som kontrol er der lavet en transmissionstabsberegning for både KB.09 og KB.10, og denne er sammenlignet med KB.01, baseline modellen.

Tabel 7, Transmissionstab for varianterne

SAMENLIGNING AF transmissionstab

		Ydervæg	Φ	Tag	Φ	Samlet
KB.01	BASELINE	0,15	20318,4	0,08	4282,88	24601,28
KB.19	ALLIANCE	0,15	20318,4	0,07	3747,52	24065,92
KB.10	KUNG	0,19	25736,64	0,13	6959,68	32696,32
A		4233		1673		
ΔT		32		32		

Her i opsamlingen, Tabel 7, viser det sig at KB.09 isolerer bedre end baseline, hvilket resulterer i et lavere energibehov og derved en lavere klimapåvirkning. For KB.10 ville man aldrig kunne justere for den dårligere isoleringsevne i ydervæggen ved at øge isoleringsmængden på taget, da transmissionstabet gennem facaden allerede er mere end den samlede transmission gennem facade og tag for baseline beregningen KB.01. Derfor er Be18 beregningen for både KB.09 og KB.10 justeret i stedet for at justere på isoleringsmængderne.



Se ovenover Figur 105, Figur 106, Figur 107 og Figur 108. Disse justeringer, der kompenserer for funktions ulighed, øger klimapåvirkning for KB.10 med 0,17 kgCO₂eq/m²år og nedbringer klimapåvirkningen for KB.09 med 0,04kg CO₂ eq/m² år. Derved er det ikke nok for KB.09 at holde sig inde for BR2029 grænse mens KB.10 forbliver under FBK2029 grænse på 5,00 kgCO₂eq/m²år. Der er 0,41 kgCO₂eq/m²år buffer op til grænsen, og det samlede spænd mellem klimapåvirkninger af vindues- og rumparametervariationer er 0,35 kgCO₂eq/m²år, hvilket betyder at alle disse variationer, i kombination med materialevalg til bygningsdele som af KB.10, ville holde sig under FBK2029 grænseværdi.

5. Diskussion

Rapporten lægger sig ud med den verserende påstand om, at det kan være svært for bygningstyper med overvejende små og dybe rum at overholde dagslys- og energibehov krav fra BR18. Jeg ville undersøge om det bliver yderlige vanskeliggjort at opnå disse krav når kravene til grænseværdier for klimapåvirkningen af bygninger træder i kraft. Hertil ville jeg undersøge hvilke parametre, der er vigtige for bygningens udformning.

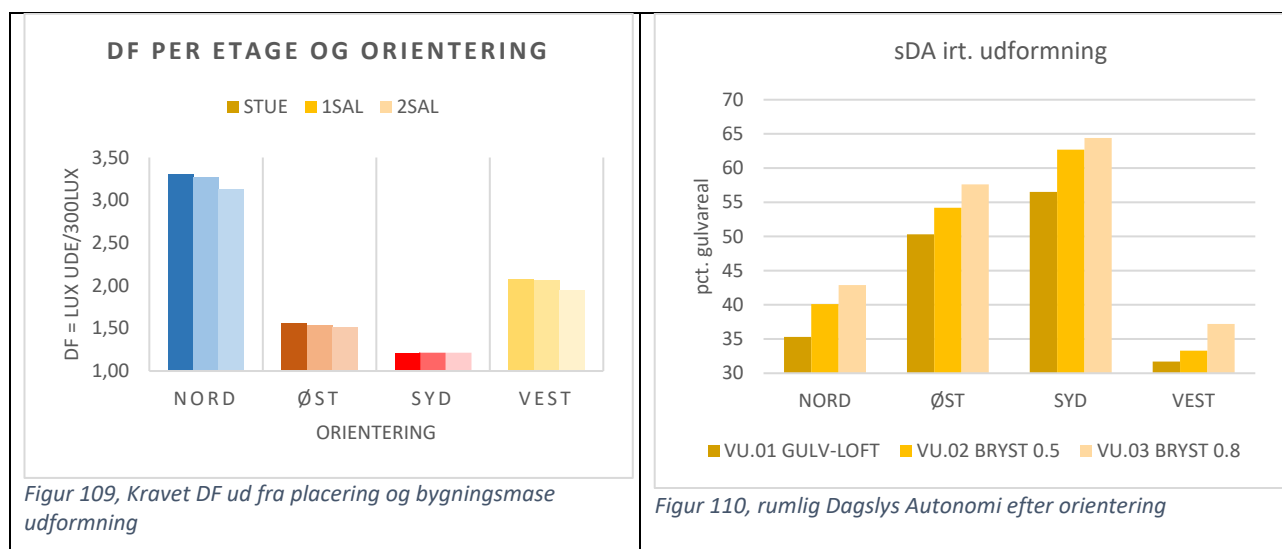
Som følge af beregningernes 'skala' og 'hierarki', hvor resultaterne fra dagslysberegning er inkorporerede i energibehovsberegning, og energibehovsberegning på sin vis er inkorporerede i LCA-beregningen, ville effekterne af parameter ændringer i dagslysberegning have en mindre effekt på energibehov og igen på klimapåvirkning. Også for energibehov ville effekten af parameterændringerne aftage når resultaterne er overført til LCA beregningen.

Men da grænseværdien for klimapåvirkning hurtig mindskes frem mod 2029, ville effekten af selve små forskelle alligevel løbende få et større betydning.

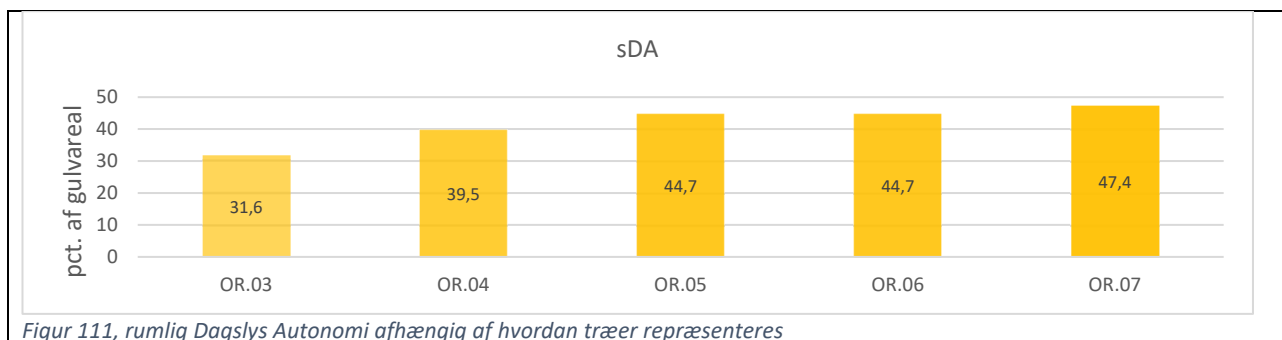
Dette kan kaldes for systemet indgangsvinkel; at se på effekten af parametrene. Når man tager bygningen som indgangsvinkel og ser på hvordan klimaskærmens udseende, rumdisponering, dagslys kvalitet, termisk komfort og valg af byggematerialer, er vægtning af parametre noget andet.

5.1 Dagslys

Orientering har vist sig at have stor indflydelse på udformning af vinduerne. Det har både at gøre med kompasorientering og hvordan ikke transparente naboobjekter er placeret og udformet, se Figur 109 og Figur 110.



Det er også bemærkelsesværdigt, hvor stor en effekt det har med hvilke metode man repræsenterer / modellerer de relevante omgivelser. Effekten er nemlig i samme størrelsesorden som forskellen mellem vinduer fra gulv til loft eller vinduer med en brystning på 800 mm, se Figur 111.

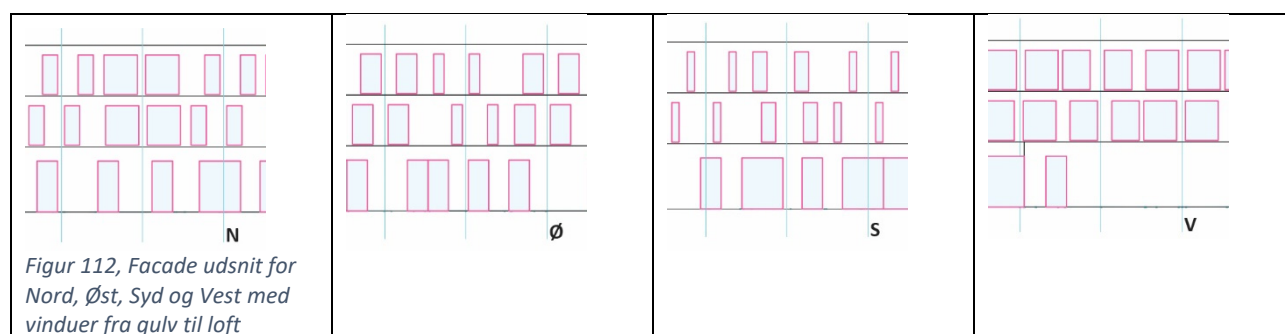


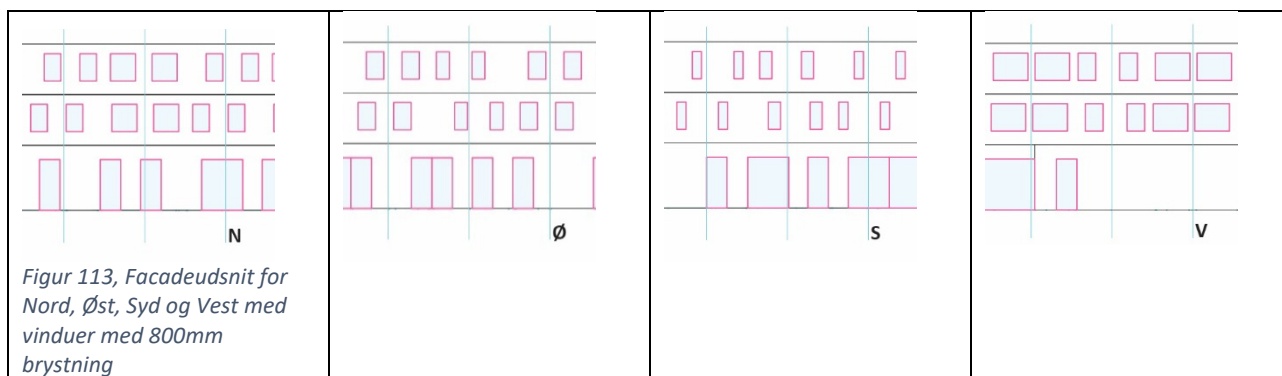
Her savner man i Bygningsreglementet en vejledning der angiver en detaljeringsgrad, på lige fod med LM-83-12 og vejledningen til 10%-reglen. DS/EN17037 hjælper heller ikke her. Der nævnes det kun at man skal lave en repræsentativ model af de undersøgte rum. Hvordan man sikre dette bliver ikke uddybet.

Vinduesproportioner, og højde i forhold til afstand fra gulv og loft, har en stor indflydelse på hvordan dagslys fordeles ind i det bagvedliggende rum. For det samme glasareal udnyttes dagslys bedre og resulterer i en højere $sDA_{300-50\%}$, når det placeres højere op facaden iht. gulvet. Men vi har set at den effekt ikke er lige stor for hver orientering. Og samlet set, over alle facader, er summen af glasareal til at opfylde dagslyskrav næsten ens.

Her kan man konstatere at case bygningens karré form udligner forskelle mellem orientering. Hvis plandisponering havde været anderledes udformet, f.eks. en enkel siddet korridorhus med vestvendte boliger, ville det samlede glasandel ift. lukkede facade været meget større. Når man laver volumen studier og i tætbebyggede kontekster er det vigtig at have fokus på det fra starten. Der orientering og omgivelse tydeligt sætter begrænsninger for rum dybder af funktioner der kræver dagslys.

Selvom det samlede glasareal for bygningen er tæt på ens for de forskellige vinduesudformninger, ændres facadeudformning dog stærkt i fremtræden, ved at vælge vinduer fra gulv til loft eller vinduer med en brystning på 800 mm. Facadeudsnit herunder, Figur 112 og Figur 113, viser vindue størrelse per orientering hvor bag ved liggende boliger alle har det samme disponering med et soveværelse og opholdsrum mod facaden. Det største af vinduer er til opholdsrum og det mindre til soveværelse.





Læg mærk også mærk til de store forskelle mellem orienteringer for såvel gulv til loft som brystningsvarianten.

Som eksemplet med de vestvendte boliger viser, burde man stille spørgsmålet om det at ændre på vinduesstørrelsen nu er den rigtige måde at reagere på en given kontekst? Her ville en justering af rumdybden være mere frugtbar, og bedre endnu hvis man kunne disponere bygningen på en anden måde og derved undgå de kritiske orienteringer. C.F. Reinharts [21] og P. Littlefairs [19] håndregler og anbefaling iht. dagslys design lægger også fokus herpå.

Det er grundet den udarbejdede plandisponering i projektgrundlaget at det ikke er belyst yderligere i denne rapport. Men det fortjener klart fokus i fremtidige opgaver. Hvis man ville lave et dagslysdesign fuldstændigt efter DS/EN17037, ville man udover krav om belysningsstyrke også skulle opfylde krav om udsyn, et bestemt antal timer direkte lys ind i opholdsrummet og blænding.

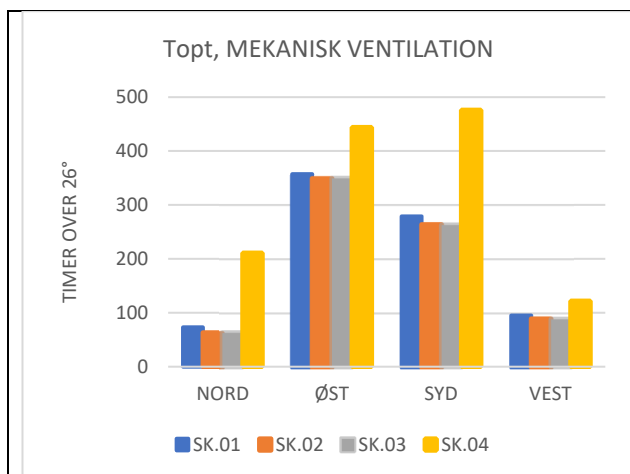
Når man opfylder det, vil disponeringen iht. orientering og rumdybde også blive taget i betragtning, da udsyn omfatter rumdybde som parameter og krav om direkte sollys omfatter orientering. Begge krav omfatter også omgivelserne som en del af parametrene.

5.2 Energibehov og Sommerkomfort

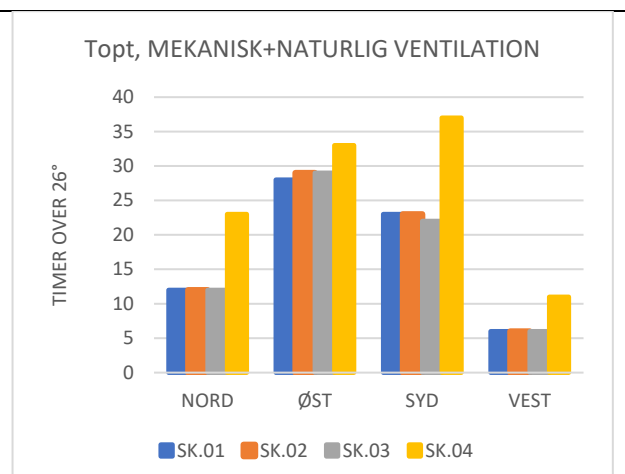
Hvordan man modellerer omgivelserne, påvirker også energibehovet i særdeles høj grad. Effekten er minimum to gange større end alle variationerne med vindues- og rummets udformning. Det viser sig, at den medfølgende reduktion i tilskud fra solstråling øger energibehovet kraftigt.

De beregnede variationer holder sig dog alle inden for energirammen, så der er ikke samme incitament til at optimere det resultat, medmindre man ønsker at opfylde lavenergiklassen. Det ville have været relevant hvis LCA-beregning ikke kunne overholdes ved kun at justere på materialerne alene. Det er dog først relevant ved FBK2029 grænseværdi, hvor den indlejrede klimabelastning og klimabelastningen fra drift nærmer hinanden i størrelsesordenen.

Generelt har der vist sig en stigning i den indvendige rumtemperatur ved øgning af glasareal. Dog har det vist sig at kunne ventileres bort, ved at simulere naturlig ventilation i kombination med mekanisk ventilation. For at anskueliggøre en forskel, skulle grænsen for overtemperatur vises fra 26 °C istf. 27 °C som er normalt for boliger, se Figur 114 og Figur 115.



Figur 114, Timer hvor den operationelle temperatur er over 26°C med kun mekanisk ventilation



Figur 115, Timer over 26°C med hybrid ventilation

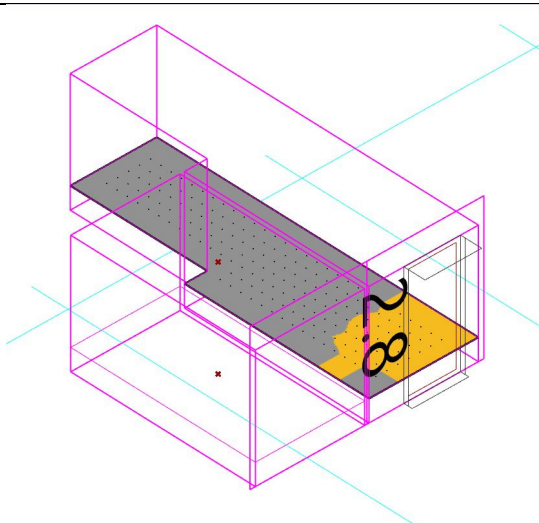
Det er øst og syd, der er de kritiske orienteringer for boligerne. Og selvom man kan ventilere varmen bort i rummet, kan der være andre gener fra solstråling. Det har været nævnt i baggrundsteorien at man sammen med belysningsstyrke (sDA), også skal viste ASE_{1000,250h} for et rum. Denne størrelse (ASE) gengiver andelen af rummet, der modtager mere direkte sollys end 1000lux for mere end 250 timer per år.

Når det areal er mellem 7% og 10%, begynder der at opstå stærk utilfredshed med den visuelle komfort i rummet. Det bliver generelt også anerkendt som en parameter, der angiver hvornår der er brug for solafskærmning til et rum.

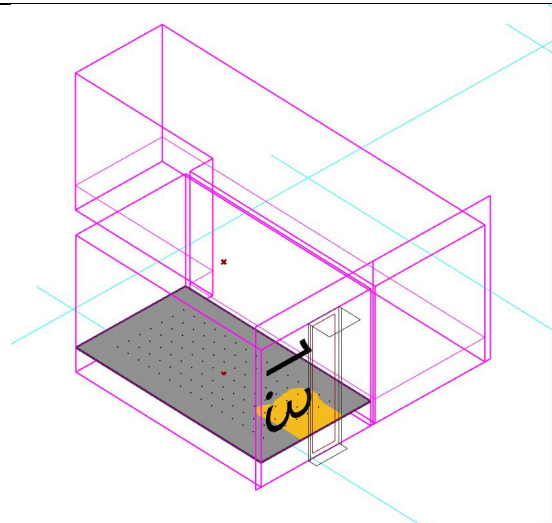
I Figur 116, Figur 117, Figur 118 og Figur 119 vises ASE_{1000,250h} resultater for en syd og vestvendt bolig. Her er for alle rum mere end 10% af areal direkte belyst med 1000lux for mere end 250h. Det er grund til, sammen med at de højeste T_{opt} er ved disse orienteringer at undersøge det nærmere.

Der er ikke hårde krav (i for af grænseværdier) for boliger omkring gener fra direkte sollys. At have direkte lys ind i sin bolig vil ofte blive opfattet som en positiv effekt. Men da der er tale om boliger til mennesker med fysiske og psykiske udfordringer som kan være mere følsom eller ikke selv i stand til at justere på deres omgivelse, burde man have øget fokus på det.

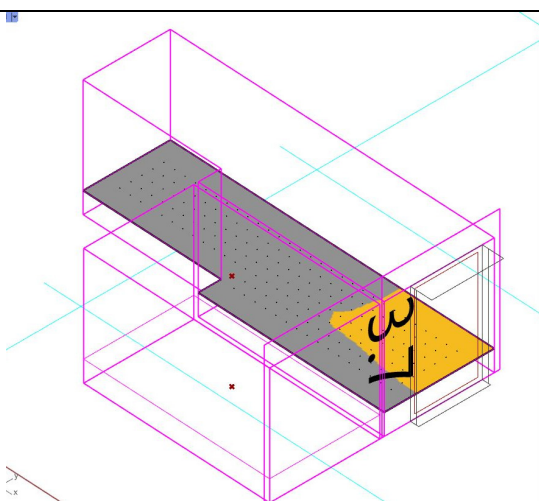
Det må bemærkes, at anvendelse af en solafskærmning også reducerer dagslysadgang. En ny belysningsstyrkeberegning skal derfor udføres, med aktiveret solafskærmning. Resultatet vil være, at glasarealet øges. Dette har effekt på både energibehov og klimapåvirkninger og igen inde temperatur.



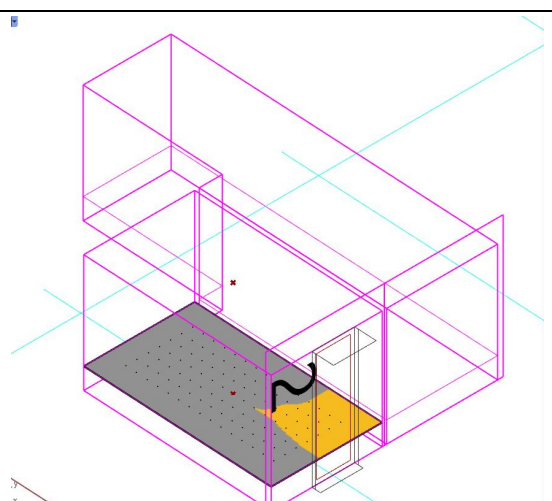
Figur 116, Sydvendt opholdsrum med ASE på 21%



Figur 117, Sydvendt soverum med ASE på 11%



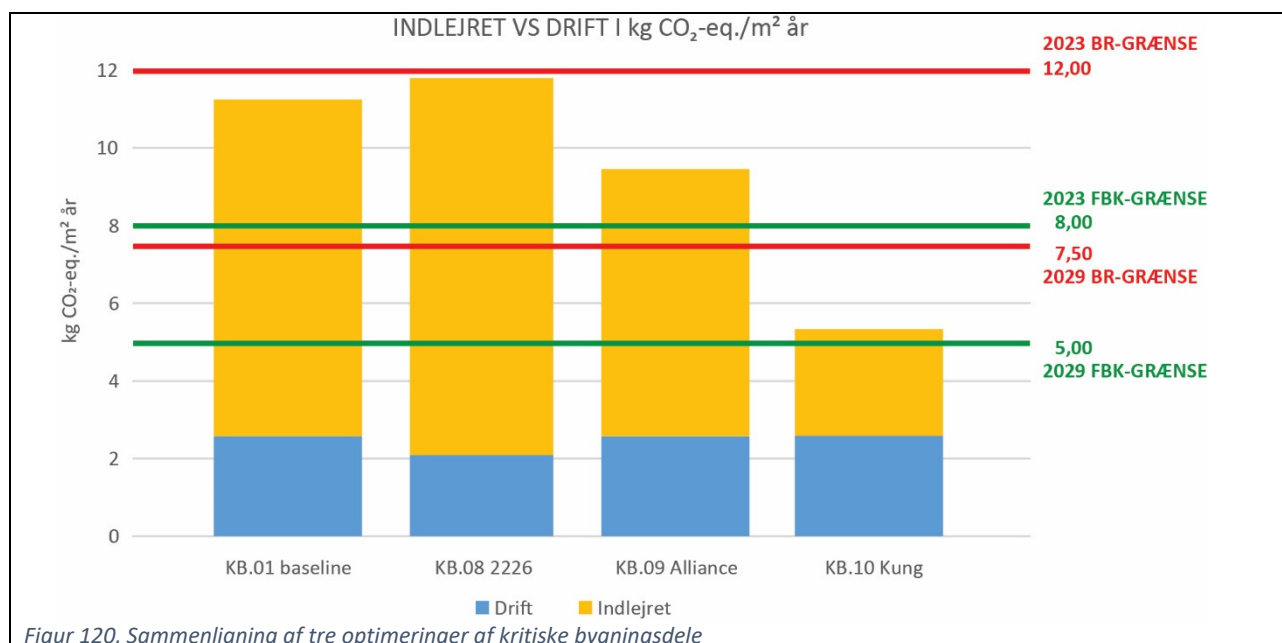
Figur 118, Østvendt opholdsrum med ASE på 24%



Figur 119, Østvendt soverum med ASE på 18%

5.3 Klimapåvirkninger

I en LCA-beregning er der mange faktorer, der kan udligne hinanden når der foretages parametervariationer. For eksempel kan en kraftig reduktion af vinduesarealet i en variant med ændret rumdybde, nemt blive udlignet pga. det øgede facadeareal. Således kan også en mindre stigning i energiforbrug blive kompenseret for ved en besparelse på antallet af antal lag glas sin energirude er bygget op ved. Det viser resultat af varianten hvor 3-lags ruden bliver udskiftet med en 2-lagsrude.



Se Figur 120 ovenover. Byggematerialernes indlejrede GWP har et større andel i case bygningens samlede klimapåvirkning end GWP til drift. Medmindre man går efter de skarpeste krav, hvor de begynder at være ligeværdig.

På overfladen er ændringer i udformningen ikke nødvendigvis synlige. For eksempel har KB.09, som er bygget i CLT, den samme overfladekarakter inde i rummene. Der er vægge og loft malet og gulvbelægningen er parket, ligesom i Granvejprojektet. Også udvendigt er facaden i begge tilfælde beklædt med profilerede træbrædder.

Materiale som KB.10 projektet ville føre til en udformning af rummene og facaden præget af ubehandlede træoverflader og ville derved opleves anderledes. KB.08 med sin massivitet som styrke, bundet i de mineralske materialer kan, selvom man antager at driftsenergi kan værre meget lavere, ikke opnå BR2029 og FBK2029 grænseværdierne for klimapåvirkning.

Hvis man ønsker høj varmekapacitet, burde man søge efter tunge materialer med et lav klimaaftryk. Det er typisk ikke brændte materialer, som skal transporteres over kort afstand til byggeplads. Her kan man tænke på ler og mineralske granulater.

Det er vigtigt at tænke på genanvendelse, når man indarbejder ikke fornybare råstoffer. Disse betragtninger falder under modul D. Dette modul er dog udenfor betragtning i beregning af grænseværdierne, og om og i så fald hvordan, det vil få plads i bygningsreglementet, er endnu uklart.

Det skal bemærkes, at beregningsmetoden til LCA først bliver gjort endelig når bygningsreglement ændres i 2023. Det kommer igen til at have indvirkning på resultaterne. En af de varslede metoder er, at tillæg i energiramme ikke regnes med som driftsenergi i LCA-beregningen. For Granvej projektet, og andre blandede boligprojekter hvor boliger udgør det største areal, er forskellen om det regnes med eller ej, dog minimal.

Det skal også bemærkes, at modul A4-5 kun regnes med i FBK LCA-beregningen, hvor i de tidlige designfaser størrelsen bestemmes baseret på erfaringer og standardtal. Disse ville blive fastlagt ved indføring af det nye bygningsreglement. Alle LCA-beregningerne i rapport er gennemført som standardberegning, hvor disse moduler ikke er taget med i betragtning.

Ville man tage højde for det alligevel, ville spildet, der opstår når man forarbejder en byggevare på byggepladsen, som er en del af modul A5, udgøre standard 10%. Og man skal som standard også medregne en vis transportafstand med lastbil, som del af modul A4. Sammen med transport under byggeprocessen og energi på byggepladsen, kan det udgøre op til 20% [26].

For KB.10 Kung beregningen ville det betyde et tillæg på 0,40 kgCO₂eq/m²år, og dermed bringe den samlede klimabelastning op på 4,99 kgCO₂eq/m²år. Ved endelig dokumentation skal dette tal forblive under eller lig med 5,00.

6. Konklusion

Som det første må jeg konkludere, at hensyntagen til flere og mere detaljerede krav tidligt i bygningsdesignfasen ikke nødvendigvis begrænser ens muligheder. Ja, enkelte designløsninger bliver udelukket fra løsningsfeltet, men antallet af kombinationer af mulige løsninger bliver større.

Det kan gøre det svært at tage en velfunderet beslutning. Man skal nemlig betragte sine valg fra flere synsvinkler og i lyset af flere, nogle gange modstridende, krav. Nogen af løsninger kan både have en positiv effekt på et krav og en negativ effekt på et andet krav.

Hvad udformning iht. dagslys angår, burde informationer om krævede vinduesstørrelser og rumdybder være kendt på samme tid som der laves plandisponering. Herved sikrer man sig at man ikke begrænser løsningsrum det minimale. Hvor f.eks. udformningsmulighed begrænses til en meget stor glasandel i facade med stor risiko for overtemperatur ind i rummene.

Energibehov skal vi ikke glemme i fremtiden. Bygningens hoveddisponering, udformning og relation til sine omgivelser gør, at designet har en bestemt passiv ydelse som det er svært at lave store ændringer i. Man skal være yderst opmærksom på, at tiltag der mindsker transmissionstab kan føre til et øget materialeforbrug. Det vil direkte øge klimabelastningen, nogle gange mere end det man sparer på energibehovet.

Det er dog klart, i lyset af usikkerheden i energileverancer og dets prisniveau, at det er økonomisk interessant at nedbringe sit behov. En øget andel af selvproduktion af vedvarende energi vil også sikre brugerne af bygningerne i fremtiden. Her er det for klimabelastning vigtigt at modregne klimabelastning af de tekniske installationer til sin energibesparelse.

Her mangler der EPD-er så det kan indregnes i LCA-beregningen. Procentandelen, som installationer fylder i en LCA-beregningen, kommer til at vokse når vi bevæger os henimod de lave grænseværdier i 2029. Det er tvivlsomt hvorvidt der kan laves de samme besparelser her, som man kan ved øvrige byggematerialer. Her mangler der undersøgelser af alternative metoder til at opvarme, køle og ventilere vores bygninger.

Det er det godt at bemærke, at den påvirkning vi har på klimaet ved at bygge, hovedsageligt har at gøre med *hvordan* vi bygger og *hvilke materialer* vi anvender hertil. Man får kun indsigt i ved at betragte klimapåvirkning på lige fod med andre tekniske krav til bygninger. Det er det man gør ved at kræve en LCA-beregning for bygninger, og samtidig fastsætte krav til grænseværdier, som skal opfyldes.

I løbet af den seneste tid er der udgivet flere artikler, der ligeledes har fokus på at energioptimeringen burde vurderes samtidig med en livscyklusvurdering. Der er også en del publikationer der fremlægger alternative måder at klimatisere vores bygninger på. Her er referencebygning 2226 Emmenweid et godt eksempel [23].

Også de bygninger, der er fremlagt i bogen Bauen mit Holz und Lehm [16] viser talrige eksempler på passiv klimatisering af rum gennem valg af byggematerialer som ler og træ. Maj udgivelse af Arkitekten indeholdt også en artikel om at bygge med ler. Dertil indeholdt denne udgave to artikler om simpel dog styret, naturlig ventilation gennem facaden.

Eksemplet fra Kung referenceprojektet [24] viser en ydervæg, der isolerer dårligere end baseline projektet, men at besparelsen på klimabelastningen af materialet kompenserer for meget mere end den stigning i energibehovet som denne dårligere isolering tilvejebringer. Det illustrer også at der åbner sig nye tekniske løsninger som før måske ikke blev overvejet. Når vi bevæger os væk fra kendte løsninger, er det vigtigt at fokusere på hvordan disse nye løsninger holder sig med tiden og hvordan de præsterer f.eks. fugtteknisk.

Et andet eksempel fra rapporten hvor vi bevæger os i en anden retning, er at man med fordel kan anvende 2-lagsenergi ruder i stedet for 3-lags. Også her kompenserer et lavere klimabelastning af en byggevarer for et øget energibehov. Det går delvist også imod de skærpede krav i BR18, hvor E-ref ikke må være mindre end 0 kWh/m²år. Klimapåvirkningsgevinsten af 2-lags ruder bliver større, når man kombinerer det med højisolerede vindueskarme. Så ved opfyldning af E-ref krav burde man have fokus på at forbedre karmens u-værdi istf. rudens u-værdi. Og samtidig burde man også have påvirkningen på komforten i indeklimaet i fokus.

Man må anerkende, at der er ændringer undervejs og at indgangsvinklerne til at gøre en forskel er rigeligt til stede. Så der er ingen grund til at tro, at vi ikke skal kunne klare at opfylde de mål vi har sat os. Jeg er klar til det. Tak fordi du tog dig tid til at læse min rapport.

7. Bilag

BILAGSLISTE		
Bilagsnummer	Bilagsnavn	Filtype
G1	DSP 92_405_GRANVEJ ARKITEKTTEGNINGERNE	pdf
G2	MODELTEGNINGER	pdf
		pdf
Be1	Be18 EB-res Andet 220529BASELINE	pdf
Be2	Be18 EB-res Andet 220529TRÆ80	pdf
Be3	Be18 EB-res Andet 220529TRÆ100	pdf
Be4	Be18 EB-res Andet 220529WK	pdf
Be5	Be18 EB-res Andet REF 220529BASELINE	pdf
Be6	Be18 EB-res Andet REF 220529WK	pdf
Be7	Be18 EB-res Bolig 220325Alliance	pdf
Be8	Be18 EB-res Bolig 220325Kung	pdf
Be9	Be18 EB-res Bolig 220325phpp	pdf
Be10	Be18 EB-res Bolig 220524BRYST05	pdf
Be11	Be18 EB-res Bolig 220524BRYST08	pdf
Be12	Be18 EB-res Bolig 220524DYB385	pdf
Be13	Be18 EB-res Bolig 220524HØJ300	pdf
Be14	Be18 EB-res Bolig 220524IGENBRYST	pdf
Be15	Be18 EB-res BOLIG 220529RUDE2	pdf
Be16	Be18 EB-res BOLIG 220529TRÆ80	pdf
Be17	Be18 EB-res BOLIG 220529TRÆ100	pdf
Be18	Be18 EB-res BOLIG 220529WK	pdf
Be19	EB.01	pdf
Be20	EB.02-07	pdf
Be21	VARMEKAPACITET	pdf

DL1	BOLIG VEST KRAVOPFYLD	pdf
DL2	Glassolutions_Climaplus_Brochure_Highres MMS Showpad_0	pdf
DL3	OPSAMLING ALLES	pdf
DL4	OR.01	pdf
DL5	OR.02	pdf
DL6	RU.01-04	pdf
DL7	sDA BOLIG NORD	pdf
DL8	sDA BOLIG SYD	pdf
DL9	sDA BOLIG VEST	pdf
DL10	sDA BOLIG ØST	pdf
DL11	sDA&ASE BOLIG SYD&ØST	pdf
DL12	sDA&ASE BOLIGVEST	pdf
DL13	TEGNINGER OMGIVELSENE	pdf
DL14	VINDUESUDFROMNING IHT INDEKLIMA	pdf
DL15	VINDUESUDFROMNING IHT sDA	pdf
DL16	VU.01-06	pdf
CS1	OPSAMLING ENBOLIG TERMISK	pdf
CS2	SK.01.04	pdf
CS3	TEMP BOLIG NORD	pdf
CS4	TEMP BOLIG SYD	pdf
CS5	TEMP BOLIG VEST	pdf
CS6	TEMP BOLIG ØST	pdf
KB1	KONE_MonoSpace_500_DX_EPD_22012714_tcm17-96160	pdf
KB2	LCA BASELINE 220513	pdf
KB3	LCA SDAKOR BRYST05 220530	pdf
KB4	LCA SDAKOR BRYST08 220530	pdf
KB5	LCA SDAKOR DYBDE385 220530	pdf
KB6	LCA SDAKOR HØJDE3 220530	pdf

KB7	LCA SDAKOR RUDE2L 220530	pdf
KB8	LCA SDAKOR RUDE2LPHPP 220530	pdf
KB9	LCA SDAKOR VKAP 220530	pdf
KB10	LCA SDAKORREKTION 220530	pdf
KB11	NEPD-3087-1726_MAXEON-3-MONO-CRYSTALLINE-PHOTOVOLTAIC-MODULE	pdf
KB12	UBAKUS BYGNINGSDELE	pdf

8. Referencer

- [1] T. D. Sørensen, »Oversigt over begrundelser for ændringsforslag,« Teknik- Bygge og Boligstyrelsen, København, 2022.
- [2] IES Daylight Metrics Committee, "Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)," Illuminating Engineering Society og Norht America, New York, 2012.
- [3] Trafik-, Bygge-, og Boligstyrelsen, »Vejledning om den frivillige bærdygtighedsklasse,« Trafik-, Bygge-, og Boligstyrelsen, København, 2020.
- [4] T. Østegård, R. Jensen and S. Maagaard, "Early Buildingdesign:Informed decision-making by exploringmultidimensional design space using sensitivity analysis," Elsevier, Amsterdam, 2016.
- [5] Statens Byggeforskningsinstitut, Afdeling for Energi og Indeklima, SBI-anvisning 190: Bygningsudformning og varmebehov, Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, 1997.
- [6] S. Rifberg, »Et puslespil der gik op. En samtale med Otto Weitling,« *Ukendt*, Ukendt.
- [7] Statens Byggeforskningsinstitut, Indeklimeats påvirkninger, SBI rapport 230, Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, 1993.
- [8] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bygningsreglementets vejledning om korrektioner til 10-pct. reglen om dagslys, København: Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019.
- [9] Dansk Standard, DS/EN 17037, Dagslys i bygninger, København: Dansk Standard, 2018.
- [10] Kjeld Johnsen, Jens Christoffersen, SBI Anvisning 219, Dagslys i rum og bygninger, København: Statens Byggeforskningsinstitut, 2008.
- [11] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, »bygningsreglement,« 07 2019. [Online]. Available: <https://bygningsreglementet.dk/>. [Senest hentet eller vist den 29 05 2022].
- [12] Statens Byggeforskningsinstitut, Bygningers Energibehov Beregningsvejledning SBI 213, København: SBI, 2018.
- [13] Dansk Standard, DS 474, Norm for specifikation af termisk indeklima, København: Dansk Standard, 1993.
- [14] BUILD 2021:13, »Klimapåvirkning fra 60 bygninger,« Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet , København, 2021.
- [15] Kai Kanafani, Harpa Birgisdottir, »LCA i priksis, Introduktion og eksempler på livscyklusvurderinger i byggeprojekter,« Trafik, Bygge- og Boligstyrelsen, København, 2021.

- [16] T. Auer og H. Kaufmann, *Gewerbebauten in Lehm und Holz, Mehrwert durch Material*, München: Sabine Djahanschah, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2020.
- [17] Kai Kanafani, Regitze Kjær Zimmermann m.m., »LCA i tidelig bygningsdesign,« Statens Byggeforskningsinstitut, København, 2019.
- [18] Dansk Standard, *Beregning af Bygningers Varmetab DS 418:2011 + Till.1:2020*, Nordhavn: Dansk Standard, 2020.
- [19] P. Littlefair, "Site layout planning for daylight," BREE UK, London, 2011.
- [20] J. Mardaljevic, »Daylight Simulation,« 1998.
- [21] C. Reinhart and V. Lo Verso, "A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight," *Lighting Res. Technol.* 42, pp. 7-31, 2010.
- [22] E. B. Jørgensen, K. Kaiafani, mm., *Brugervejledning LCAbyg 5.2*, København: BUILD, 2021.
- [23] Jakob Schoof, »Häuser ohne Heizung,« *DETAIL, Einfach bauen*, pp. 60-63, 11 2020.
- [24] Manfred Stieglmeier, »Bauen mit Holz,« *Detail*, pp. 34-41, 50-57, 12 2021.
- [25] Sven Svenson, »Ruder og vinduers energimæssige egenskaber,« DTU BYG, Kgs. Lyngby, 1999.
- [26] Thomas Graabæk, "Early stage Life cycle assesement," Grafisoft Center Danmark, København, 2022.