



Energie- en ziektebeheersing

Beheersing van het (micro)klimaat voor echte meeldauw
in aardbei

K Leiss, A Elings, J Janse, E Hernandez-Olesinski, I Tsafaras, D Constantinescu
en M Noordam

Rapport WPR-1168

Referaat

Echte meeldauw op bladeren en -vruchten (*Podosphaera aphanis*) is een van de belangrijkste ziekten in aardbei. Meeldauwontwikkeling in aardbei is afhankelijk van het aantal sporen in de lucht die tot infectie kunnen leiden, van het microklimaat rondom de plant en van het ras. Kieming van sporen en groei van het mycelium vindt plaats op de bladeren en vruchten en in de grenslagen ervan. In dit project is gekeken naar de invloed van het microklimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten op meeldauwinfectie en hoe dit aan een beheerstrategie voor meeldauw zou kunnen bijdragen. Allereerst is de dikte van de grenslaag vastgesteld. Het microklimaat in deze grenslaag en het klimaat van de omringende kaslucht zijn gemeten, waarna een rekenkundig model voor het microklimaat in de grenslaag is opgesteld met een goede voorspelbaarheid ($R^2=0.98$). Dit maakt het mogelijk om het microklimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten te berekenen op basis van gemeten klimaatwaarden in de omringende kaslucht zonder dat specifieke microklimaatensoren nodig zijn. Data van meeldauwincidentie zijn verzameld en aan het microklimaat in de grenslaag gekoppeld. Omstandigheden van het microklimaat die meeldauwontwikkeling leken te remmen of te bevorderen zijn vervolgens in experimenten in klimaatkasten op meeldauwkieming en myceliumontwikkeling getoetst. Hierbij kwam naar voren dat de kiemkracht op jong blad hoger is dan op oud blad, dat de kiemkracht toeneemt met een toename van de relatieve luchtvochtigheid en dat temperaturen boven 30°C de kiemkracht van meeldauw remmen. Myceliumontwikkeling direct na inoculatie was niet gekoppeld aan het microklimaat, terwijl uiterlijk zichtbaar mycelium twee weken na inoculatie bij een hogere relatieve luchtvochtigheid toenam. Daarmee blijkt voor de meeldauw ontwikkeling de relatieve luchtvochtigheid een belangrijkere factor voor het microklimaat dan de temperatuur. Aan de hand van deze data is een eerste model voor de voorspelling van meeldauwkiemkracht afhankelijk van het microklimaat opgezet met een redelijke voorspelbaarheid ($R^2=0.79$).

Abstract

Powdery mildew on strawberry (*Podosphaera aphanis*) leaf and fruit is one of the most important diseases in strawberry. Mildew in strawberry depends on the number of spores in the air leading to infection, on the microclimate around the plant and on the variety. Germination of spores and mycelium growth takes place in the boundary layer close to leaf and fruit. This project looked at the influence of the microclimate in the boundary layer of leaf and fruit on mildew infection and how this may contribute to a management strategy of mildew. First, the thickness of the boundary layer was determined. Subsequently, the microclimate in this boundary layer was measured and climate data were compared with the greenhouse. With these data, a model of the microclimate was drawn up based on measured climate values in the surrounding greenhouse air, leading to a good predictability ($R^2=0.98$). This makes it possible to calculate the microclimate in the boundary layer of leaves and fruits based on measured climate values in the surrounding greenhouse air without the need for specific microclimate sensors. Data from mildew incidence were collected and linked to the microclimate in the boundary layer. Microclimate settings that appeared to inhibit or promote mildew development were then tested in climate chamber experiments measuring mildew germination and mycelium development. It appeared that germination of mildew spores on young leaves is higher than on old leaves, that germination increases with an increase in relative humidity and that temperatures above 30°C inhibit germination. Mycelium development immediately after inoculation was not linked to the microclimate, while outwardly visible mycelium increased two weeks after inoculation at higher relative humidity. This shows that for mildew development, relative humidity appears to be a more important factor for the microclimate than temperature. Based on these data, a first model for the prediction of mildew germination depending on the microclimate was set up leading to a reasonable predictability ($R^2=0.79$).

Rapportgegevens

Rapport WPR-1168

DOI: <https://doi.org/10.18174/578423>

Projectnummer: 3742297600

Thema: Kasklimaat & energie

Dit project/onderzoek is mede tot stand gekomen door de bijdrage van KaE.

Disclaimer

© 2022 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research. Kamer van Koophandel nr.: 09098104 BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research. Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

| | | |
|----------|--|-----------|
| | Samenvatting | 5 |
| 1 | Inleiding | 7 |
| 2 | Denkkader | 9 |
| | 2.1 Gewas | 9 |
| | 2.2 Meeldauw | 9 |
| | 2.3 Het beheersen van meeldauw en Het Nieuwe Telen | 10 |
| 3 | Metingen aan macro-en microklimaat | 13 |
| | 3.1 Aanpak | 13 |
| | 3.2 De grenslaag | 13 |
| | 3.2.1 Grenslaagdikte | 13 |
| | 3.2.2 Grenslaagweerstand | 15 |
| | 3.3 Sensormetingen | 15 |
| | 3.3.1 Sensoren voor temperatuur en luchtvochtigheid | 15 |
| | 3.3.2 Gewastemperatuur en lichtsnelheid | 18 |
| | 3.3.3 Berekening van het microklimaat in de grenslaag | 19 |
| 4 | Effect van klimaat omstandigheden in de kas op de ontwikkeling van meeldauw | 21 |
| | 4.1 Meeldauw | 21 |
| | 4.2 Meeldauw scouting | 22 |
| | 4.2.1 Data verzameling | 22 |
| | 4.2.2 Data analyse en visualisatie | 22 |
| | 4.2.3 Conclusies | 25 |
| 5 | Koppeling van kasklimaat aan kieming en ontwikkeling van echte meeldauw | 27 |
| | 5.1 5.1 Klimaatkast experimenten | 27 |
| | 5.1.1 Uitvoering | 27 |
| | 5.1.1.1 Experiment 1 | 27 |
| | 5.1.1.2 Experiment 2 | 28 |
| | 5.1.2 Resultaten | 29 |
| | 5.1.3 Conclusies | 32 |
| 6 | Modellering kiemkracht van meeldauw sporen aan hand van het kasklimaat | 33 |
| | 6.1 Modelbeschrijving | 33 |
| | 6.1.1 Conclusies | 35 |
| 7 | Discussie en conclusie | 37 |
| | Literatuur | 39 |
| | Bijlage 1 Modelbeschrijving | 41 |

Samenvatting

Echte meeldauw op aardbeibladeren en -vruchten (*Podosphaera aphanis*) is één van de belangrijkste ziekten in aardbei. Vooral door de uitbreiding van het areaal aan aardbei onder glas wordt een significante toename van meeldauw verwacht. Meeldauw in aardbei is afhankelijk van het aantal sporen in de lucht die tot infectie kunnen leiden, van het microklimaat rondom de plant en van het ras. Kieming van sporen en groei van het mycelium vindt plaats in de grenslaag van bladeren en vruchten. In dit project is gekeken naar de invloed van het microklimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten op meeldauwinfectie en hoe dit aan een beheerstrategie voor meeldauw zou kunnen bijdragen. Metingen zijn verricht tijdens twee aardbeicycli met drie rassen: Favori (resistent tegen meeldauw), Murano (gedeeltelijk resistent tegen meeldauw), en Arabella (gevoelig voor meeldauw) in de Demokas 2030. De dikte van de grenslaag als functie van voornamelijk bladgrootte en de lichtsnelheid is berekend op 12 mm. Vervolgens is het microklimaat in deze grenslaag met microsensoren gemeten en met de klimaatgegevens van de meetbox in de kas vergeleken. De relatieve luchtvochtigheid in de grenslaag van het blad was door de gewasverdamping hoger dan die van de omgevende kaslucht. Met de gegevens van kasklimaat en microklimaat is een model voor het microklimaat opgesteld met een goede voorspelbaarheid ($R^2=0.98$). Dit maakt het mogelijk om het microklimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten te berekenen op basis van gemeten klimaatwaarden in de omringende kaslucht zonder dat specifieke microklimaatssensoren nodig zijn. Om de microklimaat gegevens met meeldauwinfectie te koppelen, is de meeldauwincidentie op bladeren en vruchten waargenomen. Zoals verwacht was het ras Favori het meest resistent en vertoonde het alleen op de vruchten tegen het einde van de teelt meeldauwinfectie. Hoewel Arabella in de praktijk nogal eens als meest gevoelige ras voor meeldauw wordt gezien, vertoonde Murano een vergelijkbare mate aan gevoeligheid. De meeldauwinfectie verspreidde zich vanuit een eerste infectiehaard naar de omgevende buurplanten in plaats van volgens een willekeurige verspreiding in de kas. Helaas is er geen duidelijke correlatie waargenomen van meeldauwincidentie met het microklimaat. Dit is toe te schrijven aan het regelmatige gebruik van fungiciden in deze productiekas om meeldauw te beheersen. Om dit probleem te vermijden is besloten experimenten in klimaatkamers uit te voeren met setpoints van temperatuur en relatieve luchtvochtigheid die de meeldauw ontwikkeling remmen of bevorderen, gebaseerd op de verkregen kasdata. Planten zijn op een standaard wijze met meeldauw geïnfecteerd en kiemkracht en mycelium ontwikkeling zijn met behulp van microscopie en visuele beoordeling bepaald. Hierbij kwam naar voren dat de kiemkracht op jong blad hoger is dan op oud blad, dat de kiemkracht toeneemt met een toename van de relatieve luchtvochtigheid en dat temperaturen boven 30°C de kiemkracht van meeldauw remmen. Myceliumontwikkeling direct na inoculatie was niet gekoppeld aan het microklimaat, terwijl uiterlijk zichtbaar mycelium twee weken na inoculatie bij een hogere relatieve luchtvochtigheid toenam. Daarmee blijkt voor de meeldauw ontwikkeling de relatieve luchtvochtigheid een belangrijkere factor voor het microklimaat dan de temperatuur. Een hoge RV is zowel voor de kieming als ook de ontwikkeling van het mycelium gunstig. RV waarden van 60% overdag en 70% 's nachts bleken het gunstigst om meeldauwkieming en myceliumontwikkeling te remmen. Aan de hand van het microklimaat en de meeldauwkiemkracht is een eerste model voor de voorspelling van kiemkracht opgezet met een redelijke voorspelbaarheid ($R^2=0.79$).

1 Inleiding

Echte meeldauw op bladeren en vruchten (*Podosphaera aphanis*) is een van de belangrijkste ziekten in aardbei. Vooral door de uitbreiding van het areaal aan aardbei onder glas wordt een significante toename van meeldauw verwacht (Carisse *et al.* 2013). Inderdaad is meeldauw op aardbeivruchten in Nederland sterk toegenomen (Marcel Beekers, Berryworld/Soft Fruit Consult, Klaas Walraven, adviseur aardbei Delphy pers. com). Ook in het KaE project in de Demokas2030 "Aardbei fossielvrij en emissieloos telen", is meeldauw op vruchten een belangrijk probleem gebleken. Meeldauw in aardbei is afhankelijk van het aantal sporen in de lucht die tot infectie kunnen leiden, van het microklimaat rond de plant en van het ras (Asalf *et al.* 2014, Carisse *et al.* 2010). Terwijl bovengenoemd onderzoek vooral naar het raseffect keek, is er nog geen kennis opgedaan over de invloed van het microklimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten op meeldauwinfectie en hoe dit aan een beheerstrategie van meeldauw zou kunnen bijdragen. Kieming van sporen en groei van het mycelium vindt heel dicht op het blad en de vrucht plaats. Nu worden de omstandigheden in een kas met een meetbox in het algemeen vastgelegd, maar dit zijn niet de omstandigheden tussen de bladeren en zeker niet die in de grenslaag van bladeren en vruchten. Dit is een laag van maximaal enkele millimeters waar er geen tot zeer weinig luchtbeweging is. Tussen deze grenslaag en de omstandigheden in het gewas bestaan fysische relaties (Defraye *et al.* 2014; Boulard *et al.* 2002). Het moet dus mogelijk zijn om op basis van routinemetingen boven of in het gewas de omstandigheden in de grenslaag te bepalen en deze mee te nemen in de klimaatbeheersing. Dit onderzoek is ingepast in het lopende onderzoek in Kas2030 naar een fossielvrije, emissieloze aardbeiteelt, waarbij er gewerkt kan worden met LED-belichting, ontvochtiging, drie schermen en verneveling om het gewenste klimaat te realiseren.

Meeldauwinfectie op planten ontstaat door kieming van sporen die door de lucht verspreid worden. Sporen zijn altijd aanwezig en kunnen tot heel hoge aantallen oplopen. Aantallen van 600-7000 meeldauwsporen per m³ lucht zijn in een bedekte teelt van aardbei gemeten (Carisse en Bouchard, 2010). In het KaE project "De perfecte roos, Balans en Integratie: meeldauw monitor" zijn in de rozenkas zelfs sporenaantallen tot 45000 per m³ lucht gemeten (de Gelder *et al.* 2021). In dit project wordt gekeken of door aanpassing van het (micro)klimaat de sporenkieming en daaraan gekoppeld ook de vorming van mycelium verminderd kan worden. Hiervoor zijn twee verschillende modellen opgesteld. Ten eerste een model om het microklimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten te berekenen op basis van gemeten klimaatwaarden in de omgevende kaslucht, zonder dat specifieke microklimaatssensoren nodig zijn. Ten tweede is een eerste aanzet voor de voorspelling van kiemkracht van meeldauwsporen op basis van het blad microklimaat gemaakt. Dit model maakt gebruik van de absolute luchtvochtigheid, en niet van de relatieve luchtvochtigheid, omdat dit een sterkere verklarend factor bleek te zijn. Om het model operationeel te maken, kan de absolute luchtvochtigheid worden afgeleid uit de relatieve luchtvochtigheid en de luchttemperatuur.

2 Denkkader

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste processen van de groei en ontwikkeling van een aardbeigewas beschreven. Vervolgens wordt beschreven op welke processen meeldauw ingrijpt en schade aan het gewas toebrengt.

2.1 Gewas

Een procesmatige beschrijving van de groei van een aardbeigewas begint met de fotosynthese, waarvan de snelheid onder meer wordt bepaald door de omgevingsfactoren licht (photosynthetically active radiation, PAR), CO₂, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid zoals deze tussen de bladeren heersen, en door de conditie van het blad, bijvoorbeeld in de vorm van het chlorofylgehalte. Het fotosyntheseprocess legt CO₂ vast en zet het om naar CH₂O (suikers). De fotosynthesesnelheden op alle locaties in een bladpakket samen geven een fotosynthesesnelheid op gewasniveau. De snelheid kan tijdens de dag sterk fluctueren, bijvoorbeeld omdat het lichtniveau verandert. Nadat in een aantal onderhoudsposten is voorzien, wordt de beschikbare CH₂O aangewend voor de groei van de organen (blad, stengel, wortels, vrucht). Hierbij worden verschillende bouwstoffen gevormd, wat resulteert in een toenemend gewicht van de organen. Deze gewichten kunnen weer afnemen door onder meer oogst van vruchten en sterfte van bladeren en wortels.

Bladeren hebben een bepaalde dikte, wat het gevolg is van bladdeling en -strekking. De combinatie van bladgewicht en het specifieke bladoppervlak (m² g⁻¹) geeft het totaal bladoppervlak. Als het totaal bladoppervlak wordt gekoppeld aan het grondoppervlak, dan wordt de bladbedekkingsgraad (leaf area index, LAI) verkregen. Het is belangrijk om deze stap te maken omdat het nogal wat uitmaakt voor de lichtonderschepping of een bepaald bladoppervlak is verdeeld over een klein of groot grondoppervlak. De LAI en de architectuur van de bladeren (staan de bladeren bijvoorbeeld meer verticaal of horizontaal georiënteerd) bepalen de mate waarin PAR door het gewas wordt onderschept.

Vanuit het oppervlak van een enkel blad (in het geval van aardbei van een van de drie deelblaadjes per blad) kan het zogenaamde effectieve bladoppervlak worden berekend. Dit is het oppervlak van de grootste cirkel die aan de binnenkant van een blad kan worden getrokken (Nobel 1975; Leigh *et al.* 2017). In combinatie met de eigenschappen van het bladoppervlak (bijvoorbeeld beharing) en de luchtsnelheid levert dit de dikte van de grenslaag. De grenslaag is de dunne luchtlaag op het bladoppervlak waarin de lucht niet beweegt. Vanzelfsprekend zal er een geleidelijke overgang zijn naar de luchtlagen iets verder van het blad. Het is van belang om de omstandigheden in de grenslaag te bepalen omdat hierin de meeldauwsporen kiemen en zich schimmeldraden ontwikkelen nadat de kiembuis zich in de epidermis heeft vastgehecht.

Een knop in de bladoksel kan zich ontwikkelen tot bloem of uitloper volgens een nog onbekend mechanisme. Vermoedelijk wordt de ontwikkelingssnelheid bepaald door de omgevingstemperatuur, maar het is mogelijk dat ook andere factoren hier een rol spelen. Het ingewikkelde bij aardbei is dat ook de omstandigheden in de herfst voor de koudeperiode van groot belang zijn. Daarnaast bestaan er rasverschillen. Het aantal vruchten in combinatie met het totale gewicht van de vruchten leidt tot een gewicht per vrucht. De potentiële groeisnelheden ('sinksterktes') van een vrucht en andere organen zijn mogelijk afhankelijk van de leeftijd van deze organen. De verhouding van sinksterktes is gelijk aan de verdeling van de beschikbare assimilaten en geeft de groeisnelheden van deze organen.

Het project richt zich niet alleen op de grenslaag van het blad, maar ook op de grenslaag van de vrucht, omdat meeldauw naast blad, ook aardbeivruchten infecteert.

2.2 Meeldauw

De dichtheid van meeldauwsporen in de lucht en de luchtsnelheid in het gewas bepaalt de hoeveelheid sporen die op het oppervlak van het blad en de vrucht terecht komen. Bij een gelijk aantal sporen per mm² blad, leidt een groter blad- of vruchtoppervlak tot een groter aantal sporen op het gewas.

Sporulatie vindt plaats onder invloed van de oppervlakte-eigenschappen van bladeren of vruchten. Daarnaast zijn temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de grenslaag van belang. UV-C en UV-B kunnen sporen en mycelium doden, waardoor er bijvoorbeeld in de natuur in het voorjaar minder meeldauw voorkomt dan in het najaar, omdat de UV straling dan het hoogst is (Suthaparan *et al.* 2012; 2018).

Eenmaal gekiemd, ontwikkelen zich schimmeldraden, het mycelium, over bladeren en vruchten, waarbij de groeisnelheid wordt bepaald door de hoeveelheid PAR, de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de grenslaag, en de hoeveelheid nutriënten in het blad of de vrucht. Ook het oppervlak van het blad of de vrucht dat bedekt is door mycelium speelt een rol in de verdere toename van het oppervlak. Het is voorstelbaar dat de groei aanvankelijk exponentieel is, maar na verloop van tijd wordt afgeremd omdat het meeste oppervlak al is bedekt.

De hypothese in dit onderzoek is geweest dat kieming van meeldauwsporen en de groei van het mycelium afhankelijk is van de omstandigheden in de grenslaag van bladeren en vruchten. De schade die meeldauw toebrengt, is tussen bladeren en vruchten erg verschillend.

Het bladoppervlak dat door mycelium is bedekt leidt tot een afname van het groene, fotosynthetisch actieve bladoppervlak en daarmee tot een afname van de gewasfotosynthese. Als de aantasting ernstig is met een substantiële afsterving van het blad, is er productieverlies. Als de aantasting minder ernstig is, is het de vraag of de afgenomen gewasfotosynthese ook tot gevolg heeft dat de vruchtproductie afneemt. Dit hoeft namelijk niet het gevolg te zijn als er toch een overmaat aan assimilaten wordt gemaakt. Het is wel mogelijk dat dit ten koste gaat van de droge stof- en suikergehalten en daarmee de smaak.

Het aantal geïnfecteerde aardbeivruchten heeft een direct effect op het aantal verkoopbare vruchten.

2.3 Het beheersen van meeldauw en Het Nieuwe Telen

Het areaal aardbei onder glas in Nederland bedraagt momenteel zo'n 450 ha en de verwachting is dat het areaal binnen 8 à 10 jaar ongeveer zal verdubbelen. Voor het grootste deel betreft het nog steeds onbelichte doorteelt van junidragers met voornamelijk het ras Elsanta, maar het areaal doordragers neemt, mede door de extreem hoge energieprijzen, toe. Dit heeft gevolgen voor het teeltsysteem. Samengevat ziet dit er voor de twee vormen als volgt uit:

1. Doorteelt junidragers
 - a. Zomer en herfst: opkweek uit stek in de buitenlucht, bloemaanleg vanaf eind augustus/begin september onder invloed van korte dag en lagere temperaturen.
 - b. Begin december: Koudeperiode van ruim een halfjaar in de koeling bij -1.5°C.
 - c. Eerste helft augustus: planten in de kas, en vanaf dat moment gewasontwikkeling bij relatief hoge temperatuur.
 - d. Najaar: 1^e productiefase september t/m november, bij afnemende buitentemperatuur en afnemend lichtniveau hernieuwde bloemaanleg, deels tijdens oogst, deels na de oogst bij minimum dag- en nachttemperaturen van 8oC
 - e. Januari: gedurende ca. 4 weken koude invangen voor voldoende strekking van bloemtrossen en bladeren
 - f. Februari: opstoken voor 2^e productiefase bij toenemende buitentemperatuur en toenemend lichtniveau. Dit kan ook met een vroeg geplant nieuw gewas dat voldoende koude heeft gekregen, worden gerealiseerd.
2. Doordragers
 - a. Juli – begin augustus: snijden van stekken en opkweek in buitenlucht. De meeste doordragerrassen zijn daglengteneutraal, dus v.w.b. bloemaanleg ongevoelig voor daglengte
 - b. December in de bewaring bij -1.5oC
 - c. Februari/maart: planten in kas
 - d. April – oktober: productiefase met gelijktijdige vorming bloemtrossen, continue productie maar deze verloopt veelal in golven

Een van de belangrijke verschillen is dat de productiefase van doordragers veel langer is, maar de productie per week lager is dan dat van junidragers en dat het te maken heeft met andere buitenomstandigheden.

De aardbei heeft in de ontwikkelings- en productiefasen een relatief lage etmaaltemperatuur van ongeveer 14°C - 17°C nodig. De lage etmaaltemperatuur is in de zomer vaak niet te bereiken en heeft eerder een waarde van ongeveer 20°C. Een lage nachttemperatuur is positief voor de vruchtgrootte en kwaliteit, met name de stevigheid/houdbaarheid en suikergehalte/smaak.

In de koude winterperiode kan de warmte afkomstig zijn van directe verwarming (maar vanuit HNT optiek liever niet), warmte van LEDs, de warmtepomp of ontvochtigde lucht. Het warmteverlies kan worden beperkt door gebruik te maken van één of meer energiescherm(en). Een diffuus scherm kan worden gebruikt om de instraling te beperken en daarmee een te hoge temperatuur te voorkomen. Zowel veel instraling als hoge bladtemperatuur kunnen leiden tot bladverbranding. Diffuus glas kan bij aardbei ook positief zijn voor de productie. Verneveling heeft eenzelfde temperatuur verlagend effect als het gebruik van een diffuus scherm, wat uiteraard wel de luchtvochtigheid doet toenemen en daarmee mogelijk het gevaar van kieming van de meeldauwsporen. Er moet worden voorkomen dat het gewas door de verneveling nat wordt.

Er is een direct verband tussen de omstandigheden in de kas en de ontwikkeling van ziekten, en daarmee tussen de energiebeheersing en ziektedruk. In de aardbeiteelt streeft men uit kwaliteitsoogpunt naar een hoge DIF in temperatuur (verschil tussen de dag- en nachttemperatuur), dus een relatief hoge dagtemperatuur gecombineerd met een lage nachttemperatuur. Het gevolg hiervan is dat de relatieve luchtvochtigheid (RV) ook sterk varieert van hoog in de nacht tot laag tijdens de dag. Een lage RV van 70-75% of lager tijdens de dag is ten tijde van bloei ook nodig om voor het vrijkomen van het stuifmeel en daarmee voor een goede bestuiving te zorgen. Uit onderzoek naar het voorkomen van meeldauw in roos (de Gelder *et al.* 2021) leek een variatie van RV helaas bevorderlijk voor meeldauw: kieming vindt plaats bij een hoge RV en de ontwikkeling van mycelium bij een lagere RV. Er moet dus een teeltstrategie worden gevonden die energiezuinig telen combineert met RV's die meeldauw niet bevorderen.

Het is belangrijk dat in de productiefase de fluctuatie in RV zoveel mogelijk wordt weggenomen, bijvoorbeeld door een iets hogere RV overdag en een iets lagere RV in de nacht. Maar de RV overdag kan niet te veel stijgen omdat dan een goede bestuiving in gevaar komt. Misschien is een korte periode eigenlijk wel genoeg, als er voor wordt gezorgd dat de bevliegings van bijen, hommels of zweefvliegen dan goed is, onder meer door er voor te zorgen dat er voldoende licht in de kas aanwezig is. Overdag zou de teler dus (periodiek) moeten overgaan tot minder ontvochtigen of meer bevochtiging. In de nacht is een lagere RV nodig, waarvoor meer ontvochtiging nodig zou zijn.

Bij aanvang van dit project wisten we natuurlijk niet precies wat de speelruimte in RV is – dat was nu juist een onderwerp van onderzoek. In dit project wilden wij dan ook onderzoeken wat voor speelruimte telers hebben om klimaat- en meeldauwbeheersing te combineren.

3 Metingen aan macro-en microklimaat

3.1 Aanpak

De klimaatomstandigheden zijn in de aardbei Demokas 2030 tijdens twee doordrager aardbeicycli tussen mei 2020 tot half augustus 2022 gemeten. In de kas zijn waarnemingen uitgevoerd bij drie verschillende rassen, namelijk Favori (resistent tegen meeldauw), Murano (gedeeltelijk resistent tegen meeldauw), en Arabella (gevoelig voor meeldauw). De metingen zijn per ras verricht.

De volgende metingen met de sensoren zijn uitgevoerd:

1. Klimaat van de kaslucht met een meetbox boven het gewas.
2. Microklimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten. Microsensoren (Wireless Value) voor temperatuur en RV zijn in een omhulsel geplaatst om directe opwarming van straling tegen te gaan en alleen de kale sensor heel dicht bij het blad/vrucht te brengen. Dit is eerder in Frans onderzoek gedemonstreerd (Boulard *et al.* 2002). Microklimaat metingen in de grenslaag zijn uitgevoerd tijdens verschillende korte perioden gedurende het jaar. Op deze manier is een voldoende lange periode met alle seizoen variatie in omstandigheden gewaarborgd.
3. Gewastemperatuur is bepaald met een IR-camera en luchtsnelheden zijn gemeten met anemometers (model Windmaster 3-as ultrasonic anemometer, Gill instrumenten).

3.2 De grenslaag

De grenslaag is de luchtlaag direct grenzend aan een plantenorgaan (meestal wordt het blad bedoeld) en wordt gekenmerkt door een hoge viscositeit waarin geen significante luchtbeweging is. De omstandigheden in de grenslaag worden bepaald door opening van de huidmondjes, de omstandigheden in de huidmondjes en in de lucht buiten de grenslaag, en door de dikte van de grenslaag.

3.2.1 Grenslaagdikte

De dikte van de grenslaag is afhankelijk van verschillende factoren waarbij de bladgrootte en de luchtsnelheid twee van de belangrijkste zijn. De dikte van de grenslaag neemt af met toenemende luchtsnelheid. Verschillende onderzoekers hebben mathematische vergelijkingen opgesteld voor de dikte van de grenslaag (Boulard *et al.* 2002, 2004; Nobel, 1975; Leigh *et al.* 2017) en de gevolgen van verdamping voor de temperatuur en de luchtvochtigheid in de grenslaag (Boulard *et al.* 2002; Defraye *et al.* 2014).

De vergelijking voor de dikte van de grenslaag is:

$$\delta = 4\sqrt{\left(\frac{w_e}{u}\right)}, \quad (1)$$

waarbij

- δ : Gemiddelde dikte van de grenslaag (mm).
 4 : Constante ($\text{mm s}^{-0.5}$) (opmerking: Boulard (2002) geeft een waarde van 4.92).
 u : Luchtsnelheid (m s^{-1}).
 w_e : Effectieve bladbreedte, of de diameter van de grootste cirkel die binnen de randen van het blad mogelijk is (m) (Nobel 1975; Leigh *et al.* 2017).

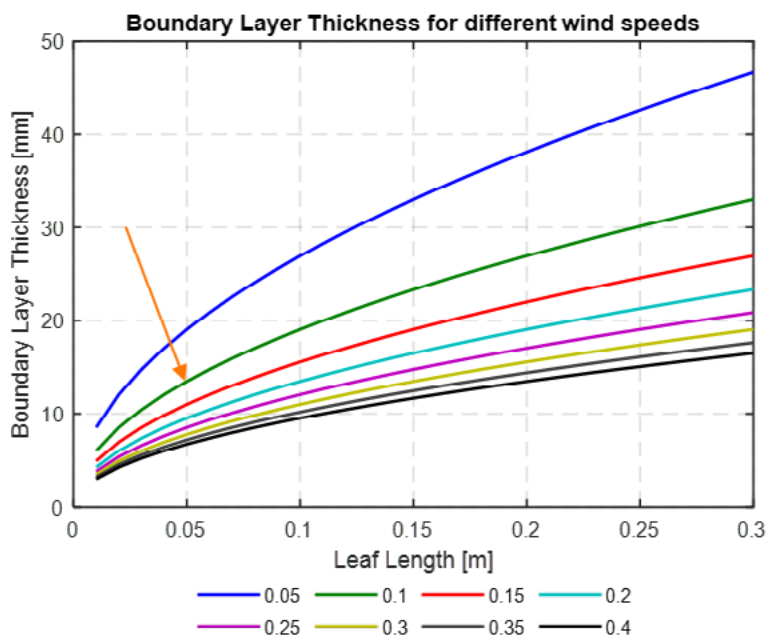
Deze vergelijkingen zijn complex en moeten mogelijk worden vereenvoudigd voor modeltoepassing (Boulard *et al.* 2002). De grenslaag van bladeren en vruchten is meestal dikker voor planten die in kassen worden gekweekt dan in het open veld.

In vergelijking met tomaat stellen de Gelder *et al.* (2006) dat de totale breedte van een tomatenblad ongeveer 40 cm is, wat moet worden vermenigvuldigd met 0.3 vanwege de versnipperde vorm, zodat we ongeveer 12 cm = 0.12 m is. Boulard *et al.* geven een waarde van 0.15 m. De luchtsnelheid in een tomatengewas in een kas is maximaal 0.5 m s⁻¹ (Boulard *et al.* 2002; Leigh *et al.* 2017). Toepassing van deze waarden in Formule 1 geeft een grenslaagdikte van 1.96 mm:

$$\delta = 4 \sqrt{\frac{0.12}{0.5}} = 4 * \sqrt{0.24} = 4 * 0.49 = 1.96 \text{ (mm)}$$

Uitgaand van een gemiddelde luchtsnelheid in de aardbei 2030 Demokas van 0.1 m s⁻¹ zal dit voor tomaat tot een grenslaagdikte van 4.38 mm leiden. Campen *et al.* (2008) bepaalden in phalaenopsis een luchtsnelheid van ongeveer 0,2 m s⁻¹ (met grote variatie), wat in het geval van tomaat tot een grenslaagdikte van 3.10 mm zou leiden. Boulard *et al.* (2002) gebruikten een iets andere formule en bepaalden een grotere grenslaagdikte van 2 cm overdag bij hoge luchtsnelheden van 0.15-0.2 m s⁻¹, en van 3 cm in de nacht bij lagere luchtsnelheden van 0.1 m s⁻¹. Voor de luchtvochtigheid gold dat de grootste afname plaats vond in de eerste 5-10 mm. De dikte van de grenslaag varieert dus van enkele mm tot enkele cm, afhankelijk van de luchtsnelheid en bladvorm. Dit is een behoorlijke spreiding.

De dikte van de grenslaag als functie van bladgrootte en windsnelheid is berekend voor aardbei in de 2030 Demokas (Figuur 3.1). Uitgaand van aardbeienblaadjes van we 10 cm lengte onder kasomstandigheden met een gemiddelde luchtsnelheid van 0.1 m.s⁻¹ werd de dikte van de grenslaag geschat op circa 12 mm.



Figuur 3.1 Dikte van de grenslaag als functie van de lengte van het blad. De verschillende lijnen representeren verschillende luchtsnelheden tussen 0.05 m.s⁻¹ (donkerblauw) en 0.4 m.s⁻¹ (zwart) welke in een kas kunnen voorkomen.

3.2.2 Grenslaagweerstand

De grenslaagweerstand is de weerstand die een gas ondervindt bij de verplaatsing door de grenslaag. Het is te vergelijken met een elektrische weerstand die, naarmate de waarde toeneemt, leidt tot een kleinere elektrische stroom. De grenslaagweerstand is afhankelijk van de bladgrootte (Leigh *et al.* 2017, Stanghellini, 1987) en is bepalend voor de uitwisseling van H₂O (dus verdamping) en CO₂ (dus fotosynthese), en heeft gevolgen voor bijvoorbeeld de bladtemperatuur. De grenslaagweerstand r_b (s m⁻¹) wordt berekend uit de 'karakteristieke' dimensie van de blaadjes (l ,) en de luchtsnelheid (u , in m s⁻¹):

$$r_b \cong 300\sqrt{l/u}$$

Het bepalen van de karakteristieke dimensie is in het geval van een tomatenblad bijzonder lastig vanwege de grote variatie in bladvormen (de Gelder *et al.* 2006). Voor volwassen gewassen komt Stanghellini (1987) tot een schatting van 200 s m⁻¹ voor tomaat, 300 s m⁻¹ voor paprika, 400 s m⁻¹ voor komkommer en 350 s m⁻¹ voor aubergine. Fatnassi *et al.* (2014), en Saudreau *et al.* (2017) hebben een driedimensionaal model opgesteld om een beter begrip te krijgen van de gevolgen van de ruwheid van het bladoppervlak voor de grenslaagweerstand.

Het is nodig om de juiste rekenregels op te stellen omdat kleine verschillen grote gevolgen kunnen hebben. De uitkomst van deze rekenregels zal zijn dat de omstandigheden in de grenslaag als ruwe benadering ergens zullen liggen tussen de omstandigheden van het blad en in de omringende luchtlaag.

3.3 Sensormetingen

In bijna alle moderne kassen worden klimaatparameters gemonitord. De groei en productie van gewassen, net als de ontwikkeling van ziekten zoals echte meeldauw, zijn direct gerelateerd aan het klimaat. Daarom is het monitoren van het kasklimaat essentieel om de meeldauwdruk te begrijpen. In het huidige project zijn klimaatparameters via sensoren op kasniveau als ook in de grenslaag van bladeren en vruchten gemonitord zoals in 3.1 genoemd.

3.3.1 Sensoren voor temperatuur en luchtvochtigheid

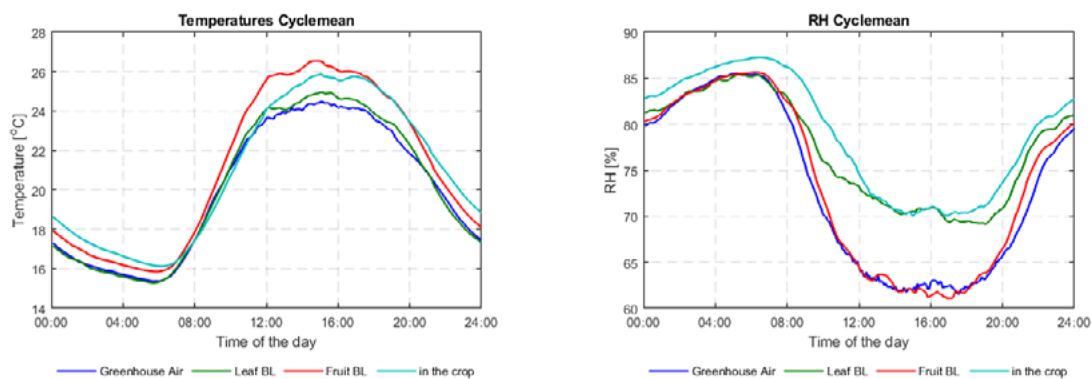
Temperatuur en relatieve vochtigheid (RV) worden meestal gemeten door meetboxen die de omgevingslucht aanzuigen. De metingen worden gebruikt voor klimaatbeheersing en voor de evaluatie van de gerealiseerde klimaatbeheersingsstrategie. De meetkasten worden meestal boven of in het bladerdak van het gewas geplaatst. De ventilatiefunctie zorgt voor een continue luchtstroom door de meetkast. Hiermee wordt voorkomen dat de meetbox opwarmt tijdens hoge stralingsmomenten. De meting kan worden beschouwd als het gemiddelde van circa 1 m³ rond de box.

Een belangrijk doel van de huidige proef bestond uit het nauwkeurig meten van temperatuur en RV in de grenslaag van bladeren en vruchten. Hiervoor is kasmeetbox niet geschikt. Daarom werden microsensoren (Wireless Value, 6x5x2 mm) gebruikt die binnen de berekende 12 mm grenslaag van bladeren of vruchten konden worden geplaatst. Deze hebben een nauwkeurigheid van ±0,1-0,2°C en ±1,5-2% voor respectievelijk temperatuur en RV (50 -100%) die binnen een kas kunnen worden gerealiseerd. De sensormetingen bleken gevoelig te zijn voor de directe blootstelling aan straling. Daarom zijn ze aan de schaduwkant van bladeren en vruchten geplaatst.

In totaal werden 18 sensoren geïnstalleerd in 6 gewasrijen over 3 verschillende soorten aardbei rassen: Favori (hoge resistentie tegen meeldauw), Murano (gedeeltelijk resistent tegen meeldauw), en Arabella (gevoelig voor meeldauw). In elke rij werden elk drie sensoren geïnstalleerd bij bladeren en bij vruchten (Figuur 3.2).

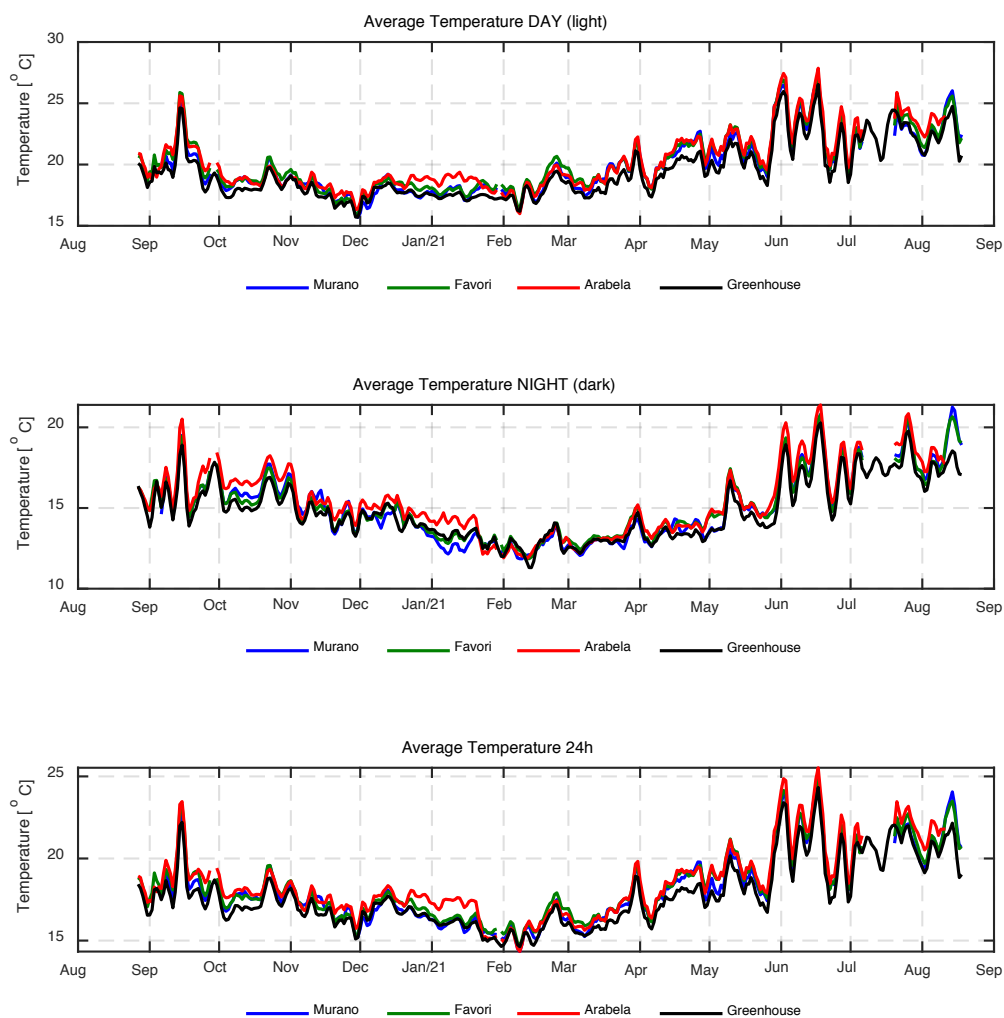


Figuur 3.2 Sensoren voor de meting van temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de grenslaag van aardbei bladeren (links) en vruchten (rechts).

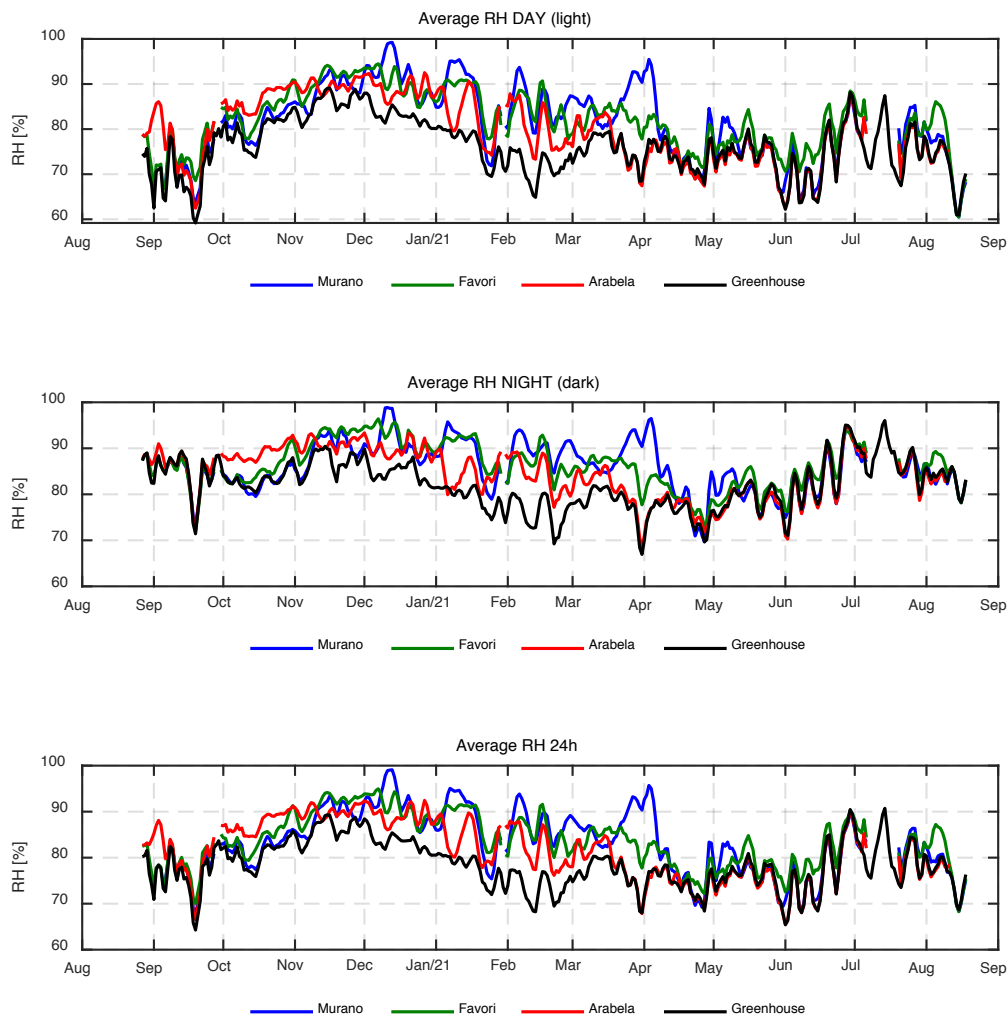


Figuur 3.3 Cyclusgemiddelden (gemiddelde dag berekend over meerdere etmalen) van temperatuur (links) en relatieve luchtvochtigheid (rechts) in de kas (blauw), en in de grenslaag van aardbeibladeren (groen) en -vruchten (rood).

De temperatuur in de grenslaag van het blad was vergelijkbaar met die van de omgevende kaslucht; overdag licht hoger (Figuur 3.3 links). Daarentegen kon de temperatuur van de grenslaag van de vrucht tot 2°C hoger liggen dan die van het blad en de omgevende kaslucht. Terwijl de RV van de omringende kaslucht overeenkwam met de RV in de grenslaag van de vruchten, lag de RV van de grenslaag van de bladeren duidelijk hoger (Figuur 3.3 rechts). Dit verschil wordt veroorzaakt door de verdamping, wat aansluit bij de gepubliceerde literatuur (Boulard *et al.* 2002). Het waargenomen verschil gold voor alle drie aardbeirassen over de hele aardbeicyclus voor bladeren (Figuur 3.4) en vruchten (Figuur 3.5).



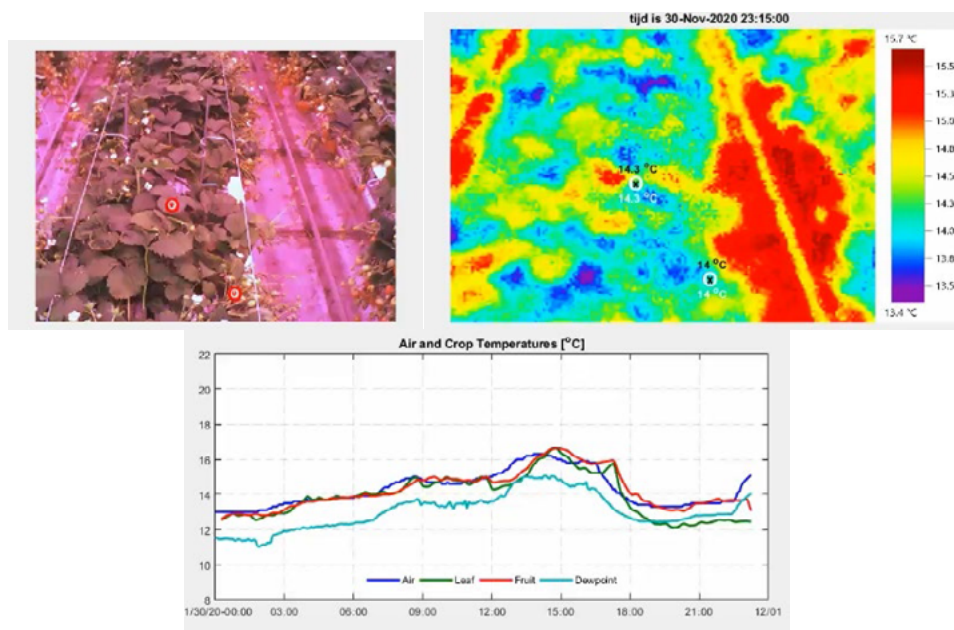
Figuur 3.4 De gemiddelde temperatuur in de kas (zwart) en in de grenslaag van het blad van drie aardbei rassen: Favori (groen), Murano (blauw), en Arabela (rood). Data zijn verkregen tijdens de productie periode van een jaar van augustus 2020 tot augustus 2021.



Figuur 3.5 De gemiddelde relatieve luchtvochtigheid in de kas (zwart) en grenslaag van vruchten van drie aardbei rassen: Favori (groen), Murano (blauw), en Arabela (rood). Data zijn verkregen tijdens de productie periode van een jaar van augustus 2020 tot augustus 2021.

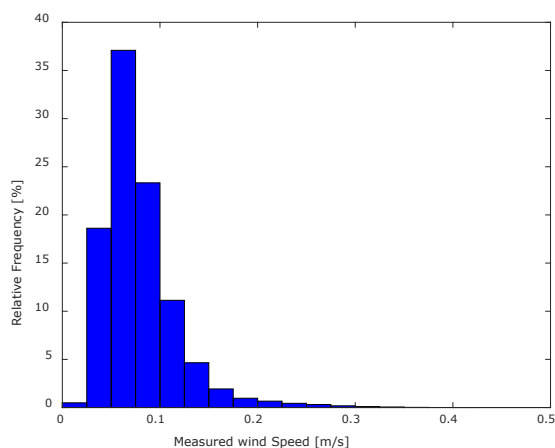
3.3.2 Gewastemperatuur en lichtsnelheid

Voor het berekenen van het microklimaat in de grenslaag zijn naast temperatuur en RV ook gewastemperatuur en lichtsnelheid van belang. De gewastemperatuur is ook belangrijk om te bepalen of condensatie en daardoor bladnatperioden kunnen optreden. Gewastemperatuur is gemeten met een infraroodcamera. Deze camera neemt echte (RGB) als ook infrarood (IR) foto's van het gewas. Voor identificatie van de in de IR foto's gemeten bladeren of vruchten zijn coördinaten gebruikt die afgeleid zijn uit de RGB foto's (Figuur 3.6). De temperatuur van bladeren en vruchten is vergeleken met de temperatuur in de kas en het dauwpunt. Ook uit deze metingen blijkt dat de temperatuur in de grenslaag van vruchten, voornamelijk in het midden van de dag, hoger ligt dan die van de omgevende kaslucht (Figuur 3.6). Het dauwpunt kwam in de latere avond onder de temperatuur van de grenslaag te liggen. In deze periode kan de temperatuur van de bladgrenslaag onder het dauwpunt uitkomen en daarmee een risico vormen voor condensatie met nat blad als gevolg.



Figuur 3.6 Representatieve data van infrarood camera metingen. RGB (boven links) en infrarood IR (boven rechts) foto's zijn gebruikt om de temperatuur van bladeren en vruchten te meten. Temperatuur van bladeren (groen) en vruchten (rood) is vergeleken met de temperatuur in de kas (donkerblauw) en het dauwpunt (lichtblauw).

Luchtsnelheidsmetingen werden gebruikt voor de berekening van de grenslaagdikte zoals in 3.2.1 beschreven. Voor de metingen zijn drie sonische anemometers gebruikt. De luchtsnelheid bleek in meer dan 80% van de meetperiode rond te 0.1 m s^{-1} te liggen (Figuur 3.7).

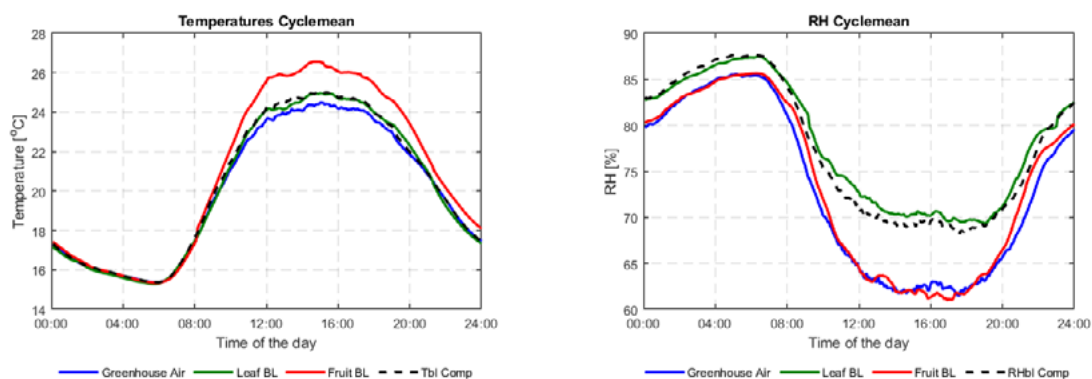


Figuur 3.7 Frequentie distributie van gemeten luchtsnelheden in de periode van begin mei 2020 tot midden augustus 2020.

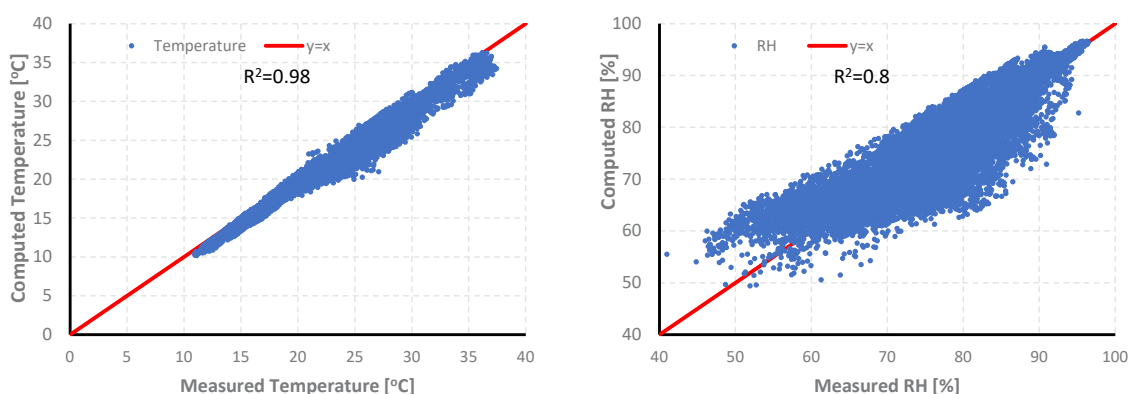
3.3.3 Berekening van het microklimaat in de grenslaag

Ervan uitgaand dat het microklimaat in de grenslaag een proces is dat alleen op experimenteel niveau kan worden gemeten, is er een poging gedaan om het microklimaat in de grenslaag van aardbeiblad en vrucht te berekenen op basis van het gemeten kasklimaat. Hiervoor werd een rekenkundig model gebruikt (Boulard *et al.* 2002). Dit model berekent het microklimaat (temperatuur en relatieve luchtvochtigheid) in de grenslaag als functie van (a) de afstand tot het blad- of vruchtoppervlak en (b) kasklimaatgegevens. Het model is vereenvoudigd en geldig onder een aantal aannames waaraan onder kasomstandigheden worden voldaan. De belangrijkste aanname is een lage luchtsnelheid rond het gewas die resulteert in een laminaire stroming.

Het aangepaste model is gekoppeld aan het kasklimaatmodel KASPRO (de Zwart, 1996). KASPRO simuleert het kasklimaat (temperatuur en RV), en de gewastemperatuur en de verdampingssnelheid die nodig zijn voor het grenslaagmicroklimaatmodel. Het kasklimaat en de gewastemperatuur worden gemeten. Door gebruik te maken van de submodellen van gewasverdamping en gewastemperatuur van KASPRO en deze te voeden met de gemeten kasgegevens was het mogelijk om het gemeten microklimaat in de grenslaag van aardbeienblad nauwkeurig te berekenen (Figuren 3.8, 3.9).



Figuur 3.8 Modelberekeningen (zwart gestippeld) en microsensen metingen van cyclisch gemiddelden (gemiddelde dag berekend over meerdere etmalen) van temperatuur (links) en relatieve luchtvochtigheid (rechts) in de kas (blauw), en in de grenslaag van aardbei blad (groen) en vrucht (rood).



Figuur 3.9 Scatter plot en lineaire regressie van temperatuur (links) en relatieve luchtvochtigheid (rechts) van model en gemeten waarden.

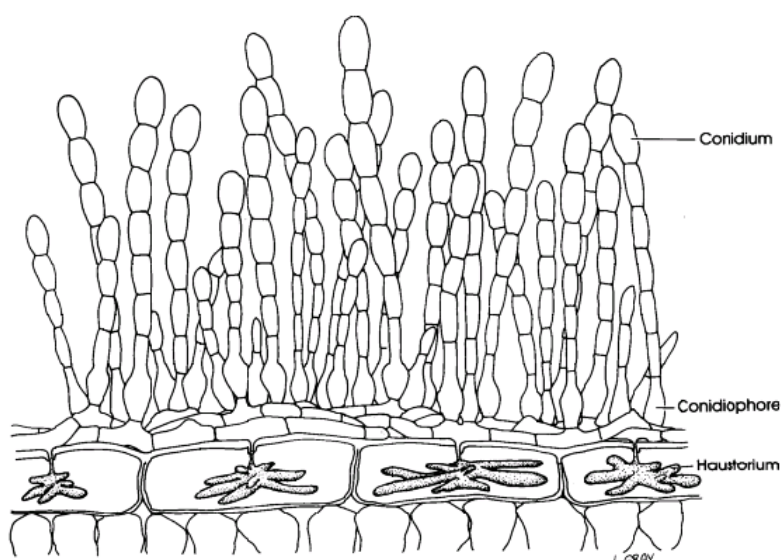
Het gemodelleerde microklimaat van temperatuur en RV in de grenslaag van het blad kwam goed overeen met de metingen van de microsensen zoals te zien is bij R^2 -waarden van respectievelijk 0,98 en 0,80 (Figuur 3.9). Dit maakt het mogelijk om het microklimaat in de grenslaag van blad te berekenen op basis van gemeten klimaatwaarden in de omgevende kaslucht. Dit betekent dat het microklimaat in de grenslaag van het blad gemonitord kan worden zonder dat specifieke microklimaatssensoren nodig zijn.

4 Effect van klimaat omstandigheden in de kas op de ontwikkeling van meeldauw

4.1 Meeldauw

Echte meeldauw op aardbei wordt veroorzaakt door *Podosphaera aphanis* (syn. *Sphaerotheca macularis*). Het is één van de belangrijkste ziekten in aardbei wereldwijd waardoor ernstige productie verliezen ontstaan. Echte meeldauw is een obligate, biotrofe schimmel die alleen op levende planten kan bestaan door zijn eigen voedingsstoffen uit de levende cellen van zijn waardplant te verkrijgen. Blad, bladstelen, stolonen, bloemen en vruchten kunnen worden aangetast.

Meeldauw wordt door sporen (conidia) die zich in de lucht bevinden van plant naar plant overgebracht. Als de sporen op een plant terechtkomen kunnen deze met een kiembuis gaan ontkiemen. De kiembuis dringt in de uiterste epidermiscellen door en vormt een haustorium, een orgaan om zich in de cel vast te maken en de voedingsstoffen van de cel op te nemen (Figuur 4.1). De gekiemde sporen groeien uit tot een vlechtwerk van schimmeldraden (mycelium) die als karakteristieke witte poederige vlekken op het gewas zijn waar te nemen. Vanuit het mycelium kunnen zich sporendragers (conidioforen) met nieuwe sporen vormen voor verdere verspreiding. Elke sporendrager kan 5 - 10 sporen bevatten.



Figuur 4.1 Kolonie van echte meeldauw. Bron: <http://ipm.illinois.edu/diseases/series400/rpd406/>.

De kiemkracht van meeldauw sporen en de ontwikkeling van nieuwe kolonies wordt bepaald door de omgevingsfactoren in de kas. Hierbij zijn temperatuur en relatieve luchtvochtigheid (RV) het meest relevant (de Gelder *et al.* 2021). Licht leek geen invloed op sporenkieming van aardbeimeeldauw te hebben (Periest 1962) terwijl Amsalem *et al.* (2006) opmerkten dat een straling van 7000 lux schadelijk was voor meeldauw ontwikkeling. Beide studies rapporteerden dat hoge RV's gunstig waren voor sporenkieming.

Om de invloed van temperatuur en RV op meeldauw ontwikkeling in aardbei te onderzoeken zijn deze twee omgevingsfactoren evenals meeldauwincidentie in de 2030 Demokas voor twee gewascycli gemonitord. Meeldauwincidentie is waargenomen op blad en vrucht.

4.2 Meeldauw scouting

4.2.1 Data verzameling

De ontwikkeling van meeldauw is één keer per week tijdens twee gewascycli (28.04.2020 tot 12.08.2020 en 02.09.2020 tot 11.08.2021) in Demokas 2030 gescout. Deze kas omvatte 20 goten met 3 verschillende aardbeirassen: Favori (resistent tegen meeldauw), Murano (gedeeltelijk resistent tegen meeldauw), en Arabella (gevoelig voor meeldauw). Op elke goot waren 19 velden met elk 8 planten die over het veld in twee rijen verdeeld waren: 4 planten links en 4 planten rechts. Er zijn twee typen scouting uitgevoerd: een algemene scouting en een gedetailleerde scouting. In de algemene scouting zijn besmette bladeren en vruchten waargenomen. In de gedetailleerde scouting is binnen de besmette vruchten gekeken of meeldauw op groene onrijpe of rode rijpe vruchten voorkomt als ook op vruchstelen. De algemene scouting is tot 2 oktober 2020 in alle velden uitgevoerd, maar daarna is overgegaan op scouten van alleen de oneven genummerde velden. Dit om de scouttijd te verkorten en toch een goede monitoring te kunnen uitvoeren. De gedetailleerde scouting is uitgevoerd vanaf januari 2021. Hiervoor zijn elk drie velden in 6 goten genomen bestaande uit goten 7 en 13 (ras Favori), goten 5 en 17 (ras Murano) en goten 9 en 15 (ras Arabella). De planten zijn per veld op meeldauw gescout waarbij de linker en de rechter kant van het veld apart gescout zijn. Meeldauw is als een score bepaald waarbij de score voor blad en vrucht apart maar op dezelfde manier is bepaald. De score loopt van 1 tot 4: 1 plant met 1 blad of vrucht met meeldauw geeft score 1; 2 planten met blad of vrucht met meeldauw geeft score 2; 3 planten met blad of vrucht met meeldauw geeft score 3; 4 planten met blad of vrucht met meeldauw geeft score 4.

4.2.2 Data analyse en visualisatie

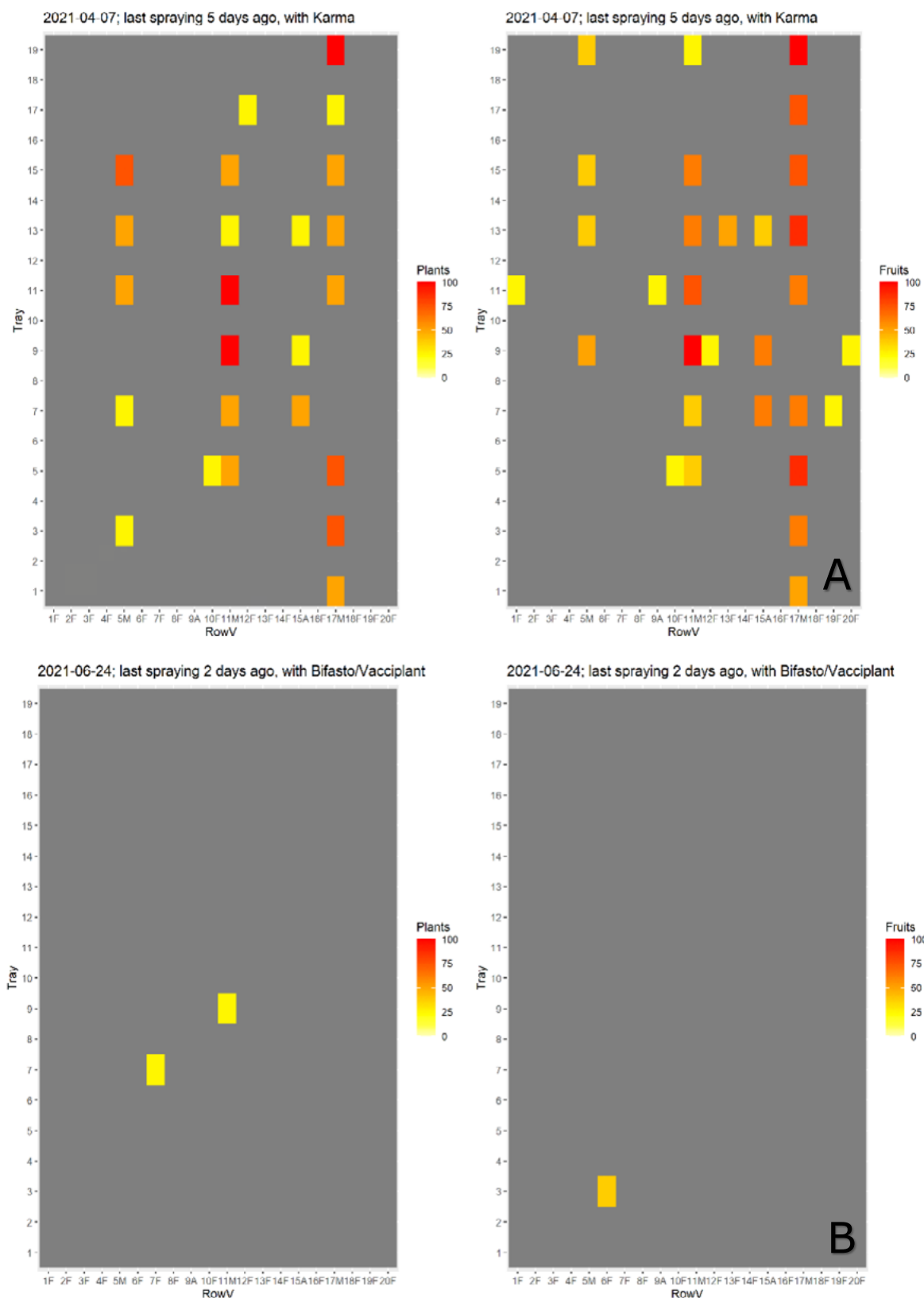
Op basis van de theoretische omstandigheden die gunstig zijn voor meeldauw is een analyse gemaakt van klimaatgegevens en meeldauwscores. Zoals in 4.1 beschreven bleek uit de literatuur dat een hoge RV in combinatie met een optimale temperatuur tussen 21-24°C bevorderlijk is voor meeldauwincidentie in aardbei. Aanwezigheid van meeldauw in de kas is voor blad en vrucht op basis van de algemene scouting gevisualiseerd aan de hand van een doorlopende kleurschaal van geel (0% infectie) over oranje (50 % infectie) naar rood (100 % infectie) (Figuur 4.2).

Tabel 4.1

Gunstige temperaturen en relatieve luchtvochtigheden voor meeldauwontwikkeling (de Gelder et al. 2021).

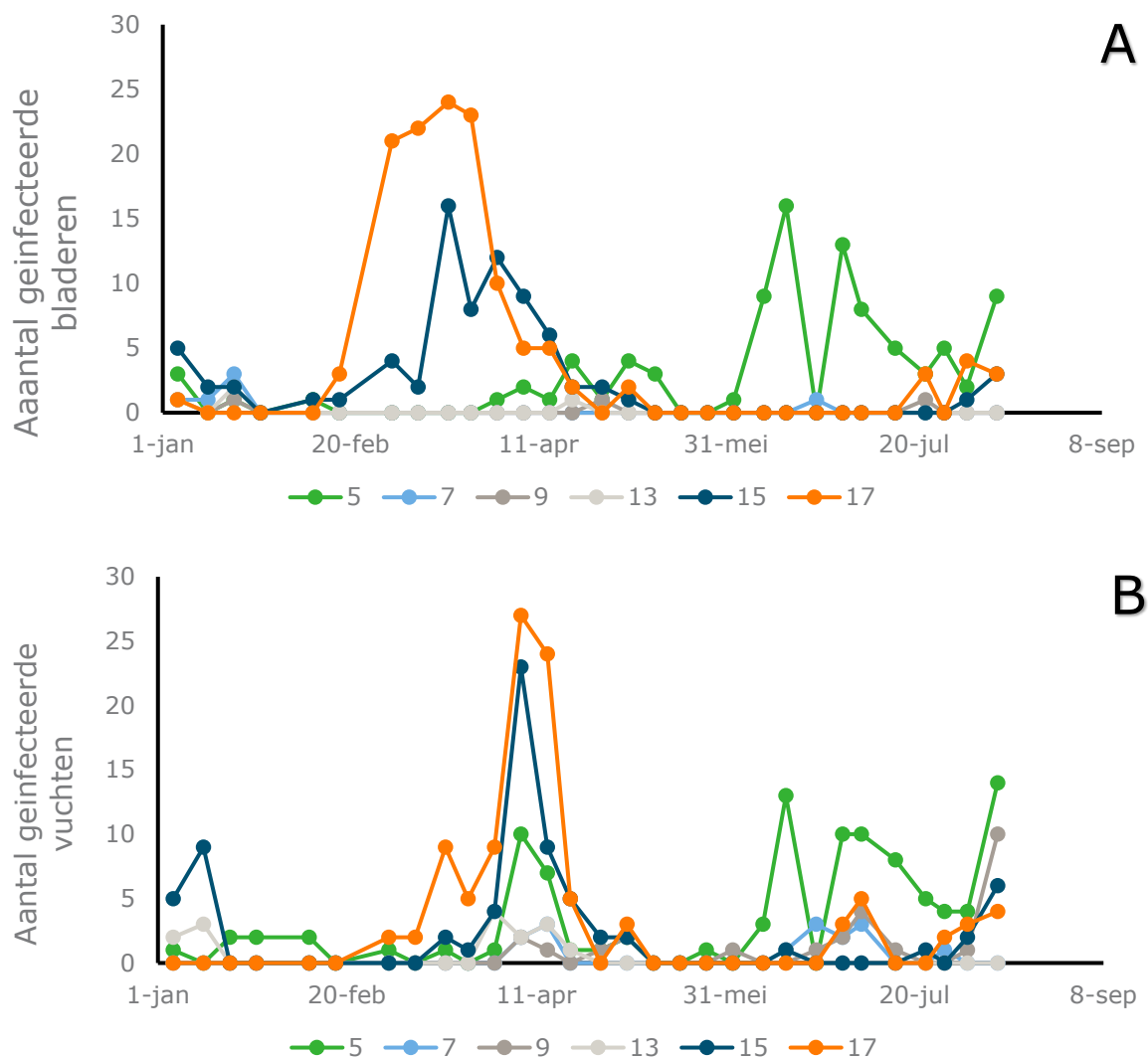
| Criteria | Klimaatomstandigheden | |
|----------|----------------------------|------------------|
| | Relatieve luchtvochtigheid | Temperatuur |
| 1 | > 90 % | |
| 2 | > 90 % | < 21°C en < 24°C |
| 3 | > 80 % | < 21°C en < 24°C |

Vervolgens is het aantal uren per dag geselecteerd wanneer het microklimaat in de grenslaag aan deze gunstige voorwaarden voldeed en gecorreleerd met de geobserveerde meeldauw incidentie. Helaas kon geen duidelijke correlatie tussen RV en temperatuur enerzijds en meeldauw incidentie op blad of vrucht anderzijds gevonden worden. Dit werd toegeschreven aan het gebruik van fungiciden. Omdat het doel in de Demokas 2030 een optimale aardbei productie was, was het helaas niet mogelijk om de meeldauw infectie helemaal vrij in de kas te laten ontwikkelen. Bij oplopende infectie is met verschillende fungiciden tegen meeldauw gespoten zoals: Abir, Bifasto, Fado, Flint, Frupica, Karma, Luna Privilege, Serenade, Sonata, Strobby, Taegro, Takumi, Vacciplant en Vivando. Hierdoor is de meeldauw ontwikkeling verschillende malen afgebroken. Wel laten de incidentie patronen zien dat een meeldauwinfectie vanuit een haard naar de omringende buurplanten overgaat in plaats van een willekeurige verspreiding in de kas.



Figuur 4.2 Voorbeelden van meeldauwincidentie op bladeren (links) en vruchten (rechts) in de 2030 kas op basis van een algemene scouting per goot: A) hoge meeldauwincidentie en B) lage meeldauwincidentie. Meeldauwincidentie wordt weergegeven als een doorlopende kleurschaal van geel (0% infectie) over oranje (50 % infectie) naar rood (100 % infectie).

Data uit de gedetailleerde scouting lieten het volgende zien (Fig. 4.3): Er is een duidelijk verschil in meeldauw gevoeligheid tussen de drie rassen waarbij de rassen Murano (rijen 5,17) en Arabella (rijen 9,15) duidelijk vatbaarder zijn dan FAVORI (rijen 7,13). FAVORI had nooit meer dan 3 geïnfecteerde bladeren tijdens de hele gewascyclus en vruchten raakten pas aan het einde van de teeltcyclus geïnfecteerd. De rassen Murano (rij 17) en Arabella (rij 15) vertoonden een piek in bladinfectie in maart, terwijl die voor vruchtinfectie in april was. In juni echter laat Murano een piek zien in meeldauwinfectie voor zowel bladeren als ook vruchten. Meeldauwinfectie gaat tussen de pieken terug naar 0 omdat bij oplopende meeldauw incidentie, zoals boven beschreven, fungiciden ter controle van meeldauw zijn ingezet. Toch lijkt meeldauw infectie na een tijdje weer op dezelfde plekken terug te komen. Dit geeft aan dat onder gunstige omstandigheden meeldauw ontwikkeling snel kan plaatsvinden onafhankelijk van ras en locatie in de kas.



Figuur 4.3 Meeldauwincidentie op A) blad en B) vrucht van aardbei in de Demokas 2030 op basis van gedetailleerde scouting van 3 verschillende rassen: FAVORI (goten 7,13) Murano (goten 5,17) en Arabella (goten 9,15).

4.2.3 Conclusies

Van de drie gescoute rassen was zoals verwacht en door de veredelaars en telers aangegeven inderdaad Favori het meest resistente en vertoonde het alleen meeldauwinfectie tegen einde van de teelt. Hoewel Arabella in de praktijk als meest gevoelige ras voor meeldauw aangezien wordt vertoonde Murano een vergelijkbare mate aan gevoeligheid.

Meeldauw infectie verspreidt zich vanuit een eerste infectiehaard naar de omgevende buurplanten in plaats van zich willekeurig in de kas te verspreiden.

Er werd geen duidelijke correlatie waargenomen van meeldauwincidentie met temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in het microklimaat. Dit is toe te schrijven aan het regelmatig gebruik van fungiciden om meeldauw te beheersen. Om dit probleem te vermijden is het nodig een klimaatkast experiment uit te voeren met set-points van temperatuur en relatieve luchtvochtigheden welke de meeldauw ontwikkeling remmen of bevorderen, gebaseerd op de verkregen kasdata.

5 Koppeling van kasklimaat aan kieming en ontwikkeling van echte meeldauw

5.1 5.1 Klimaatkast experimenten

Klimaatkasten hebben het voordeel dat ze volledig controleerbare klimatologische omstandigheden bieden. Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid (RV) als hoofdfactoren die de meeldauwkieming- en ontwikkeling beïnvloeden kunnen nauwkeurig ingesteld en constant gehouden worden. Zo kan het effect van deze twee factoren op meeldauw nauwkeurig worden bepaald. De temperatuur en relatieve luchtvochtigheid om te toetsen zijn gebaseerd op de voorafgaande metingen aan het microklimaat (hoofdstuk 3) en meeldauw scouting (hoofdstuk 4). Jonge en oude bladeren zijn met meeldauw geïnfecteerd. Om de meeldauw ontwikkeling in zijn geheel te volgen is voor meting van de kiemkracht een plek in het midden van het blad voor inoculatie gebruikt terwijl voor meting van het mycelium het hele blad is geïnoculeerd. Op deze manier konden specifieke destructieve microscopie metingen voor meeldauw uitgevoerd worden voordat uiterlijke symptomen zichtbaar waren.

5.1.1 Uitvoering

Alle proeven zijn uitgevoerd met het meeldauw gevoelige ras Arabella. Naast de gekozen temperaturen en relatieve luchtvochtigheden zijn 600 ppm CO₂, een lichtintensiteit van 150 µmol/m²/s en een daglengte van 14 uur aangehouden.

5.1.1.1 Experiment 1

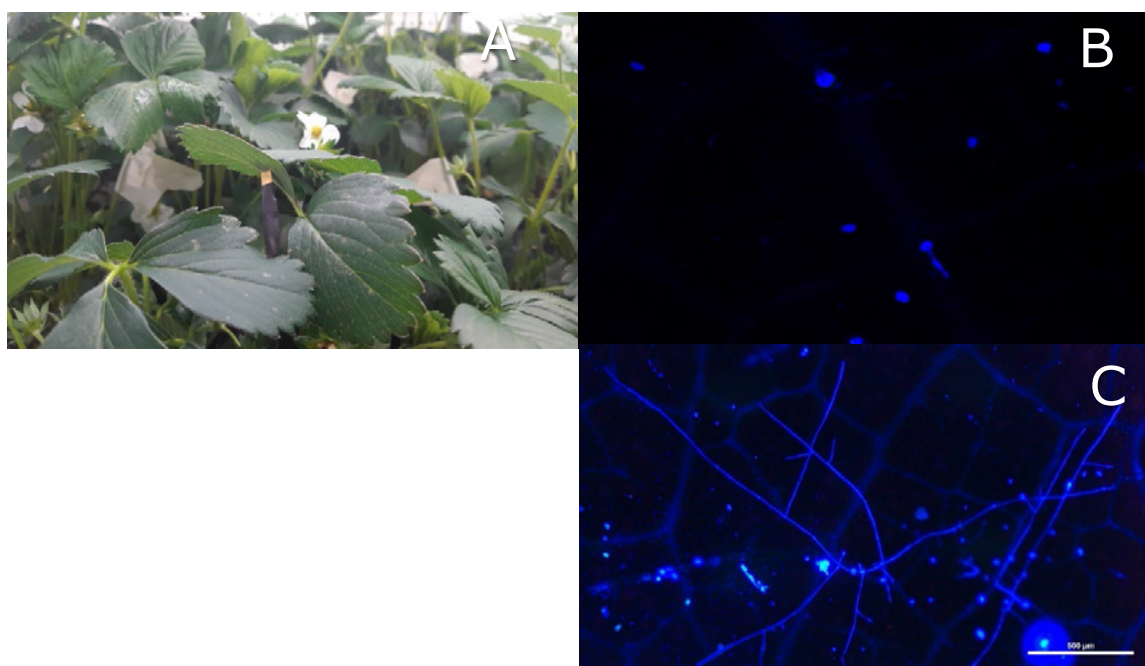
Voor het eerste experiment zijn de in Tabel 1 beschreven microklimaat omstandigheden gebruikt die gunstig of ongunstig zijn voor meeldauw ontwikkeling. Dit waren combinaties van verschillende temperaturen en relatieve luchtvochtigheden (proeven a-c). De gekozen microklimaat omstandigheden zijn gecontroleerd door microsensoren zoals beschreven in hoofdstuk 3 en te zien in Figuur 5.1A.

Tabel 1

Dag, nacht en dag/nacht gemiddelde temperaturen en relatieve luchtvochtigheden welke gunstig of ongunstig zijn voor meeldauw ontwikkeling zoals getoetst in de eerste set van klimaatkast experimenten.

| Proef | T(dag) °C | T (nacht) °C | T (gem.) °C | RV (dag) % | RV (nacht)% | RV (gem) % |
|----------------|-----------|--------------|-------------|------------|-------------|------------|
| a1 – ongunstig | 32,5 | 19 | 25,75 | 44 | 47 | 45,5 |
| a2 – gunstig | 30 | 18 | 24 | 50 | 69 | 59,5 |
| b1 – ongunstig | 32 | 18 | 25 | 50 | 60 | 55 |
| b2 – gunstig | 26,5 | 15 | 20,75 | 50 | 95 | 72,5 |
| c1 – ongunstig | 32 | 18 | 25 | 50 | 70 | 60 |
| c2 – gunstig | 26,5 | 15 | 20,75 | 50 | 82 | 66 |

Een week voor de proef zijn 16 aardbei planten in de klimaatkast gezet om deze aan het ingestelde microklimaat te laten wennen. Voor de meting van de kiemkracht is een bladtoets met pleksgewijze inoculatie gebruikt. Van 5 planten is een oud en een jong blad geplukt en op een bodem van 1% agar in een petrischaal geplaatst. Per blad is een bladoppervlak van 4 cm² geïnoculeerd. Hierbij zijn bladeren van planten licht ingewreven met verse meeldauwkoloniën uit onze aardbei meeldauwkweek. Bladoppervlak buiten de te infecteren 4 cm² is voor de inoculatie afgedekt. De petrischalen zijn in de klimaatkast geplaatst. Een dag (24 uur) na inoculatie is de kiemkracht als percentage gekiemde sporen met behulp van fluorescentiemicroscopie bepaald. Per telling zijn 100 sporen geteld (Figuur 5.1B). Data zijn geanalyseerd met ANOVA. Daarnaast is voor de myceliumontwikkeling een bladtoets met inoculatie van het hele blad gebruikt. Hiervoor is een jong blad van elk 10 planten door lichte wrijving met geïnfecteerd blad, geïnoculeerd. Myceliumgroei als de bladoppervlakte bedekt met mycelium is voor 5 planten drie dagen (72 uur) na inoculatie via fluorescentiemicroscopie bepaald (Figuur 5.1C). Hiervoor zijn de drie grootste meeldauw koloniën gemeten. Uiterlijk zichtbaar mycelium is 14 dagen na inoculatie gemeten. Data zijn geanalyseerd met ANOVA.



Figuur 5.1 Ontwikkeling van echte meeldauw: A) planten in de klimaatkast met de microsensor naast het blad B) sporen 24 uur na inoculatie, C) mycelium 72 uur na inoculatie.

Omdat door combinaties van verschillende temperaturen en RV's de invloed van deze twee factoren onafhankelijk van elkaar niet kon worden vastgesteld, is in een tweede set van experimenten gekozen voor een vaste temperatuur met verschillende relatieve luchtvochtigheden (proeven d-f2) of andersom (proeven f3 en e). Omdat de eerste set liet zien dat kiemkracht de bepalende factor voor meeldauw ontwikkeling was, is de focus van de tweede set op kiemkracht gelegd.

5.1.1.2 Experiment 2

Voor het tweede experiment zijn de in Tabel 2 beschreven microklimaat omstandigheden gebruikt die gunstig of ongunstig zijn voor meeldauw ontwikkeling. De gekozen microklimaat omstandigheden zijn gecontroleerd door microsensoren zoals beschreven in hoofdstuk 3.

Tabel 2

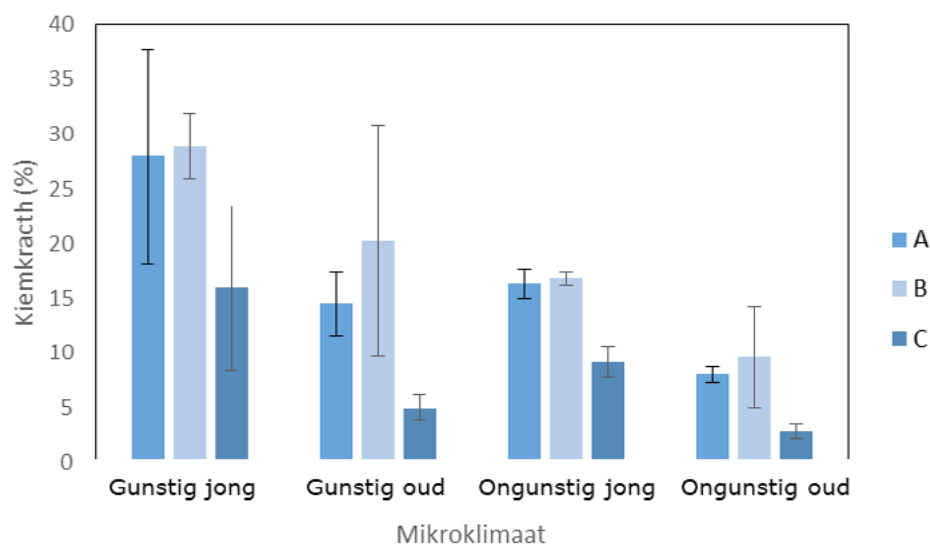
Dag, nacht en dag/nacht gemiddelde temperaturen en relatieve luchtvochtigheden welke gunstig of ongunstig zijn voor meeldauw ontwikkeling zoals getoetst in de tweede set van klimaatkast experimenten.

| Proef | T(dag) °C | T (nacht) °C | T (gem.) °C | RV (dag) % | RV (nacht)% | RV (gem.) % |
|-------|-----------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| d1 | 17 | 10 | 13,5 | 62 | 72 | 67 |
| d2 | 17 | 10 | 13,5 | 75 | 82 | 78,5 |
| e1 | 17 | 10 | 13,5 | 88 | 93 | 90,5 |
| e2 | 17 | 10 | 13,5 | 65 | 74,5 | 69,75 |
| f1 | 17 | 10 | 13,5 | 71,5 | 79,5 | 75,5 |
| f2 | 17 | 10 | 13,5 | 84,5 | 90 | 87,25 |
| f3 | 17 | 12 | 14,5 | 65 | 90 | 77,5 |
| e1 | 20,5 | 15,5 | 18 | 65 | 90 | 77,5 |
| e2 | 24 | 19 | 21,5 | 65 | 90 | 77,5 |
| e3 | 17 | 10 | 13,5 | 62 | 72 | 67 |

Kiemkracht als percentage gekiemde sporen is bepaald zoals hierboven beschreven voor de eerste set van klimaatkast proeven.

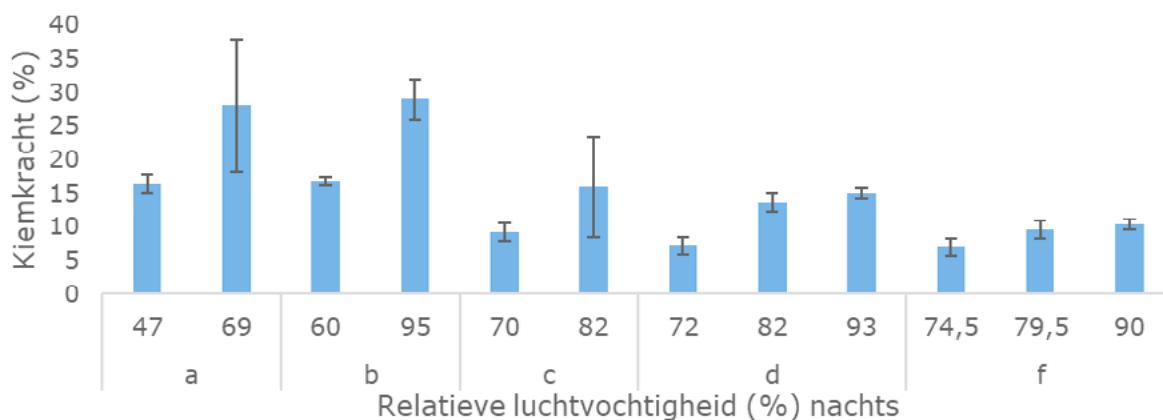
5.1.2 Resultaten

In de eerste set zijn duidelijke tendensen voor de kiemkracht van meeldauw waargenomen (Figuur 5.2). De kieming van meeldauwsporen op jong blad is in het algemeen dubbel zo hoog als die op oud blad. De als gunstig gekozen microklimaatomstandigheden leidden inderdaad tot een hogere kiemkracht. De kiemkracht neemt met toenemende relatieve luchtvochtigheid toe en temperaturen boven 30 °C lijken de kiemkracht te remmen.



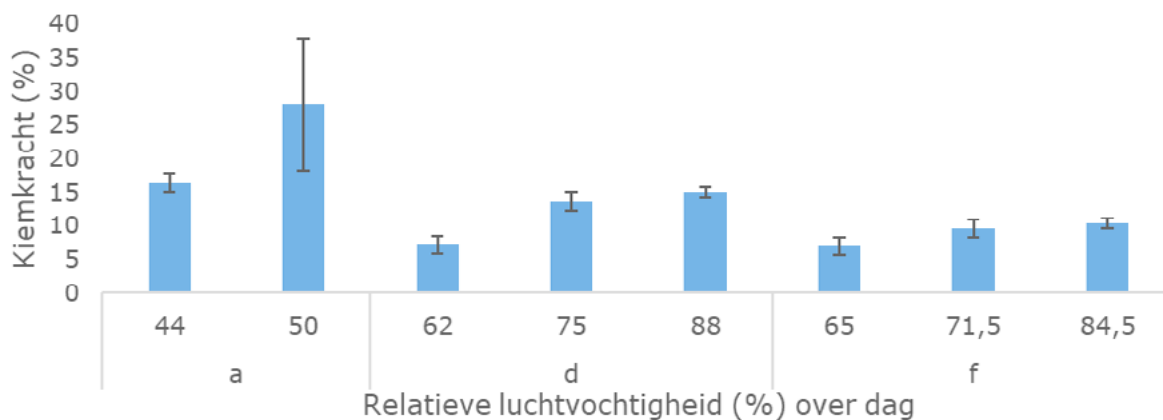
Figuur 5.2 Kiemkracht (%) van meeldauwsporen voor de eerste set klimaatkast experimenten. A, B en C representeren de gekozen microklimaat omstandigheden zoals beschreven in Tabel 1. Jong en oud staat voor oud en jong blad. Gegevens zijn gemiddelden met standaardfout.

Beide experimenten laten zien dat met de toename van de RV gedurende de nacht de kiemkracht toeneemt (Figuur 5.3). De kiemkracht lag tussen de 7% en 30%, waarden die lager waren dan de gemiddelde kiemkracht van 60% onder laboratoriumomstandigheden.



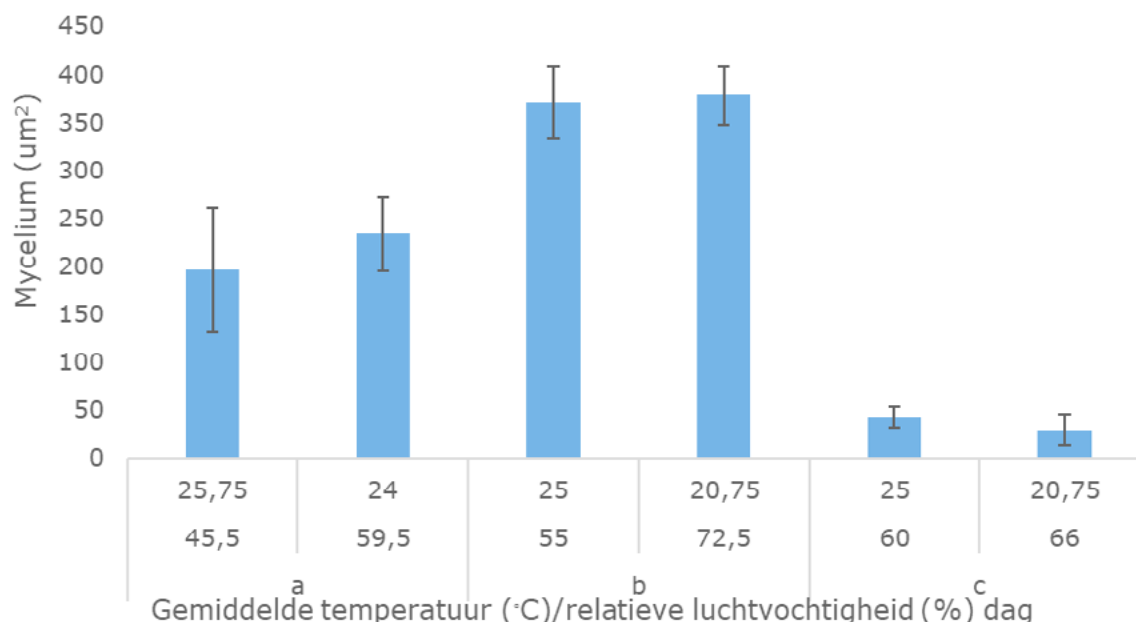
Figuur 5.3 Kiemkracht (%) van meeldauwsporen voor de gekozen microklimaat omstandigheden tijdens de nacht zoals beschreven in Tabellen 1 en 2: variabele temperaturen en relatieve luchtvochtigheden (a-c), constante temperaturen met variabele relatieve luchtvochtigheden (d) en constante relatieve luchtvochtigheden met variabele temperaturen (d-f). Gegevens zijn gemiddelden met standaardfout.

Een vergelijkbare tendens was ook waar te nemen voor de RV overdag (Figuur 5.4).



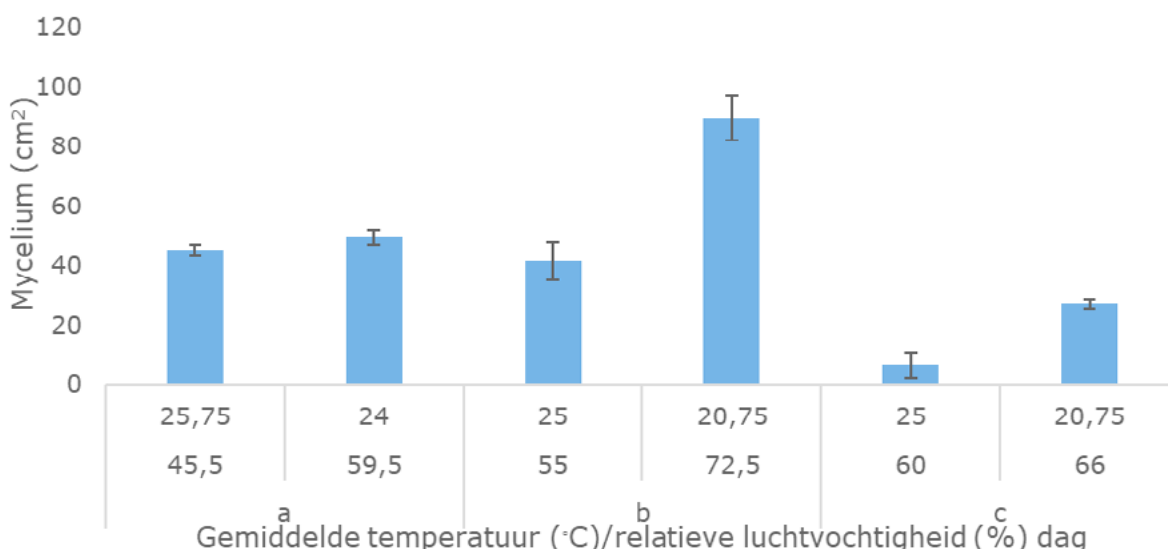
Figuur 5.4 Kiemkracht (%) van meeldauwsporen voor de gekozen microklimaat omstandigheden tijdens de dag zoals beschreven in Tabellen 1 en 2: variabele temperaturen en relatieve luchtvochtigheden (a), constante temperaturen met variabele relatieve luchtvochtigheden (d), en constante relatieve luchtvochtigheden met variabele temperaturen (f). Gegevens zijn gemiddelden met standaardfout.

De myceliumontwikkeling 72 uur na inoculatie liet geen toename bij hogere RV's zien (Figuur 5.5). Data analyse van RV per dagdeel (dus overdag of 's nachts) liet hetzelfde zien (data niet gepresenteerd).



Figuur 5.5 Myceliumgroei 72 uur na inoculatie voor de eerste set klimaatkast experimenten (a-c). zoals beschreven in Tabel 1. Gegevens zijn gemiddelden met standaardfout.

Visueel zichtbaar mycelium 14 dagen na inoculatie liet wel een toename met hogere RV's zien (Figuur 5.6). Data analyse van RV per dagdeel (dus overdag of 's nachts) liet hetzelfde zien (data niet gepresenteerd). Behalve voor behandeling a, was de mycelium ontwikkeling onder de als gunstig gekozen microklimaat omstandigheden inderdaad hoger vergeleken met de ongunstige omstandigheden.



Figuur 5.6 Uiterlijk zichtbaar myceliumgroei 14 dagen na inoculatie voor de eerste set klimaatkastexperimenten (a-c) zoals beschreven in Tabel 1. Gegevens zijn gemiddelden met standaardfout.

5.1.3 Conclusies

Er zijn verschillende tendensen in de uitgevoerde proeven naar kiemkracht van meeldauwsporen waargenomen:

- A. Bladleeftijd speelt een rol bij de kieming van sporen: op oud blad is de kieming van sporen lager dan op jong blad.
- B. Kieming van sporen neemt toe met de toename van de RV.
- C. Temperaturen boven 30°C lijken de kiemkracht van meeldauw sporen te remmen.

De ontwikkeling van individuele kolonies, 72 uur na inoculatie, was niet significant verschillend voor de verschillende microklimaten. Uit dit experiment blijkt dat verschillen in meeldauwontwikkeling hoofdzakelijk te wijten zijn aan het aantal gekiemde sporen dat de planten met succes infecteert.

De ontwikkeling van uiterlijk zichtbaar mycelium 2 weken na inoculatie, nam echter toe met een toename van de RV variërend van gemiddeld 46 tot 73%.

Daarmee lijkt voor meeldauw ontwikkeling de RV een belangrijkere factor voor het microklimaat te zijn dan de temperatuur. De RV beïnvloed vooral de sporenkieming, die het succes van meeldauwinfectie lijkt te bepalen. Het effect van RV op de groei van nieuwe meeldauw koloniën lijkt beperkt, terwijl het de latere zichtbare myceliumgroei wel beïnvloedt.

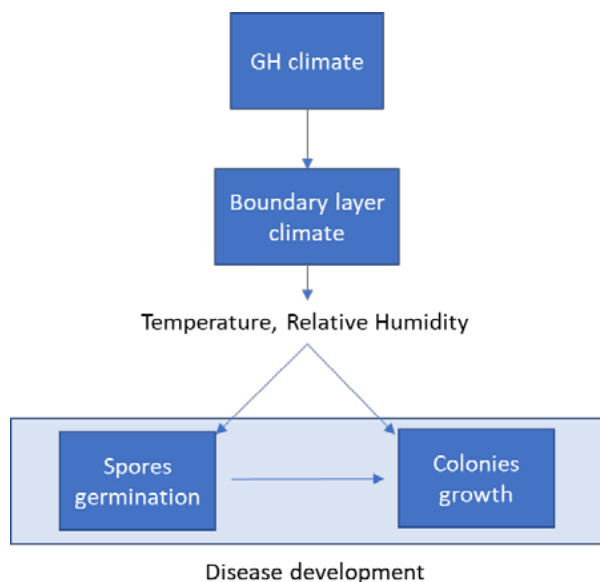
6 Modelling kiemkracht van meeldauw sporen aan hand van het kasklimaat

Er is een eerste uitwerking in een model benadering gemaakt om het kasklimaat met rekenregels te koppelen aan de kieming en de ontwikkeling van meeldauw op het blad. Rekenregels maken het mogelijk om bij het opstellen van de klimaatinstellingen expliciet rekening te houden met meeldauw, naast rekening te houden met energieverbruik en productie.

6.1 Modelbeschrijving

Bestaande rekenmodellen van schimmelziekten zijn of empirisch of mechanistisch van aard. In een empirisch model hangen de uitkomsten af van parameters die geen verband houden met de biofysische processen van, in dit geval, het systeem van de schimmelziekte. In een mechanistisch model, dat is gebaseerd op processen, is dit juist wel het geval. Mechanistische modellen worden als de beste keuze beschouwd om de relatie tussen de omgevingsfactoren en een ziekte te beschrijven (de Wolf en Isard, 2007). Mechanistische modellen kunnen erg complex zijn, zeker als er een ruimtelijke verdeling aan wordt toegevoegd (Boswell *et al.* 2003).

Het doel was om een verband te vinden tussen de omstandigheden in de kas en meeldauwinfectie op het aardbeigewas. Hierbij hebben we ons geconcentreerd op de temperatuur en luchtvochtigheid in de grenslaag zoals beschreven in 3.2. De modelkeuze werd bepaald door de volgende vereisten: (i) de behoefte aan een eenvoudig rekenmodel dat kan worden geïntegreerd met het bestaande Kaspro-Intkam model voor kasklimaat en gewasgroei, en (ii) het omvatten van de belangrijkste processen van de ontwikkeling van meeldauw. We kozen voor de gulden middenweg (Figuur 6.2), waarin kieming van meeldauwsporen en de groei van nieuwe kolonies werd beschreven.

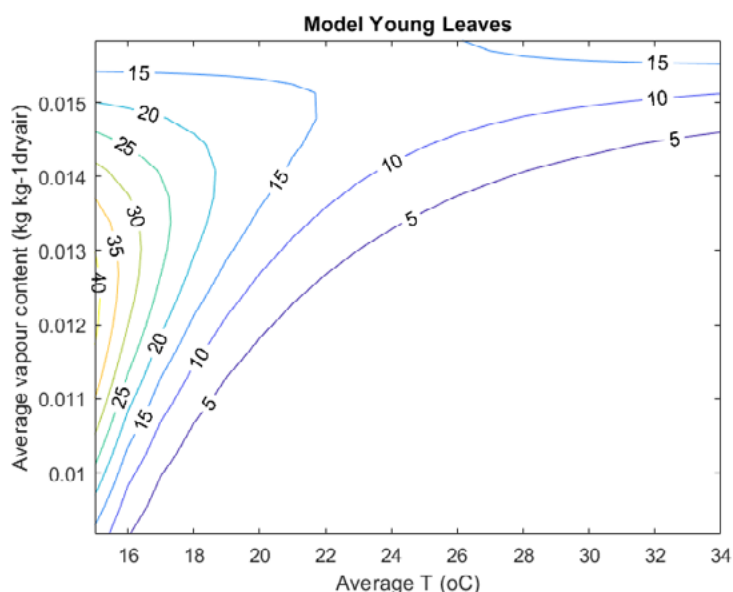


Figuur 6.1 Model concept van echte meeldauw ontwikkeling

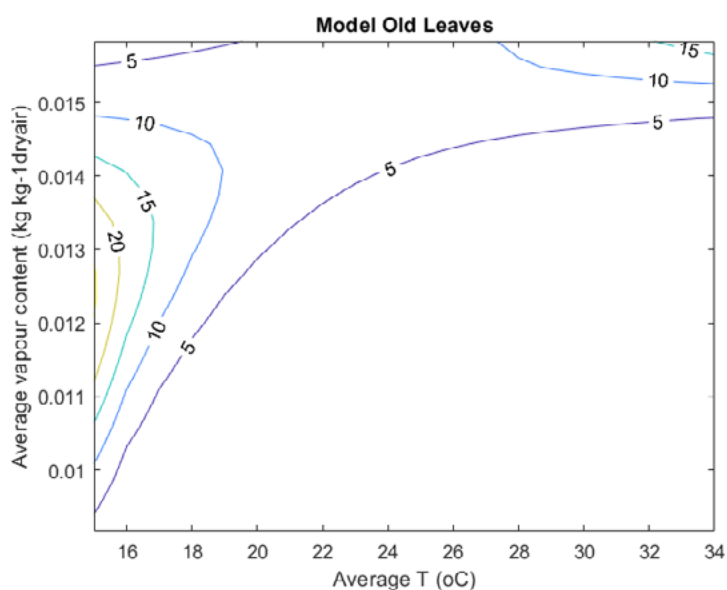
De eerste serie experimenten in de klimaatkast resulteerden niet in significante verschillen in de beginnende myceliumgroei van kolonies bij verschillende temperaturen en relatieve luchtvochtigheid (RV), wat leidde tot de conclusie dat sporenkieming het essentiële proces is. Daarom werd besloten alleen dit proces in rekenregels te vatten.

De kans op kieming werd beschreven op basis van de omstandigheden in de afgelopen 24 uur. Voor oud en jong blad werden de beste resultaten verkregen door de kieming te koppelen aan de som van de temperaturen ($^{\circ}\text{C}$) per uur en absolute luchtvochtigheden (kg water per kg lucht), en hun interactie. Na analyse van de kiemkrachtgegevens zijn meerdere lineaire regressiemodellen geselecteerd om het model te bouwen. Een uitgebreidere modelbeschrijving is bijgevoegd in bijlage 1.

Figuren 6.2 en 6.3 vertegenwoordigen modellen met de contourlijnen van de kiemkracht van meeldauw sporen op oud en jong blad respectievelijk gebaseerd op gemiddelde dagwaarden (som van dagwaarden gedeeld door 24). Deze twee gemodelleerde functies laten over het algemeen een vergelijkbare vorm zien. Wellicht ligt de kiemkracht van meeldauw sporen op jong blad hoger dan op oud blad. De modellen tonen aan dat er kritische waarden van temperatuur en absolute luchtvochtigheid nodig zijn om sporen te laten kiemen. De hoogste kiemkansen lijken gecorreleerd met een hoge luchtvochtigheid bij lage gemiddelde temperaturen.



Figuur 6.2 Model met de contourlijnen van de kiemkracht (%) van meeldauw sporen op jong blad volgens de gemiddelde dagtemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) en het gemiddelde lucht dampgehalte ($\text{kg} \cdot \text{kg}$ droge lucht $^{-1}$) lucht.



Figuur 6.3 Model met de contourlijnen van de kiemkracht (%) van meeldauw sporen op oud blad volgens de gemiddelde dagtemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) en het gemiddelde lucht dampgehalte ($\text{kg} \cdot \text{kg}$ droge lucht $^{-1}$) lucht.

Toepassing van deze gegevens in een meervoudig lineair regressiemodel resulteerde in een redelijke voorspelling van de kiemkracht (%) van meeldauw sporen bij zowel jong als oud blad met R^2 waarden van respectievelijk 0,49 en 0,62 (Bijlage 1). We zagen echter relatief grote standaardfouten (SE) van de modelparameters. Dit komt zowel door de grote variatie in gegevens als door de relatief kleine hoeveelheid waarnemingen. De waargenomen waarden van de logit getransformeerde waarschijnlijkheden leidde tot iets betere R^2 waarden van 0,66 voor jonge en 0,79 voor oud blad.

6.1.1 Conclusies

Er is een eerste uitwerking in een model benadering gemaakt om het kasklimaat met rekenregels te koppelen aan de kieming van meeldauw op het blad. Hiervoor zijn de data van de kiemkracht op jong en oud blad, gemeten in de klimaatkast experimenten, gebruikt. De grote variatie in gegevens gaf een relatief hoge onzekerheid, vooral bij het analyseren van de ruwe data om het beste model te bepalen. De som van de dagelijkse temperatuur en absolute luchtvochtigheid konden onze gegevens het best verklaren. De aangepaste meervoudige lineaire regressies hadden een redelijke voorspelbaarheid ondanks hun hoge variabiliteit. De modelleringstechniek lijkt veelbelovend als een eenvoudig hulpmiddel om de kiemkracht op basis van klimaatomstandigheden te voorspellen.

7 Discussie en conclusie

Er is een direct verband tussen de omstandigheden in de kas en de ontwikkeling van ziekten en daarmee tussen de energiebehoefte en ziektedruk. In dit verband hebben wij echte meeldauw als een van de belangrijkste ziekten van aardbei onderzocht. Daarbij is van belang dat de kieming van meeldauwsporen en de groei van het mycelium afhankelijk is van de omstandigheden in de grenslaag van bladeren en vruchten. Daarom hebben wij ten eerste de dikte van de grenslaag berekend en vervolgens het klimaat in deze grenslaag met microsensoren gemeten. Deze data zijn vervolgens gebruikt om op basis van het klimaat boven het gewas tot een berekening van het klimaat in de grenslaag van bladeren en vruchten te komen. Dit heeft een goed werkend model opgeleverd dat het voor de teler mogelijk maakt het microklimaat in de grenslaag te monitoren zonder microsensoren te hoeven plaatsen.

Vervolgens zijn de data aan de meeldauw incidentie in de kas gekoppeld. Helaas kon hier geen verband tussen het microklimaat en het voorkomen van meeldauw gevonden worden. Omdat een goede productie en vruchtkwaliteit belangrijk was binnen het project 'Kas2030 fossielvrij en emissieloos', is regelmatig met fungiciden tegen meeldauw gespoten en is daarmee de ontwikkeling van meeldauw grotendeels gestopt. Hoewel het voor het KaE onderzoeksprogramma wenselijk en handig is om verschillende onderzoeksrichtingen in een kas te combineren was het in ons geval ongunstig. Voor onderzoek naar de relatie van kasklimaat en de ontwikkeling van meeldauw is het belangrijk dat de meeldauw zich vrij door de kas heen kan ontwikkelen. Wel konden we vaststellen dat meeldauw zich van een beginnende haard naar de buurplanten verspreidt en niet willekeurig door de kas heen. Ook na een fungicidebehandeling kwam de meeldauw op sommige plekken terug. Dit is ook gezien in de verspreiding van meeldauw in roos (de Gelder *et al.* 2021) waar zich meeldauwhaarden ondanks fungicide behandelingen bleven handhaven. Daarom is ervoor gekozen klimaatkast experimenten uit te voeren met setpoints van temperatuur en relatieve luchtvochtigheden welke meeldauw ontwikkeling remmen of bevorderen, gebaseerd op de verkregen kasdata.

In de aardbeiteelt streeft men uit productie- en kwaliteitsoogpunt naar een groot verschil tussen de dag- en nachttemperatuur. Het gevolg hiervan is dat de relatieve luchtvochtigheid (RV) ook sterk varieert van hoog in de nacht tot laag tijdens de dag. Een lage RV van 70-75% tijdens de dag is ten tijde van bloei ook nodig om voor het vrijkomen van het stuifmeel en daarmee voor een goede bestuiving te zorgen. Uit onderzoek naar meeldauw incidentie in roos (de Gelder *et al.* 2021) leek een sterke variatie van RV helaas bevorderlijk voor de meeldauw: kieming vindt plaats bij een hoge RV en de ontwikkeling van mycelium bij een lagere RV. In tegenstelling hiermee blijkt uit onze gegevens dat voor meeldauw in aardbei een hoge RV zowel voor de kieming als ook de ontwikkeling van het mycelium gunstig is. Sporenkieming lijkt het belangrijkste proces voor meeldauwontwikkeling in aardbei in tegenstelling tot mycelium groei. Meeldauwsporen lijken heel gevoelig en kwetsbaar. Eenmaal gekiemd lijkt zich het mycelium zonder grote problemen te ontwikkelen. Dit zou kunnen verklaren waarom meeldauwsporen in heel grote getallen vrijkomen (de Gelder *et al.* 2021).

In de aardbeiteelt is een lage RV, zoals nagestreefd voor een goede bestuiving, dus gunstig om meeldauw ontwikkeling te voorkomen. Helaas laten onze metingen zien dat bij een dagtemperatuur van 17 °C, de kiemkracht als ook de myceliumgroei bij een RV van 70 -75% nog niet afneemt. Een afname van beiden is vanaf een RV van 65% waar te nemen. 's Nachts, bij een temperatuur van 10 °C worden kiemkracht en myceliumgroei onder een RV van 70% geremd. 's Nachts moet dan uit oogpunt van het tegengaan van meeldauwontwikkeling, de RV door ontvochtiging onder de 70% gehouden worden. Om klimaatsturing met meeldauwbeheersing te combineren moet dus zowel overdag als ook 's nachts de RV laag gehouden worden. Overdag en tijdens de nacht is een lagere RV nodig, waarvoor meer ontvochtiging nodig zou zijn. Sterke ontvochtiging gaat echter gepaard met veel energie gebruik als gewerkt wordt met een warmtepomp systeem, waardoor warmte vrijkomt die vaak niet nuttig kan worden ingezet.

Er is een eerste modelversie gemaakt om het kasklimaat met rekenregels te koppelen aan de kieming van meeldauw op het blad. Rekenregels maken het mogelijk om bij het opstellen van de klimaatinstellingen expliciet rekening te houden met meeldauw, naast rekening te houden met energieverbruik, productie en kwaliteit. Hiervoor zijn de data van de kiemkracht op jong en oud blad, gemeten in de klimaatkast experimenten, gebruikt. De grote variatie in gegevens gaf een relatief hoge onzekerheid van het modelleringsproces, vooral bij het analyseren van de ruwe data om het beste model te bepalen. De som van de dagelijkse temperatuur en luchtvochtigheid konden onze gegevens het best verklaren. De aangepaste meervoudige lineaire regressies hadden een redelijke voorspelbaarheid. De modelleringstechniek lijkt veelbelovend als een eenvoudig hulpmiddel om de kiemkracht op basis van klimaatomstandigheden te voorspellen. Voor dit onderzoek konden we een relatief breed scala van luchtvochtigheden testen, maar voor de temperatuur ontbreekt dit nog. Ook zouden naast de gebruikte indices voor luchtvochtigheden en temperatuur nog andere, zoals de som van de uren met een bepaalde luchtvochtigheid of temperatuur, voor het modelleringsproces gebruikt kunnen worden om het model te optimaliseren. Deze waarden zouden uit experimenten met een meeldauwinfectie die niet door bespuiting wordt beïnvloed in een kas of in klimaatkast experimenten vastgesteld kunnen worden. Om de variatie in gegevens te verminderen is het nodig het aantal herhalingen per meting te vergroten. Idealiter zou het model daarna kunnen worden geëvalueerd op nieuwe gegevens met verschillende klimatologische omstandigheden. Als alternatief zou een groot aantal herhalingen het gebruik van validatietechnieken mogelijk maken, zoals de k-voudige kruisvalidatie (Fushiki, 2011).

Het feit dat kieming volgens onze gegevens de belangrijkste factor is, leidt tot een behoefte aan meer kennis over dit biologische proces. Een beter begrip van het kiemproces en hoe het gerelateerd is aan de klimatologische omstandigheden kan tot een betere definitie van zowel de klimaatindexen als het experimentele ontwerp leiden. Ook zou de modellering uitgebreid moeten worden met de kieming van sporen op vruchten. In principe gelden dezelfde gunstige microklimaat omstandigheden voor kieming van sporen voor beiden: bladeren en vruchten. Wellicht zien we bij het ras Favori duidelijke verschillen in aantasting tussen bladeren en vruchten: bladeren zijn duidelijk minder geïnfecteerd vergeleken met de vruchten. We hebben verschillen in het microklimaat van bladeren en vruchten gemeten, die hoofdzakelijk met de verdamping van het blad te maken hadden. Deze verschillen hebben we in alle drie de rassen gevonden en het blijft de vraag of de hogere vatbaarheid van vruchten t.o.v. het blad in het ras Favori niet te maken heeft met de eigenschappen van het ras.

Literatuur

- Amsalem L, Freeman S, Rav-David D, Nitzani Y, Szejnberg A, Perto I, Elad Y (2006).
Effect of climatic factors on powdery mildew caused by *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragariae* on strawberry. *European Journal of Plant Pathology* 114:283–292.
- Asalf B, Gadoury DM, Tronsmo AM, Seem RC, Dobson A, Peres NA, Stensvand A (2014).
Ontogenetic resistance of leaves and fruit, and how leaf folding influences the distribution of powdery mildew on strawberry plants colonized by *Podosphaera aphanis*. *Phytopathology* 104: 9554-963.
- Boswell GP, Jacobs H, Gadd GM, Ritz K, Davidson FA (2003).
A mathematical approach to studying fungal mycelia. *Mycologist* 17:165–171.
- Boulard T, Fatnassi H, Roy JC, Lagier J, Fargues J, Smits N, Rougier M, Jeannequin B (2004).
Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer. *Agric. For. Meteorology* 125: 225-239.
- Boulard, T, Mermier M, Fargues J, Smits N, Rougier M, Roy JC (2002).
Tomato leaf boundary layer climate: implications for microbiological whitefly control in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 159-176.
- Campen, J.B., F.L.K. Kempkes, en A.A. Sapounas, (2008).
Klimaat “Kas zonder Gas”. Wageningen UR Glastuinbouw Rapport GTB-1001.
- Carisse O, Lefebvre A. van der Heyden H, Roberge L, Bordeur L (2013).
Analysis of incidence-severity relationships of strawberry leaves and berries to infection by *Podosphaera aphanis*. *Plant Disease* 97: 354-362.
- Carisse O, Bouchard J (2010).
Age – related susceptibility of strawberry leaves and berries to infection by *Podosphaera aphanis*. *Crop Protection* 29: 969-978.
- Defraye T, Derome D, Verboven P, Carmeliet C, Nicolai B (2014).
Cross-scale modelling of transpiration from stomata via the boundary layer. *Annals of Botany* 114: 711-723.
- de Gelder A, Warmenhoven M, van der Stoep R, Hartog B, Bac-Molenaar J, Khanh P, Leiss K (2021).
Perfekte rozen onder LED en meeldauw monitoring. Wageningen UR Glastuinbouw Rapport
- de Gelder A, Campen J, Elings A, Stanghellini C, E. Meinen E. (2006).
Luchtcirculatie en productie. PPO rapport 41616052.
- de Wolf ED, Isard SA (2007).
Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annual Review of Phytopathology* 45 203–220.
- de Zwart HF (1996).
Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD proefschrift, Landbouwniversiteit Wageningen, 236 p.
- Fatnassi H, Boulard T, Poncet C, Bartzanas T, Katsoulas N, Kacira M, (2014).
CFD modelling of microclimate in the leaf boundary layer, ecological niche of pests. *Acta Horticulturae* 1037: 1027-1034.
- Leigh A, Sevanto S, Close JD, Nicotra AB (2017).
The influence of leaf size and shape on leaf thermal dynamics: does theory hold up under natural conditions? *Plant, Cell and Environment* 40: 237-248.
- Nobel PS (1975).
Effective thickness and resistance of the air boundary layer adjacent to spherical plant parts. *Journal of Experimental Botany* 26: 120-130.
- Mascellani A, Leiss KL, Bac-Molenaar J, Malanik M, Marsik P, Hernandez Olesinski E, Tauchen J, Kloucek P, Smejkal K, Havlik J (2022).
Polyketide derivatives in the resistance of *Gerbera hybrida* to powdery mildew. *Frontiers in Plant Science* 12: article 790907.
- Mouden S, Bac-Molenaar J, Kappers I, Beerling E, Leiss KA (2021).
Elicitor application in strawberry results in long-term increase of plant resilience without yield loss. *Frontiers in Plant Science* 12: article 695908.
- Periest B (1962).
Studies on strawberry mildew, caused by *Sphaerotheca macularis* (Wallr. ex Fries) Jaczewski. *Annual Applied Biology* 50: 211-224.

- Saudreau M, Ezanic A, Adam, Caillon R, Walser P, Pincebourde S (2017).
Temperature heterogeneity over leaf surfaces: the contribution of the lamina microtopography. *Plant, Cell and Environment* 40: 2174-2188.
- Suthaparan, A, Pathak R, Solhaug KA, Gislerød H R (2018).
Wavelength dependent recovery of UV-mediated damage: Typing up the loose ends of optical based powdery mildew management. *J Photochemistry & Photobiology* 178: 631-640.
- Suthaparan A, Stensvand A, Solhaug KA, Torre S, Mortensen LM, Gadoury DM, Seem RC (2012).
Suppression of powdery mildew (*Podosphaera pannosa*) in greenhouse roses by brief exposure to supplemental UV-B radiation. *Plant Disease* 96: 1653-1660.
- Suthaparan, A, Pathak R, Solhaug KA, Gislerød H R (2018).
Wavelength dependent recovery of UV-mediated damage: Typing up the loose ends of optical based powdery mildew management. *J Photochemistry & Photobiology* 178: 631-640.
- Stanghellini C (1987).
Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. PhD proefschrift, Landbouwniversiteit Wageningen, 150 p.

Bijlage 1 Modelbeschrijving

Het model is opgesteld om de kiemkracht van meeldauw sporen op basis van klimatologische gegevens in de grenslaag van blad gemeten door microsensoren te bepalen. Met dit model is getracht een relatie te vinden tussen kiemkracht en temperatuur en het watergehalte in de lucht. Na analyse van kiemkrachtgegevens zijn meerdere lineaire regressiemodellen geselecteerd om het model te bouwen. Een meervoudig lineair regressiemodel is een statistisch model dat een lineaire relatie definieert tussen een uitvoervariabele – of responsvariabele – en meerdere invoervariabelen die ook wel verklarende variabelen worden genoemd. In ons geval voorspelt het model de kans op kieming P (%) van de meeldauwsporen op basis van de klimaatomstandigheden in de voorgaande 24 uur. Gebaseerd op de temperatuur T (°C) en de absolute vochtigheid of waterdampgehalte van de droge lucht AV ($\text{kg waterdamp} \cdot \text{kg droge lucht}^{-1}$), definieerden we een lineair verband tussen de kans op kieming en twee verschillende aggregatie-indexen van T en AV . Als eerste selecteerden we de indices $It-24t_a(T)$ en $It-24t_a(AV)$, overeenkomend met de dagelijkse som van temperatuur en absolute luchtvochtigheid. Dit model maakt daarmee gebruik van de absolute luchtvochtigheid, en niet van de relatieve luchtvochtigheid, omdat dit een sterkere verklarend factor bleek te zijn. Om het model operationeel te maken, kan de absolute luchtvochtigheid worden afgeleid uit de relatieve luchtvochtigheid en de luchttemperatuur. We selecteerden de interacties tussen de twee indices voor het meervoudig lineaire model met een trial and error-benadering, waarbij we het beste model kozen volgens de AIC-parameter (Akaike Information Criterion). Omdat de kans op kieming gemeten is aan de hand van de frequenties van gekiemde sporen van een bepaald sporenmonster, waren de data niet normaal verdeeld. Daarom is de logittransformatie van de responsvariabele P gebruikt.

Het model dat de gegevens het beste beschreef en niet al te complex was, was het volgende:

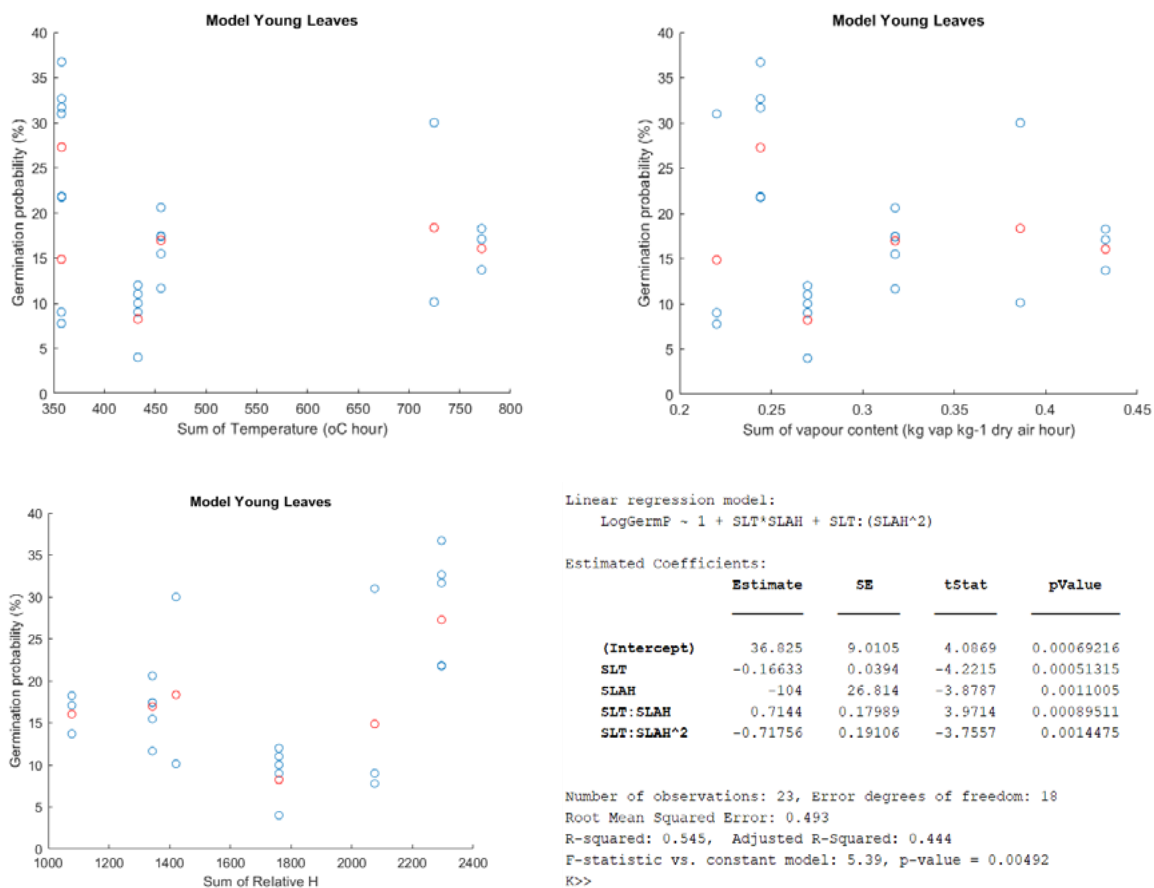
$$\text{Logit}(Pt) = \text{Logit}Pt = b_0 + b_1 \cdot It-24t_a(T) + b_2 \cdot It-24t_a(AV) + b_3 \cdot It-24t_a(AV) \cdot It-24t_a(T) + b_4 \cdot It-24t_a(AV)^2 \cdot It-24t_a(T) + \varepsilon t$$

εt is de voorspelling error.

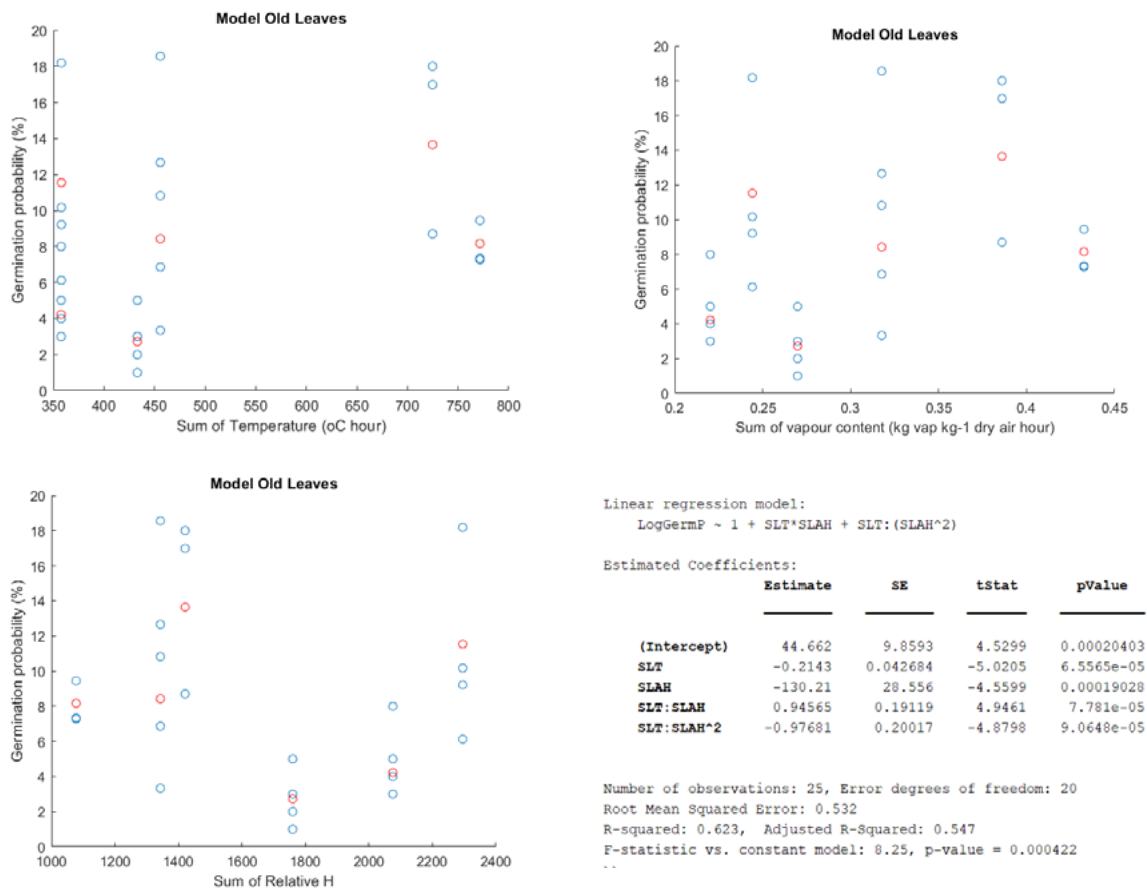
Om Pt af te leiden uit $\text{logit}pt$ passen we de inverse van de logittransformatie als volgt toe:

$$Pt = 1/(1+\exp(-\text{Logit}(Pt))).$$

Toepassing van onze gegevens in dit meervoudig lineair regressiemodel resulteerde in een redelijke voorspelling van de kiemkracht (%) van meeldauw sporen bij zowel jong (Figuur 1.1) als oud blad (Figuur 1.2). met R^2 waarden van respectievelijk 0,49 en 0,62. We zagen echter relatief grote standaardfouten (SE) van de modelparameters. De RMSE van ongeveer 0,5 van beide modellen was van dezelfde orde van grootte als die van de standaarddeviatie van de waargenomen waarde van de logit getransformeerde waarschijnlijkheden (0,66 voor jong en 0,79 voor oud blad). Dit komt zowel door de hoge datavariabiliteit als door de relatief kleine hoeveelheid waarnemingen.



Figuur B1.1 Waargenomen (blauwe cirkels) en voorspelde (rode cirkels) waarden van kiemkracht (%) van meeldauw sporen op jong blad, geprojecteerd in de assen van de som van temperatuur (linksboven), de som van het waterdampgehalte (rechtsboven) en de som van relatieve vochtigheid (linksonder). Specificaties modelstatistieken (rechtsonder) waaronder SLT: dagelijkse som van de grenslaagtemperatuur, SLAH: dagelijkse som van de absolute vochtigheid van de grenslaag. SLT:SLAH en SLT:SLAH² vertegenwoordigen de interactie tussen deze twee indexen.



Figuur B1.2 Waargenomen (blauwe cirkels) en voorspelde (rode cirkels) waarden van kiemkracht (%) van meeldauw sporen op oud blad, geprojecteerd in de assen van de som van temperatuur (linksboven), de som van het waterdampgehalte (rechtsboven) en de som van relatieve vochtigheid (linksonder). Specificaties modelstatistieken (rechtsonder) waaronder SLT: dagelijkse som van de grenslaagtemperatuur, SLAH: dagelijkse som van de absolute vochtigheid van de grenslaag. SLT:SLAH en SLT:SLAH² vertegenwoordigen de interactie tussen deze twee indexen.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1168

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.