Vroege detectie kiepers in tulp met hyperspectrale camera

Verkenning van mogelijkheden om met behulp van een hyperspectrale camera kiepers in tulpen vroegtijdig te detecteren

Jeroen Wildschut, John Trompert, Martin van Dam, Selwin Hageraats en Sjoerd van Vilsteren

Rapport WPR-1074

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit

Referaat

Zeker nu de meerlagenteelt in tulpenbroei in opkomst is, blijft het ontvochtigen van de lucht één van de grootste kostenposten qua energie. Een te hoge luchtvochtigheid in de kiepgevoelige fase van de teelt zorgt ervoor dat tulpen op een later moment zullen omvallen door een gebrek aan stevigheid (kiepen). Er is in de afgelopen 8 jaar al veel onderzoek gedaan naar de achterliggende factoren van kiepen. Verschillen treden op tussen o.a. cultivars, partijen, koeling, kastemperatuur of bemesting. Zodra de eerste symptomen van kiepers met het blote oog zijn waar te nemen is het kiepen in later stadium onvermijdelijk. Het sneller detecteren van kiepers binnen het teeltproces zou wellicht een uitkomst bieden. Daarom heeft WUR de mogelijkheden van spectraalcamera's verkend, om kiepers eerder te kunnen detecteren. Metingen bij 'Purple Prince' en 'Strong Gold' lieten zien, dat camera's al na 4-5 dagen kunnen zien dat tulpen bij hoge RV zijn gebroeid, terwijl dat met het blote oog pas na 8 dagen kon worden vastgesteld.

Abstract

Keeping humidity below <80% in the forcing of tulips prevents flowers from losing solidity and tipping over in a later stage. However, much energy is needed for dehumidification. Previous research has shown that there are differences in timing that tulips are susceptible to tipping between varieties, batches, temperature treatment, greenhouse conditions and fertilization. As soon as the first symptoms of tippers can be observed with the naked eye, tipping at a later stage is unavoidable. Faster detection of tippers within the cultivation process might offer a solution. That is why WUR has explored the possibilities of spectral cameras, which are expected to be able to detect tippers earlier. Measurements at 'Purple Prince' and 'Strong Gold' showed that cameras can already see after 4-5 days that tulips have been grown at high RH, while a trained observer sees the first symptoms only after 8 days.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1074

Projectnummer: 3742 3100 00

DOI: <https://doi.org/10.18174/554346>

Thema: Bloembollen

Dit project is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door de partijen in de Meerjarenaafpraak energie Bloembollen (KAVB, Min. LNV, RVO.nl en telers).

Disclaimer

© 2020 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw - Bollen

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 - Bloembollen

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Werkwijze	9
	2.1 Metingen	9
	2.2 Analyse	9
3	Resultaat	11
	3.1 Spectrale metingen	11
	3.2 Verkenning <i>handheld</i> spectrometer of miniatuurspectrometer	16
4	Conclusie en discussie	19
5	Aanbevelingen	21
	5.1 Bestuderen aanpak <i>handheld</i> spectrometer of miniatuurspectrometer	21
	5.2 Vergroten dataset cultivars	21
	5.3 Verkenning beperken kiepers na vroege detectie	22
	5.4 Inzicht in de achtergrond van kieproces	22
	Literatuur	23

Samenvatting

In de broei van tulpen wordt steeds vaker gestreefd naar een klimaat neutrale productie. Tegelijkertijd is blad- en stengelkiep nog altijd één van de grootste problemen in de broeierij, welke met voldoende ventilatie van droge (warme) lucht kan worden voorkomen. Het efficiënt inzetten van deze ventilatie met droge lucht tijdens de broei kan uiteindelijk bijdragen aan een lager energieverbruik. Tevens is het de verwachting dat de meerlagenteelt van tulp in de toekomst alleen maar verder toeneemt waarbij ventilatie een steeds grotere uitdaging wordt en het ontvochtigen van de lucht nog meer energie zal vragen. Gemiddeld staan de tulpen tijdens broei 20 dagen in de kas voordat ze worden geoogst. Uit voorgaand onderzoek is gebleken dat in de middelste periode (2^e week), de meeste strekking optreedt. Dit blijkt tevens de kiepgevoelige fase te zijn: als in deze fase de RV te hoog is, is er een groot risico op kiepen (Wildschut, 2016). Het is van groot belang dat in die fase de tulpen voldoende kunnen verdampen om zodoende voldoende calcium vanuit het voedingswater in de plant te krijgen. Bij een calciumtekort in de plant kan blad- en stengelkiep ontstaan.

Wanneer de kiepgevoelige fase precies begint en eindigt, verschilt onder andere tussen cultivars, partijen, seizoenen, temperatuurbehandelingen, kasomstandigheden en bemesting (Wildschut *et al.* 2021). Als met het menselijk oog de eerste symptomen kunnen worden waargenomen, is het al te laat en zullen de tulpen gaan kiepen ongeacht de RV tijdens de rest van de broei. Een snellere detectie kan wellicht uitkomst bieden. Wageningen University & Research BU Glastuinbouw en Bloembollen heeft in opdracht van de partijen uit de Meerjarenaafpraak Energie Bloembollen een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden van spectraalcamera's voor vroege detectie.

Middels een tweetal spectraalcamera's is een serie metingen verricht aan kratten met (voor waterbroei) opgeplante en voor-bewortelde tulpen van cultivars Purple Prince en Strong Gold. Deze twee camera's maken spectrale beelden waarbij voor iedere pixel een reflectiespectrum opgenomen wordt. Voor de ene camera (imec Snapscan VNIR) is dit in het golflengtegebied 470-900 nm, terwijl dit voor de andere camera (imec Snapscan SWIR) is in het golflengtegebied 1000-1670 nm. Deze absorptiespectra kunnen gebruikt worden om subtiële kleurverschillen te detecteren die niet zichtbaar zijn voor het menselijk oog. De verwachting daarom is dat op basis van spectrale beeldvorming tulpen die drien te gaan kiepen eerder opgespoord kunnen worden door middel van spectrale beeldvorming dan mogelijk zou zijn met het blote oog.

De complete dataset is opgenomen over een periode van zestien dagen, waarbij de eerste meetdag heeft plaatsgevonden één dag nadat de tulpen in de kas zijn geplaatst (29 maart, 2021). Iedere dag zijn spectrale beelden opgenomen van de voor- en achterkant van twee kratten Purple Prince en twee kratten Strong Gold. Van elke cultivar is één krat telkens in een vochtige (RV ~100%), onvoldoende geventileerde omgeving gehouden, terwijl de andere krat in een goed geventileerd omgeving is gehouden met een gunstigere (lagere) luchtvochtigheid (RV <80%).

Het blijkt mogelijk om op basis van deze spectrale beelden modellen te trainen die, op basis van een nieuw opgenomen spectraal beeld, vast kunnen stellen of deze tulpen in een omgeving met te hoge of voldoende lage RV zijn gehouden tijdens waterbroei. In dit onderzoek is gebleken dat dit al na enkele dagen van het begin van de waterbroei met 100% zekerheid kan worden vastgesteld. Dit suggereert sterk dat spectroscopie een waardevolle methode zou kunnen zijn voor het vroeg detecteren van tulpen die dreigen te kiepen. Dit terwijl met het menselijk oog de eerste symptomen pas op dag 6 gedetecteerd kunnen worden, en het kiepen pas begint tussen dag 9 en 13. Met name de spectraalcamera die data opneemt in het Vis-NIR golflengtegebied kan volgens dit onderzoek gekalibreerd worden om met grote nauwkeurigheid tulpen te onderscheiden die voldoende en onvoldoende geventileerd zijn.

Voor vervolgonderzoek wordt aanbevolen om te verkennen of het ook daadwerkelijk mogelijk is om het kiepen te voorkomen door de RV te verlagen op basis van detectie door spectroscopie, en of er hierbij verschillen zijn tussen cultivars. Voor de implementatie van dergelijke metingen in de praktijk, bieden *handheld* spectrometers of miniatuurspectrometers mogelijkheden. Om een dergelijke aanpak te testen zal eerst een grote dataset verzameld moeten worden met één van deze sensoren, op een vergelijkbare manier als nu is gedaan met de spectraal camera's.

1 Inleiding

In de broei van tulpen wordt steeds vaker gestreefd naar een klimaatneutrale productie. Tegelijkertijd is blad- en stengelkiep nog altijd één van de grootste problemen in de broeierij, welke met voldoende ventilatie van droge (warme) lucht kan worden voorkomen. Het efficiënt inzetten van deze ventilatie met droge lucht tijdens de broei kan uiteindelijk bijdragen aan een lager energieverbruik. Tevens is het de verwachting dat de meerlagenteelt van tulp in de toekomst alleen maar verder toeneemt waarbij ventilatie een steeds grotere uitdaging wordt en het ontvochtigen van de lucht nog meer energie zal vragen. Gemiddeld staan de tulpen tijdens broei 20 dagen in de kas voordat ze worden geoogst. Uit voorgaand onderzoek is gebleken dat in de middelste periode (2^e week), de meeste strekking en daarmee de kiepgevoelige fase, plaatsvindt (Wildschut, 2016). Het is van groot belang dat in die fase de tulpen voldoende kunnen verdampen om zodoende voldoende calcium vanuit het voedingswater in de plant te krijgen. Bij een calcium tekort in de plant kan blad- en stengelkiep ontstaan.

De mate waarin tulpen gaan kiepen in de broeierij hangt af van verschillende factoren, waaronder seizoenen, cultivar, maar ook partijen binnen een cultivar kunnen sterk verschillen in kiepgevoeligheid. In de afgelopen jaren is er meerdere malen onderzoek gedaan naar deze factoren. In mei 2021 is het project: "Minimale CO₂-uitstoot door Minimale Verdamping Tulp Fase IV" afgerond. In dit onderzoek werden factoren verkend welke mogelijk een rol spelen in kiepgevoeligheid, waaronder, cultivars, partijen, bemesting en koelperiode (Wildschut *et al.* 2021).

Parallel aan dit onderzoek, gebruikmakend van dezelfde tulpen, werd de mogelijkheid verkend om met behulp van een (hyper) spectrale camera in een vroeg stadium kiepers te detecteren. Het vroegtijdig met het blote oog detecteren van tulpen die dreigen te gaan kiepen is mogelijk, maar vergt een ervaren professional en is beperkt tot de dagen waarin de fysiologische symptomen zich al in een relatief vergevorderd stadium bevinden. Aangezien vroegtijdige detectie met het blote oog wordt gedaan op basis van (subtiële) verkleuringen wordt verwacht dat deze detectie in een nog vroeger stadium gedaan zou kunnen worden met behulp van spectrale metingen.

2 Werkwijze

2.1 Metingen

Middels een tweetal spectraalcamera's is een serie metingen verricht aan vier kratten (twee per cultivar) met (voor waterbroei) opgeplante en voor-bewortelde tulpen van cultivars Purple Prince en Strong Gold. Deze twee camera's maken spectrale beelden waarbij voor iedere pixel een reflectiespectrum opgeslagen wordt. Voor de ene camera (imec Snapscan VNIR) is dit in het golflengtegebied 470-900 nm, terwijl dit voor de andere camera (imec Snapscan SWIR) is in het golflengtegebied 1000-1670 nm. De reflectiespectra uit deze spectrale beelden kunnen gebruikt worden om subtiele kleurverschillen te detecteren die niet zichtbaar zijn voor het menselijk oog.

De complete dataset is opgenomen over een periode van zestien dagen, waarbij de eerste meetdag heeft plaatsgevonden op 31 maart 2021, twee dagen nadat de tulpen in de kas zijn geplaatst. Iedere dag zijn spectrale beelden opgenomen van de voor- en achterkant van twee kratten Purple Prince en twee kratten Strong Gold. Van elk cultivar is één krat telkens in een vochtige (RV ~100%), slecht geventileerde omgeving gehouden, terwijl de andere krat in een goed geventileerd omgeving is gehouden met een gunstigere luchtvochtigheid (RV <80%). Gedurende de gehele meetperiode zijn de tulpen geïnspecteerd door een gewasexpert om vast te stellen vanaf wanneer vroege en late symptomen met het blote oog detecteerbaar zijn.

2.2 Analyse

De dataset, bestaande uit acht spectrale afbeeldingen per dag per spectrale camera, is gebruikt om een indicatie te krijgen van de potentie om, door middel van absorptiespectra, tulpen op te sporen die dreigen te gaan kiepen. Dit is gedaan door classificatiemodellen te trainen die op basis van absorptiespectra kunnen voorspellen of de tulpen waarvan het spectrum afkomstig is in een goed geventileerde of een te vochtige (onvoldoende geventileerde) ruimte hebben gestaan. Hierbij zijn de omstandigheden zo gekozen dat op voorhand al duidelijk was dat de tulpen in de onvoldoende geventileerde ruimte uiteindelijk zouden gaan kiepen. De classificatie van een krat tulpen als afkomstig van een onvoldoende geventileerde ruimte is daarmee dus indirect een voorspelling dat tulpen in deze krat uiteindelijk zullen gaan kiepen.

In dit project is ervoor gekozen om lineaire classificatiemodellen te trainen volgens het principe van *linear discriminant analysis* (LDA). Deze LDA modellen wegen iedere reflectiewaarde in een spectrum en nemen vervolgens de som van al deze gewogen waardes. Spectra worden dan geclassificeerd op basis van het wel of niet overschrijden van een bepaalde grenswaarde. Bij het trainen van het model worden weegfactoren en grenswaardes gezocht die de classificatie met zo min mogelijk fouten uit kunnen voeren op een set spectra die het model niet heeft gezien tijdens de trainingsfase.

Een doel van dit onderzoek is erachter komen vanaf welke dag het classificatiemodel beter gaat presteren dan mogelijk is op basis van visuele observaties. Om die reden zijn LDA modellen getraind per dag en per tijdvak van twee opeenvolgende dagen. Dit betekent dat per model slechts acht of zestien spectrale afbeeldingen beschikbaar zijn voor het trainen van de LDA modellen. Deze spectrale afbeeldingen zijn eerst gesegmenteerd om zo selectief spectra te kunnen kiezen die met zekerheid op een tulp zijn opgenomen en niet op de achtergrond, de plastic krat, of een papieren label. Trainingssets kunnen vervolgens worden samengesteld door alle gesegmenteerde spectra per spectrale afbeelding te middelen, ofwel door de spectra van een groot aantal kleine regio's per spectrale afbeelding te middelen. De eerste methode geeft slechts acht of zestien spectra in een trainingsset, terwijl de andere methode meer dan duizend spectra op kan leveren. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met de noodzaak voor het achterhouden van een testset: een subset van spectra die niet gebruikt worden in de trainingsfase, maar alleen gebruikt worden om te testen hoe goed het model functioneert op spectra die het model nog nooit gezien heeft.

De LDA modellen zijn gevalideerd door middel van *leave-one-out cross-validation*. Hierbij is het LDA model steeds getraind op alle beschikbare spectra van een trainingsset behalve één, die vervolgens is geclassificeerd door middel van het getrainde model. Dit proces wordt is net zo lang herhaald totdat alle spectra één keer zijn weggelaten uit de trainingsset en gebruikt zijn om het model te testen. Ieder model krijgt op die manier ofwel de score 0 (testspectrum verkeerd geclassificeerd) of een score 1 (testspectrum correct geclassificeerd). Na een complete *leave-one-out cross-validation* cyclus zijn al deze scores gemiddeld om tot een definitieve nauwkeurigheidsscore te komen. Wanneer het LDA classificatiemodel even goed presteert als willekeurig gokken, dan ligt deze score rond de 0.5. Bij foutloze classificatie van alle testspectra is deze score precies 1.

3 Resultaat

3.1 Spectrale metingen

De Purple Prince tulpen die in een onvoldoende geventileerde omgeving zijn gehouden vertoonden met het blote oog het eerste kiepgedrag rond dag 9 van de meetseries, terwijl de Strong Gold tulpen dit pas lieten zien op dag 13. Dit correspondeert met 10 en 14 dagen nadat de tulpen in de kas zijn geplaatst. De eerste visuele symptomen van de plaatsing in de onvoldoende geventileerde ruimte werden waargenomen op tulpen in een krat Purple Prince, 8 dagen na plaatsing van de bak in de kas (dag 7 van de meetserie). Deze symptomen zijn door de gewasexpert beschreven als *'kleine, donkere, nat uitziende plekjes in vooral de steel, maar ook in het blad'*. 4 tot 5 dagen hierna (dag 11/12 van de meetserie) werden deze symptomen ook zichtbaar in de onvoldoende geventileerde krat Strong Gold. Kleurenrepresentaties van spectrale afbeeldingen van onvoldoende geventileerde kratten Purple Prince en Strong Gold vóór en na het kiepen zijn getoond in figuur 1. Voor beide cultivars geldt dat alle tulpen, geteeld in hoge RV (>80%), al dan niet in een later stadium, zijn gaan kiepen.

Figuur 1 Kleurenrepresentaties van spectrale afbeeldingen opgenomen op onvoldoende geventileerde kratten Purple Prince (a, b) en Strong Gold (c, d). Afbeeldingen opgenomen op dag 1 (a, c) en dag 11 van de meetserie (b, d).

Om eerst een indicatie te geven van de spectra waar de classificatiemodellen onderscheid tussen dienen te maken zijn in figuur 2 en 3 de gemiddelde spectra weergegeven van alle kratten op de zevende meetdag, genomen met respectievelijk de VNIR en SWIR camera. Vanuit deze spectra is met het blote oog niet direct een criterium te ontdekken op basis waarvan de voldoende en onvoldoende geventileerde tulpen uit elkaar te houden zijn.

Figuur 2 Gemiddelde Vis-NIR absorptie spectra van bakken Purple Prince (paars en rood) en Strong Gold (oranje en groen) die voldoende (paars en oranje) en onvoldoende (rood en groen) geventileerd zijn. De spectra zijn opgenomen op dag 7 van de meetserie (6 april 2021).

Figuur 3 Gemiddelde SWIR reflectiespectra van bakken Purple Prince (paars en rood) en Strong Gold (oranje en groen) die voldoende (paars en oranje) en onvoldoende (rood en groen) geventileerd zijn. De spectra zijn opgenomen op dag 7 van de meetserie (6 april 2021).

De resultaten van classificatie middels LDA per meetdag zijn getoond in tabel 1. De nauwkeurigheid van de LDA modellen geplot als functie van de meetdag zijn getoond in figuur 4. De resultaten van classificatie middels LDA per twee opeenvolgende meetdagen zijn getoond in tabel 2. De corresponderende plot is getoond in figuur 5.

Tabel 1

Nauwkeurigheid van LDA modellen in het classificeren van voldoende en onvoldoende geventileerde tulpen gebaseerd op alle opgenomen spectra per meetdag.

Meetdag	Nauwkeurigheid VNIR	Nauwkeurigheid SWIR
1	0.250	0.500
2		0.375
3	0.429	0.571
4	0.875	0.750
5	0.625	0.375
6	1.0	0.375
7	1.0	0.750
8	1.0	0.750
9	1.0	0.833
10	1.0	1.0
11	1.0	0.909
12	1.0	0.667
13	1.0	0.833
14	1.0	0.500
15	0.833	0.500
16	0.833	0.677

Figuur 4 Nauwkeurigheid van de LDA modellen als functie van de meetdag. Nauwkeurigheid van modellen getraind op VNIR data getoond in het groen, nauwkeurigheid van modellen getraind op SWIR data getoond in het rood.

Tabel 2

Nauwkeurigheid van LDA modellen in het classificeren van goed en slecht geventileerde tulpen gebaseerd op alle spectra opgenomen binnen twee opeenvolgende dagen.

Meetdag	Nauwkeurigheid VNIR	Nauwkeurigheid SWIR
1-2		0.250
1-3	0.733	
2-3		0.733
3-4	1.0	0.867
4-5	0.875	1.0
5-6	0.934	0.934
6-7	1.0	0.875
7-8	1.0	0.834
8-9	1.0	0.950
9-10	1.0	1.0
10-11	1.0	0.870
11-12	1.0	1.0
12-13	1.0	1.0
13-14	1.0	1.0
14-15	1.0	1.0
15-16	0.833	1.0

Figuur 5 Nauwkeurigheid van de LDA modellen als functie van de eerste meetdag van de twee opeenvolgende meetdagen waarop de modellen getraind zijn. Nauwkeurigheid van modellen getraind op VNIR data getoond in het groen, nauwkeurigheid van modellen getraind op SWIR data getoond in het rood.

Tabel 1 & 2 maken duidelijk dat 1) de nauwkeurigheid van classificatie op basis van de VNIR camera aanzienlijk beter is dan op basis van de SWIR camera, 2) het samennemen van data gemeten over twee dagen het model sterk ten goede komt, en 3) dat een nauwkeurigheid van 100% gehaald kan worden 4-5 dagen nadat de tulpen in de kas zijn gezet (dag 3-4 van de meetserie).

Zoals ook al eerder staat vermeld werkten de LDA modellen door de verschillende reflectiewaardes te wegen, ze bij elkaar op te tellen en de som te vergelijken met een grenswaarde. Deze wegingsfactoren per golflengte voor de modellen getraind op de Vis-NIR data van meetdagen 6 & 7 zijn getoond in figuur 6. De wegingsfactoren voor de modellen getraind op de SWIR data van meetdagen 8 & 9 en meetdagen 9 & 10 zijn getoond in figuur 7. Het is duidelijk dat de LDA modellen getraind op de Vis-NIR spectra voor een groot deel classificeren op basis van de reflectiewaarde rond 725 nm met een tevens belangrijke bijdrage rond 540 nm. Voor de LDA modellen getraind op de SWIR spectra geldt dat met name de reflectiewaardes rond 1350 nm van belang zijn voor de nauwkeurigheid van het model.

Figuur 6 LDA wegingsfactoren per golflengte in het Vis-NIR golflengtegebied. De corresponderende modellen zijn getraind op enkel de data uit meetdag 6 (a) en meetdag 7 (b). Op de achtergrond is een typisch Vis-NIR reflectiespectrum te zien.

Figuur 7 LDA wegingsfactoren per golflengte in het SWIR golflengtegebied. De corresponderende modellen zijn getraind op enkel de data uit meetdagen 8 & 9 (a) en meetdagen 9 & 10 (b). Op de achtergrond is een typisch SWIR reflectiespectrum te zien.

3.2 Verkenning *handheld* spectrometer of miniatuurspectrometer

Gezien de hoge prijs van deze camera (~€15,000), de relatief complexe bediening en de gebrekkige mobiliteit van de opstelling zou de keuze gemaakt kunnen worden voor een applicatie op basis van een *handheld* spectrometer of miniatuurspectrometer. Sommige van dergelijke *handheld* spectrometers kosten aanzienlijk minder dan een spectraal camera, zijn veel handzamer en hun bediening is eenvoudiger. Tevens hebben nieuwe ontwikkelingen ervoor gezorgd dat spectrometers die werken zonder dispersieve optica geminiaturiseerd kunnen worden en geproduceerd tegen zeer lage kosten (<€100). Nadeel bij beide typen spectrometers ten opzichte van een spectraalcamera is dat niet de gehele krat tulpen gemeten kan worden zonder ook signaal mee te pakken van de achtergrond en de plastic krat zelf. In plaats daarvan moet dan een lokale meting gedaan worden, bijvoorbeeld op één blad.

Dergelijke metingen zijn te simuleren met de huidige dataset door in iedere spectrale afbeelding een groot aantal (10-100) kleine regio's (bijvoorbeeld 20 x 20 of 40 x 40 pixels) willekeurig te kiezen binnen de gesegmenteerde tulpen, en uit iedere regio een gemiddeld spectrum te berekenen. Op deze manier worden training sets met enkele tientallen tot honderden spectra verkregen waarop LDA classificatie modellen getraind kunnen worden. De nauwkeurigheid van deze modellen in het onderscheiden van tulpen die voldoende en onvoldoende geventileerd zijn getoond in tabel 3 en 4. De corresponderende dag afhankelijke nauwkeurigheidscurves zijn getoond in figuur 8 & 9.

Tabel 3

Nauwkeurigheid van LDA modellen in het classificeren van voldoende en onvoldoende geventileerde tulpen. De modellen zijn getraind en getest op enkele tientallen tot honderden spectra verkregen uit 40 x 40 pixel regio's in de spectrale afbeeldingen van één meetdag.

Meetdag	Nauwkeurigheid VNIR	Nauwkeurigheid SWIR
1-2		0.603
1-3	0.783	
2-3	0.870	0.682
3-4	0.869	0.740
4-5	0.858	0.767
5-6	0.852	0.829
6-7	0.870	0.788
7-8	0.892	0.798
8-9	0.873	0.798
9-10	0.888	0.814
10-11	0.869	0.763
11-12	0.898	0.768
12-13	0.935	0.895
13-14	0.942	0.879
14-15	0.970	0.862
15-16	0.962	0.915

Figuur 8 Nauwkeurigheid van LDA modellen als functie van de meetdag. Nauwkeurigheid van modellen getraind op VNIR data getoond in het groen, nauwkeurigheid van modellen getraind op SWIR data getoond in het rood.

Tabel 4

Nauwkeurigheid van LDA modellen in het classificeren van voldoende en onvoldoende geventileerde tulpen. De modellen zijn getraind en getest op enkele tientallen tot honderden spectra verkregen uit 40 x 40 pixel regio's in de spectrale afbeeldingen van twee opeenvolgende meetdagen.

Meetdag	Nauwkeurigheid VNIR	Nauwkeurigheid SWIR
1	0.854	0.625
2		0.540
3	0.870	0.745
4	0.937	0.745
5	0.849	0.867
6	0.850	0.848
7	0.888	0.796
8	0.910	0.839
9	0.884	0.868
10	0.909	0.798
11	0.927	0.823
12	0.932	0.840
13	0.931	0.858
14	0.968	0.829
15	0.964	0.854
16	0.965	0.915

Figuur 9 Nauwkeurigheid van de LDA modellen als functie van de eerste meetdag van de twee opeenvolgende meetdagen waarop de modellen getraind zijn. Nauwkeurigheid van modellen getraind op VNIR data getoond in het groen, nauwkeurigheid van modellen getraind op SWIR data getoond in het rood.

Vanuit deze cijfers wordt duidelijk dat de lage nauwkeurigheid van classificatie voor dagen 1-5 (zie tabel 1) hoofdzakelijk te maken heeft met het kleine aantal spectra per trainingsset. Door dit aantal van 7 te verhogen naar 300-400 spectra kan consequent een nauwkeurigheid worden behaald van meer dan 85%, zelfs bij dag 1 van de meetserie. Tevens is te zien dat het samenvoegen van twee opeenvolgende dagen gemiddeld genomen de nauwkeurigheid iets verlaagt. Dit komt mogelijk doordat er kleine spectrale verschillen bestaan tussen opeenvolgende dagen. Dit brengt extra variatie in de dataset die geen correlatie heeft met de graad van ventilatie.

4 Conclusie en discussie

De hoge nauwkeurigheid van classificatie suggereert sterk dat spectroscopie een waardevolle methode zou kunnen zijn voor het vroeg (enkele dagen na inhalen) detecteren van tulpen die dreigen te kiepen. Dit terwijl met het menselijk oog de eerste symptomen pas gedetecteerd kunnen worden 8 dagen nadat de tulpen in de onvoldoende geventileerde ruimte gezet zijn, en het kiepen pas begint na 10-14 dagen. Met name de spectraalcamera die data opneemt in het Vis-NIR golflengtegebied kan volgens dit onderzoek gekalibreerd worden om met grote nauwkeurigheid tulpen te onderscheiden die voldoende en onvoldoende geventileerd zijn. Daarnaast kan er worden geconcludeerd dat ook een aanpak gebaseerd op het gebruik van een *handheld* spectrometer of miniatuurspectrometer een hoge nauwkeurigheid zou moeten kunnen halen in het onderscheiden van voldoende en onvoldoende geventileerde tulpen.

5 Aanbevelingen

5.1 Bestuderen aanpak *handheld* spectrometer of miniatuurspectrometer

In plaats van een kostbare en fragiele spectraalcameraopstelling te plaatsen om vroegtijdig kiepers te detecteren, is het mogelijk gebleken om een spectrometer te gebruiken die niet een spectrum opneemt op de hele bak tulpen, maar slechts op een gedeelte van één blad. Om vast te stellen of deze aanpak praktisch is en de benodigde nauwkeurigheid haalt zal een nieuw experiment opgezet moeten worden, welke vergelijkbaar is met het hier beschreven experiment, maar waarbij de tulpen niet dagelijks naar een meetopstelling worden gebracht, maar waar de spectrometer dagelijks de kas in wordt gebracht om grote hoeveelheden data op te nemen op voldoende en onvoldoende geventileerde tulpen. Afhankelijk van de instrumentatiekosten die redelijk worden geacht voor deze toepassing kan hierbij gekozen worden voor een *handheld* spectrometer (eenvoudig toe te passen, hoge kwaliteit data, relatief duur) of één of meerdere miniatuurspectrometers (eventueel te automatiseren, lagere kwaliteit data, in de basis potentieel zeer goedkoop). Op deze data kan vervolgens, net als in de huidige studie, een serie LDA classificatiemodellen getraind worden, waaruit zal blijken of de aanpak in de praktijk de benodigde informatie kan bieden.

Als blijkt dat er een voldoende hoge nauwkeurigheid van classificatie kan worden behaald, kan verder nagedacht worden over de dagelijkse toepassing in de kas. Met een *handheld* spectrometer zal de dagelijkse workflow bijvoorbeeld bestaan uit het opnemen van een tiental of enkele tientallen spectra, het uploaden van de spectra naar een laptop en het draaien van het model op deze spectra om te bepalen of de tulpen voldoende of onvoldoende geventileerd zijn. Met een miniatuurspectrometer kan eventueel zelfs een volautomatische opstelling worden ontworpen, waarbij de spectrometer continue gericht staat op een krat tulpen en op bepaalde tijdsintervallen spectra opneemt, het model draait en de tulpen classificeert als voldoende of onvoldoende geventileerd. In plaats van een binaire classificatie kan bij beide aanpakken voorlopig worden gekozen om de output van het model een continue score te laten zijn, waarbij een hogere score een hogere waarschijnlijkheid tot kiepen impliceert. De teler of gewasverzorger kan dan experimenteren met verschillende manieren waarop de ventilatie wordt aangepast op basis van de scores. Wanneer hier een optimum in wordt gevonden kan over worden gegaan op een binaire adviesscore of zelfs volledige automatisering.

5.2 Vergroten dataset cultivars

Ondanks dat in de huidige studie geen duidelijke negatieve invloed te vinden is van het gebruik van twee cultivars in het model (er wordt immer nog steeds 100% nauwkeurigheid behaald), is dit niet gegarandeerd wanneer één model getraind wordt op nog meer of nog verder uiteenlopende cultivars. In een dergelijk geval kan het nodig zijn dat datasets worden verzameld op alle cultivars waarvoor later, in de praktijk, het meest optimale moment van ventileren kan worden bepaald.

5.3 Verkenning beperken kiepers na vroege detectie

Dit onderzoek heeft aangetoond dat het mogelijk is om met hoge nauwkeurigheid te bepalen of een krat tulpen is gehouden in een voldoende of onvoldoende geventileerde ruimte. Dit kan al enkele dagen eerder dan mogelijk is op basis van visuele observaties door een gewasexpert. Het blijft echter onduidelijk op welke manier deze extra informatie het beste bij kan dragen aan het maken van een economisch gunstige afweging tussen de kosten van het kunstmatig verlagen van de luchtvochtigheid en het risico op kiepers. Met de vervroegde detectie van potentiële kiepers kan bijvoorbeeld al zeer vroeg een aanleiding worden gevonden om de luchtvochtigheid te verlagen. Het is echter niet duidelijk in hoeverre de tulpen zich dan al in de kiepgevoelige fase bevinden. Zonder accuraat te bepalen wat het effect is van verlagingen van de luchtvochtigheid op verschillende tijdstippen zal het niet duidelijk zijn hoe de spectrale waarschuwingssignalen in actie te vertalen. Hetzelfde geldt voor de latere stadia van de groei: een spectrale classificatiemethode zou vrij laat in de groei nog aan kunnen geven dat bepaalde tulpen dreigen te gaan kiepen. Ingrijpen heeft echter alleen zin als de tulpen zich nog steeds in de kiepgevoelige fase bevinden.

Wanneer het duidelijk is in welk tijdsbestek de spectrale waarschuwingssignalen relevant zijn kan worden nagedacht over een efficiënte strategie om deze signalen te implementeren. Hierbij moet constant een afweging worden gemaakt tussen de kosten van het verlagen van de luchtvochtigheid en een afname in de kwaliteit of opbrengst van de tulpen. Voordat een dergelijke aanpak in de praktijk gebracht kan worden moeten zeker drie dingen nog met vervolgonderzoek uitgezocht worden:

1. Is de huidige spectrale classificatie een afspiegeling van een algemeen effect van hoge luchtvochtigheid op alle tulpen, of alleen een afspiegeling van de fysiologische veranderingen in de tulpen die later zullen kiepen? Om dit uit te zoeken is vervolgonderzoek nodig op individuele tulpen, waarbij kiepgedrag wordt gescoord en spectrale afbeeldingen worden opgenomen op individuele tulpen. Alleen dan kan daadwerkelijk een voorspellend model worden getraind dat het risico op kiepen voorspelt en niet slechts de hoogte van de relatieve luchtvochtigheid (dit wordt ook al direct gemeten).
2. Wat is het effect van een verlaging van de luchtvochtigheid op de spectrale karakteristieken? Als het kiepen voorkomt, zorgt het dan ook ervoor dat de tulp weer als "voldoende geventileerd" wordt geclassificeerd? Als dit niet het geval is, hoe kunnen we dan het beste een correctie aanbrengen op de spectrale waardes?
3. Voor iedere teler moet duidelijk zijn wat de kosten zijn van het verlagen van de luchtvochtigheid, wat de afname in inkomsten is bij bepaalde percentages kiepers en hoe spectrale waardes vertalen naar een percentage kans om te kiepen.

Met deze informatie op zak zouden spectrale metingen op individuele tulpen gebruikt kunnen worden om allereerst te voorspellen wat ongeveer de kans is dat de tulp later zal kiepen, vervolgens te bepalen of het een verlaging van de luchtvochtigheid inderdaad effect heeft op later kiepgedrag, daarna de economische afweging te maken, en uiteindelijk (eventueel, indien gekozen is voor een verlaging van de luchtvochtigheid) een correctie aan te brengen op de spectrale waardes. Het toepassen van een dergelijke strategie op langere termijn is waarschijnlijk nodig voor het finetunen van de kansenverdeling (kans op kiepen als functie van spectrale waarde) en de correctieterm.

5.4 Inzicht in de achtergrond van kiepproces

Ondanks dat het mogelijk blijft om met spectrale beelden vroegtijdig kiepers te detecteren, blijft het nog onduidelijk wat deze reflecties precies inhouden. 'Wat precies zien we bij bepaalde reflecties? Correleert dit met bepaalde inhoudsstoffen van de plant?', zijn vragen die overblijven aan de hand van het huidige resultaat en waar vervolgonderzoek op in kan gaan.

Literatuur

Wildschut J., 2016.

"Minimale CO₂-uitstoot door Minimale Verdamping Tulp, fase I: Verkenning kiepgevoeligheid tulp in Meerlagenteelt 2.0". Wageningen UR / Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Bloembollen, Boomkwekerij & Fruit.

Wildschut J., Van Dam M., Trompert J., van Vilsteren S., 2021.

"Minimale CO₂-uitstoot door Minimale Verdamping Tulp, fase IV: Minimaliseren Verdamping Tulp. Wageningen UR / Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Bloembollen, Boomkwekerij & Fruit.

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

Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw - Bloembollen
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1074

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.