



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Modellering og simulering av agriPV i Ås

Modelling and simulating agrivoltaics in Ås, Norway

Amanda Henriksdatter Woie
Miljøfysikk og fornybar energi

Forord

Denne oppgaven representerer slutten på en givende studietid innen miljøfysikk og fornybar energi på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet i Ås. Min største takk går til mine veiledere Espen Olsen og Ingunn Burud. Støtte, tilbakemeldinger og konstruktiv kritikk var essensielt for gjennomføring av oppgaven. Jeg har også fått god faglig hjelp fra Iver Frimannslund og Arnkell Jonas Petersen ved institutt for bygg- og miljøteknikk ved fakultet for realfag og teknologi.

Tidlig i semesteret kom jeg i kontakt med tidligere NTNU-student, Erlend Hustad Honningdalsnes, som har vært til stor hjelp med digitale verktøy og modelleringsarbeid. Denne ressursen ble jeg introdusert til av tidligere UiO-student Taao Laue, som også bistod med innblikk i modelleringsverktøy i en tidlig fase. Begge disse, i tillegg til tidligere NMBU-student Mina Holter har skrevet masteroppgaver om forskjellige svært relevante temaer. Disse masteroppgavene har bidratt til god innsikt over oppgavens fagfelt, samt skriveteknikk og inspirasjon.

Til korrekturlesning fikk jeg uvurderlig god hjelp fra studievenninner Rugile Balciunaite og Kristin Einan Storeide, onkel Gaute Hansen, og onkel Kenneth Woie.

For støtte, felles lunsjer og godt vennskap gjennom skriveprosessen og studiet, vil jeg takke mine studievenninner fra NMBU, Kjersti Kvisberg og Ingvild Pedersen.

Til slutt vil jeg også takke mine foreldre, besteforeldre, søstre, og samboer for omtanke, motiverende ord og kjærlige hilsner langs veien. Dette har drevet motivasjonen framover og vært en stor drivkraft for ønsket om å gjøre dere stolte.

Amanda Henriksdatter Woie

ÅS, DESEMBER 2022

Sammendrag

Konseptet *Agriphotovoltaics*, agriPV, (APV) ble første gang introdusert av Adolf Goetzberger og Armin Zastrow i 1981 [1]. Det går ut på å implementere av solcellepaneler i landbruksområder for økt utnyttelse av solen til både dyrket mark og energi. Denne teknologien kan peke på en mulig løsning for mer arealeffektiv energiproduksjon og plantevekst, i en fremtid preget av varmere klima med behov for bærekraftige synergier som kan ivareta økt energi- og matbehov. Det pågår allerede forskning på hvordan APV kan fungere i det norske landbruket, og hvilke fordeler og ulemper løsningen bærer med seg i et kaldt nordisk klima på høye breddegrader. Det planlegges å bygge et testanlegg på NMBU i Ås, med vertikalt monterte solcellemoduler som har flatende vendt mot øst og vest. I den forbindelse, er denne oppgavens hensikt å modellere anlegget og simulere innstråling, strømproduksjon, celletemperatur, omgivelsestemperatur og plantevekst. Dette gjøres ved hjelp av softwaren *Ladybug Tools* i *Grasshopper* og *Rhinoceros* som modelleringsverktøy. Målet for oppgaven er å finne optimal avstand mellom panelradene til anlegget med bakgrunn i de nevnte simuleringene. Sikkerhetsmargin med hensyn til landbruksmaskiners bredde, er tatt i betraktning gjennom bruk av et utvalg fastsatte radavstander på 4 m, 7 m, 9 m, 13 m, 28 m og 37 m. I tillegg gjennomføres optimalisering med softwaren *Wallacei*, som ved hjelp av maskinlæring, beregner at 20 m radavstand vil være beste løsning. I den hensikt å unngå reduksjon av plantevekst konkluderes det fra resultatene av de enkeltvise simuleringene, at 9 m eller 13 m er optimalt ved valg av de fastsatte radavstandene. Oppgavens evaluering av modelleringsverktøyet konkluderer med at *Ladybugs* komponenter, brukt i simuleringsarbeidet, gir et godt utgangspunkt for beregninger. Samtidig er det manglende funksjonalitet når det kommer til *ray tracing*, strålesporing, og implementering av skygge fra horisont og systemets paneler.

Abstract

Agriphotovoltaics (APV) is a concept introduced by Adolf Goetzberger and Armin Zastrow in 1981 [1]. The concept is to implement solar cell panels in agricultural areas to achieve a higher exploitation of the sun to provide energy for both cropland and photovoltaics. This is a technology in development, and a possible solution for increased need for energy and adaptation for plants in a future with increased temperatures. With Norwegian latitudes and a cold nordic climate, there are currently research activities investigating if APV is feasible for Norwegian agriculture, and what advantages or challenges it may bring. Existing plans to build a testsite for APV with vertically mounted bifacial solar panels at the Norwegian University of Life Sciences, incentivise the need to predict the systems irradiation, electricity production, cell temperature, ambient temperatures, and crop growth. Modeling and simulations of these elements is done with the software *Ladybug Tools* in *Grasshopper* and *Rhinoceros* as main modeling tools. The goal of the thesis is to find an optimal distance between the systems panel-rows. A safety-margin to cover for the width of the different agricultural machines used in Norway, incentivise the use of selected row distances of 4 m, 7 m, 9 m, 13 m, 28 m and 37 m when running the simulations. There is also an additional automatic optimizing done by the *Wallacei* software, which suggests that a row distance of 20 m is optimal for the APV-system holistically. However, there are currently law-bound restrictions in Norwegian agriculture to not build structures in cropland that can reduce the yield. To avoid reduction of crop yields, the thesis concludes from the results of the individual simulations, that a row distance of 9 m or 13 m is optimal when choosing from the pre-selected distances mentioned. An evaluation of the modeling software used, concludes that *Ladybug's* components, used in the simulations, give a good basis for predictions, but lack functionality in terms of *ray tracing* and use of horizon shadow as well as shadow from the panels themselves.

Forkortelser

- a-Si:H** Hydrogenert amorft silisium
- AM** Air Mass - Luftmasse
- APV** Agriphotovoltaics
- c-Si** Krystallinsk silisium
- CFD** Computational Fluid Dynamics
- EPW** EnergyPlus Weatherfile
- G_M** Modulinnstråling
- HTJ** Heterojunction - heterogen overgang
- LB** Ladybug
- LER** Land Equivalent Ratio
- MPP** Max Power Point - Makseffekt punkt
- MRT** Mean Radiant Temperature
- NREL** National Renewable Energy Laboratory
- PAR** Photosynthetic Active Radiation
- PVGIS** Photovoltaic Geographical Information System
- PV** Photovoltaic - Fotovoltaisk
- RUE** Radiation Use Efficiency
- STC** Standard Test Conditions - Standard testbetingelser
- T_M** Modultemperatur
- TG_E** Bifacial Gain in Energy - Tosidig energigevinst

TMY Typical Meteorological Year

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Forkortelser	iii
Tabeller	ix
Figurer	xi
1 Introduksjon	1
2 Teori	7
2.1 Norges klima og lysforhold	7
2.2 Mikroklima i et APV-system	10
2.2.1 Værdata	10
2.2.2 Innstråling og plantevekst	10
2.2.3 Omgivelsestemperatur	11
2.3 Systemdesign for APV	13
2.3.1 Overstående - pergola og drivhus	13
2.3.2 Vertikale	14
2.4 Strålingsteori	14
2.4.1 Solens posisjon og sfæriske koordinater	15
2.4.2 Air Mass	16
2.4.3 Spredning i atmosfæren	17
2.4.4 Solspekteret	18
2.4.5 Standard Test Conditions - STC	19
2.4.6 Albedo	19
2.5 Solcellefysikk	19
2.5.1 Tosidige solceller	20
2.5.2 Tosidighetsfaktor	23

2.5.3	Tosidig energigevinst	23
2.5.4	Termiske effekter i solceller	24
3	Metode	27
3.1	APV-anlegg på Kjerringjordet i Ås	27
3.2	Modelleringsverktøy	29
3.2.1	Antakelser og forenklinger	30
3.2.2	Bygging av geometrien	31
3.2.3	Konstruering og anvendelse av værdata	32
3.2.4	Solcellemodellen	33
3.2.5	Innstråling	35
3.2.6	Plantemodell	38
3.2.7	Omgivelsestemperatur i mikroklimaet	39
3.2.8	Optimalisering	40
3.2.9	Databehandling	41
4	Resultater og diskusjon	42
4.0.1	Solcellemodellen	43
4.0.2	Innstråling	54
4.0.3	Plantemodell	60
4.0.4	Omgivelsestemperatur i mikroklimaet	62
4.0.5	Optimalisering	66
4.0.6	Helhetlig vurdering	71
4.0.7	Gjensidige interaksjoner mellom jordbruk og APV	73
5	Konklusjon	74
5.0.1	Radavstand og orientering	74
5.0.2	Modelleringsverktøy	75
6	Videre arbeid	77
6.1	Forbedring og utvidelse av modell	77
6.2	Validering av modell og fysiske målinger	79
	Referanser	81
A	Datablad til kapittel 3	84
B	Modellens deler med tilhørende komponenter for kapittel 3	87
C	Tilleggstabeller for kapittel 4	92

Tabeller

1.1	Plantearter som oppnår økt avling under skygge [11].	4
2.1	Årlig innstråling i forskjellige norske landsdeler.	9
2.2	UTCI-nivåene fra Climate-ADAPTs definisjon for menneskelig biometeorologisk påkjenning fra atmosfæriske forhold ⁷⁷	12
3.1	Bredde på vanlige landbruksmaskiner.	40
4.1	Årlig produksjon for panelradene med forskjellig radavstand og orientering av fram- og bakside.	43
4.2	Tabell for differansen mellom tabell 4.1 sine verdier og overstående celle dividert på avstand i meter.	44
4.3	Differanse mellom øst- og vestsida på panelradene.	45
4.4	Tabell for oppskalerte anlegg med produksjon per kvadratmeter i fokus.	46
4.5	Tabell for anlegg med framsiden vendt mot sør.	47
4.6	Innstrålt energi på panel-sensorene med varierende radavstand.	55
4.7	Avling i AVP-systemets analyseområde for forskjellige radavstander.	61
4.8	Resultater for Wallacei-optimaliserte radavstander ved maksimering av elementene enkeltvis.	66
4.9	Optimal radavstand og diamant-diagram for de forskjellige elementene ved Wallacei-optimalisering på alle samtidig. Her er FO1, FO2, FO3 og FO4 hhv. årlig energiproduksjon, plantevekst, innstråling på bakken og innstråling på panelene.	67
4.10	Den årlige energiproduksjon for framside og bakside av alle radene ved 20 m radavstand.	68
4.11	Verdier for plantevekst og innstrålt energi på bakkemonterte sensorer, ved 20 m radavstand.	69
4.12	Simulert innstrålt energi for solcellepanelenes vertikalt plasserte sensorer, med 20 m radavstand.	70

- C.1 Utsnitt av timesverdier for innstrålt energi på modulradenes vestsida, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand. 93
- C.2 Utsnitt av timesverdier for innstrålt energi på modulradenes østside, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand. 94
- C.3 Utsnitt av timesverdier for celleteperatur på modulradenes vestsida, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand. 95
- C.4 Utsnitt av timesverdier for celleteperatur på modulradenes vøstside, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand. 96

Figurer

1.1	Skyggen fra skråstilte tosidige solcellemoduler har beskyttet planteveksten fra sterk sol gjennom våren og sommeren. Området med grønt omriss har fått mindre sol enn området med grått omriss, noe som trolig har påvirket mosebunnens evne til å holde på vann. Foto: A. Woie	5
2.1	Norges klimasoner ut ifra Köppens klimaklassifikasjon. Kilde: Meteorologisk institutt, https://snl.no/Koppensklimaklassifikasjon . Licens: CC BY SA 3.0	8
2.2	Fordeling av innstråling i Europa. Bildeutsnitt av PVGISs brukergrensesnitt.	9
2.3	Illustrasjon av hvordan overstående APV- anlegg kan skisseres.	13
2.4	Figurene sammenligner potensielle effektkurver gjennom døgnet, som resultat av sørvendt solcellemodul og øst-vest vendte konfigurasjoner. Illustrasjonen er inspirert og forenklet av Next2Suns informasjonssider: https://next2sun.com/en/agripv/	14
2.5	Solens posisjon beskrives av sfæriske koordinater, bestående av azimuth og elevasjonsvinkel og zenitvinkel. Illustrasjonen er forenklet med utgangspunkt i teori fra <i>Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems</i> [8].	15
2.6	Illustrasjon av AM1 ved ett atmosfærelag.	16
2.7	Rayleighspredning av lys i atmosfæren er årsaken til at himmelen er blå om dagen, og soloppgang og solnedgang er rød. Dette skjer fordi lys med lengre bølglengde kan passere lengre gjennom atmosfæren uten for mye spredning. Forenklete figurer med inspirasjon fra https://snl.no/rayleighspredning	17

2.8	Mengden stråling som treffer et gitt observasjonspunkt og dens spektrale oppbygning avgjøres av avstanden strålingen må legge bak seg gjennom atmosfæren. Forenklet figur fra følgende kilder: Solar Energy[8], The Physics of Solar Cells[19]	18
2.9	Enkel visualisering av båndgapet til en halvleder. Båndgapet (E_G) representerer energien et foton må ha for å eksitere et elektron fra energinivået til valensbåndet (E_V) til energinivået til ledningsbåndet (E_L). Figuren er forenklet med utgangspunkt i teori fra <i>Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems</i> [8].	20
2.10	En heterogen nP-overgang settes sammen av to materialer med forskjellig båndgap for bedre utnyttelse av fotonene fra sola, da de kan ha forskjellig bølgelengde, og derfor forskjellig energi. Her er også Fermienergien (E_F , markert med oransje horisontal stiplet linje) og vakuumenergien (E_{vac} , markert med grønn horisontal stiplet linje) inkludert. Dette for å bemerke at disse må være kontinuerlige ved fremstilling av båndgapsmodellen. Dette skaper diskontinuiteter mellom energinivåene, og visualiseres med røde vertikale stiplede linjer. Figuren er forenklet med utgangspunkt i teori fra <i>Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems</i> [8].	21
2.11	Tverrsnitt av en HTJ-solcelle med n-type c-Si wafer (lyseblå) omgitt av innlemmet amorft tyntfilm-silisium på begge sider (grå), p-dopet amorft silisium (rød) på framsiden og n-dopet amorft silisium (mørkeblå) på baksiden. Figuren er forenklet med utgangspunkt i teori fra <i>Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems</i> [8].	22
2.12	Fuentes-modellen baseres på et regnskap for hvilke varmeoverføringer som kommer inn eller ut fra solcellemodulen.	25
3.1	Kjerringjordets planlagte oppsett og lokasjon i Norge.	27
3.2	Bilder som illustrerer det fysiske utseende til et fremtidig testanlegg på Kjerringjordet i Ås.	28

29figure.caption.32

3.4	Her ser vi brukergrensesnittet til Rhino (til venstre) og Grasshopper (til høyre). I Grasshopper-vinduet er det de firkantede grå bokserne som representerer komponenter med kode, og trådene imellom er sammenkoblinger av input og output mellom komponenter. Det man kobler sammen i Grasshopper, er hva som vises i Rhino-vinduet med det perspektivet man ønsker.	30
3.5	Systemets 3D-modell i Rhino.	31
3.6	Her vises LB-komponentene som importerer EPW-filen og anveder tidsperiode på dataen.	33
3.7	Beregningsmodellen er forenklet ved å konstruere en tynn stripe på bakken og på midten av alle radene. Disse analyseområdene inneholdt en rekke punkter som representerer sensorer for innstrålingsanalyse. .	35
3.8	Illustrasjon av bakke-sensorene i 3D-modellen, hvor vest er mot venstre og øst mot høyre i bildet.	36
3.9	Illustrasjon av panel-sensorene i 3D-modellen.	37
4.1	Strømproduksjon for raden lengst vest gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer), bakside (grå linjer) og totalt (blå linje) ved forskjellige radavstander.	48
4.2	Strømproduksjon for midterste rad gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer), bakside (grå linjer) og totalt (blå linje) ved forskjellige radavstander.	48
4.3	Strømproduksjon for raden lengst øst gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer), bakside (grå linjer) og totalt (blå linje) ved forskjellige radavstander.	49
4.4	Innstrålt energi for raden lengst vest gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer) og bakside (grå linjer) ved forskjellige radavstander.	50
4.5	Kumulativ direkte solinnstråling for solcellepanelene med skygge fra horisont i øst og vest.	51
4.6	Høydedata for Kjerringjordet viser at det er forskjell på horisonten i øst og vest. Kilde: Kartverket, https://hoydedata.no/LaserInnsyn2/ .	51
4.7	Celletemperatur for raden lengst vest gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer) og bakside (grå linjer) ved forskjellige radavstander.	52
4.8	Sol-kupler fra SkyDome komponenten brukt til å simulere innstråling i kapittel 3.2.5.	57

4.9	Tabeller for innstrålt energi og timer med direkte sollys for bakke-sensorene.	59
4.10	MRT-verdier per time 21.juni for angitte radavstander.	63
4.11	UTCI-verdier per time 21.juni for angitte radavstander.	65
4.12	MRT og UTCI for APV-systemet med 20 m radavstand.	70
4.13	gjennomsnittlig årlig plantevekst for systemet er 100% mellom 9 m og 13 m. Her er 100% markert med en rød linje.	71
4.14	Årlig strømproduksjon for treraders systemet øker ved økende radavstand og flater ut fra 13 m.	72
4.15	Den årlige strømproduksjonen for de oppskalerte systemene synker på grunn av at antallet rader synker, selv om produksjonen per rad øker.	72
B.1	Oppsett av Grasshopper-komponenter for parametrisk konstruksjon av geometri for bakkeplan og panelrader.	87
B.1	Oppsett av Grasshopper-komponenter for parametrisk konstruksjon av geometri for bakkeplan og panelrader.	88
B.2	Simulering av solinnstråling og omgivelsestemperaturer.	90
B.3	Solcellemodellens komponenter fra Ladybug.	91
D.1	Timesverdier for strømproduksjon [kWh] til framside og bakside av vest-raden.	98
D.2	Timesverdier for strømproduksjon [kWh] til framside og bakside av midt-raden.	98
D.3	Timesverdier for strømproduksjon [kWh] til framside og bakside av øst-raden.	98
D.4	Timesverdier for innstrålt energi [kWh/m ²] til framside og bakside av vest-raden.	99
D.5	Timesverdier for innstrålt energi [kWh/m ²] til framside og bakside av midt-raden.	99
D.6	Timesverdier for innstrålt energi [kWh/m ²] til framside og bakside av øst-raden.	99
D.7	Timesverdier for celletemperaturer [C] til framside og bakside av vest-raden.	100
D.8	Timesverdier for celletemperaturer [C] til framside og bakside av midt-raden.	100
D.9	Timesverdier for celletemperaturer [C] til framside og bakside av øst-raden.	100

Kapittel 1

Introduksjon

Bakgrunn: landbruk, strømproduksjon og klima

Landbruk og strømproduksjon i Norge har et felles bindeledd som de begge er avhengige av; klimaet. Endringer i klimaet som følge av blant annet klimagassutslipp kan, i følge Meteorologisk Institutt, føre til høyere temperaturer, samt flere og mer ekstreme nedbørsperioder¹. Økt temperatur kan også resultere i tørkeperioder og hetebølger. Da tilgang på vann er essensielt for landbruk og vannkraft, og endringer på nedbørsmønstre kan føre til svekket økonomisk stabilitet i begge sektorer. Sommeren 2022 demonstrerte hvordan varme og redusert nedbør resulterte i lav fyllingsgrad i flere vannmagasiner². Dette, sammen med energikrise i Europa, bidro til at utgifter knyttet til energikrevende oppbevaring av høstet mat i noen tilfeller viste seg å ikke være lønnsomt for norske bønder³. 2018 var også et år preget redusert nedbør og dermed tørke i flere deler av landet. Dette førte til at Landbruksdirektoratet igangsatte et omfattende forskningsarbeid på NIBIO rundt vanning til jord- og hagebruksvekster [2]. I starten av 2022 satte regjeringen fire mål for norsk landbruk; “matsikkerhet, landbruk over hele landet, økt verdiskaping og bærekraftig landbruk med lavere utslipp av klimagasser” [3]. Dette viser at klimaendringer spiller en sentral rolle for hvordan strømproduksjon og landbruk behøver bærekraftige løsninger for fremtidens energi- og matsikkerhet.

¹Kilde: Meteorologisk institutt, <https://www.met.no/nyhetsarkiv/slik-laget-vi-vaermelding-for-2050?fbclid=IwAR1DOiGkUfmoAhje968VTj686YW7xnXx77ctFHG3gUQGa7jb12ASFIgI>

²Kilde: SSB, <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet/artikler/svaert-lav-vannkraftproduksjon-i-3.kvartal>

³Kilde: NRK, <https://www.nrk.no/innlandet/hoye-strompriser-fikk-bonden-til-a-harve-nedegen-gronnsakavling-pa-ostre-toten-1.16089191>

Bærekraftig utvikling ble i 1987 definert av Bruntlandkommisjonen som

“En utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge mulighetene for at kommende generasjoner skal få dekket sine behov.”

Denne definisjonen ble lagt frem i *Vår felles framtid*, en rapport som foreslo løsninger på fattigdoms- og miljøproblemer⁴. Bærekraftige synergier trengs for å sikre fremtidens energiproduksjon og matsikkerhet, i en verden preget av klimaendringer og utslippskutt.

En teknologi som knytter strømproduksjon og landbruk sammen, er *Agriphotovoltaics* (APV). Dette innebærer strømproduksjon fra solceller plassert på dyrket mark. Dette konseptet anses av mange som bærekraftig på grunn av potensialet for arealeffektivisering. I Norge er kun 3.5% av arealet utnyttet til jordbruk⁵. Sammenlignet med den gjennomsnittlige andelen på 27% i Europa [4], er Norges jordbruksareal relativt lite, og representerer en av grunnene til at det per dags dato, ikke er lov til å bygge installasjoner som kan svekke leveringspotensialet til matproduserende dyrket mark. Store solparker kan, i likhet med vindparker, oppta uforholdsmessig store arealer til energiproduksjon sammenlignet med andre energikilder som gassanlegg eller kjernekraft⁶. Det er vist av forskning i Tyskland fra 2021 at effektiviteten i arealbruken, Land Equivalent Ratio (LER), kan øke med 56% til 70% [5] ved implementering av APV. Siden solenergi krever store åpne flater, er det interessant å undersøke hvordan våre eksisterende flate arealer kan brukes mer effektivt med APV. Dette kan dermed gi bedre grunnlag for å avgjøre hvordan solenergi skal spille en større rolle i fremtidens norske energimiks.

En samfunnsøkonomisk faktor i utviklingen av APV er norske bønders opplevelse av lønnsomhet. I følge Landbruksbarometeret fra 2021, er det til sammen 57% av undersøkelsens deltakere som svarer at lønnsomheten for gårdsbruket er “ganske dårlig” eller “veldig dårlig” [6]. Selv om lønnsomhet og økonomi ikke vil undersøkes i detalj gjennom denne oppgaven, er det et viktig aspekt innen bærekraft. Behovet for økt lønnsomhet kan også regnes som et argument for hvordan økt tilgang på strøm gjennom APV, kan gjøre bønder bedre rustet mot energikriser og høye strømpriser som truer matsikkerheten. Samt at potensialet for passiv inntekt ved salg av elektrisitet ut på nettet, vil finne sted.

⁴Kilde: FN, <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>

⁵Kilde: SSB, <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/faktaside/landskap-i-norge>

⁶Kilde: Our World in Data (basert på United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) 2021, Lifecycle Assessment of Electricity Generation Options. <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>

APV er et multidisiplinært felt, da miljø- og energifysikk, biologi, fluidmekanikk og økonomi er viktige komponenter under temaet. Spesielt er plantevitenskap et viktig fagfelt som har mye å si for lønnsomheten til APV. Strømproduksjon til nettet kan gi gode inntekter, men dersom dette går på bekostning av matsikkerhet og vekstforhold er det essensielt å ha solid forskning for å finne optimale løsninger. Bærekraft vil være et viktig perspektiv for oppgavens evaluering av APV i det norske landbruket. Konkrete aspekter som skal undersøkes er strømproduksjon og plantevekst til et småskala anlegg i Øst-Norge. Dersom simulering av disse elementene gir tilfredsstillende resultater, kan videre forskning bidra til å avgjøre om APV er et bærekraftig satsningsområde for norsk energi- og matproduksjon.

Strømproduksjon fra tosidige moduler

Forskning og produksjon av tosidig solcelleteknologi har økt de siste årene. Blant de mest effektive typene er *heterojunction* (HTJ), en teknologi som kombinerer forskjellige materialer i cellene, for høyere utnyttelse av den innfallende solenergien. Sammensetning av de forskjellige materialene tillater cellene å benytte innstrålt sollys på begge sider av waferen, noe som fører til at energiproduksjon fra et panel kan øke med opp til 30% ved optimale forhold [7]. En annen fordel med denne teknologien er at måten materialene settes sammen under produksjon, krever relativt lite ekstra energi, slik at lønnsomheten for innkjøp og bruk av denne teknologien øker [8]. Ved vertikal orientering av tosidige moduler med panelflatene mot øst og vest er det vist at APV-systemer kan gi opp til 15% høyere energiproduksjon enn konvensjonelle anlegg⁷.

Introduksjon av planter i urbane områder har allerede vist seg å være effektivt for reduksjon av varmestress på bygninger og begrenset dannelse av varmeøy⁸ [9]. Det kan være interessant å undersøke om dette er overførbart til mikroklimaet i et APV-system. En studie om bygningsintegrert APV fra 2022 [10], dokumenterte at solcellesystemer med plantevekst under seg hadde gjennomsnittlig lavere celletemperatur enn tilsvarende systemer uten plantevekst på både solfylte og overskyede dager. Celletemperatur har påvirkning på solcellers virkningsgrad, og vil derfor simuleres i denne oppgaven.

⁷Kilde: Next2Suns elektrisitetsanalyser: <https://next2sun.com/en/agripv/>

⁸En varmeøy er et område med vesentlig høyere temperatur enn rundtliggende områder. Kilde: Glosbe, <https://nb.glosbe.com/en/nb/urban%20heat%20island>

Vekstforhold og matsikkerhet

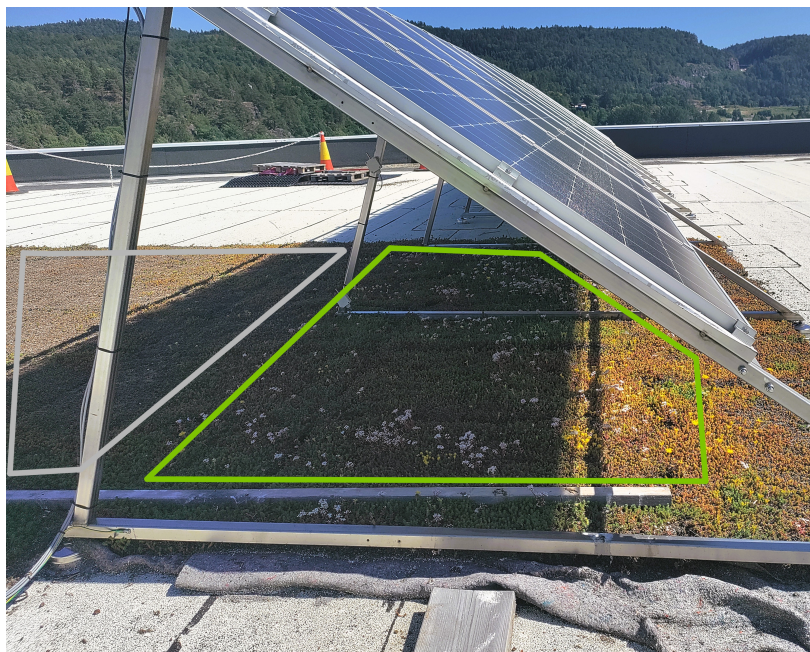
Selv om økt arealeffektivitet og strømproduksjon er ønskelig, er det også viktig å ikke begrense fremtidens økosystemer ved installasjon av skyggebringende konstruksjoner i sårbare områder. Planters behov for lys, og deres tilpasningsevner kan ha store innvirkninger på hvorvidt det er bærekraftig å installere APV. Effekten av innstråling og skygge på plantevekst er forsket på for flere arter i forskjellige land verden over. Tabell 1.1 gir en oversikt over plantearter som kan få økt avling når de blir utsatt for forskjellig grad av skygge [11].

Tabell 1.1: Plantearter som oppnår økt avling under skygge [11].

Art	Effekt og skyggenivå	Lokasjon
Potet	Økt avling for noen lokasjoner og skygge-perioder	Australia
Hvete	Økt avling for noen tilfeller under moderat skygge	Frankrike
Tomat	Økt fruktavling under moderat skygge	Indonesia, Egypt, India
Paprika	Økt avling under moderat skygge	Israel
Kiwi	Økt avling under moderat skygge	Kina, Sør-Afrika
Kaffe	Økt avling under moderat skygge	Mexico
Blåbær	Økt avling for noen lokasjoner under gitte skygge-perioder	USA

I tillegg har Fraunhofer gjennomført et forskningsprosjekt på APV i Tyskland som ble publisert i 2021 [5]. Her ble det observert at potet fikk økt avling, samt at selleri og kløvergress verken minket eller økte i avling.

I figur 1.1 vises et eksempel på hvordan skyggen fra tosidige solcellemoduler har beskyttet veksten av små planter på et takanlegg i Norge.



Figur 1.1: Skyggen fra skråstilte tosidige solcellemoduler har beskyttet planteveksten fra sterk sol gjennom våren og sommeren. Området med grønt omriss har fått mindre sol enn området med grått omriss, noe som trolig har påvirket mosebunnens evne til å holde på vann. Foto: A. Woie

Det er også gjort flere studier på innvirkningen av diffust lyst i forhold til direkte sollys. En studie fra University of Vermont i 2008 viser at det er store variasjoner i hvorvidt planter har bedre nytte av diffust eller direkte sollys ut ifra art og naturlig habitat [12]. Regulering av innstråling i drivhus er en godt utviklet metode i landbruket. Dette demonstreres bl.a. på NMBU, i SiEUGreens bobledrivhus som regulerer innstråling for lys og isolasjonshensikter ved å produsere eller redusere bobler i veggene ⁹. I en masteroppgave fra UiO skrevet våren 2020 [13], ble programvaren *Radiance* brukt til å vise hvordan plastikk i drivhustak og -vegger, i kombinasjon med skygging fra solcellepaneler, ga gode resultater for det modeller-te APV-systemet. Tarpon Solar er et innovasjonsfirma som utvikler solduker med integrerte solceller i spredt mønster¹⁰. Dette er noe som fortsatt utvikles og testes, men kan bli et godt bidrag til APVs rolle i bruken av fornybare energikilder.

⁹Kilde: NIBIO, <https://www.nibio.no/nyheter/fremtidens-urbane-landbruk-gar-i-kretslop>

¹⁰<https://tarponsolar.no/>

Arbeidets mål

Målet for denne studien er å lage en modell for vertikalt monterte tosidige paneler som kan simulere strømproduksjon og plantevekst under norske værforhold og solinnstråling. Dette vil gjøres ved å undersøke sensitiviteten til APV-anleggets strømproduksjon og plantevekst i relasjon til fysiske designparametre som simulerer innstråling og omgivelsestemperaturer. Dette gjøres med programvaren *Rhinoceros* og programmeringstillegget *Grasshopper*, som fungerer som knutepunkt for øvrige beregningsmoduler fra *Ladybug Tools*.

Gjennom modelleringen ønsker vi å finne svar på følgende spørsmål:

- 1. Hvilken konfigurasjon av sideflate-retninger er best for strømproduksjon?*
- 2. Hvilken avstand mellom radene er best med hensyn til kombinasjonen av strømproduksjon, plantevekst og landbruksmaskiners driftsbredde?*
- 3. Hvor godt egner de valgte modelleringsverktøyene seg til simuleringer relatert til APV i Norge? Deriblant strømproduksjon og celletemperatur for tosidige vertikale solcellemoduler, samt skyggeanalyse og omgivelsestemperatur for mikroklimaet i anlegget.*

Kapittel 2

Teori

2.1 Norges klima og lysforhold

Klimaet i Norge varierer, i følge Köppens klimaklassifisering, mellom varm-temperert, kald-temperert og polarklima ¹ som vist i figur 2.1. Klimasoner og varierende lysforhold som midnattssol og mørketid i Nord-Norge, påvirkes både av breddegrader, og av landets topografi med fjorder og fjell². Tidligere studier av APV er hittil gjennomført hovedsaklig ved lavere breddegrader i Europa, Asia og USA, ofte med varmere klima og andre lysforhold. Det er derfor grunn til å anta at resultater og konklusjoner fra disse ikke er direkte overførbare for Norge. Dette er med tanke på både temperaturprofiler, innstråling og vind, da alle disse faktorene påvirker både solcellers effektivitet og plantevekst.

¹Kilde: SNL, https://snl.no/Koppens_klimaklassifisering

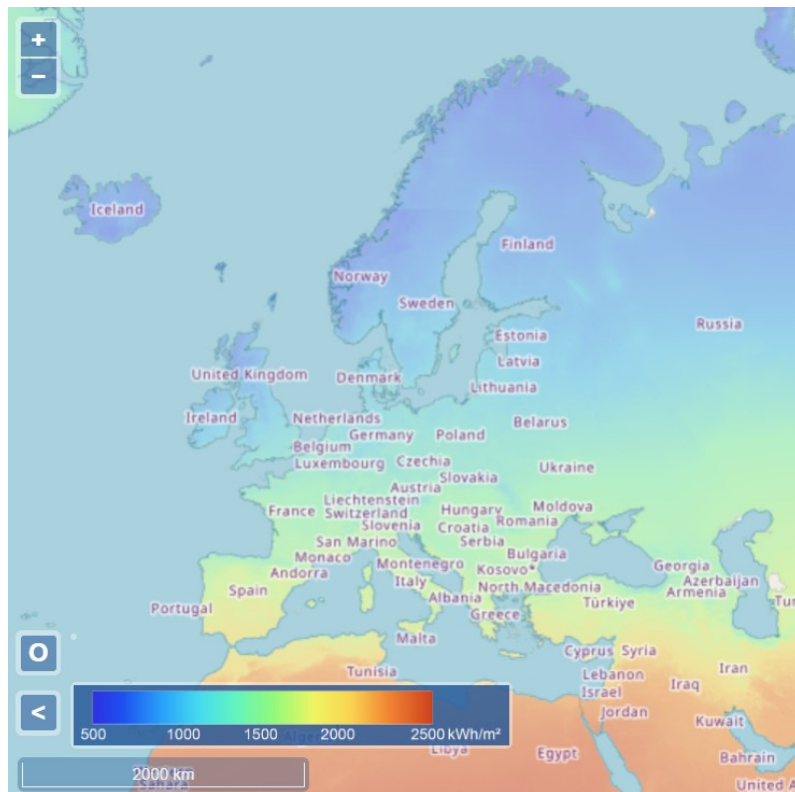
²Norges sørligste og nordligste punkt på fastlandet er henholdsvis 57° og 71° nord. Kilde: SNL, https://snl.no/Norges_geografi



Figur 2.1: Norges klimasoner ut ifra Köppens klimaklassifikasjon. Kilde: Meteorologisk institutt, <https://snl.no/Koppensklimaklassifikasjon>. Lisens: CC BY SA 3.0

Av Europakommisjonens verktøy for evaluering av solenergi-potensial, *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS)³, ser man i figur 2.2 at Norges innstrålingsnivå er vesentlig lavere enn for andre land sørover i Europa. Samtidig er Norge som nevnt et land med kaldere klima enn land sørover i Europa. Dette kan bidra positivt til solcellers virkningsgrad, og mulighet til å utnytte det reduserte sollyset, da virkningsgraden påvirkes negativt ved økte temperaturer. Dette vil utdypes ytterligere i teori om solcelleteknologi i 2.5.4.

³PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/



Figur 2.2: Fordeling av innstråling i Europa. Bildeutsnitt av PVGISs brukergrensesnitt.

Tabell 2.1 viser verdier for årlig innstråling i forskjellige landsdeler, i følge meteorologisk institutt⁴. Disse verdiene kan gi et bilde på hvordan potensialet for solenergi kan være ved eventuell implementering i Norge i sammenligning med andre land som vist i figur 2.2.

Tabell 2.1: Årlig innstråling i forskjellige norske landsdeler.

Plassering	Innstråling [kWh/m ²]
Råde	980
Oslo	938
Bergen	770
Trondheim	822
Tromsø	669

⁴Kilde: MET, <https://www.met.no/nyhetsarkiv/gode-muligheter-for-solenergi-i-norge>

2.2 Mikroklima i et APV-system

Mikroklimaet i et APV-anlegg påvirkes primært av skygge fra panelradene. Denne skyggingen er katalysator for en rekke konsekvenser som kan oppstå, blant annet redusert fotosyntese i planter og dermed mindre vekst. Redusert vekst kan føre til mindre dekke av jordoverflaten, som slipper til mer innstråling og dermed fører til potensielt høyere fordamping av vann. Skygging kan også bidra til redusert temperatur som fører til lavere fordamping og øker jordens evne til å holde på vann. Vanning kan, i følge NIBIO-rapporten [2], føre til bedre utnyttelse av tilført nitrogen og dermed økt plantevekst som veier opp for den tapte innstrålingen. Dette delkapitlet vil gi nødvendig bakgrunnsinformasjon for hvordan noen av de mikroklimatiske forholdene tas i betraktning gjennom oppgaven.

2.2.1 Værdata

For å simulere mikroklima, er det nødvendig med data fra lokalklimaet til Kjerrinjordet i Ås. Værdata finnes i mange former, oppløsninger og formater, og kan være basert på fysiske målinger eller satellittdata. Formatet som brukes i denne oppgaven er *EnergyPlus Weatherfile* (EPW). Dette formatet er en *Comma Separated Values* (CSV) fil med spesialtilpasset syntaks for header-informasjon og værdata. EPW-formatet baseres på *Typical Meteorological Year* (TMY). TMY er timesdata for et helt år, der hver måned er valgt fra det man regner som et typisk meteorologisk år for den spesifikke lokasjonen. Dette betyr at alle timesdataene til januar kan være fra 2013, mens for februar kan 2009 ha gitt de mest typiske timesdataene osv. I denne oppgaven brukes TMY3, som er nyeste versjon av offentlig TMY-data.

2.2.2 Innstråling og plantevekst

For planter har spekteret til innkommende lys påvirkning på veksten. Photosynthetic active radiation (PAR), er et spekter av bølgelengder planter kan benytte til fotosyntese. Disse befinner seg innen spekteret for synlig lys mellom 400 nm og 700 nm [14].

Plantearter har også individuelle metningspunkt for hvor mye energi fra sollyset som brukes til fotosyntese. Denne metningsverdien kalles *Light Saturation Point* (LSP), og for mange arter er metningspunktet lavere enn faktisk mengde solinnstråling [15]. Alle planter klarer dermed ikke å bruke alt lyset som innstråles, og skygging som møter kravene til hva planten faktisk trenger kan være med på å optimalisere vekstforholdene.

I tillegg til PAR og LSP, har planter individuelle forutsetninger for hvor effektivt de kan bruke energien som faktisk absorberes, kalt *Radiation Use Efficiency* (RUE). Dette er en verdi som beskriver hvor mye biomasse som produseres basert på energiinntaket, oppgitt i g/MJ [16]. Her er det også viktig å nevne at andre faktorer som temperatur, fuktighet og fordelingen av direkte og diffus PAR som treffer en plante kan påvirke både LSP og RUE.

Ved for høyt inntak av lys kan planter oppleve abiotisk stress⁵, noe som kan føre til oksidativt stress⁶ med ubalanse i produksjon og nøytralisering av skadelige biprodukter fra celleånding. Dette kan føre til at planten tilpasser seg de stress-framkallende forholdene over tid, men først og fremst blir evnen til å bruke energien fra lyset svekket under stresset. Abiotisk stress hos planter kan også være forårsaket av for varme eller kalde temperaturer.

2.2.3 Omgivelsestemperatur

Temperaturforhold gjennom en vekstsesong i et APV-system kan påvirke solcellers virkningsgrad og plantevekst i forskjellig grad. Nåværende studier på mikroklima i APV-systemer tar tilsynelatende ikke plantenes termiske påvirkning for seg. Derfor velges det å undersøke en verdi som kan gi en indikator på hvordan en plante opplever de termiske omgivelsene, basert på menneskelige referansepunkter, kalt Universal Thermal Climate Index (UTCI).

UTCI er i følge European Climate Adaptation Platform (Climate-ADAPT)⁷ en menneskelig biometeorologisk parameter. Det betyr at det finnes en numerisk skala som indikerer hvordan menneskekroppen reagerer på atmosfæriske forhold i omgivelsene. Her kombineres påvirkning fra omgivelsestemperatur, fuktighet, vind og stråling. Det er ikke reelt å anta at en plante vil oppleve omgivelsene likt som en menneskekropp da det er store forskjeller i prosesser og materialer. Likheter er allikevel at planter og mennesker er karbonbaserte livsformer som påvirkes av vanninnhold og lufttemperatur. Planter har også et stort artsmangfold med varierende tilpasningsdyktighet. UTCI blir dermed kun brukt som en indikator for hvordan det er å oppholde seg i mikroklimaet mellom modulradene, og gir ikke et nøyaktig bilde på hvorvidt forholdene er i stand til å skade en plante eller ikke. Planter er, til forskjell fra mennesker, tilpasset å stå ute 24 timer i døgnet uten direkte beskyttelse.

⁵Stress fra ytre faktorer. Kilde: SNL, https://snl.no/stress_hos_planter

⁶Opphopping av frie radikaler fra celleånding. Kilde: SNL, https://snl.no/oksidativt_stress

⁷Kilde: Climate-ADAPT, <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/thermal-comfort-indices-universal-thermal-climate-index-1979-2019>

Det er 10 nivåer av UTCI som oppgis i tabell 2.2, hvor området for ingen termisk påkjenning er markert i grønt.

Tabell 2.2: UTCI-nivåene fra Climate-ADAPTs definisjon for menneskelig biometorologisk påkjenning fra atmosfæriske forhold⁷

UTCI-verdi	Menneskelig påkjenning
Over +46	Ekstremt varmestress
+38 til +46	Svært kraftig varmestress
+32 til +38	Kraftig varmestress
+26 til +32	Moderat varmestress
+9 til +26	Ingen termisk påkjenning
0 til +9	Noe kuldestress
-13 til 0	Moderat kuldestress
-27 til -13	Kraftig kuldestress
-40 til -27	Svært kraftig kuldestress
Under -40	Ekstremt kuldestress

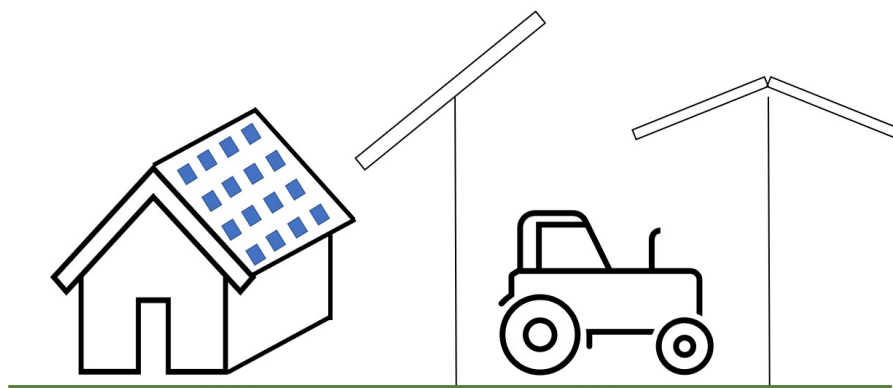
UTCI beregnes i dette arbeidet ved å kombinere omgivelsestemperatur, relativ fuktighet og vindhastighet. Omgivelsestemperaturen her er Mean Radiant Temperature (MRT), som er temperaturen forårsaket av kombinasjonen mellom utendørs kortbølget solstråling og langbølget stråleutveksling med himmelen. Denne beregningen tar også hensyn til stråling som blokkeres og reflekteres av nærliggende geometri, samt albedo. Innstrålingsdata, samt relativ fuktighet og vindhastighet kommer fra en EPW-fil for Kjerringjordet, basert på TMY-data. Konstrueringen av dette datasettet vil forklares nærmere i kapittel 3.2.3.

2.3 Systemdesign for APV

Det finnes forskjellige konfigurasjoner av APV systemer, og dette kapitlet vil gi en kort oversikt over deres fordeler og ulemper til forskjellig bruk.

2.3.1 Overstående - pergola og drivhus

En konfigurasjon med overstående solceller kan utformes som tak/pergola eller drivhus slik at panelenes sideflate hovedsakelig vender oppover mot himmelen. Her finnes det forskjellige konfigurasjoner for orientering av panelene. En variant er med to paneler vinklet på toppen slik at sideflatene vender øst og vest, som et saltak. En annen mulighet er å ha enkle paneler med en- eller toakset rotasjon for å følge solens bane gjennom dagen⁸. En annen konfigurasjon er hvor panelenes sideflate vender mot sør, gjerne vinklet fastmontert eller med rotasjonsakse som følger solens bane. Figur 2.3 viser illustrasjoner av forskjellige overstående APV-konfigurasjoner.



Figur 2.3: Illustrasjon av hvordan overstående APV- anlegg kan skisseres.

De overstående panelene bygges som regel i en høyde som tillater landbruksmaskiner å passere under. Høyden til et system i Tyskland [5] var 5 m over bakken, noe som også førte til mindre størrelse på skyggene som treffer bakken, samt mer diffus skygge enn hvis panelene skulle vært plassert like over bakken. Overstående panel brukes også til frukt- og bæråkrer i Nederland og Belgia, der bringebær⁹ og pærer [18] er forsket på de siste årene. En pergola-løsning med mellomrom mellom cellene, ofte

⁸Seval Skog Solkraftverk ved Gjøvik er et anlegg som foreløpig underligger konsesjonssøknad for installering av et system med enakset rotasjon av tosidige paneler i kombinasjon med beitemark [17]

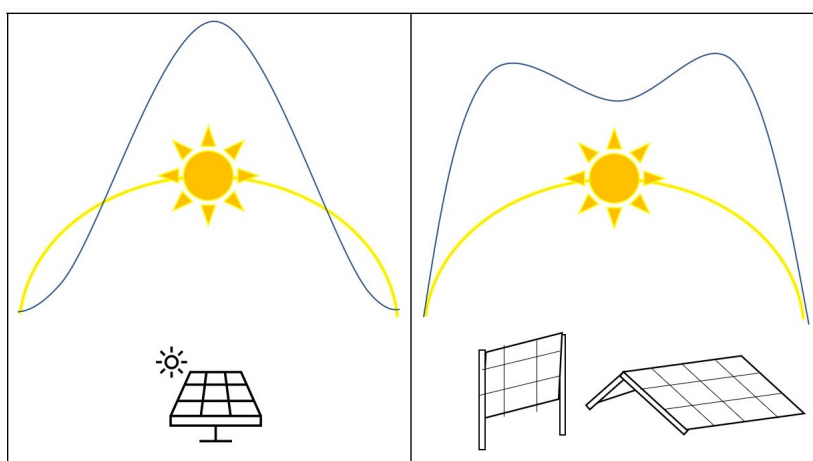
⁹[https://www.baywa-re.com/en/cases/emea/solar-installations-bear-fruit-for-netherlands-agri-pv?filter=energy_form\\$filter - value = 2](https://www.baywa-re.com/en/cases/emea/solar-installations-bear-fruit-for-netherlands-agri-pv?filter=energy_form$filter - value = 2)

med medfølgende drivhusvegger, har vist seg å gi gode forhold for både plantevekst og gårdsarbeidere. Oppsettet beskytter mot ekstremvær som kraftig regn, hagl og vind, samt ekstrem varme og solinnstråling.

Integrering av solceller på drivhus med glass, hvit presenning eller plastmaterialer er også en teknologi i vekst, og kan gi viktig spredning av sollys for planter, som nevnt i introduksjonen og delkapittel 2.2.2.

2.3.2 Vertikale

Oppgavens hensikt er som nevnt å modellere og simulere funksjonaliteten til et system med vertikalt monterte tosidige solcellepaneler. Dette er en konfigurasjon som er i vekst for flere selskaper i Europa, blant annet tyske Next2Sun¹⁰. Hensikten med et slikt oppsett er muligheten til å skape en bredere effektkurve gjennom dagen ved å benytte seg bedre av sollyset fra øst og vest på hhv. formiddag og ettermiddag. Effekttopper ser gjerne ut som på figur 2.4.



Figur 2.4: Figurene sammenligner potensielle effektkurver gjennom døgnet, som resultat av sørvendt solcellemodul og øst-vest vendte konfigurasjoner. Illustrasjonen er inspirert og forenklet av Next2Suns informasjonssider: <https://next2sun.com/en/agripv/>

2.4 Strålingsteori

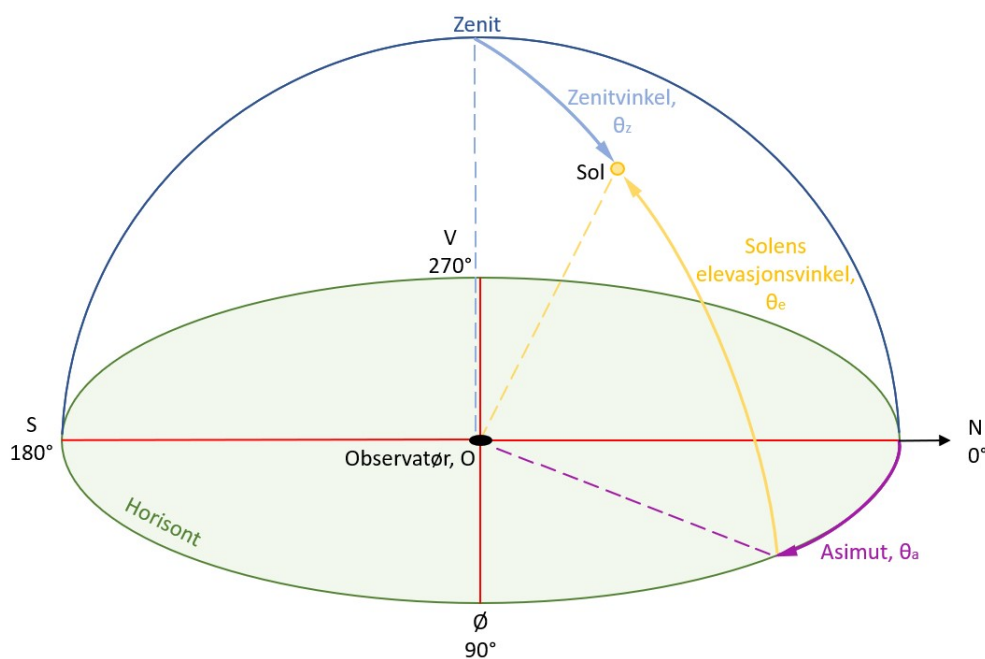
Sola er jordens mest trofaste fornybare energikilde, med en *radians* - utstråling, på $3,8 \times 10^{26}$ W. Jorden mottar til ethvert tidspunkt $1,7 \times 10^{18}$ W av denne strålingen og dette tilsvarer mottatt irradians på 1361 W/m^2 ved atmosfærens overflate

¹⁰<https://next2sun.com/en/>

[8]. Solstrålingen er *elektromagnetisk stråling* som sørger for at fotosyntese i planter forekommer, og spiller dermed rollen som en viktig grunnpilar for livet på jorden slik vi kjenner det. I tillegg har solas tilstedeværelse stor innvirkning på klima gjennom vindstrømmer og temperaturregulering, og potensialet for energi som kan utnyttes er stort. For å forstå hvordan innkommende solstråling vil påvirke et APV-system, er det nødvendig med teknisk forkunnskap om elektromagnetisk stråling og lysets samhandling med omgivelsene. Samhandlingsmekanismer avgjøres av solens posisjon, spredning i atmosfæren, sollysets spekter av bølgelengder - solspekteret, og bakkens refleksjonsevne - albedo.

2.4.1 Solens posisjon og sfæriske koordinater

Hvor solen står på himmelen er avgjørende for hvor mye energi som når jordoverflaten gjennom atmosfæren. Solens posisjon i forhold til et observasjonspunkt, O, på jordoverflaten er det som kalles sfæriske koordinater, og illustreres i figur 2.5.



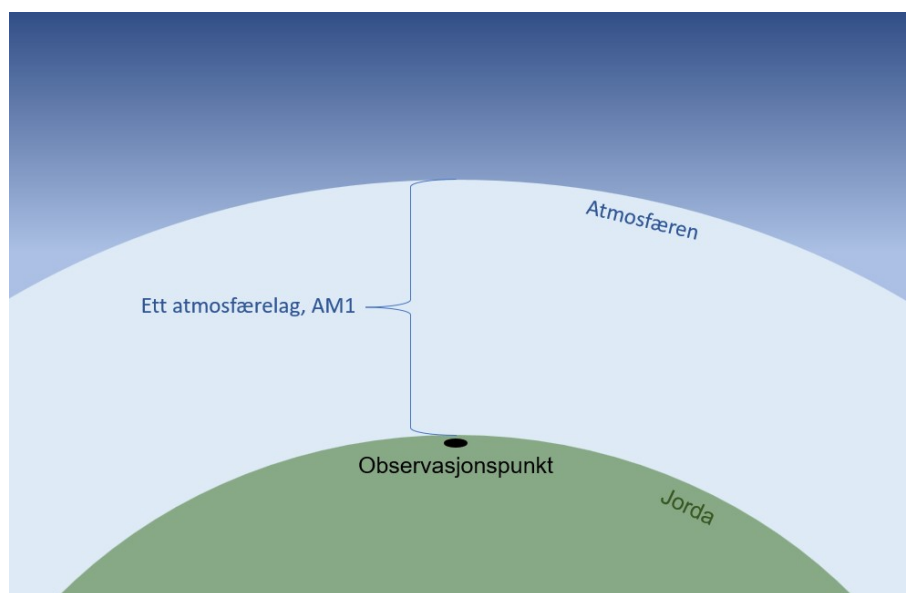
Figur 2.5: Solens posisjon beskrives av sfæriske koordinater, bestående av asimut og elevasjonsvinkel og zenitvinkel. Illustrasjonen er forenklet med utgangspunkt i teori fra Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems [8].

- *Asimut*, θ_a , beskriver hvilken himmelretning solen står i når den ikke er i zenit. Nord er 0° og viseren følger klokkeretning ved økende vinkelstørrelse, slik at vinkelen varierer mellom 0° og 360° via nord, øst, sør og vest
- *Elevasjonsvinkelen*, θ_e , beskriver hvor høyt solen står på himmelen med start på 0° langs horisonten, og slutt på 90° i zenit
- *Zenit* er posisjonen solen står i når den befinner seg lodrett over observasjonspunktet. Dette vil være i 90° vinkel med alle himmelretninger på bakkeplanet
- *Zenitvinkelen*, θ_z , er vinkelen mellom solen og planets normal (zenit). Den vil altså være lik $90^\circ - \theta_e$

2.4.2 Air Mass

Solens posisjon på himmelen avgjør også hvor mye atmosfære solstrålene må passere for å nå frem til et observasjonspunkt. *Air Mass (AM)* betegnes med en tallverdi for å identifisere mengde atmosfære mellom sol og observasjonspunkt. Ved atmosfærens ytre overflate har man AM0, da ingen solstråler har passert noen del av atmosfæren. Solen i zenit gir AM1 ved jordoverflaten, etter ett atmosfærelag. AM1 illustreres i figur 2.6, og ved en gitt zenitvinkel (θ_z), vil AM være gitt av

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z}. \quad (2.1)$$

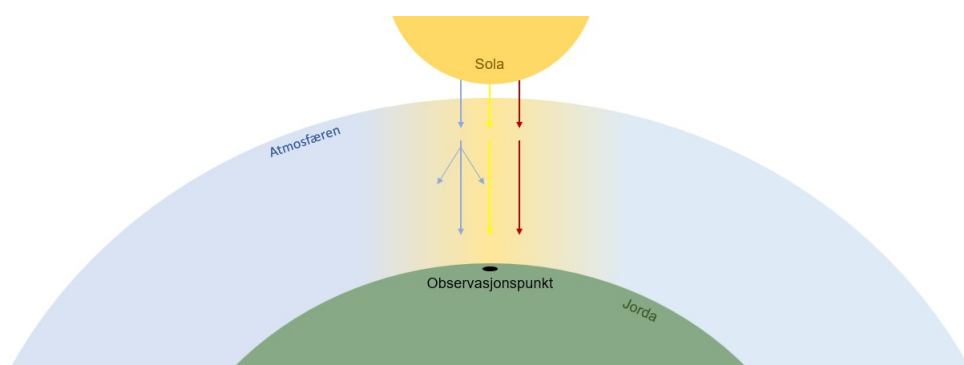


Figur 2.6: Illustrasjon av AM1 ved ett atmosfærelag.

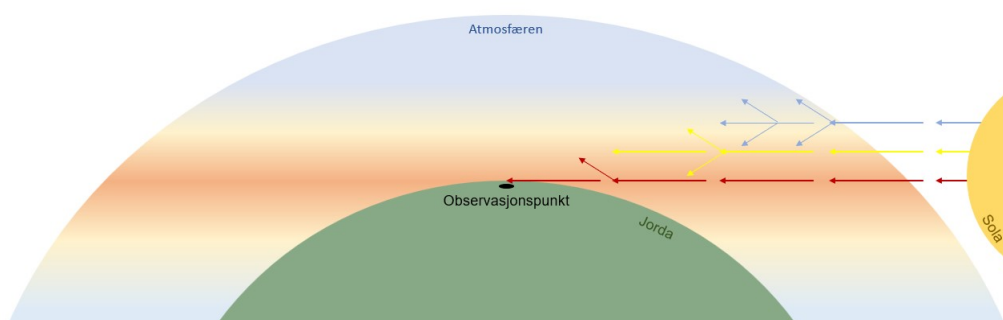
2.4.3 Spredning i atmosfæren

Solstråler spres når de treffer ulike atmosfæriske elementer. Rayleighspredning forekommer når den elektromagnetiske strålingen (lyset) fra sola spres av partikler som er små i forhold til bølgelengden til lyset som treffer dem. Spredningen er sterkest for lys med lav bølgelengde, som blått lys. Gult og rødt lys har lengre bølgelengde blir dermed mindre påvirket.

Det blå lyset med kort bølgelengde spres til alle retninger og gjør at himmelen/luften i atmosfæren ser blå ut om dagen, som vist i figur 2.7a. På kvelden vil solen ha lengre avstand fra observasjonspunktet og lyset har mer atmosfærisk masse å passere. Det røde lyset vil dermed treffe flere molekyler og partikler som sprer det i større grad og fordeler rødt lys utover himmelen, som vist i figur 2.7b.



(a) Blå himmel på grunn av redusert rayleighspredning i et tynt lag atmosfære.

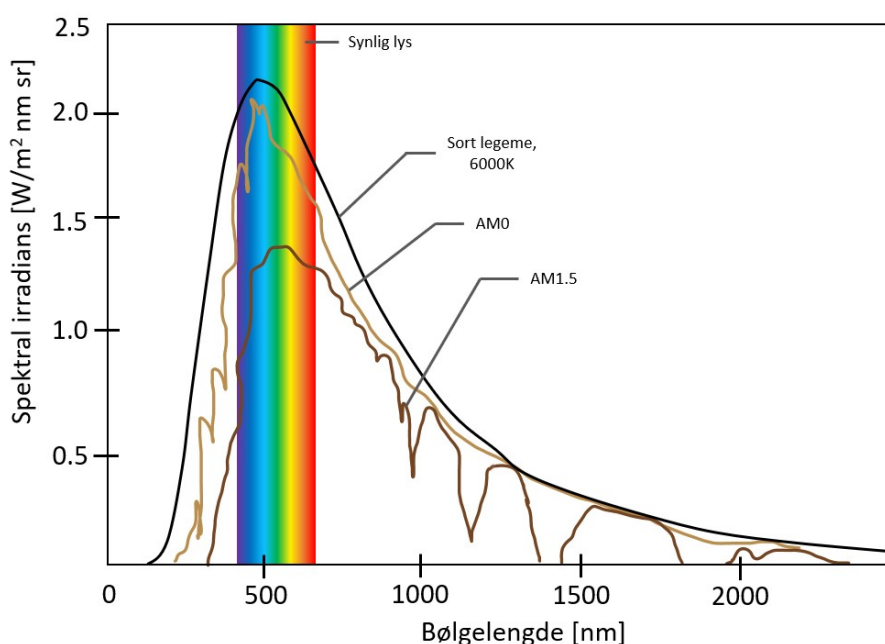


(b) Rød solnedgang på grunn av rayleighspredning i et tykkere lag atmosfære.

Figur 2.7: Rayleighspredning av lys i atmosfæren er årsaken til at himmelen er blå om dagen, og soloppgang og solnedgang er rød. Dette skjer fordi lys med lengre bølgelengde kan passere lengre gjennom atmosfæren uten for mye spredning. Forenklete figurer med inspirasjon fra <https://snl.no/rayleighspredning>

2.4.4 Solspekteret

Spredning og refleksjon som konsekvens av AM og solens posisjon fører til at spekteret av bølglengder, solspekteret, som treffer jordoverflaten har forskjellig sammensetning. Ved passering gjennom større mengde molekyler og partikler vil effektene av spredning og refleksjon forsterkes, og dermed svekke den direkte strålingen. Dette illustreres i figur 2.8 ved at grafen for AM0 har større underliggende areal og amplitude enn for AM1.5, som er *Standard Test Conditions* (STC). STC vil forklares i følgende delkapittel.



Figur 2.8: Mengden stråling som treffer et gitt observasjonspunkt og dens spektrale oppbygning avgjøres av avstanden strålingen må legge bak seg gjennom atmosfæren. Forenklet figur fra følgende kilder: *Solar Energy*[8], *The Physics of Solar Cells*[19]

AM, rayleighspredning og solspekteret er viktig for vertikale tosidige solcellemoduler som mottar direkte solstråler om morgen og kveld. Disse faktorene kan påvirke energiproduksjon i forhold til innstrålt effekt på panelene.

2.4.5 Standard Test Conditions - STC

Selv om forskning og marked for solcelleteknologi er i utvikling, er det viktig å forholde seg til felles forhold for sammenligning av solcellemoduler. Disse forholdene kalles *Standard Test Conditions*, stand testbetingelser, (STC), og er definert ved

- Irradians G_{STC} lik 1000 Wm^{-2}
- AM1,5 solspekter
- Celletemperatur T_{STC} lik 25°C

2.4.6 Albedo

Da APV-systemer er til bruk blant planter og i åpent landskap vil albedo ha signifikant innvirkning på hvordan lys reflekteres fra omgivelsene. Albedo (α) er en verdi mellom 0 og 1 som angir hvor mye innstråling bakken reflekterer (G_{refl}) i forhold til innkommende lys (G_{inn}), gitt av ligning 2.2.

$$\alpha = \frac{G_{refl}}{G_{inn}} \quad (2.2)$$

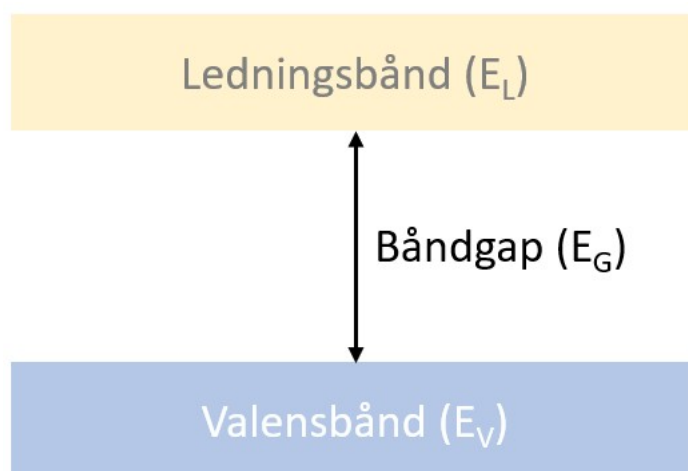
Høy albedo betyr høy refleksjonsevne og vil derfor være hensiktsmessig for tosidige solcellemoduler som bruker direkte stråling på framsiden og reflektert diffus stråling på baksiden til strømproduksjon. Desto mer relevant er det for APV, med hensyn til bakkens varierende refleksjonsevne når det er bart, gress eller snødekke. En masteroppgave fra NMBU skrevet høsten 2021 [20], tar for seg påvirkningen albedo har på tosidig effektgevinst. Studien kom fram til at underlagets farge spilte en avgjørende rolle, da hvitt underlag ga høyest verdier, sammenlignet med sort og grønt, for både albedo og energiproduksjon hos panelene.

2.5 Solcellefysikk

Nå forutsetninger for strålingen som treffer solcellepanelene er etablert, er det naturlig å gå videre med hvordan solcellene bruker energien fra innstrålingen til å produsere elektrisitet. Hovedmengden av informasjon i dette delkapitlet er hentet fra *Solar Energy - The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion Technologies and Systems* [8].

2.5.1 Tosidige solceller

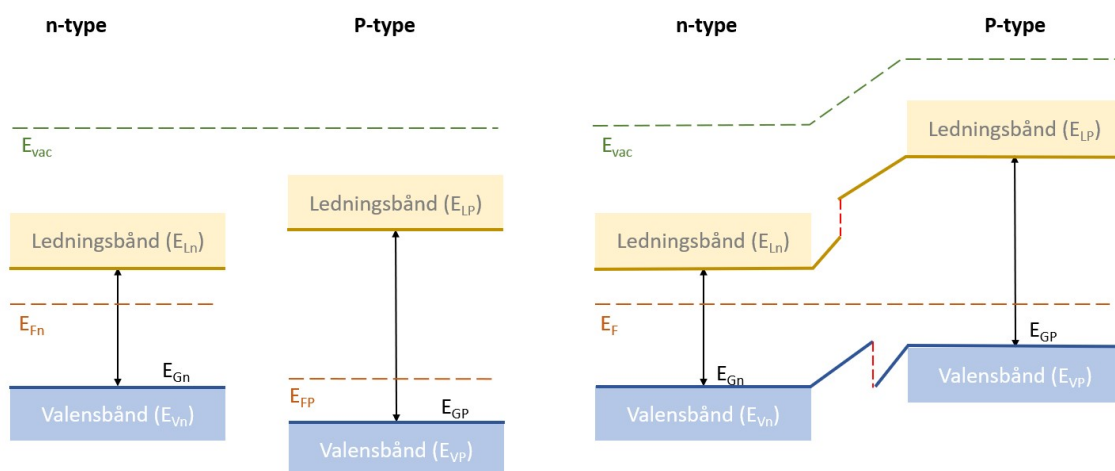
Silisium kan dopes for å generere overskudd av positive eller negative ladningsbærere, hull (p-dopet) og elektroner (n-dopet) i materialet. Energikonvertering fra sollys til elektrisitet baseres på forflytning og rekombinasjon/sammenslåing av hull og elektroner i overgangen mellom p- og n-dopede silisium-halvledere. Rekombinasjonens energiutbytte avgjøres av båndgapet (energidifferansen), E_G , mellom valensbåndet og ledningsbåndet i materialet som vist i figur 2.9. For krystallinsk silisium er båndgapet 1.12 eV [8].



Figur 2.9: Enkel visualisering av båndgapet til en halvleder. Båndgapet (E_G) representerer energien et foton må ha for å eksitere et elektron fra energinivået til valensbåndet (E_V) til energinivået til ledningsbåndet (E_L). Figuren er forenklet med utgangspunkt i teori fra Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems [8].

Om fotonets energi er høy nok til å eksitere et elektron fra valensbåndet til ledningsbåndet, vil elektrisk energi produseres ved at elektronet forflytter seg videre i en påkoblet krets. Båndgapet setter altså en begrensning for hvilke fotoner som kan brukes til energikonvertering, i forhold til energien de bærer. p- og n-dopet silisium av samme type med likt båndgap kan settes sammen i en *homojunction*, homogen pn-overgang, for å oppnå rekombinasjon når energi fra lyset eksiterer elektroner og setter dem i bevegelse. For å utnytte et større spekter av energier fra sollyset, kan man sette sammen materialer med forskjellige båndgap i solcellene.

Dette kalles *heterojunction* (HTJ), heterogen pn-overgang, og båndgapsmodellen for en slik overgang vises i figur 2.10. Det finnes forskjellige varianter av HTJ, men vi vil ta for oss n-P typen hvor det p-dopede silisiumet har det høyeste båndgapet. Blant de beste HTJ-solcellene med silisium som halvleder, er de med kombinasjon av n-type monokrystallinsk silisium (c-Si) og p-type hydrogenert amorf¹¹ silisium (a-Si:H).



Figur 2.10: En heterogen nP-overgang settes sammen av to materialer med forskjellig båndgap for bedre utnyttelse av fotonene fra sola, da de kan ha forskjellig bølgelengde, og derfor forskjellig energi. Her er også Fermienergien (E_F , markert med oransje horisontal stiplede linje) og vakuumergien (E_{vac} , markert med grønn horisontal stiplede linje) inkludert. Dette for å bemerke at disse må være kontinuerlige ved fremstilling av båndgapsmodellen. Dette skaper diskontinuiteter mellom energinivåene, og visualiseres med røde vertikale stiplede linjer. Figuren er forenklet med utgangspunkt i teori fra Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems [8].

Fermienergien¹², E_F , og vakuumergien¹³ E_{vac} er inkludert i figur 2.10 for å korrekt visualisere båndgapsmodellen til en heterogen overgang. Fermienergien må likestilles og vakuumergien må holdes konstant. Dette fører til diskontinuitet mellom energinivåene til valensbåndene og ledningsbåndene. Disse diskontinuitetene kan føre til barrierer mellom elektroner og hull, som kan overkommes gjennom kvantemekanisk tunnelering¹⁴.

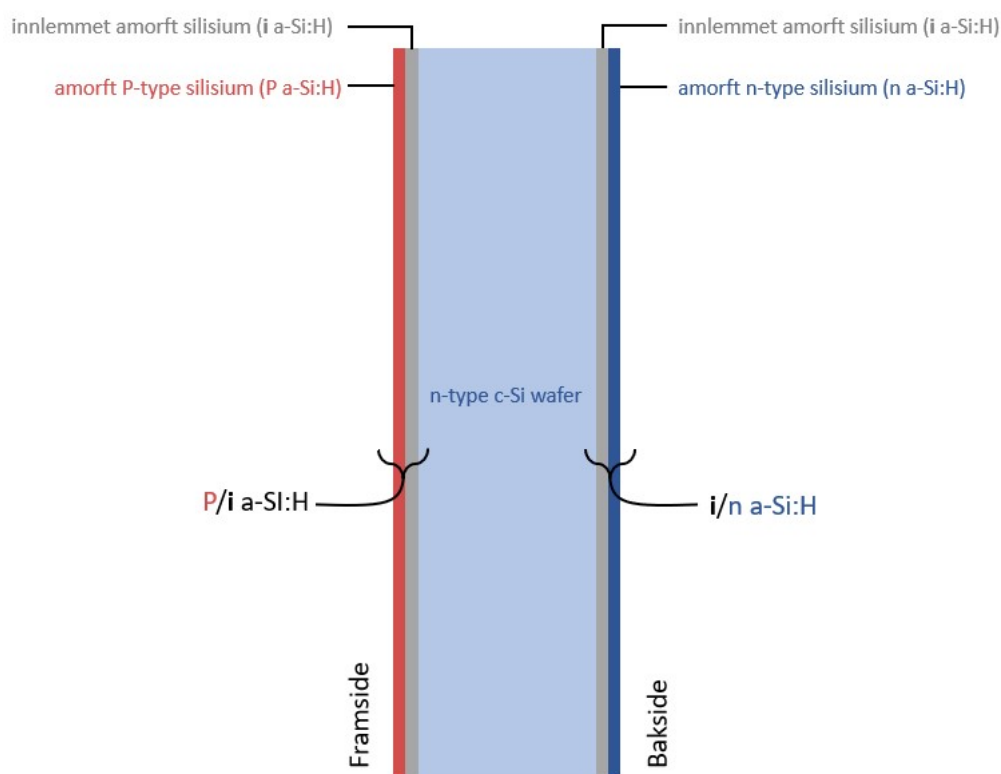
¹¹Amorf silisium, betyr silisium uten krystallstruktur.

¹²Fermienergien er gjennomsnittlig energi til elektronene i et materiale [8].

¹³Vakuumergien er energinivået til omgivelsene rett utenfor et atom. Hvis et elektrons energi økes til dette nivået, vil det forlate atomets påvirkningskraft [8].

¹⁴Kvantemekanisk tunnelering er fenomenet der en partikkel beveger seg gjennom en barriere

Konseptet med HTJ-solceller ble opprinnelig utviklet av et japansk selskap, Sanyo, som kalte teknologien for *heterojunction with intrinsic thin layer* (HIT), HTJ med innlemmet tynnfilm. Solcellen konstrueres som vist i figur 2.11, ved at en n-type c-Si wafer (med lyseblå farge), dekkes av det innlemmede amorfe tynnfilm-silisiumet på begge sider (med grå farge). Deretter blir p-dopet amorft silisium diffundert på overflaten til framsiden (med rød farge), og n-dopet amorft silisium blir diffundert på baksiden (med mørkeblå farge).



Figur 2.11: Tverrsnitt av en HTJ-solcelle med n-type c-Si wafer (lyseblå) omgitt av innlemmet amorft tynnfilm-silisium på begge sider (grå), p-dopet amorft silisium (rød) på framsiden og n-dopet amorft silisium (mørkeblå) på baksiden. Figuren er forenklet med utgangspunkt i teori fra Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems [8].

som den tilsynelatende ikke har nok energi til å gjennomtrenge i klassisk fysikk. Dette skjer på grunn av en tilstedeværende sannsynlighet for at den kan befinne seg på andre siden. Kilde: SNL, https://snl.no/kvantemekanisk_tunnelering

Lysinntaket på både framside og baksiden fører til høyere strømproduksjon, og skaper et behov for reduksjon av cellestørrelse. Derfor er det vanlig å bruke halve eller enda mindre celler med flere strømskinner¹⁵.

En vanlig modulkonfigurasjon er å innlemme cellene i glass på framside og bakside, med eller uten rammer. Rammer kan gi modulen bedre robusthet, men også bidra til skygger for cellene¹⁶.

2.5.2 Tosidighetsfaktor

En essensiell parameter for tosidige solcellemoduler er *tosidighetsfaktoren*. Denne verdien mellom 0 og 1, forklarer forholdet mellom effektiviteten til modulens bakside og framside slik

$$\text{Tosidighetsfaktor} = \frac{\eta_{bak}}{\eta_{front}}. \quad (2.3)$$

Grunnen til at effektiviteten på framside og bakside ikke er lik, skyldes modulens oppbygning og heterogene pn-overganger. En vanlig verdi for tosidighetsfaktor er mellom 0.6 og 0.8.

2.5.3 Tosidig energigevinst

Ettersom tosidige solcellemoduler kan absorbere lysenergi og omdanne den til elektrisk energi på både framside og bakside, vil det oppstå økt energiproduksjon sammenlignet med tilsvarende ensidige moduler. Denne gis ved

$$TG_E = \frac{E_t}{E_e} - 1, \quad (2.4)$$

der TG_E står for *tosidig gevinst for energi*, E_t er energiutbyttet fra systemer med tosidige moduler, og E_e er energiutbyttet fra et tilsvarende anlegg med ensidige moduler.

¹⁵Strømskinner er tynne ledere av kobber eller aluminium som kobler cellene i en modul sammen, slik at elektrisitet kan føres ut i en krets [8]

¹⁶Fraunhofer har dokumentert at glass-glass moduler har lavere karbonfotavtrykk med redusert utslipp av CO_2 under produksjon sammenlignet med moduler med bakplate av aluminium [21]

2.5.4 Termiske effekter i solceller

Solceller oppgis med temperaturkoeffisienter for effekt, strøm og spenning i medfølgende datablad fra produsent. Disse forteller hvordan effekt, spenning eller strøm vil svekkes eller styrkes ved varierende celletemperatur. Temperaturkoeffisienten for effekt er vanligvis mellom -0.3%/og -0.5%/, som betyr at effekten synker for hver grad over STC-temperatur på 25.

Enkel modell for modultemperatur og ytelse

Modultemperatur kan være utfordrende å måle, så en forenklet modell [8] basert på eksperimentelle observasjoner, gir sammenhengen mellom modultemperatur T_M , lufttemperatur T_a og innstråling på modulen G_M ved

$$T_M = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20^\circ}{800} G_M. \quad (2.5)$$

Her er T_{NOCT} det som kalles *nominal operating cell temperature*, nominell celletemperatur under drift, og beskriver cellens temperatur under arbeidsforhold med irradians på 800 W/m^2 , lufttemperatur på 20°C og vindhastighet på 1 m/s [8]. Denne verdien, i tillegg til ytelse ved STC, pleier å oppgis i modulens datablad.

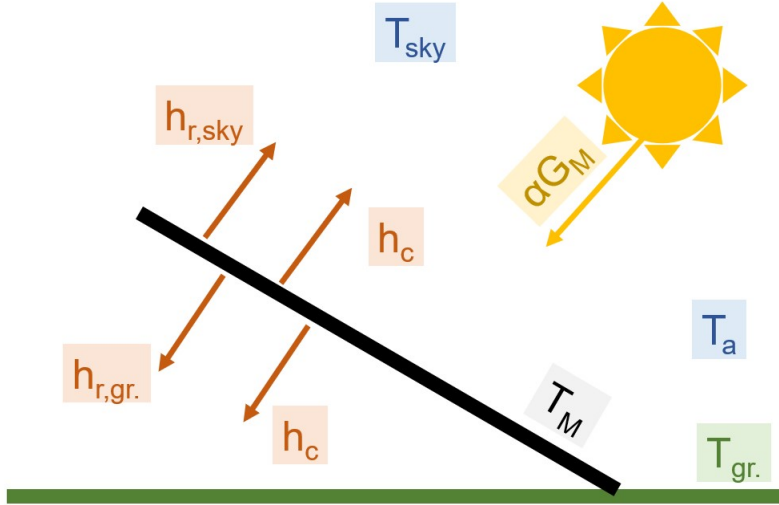
Utvidet modell for modultemperatur

NOCT-modellen ovenfor tar kun hensyn til lufttemperatur i *steady state* og vindforhold neglisjeres. Derfor vil oppgavens simuleringer av modultemperatur gjøres med en forenklet termisk modell av Martin K. Fuentes [**fuentes**] som baseres på varmeoverføringsmekanismer, med *konveksjon*¹⁷ og *infrarød stråling*¹⁸ som vist i figur 2.12. *Konduksjon*¹⁹ mellom modulen, bærestruktur og bakken neglisjeres. Det er også viktig å nevne at denne modellen tar utgangspunkt i en solcellemodul orientert med en av sideflatene opp mot himmelen og en sideflate som vender ned mot bakken. Derfor vil det nevnes overside og underside.

¹⁷Konveksjon er varmetransport i vesker og gasser.

¹⁸Infrarød stråling er varmeoverføring via elektromagnetisk stråling av langbølget type.

¹⁹Konduksjon er varmeoverføring/varmeledning ved direkte fysisk kontakt mellom molekyler.



Figur 2.12: Fuentes-modellen baseres på et regnskap for hvilke varmeoverføringer som kommer inn eller ut fra solcellemodulen.

Fuentes-modellen definerer modultemperatur T_M som

$$T_M = \frac{\alpha G_M + h_c T_a + h_{r,sky} T_{sky} + h_{r,gr.} T_{gr.}}{h_c + h_{r,sky} + h_{r,gr.}}. \quad (2.6)$$

De forskjellige leddene i ligningen består av følgende elementer som vi også ser i figur 2.12.

- αG_M er varmen mottatt fra solen gitt ved produktet av absorpsjonsevne og irradians.
- h_c er konvektiv varmeoverføring mellom modulens modultemperatur T_M og omkringliggende lufttemperatur T_a . Denne påvirkes blant annet av turbulent og laminær vind, samt vindhastigheten korrigert for modulens egen høyde, fra TMY-verdi for 5m over bakken.
- Strålevarmeveksling mellom modulens overflate og himmelen, $h_{r,sky}$, defineres som

$$h_{r,sky} = \epsilon_{top} \sigma (T_M^2 + T_{sky}^2) (T_M + T_{sky}), \quad (2.7)$$

hvor $\epsilon_{top} = 0.84$ er emissiviteten til modulens framside-glass, og $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ er Stefan-Boltzmanns konstant. T_{sky} er himmeltemperaturen definert ved

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (2.8)$$

for skyfri himmel, og

$$T_{sky} = 0.68(0.0552T_a^{1.5}) + 0.32T_a \quad (2.9)$$

for overskyet himmel.

- Strålevarmeveksling mellom modulens underside og bakken, $h_{r,gr.}$, defineres som

$$h_{r,gr.} = \epsilon_{back}\sigma(T_M^2 + T_{gr.}^2)(T_M + T_{gr.}), \quad (2.10)$$

hvor $\epsilon_{back} = 0.89$ er emissiviteten til undersiden som vender mot bakken. $T_{gr.}$ er bakkens overflatetemperatur.

Fuentes-modellen forenkler modul-strukturen ved å anta at hele strukturen er en uniform masse med uniform temperatur. Dette kan ikke regnes som realistisk fordi, som forklart i delkapittel 2.5.1, består solcellene som modelleres i denne oppgaven av flere lag av forskjellige materialer. Denne forenklingen rettfærdiggjøres av at solcellen har relativt lav tykkelse og lav varmekapasitet [22]. Modellen beskrives også til å ha en nøyaktighet innen 5

En solcellemoduls virkningsgrad η ved gitt modultemperatur T_M og irradians G_M defineres [8] som

$$\eta(T_M, G_M) = \eta(25^\circ C, G_M)[1 + \kappa(T_M - 25)], \quad (2.11)$$

hvor κ er definert som

$$\kappa = \frac{1}{\eta(STC)} \frac{\partial \eta}{\partial T}. \quad (2.12)$$

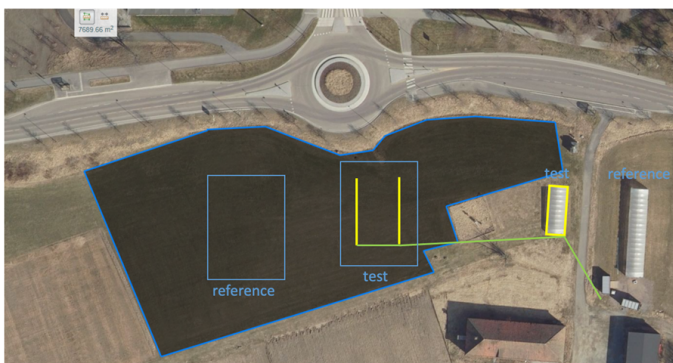
Som nevnt gir temperaturkoeffisienten fra databladet en pekepin for økning eller reduksjon av virkningsgrad til et solcellepanel ved lufttemperaturrendringer over eller under STC. Simuleringene av celletemperatur og strømproduksjon i denne studien vil dermed kunne bidra som datagrunnlag for sammenligning av prediksjoner og målte data, i forhold til solcellers potensielle termiske fordel med plassering i dyrket mark.

Kapittel 3

Metode

3.1 APV-anlegg på Kjerringjordet i Ås

Høsten 2021 ble det bestemt at NMBU skulle iverksette forskning på APV i Ås. Målet har siden da vært å bygge et fysisk test-anlegg med mulighet for målinger av diverse mikroklimatiske data. Lokasjonen til APV-anlegget ble satt til Kjerringjordet som vist i figur 3.1.



(a) Kjerringjordets planlagte oppsett med et testområde for APV med vertikale tosidige moduler på jordet og drivhus med solcelleduk. Referanseområder er satt av for sammenligning av for eksempel innstråling og plantevekst.



(b) APV-anlegget skal bygges og modelleres i Ås, som vist med den røde prikken på kartet. Kilde: Google Maps

Figur 3.1: Kjerringjordets planlagte oppsett og lokasjon i Norge.

Etter kontakt med det tyske selskapet Next2Sun, ble det etablert et forsknings-samarbeid som gjør det mulig å bruke deres patenterte oppsett med fastmonterte vertikale solcellemoduler. Systemet får dermed følgende design, basert på anbefaling fra Next2Sun ¹:

- Tre rader med ti modul-elementer og medfølgende bærestruktur i hver rad
- Panelene skal plasseres med lengste kant horisontalt, med to stk i høyden
- Det skal være 0.8 m mellom bakken og kanten på det nederste panelet
- Solcelleradene orienteres parallelt nord-sør, med sideflatene vendt mot øst og vest

Til sammen blir det ca. 70 m med vertikale solcellepanelrader, og illustrasjoner av anleggets utseende vises i figur 3.2.



(a) Illustrasjon av hvordan anlegget på Kjerringjordet i Ås vil se ut. Bildet er illustrert av Mälardalens Universitet i Sverige, der det bygges et tilsvarende anlegg. <https://www.mdu.se/en/malardalen-university/research/research-projects/evaluation-of-the-first-agrivoltaic-system-in-sweden>



(b) Fotografi som representerer hvordan anlegget på Kjerringjordet i Ås vil se ut. Dette bildet er også av testanlegget som bygges på Mälardalens Universitet i Sverige. <https://next2sun.com/en/testimonials/agripv-systems/>

Figur 3.2: Bilder som illustrerer det fysiske utseende til et fremtidig testanlegg på Kjerringjordet i Ås.

¹S. Lahr, personlig kommunikasjon, 17. oktober 2022

3.2 Modelleringsverktøy

Som forarbeid til test-anlegget, og hovedmål for dette arbeidet, blir det laget en 3D-modell med tilhørende analyser av innstråling, temperatur i anleggets mikroklima, samt energiproduksjon fra panelene. 3D-modellen er en forenklet versjon, men vil kunne bidra som grunnlag for sammenligning av prediksjoner og fysiske resultater.

Modellen utarbeidet i dette arbeidet baserer seg på en autonom modell for optimalisering av APV, konstruert av Erlend Hustad Honningdalsnes i sammenheng med hans masteroppgave skrevet på NTNU våren 2022 [23]. 3D-modellering av forsøksanlegget ble gjort med programvaren *Rhinoceros*, og nyeste utgave *Rhino 7*. Dette er et 3D-verktøy for konstruering, design og visualisering av modeller ². Tilleggsprogrammet *Grasshopper* ble benyttet for å bygge geometrien til 3D-modellen ³, og koble sammen beregningsmoduler for simuleringer ved parametrisk programmering.

Hovedmengden av simuleringsarbeidet ble gjennomført med *Ladybug Tools*⁴ (heretter forkortet til *Ladybug* eller LB) til forskjell fra *ClimateStudio* brukt i Honningdalsnes' versjon. Dette er et verktøy som kan generere interaktiv klimagrafikk for simulering og analyse av innstråling, skygger og temperatur. Simulering av PV-modulenes strømproduksjon og celledetemperatur ble gjort med *Ladybugs* versjon 0.0.69 - *Ladybug Legacy*. Verktøyenes logoer vises i figur 3.3, og brukergrensesnittet kan vi se i figur 3.4.



(a) *Rhinoceros* er en solid motor for utvikling av konstruksjoner og teknologi blant arkitekter og ingeniører.



grasshopper

(b) *Grasshopper* er et tilleggsprogram til *Rhino* for visuell parametrisk programmering.



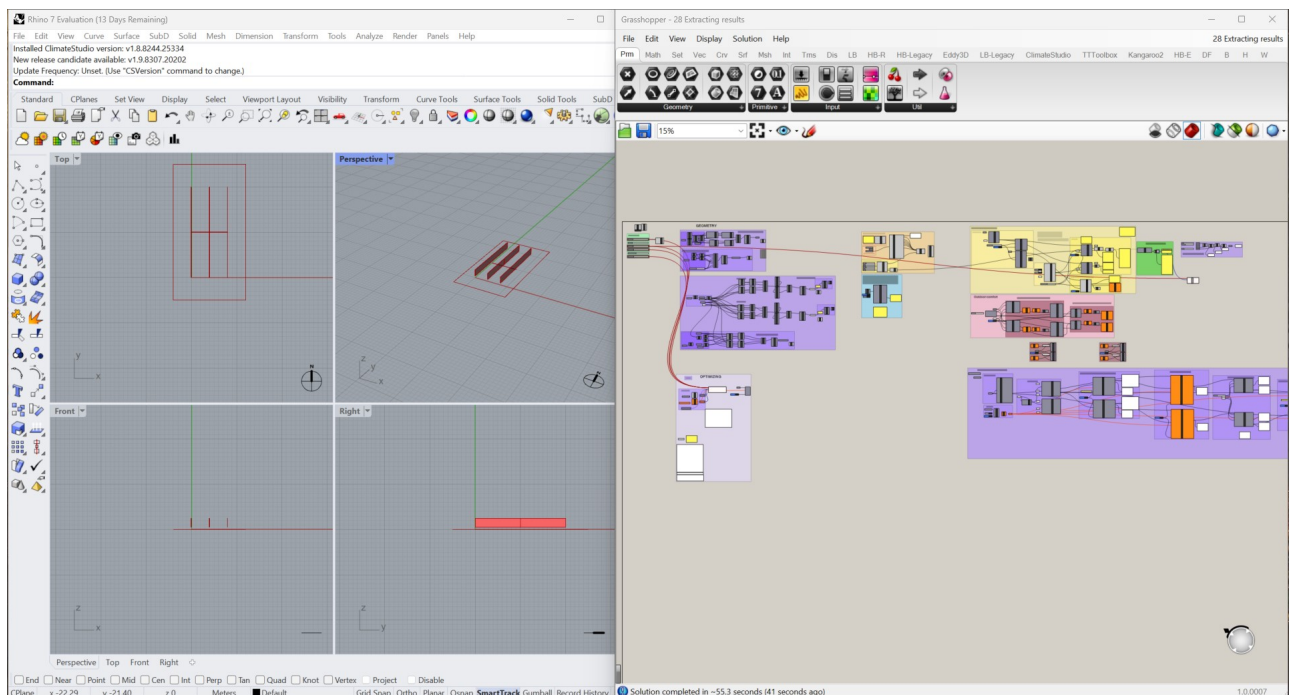
(c) *Ladybug Tools* er en pakke med plug-ins til *Grasshopper* som muliggjør analyse og visualisering av værdata i 2D og 3D.

Figur 3.3: Alle logoer er brukt med tillatelse fra utgivere via e-post korrespondanse med *Ladybug Tools*, *Rhinoceros* og *Wallacei* ⁵.

²<https://www.rhino3d.com/>

³<https://www.grasshopper3d.com/>

⁴<https://www.ladybug.tools/>



Figur 3.4: Her ser vi brukergrensesnittet til Rhino (til venstre) og Grasshopper (til høyre). I Grasshopper-vinduet er det de firkantede grå boksene som representerer komponenter med kode, og trådene imellom er sammenkoblinger av input og output mellom komponenter. Det man kobler sammen i Grasshopper, er hva som vises i Rhino-vinduet med det perspektivet man ønsker.

3.2.1 Antakelser og forenklinger

En oppsummering av avgjørelser, antagelser og forenklinger gjort ved modellering av forsøksanlegget til Kjerringjordet i Ås foreligger slik:

- LB-komponentenes innebygde standardverdier antas å være gode nok der relevante måledata ikke kan oppdrives
- Det antas at ansamling av støv, partikler (soiling), og snø på modulflatene kan neglisjeres, grunnet deres vertikale orientering. Neglisjering av soiling vil diskuteres i delkapittel 4.0.7
- 3D-modellen forenkles ved å bygge på et flatt underlag i xy-planet
- 3D-modellen forenkles ved at panelene modelleres som rektangulære overflater, uten rammer og fundamentering
- De tosidige modulene bygges som to flater inntil hverandre. Dette gjøres da *Ladybug* ikke har modeller for tosidighetsfaktor implementert. Dette er en begrensning i programvaren

- Koordinatsystemet i 3D-modellen er definert med positiv x-akse som øst, og positiv y-akse som nord

3.2.2 Bygging av geometrien

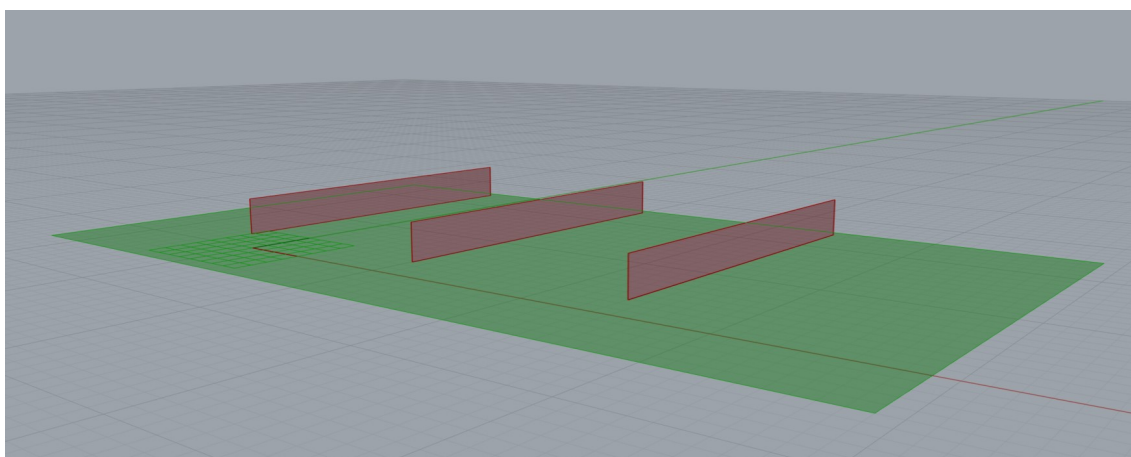
Ved bygging av geometri for APV-anlegget ble standard Grasshopper-komponenter benyttet for å konstruere punkter og flater basert på gitte parametre. Disse ble implementert som glidebrytere og inneholder følgende elementer:

Geometri-parametre:

- Lengde på rader
- Antall rader
- Avstand mellom rader
- Asimut vinkel
- Antall paneler i høyden
- Høyde over bakken

Parametrene størrelser ble satt til å representere det fysiske anlegget som beskrevet i delkapittel 3.1. Dermed blir lengde på rader, antall rader, azimuth vinkel og høyde over bakken utelatt fra den kommende automatiske optimaliseringen. Muligheten for justering av parametrene blir likevel værende i modellen for videre bruk og utvikling og studier av tilsvarende systemer.

Den endelige 3D-modellen til systemet er illustrert i 3.5, og komponentenes sammensetning finnes i tillegg B.



Figur 3.5: Systemets 3D-modell i Rhino.

3.2.3 Konstruering og anvendelse av værdata

Neste del av modellen består av å importere riktig værdata til *Ladybug*. Formatet som brukes til *Ladybug*-komponentene er som nevnt i kapittel 2.2.1 EnergyPlus Weatherfiles - EPW.

Værdata til modellen er etter beste evne utarbeidet fra målinger gjort på Søråsjordet, og sammensatt til EPW format, da dette ikke er et standard format hos BIOKLIM på NMBU ⁶. Der det manglet nødvendige målinger fra Søråsjordet, ble Landbruksmeteorologisk Tjeneste (LMT) fra NIBIO ⁷ eller Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) ⁸ brukt. PVGIS kan levere EPW-filer for eksakte koordinater, men disse er basert på satelitt-data, så dette ble hovedsakelig brukt til å bestemme hvilke år man skulle hente de forskjellige månedene fra i forhold til deres TMY-filer.

Når riktig værdata var satt sammen i en CSV-fil med riktig oppbygning, ble denne konvertert til EPW ved bruk av EnergyPlus sitt eget konverteringsprogram *Weather*⁹. *Ladybug* sin egen komponent *CreateEPW* ble også testet, men viste seg å fungere dårlig da første rad for tilsynelatende tilfeldige kollonner automatisk ble plassert nederst i den ferdige EPW-fila. *CreateEPW* ser også ut til å regne ut relativ luftfuktighet på egenhånd, da de målte verdiene var byttet ut med andre (i tilsvarende størrelsesorden) i den ferdige fila herfra. Grunnen til disse avvikene er uvisst, men det skjedde ikke for de andre måleverdiene.

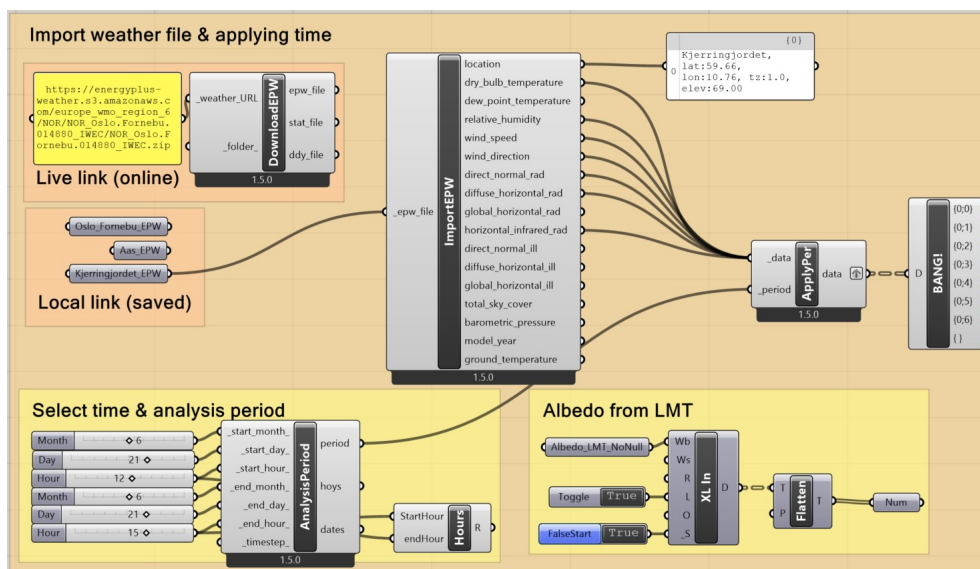
⁶Kilde: NMBU, <https://www.nmbu.no/fakultet/realtek/laboratorier/bioklim>

⁷Kilde: Landbruksmeteorologisk tjeneste, <https://lmt.nibio.no/>

⁸Kilde: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

⁹Dette programmet følger med den nedlastede EnergyPlus pakken som må installeres for å bruke *Ladybug Tools*.

Til slutt blir værfilen filtrert av en *AnalysisPeriod* komponent, der man velger et intervall for analysen. Slik kan man spesifisere at man for eksempel simulerer innstråling kun i juni, eller for alle måneder mellom kl.12 og kl.16. Figur 3.6 viser delen av modellen som importerer og periodiserer en EPW-fil.



Figur 3.6: Her vises LB-komponentene som importerer EPW-filen og anveder tidsperiode på dataen.

3.2.4 Solcellemodellen

Simulering av PV-modulene ble gjennomført med innebygde komponentene for solceller i LB¹⁰. Komponentene ved navn *Photovoltaics Surface* er hovedkomponenten for beregning av strømproduksjon, innstrålt energi og celleteperatur. Denne komponenten baseres på “NREL PVWatts v1” solcellekalkulator¹¹ for krySTALLinsk silisium (c-Si) og tynnfilm PV¹². Geometrien brukt som “PVsurface” input til *Photovoltaics Surface* er hele rad-flatene. Da det er tosidige paneler som skal modelleres ble det lagt inn to av hver beregnings-komponent som representerte hhv. østside og vestside. I modulinnstillingene konstruert av komponenten ved navn *SimplifiedPhotovoltaicsModule* ble virkningsgrad og andre relevante modulspefikasjoner hentet fra databladet til **ECO Line HTJ Glass-Glass HC Bifacial M144** solcellemodul, av Luxor¹³. Databladet er å finne i tillegg A. Panelsiden med databladets virk-

¹⁰Til denne delen av modellen ble *Ladybug Legacy* (v.0.0.69) benyttet på grunn av manglende funksjonalitet nyeste LB-utgave.

¹¹PVwatts: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60272.pdf>

¹²Kilde: Sandia National Laboratories, <https://pvpmc.sandia.gov/>

¹³<https://www.luxor.solar/en/downloads.html>

ningsgrad vil heretter kalles for framsiden, og siden med virkningsgrad justert av tosidighetsfaktoren kalles heretter for baksiden. Orienteringen til framside og bakside varieres ved å bytte på om det er øst- eller vestsida som har databladets oppgitte virkningsgrad.

Simuleringen foregår ved å først bruke *Photovoltaics Surface* komponenten til å beregne strømproduksjon, innstråling og celletemperatur til en forenklet modulkomponent. Dette gjøres uten skygging og tap fra elektriske enheter. Relevante tekniske verdier for modulspekifikasjoner ble hentet fra databladet i tillegg A. For verdier som ikke oppgis her, brukes standardverdiene som allerede ligger inne i komponentene grunnet forenkling oppgitt i kapittel 3.2.1.

Deretter settes modolgeometrien inn i en *sunPath* komponent som beregner solinnstråling med skygging inkludert. Verdien for *Annual shading*, årlig skygging, fra *sunPath* komponenten føres inn i en *System losses* komponent hvor verdier for blant annet alder, soiling og inverter-tap inkluderes. Til slutt brukes *pvSurface* komponenten på nytt til å beregne produksjon og celletemperatur med tap fra skygge og elektriske enheter. Her kan man ta ut både time- og årsverdier.

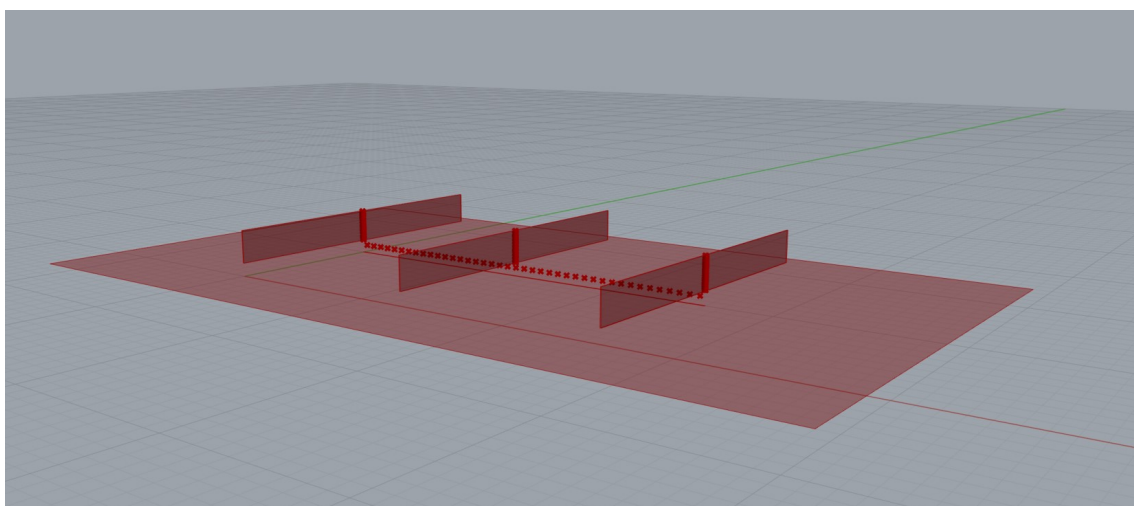
I simuleringen bruker *Ladybug* sine PV-komponenter PVWatts¹⁴ som beregningsalgoritme, utviklet av *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). For beregning av celletemperatur brukes en forenklet termisk modell [24], forklart i delkapittel 2.5.4. Denne benytter seg av både direkte og diffus innstråling, samt lufttemperatur og vindhastighet. Da modellen for beregning av celletemperatur er fra 1987, kan det diskuteres hvorvidt den er aktuell for dagens solcellepaneler, og spesielt tosidige. Foreløpig finnes det ikke en standardisert modell for beregning av celletemperatur for tosidige glass-glass moduler. Dupliseringen av *PhotovoltaicSurface* komponenten gir celletemperatur for framside og bakside enkeltvis uten hensyn til varmeoverføring innad i selve modulen. Oppsettet av LB-komponenter for simuleringen vises i tillegg B.

Som nevnt i introduksjonen er det et mål for oppgaven å undersøke hvilken konfigurasjon av framside og bakside på de forskjellige panelradene som egner seg best vendt mot øst eller vest. Å veksle mellom hvilken side som får opprinnelig effekt, og hvilken som får redusert, i forhold til tosidighetsfaktoren, gjør det mulig å modellere de forskjellige konfigurasjonene. Slik kan man deretter analysere, basert på energiproduksjon, om framsiden eller baksiden bør vende mot øst. På grunn av den geometriske modelleringen var det kun mulig å ha alle radenes framside samme vei.

¹⁴PVwatts: <https://pvwatts.nrel.gov/index.php>

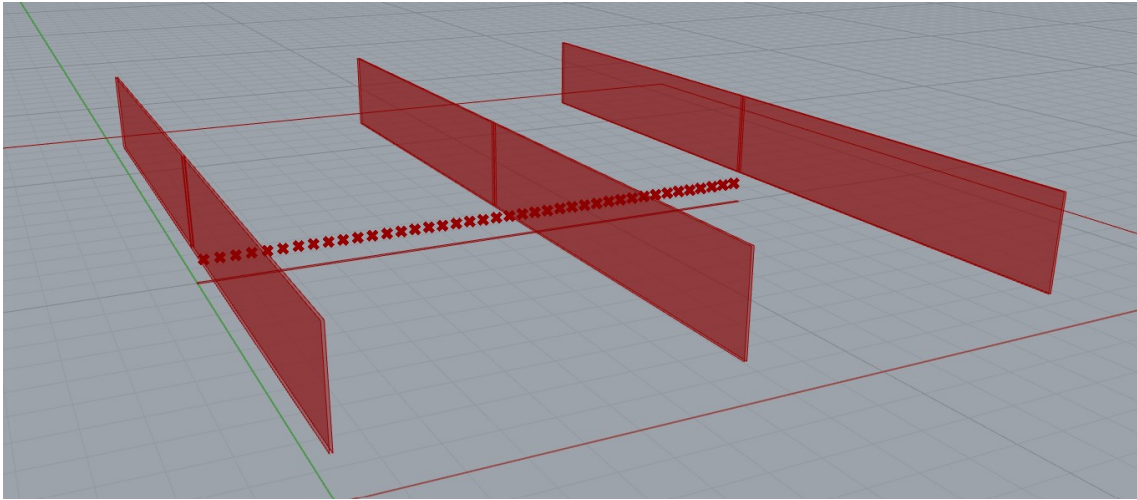
3.2.5 Innstråling

Simulering og analyse av innstråling på bakke og panelrader blir gjort med utgangspunkt i symmetri, slik at ende-effekter neglisjeres [23]. Det ble konstruert en tynn stripe på bakken og på panelene med en rekke sensorer som vist i figur 3.7. Dette minimerte beregningstiden.

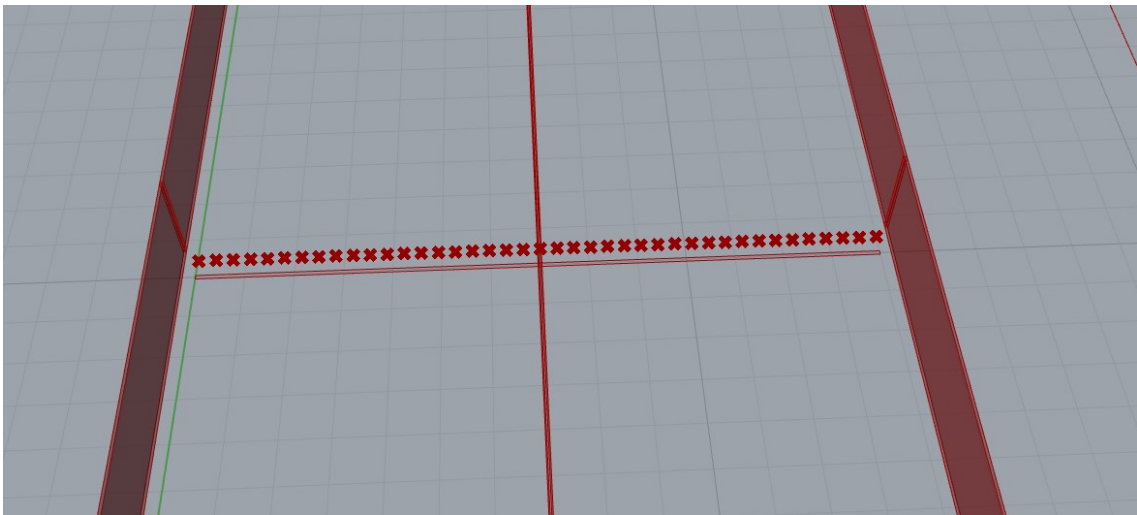


Figur 3.7: Beregningsmodellen er forenklet ved å konstruere en tynn stripe på bakken og på midten av alle radene. Disse analyseområdene inneholdt en rekke punkter som representerer sensorer for innstrålingsanalyse.

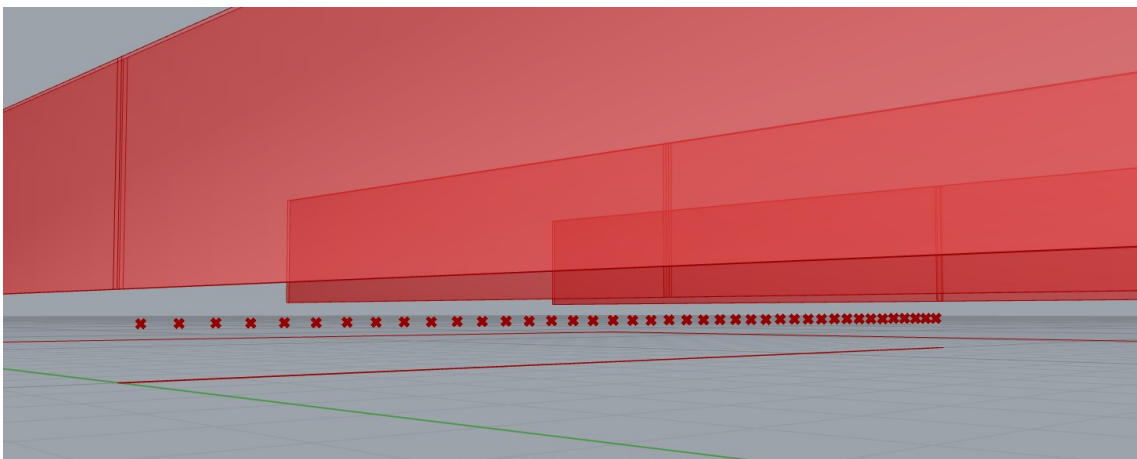
Bakke-sensorene ble plassert 0.5 m over bakken for å fange opp resultater fra en sannsynlig plantes høyde. Nærmere illustrasjon av disse sensorene vises i figur 3.8.



(a) Bakkens 41 sensorer fordelt over testområdet.



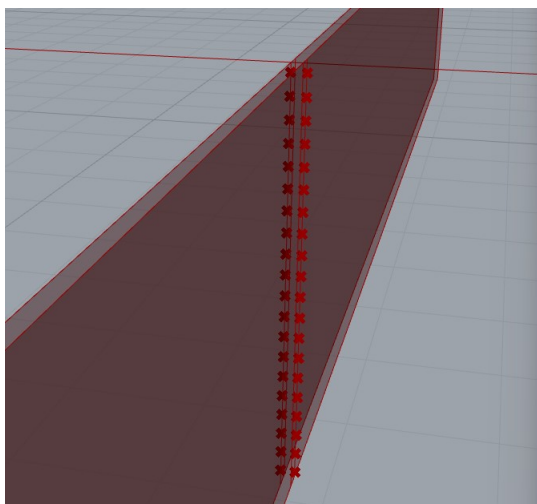
(b) Antall sensorer er oddetall slik at midterste sensor befinner seg rett under midterste panel.



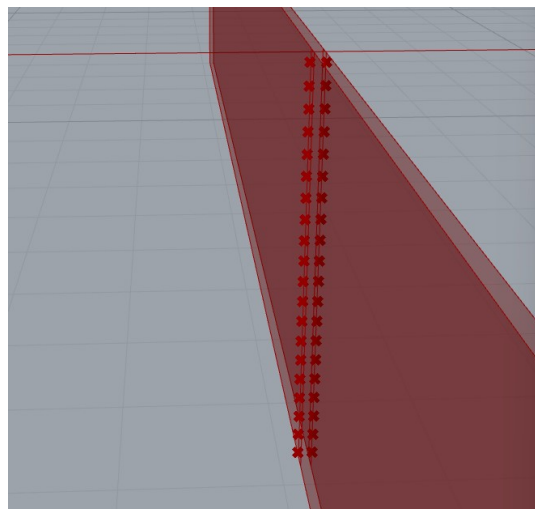
(c) Sensorene er plassert 0.5 m over bakken for å måle innstråling i høyde med plantenes potensielle toppunkt.

Figur 3.8: Illustrasjon av bakke-sensorene i 3D-modellen, hvor vest er mot venstre og øst mot høyre i bildet.

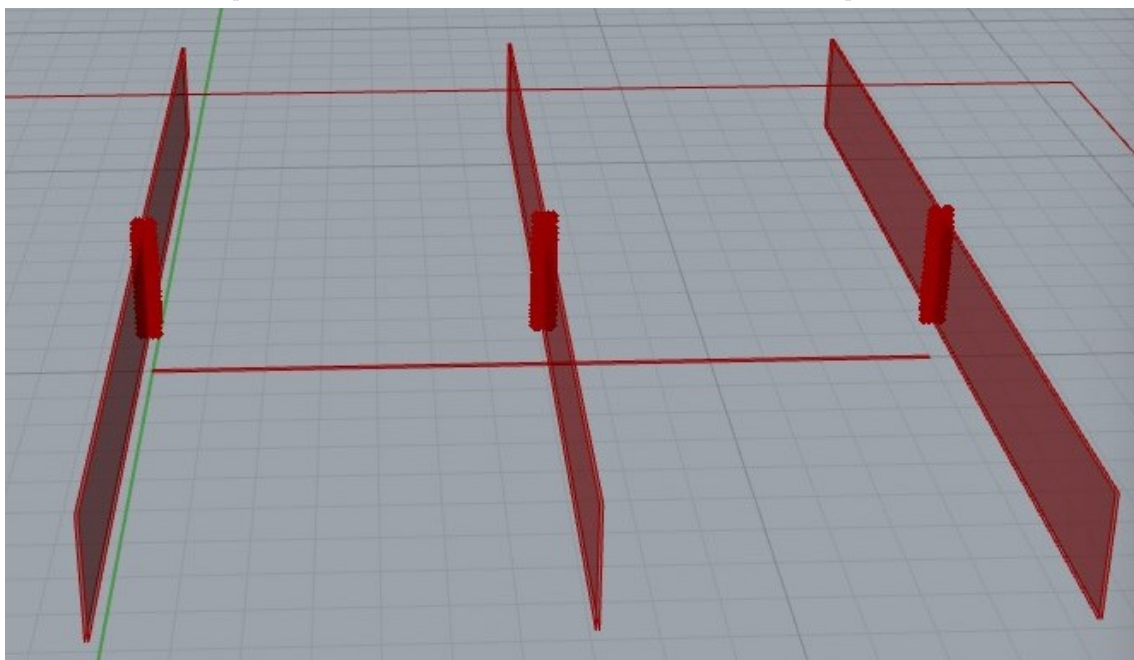
De panel-monterte sensorene ble plassert som dobbelte sett av 20 sensorer på midten av hver av de tre radene, og illustreres i figur 3.9.



(a) Modulenes 20 sensorer på analyseområdet til østvendt side av panelradene.



(b) Modulenes 20 sensorer på analyseområdet til vestvendt side av panelradene.



(c) Sensorene er plassert vertikalt på midten av alle radene for å observere forskjeller i innstråling langs panelenes høyde.

Figur 3.9: Illustrasjon av panel-sensorene i 3D-modellen.

Det er i alt 90 sensorer, med 20 sensorer på de tre radenes østside og vestsiden som vist i henholdsvis figur 3.9a og 3.9b.

Fra *Ladybug Tools* ble *Incident Radiation* komponenten brukt til å kalkulere innstråling på overflatene som inkluderes. Innstrålingen genereres av komponentene *SkyMatrix*, *SkyDome* og *Sunpath*. Både direkte, diffus og reflektert stråling tas med her, da albedo også inkluderes i beregningen av himmelmatrisen ved bruk av *SkyMatrix* komponenten. For denne simuleringen kunne ikke albedo settes inn som timesverdi, kun konstant tallverdi for hele analyseperioden. Dette kan ha ført til unøyaktigheter og regnes som en feilkilde. Siden de viktigste simuleringene ble gjort for juni, ble det antatt at bakken for det meste var dekket av gress eller jord, som har albedo-verdi rundt 0.25.

Incident Radiation-komponenten gir resultater for innstrålingsenergi per kvadratmeter [kWh/m^2] til hver sensor for valgt analyseperiode. Oppsettet med sammensetning av komponenter vises i figur B.2a i tillegg B.

3.2.6 Plantemodell

I denne oppgaven velges det å simulere veksten av timotei-gress, da dette er en av de mest dyrkede grass-artene i Norge. Selv om timotei ikke er en av artene listet opp i tabell 1.1 for økt avling ved redusert innstråling, ble denne gressarten valgt på grunn av tilgangen på en ferdig programert vekstkalkulator for denne arten. Den programmerte vekstkalkulatoren baserer seg på *Canadian Timothy Model* (CATIMO) [25], som er en mekanistisk modell som brukes til å predikere avlinger av gresstypen timotei. Modellen ble utviklet av Helge Bonsemo og Gilles Bélanger, og benyttes fortsatt av blant annet NIBIO, til videre forskning og sammenligningsstudier mellom andre plantemodeller [26]. Forfatter av vekstkalkulatoren algoritme er E. H. Honningdalsnes som konstruerte den til bruk i egen masteroppgave [23]. Vekstkalkulatoren beregner utbytte per år basert på tilgang på lys. Innstrålingsverdiene [kWh/m^2] som settes inn i beregningen, kommer fra simulering på bakke-sensorer med *Incident Radiation* komponenten til *Ladybug* som beskrives i kapittel 3.2.5. Her tas det utgangspunkt i at vanningsforhold og gjødsling er optimale, slik at det kun er lys og skygge som påvirker avlingen. Resultatet oppgis dermed som en prosent-verdi av hva som kunne blitt produsert ved optimale lysforhold uten skygge fra moduler.

Optimale lysforhold for timotei i CATIMO, baserer seg på blant annet *Radiation Use Efficiency* (RUE) og *Photosynthetic active radiation* (PAR) som er beskrevet i 2.2.2. Dette betyr i korte trekk at plantemodellen tar hensyn til gressets mulighet til å absorbere lys i forhold til størrelsen på blader, og behandler informasjonen ut ifra plantens daværende mulighet til å bruke energien til fotosyntese for videre vekst. Det er også en rekke andre modellparametre som avgjør veksten og disse er

i all hovedsak basert på opprinnelig publikasjon [25], med unntak av noen som er modifisert på grunnlag av Honningdalsnes kommunikasjon med en av modellenes forfattere, Helge Bonsemo.

Plantemodellen opererer gjennom et år på grunnlag av daglige verdier for blant annet snødekke, temperatur, innstråling, vanning, nitrogen i jorda, og daglengde. Snødekke og temperatur over et gitt nivå avgjør når vekstsesongen starter, og deretter er det innstråling per dag som kontrollerer vekstraten. Hver dag undersøkes avlingens størrelse for å avgjøre om det skal høstes. Dette gjøres ved beregning av tørt materiale bestående av bladstørrelse og stilker. Avlinger store nok til å høstes legges til i en akkumulert samling, og ny vekstperiode settes i gang hvis forholdene ligger til rette for det. Hvis temperatur har falt under tillatt nivå vil vekstsesongen avsluttes. Med optimale vannings- og gjødslingsforhold som forenkling, vil prosessen gå i en syklus på et år og avsluttes når datotelleren når 31. desember. Deretter sammenlignes den produserte avlingen, med hva total avling ville vært med optimal innstråling, og resultatet oppgis i prosent av optimal mengde.

3.2.7 Omgivelsestemperatur i mikroklimaet

For å modellere temperaturforholdene i APV-systemet ble det satt opp simuleringer av MRT og UTCI (forklart i kapittel 2.2.3) for samme utvalg av punkter som for innstråling. Det betyr at ende-effekter også neglisjeres her. MRT ble valgt etter anbefaling under veiledning med Arnkell Jonas Petersen, førsteamanuensis på institutt for bygg- og miljøteknologi ¹⁵. MRT beregnes i *OutdoorSolarMRT*-komponenten, og det var ikke mulig å benytte albedo som times-verdi i denne simuleringen. Dermed ble standard verdi for gress, 0.25, brukt for hele analyseperioden. LB-komponenten bruker *SolarCal* modellen til ASHRAE-55 og en forenklet modell for eksponering av et legeme. Målehøyden til legemet ble satt til 0.5 m for å simulere temperaturen på plantenes nivå. Kontekst-geometrien som kan skape skygge består av panelradene.

Det ble laget to simuleringer av MRT for alle radavstandene, der den første betrakter resultater uten modullrader til stede. Den andre har modullradene og deres skygge/refleksjon av stråler med i beregningen, slik at en sammenligning kan gjennomføres.

¹⁵personlig kommunikasjon, 01. november 2022

Etter MRT er beregnet kan man sette resultatene fra dette inn i komponent for “utendørs komfort”. Denne analysen gir verdier for *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) som også er nærmere beskrevet i delkapittel 2.2.3. Dette ble gjort for systemet med og uten skyggng/refleksjon. Hele oppsettet av LB-komponenter i *Grasshopper* vises i figur B.2b i tillegg B.

3.2.8 Optimalisering

Avstanden mellom radene anses å være denne oppgavens viktigste parameter å tilpasse for å finne de optimale forholdene for både energiproduksjon og plantevekst. Denne verdien spiller en stor rolle for mengde skygge som treffer bakken, da den avgjør hvor mange rader som kan plasseres på et gitt område.

En annen faktor for å avgjøre radavstand er behovet for at landbruksmaskiner skal kunne å passere trygt mellom konstruksjonene. Bredden på slike kan variere mye, og oppgis i tabell 3.1 ¹⁶.

Tabell 3.1: Bredden på vanlige landbruksmaskiner.

Landbruksmaskin	Bredde
Slåmaskin og beitepusser m.m	3m
Såmaskin	3m, 6m, og 8m
Åkersprøyter	12m - 36m

Med hensyn til 0.5 m margin mellom maskinen og panelene på begge sider, velges følgende radavstander til simuleringer: 4 m, 7 m, 9 m, 13 m, 19 m, 28 m og 37 m.

På denne måten kan maskiner med 3 m, 6 m, 8 m, 12 m, og 36 m, passere trygt gjennom feltet uten for mye overlapp dersom maskinen må passere flere ganger for å dekke hele bredden.

Automatisk optimalisering ble gjort med programpakken *Wallacei* ¹⁷. Dette er en evolusjonsbasert algoritme som gjør det mulig å simulere flere konfigurasjoner av et system samtidig. Slik kan man finne hvilket utvalg av gener (parametre) som gir en konfigurasjon (system/3D-modell) med best resultat for elementene (“objectives”) man velger. For eksempel kan avling, innstråling eller strømproduksjon settes inn som elementer for optimalisering. Verdien til elementene er det man ønsker å minimere eller maksimere, ut ifra hvilke parametre (gener) som velges og varieres.

¹⁶J.A. Randem, personlig kommunikasjon via e-post, 08. november 2022

¹⁷<https://www.wallacei.com/>

Genene som settes inn i *Wallacei* er variabler man ønsker å tilbake for best resultat til de valgte elementene. Her kan radavstand, asimut vinkel, høyde over bakken osv. settes inn og algoritmen vil se hvilket sett av innstillinger for disse parametrene som for eksempel gir høyest plantevekst.

Optimaliseringen ble dermed gjennomført for strømproduksjon, plantevekst, innstråling og celletemperatur med variasjon av kun radavstand. Hver av elementene ble undersøkt enkeltvis, før det til slutt ble gjennomført en optimalisering som viste best radavstand for alle elementene samtidig. Da løsningen for optimal radavstand var funnet, ble denne brukt til å sette sammen et nytt sett av beregninger for alle de øvrige simuleringene i solcellemodellen, innstråling, plantemodell og omgivelsestemperatur.

3.2.9 Databehandling

All uthenting og innhenting av punktdata, samt importering til og fra excel eller csv filer har blitt gjort via *TTToolbox*, som er en tilleggspakke i *Grashopper* for eksport og import av data. Punktdata fra resultater ble behandlet i *Jupyter Notebook* og *Excel*, ved bruk av *Pandas*¹⁸, *Matplotlib*¹⁹, *NumPy*²⁰ og *Seaborn*²¹ for statistikk og visualisering.

¹⁸<https://pandas.pydata.org/>

¹⁹<https://matplotlib.org/>

²⁰<https://numpy.org/>

²¹<https://seaborn.pydata.org/>

Kapittel 4

Resultater og diskusjon

I dette kapitlet vil resultater presenteres sammen med relevant diskusjon rundt observasjonene som er avdekket gjennom arbeidet. Rekkefølgen på de forskjellige delene vil ha samme struktur som i metode-kapitlet, med solcellemodellen først, etterfulgt av innstråling på paneler og bakke. Så plantevekst forårsaket av innstrålingen på bakken presenteres. Til slutt vil resultater for omgivelsestemperaturer og optimalisering legges frem. Resultat-rekkefølgen hittil er valgt på grunnlag av hva som anses som naturlig og viktigst for valg av radavstand. Videre tar vi for oss diskusjon rundt hvordan resultatene fra årlig produksjon, plantevekst og oppskalering kan brukes som hovedfaktorer for helhetlig vurdering av radavstand til testanlegget i Ås. Til slutt understrekes og diskuteres det elementer fra jordbrukets påvirkning ved drifting av området.

For enkelhets skyld er det valgt å fokusere på juni måned der det beregnes detaljerte resultater som time- eller døgnverdier. Dette gjøres for å simulere forhold hvor kjøling fra vind og skygge er nyttig for økt strømproduksjon. Timesverdier for hele juni måned med strømproduksjon, innstrålt energi og celletemperatur, finnes i tillegg D. Der det fremvises verdier fra kun ett døgn i dette kapitlet, er 21. juni valgt da dette er patent-datoen til den første mekaniske innhøstingsmaskinen ¹. I månedsplottene fra tillegg D ser vi at den 21. kurvetoppen for hvert av plottene verken er den høyeste eller laveste, og dette regnes som en typisk 21.juni-dag, selv om dette er sommersolverv og årets lengste dag.

¹Innhøstingsmaskinen ble patentert av Cyrus Hall McCormick, det moderne jordbrukets far, i 1834. <https://www.wisconsinhistory.org/Records/Image/IM3426>

4.0.1 Solcellemodellen

Resultatene fra solcellemodellen er delt i fire seksjoner: årlig strømproduksjon, strømproduksjon - timesverdier, innstråling - timesverdier og celleteperatur - timesverdier.

Årlig strømproduksjon

Den totale årlige strømproduksjonen for radene vises i tabell 4.1. Her er det simulert med framsiden vendt mot vest og mot øst for alle radene, som gjør tabellen todelt. Forskjellige radavstander vises nedover for begge orienteringene. Tabellen fremvises med en fargeskala som blir mørkere for høyere verdier.

Tabell 4.1: Årlig produksjon for panelradene med forskjellig radavstand og orientering av fram- og bakside.

Årlig energiproduksjon for APV-systemets panelrader [kWh]							
<i>Framsiden vender vestover</i>							
	Vest-rad		Midt-rad		Øst-rad		
Rad-avstand	Vestside	Østside	Vestside	Østside	Vestside	Østside	TOTALT
4 m	3311.0	2825.2	3003.0	2825.2	3003.0	3191.8	18159.0
7 m	3311.0	3006.5	3199.8	3006.5	3199.8	3191.8	18915.3
9 m	3311.0	3057.0	3251.1	3057.0	3251.1	3191.8	19119.1
13 m	3311.0	3111.8	3289.6	3111.8	3289.6	3191.8	19305.6
19 m	3311.0	3149.7	3302.5	3149.7	3302.5	3191.8	19407.0
28 m	3311.0	3170.7	3306.7	3170.7	3306.7	3191.8	19457.7
37 m	3311.0	3179.1	3311.0	3179.1	3311.0	3191.8	19483.1
Differanse	0.0	354.0	308.1	354.0	308.1	0.0	133846.8
<i>Framsiden vender østover</i>							
	Vest-rad		Midt-rad		Øst-rad		
Rad-avstand	Vestside	Østside	Vestside	Østside	Vestside	Østside	TOTALT
4 m	2748.1	3403.8	2492.5	3403.8	2492.5	3845.5	18386.2
7 m	2748.1	3622.3	2655.8	3622.3	2655.8	3845.5	19149.9
9 m	2748.1	3683.2	2698.4	3683.2	2698.4	3845.5	19356.8
13 m	2748.1	3749.2	2730.4	3749.2	2730.4	3845.5	19552.7
19 m	2748.1	3794.8	2741.0	3794.8	2741.0	3845.5	19665.3
28 m	2748.1	3820.1	2744.6	3820.1	2744.6	3845.5	19723.1
37 m	2748.1	3830.3	2748.1	3830.3	2748.1	3845.5	19750.5
Differanse	0.0	426.5	255.7	426.5	255.7	0.0	135584.5

Det første vi ser av tabellens verdier og fargekontraster, er at det er større forskjell mellom verdiene for øst- og vestsida når panelenes framside vender mot øst (nederste del av tabellen), enn når framsiden vender mot vest (øverste del av tabellen).

Høyre kolonne på begge sider av tabellen viser total årlig produksjon for systemet med den gitte radavstanden. Nederste celle i denne kolonnen oppgir summen av disse verdiene. Ved sammenligning ser vi at summen for alle systemene med framside vendt østover, både enkeltvis og samlet har høyere verdi enn ved framsiden mot vest. I hele tabellen er det også radavstand på 37 m som gir høyeste verdi for årlig strømproduksjon.

Nederste rad i tabellen viser differanse mellom høyeste og laveste verdi for hver kolonne. Videre undersøkelse av differanse mellom radavstandene gis i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Tabell for differansen mellom tabell 4.1 sine verdier og overstående celle dividert på avstand i meter.

Rad-avstand	Metervis differanse for radavstander [kWh/m]			
	Framsiden vender vestover		Framsiden vender østover	
	Vestside	Østside	Vestside	Østside
4 m	-	-	-	-
7 m	65.61	60.44	54.46	72.82
9 m	25.66	25.27	21.30	30.44
13 m	9.63	13.69	7.99	16.49
19 m	2.14	6.32	1.78	7.61
28 m	0.48	2.34	0.39	2.82
37 m	0.48	0.93	0.39	1.13

Tabell 4.2 viser økning i årlig produsert elektrisitet for hver meter radavstanden øker. Verdiene i cellene er altså et resultat av at verdiene i tabell 4.1 enkeltvis er subtrahert med verdien i cellen ovenfor, og dividert med avstandsdifferansen. Tabell 4.2 viser at strømproduksjonen øker sterkest ved endring mellom de korte avstandene enn ved endring av allerede store avstander. Her kategoriseres korte avstander som 5-15 m, og store avstander som 15-40 m. For eksempel ser vi at årlig produksjon til østsiden av midterste rad (når framsiden vender mot øst), øker med ca. 73 kWh/m når avstanden øker fra 4m til 7m. Samtidig ser vi at årlig produksjon kun øker med 1.13 kwh/m mellom 28 m og 37 m for midt-raden. Av verdiene i tabell 4.2 ser vi

også at radavstand trolig har større påvirkning på strømproduksjon når fremsiden av panelene vender mot øst enn mot vest.

Vi kan i tillegg undersøke forskjellen mellom østside og vestsida for de varierende radavstandene og orienteringene i tabell 4.3.

Tabell 4.3: Differanse mellom øst- og vestsida på panelradene.

Rad-avstand	Produksjon-differanse mellom øst- og vestsida [kWh]					
	Framsida vender vestover			Framsida vender østover		
	Vest-rad	Midt-rad	Øst-rad	Vest-rad	Midt-rad	Øst-rad
4 m	-485.8	-177.8	188.8	655.7	911.4	1353.0
7 m	-304.5	-193.3	-8.0	874.2	966.5	1189.7
9 m	-254.0	-194.1	-59.4	935.0	984.8	1147.1
13 m	-199.2	-177.8	-97.9	1001.0	1018.8	1115.1
19 m	-161.3	-152.8	-110.7	1046.7	1053.8	1104.4
28 m	-140.3	-136.0	-115.0	1072.0	1075.6	1100.9
37 m	-131.9	-131.9	-119.3	1082.1	1082.1	1097.3

I tabellen vises verdier for østside-kolonnene til tabell 4.1 minus vestsida-kolonnene.

I begge orienteringene er det som regel siden med høyest virkningsgrad (framsida) som gir positiv differanse-verdi. Unntaket er øst-raden med framsida vendt vest (venstre del av tabell 4.3) ved 4 m radavstand. Her produserer østsida (baksida) mer strøm enn vestsida (framsida), til forskjell fra resten av resultatene der vestsida produserer mest. I dette tilfellet er vestsida den som har høyest virkningsgrad, og den som forventes å produsere mest. Grunnen til unntaket kan være at den korte radavstanden fører til mer skygge på de bakenstående radene (midt og vest) på formiddagen når panelene er kalde, enn skyggen som inntreffer ved større radavstander. Samt at skyggen på vestsida til øst-raden relativt er større om ettermiddagen samtidig med at panelet er blitt varmere og yter dårligere, selv med sin “gode” side.

En annen forskjell mellom de to delene av tabell 4.3, er at differanse-verdiene er lavere for orienteringen med framsida mot vest (venstre del av tabellen). Dette stemmer overens med forskjellen i farge-kontraster vi allerede så i tabell 4.1. Dette skyldes trolig at vestsidene generelt mottar mindre innstråling, og når den “gode” siden vender vestover kan denne benytte det reduserte lyset bedre og veie opp for at den “dårlige” baksida får mer lys gjennom dagen. I tillegg vil panelene trolig

være varmere når solen treffer vestsiden på ettermiddagen, som gjør at temperaturkoeffisienten påvirker strømproduksjonen negativt.

Oppskalering

Nå som resultatene for testanlegget med tre rader er diskutert, blir det hensiktsmessig å undersøke hvordan kvadratmeter-produksjonen for anlegg med de forskjellige radavstandene ser ut ved potensiell oppskalering av antall rader.

For denne analysen tas det utgangspunkt i arealet som dannes innenfor anlegget med 37 m radavstand, når alle radene beholder sin 20 m lengde, altså 1480 m^2 . Ved bruk av dette arealet og lavere radavstand, får man plass til flere rader i anlegget, og kan dermed øke den totale strømproduksjonen til systemet. Resultatene i tabell 4.4, er konstruert ved å beholde produksjon til vest-rad og øst-rad for hver radavstand, men multiplisere midt-radens produksjon med antallet rader som får plass innenfor de to ytterste.

På grunnlag av at konfigurasjonen med framsiden vendt mot øst ga høyest årlig produksjon, brukes kun denne som utgangspunkt for oppskalering.

Tabell 4.4: Tabell for oppskalerte anlegg med produksjon per kvadratmeter i fokus.

Årlig energiproduksjon for oppskalert APV-system [kWh]								
Rad-avstand	Vest-rad		Midt-rader		Øst-rad		TOTALT [kWh]	TOT/areal [kWh/m ²]
	Vestside	Østside	Vestsider	Østsider	Vestside	Østside		
4 m (16 rader)	2748.1	3403.8	34894.4	47653.7	2492.5	3845.5	95038.0	64.21
7 m (11 rader)	2748.1	3622.3	23902.4	32600.6	2655.8	3845.5	69374.8	46.87
9 m (9 rader)	2748.1	3683.2	18889.0	25782.2	2698.4	3845.5	57646.4	38.95
13 m (6 rader)	2748.1	3749.2	10921.5	14996.6	2730.4	3845.5	38991.3	26.35
19 m (4 rader)	2748.1	3794.8	5482.1	7589.6	2741.0	3845.5	26201.2	17.70
28 m (3 rader)	2748.1	3820.1	2744.6	3820.1	2744.6	3845.5	19723.1	13.33
37 m (3 rader)	2748.1	3830.3	2748.1	3830.3	2748.1	3845.5	19750.5	13.34

Tabellen viser de resulterende verdiene for hvert nye anlegg der totalt antall rader er inkludert i parentes i første kolonne, og produksjon per kvadratmeter vises i siste kolonne. Systemenes produksjon har som forventet økt betydelig der det er rom for flere enn de opprinnelige tre radene. Dette fører til den areal-baserte produksjonen er høyest ved lavest radavstand, selv om dette potensielt er konfigurasjonen med lavest innstråling.

Til sammenligning ble det også simulert årlig strømproduksjon for et APV-system med framsiden vendt sørover, og disse resultatene oppgis i tabell 4.5.

Tabell 4.5: Tabell for anlegg med framsiden vendt mot sør.

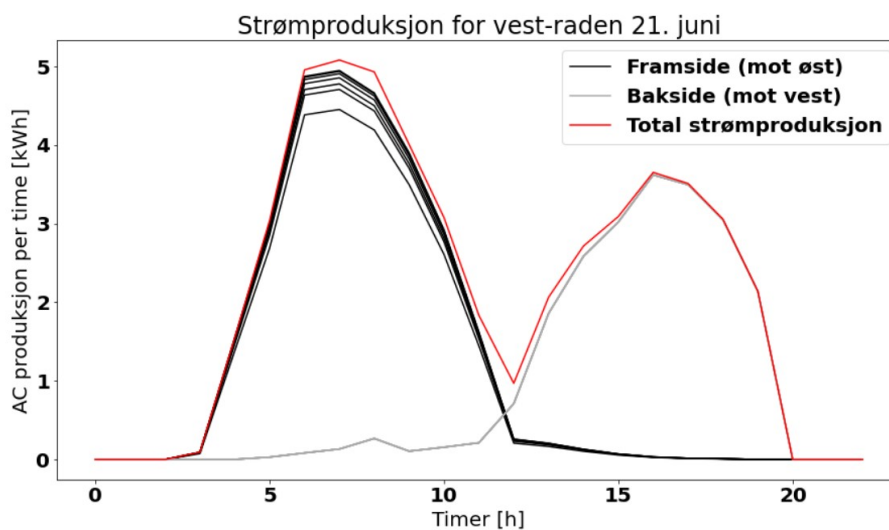
<i>Framsiden vender sørover</i>							
		Nord-rad		Midt-rad		Sør-rad	
Rad-avstand	<i>Nordside</i>	<i>Sørside</i>	<i>Nordside</i>	<i>Sørside</i>	<i>Nordside</i>	<i>Sørside</i>	TOTALT
4 m	696.1	5037.9	665.0	5037.9	665.0	5395.1	17496.9
7 m	696.1	5233.5	680.5	5233.5	680.5	5395.1	17919.3
9 m	696.1	5287.5	686.2	5287.5	686.2	5395.1	18038.5
13 m	696.1	5341.3	690.4	5341.3	690.4	5395.1	18154.7
19 m	696.1	5381.7	694.7	5381.7	694.7	5395.1	18244.0
28 m	696.1	5395.1	696.1	5395.1	696.1	5395.1	18273.7
37 m	696.1	5395.1	696.1	5395.1	696.1	5395.1	18273.7
Differanse	0.0	357.2	31.2	357.2	31.2	0.0	126401.0

Her ser vi at kontrasten er enda høyere mellom framside og bakside, sammenlignet med tabell 4.1. I tillegg er differansen mellom høyeste og laveste verdier i kolonnene lavere. Den totale strømproduksjonen for hvert anlegg med hver sin radavstand er også mindre enn begge variasjonene for sideflater mot øst og vest.

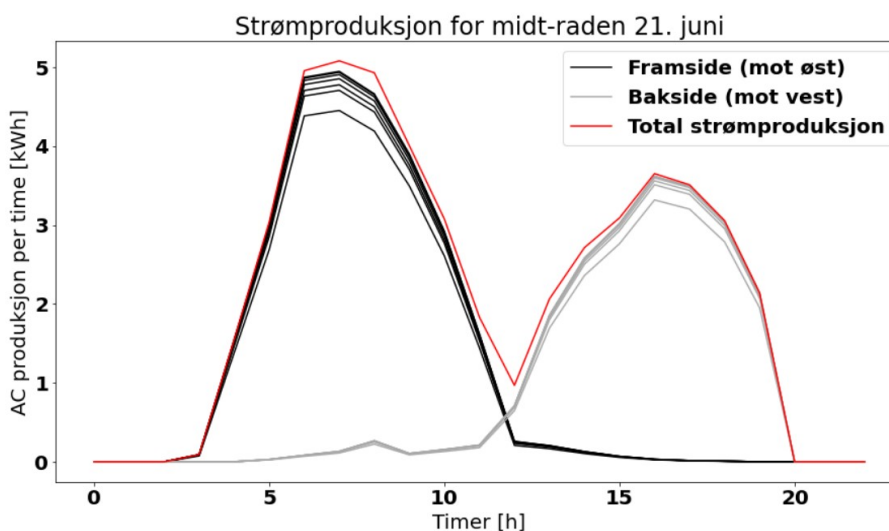
Strømproduksjon - timesverdier

I resultatene for årlig strømproduksjon kom det frem at konfigurasjonen med panele-
lenes framside mot øst ga høyest produksjon for alle radavstander. Derfor vil kun
resultater fra denne konfigurasjonen vises for de akkumulerte timesverdiene.

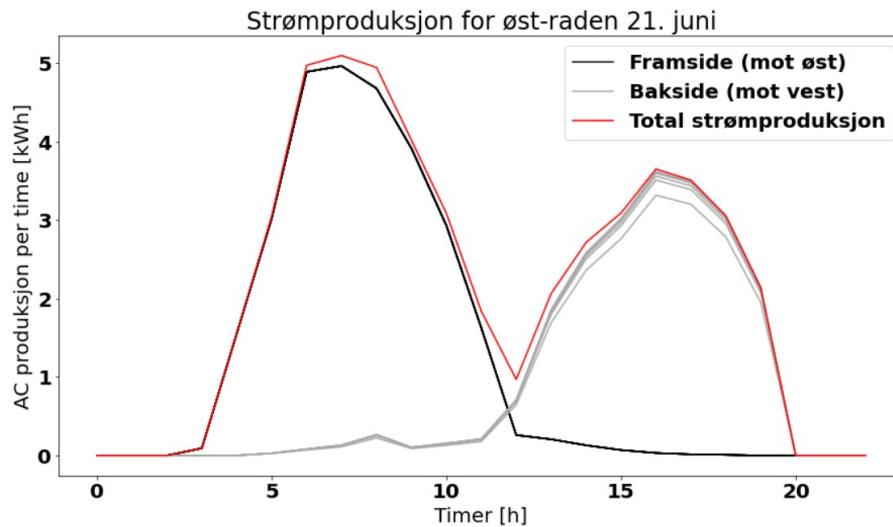
Som nevnt er plottene for hele juni måned oppgitt i tillegg D, så for detaljert analyse
av strømproduksjon, vil altså resultater fra 21.juni vises i figur 4.1, 4.2 og 4.3.



Figur 4.1: Strømproduksjon for raden lengst vest gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer), baksida (grå linjer) og totalt (blå linje) ved forskjellige radavstander.



Figur 4.2: Strømproduksjon for midterste rad gjennom et døgn i juni, for framsida (svarte linjer), baksida (grå linjer) og totalt (blå linje) ved forskjellige radavstander.



Figur 4.3: Strømproduksjon for raden lengst øst gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer), baksida (grå linjer) og totalt (blå linje) ved forskjellige radavstander.

Disse grafene er forenklet ved å farge linjene til framsiden som peker mot øst svarte, og baksiden som peker mot vest grå. De forskjellige linjene i de to kurve-formene i hver figur, representerer resultater for de forskjellige radavstandene. Som i de årlige resultatene er det tydelig at økt radavstand gir økt strømproduksjon, og hoppet er størst mellom lavest avstand og nest lavest. Det virker som at dette kun gjelder for tidspunktene hvor strømproduksjonen allerede er på sitt høyeste (kl.05-10 og kl.14-18), og vi ser ikke like mye forskjell ved stigende/synkende produksjon.

Det er viktig å nevne at den totale strømproduksjonen til en rad for ethvert tidspunkt, består av summen av kurvene når de produserer strøm samtidig. Dette vises med de blåfargede kurvene i hvert av plottene. Her er kun summen av produksjon ved radavstand på 37 m plottet for enkel visualisering i figurene.

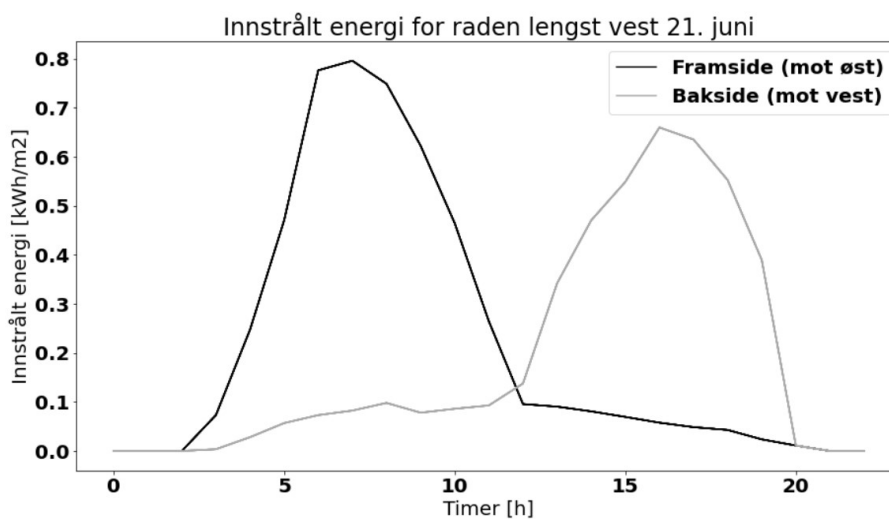
I alle figurene ser vi en liten effekttopp på baksidens (grå) graf rundt kl.8. Baksiden (som vender vestover) har enda ikke begynt å motta direkte sollys her, så dette kan trolig skyldes at refleksjon fra omgivelsene må ha vært spesielt høy rundt dette tidspunktet. For eksempel kan det ha vært en stor sky i vest som har reflektert sollyset inn på baksiden.

I figur 4.1 og 4.3, ser vi at henholdsvis baksida og framsida ikke påvirkes av radavstand, noe som kan forklares med at disse sidene ikke mottar skygge da de er på hver sin ende-rad av anlegget. Den midterste raden, vist i figur 4.2, er en klar forskjell, da både framsida og baksida mottar skygge fra omkringliggende rader.

Forskjellen i timesverdier for strømproduksjon mellom radavstander, vises hovedsakelig i kurvenes toppunkt og ikke når kurven stiger/synker. Altså kun noen få timer om dagen (05-10 og 14-18).

Innstrålt energi - timesverdier

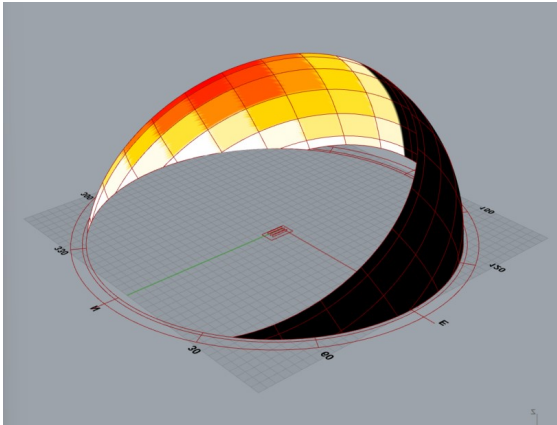
Grafen som viser timesverdier for innstrålt energi per time ved forskjellige radavstander vises i figur 4.4.



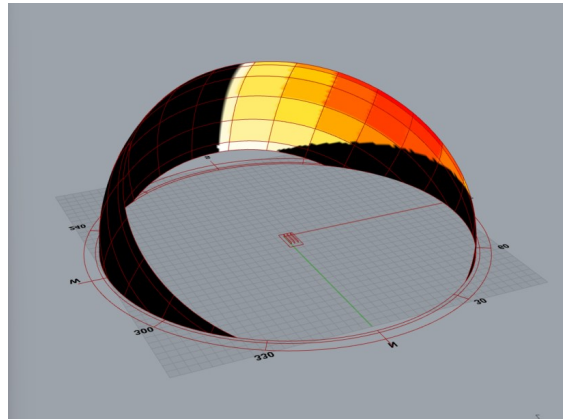
Figur 4.4: Innstrålt energi for raden lengst vest gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer) og baksida (grå linjer) ved forskjellige radavstander.

Grafene for midt- og øst-rad var like som for vest-raden.

Som predikert i underkapittel 4.0.1, mottar riktignok østsiden av panelene mer innstråling enn vestsiden. Kurvene til framsiden som vender øst for både innstråling og strømproduksjon har startet med en bratt og nesten rettlinjert økning. Her kunne man ellers forventet en mer buet økning slik man ser på baksidens kurver. Årsaken til denne bratte kurven, kan være at *Photovoltaic Surface* komponenten inkluderer terrengets horisont når innstrålingsberegninger blir gjennomført. Visualisering av solbanene til østside og vestsida vises i figur 4.5.



(a) Kumulativ innstråling fra vest.



(b) Kumulativ innstråling fra vest.

Figur 4.5: Kumulativ direkte solinnstråling for solcellepanelene med skygge fra horisont i øst og vest.

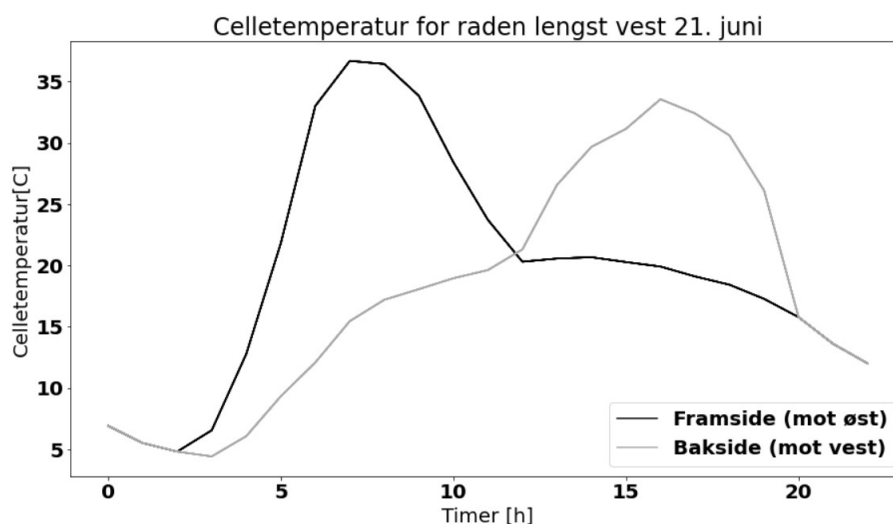
Her ser vi en tydelig skygge i bunnen av sol-banen som panelene “ser” mot øst. Nærmere undersøkelse av høydedata, vist i figur 4.6 viser at denne skyggen passer med hvordan horisonten blokkerer sola med en oppoverbakke øst for APV-anlegget.



Figur 4.6: Høydedata for Kjerringjordet viser at det er forskjell på horisonten i øst og vest. Kilde: Kartverket, <https://hoydedata.no/LaserInnsyn2/>

De grønne pilene viser hvor langt området strekker seg mot øst og vest uten betydelig endring i terrengets høyde. Mot øst er denne pilen betraktelig kortere enn mot vest. Gul og rød pil representerer terreng med høyere elevasjon.

Celletemperaturer - timesverdier



Figur 4.7: Celletemperatur for raden lengst vest gjennom et døgn i juni, for framside (svarte linjer) og baksida (grå linjer) ved forskjellige radavstander.

Grafene for midt- og øst- rad var like som for vest-raden.

Vi starter med å analysere framsidens celletemperaturer (de sorte kurvene). Vi ser som forventet at celletemperaturen er høyere ved slutten av dagen, enn ved starten. Dette var forventet da både paneler og lufta i omgivelsene varmes opp gjennom formiddagen og bruker god tid på å avkjøles gjennom ettermiddagen. Kurven når også en topp rundt kl.07:30 som trolig er da solens innstråling står normalt på panelets østside og produksjonen er høyest.

Ved å gå videre til baksidens celletemperaturer (de grå kurvene) ser vi at toppunktet her er lavere enn det for framsiden. Grunnen til dette kan være at denne siden mottar en innstrålt energi som også er lavere om ettermiddagen enn om formiddagen som vist i grafene fra figur 4.4. Samtidig ser man at celletemperaturen til baksiden allerede øker gradvis fra morgenen slik som for framsiden. Dette skyldes hovedsakelig at lufttemperaturen øker rundt modulene. Til slutt ser det ut til at temperaturen på framside og baksida møtes og synker likt utover kvelden og natten fra kl.20.

For timesverdiene til både innstrålt energi og celletemperatur ser vi at kurvene for de

forskjellige radavstandene ligger oppå hverandre, til forskjell fra kurvene til strømproduksjon i figurene 4.1, 4.2 og 4.3. Grunnen til dette er at verdien til datapunktene for de forskjellige radavstandene er identiske. Et utsnitt av disse verdiene vises i tillegg C. Grunnen til at temperatur og innstrålt energi er lik for alle de forskjellige radavstandene og radene innad i systemet kan være at de lokale forskjellene på selve panelene ikke simuleres detaljert nok til at gjennomsnittsverdiene deres skiller seg fra hverandre. Samtidig er det usikkert hvordan strømproduksjonen ikke påvirkes av dette, da det er tydelig forskjell mellom radavstandene. Det antas at det er andre mekanismer i komponentenes algoritmer som fører til ulik strømproduksjon, men lik innstråling og celledetemperatur. En mulig forklaring kan være at “Annual shading” fra *SunpathShading* komponenten kun plugges inn i *DCtoACderateFactor* for beregning av tap, og ikke inn i selve *Photovoltaic Surface* komponenten der EPW-fila med opprinnelig innstrålt energi og lufttemperatur brukes til beregninger.

Som nevnt tar den termiske modellen forklart i delkapittel 2.5.4 utgangspunkt i et system med en siden av modulen vendt mot himmelen, og en side vendt mot bakken. Det kan diskuteres om dette er overførbart til den vertikale orienteringen som skal brukes i oppgavens simuleringer, men siden $INOCT^2$ er en signifikant faktor i modellen, velges det å fortsette bruken av den. $INOCT$ implementeres i det innebygde scriptet til *Photovoltaic Surface komponenten* gjennom *PVwatts* algoritmen basert på Fuentes termiske modell forklart i 2.5.4. $INOCT$ implementeres gjennom valg av modulkonfigurasjon i *SimplifiedPhotovoltaicsModule* komponenten.

En annen faktor som kan påvirke panelenes temperatur er le fra de omkringliggende panelradene. Dette er ikke utforsket i detalj i denne oppgaven, men diskuteres i kapitlet for videre arbeid 6.2.

² $INOCT$ er “installed nominal cell temperature”, som betyr celledetemperaturen til en installert modul under $NOCT$ forhold (800 W/m^2 , 20 og 1 m/s vindhastighet)

4.0.2 Innstråling

Simulering av innstråling på bakke og panelrader ble som forklart gjennomført med LB-komponenter på sensorer jevnt plassert utover analyseområdene som forklart i delkapittel 3.2.5. Resultatene i denne delen representerer verdier fra 21. juni.

Innstråling på panelradene

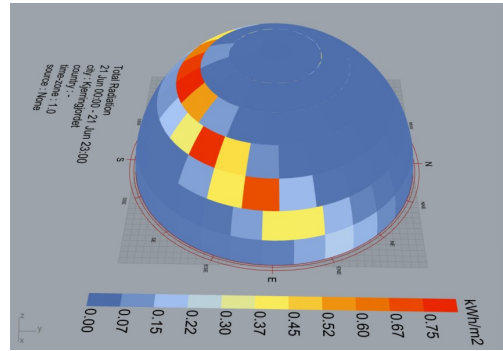
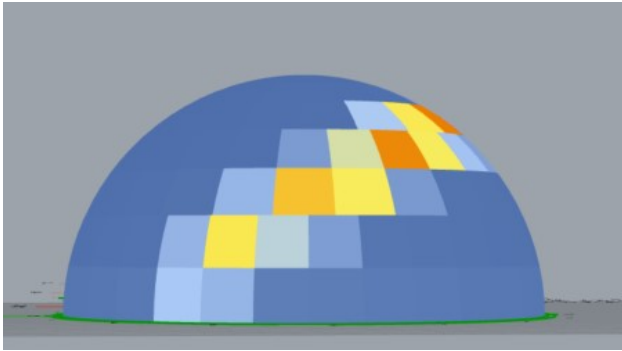
Resultatene fra simulering av innstråling på panelradene vises i tabell 4.6. Det ble forsøkt å gjennomføre samme simulering for antall timer direkte sollys, men LB-komponenten kunne ikke gjennomføre beregningene som ønsket. Dette skyldes trolig at det er flere sett med sensorer som puttes inn i både analyse-geometri og kontekst-geometri (det som skaper skygge for analyse-geometrien) til forskjell fra kun ett sett for bakke-sensorene.

Tabell 4.6: Innstrålt energi på panel-sensorene med varierende radavstand.

Innstrålt energi på panelenes vertikale sensorer for varierende rad-avstand [kWh/m ²]														
4 m	7 m	9 m	13 m	19 m	28 m	37 m		4 m	7 m	9 m	13 m	19 m	28 m	37 m
Vest-rad: vestsida								Vest-rad: østside						
4.11	3.96	3.84	3.84	3.84	3.71	3.71	Topp	4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
4.11	3.96	3.84	3.84	3.84	3.71	3.71		4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
4.08	3.92	3.84	3.84	3.84	3.71	3.71		4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
4.08	3.92	3.84	3.84	3.84	3.71	3.71		4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
4.08	3.88	3.84	3.84	3.84	3.71	3.71		4.05	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
4.02	3.84	3.84	3.84	3.76	3.68	3.68		3.86	4.28	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.99	3.84	3.84	3.84	3.76	3.68	3.68		3.74	4.28	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.99	3.84	3.84	3.84	3.72	3.68	3.68		3.69	4.21	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.99	3.84	3.84	3.84	3.68	3.68	3.68		3.69	3.90	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.99	3.84	3.84	3.81	3.65	3.65	3.65		3.69	3.88	4.21	4.28	4.28	4.28	4.28
3.99	3.84	3.84	3.78	3.65	3.65	3.65		3.69	3.76	4.07	4.28	4.28	4.28	4.28
3.96	3.82	3.82	3.76	3.63	3.63	3.63		3.67	3.74	3.86	4.27	4.27	4.27	4.27
3.95	3.81	3.78	3.71	3.62	3.62	3.62		3.66	3.68	3.85	4.26	4.26	4.26	4.26
3.91	3.81	3.78	3.71	3.62	3.62	3.62		2.89	3.68	3.73	4.26	4.26	4.26	4.26
3.91	3.81	3.78	3.62	3.62	3.62	3.62		2.89	3.68	3.73	4.04	4.26	4.26	4.26
3.83	3.81	3.75	3.62	3.62	3.62	3.62		2.77	3.68	3.73	4.04	4.26	4.26	4.26
3.83	3.78	3.75	3.62	3.62	3.62	3.62		2.77	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26	4.26
3.83	3.78	3.71	3.62	3.62	3.62	3.62		2.72	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26	4.26
3.81	3.75	3.67	3.62	3.62	3.62	3.62		2.72	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26	4.26
3.81	3.75	3.62	3.62	3.62	3.62	3.62		Bunn	2.72	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26
Midt-rad: vestsida								Midt-rad: østside						
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71	Topp	4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.27	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
3.40	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.05	4.28	4.31	4.35	4.35	4.35	4.35
3.23	3.65	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		3.86	4.28	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.18	3.65	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		3.74	4.28	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.15	3.58	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		3.69	4.21	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.15	3.27	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		3.69	3.90	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
3.15	3.25	3.58	3.65	3.65	3.65	3.65		3.69	3.88	4.21	4.28	4.28	4.28	4.28
3.15	3.20	3.42	3.65	3.65	3.65	3.65		3.69	3.76	4.07	4.28	4.28	4.28	4.28
3.13	3.18	3.23	3.63	3.63	3.63	3.63		3.67	3.74	3.86	4.27	4.27	4.27	4.27
3.13	3.19	3.22	3.62	3.62	3.62	3.62		3.66	3.72	3.85	4.26	4.26	4.26	4.26
2.46	3.14	3.17	3.62	3.62	3.62	3.62		2.92	3.68	3.73	4.26	4.26	4.26	4.26
2.47	3.14	3.17	3.39	3.62	3.62	3.62		2.93	3.68	3.73	4.04	4.26	4.26	4.26
2.38	3.14	3.17	3.39	3.62	3.62	3.62		2.84	3.68	3.73	4.04	4.26	4.26	4.26
2.47	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		2.93	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26	4.26
2.41	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		2.85	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26	4.26
2.37	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		2.81	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26	4.26
2.33	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		Bunn	2.76	3.68	3.73	3.85	4.26	4.26
Øst-rad: vestsida								Øst-rad: østside						
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71	Topp	4.75	4.60	4.47	4.47	4.47	4.35	4.35
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.75	4.60	4.47	4.47	4.47	4.35	4.35
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.71	4.56	4.47	4.47	4.47	4.35	4.35
3.63	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.71	4.56	4.47	4.47	4.47	4.35	4.35
3.40	3.65	3.68	3.71	3.71	3.71	3.71		4.67	4.52	4.47	4.47	4.47	4.35	4.35
3.23	3.65	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		4.65	4.47	4.47	4.47	4.40	4.31	4.31
3.18	3.65	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		4.63	4.47	4.47	4.47	4.40	4.31	4.31
3.15	3.58	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		4.63	4.47	4.47	4.47	4.36	4.31	4.31
3.15	3.27	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68		4.63	4.47	4.47	4.47	4.31	4.31	4.31
3.15	3.25	3.58	3.65	3.65	3.65	3.65		4.63	4.47	4.47	4.45	4.28	4.28	4.28
3.15	3.20	3.42	3.65	3.65	3.65	3.65		4.63	4.47	4.47	4.41	4.28	4.28	4.28
3.13	3.18	3.23	3.63	3.63	3.63	3.63		4.60	4.45	4.45	4.39	4.27	4.27	4.27
3.13	3.14	3.22	3.62	3.62	3.62	3.62		4.59	4.45	4.42	4.35	4.26	4.26	4.26
2.44	3.14	3.17	3.62	3.62	3.62	3.62		4.55	4.45	4.42	4.35	4.26	4.26	4.26
2.44	3.14	3.17	3.39	3.62	3.62	3.62		4.51	4.45	4.42	4.26	4.26	4.26	4.26
2.31	3.14	3.17	3.39	3.62	3.62	3.62		4.46	4.45	4.38	4.26	4.26	4.26	4.26
2.31	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		4.46	4.42	4.38	4.26	4.26	4.26	4.26
2.29	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		4.46	4.42	4.35	4.26	4.26	4.26	4.26
2.29	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		4.45	4.38	4.30	4.26	4.26	4.26	4.26
2.29	3.14	3.17	3.22	3.62	3.62	3.62		Bunn	4.45	4.38	4.26	4.26	4.26	4.26

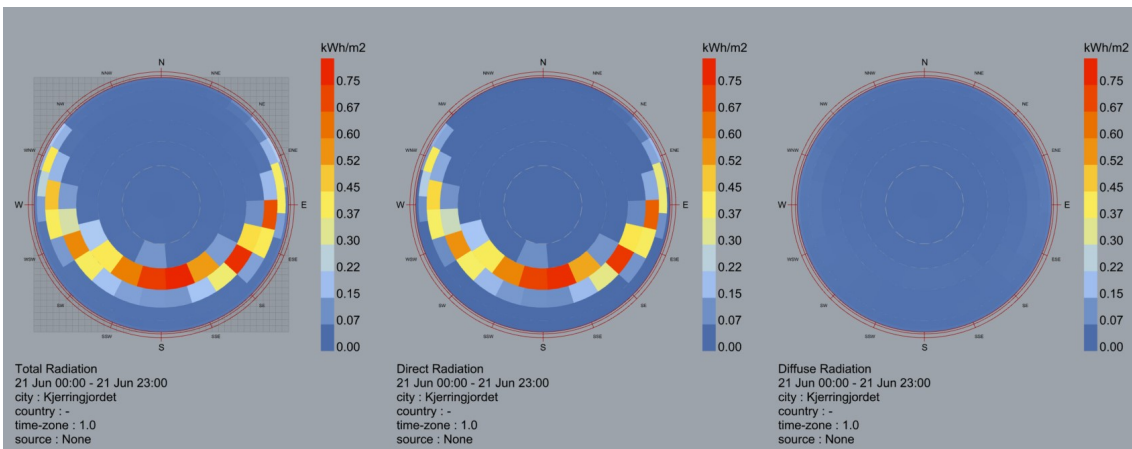
I den sensor-baserte simuleringen til innstrålt energi på panelene kan man også her se at østsiden mottar mer innstråling enn vestsiden av panelradene. De lokale forskjellene er også synlige langs den vertikale aksene. Som nevnt i delkapittel 4.0.1, kan det hende at *Photovoltaic Surface* komponenten fra forrige simulering i kapittel ikke gjennomfører sensor-simuleringer, men heller ser på hele flaten som en helhet og benytter seg av gjennomsnittverdier, og at dette er årsaken til de forskjellige resultat-strukturene.

Ved nærmere undersøkelse av Ladybugs komponenter og resultater kom det frem at de brukte algoritmene tilsynelatende ikke inkluderte verken diffus stråling eller refleksjon ved *ray tracing*, strålesporing. Illustrasjoner av sol-kupplene som dannes av LB sin *SkyDome* komponent som brukes til *Incident Radiation* og *Direct Solar Hours* vises i figur 4.8.



(a) Sol-kuppelens vestside, fra SkyDome komponenten som brukes til simulering av innstråling.

(b) Sol-kuppelens østside, fra SkyDome komponenten som brukes til simulering av innstråling.



(c) De simulerte sol-kuplene viser at det kun er direkte stråling (med skygging fra panel-geometrien) som brukes i Ladybug-komponentenes simulering av innstrålt energi.

Figur 4.8: Sol-kupler fra SkyDome komponenten brukt til å simulere innstråling i kapittel 3.2.5.

I figurene ser vi at det ikke er tilsvarende skygge mot øst skapt av horisonten slik som i figur 4.5. Dette ble avdekket på et tidspunkt som ikke tillot å begynne på nye geometrier eller komponenter som krevde ny opplæring i bruk.

Innstråling på bakken

Innstrålt energi og antall timer direkte sollys for sensorene på bakke-geometrien vises hhv. i tabell 4.9a og 4.9b. Her er sensorene fra vest til øst fremvist fra venstre til høyre i tabellene. Som nevnt i metode-kapittelet er det 41 sensorer mellom rad vest og rad øst, med en sensor rett under midterste rad. På hver av tabellene er det også beregnet differanse mellom høyeste og laveste verdi for hver kolonne for å undersøke forskjeller mellom radavstander. Fargeskalaene for innstråling og differanse-verdier varierer fra lys til mørk basert på verdimensjonenes individuelle høyeste og laveste verdi. Nederste rad i tabellene forteller hvilke(n) radavstand(er) som ga høyest verdi i hver kolonne. Fargeskalaen til denne raden har kun illustrative hensikter.

Som nederste rad av tabellene forteller oss, er det en radavstand på 37 m som oftest gir de høyeste verdiene for innstrålt energi og soltimer. Samtidig ser vi også her at østsiden av systemet mottar noe mer innstråling enn vestsiden som foreslått i delkapittel 4.0.1. Interessant nok er det også flere steder man ser at opptil fire forskjellige radavstander gir samme maksverdi. Et gjennomgående mønster er økt skygge nær panelradene, og høy innstråling direkte under. Den økte innstrålingen direkte under panelene kan forklares med at det er svært kort tid i løpet av dagen hvor solen står direkte ovenfor panelradene, og at simuleringsprogrammet har brukt kun overflate-geometrien til panelene ved konstruering av skyggene, og dermed er ikke tykkelse på selve raden inkludert. Bærekonstruksjonens rammer og bein er heller ikke modellert for enkelhetens skyld.

En oppsiktsvekkende observasjon er verdien for midterste sensor for 28 m radavstand. Verdien til midterste sensor ser ut til å øke jevnt med avstanden, men på 28 m faller verdien betydelig. Dette gjelder ikke for antall timer direkte sollys og årsaken til dette er usikker, men det kan ikke utelukkes at feil kan ha skjedd under simuleringen av akkurat denne radavstanden.

4.0.3 Plantemodell

Resultater for gress-produksjon ved varierende radavstander oppgis i tabell 4.7. Tabellen viser mengde avling som vil forekomme for gitt belysning 21. juni der de samme sensorene som ble brukt i innstrålings-analysen er plassert. Avlingen er angitt som prosent-verdi av hva som ville grodd uten skygge fra panelene.

I tabellen inkluderes også gjennomsnitt og økning for hver radavstand. Tabellens farge-gradient og verdier tyder på at avlingen reduseres mer ved lavere radavstander, noe som er i tråd med at sensorene mottar mindre innstråling under disse forholdene som vist i tabell 4.9a. En interessant forskjell mellom tabell 4.9a og tabell 4.7 er mønsteret for hvor det er skygge og hvor avlingen økes og reduseres. Gjennomsnittsverdien for planteveksten er høyest for radavstand på 9 m og 13 m, selv om innstrålingen fortsatt øker med økende radavstand. Årsaken til denne observasjonen kan ligge hos vekstkalkulatorens algoritmer, for hvor godt timotei-gress kan benytte den innkommende strålingen som forklart med PAR, LSP, RUE og plantestress i kapittel 2.2.2.

Basert på gjennomsnittsverdiene i siste kolonne av tabell 4.7, kan det se ut som at radavstand på 9 m og 13 m gir tilfredsstillende plantevekst.

4.0.4 Omgivelsestemperatur i mikroklimaet

I dette underkapittelet vil mikroklimatiske forhold relatert til temperatur presenteres.

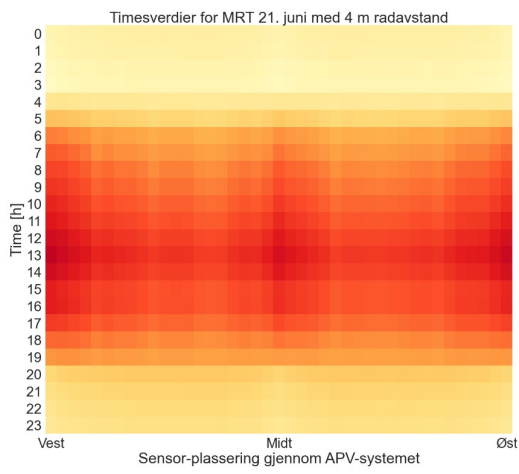
MRT - Mean Radiant Temperature

Resultatene fra simulering av MRT med forskjellige radavstander vises i figur 4.10.

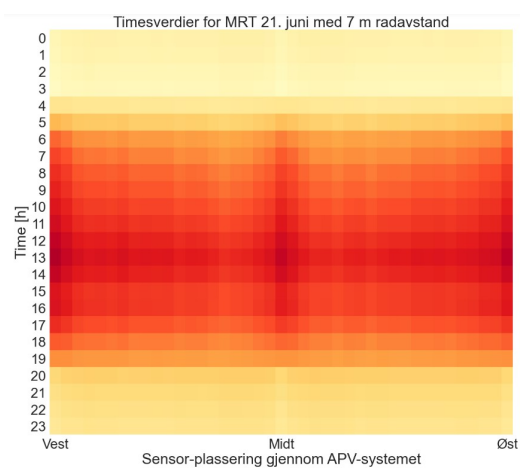
Skala for temperaturverdiene i celsius går mellom -2 og +46 grader, der lys gulfarge dedikeres til lave verdier, og mørk rødfarge representerer høye verdier (relativt innad i verdimengden) som vist i figur 4.10i.

Figurene viser at lengre radavstand gir høyere verdier for MRT, men det er tilsynelatende ikke like stor endring mellom 19m, 28m og 37m, som mellom 4m og 13m. Siste figur 4.10h er en representasjon av forholdene uten panelrader tilstede. Dette gir et godt sammenligningsgrunnlag for å se hvor mye skyggen og radavstanden har for det temperatur-baserte mikroklimaet.

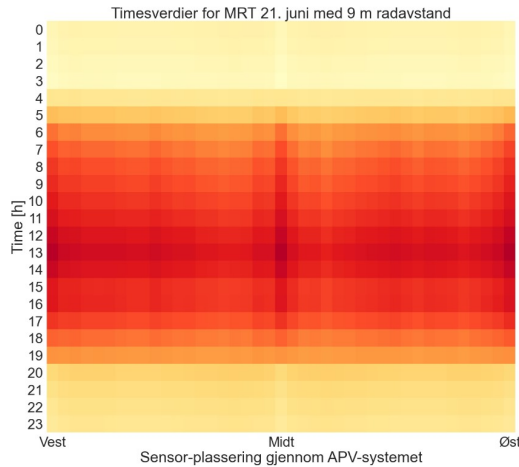
Mellom radene ser vi at temperaturen tilsynelatende er lavest rundt den midterste raden, for så å øke igjen like under. Den lave temperaturen rundt midterste rad kan skyldes samme forklaring som for innstrålt energi, med lite skygge fra panelene her i tråd med antall timer direkte sol vist i tabell 4.9b. Lavere radavstand ser også ut til å ha mer uniform temperatur gjennom systemet og døgnet, til forskjell fra større radavstander med relativt stor variasjon for visse punkter gjennom dønets timer.



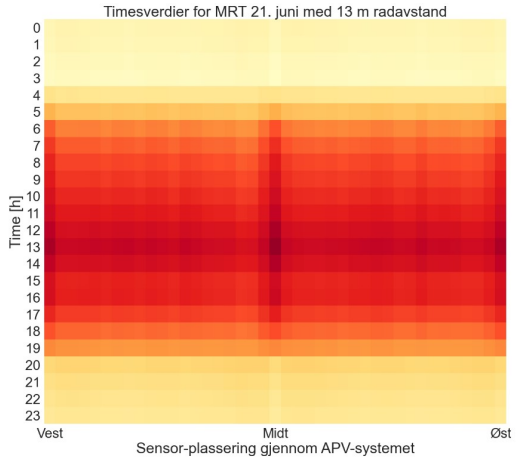
(a) MRT per time for 4m.



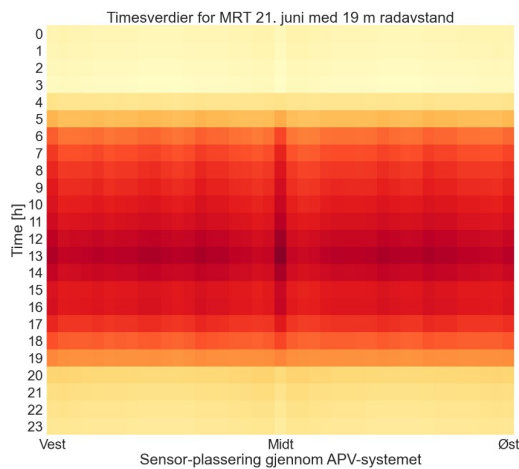
(e) MRT per time for 7m.



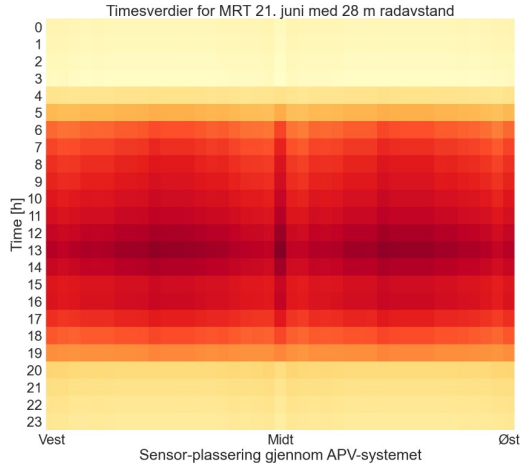
(b) MRT per time for 9m.



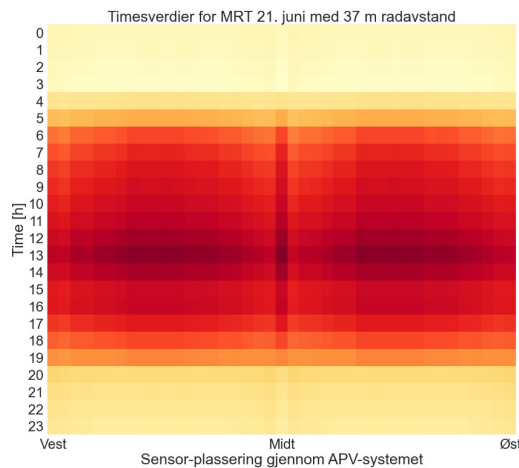
(f) MRT per time for 13m.



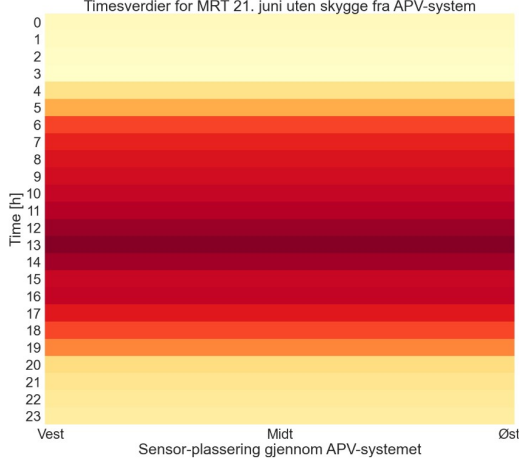
(c) MRT per time for 19m.



(g) MRT per time for 28m.



(d) MRT per time for 37m.



(h) MRT per time uten skygge.

(i) Farge-skala for MRT-verdier.

Figur 4.10: MRT-verdier per time 21.juni for angitte radavstander.

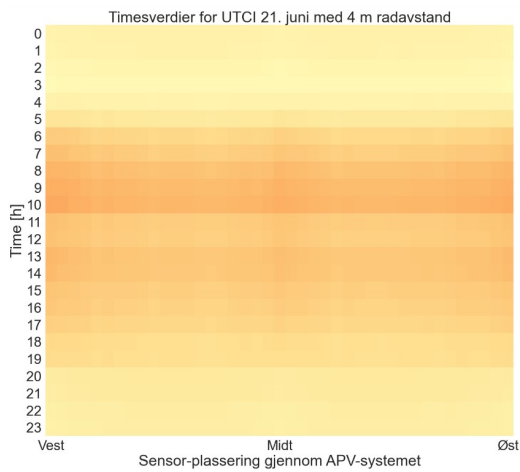
Universal Thermal Climate Index - UTCI

Resultatene fra simulering av UTCI med forskjellige radavstander vises i figur 4.11. Skala for UTCI-verdiene, vist i figur 4.11i, løper mellom -40 og +46, der blå farge representerer verdier for kuldestress, oransje representerer området for ingen termisk påkjenning, og rødt tilegnes verdier for varmestress. Se også tabell 2.2 i kapittel 2.2.3 for nærmere forklaring av UTCI-nivåene.

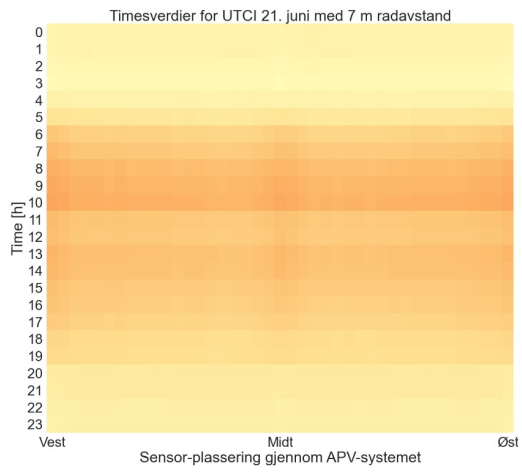
Til forskjell fra MRT, kan det her virke som verdiene ikke gjennomgår de største endringene ved variering av radavstand. Det er fortsatt en observerbar forskjell mellom plottet for 4 m radavstand og uten panelrader. Mindre variasjon her enn for MRT kan skyldes at vind, relativ luftfuktighet og bakkens termiske utstråling bidrar til stabilisering av temperaturen gjennom døgnet timer. Ingen av verdiene i noen av plottene overstiger 26, som tilsvarer nedre grense for moderat varmestress. I timene mellom kl.22 og kl.6 ser det ut til at UTCI-verdiene til de fleste sensorer ved samtlige radavstander senkes til under 9, og tiltrer området for “noe kuldestress”. Da dette også skjer for simuleringen uten APV-anlegget tilstede kan det antas at dette er noe norske planter har tilpasset sin levedyktighet til.

Som forklart i kapittel 2.2.3 er UTCI en biologisk verdi for hvordan menneskekroppen opplever de atmosfæriske forholdene. Det kan derfor ikke konkluderes med at planter har samme trivsel ved disse forholdene. UTCI brukes dog som en indikasjon på planters trivsel i dette arbeidet, og av resultatenes mangel på drastisk variasjon tyder det på at radavstand ikke har like stor påvirkning her som for innstråling og strømproduksjon.

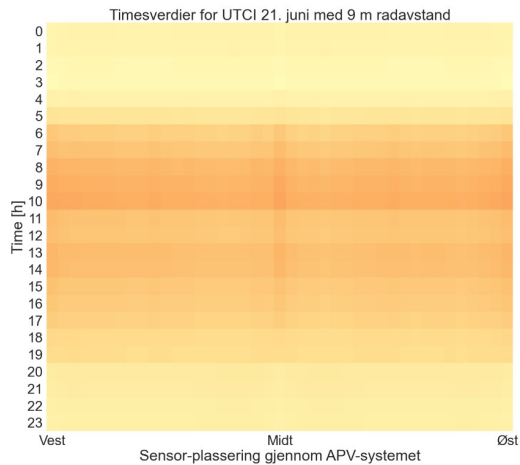
Selv om vindhastighet inkluderes i beregningen, er ikke dette nødvendigvis et nøyaktig estimat av reelle forhold. Vindhastigheten hentes direkte fra TMY-data i EPW-fila og gjennomgår dermed ingen CFD-simulering før den anvendes på punktene i analysefeltet på bakken. Vindhastigheten er altså lik for alle punkter, noe som ikke gjenspeiler realiteten med turbulens-effekter og lignende.



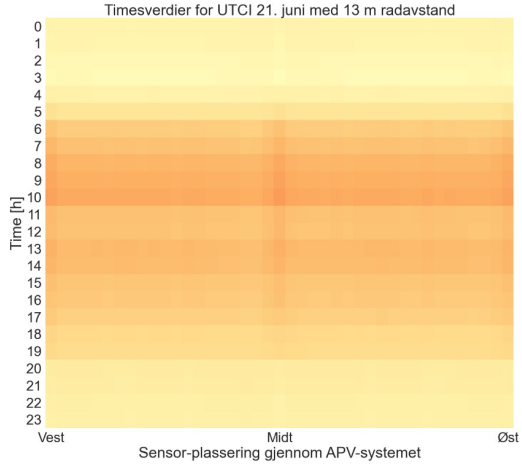
(a) UTCI per time for 4m.



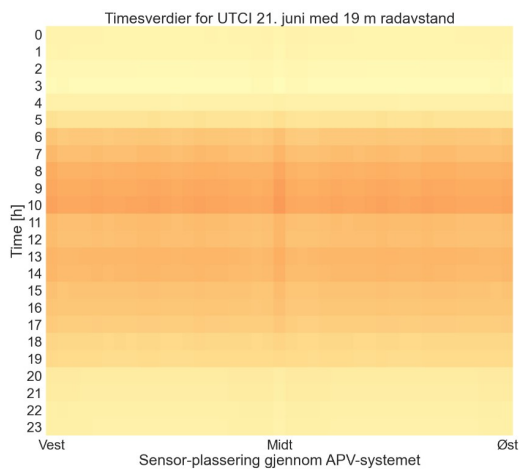
(e) UTCI per time for 7m.



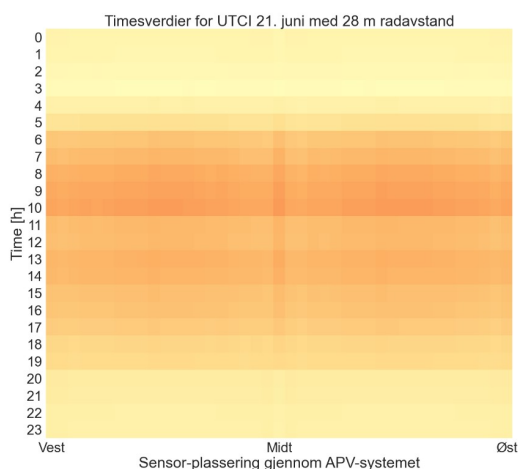
(b) UTCI per time for 9m.



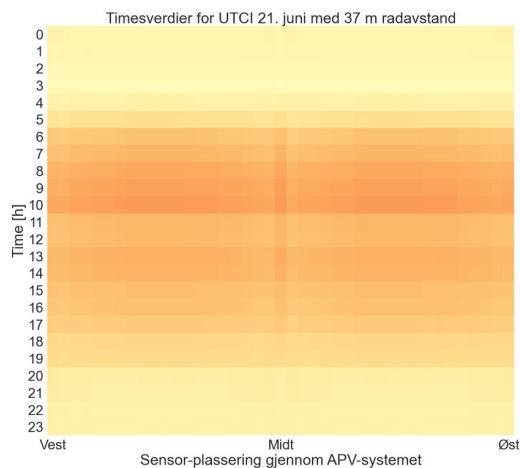
(f) UTCI per time for 13m.



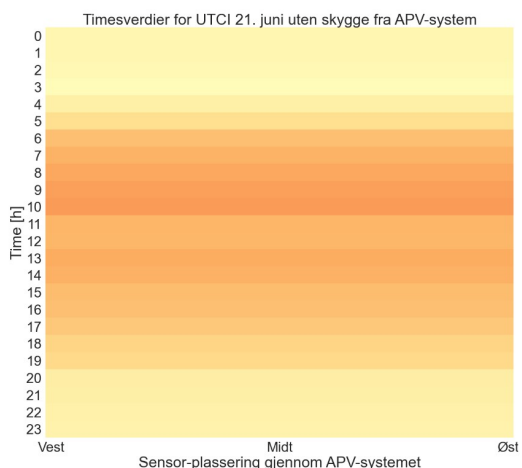
(c) UTCI per time for 19m.



(g) UTCI per time for 28m.



(d) UTCI per time for 37m.



(h) UTCI per time uten skygge.

(i) Farge-skala for UTCI-verdier.

4.0.5 Optimalisering

Optimaliseringsalgoritmen resulterte i følgende radavstandene for optimaliseringer:

Tabell 4.8: Resultater for Wallacei-optimaliserte radavstander ved maksimering av elementene enkeltvis.

Element	radavstand [m]
Årlig energiproduksjon	29
Plantevekst	36
Innstrålt energi på bakken	35
Innstrålt energi på panelene	36

Ved optimalisering av alle elementene samtidig ble radavstander for de forskjellige elementene beregnet som vist i tabell 4.9.

Figurene i tabell 4.9 viser diamant-diagram for “Fitness Value” til elementene ved valgt løsning (radavstand). Her er målet at denne verdien er så lav som mulig, og vises nært sentrum av diamanten for alle elementene (“Fitness Objectives, FO”). FO1, FO2, FO3 og FO4 står for hhv. årlig energiproduksjon, plantevekst, innstråling på bakken og innstråling på panelene. Løsningen med lavest “Fitness Value” for flest elementer ser ut til å være 19 m ved optimalisering av innstrålt energi på panelene. Her er det kun FO2 - plantevekst denne radavstanden ikke passer like godt med, noe som er i tråd med diamant-diagrammet for plantevekst med 35 m som optimal radavstand.

Tabell 4.9: Optimal radavstand og diamant-diagram for de forskjellige elementene ved Wallacei-optimalisering på alle samtidig. Her er FO1, FO2, FO3 og FO4 hhv. årlig energi-produksjon, plantevekst, innstråling på bakken og innstråling på panelene.

Element	radavstand [m]	Diamant-diagram
Årlig energiproduksjon	36	
Plantevekst	35	
Innstrålt energi på bakken	18	
Innstrålt energi på panelene	19	

I Wallaceis' Selectionvindu ble løsningen med gjennomsnittlig best "rank" for elementene, altså løsningen med gjennomsnittlig lavest "fitness"-verdi for alle elementene, eksportert. Dette resulterte i en radavstand på **20 m**. Årsaken til at denne verdien ikke var lik noen av de i tabell 4.9, kan være den høye "fitness"-verdien for plantevekst i diamant-diagrammene til innstrålt energi på bakken og panelene. Plantevekst ønsker 35 m radavstand og øker derfor den felles optimale avstanden til 20 m.

En feilkilde for wallacei-optimaliseringen er at glideparameteren for radavstand ble satt til å variere mellom kun hele tall. Dette gjelder også for flere andre variabler, for reduksjon av prosessor-kapasitet.

Med en radavstand på 20 m ble det simulert nye resultater for alle øvrige elementer for APV-systemet på Kjerringjordet. Dette under forhold som tilsvarer en typisk dag i juni.

Strømproduksjon:

Fra *Photovoltaic Surface* komponenten til Ladybug ble følgende resultater beregnet for årlig strømproduksjon med radavstand på 20 m.

Tabell 4.10: Den årlige energiproduksjon for framside og bakside av elle radene ved 20 m radavstand.

Årlig strømproduksjon for 20m med framsiden vendt mot øst [kWh]						
Vest-rad		Midt-rad		Øst-rad		TOTALT
Vestside	Østside	Vestside	Østside	Vestside	Østside	
2748.1	3794.8	2741.0	3794.8	2741.0	3845.5	19665.3

Verdiene her er like som for 19 m i tabell 4.1, noe som trolig skyldes at forskjellene i innstrålt energi er for små til å lage store nok tap som kan ha innvirkning på årlig produksjon. Ved plotting av timesverdier, kunne man heller ikke se at kurven for 20 m skilte seg merkbart ut fra den for 19 m.

Innstrålt energi og celledetemperatur - timesverdier:

I plottene for innstrålt energi og celledetemperatur (se kap. 4.0.1 og 4.0.1) var kurvene for de forskjellige radavstandene like. Resultatet med 20 m radavstand ble dermed også likt.

Plantevekst og innstrålt energi:

Resultater for innstrålt energi og plantevekst vises i tabell 4.11.

Tabell 4.11: Verdier for plantevekst og innstrålt energi på bakkemonterte sensorer, ved 20 m radavstand.

		Avling, innstrålt energi og timer med direkte sollys per sensor med 20 m radavstand																												Gj.snitt	
		Vest							Midd							Øst															
Avling [%]	94	97	102	102	101	101	100	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	92	99.4		
Innstrålt energi på bakke [kWh/m ²]	5	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	5	6.5	
Timer direkte sollys [h]	14	12	13	13	14	15	15	15	14	15	15	15	15	15	14	14	14	14	12	13	18	13	13	13	14	14	14	14	14	13	14.3

Innstrålt energi på paneler:

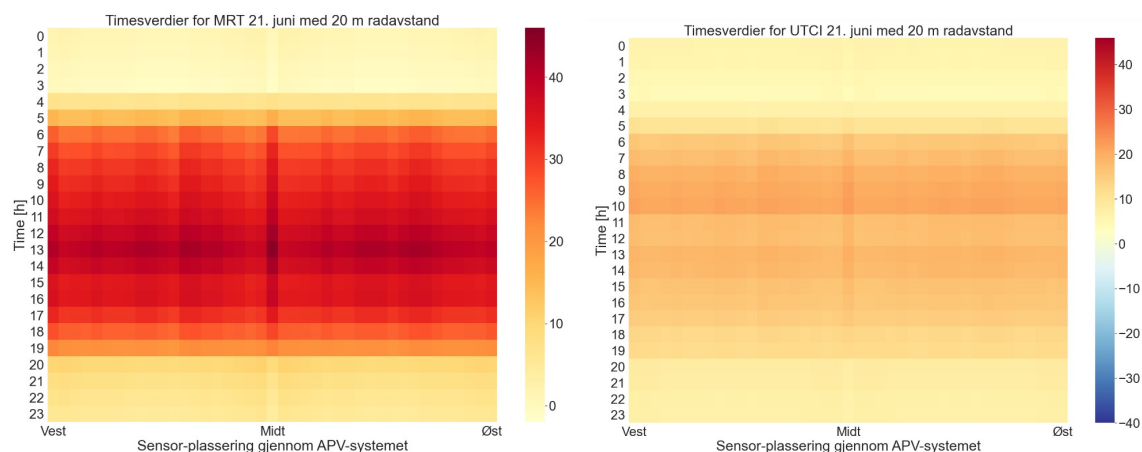
Resultater for innstrålt energi på paneler vises i tabell 4.12.

Tabell 4.12: Simulert innstrålt energi for solcellepanelenes vertikalt plasserte sensorer, med 20 m radavstand.

Innstrålt energi på panel-sensorer for 20 m radavstand [kWh/m ²]							
Vest-rad			Midt-rad			Øst-rad	
Vestside	Østside		Vestside	Østside		Vestside	Østside
3.84	4.35	Topp	3.71	4.35	Topp	3.71	4.47
3.84	4.35		3.71	4.35		3.71	4.47
3.84	4.35		3.71	4.35		3.71	4.47
3.84	4.35		3.71	4.35		3.71	4.47
3.80	4.35		3.71	4.35		3.71	4.43
3.76	4.31		3.68	4.31		3.68	4.40
3.72	4.31		3.68	4.31		3.68	4.36
3.68	4.31		3.68	4.31		3.68	4.31
3.68	4.31		3.68	4.31		3.68	4.31
3.65	4.28		3.65	4.28		3.65	4.28
3.65	4.28		3.65	4.28		3.65	4.28
3.63	4.27		3.63	4.27		3.63	4.27
3.62	4.26		3.62	4.26		3.62	4.26
3.62	4.26		3.62	4.26		3.62	4.26
3.62	4.26		3.62	4.26		3.62	4.26
3.62	4.26	3.62	4.26	3.62	4.26		
3.62	4.26	3.62	4.26	3.62	4.26		
3.62	4.26	3.62	4.26	3.62	4.26		
3.62	4.26	Bunn	3.62	4.26	Bunn	3.62	4.26

MRT og UTCI:

Resultater for MRT og UTCI med 20 m radavstand vises i figur 4.12.



(a) Timesverdier for MRT ved 20 m.

(b) Timesverdier for UTCI ved 20 m.

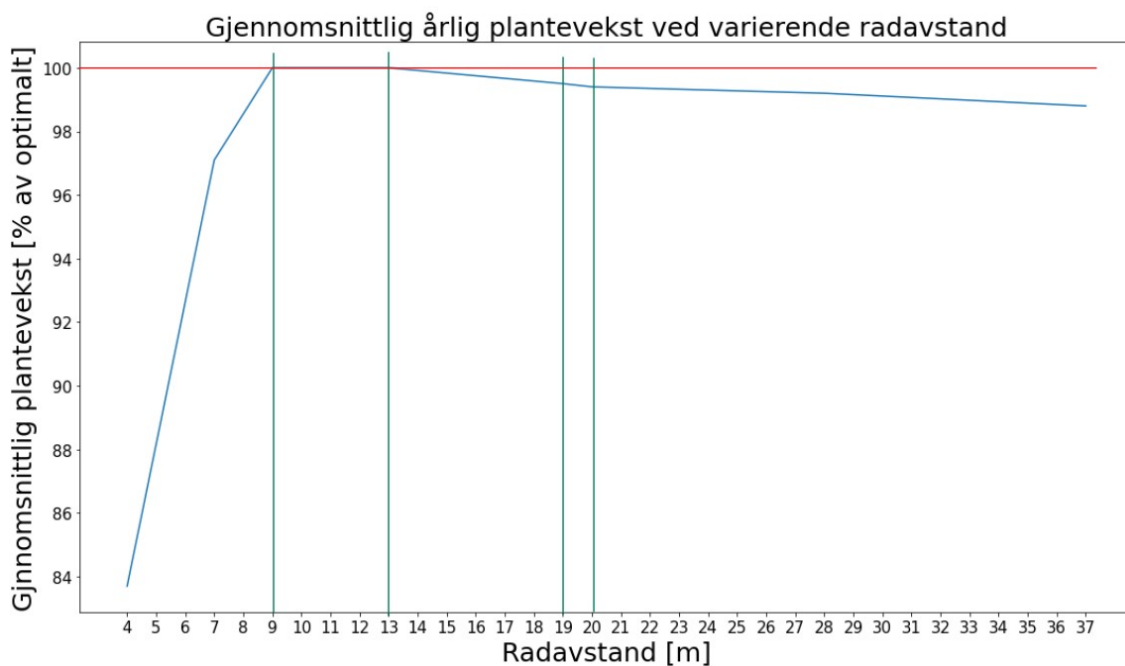
Figur 4.12: MRT og UTCI for APV-systemet med 20 m radavstand.

4.0.6 Helhetlig vurdering

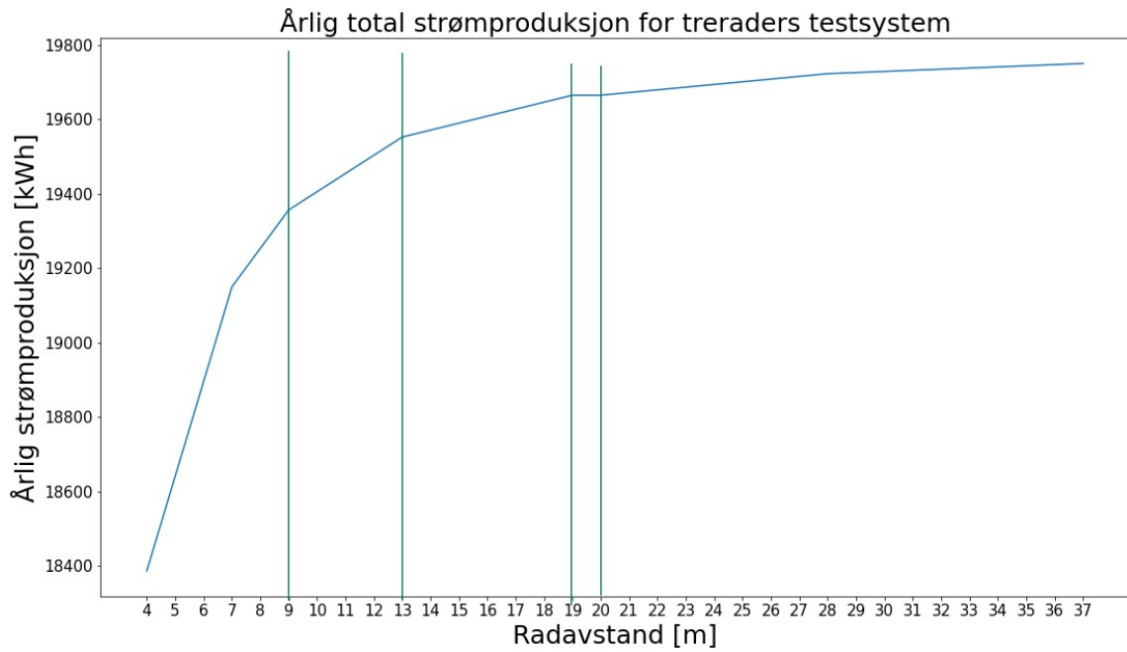
For å lettere kunne ta en helhetlig avgjørelse på hvilken radavstand som passer best for testanlegget i Ås, velges det å legge vekt på minimal reduksjon av plantevekst, total årlig produksjon og potensialet til oppskalering, i prioritert rekkefølge. Dette gjøres på grunnlag av de nåværende restriksjonene for å redusere produksjonspotensialet til norsk jordbruk.

I figur 4.13, 4.14 og 4.15 belyses derfor de nevnte elementene som grafer, med verdiene fra 20 m radavstand inkludert. Grafene er en visuell representasjon av gjennomsnittlig plantevekst, årlig total strømproduksjon for treraders systemet og årlig total strømproduksjon for oppskalerte systemer fra hhv. tabell 4.7, 4.1 og 4.4.

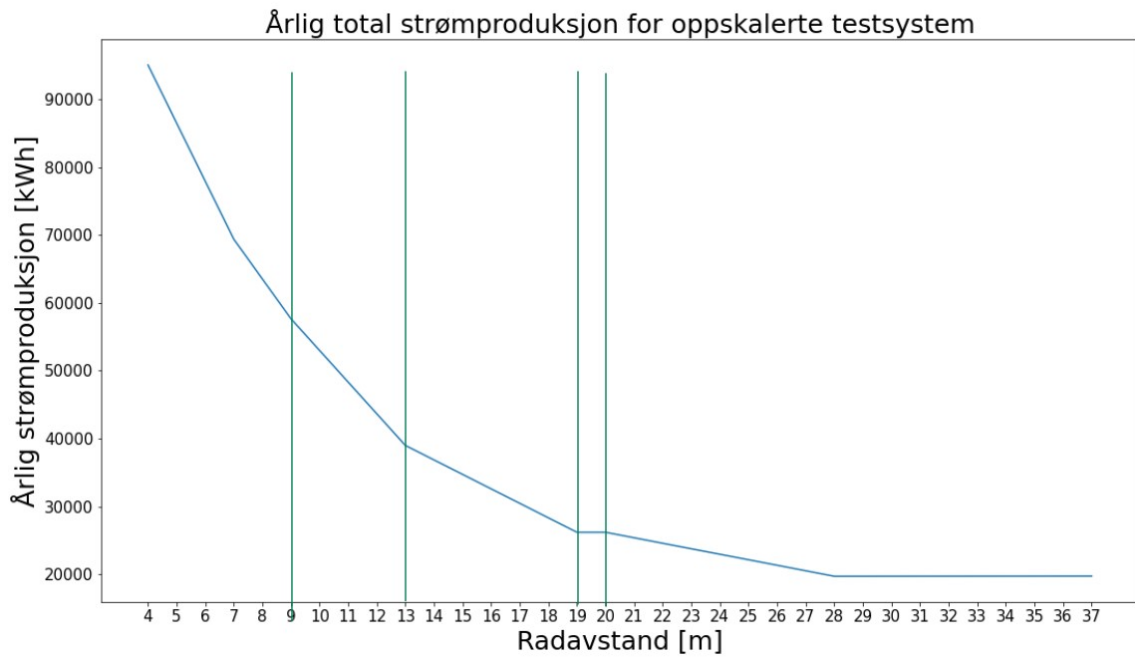
Det er foreløpig 9 m, 13 m, 19 m, og 20 m som er blitt diskutert som potensielt gode alternativer for radavstand. Figurene inneholder derfor rettlinjede streker som markerer hvordan grafene oppfører seg ved disse avstandene.



Figur 4.13: gjennomsnittlig årlig plantevekst for systemet er 100% mellom 9 m og 13 m. Her er 100% markert med en rød linje.



Figur 4.14: Årlig strømproduksjon for treraders systemet øker ved økende radavstand og flater ut fra 13 m.



Figur 4.15: Den årlige strømproduksjonen for de oppskalerte systemene synker på grunn av at antallet rader synker, selv om produksjonen per rad øker.

4.0.7 Gjensidige interaksjoner mellom jordbruk og APV

I delkapittel 3.2.1 neglisjeres ansamling av støv og partikler (soiling) på panelene i solcellemodellen. Dette er en antakelse som kun baseres på at panelene monteres vertikalt. Med tanke på at det er kraftige landbruksmaskiner som skal drifte jordbruket, er det mer realistisk å anta at støv og partikler vil virvles opp og feste seg på panelenes sideflater. Bruk av sprøytemidler og gjødsling kan også føre til soiling i systemet. Et forslag til løsning, kan være at bærestrukturane til APV-systemet kombineres med vanningsanlegg som både renser paneler og vannet jorda samtidig. Ytterligere automatiseringselementer som fuktsensorer i jorda, kan bidra til spesialtilpassede systemer som kun bruker vannressurser der det trengs og når det trengs i den dyrkede marken.

En annen faktor som potensielt kan føre til redusert avling grunnet APV, er avstanden som landbruksmaskinene i feltet må ha mellom seg og panelene. I valget av faste radavstander for simulering ble det tatt hensyn til en 0.5 m sikkerhetsmargin. Hvis landbruksmaskiner ikke dyrker eller høster fra dette arealet vil man potensielt se en reduksjon i avling som følge av APV-systemets tilstedeværelse. Det kan samtidig tenkes at forbedrede vekstvilkår med moderat skygge og økt fuktighet i luft og jord, kan virke som en motvekt, men dette er ikke simulert i dette arbeidet. I tillegg kan det tenkes at andelen upløyd mark under panelene kan bidra som grobunn for blomstereng-planter. Økt biologisk mangfoldet i åkeren, kan både bidra til stabile økosystemer som sikrer gode levevilkår for bl.a. bier og andre viktige organismer.

Kapittel 5

Konklusjon

5.0.1 Radavstand og orientering

Det mest sentrale målet for oppgaven har vært å finne en optimal radavstand og orienteringen til panelenes framside og bakside, for APV-anlegget som skal bygges på Kjerringjordet i Ås. Her har simuleringer av innstråling og omgivelsestemperatur gitt prediksjoner på hvor god energiproduksjon og plantevekst systemet vil ha for forskjellige radavstander.

Fysiske forhold gitt av størrelser på landbruksmaskiner har også satt rammer, som forklart i delkapittel 3.2.8, for hvordan synergier i produktivitet kan optimaliseres. Her er det lagt vekt på redusert risiko for fysisk skade på solcellepanelene, og minimalt overlapp dersom bredden tillater at landbruksmaskinen passerer gjennom feltet to eller flere ganger.

En oppsummering av de mest aktuelle resultatene vil fremlegges før endelig konklusjon besluttes. For å lettere kunne ta en helhetlig avgjørelse på hvilken radavstand som passer best for testanlegget i Ås, er det som nevnt valgt å legge vekt på minimal reduksjon av plantevekst, total årlig produksjon og potensialet til oppskalering.

Som vist i figur 4.13 flater grafen ut på 100% mellom 9 m og 13 m radavstand før den synker litt igjen med økende radavstander. Her er den 100%, som er det vi ønsker da det i dag ikke er tillatt å bygge installasjoner som kan redusere matproduksjon i eksisterende jorder. Derfor står valget foreløpig mellom disse radavstandene.

I forhold til total årlig energiproduksjon, beregnet med Ladybug Tools, ser vi av tabell 4.2 og figur 4.14 at økningen i energiproduksjon, svekkes mellom 9m og 13m før den flater ut. I tillegg var det framside mot øst som ga høyest årlig strømproduksjon for alle radavstander, og det konkluderes derfor at dette vil være mest optimal orientering. I tillegg ser vi i tabell 4.5 at sidene mot øst og vest, gir høyere årlig strømproduksjon enn med framsiden mot sør. Et system på tre rader med 13 m radavstand vil ha høyere årlig energiproduksjon enn det med 9 m, og kan derfor være det beste alternativet dersom oppskalering ikke er en del av fremtidsplanene for anlegget.

For en optimal løsning kombinert av alle elementene ble det gjennomført automatisk optimalisering med *WallaceiX* komponenten. Denne beregnet at en radavstand på 20 m ville være optimalt for høy innstrålt energi, plantevekst og energiproduksjon samtidig. Da denne radavstanden gir like verdier for årlig strømproduksjon som ved 19 m, samt reduserer planteveksten under 100% og ikke har klar synergi med landbruksmaskiner ble denne radavstanden å forkastet. Ved 19 m er planteveksten også lavere enn 100%, som gjør at denne også ekskluderes fra utvalget.

Ved oppskalering av anlegget til flere rader, viser tabell 4.4 at de korteste radavstandene har størst potensiale for årlig strømproduksjon, da det blir plass til flere rader på samme areal selv om de enkeltvis får noe mindre lys og produksjon. Sett i sammenheng med ønsket om å bevare optimal plantevekst kan det derfor være hensiktsmessig å velge 9 m radavstand for maksimal total strømproduksjon.

På grunnlag av disse perspektivene, konkluderes det med at for testanlegget med tre rader vil radavstand på 13 m gi høyest årlig strømproduksjon uten reduksjon av plantevekst. Det må derfor evalueres videre om dette er optimalt for landbruksmaskinene som skal brukes, og om fremtidige utsikter for oppskalering er tilstede.

5.0.2 Modelleringsverktøy

Dette arbeidet har tatt i bruk modelleringsverktøy som er relativt nye og lite brukt i PV-modellering for norske forhold. *Rhino* er et program oftest brukes av arkitekter og produkt-designere, men med software som Ladybug Tools er det et voksende behov for utprøving og sammenligning med annen eksisterende software som *Climate Studio*, *Radiance*, *Bifacial radiance*, *PVwatts* og *PVSyst*. Resultatene fra denne oppgaven er derfor en viktig del av sammenligningsgrunnlaget for hvilke måledata som vil akkumuleres ved testing av det fysiske systemet når det ferdigstilles på Kjer-ringjordet. Det viste seg at *Incident Radiation* komponenten til Ladybug, brukt til

paneler- og bakkesensorer, ikke inkluderte skygge fra horisont eller strålesporing, som forventet. Imidlertid blir skyggen fra de andre panelradene tatt høyde for i beregninger. Selv om *Photovoltaic Surface* komponenten inkluderer skygge fra horisont, ser det ut til at denne ikke inkluderer skygge fra de andre panelradene ved beregning av innstråling og temperatur på de enkelte radene. Derfor kan det konkluderes med at disse to komponentene ikke representerer realiteten like nøyaktig som forventet.

I all hovedsak kan man likevel si at APV-modellen fungerer som tiltenkt. Målet for arbeidet var å simulere innstråling, energiproduksjon og plantevekst, noe modellen gjør i de enkelte delene. Modellen har også potensiale for utvidelser til flere bruksområder og spesifikasjoner. For eksempel er geometrien justerbar med de oppgitte parametrene, og alle Ladybugs komponenter har åpen kildekode med mulighet til redigering og tilpasning til ønsket formål. Ingen av komponentenes script har dog blitt endret i dette arbeidet. I tillegg har *Grasshopper* en egen *Python* komponent for implementering av eget original-script for ønsket input og output¹.

Plantemodellen brukt i oppsettet er også justerbar og utskiftbar, slik at man kan implementere andre arter der det finnes tilstrekkelig litteratur for å lage en tilsvarende vekst-kalkulator. Analysen av omgivelsestemperatur i systemets mikroklima ble gjennomført ved bruk av UTCI, som gir indikasjoner på hvordan mennesker reagerer på de atmosfæriske omgivelsene. Ved bruk av flere eksisterende studier på hvordan temperatur og solinnstråling påvirker forskjellige plantearter kan også plantemodellen utvikles til å passe for et større spekter av planter.

Optimalisering med Wallacei ble gjort på enklest mulig måte, da prosessorkraft og tid til innlæring av funksjoner var noe begrenset. Dette verktøyet er godt utviklet og brukervennlig, med mange muligheter for simulering og analyse. Man kan for eksempel også lage optimaliseringer som minimerer eller maksimerer varians, standardavvik eller andre statistiske variabler for elementene.

APV er et tverrfaglig forskningsfelt. Materialteknologi, strålingsfysikk, termodynamikk, fluidmekanikk, samt biologi og agrikultur er sentrale fagfelt som må kombineres for å skape et komplett verktøy til modellering og predikering av APV-systemer. Denne oppgaven kan bidra som en byggestein i kartlegging av hvordan de anvendte metodene fungerer til APV-modellering.

¹Bruk av *Grasshoppers Python* komponent er måten CATIMO-modellen er implementert [23].

Kapittel 6

Videre arbeid

6.1 Forbedring og utvidelse av modell

Digitale verktøy og videre testing

Videre arbeid som bygger på oppgavens mål om å modellere en APV-modell for simulering av strømproduksjon og plantevekst, bør baseres på forbedring av allerede sammensatt modell og utprøving av flere relaterte verktøy. Det er for eksempel variasjon innad i software-pakkenes komponenter, spesielt i *Ladybug Tools*. Da det ble avdekket i kapittel 4.0.2 at Ladybug-komponentene som simulerte innstråling og skygge på bakke og paneler ikke benyttet seg av horisontens skygge eller strålesporing, kan det være interessant å simulere innstråling på andre måter for sammenligning. *Honeybee* ser ut til å ha en komponent kalt *Cumulative Radiation*, som bruker *Radiancance* sine strålesporings-algoritmer for mer nøyaktige innstrålingsanalyser. Bruk av denne komponenten krever konstruksjon av en “*Honeybee*-modell”, basert på rom i bygninger med vinduer, vegger og dører. Tiden ble en begrensning for implementering av denne komponenten, så det anbefales å undersøke videre.

For plantevekst-simuleringer kan det også være interessant å implementere andre vekstmodeller for forskjellige arter, samt benytte seg av andre verktøy. For eksempel kan modellering av proteinrike planter (kjøtt-erstatning) eller planter med høy CO_2 -fangst være viktig for helhetlige livssyklusberegninger til APV-systemers rolle i reduksjon av klimagassutslipp. Et interessant verktøy som ikke er testet i dette arbeidet, er *APSIM*¹, som beskrives som et av verdens ledende software for modellering og simulering av agrikulturelle systemer.

¹APSIM: <https://www.apsim.info/apsim-model/>

Testing av modellen ved flere tider på året enn juni vil også være hensiktsmessig for det helhetlige bildet av systemets ytelse, da albedoen vil gjennomgå markante variasjoner gjennom årstidene. Her kan det være interessant å undersøke synergier for hvor store andeler av året de forskjellige overflatene (bart, plantevekst og snø-dekke) dominerer for økt effektgevinst. I tillegg er det mulig å implementere andre lokasjoner i modellen, noe som anbefales for å kartlegge APV-potensialet i Norge og Norden.

Utvidelser - økonomi, kraftnett, høydedata, vind og fuktighet

Av utvidelser anbefales det å inkludere bl.a. økonomi og integrering i kraftnettet som elementer. Prediksjon av lønnsomheten til APV kan spille en stor rolle for teknologiens utvikling og aksept i landbruket. Å simulere APV-systemer integrert i kraftnettet vil trolig være viktig for å undersøke hvorvidt det er behov for lokale batterier til lagring av produsert strøm, eller om det eksterne kraftnettet har kapasitet til å motta strømmen direkte. Undersøkelse av synergier for strømproduksjon og strømbehov til forskjellige gårdsbruk er også av interesse for bønders egne fordeler ved installering av systemet. Et eksempel er å ta utgangspunkt i lastanalyser som den gjennomført i tidligere NMBU-student Svein Gjerdåkers masteroppgave fra 2020 [27]. I tillegg utvikles det stadig ny landbruksteknologi for automatisert innhøsting og avlingskontroll, som vil trenge elektrisitet. Et eksempel er den elektriske landbruksroboten Thorvald, som utvikles her på NMBU², hvor lading av robotens batterier kan gjøres med solenergi fra APV-systemets integrerte batteri.

Et annet eksempel på utvidelse av modellen kan være å implementere høydedata for lokasjonen, som kan gi ytterligere detaljer i modellen³. I tillegg er modellering av vind og luftfuktighet faktorer som kan bidra til ytterligere forbedring av det helhetlige anlegget. *Butterfly* og *Eddy3D* er eksempler på verktøy som kan brukes til *Computational Flyid Dynamics* (CFD). Disse ble testet under arbeidet, men viste seg å være for komplekse og kapasitetskrevende å gå videre med uten tilstrekkelig bakgrunnskunnskap.

²Thorvald: <https://www.nmbu.no/fakultet/realtek/forskning/forskergrupper/robotikk/prosjekter/thorvald>

³Høydedata, Kartverket: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn2/>

6.2 Validering av modell og fysiske målinger

Simulerte parametre

I modellen er det simulert innstråling, omgivelsestemperatur, strømproduksjon og celledetemperatur. Alle disse parametrene anbefales å gjøre fysiske målinger av, for å validere hvor kvalitative resultatene fra simuleringene har vært. For eksempel kunne det vært interessant å måle celledetemperatur og strømproduksjon til anlegget når det er snødekke, bar bakke og plantevekst. Eventuelt kunne et forsøk med plantedekke i en del av systemet, samtidig med bar bakke i en annen del av systemet gi interessante resultater for hvordan planters tilstedeværelse påvirker celledetemperatur og strømproduksjon, ved ellers like atmosfæriske forhold. Det kan også være interessant å måle omgivelsestemperatur i APV-anlegget med planter, et referanseområde med planter uten panelrader, og i et referanseområde uten tilstedeværelse av verken planter eller panelrader. Selv om forfatter ikke har faglig bakgrunn i plantevitenskap, kan det tenkes at disse målingene vil gi nyttig indikasjon på hvor mye planter og panelrader påvirker hverandre. Slik kan man også undersøke om temperaturen får endringer i maksimums- og minimumsverdier, samt den generelle variasjonen gjennom døgn og årstider.

Vind og fuktighet

Ved implementering av vind og fuktighet i fremtidige modeller, vil måling også bli elementært for validering. Måling i et APV-anlegg og referanseområde, med sammenligning av prediksjoner fra relevant litteratur kan gi grunnlag for videre forskning og optimalisering. Værdata om fordampning og vind finnes i BIOKLIM-datasettet til Søråsfeltet, så dette kan eventuelt brukes som referanseområde for sammenligning. Lange rader av vertikale paneler vil utvilsomt redusere vinden i retninger som treffer flatene av panelene normalt på, samt skape turbulenseffekter og forstyrrelser. Redusert vind kan gi mer stabile vekstforhold for planter, med redusert fysisk påkjenning og økt temperatur⁴. Mangel på vind kan samtidig være en potensiell negativ faktor for strømproduksjon i solcellepaneler, da overoppheting kan føre til redusert effekt og risiko for skade på selve cellene. Derfor er det interesse for å finne en konfigurasjon som gir god balanse mellom nok vind til nedkjøling av paneler, og lite nok vind for gode vekstvilkår.

Det er også forsket på luftstrømning under paneler, og i en nylig simuleringsstudie

⁴Kilde: Norsk Landbruksrådgivning, <https://viken.nlr.no/fagartikler/frukt-og-baer/paere/viken/vindvern-kan-gi-avlingsauke-i-frukt-og-baer>

ble det avdekket at gitte høyder på solcellepaneler kunne gi akselerasjon av vinden akkurat der den passerte under [28]⁵. Her var akselerasjonen viktig for å unngå ansamling av snø rundt konstruksjonene. I et APV perspektiv er det interessant å undersøke hva akselerert vindhastighet under panelene kan ha av konsekvenser for plantevekst eller andre forhold. Et mulig utfall kan være at akselerasjonen ikke oppstår med tanke på planters høyde og blokkering av mellomrommet mellom bakke og panel. Da det legger seg snø om vinteren kan det være gunstig å unngå ansamling. Spesielt når daglengdene er korte, og det er ønskelig at panelene produserer det de har mulighet til. Det er også kjent at turbulent vind ofte har bedre nedkjølingseffekt, så dette kan anbefales å forske videre på i etterfølgende prosjekter.

Videre kunnskap om skyggers påvirkning på luftfuktighet kan gi grunnlag for optimalisering av vanningsystemer for landbruket og dermed effektivisere ressursbruk. Fordamping påvirkes av innstråling, temperatur og vind. I NIBIO-rapporten om vanning fra 2020 [2] kom det også frem at ved de testede forholdene var det energitilførsel ved kortbølget innstråling som sto for mer av fordampingen enn adveksjon. Dette betyr at vind har mindre påvirkningskraft for fordamping, da adveksjon defineres i rapporten som vindhastighet [m/s] \times damptrykkdefisitt [$mbar$], og representerer bortførsel av damp \times vannlagring i luft. Da sopp og bakterier ofte etablerer seg i klimaer med høy fuktighet, kan det være nyttig å implementere forskning på om skygging fra APV-systemer kan føre til økt ressursbruk av sprøytemidler o.l. for å unngå plantesykdommer, råte, og lignende.

Tele

I Norske forhold er tele i bakken et viktig værphenomen å ta høyde for ved fundamentering i landbruket. Landbruksjord kan være bearbeidet og påvirket av mange faktorer, der fuktighet og temperatur er noen av de mest avgjørende for jordas porøsitet. Ved tørre vintre vil bakken fryse dypere enn mildere og fuktigere vintre. Simulering eller analyse av dette inngår ikke i oppgavens omfang, men anbefales å undersøke nærmere da det for eksempel er uvisst om skygging fra solcellepaneler kan forlenge frostperioden og utsette vekstsesongen, eller om telen vil ha fysiske påvirkninger på robustheten til bærekonstruksjonen.

⁵Denne akselerasjonen på grunn av innsnevring kalles venturi effekt.

Referanser

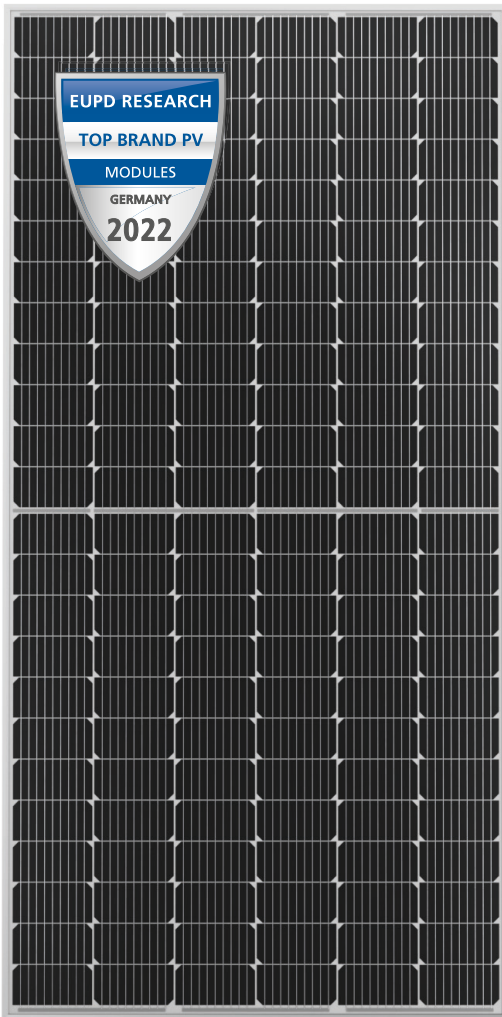
- [1] A. Goetzberger og A. Zastrow. “On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation”. I: *International Journal of Solar Energy* 1 (1982), s. 55–69. DOI: <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>.
- [2] H. Riley. *Vanning til jord- og hagebruksvekster: En litteraturstudie av norske undersøkelser siden 1960*. Tekn. rapp. NIBIO - Norsk Institutt for Bioøkonomi, 2021.
- [3] M. Berger mfl. *Utsyn over norsk landbruk. Tilstand og utviklingstrekk 2021*. Tekn. rapp. NIBIO - Norsk Institutt for Bioøkonomi.
- [4] O. Rognstad, A. I. Løvberget og T. A. Steinset. *Landbruket i Norge 2015*. Tekn. rapp. Statistisk sentralbyrå, 2016.
- [5] M. Trommsdorff mfl. “Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany”. I: (2020).
- [6] AgriAnalyse. *Landbruksbarometeret 2021*. Tekn. rapp. AgriAnalyse, 2021.
- [7] R. Kopecek og J. Libal. “Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges”. I: *Energies* 14 (2021). ISSN: 1996-1073. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082076>.
- [8] A. H.M. Smets mfl. *Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. UIT Cambridge Ltd, 2016.
- [9] R. W. F. Cameron, J. E. Taylor og M. R. Emmett. “What’s ‘cool’ in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls”. I: *Building and Environment* 73 (2014), s. 198–207. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>.
- [10] J. W. Chiang Teng mfl. “Effects of Agrivoltaic Systems on the Surrounding Rooftop Microclimate”. I: *Sustainability* 14 (2022). ISSN: 2071-1050. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127089>.

- [11] A. Weselek mfl. “Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review”. I: *Agronomy for Sustainable Development* 39 (2019). ISSN: 1773-0155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.
- [12] C. R. Brodersen mfl. “A new paradigm in leaf-level photosynthesis: direct and diffuse lights are not equal”. I: *Plant Cell Environ* (2008). ISSN: 159-64. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01751.x>.
- [13] T. Laue. “Using ray tracing to model agri-PV greenhouse energy production and PAR levels”. Masteroppg. Norway: Universitetet i Oslo - UiO, 2022.
- [14] T. J. B. Carruthers mfl. *Global Seagrass Research Methods - Chapter 19 - Measurement of light penetration in relation to seagrass*. Elsevier Science, 2001, s. 369–392. ISBN: 978-0-444-50891-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-044450891-1/50020-7>.
- [15] M. Trommsdorff mfl. *Agrivoltaics: Opportunities for agriculture and the energy transition. A guideline for Germany*. Tekn. rapp. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2020.
- [16] T.J. Arkebauer mfl. “In defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah et al. (1992)”. I: *Agricultural and Forest Meteorology* 68 (1994). ISSN: 0168-1923. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90038-8).
- [17] I. Vatndal. *Seval Skog Solkraftverk og Innmarksbeite*. Tekn. rapp. Energeia AS, 2021.
- [18] T. Reher1c mfl. *Pear Harvest in an Agrivoltaic Cropping System: Results from 2021 and Future Perspectives*. Tekn. rapp. University of Leuven, 2022.
- [19] J. Bisquert. *Solar Energy - The Physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. UIT Cambridge Ltd, 2016.
- [20] M. E. Ø. Holter. “Tosidige solcellemoduler - påvirkningen albedo har på to-sidig effektgevinst”. Masteroppg. Norway: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet - NMBU, 2021.
- [21] A. Müller mfl. “A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory”. I: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230 (2021), s. 111–277. ISSN: 0927-0248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>.
- [22] A.D. Jones og C.P. Underwood. “A thermal model for photovoltaic systems”. I: *Solar Energy* 70.4 (2001), s. 349–359. ISSN: 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00149-3).

- [23] E. H. Honningdalsnes. “Autonomous Optimization of Agrivoltaic Systems in Norway”. Unpublished thesis. Masteroppg. Norway: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU, 2021.
- [24] M. K. Fuentes. *A Simplified Thermal Model for Flat-Plate PPhotovoltaic Arrays*. Tekn. rapp. Sandia National Laboratories, 1987.
- [25] H. Bonesmo mfl. “Adapting the CATIMO grass model to meadow bromegrass grown in western Canada”. I: *Canadian Journal of Plant Science* 94 (2014), s. 61–71. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps2013-183>.
- [26] T. Persson mfl. “Simulation of timothy nutritive value: A comparison of three process-based models”. I: *Field Crops Research* 231 (2019), s. 81–92. ISSN: 0378-4290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.008>.
- [27] S. Gjerdåker. *Endra nettleigestructur som insentiv for sluttbrukar til å jamne ut straumforbruk med batteri*. Elizabeth Stephansens vei 15, 1430 Ås, Norway, 2020.
- [28] I. Frimannslund mfl. “Impact of solar power plant design parameters on snow-drift accumulation and energy yield”. I: *Cold Regions Science and Technology* 201 (2022). ISSN: 0165-232X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103613>.

Tillegg A

Datablad til kapittel 3



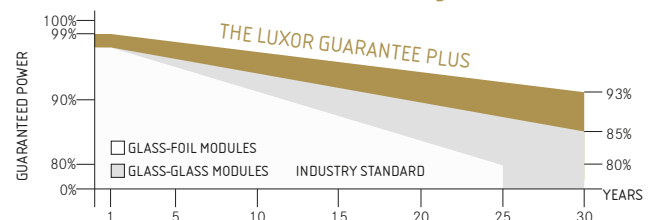
- + POWERFUL HETEROJUNCTION CELLS
- + DOUBLE GLASS: HIGHER MECHANICAL STABILITY AND FIRE SAFETY
- + BIFACIAL: DOUBLE-SIDED POWER GENERATION FOR MORE YIELD
- + REDUCTION OF BALANCE-OF-SYSTEM-COSTS THROUGH HIGHER PERFORMANCE PER MODULE
- + ESPECIALLY ECONOMIC FOR COMMERCIAL SYSTEMS



product guarantee¹



linear performance guarantee¹



ECO LINE HJT GLASS-GLASS HC BIFACIAL

M144 / 460-480 W

MONOCRYSTALLINE HJT MODULE FAMILY. WHITE MESH



Longlife tested



Power proofed



Safety provided



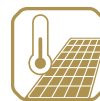
Selection of components



Back glass



Performance surplus of 0 Wp to 6.49 Wp



Higher heat dispensing



PID free
LID free



German warrantor

ECO LINE HJT GLASS-GLASS HC BIFACIAL

M144 / 460-480 W, WHITE MESH

Module type LX - XXXM/166-144+ GG BiF | XXX = Rated power Pmpp

Electrical data at STC

Rated power Pmpp [Wp]	460.00	465.00	470.00	475.00	480.00
Pmpp range to	466.49	471.49	476.49	481.49	486.49
Rated current Impp [A]	10.14	10.21	10.28	10.35	10.42
Rated voltage Vmpp [V]	45.37	45.55	45.73	45.92	46.10
Short-circuit current Isc [A]	10.79	10.86	10.94	11.01	11.09
Open-circuit voltage Uoc [V]	53.38	53.59	53.81	54.02	54.24
Efficiency at STC up to	21.46%	21.69%	21.92%	22.15%	22.38%
Efficiency at 200 W/m ²	20.95%	21.18%	21.41%	21.65%	21.88%

Electrical data at NOCT

Power at Pmpp [Wp]	349.01	352.80	356.60	360.39	364.19
Rated current Impp [A]	8.14	8.20	8.25	8.31	8.36
Rated voltage Vmpp [V]	42.88	43.05	43.21	43.38	43.54
Short-circuit current Isc [A]	8.66	8.72	8.78	8.84	8.90
Open-circuit voltage Uoc [V]	49.27	49.48	49.69	49.91	50.13

Specification as per STC (Standard test conditions): irradiance 1000 W/m² | module temperature 25°C | Air Mass = 1.5
 NOCT (nominal operating cell temperature): irradiance 800 W/m² | wind speed 1 m/sec | ambient temperature 20°C | cell operating temperature 45 +/- 2°C | Air Mass = 1.5

Bifacial Gain* (e.g. 460Wp)

Backside power gain [Wp]	5%	10%	15%	20%	25%
Rated power Pmpp [Wp]	483.00	506.00	529.00	552.00	575.00
Rated current Impp [A]	10.65	11.16	11.67	12.17	12.68
Rated voltage Vmpp [V]	45.37	45.37	45.37	45.37	45.37
Short-circuit current Isc [A]	11.33	11.87	12.41	12.95	13.49
Open-circuit voltage Uoc [V]	53.38	53.38	53.38	53.39	53.39

*depending on the reflection of the underlying surface

Limiting values

Max. system voltage max. return current	1500 V 25 A
Safety class Fire safety class	II A (according to IEC 61730)
Operating Temperature	-40 bis 85°C
Max. tested pressure load-/tensile ²	5400 Pa / 2400 Pa

Temperature coefficient

Temperature coefficient [U] [I] [P]	-0.26% /°C 0.04% /°C -0.24% /°C
---	-------------------------------------

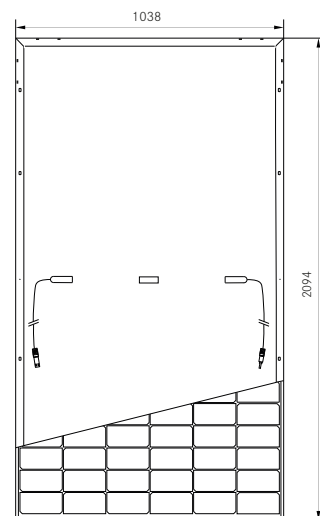
Specifications

Number of cells (matrix)	144 (6 x 24) 166 mm x 83 mm
Module dimensions (L x W x H) ³ Weight	2094 mm x 1038 mm x 30 mm 29 kg
Bifaciality factory ³	Up to 83%
Front-side	2 mm tempered, highly transparent, anti-reflection solar glass
Back-side	2 mm tempered, highly transparent, white mesh print
Frame	stable, anodised aluminium frame
Embedding material	EVA/POE
Junction Box	At least IP67
Cable	Symmetrical cable lengths > 1.3 m and 1.3 m. 4 mm ² solar cable
Connectors Diodes	MC4 or equivalent with IP67 3 Schottky Diodes
Hail test (max. hailstorm)	Ø 45 mm impact velocity 23 m/s ± 83 km/h

The specifications and average values can vary slightly. Relevant is the corresponding data of the individual measurement. Specifications are subject to change without notice. Measurement tolerance depending on equipment: rated power +/- 3%, other values +/- 10%. All information given in this data sheet corresponds to DIN EN 50380. A potential light-induced degradation of the power after commissioning is not considered here. Further information in the installation manuals.

- The specific warranty conditions are given under www.luxor.solar/downloads.html
- Horizontal mounted, for details please check mounting instruction
- Tolerance L/W = +/- 3 mm. H +/- 2mm. the dimensions given in the order confirmation will be decisive
- Location and dimensios of holes on request
- Bifaciality degree: 80% +/- 3%

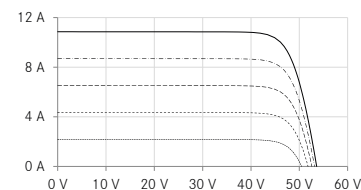
Back - / Frontview³



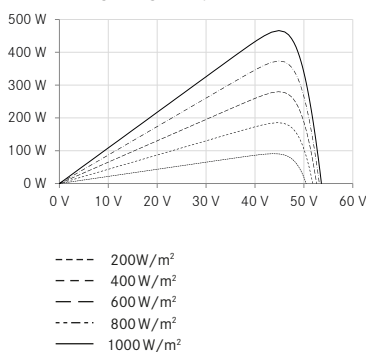
Drilled holes⁴ A: 4 x drainage
 B: 8 x ventilation
 C: 2 x earthing

Electrical characteristics

UI-diagram e.g. 460Wp



UP-diagram e.g. 460Wp



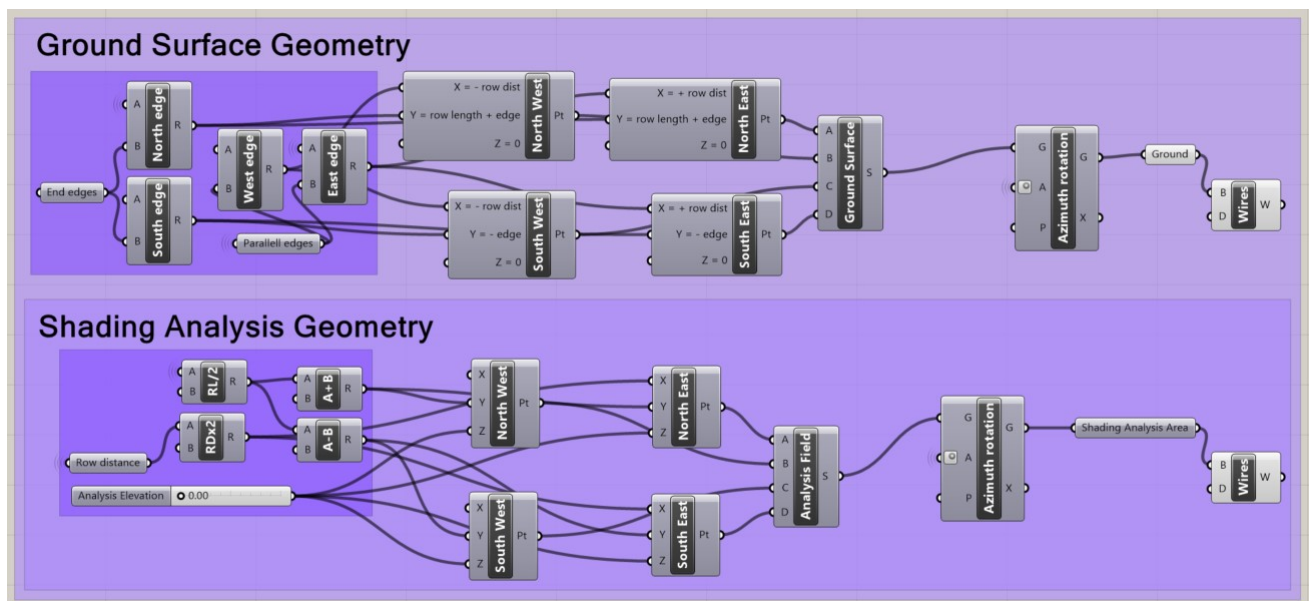
Guidelines:
 93/68/EEC
 2014/35/EU. (LVD)
 2014/30/EU. (EMC)

The validity of the certificates/listings for a specific country has to be examined under:
www.luxor.solar/downloads.html

Luxor. your specialised company

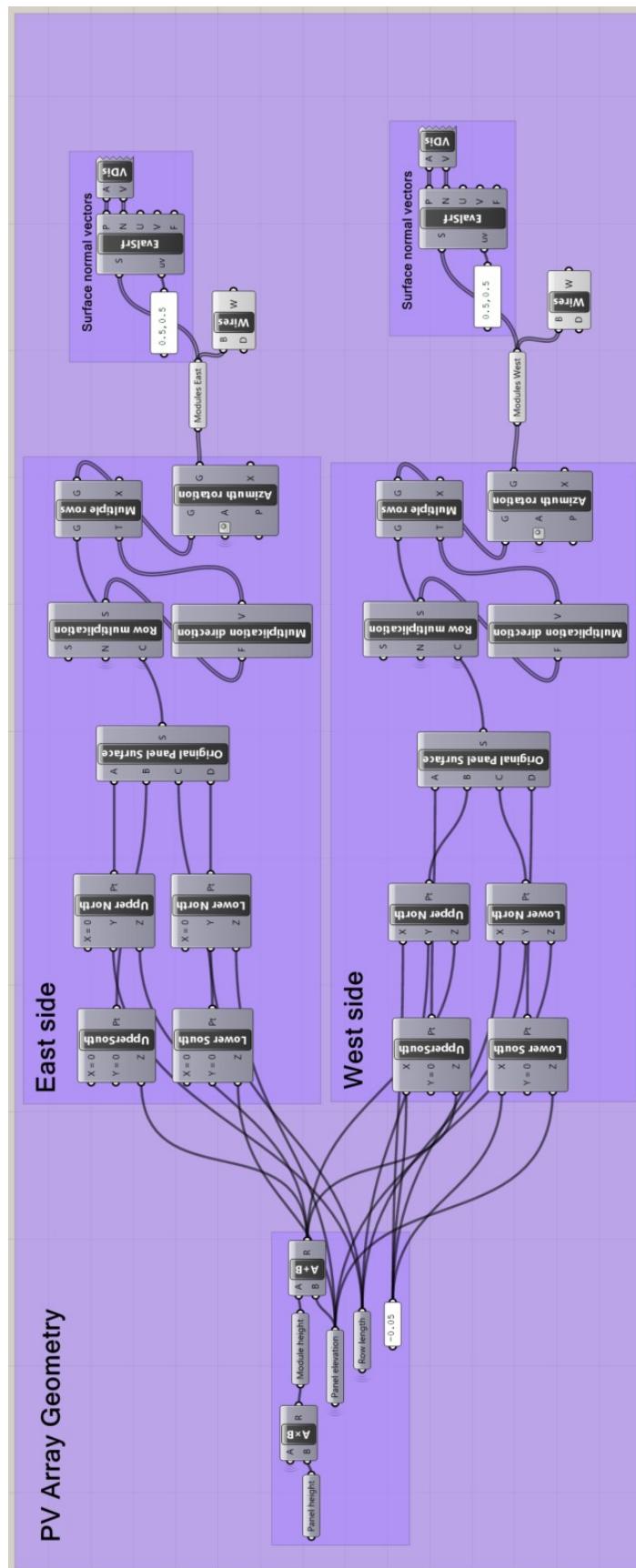
Tillegg B

Modellens deler med tilhørende komponenter for kapittel 3



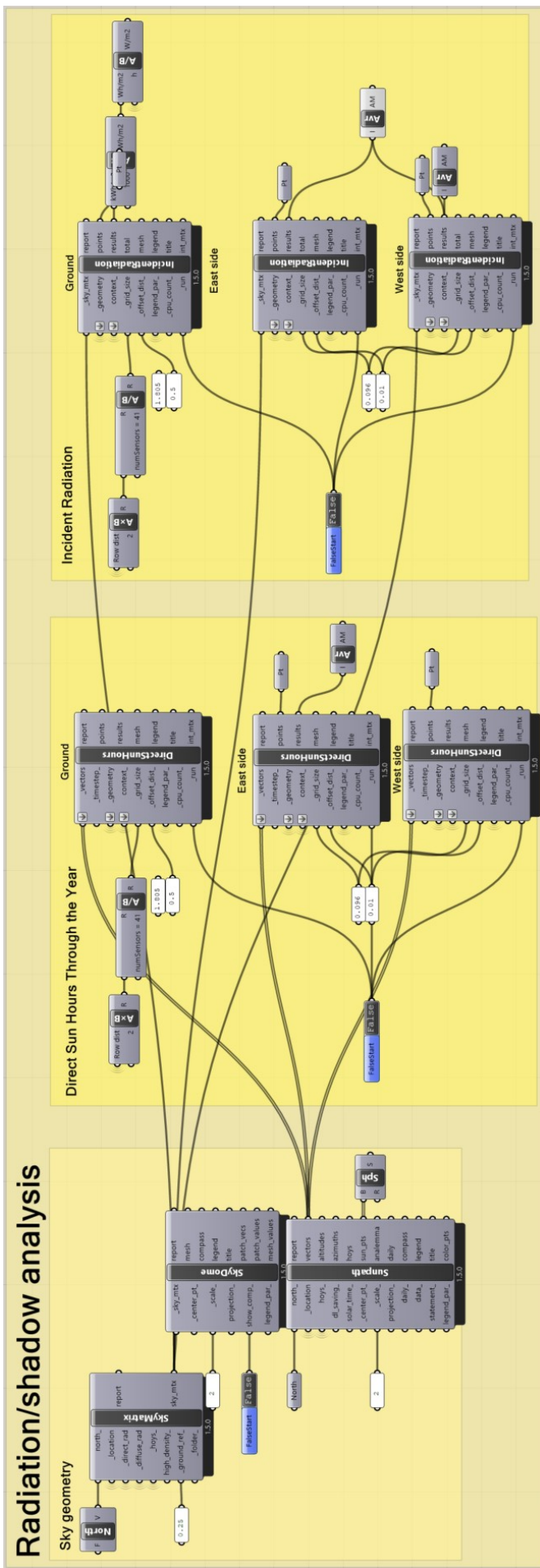
(a) Komponentene satt sammen for konstruksjon av modellens bakkeplan.

Figur B.1: Oppsett av Grasshopper-komponenter for parametriske konstruksjon av geometri for bakkeplan og panelrader.

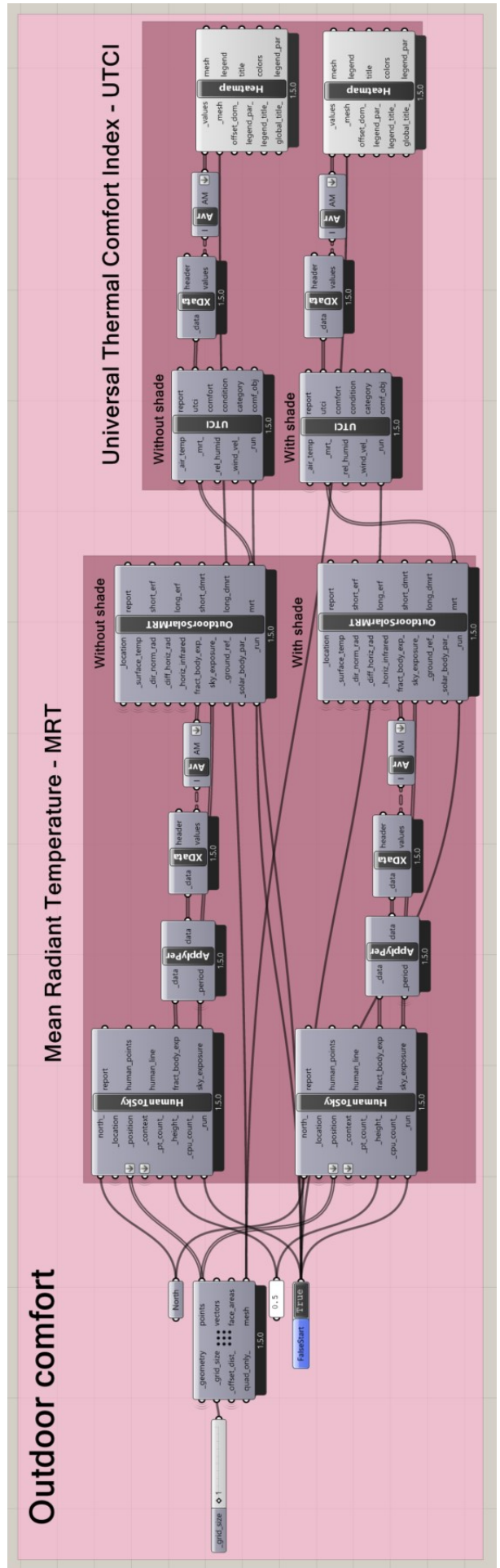


(b) Komponentene satt sammen for konstruksjon av modellens rader av solcellepaneler.

Figur B.1: Oppsett av Grasshopper-komponenter for parametrisk konstruksjon av geometri for bakkeplan og panelrader.



(a) Ladybug-komponentene satt sammen til simulering av innstråling.



(b) Oppsett for simulering av omgivelsestemperatur (MRT) og komfort (UTCI) i Grasshopper med Ladybug tools.

Tillegg C

Tilleggstabeller for kapittel 4

Tabell C.1: Utsnitt av timesverdier for innstrålt energi på modulradenes vestsiden, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand.

Innstrålt energi på vestsiden av paneler per time for varierende rad-avstander [kWh/m ²]							
Time	4 m	7 m	9 m	13 m	19 m	28 m	37 m
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0.003565	0.003565	0.003565	0.003565	0.003565	0.003565	0.003565
4	0.02814	0.02814	0.02814	0.02814	0.02814	0.02814	0.02814
5	0.056861	0.056861	0.056861	0.056861	0.056861	0.056861	0.056861
6	0.073103	0.073103	0.073103	0.073103	0.073103	0.073103	0.073103
7	0.082363	0.082363	0.082363	0.082363	0.082363	0.082363	0.082363
8	0.097967	0.097967	0.097967	0.097967	0.097967	0.097967	0.097967
9	0.078052	0.078052	0.078052	0.078052	0.078052	0.078052	0.078052
10	0.086017	0.086017	0.086017	0.086017	0.086017	0.086017	0.086017
11	0.092858	0.092858	0.092858	0.092858	0.092858	0.092858	0.092858
12	0.137566	0.137566	0.137566	0.137566	0.137566	0.137566	0.137566
13	0.341698	0.341698	0.341698	0.341698	0.341698	0.341698	0.341698
14	0.470233	0.470233	0.470233	0.470233	0.470233	0.470233	0.470233
15	0.548682	0.548682	0.548682	0.548682	0.548682	0.548682	0.548682
16	0.659698	0.659698	0.659698	0.659698	0.659698	0.659698	0.659698
17	0.635119	0.635119	0.635119	0.635119	0.635119	0.635119	0.635119
18	0.552427	0.552427	0.552427	0.552427	0.552427	0.552427	0.552427
19	0.389547	0.389547	0.389547	0.389547	0.389547	0.389547	0.389547
20	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105
21	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0

Tabell C.2: Utsnitt av timesverdier for innstrålt energi på modulradenes østside, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand.

Innstrålt energi på østsiden av paneler per time for varierende rad-avstander [kWh/m ²]							
Time	4 m	7 m	9 m	13 m	19 m	28 m	37 m
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0.073246	0.073246	0.073246	0.073246	0.073246	0.073246	0.073246
4	0.247489	0.247489	0.247489	0.247489	0.247489	0.247489	0.247489
5	0.47053	0.47053	0.47053	0.47053	0.47053	0.47053	0.47053
6	0.77625	0.77625	0.77625	0.77625	0.77625	0.77625	0.77625
7	0.795728	0.795728	0.795728	0.795728	0.795728	0.795728	0.795728
8	0.748709	0.748709	0.748709	0.748709	0.748709	0.748709	0.748709
9	0.622467	0.622467	0.622467	0.622467	0.622467	0.622467	0.622467
10	0.464356	0.464356	0.464356	0.464356	0.464356	0.464356	0.464356
11	0.264473	0.264473	0.264473	0.264473	0.264473	0.264473	0.264473
12	0.09563	0.09563	0.09563	0.09563	0.09563	0.09563	0.09563
13	0.090432	0.090432	0.090432	0.090432	0.090432	0.090432	0.090432
14	0.080788	0.080788	0.080788	0.080788	0.080788	0.080788	0.080788
15	0.069438	0.069438	0.069438	0.069438	0.069438	0.069438	0.069438
16	0.057705	0.057705	0.057705	0.057705	0.057705	0.057705	0.057705
17	0.048577	0.048577	0.048577	0.048577	0.048577	0.048577	0.048577
18	0.042857	0.042857	0.042857	0.042857	0.042857	0.042857	0.042857
19	0.023685	0.023685	0.023685	0.023685	0.023685	0.023685	0.023685
20	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105	0.01105
21	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0

Tabell C.3: Utsnitt av timesverdier for celleteperatur på modulradenes vestsiden, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand.

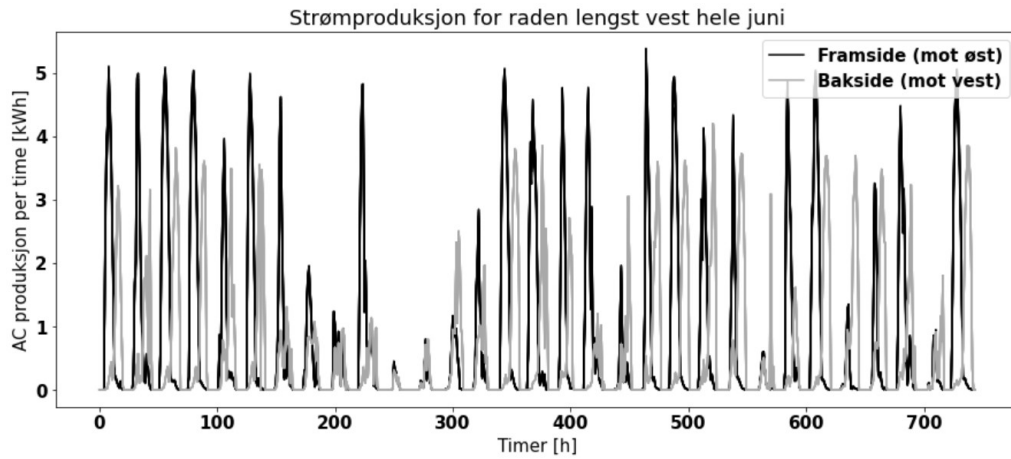
Celleteperatur på vestsiden per time for varierende rad-avstander [C]							
Time	4 m	7 m	9 m	13 m	19 m	28 m	37 m
0	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
1	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
2	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
3	4.409095	4.409095	4.409095	4.409095	4.409095	4.409095	4.409095
4	6.061051	6.061051	6.061051	6.061051	6.061051	6.061051	6.061051
5	9.316491	9.316491	9.316491	9.316491	9.316491	9.316491	9.316491
6	12.07721	12.07721	12.07721	12.07721	12.07721	12.07721	12.07721
7	15.453	15.453	15.453	15.453	15.453	15.453	15.453
8	17.19811	17.19811	17.19811	17.19811	17.19811	17.19811	17.19811
9	18.06282	18.06282	18.06282	18.06282	18.06282	18.06282	18.06282
10	18.95368	18.95368	18.95368	18.95368	18.95368	18.95368	18.95368
11	19.6203	19.6203	19.6203	19.6203	19.6203	19.6203	19.6203
12	21.31093	21.31093	21.31093	21.31093	21.31093	21.31093	21.31093
13	26.5702	26.5702	26.5702	26.5702	26.5702	26.5702	26.5702
14	29.68165	29.68165	29.68165	29.68165	29.68165	29.68165	29.68165
15	31.15115	31.15115	31.15115	31.15115	31.15115	31.15115	31.15115
16	33.57043	33.57043	33.57043	33.57043	33.57043	33.57043	33.57043
17	32.41265	32.41265	32.41265	32.41265	32.41265	32.41265	32.41265
18	30.60884	30.60884	30.60884	30.60884	30.60884	30.60884	30.60884
19	26.13741	26.13741	26.13741	26.13741	26.13741	26.13741	26.13741
20	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035
21	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
22	12	12	12	12	12	12	12
23	11	11	11	11	11	11	11

Tabell C.4: Utsnitt av timesverdier for celleteperatur på modulradenes vøstside, ved forskjellige radavstander 21. juni. Like verdier ved hver radavstand.

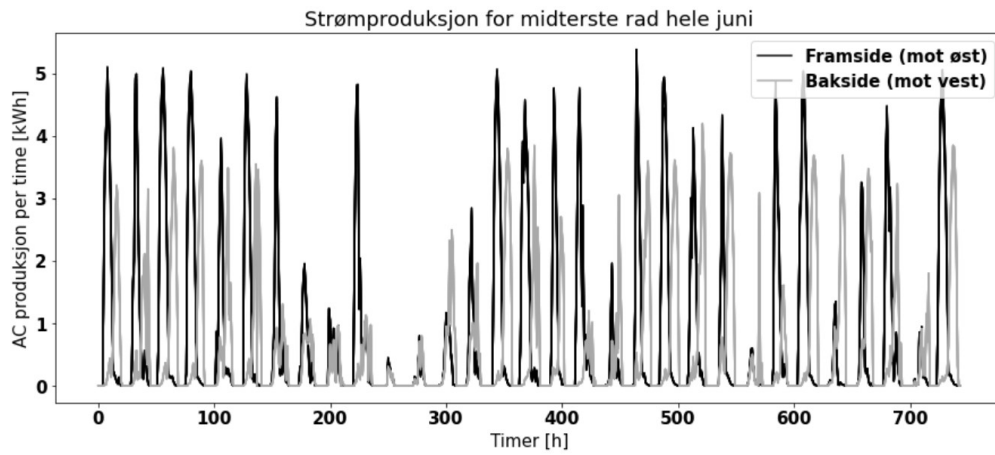
Celleteperatur på østsidan per time for varierende rad-avstander [C]							
Time	4 m	7 m	9 m	13 m	19 m	28 m	37 m
0	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
1	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
2	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
3	6.541211	6.541211	6.541211	6.541211	6.541211	6.541211	6.541211
4	12.77274	12.77274	12.77274	12.77274	12.77274	12.77274	12.77274
5	21.8041	21.8041	21.8041	21.8041	21.8041	21.8041	21.8041
6	33.0188	33.0188	33.0188	33.0188	33.0188	33.0188	33.0188
7	36.6989	36.6989	36.6989	36.6989	36.6989	36.6989	36.6989
8	36.44874	36.44874	36.44874	36.44874	36.44874	36.44874	36.44874
9	33.84604	33.84604	33.84604	33.84604	33.84604	33.84604	33.84604
10	28.4264	28.4264	28.4264	28.4264	28.4264	28.4264	28.4264
11	23.72371	23.72371	23.72371	23.72371	23.72371	23.72371	23.72371
12	20.30162	20.30162	20.30162	20.30162	20.30162	20.30162	20.30162
13	20.56229	20.56229	20.56229	20.56229	20.56229	20.56229	20.56229
14	20.66952	20.66952	20.66952	20.66952	20.66952	20.66952	20.66952
15	20.27576	20.27576	20.27576	20.27576	20.27576	20.27576	20.27576
16	19.90949	19.90949	19.90949	19.90949	19.90949	19.90949	19.90949
17	19.10234	19.10234	19.10234	19.10234	19.10234	19.10234	19.10234
18	18.42474	18.42474	18.42474	18.42474	18.42474	18.42474	18.42474
19	17.27381	17.27381	17.27381	17.27381	17.27381	17.27381	17.27381
20	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035	15.78035
21	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
22	12	12	12	12	12	12	12
23	11	11	11	11	11	11	11

Tillegg D

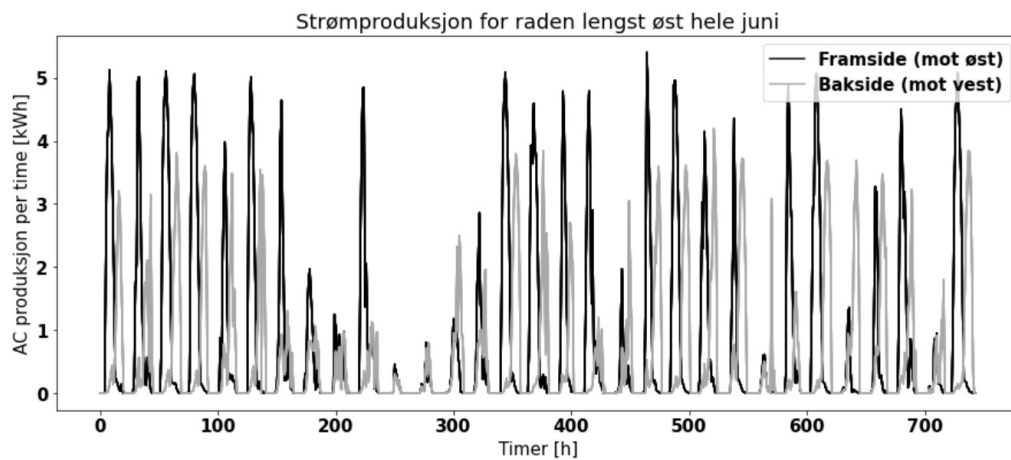
Tilleggsfigurer til kapittel 4



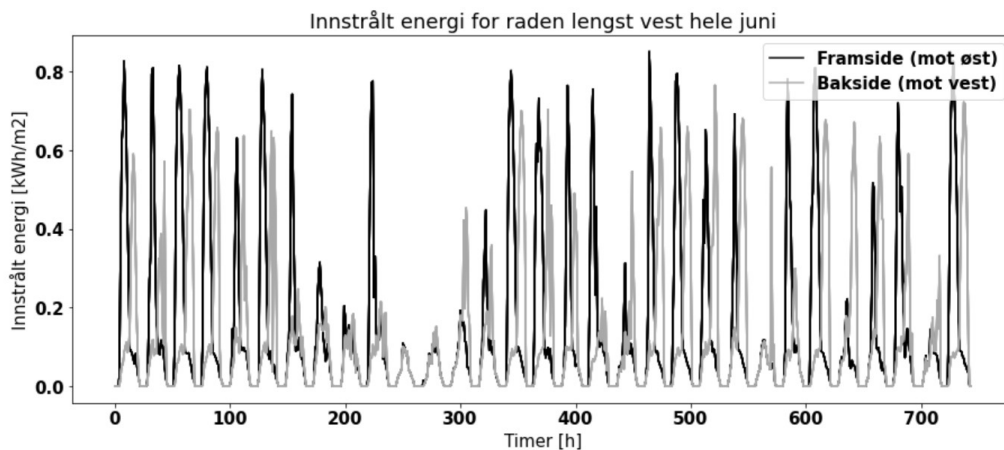
Figur D.1: Timesverdier for strømproduksjon [kWh] til framside og baksida av vest-raden.



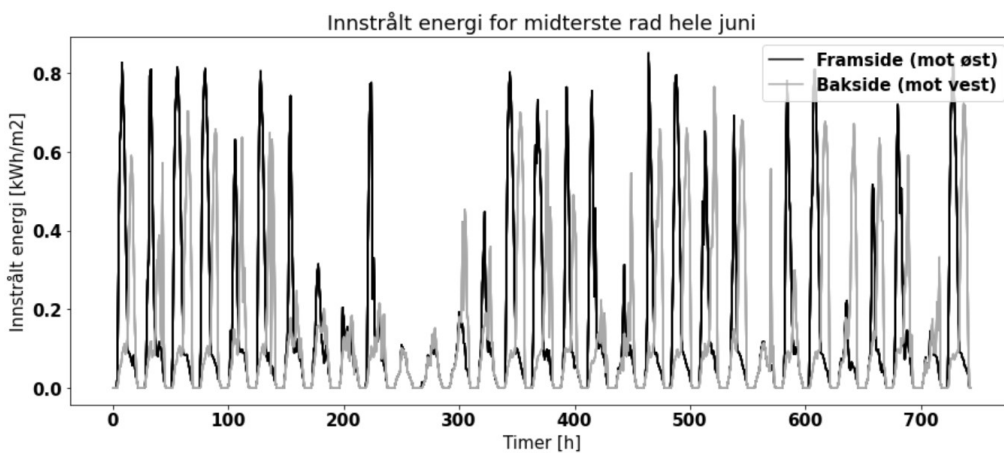
Figur D.2: Timesverdier for strømproduksjon [kWh] til framside og baksida av midt-raden.



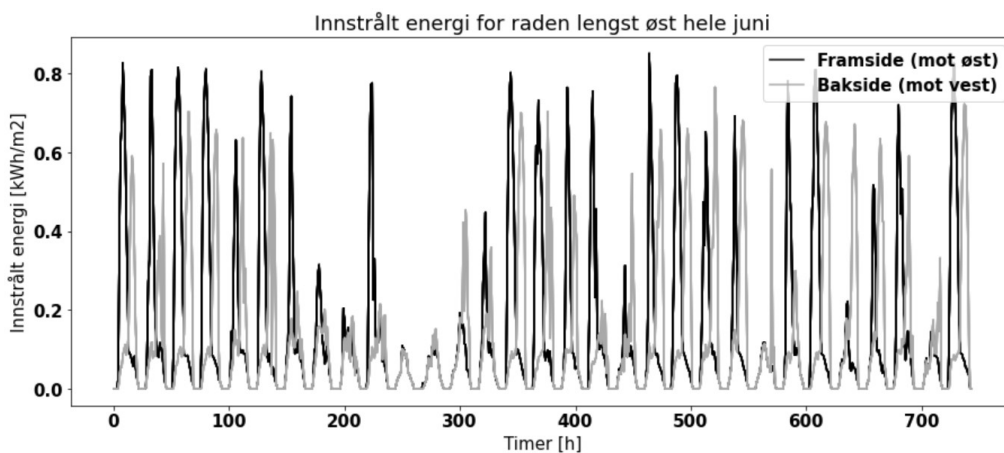
Figur D.3: Timesverdier for strømproduksjon [kWh] til framside og baksida av øst-raden.



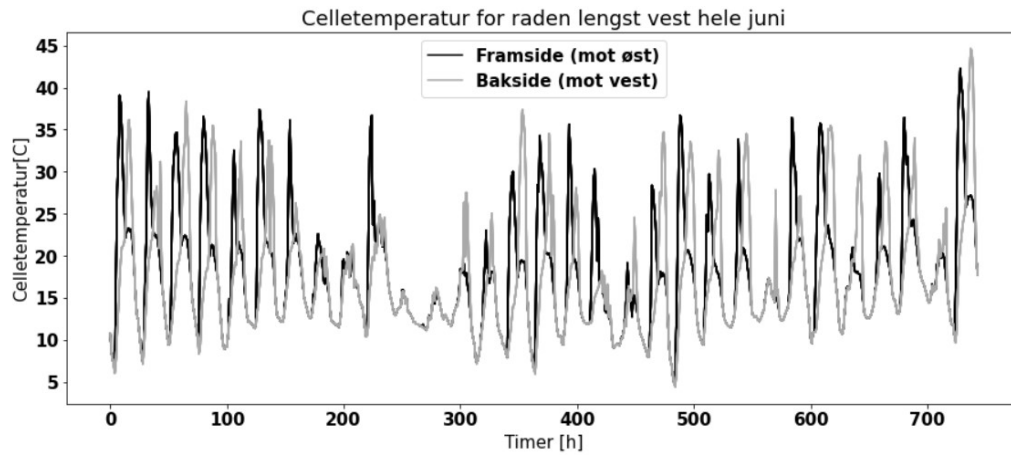
Figur D.4: Timesverdier for innstrålt energi [kWh/m²] til framside og baksida av vestraden.



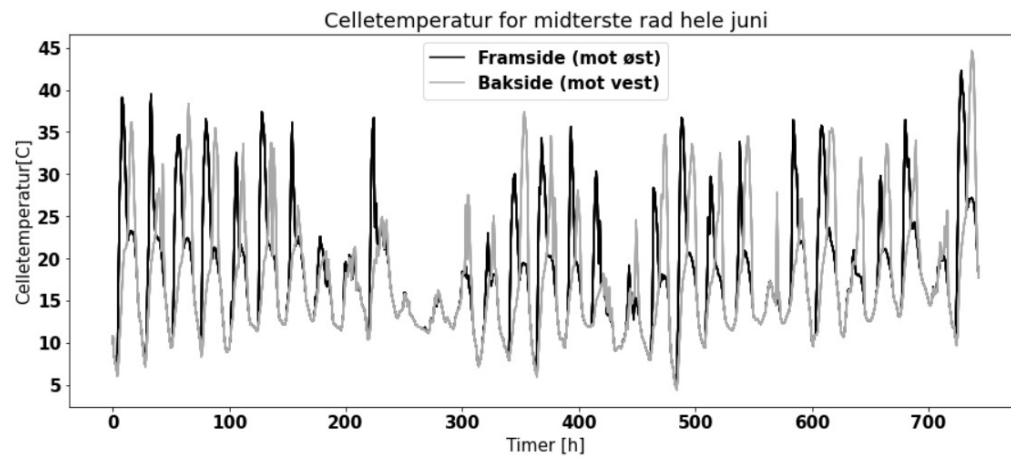
Figur D.5: Timesverdier for innstrålt energi [kWh/m²] til framside og baksida av midt-raden.



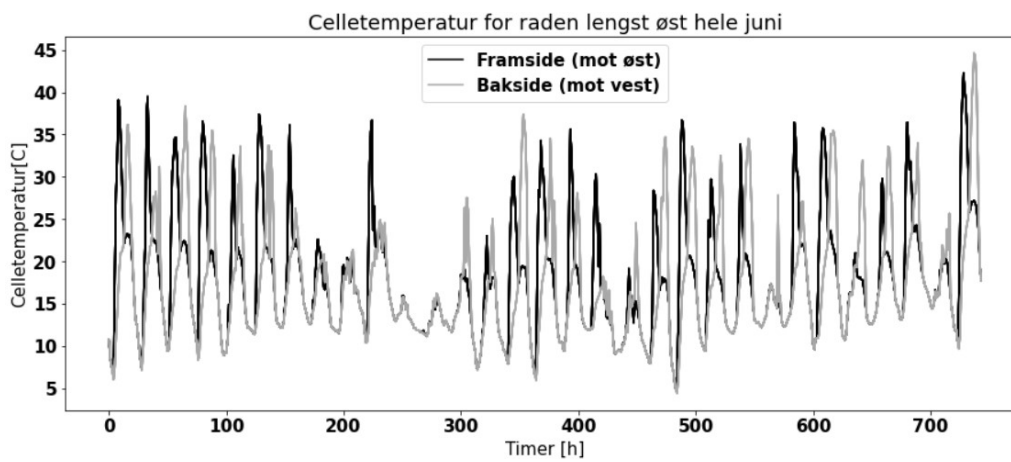
Figur D.6: Timesverdier for innstrålt energi [kWh/m²] til framside og baksida av øst-raden.



Figur D.7: Timesverdier for celletemperaturer [C] til framside og baksida av vest-raden.



Figur D.8: Timesverdier for celletemperaturer [C] til framside og baksida av midt-raden.



Figur D.9: Timesverdier for celletemperaturer [C] til framside og baksida av øst-raden.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway