



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Dagslysberegninger i praksis

*En undersøgelse af ni beregningsprogrammer med udgangspunkt i fem typiske rum*

Iversen, Anne; Roy, Nicolas ; Hvass, Mette; Jørgensen, Michael; Christoffersen, Jens ; Osterhaus, Werner; Johnsen, Kjeld

*Publication date:*  
2013

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Iversen, A., Roy, N., Hvass, M., Jørgensen, M., Christoffersen, J., Osterhaus, W., & Johnsen, K. (2013). *Dagslysberegninger i praksis: En undersøgelse af ni beregningsprogrammer med udgangspunkt i fem typiske rum.* (1. udg.) SBI forlag. SBI Bind 2013 Nr. 20

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

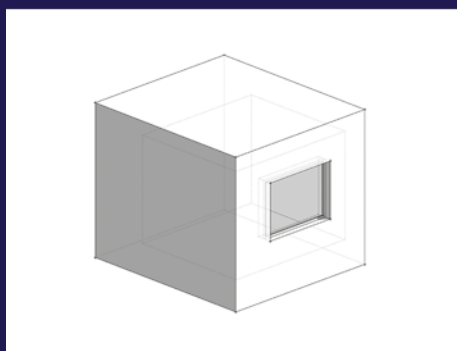


STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT  
AALBORG UNIVERSITET KØBENHAVN

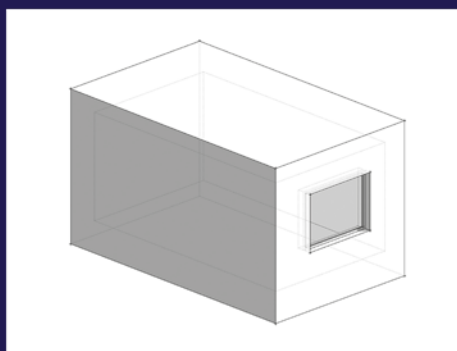
# DAGSLYSBEREGNINGER I PRAKSIS

EN UNDERSØGELSE AF NI BEREGNINGSPROGRAMMER MED  
UDGANGSPUNKT I FEM TYPISKE RUM

SBI 2013:20



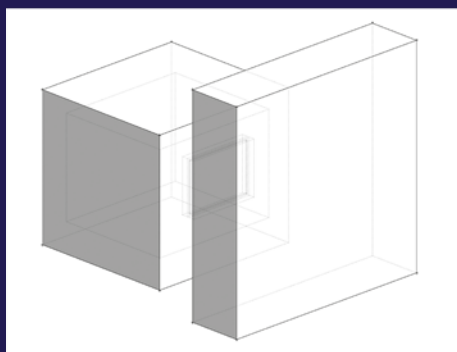
SIMPELT RUM



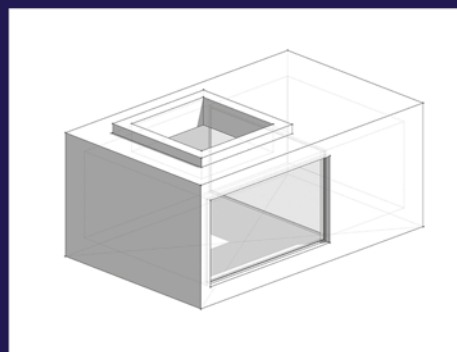
DYBT RUM



RUM MED LYSHYLDE



RUM MED OMGIVELSER



RUM MED LÅNT LYS



# Dagslysberegninger i praksis

En undersøgelse af ni beregningsprogrammer med udgangspunkt i fem typiske rum

Anne Iversen  
Nicolas Roy  
Mette Hvass  
Michael Jørgensen  
Jens Christoffersen  
Werner Osterhaus  
Kjeld Johnsen

Projektet er støttet af

**COWIfonden**



Titel	Dagslysberegninger i praksis
Undertitel	En undersøgelse af ni beregningsprogrammer med udgangspunkt i fem typiske rum
Serietitel	SBi 2013:20
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2013
Forfattere	Anne Iversen, Nicolas Roy, Mette Hvass, Michael Jørgensen, Jens Christoffersen, Werner Osterhaus, Kjeld Johnsen
Sidetæl	55
Litteratur-henvisninger	Side 55
Emneord	Dagslys, Bygningsreglement 2010, Arbejdstilsynet, dagslysfaktoren, dagslysberegninger, beregningsprogrammer.
ISBN	978-87-92739-43-8
Omslag	Forfatterne
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post <a href="mailto:sbi@sbi.aau.dk">sbi@sbi.aau.dk</a> <a href="http://www.sbi.dk">www.sbi.dk</a>

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

# Indhold

Forord .....	4
Hovedkonklusioner .....	5
Indledning .....	8
Formål .....	9
Workshop .....	10
Indhold .....	10
Deltagere .....	10
Kernegruppens arbejde .....	11
Krav til dagslys .....	12
Bygningsreglementet 2010 .....	12
Arbejdstilsynet krav til dagslys .....	13
Definition af dagslysfaktor .....	13
Metoder til analyse af dagslysfaktoren .....	14
Beregningsprogrammer .....	17
Dagslysberegningens nøjagtighed .....	17
Beregningsmetoder .....	17
Split-flux metoden .....	17
Radiosity .....	18
Ray tracing .....	18
Photon mapping .....	19
Himmeltyper .....	19
Beregningsmodel .....	20
Overfladeegenskaber .....	21
Brugerens ekspertise .....	22
Beskrivelse af beregningsprogrammer .....	23
Radiance .....	23
Daysim .....	23
Desktop Radiance .....	24
IESve .....	24
DIALux .....	24
Relux .....	25
Ecotect .....	25
Velux Daylight Visualizer .....	25
LightCalc .....	25
Grafisk præsentation af resultater .....	27
Beregninger og analyse .....	28
Rumtyper .....	28
Beregningsparametre .....	30
Vejledning til resultatark beregninger .....	31
Vejledning til resultatark analyse .....	32
RUM 1 – SIMPELT RUM – Beregningsark .....	33
RUM 1 - SIMPELT RUM – Analyseark .....	35
RUM 2 - DYBT RUM - Beregningsark .....	37
RUM 2 - DYBT RUM - Analyseark .....	39
RUM 3 - RUM MED OMGIVELSER – Beregningsark .....	41
RUM 3 - RUM MED OMGIVELSER – Analyseark .....	43
RUM 4 - RUM MED LYSHYLDE – Analyseark .....	48
RUM 5 - RUM MED LÅNT LYS - Beregningsark .....	50
RUM 5 - RUM MED LÅNT LYS - Analyseark .....	52
Vurdering af de ni dagslysberegningsprogrammer .....	54
Referencer .....	55

# Forord

Nærværende rapport er resultatet af et projekt initieret af COWI og Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) ved Aalborg Universitet København med fokus på dagslysberegninger i praksis. Projektet er gennemført af forskere fra SBI, Aarhus Universitet og Danmarks Tekniske Universitet samt rådgivende ingeniører og arkitekter fra COWI, VELUX, Alectia og Arkitema. Følgende personer udgjorde projektgruppen:

Kjeld Johnsen, SBI Aalborg Universitet  
Anne Iversen, SBI Aalborg Universitet  
Mette Hvass, COWI  
Michael Jørgensen, COWI  
Nicolas Roy, VELUX  
Jens Christoffersen, VELUX  
Glenn Elmbæk, Arkitema  
Werner Osterhaus, Aarhus Universitet  
Steffen Petersen, Aarhus Universitet/Alectia  
Christian Anker Hviid, DTU/Alectia

COWI fonden og VELUX har ydet støtte til projektet.

Formålet med projektet er at opnå en bedre forståelse af, hvad en dagslysberegning viser, og hvordan de forskellige beregningsprogrammer beregner i forhold til hinanden. Derudover er formålet at give en viden om, hvordan man rent modelteknisk skal opbygge sin dagslysmodel.

Rapporten beskriver en undersøgelse af ni simuleringsprogrammernes evne til at beregne dagslysfaktoren på arbejdsplan i fem standardrum.

Projektgruppen vil gerne takke deltagerne i de to workshops, der blev afholdt i forbindelse med projektet. Deltagerne kom fra ARUP London, Kunstakademiets Arkitektskole, Rambøll, Grontmij, Esbensen, DTU, Niras, Alectia, Danske Ark, CCO Arkitekter, Schmidt Hammer Lassen architects, Aarhus Universitet / Ingeniørhøjskolen Aarhus, VKR Holding og Dansk Center for Lys. En særlig tak går til foredragsholderne ved workshoppen; Nanet Krogsbæk Mathiasen fra Kunstakademiets Arkitektskole, Francesco Anselmo fra ARUP London, Glenn Elmbæk fra Arkitema, Steffen Petersen fra Alectia/AU-ASE og Mette Hvass fra COWI.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet  
Energi og miljø  
August 2013

*Søren Aggerholm*  
Forskningschef

# Hovedkonklusioner

Dagslysberegningssoftware har oplevet en kraftig vækst i de seneste år, dette er både som følge af krav udstukket fra bygningsreglementet og anbefalinger hos arbejdstilsynet samt ud fra et ønske fra bygherrer og arkitekter om, at bygningens lysmæssige kvalitet skal dokumenteres. Beregningsprogrammerne er i stand til at forudsige dagslysniveauer i et rum. Men det er vigtigt ikke at glemme, at kvaliteten og nøjagtigheden af simuleringer kan være påvirket af en række forskellige faktorer, herunder:

- Beregningsmetoden
- Himmelmmodel
- Bygningsmodel
- Overfladeegenskaber
- Brugerens ekspertise

Denne rapport undersøger forskelle og ligheder mellem ni ge simuleringsprogrammer, der alle har det til fælles, at de anvendes i praksis af forskere i ingeniør- og arkitektbranchen. Programmerne sammenlignes ud fra deres evne til at beregne dagslysfaktoren på arbejdsplan samt dagslysindestrængningsdybden i fem forskellige rum.

Programmerne, der er anvendt til undersøgelsen er: Radiance, Daysim, VELUX Daylight Visualizer, DIALux, Ecotect, Ecotect/Radiance, IESve, LightCalc og Relux. Til dagslyssimuleringer i Relux kan der anvendes to metoder radiosity og raytracing hvorfor Relux figurerer to gange i analyserne, og det i alt er 10 og ikke 9 programmer, der analyseres.

Fem forskellige rumtyper blev undersøgt, disse er:

Rum 1 – Simpelt rum

Rum 2 – Dybt rum

Rum 3 – Rum med omgivelser

Rum 4 – Rum med lyshylde

Rum 5 – Rum med lånt lys

Tabel 1: Programmernes evne til at regne dagslysfaktorniveauer i de fem forskellige rumtyper. Ja = OK, Nej = ikke OK.

	Radiance	Desktop Radiance	Daysim	Velux Daylight Visualizer	DIALux	Ecotect	IESVE	LightCalc	Relux Radiosity	Relux Raytracing
1. Simpelt rum	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
2. Dybt rum	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
3. Rum med omgivelser	ja	ja	ja	ja	ja	nej	ja	ja	ja	ja
4. Rum med lyshylde	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nej	ja	ja
5. Rum med lånt lys	ja	ja	ja	ja	ja	nej	ja	nej	nej	ja

De programmer, der sammenlignes for hver rumtype, er dem, der er angivet med et 'ja' i tabel 1. For disse programmer er konklusionen, at de forskellige beregningsprogrammer regner meget ens, se tabel 2.

Standardafvigelse svarer til en afvigelse mellem de forskellige simuleringer på  $\pm 5,1\%$  til  $\pm 13,6\%$ . De mindste standardafvigelser i beregningsresultaterne,  $\pm 5,1\%$ ;  $\pm 6,6\%$  og  $\pm 7,4\%$ , opnås for de mere simple



rum; Rum 1, Rum 2 og Rum 4. Mens de mere komplekse rum, Rum 3 og Rum 5 har standardafvigelser på  $\pm 10,3\%$  og  $\pm 13,6\%$ .

Tabel 2: Variation i gennemsnitlig dagslysfaktor [%] for de forskellige rum opnået med de forskellige simuleringerprogrammer

	Rum 1 Simpelt rum	Rum 2 Dybt rum	Rum 3 Omgivelser*	Rum 4 Lyshylde**	Rum 5 Lånt lys***
Maks	3,5	2,1	0,9	2,6	2,4
Min	3,0	1,6	0,6	2,1	1,7
Gennemsnit	3,2	1,8	0,8	2,4	2,0
Standard afvigelse[DF %]	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3
Standard afvigelse (+/-) [%]	$\pm 5,1$	$\pm 7,4$	$\pm 10,3$	$\pm 6,6$	$\pm 13,6$
Relativ forskel, maks vs. min [%]	15,0	22,6	28,1	18,3	31,2

\*Ecotect ekskluderet

\*\*LightCalc ekskluderet

\*\*\*Ecotect, LightCalc og Relux Radiosity ekskluderet

Dagslysendtrængningsdybden er i denne rapport defineret som afstanden fra facaden, hvor en dagslysfaktor på 2% opnås. Ved simulering af dagslysendtrængningsdybde er standardafvigelsen i området fra  $\pm 4,9\%$  til  $\pm 8,7\%$ , se tabel 3. Den højeste afvigelse opnås for rummet simuleret med omgivelser. Dette resultat kan skyldes, at de forskellige programmer behandler en obstruktion forskelligt i deres beregningskerne. For rummet med lånt lys var dagslysendtrængningsdybden ikke vurderet, da dette rum er et indeliggende rum og derfor ikke har nogen åbninger i facaden direkte mod det fri.

Tabel 3: Variation i afstand [m] fra facade, hvor 2% DF er nået, for de undersøgte lokaler simuleret med de anvendte simuleringerprogrammer.

	Rum 1 Simpelt rum	Rum 2 Dybt rum	Rum 3 Omgivelser*	Rum 4 Lyshylde**	Rum 5 Lånt lys***
Maks	2,5	2,4	0,7	2,2	-
Min	2,1	2,1	0,6	1,8	-
Gennemsnit	2,3	2,2	0,7	2,0	-
Standard afvigelse[DF %]	0,1	0,1	0,1	0,1	-
Standard afvigelse (+/-) [%]	$\pm 6,4$	$\pm 4,9$	$\pm 8,7$	$\pm 6,7$	-
Relativ forskel, maks vs. min [%]	18,1	15,9	24,9	20,6	-

\*Ecotect ekskluderet

\*\*LightCalc ekskluderet

\*\*\*Ikke beregnet, da rummet er indeliggende

Erfaringer fra rapporten viser, at programmerne Radiance, Desktop Radiance, Daysim, Velux Daylight Visualizer, DIALux, IESve og Relux Raytracing alle gav acceptable resultater for de simulerede dagslysfaktorer i de fem rumtyper.

Programmet Ecotect kunne beregne dagslysfaktorer i det simple rum, det dybe rum og rummet med lyshylde med acceptabel nøjagtighed. Programmet kunne ikke regne på rum med omgivelser og rum med lånt lys. Dette tilskrives den simplificerede split flux-beregningsmetode, der er implementeret og anvendes som default i Ecotect.

LightCalc kunne beregne dagslysfaktoren i det simple rum, det dybe rum og rummet med omgivelser med acceptabel nøjagtighed set i forhold til resultaterne fra de andre simuleringerprogrammer. LightCalc kunne ikke regne på rum med lyshylde og rum med lånt lys, hvilket til dels skyldes, at beregnings-

rutinen i LightCalc ikke er udviklet til at regne på lyshylder, samt at programmet kun kan regne på ét rum og derfor ikke er i stand til at regne på et indeliggende rum.

Relux radiosity kunne beregne dagslysfaktoren i fire af rummene med acceptabel nøjagtighed set i forhold til resultaterne opnået fra de andre simuleringer. Disse rum er; det simple rum, det dybe rum, rummet med omgivelser og rummet med lyshylde. Relux radiosity var ikke i stand til at regne på rum med lånt lys, hvilket skyldes, at det i programmet kun er muligt at placere vinduer i facaden mod det fri, og det derfor ikke har været muligt at generere en rumgeometri med et indeliggende vindue.

På trods af at tabel 1 viser, at IESve kunne regne på alle rumtyper, bør der i denne forbindelse knyttes den kommentar, at når der simuleres med den 'højeste nøjagtighed' i IESve, da regnes der med et antal af inter-reflektioner på 3 (ambient bounces = 3). Til sammenligning kan det nævnes, at antallet af inter-reflektioner var sat til 7 i programmerne Daysim og Radiance. Det betyder, at IESve-beregninger undervurderer dagslysniveauet i mere komplekse scener, hvor f.eks. skyggevirkningen fra omgivelserne er medregnet. Ønsker man at regne på rum med omgivelser i IESve, skal man derfor være opmærksom på at ændre default beregningsparametrene i programmet.

I rapporten har vi beskrevet en række mulige årsager til disse afvigelser. Årsager som både kan findes i beregningsprogrammets opbygning, kompleksiteten af rumgeometrier/ydre omgivelser samt brugerens valg af og kendskab til beregningsprogrammet.

# Indledning

I de seneste år er der blevet stigende opmærksomhed på fordelene ved at udnytte dagslyset i bygninger. Ud over de æstetiske og oplevelsesmæssige kvaliteter, som dagslyset kan give os, er dagslyset også en vigtig faktor i bestræbelserne på at reducere elforbruget til belysning.

Derfor indgår dagslysberegninger også i designprocessen som et værktøj til at forudsige det kommende dagslysniveau i en bygning. Der findes mange forskellige beregningsprogrammer på markedet, og programmerne anvendes både af arkitekter og ingeniører.

Erfaringer har vist, at beregningsresultaterne fra to beregningsprogrammer kan være meget forskellige i det samme rum. Hvilket kan skyldes begrænsninger i selve beregningsprogrammet og/eller de personer, der laver modellerne. Dette er kritisk, da dagslysberegningerne bruges til at eftervise, at Bygningsreglementets krav om en dagslysfaktorværdi er overholdt og til at beregne behovet for kunstig belysning. En misvisende dagslysberegning kan have store konsekvenser for udformningen af en bygning og overvejelser om udnyttelse af f.eks. et kontorlandskab. Derfor er det vigtigt, at dagslysberegningerne udføres rigtigt, og at man kender begrænsninger ved det givne værktøj, man anvender.

Projektet udspringer af et konkret eksempel som involverede COWI og SBI. Dagslysberegninger af et rum udført i to forskellige beregningsprogrammer gav meget forskellige resultater. Derfor blev der initieret et samarbejde for at belyse årsagerne til forskellen i resultaterne. Fokus for samarbejdet var dagslysberegninger i praksis og indeholdt både viden om programrelaterede begrænsninger og viden om modelopbygningsmæssige forhold, man skal være opmærksom på.

Arbejdet blev iværksat med en workshop med deltagere fra byggebranchen og forskningsmiljøer, som havde erfaring med dagslysberegninger og registrering af dagslys i rum og bygninger. På denne workshop blev en arbejdsgruppe nedsat, som efterfølgende har arbejdet videre med erfaringerne fra workshoppen. Det er arbejdsgruppen, som har udført beregningerne i denne rapport.

## Formål

Projektets formål er at opnå en bedre forståelse af, hvad en dagslysberegning viser, og hvordan de forskellige beregningsprogrammer beregner i forhold til hinanden. Derudover er formålet også at give en viden om, hvordan man rent modelteknisk skal opbygge sin dagslysmodel.

Med en større viden om de forskellige tilgængelige beregningsprogrammer og nøjagtigheden af resultaterne man kan opnå i disse programmer, er det den overordnede målsætning at højne kvaliteten af den rådgivning, der ydes i Danmark inden for dette felt.

Projektet er opdelt i tre faser:

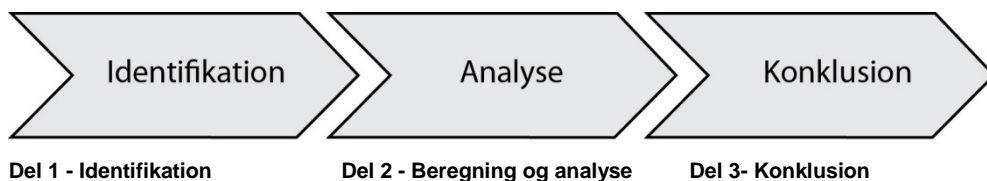
**Del 1 - Identifikation** Afholdelse af workshop Identifikation af problem  
Udvælgelse af rumtyper og beregningsprogrammer

### **Del 2 - Beregning og analyse**

Analyse af beregningsresultaterne fra første del af udviklingsarbejdet. Beskrivelse af de forskellige beregningsprogrammer, tekniske facts om programmernes opbygning.

### **Del 3 - Konklusion**

Vurdering af dagslysberegningsprogrammer  
Konklusion



Figur 1: Opdeling af projektets faser.

## Workshop

For at udrede problematikken i projektet blev ingeniører, arkitekter, programudviklere og andre med erfaring i beregning og registrering af dagslys i bygninger samlet til en workshop. Her blev aktørerne præsenteret for eksempler på typiske problemer med dagslysberegninger samt oplæg omhandlende det beregnede og det oplevede lys. Med udgangspunkt i denne fælles referenceramme diskuterede deltagerne i mindre grupper problemstillingerne som de oplevede i deres daglige virke.

### Indhold

Workshoppen var delt i to dele; 1) en formiddag med foredrag og 2) en eftermiddag med workshops i grupper. Nanet Krogsbæk Mathiasen fra Kunstakademiets Arkitektskole holdt foredrag om det oplevede lys og Francesco Anselmo fra ARUP London holdt et foredrag om det beregnede lys. Der var tre eksempler fra "det virkelige liv", hvor problemer med dagslysberegninger havde haft konsekvenser for udformning af en bygning. Eksemplerne blev præsenteret af Glenn Elmbæk fra Arkitema, Steffen Petersen fra Alectia/AU-ASE og Mette Hvass fra COWI.

### Deltagere

SBi og COWI tog initiativ til workshoppen og arrangerede den i samarbejde med VELUX. Øvrige deltagere i workshoppen var: ARUP London, Kunstakademiets Arkitektskole, Rambøll, Grontmij, Esbensen, DTU, Niras, Alectia, Danske Ark, CCO Arkitekter, Schmidt Hammer Lassen architects, Aarhus Universitet / Ingeniørhøjskolen Aarhus, VKR Holding og Dansk Center for Lys.

Nogle af hovedpunkterne fra diskussionerne var:

- Dagslyskvalitet, hvad er god dagslyskvalitet?
- Dagslysets indvirkning på vores fysiske og psykiske velbefindende.
- Beskrivelse af ønsker for dagslyset i en bygning fra bygherre og arkitekt, en dagslysdrejebog.
- Valg af bygningsdetaljer, materialer og overflader og deres indflydelse på dagslyset.
- Det oplevede og det beregnede lys, en holistisk indgangsvinkel til dagslysberegninger.
- Hvordan kommunikerer vi dagslys, det oplevede lys og beregningsresultaterne?
- Hvornår anvendes dagslysberegningerne i dagslysdesignprocessen.
- Betydningen af de parametre som indtastes i programmerne.
- Hvad fortæller de forskellige beregningsresultater om dagslyset i rummet; dagslysfaktor, "maks, min og middel"-værdier, blænding, jævnhed, lys på vertikale flader (luminans).

## Kernegruppens arbejde

Kernegruppen blev dannet på workshopen og består af deltagere fra uddannelsesinstitutioner, ingeniør- og arkitektvirksomheder, samt programudviklere.

Kernegruppen har udvalgt rumtyper til beregninger samt beregningsprogrammer. Gruppen har udført dagslyssimuleringerne samt dokumenteret det udførte arbejde. Beregningerne er foretaget ud fra de samme parametre som er beskrevet i denne rapport.

Arbejdet i gruppen er foregået ved møder samt løbende kommunikation vedrørende resultater.

*Kernegruppen består af:*

Kjeld Johnsen

Anne Iversen

Mette Hvass

Michael Jørgensen

Nicolas Roy

Jens Christoffersen

Glenn Elmbæk

Werner Osterhaus

Steffen Petersen

Christian Anker Hviid

*Beregningerne er udført af:*

Radiance, Daysim, Velux Daylight Visualizer, Nicolas Roy

DIALux, Anne Iversen

Ecotect, Ecotect/Radiance, IESVE, Michael Jørgensen

LightCalc, Steffen Petersen

Relux, Werner Osterhaus.

# Krav til dagslys

Dagslysberegningerne anvendes til at påvise at bygningsreglementets krav til en dagslysfaktor på 2% overholdes. Den følgende tekst indeholder lovkrav fra bygningsreglementet 2010, Arbejdstilsynets anvisninger samt en definition på dagslysfaktoren.

## Bygningsreglementet 2010

### 6.5.2 Dagslys Stk. 1

Arbejdsrum, opholdsrum i institutioner, undervisningslokaler, spiserum, benævnt i det følgende arbejdsrum mv. samt beboelsesrum skal have en sådan tilgang af dagslys, at rummene er vel belyste. Vinduer skal udføres, placeres og eventuelt afskærmes, så solindfald gennem dem ikke medfører overopledning i rummene, og så gener ved direkte solstråling kan undgås.

#### *Vejledning: (6.5.2, stk. 1)*

I arbejdsrum m.v., beboelsesrum og køkken kan dagslyset i almindelighed anses for at være tilstrækkeligt, når glasarealet ved sidelys svarer til mindst 10 pct. af gulvarealet eller ved ovenlys mindst 7 pct. af gulvareal, forudsat at ruderne har en lystransmittans på mindst 0,75. De 10 pct. og 7 pct. er vejledende ved normal placering af bygningen og normal udformning og indretning af lokalerne. Hvis vinduestypen er ukendt på projekteringstidspunktet, kan omregning fra karmlysningsareal til glasareal ske ved at multiplicere karmlysningsarealet med faktoren 0,7. Glasarealet skal forøges forholds-mæssigt ved reduceret lysgennemgang (f.eks. solafskærmende ruder) eller formindsket lysadgang til vinduerne (f.eks. ved tætliggende bygninger).

I beboelsesrum og køkken kan dagslyset alternativt anses for at være tilstrækkeligt, når det ved beregning kan eftervises, at der er en dagslysfaktor på 2 pct. i halvdelen af rummet. I arbejdsrum kan dagslyset også anses for at være tilstrækkeligt, når det ved beregning kan eftervises, at der er en dagslysfaktor på mindst 2 pct. i arbejdszonen i rummet. Dette kan beregnes med et net, der dækker rummet eller arbejdszonen. Nettet starter 0,5 m fra væggene og indeholder beregningspunkter med ens afstand på højst 0,5 m. Der bør være lige stor afstand mellem beregningspunkterne.

Dagslyset i arbejdsrum m.v. kan ligeledes anses for at være tilstrækkeligt, når det ved måling kan eftervises, at der er en dagslysfaktor på 2 pct. ved arbejdspladserne. Ved bestemmelse af dagslysfaktoren tages der hensyn til de faktiske forhold, herunder vinduesudformning, lystransmittans og rummets og omgivelsernes karakter.

Der henvises til By og Byg Anvisning 203: Beregning af dagslys i bygninger samt SBI-anvisning 219: Dagslys i rum og bygninger.

## Arbejdstilsynet krav til dagslys

Arbejdstilsynet foreskriver i deres AT-vejledning A1.11, arbejdsrum på faste arbejdspladser (juni 2007), at:

Der skal være tilstrækkelig tilgang til dagslys til arbejdsrum. Dagslystilgangen vil normalt være tilstrækkelig, når vinduesarealet ved side lys svarer til mindst 10% af gulvarealet eller ved ovenlys mindst 7%.

En anden udformning er imidlertid mulig. De 10% og 7% er en vejledning, der ved normal placering og normal udformning af lokalerne normalt vil give acceptable forhold. Der kan dog forekomme situationer, hvor en sådan dagslystilgang ikke kan anses for tilstrækkelig. Omvendt kan forholdene efter omstændighederne anses for forsvarlige, når det ved beregning eller måling kan eftervises, at der er en dagslysfaktor på 2% ved arbejdspladserne.

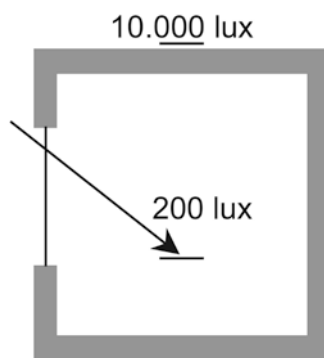
### Definition af dagslysfaktor

Som et simpelt mål for, hvor meget lys der vil være i et bestemt punkt af et rum, f.eks. på et arbejdsbord, benyttes begrebet dagslysfaktor. Dagslysfaktoren (DF) er defineret som forholdet mellem belysningsstyrke indendørs på et vandret plan, belyst af en fuld himmelhalvkugle, se figur 2. Dagslysfaktoren angives normalt i procent.

$$DF = \frac{E_{\text{indvendig}}}{E_{\text{udvendig}}} \cdot 100 \%$$

$E_{\text{indvendig}}$  er belysningsstyrken indendørs i et punkt på et givent plan (lux)

$E_{\text{udvendig}}$  er belysningsstyrken målt udendørs på et vandret plan (lux)

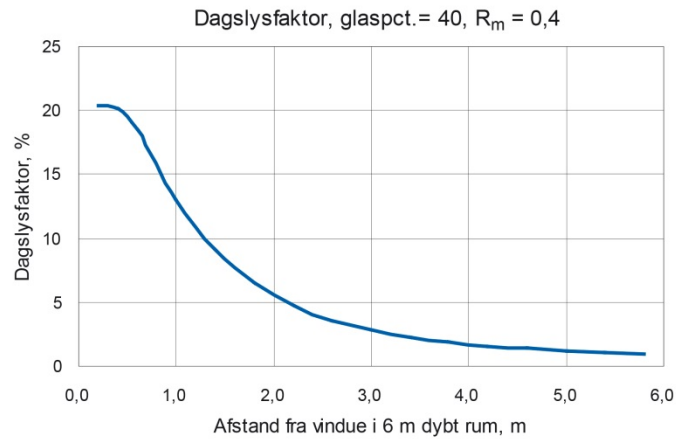


Figur 2: Definition af dagslysfaktoren DF, når belysningsstyrken er 10.000 lux i det fri og 200 lux indendørs er dagslysfaktoren 2%. Vejledningen til Bygningsreglementets kap 6.5.2 stk 1 angiver, at i arbejdsrum kan dagslyset anses for at være tilstrækkeligt, når der er en dagslysfaktor på 2 % ved arbejdspladserne. Figur er taget fra SBI-anvisning 219 (Johnsen & Christoffersen 2008)

For et givent punkt i et rum er dagslysfaktoren en fast størrelse, som indtræffer på overskyede dage. Dagslysfaktoren er beregnet under en standard overskyet himmel, hvilket betyder, at beregningen pr. definition er uafhængig af vinduesorienteringen og ikke udtrykker noget om, hvor meget lys der vil være i beregningspunktet under faktiske vejrforhold og ved en given orientering.

Et typisk forløb af dagslysfaktoren ind gennemrummet, er vist i figur 3. Dagslysfaktoren er størst ved vinduet og forholdet mellem højeste og laveste dagslysfaktor er som regel mindst 20:1 og ofte 50:1.





Figur 3: Et typisk forløb af dagslysfaktoren gennem rummet ved glasprocent af facaden op 40% og midtreflektans af rummet på 0,4. Figur er taget fra SBI-anvisning 219 (Johnsen & Christoffersen 2008).

## Metoder til analyse af dagslysfaktoren

Dagslysfaktoren (DF) kan evalueres på forskellige måder. Den kan måles på specifikt punkt i et rum for at sikre DF niveauer for bestemte funktioner, f.eks. et skrivebord - og den kan måles på et arbejdsplan eller gulvareal (afhængig af funktionen af rummet), i hvilket tilfælde det anbefales at anvende et beregningsnet (EN 12464-1:2011).

### *DF middel*

DFmiddel beskriver den gennemsnitlige dagslysfaktor for det undersøgte beregningsplan.

### *DF median*

DFmedian svarer til den midterste observation, når de beregnede dagslysfaktorer opstilles i en række med faldende eller stigende værdier. Medianen er således et udtryk, der er mindre afhængig af høje og lave dagslysfaktorer i rummet, f.eks. meget høje dagslysfaktorværdier tæt ved vinduet og meget lave dagslysfaktorværdier længst fra vinduet.

### *Ensartethed*

Ensartetheden af dagslysfaktorer på arbejdsplanet kan defineres på to måder:

- 1) forholdet mellem  $DF_{min} / DF_{middel}$  og
- 2) forholdet mellem  $DF_{min} / DF_{maks}$

Ifølge BREAM 2,08 skal forholdet mellem  $DF_{min} / DF_{middel}$  være lig med eller højere end 0,4 eller den mindste dagslysfaktor i et beregningspunkt skal være 0,8%.

### *Dagslyszone*

Man kan tale om en dagslyszone i et rum givet ved afstanden fra facaden, hvor den anbefalede dagslysfaktor kan opnås.

### *Beregningsnet*

Til beregning af belysningsstyrker skal defineres et beregningsnet for at angive de punkter, hvor værdierne for belysningsstyrke beregnes og verificeres for arbejdsfelter, de omgivende felter og baggrundsområder. Den følgende beskrivelse stemmer overens med beskrivelsen fra EN 12464-1:2011, og det anbefales at man følger denne vejledning.

Det foretrækkes, at maskerne i beregningsnettet er tæt på at være kvadratiske. Forholdet mellem siderne i maskerne i beregningsnettet skal ligge mel-

lem 0,5 og 2 (se også EN 12193:2007 og EN 12464-2:2007). Den maksimale størrelse af en maske er:

$$p = 0,2 \times 5^{\log_{10}(d)} \quad (1)$$

hvor

p er den maksimale maskestørrelse i beregningsnettet (m),  $\leq 10$  m

d er den længste dimension i beregningsområdet (m), men hvis forholdet mellem den lange og den korte side er 2 eller mere, skal for d indsættes den korte dimension i området

Antallet af punkter i den relevante dimension er givet ved den nærmeste hele værdi af forholdet d/p.

Den resulterende afstand mellem punkterne i beregningsnettet bruges til at beregne den nærmeste hele antal beregningspunkter i den anden dimension. Det vil give et forhold mellem længde og bredde i en maske i beregningsnettet, som er tæt på 1.

En randzone på 0,5 m fra væggene er undtaget beregningsområdet. Dette gælder dog ikke for meget små rum, eller når et arbejdsfelt ligger inden for randzonen.

For vægge og lofter skal benyttes en relevant maskestørrelse i nettet, og en randzone på 0,5 m kan undtages ved beregningerne.

NOTE 1 - Afstanden mellem beregningspunkterne må ikke være sammenfaldende med afstanden mellem armaturene.

NOTE 2 - Formel (1) (fra CIE x005-1992) er udledt ud fra den forudsætning, at p er proportional med log (d), hvor:

$$p = 0,2 \text{ m for } d = 1 \text{ m}$$

$$p = 1 \text{ m for } d = 10 \text{ m}$$

$$p = 5 \text{ m for } d = 100 \text{ m.}$$

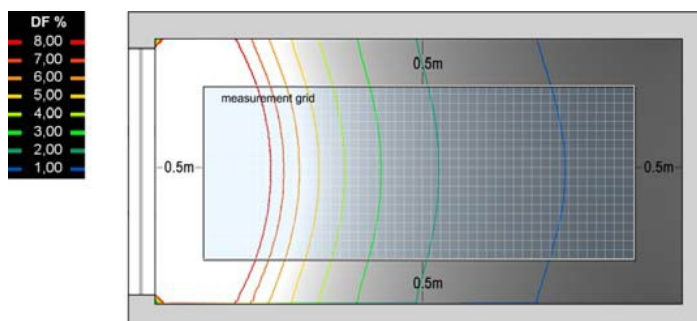
NOTE 3 - Tabel 4 indeholder typiske værdier for afstanden mellem beregningspunkterne.

Tabel 4: Anbefalede antal af beregningspunkter

Længde af beregningsområde (d) [m]	Maksimal afstand mellem beregningspunkter (p) [m]	Mindste antal af beregningspunkter
0,4	0,15	3
0,6	0,20	3
1,0	0,20	5
2,0	0,30	6
5,0	0,60	8
10,0	1,00	10
25,0	2,00	12
50,0	3,00	17
100,0	5,00	30

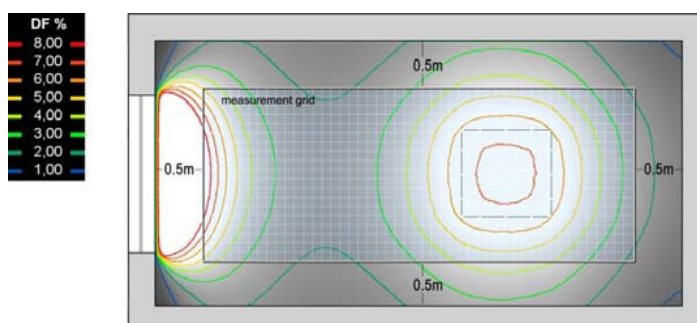
### Eksempel

Eksemplerne nedenfor viser DF beregninger på et arbejdsplan i 2 rum med identiske dimensioner (3m x 6m x 2,5 m) og materialeegenskaber (gulv 0,2; væg 0,5; loft 0,8), men med forskellig vinduesplacering og glasareal. Rum 1 er udelukkende belyst af et stort facadevindue med 5,9 m<sup>2</sup> glasareal, og rum 2 belyses af en kombination af facade- og tagvindue med et samlet glasareal på 2,4 m<sup>2</sup>.



Rum 1 (5.9 m <sup>2</sup> glasareal)	
DFmiddel	4,0%
DFmedian	2,3%
Ensartethed (min/middel)	0,19
Ensartethed (min/maks)	0,04
Andel af rum med over 2% DF	54%

Figur 4: DF resultater i eksempelrummet med et vindue i facaden



Rum 2 (2.4 m <sup>2</sup> glasareal)	
DFmiddel	4,2%
DFmedian	3,9%
Ensartethed (min/middel)	0,41
Ensartethed (min/maks)	0,17
Andel af rum med over 2% DF	98%

Figur 5: DF resultater i et rum med to forskellige vindues konfigurationer; både facadevindue og ovenlysvindue

Af figurerne ses det, at DFmiddel er i samme størrelsesorden; 4,0% og 4,2% for de 2 rum. Ses der derimod på arealet af rummene, hvor der opnås en dagslysfaktor over 2%, er forskellen mellem 54% og 98%, dette på trods af at den gennemsnitlige dagslysfaktor er tilnærmelsesvis ens. Sammenlignes DFmiddel og DFmedian for de 2 rum ses det, at i rum med stor kontrast (Rum 1) er der en større forskel mellem DFmiddel- og DFmedian-værdien. Det kan derfor konstateres, at DFmedian, samt arealet af rummet, hvor en dagslysfaktor over 2% opnås er en mere følsom målestANDARD end DFmiddel i evalueringen af rummene.

# Beregningsprogrammer

## Dagslysberegningens nøjagtighed

Dagslysberegningssoftware har oplevet en kraftig vækst i de seneste år, det er både som følge af krav udstukket fra bygningsreglementet og anbefalinger arbejdstilsynet samt ud fra et ønske fra bygherrer og arkitekter om at bygningens lysmæssige kvalitet skal dokumenteres. Beregningsprogrammerne er i stand til at forudsige dagslysniveauer i et rum. Men det er vigtigt ikke at glemme, at kvaliteten og nøjagtigheden af simuleringer kan være påvirket af en række forskellige faktorer, herunder:

- Beregningsmetoden
- Himmelmmodel
- Bygningsmodel
- Overfladeegenskaber
- Brugerens ekspertise

Undersøgelser, hvor dagslysmålinger foretaget under virkelige forhold og sammenlignet med simulerede dagslysforhold, viser, at man kan forvente afvigelser mellem simulerede og målte dagslysforhold på omkring 10 % (Mardaljevic 1995; Reinhart & Walkenhorst 2001; Reinhart & Andersen 2006; Reinhart 2010).

## Beregningsmetoder

### Split-flux metoden

Split-flux metoden er en simpel algoritme, der er afledt af en håndberegningss metode, udviklet ved BRE (Building Research Establishment). Metoden er i By og Byg Anvisning 203 henvist til som 'Skabelonmetoden' (Christoffersen, Johnsen, & Petersen 2002). Metoden er baseret på princippet om, at global belysning et bestemt sted i et rum er resultatet af tre karakteristiske komponenter af dagslyset:

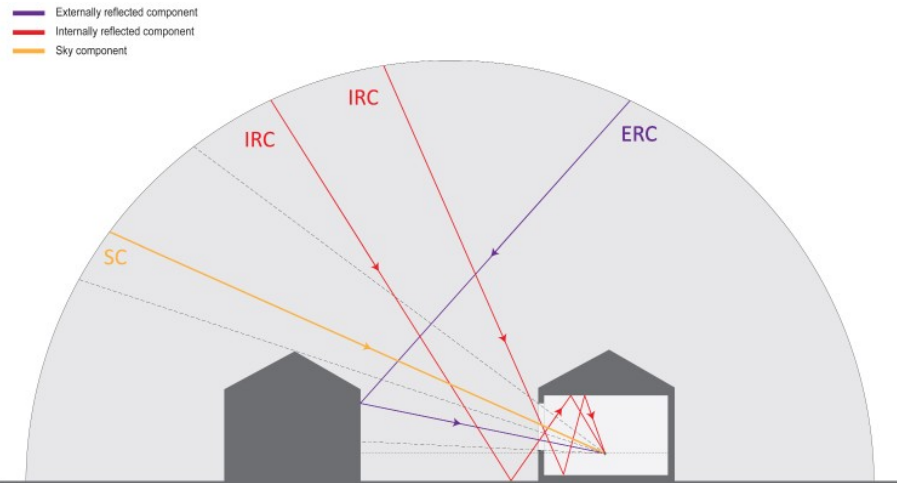
1. bidraget, der kommer direkte fra den synlige del af himlen (SC),
2. lys, der bliver reflekteret direkte mod punktet fra omgivelserne uden for vinduet (ERC),

og

3. refleksionerne fra indre overflader (IRC).

Hvert komponent beregnes separat og lægges sammen for at opnå global belysning i et givent punkt. Den internt reflekterede komponent er bestemt af en ligning med den gennemsnitlige reflektans af indvendige overflader, det samlede glasareal og en korrektionsfaktor for den eksterne obstruktion. Med disse tilnærmelser taget i betragtning, kan det forventes, at denne metode overvurderer eller undervurderer mængden af dagslys. Det anbefales kun at benytte denne metode til simple rum, hvor vinduesåbninger er bånd, der løber i hele facadens længde.

Simuleringsprogrammet Ecotect anvender som default split-flux metoden som sin beregningskerne.



Figur 6: Bidraget fra de 3 komponenter, der indgår i split flux-metoden

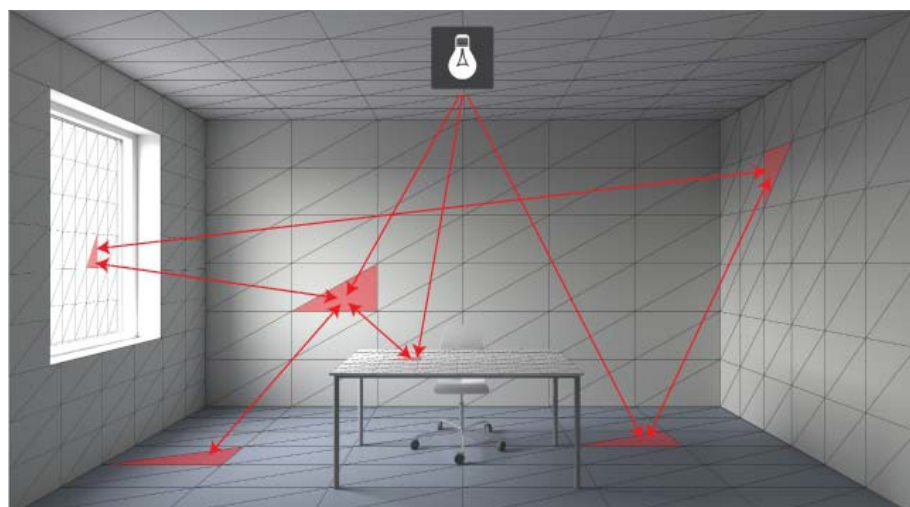
### Radiosity

Radiosity er en algoritme, som er i stand til at gengive realistiske scener med skygger og diffust lys (Watt 2000). I radiosity benyttes finite element-metoden til at løse renderingsligningen for scener med rent diffuse overflader. Radiosity er oprindeligt udviklet til at beregne varmetransmission, og beror på strålings- eller lysudveksling mellem overflader.

Metoden kræver, at overflader i en scene inddeles i et net af mindre felter. Vinkelforhold – dvs. hvor meget ser det ene felt af det andet felt i en given situation - mellem felterne beregnes, og belysningen i et felt bestemmes ved at addere bidraget fra alle synlige omgivende felter og lyskilder.

Denne metode har begrænsninger i forhold til dagslyssimuleringer, da den kun inkluderer diffus refleksion, og metoden bør kun anvendes til at vurdere relativt enkle rum.

Simuleringsprogrammerne Relux, DIALux og LightCalc anvender alle Radiosity metoden som deres beregningskerne.



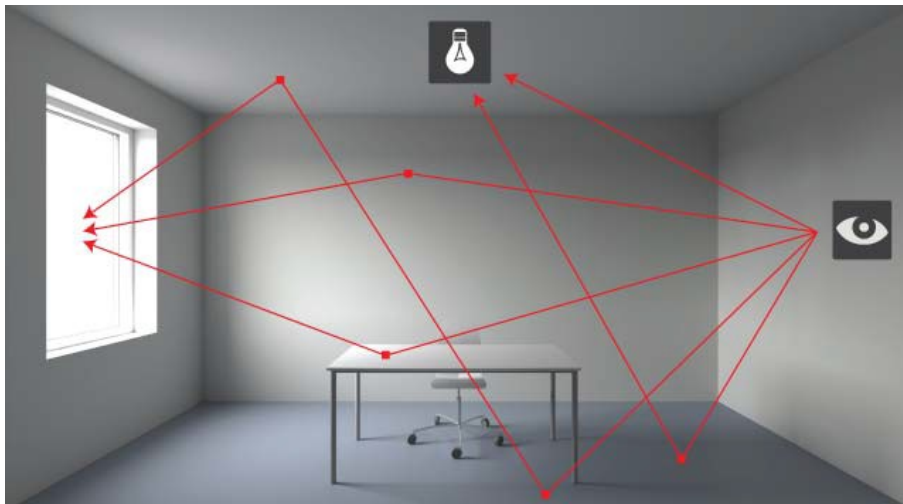
Figur 7: Illustration af radiosity beregningsmetoden

### Ray tracing

Ray tracing er en renderingsteknik baseret på beregning af fordelingen af stråler, der udsendes i en scene - enten fra lyskilder (forward ray tracing), eller øjets position (backward ray tracing) (Larson & Shakespeare 1998).

Backward ray tracing er en hurtigere metode end forward ray tracing, fordi denne metode kun beregner stråler, der rammer øjet. På den anden side er backward ray tracing mindre egnet eller ikke egnet til brug i beregningseksempler, hvor det sted lyset kommer fra er svært at finde, f.eks. i en smal lys-skakt. Ray tracing algoritmer understøtter direkte og diffus refleksion, transmission og brydningsegenskaber af overflader, som tillader brugen af komplekse materialer i simuleringerne (Watt 2000).

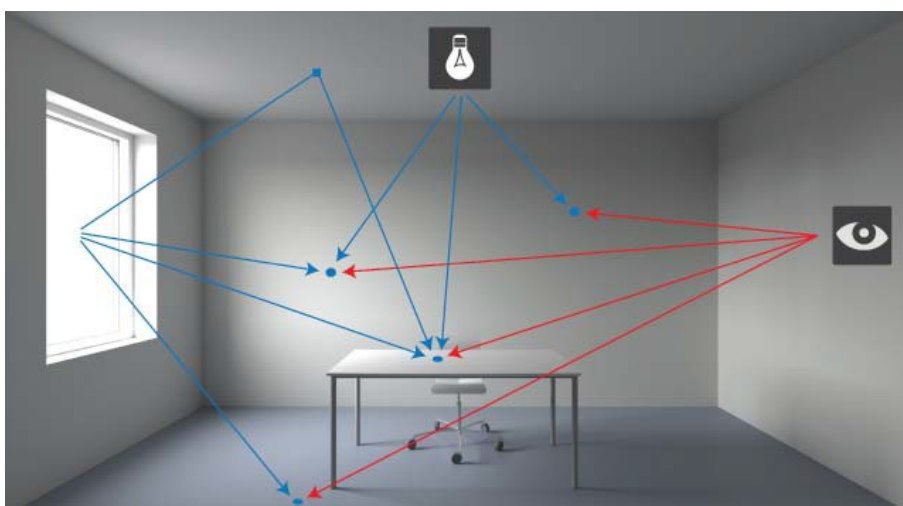
Simuleringsprogrammet Radiance anvender Ray tracing i sin beregningsrutine.



Figur 8: Illustration af backward raytracing metoden

### Photon mapping

Photon mapping er en renderingsteknik, som benytter en to-vejs ray tracing. Først kombineres forward ray tracing og photon mapping for at fordele lyset i rummet og fordele lysstrømmen på overflader. Derefter anvendes backward ray tracing fra øjets position til at beregne det endelige billede. Denne optimerede teknik gør det muligt at simulere mere komplekse belysningsscener med stor nøjagtighed, f.eks. lysskakte, og metoden er hurtigere end den traditionelle backward ray tracing.



Figur 9: Illustration af photon mapping metoden

VELUX Daylight Visualizer anvender photon mapping som sin beregningskerne.

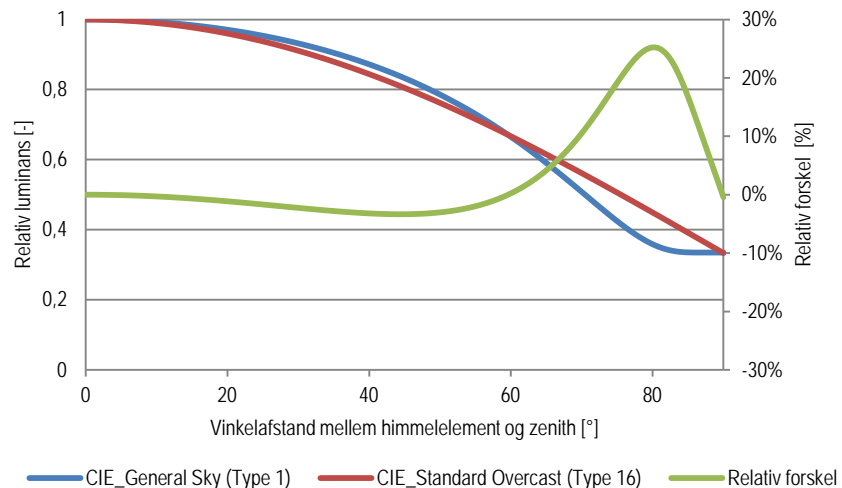
### Himmeltyper

Karakteren af dagslyset udenfor varierer fra det ene øjeblik til det andet. Derfor har Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) defineret 15 normali-

serede himmeltyper til brug i dagslyssimuleringer. Himmeltyperne varierer i type fra kraftigt overskyet til helt klar himmel (CIE 2003).

Ud over disse 15 himmeltyper, er der stadig nogle ældre himmelmodeller, der anvendes til dagslyssimulering. Når man f.eks. simulerer med CIE overskyet himmel i Radiance, benytte programmet "Standard Overcast Sky", der en ældre himmelmodel og som nu betegnes som himmeltype 16.

Nedenstående figur, Figur 10, viser den relative forskel i luminansniveauer for forskellig vinkelafstand mellem et himmelement og zenith for himmeltype 1 og 16. Sammenligningen viser en relativ forskel på over 25 % for himmelluminansen af himmelementet placeret tæt på horisonten (80 grader), hvilket betyder, at himmeltype 16 vil blive lysere, eller mere lysende tæt på horisonten.



Figur 10: Den relative forskel mellem luminansen for "Overcast Sky" type 1 og 16

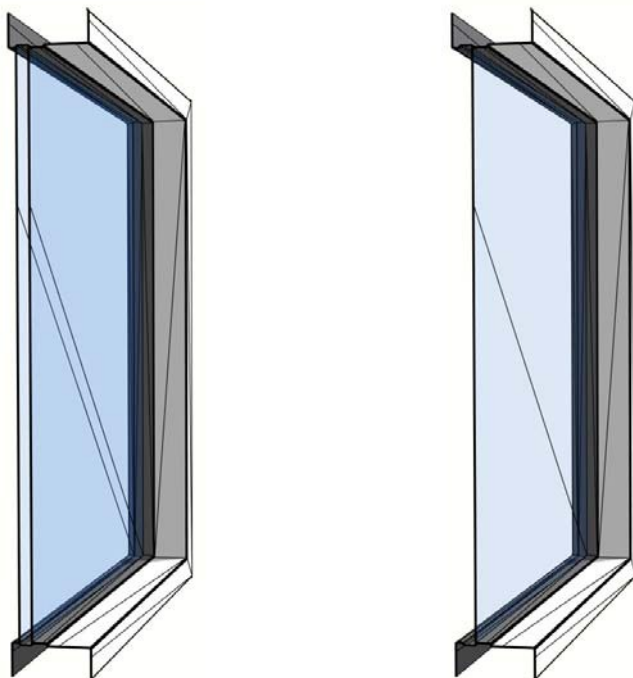
Dette er vigtigt at have med i betragtning ved sammenligning af resultaterne fra forskellige simuleringsprogrammer, da det kan forklare hvorfor nogle af forskellene forekommer mellem beregningsresultaterne. For eksempel kan vi, når vi sammenligner, de opnåede resultater mellem VELUX Daylight Visualizer og Radiance, se lidt højere dagslysniveauer simuleret med Radiance for rum 1, 2, 3 og 4, mens dagslysniveauerne er lidt højere for VELUX Daylight Visualizer i rum 5. Dette kan forklares ved, at Radiance bruger himmeltype 16 og VELUX Daylight Visualizer bruger himmeltype 1. Samt det faktum, at kun rum 5 havde en tagåbning (alle andre rum blev oplyst alene ved facadeåbninger), og dermed er det rum, der tydeligst vil blive påvirket af forskellig beregning af himmelluminansen i zenith.

## Beregningsmodel

Kvaliteten af den model, der opbygges i beregningsprogrammet og anvendes i simuleringen, kan influere betydeligt på kvaliteten og nøjagtigheden i dagslysberegningen.

### Geometri

Det er vigtigt at sikre, at geometrien af rum og dagslysåbninger er korrekt udformet, og at de korrekte beregningsparametre anvendes. Det er vigtigt, at den overflade, der repræsenterer glasset er uden tykkelse (kun har et lag). Opbygningen af ruden; om det er en et-, to- eller tre-lagsrude, ligger nemlig implicit i de materialeegenskaber der er opgivet for glasset. Derfor vil det være forkert at opbygge en rude med de eksakte antal glaslag.



Figur 11: Illustration af et vinduesmodel med 2 lag til at modellere glas (venstre) og et lag (højre). Til dagslyssimulering skal anvendes en opbygning som angivet i vinduet placeret til højre.

#### *Ekstern obstruktion*

Det er vigtigt, at repræsentere elementer, der påvirker dagslys på grunden, hvor bygningen er placeret, ordentligt. Det kan være ekstern obstruktion fra omkringliggende bygninger, landskab og vegetation. Effekten af ekstern obstruktion kan illustreres ved at sammenligne resultater opnået for 'RUM 1 - SIMPELT RUM – Analyseark' og 'RUM 3 – Rum med omgivelser - Analyseark'.

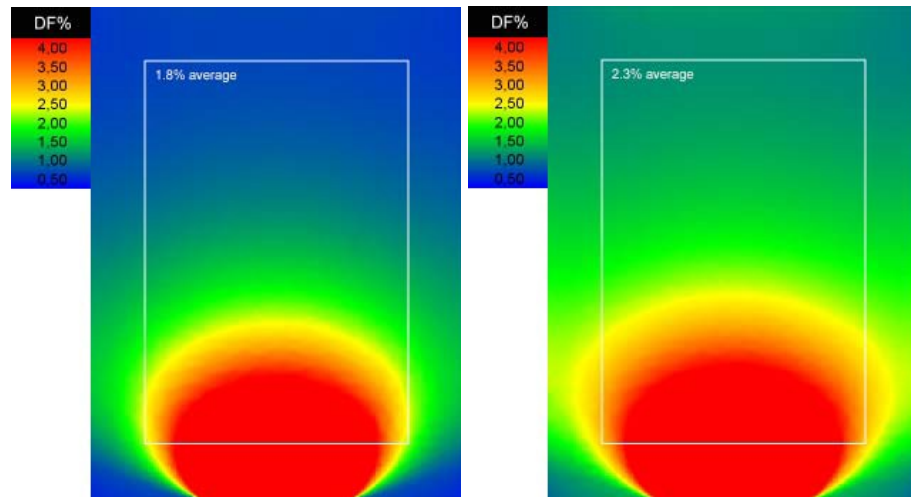
#### **Overfladeegenskaber**

Overfladeegenskaber, såsom materialetype, reflektans og transmittans, vil påvirke den måde dagslys fordeles i rum. Det er vigtigt at sikre, at realistiske værdier anvendes til gulv, væg og loft overflader, samt alle andre overflader, der indgår i modellen. Det er også vigtigt at sikre, at glassets transmittans defineres korrekt, og at der differentieres mellem åbningerne, hvor der anvendes forskellige typer af glas. Det er også vigtigt at være opmærksom på vinduets konstruktion og placering i ydervæggens dybde og differentiere mellem reflektans værdier på den indvendige og den udvendige vindues fals. Kendes overfladereflektansen ikke, anbefaler bygningsreglementet at man anvender overfladereflektanser for gulv, væg og loft på hhv. 0,1; 0,4, og 0,7.

#### *Eksempel*

I eksemplet nedenfor, sammenligner vi en scene med realistiske overfladeegenskaber (gulv 0,2, væg 0,5, loft 0,7) med en scene med urealistiske overfladeegenskaber (gulv 0,9, væg 0,9, loft 0,9). Resultaterne viser en forskel på 22 % mellem de gennemsnitlige opnåede dagslysfaktor værdier.





Figur 12: Dagslys faktor resultater for rum med realistiske overfladeegenskaber (venstre og urealistiske overfladeegenskaber (højre)

### Brugerens ekspertise

For at sikre nøjagtige simuleringer, er det vigtigt for brugerne at have et godt kendskab til beregningsprogrammets interface og hvordan man indtaster data i programmet. Et studie fra 2009 foretaget af forskere ved Harvard Universitet undersøgte, hvor rigtige resultaterne var fra dagslyssimuleringer foretaget af nye brugere/studerende (Ibarra & Reinhart 2009). I deres studie fandt de ud af, at typiske fejl var geometriske fejl, som at vægtykkelsen var undladt i modellen, og at materialeegenskaberne var angivet forkert.

Derudover er det vigtigt at kende til de muligheder og begrænsninger, der er i de anvendte værktøjer. Og det er vigtigt at vælge en beregningsmetode samt beregningsparametre som passer til kompleksiteten af det scenarie, man ønsker at evaluere.

# Beskrivelse af beregningsprogrammer

I dette afsnit beskrives kort de ni beregningsprogrammer, der er anvendt i denne rapport. Beskrivelserne baserer sig på information tilgængelig af software udviklerne. For hvert beregningsprogram er der angivet links til hvor man kan finde mere information.

## Radiance

Radiance er et avanceret lyssimulerings- og visualiserings værktøj, som kan anvendes til at modellere simple eller komplekse dagslysforhold og elektriske belysningsystemer. Input filer specificerer scene geometri, materialer, armaturer, tidspunkt, dato og himmeltype. Beregnede værdier er spektral radian (luminans og farve), irradians (belysningsstyrke og farve) og blændingsindekser. Simuleringsresultater kan vises som billeder, numeriske værdier og kontur-plots.

Der er ingen begrænsning i forhold til de geometrier og materialetyper, der kan simuleres. Radiance anvendes af arkitekter og ingeniører til at estimere belysningsstyrke, visuel kvalitet og fremtoning af de simulerede områder. Programmet opdateres løbende.

Brugbare links:

Alex Jacobs har skrevet tutorials, der kan hjælpe én i gang med Radiance, de kan hentes fra denne side:

<http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/documentation/index.shtml>

Den primære internetside for Radiance, hvor der er adgang til mailing-liste, samt mulighed for at se og søge på alle de Radiance-relaterede spørgsmål, der er blevet stillet gennem tiden, er at finde på nedenstående link. Det er også fra denne hjemmeside programmet kan downloades gratis:

<http://www.radiance-online.org/>

Derudover kan versioner af Radiance, der kan køre både på Windows, Mac og linux computere kan downloades gratis fra:

<https://openstudio.nrel.gov/getting-started-developer/getting-started-radiance>

## Daysim

Daysim er et valideret dagslysberegningsprogram, der kan beregne den årlige dagslysadgang i bygninger baseret på Radiance. I programmet kan man anvende en LightSwitch-brugsmønstermodel til at efterligne brug af personlig kontrol, såsom manuel tænd/sluk af kunstig belysning og regulering af persienner, samt til at forudsige energibesparelser fra automatiseret lyskontrollsystemer såsom bevægelsesmeldere og dagslysstyring. I forbindelse med designundersøgelser kan Daysim, ud over at vurdere dagslysforholdene baseret på dagslys faktoren, vurdere dagslysforholdene i det undersøgte område ud fra en række klimabaserede dagslysevalueringer.

Daysim kan også bruges til at foretage en årlig analyse af blænding i dagslysscener ved hjælp af et "daylight glare probability" koncept. Daysim genererer automatisk rummets brugsmønster pr. time, forbrug af elektrisk belysning

og status for solafskærmning. Disse skemaer kan kobles direkte med populære termiske simuleringer såsom TRNSYS, EnergyPlus, Equest og Esp-r for en integreret belysning-termisk simulering. Daysim har været knyttet til en række CAD-miljøer, herunder Rhinoceros, Autodesk-Ecotect og Google Sketch Up. Daysim er gratis.

Brugbare links:

<http://www.daysim.com/>

## Desktop Radiance

Desktop Radiance er en afledt version af Radiance, der fungerer under Windows. Når man anvender Desktop Radiance er der et windows kompatibelt interface, hvor man kan håndtere de fleste af de komplekse Radiance kommandoer. Udviklingen af Desktop Radiance ophørte i 2002. Desktop Radiance er dog medtaget i rapporten, da brugere af Autodesk Ecotect Analysis henvises til Desktop Radiance.

NREL har frigivet en version af Radiance, der kan køre på windowsmaskiner og som kan fungere sammen med Autodesk Ecotect Analysis. Det anbefales, at downloade den nyeste version af Radiance til windows, da beregningskernen er blevet opdateret og optimeret betydeligt, og denne windowsversion løbende bliver opdateret.

## IESve

IES anvender Radiance i sin beregningskerne til dagslyssimuleringer i <Virtual Environment>. Via implementeringen af RadianceIES får brugeren en let adgang til brugen af Radiance via det grafiske brugerinterface kendt som <Virtual Environment>. I IESve er det muligt at opbygge den geometriske model og efterfølgende simulere dagslysforholdene.

Brugbare links:

<http://www.iesve.com/>

## DIALux

DIALux er orienteret mod det europæiske marked og anvendes til beregning af indendørs og udendørs elektrisk belysning. Programmet følger forskellige nationale standard belysningsberegninger, og kan importere fotometriske databaser fra producenterne. DIALux kan beregne belysning, dagslys og energiforbruget til kunstig belysning. Der kan foretages individuelle eller kombinerede beregninger af de tre parametre. Geometrisk opbygning af modeller er begrænset til visse former. For dagslysberegninger kan der anvendes 3 himmeltyper – dette er en klar himmel, gennemsnitlig himmel og overskyet himmel. Dagslysberegningen i DIALux følger den tyske standard DIN 5043 og CIE-publikation 110. Desuden er der en ekstern radiosity og raytracing model, POV-Ray (Persistence of Vision 2010), der bruges til at producere billeder fra beregningsresultater og renderinger.

DIALux er gratis, men er ikke open-source og kan hentes fra nedenstående link.

Brugbare links:

<http://dial.de/>

## Relux

Relux anvendes primært til kunstig belysning og inkluderer links til producenter af elektrisk belysning. Programmet er orienteret mod det europæiske marked. Relux kan beregne belysning, dagslys og energiforbruget til kunstig belysning. Der kan foretages individuelle eller kombinerede beregninger af de tre parametre. Relux bruger en kombination af radiosity og en modificeret Radiance raytracing algoritme. Det er op til brugeren at vælge hvilken beregningskerne, der skal anvendes til beregningerne. Raytracingmodulet bruges også til rendering. Relux er gratis, men er ikke open-source.

Brugbare links:

<http://www.relux.biz/>

## Ecotect

Ecotect er et Autodesk-produkt, der kan foretage en lang række forskellige simuleringer, herunder bygningsenergisimuleringer, termiske simuleringer, solindstråling, dagslysniveau og skyggediagrammer.

Brugbare links:

<http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>

## Velux Daylight Visualizer

VELUX Daylight Visualizer er et valideret (Labayrade *et al.* 2009) dagslys simulering- og visualiserings værktøj til brug for design og dagslysanalyse af bygninger. Det er hensigten med programmet at fremme brugen af simuleringer og visualiseringer i den tidlige designfase – og dermed at bruge programmet som et dagslysdesign værktøj på arkitekt-tegnestuer.

Daylight Visualizer har et integreret modelværktøj, der giver hurtig mulighed for opbygning af simple 3D-modeller med et katalog af daglysåbninger samt at importere 3D-modeller genereret af CAD-programmer med henblik på at skabe fuld fleksibilitet i forhold til komplekse geometrier. Daylight Visualizer kan bruges til at beregne luminans-, illuminans- og dagslysfaktorniveauer for alle 15 himmel typer defineret i CIE Standard General Sky. Outputs fra Daylight Visualizer er billedbaserede og behandlet i en fremviser, hvor pseudofarver kan anvendes og pixelværdier kan eksporteres til videre analyse. VELUX Daylight Visualizer har et effektivt workflow og et intuitivt design som gør det tilgængeligt og nemt at bruge.

Programmet er gratis og kan hentes fra nedenstående link.

Brugbare links:

<http://viz.velux.com>

## LightCalc

LightCalc er et gratis open source værktøj til kunst- og dagslysberegninger. LightCalc har sin egen beregningskerne baseret på forward raytracing og radiosity. Forward raytracing benyttes for lys fra himmelen og andre lyskilder, og radiosity benyttes til at beregne indvendige interreflekterede bidrag. Programmet har brug for få brugerinput og har en kort beregningstid.

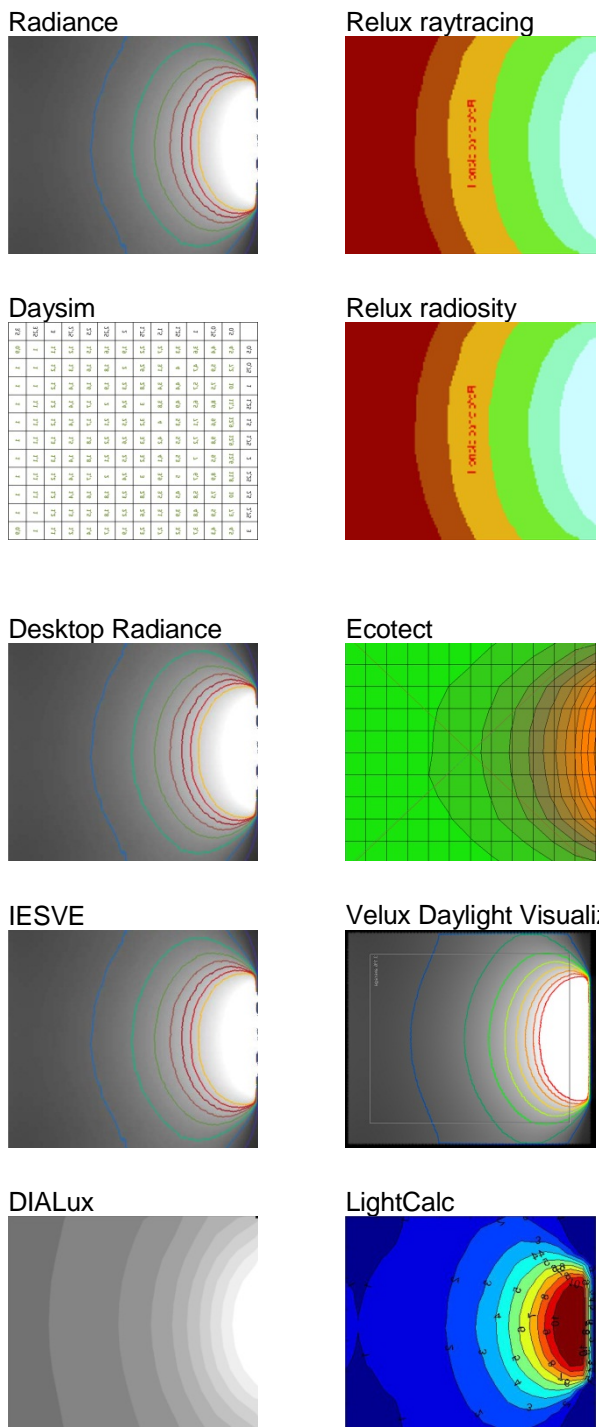
LightCalc er et af de få programmer, der giver muligheden for at koble lysberegninger direkte til timebaserede termiske beregninger i iDbuild. LightCalc er begrænset til kunne beregne på et rum.

Brugbare links

<http://idbuild.dk/>

# Grafisk præsentation af resultater

Det grafiske output fra de forskellige beregningsprogrammer varierer i udtryk-  
ket. Figur 13 viser eksempler fra de anvendte programmer af den grafiske  
præsentation af dagslysfaktor niveau i det simple rum. I det følgende har vi  
behandlet resultaterne fra dagslysberegningerne på et resultatark for hver af  
de 5 rumtyper. For hvert rum ses beregningsresultaterne præsenteret på en  
sammenlignelig grafisk måde.



Figur 13: Beregningsresultater (DF) gengivet i arbejdsplan 0,85 m over gulv for de forskellige programmer

# Beregninger og analyse

## Rumtyper

Rumtyperne i denne undersøgelse er valgt ud fra et ønske om både at sammenligne beregninger i rum med en enkel rumgeometri og rum med en mere kompleks rumgeometri. Nogle beregningsprogrammer kan beregne alle rumtyper og andre kan kun beregne de mere simple rumgeometrier. Følgende rumtyper er valgt:

### *Rum 1 - Simpelt rum*

Et simpelt rum med et vindue. Lysindfaldet i rummet reflekteres både på side- og endevægge. Rummets dimensioner er: Bredde = 3,5 m, Højde = 2,8 m, Dybde = 4 m. Vægtykkelsen er 0,4 m og vinduesrammens tykkelse er 0,06 m. Vindueshullet har dimensionerne 2 m i bredden og højde på 1,5 m. Brystningen er 0,9 m.

### *Rum 2 - Dybt rum*

Rummet og vinduet har samme format som det simple rum bortset fra at rumdybden er øget fra 4 m til 7 m. Lyset vil ikke blive reflekteret på endevæggen.

### *Rum 3 - Rum med omgivelser*

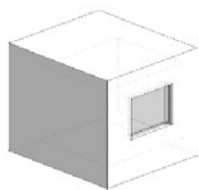
Rummet og vinduets dimensioner er de samme som standard rummet men udenfor vinduet er en flade placeret. I beregningsresultaterne kan aflæses hvor stor betydning omgivelserne har for dagslysniveauet i rummet.

### *Rum 4 - Rum med lyshylde*

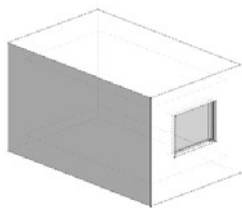
Det simple rum med en lyshylde i vinduet. Rumtypen er medtaget for at beregne en detalje i facaden/vindue og for at se de forskellige programmers evne til at gengive dette.

### *Rum 5 - Rum med lånt lys*

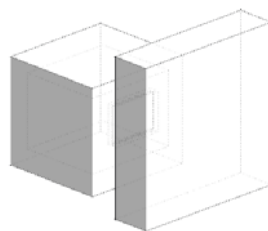
Dagslyset skal passere gennem to adskilte vinduesglas før lyset når til det rum hvor der er krav om et dagslysfaktorniveau. Der er vinduesåbninger i tag og i facade, lyset skal derefter passere gennem et indre glasparti til det beregnede rum.



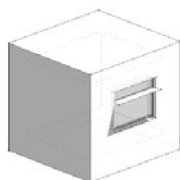
***Simpelt rum***



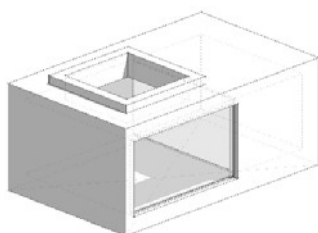
***Dybt rum***



***Rum med omgivelser***



***Rum med lyshylde***



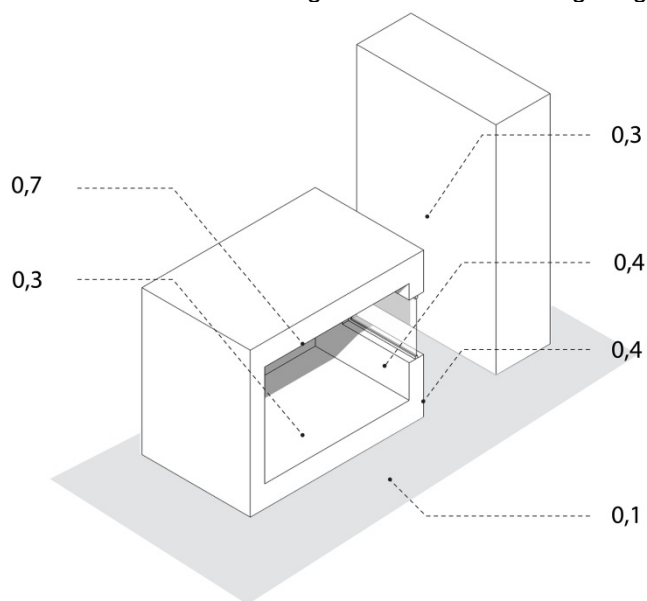
***Rum med lånt lys***

Figur 14: Valgte rumtyper



## Beregningsparametre

Beregningsparametrene for rummene er ens. Der er regnet med overflade-reflektanser som de fremgår af nedenstående figur og tabel.



Tabel 5: Overfladeegenskaber

	Reflectans (r)
Grund plan	0,1
Udvendige vægge og obstruktioner	0,3
Gulv	0,1
Væg	0,4
Loft	0,7
Vinduesramme	0,8
Vindueslysning, indvendig	0,7
Vindueslysning, udvendig	0,3
Lyshylde	0,5

Tabel 6: Lystransmittans

	Lystransmittans (LT)
Vinduesglas i façade og ovenlys	0,76
Indvendigt glas	0,85

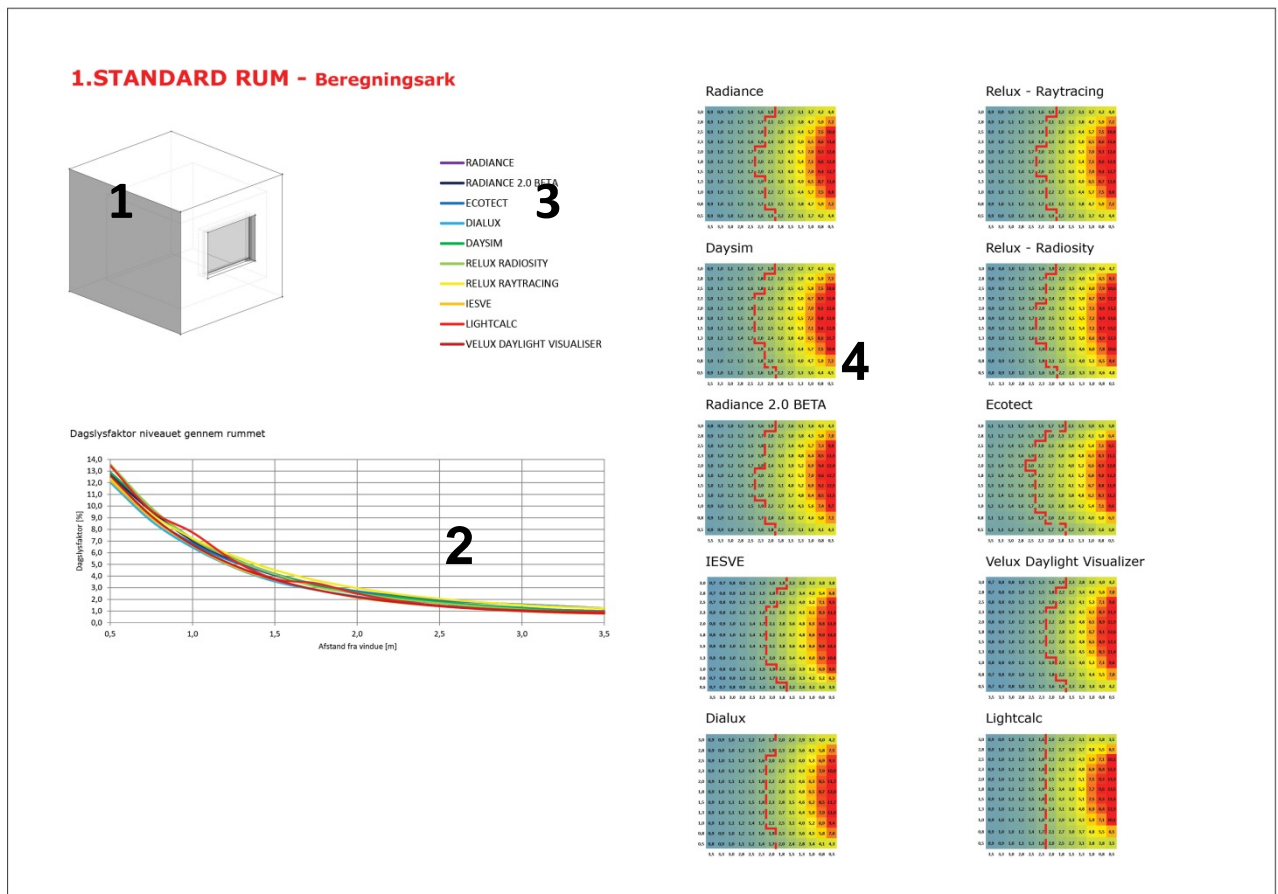
Tabel 7: Beregningspunkter, beregningsniveau og grund plan

Arbejdsplanhøjde	0,85m
Arbejdsplanområde	Afstand fra væg til beregningsområde er 0,5m
Grid	0,25 m horisontalt og vertikalt
Beregningsniveau	High Quality
Grund plan	Placér rummene midt på en 50x50 m grundplan

# Vejledning til resultatark beregninger

På de følgende sider præsenteres beregningsresultaterne fra de forskellige rum. For hvert rum præsenteres et beregningsark, som det illustreret herunder. Resultatark beregninger indeholder

- 1) Illustration af rumtype,
- 2) Figur, der viser dagslysfaktoren i centerlinjen af rummet som funktion af rumdybden. Resultaterne er i dette tilfælde efterbearbejdet i excel for at opnå samme grafiske udtryk fra alle simuleringsprogrammerne.
- 3) Legend, til forklaring af ovenstående figur
- 4) Beregningsresultater i beregningsnet på arbejdsplan for de forskellige beregningsprogrammer



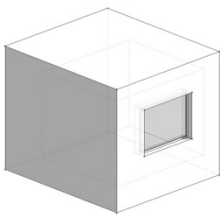
# Vejledning til resultatark analyse

På de følgende sider præsenteres ligeledes analyseresultaterne fra de forskellige rum. For hvert rum præsenteres et analyseark, som det er illustreret herunder.

Resultatark analyse indeholder:

- 1) Illustration af rumtype
- 2) Forklaring til figurer
- 3) Figur, der viser dagslysfaktor for de forskellige beregningsprogrammer givet ved DFmiddel, DFmedian, DFmin og DFmaks, samt ensartet; DFmin/DFmiddel og DFmin/DFmaks
- 4) Figur, der viser forskelle i dagslysfaktorværdier givet ved boxplot. DFmaks er den højeste værdi, herefter følger 75 percentilen, DFmiddel, 25% percentilen og DFminium. 75- og 25 percentilen beskriver hhv. hvad dagslysfaktoren er for 75% og 25% af beregningspunkterne
- 5) Figur, der viser afstanden fra facaden, hvor en dagslysfaktor på 2 % opnås for de forskellige beregningsprogrammer

## 1. STANDARD RUM - Analyseark



1

Figur 8 - Tabel med dagslysfaktorværdier

	DIALux	Radiance	DaySim	Relux Radiosity	Relux Raytracing	RADIANCE 2.0 BETA	Ecolect	IESve	LightCalc	VELUX Daylight Visualizer
Average	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,3	3,2	3,0	3,3	3,0
Median	2,1	2,2	2,3	2,2	2,4	2,2	2,2	1,9	2,3	1,9
Min	0,9	0,9	0,9	0,8	1,1	0,8	1,1	0,7	0,9	0,7
Max	12,0	12,9	12,9	13,6	13,5	12,7	12,3	12,2	13,5	12,6

Uniformity										
Dmin/Davg	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
Dmin/Dmax	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

3

Figur 8 viser dagslysfaktorværdier i tal i det simulerede rum.

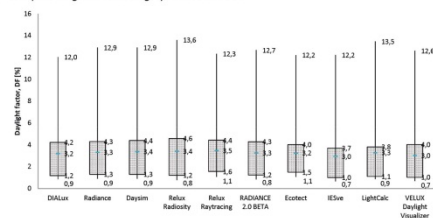
Figur 9 viser, at spredningen i den gennemsnitlige dagslysfaktor for de 10 beregningsprogrammer ligger mellem 3,0% (Visualizer og IESve) til 3,5% (Relux raytracing). Dette betyder, at der er en afvigelse på 15% mellem de største og mindste værdi i simuleret gennemsnitlige dagslysfaktor for de 10 programmer. Endvidere er standardafvigelsen beregnet. Standardafvigelsen er 0,17, hvilket svarer til en standardafvigelse på  $\pm 5,1\%$  mellem de forskellige programmer. Denne type rum repræsenterer en standard scene uden spektakulære dagslysparemetre. Det forventes derfor, at denne simulering vil give den laveste forskel mellem de forskellige simuleringer.

Figur 10 viser at afstanden fra facade med en dagslysfaktor på 2% varierer fra 2,1 m til 2,5 m. Det fører til forskelle på 18% i dagslys indtrængningsdybde mellem den maksimale og minimale afstand. Standardafvigelsen er 0,15 m, hvilket giver standardafvigelse på  $\pm 6,4\%$  for de forskellige simuleringer.

Alle simuleringer er i stand til at simulere standard rummet. Det kunne ikke fastslås, at simuleringer der anvender den samme simulering algoritme, giver de samme resultater. Dette tyder på, at et program er lige så godt som et andet til at simulere standard rummet. Standardfejlen mellem de forskellige simuleringer var  $\pm 5,5\%$ . Og forskellen i gennemsnitlig dagslysfaktor mellem største- og mindsteværdier var 15%. Når man ser på dagslys indtrængningsdybde, var standardfejlen  $\pm 6,4\%$  mellem de forskellige simuleringer, og forskellen mellem den største og mindste dagslys indtrængningsdybde var 18%.

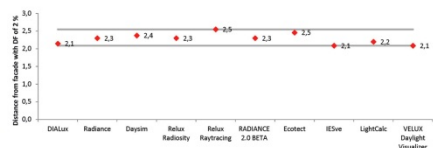
2

Figur 9 - Boxplot diagram med dagslysfaktorværdier



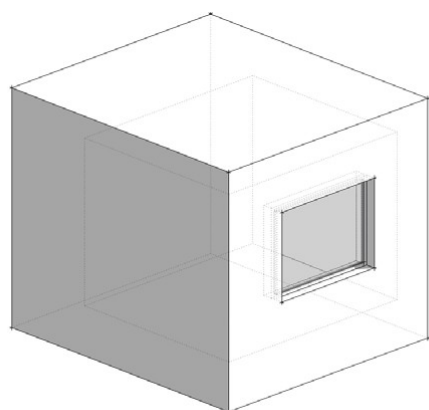
4

Figur 10 - Afstanden fra facaden, hvor en dagslysfaktor på 2% er opnået

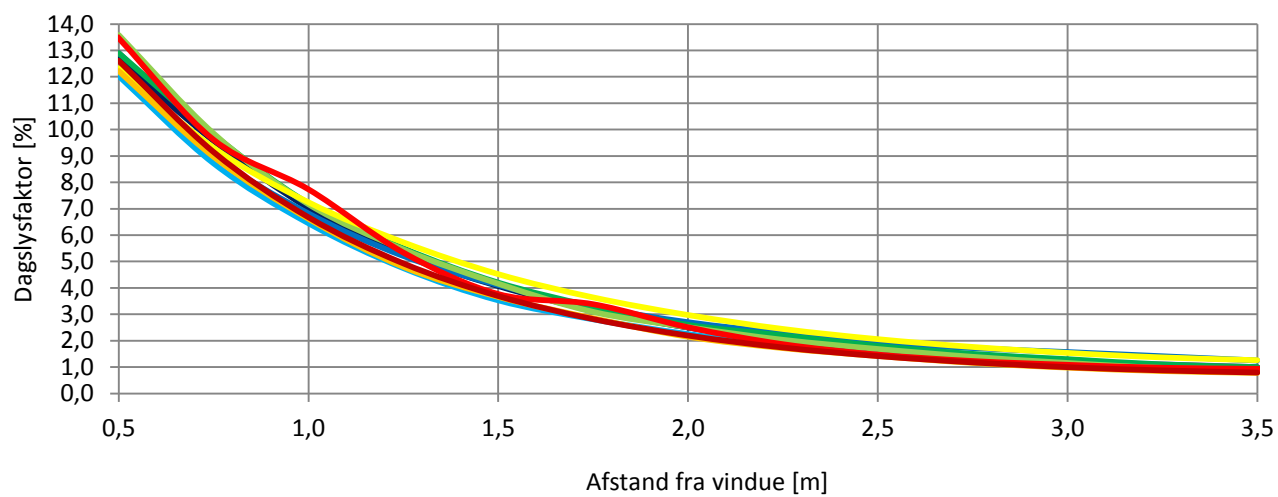


5

# RUM 1 – SIMPELT RUM – Beregningsark

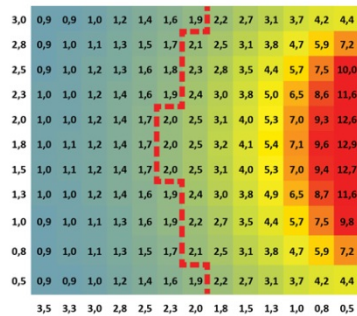


- Radiance
- Desktop Radiance
- Ecotect
- DIALux
- Daysim
- Relux Radiosity
- Relux Raytracing
- IESve
- LightCalc
- VELUX Daylight Visualizer

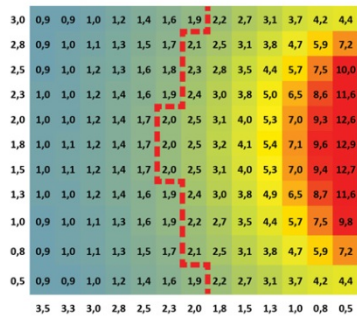


Figur 15: Dagslysfaktorniveau gennem rummet

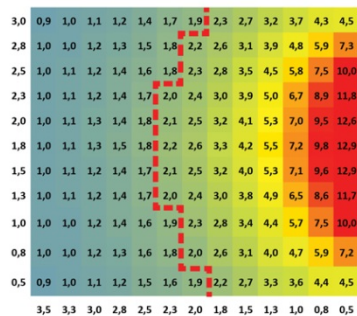
### Radiance



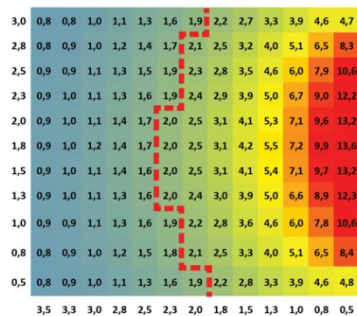
### Relux - Raytracing



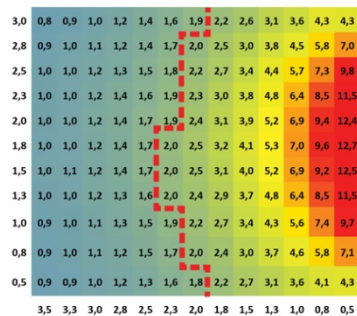
### Daysim



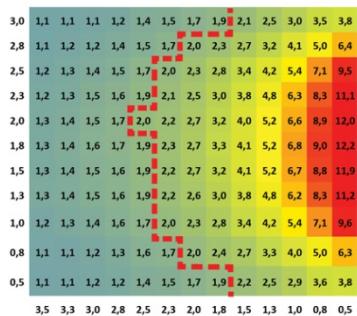
### Relux - Radiosity



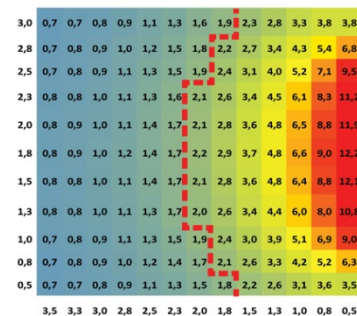
### Desktop Radiance



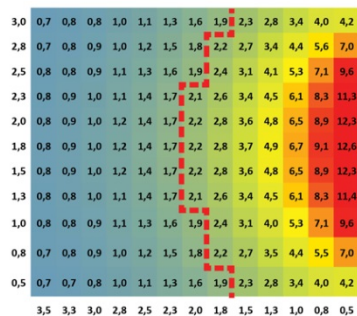
### Ecotect



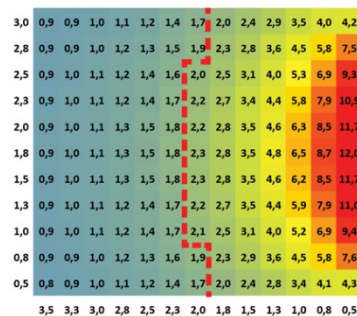
### IESve



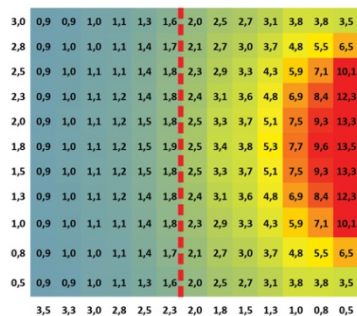
### VELUX Daylight Visualizer



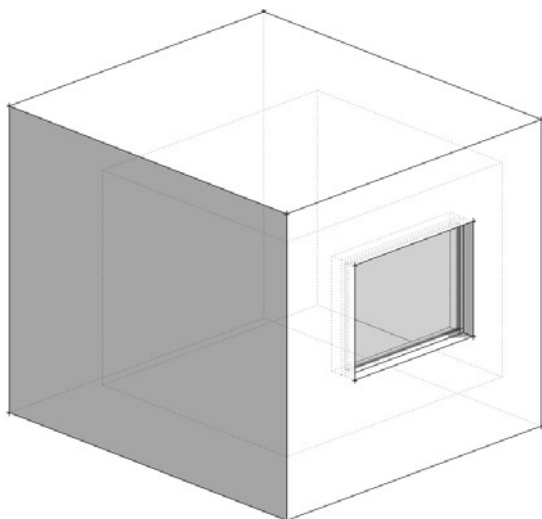
### DIALux



### LightCalc



## RUM 1 - SIMPELT RUM – Analyseark



Tabel 8 viser dagslysfaktorer for det simulerede rum angivet som DFmiddel, DFmedian, DFminimum og DFmaksimum. Tilsvarende resultater ses i figur 16 visualiseret ved et boxplot.

Fra tabellen og figuren kan det aflæses, at variationen i den gennemsnitlige dagslysfaktor for de 10 beregningsprogrammer ligger mellem 3,0% (VELUX Daylight Visualizer og IESve) til 3,5% (Relux Raytracing). Dette betyder, at der er en afvigelse på 15% mellem de største og mindste værdi i simuleret gennemsnitlige dagslysfaktor for de 10 programmer. Standardafvigelsen, dvs. hvor meget de 10 simuleringresultater afviger fra gennemsnittet, er beregnet til en dagslysfaktor på 0,17%. Dette svarer til en afvigelse på  $\pm 5,1\%$  mellem de forskellige programmer.

Figur 17 viser afstanden fra facaden, hvor en dagslysfaktor på 2% opnås. Af figuren kan det aflæses, at afstanden fra facade med en dagslysfaktor på 2% varierer mellem 2,1 m til 2,5 m. Det fører til forskelle på 18 % i dagslys indtrængningsdybde mellem den største og mindste afstand. Standardafvigelsen er 0,15 m, hvilket giver standardafvigelse på  $\pm 6,4\%$  for de forskellige simuleringprogrammer.

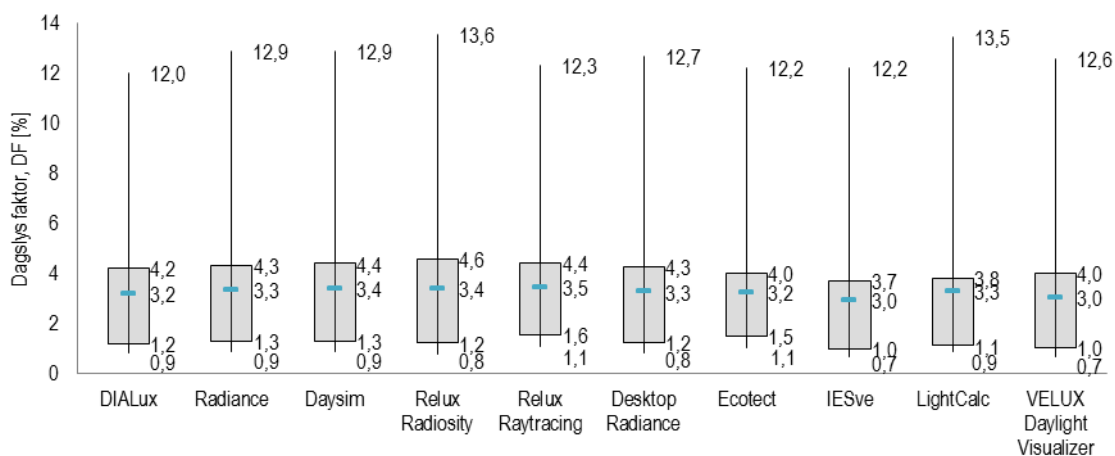
Det simple rum, repræsenterer en standard scene uden spektakulære dagslysparemetre. Det forventes derfor at for de 5 undersøgte rumtyper, vil simulering af dette rum give den laveste forskel mellem de forskellige simuleringprogrammer.

Alle simuleringprogrammer er i stand til at simulere det simple rum. Standardafvigelsen mellem de forskellige simuleringprogrammer var  $\pm 5,5\%$ . Dette tyder på, at et program er lige så godt som et andet til at simulere det simple rum. Forskellen i gennemsnitlig dagslysfaktor mellem største- og mindsteværdier var 15%. Når man ser på dagslys indtrængningsdybde, var standardafvigelsen  $\pm 6,4\%$  mellem de forskellige simuleringprogrammer, og forskellen mellem den største og mindste dagslys indtrængningsdybde var 18%.

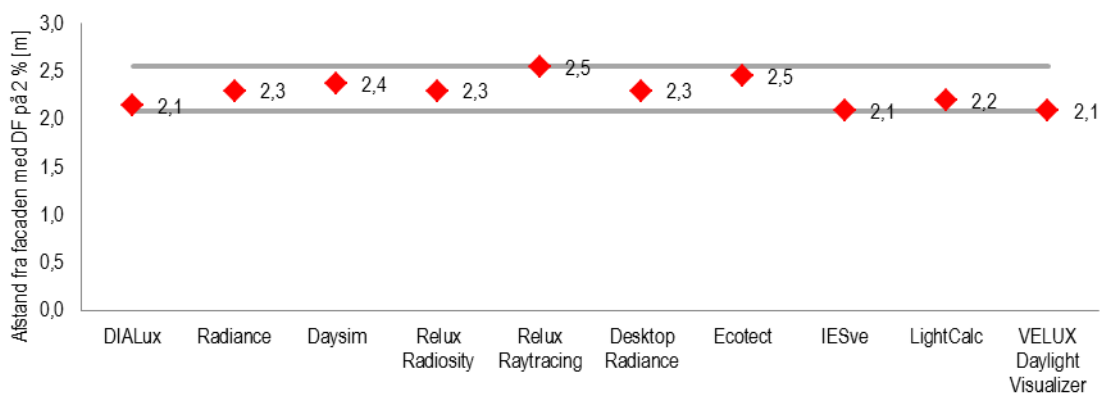


Tabel 8: Dagslysfaktorværdier, angivet som middel, median og maks og minimumsværdier, samt ensartethed givet ved DFmin/DFmiddel og DFmin/DFmaks

	DIALux	Radiance	Daysim	Relux Radiosity	Relux Raytracing	Desktop Radiance	Ecotect	IESve	LightCalc	VELUX Daylight Visualizer
	DF [%]									
DFmiddel	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,3	3,2	3,0	3,3	3,0
DFmedian	2,1	2,2	2,3	2,2	2,6	2,2	2,2	1,9	2,3	1,9
DFmin	0,9	0,9	0,9	0,8	1,1	0,8	1,1	0,7	0,9	0,7
DFmaks	12,0	12,9	12,9	13,6	12,3	12,7	12,2	12,2	13,5	12,6
	Ensartethed									
DFmin/DFmiddel	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
DFmin/DFmaks	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

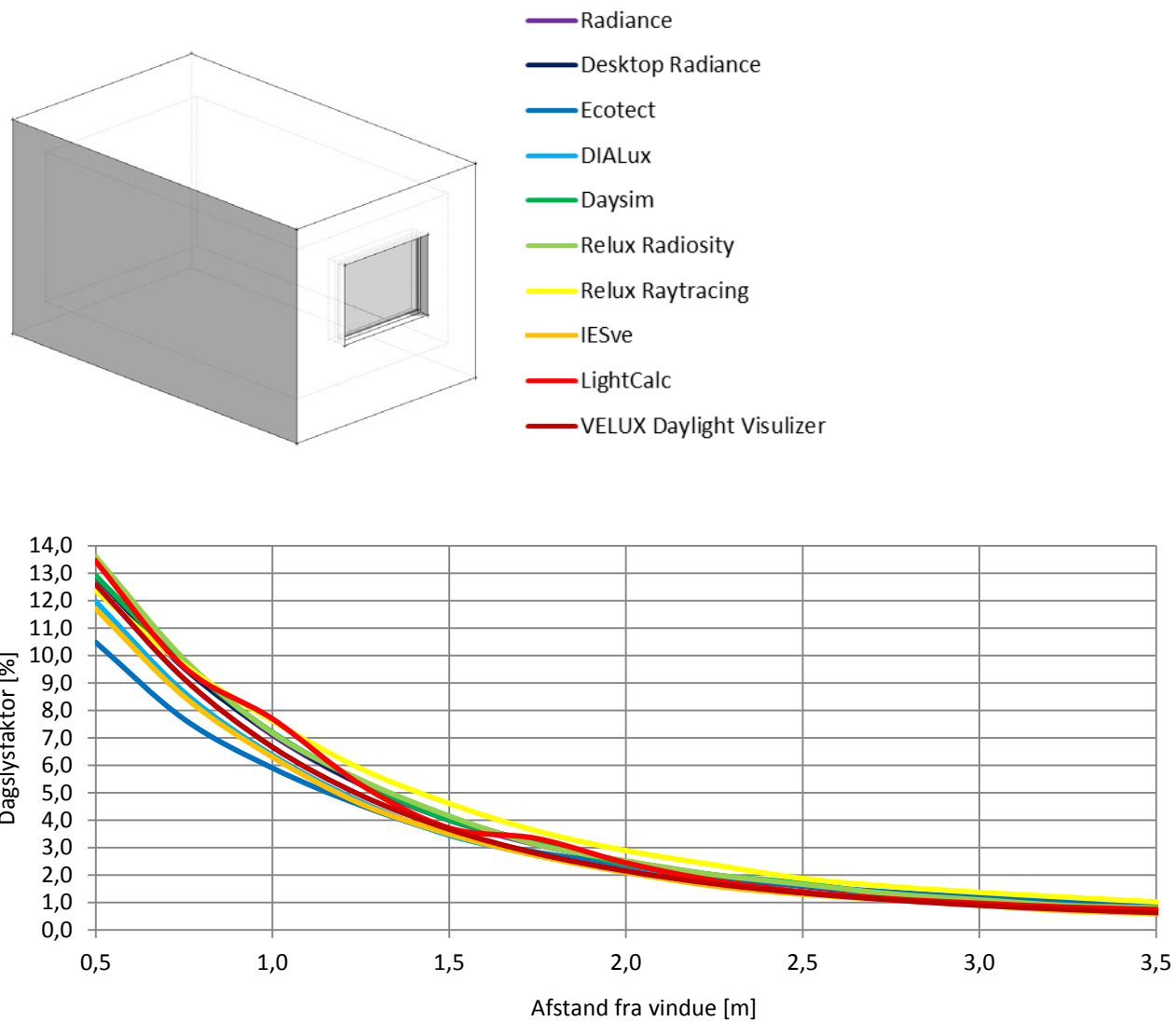


Figur 17: Boxplot af dagslysfaktor for det simple rum, simuleret i de forskellige beregningsprogrammer



Figur 18: Afstand fra facaden hvor en 2 % dagslysfaktor er opnået for de forskellige beregningsprogrammer

## RUM 2 - DYBT RUM - Beregningsark

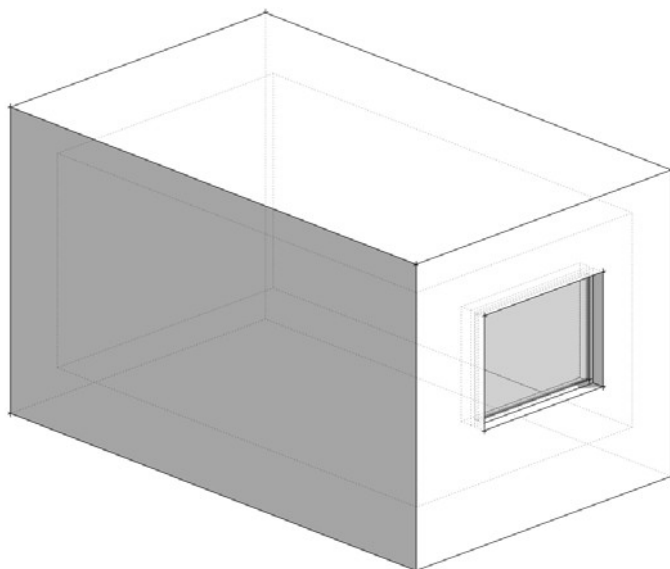


Figur 19: Dagslysfaktorniveau ind gennem rummet





## RUM 2 - DYBT RUM - Analyseark

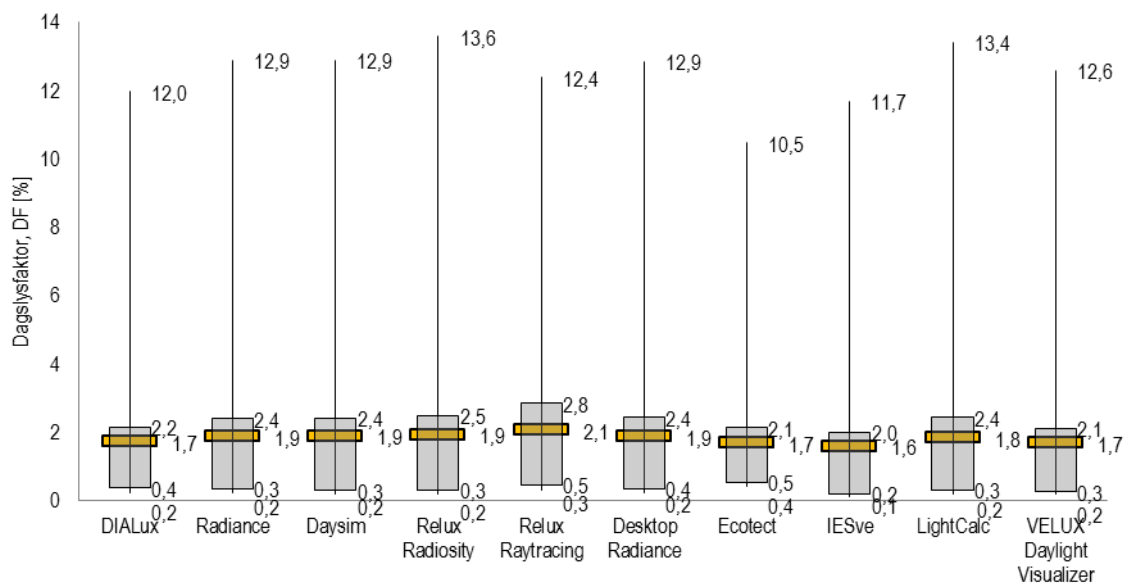


Tabel 9 og figur 21 viser dagslysfaktorværdier for det simulerede rum. For den gennemsnitlige dagslysfaktor er den største værdi 2,1% (Relux Raytracing), og den mindste værdi er 1,6% (IESve). Forskellen i simulerede gennemsnitlige DF mellem maksimum- og minimumværdier er 23%, og standardafvigelsen er en DF på 0,13%, hvilket giver en standardafvigelse i forhold til gennemsnittet på  $\pm 7,4\%$

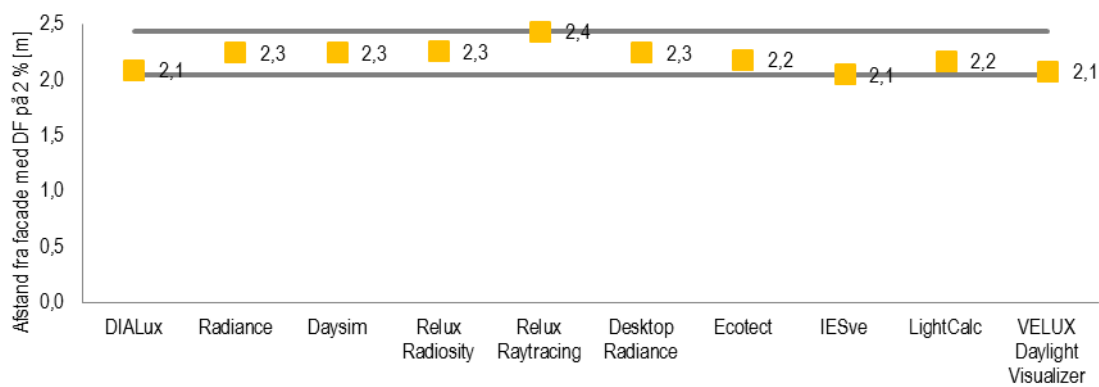
Figur 22 viser afstanden fra facaden hvor en 2 % dagslysfaktor opnås. Af figuren kan det aflæses at den simulerede maksimale afstand fra facaden med dagslysfaktor på 2% er 2,4 m (Relux Raytracing) og den mindste afstand fra facaden er 2,1 m (DIALux, IESve og VELUX Daylight Visualizer). Dette er en forskel på 0,3 m, eller 16%. Standardafvigelsen er 0,11 m, der svarer til en standardafvigelse i forhold til gennemsnittet mellem de forskellige simuleringssprogrammer på  $\pm 4,9\%$ . Dagslysendrængningsdybden er lidt lavere i det dybe rum (Rum 2) i modsætning til det simple rum (Rum 1). Dette skyldes det reflekterede lys fra bagvæggen, som bidrager til en stigning i dagslysfaktoren i standardrummet, ikke bidrager til en stigning i det dybe rum.

Tabel 9: Dagslysfaktorværdier, angivet som middel, median og maks- og minimumsværdier, samt ensartethed givet ved DFmin/DFmiddel og DFmin/DFmaks

	DIALux	Radiance	Daysim	Relux Radiosity	Relux Raytracing	Desktop Radiance	Ecotect	IESve	LightCalc	VELUX Daylight Visualizer
	DF [%]									
DFmiddel	1,7	1,9	1,9	1,9	2,1	1,9	1,7	1,6	1,8	1,7
DFmedian	0,7	0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	0,8	0,6	0,7	0,6
DFmin	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,1	0,2	0,2
DFmaks	12,0	12,9	12,9	13,6	12,4	12,9	10,5	11,7	13,4	12,6
DFmin/DFmiddel	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1
DFmin/DFmaks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

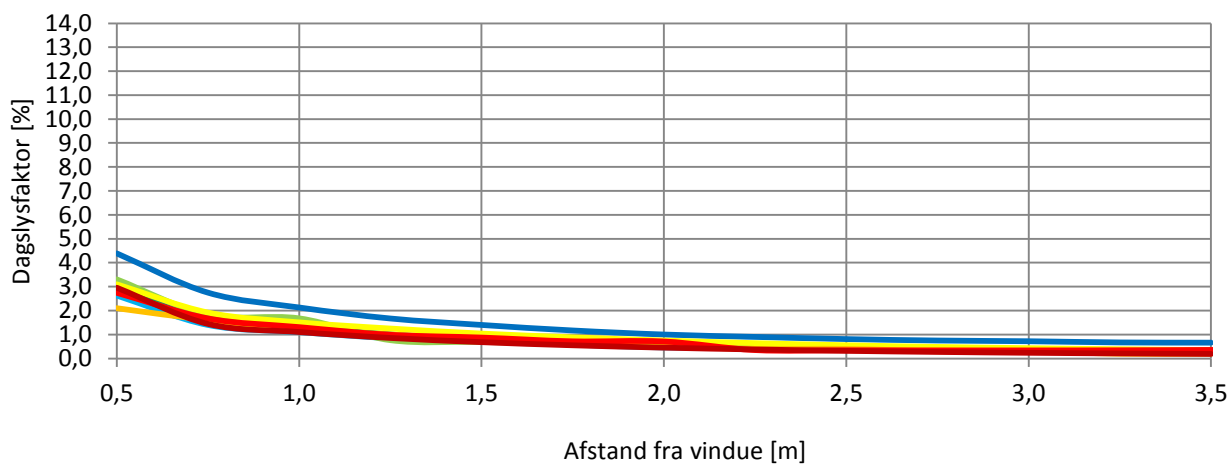
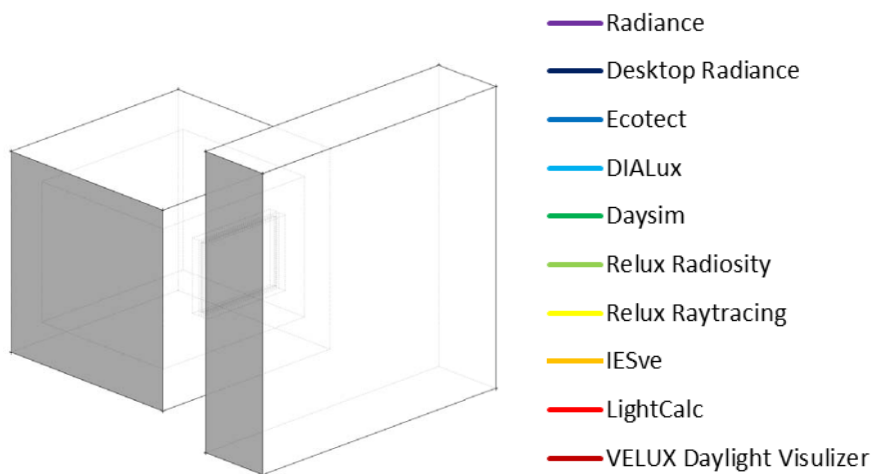


Figur 22: Boxplot af dagslysfaktor for det dybe rum simuleret i de forskellige beregningsprogrammer



Figur 21: Afstand fra facaden, hvor en 2 % dagslysfaktor er opnået for de forskellige beregningsprogrammer

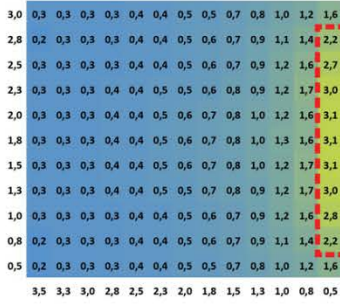
### RUM 3 - RUM MED OMGIVELSER – Beregningsark



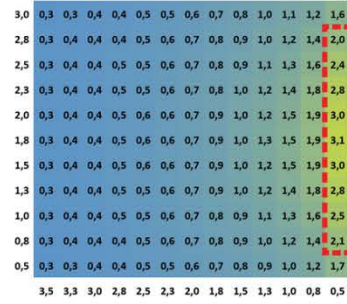
Figur 23: Dagslysfaktorniveau ind gennem rummet



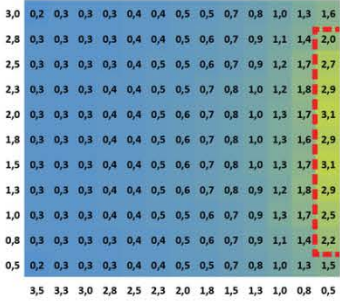
### Radiance



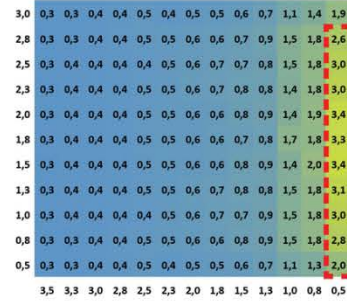
### Relux - Raytracing



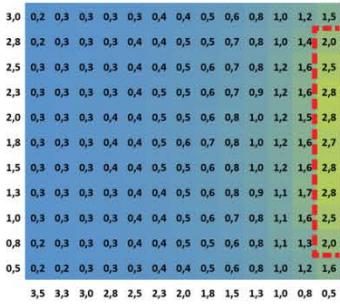
### Daysim



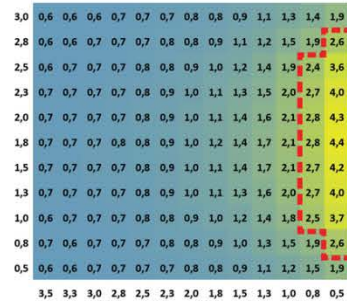
### Relux - Radiosity



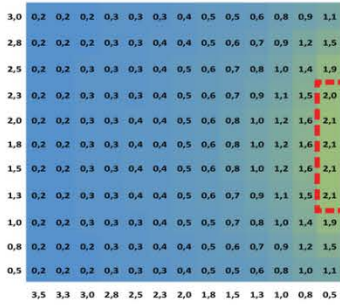
### Desktop Radiance



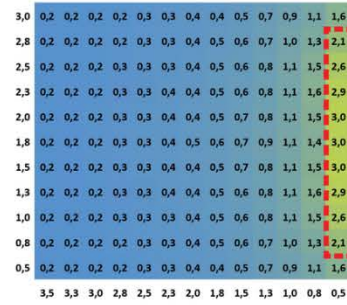
### Ecotect



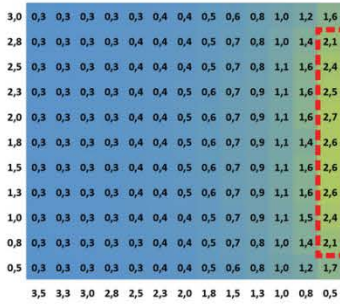
### IESve



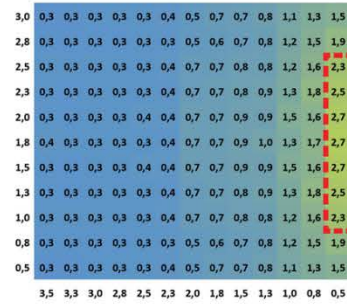
### VELUX Daylight Visualizer



### DIALux

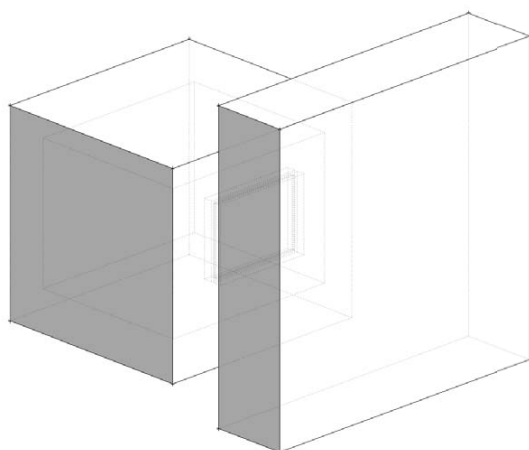


### LightCalc



Figur 24: Rum med omgivelser - Beregningsark

## RUM 3 - RUM MED OMGIVELSER – Analyseark



Tabel 10 og figur 25 viser dagslysfaktorværdier i det simulerede rum.

Ud fra tabellen og figuren kan det aflæses at den maksimale gennemsnitlige dagslysfaktor er 1,2% (Ecotect), og den mindste gennemsnitlige dagslysfaktor er 0,7% (VELUX Daylight Visualizer, Desktop Radiance, DIALux). Resultaterne viser klart, at Ecotect simuleringerne adskiller sig meget fra de andre resultater, de er generelt højere. Derfor undlades Ecotect-resultaterne fra gennemsnitsbetragtningen, og den maksimale gennemsnitlige dagslysfaktor 0,9% (Relux radiosity og Relux Ray tracing). Det betyder, at variationen mellem den maksimale og mindste gennemsnitlige dagslysfaktor er 25%. Standardafvigelsen for den gennemsnitlige dagslysfaktor i "rum med omgivelser" er en dagslysfaktor på 0,08% svarende til simuleret standardafvigelse i forhold til gennemsnittet på  $\pm 10,4\%$ .

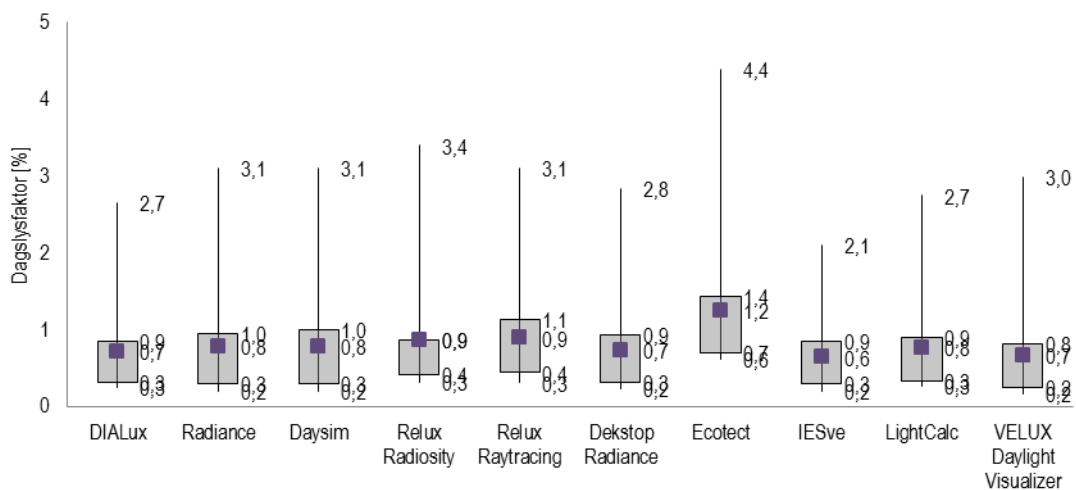
Desuden er det værd at notere sig IESve simuleringresultaterne. Den maksimale dagslysfaktor for dette simuleringprogram er bemærkelsesværdigt lavere i forhold til de andre simuleringprogrammer. Det forventes at denne afvigelse skyldes den geometriske opbygning af modellen i IESve, eller at default simuleringparametrene ved en simulering med 'højeste nøjagtighed' i IESve ikke er gode nok til at tage højde for omgivelser. Radiance er beregningskernen i IESve. Når man udfører Radiance-beregninger skal man angive hvor mange interrefleksioner der anvendes i simuleringerne ('ambient bounces'). I nærværende rapport blev der i Daysim og Radiance simuleringerne anvendt 'ambient bounces' på 7, hvorimod standard IESve-indstillingen er 3. Når en praktiker anvender IESve og bruger den højeste nøjagtighed i hans/hendes simulering, vil han/hun naturligvis forvente, at programmet producerer pålidelige resultater. Men når det drejer sig skyggevirksomhed fra modstående bygninger, synes dette ikke at være tilfældet.

Figur 26 viser afstanden fra facaden, hvor en dagslysfaktor på 2 opnås. Fra figuren ses det tydeligt, at Ecotect beregningerne igen afviger kraftigt fra resultaterne opnået med de andre programmer. Ecotect er derfor ikke taget med i den videre bearbejdning af resultaterne for dagslysets indtrængningsdybde. IESve programmet resulterer i den laveste dagslysendtrængningsdybde på 0,55 m, og den maksimale dagslysendtrængningsdybde på 0,73 m blev opnået med Relux Raytracing programmet. Dette giver en forskel i dagslysendtrængningsdybder på 25% mellem maksimal og minimal afstand. Standardafvigelsen er 0,06 m, hvilket giver en standardafvigelse på  $\pm 8,7\%$  i forhold til gennemsnitsværdien.

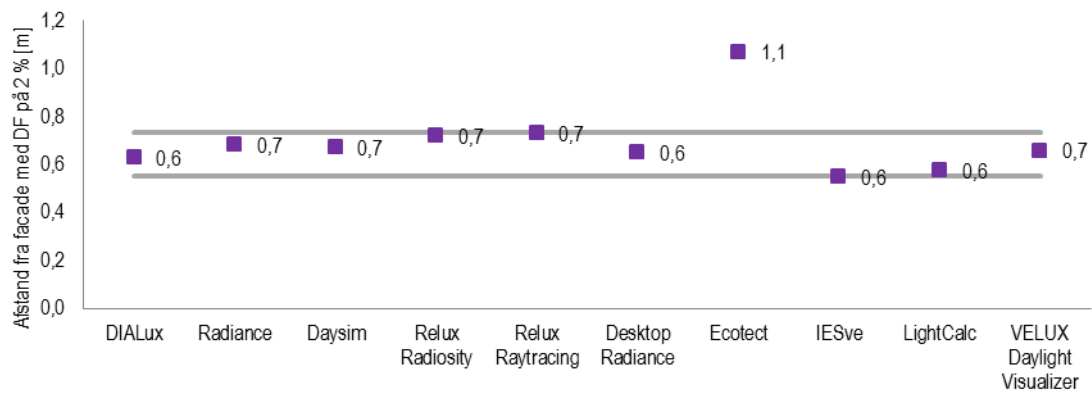
Bortset fra simuleringer med Ecotect, var de undersøgte simuleringssprogrammer i stand til at regne med en obstruktion. Det skal her bemærkes, at i beregningsprogrammet IESve, anvendes den højeste nøjagtighed ved simuleringen. Der er en tendens til, at dette program undervurderer dagslysindfaldet når der regnes med omgivelser. Ecotect er det eneste program, der anvender BRE Split Flux metode til beregning. Denne beregningsmetode er en forenklet metode, og er begrænset ved ikke at regne på gentagne refleksioner af lyset. Dette kan være grunden til, at vi ser denne høje uoverensstemmelse mellem Ecotect og de andre simuleringssprogrammer.

Tabel 10: Dagslysfaktorværdier, angivet som middel, median og maks- og minimumsværdier, samt ensartethed givet ved DFmin/DFmiddel og DFmin/DFmaks

	DIALux	Radiance	Daysim	Relux Radiosity	Relux Raytracing	Desktop Radiance	Ecotect	IESve	LightCalc	VELUX Daylight Visualizer
	DF [%]									
DFmiddel	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,7	1,2	0,6	0,8	0,7
DFmedian	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,5	0,9	0,5	0,6	0,4
DFmin	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,6	0,2	0,3	0,2
DFmaks	2,7	3,1	3,1	3,4	3,1	2,8	4,4	2,1	2,7	3,0
	Ensartethed									
DFmin/DFmiddel	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2
DFmin/DFmaks	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1



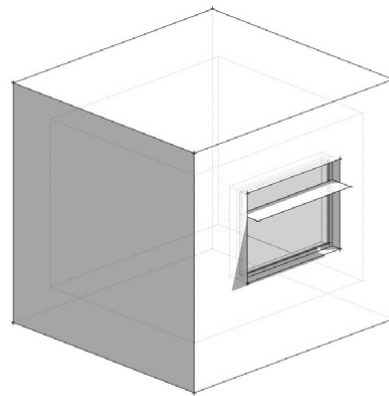
Figur 25: Boxplot af dagslysfaktor for rum med omgivelser simuleret i de forskellige beregningsprogrammer



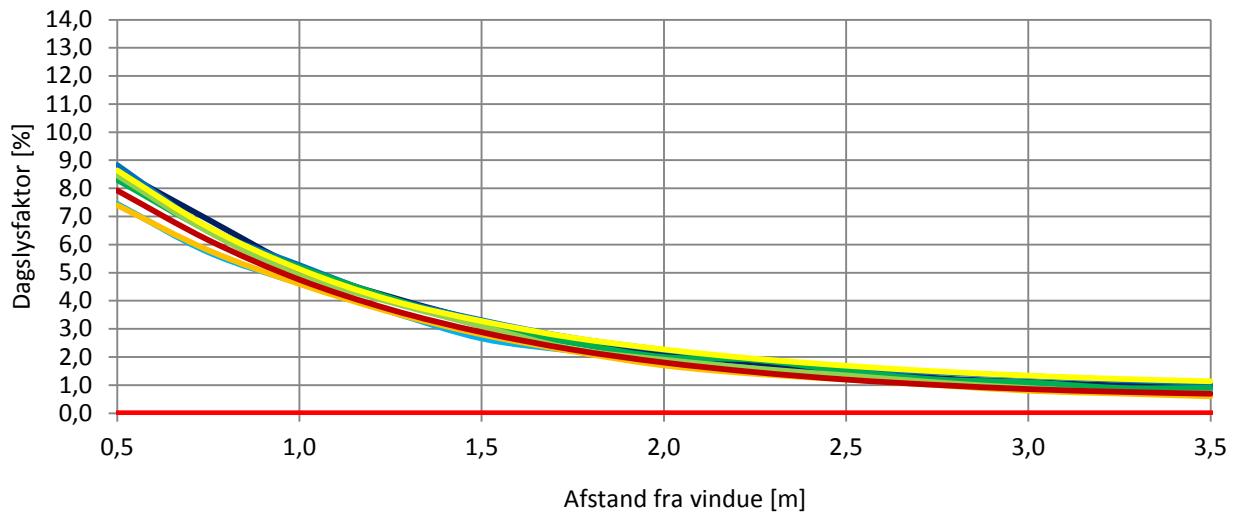
Figur 26: Afstand fra facaden hvor en 2 % dagslysfaktor er opnået for de forskellige beregningsprogrammer



## RUM 4 - RUM MED LYSHYLDE - Beregningsark

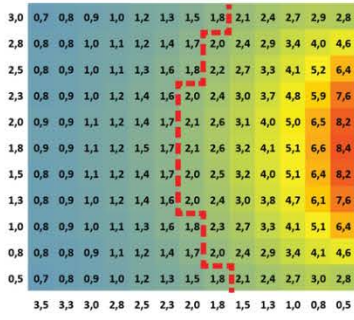


- Radiance
- Desktop Radiance
- Ecotect
- DIALux
- Daysim
- Relux Radiosity
- Relux Raytracing
- IESve
- LightCalc
- VELUX Daylight Visualizer

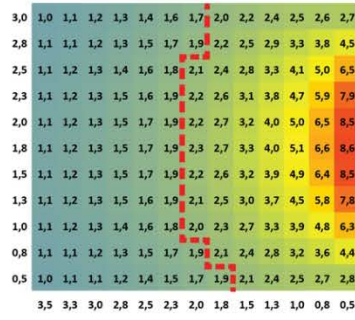


Figur 27: Dagslysfaktorniveau gennem rummet

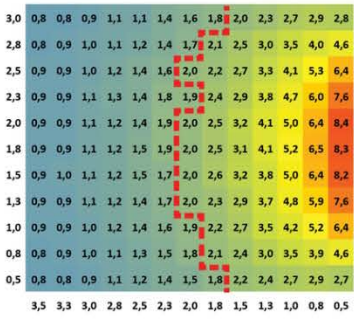
### Radiance



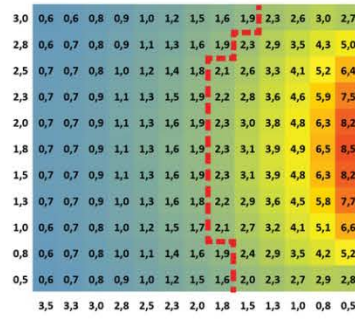
### Relux - Raytracing



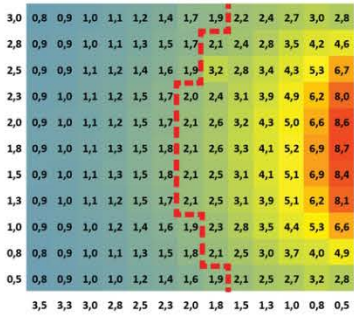
### Daysim



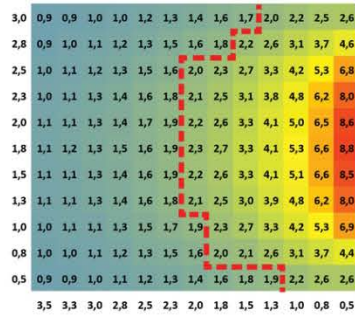
### Relux - Radiosity



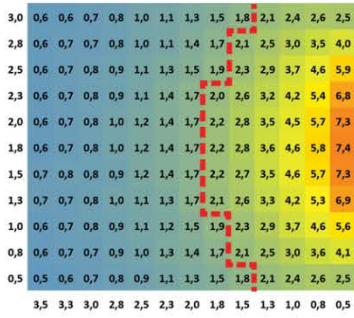
### Desktop Radiance



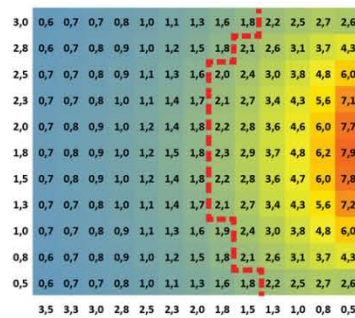
### Ecotect



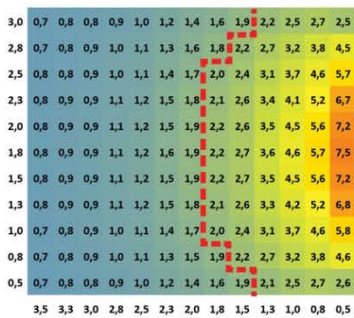
### IESve



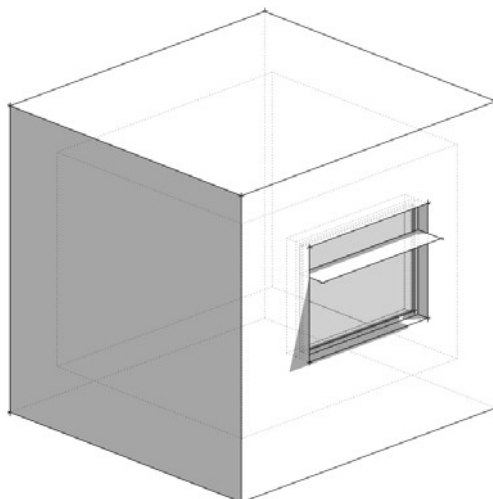
### VELUX Daylight Visualizer



### DIALux



## RUM 4 - RUM MED LYSHYLDE – Analyseark



Tabel 11 og figur 29 viser dagslysfaktorværdier for det simulerede rum. Fra tabellen og figuren ses det, at den maksimale gennemsnitlige dagslysfaktor er 2,6% (Relux raytracing og Desktop Radiance), og den mindste gennemsnitlige dagslysfaktor er 2,1% (IESve). Den relative forskel i gennemsnitlig dagslysfaktor mellem maks- og minværdier er 18%, og standardafvigelsen er  $\pm 6,6\%$ .

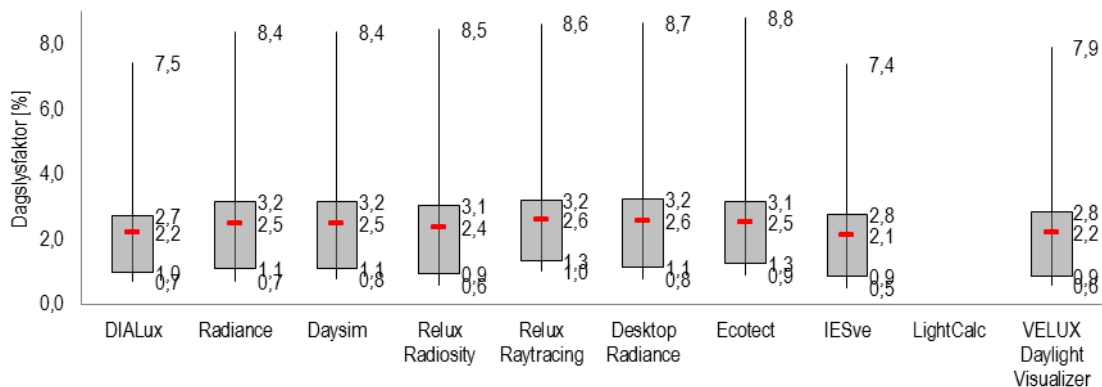
Når man sammenligner den gennemsnitlige dagslysfaktor for Rum 4, med lyshylde, med det simple rum (Rum 1), ses det, at den gennemsnitlige dagslysfaktor for rummet med lyshylden lavere. Dette skyldes, at der ved simulering med en standard overskyet himmel kommer mindre lys ind i lokalet på grund af lyshylden, der har samme virkning som et udhæng. En lyshylde har til formål at reflektere en del af dagslyset længere ind i rummet. Denne effekt kan ikke aflæses i en dagslysfaktorsimulering, hvor det diffuse lys fra den overskyede himmel reflekteres med en jævn fordeling i lyshylden.

Figur 30 viser afstanden fra facaden hvor en dagslysfaktor på 2% kan opnås. Fra figuren kan det aflæses at den mindste dagslysendtrængningsdybde er 1,8 m fra facaden (IESve) og den maksimale dagslysendtrængningsdybde er 2,2 fra facaden (Relux raytracing og Ecotect). Dette betyder, at der er en forskel på 0,4 m mellem den maksimale og minimale afstand fra facaden, hvor 2% dagslysfaktor opnås for alle de anvendte simuleringer. Dette svarer til en forskel mellem største og mindste dagslysendtrængningsdybde på 21%. Standardafvigelsen er 0,14 m svarende til en standardafvigelse på  $\pm 6,7\%$ .

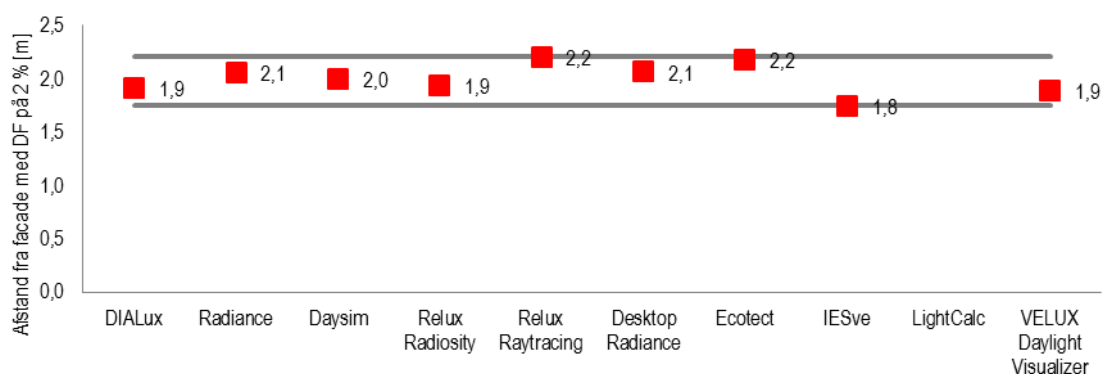
LightCalc var ikke i stand til at simulere lyshylden. Men resten af programmerne var i stand til at simulere lyshylden, som en hylde med en reflektans på 0,5.

Tabel 11: Dagslysfaktorværdier, angivet som middel, median og maks og minimumsværdier, samt ensartethed givet ved DFmin/DFmiddel og DFmin/DFmaks

	DIALux	Radiance	Daysim	Relux Radiosity	Relux Raytracing	Desktop Radiance	Ecotect	IESve	LightCalc	Velux Daylight Visualizer
	DF [%]									
DFmiddel	2,2	2,5	2,5	2,4	2,6	2,6	2,5	2,1		2,2
DFmedian	1,6	1,8	1,9	1,6	2,0	1,9	1,8	1,5		1,6
DFmin	0,7	0,7	0,8	0,6	1,0	0,8	0,9	0,5		0,6
DFmaks	7,5	8,4	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	7,4		7,9
	Ensartethed									
DFmin/DFmiddel	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,4	0,2		0,3
DFmin/DFmaks	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1

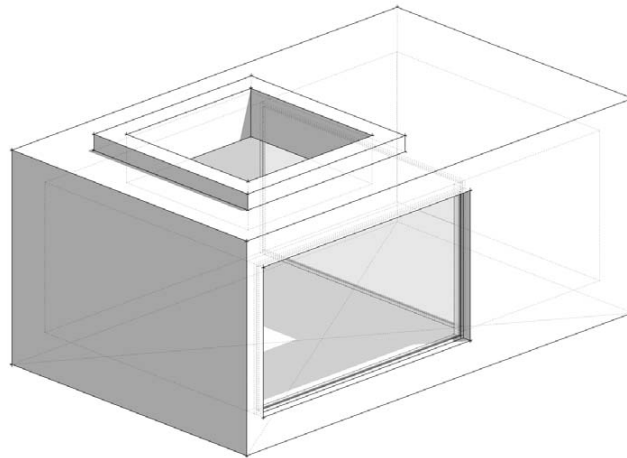


Figur 29: Boxplot af dagslysfaktor for rum med lyshyde simuleret i de forskellige beregningsprogrammer

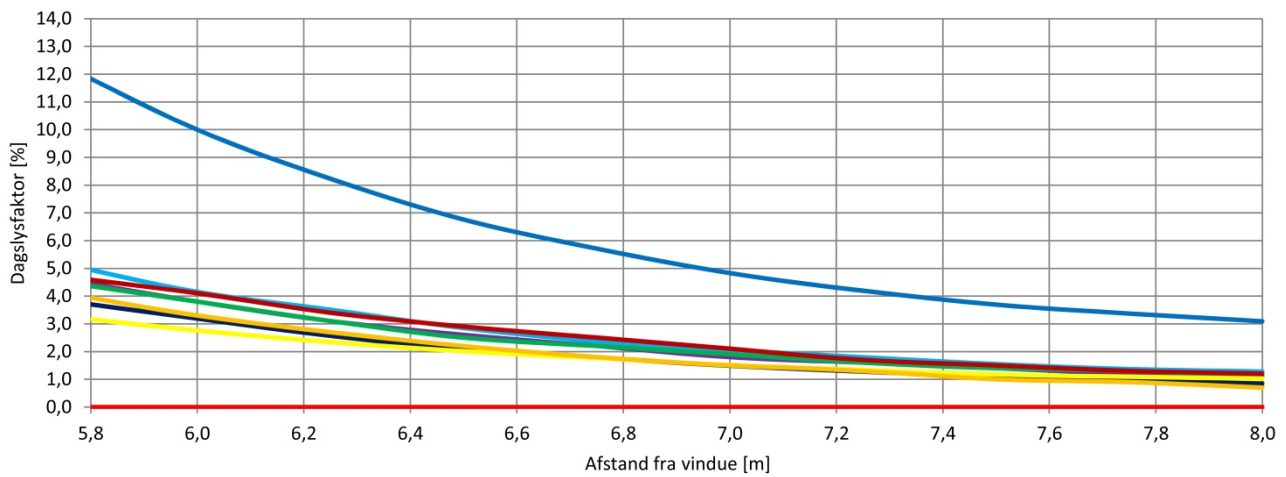


Figur 30: Afstand fra facaden hvor en 2 % dagslysfaktor er opnået for de forskellige beregningsprogrammer

## RUM 5 - RUM MED LÅNT LYS - Beregningsark



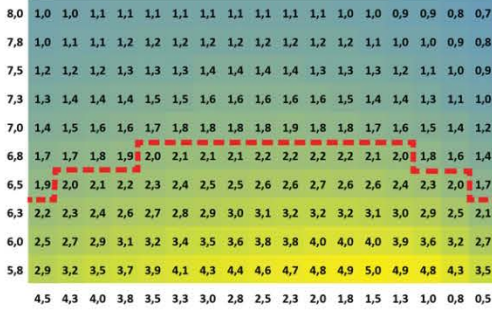
- Radiance
- Desktop Radiance
- Ecotect
- DIALux
- Daysim
- Relux Radiosity
- Relux Raytracing
- IESve
- LightCalc
- VELUX Daylight Visualizer



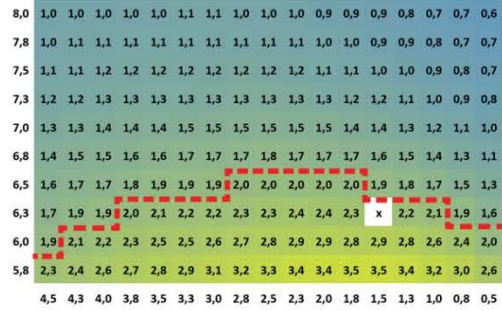
Figur 31: Dagslysfaktorniveau gennem rummet



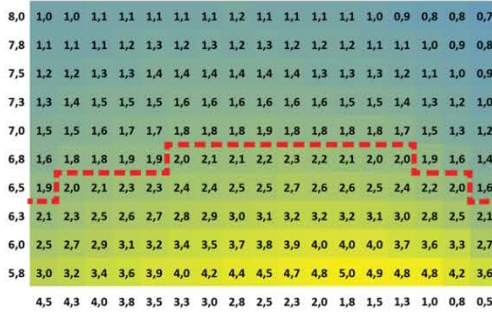
### Radiance



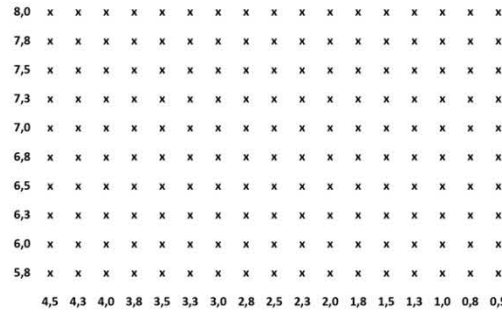
### Relux - Raytracing



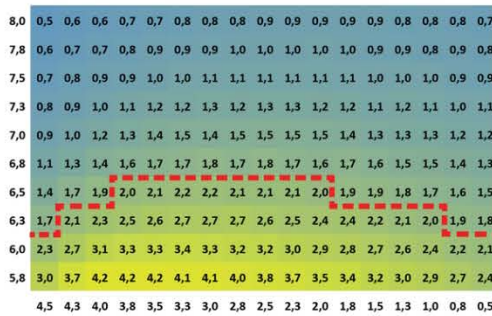
### Daysim



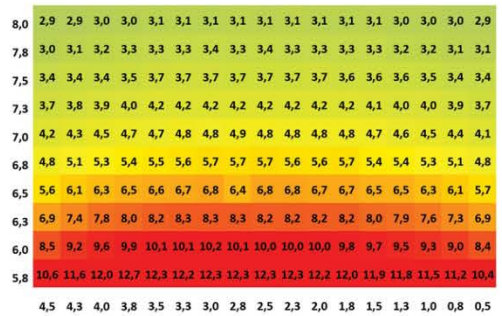
### Relux - Radiosity



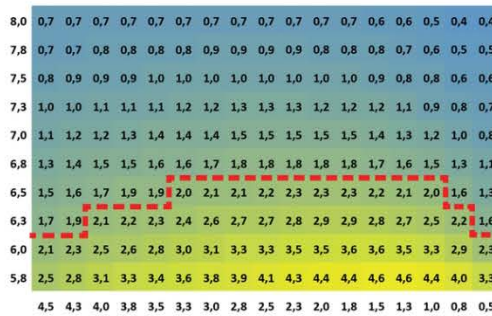
### Desktop Radiance



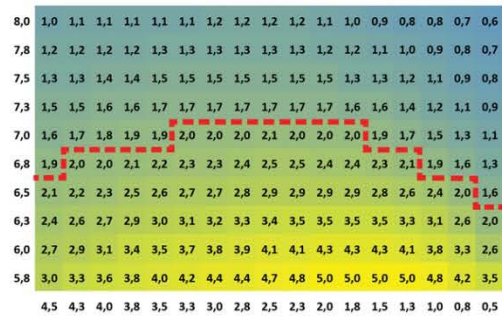
### Ecotect



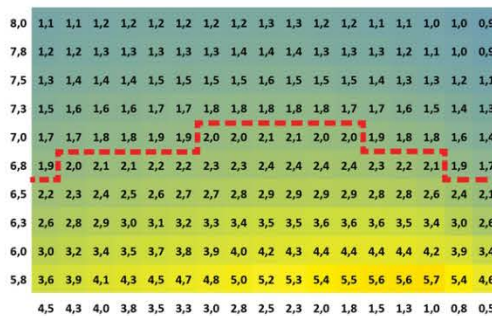
### IESve



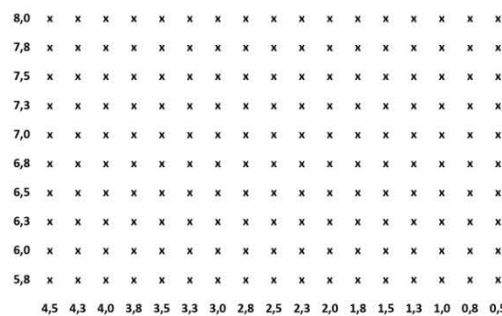
### VELUX Daylight Visualizer



### DIALux

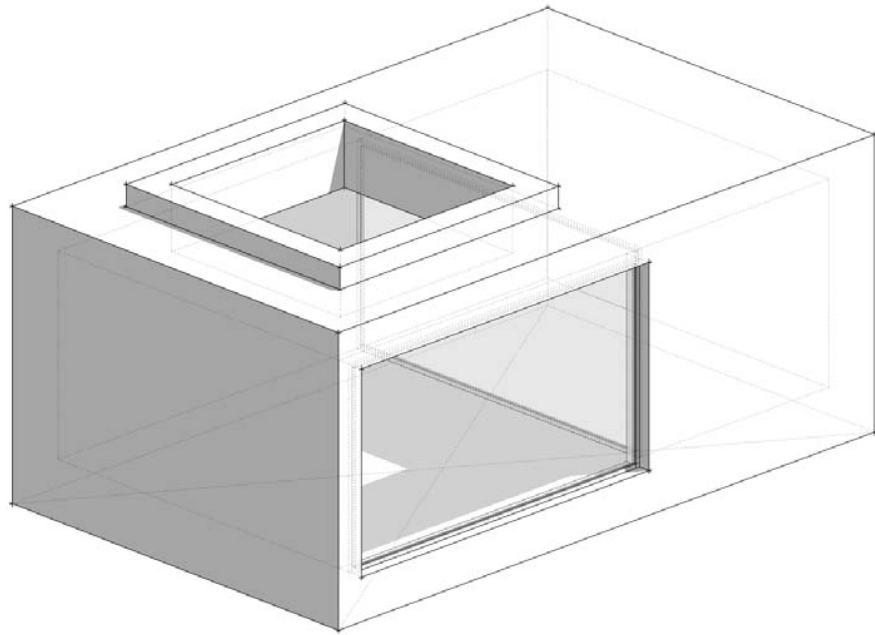


### LightCalc



Figur 32: Rum med lånt lys - Beregningsark

## RUM 5 - RUM MED LÅNT LYS - Analyseark



Tabel 12 og figur 33 viser dagslysfaktorværdier for det simulerede rum. Fra tabellen og figuren kan det tydeligt aflæses at resultaterne fra Ecotect adskiller sig væsentligt fra de andre. Her opnås en gennemsnitlig dagslysfaktor på 6 % mod gennemsnitlige dagslysfaktorer i intervallet fra 1,7% til 2,4% for de andre programmer. Denne store forskel skyldes begrænsninger i split flux metoden, som anvendes i Ecotect.

Når Ecotect resultaterne ikke tages med i betragtning er den maksimale gennemsnitlige dagslysfaktor 2,4% (DIALux) og den mindste gennemsnitlige dagslysfaktor er 1,7% (Relux Raytracing, Desktop Radiance, IESve). Forskellen mellem største og mindste gennemsnitlige dagslysfaktor er 31%. Standardafvigelsen for dette rum er en DF på 0,24%, svarende til standardafvigelse på  $\pm 9,5\%$  i forhold til gennemsnitlig dagslysfaktor.

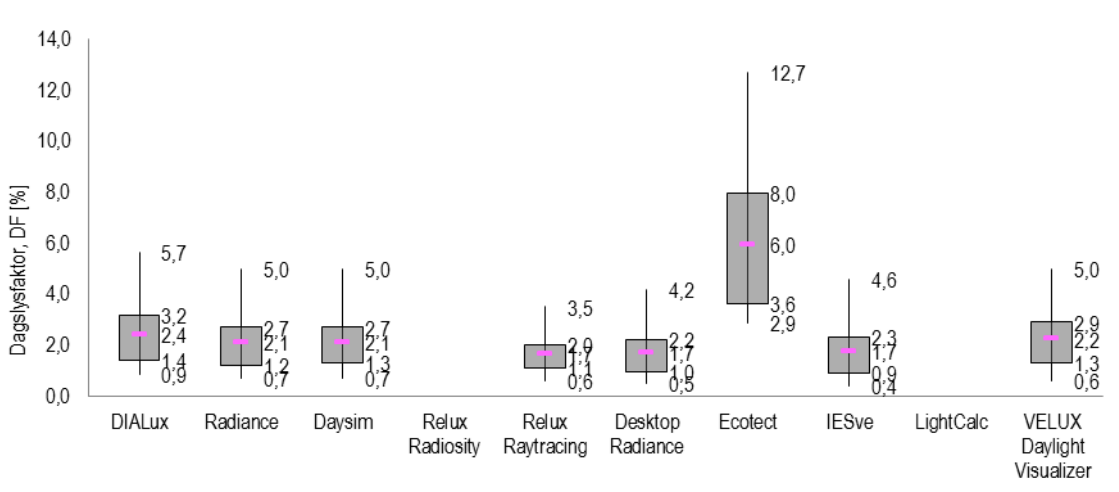
Der er ikke foretaget en analyse af dagslyset indtrængningsdybde i dette rum, da det er et indre rum med "lånt lys".

Tabel 12: Dagslysfaktorværdier, angivet som middel, median og maks og minimumsværdier, samt ensartethed givet ved DFmin/DFmiddel og DFmin/DFmaks

	DF [%]									
DFmiddel	2,4	2,1	2,1		1,7	1,7	6,0	1,7		2,2
DFmedian	2,0	1,8	1,8		1,5	1,4	4,8	1,5		2,0
DFmin	0,9	0,7	0,7		0,6	0,5	2,9	0,4		0,6
DFmaks	5,7	5,0	5,0		3,5	4,2	12,7	4,6		5,0

Ensartethed										
DFmin/DFmiddel	0,4	0,3	0,3		0,4	0,3	0,5	0,2		0,3
DFmin/DFmaks	0,2	0,1	0,1		0,2	0,1	0,2	0,1		0,1



Figur 33: Boxplot af dagslysfaktor for rum med lånt lys, simuleret i de forskellige beregningsprogrammer



# Vurdering af de ni dagslysberegningsprogrammer

En samlet vurdering af de ni beregningsprogrammer ift. deres beregningsmetode, evne til at beregne på de fem typer af rum, deres output, brugervenligheden og pris er gengivet i tabellen nedenfor.

	Radiance	Desktop Radiance	Daysim	VELUX Daylight Visualizer	DIALux	Ecotect	IESVE	LightCalc	Relux*
<b>Beregningsmetode</b>	Backward raytracing	Backward raytracing	Backward raytracing	Bidirectional raytracing with photon mapping and irradiance caching	Radiosity	BRE Split Flux	Backward raytracing	Forward raytracing and radiosity	Radiosity og backward raytracing
<b>Programmets evne til at regne på de fem rum</b>									
1. Simpelt rum	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Ja	ja	ja
2. Dybt rum	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Ja	ja	ja
3. Rum med omgivelser	ja	ja	ja	ja	ja	nej	Ja	ja	ja
4. Rum med lyshylde	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Ja	nej	ja
5. Rum med lånt lys	ja	ja	ja	ja	ja	nej	Ja	nej	Ja/Nej**
<b>Output</b>									
Dagslysfaktor og illuminance	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Gennemsnitlig dagslysfaktor	ja	ja	ja	ja	nej	ja	Ja	ja	ja
<b>Brugervenlighed</b>									
Generelt interface	-2	-2	-1	2	1	2	1	0	1
Opbygning af geometrisk model i programmet	-2	-2	Ikke muligt	2	0	1	0	2	0
Import af geometrisk model i program	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Ja	ja	ja
Filtyper***	.obj .skp .disxml .dxf .mgf	.obj	.eco .skp .3ds .rad	.obj .skp .dwg .dxxf	.skp .sat .m3d .3ds	.obj .dwg .dxf	.skp .3ds .rvt	.skp	.skp .3ds .dxf .wrl
Grafisk behandling af resultater	0	-1	-2	2	1	2	-1	-2	1
<b>Brugerlicens</b>	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja	Nej	Nej

\*Relux kan anvende to beregningsmetoder til dagslyssimulering, radiosity og raytracing

\*\*Ja: Relux Raytracing kan regne på indeliggende rum. Nej: Relux Radiosity kan ikke regne på indeliggende rum.

\*\*\*filtyper, der kan importeres i programmerne, som forfatterne af nærværende rapport har registreret ved granskning af programmerne. Der kan muligvis importeres andre filtyper.

-2 = meget dårlig / meget svær, -1 = mindre god / lidt svær, 0 = middel, 1 = godt / let, 2 = meget god / meget let

# Referencer

- Christoffersen, J., Johnsen, K. & Petersen, E. (2002). *Beregning af dagslys i bygninger (SBI-Anvisning 203)*. Statens Byggeforskningsinstitut. Hørsholm.
- CIE. (2003) Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky. *CIE Standard, CIE S 011/E:2003*.
- CIEEx005. (1992) *Proceedings of the CIE Seminar 1992 on "Computer Programs for Light and Lighting"*. CIE.
- EN12193. (2007) Light and lighting - Sports lighting. *Brussels: European committee for standardization*.
- EN12464-1. (2011) Light and lighting - lighting of work places - part 1: indoor work places. *Brussels: European committee for standardization*.
- EN12464-2. (2007) Lighting of work places - Part 2: Outdoor work places. *Brussels: European committee for standardization*.
- Ibarra, I.D. & Reinhart, C.F. (2009) DAYLIGHT FACTOR SIMULATIONS – HOW CLOSE DO SIMULATION BEGINNERS “REALLY” GET ? *Building Simulation 2009, Eleventh International IBPSA Conference* pp. 196–203. Glasgow, Scotland, July 27-30.
- Johnsen, K. & Christoffersen, J. (2008). *Dagslys i rum og bygninger. (SBI-anvisning 219)* Statens byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. København.
- Labayrade, R., Jensen, H.W., Jensen, C., Lyon, U. De, Ecole, F., Publics, T., Etat, D., Génie, D. & Audin, M. (2009) VALIDATION OF VELUX DAYLIGHT VISUALIZER 2 AGAINST CIE 171 : 2006 TEST CASES. *Building Simulation 2009, Eleventh International IBPSA Conference* pp. 1506–1513.
- Larson, G.W. & Shakespeare, R. (1998) *Rendering with Radiance - The Art and Science of Lighting Visualization*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.
- Mardaljevic, J. (1995) Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. *Lighting Research and Technology*, **27**.
- Reinhart, C.F. (2010) *Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design*.
- Reinhart, C.F. & Andersen, M. (2006) Development and validation of a Radiance model for a translucent panel. *Energy and Buildings*, **38**, 890–904.
- Reinhart, C.F. & Walkenhorst, O. (2001) Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, **33**, 683–697.
- Watt, A. (2000) *3D Computer Graphics*. Pearson Education Limited.

Erfaringer har vist, at beregningsresultaterne fra to beregningsprogrammer til dagslysberegning kan være meget forskellige i det samme rum. Det kan skyldes begrænsninger i selve beregningsprogrammet og/eller de personer, der laver modellerne. Dette er kritisk, da dagslysberegningerne bruges til at eftervise, at Bygningsreglementets krav om en dagslysfaktorværdi er overholdt og til at beregne behovet for kunstig belysning.

Formålet med denne rapport er at opnå en bedre forståelse af, hvad en dagslysberegning viser, og hvordan de forskellige beregningsprogrammer beregner i forhold til hinanden. Derudover er formålet at give en viden om, hvordan man rent modelteknisk skal opbygge sin dagslysmodel.

Ni forskellige simuleringsprogrammer er undersøgt og sammenlignet. Det drejer sig om:

Radiance, Daysim, VELUX Daylight Visualizer, Dialux, Ecotect, Ecotect / Radiance, IESve, Light-Calc, Relux Radiosity og Relux Raytracing.

Med en større viden om de forskellige tilgængelige beregningsprogrammer og nøjagtigheden af de resultater, man kan opnå i disse programmer, kan kvaliteten af den rådgivning, der ydes inden for dette felt, højnes.

Projektet er støttet af

**COWIfonden**



1. udgave, 2013

ISBN 978-87-92739-43-8