



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Effekt af træer som solafskærmning

Rohde, Lasse; Jeppesen, Mads Panfil; Sarey Khanie, Mandana

Publication date:
2024

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Rohde, L., Jeppesen, M. P., & Sarey Khanie, M. (2024). *Effekt af træer som solafskærmning*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. DCE Technical Reports Nr. 321

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 providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



BUILD
AALBORG UNIVERSITET



Effekt af træer som solafskærmning

**Lasse Rohde
Mads Panfil Jeppesen
Mandana Sarey Khanie**

ISSN 1901-726X
Technical Report No. 321

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri, By og Miljø
Sektionen for Energi og Bæredygtighed i Byggeriet

BUILD Technical Report

Effekt af træer som solafskærmning

Lasse Rohde
Mads Panfil Jeppesen
Mandana Sarey Khanie

April 2024

© Aalborg Universitet

Udgivet 2024 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD)
Thomas Manns Vej 23
DK-9220 Aalborg Ø, Danmark

ISSN 1901-726X
Technical Report No. 321

Sammenfatning

Denne rapport beskriver udvalgte dele af resultaterne fra projektet: "Træers forbedring af inde- og mikroklima i og omkring bygninger i Danmark - Reducering af projekt", som er støttet af Realdania. En egentlig slutrapport med formidling til byggebranchen blev fravalgt igennem den reducerede ansøgning, så formålet med denne rapport, er at gøre den indsamlede viden og erfaringer tilgængelige for andre.

Rapportens formål består af to dele, herunder:

- 1) at formidle den indsamlede viden om træers effekt som solafskærmning til beslutningsstøtte eller som input til termiske bygningssimuleringer, og
- 2) at dele erfaringer fra projektet, som kan anvendes til at informere fremtidige studier af emnet.

Rapporten dokumenter dele af det materiale projektgruppen har udviklet over en 3-årig periode. Det oprindelige projekt indeholdt flere arbejdsopgaver end det reducerede projekt, hvorfor nogle parter kun bidrog i de indledende projektfaser.

Projektdeltagerne for hele det oprindelige projekt er vist nedenfor på firmaniveau, men indholdet af denne rapport består primært af bidrag fra bevillingsmodtager Søren Jensen, DTU og AAU BUILD, samt simuleringer udført af Paul Sabatier University i Toulouse. Bemærk at dele af det udførte projekt ikke er udeladt fra denne rapport, herunder en arbejdsopgave med fysiske målinger primært udført af New Nordic Engineering (NNE).

| | |
|--------------------------|---|
| Søren Jensen | Projektledelse, økonomi og afrapportering til Realdania. Ansvarlig for indeklimasimulering og medvirkende i alle øvrige arbejdsopgaver. |
| AAU BUILD | Dagslysekspertise i de første faser af projektet. Ansvarlig for simuleringstrategi og parametermatrix, samt rapportering af simuleringresultater. |
| Paul Sabatier University | Ansvarlig for modellering og simulering i DART, herunder scripts til databehandling og tilpasning af 3D-geometri af træer. |
| NNE | Fysiske målinger og udvikling af metode til databehandling. |
| JaJa | Sparring omkring valg af træer i det indledende arbejde. |
| Aart | Input til det indledende arbejde. |
| DTU | Databehandling af simuleringresultater fra DART, samt ekspertviden om dagslys. |
| KU | Ekspertviden omkring træer i de senere projektfaser, herunder vækstmønstre og geometri ved skalering af 3D-modeller af træer. |

Kort opsamling af resultater:

- Træer har et potentiale som supplerende solafskærmning, særligt for facader med østlig og vestlig orientering
- Træer kan reducere passiv solvarme uden at reducere udsynskvaliteten
- Træer skal indtænkes som en del af en samlet løsning for energi- og indeklimaperformance for at opnå tilstrækkelig regulerende effekt
- Vejledende skyggefaktorværdier opgives for 5 træsorter med sæsonvariationer af krone/blade
- Designguides til beslutningsstøtte i tidlige designfaser, viser skyggeeffekten for et simuleret løsningsrum i en række tabeller og grafer

Indholdsfortegnelse

| | |
|--|---------|
| 1. Indledning..... | side 07 |
| Formål | |
| Metode | |
| Involverede parter | |
| 2. Simulering af afskærmningsfaktorer..... | side 11 |
| Hvorfor simulering? | |
| Resultater for afskærmningsfaktorer | |
| Designguides | |
| Resultater for designguides | |
| Grafer til beslutningsstøtte | |
| Diskussion | |
| Delkonklusion | |
| 3. Indeklimasimulering med afskærmningsfaktorer..... | side 37 |
| Implementering af afskærmningsfaktor | |
| Simuleringsresultater | |
| 4. Diskussion..... | side 43 |
| 5. Konklusion..... | side 45 |
| 6. Bilag..... | side 48 |
| Træliste til simulering | |
| Trægeometri | |
| Grafer for fordeling over dagen | |
| Grafer for det synlige spektrum vs. det fulde spektrum | |
| Simuleringsstrategi | |

1. Indledning

-Formål og metode

Formål

Projektets formål er beskrevet i ansøgningen: "Formålet med projektet er at få skabt valide data for karakterisering af træernes effekt på inde- og mikroklima i en dansk kontekst, og med dette udgangspunkt at opstille retvisende algoritmer, som kan implementeres i indeklimasimuleringer, energirammeberegninger og planlægning.". Dette har været projektholdets mål igennem projektet, omend metoden har udviklet sig undervejs og dele af den oprindelige opgave er blevet beskåret.

Hvis træer i højere grad kan benyttes som solafskærmning i stedet for mekanisk køl eller automatisk styret solafskærmning, vil det være en gevinst både for energiforbrug, CO₂ balance, biodiversitet mm. Udfordringen for mange rådgivere er, at det er svært at kvantificere effekten af træer på fx kølebehovet. Det har derfor været projektholdets mål at give et kvalificeret bud på, hvordan man indregner denne effekt, så træer i højere grad kan benyttes som et designparameter og benyttes som en dynamisk solafskærmning.

Metode

Hvad er solafskærmning?

Der findes en række forskellige typer solafskærmning, som opfører sig forskelligt under varierende forhold. Nogle er simple, mens andre er dynamiske - på hver deres måde. For at forstå, hvordan træer fungerer som solafskærmning – og evt. se den som erstatning for anden type afskærmning eller for at reducere kølebehovet – er grundprincipperne i forskellige afskærmningstyper kategoriseret nedenfor:

1. **Ingen solafskærmning.** Den energi der rammer facaden, reduceres kun af vinduets G-værdi inden den når rummet.
2. **Fast solafskærmning.** Er konstant aktiv, men effektiviteten afhænger af facadens orientering og solens placering på himlen. For udhæng og vandrette lameller er solhøjden afgørende (mest effektiv for [sæson: sommer], og [tid: middag]), mens facadens orientering er afgørende for sidefinner og lodrette lameller.
3. **Bevægelig solafskærmning.** Aktiveres efter behov, enten manuelt betjent eller med styring, fx efter solindstråling på facaden. Afhængig af afskærmningens udformning kan den enten fungere som 'on/off' eller med flere trin fx delvist nedrullede gardiner eller delvist lukkede persienner.
4. **Skygger fra kontekst.** Er konstant aktiv, men effektiviteten afhænger af geometriske forhold omkring de skyggende objekter, fx højden, bredden, og især afstanden til facaden. Bemærk at effekten på direkte solindstråling kan variere meget drastisk med solhøjden, hvor facaden kan gå fra at være helt i skygge til i fuld sol med en lille ændring i solhøjden (pga. årstid eller tid på dagen).

Eftersom træer er et skyggende objekt i en bygnings omgivelser, hører træer til i kategori 4 og opfører sig lang hen ad vejen som beskrevet ovenfor. Men som solafskærmende objekter er træer lidt mere komplekse end fx bygninger, som illustreret nedenfor:

- **Træer er delvist transparente.** Graden af transparens afhænger både af træsorten, træets alder/størrelse, kronens udformning mm.
- **Træer er sæsonafhængige.** Graden af transparens ændrer sig flere gange hen over året (for løvfældende træer).
- **Træer vokser.** Træets dimensioner er delvist proportionelle med træets alder, hvilket ændrer de geometriske forhold mellem træ og facade. Desuden øges kronens tæthed (og transparensen falder) med alderen.
- **Træer kan tilpasses.** Træer skal beskæres, og nogle gange tyndes der ud i en gruppe træer, for at give plads til de resterende træer. Træer kan også blive syge og må fældes.
- **Træer kan planlægges.** I modsætning til eksempelvis nabobygninger, kan solafskærmende træer indtænkes i planlægningsfasen og placeres med den ønskede afstand, tæthed mm.
I dette projekt ligger fokus på at finde relative reduktionstal af den energi, der når facaden for at dokumentere den effekt træerne kan have som solafskærmning, både ift. energi og lys.

Metoden generelt

Metoden til at måle afskærmningsfaktoren i dette projekt er i princippet det samme om det gøres fysisk eller digitalt. Sollyset på en fri vægflade sammenlignes med sollyset på en vægflade der skygges af et træ. Differencen mellem de to energiniveauer er den afskærmende effekt og forholdet imellem dem er afskærmningsfaktoren. Dermed er metoden i princippet ret enkel. Men et træ er ikke en homogen masse med fast defineret omkreds, og dermed varierer afskærmningseffekten alt efter hvor på træet der måles. Ligeledes er der store forskelle på forskellige trætyper og vækstforhold, og beskæring giver meget forskellige trægeometrier.

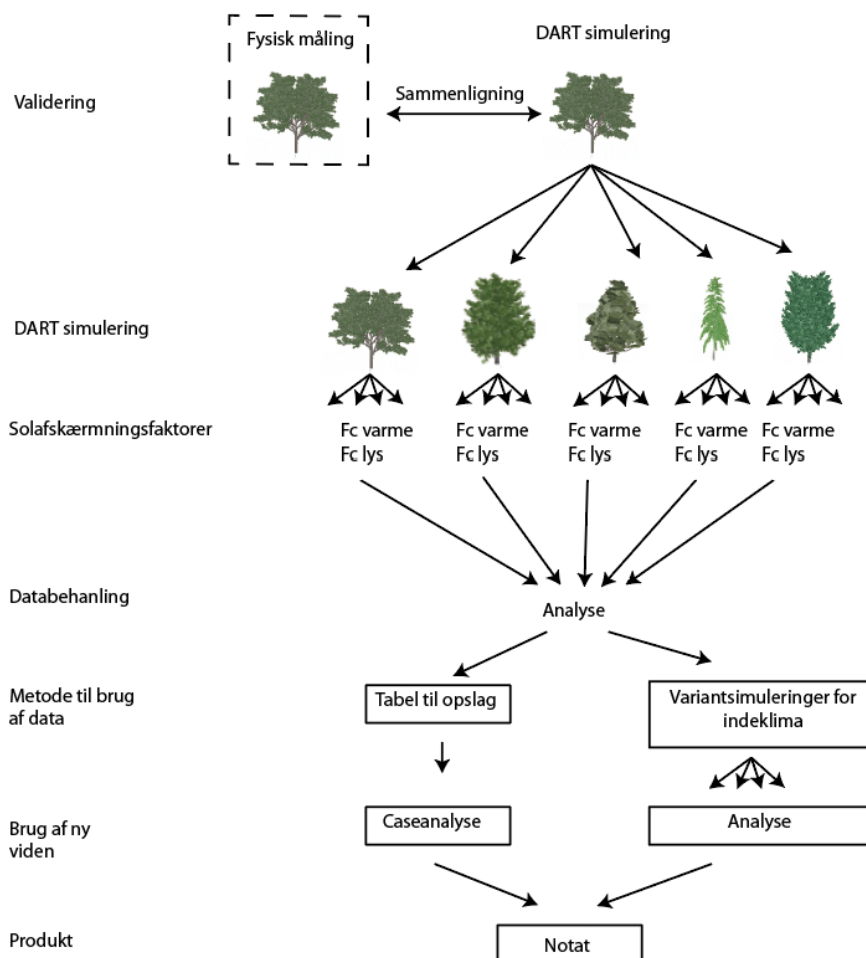


Figur 1 - Sammenligning af 5 billeder med forskellige frekvenser af en belyst plade med skygge sammenlignet med 5 billeder uden skygge indenfor samme frekvensområde.

Da lysintensiteten vil være forskellig i forskellige frekvenser, vil afskærmningsfaktoren have forskellig effektivitet afhængig af om fokus er på det termiske indeklima eller visuelt indeklima. Da indeklimatekninger ofte består af analyser for overtemperaturer og dagslysmængde, vil det ønskværdigt med en høj afskærmning for den termiske påvirkning, men lav for dagslyset. I praksis vil det være et trade off, hvor der skal findes en balance imellem skyggevirkning og dagslystilstrømning.

Fysiske målinger var omdrejningspunktet for projektet i de tidligere stadier, men det viste sig i praksis at være problematisk ift. at afdække et løsningsrum med flere variable grundet det lave antal målinger, der ville være mulige at udføre. Derudover kommer bindinger og påvirkninger fra vejrlig og årstidernes skiftet. For at kunne undersøge én effekt ad gangen, blev fokus derfor rettet mere på simulerede data, for at opnå en grundforståelse for træers afskærmende potentiale. Denne rapport har som nævnt kun fokus på simuleringsresultaterne.

Enkelte fysiske målinger blev dog udført for at udvikle og teste metoden for de fysiske målinger, samt for at have en referenceværdi for de simulerede data. Dermed har metoden i projektet været som illustreret i på figur 2, hvor der er udvalgt 5 træer til simulering.



Figur 2 - Diagram af metoden

Involverede parter

Projektet som dette arbejde er en del af, har i høj grad været tværfagligt og inddraget en masse parter, med forskellige fagområder. Nedenfor ses et overblik over de forskellige parter og deres ansvarsområder:

Søren Jensen (SJ) har stået for projektledelse og indeklimasimulering samt været deltagende i arbejdet for de andre grupper i det omfang det har været nødvendigt. Desuden har SJ bidraget med praktisk projekterings erfaring med byggeprojekter.

AAU BUILD – Har været ansvarlig for simuleringsstrategien, databehandling og udvikling af parametermatrix og grafer. AAU BUILD har desuden bidraget til metodeudvikling og sparring i de øvrige arbejds pakker.

DTU – Har stået for databehandling af output fra DART og ekspertviden indenfor dagslysområdet.

Paul Sabatier University – Har udført simuleringerne i DART. De har desuden tilpasset eksisterende 3D-geometri af træer, samt implementeret ny himmeltype til brug for netop dette projekt.

KU – Simon Skov fra KU er sent i projektføreløbet blevet kontaktet for sparring omkring træer. I fremtidigt arbejde med træer som afskærmning, bør han inddrages i arbejdet i den tidlige fase for at kunne byde ind med viden om vækstforhold, træpleje og lign.

JAJA – Har bidraget med viden om træer og med udvælgelse af træsorter i de tidlige projektfaser.

AART – Har været med i det indledende arbejde og har erfaring med brug af træer som designparameter igennem projektet Vrå Skole hvor træer skaber skygge ved at blive placeret meget tæt på facaden.

NNE – Har været ansvarlig for de fysiske målinger, som ikke er med i denne rapport. I forhold til fysiske målinger har NNE ydet rådgivning i forbindelse med valg af udstyr samt udvikling af prototype kameraer/sensorer til de fysiske målinger. Prototyperne karakteriserer Low-End udstyr som kalibreres med High-End udstyr, hvor præcision og validitet er højere. For data genereret fra prototyperne har NNE bidraget med opbygningen af en cloud-understøttet dataplatform, hvor målt data kan uploades, processeres og efterfølgende downloades efter behov. Afslutningsvis har NNE gennemført de fysiske målinger ved brug af High-End udstyr samt den tilhørende kalibrering med Low-End udstyr.

Projektet er finansieret af Realdania.

2. Simulering

- Valg af træer og trægeometri

Hvorfor simulering?

Når mellemstore eller større byggeprojekter skal dokumentere risikoen for overtemperatur i en bygning, simuleres forholdene gennem dynamisk bygningssimulering i programmer som IES, IDA ICE, EnergyPlus og BSIM. Her modelleres træer typisk som skyggende objekter på lige fod med fx nabobygninger. Men træers egenskaber for lysgennemtrængning og refleksionen af lyset er meget anderledes, end de er for bygninger. Træers 'lystransmittans' (eller lysgennemstrømning) varierer mellem træsorter og ændrer sig med årstiderne (for løvfældende træer).

Det blev af projektholdet besluttet at fokusere mere på simulerede data i stedet for målte data af flere årsager. En af de primære grunde er at det er svært at udføre variantanalyser på målte data, da der på alle forskellige målinger altid vil være flere parametre, der ændres på samme tid. Ligeledes er et træ et meget stort måleobjekt, som det er svært at måle på samlet i den fysiske verden, hvor digitale måleflader ikke har samme hindringer mht. størrelse. Træers geometri er også så unik fra træ til træ, at det er svært at sammenligne målinger af to forskellige træer og bruge det til at drage konklusioner på andet end blot geometriens indflydelse.

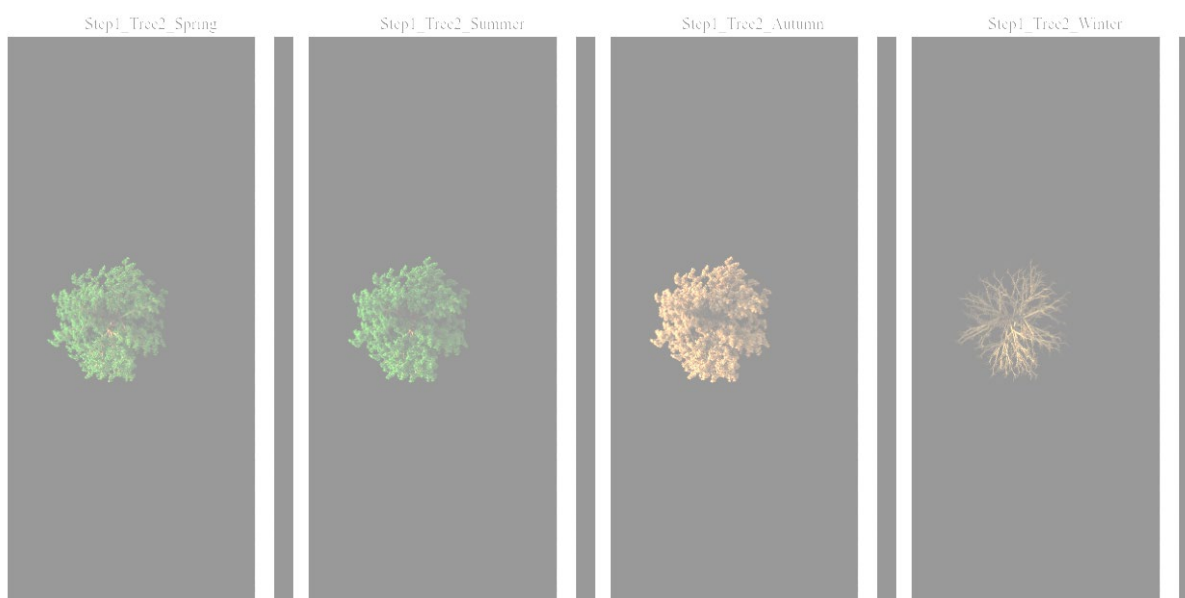
Derfor blev indledt et samarbejde med Paul Sabatier University om at benytte deres simuleringværktøj DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) til simulering af træernes skyggeeffekt. Programmet benyttes primært til simuleringer af lysgennemstrømning til skovbunden i større skovområder, men har også været benyttet til urbane analyser. I dette projekt anvendes programmet for første gang til bygningssimulering i en mindre skala, men da der kun regnes på energi på en facade (og ikke fx energiforbrug og indeklima) er de fysiske forudsætninger for beregningen de samme.

Building Performance Simulation med træer

Træernes indflydelse på mængden af solens energi, der når bygningens facade, er undersøgt via simulering i det avancerede lyssimuleringsprogram DART. I første simuleringsrække indeholder scenen kun et enkelt træ, der kaster sin skygge på en facade. Scenen er opsat, så hele kronens skygge rammer facaden. Den energi der rammer arealet som dækkes af kronen, sammenlignes med tilsvarende areal i en scene uden træet. Forskellen er således trækronens nettobidrag til reduktionen af energi, der når facaden.

Resultatet af er en række tabeller, der indeholder numeriske værdier som input til Building Performance Simulation (BPS) for 5 forskellige træsorter. Værdierne beskriver træets egenskaber ift. at påvirke det lys, der hhv. strømmer igennem kronen og reflekteres af kronen. Dvs. egenskaber for både termisk og visuel performance. Disse egenskaber skal tilføjes træernes geometri i den modellerede scene, hvorefter træet simuleres mere korrekt end med eksisterende praksis.

Hvert træ er simuleret for fire forskellige sæsonvariationer af kronen, hvilket er uddybet i det efterfølgende afsnit. Herunder vises eksempler på scener for træsort 2, der sammenholdes med en scene uden et træ.



Figur 13 – Trækroner ved forskellige årstider

Sæsonafhængige egenskaber for trækroner

Hver trækrone har et sæt egenskaber, der er sæsonafhængige for løvfældende træer. De to længste perioder er vinterkronen helt uden blade, og sommerkronen hvor bladene er store og grønne. Overgangsperioderne er typisk meget kortere. Om efteråret er bladene store og lidt brunlige, mens bladene i foråret er lidt mindre og mere lyse i deres grønne farve. Nogle BPS-værktøjer har allerede introduceret idéen om dynamiske egenskaber, så et stykke geometri kan have forskellige egenskaber til forskellige situationer. Eksempelvis kan man forestille sig et 'schedule', der dikterer, i hvilket datointerval træet skal trække på egenskaberne for sommerkronen. Til dette formål har projektet generet performance-data for træets sæsonvariationer og samlet dem i en række tabeller. Hvis det anvendte BPS-værktøj ikke understøtter dynamiske værdier, vil man skulle simulere for en del af året med ét sæt egenskaber, og gentage proceduren for andre relevante sæsoner.

Træliste

Der blev udarbejdet en liste med forskellige trætyper, som kunne være relevante at undersøge i samarbejde med JAJA arkitekter. Ud fra denne liste blev udvalgt 5 træer til simulering. Disse træer blev valgt ud fra tilvæksthastighed, løvspring og -fældning, lysgennemfald og jordbundsforhold. For en mere detaljeret beskrivelse se "træliste til simulering" i Bilag 1.

Det skal også bemærkes, at trætyperne har forskellig højde ved plantning. Umiddelbart efter plantning er afskærmningseffekten af træerne meget lille, derfor er der i projektet valgt, at der simuleres på afskærmningseffekten 7 år efter plantning. Her er begynder træerne at have en rimelig størrelse krone og er stadig indenfor en rimelig tidshorisont, hvor det er relevant for den nuværende bygherre. Efter 20 eller 30 år er afskærmningseffekten naturligvis væsentlig større, men det er ikke sikkert at brugen af byen er den samme eller, at der ikke er sket større bygningsmæssige ændringer. Derfor er der en generel problematik ved brug af træer som solafskærmning: de fleste bygherrer vil gerne have en effekt nu. Men træer er en langsigtet investering, både mht. biodiversitet og skyggevirkning. De 5 udvalgte træer og deres dimensioner ved plantning og ved simulering er:

| Træ nr. | Navn | Højde ved plantning | Højde efter 7 år |
|---------|--------------|---------------------|------------------|
| 1 | Alm. Robinie | 4-5m | 12 m |
| 2 | Rødel | 7-9 m | 10 -12 m |
| 3 | Platan | 7-9m | 12 m |
| 4 | Vortebirk | 4-5 m | 8 m |
| 5 | Skovfyr | 1-2 m | 6-7 m |

Tabel 8 - De udvalgte træer og deres højder. Skovfyr simuleres lidt senere end efter 7 år, for at få en mere relevant skyggeeffekt



Figur 14 - De fem trætyper i numerisk rækkefølge

Som set i nedenstående tabel vil træerne vokse i forskellige tempo og vil opnå en forskellig størrelse, når de er fuldt udvoksede. Dette skal der naturligvis tages stilling til under projektering i faktiske projekter.

| Trætype Nr. | Træ navn Latin | Tree name English | Trænavn Dansk | Højde: +7 år | Bredde +7 år | Højde: Fuldt udvokset | Bredde: Fuldt udvokset | Blade |
|----------------|-------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | Robinia pseudoacacia | Black Locust "Bessoniana" | Alm. Robinie | 12 | 7.6 | 20-25 | 12-18 | Maj / Nov |
| 2 | Alnus glutinosa | Italian Alder | Rødel | 8 | 5 | 10-25 | 8-14 | Maj / Okt- Nov |
| 3 | planatus orientalis | Oriental Plane Tree | Platan | 12 | 6 | 20-30 | 15-25 | Maj- Jun / Okt- Nov |
| 4 | Betula pendula | European White Birch | Vortebirk | 8 | 3 | 15-20 | 4-7 | Apr- Maj / Okt- Nov |
| 5 | Pinus sylvestris | Scotch Pine | Skovfyr | 12 | 7 | 10-30 | 7-10 | N/A |

Tabel 9- Overblik over de valgte trætyper og deres basisdimensioner. Det bemærkes at højde og bredde +7 år refererer til 7 års vækst efter det konkrete træ er blevet plantet. Fyrretræet er nogle år ældre end indikeret grundet en mindre størrelse ved plantning

Fremadrettet vil disse træer bliver beskrevet ud fra ovenstående nummerering. Som udgangspunkt er træer gode som solafskærmning, da de skærmer mest om sommeren, hvor der behovet er størst - og mindst om vinteren, hvor dagslyset er sparsomt. Derfor er der valgt 4 løvfældende træer, der udnytter denne sæsonvariation. Træ nummer 5 er et nåletræ, der har tilnærmelsesvist samme afskærmningseffekt året rundt. Bemærk at for nogle byggerier kan opvarmings-sæsonen være dimensionerende for kølesystemet eftersom komfortkravene varierer mellem sommer og vinter. Derfor vil løvfældende træer oftest – men ikke altid - være den bedste afskærmningsløsning. Træ nummer 1-4 er simuleret med hver fire forskellige trægeometrier alt efter årstiden, hvor der tages højde for bladernes størrelse og farve. For trætype 5 er der benyttet den samme geometri hele året.

Det er desværre svært at finde gode 3D-modeller af træer, til anvendelse i solafskærmningsstudier. De fleste 3D-modeller af træer er udviklet til arkitektoniske visualiseringer, og er således blot modelleret til at 'se rigtige ud' fra afstand. Projektholdet besluttede at anvende et Rhino-plugin ved navn Landsdesign til at generere trægeometrien, da det indeholdt en række brugbare træmodeller, der kunne skaleres efter vækstår. Men grundet programmets fokus på æstetik fremfor videnskabelig korrekthed, er skaleringen af træerne uniform over tid, hvilket ikke stemmer overens med træers naturlige vækstmønstre. På bladniveau var der også behov for en efterbehandling. Derfor er træerne i første omgang blev justeret i Rhino og efterfølgende har holdet bag Paul Sabatier University detaljeret bladene gennem scripts udarbejdet til dette projekt. I nedenstående figur ses udviklingen af geometrien fra den rå geometri fra Lands-design, der tager udgangspunkt flader, der repræsenterer større grupper af grene. Først blev fladerne af grene erstattet af nåleflader, men dette gav ikke et realistisk billede. Derfor blev der udarbejdet et script, som kombinerede

nålegeometri med træets geometri. Til sidst blev der anvendt et script, som "klumpede" denne geometri i områder, hvor det en oprindelige model havde var flader så skalaen på nålene blev rigtige.



Figur 15 - Udvikling af trægeometrien for Træ 5 i løbet af projektet

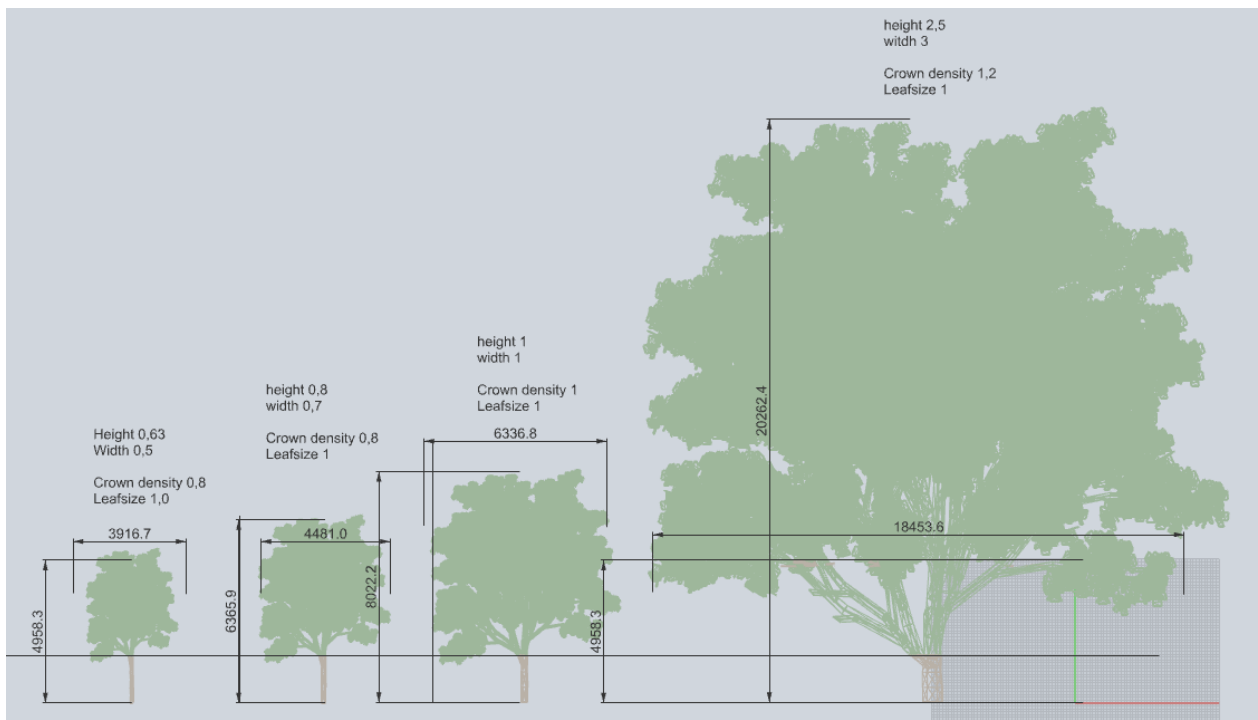
I forbindelse med tilpasning af trægeometrierne blev der indledt et samarbejde med Simon Skov fra KU for at kunne definere f.eks. træets dimensioner, når det vokser over tid (se figur 10). Der eksisterer ikke tabelværdier for dette, så skalering af stamme og krone og baseret på Simon Skovs omfattende erfaring med træer. Projektet har observeret, at træers geometri pt. ikke er systematisk undersøgt ud fra de parametre, som er relevante for at anvende dem præcist som geometri i bygningssimulering.

Bemærk at de forskellige vækststadier for det viste træ er en del af et forstudie (Simuleringsserie 3), hvis resultater ikke fremgår af denne rapport. Simuleringsserie 3 var en række ekstra simuleringer udført af Paul Sabatier University, der skulle indikere forskellige mulige studier fremadrettet. Herunder et studie omkring træers afskærmningseffekt i forskellige vækststadier, som evt. kunne føre til en reduktionsfaktor til træets skyggeeffekt, for hhv. yngre eller ældre træer end 'grundmodellen'.

Generelt blev simuleringerne i projektet udført i tre serier. Serie 1 bestemmer afskærmningsfaktorer til bygningssimulering og udfører enkelte følsomhedsanalyser. Serie 2 laver parametervariationer og skitserer et løsningsrum på baggrund af en parametermatrix. Serie 3 indeholdt en række yderligere simuleringer af enkeltforhold, som blev valgt fra til parametermatrixen i Serie 2. Simuleringerne i Serie 3 ligger således ud over den oprindelige simuleringsplan, og resultaterne er ikke med i denne rapport.

Da Paul Sabatier University udviste stor villighed til at teste og udvikle deres program til denne type simuleringer, blev omfanget af serie 3 udvidet på trods af, at det lå ud over den definerede opgave - og at der ikke ville være tid og økonomi til at databehandle resultaterne i dette projekt. Der er således indsamlet data, der indikerer mulighed for at udføre supplerende studier, i form af databehandling af allerede udførte simuleringer, samt metoder for udførelse af en række supplerende simuleringstudier i DART.

Den fulde beskrivelse af simuleringsserierne, der er benyttet som aftale mellem projektholdet i Danmark og Paul Sabatier University, ses i Bilag 5 (skrevet på engelsk).



Figur 16: Definerings af højde-, bredde- og kronedensitetsskaleringsfaktor over et træs livscyklus og den resulterende renderede geometri. Bemærk at enkelte grene beskæres.

Resultater for afskærmningsfaktorer

Tabeller med BPS-inddata

Hver af de 5 træsorter har et sæt talværdier for energireduktion i procent, her benævnt 'skyggefaktor'. Skyggefaktoren er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum. Hver træsort har fire sæt af disse talværdier, ét sæt for hver sæson, se nedenfor. Bemærk at skyggefaktoren er angivet som en procentvis reduktion af den energi, der rammer kronen. Således betyder en værdi på 0, at der ikke sker reduktion af energien, mens en værdi på 100 betyder fuld reduktion af energien. Energien der når facaden, kan udtrykkes ved:

$$\text{Solstråling på facaden} = \sum (\text{direkte solindstråling} + \text{indirekte solindstråling}) * (1 - \text{skyggefaktor})$$

Såfremt man ønsker at sammenholde skyggefaktorer fra tabellerne med afskærmningsfaktorer for traditionelle afskærmningsløsninger (som i Be18), skal man således omregne. En skyggefaktor på 70% svarer eksempelvis til en afskærmningsfaktor på 0,30. Bemærk dog at de oplyste skyggefaktor-værdier er gældende for energireduktionen i det område, hvor kronen skygger. Den faktiske reduktion af energien på en given facade vil typisk være meget mindre og skal findes gennem bygningssimulering med tabelværdierne (eller ved overslag på løsningsrum, se afsnit om Designguides).

Bemærk at værdier angives med to decimaler i det følgende på baggrund af simuleringernes præcision (læs: beregningen), og ikke på baggrund af præcisionen af resultaterne ift. bygningssimulering. Altså, er de opgivne værdier meget præcise for den opstillede scene med den givne træ-geometri, mens variationerne mellem enkelte træers geometri er langt, langt større.

| Tree type 1* (adult) | Shading factor, % | | Leaf discription |
|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| | Full spectrum | Visible spectrum | |
| Spring | 66.97 | 56.50 | Small green leaves |
| Summer | 74.36 | 62.34 | Full green leaves |
| Autumn | 74.39 | 62.10 | Full brown leaves |
| Winter | 11.20 | 9.28 | No leaves |

Tabel 10 - Sæsonspecifikke skyggefaktorværdier for hhv. det fulde og det synlige spektrum for træsort 1 – alm. robinie.

| Tree type 2* (adult) | Shading factor, % | | Leaf discription |
|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| | Full spectrum | Visible spectrum | |
| Spring | 62.84 | 52.00 | Small green leaves |
| Summer | 70.91 | 58.51 | Full green leaves |
| Autumn | 70.91 | 58.33 | Full brown leaves |
| Winter | 39.44 | 32.67 | No leaves |

Tabel 11 - Sæsonspecifikke skyggefaktorværdier for hhv. det fulde og det synlige spektrum for træsort 2 – rødel.

| Tree type 3* (adult) | Shading factor, % | | Leaf discription |
|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| | Full spectrum | Visible spectrum | |
| Spring | 43.02 | 36.36 | Small green leaves |
| Summer | 58.35 | 49.17 | Full green leaves |
| Autumn | 58.26 | 48.61 | Full brown leaves |
| Winter | 8.17 | 6.73 | No leaves |

Tabel 12- Sæsonspecifikke skyggefaktorværdier for hhv. det fulde og det synlige spektrum for træsort 3 – platan.

| Tree type 4* (adult) | Shading factor, % | | Leaf discription |
|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| | Full spectrum | Visible spectrum | |
| Spring | 40.22 | 29.67 | Small green leaves |
| Summer | 53.69 | 39.55 | Full green leaves |
| Autumn | 53.70 | 39.55 | Full brown leaves |
| Winter | 10.25 | 7.50 | No leaves |

Tabel 13- Sæsonspecifikke skyggefaktorværdier for hhv. det fulde og det synlige spektrum for træsort 4 – vortebirk.

| Tree type 5* (adult) | Shading factor, % | | Leaf discription |
|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Full spectrum | Visible spectrum | |
| All four seasons | 58.50 | 49.74 | Needles, all year |

Tabel 14- Sæsonspecifikke skyggefaktorværdier for hhv. det fulde og det synlige spektrum for træsort 5 – skovfyr.

Solhøjdevinkler

Skyggefaktorer i de ovenstående tabeller er baseret på simuleringer med en solhøjdevinkel på 10 grader for alle sæsoner. Særligt om sommeren vil solen dog stå højere på himlen store dele af dagen. Der er derfor som forsøg simuleret for andre solhøjdevinkler for en enkelt trætype (træsort 2). I tabellen nedenfor vises resultaterne for dette forsøg, i form af solhøjdevinkler på hhv. 10, 30 og 50 grader for sommersimuleringer og hhv. 10 og 30 grader for forår/efterår. Tendenserne er de samme ift. variationerne mellem sæsonerne, og forskellene er så relativt små, at de ikke er medtaget i de generelle tabelværdier til simulering.

| Tree type 2* (adult) | Shading factor, % | | Leaf discription |
|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| | Full spectrum | Visible spectrum | |
| Summer, 10° | 70.91 | 58.51 | Small green leaves |
| Summer, 30° | 72.41 | 64.97 | Full green leaves |
| Summer, 50° | 69.83 | 61.93 | Full brown leaves |

Tabel 15 - Eksempel på simulerede skyggefaktorer for forskellige solhøjdevinkler for, her hhv. 10, 30 og 50 grader.

Som det fremgår af tabellen ovenfor, resulterer de højere solhøjdevinkler i let ændrede skyggefaktorer, her ca. +/-2 procentpoint. Der kan være mange årsager til dette, herunder at bladenes vinkel ift. facaden er anderledes, samt at lyset får en anderledes 'rejse gennem kronen'. Sidstnævnte afhænger naturligvis af formen på kronen, hvor der ingen teoretisk forskel vil være for en helt kugleformet krone (lyset skal altid passere samme længde = kuglens diameter), mens der vil være størst forskel for de mest aflange kroner (fx kroner formet som vertikale ellipsoider, cylindre eller paraboloider). Den lidt højere skyggefaktorer for den 30 graders solhøjdevinkel i dette studie kan således skyldes, at de valgte træsorters kroner er lidt-til-moderat højere end de er brede (med former som søjler, kegler, ovaler og pyramider). For træsorter med brede kroner, vil det modsatte formentlig være gældende, altså at den lave solhøjdevinkel på 10 grader vil give lavere skyggefaktorer fx for en krone med paraply-form, men det er dog ikke testet i dette studie.

Lysfordeling og farvetoner

Foruden det fulde spektrum og det synlige spektrum er lysenergien summeret for tre udvalgte spekter af det synlige lys hhv. blå, grønt og rødt, som vist i eksemplet nedenfor. I de endelige tabeller med simuleringsværdier opgives dog kun hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum, da der tilsyneladende ikke sker nogen særlig skævvridning af lysets farvefordeling. Dette kan evt. undersøges nærmere i et opfølgende studie, ved at sammenligne lyset i de forskellige spektre hhv. med og uden træet som skygge.

| Tree type 2* (adult) | Shading factor, % | | | | | Leaf discription |
|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| | Full spectrum | Visible spectrum | Visible blue light | Visible green light | Visible red light | |
| Spring | 62.84 | 52.00 | 38.88 | 48.87 | 58.90 | Small green leaves |
| Summer | 70.91 | 58.51 | 43.58 | 54.96 | 66.36 | Full green leaves |
| Autumn | 70.91 | 58.33 | 43.49 | 54.88 | 66.14 | Full brown leaves |
| Winter | 39.44 | 32.67 | 24.53 | 30.77 | 36.97 | No leaves |

Tabel 16 - Eksempel på simulerede skyggefaktorer for forskellige lysspektre - hhv. fuldt spektrum, synligt spektrum og synligt lys i udvalgte farver (solhøjdevinkel på 10 grader).

Designguides

Beslutningsstøtte omkring træer som solafskærmning

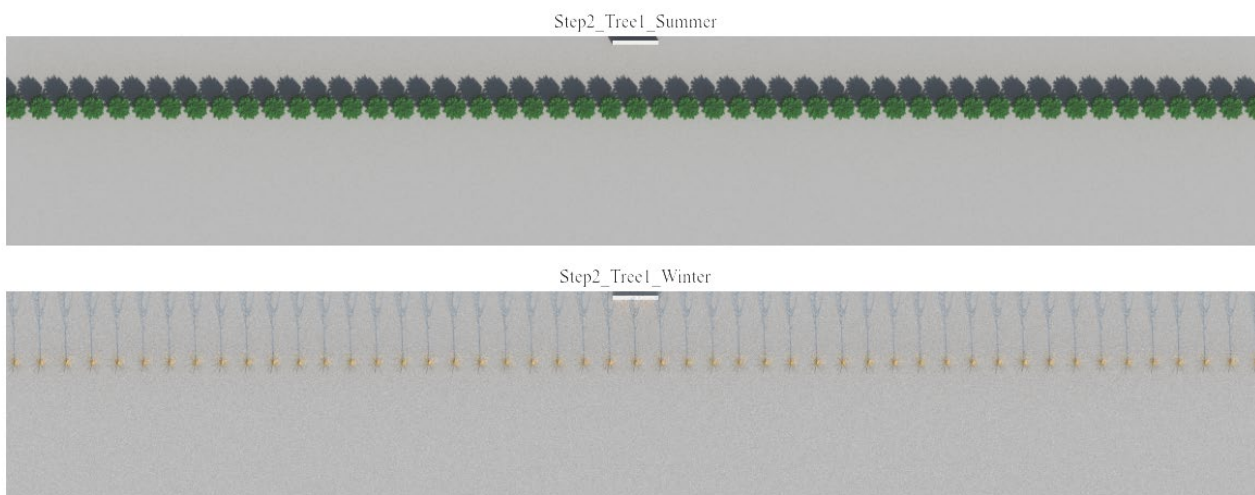
Mange vigtige designbeslutninger fastlægges i de tidlige designfaser af ethvert byggeprojekt. Her er der typisk ikke tid, råd eller data nok til at simulere performance for en række mulige designmuligheder. Derfor træffer bygningsdesignere ofte afgørende beslutninger på baggrund af overslagsberegninger, mavefornemmelser og erfaring fra tidligere projekter. Dette kan i værste fald resultere i uhensigtsmæssigt design, og kan føre til, at man vælger kendte løsninger – 'de sikre løsninger'. Men disse løsninger er ikke nødvendigvis de bedste for mennesker, miljø og energipreformance. For at skabe rum til de innovative løsninger med et stort uindfriet potentiale er der derfor behov for værktøjer til tidlig beslutningsstøtte.

Træer har et stort potentiale som solafskærmning, hvilket i dette projekt synliggøres i en række tabeller for forskellige træsorter og facadeorienteringer. Ved hjælp af en lang række simuleringer har projektet afsøgt løsningsrummet for træer som solafskærmning under en række varierende forudsætninger. Scenerne indeholder alle én række ens træer med en centerafstand svarende til kronens maksimale bredde, placeret overfor en simpel bygningsfacade. På facaden måles energien hhv. med og uden rækken af træer. Forskellen er således træernes bidrag til reduktionen af energi, der når facaden, under de simulerede forudsætninger.

Der simuleres for alle kombinationer af 5 varierende parametre, hver med 4-5 variationer, jævnfør parameter-matricen nedenfor. Alle scener simuleres med tidsskridt på en halv time for en udvalgt dag per sæson, hhv. 6. maj, 21. juni, 6. august og 21. december. Nedenfor vises eksempler på scener for hhv. sommer- og vinterkroner træsort 1, i en given afstand fra en sydvendt facade (den lysegrå flade).

| Tree type | Season | Date | Façade to trunk distance ¹ | Façade orientation ² |
|-----------|--------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Spring (summer crown) | May 6 th (between spring equinox and summer solstice) | 7,5 m ($\approx 55^\circ$) | East |
| 2 | Summer (summer crown) | June 21 st (summer solstice) | 10,5 m ($\approx 45^\circ$) | South |
| 3 | Autumn (summer crown) | August 6 th (between summer solstice and autumn equinox) | 15 m ($\approx 35^\circ$) | West |
| 4 | Winter (winter crown) | December 21 st (winter solstice) | 22 m ($\approx 25^\circ$) | North |
| 5 | | | 39 m ($\approx 15^\circ$) | |

Tabel 17 - Matrice med parametervariationer for hhv. træsort, sæson-trækroner, afstand til façade og façadeorientering. Kombinationen af parametre udgør grænserne for det løsningsrum, der er undersøgt i simuleringerne.



Figur 17 – Træerækker til simulering

Resultatet af undersøgelserne opsummeres her i en række tabeller, der indeholder numeriske værdier for træernes reduktion af den energi, der når facaden ift. en tilsvarende simulering uden træer. På den måde kan bygningsdesignere allerede i de tidligere designfaser få et overslag på, hvor stor en solafskærmnings-effekt de kan forvente at hente fra en række træer under valgte forudsætninger. De kan også hente vigtig information om, hvordan performance varierer mellem forskellige sæsoner og facadeorienteringer, samt hvordan forventede performance påvirkes af valget af træsort og træernes afstand til facaden.

Resultater for designguides

Tabeller til beslutningsstøtte

Resultaterne fra simuleringerne vises herunder i 15 beslutningsstøttetabeller, der giver et indtryk af det simulerede løsningsrum. For hver af de fem træsorter findes tre tabeller – én tabel for hver af orienteringerne 1) syd, 2) øst/vest og 3) nord. I hver tabel kan man finde sæsonspecifikke skyggefaktorværdier som funktion af afstanden til facaden. Skyggefaktoren er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

Skyggefaktoren angiver hvor stor en del af lysets energi, der forhindres i at nå facaden ved at sammenligne resultatet fra en simulering hhv. med og uden træer. En højere skyggefaktor-værdi betyder således større reduktion af energi på facaden (0 % = ingen skygge, 100 % = fuld skygge, ingen stråling på facaden).

Den energi der når facaden, kan således udtrykkes ved:

$$\text{Solstråling på facaden} = \sum (\text{direkte solindstråling} + \text{indirekte solindstråling}) * (1 - \text{skyggefaktor})$$

| Tree type 1 <u>east/west</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 54 | 59 | 43 | 47 | 30 | 34 | 19 | 22 | 8 | 11 |
| Summer | 53 | 57 | 41 | 45 | 29 | 32 | 17 | 20 | 8 | 10 |
| Autumn | 54 | 59 | 43 | 47 | 30 | 34 | 19 | 22 | 9 | 11 |
| Winter | 16 | 15 | 12 | 12 | 9 | 9 | 6 | 6 | 3 | 3 |

Tabel 18- Simulerede skyggefaktorer for en østlig/vestlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 1 <u>south</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|---|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 34 | 42 | 16 | 24 | 11 | 18 | 8 | 13 | 5 | 7 |
| Summer | 22 | 32 | 15 | 24 | 11 | 18 | 8 | 13 | 5 | 8 |
| Autumn | 35 | 42 | 16 | 24 | 11 | 18 | 8 | 13 | 5 | 7 |
| Winter | 13 | 13 | 14 | 13 | 13 | 12 | 11 | 9 | 5 | 4 |

Tabel 19- Simulerede skyggefaktorer for en sydlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 1 <u>north</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 35 | 52 | 30 | 44 | 24 | 35 | 18 | 27 | 11 | 16 |
| Summer | 43 | 53 | 35 | 44 | 27 | 34 | 20 | 25 | 11 | 15 |
| Autumn | 36 | 52 | 29 | 44 | 24 | 36 | 18 | 27 | 11 | 16 |
| Winter | 2 | 10 | 1 | 9 | 1 | 7 | 1 | 5 | 1 | 3 |

Tabel 20 - Simulerede skyggefaktorer for en nordlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 2 <u>east/west</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|---|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 45 | 48 | 34 | 36 | 22 | 24 | 13 | 15 | 6 | 8 |
| Summer | 43 | 46 | 32 | 34 | 21 | 23 | 12 | 14 | 5 | 7 |
| Autumn | 44 | 48 | 35 | 36 | 22 | 24 | 13 | 15 | 6 | 8 |
| Winter | 39 | 36 | 34 | 31 | 26 | 23 | 18 | 16 | 9 | 9 |

Tabel 21 - Simulerede skyggefaktorer for en østlig/vestlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 2 <u>south</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 19 | 26 | 12 | 18 | 9 | 13 | 6 | 9 | 3 | 5 |
| Summer | 17 | 24 | 12 | 19 | 9 | 14 | 6 | 10 | 3 | 6 |
| Autumn | 19 | 26 | 12 | 18 | 9 | 13 | 6 | 9 | 3 | 5 |
| Winter | 28 | 30 | 33 | 33 | 39 | 34 | 40 | 32 | 13 | 11 |

Tabel 22 - Simulerede skyggefaktorer for en sydlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 2 <u>north</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 31 | 42 | 26 | 35 | 20 | 27 | 14 | 20 | 8 | 12 |
| Summer | 37 | 43 | 30 | 35 | 22 | 26 | 15 | 19 | 8 | 11 |
| Autumn | 32 | 43 | 25 | 35 | 20 | 28 | 14 | 20 | 8 | 12 |
| Winter | 9 | 27 | 9 | 24 | 8 | 20 | 7 | 15 | 5 | 9 |

Tabel 23 - Simulerede skyggefaktorer for en nordlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 3 <u>east/west</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|---|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 34 | 40 | 28 | 33 | 20 | 24 | 13 | 16 | 6 | 8 |
| Summer | 34 | 39 | 27 | 31 | 19 | 22 | 12 | 15 | 5 | 7 |
| Autumn | 34 | 40 | 28 | 32 | 20 | 24 | 13 | 16 | 6 | 8 |
| Winter | 9 | 9 | 8 | 7 | 6 | 6 | 4 | 4 | 2 | 2 |

Tabel 24 - Simulerede skyggefaktorer for en østlig/vestlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 3 <u>south</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|---|------------------|---|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 28 | 33 | 10 | 17 | 7 | 12 | 5 | 9 | 3 | 5 |
| Summer | 15 | 24 | 9 | 17 | 7 | 13 | 5 | 9 | 3 | 5 |
| Autumn | 27 | 33 | 10 | 17 | 7 | 12 | 5 | 9 | 3 | 5 |
| Winter | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 7 | 6 | 6 | 4 | 3 |

Tabel 25 - Simulerede skyggefaktorer for en sydlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 3 <u>north</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 22 | 36 | 19 | 31 | 15 | 25 | 12 | 19 | 7 | 12 |
| Summer | 29 | 38 | 24 | 32 | 19 | 25 | 14 | 18 | 8 | 11 |
| Autumn | 22 | 36 | 19 | 31 | 15 | 25 | 12 | 19 | 7 | 12 |
| Winter | 0 | 6 | 0 | 5 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 2 |

Tabel 26 - Simulerede skyggefaktorer for en nordlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 4 <u>east/west</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|---|------------------|---|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 24 | 28 | 17 | 21 | 11 | 14 | 7 | 9 | 3 | 5 |
| Summer | 25 | 27 | 18 | 20 | 11 | 13 | 7 | 8 | 3 | 4 |
| Autumn | 24 | 28 | 17 | 21 | 11 | 14 | 7 | 9 | 3 | 5 |
| Winter | 9 | 9 | 7 | 7 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 2 |

Tabel 27 - Simulerede skyggefaktorer for en østlig/vestlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 4 <u>south</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|---|------------------|---|------------------|---|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 10 | 16 | 7 | 12 | 5 | 8 | 3 | 6 | 2 | 3 |
| Summer | 9 | 16 | 7 | 12 | 5 | 9 | 3 | 6 | 2 | 3 |
| Autumn | 10 | 16 | 7 | 12 | 5 | 8 | 3 | 6 | 2 | 3 |
| Winter | 10 | 9 | 10 | 9 | 9 | 7 | 6 | 5 | 2 | 2 |

Tabel 28 - Simulerede skyggefaktorer for en sydlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 4 <u>north</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|---|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 20 | 30 | 15 | 24 | 11 | 18 | 8 | 13 | 4 | 7 |
| Summer | 24 | 30 | 18 | 23 | 13 | 17 | 8 | 12 | 4 | 7 |
| Autumn | 19 | 30 | 16 | 24 | 12 | 18 | 8 | 13 | 5 | 7 |
| Winter | 1 | 7 | 1 | 5 | 1 | 4 | 1 | 3 | 0 | 2 |

Tabel 29 - Simulerede skyggefaktorer for en nordlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 5 <u>east/west</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 44 | 49 | 37 | 40 | 26 | 29 | 17 | 19 | 8 | 10 |
| Summer | 43 | 47 | 34 | 38 | 25 | 28 | 15 | 18 | 7 | 9 |
| Autumn | 44 | 49 | 37 | 40 | 26 | 29 | 17 | 19 | 8 | 10 |
| Winter | 56 | 57 | 50 | 50 | 45 | 43 | 34 | 32 | 19 | 18 |

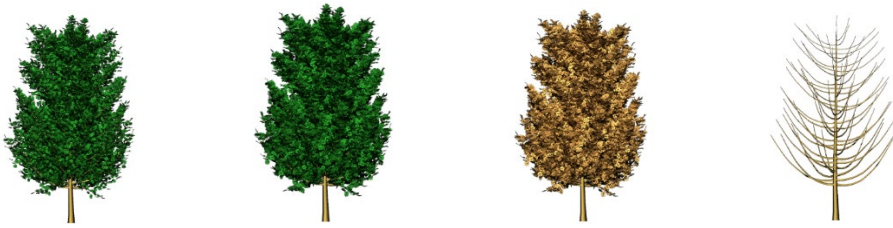
Tabel 30 - Simulerede skyggefaktorer for en østlig/vestlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 5 <u>south</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 34 | 40 | 14 | 21 | 9 | 15 | 7 | 11 | 4 | 6 |
| Summer | 19 | 28 | 13 | 20 | 9 | 16 | 7 | 11 | 4 | 7 |
| Autumn | 34 | 40 | 14 | 21 | 9 | 15 | 7 | 11 | 4 | 6 |
| Winter | 47 | 50 | 51 | 52 | 56 | 23 | 56 | 50 | 42 | 35 |

Tabel 31 - Simulerede skyggefaktorer for en sydlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.

| Tree type 5 <u>north</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | Full / Visible | | | | | | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 32 | 44 | 27 | 38 | 22 | 31 | 17 | 23 | 10 | 14 |
| Summer | 39 | 46 | 32 | 38 | 25 | 31 | 18 | 22 | 10 | 13 |
| Autumn | 32 | 44 | 28 | 38 | 22 | 31 | 17 | 24 | 10 | 14 |
| Winter | 17 | 46 | 17 | 42 | 16 | 36 | 15 | 29 | 11 | 19 |

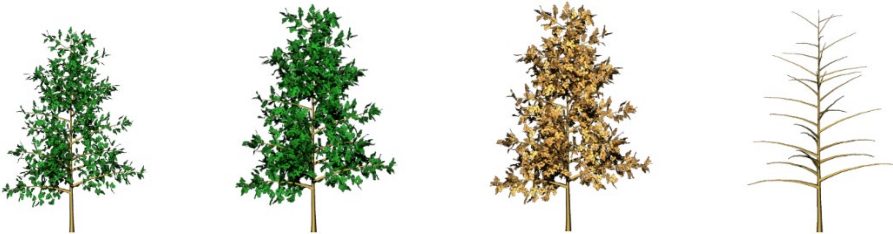
Tabel 32 - Simulerede skyggefaktorer for en nordlig orienteret facade, som funktion af afstanden mellem træet og facaden. Skyggefaktorer er opgivet for hhv. det fulde spektrum og det synlige spektrum.



Figur 18 - Sæsonvariationer af trækroner for træsort 1. Fra venstre mod højre: forår (små blade), sommer (store blade), efterår (brune blade) og vinter (ingen blade).



Figur 19 - Sæsonvariationer af trækroner for træsort 2. Fra venstre mod højre: forår (små blade), sommer (store blade), efterår (brune blade) og vinter (ingen blade).



Figur 20 - Sæsonvariationer af trækroner for træsort 3. Fra venstre mod højre: forår (små blade), sommer (store blade), efterår (brune blade) og vinter (ingen blade).



Figur 21 - Sæsonvariationer af trækroner for træsort 4. Fra venstre mod højre: forår (små blade), sommer (store blade), efterår (brune blade) og vinter (ingen blade).



Figur 22 - Der findes ingen sæsonvariationer for træsort 5, da dette er et nåletræ, og således ikke er løvfældende.

Eksempel på anvendelse

Et tænkt designteam ønsker at undersøge potentialet for at anvende en række træer som supplerende solafskærmning på en skolebygning lange øst- og vestvendte facader. Med udgangspunkt i 'øst/vest'-tabellen for træsort 1, kan de se den potentielle reduktion af energien på facaden for de forskellige sæsoner (rækker) og for forskellige afstande til facaden (kolonner).

Skyggefaktoren er næsten ens for de forskellige sæsoner, hvor der er risiko for overtemperatur (vinter er uvæsentlig her), men tabellen viser at afstanden til facaden er ret afgørende. Ved korte afstande mellem træ og facade (7,5 meter) kan der opnås ca. 54% reduktion af energien, men samtidig reduceres det synlige lys, der når facaden med ca. 58%, hvilket vil gøre det meget svært at opfylde dagslyskravet for lokalerne. Designteamet vælger derfor i første omgang at antage en middel afstand til facaden (15 meter), og aflæser skyggefaktorer på hhv. ca. 30% og 33%. Den afstand giver også mere frihed i designet af skolegården foran klasselokalerne.

Senere i projektet viser dagslyssimuleringer udfordringer med at opfylde dagslyskravene. Designteamet overvejer derfor at øge afstanden mellem træ og facade, men dette er ikke muligt pga. disponering af arealerne udenom bygningen. I stedet sammenligner designteamet de fundne værdier med 'øst/vest'-tabellerne for de øvrige fire træsorter og vælger i stedet træsort 2, der har skyggefaktorer på hhv. ca. 22% og 24% for tilsvarende afstand på 15 meter. Dette skyldes primært, at træsort 2 er væsentligt lavere 7 år efter plantning, med sine 8 meter mod 12 meter for træsort 1.

Bemærk, at det på sigt kan det være nødvendigt at beskære træernes kroner for at kunne opfylde dagslyskravene. Alternativt kan der tyndes ud i rækken af træer, således fx hvert tredje træ fældes.

| Tree type 1 <u>east/west</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|---------|------------------|----|------------------|----|
| | Full | | | | | Visible | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 54 | 59 | 43 | 47 | 30 | 34 | 19 | 22 | 8 | 11 |
| Summer | 53 | 57 | 41 | 45 | 29 | 32 | 17 | 20 | 8 | 10 |
| Autumn | 54 | 59 | 43 | 47 | 30 | 34 | 19 | 22 | 9 | 11 |
| Winter | 16 | 15 | 12 | 12 | 9 | 9 | 6 | 6 | 3 | 3 |

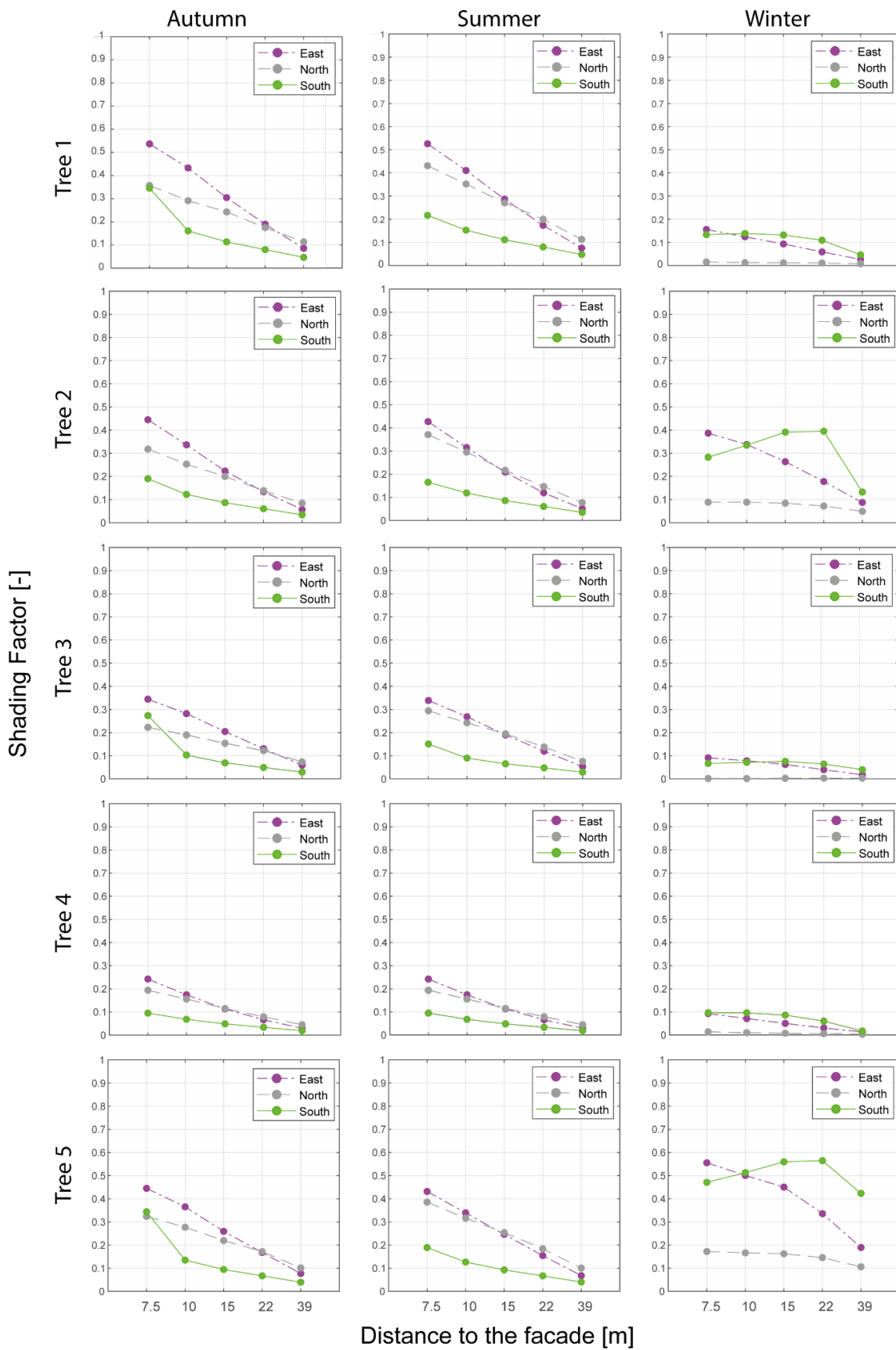
| Tree type 2 <u>east/west</u> | Shading factor, % | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----|--------------------|----|------------------|---------|------------------|----|------------------|---|
| | Full | | | | | Visible | | | | |
| | Distance 7.5 m | | Distance 10.5 m | | Distance 15 m | | Distance 22 m | | Distance 39 m | |
| Spring | 45 | 48 | 34 | 36 | 22 | 24 | 13 | 15 | 6 | 8 |
| Summer | 43 | 46 | 32 | 34 | 21 | 23 | 12 | 14 | 5 | 7 |
| Autumn | 44 | 48 | 35 | 36 | 22 | 24 | 13 | 15 | 6 | 8 |
| Winter | 39 | 36 | 34 | 31 | 26 | 23 | 18 | 16 | 9 | 9 |

Tabel 33 - Eksempel med markering af de nævnte værdier i anvendelseseksemplet ovenfor.

Grafer til beslutningsstøtte

Sammenligning af orienteringer

Resultaterne fra simuleringerne vises herunder som et grid af grafer, der giver et visuelt indtryk af træernes performance på én side til nem sammenligning på tværs af orienteringer. Værdierne er de samme som fra de 15 beslutningsstøttetabeller, dvs. sæson-specifikke skyggefaktor-værdier som funktion af afstanden til facaden. Her er skyggefaktoren dog ikke opgivet i %, men som en faktor dvs. med værdier mellem 0 og 1. I disse grafer vises kun værdier for det fulde spektrum. Graferne er organiseret anderledes end beslutningsstøttetabellerne og serien af grafer ovenfor. Her har hver træsort sin egen 'række' og hver 'søjle' sin egen sæson.

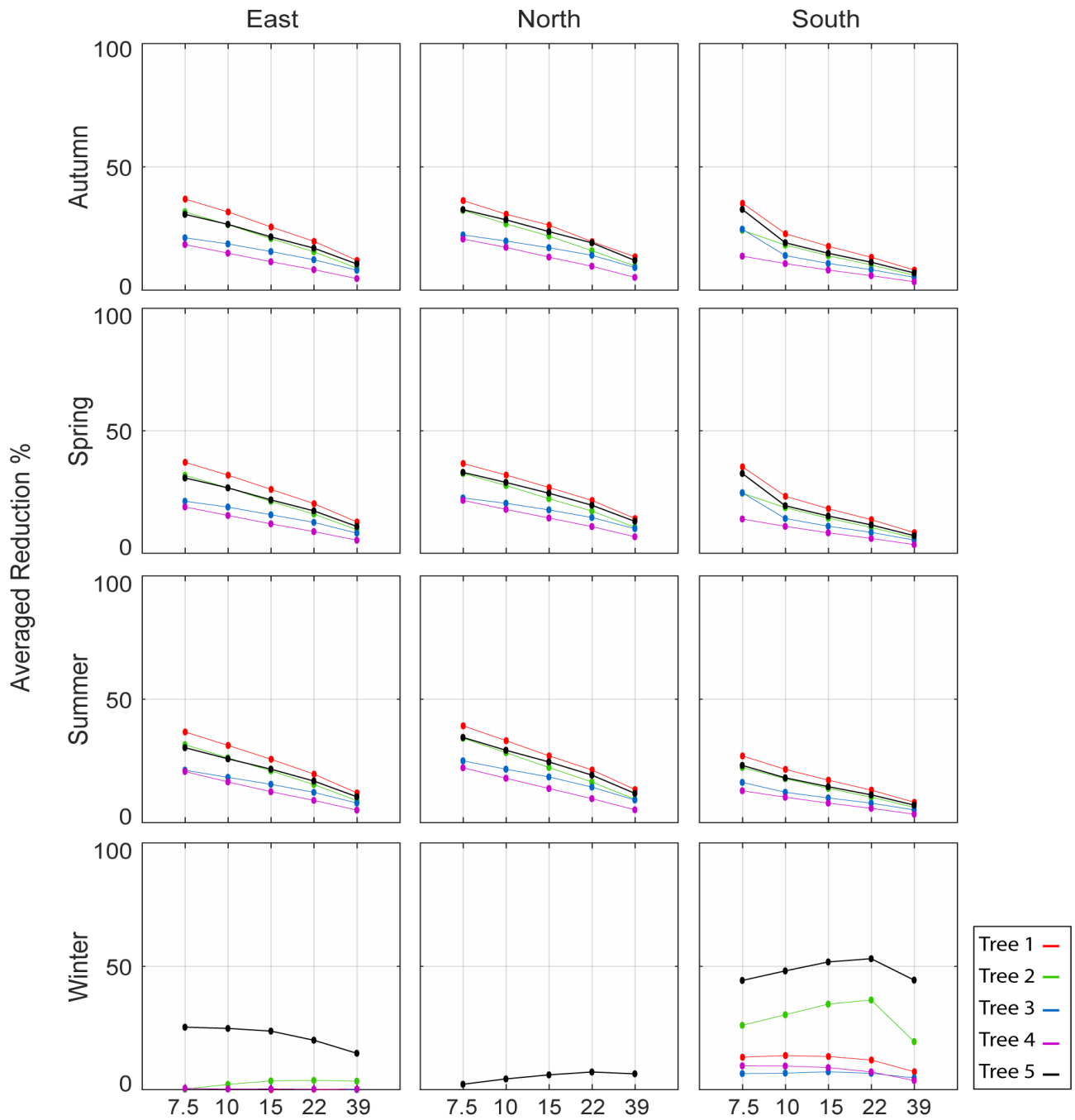


Figur 23 – Skyggefaktor i sammenhæng med afstand til facade og orientering for de 5 trætyper ift. årstiderne

Grafer til beslutningsstøtte – sammenligning af træsorter

Resultaterne fra simuleringerne vises herunder som et grid af grafer, der giver et visuelt indtryk af træernes performance på én side, til nem sammenligning af performance på tværs af træsorter. Graferne viser den gennemsnitlige sæsonspecifikke timereduktion af energien i det fulde spektrum i % for hver træsort som funktion af afstanden til facaden.

Graferne er organiseret tilsvarende beslutningsstøttetabellerne, hvor hver 'række' er en sæsonvariation, og hver 'søjle' er en given orientering, her dog med alle 3 orienteringer ved siden af hinanden for at give et hurtigt overblik over det samlede løsningsrum. Graferne giver mulighed for nemt at sammenligne på tværs af træsorter. Bemærk af træsort 5 (sort) er et nåletræ, og derfor har væsentligt højere skyggefaktor i vintersæsonen end alle de løvfældende træsorter. Skyggefaktor-værdierne er generelt lave om vinteren, men mod syd står solen så højt på himlen, at der trods alt er et lille skyggebidrag. De stejle hældninger på graferne for sydlig orientering viser desuden, hvordan den højtstående sol for nogle afstande resulterer i, at træets bidrag til skygge på facaden reduceres væsentligt.



Figur 24 - Relativ sammenligning af træernes afskærmningsevne som funktion af afstand til facaden i forhold til årstid

Diskussion

Generelle værdier – men træer er jo forskellige?

Hvordan kan man generere generelle værdier for træers egenskaber, når hvert træ er unikt? I dette studie er data generet ved simulering af træmodeller af et 'repræsentativt træ' for hver træsort, med en bestemt alder – her forventet størrelse 7 år efter den maksimale størrelse træet normalt kan plantes i. Bemærk at de faktiske skyggeverdier naturligvis i høj grad vil være afhængige af de givne træers dimensioner, og kan afvige væsentligt fra netop den 3D-model af træsorten, som er anvendt i simuleringerne. De oplyste værdier er således mest præcise for træer, der i højde og kronetæthed ligner det simulerede træ, og præcisionen vil aftage, hvis man bevæger sig langt væk fra den viste geometri (fx et helt ungt træ, hvor værdierne for skyggeeffekt vil være langt lavere). Fremadrettet kunne det være relevant at undersøge spredningen i de generelle egenskaber for en række træer indenfor bestemte træsorter, for at finde ud af hvor stor usikkerhed dette udgør for simuleringsresultaterne. Et sådan studie vil kræve, at der registreres en række træer i felten for en given træsort, som efterfølgende modelleres i 3D. Herefter skal simulerings-serierne for dette studie gentages med de forskellige træmodeller, og spredningen kan blive undersøgt.

Eftersom de oplyste værdier anvendes til at beskrive de generelle egenskaber af et stykke geometri, er det 3D-modellen (scenen), der afgør træets størrelse, kronens form og afstanden til facaden. Altså kan man fint anvende de oplyste værdier for en given træsort til en anden geometri. Men hvis man ønsker at repræsentere et træ med en meget tættere krone (fx et gammelt træ med en meget 'dyb' krone) eller en meget mindre tæt krone (fx et ungt træ med en meget åben krone med få grene og blade), så vil de oplyste generelle værdier for kronen ikke være repræsentative. Fremadrettet kan det være nyttigt at udvikle et kartotek af kroner med forskellige tæthed for en given træsort, så man fx ud fra billeder kan vælge mellem 3-5 forskellige kroner med tilhørende egenskaber til BPS. En sådan studie vil kræve, at der modelleres nye varianter af træerne i 3D, som svarer til forskellige krone-vækststadier, samt at simulerings-serierne for dette studie gentages med alle de nye kronevarianter.

Fordeling over dagen

Resultatafsnittet har præsenteret skyggefaktoren som median-værdier for alle dagslystimerne i både tabeller og forskellige performance-grafer for at give et godt overblik over performance. Resultaterne fra simuleringerne giver dog også indsigt i skyggeeffektens fordeling hen over dagen, hvilket vises i en række eksempler for træsort 1 i Bilag 3. På baggrund af graferne i Bilag 3 og tilsvarende grafer for træsort 2-4 udledes nogle generelle tendenser for træernes performance hen over dagen:

ØST: Træerne er effektive om morgenen for en østligt orienteret facade, men effektiviteten reduceres kraftigt frem mod formiddag/middag.

- *Forår/efterår: Om morgenen er skyggefaktoren hhv. ca. 40-60% for træsort 2,3 og 4, og ca. 60-80% for træsort 1, indtil solen står så højt på himlen at træernes effekt reduceres drastisk. Dette sker tidligt for lange afstande (ved 8-tiden for 39 m) og først midt på dagen for korte afstande (ved 12-tiden for 7,5 m). Andelen af reduceret synligt lys forbliver forholdsvist højt hele dagen, især for de lave afstande, mens reduktionen af infrarød stråling næsten bortfalder.*
- *Sommer: Som forår/efterår ovenfor, men træernes skyggeeffekt reduceres allerede drastisk fra hhv. ca. kl. 7 for lange afstande og kl. 10 for de kortere afstande.*

VEST: Det omvendte er gældende for en vestlig orientering, hvor træerne er effektive om eftermiddagen for en vestligt orienteret facade, men ellers ikke.

- *Forår/efterår, samt Sommer: Solafskærmningsfaktoren er kun høj sidst på eftermiddagen og først på aftenen. Eftersom effekten først for alvor slår til fra ca. kl. 16 og frem vil det ikke gøre meget for at reducere risikoen for overtemperatur i brugstiden.*

SYD: For en sydlig orientering er træerne kun effektive i ydertimerne, og der er generelt en begrænset skyggeeffekt i den normale brugstid for en sydligt orienteret facade.

- *Forår/efterår: I ydertimerne når skyggefaktoren for de korte afstande op mod ca. 25% for træsort 2,3 og 4, og ca. 40% for træsort 1, indtil solen står så højt på himlen at træernes effekt reduceres drastisk. Som følge af den højtstående sol gælder denne reduktion i hele tidsrummet fra ca. 8:00 til 16:30, hvor skyggefaktoren reduceres til ca. halv performance ift. ydertimerne.*
- *Sommer: Som forår/efterår ovenfor, men træernes skyggeeffekt reduceres allerede drastisk fra ca. kl. 8.*

Effektivitet ift. synligt lys

Forholdet mellem reduktionen af energien i det fulde spektrum mod energien i det synlige spektrum siger noget om den effektive lysudnyttelse forudsat, at formålet med solafskærmningen er at reducere energi der kan føre til overophedning, mens man ønsker at reducere dagslysindfaldet så lidt som muligt.

Resultatafsnittet præsenterer skyggefaktoren for det fulde spektrum, men resultaterne fra simuleringerne indeholder også skyggefaktoren for det synligt spektrum. Reduktionen af energi i det synlige spektrum ses plottet som funktion af det fulde spektrum for hver træsort i Bilag 4. Andelen af reduceret energi i det synlige spektrum er generelt væsentlig højere end andelen af reduceret energi i det synlige spektrum. I et kommende studie vil dette kunne sammenlignes med den tilsvarende effektivitet af andre solafskærmningsløsninger.

Delkonklusion

Nedenfor gives en opsamling for de to resultat afsnit præsenteret ovenfor, hhv. værdier til BPS og tabeller/grafar til beslutningsstøtte. Desuden forsøges en række generelle spørgsmål besvaret med afsæt i simulerings-resultaterne. Eftersom forholdene varierer fra projekt til projekt, vil der altid skulle laves en individuel vurdering af potentialet for at anvende træer som solafskærmning. På trods af dette kan der laves en række generelle anbefalinger, der kan være med til at udstikke en retning i de tidlige undersøgelser.

Opsamling på afskærmningsfaktorer

1. **Skyggefaktor.** Træsart 1 og 2 har de højeste skyggefaktorværdier til simulering. Bemærk at dette er skyggefaktoren for selve kronen. En høj værdi er således en 'tæt krone', uden at tage højde for fx træets dimensioner og afstanden til facade.
2. **Sommer/vinter.** Skyggefaktoren er ca. 5-7 gange højere for sommerkronen, end for vinterkronen (for træsort 1, 3 og 4). Altså er der potentiale for at bevare en stor del af den passive solvarme i perioden fra november til maj, og samtidig reducere solindfaldet væsentligt i perioden med løv. Såfremt bygningen har risiko for overtemperaturer hele året, kan man overveje en træsort med meget tæt grenstruktur i kronen (træsart 2), eller et nåltræ (træsart 5).
3. **Fuldt vs. synligt spektrum.** Der er ca. samme forhold mellem reduktionen af det fulde spektrum til det synlige spektrum for de testede trækrone (forhold ca. 1,2). Træsart 4 har dog en lidt bedre fordeling, således det synlige lys reduceres relativt mindre per samlet energireduktion end for de andre trækrone (forhold ca. 1,4).

Opsamling på 'Designguides'

1. **Skyggefaktor.** Træsart 1 har de højeste skyggefaktorværdier for det simulerede scenarie for alle afstande til facaden. Dog er træsort 5 det klart mest skyggende om vinteren, da det ikke er løvfældende. Træsart 2 er det næstmest skyggende løvfældende træ, og er grundet dets tæthed det klart mest skyggende af de lave træsorter. Træsart 3 og 4 har en meget begrænset effekt medmindre de placeres relativt tæt på facaden.
2. **Sommer/vinter.** Som følge af den tætte sommerkrone, er den resulterende skyggefaktor ca. 2-4 gange højere for en række træer om sommeren end om vinteren (for træsort 1, 3 og 4) for en østlig eller vestlig orienteret facade. Altså er der her potentiale for at bevare en stor del af den passive solvarme i perioden fra november til maj, og samtidig reducere solindfaldet væsentligt i perioden med løv. For en sydlig orienteret facade er den resulterende skyggefaktor dog kun ca. 1-2 gange højere om sommeren eftersom den højtstående sol mindsker træernes skyggeeffekt.
3. **Afstand til facaden.** Træerne skygger mest for østlig og vestlig orienterede facader. Her er der en betydelig reduktion (læs > 15% skyggefaktor) helt ud til hhv. 15 og 22 meters afstand til facaden afhængig af træsorten for træsort 1,2,3 og 5. For sydlig orienterede facader er effekten noget mindre, og afstanden mellem træ og facade skal ikke være mere end hhv. 7,5 (træsart 2 og 4) og 10 m (træsart 1 og 5) for at opnå en betydelig reduktion.

Samlede anbefalinger til hvordan vi træer virke bedst som solafskærmning

Undersøgelserne viser, at træerne kan have en betydelig solafskærmende virkning, når de står tæt på facaden, men kun i begrænsede tidsrum for de enkelte facader. Generelt har træerne for lav effekt mod syd, når solen står højest på himlen, herunder hele sommerperioden, og midt på dagen i overgangssæsonerne. Alternativt skal træerne stå meget tæt på facaden for at have tilstrækkelig effekt, og det går meget ud over dagslyset.

Træer kan med fordel placeres lidt længere fra facaden og suppleres med et udhæng, som tager den højtstående sol. Træernes funktion er således primært at begrænse den lavtstående sol. På den måde får

man en samlet løsning, der reducerer risikoen for overtemperatur og blænding uden at lokalet skal blændes af med gardiner, persienner el.lign.

Træerne er mest effektive som solafskærmning for facader orienteret mod øst og vest. For østvendte facader er træerne særlig effektive om morgenen, mens de for vestvendte facader er mest effektive om eftermiddagen. For nordvendte facader kan træerne have en vis effekt, men det synlige lys reduceres meget ift. den samlede reduceret energi og det er således en ineffektiv løsning.

Energi og miljø

Ifølge resultaterne fra dette studie kan træer næppe stå alene som en solafskærmende løsning – og kan ej heller erstatte behovet for mekanisk køling i nye bygninger med høje interne belastninger. Til gengæld har træerne potentiale for at reducere kølebehovet uden at reducere den passive solvarme om vinteren væsentligt, da der ikke er blade på træerne. På den måde vil en ekstra investering i anlægsomkostninger kunne give løbende driftsenergiebesparelser hvert år, i både kr og CO₂.

Udsyn og velvære

I modsætning til traditionelle afskærmningstiltag mod overtemperatur, som fx udvendig eller indvendig solafskærmning, så fjerner træerne ikke adgangen til udsyn. Tværtimod vil de oftest øge kvaliteten af udsynet. Træer og udhæng vil ikke kunne eliminere behovet for en brugerstyret indvendig solafskærmning, da risikoen for blænding vil være stor fx ved brug af skærme eller ved faste arbejdspladser. Men træerne kan fint reducere blænding fra eksempelvis den lavtstående morgensol, der er afgørende for brugernes trivsel. Morgensolen forstærker døgnrytmen og hjælper til at 'booste' vores morgen, og det ville være synd at blænde af for den. For hver eneste gang træerne skærmer nok til at spare gardinet, så får rummet adgang til dagslys og udsyn, som ellers ville være gået tabt.

Næste skridt ift. simulering og analyse af data

Undervejs i projektet er der identificeret en række potentielle fremtidige studier, som enten kræver flere simuleringvariationer, eller mere dybdegående analyser for at blive kortlagt. Nogle faktorer er allerede undersøgt som tests for at vurdere vigtigheden heraf. Der mangler dog data og behandling heraf, for at kunne konkludere noget generelt, og der er ofte blot simuleret data for én træsort med én given afstand. Herunder følger nogle af disse potentielle fremtidige studier i punktform:

- Fordeling af evt. forskydning i lysspektre hhv. rødt, grønt og blå
 - o data er indsamlet for de 5 kroner, men dybdegående analyse mangler
- Udvælgelse af repræsentativ solhøjde for skyggefaktorer
 - o forstudie udført, men det mangler yderligere datapunkter, samt dybdegående analyse bl.a. af klimadataset til simulering
- Kortlægning af skyggefaktorer for træers forskellige vækststadier
 - o eksempeldata indsamlet for 4 vækststadier viser en tendens, men der mangler yderligere datapunkter samt analyse
- Undersøge flere facadeorienteringer (mulighed for interpolering?)
 - o Eksempeldata indsamlet for 4 'mellem-orienteringer' (fx sydøst), men der mangler yderligere datapunkter samt analyse
- Simulering over flere dage på året (mulighed for interpolering?)
 - o Eksempeldata indsamlet for 12 datoer hen over året (d. 21. i hver måned), men der mangler yderligere analyse af data
- Simulering med flere himmel-modeller (hvilken er mest hensigtsmæssig?)
 - o Eksempeldata indsamlet for CIE overcast og CIE intermediate sky, men der mangler yderligere datapunkter samt analyse

4. Indeklimasimuleringer

- Afskærmningseffekt som parameter i indeklimasimuleringer

Den udviklede parametermatrix giver en indikation af afskærmningseffekter, som kan bruges til beregninger på overslagsniveau. I forbindelse med køleeffektsimuleringer eller simuleringer af brugstid af automatisk solafskærmning vil den rådgivende virksomhed udføre projektspecifikke simuleringer i et indeklimaprogram. De data input-data der er blevet generet i dette projekt, kan implementeres på forskellig måde i indeklimasimuleringerne. I det følgende afsnit ses eksempel på en metode til implementering og eksempler på simuleringer, der kan udføres på baggrund heraf. Simuleringerne vil være projektspecifikke og vil i virkeligheden have markant forskellige resultater alt efter bygningsgeometri, interne- og eksterne belastninger, brugstid osv.

Implementering af afskærmningsfaktor

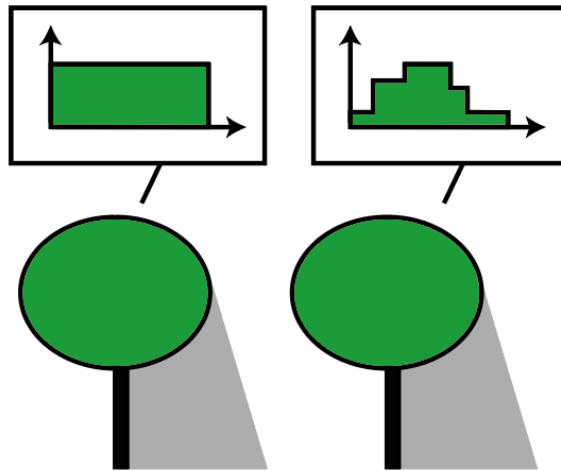
Der er i løbet af projektet lavet test af forskellige muligheder for at implementere i dynamiske afskærmningsværdier i indeklimasimuleringsprogrammer. Generelt kan afskærmningseffekten implementeres på to måder:

- 1) Integreret i vindueselementet. Solafskærmningseffekten indarbejdes så den påvirker de parametre, der er tilknyttet en vinduesgeometri så som g-værdi, rammeandel, eller nogle mere programspecifikke parametre for solafskærmning. Ulempen med denne metode er at afskærmningseffekten bl.a. er afhængig af afstanden og vinklen til træet. Dermed bliver værdierne kun retvisende for et vindue.
- 2) Solafskærmningseffekt tildeles en trægeometri. Ved at sætte afskærmningseffekten som transparens på et modelleret objekt, vil programmet selv beregne den effekt som afstande og vinkler har på den samlede afskærmning. Hvis der så yderligere tilknyttes et schedule til denne parameter, kan træet få en varierende afskærmningseffekt hen over året. På den måde kan man simulere årets gang ret præcist.

Metode 1 vil give et mindre præcist resultat og medfører nogle omfangsrige beregninger for at bestemme afskærmningseffekten. Men hvis der fx regnes sommerkomfort igennem BE18, hvor der ikke er tilknyttet geometri for afskærmning, er dette umiddelbart den eneste brugbare metode. I den sammenhæng vil en parametermatrix som set tidligere i denne rapport, være et brugbart redskab.

Metode 2 vil give et mere præcist resultat. Der er i forbindelse med dette studie lavet undersøgelser af "translucent shade"-funktionen i IES VE, der er et nyere komponent og som burde kunne tildele eksterne skyggeelementer en dynamisk afskærmningsfaktor. Test af translucent shade funktionen har givet simuleringsresultater, der virker realistiske, men den direkte sol havde ikke den forventede indvirkning. Over en periode har der været dialog med IES om dette problem, uden der er fundet en løsning. Det har vist sig, at funktionen ikke er helt stabil endnu, og IES VE har som konsekvens fjernet denne funktion i den følgende opdatering (IES VE2022). I møde med IES i marts 2023 har de meldt ud at de ikke kan love, hvornår denne funktion kommer til at virke korrekt. Dette er dog et softwareteknisk problem og ikke et spørgsmål om, hvorvidt dette er den rigtige metode til at implementere træer i indeklimaprogrammer. Der ligger et stort potentiale i at lignende funktioner bruges i indeklimasimuleringer.

At behandle træer som 3D geometri med varierende egenskaber over året vil give den klart bedste repræsentation af de virkelige forhold og vil automatisk inkludere vinkelforholdene mellem træer og glas.

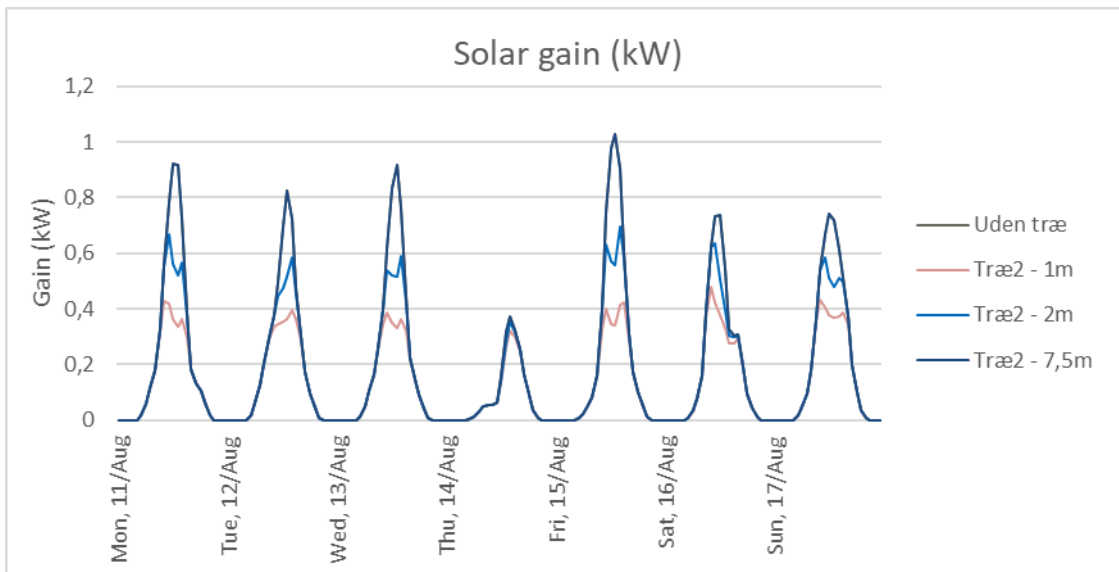


Figur 25 - Afskærmning af træet defineret som enten en statisk værdi eller en varieret værdi på baggrund af et tilknyttet Schedule

Om end teknologien i fx IES ikke er helt moden til at kunne simulere træers indflydelse korrekt endnu, er der i projektet udført en række simuleringer for at undersøge potentialet. Dette er gjort i IES VE2021, hvor komponenten stadig er tilgængelig. Da softwaren ikke er pålidelig endnu, er det vigtigt at understrege at dette alene er gjort som undersøgelse af metoden. Det kan ikke anbefales at dimensionere sit kølebehov ud fra dette på nuværende tidspunkt. På de følgende sider er et par eksempler på relevante simuleringer, der kan udføres på projekter med træers solafskærmningseffekt som et parameter. Disse simuleringer er lavet med et simpelt opbygget rum med et vindue, som afskærmes af et træ af den pågældende trætype. Det fremgår at træernes afskærmningseffekt kan indarbejdes som relevante undersøgelser i et tidligt design af bygninger.

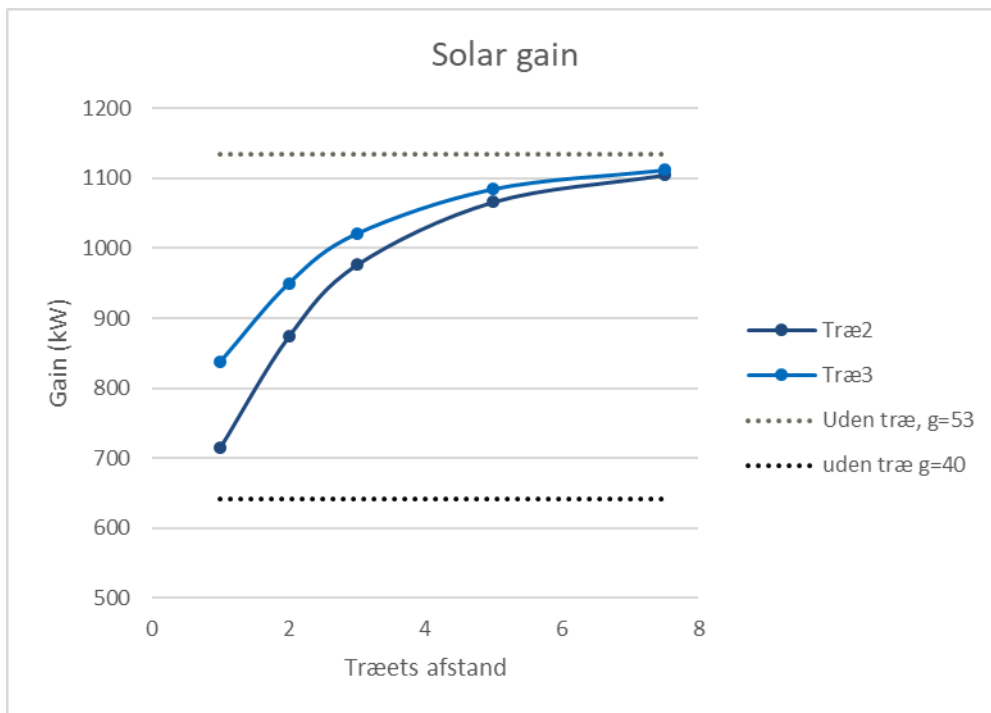
Simuleringsresultater

Nedenstående ses et rum svarende til et typisk sydvendt kontor i stueplan, med et større træ tæt på facaden. For en typisk sommeruge er den eksterne varmebelastning plottet for hhv. et 5 m højt træ med 1 m afstand, 2 m afstand, 7,5 m afstand samt intet træ. Som det fremgår af figur 26, er der en markant effekt af træer placeret tæt på facaden, som aftager som funktion af afstanden til facaden. Ved 7,5 m afstand er reduktionen af solbelastningen forsvindende lille. Dette er i overensstemmelse med simuleringresultaterne fra DART, hvor sydvendte facader kun opnåede meget lidt afskærmning om sommeren som følge af den højtstående sommersol.

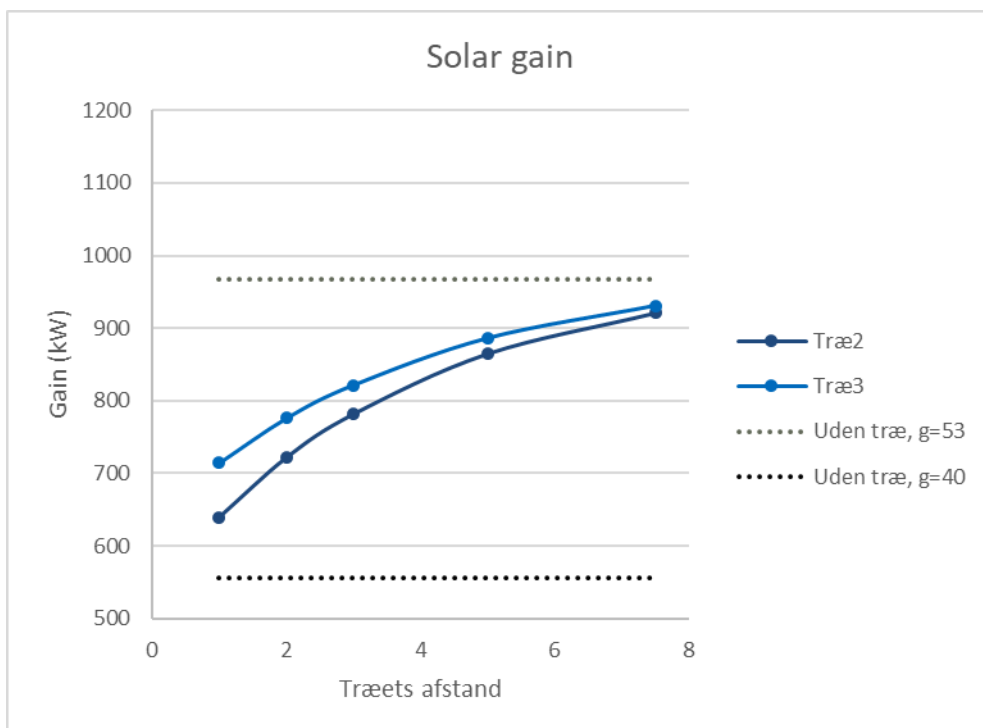


Figur 26 - Solbelastning i et rum i en sommeruge for forskellige afstande af træer

Der er i nedenstående graf (figur 27) lavet en sammenligning af den samlede soleffekt over året på en sydvendt rude med en g-værdi på 40. Den afskærmes af hhv. trætype 2 og 3 med forskellig afstand og sammenlignes med en rude med lav g-værdi. Det kan ses at træerne skal placeres ret tæt på ruden for at have en markant effekt. Desuden vil den lavere g-værdi samlet set give et lavere solbelastning. Som forventet ses det, at der er en lavere samlet solbelastning på et østvendt vindue. Ligeledes ses det dog, at træer har en større afskærmningseffekt mod øst selv med større afstand til ruden. Dette er ligeledes i overensstemmelse med tidligere simuleringer i DART, og skyldes at solen står lavere på himlen mod øst/vest.



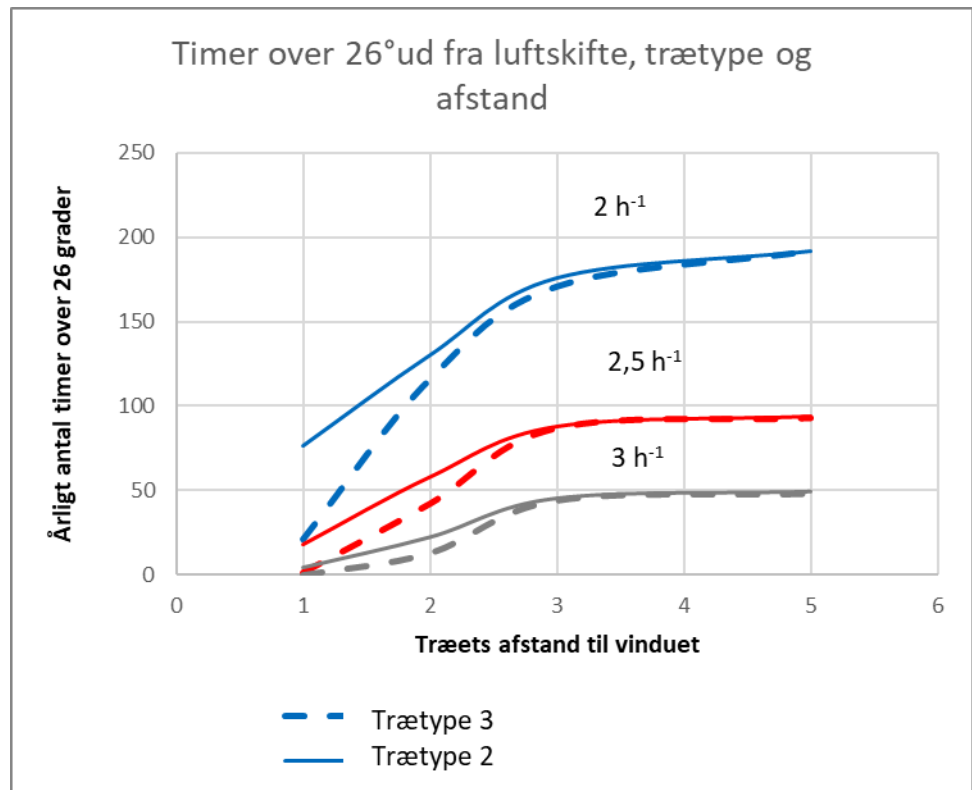
Figur 27 - Samlet soleffekt for et sydvendt vindue, der afskærmes af træer med forskellig afstand



Figur 28 - Samlet soleffekt for et østvendt vindue, der afskærmes af træer med forskellig afstand

Ved at sammenstille flere parametre, som fx luftskifter og træhøjder, kan der udføres en lang række variantanalyser og optimeringer i forhold til opfyldelse af f.eks. overholdelse af krav om risiko for overtemperatur (typisk: max 100 timer om året over 26 grader).

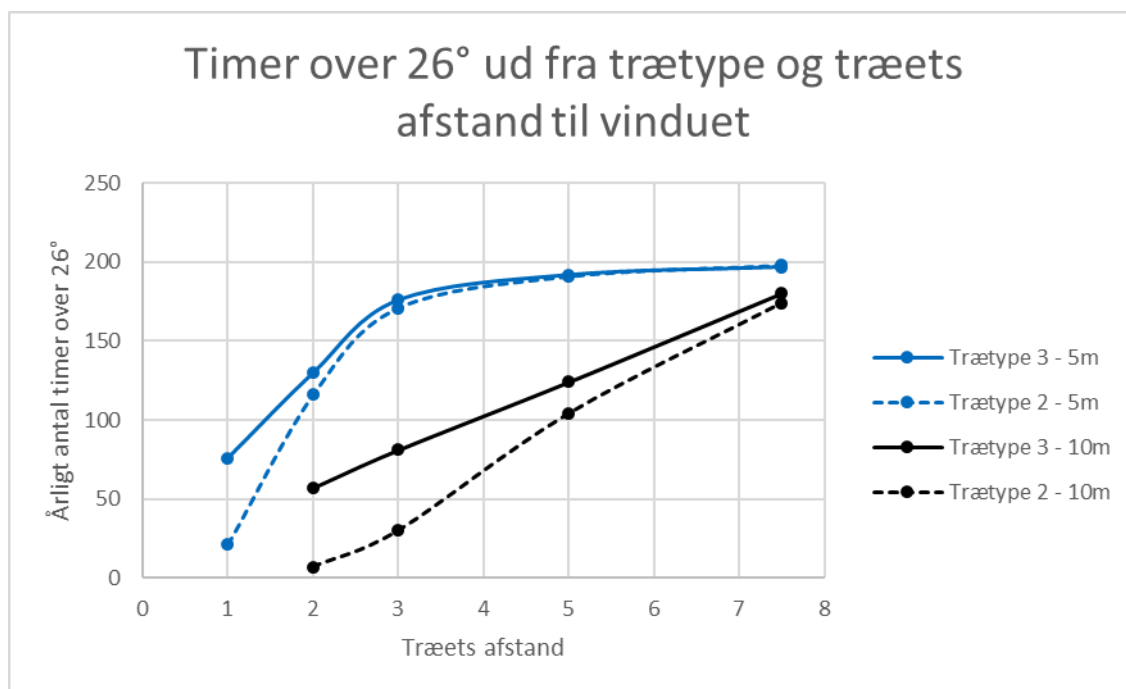
Herunder ses en variantanalyse af timer med overtemperaturer i et sydvendt kontor ved forskelligt luftskifte og afstand til et 5 meter højt skyggevirkende træ. Ved højere luftskifter har træets afstand til facaden en mindre effekt. Kun ved afstande mellem træ og facade på under 3 m har træet en markant effekt på overtemperaturer.



Figur 29 – Simulering af timer med overtemperatur som funktion af luftskifte og træets afstand til facaden

Herunder ses en variantanalyse af timer med overtemperaturer i et sydvendt kontor ved en træhøjde på hhv. 5 og 10 meter. Det større træ har en markant større afskærmningseffekt. Desuden betyder trætypen mere, des større indflydelse afskærmningseffekten fra træet har i det samlede termiske regnskab.

Det ses desuden at kurverne følger et forskelligt mønster grundet det forskellige geometriske forhold mellem vindue og afskærmning for forskellige træhøjder. Ved alle træhøjder går effekten dog mod nul, når afstanden øges. Der er ret markant forskel på træets solafskærmende effekt på et hhv. 5 meter højt træ og et 10 meter højt træ.



Figur 30 – Antal timer med overtemperatur som funktion af vinduets afstand til træer samt træets højde

Delkonklusion

Ved at simulere i IES kan metoden med at implementere træet som en ekstern geometri med en afskærmningsparameter svarende til g-værdi, rammeandel eller lign. kan bruges til ret omfattende simuleringsovelser, der kan bruges til at optimere træernes afstande, højde og lignende som designparametre i de tidligere projektfaser. De gængse simuleringstværtøjer på markedet er endnu ikke klar til, at der på en let og brugervenlig måde kan indarbejdes træernes sæson-varierende afskærmningseffekt. Det virker dog til, at f.eks. IES burde få et komponent klar, som ville gøre arbejdsgangen noget lettere. Søren Jensen er løbende i kontakt med IES, men der er ingen dato for, hvornår "translucent shade" er køreklar til dimensionering af bygningers kølesystemer.

På baggrund af simuleringerne kan man se samme tendenser som i DART simuleringerne: at man skal bruge træer bevist som en integreret del af design processen, hvis der skal opnås signifikant skyggevirksomhed. Orienteringen af ruden har en stor indflydelse, ligesom de geometriske forhold som højde og afstand er af afgørende betydning.

5. Diskussion

- Fejlkilder og diskussion af metode

Fejlkilder

I simuleringerne udgør 3D-modellerne en usikkerhed da træernes geometri ikke altid er præcist modellerede. Projektet har forsøgt at minimere denne usikkerhed ved tilpasning af geometrien med assistance fra teamet hos Paul Sabatier University, herunder ved at omdanne bl.a. træernes bladstørrelse vha. scripts, så de bedre repræsenterede de virkelige træer. Dog har det været en udfordring, at de tilgængelige 3D-filer af træer på markedet, som udgangspunkt er designet for at ligne træer bedst muligt i simuleringer, men ikke nødvendigvis performer som træer i simuleringer. De træer som Paul Sabatier traditionelt bruger i DART, er skovtræer med lange stammer og små kroner øverst på stammen, og der er ikke relevante i en bygningskontekst. Derfor er træerne i dette projekt, baseret på en database der primært benyttes til renderinger af landskabsprojekter, som efterfølgende er blevet tilrettet en smule.

Simuleringerne giver en unik mulighed for at undersøge følsomheden af enkelte parametre, som målinger af fysiske træer ikke giver. Derfor har det, i det stadie som forskningsområdet er på nu, været mere fordelagtigt at simulere generiske træmodeller for at undersøge hvilke parametre, der har størst indflydelse - end at måle på en række enkeltstående fysiske træer, som er svære at sammenligne.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at bytræer ikke vokser frit. Ethvert træ får i høj grad den geometri som vækstbetingelserne og beskæringen tillader. Derfor vil det samme træ få forskellig geometri, og dermed forskellig afskærmningseffekt, hvis den placeres forskellige steder og har forskellige ejere.

Simuleringer

Simuleringerne i DART har muliggjort variantanalyser og følsomhedsanalyser, som giver en bedre forståelse af træernes indflydelse ved at kunne justere på en parameter af gangen. Ulempen ved simuleret data er udfordringen med at dokumentere at disse data også er valide i den fysiske verden. Hvis dette skal gøres præcist, kan det kræve en præcis scanning af et givent træ, som så simuleres for at kunne sammenligne én-til-én. Som tidligere nævnt har det været en udfordring, at de tilgængelige trægeometrier er udarbejdet med henblik på arkitektur og æstetik. Derfor har der i forskellig grad været behov for at efterbehandle træmodellerne for at opnå en brugbar geometri. Metoden med at simulere i DART er forholdsvis tung og genererer meget tunge datasæt som er svære at håndtere for de fleste virksomheder. DART genererer også store mængder af data som ikke vil være relevante at benytte i de enkelte byggesager. Der er i dette projekt etableret en metode, hvor de komplekse data fra DART konverteres til en afskærmningsfaktor for det visuelle og termiske spektrum, som gør det let at arbejde videre med til håndberegninger eller simuleringer.

Træer vil forholdsvis nemt kunne indarbejdes i indeklimasimuleringer, hvis branchens indeklimasimuleringsprogrammer understøtter eksterne translucente afskærmningsobjekter. IES VE har indarbejdet denne funktionalitet, men på grund af fejl er funktionen midlertidig deaktiveret. Søren Jensen er i løbende dialog med IES support omkring hvornår denne funktion igen implementeres. Dialog med support fra IDA ICE har ikke givet indikationer på, at der er en tilsvarende brugbar feature i IDA ICE. Projektet har

bevidst valgt ikke at udbygge beregningsmetoder, der er frakoblet de arbejdsgange, som benyttes hos de rådgivende virksomheder i Danmark. Hvis der f.eks. udvikles en specifik metode, der kun er brugbar i EnergyPlus, vil det kun være relevant for en meget begrænset del af branchen. Desuden vil det i praksis være en betydelig fordyrelse af byggeprojekterne, at der skal oprettes og vedligeholdes flere modeller. Metoden med at benytte eksterne translucente objekter kan benyttes i flere simuleringsprogrammer. Desuden forsimples de geometriske betragtninger, som kan være ret komplekse, når der skal tages højde for placeringen af vinduer, træer, sol og himmel.

6. Konklusion

- Erfaringer på baggrund af studiet og mulighed for videre studier

Der er i projektet udregnet afskærmningsfaktorer både fra simulering og fra målte værdier (de målte værdier er dog ikke med i denne rapport). Begge undersøgelser indikerer en markant afskærmningseffekt af træer, hvis træerne bliver benyttet korrekt – dvs. med de rette kombinationer af orientering, afstand og kronehøjde. Effekten er dog ikke af et omfang, så den vil kunne erstatte fx mekanisk køl eller glas med en lav g-værdi i de fleste byggerier. Men som en del af en samlet designstrategi kan træer benyttes til at reducere kølebehovet. For at anvende træer aktivt som solafskærmning er det dog vigtigt at tage højde for følgende:

Samtidighedsbetragtning mellem brugstid og afskærmning

Interne og eksterne varmebelastninger vil variere over tid. Når træer benyttes som afskærmning vil træet også have en forskellig afskærmningsfaktor i løbet af dagen og på tværs af årstiderne. Derfor er det vigtigt at definere nogle dimensionerende situationer. Både mht. maksimale varmebelastninger, men også i forhold til træernes afskærmning

Orientering af vindue

Træers solafskærmningseffekt er ikke lige effektiv mod alle orienteringer. Mod øst og vest kan træerne reducere lavtstående sol på facaden, mens reduktion er markant mindre for en sydlig orientering, da solen ofte lyser over træerne. Dog er der en sæsonmæssig betragtning, der er relevant at have for øje på grund af solens varierende bane hen over året: hvis vintersituationen f.eks. er dimensionerende for kølesystemet, vil træernes effekt være højere ved sydvendte rum.

Valg af trætype

I tilfælde hvor der primært skal afskærmes om vinteren, vil nåletræer oftest være at foretrække. I alle øvrige tilfælde er det vigtigt at undersøge, hvilke typer træer der er anvendelige til det enkelte projekt. Hvis der ønskes en 'hurtig' afskærmningseffekt, bør relativt hurtigvoksende trætyper så som robinie eller platan benyttes. Ligeledes der en række overvejelser som ikke indgår i denne rapports undersøgelser, så som vanding og jordbundsforhold. Hvis der vandes skal tages højde for, om der skal benyttes brugsvand eller opsamlet regnvand, og om træerne kan klare sig i det mikroklima de skal placeres i. Derfor er det vigtigt med et tidligt tværfagligt arbejde for at forene arkitekternes æstetiske ønsker med ingeniørens performance krav og træeksperternes viden om træernes vækstforhold og trivsel.

Afstand fra facade

Afstanden fra facaden har meget stor effekt på solafskærmningen. Afhængig af facadens orientering skal træerne generelt placeres tæt eller meget tæt på facaden for at have væsentlig effekt. Dette kan have indflydelse på både landskabsarkitektur, bygningsarkitektur og brandforhold - da det har indvirkning på hvordan facaden betragte, hvor der kan etableres redningsåbninger, brandveje og lign.

Træpleje

Hvis træer placeres meget tæt på facaden, kan det kræve en højere driftsudgift, da de skal beskæres ofte for ikke at ramme facaden. Derudover er det vigtigt at huske, at træer ikke kun vokser i højden, men også i bredden. Derfor kan det være nødvendigt at plante flere træer tidligt for at opnå en afskærmningseffekt, men at der senere tyndes systematisk ud for at give plads til de mere fuldvoksne træer. I sådanne betragtninger er det relevant af indhente vejledning fra fagfolk med den rette viden om pleje af træerne. Desuden vil træplejen for bytræer generelt have afgørende betydning for tæthed og den generelle geometri.

Jordbundsforhold

Undersøgelser af jordbundsforhold er ikke belyst i denne rapport. For at kunne definere hvor meget et træ kan vokse, er det vigtigt at fastlægge jordbundsforholdene. Både i forhold til hvilken type af jord, om den er våd eller tør, men også hvor meget plads rødderne har til at vokse. Hvis træer plantes på taghaver eller over parkeringskældre, er der et naturligt begrænset rum for træerne til at vokse. Men også i mere almindelige urbane træplaceringer kan der være bindinger i jorden der hæmmer væksten. Installationer i jord, fundamenter og lign kan have en indflydelse på i hvilket omfang træet kan vokse. Men de er essentielle for projekteringen i praksis.

Eksisterende forhold og kontekst

Hvis der er eksisterende træer ved nybyg eller renovering, er de en potentiel afskærmningsressource som det vil tage mange år at opnå ved, at der plantes nyt. Ligeledes skal der ved nyplantning tages højde for den kontekst mht. til flora og fauna som træet tilføjes. Hvis der er defineret en biodiversitetsstrategi, kan det være defineret at bestemte dyr kræver bestemte trætyper ligesom der kan stilles krav om hjemmehørende plantearter.

Dagslys

Hvis træer benyttes som afskærmning for solvarmetilskud, vil det medføre en reduceret tilgang af dagslys. Denne minimering vil ved løvfældende træer være varieret, så der ikke er samme afskærmning om vinteren. På den måde er der en sæsonmæssig sammenhæng imellem behov for dagslys og træets afskærmningseffekt. Ligeledes er der højst sandsynligt en psykologisk forskel på afskærmningen fra træer og bygningsintegreret solafskærmning som persiener. Skygge fra blade kan betragtes som en mere naturlig afskærmning og derfor mindre generende. Uanset hvad, er det vigtigt at tage højde for det trade off, det er at placere træer tæt på facaden, da det kan øge behovet for elektrisk belysning. I dette studie viser målingerne, at der er en forskellig afskærmningseffekt i det visuelle og det termiske spektrum, hvor der desværre afskærmes forholdsvist mere i det visuelle spektrum.

Videre studier

Der er generet en stor mængde data fra simuleringer i løbet af dette projekt, For at afklare følsomheden af forskellige faktorer, er der i simuleringssprogrammet DART genereret en lang række simuleringsserier der undersøger andre parametre end dem der benyttes til udvikling af afskærmningsfaktorer og afdækning af løsningsrum. Der er derfor rig mulighed for at arbejde videre på de data, der er genereret fra simuleringerne udført af Paul Sabatier University. Det er også mulighed for at bygge videre på de udviklede metoder.

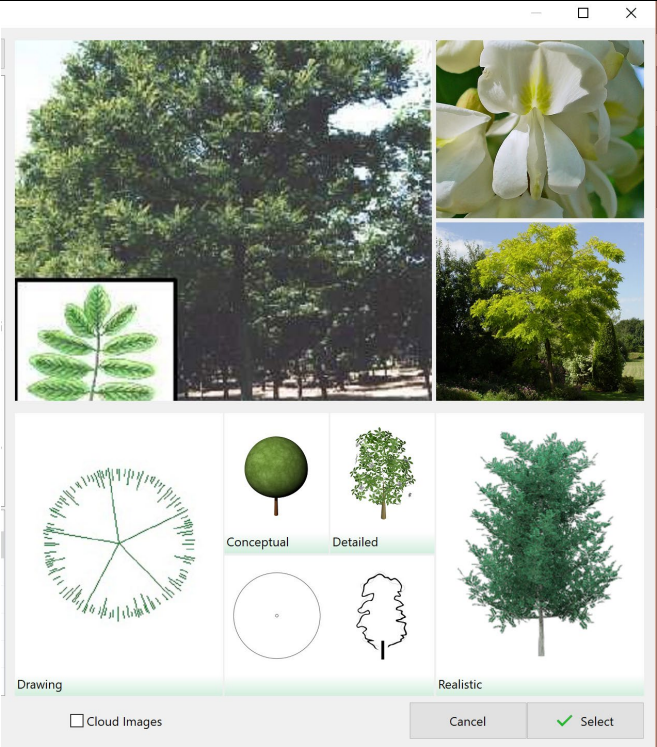
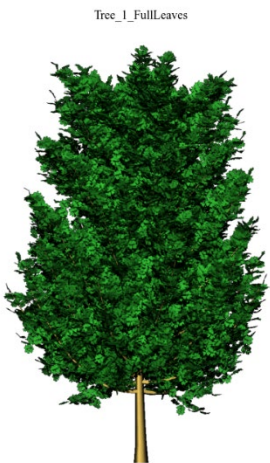
Der kan eksempelvis arbejdes videre i forlængelse af de forstudier af parametervariationer, der er udført i simuleringsserie 3, jævnfør Bilag 5. Derudover er der en lang række emner, der kan arbejdes videre med, herunder:

- Målte værdier i testbyggerier/opstillinger
- Målte værdier i casebyggerier
- Nærmere studier af trægeometri og udarbejdelsen af 3D-modeller til termiske og visuelle simuleringer
- Effekten af træpleje på afskærmningsfaktoren
- Vidensdeling omkring projekts metoder og resultater til både lægmand og fagfolk
- Udvikling af metode og algoritme til brug i Be18 og indarbejdelse i Bygningsreglementet samt brugervenligt værktøj til vurdering af energi og indeklimavurderinger
- Udførelse af subjektive brugervurderinger af træernes effekt på det oplevede indeklima
- Database for træsorter inklusive afskærmningseffekt
- Længerevarende fysiske målinger med større måleinterval
- Afskærmning ved facadeintegrerede slyngplanter, som metode for at sikre en højere og mere konstant afskærmningsværdi hen over sommeren og sikre sig en hurtigere tilvækst

6. Bilag

| | |
|---|-----------|
| 1 Træliste til simulering | 49 |
| 2 Trægeometri | 54 |
| 3 Grafer for fordeling over dagen | 56 |
| 4 Grafer for det synlige spektrum vs. det fulde spektrum | 60 |
| 5 Simuleringsstrategi | 65 |

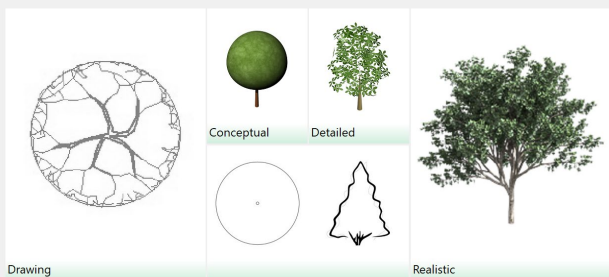
1 Træliste til simulering

| | |
|--|---|
| <p>1 Alm. Robinie</p> <p>Robinia pseudoacacia</p> <p>Black Locust "Bessoniana"</p> | |
|  | |
| <p>Height: 12m</p> <p>Diameter: 7,6m</p> <p>Maks højde: 20-25m</p> <p>Maks diameter: 12-18 m</p> | |
|  | |
| <p>Note:</p> | <p>højdetilvæksten er meget stor i ungdomsfasen +1 m pr. År, 25-50cm pr-år efter 10 år.</p> |
| <p>Udvælgeskriterie</p> | <p>Kan beskæres som højtstammet træ. Meget hurtigtvoksende hvormed der hurtigt kan skabes skygge fra træer.</p> |
| <p>Løvspring</p> | <p>Maj</p> |
| <p>Løvfældende / stedsegrøn</p> | <p>Løvfældende i november måned</p> |
| <p>Lysgennemfald*</p> | <p>Sol</p> |

2 Rødel

Alnus glutinosa

Common alder



Height: 8m

Diameter: 5 m




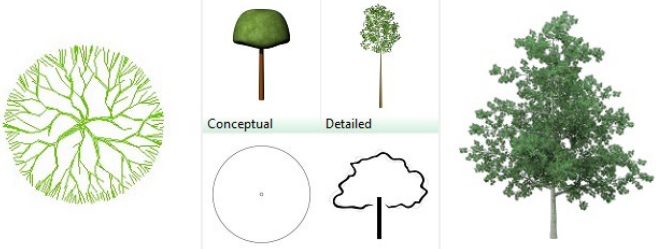
Maks højde: 10-25 m

Maks diameter: 8-14m



| | |
|----------------------------------|--|
| Note: | <p>Rødel blomstrer allerede i marts/april. Bladene springer derimod først ud i begyndelsen af maj.</p> <p>Bladene er runde og glatte med en fint takket kant. De er mørkegrønne på oversiden og lysegrønne på undersiden og tit lidt klæbrige. Bladene er stadig grønne, når de falder af om efteråret, hvilket er helt specielt for rødel.</p> <p>Årlig vækst 30-40cm i højden og 20cm i plan</p> |
| Udvælgeskriterie | <p>Rødel kan som det eneste danske træ tåle at stå med rødderne i vand gennem længere perioder. Træet er dermed velegnet til brug i regnvandsbed som der ofte er behov for i bymæssige sammenhæng.</p> <p>Hjemmehørende art</p> |
| Løvspring | Maj |
| Løvfældende (måned) / stedsegrøn | Oktober-november |
| Lysgennemfald* | Mellemtæt |



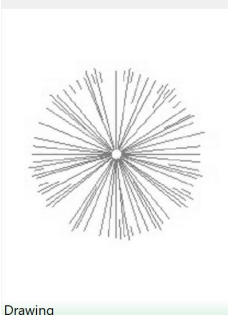




3 Platan

| | |
|---|---|
| <p>planatus x acerifolia</p> <p>Plane tree</p> | |
|   | |
| <p>Height: 12m</p> <p>Diameter: 6m</p> <p>Maks højde: 20-30 m</p> <p>Maks diameter: 15-25 m</p> | |
|  <p style="text-align: center; font-size: small;">Tree_3_FullLeaves</p> | |
|  | |
| Note: | |
| Udvælgeskriterie | <p>Medtaget for at repræsentere et mere skyggende træ. Den har en særedels bred krone og skaber dermed meget skygge.</p> <p>Tilvæksten er stor i ungdomsårene.</p> <p>Meget typisk allétræ og fungerer godt som bytræ.</p> <p>Bemærk risiko for plantansyge</p> <p>Årlig vækst 50cm i højden og 40cm i plan</p> |
| Løvspring | Sidst maj – start juni |
| Løvfældende / stedsegrøn | Løvfældende i oktober/november måned |
| Lysgennemfald* | Skygge |

| |
|---|
| <p>4 Vortebirk</p> <p>Betula pendula</p> |
|---|

| European White Birch | |
|--|--|
| | <p>Tree_4_FullLeaves</p> <p>Height: 8m Diameter: 3m Maks højde: 15-20 m Maks diameter: 4-7 m</p> |
| <p>Note:</p> | <p>Bredde er faktor 2 i forhold til standard i Lands design for at give en mere retvisende geometri</p> <p>Årlig vækst 35-40cm i højden og 10cm i plan</p> |
| <p>Udvælgeskriterie</p> | <p>Vortebirk er velegnet på sandet, tør bund, men tåler ikke vind. Et let træ, der springer tidligt ud.</p> |
| <p>Løvspring</p> | <p>Slut april / start maj</p> |
| <p>Løvfældende / stedsegrøn</p> | <p>Løvfældende i oktober / november måned</p> |
| <p>Lysgennemfald*</p> | <p>Sol</p> |

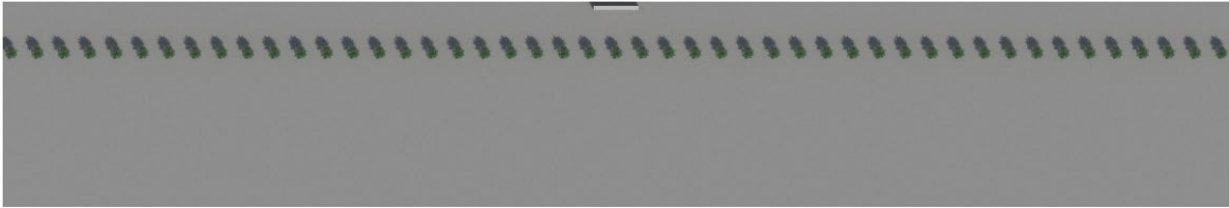
5 Skovfyr - Pinus sylvestris, Scotch pine

| | | | | |
|--|--|---|--|---|
|  |  | <p>Højde: 12m Diameter: 7m Maks højde: 10-30 m Maks diameter: 7-10 m</p> | | |
|  <p>Drawina</p> |  <p>Conceptual</p> |  <p>Detailed</p> |  <p>Realistic</p> | <p>Tree_5_FullLeaves</p>  |
| <p>Note:</p> | <p>Bemærk mindre ved plantning end de andre typer, men vil med tiden vokse sig op til samme størrelse. Derfor er størrelsen H:12m og Ø:7m nok mere end 7 år.</p> | | | |
| <p>Udvælgeskriterie</p> | <p>Skovfyr er en nøjsom træart, der vokser godt selv på ret næringsfattig jord. Træet kan trives under meget forskellige klimaforhold – og kræver ikke meget vand.</p> <p>Medtag et nåltræ aht. længere skyggesæson. Skyggevirkningen er dog afhængig af kroneform som kan være uregelmæssigt.</p> | | | |
| <p>Løvspring</p> | <p>Stedsegrønt nåltræ - knopbrydning i maj</p> | | | |
| <p>Løvfældende / stedsegrøn</p> | <p>stedsegrønt nåltræ</p> | | | |
| <p>Lysgennemfald*</p> | <p>Sol</p> | | | |

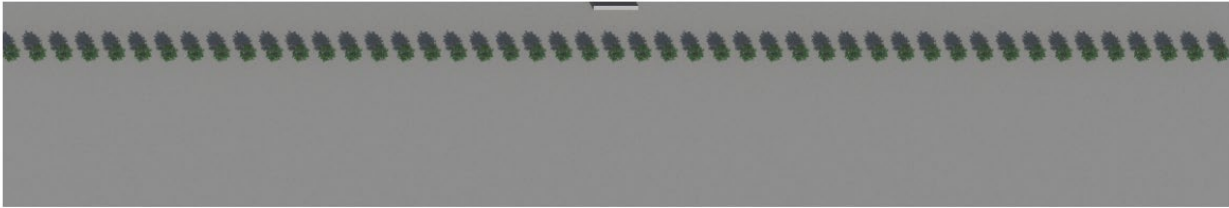
2 Trægeometri

Rækker af træer er simuleret som set i nedenstående screenshots

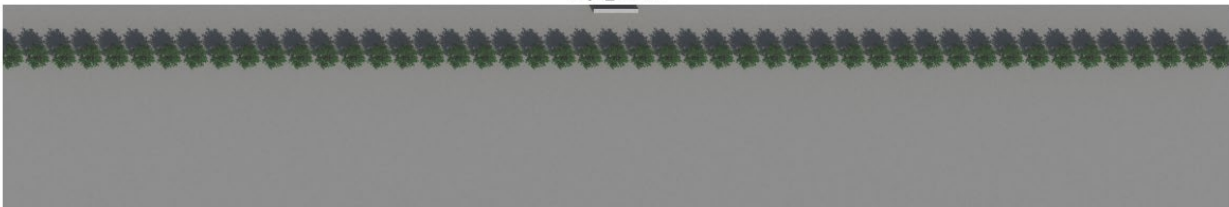
Step3_Juvenile



Step3_Young



Step3_Mature



Step3_Fully_Mature



Eksempel på årstidevariation af trægeometri. Årstidsvariationerne ses desuden ved parametermatrix

Tree_1_BrownLeaves



Tree_1_FullLeaves



Tree_1_NoLeaves



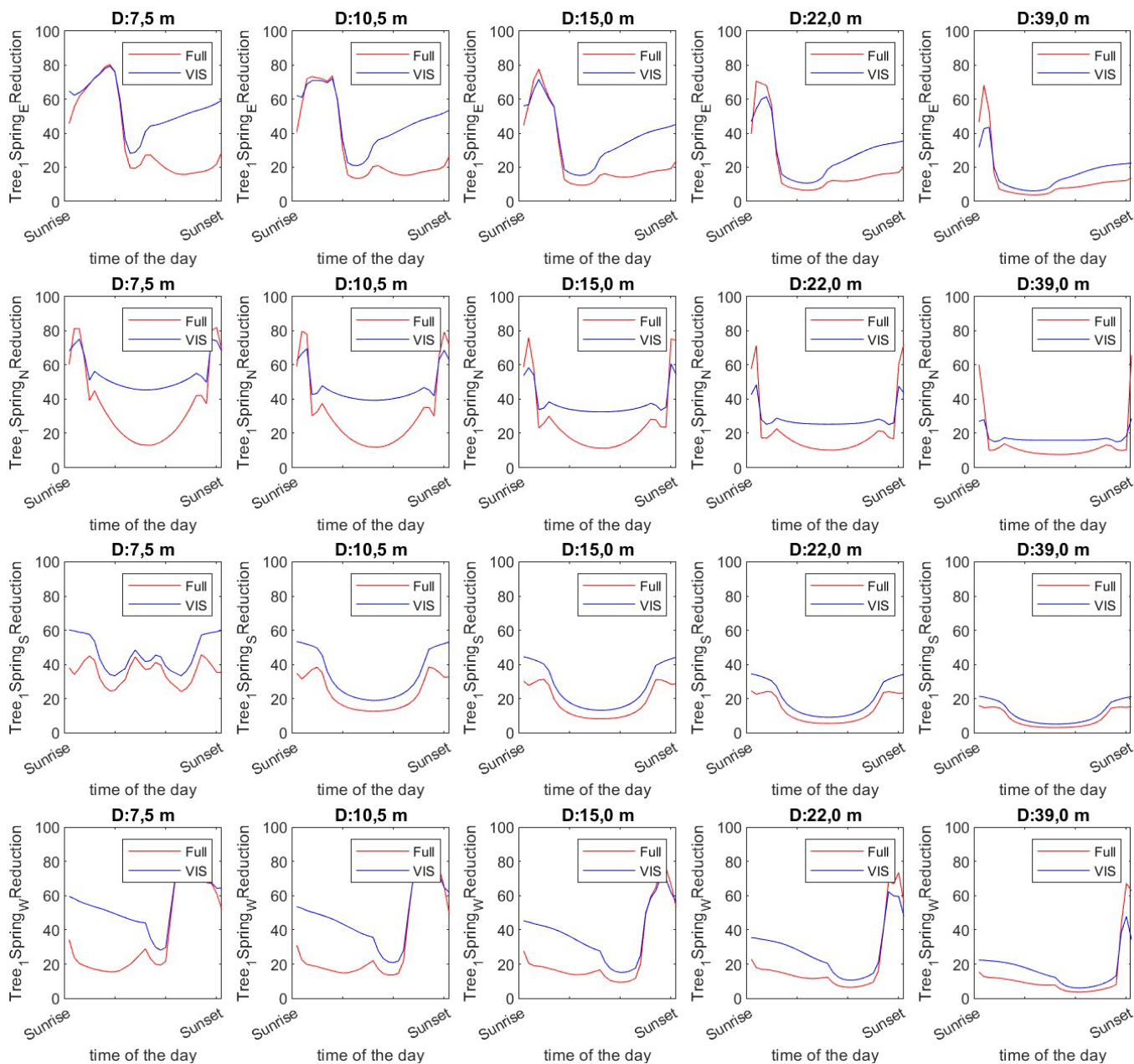
Tree_1_SmallLeaves



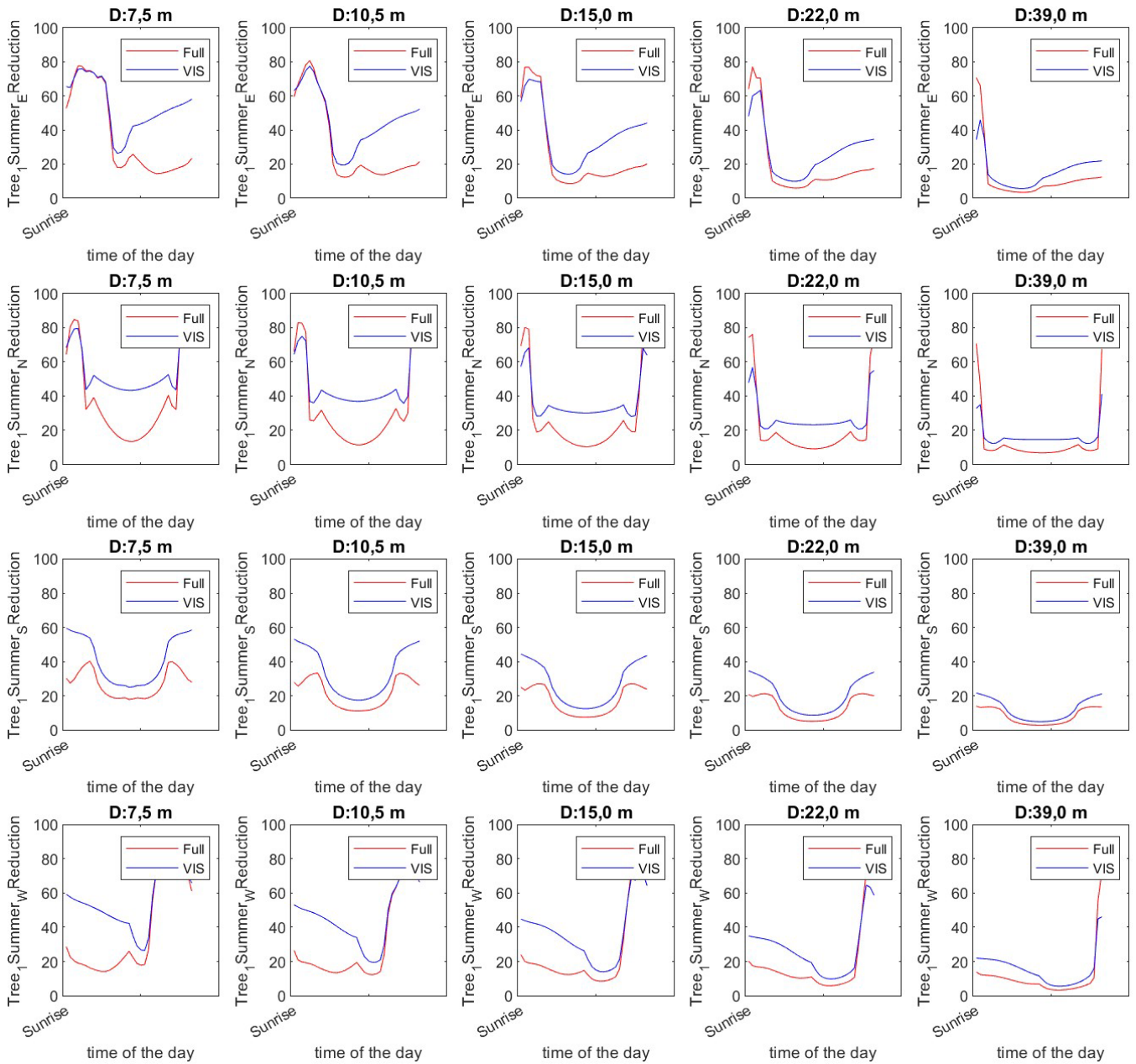
3 Grafer for fordeling over dagen

Fordeling over dagen

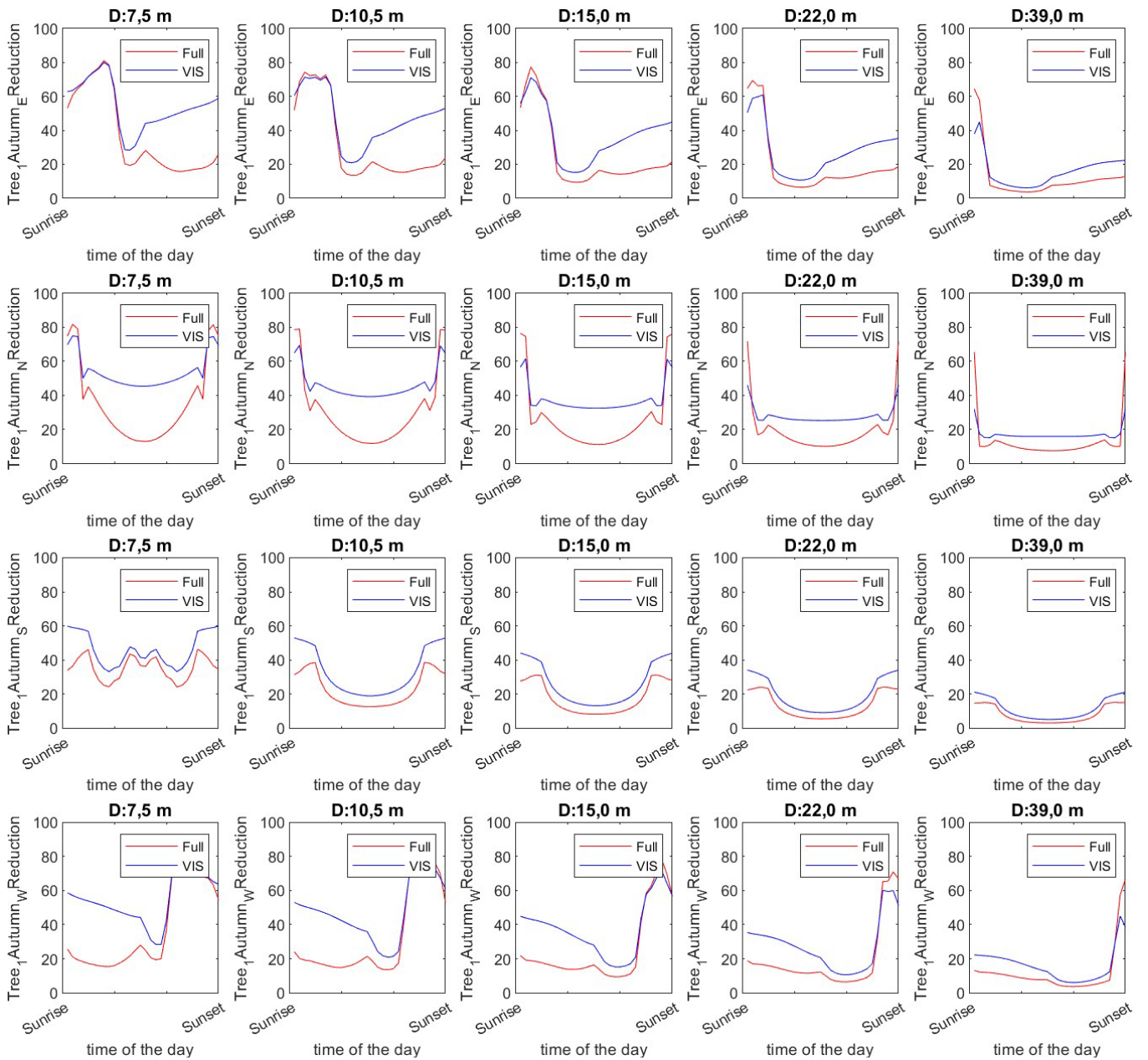
Herunder vises i en række eksempler på skyggefaktorens fordeling over dagen for træsort 2. Hver side med grafer viser en bestemt sæson, og de tre rækker på hver side gælder for hver deres orientering hhv. øst (E), nord (N) og syd (S). Fordeling – træsort 1, forår



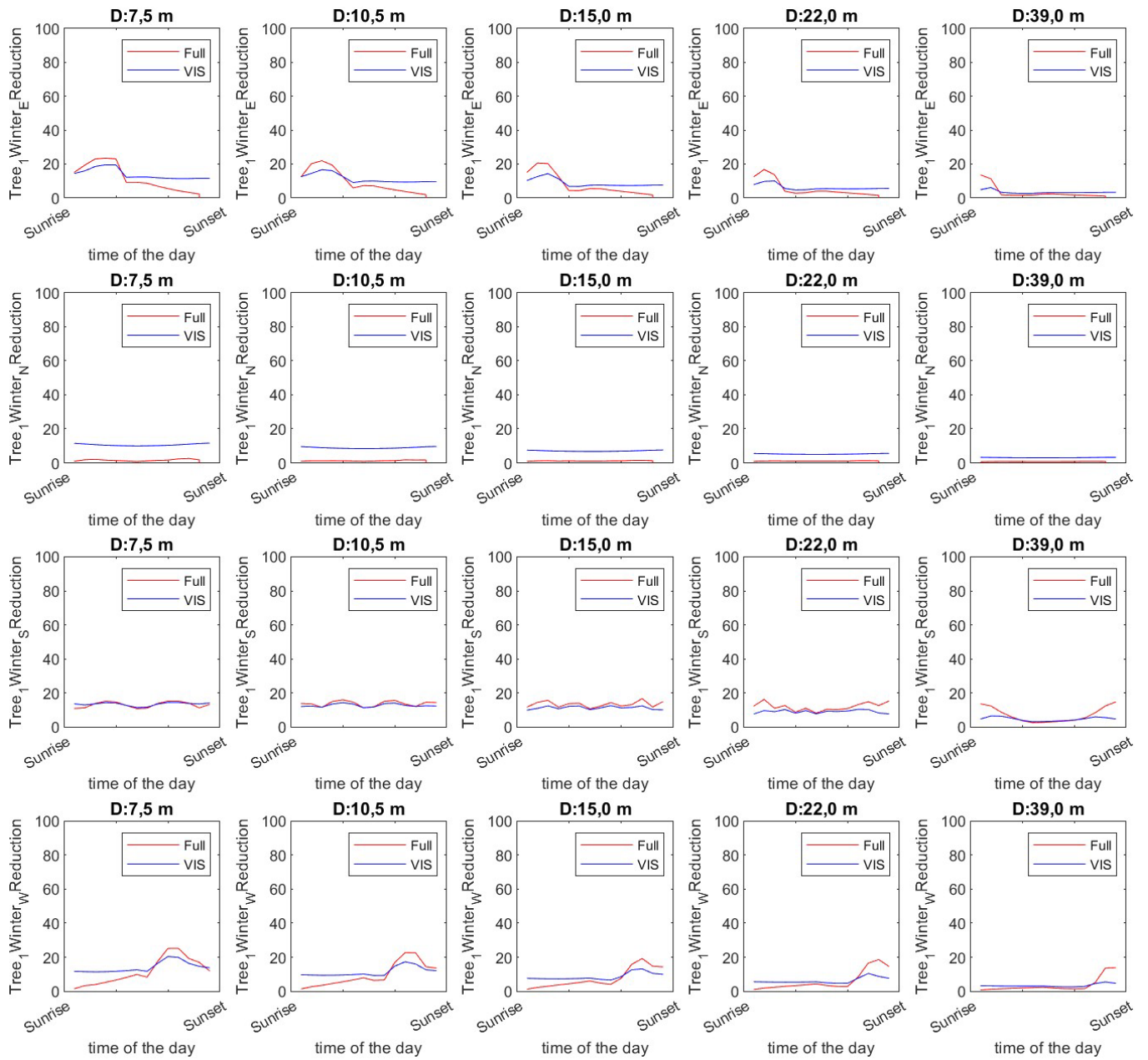
Fordeling – træsort 1, sommer



Fordeling – træsort 1, efterår



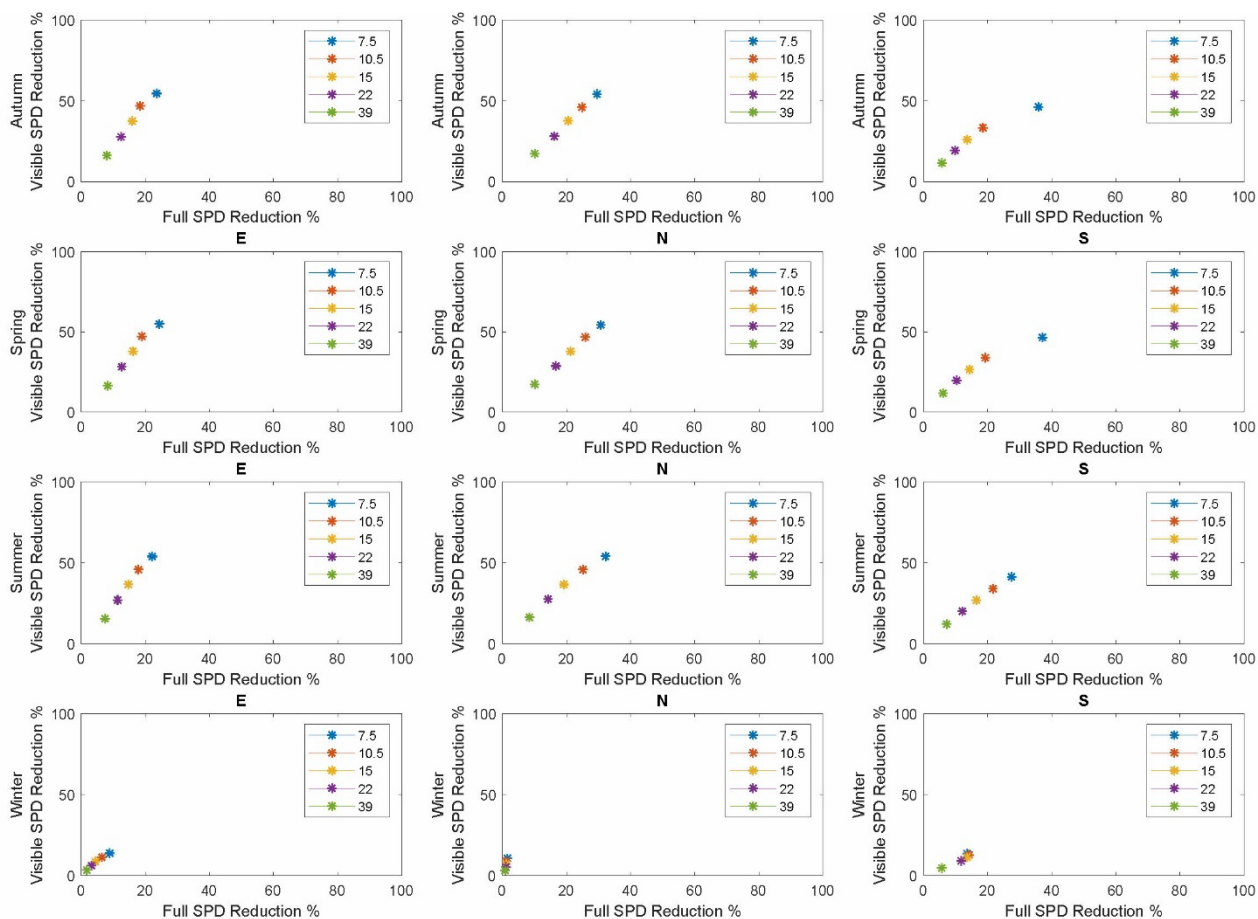
Fordeling – træsort 1, vinter



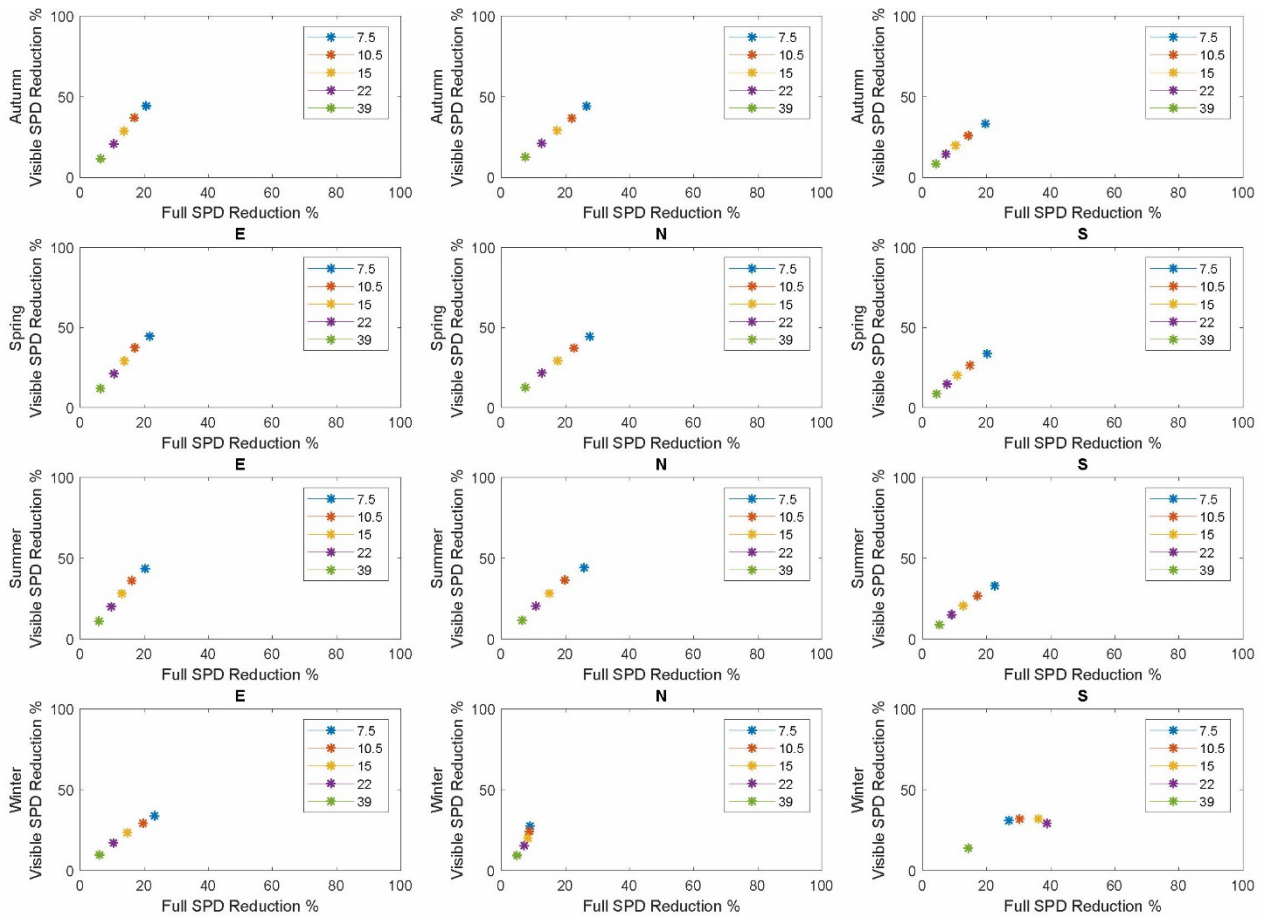
4 Grafer for det synlige spektrum vs. det fulde spektrum

Herunder vises reduktion af energien i det synlige spektrum plottet som funktion af det fulde spektrum for hver træsort.

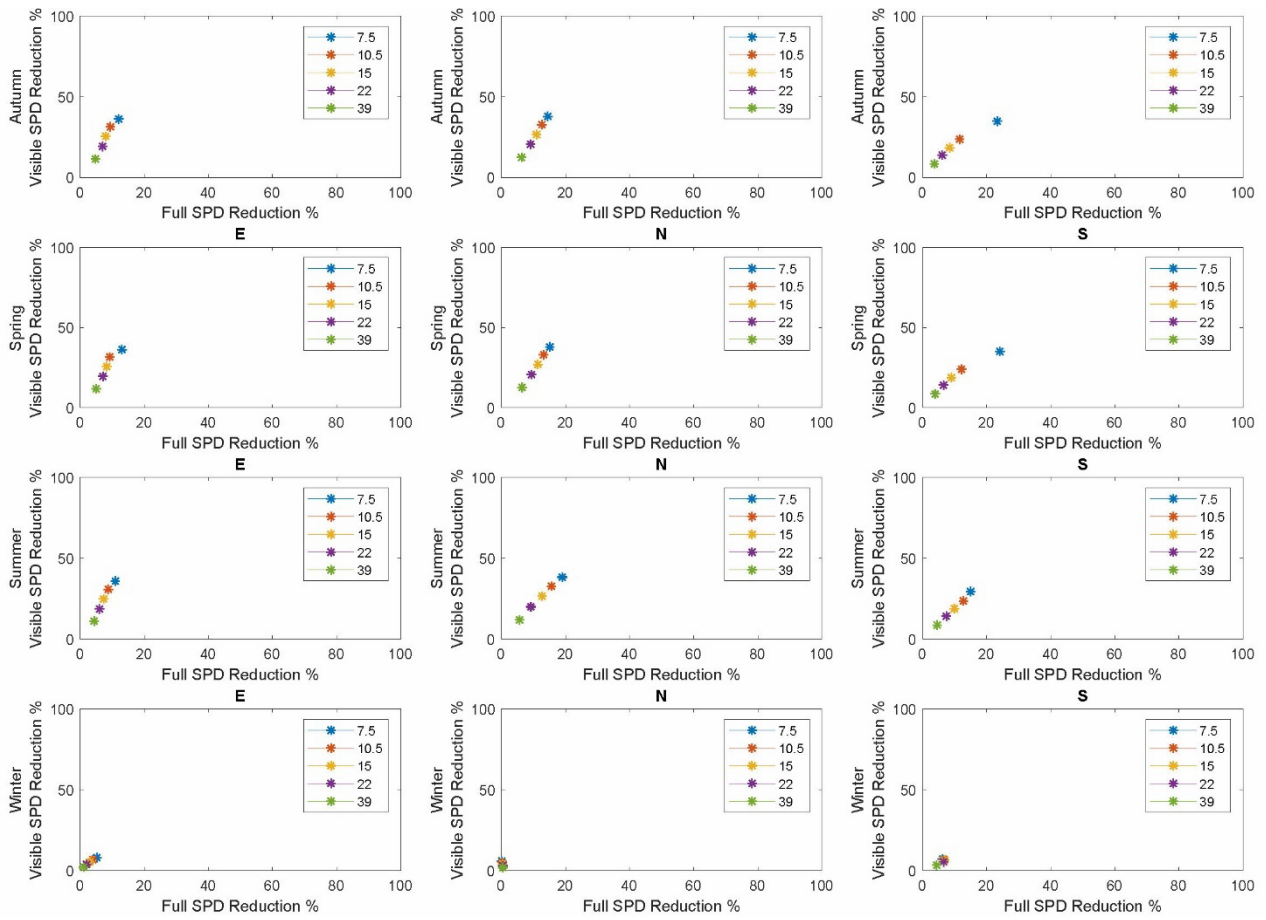
Effektivitet – træsort 1



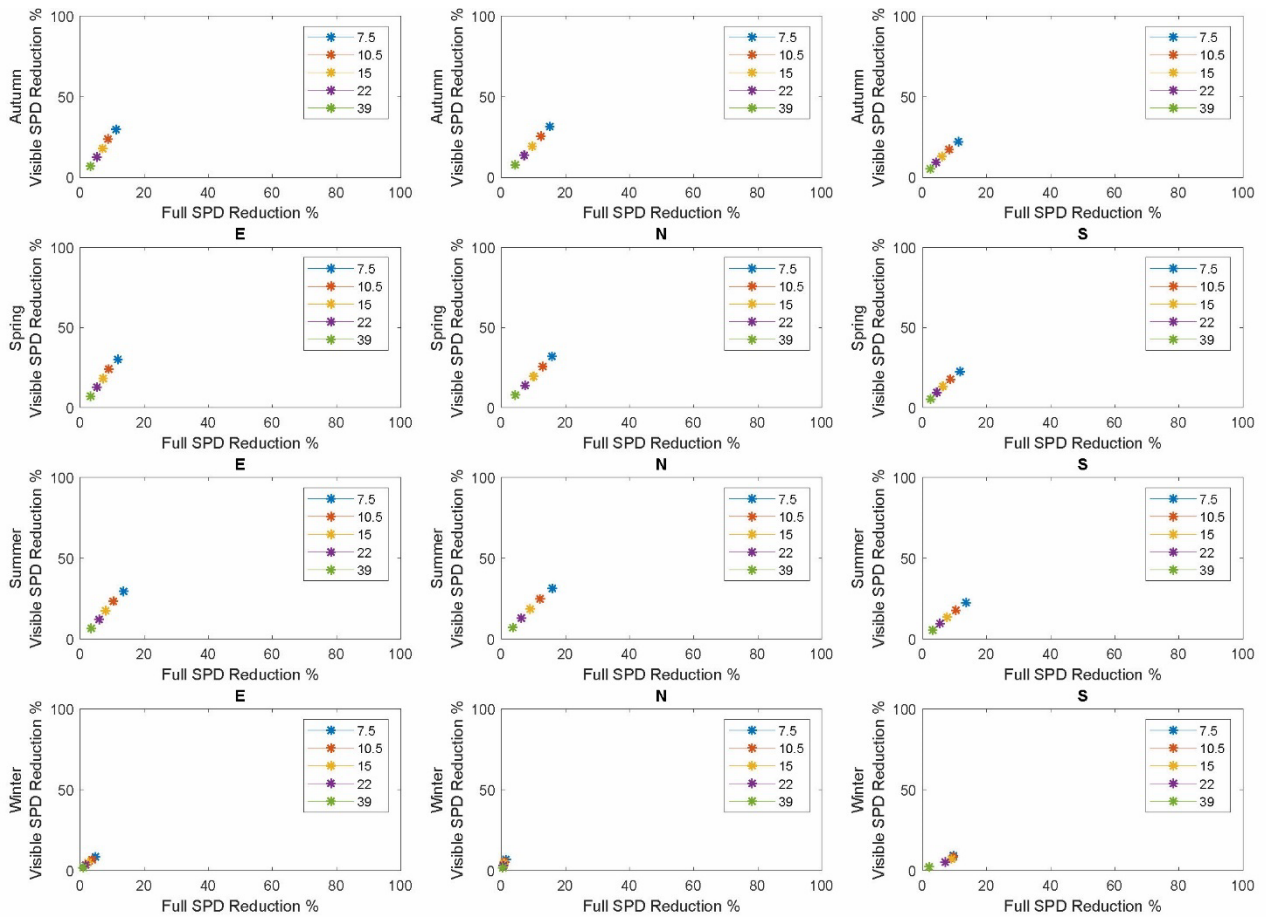
Effektivitet - træsort 2



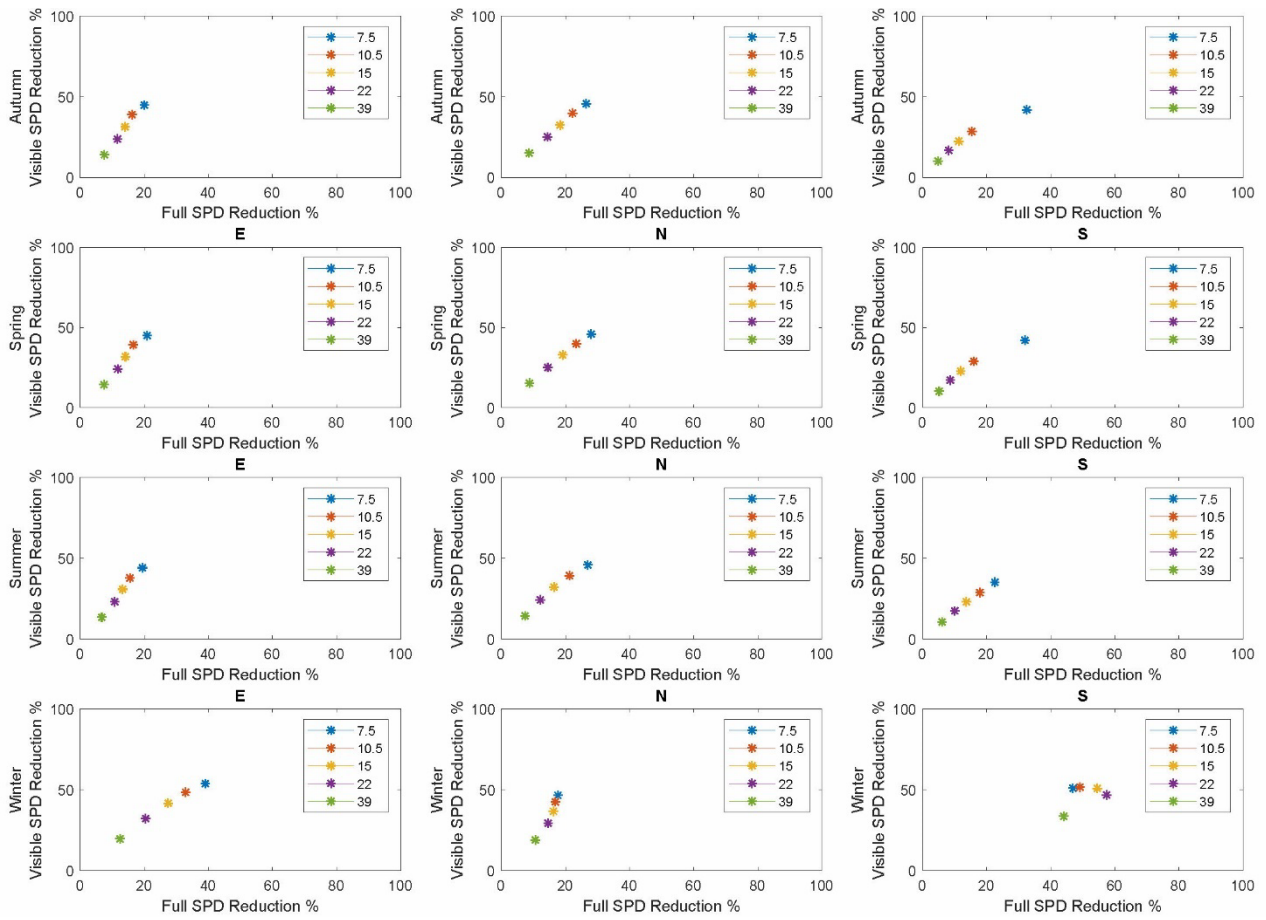
Effektivitet - træsort 3



Effektivitet - træsort 4



Effektivitet - træsort 5



5 Simuleringsstrategi

Simulation strategy overview

Version 2.6.1, Juli 7th - 2022

General description

This document contains descriptions of the simulation strategy including the setup of the simulations and the parameter variations.

The proposed strategy for simulation in three steps:

1. The first simulation series explores the shading efficiency of a chosen tree crown (read: the combined contribution of the many individual leaves and branches in the given crown). Results aim to provide 'generic' shading properties that could be used in future buildings performance simulations (BPS). Note that in this first simulation series, all simulations are made without context (such as other trees or neighboring buildings), as this will be taken into account in each individual case when BPS is performed (outside of this project).

| | |
|----------------------|---|
| Scene: | single tree |
| Tree types: | 5 (with four seasonal variations) |
| Temporal resolution: | single measurement |
| Variables: | altitude variation (only for tree type 1) |

2. The second simulation series explore a multivariate solution space by simulating all combinations of two selected parameters ('orientation' and 'distance') with 4-5 variations for each. All other possibly relevant parameters either are fixed or considered negligible and thus outside the scope of this project. Results aim to provide a pre-simulated solution space, which designers and planners can use to provide design decision support, without having to rely on BPS software.

| | |
|----------------------|---|
| Scene: | row of trees |
| Tree types: | 5 (with two seasonal variations) |
| Temporal resolution: | a full day/season (30 min time steps) |
| Variables: | orientation and distance in combination |

3. The third simulation series is a series of 'local' studies that provides information that can supplement the 'global' study performed in the second simulation series. This simulation series consists of three individual studies that each investigate a single parameter variation (at different orientations), while all other parameters are fixed. This approach has the advantage of providing some insight into the sensitivity of the investigated parameters without increasing the total amount of simulations exponentially.

| | |
|----------------------|---|
| Scene: | row of trees |
| Tree types: | 1 (with two/four seasonal variations) |
| Temporal resolution: | a full day/season (30 min time steps) |
| Variables: | tree size, façade orientation, overcast sky conditions, increased temporal resolution, |

Timeline and simulation hierarchy

Due to a combination of 1) time constraints in the project because earlier delays, 2) missing 3D models for some of the tree species, and 3) some simulations being dependent on the results of other simulations we propose that the simulations are performed in a series of five steps as indicated by the roman numerals:

- I. The first simulation series: tree type 1 (Robinia pseudoacacia).
 - a. This will indicate whether the study provides the results we expected for the first simulation series, including whether the parameter 'direction through crown' is significant.

Note: The direction is significant. As a result, tree type 2-5 has to be run with the same altitude variations as for tree type 1.
 - This step can be initiated as soon as both parties have confirmed the proposed strategies and all details have been clarified.

- II. The first simulation series: tree type 2-5.
 - This step can be initiated as soon as the results from step (I) has been confirmed to provide useful results and once we confirmed whether the angle through the crown is a significant parameter or not.

Note: The direction is significant. As a result, tree type 2-5 has to be run with the same altitude variations as for tree type 1.

- III. The second simulation series: tree type 1 (Robinia pseudoacacia).
 - a) This will indicate whether the study provides the results we expected for the second simulations series, including whether the 'east' and 'west' orientations yield identical results.
 - This step can be initiated as soon as both parties have confirmed the proposed strategies and all details have been clarified.

- IV. The second simulation series: tree type 2-5.
 - This step can be initiated as soon as the results from step (I) has been confirmed to provide useful results and once we have concluded whether the 'east' and 'west' orientation results are identical.

- V. The third simulation series: all individual studies (simulation 3.1 to 3.4).
 - This step can be initiated as soon as the results from step (III) has indicated which tree type and tree distance has the 'best performance'. Søren Jensen and the research team will choose a single tree and a single distance for these studies.

Tree types for all simulations

As of 07/03/22, the trees proposed for the simulations are as indicated in Table 0a below. The listed dimensions are for trees of comparable size and age. The deciduous trees are aged 7 years after the maximum planting size of 4-5 meters. As pine trees are typically planted at maximum 2 meters height, and will only be 6-7 meters after 7 years, the current study we use a slightly older tree with similar dimensions as the deciduous trees. This is done to ease comparison across species, and because all tree types will eventually grow to a similar height.

Note that while the tree crowns are not yet fully developed 7 years after planting, they are assumed to have a decent leaf coverage.

| Tree type # | Tree name Latin | Tree name English | Tree name Danish | Height: +7 years | Width: +7 years | Height: full grown | Width: full grown | Leaves |
|-------------|----------------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| 1 | Robinia pseudoacacia | Black Locust "Bessoniana" | Alm. Robinie | 12 | 7.6 | 20-25 | 12-18 | May / Nov |
| 2 | Alnus glutinosa | Italian Alder | Rødel | 8 | 5 | 10-25 | 8-14 | May / Oct- Nov |
| 3 | planatus orientalus | Oriental Plane Tree | Platan | 12 | 6 | 20-30 | 15-25 | May- Jun / Oct- Nov |
| 4 | Betula pendula | European White Birch | Vortebirk | 8 | 3 | 15-20 | 4-7 | Apr- May / Oct- Nov |
| 5 | Pinus sylvestris | Scotch Pine | Skovfyr | 12 | 7 | 10-30 | 7-10 | N/A |

Table 0a: overview of the selected tree types and their basic dimensions. Note that the '+7' height and width categories refer to 7 years of growth after maximum plantation size for deciduous trees (type 1-4). The pine tree of a similar height (type 5), is a few years older than the indicated +7 years due to a smaller plantation size.

Simulation series 1: Shading properties of a single tree crown

1a. Description

Quantification of shading performance for the chosen tree crown.

The first simulations series seeks to obtain general shading/transmittance properties for a full tree crown (leaves and branches combined). This is done by filtering direct sunlight through the crown and analyzing the resulting transmission on a surface area behind the tree.

For each tree crown simulated, key characteristics will be generated:

- A file describing transmittance of the full spectrum of light (W/m²)
- A file describing transmittance of the visible spectrum of light (lumen/m², 380-750nm)
- A file describing wavelength bandwidths for indication of color representation:
 - Visible blue light (400 to 450nm)
 - Visible green light (500 to 565nm)
 - Visible red light: (625 to 750nm)
- All results for both shaded and unshaded scenarios provided as mean values for the pixels of interest.
- All results for both shaded and unshaded scenarios provided 'visualized', e.g., as image files with grid values.

The scene consists of a single tree and a single 'reference surface'. The sun altitude is 10 degrees. The size and position of the surface is designed to ensure that the entire shadow of the tree crown hits the surface. A single simulation is made both with and without the tree, to determine the influence of the tree crown. The simulation is repeated for four different seasons, with modifications of the tree crown to reflect the differences of leaves across the year. Only one simulation is needed for the shaded/unshaded scenarios for each season. The scene is modelled in DART so that the sun direction is always perpendicular to the reference surfacade in the horizontal plane.

As a secondary goal, this study investigates whether the transmittance factor of the tree changes significantly depending on the sun altitude - as to the waves have a (slightly) longer path through the tree crown. This secondary objective is approached as a sensitivity study for tree type 1 only, where the sun altitude is varied between 10, 30 and 50 degrees. The dates for the four seasons are kept constant, but the time of the day is varied to achieve the altitudes listed above. Note that the 50-degree altitude can only be achieved in the summer season, and that the winter season is not relevant for this objective (max altitude 11 degrees, no leaves on the tree). Note that since the tree crown should always be fully within the reference surface, the position of the tree needs to change for the alternate altitudes of 30 and 50 degrees. This is ensured by elevating the tree to the height necessary to achieve this (the tree will be 'floating in the air').

Tree type 1 (*Robinia pseudoacacia*) has been selected for the study of sun altitudes, as the hypothesis is that there may be a change in the shading factor of the crown due a 'longer passage' through the crown for an ellipsoid tree (compared to a spherical tree, where the distance is the same). If the difference turns out to be insignificant (negligible for the purpose at hand, we will assume that the same is the case for the other tree types (although the Leaf Angle Distribution may act differently at different sun altitudes for each individual tree type).

Note: all other variations that may influence the degree of shade provided by the crown are taken into account in each individual case of BPS performed using extracted shading factor. Thus, key parameters such as neighboring buildings, as well as the number of trees and their position relative to the building will be accounted for in each individual case.

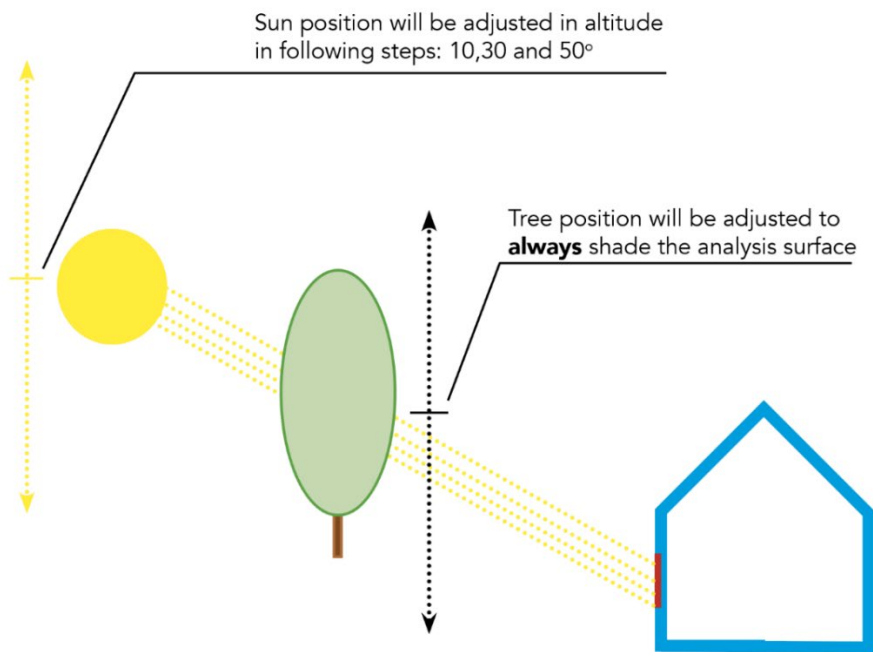


Illustration 1a: conceptual sketch of the 'floating tree scene' for the secondary study in simulation step 1.

1b. Scene

The scene will consist of following elements and attributes:

- A single tree ('real geometry', .obj-files provided by SJ, to be approved by Toulouse)
 - Tree type 1 first, with variations in altitude (10, 30 and 50 degrees)
 - Tree type 2-5 afterwards
 - If the influence of altitude is considered insignificant after the analysis of the results for tree type 1, only the 10-degree angle is used for tree type 2-5.
- Tree geometry is manipulated to reflect different seasons
 - For each tree type, the leaf area is varied to mimic the change of leaf size with seasons (no leaves in winter, full leaves in summer, small leaves in spring, full brownish leaves in autumn). The DART team will model these mimicked seasonal tree crowns. Before starting the simulations, the manipulated tree models have to be approved by the project team (SJ, BUILD, DTU + AART, JAJA).
- Distance from analysis surface to the tree trunk: 7,5 m
 - The 7,5 meters is a proposed value - we are open to changing this distance if it makes 'more sense' when modelling the scene, as long as the distance remains relevant for the built environment, e.g., 5-15 meters.
- Sky conditions: CIE Clear Sky Model
 - The location is Denmark.
- Context: no surrounding buildings, only the investigated tree and the analysis surface.
- Material, ground – no reflection variant: reflection coefficient 0.00 (colour neutral RGB channel¹).
- Material, façade: reflection coefficient 0.30 (colour neutral RGB channel²).
- Measured values: $E_{\text{wall,iterX}} / E_{\text{BOA}}$, as it represents combined direct and diffuse light and irradiance on the analysis surface.
- Wavelength bandwidth for simulations:
 - Full spectrum of light
 - Global visible light (daylight): 380-750nm
 - Visible blue light: 400 to 450nm
 - Visible green light: 500 to 565nm
 - Visible red light: 625 to 750nm

¹ "A black surface to avoid the contribution from ground surface reflections". R= 0.0, G= 0.0 , B= 0.0. Roughness = 0. Specularity = 0. Type: Opaque.

² "Material for outside facades as suggested by IES-LM-83". R= 0.3, G= 0.3 , B= 0.3. Roughness = 0. Specularity = 0. Type: Opaque.

1c. Collection of data

Note: Final decision has yet to be made on this matter – TBD by Toulouse, SJ, BUILD and DTU!

After receiving the pre-study results from DART, it became clear that it is challenging to define what the representative analysis area is, as it is difficult to define where the crown begins and ends.

'Capturing' the shaded area:

- a. We are interested in the reduced energy for the shaded area of the entire crown. That is the *mean* of the whole crown area.
- b. We recognize that the trunk is included as part of the crown for this purpose.
- c. The crown casts its shade on a surface that is bigger than the crown, to make sure that the entire crown is captured.
- d. Simulations are made both with the tree and without the tree (control).
- e. Image analysis is used to filter out the pixels that are unshaded (using values for 'no shade' with a small margin for variation).
- f. NOTE: We need to verify that we do not exclude pixels with a high value within the crown. Any unshaded or partially shaded pixels within the crown should still be part of the 'mean value' of the crown.

The challenge with the method in step 'e' above, is that we risk excluding the unshaded pixels within the crown. This would result in an overestimation of the shading properties of the crown, as we would receive results for a crown 'without gaps'. Different approaches to avoid this bias include:

1. Investigating whether the 'unshaded' pixels within the crown are actually 'slightly shaded' compared to the completely unshaded pixels in the control. If they turn out to be 'slightly shaded' we should take care not to filter them out, by fine tuning the threshold between shaded and unshaded pixels.
2. Alternate method: Choosing not to filter the pixels by their values, but instead by using a tree crown geometry as a mask to define the area of investigation. This success of this strategy depends on the quality of the created mask, and whether it can be applied as a filter to the images generated by DART. A very simplified mask is shown in the illustration below as an example.

1d. Results

The final shading factor of the crown is communicated in a simple ratio or percentage: the amount of energy on the façade with shading vs. without shading. The relevant data could be summarized in a table as show below (note: 20 tables in total):

EXAMPLE (A)

Tree type 1: season 1-4 (one table for each seasonal crown variation)

| Altitude (remember: tree moves with the sun) | Bandwidth interval (wavelengths) | Energy reaching analysis surface (W/m2) with tree | Energy reaching analysis surface (W/m2) no tree | Reduction % |
|--|----------------------------------|---|---|-------------|
| 10° | Interval 1 | | | |
| | Interval 2 | | | |
| | Interval 3 | | | |
| | Interval 4 | | | |
| | Interval 5 | | | |
| 30° (only for summer, spring and autumn) | Interval 1 | | | |
| | Interval 2 | | | |
| | Interval 3 | | | |
| | Interval 4 | | | |
| | Interval 5 | | | |
| 50° (only for summer) | Interval 1 | | | |
| | Interval 2 | | | |
| | Interval 3 | | | |
| | Interval 4 | | | |
| | Interval 5 | | | |

EXAMPLE (B)

Tree type 2-5: seasons 1-4 (one table for each seasonal crown variation)

| Altitude | Bandwidth interval (wavelengths) | Energy reaching analysis surface (W/m2) with tree | Energy reaching analysis surface (W/m2) no tree | Reduction % |
|----------|----------------------------------|---|---|-------------|
| 10° | Interval 1 | | | |
| | Interval 2 | | | |
| | Interval 3 | | | |
| | Interval 4 | | | |
| | Interval 5 | | | |

UPDATE:

Results from Tree type 1 in the first simulation series indicate that the direction through the crown does have a significant influence on the results (particularly for specific bandwidths). As a results, the altitude variations used for Tree type 1 needs to be performed for all 5 tree types. Thus, results from all 5 tree types will then be in the format 'EXAMPLE (A)' above.

1e. Quality assessment of data

Notes for future studies - not part of this simulation plan!

After extracting the 'shading properties' of the five tree crowns the team hopes to use this data for future building performance simulations (BPS). The intention is to test whether these properties could be applied to standardized tree geometry in traditional building performance software, to perform thermal and visual performance simulations where trees have an impact. When SJ performs BPS with trees using this approach, it could be interesting to simulate an identical scene in DART to validate the results from the other simulation software.

Simulation series 2: Influence of a row of trees in different scenarios

2a. Description

Simulation that helps generate a global solution space to provide design guidance for using trees as (supplemental) solar shading in a building context.

The second simulations series seeks to investigate the effect on irradiance and daylight of a row of trees shading a horizontal building façade - with parameter variations for distance and orientation (see Table 2d below). Like simulation series 1, each parameter variation is simulated both with and without trees for comparison. In this study an entire day is investigated in 30 minutes time steps, over the course of a representative day for each season (see table 2d for dates below).

For each simulation scenario simulated, key characteristics will be generated:

- A file describing transmittance of the full spectrum of light (W/m²)
- A file describing transmittance of the visible spectrum of light (lumen/m², 380-750nm)
- All results for both shaded and unshaded scenarios provided as mean values for the pixels of interest.
- All results for both shaded and unshaded scenarios provided 'visualized', e.g., as image files with grid values.

The scene consists of a single row of trees and a single 'reference surface'. Additional information on the reference surface, as well as the spacing and positioning of the trees relative to the surface is given below in section 2c, 2d and 2e below.

Each simulation is made both with and without the tree, to determine the influence of the trees. Each simulation is repeated for four different seasons, with modifications of the tree crown to reflect the differences of leaves across the year. Simulations are run over the course of the day, with 30-minute time steps.

Note: three additional variables that influence the degree of shade provided by the row of trees are investigated separately in simulation series 3.

All simulations will be run with tree type 1, followed by analysis of the results before simulation of tree type 2-5 is initiated. Results for tree type 1 may reveal that some parameter variations may be omitted and thus reduce the number of simulations for the next tree type (e.g., if east and west yield identical results). After making minor adjustments (if any), the simulations are repeated for tree type 2-5.

Each tree is placed on the ground at a height of +0.00 meters. The spacing between them depends on the crown width for the individual tree species. The spacing is adjusted so that the edge of the crowns just touch at their widest point, for the widths given in the 'Width: +7 years' column of Table 0a.

spacing (distance between trunk center points) = crown width at +7 years

Note: In reality, this means that the trees are initially planted with a distance that gives significant gaps between the trees. However, 7 years after planting the crowns would have closed most of these gaps. In time, it may be necessary to cut down every second tree, to avoid the crowns from overlapping, and to allow the trees to reach their full growth potential.

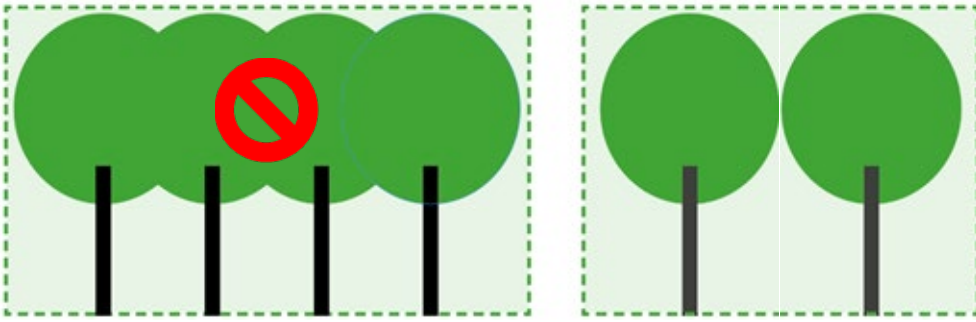


Figure 2a. The distance between the trunk center points is equal to the width the tree crown for each species (at +7 years).

Since the simulations use trees with different spacing and different crown geometries, the total crown shading coverage will differ between species. The reference surface width is chosen with this in mind, by having a considerable width, and thus capturing the shade cast from several crowns (see 2c below).

2b. Scene

The scene will consist of following elements and attributes:

- A row of identical trees ('real geometry', .obj-files provided by SJ, to be approved by Toulouse)
 - Tree type 1 is simulated first
 - Tree type 2-5 are simulated afterwards (after potential minor adjustments)
 - For more information on placing the trees refer to section 2e below
- Tree geometry is manipulated to reflect different seasons
 - For each tree type, the leaf area is varied to mimic the change of leaf size with seasons (no leaves in winter, full leaves in summer, small leaves in spring, full brownish leaves in autumn). The DART team will model these mimicked seasonal tree crowns. Before starting the simulations, the manipulated tree models have to be approved by the project team (SJ, BUILD, DTU + AART, JAJA).
- Distance from analysis surface to the tree trunk: varies (see below)
- Sky conditions: CIE Clear Sky Model
 - The location is Denmark, and the sky condition is 'clear sky'.
- Sun altitude: varies (simulations run throughout the day)
- Context: no surrounding buildings, only the investigated tree and the analysis surface.
- Material, ground: reflection coefficient 0.20 (colour neutral RGB channel³).
- Material, façade: reflection coefficient 0.30 (colour neutral RGB channel⁴).
- Measured values: $E_{\text{wall,iterX}} / E_{\text{BOA}}$, as it represents combined direct and diffuse light and irradiance on the analysis surface.
- Wavelength bandwidth for simulations:
 - Full spectrum of light
 - Global visible light (daylight): 380-750nm

2c. Collection of data

Data is measured/collected on a reference surface like a building façade on the ground floor. The measurement surface will be a rectangular area that represents a building façade, with a height of 3.00 meters and a center point at +1.50 meters above the ground level (representing a typical window center point and eye height level). The reference surface width is 10.00 meters.

Post processing of the simulated images is like what is described in simulation step 1. (section 1c), but with a single noticeable difference: the result of interest is the average value of the all of the pixels on the reference surface - including unshaded pixels 'outside the crowns'. Thus, the surface area of interest is always 3.00 m high by 10.00 m wide.

³ "This is a purely diffuse reflector with a standard reflectivity of 20%". R= 0.2, G= 0.2 , B= 0.2. Roughness = 0. Specularity = 0. Type: Opaque.

⁴ "Material for outside facades as suggested by IES-LM-83". R= 0.3, G= 0.3 , B= 0.3. Roughness = 0. Specularity = 0. Type: Opaque.

2d. Parameter variations

Simulations run with a variation of the irradiance over 1 day per season with a time step of half an hour (in the hours when the sun is up). The table below shows the variations of the two investigated parameters: Façade to trunk distance and Façade orientation. For ease of reference, the five tree types and the four seasonal modifications are also included in the table.

PARAMETER VARIATION MATRIX

| Tree type | Season | Date | Façade to trunk distance ¹ | Façade orientation ² |
|-----------|--------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Spring (summer crown) | May 6 th (between spring equinox and summer solstice) | 7,5 m ($\approx 55^\circ$) | East |
| 2 | Summer (summer crown) | June 21 st (summer solstice) | 10,5 m ($\approx 45^\circ$) | South |
| 3 | Autumn (summer crown) | August 6 th (between summer solstice and autumn equinox) | 15 m ($\approx 35^\circ$) | West |
| 4 | Winter (winter crown) | December 21 st (winter solstice) | 22 m ($\approx 25^\circ$) | North |
| 5 | | | 39 m ($\approx 15^\circ$) | |

Table 2d. Overview of the selected variations for 'distance' and 'orientation', alongside the 'tree type' and 'season' parameters used in all of the four studies, and the selected simulation date for each season.

¹ Distance of trunk to the façade:

The listed distance variations have been selected to represent profile angles in the range of approximately 15-55 degrees, at 10-degree intervals. The distances listed in the table have been calculated with a point of departure in a tree height of 12 meters. As tree type 2 and 4 have a height of only 8 meters, the profile angles are lower than indicated in the table ($\approx 41, 32, 23, 16$ and 10 , respectively). Note that the profile angle is calculated from eye height (here 1.50 meters).

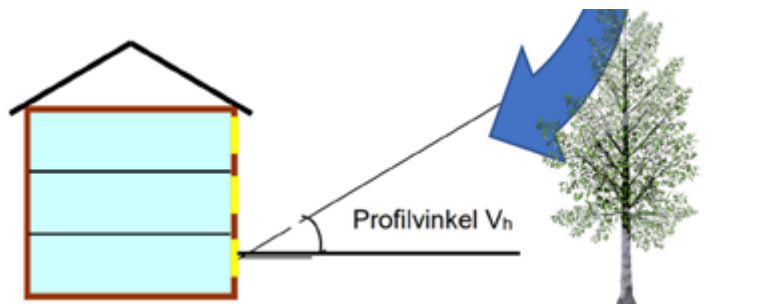


Figure 2d. Example of the 'profile angle', measured from a height that represents eye height and center of a standard window (+1.50 m) to the top of the tree.

² Façade orientation:

Façade orientation variations include south, north, east and west. After performing the full set of simulation for tree type 1, the results will be screened for the possibility to omit façade orientation 'east' for the remaining four tree types. Since the east and west orientations have the same sun angle, the hypothesis is that we only need to simulate one of them (in order to reduce the number of simulations required by 25%).

2e. Tree position

In this simulation series, all simulations are made with a single line of trees. The first tree trunk is positioned at the center of the data collection surface. The sightline between the center of the data collection point (the façade) and the tree (trunk centre) is perpendicular to the façade (see figure 2e below). Identical trees are then positioned with a fixed spacing on both sides of this tree to form an infinite row of trees. The line of trees is *considered* infinite, but the row should only be sufficiently long to not reduce the shading efficiency based on the length of the tree row.

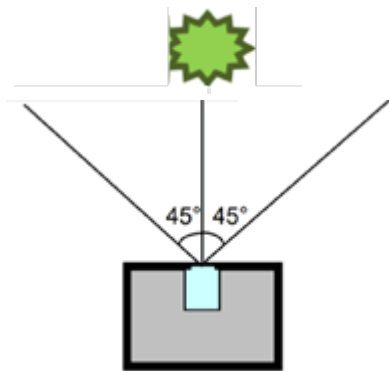


Figure 2e. The 'first tree' is centered in relation to the data collection point. Additional trees are then placed on both sides of this tree with a fixed spacing.

2f. Results

Results are provided in an excel spreadsheet, like what is proposed for step 1. The values should be presented in W/m² for different bandwidths of energy (similar intervals to Step 1).

Minor adjustments may be made on the desired result format once we receive the first set of simulations.

Simulation series 2 only requests two spectral bands:

1. Full spectrum of light
2. Global visible light (daylight): 380-750nm

Simulation part 3: Additional parameter investigations as individual studies

3a. Description

This simulation series consist of three stand-alone investigations of individual parameters that supplement the main study. The purpose of keeping these 'local' investigations separated from the 'global' solutions space investigated in simulations series 2, is keeping the total amount of simulations as low as possible. Some of the parameters varied in simulation series 2 are fixed in this study, including Distance and Tree type. The distance and tree type used will be determined after analysis of the results from simulation series 2.

Each of the three investigations are expected to provide indicative results that can be used as design guidance in combination with the results from simulation step 1. Results will also indicate the sensitivity of each investigated parameter.

3b. Scene

The scenes will consist of following elements and attributes:

- A row of identical trees (identical to series 1, but with the 'best performing'* tree type)
 - Tree type: *Italian Alder*
- Tree geometry is manipulated to reflect different seasons (identical to simulations series 2)
 - For each tree type, the leaf area is varied to mimic the change of leaf size with seasons (no leaves in winter, full leaves in summer, small leaves in spring, full brownish leaves in autumn).
- Distance from analysis surface to the tree trunk: fixed (the 'best performing'* distance)
 - Distance used for all simulations in this series: 10.5 meters
- Sky conditions: CIE Clear Sky Model
 - The location is Denmark. The sky condition is 'clear sky', except for study 3.3 that investigate skies with cloudy conditions as the single variable.
- Sun altitude: varies (simulations run throughout the day)
- Context: no surrounding buildings, only the investigated tree and the analysis surface.
- Material, ground: reflection coefficient 0.20 (colour neutral RGB channel⁵).
- Material, façade: reflection coefficient 0.30 (colour neutral RGB channel⁶).
- Measured values: $E_{wall,iterX} / E_{BOA}$, as it represents combined direct and diffuse light and irradiance on the analysis surface.
- Wavelength bandwidth for simulations:
 - Full spectrum of light
 - Global visible light (daylight): 380-750nm

⁵ "This is a purely diffuse reflector with a standard reflectivity of 20%". R= 0.2, G= 0.2 , B= 0.2. Roughness = 0. Specularity = 0. Type: Opaque.

⁶ "Material for outside facades as suggested by IES-LM-83". R= 0.3, G= 0.3 , B= 0.3. Roughness = 0. Specularity = 0. Type: Opaque.

* 'Best performing' refers to results from simulations series 2, with respect to the purpose at hand: a good compromise between sufficient daylight transparency and sufficient shading efficiency in the summer.

UPDATE:

Results from the first and second simulation series indicate that all of the tree types investigated could work for the intended purpose. Tree type 2 (*Alnus glutinosa* / Italian Alder / Rødel) has been selected for all simulations in simulations series 3, as it is a local deciduous tree (Danish context), and unlike birch has no known allergy issues. After investigating the results from simulation series 2, the set distance for all series 3 simulations is 10.5 meters (as per 18th of August).

3c. Collection of data

Identical with simulations series 2 (refer to 2c above).

3d. Results

Identical with description for simulations series 2 (refer to 2f above).

Simulation series 3 only requests two spectral bands:

1. Full spectrum of light
2. Global visible light (daylight): 380-750nm

3e. Study I – Tree size/age category

PURPOSE:

This study generates results on the tree shading efficiency for 3 additional tree growth stages, which affect both the total tree height, the crown size and the LAI. This investigation simulates different growth stages of a particular tree type, as opposed to simulations series 2 that use trees in a single growth stage (mature). The purpose is to represent the tree in different growth stages to predict how much the shading factor is reduced or increased compared to the shading factor at the mature stage. This reduced or increased relative performance could be communicated as a ‘tree age correction factor’ (example values: juvenile [0.30], young [0.60], mature [1.00], fully mature [1.50]).

The tree heights listed in the table below are examples that depend on the tree type selected for the study. The project team will propose the tree height and an indication of the LAI for each age category to be simulated for the selected tree type. The DART team will then modify the original tree model (mature version, used in previous simulations) to fit the proposed values. The modified trees will be approved by the project team before simulation (e.g. visual confirmation of model based on pictures or an exported .obj file).

Note: Initial proposal for size/age variations indicated in the table below. A final decision will be taken on the matter in collaboration between the DART team and SJ/BUILD/DTU/JAJA/ART

| Tree size / age category variations | Facade orientation |
|---|---------------------------|
| Juvenile (4-5 meters, max planting size – fewer leaves?) | South |
| Young (8 meters, ≈ ‘+3 years?’) | East / West |
| Mature (12 meters, ≈ ‘+7 years?’) | North |
| Fully mature (20 meters, ≈ ‘+20 years?’) | |

Table 3e. The proposed number of variations of the 2 parameters result in a total of 12 simulation scenarios (4x3 variations). The final number of variations may be altered based on your input and feedback. Each parameter variation is described below.

3f. Study II – Façade orientation

PURPOSE:

This study generates results for a range of different orientations, as a supplement to the orientations simulated in the global study of simulations series 2. Orientation intervals are investigated to validate the intent of using interpolation between the three orientations simulated in simulations series 2. This study could potentially draw upon the data from the four main orientations already simulated in simulations 2, as indicated in tables below (~~strikethrough~~).

Note: after analyzing the results in simulations series 2, the final decision will be taken on the investigated orientation resolution and which orientations to cover.

The two tables below indicate alternate options for which variables could be simulated (the tables are examples: only one set of variables will be run - not both tables).

| |
|---|
| Facade orientation |
| - 45-degree intervals, east and west |
| North-East |
| East |
| South-East |
| South |
| South-West |
| West |
| North-West |
| North |

Table 3f. The proposed number of variations of the orientation parameter results in a total of 4 additional simulation scenarios – as several of the listed (~~strikethrough~~) have already been covered as part of the matrix in the main study. The final number of variations may be altered based on the analysis of the previous studies.

3g. Study III – Sky conditions

PURPOSE:

This study generates results with sky conditions that differ from the clear sky used in simulations series 2. The purpose is to provide information on the performance during overcast sky conditions (of which we have many in Denmark).

| Sky conditions – different from the base parameter! | Facade orientation |
|--|---------------------------|
| CIE Clear Sky | South |
| CIE Intermediate Sky | East / West |
| CIE Overcast Sky | North |

Table 3.3. The proposed number of variations of the 2 parameters result in a total of 6 simulation scenarios (2x3 variations) – as one of the listed (strikethrough) have already been covered as part of the matrix in the main study. The final number of variations may be altered based on your input and feedback (e.g. more variations of sky conditions).

3h. Study IV – Temporal map

PURPOSE:

This study generates additional monthly data points across the year, to complement the global study, which only simulate 4 times per year. The purpose is to provide monthly simulation data, that allows us to make a temporal map (as an example for these specific conditions).

The monthly simulations are run for only a single orientation: South. Note that the simulations run for May 21st will use a spring crown, while the simulations for October 21st will use an autumn crown. All other months use the winter and summer crowns respectively, as indicated in table 3.4. below.

| Increased temporal resolution - more data point over half a year | Crown type used |
|---|------------------------|
| January 21. | Winter crown |
| February 21. | Winter crown |
| March 21. | Winter crown |
| April 21. | Winter crown |
| May 21. | ~ Spring crown |
| June 21. | Summer crown |
| July 21. | Summer crown |
| August 21. | Summer crown |
| September 21. | Summer crown |
| October 21. | ~ Autumn crown |
| November 21. | Winter crown |
| December 21. | Winter crown |

Table 3.4. The proposed number of variations of the single parameter (month of the year) result in a total of 10 additional simulation scenarios – as two of the listed (strikethrough) have already been covered as part of the matrix in the main study. The final number of variations may be altered based on your input and feedback.