

Het verloop van de chlorofylratio van rijpende paprika vruchten aan de plant

D. J. Koolen

juni 2011



WAGENINGEN UNIVERSITY

WAGENINGEN UR

CROPS "Clever Robots for Crops"

Het verloop van de chlorofylratio van rijpende paprikavruchten aan de plant

Naam vak : BachelorafsluitingAgrotechnologie
Vakcode : FTE-80812
Studiebelasting : 12 credits
Datum : 4 mei 2011

Student : D. J. Koolen
Registratienummer : 90-07-25-463-040
Studieprogramma : BSc Agrotechnologie (BAT)

Begeleider(s) : Ir. C.W. Bac
Examinator : Prof. Dr. Ir. E.J. van Henten

Leerstoelgroep : Agrarische Bedrijfstechnologie
Technotron, Gebouw 118
Bornse Weilanden 9
6708 WG Wageningen
Tel: +31 (317) 48 29 80
Fax: +31 (317) 48 48 19
E-mail: webmaster.fte@wur.nl

Onderzoeksinstituut : Wageningen UR Glastuinbouw
Radix, Gebouw 107
Droevendaalsesteeg 1
6708 PB Wageningen
Tel: +31 (317) 486001
Fax: +31 (317) 418094
E-mail: glastuinbouw@wur.nl

Voorwoord

Bij een practicum voor het vak Product Quality and Post-Harvest Physiology kwam ik voor het eerst in aanraking met chlorofyl. In het practicum werd de chlorofylconcentratie van een bananenschil bepaald aan de hand fotospectrometrie. Dit gebeurde met groene en gele bananen, er werd gezegd dat tijdens het rijpen chlorofyl wordt afgebroken. De rijpere bananen zouden dan weinig tot geen chlorofyl bevatten. Zulke combinatie van planten en techniek heeft me altijd al aangetrokken, vooral als het gaat om hightech zoals sensoren. Dit is ook wat ik heb gevonden bij het onderwerp van deze bachelorafsluiting, een nieuwe technische ontwikkeling gecombineerd met planten.

Met paprika's zelf had ik eigenlijk weinig ervaring, tot een paar jaar geleden werden die bij mij thuis in de buurt (Wieringermeer) nog niet gekweekt. Tijdens de metingen die ik voor deze bachelorafsluiting heb verricht kwam ik er al snel achter dat er veel over de paprikaplant te vertellen valt, en dat het toch een bijzondere plant is.

Meestentijds heb ik met plezier aan mijn bachelorafsluiting gewerkt. Er waren momenten dat het wat moeilijker ging. Gelukkig ben ik altijd goed geholpen en stond Wouter Bac, mijn begeleider, altijd paraat om de helpende hand toe te steken. Harstikke bedankt voor alle hulp Wouter!

Verder wil ik graag Henk Jalink en Rob van der Schoor bedanken voor het gebruik van hun lab en apparatuur. Waarschijnlijk heb ik er af en toe wel in de weg gestaan met de paprikaplanten. Andreas Savvides bedankt voor het mogen gebruiken van de klimaatcel. Hier hebben de paprikaplanten een goed verblijf gehad. Bart van Tuijl wil ik bedanken voor het lenen van de statieven en andere apparatuur. De paprikaplanten hadden de extra ondersteuning nodig. Ook Taede Stoker bedankt voor de hulp bij het installeren van de planten, en voor het extra water geven wanneer de paprikaplanten het nodig hadden. Gerrit Polder wil ik bedanken voor het mogen gebruiken van de chromameter. Eldert van Henten wil ik alvast bedanken voor het examineren van mijn bachelorafsluiting, hopelijk is het een plezier om het door te lezen.

Uiteraard moet ook Bob van der Helm bedankt worden voor zijn eerdere onderzoek, waarin werd gesteld dat de chlorofylratio waarschijnlijk een geschikte parameter is om de rijpheid van paprika's te bepalen. Met Bob van der Helm heb ik tevens een presentatie gegeven aan het Franse bedrijf Force-A, een bedrijf dat gespecialiseerd is in sensoren om kwaliteit en rijpheid van planten te bepalen.

Alle andere die ik nog niet genoemd heb wil ik ook nog bedanken, voor de hulp, interesse, ondersteuning en kritische vragen. Ik ben benieuwd hoe de ontwikkelingen van de paprika-oogstrobot verlopen. Graag kom ik nog een keer kijken hoe het met het project gaat. Wouter nog heel veel succes met het behalen van je PhD.

Samenvatting

In deze bachelorafsluiting is onderzoek gedaan naar het verloop van de chlorofylratio (chlorofyl b / chlorofyl a) van paprikavruchten die rijpen aan de plant. De chlorofylratio is bepaald met een nieuw type sensor die chlorofylfluorescentie van chlorofyl a en b meet. Deze sensor is ontwikkeld door Henk Jalink en Rob van der Schoor. De ratio tussen chlorofylfluorescentie van chlorofyl a en b zou een indicatie moeten geven voor de rijpheid van de paprika. Deze nieuw ontwikkelde sensor zou eventueel onderdeel kunnen uitmaken van een paprika-oogstrobot. De paprika-oogstrobot wordt ontwikkeld binnen het CROPS-project. Bob van der Helm heeft al eerder laten zien dat er een sterke relatie bestaat tussen de kleur en de chlorofylratio van de paprika. Er is echter nog niet bekend hoe de chlorofylratio verandert tijdens het rijpen van de paprika aan de plant. Verwacht wordt dat de chlorofylratio afneemt, hier is deze bachelorafsluiting op ingegaan.

Chlorofyl is een belangrijk pigment voor planten. Het geeft planten een groene kleur. Chlorofyl is betrokken bij de fotosynthese in de plant. Het absorbeert lichtenergie die nodig is voor verdere chemische reacties. Het licht dat wordt geabsorbeerd door chlorofyl bevindt zich in het spectrum dat zichtbaar is voor het menselijk oog. Groen licht wordt echter niet opgenomen door de chlorofylmoleculen, maar wordt gereflecteerd. Daarom hebben planten een groene kleur. In planten komt chlorofyl in twee types voor, chlorofyl a en b. Chlorofyl b moleculen kunnen alleen lichtenergie opnemen en vervolgens overgeven aan andere chlorofylmoleculen. Chlorofyl a moleculen kunnen dit ook, maar die kunnen uiteindelijk ook de energie gebruiken voor de fotosynthese. Chlorofyl moleculen kunnen zich ook bevinden in de vruchten van planten. Wanneer een vrucht rijper wordt zal de concentratie chlorofyl in een vrucht afnemen. Hierdoor worden er andere pigmenten zichtbaar, en kan een paprikavrucht rood of geel worden.

In het onderzoek zijn er een aantal paprika's gevolgd, terwijl deze nog aan de plant aan het rijpen waren. Gedurende vier weken is iedere dag de chlorofylratio van de paprika's bepaald. Tevens zijn de Hue angle, de lengte en de diameter van de paprika's iedere dag bepaald. Er zijn twee verschillende cultivars gevolgd. Een cultivar met gele paprika's en een cultivar met rode paprika's. De cultivar met rode paprika's kunnen ook als groen worden verkocht, als de paprika's nog niet verkleurd zijn. Beide cultivars worden gebruikt door paprikakwekers. De paprikaplanten die werden onderzocht kwamen van commerciële bedrijven. Gedurende de metingen stonden de planten in een klimaatcel in Wageningen zelf. De planten waren aan een statief opgebonden en stonden in plastic bakken zodat ze iedere dag naar het lab verplaatst konden worden waar de chlorofylsensor stond.

Het blijkt dat bij de paprika's pas de laatste week voor de oogst de paprikavruchten beginnen te verkleuren. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de paprika's worden geoogst bij een verkleuring van 90-99%, dit is het moment waarop kwekers hun paprika's normaliter oogsten in de winter maanden. Aan het begin van de verkleuring neemt de chlorofylratio erg snel af. Het grootste gedeelte van de afname vind binnen één á twee dagen plaats, dit is aan het begin van de verkleuring. De dagen daarna daalt de chlorofylratio een stuk langzamer. Dit geldt voor zowel de rode als de gele cultivar. De chlorofylratio was bij rijpen paprika's meestal hetzelfde. Tussen de twee verschillende cultivars zat wel een klein verschil in de chlorofylratio op het moment van oogsten. Ook de Hue angle neemt het snelst af in de eerste paar dagen dat de paprika vrucht begint te verkleuren. Bij de chlorofylratio is het opvallend dat deze ongeveer twee weken voor de oogst lijkt te stijgen. De Hue angle laat bij de paprika's vanaf de eerste dag van meten, tot een week voor de oogst geen verandering zien.

De lengte en diameter laten weinig verandering zien de laatste twee weken voor de oogst. De vorm van de paprika's, lengte/diameter, verandert daardoor ook niet de laatste twee weken voor de oogst. Daarvoor neemt de lengte en de diameter van de paprika's wel toe. De toename van de lengte en diameter is echter redelijk gelijk aan elkaar, waardoor de vorm ook niet verandert. Dit komt ook in de literatuur naar voren. Daarin blijkt dat de paprikavrucht voornamelijk van vorm veranderd in de eerste weken nadat de vrucht is gevormd. Geen verandering in lengte-diameter verhouding en wel verandering in de chlorofylratio en Hue angle in de laatste week voor de oogst betekent dat deze parameters geen correlatie met elkaar hebben. De chlorofylratio en de Hue angle zijn wel aan elkaar gecorreleerd, wat al in eerder onderzoek is aangetoond, maar nu nog eens is bevestigd. De correlatie is het sterkst vanaf het moment dat de plant begint te verkleuren tot en met de oogst.

Het lijkt erop dat met behulp van de chlorofylratio goed kan worden bepaald of een paprika rijp is. Het is duidelijk dat er een grote verandering van de chlorofylratio plaatsvindt in de paprikavruucht in de laatste week dat deze aan de plant zit.

Zowel de chlorofylratio als de Hue angle laten in de laatste week voor de oogst een sterke daling zien. De Hue angle en de chlorofylratio zijn voor de paprika's gelijk op het moment van oogsten. Wel laat de karakteristiek van de chlorofylratio twee weken voor de oogst een stijging zien, terwijl de Hue angle op hetzelfde moment constant blijft. Voor het rijpen neemt de sensor van Henk Jalink en Rob van der Schoor dus veranderingen waar die met het blote oog niet te zien zijn.

De lichte stijging die de paprika's laten zien die twee weken voor de oogst plaatsvindt, zou gebruikt kunnen worden om te bepalen of een groene paprika geoogst kan worden. Het is alleen nog niet duidelijk of de groene paprika dan wel genoeg smaak heeft ontwikkeld, hier moet nog naar gekeken worden. De lengte en diameter, en daarmee het gewicht zullen echter niet meer toenemen twee weken voor de oogst.

Wanneer de lengte en de diameter van de paprika niet meer toenemen is deze nog groen. Een paprika die nog groter wordt is nog niet geschikt om te oogsten. Het moment van oogsten kan niet aan de hand van de lengte en diameter of de verhouding daarvan bepaald worden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting.....	v
1 Introductie.....	1
1.1 Huidige situatie.....	1
1.2 Gewenste situatie.....	1
1.3 Probleem	1
1.4 Doel.....	1
1.5 Onderzoeksvragen.....	2
1.6 Afbakening.....	2
1.7 Aanpak.....	2
2 Rijpen van vruchten.....	3
2.1 Door de mens waarneembare verandering tijdens het rijpen	3
2.2 Andere factoren bij het rijpen	3
2.3 Rijpen van de paprika	5
2.4 Chlorofyl	7
2.4.1 Chlorofyl bij de fotosynthese.....	8
2.4.2 Chlorofyl fluorescentie	8
2.4.3 Chlorofyl afbraak	9
2.4.4 Chlorofylin verschillende soorten vruchten	9
3 Materialen en methoden	11
3.1 Hoe meten?	11
3.2 Proefmeting.....	11
3.3 De metingen	11
3.3.1 Verdeling van de paprika	11
3.3.2 Vast punt van meten	14
3.3.3 Meten van de chlorofylfluorescentie	15
3.3.4 Meten van de kleur.....	15
3.3.5 Meten van de lengte en diameter.....	17
3.3.6 Het plant materiaal.....	17
3.3.7 Paprika schema.....	17
4 Resultaten.....	19
4.1 Resultaten precisie bepaling.....	19
4.2 De gele paprika's	19
4.2.1 Verloop van de chlorofylratio.....	19
4.2.2 Het verloop van de Hueangle	22
4.2.3 Het verloop van de lengte en diameter.....	22
4.2.4 Correlatie tussen verschillende parameters.....	24
4.3 De rode paprika's.....	25
4.3.1 Verloop van de chlorofylratio.....	26
4.3.2 Verloop van de Hue angle	27
4.3.3 Verloop van de lengte en diameter.....	28
4.3.4 Correlatie van de verschillende parameters	30
4.4 Ratio verloop per dag	31
5 Discussie	33
6 Conclusie.....	35

7 Aanbevelingen	37
Referentielijst	39

1 Introductie

Binnen het CROPS-project wordt een paprika-oogstrobot ontwikkeld. Om de paprika's aan de plant te detecteren zal de robot sensoren nodig hebben. Een van deze sensoren zal de rijpheid van de paprika moeten gaan vaststellen. Om de rijpheid van vruchten te bepalen kan er gebruik gemaakt worden van de ratio tussen chlorofyl a en chlorofyl b. Jalink en Van der Schoor (2002) hebben een methode ontwikkeld waarmee op eenvoudige en niet destructieve wijze de ratio tussen chlorofyl a en b kan worden bepaald. Bij verschillende vruchten is er al onderzoek gedaan naar het verband tussen chlorofyl en de rijpheid en kwaliteit, hierbij worden er meestal methodes gebruikt waarbij het onderzochte materiaal niet intact blijft. Ook wordt er meestal gekeken naar de totale hoeveelheid chlorofyl. Dit is onder andere gedaan bij bananen (Kays and Paul 2004). Deze metingen kosten echter veel tijd en zijn niet bijzonder nauwkeurig. Voor een plukrobot die de rijpheid van paprika's moet beoordelen is een snelle en nauwkeurige meting echter wel vereist.

1.1 Huidige situatie

De paprika-oogstrobot moet de rijpheid van de paprika's kunnen bepalen. Jalink en Van der Schoor (2002) hebben hiervoor een sensor ontwikkeld. Deze sensor kan op een snelle en nauwkeurige manier de ratio tussen chlorofyl a en b meten. Met de techniek van Jalink en Van der Schoor (2002) raken de planten ook niet beschadigd.

Bob van der Helm heeft reeds onderzoek gedaan naar de chlorofylratio van bonte paprika's met deze sensor. Hierbij is onderzocht of op verschillende plekken (verschillende kleuren) van de bonte paprika's de chlorofylratio verschilt. Als referentie voor de chlorofylmetingen heeft Bob van der Helm kleurmetingen uitgevoerd. Het blijkt dat er een sterke relatie zit tussen de kleur en de chlorofylratio. Het is hiermee echter nog niet duidelijk hoe de chlorofylratio van paprika's die nog rijpen aan de plant door de tijd verandert. Tijdens het rijpen zal dit juist voor een robot die de paprika's moet gaan plukken van belang zijn. Aan de hand van de gemeten chlorofylfluorescentie kan dan worden bepaald of de robot een bepaalde paprika gaat plukken of nog door laat groeien aan de plant. Misschien kan er zelfs worden voorspeld wanneer de paprika wel rijp zal zijn.

1.2 Gewenste situatie

Er is kennis van het verloop van de chlorofylratio van paprikavruchten door de tijd. Met die kennis is het mogelijk om aan de hand van de ratio tussen chlorofyl a en b te bepalen of een paprika rijp genoeg is om te oogsten. Met een sensor die de chlorofylfluorescentie van chlorofyl a en b meet, kan de chlorofylratio tussen chlorofyl a en b worden bepaald, en kan met behulp van de chlorofylratio vervolgens de rijpheid snel en accuraat worden bepaald. Deze sensor kan onderdeel uitmaken van een oogstrobot, zodat de robot aan de hand van de chlorofylratio kan bepalen of een paprika geplukt moet worden en wanneer de robot zou terug moeten keren mochten de paprika's nog niet rijp zijn.

1.3 Probleem

Het is onbekend hoe de chlorofylratio tussen a en b verloopt door de tijd, tijdens het rijpen van de paprika aan de plant.

1.4 Doel

Het volgen van de paprika tijdens de groei, en dan vooral tijdens het rijpingsproces. Dit gebeurt met behulp van drie sensors: 1) een sensor die de chlorofylfluorescentie van chlorofyl a en b meet. 2) een Minolta chromameter die de kleurverandering meet. 3) een schuifmaat die de lengte en diameter meet.

1.5 Onderzoeksvragen

- Hoe verloopt de chlorofylratio van de paprika vrucht aan de plant?
- Wat zijn de overeenkomsten en verschillen tussen de tijdreeks van de kleurmetingen en de tijdreeks van de chlorofylratio?
- Is de chlorofylratio geschikter om de rijpheid van paprika's te bepalen dan de kleur?
- Kan de chlorofylratio een indicatie geven voor het moment waarop groene paprika's geoogst kunnen worden?
- Kunnen de lengte en de diameter dienen als een indicatie voor de rijpheid van de paprika.

1.6 Afbakening

Er gaan zijn geen metingen verricht die de rijping op een andere manier beschrijven dan de kleur, de ratio van de chlorofylfluorescentie tussen chlorofyl b en a en de lengte en diameter van de paprika. Bij de metingen wordt er geen rekening mee gehouden dat omgevingsfactoren (als temperatuur en lichtintensiteit, en voeding) de ratio tussen de chlorofylfluorescentie van chlorofyl b en a kunnen beïnvloeden. De metingen worden gedaan aan twee verschillende soorten paprika's, gele (cultivar: Stayer) en rode (cultivar: Spider). De rode paprika's kunnen in een vroeger stadium ook als groen worden verkocht. Er worden echter geen metingen verricht aan paprika's die altijd groen blijven of paprika's die een andere kleur hebben dan geel en rood.

1.7 Aanpak

Om het verloop van de chlorofylratio door de tijd te beschrijven werd er gemeten met de door Henk Jalink en Rob van der Schoor ontwikkelde sensor. Rijpende paprika's, die nog aan de plant hingen werden gevolgd, totdat ze geoogst werden. Een verkleuring van 90-99% werd aangehouden om de paprika's te oogsten. Deze verkleuring werd met het oog beoordeeld. De gebruikten paprikaplanten waren van productierassen die ook door de professionele paprikakwekers gebruikt worden.

Iedere dag werd er bij de paprika's chlorofylfluorescentie gemeten, hiermee kon de ratio tussen chlorofyl a en b worden bepaald. Tevens werd er iedere dag de kleur van de paprika's gemeten met een chromameter en de lengte en diameter met een schuifmaat. De verandering van de chlorofylratio door de tijd is vergeleken met de kleur verandering door de tijd.

2 Rijpen van vruchten

In deze sectie wordt het rijpen van vruchten besproken. Eerst worden de veranderingen van de vrucht besproken die de mens kan waarnemen, zoals verandering in kleur en smaak. Daarna wordt er kort ingegaan op de respiratie van vruchten tijdens het rijpen. Vervolgens wordt er dieper op het rijpen van de paprika zelf ingegaan, en wordt er besproken hoe de paprika verandert tijdens het rijpen. Als laatste wordt er in deze sectie besproken wat er met de chlorofyl in de vrucht gebeurt gedurende het rijpen.

2.1 Door de mens waarneembare verandering tijdens het rijpen

Tijdens het rijpen ondergaat de vrucht kwalitatieve veranderingen. Hierbij moet worden gedacht aan verandering in textuur, pigmenten, en smaak. De textuur verandering wordt onder andere veroorzaakt door het afbreken van pectine (Kays and Paull 2004). Pectine zijn grote moleculen die de cellen bij elkaar houden (Raven et al. 2005). Wanneer de pectine door enzymen worden afgebroken zal dit tot zachter fruit leiden.

De kleur van een vrucht wordt tijdens de oogst vaak gebruikt om de rijpheid te bepalen. De kleur van een vrucht wordt bepaald door pigmenten. De pigmentsamenstelling van een vrucht verandert tijdens het rijpen. Een belangrijk pigment dat in planten voorkomt is chlorofyl. Het chlorofyl pigment absorbeert lichtenergie wat gebruikt wordt tijdens de fotosynthese. Chlorofyl is een groen pigment, wanneer er tijdens het rijpen chlorofyl wordt afgebroken zal de groene kleur dus afnemen. Door de afname van het groen kleurende chlorofyl kunnen er ook andere pigmenten zichtbaar worden die al eerder aanwezig waren. Gedurende het rijpen is er ook synthese van nieuwe pigmenten. Een deel van de climacterische vruchten (climacterische en niet-climacterische vruchten worden in §2.2 besproken) kleuren na het oogsten normaal af, het nakleuren gebeurt onder andere bij bananen en tomaten. De meeste vruchten moeten echter aan de plant blijven hangen om hun volledige kleur te ontwikkelen. Vruchten die aan de plant moeten doorgroeien voor volledige kleurontwikkeling, breken meestal wel chlorofyl af wanneer ze te vroeg geoogst worden, maar de ontwikkeling van andere pigmenten dan chlorofyl blijft bij te vroeg oogsten maar beperkt tot een fractie van de normale concentratie. Hoewel de kleur vaak een nauwe relatie met de rijpheid heeft en dus het moment van oogsten bepaald, loopt de kleur niet altijd parallel met andere rijpheidsfactoren. Het rijpheidsstadium van respiratie kan anders zijn dan het rijpheidsstadium van de kleur.

Aromatische stoffen bepalen de smaak en geur van een vrucht. De samenstelling van aromatische stoffen in een vrucht verandert tijdens het rijpen. De aroma van een vrucht bestaat voornamelijk uit suikers, zuren en vluchtige stoffen. Bij de meeste rijpende vruchten aan de plant zal het suiker gehalte toenemen. Hierbij komen suikers van de bladeren in de plant. Bij climacterische vruchten kunnen er koolhydraten worden omgezet, dit kan bijvoorbeeld van zetmeel naar suiker zijn. Tijdens het rijpen is de zuurtegraad ook aan verandering onderhevig. Meestal wordt een vrucht minder zuur. Bij de geur van vruchten kunnen de concentraties van de geur enorm verschillen met de geur concentratie van een andere soort vrucht. De concentratie om een bepaalde geur waar te nemen met de neus is tevens ook erg verschillend per geur. De concentratie van de vluchtige stoffen neemt toe tijdens het rijpen. Van sommige aromatische stoffen kan de synthese achterblijven wanneer de vrucht te vroeg is geplukt.

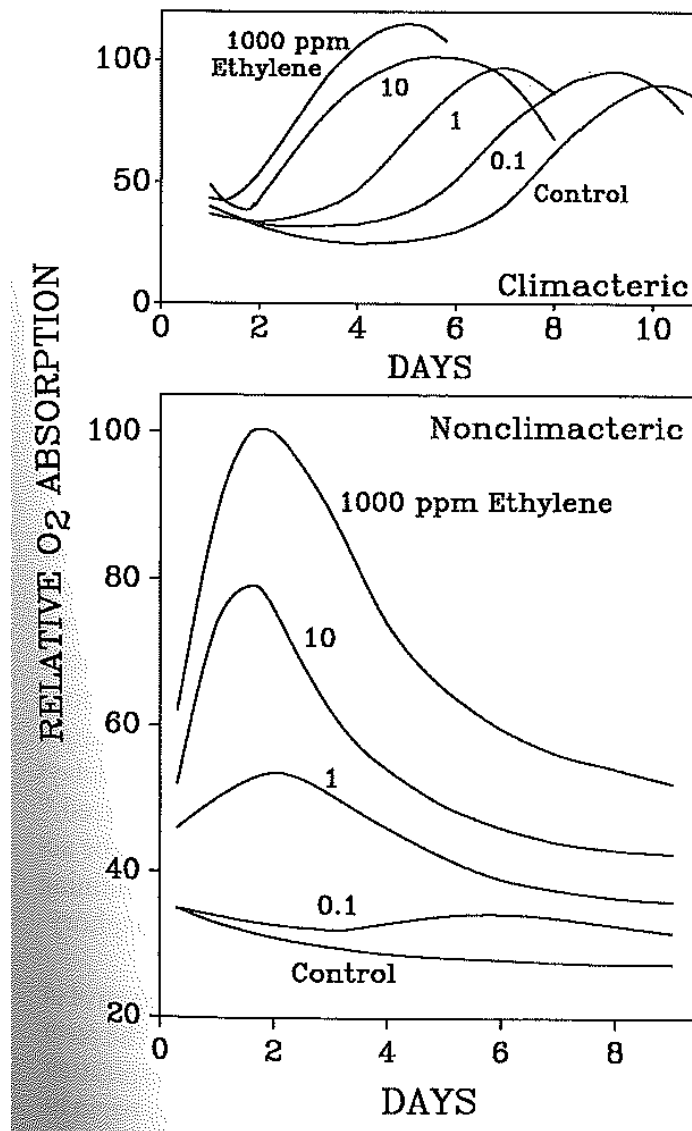
2.2 Andere factoren bij het rijpen

Sommige vruchten vertonen een piek in de respiratie snelheid en ethyleen productie. Dit zijn de zogenaamde climacterische vruchten. Appels, bananen en tomaten zijn onder andere climacterische vruchten. De olijf, sinasappel en aardbij zijn voorbeelden van niet-climacterische vruchten. Bij climacterische vruchten neemt de respiratiesnelheid af, maar op een gegeven moment neemt de respiratiesnelheid erg snel toe. Op dit moment begint de vrucht te rijpen. Na een bepaalde piek te hebben bereikt neemt de respiratiesnelheid vervolgens weer af. Climacterische vruchten worden beïnvloed door ethyleen. Wanneer ze eenmaal aan ethyleen worden blootgesteld neemt de respiratiesnelheid vaak enorm toe en gaan de climacterische vruchten zelf ethyleen produceren (een auto katalytische reactie). Als de ethyleen weer uit de lucht wordt gehaald zal bij climacterisch fruit de respiratiesnelheid blijven toenemen tot een zekere piek en dan weer afnemen. De hoogte van de piek in respiratiesnelheid is onafhankelijk van de ethyleen concentratie. Een hogere ethyleen concentratie zorgt bij climacterisch fruit er echter wel voor

dat de respiratiesnelheid eerder toeneemt. Omdat cellen in de vrucht uit verschillende celtypes bestaan zullen deze cellen van verschillende leeftijd zijn. Via diffusie van ethyleen van de vrucht zelf, komen de cellen die nog niet aan het rijpen zijn in aanraking met ethyleen. Deze cellen zullen dan ook gaan rijpen. Door andere cellen aan te slaan met ethyleengas, gebeurt het rijpen van de complete vrucht gelijkmatiger. Hierdoor kan het ook gebeuren dat in sommige climacterische vruchten de ethyleen productie net als bij de respiratiesnelheid een piek vertoont tijdens het rijpen.

Het principe van rijpen van climacterische vruchten na blootstelling aan ethyleen wordt in de praktijk ook gebruikt bij het vervoeren van bananen. Bananen worden groen geplukt, dan produceren ze nog geen ethyleen en is de respiratiesnelheid laag. Wanneer de bananen moeten rijpen worden ze even blootgesteld aan ethyleen, dan beginnen ze te rijpen en produceren ze zelf ethyleen.

Niet-climacterische vruchten vertonen geen piek in de respiratiesnelheid tijdens het rijpen. Maar onder invloed van ethyleen zal bij niet-climacterische vruchten de respiratiesnelheid wel toenemen. In tegenstelling tot climacterische vruchten neemt de respiratiesnelheid wel af als de ethyleen uit de omgeving is verwijderd. Niet-climacterische vruchten vertonen ook geen auto-katalytische reactie. De productie van ethyleen is en blijft erg laag (Kays and Paull 2004). In *Figuur 2.1* zijn de kenmerkende eigenschappen van climacterische en niet-climacterische vruchten in een grafiek weergegeven.



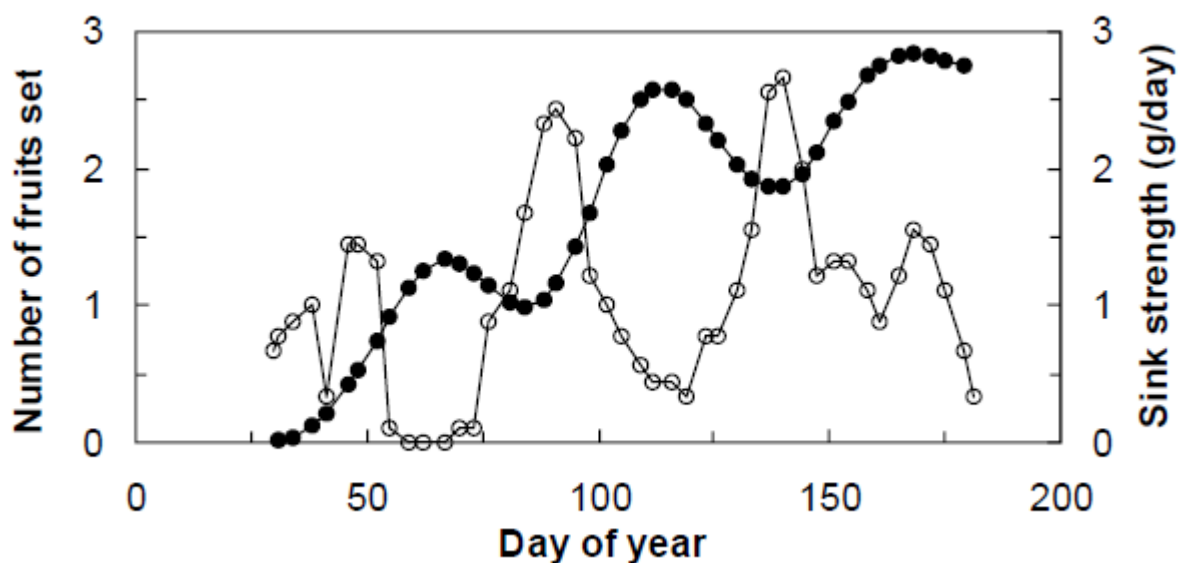
Figuur 2.1 De eigenschappen van climacterische en niet-climacterische vruchten na het toedienen van een bepaalde dosis ethyleen. Bij de climacterische vruchten is de verhoging van O₂ opname onafhankelijk van de hoeveelheid toegediende ethyleen. Bij de niet-climacterische vruchten heeft de ethyleen hoeveelheid juist een grote invloed. Figuur uit: (Kays and Paull 2004).

2.3 Rijpen van de paprika

De aanzet van nieuwe vruchten aan de paprikaplant is erg onregelmatig verdeeld over de tijd. De ontwikkeling van nieuwe vruchten wordt vertraagd door vruchten die al aanwezig zijn (Tijskens et al. 2005). Daarom kan de oogst van paprika's variëren van 5-10 paprika's per week per m² tot slechts 2 paprika's per week per m². De productiepiek komt ongeveer iedere 4-5 weken terug, maar kan worden verstoord door bijvoorbeeld het weer. De hoeveelheid nieuwe vruchten hangt voornamelijk af of er bloemknoppen, bloemen en jonge vruchten worden afgestoten door de plant. Slechts een gedeelte van de bloemknoppen zal uiteindelijk een paprikavrucht worden. Het afgstoten wordt beïnvloed door het licht en de temperatuur, maar ook door de source-sink ratio. De source geeft aan hoeveel assimilaten er beschikbaar zijn. De sink geeft de vraag naar assimilaten van de plant aan. De aanzet van nieuwe vruchten wordt positief beïnvloed door een hoge sourcestrength, en negatief door een hoge sinkstrength. De vruchtaanzet van nieuwe paprika's is dus gebaat bij een hoge source-sink ratio. De sinkstrength is het sterkst bij paprika's die halverwege de groei zijn, wanneer de paprika's weer ouder worden neemt de sinkstrength weer af. De

sinkstrength laat een regelmatige schommeling zien tijdens het rijpen van de vruchten. Hierdoor schommelt ook de source-sink ratio en dus ook de vruchtaanzet. *Figuur 2.2* laat ook duidelijk zien dat wanneer de sinkstrength een dieptepunt laat zien in een oscillatie, dat daarna de vruchtaanzet het grootst is.

Hoewel de kleur van twee verschillende paprika's er hetzelfde uit kunnen zien, kan de ene paprika wel rijp genoeg zijn, en de andere niet. Een paprika die onrijp is geplukt ontwikkelt minder smaak, dit is verlies van kwaliteit (Tadesse et al. 2002). Voor de kweker is het ook er lastig als de paprika's ongelijkmatig rijp worden. Door het onregelmatige rijpen is het moeilijk altijd aan de wekelijkse vraag te voldoen. Verondersteld wordt dat het aanzetten en de ontwikkeling van nieuwe vruchten aan de plant wordt voorkomen door vruchten aan de plant die al ouder zijn. Rijpere vruchten gebruiken enerzijds veel voedingsstoffen voor de zaden. Hierdoor blijven er minder voedingsstoffen achter voor nieuwe paprika's. Deze zaden hebben veel energie nodig om later te ontkiemen. Anderzijds geven rijpere vruchten bepaalde hormonen af. Deze hormonen voorkomen de ontwikkeling van nieuwe vruchten. Hierdoor blijven er meer voedingsstoffen over voor de rijpere vruchten. Om te voorkomen dat de productie per week erg fluctueert kan een paprikateler er voor kiezen om op verschillende datums de paprika's te planten, om zo de oogstpieken beter te verdelen over de tijd. Een andere methode voor het verdelen van de vruchtaanzet is om jonge vruchten weg te snoeien wanneer de planten veel vruchten vormen. Minder vruchten aan de plant zorgt later voor een lagere sinkstrength, door de lagere sinkstrength worden er vervolgens weer meer nieuwe vruchten gevormd. Ook wordt er hard gewerkt aan nieuwe cultivars, deze cultivars zouden een stuk minder last moeten hebben van de fluctuaties (Marcelis and Hofman-Eijer 1997; Heuvelink et al. 2004)



Figuur 2.2 Vruchtaanzet. o, Aantal nieuwe vruchten dat jonger is dan 10 dagen na de bloei). ● Sinkstrength, de potentiële groei van de vrucht. Het figuur laat zien dat de paprika plant weer nieuwe vruchten gaat vormen als de sinkstrength afneemt. Bij afname van de groei van rijpere vruchten worden er dus (meer) nieuwe vruchten aan de plant gevormd. Figuur uit: (Heuvelink et al. 2004)

Tadesse et al. (2002) hebben 'Domino' paprika's onderzocht. De paprika blijft groen voor 7 WAA (weeks after anthesis, de weken na de bloei). Hierna daalt de Hue angle (maat voor bepaalde kleur waarde) binnen een paar weken. Deze daling van de Hue angle is zichtbaar als kleur verandering van groen naar rood. De chroma neemt juist weer toe na de zeven weken. De eerste vier WAA is de chroma juist afgenomen. De Hue angle vertoont een kleinere spreiding dan de chroma, en zou dus betrouwbaarder moeten zijn. De stevigheid van de paprika begint naar ongeveer 8 weken af te nemen. Opvallend is dat de hoeveelheid oplosbare droge stof plotseling afneemt, en daarna alweer snel toeneemt. Tijdens het rijpen laat de paprika een kleine piek zien in de ethyleen productie en respiratiesnelheid, wat een climacterische eigenschap is.

Dit is ook te zien bij eerder werk van Tadesse (1998), hoewel er bij vruchten van de paprika die niet meer aan de plant zitten geen verhoogde respiratiesnelheid wordt waargenomen.

De lengte-diameter verhouding bepaalt de vorm van de paprika. De verhouding tussen de lengte en de diameter is niet constant tijdens de groei. De lengte van de paprika kan sneller of langzamer toenemen dan de diameter. Tijdens de groei zal de paprika dus niet alleen groter worden, maar verandert deze ook van vorm. De lengte diameter verhouding daalt heel scherp na 2 WAA. De eerste 2 WAA wordt de paprika juist langer. Na 11 WAA neemt de lengte een klein beetje toe, en neemt de diameter juist weer een klein beetje af. De lengte/diameter verandert hiermee in de laatste week van 1.1 naar 1.2. Eigenlijk verandert de paprika dus alleen de eerste 4 WAA echt van vorm. Daarna blijft deze tussen de 1.1 en 1.2. De veranderingen in lengte en diameter zijn de laatste weken echter maar zeer klein, in de orde van een paar centimeter. De paprika's zijn tot 11 WAA gevolgd. De groei zette tot 9 WAA door (Tadesse et al. 2002).

De lengte en de diameter van een paprika bepalen ook het volume van een paprika. Het volume kan vereenvoudigd worden tot een cilindrische vorm. Het volume wordt dan bepaald door de formule:

$$V = \frac{1}{4}\pi LD^2 \quad [\text{cm}^3] \quad (1)$$

Hierin is V het volume (cm^3), L de lengte (cm) en D de diameter (cm). Bij een paprikavriest hebben het gewicht en het volume een sterk verband met elkaar ($r^2 = 0.98$) (Tadesse et al. 2002).

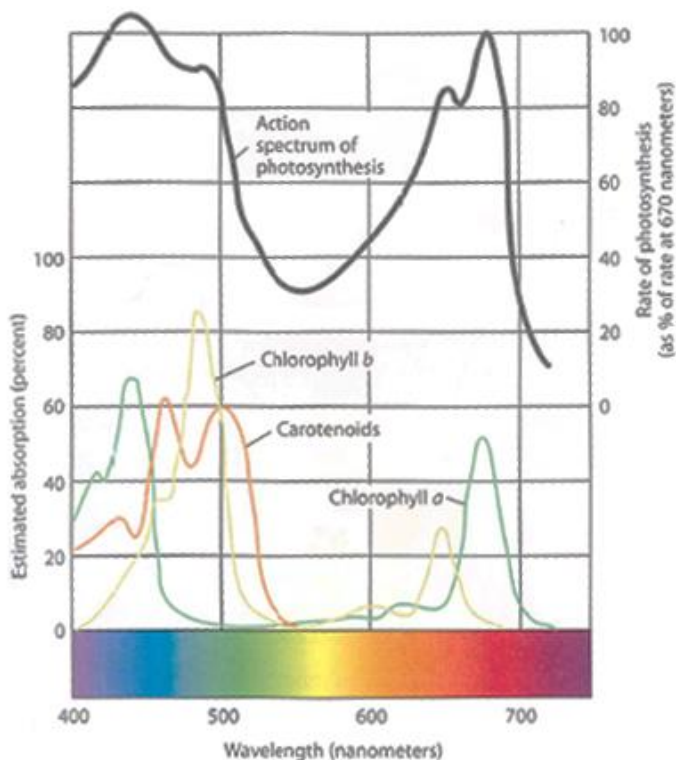
Tijdens het rijpen neemt het vitamine C gehalte toe in de paprika. Een rijpe paprikavriest heeft een aanzienlijk grotere concentratie Vitamine C dan groene, onrijpe paprika's. Dit kan verschillen van nog geen 5 mg Vitamine C per 100 gram bij onrijpe paprika's tot 120 mg per 100 gram bij rijpe paprika's. De paprika laat tijdens het rijpen ook een toename zien van carotenoïden. Deze carotenoïden pigmenten zijn mede bepalend voor de kleur. Ook hiervan hebben de rode paprika's een grotere concentratie dan de nog groene, onrijpe paprika's (Perez-Lopez et al. 2007).

Een groene, onrijpe paprika smaakt anders dan een rode of gele paprika. De paprika bevat veel vluchtige stoffen die de geur en smaak bepalen. Luning et al. (1994) hebben onderzoek gedaan naar welke stoffen groene, rijpende en rode, rijpe paprika's bevatten. In totaal werden er 64 verschillende stoffen gevonden. Gedurende het rijpen neemt de concentratie van veel vluchtige stoffen af. Hierdoor bevatten groene paprika's meer vluchtige stoffen die de smaak kunnen bepalen dan rode paprika's. Er is maar één stof gevonden die wel in rijpen of rijpende paprika's zit, maar niet in groene paprika's. De stevigheid van de paprika is waarschijnlijk ook van invloed op de smaak. Wanneer weefsel wordt kapot gemaakt kunnen er nog andere smaken worden waargenomen.

Groene paprika's bevatten chlorofyl. De chlorofylconcentratie in de paprika vrucht is vlakbij het oppervlak het grootst, en neemt af als je dieper in het vruchtvlees gaat kijken. Door de aanwezigheid van chlorofyl zijn groene vruchten fotosynthetisch actief. Gedurende het rijpen neemt de chlorofylconcentratie af, en dus ook de fotosynthetische activiteit (Pilarski and Kocurek 2005).

2.4 Chlorofyl

Chlorofyl is een pigment dat paars, blauw en rood licht absorbeert. Groen licht wordt voor grootste deel door chlorofyl gereflecteerd, daarom zijn planten en vruchten die nog chlorofyl bevatten groen. Chlorofyl is betrokken bij de fotosynthese in planten. Het absorbeert de benodigde licht-energie die nodig is voor de reactie. Er zijn verschillende soorten chlorofyl, waarvan er twee in planten te vinden zijn, dit zijn chlorofyl a en b. De andere soorten chlorofyl zijn te vinden in onder andere algen. De optimale golflengte van het licht waarbij chlorofyl maximale absorptie vertoont verschilt tussen chlorofyl a en chlorofyl b, in *Figuur 2.3* zijn de absorptie spectra weergegeven van beide typen chlorofyl.



Figuur 2.3 De absorptie spectra van verschillende pigmenten. De golflengte waarbij chlorofyl maximale absorptie vertoont verschilt tussen chlorofyl a en b. Het actiespectrum van de fotosynthese is ook weergegeven, het is duidelijk dat dit het minst is in de buurt van het groene en gele licht. *Figuur uit: (Raven et al. 2005).*

2.4.1 Chlorofyl bij de fotosynthese

Tijdens de fotosynthese wordt er lichtenergie omgezet naar chemische energie. De lichtenergie wordt geabsorbeerd door de chlorofylmoleculen. Speciale chlorofyl a moleculen kunnen de lichtenergie omzetten in chemische energie, deze speciale chlorofyl a moleculen staan namelijk een elektron af wanneer deze in een hogere energietoestand komt door de opgenomen energie. De meeste andere chlorofylmoleculen zorgen er echter voor dat de opgenomen lichtenergie wordt overgedragen aan een ander chlorofyl a molecuul zodat het uiteindelijk bij de speciale chlorofyl a moleculen komt die de energie daadwerkelijk gebruiken. Zo kan chlorofyl b alleen de geabsorbeerde lichtenergie aan een ander chlorofyl molecuul overdragen, maar zetten chlorofyl b moleculen de lichtenergie niet om in chemische energie (Raven et al. 2005).

2.4.2 Chlorofyl fluorescentie

Niet al het licht wat door de chlorofylmoleculen wordt geabsorbeerd, wordt door de fotosynthese gebruikt. Het kan zijn dat de energie weer wordt uitgezonden als warmte. Ook kan er een foton worden uitgezonden van een lagere energie, deze foton heeft dus een kortere golflengte dan de ingestraalde energie. Het resterende deel wordt dan als warmte uitgezonden (Raven et al. 2005), (Maxwell and Johnson 1999). Doordat de chlorofylfluorescentie een langere golflengte heeft dan het licht wat wordt geabsorbeerd door chlorofyl, is het mogelijk om één bepaalde golflengte aan chlorofyl bloot te stellen en dan de langere golflengtes die worden uitgestraald te meten. Zo kan chlorofylfluorescentie gemeten worden. Wanneer een plant wordt blootgesteld aan vol licht zal de chlorofylfluorescentie snel toenemen. Het fotosysteem II raakt dan verzadigd en is niet meer in staat om de geabsorbeerde energie te gebruiken. De energie moet dus weer worden uitgezonden, dit gebeurt in de vorm van warmte en licht (fluorescentie) (Maxwell and Johnson 1999), (Krause and Weis 1991). In fotosysteem II wordt er water opgesplitst wanneer er lichtenergie wordt opgevangen. Hierbij komt er zuurstof vrij.

2.4.3 Chlorofyl afbraak

Zoals al eerder is vermeld wordt er tijdens het rijpen chlorofyl afgebroken. Chlorofyl b wordt niet direct afgebroken, maar wordt eerst omgezet naar chlorofyl a. Het omzetten van chlorofyl b naar chlorofyl a wordt ook wel gezien als de het begin van de gehele chlorofylafbraak. Tijdens het afbreken van chlorofyl ontstaan er verschillende katabolieten, dit zijn producten die ontstaan bij het afbreken van grotere moleculen. Het grootste deel van de chlorofylkatabolieten hebben geen kleur en zijn daarom moeilijk waar te nemen. Daarom heeft het lange tijd geduurd voordat er meer bekend werd over de chlorofylafbraak. Met behulp van fluorescentietechnieken is er toch geprobeerd om meer te weten te komen van het afbreken van chlorofyl (Hörtensteiner and Kräutler 2010), (Kräutler and Matile 1999). Bij het volgen van de paprika's met de sensor van Henk Jalink en Rob van der Schoor zal de chlorofyl b / chlorofyl a dus waarschijnlijk af nemen aan het begin van het rijpen van de paprikavrucht.

Er zijn vruchten die groen blijven. Dit zijn zogenaamde 'chlorophyllretainers'. Deze vruchten breken tijdens het rijpen namelijk niet, of nauwelijks, chlorofyl af. Ook bij paprika's zijn er soorten die geen chlorofyl afbreken. Wanneer rode paprika's geen chlorofyl kunnen afbreken zal deze bruin worden, wat een combinatie is van groen en rood. Bij gele paprika's zal de kleur groen blijven wanneer er geen chlorofyl wordt afgebroken bij het rijpen (Borovsky and Paran 2008).

2.4.4 Chlorofyl in verschillende soorten vruchten

Van verschillende soorten vruchten is het bekend hoe de hoeveelheid chlorofyl verandert in verschillende rijpheidsstadia. Dit is onder andere gedaan bij bananen. In het begin is de concentratie van chlorofyl a veel groter dan die van chlorofyl b. Later komen de concentratie dicht bij elkaar in de buurt. Tijdens het rijpen nemen de concentraties van zowel chlorofyl a als b af. De carotenoïden concentratie neemt eerst af en daarna weer toe, terwijl de concentratie van beide chlorofyl typen alleen afneemt. Met het vergelijken van de carotenoïden en chlorofyl curve is het dus aannemelijk dat de afbraak van chlorofyl geen direct verband houdt met de synthese van carotenoïden. De afbraak en synthese van beide pigmenten zou dus onafhankelijk van elkaar zijn. De snelle kleurverandering van bananen wordt voor een groot deel veroorzaakt doordat chlorofyl snel wordt afgebroken en hierdoor al eerder aanwezige pigmenten zichtbaar worden.

3 Materialen en methoden

De chlorofylfluorescentiemetingen werden verricht aan paprika's die nog aan de plant zaten. De planten werden gedurende 4 weken gevolgd. De exacte oogstdatum van de metingen zijn per paprika vermeld in Tabel 3-2. De planten waaraan gemeten is kwamen uit een kas in Bleiswijk, van een commerciële kweker. De gebruikte rassen waren dus productierassen. Gedurende de metingen hebben de planten in klimaatcel C2 gestaan van het Radix gebouw in Wageningen. Uiteindelijk werden er vier rode (cultivar: Spider) en drie gele paprikaplanten (cultivar: Stayer) gevolgd.

Er is vanuit gegaan dat de energieoverdracht van chlorofyl b naar chlorofyl a die wordt gemeten met de chlorofylfluorescentiesensor zoals beschreven in het bij behorende patent (Jalink and Schoor 2002) overeenkomt met de chlorofylratio. In dit onderzoek wordt er dan ook over de chlorofylratio gesproken (chlorofyl b / chlorofyl a).

3.1 Hoe meten?

Op de paprika wordt door de sensor op een beperkte oppervlakte (1 mm bij 5 mm) gemeten. De chlorofylratio zal niet homogeen zijn verdeeld over de paprika. De kant die in de zon hangt zal waarschijnlijk sneller rijpen en dus eerder beginnen met het afbreken van de chlorofyl. Verder bevinden zich achter de groeven van de paprika verdikkingen in het vruchtvlees. Dit kan ook van invloed zijn op de chlorofylconcentratie en dus de fluorescentiemeting.

Van der Helm (2011) heeft eerder aangegeven dat de chlorofylratio in een geoogste paprikavrucht een variatiecoëfficiënt kan hebben tot 35%.

3.2 Proefmeting

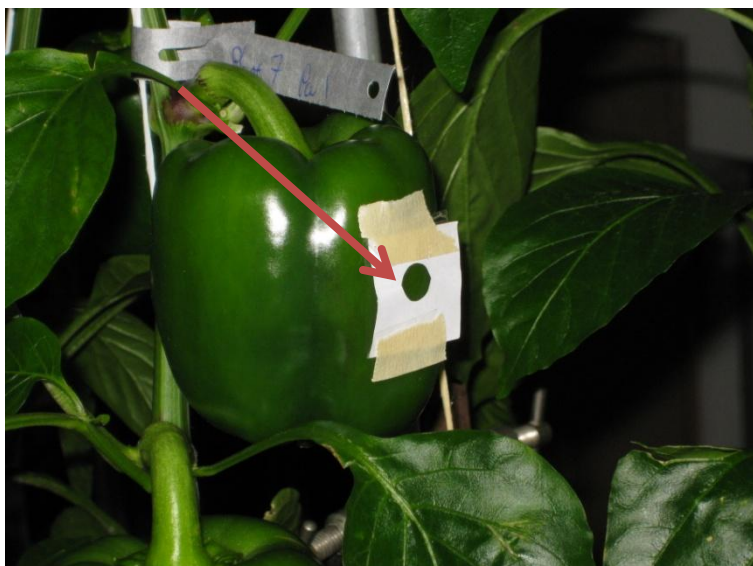
Om enig gevoel met de chlorofylsensor te krijgen is er een proefmeting uitgevoerd. De proefmetingen waren ook bedoeld om een indruk te krijgen hoe er gemeten zou kunnen worden en hoe precies de metingen zijn. Het resultaat van de proefmetingen is ook gebruikt bij de beslissing hoe er gemeten gaat worden. De resultaten van de proefmetingen staan kort beschreven in §4.1.

3.3 De metingen

De paprikaplanten die gebruikt werden voor de metingen stonden in klimaatcel C2 in het Radix gebouw te Wageningen. Eén keer per dag werden de planten uit de cel gehaald en op een karretje vervoerd naar het lab waar de chlorofylsensor stond. In het lab werd de chlorofylfluorescentie gemeten alsmede de kleur met een chromameter. Ook werden de lengte en de diameter van de paprika opgemeten met een schuifmaat om te onderzoeken of er een relatie zit tussen de lengte en diameter (en de verhouding van deze twee) en de chlorofylfluorescentie.

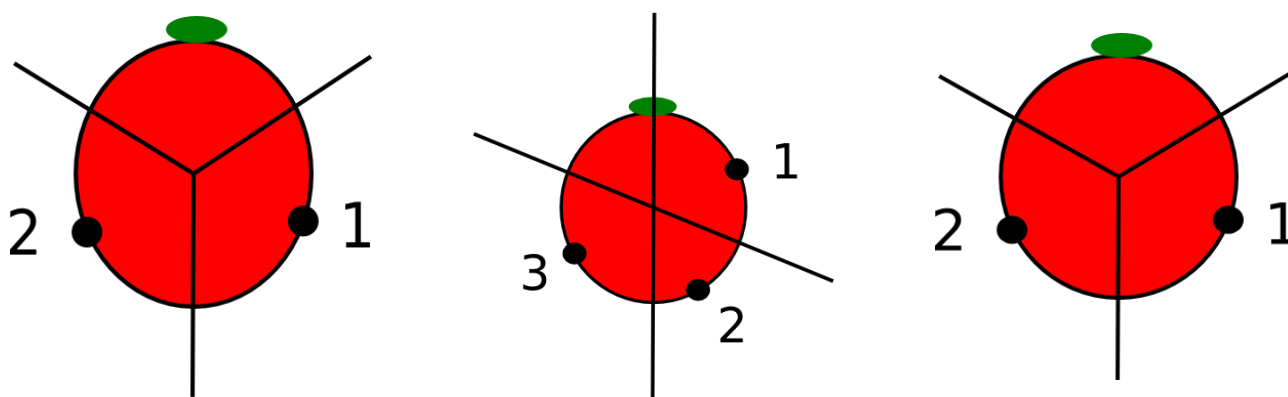
3.3.1 Verdeling van de paprika

Om de paprika's zelf te identificeren werden er labels om de paprika gehangen. Op deze labels stond het nummer van de paprikaplant en het nummer van de paprika zelf. Om de paprika zelf te verdelen in verschillende meetpunten is uiteindelijk gebruik gemaakt van de vorm van de paprika zelf. De paprika heeft een natuurlijke verdeling van meestal drie of soms vier 'bollingen', of vlakken. Op het midden van een vlak is iedere keer een meting uitgevoerd. *Figuur 3.1* geeft aan waar er op het vlak gemeten is, en hoe de natuurlijke vlakken op de paprika van elkaar gescheiden zijn. Er waren uitzonderingen in op het midden meten van een vlak, maar deze uitzonderingen zijn vermeld bij de figuren in deze paragraaf. Omdat de paprika's nog aan de planten hingen, en de sensor één vaste opstelling had, kon niet op ieder vlak van een paprika gemeten worden. In de praktijk zie je de paprika ook maar slechts voor een gedeelte, alleen vanaf het looppad. Er moet dus later ook rekening mee worden gehouden dat niet de hele paprika zichtbaar zal zijn voor de sensor.

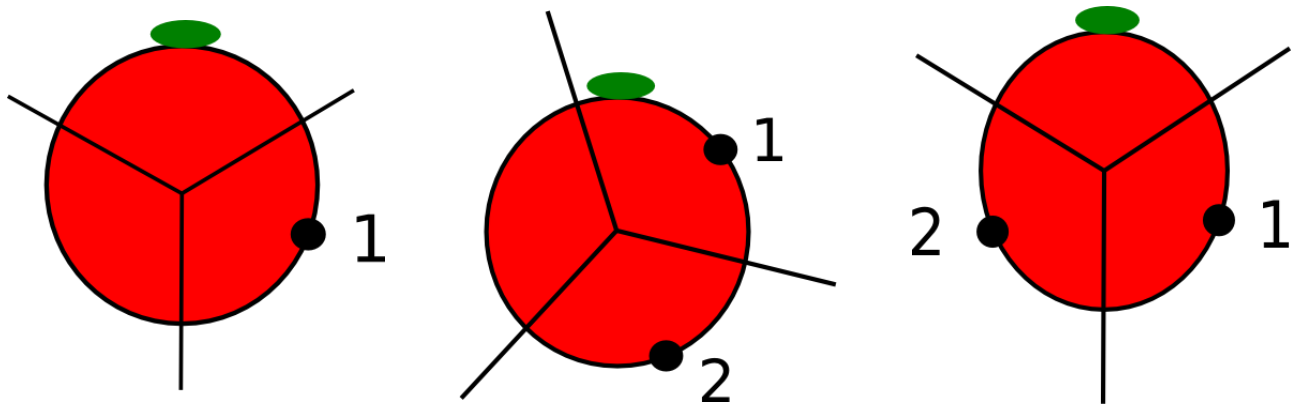


Figuur 3.1 Meetpunt op de paprika. Op het midden van het vlak is de meting uitgevoerd, in de uitgeknipte cirkel. De twee vlakken worden van elkaar gescheiden door een natuurlijke 'groef'.

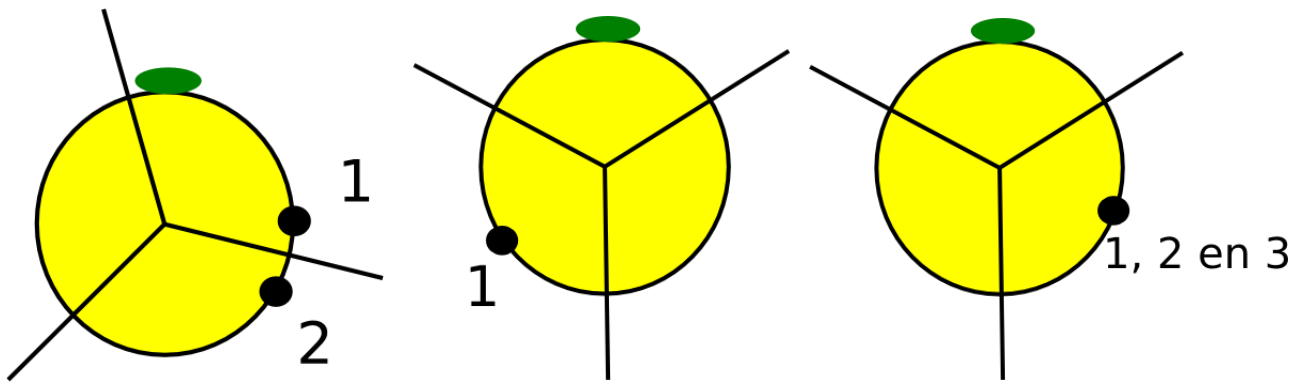
Om een goed beeld te krijgen van de metingen zijn de meetpunten schematisch weergegeven. Hierbij is de stengel waar de paprika aan de plant vast zat gebruikt als referentie punt. Vervolgens zijn de meetpunten van de paprika's met de klok mee genummerd. De nummers verwijzen dus niet naar een bepaald vlak van de paprika. Aan de hand van gemaakte foto's was er een zo goed mogelijke reconstructie gemaakt. In Figuur 3.2, Figuur 3.3, Figuur 3.4 en Figuur 3.5 zijn de meetpunten schematisch weergegeven.



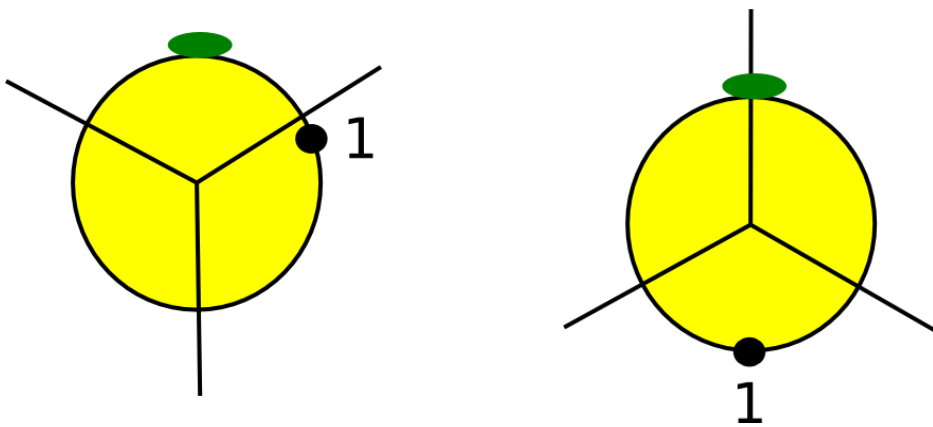
Figuur 3.2 Bovenanzicht van de meetpunten op de paprika's. Van links naar rechts paprika 1.1, 1.2 en 2.1. De groene stip geeft aan waar de paprika aan de plant zat. De zwarte stippen geven aan waar er op de paprika is gemeten. De zwarte strepen geven de scheiding van de vlakken van de paprika weer.



Figuur 3.3 Boven aanzicht van de meetpunten op de paprika's. Van links naar rechts paprika 2.2, 3.1 en 4.1. De groene stip geeft aan waar de paprika aan de plant zat. De zwarte stippen geven aan waar er op de paprika is gemeten. De zwarte strepen geven de scheiding van de vlakken van de paprika weer.



Figuur 3.4 Bovenaanzicht van de meetpunten op de paprika's. Van links naar rechts paprika 5.1, 5.2 en 6.1. De groene stip geeft aan waar de paprika aan de plant zat. De zwarte stippen geven aan waar er op de paprika is gemeten. Op paprika 5.1 zat een vaste plakker (punt 1) en werd er links van de plakker op het vlak er naast gemeten (punt 2). Op paprika 6.1 waren er drie meetpunten over de hoogte verdeeld, de zwarte stip geeft aan waar op het horizontale vlak zich deze meetpunten bevonden, deze punten liepen van boven naar beneden. De zwarte strepen geven de scheiding van de vlakken van de paprika weer.



Figuur 3.5 Bovenaanzicht van de meetpunten op de paprika's. Van links naar rechts paprika 6.2 en 7.1. De groene stip geeft aan waar de paprika aan de plant zat. De zwarte stippen geven aan waar er op de paprika is gemeten. De zwarte strepen geven de scheiding van de vlakken van de paprika weer.

3.3.2 Vast punt van meten

Op het oog werd iedere keer het midden van een vlak opgezocht, waar gemeten werd. Een sjabloon van papier werd er opgeplakt zodat er tijdens het meten het punt niet teveel afwijkt. Het sjabloon was een uitgeknipte cirkel met een straal van ± 5 mm. Tijdens het meten van de chlorofylfluorescentie en de kleur werd er opgelet dat de meting binnen in de cirkel werd verricht. Na het meten van chlorofylfluorescentie en kleur werd dit sjabloon uiteraard weer verwijderd zodat de paprika ongestoord verder kon groeien. De plakker met de cirkel zou misschien licht tegen gehouden kunnen hebben, wat van invloed kan zijn op de chlorofylafbraak in de vrucht. Uit de proefmeting is gebleken dat waarschijnlijk de afwijking ten opzichte

van het vorige midden een niet heel groot verschil op zal leveren bij de groene paprika's. Op het oog het midden bepalen is dus waarschijnlijk nauwkeurig genoeg. Ongeveer één keer per week zijn er van een aantal paprika's 5 metingen in plaats van één binnen de uitgeknipte cirkel uitgevoerd. Bij de resultaten is er dan het gemiddelde gebruikt om de chlorofylratio van die dag te bepalen. Omdat de verschillen tussen deze 5 metingen zeer klein waren, is er gekozen om normaal maar één keer per vlak te meten. Om het terug vinden van de juiste plek enigszins makkelijker te maken waren er ook foto's gemaakt van de paprika's. Op de foto's werd aangegeven waar op de paprika de vorige keer gemeten was. Met behulp van de foto's kon de plaats van de plakker weer worden terug gevonden. Er is geprobeerd om dit zo goed mogelijk te doen. Wanneer er op de foto werd gekeken waar de paprika aan de plant vast zat kon weer hetzelfde gezichtspunt worden ingenomen, zodat de plakkers er weer met de juiste volgorde erop werden geplakt.

3.3.3 Meten van de chlorofylfluorescentie

De sensor stond vast, dus de planten moesten volledig naar de sensor toe worden gebracht. Paprika's zitten erg stevig aan de plant. Het leek ook hoe groter/ouder de paprika's waren des te steviger ze aan de plant hingen. De paprika even ombuigen naar de sensor toe ging dus niet. Om de rode paprika's tegen de sensor te houden werden de paprikaplanten met de hand opgetild. Dit kon nog zonder breken, omdat ze nog relatief klein waren. Het blokje steenwol waar ze in stonden was ook niet te zwaar om mee opgetild te worden. Door te draaien konden er bij de rode paprika's meestal twee vlakken per paprika gemeten worden. Bij de gele paprika's was het lastiger om ze bij de sensor te krijgen. Deze planten waren al zover gegroeid dat ze niet meer individueel op te tillen waren. Om de planten toch bij de sensor te krijgen is er gebruik gemaakt van een elektrisch liftje, waarmee de te meten paprika precies op hoogte kon worden gebracht. Met het verschuiven van de bak waar de planten in stonden kon de paprika dan zo dicht mogelijk naar de sensor worden gebracht. De laatste paar centimeter werden de paprika's met de hand tegen de sensor geduwd. Doordat het erg manoeuvreren was kon er bij de gele paprika's meestal maar op één vlak van de paprika gemeten worden.

De fluorescentie veroorzaakt door het aanslaan van chlorofyl a en chlorofyl b moleculen werden afgelezen van de twee lock-in-versterkers. De weergegeven eenheid was micro-volt. Er is geprobeerd om af te lezen aan de top van de inductiecurve, het punt waarbij de chlorofylfluorescentie het grootst is, de fluorescentie neemt daarna weer af, en is maar een paar seconden op het maximale niveau. Op de lock-in-versterker was echter geen functie aanwezig die de maximale waarde opslaat. De maximale waarde van de fluorescentie van chlorofyl a en b moest dus worden onthouden, en direct worden opgeschreven. Het aflezen en onthouden van de maximale waarde brengt natuurlijk een onnauwkeurigheid met zich mee. Na een aantal metingen gedaan te hebben ging dit steeds beter.

3.3.4 Meten van de kleur

Met een chroma meter was dagelijks de kleur gemeten. Het LCH kleur model is gebruikt, om de metingen uit te drukken. Dit systeem is onder andere gebruikt door Tadesse et al. (2002) en door Van der Helm (2011) om de kleur van de paprikavrucht uit te drukken. Uit onderzoek van Van der Helm (2011) blijkt ook dat de Hue angle een sterke correlatie (r^2 groter dan 0.8) heeft met de chlorofylratio bij geogste paprika's. Om vergelijkingen makkelijker te maken tussen de eerdere onderzoeken, en vanwege de sterke relatie tussen de chlorofylratio en Hue angle, werd er daarom in dit onderzoek ook voor het LCH kleur model gekozen. De gebruikte chroma meter betreft een Minolta Chroma meter model CR-221 (dezelfde als Van der Helm (2011)). De kleur werd dagelijks gemeten. Het meetpunt van de kleurmeting was hetzelfde als bij de chlorofylfluorescentiemeting en ook weer met het oog bepaald. Door het gebruik van het sjabloon zal de afwijking van het meetpunt per meting niet veel verschillen van die van de chlorofylsensor. De chromometer meet een grotere oppervlakte dan de fluorescentie meter en geeft eigenlijk het gemiddelde weer van drie metingen ('flitsen') die de chroma meter uitvoert, daarom is er altijd één kleurmeting per vlak uitgevoerd.

De Hue angle loopt van 0° tot 360° . De primaire kleuren (rood, groen en blauw) verschillen onderling 120° van elkaar. Over het algemeen wordt rood op 0° gezet, en wordt er tegen de klok in gekeken. Rood is dan 0° , groen 120° en blauw 240° (Gonzalez and Woods 2008).

3.3.5 Meten van de lengte en diameter

Een andere parameter die verandert tijdens het rijpen is de lengte en de breedte van de paprika vrucht. De langste lengte en de grootste diameter van de paprika werden ook iedere dag bepaald. Hiervoor werd een digitale schuifmaat gebruikt. De ratio van de lengte en de diameter geeft een kwantificatie van de vorm van de paprika.

3.3.6 Het plant materiaal

In totaal is er gebruik gemaakt van drie gele paprikaplanten (cultivar: Stayer), en vier rode paprikaplanten (cultivar: Spider). Van de rode planten kunnen ook paprika's worden geoogst die als groen worden verkocht. Wanneer ze langer aan de plant hangen worden ze rood. In de paprikateelt worden deze paprika's ook daadwerkelijk in beide kleuren verkocht. Alle planten stonden op steenwol, en stonden alvast in een steenwol kluit toen ze werden aangeleverd. De gele planten werden met steenwol omringd in de bak, zodat de wortels verder konden groeien. De rode paprika's hadden een kleine kluit zodat deze in een soort zak met steenwol werden geplaatst. Omdat de planten iedere dag vanuit de klimaatcel naar het lab vervoerd moesten worden werden ze met het steenwol in bakken gezet. Tegen het verstikken van de wortels van de paprikaplanten hadden de bakken gaten. In de zakken met steenwol moesten er ook gaten worden geprikt. De drie gele planten stonden in één bak, en de vier rode planten werden over twee bakken verdeeld. De planten waren 1.2 m - 1.5 m hoog toen ze op 7 maart 2011 naar Wageningen werden gebracht. Opbinden van de planten was al meteen noodzakelijk, anders vielen ze om. Voor het opbinden werd een hoog statief in de bakken geplaatst. Aan het statief werden de planten opgebonden met touw. Doordat het statief ook in de bakken was geplaatst, konden de planten gemakkelijk worden vervoerd.

Gedurende het verblijf van de planten in de klimaatcel stonden ze aangesloten op een druppelsysteem. Omdat er in dezelfde klimaatcel ook nog veel kleinere planten (minder verdamping) stonden die ook gebruik maakte van hetzelfde druppelsysteem kregen ze hiermee niet voldoende water. Daarom werd er iedere dag wat extra water en voeding gegeven met de gieter. Die voeding die werd gegeven met die gieter en druppelsysteem was eigenlijk bedoeld voor tomaten, maar de gebruikte voeding zal hoogstwaarschijnlijk geen effect hebben op de resultaten.

Tabel 3-1 Gegevens van de klimaatcel waar de paprika's in stonden.

Lichttijd	Van 01:00 tot 16:30
Hoeveelheid PAR overdag	350-400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Temperatuur	21-22 °C
Relatieve luchtvochtigheid	70%

3.3.7 Paprika schema

Het volgende schema geeft inzicht in de verdeling van de metingen over de verschillende paprika's. De planten waren genummerd van 1 t/m 7. Op iedere plant werden de paprika's waaraan gemeten werd ook weer afzonderlijk genummerd. Op een individuele paprika werden de te meten vlakken ook nog eens genummerd. De uiteindelijke codering van een meetpunt bestaat dus uit drie delen. De plant, paprika en part zijn gescheiden met een punt (plantnummer.paprikanummer.partnummer). Om alleen een paprika aan te geven kan het partnummer weggelaten worden. Het schema geeft ook aan vanaf wanneer er begonnen is met meten, en wat de datum van oogsten was. Of een paprika rijp genoeg was om te oogsten is met het oog beoordeeld. Er is geprobeerd om 90% tot 99% verkleuring van de paprika aan te houden. Dit is ook het moment waarop de telers de paprika's in de winter oogsten.

Tabel 3-2 De oogstdatum van de verschillende paprika's.

Paprika kleur (cultivar)	Paprika	Oogst datum
Rood (cultivar:Spider)	1.1	Niet rijp aan het einde van de metingen
	1.2	8-april
	2.1	2-april
	2.2	Niet rijp aan het einde van de metingen
	3.1	1-april
	4.1	4-april
Geel (cultivar: Stayer)	5.1	25-maart
	5.2	25-maart
	6.1	5-april
	6.2	3-april
	7.1	5-april

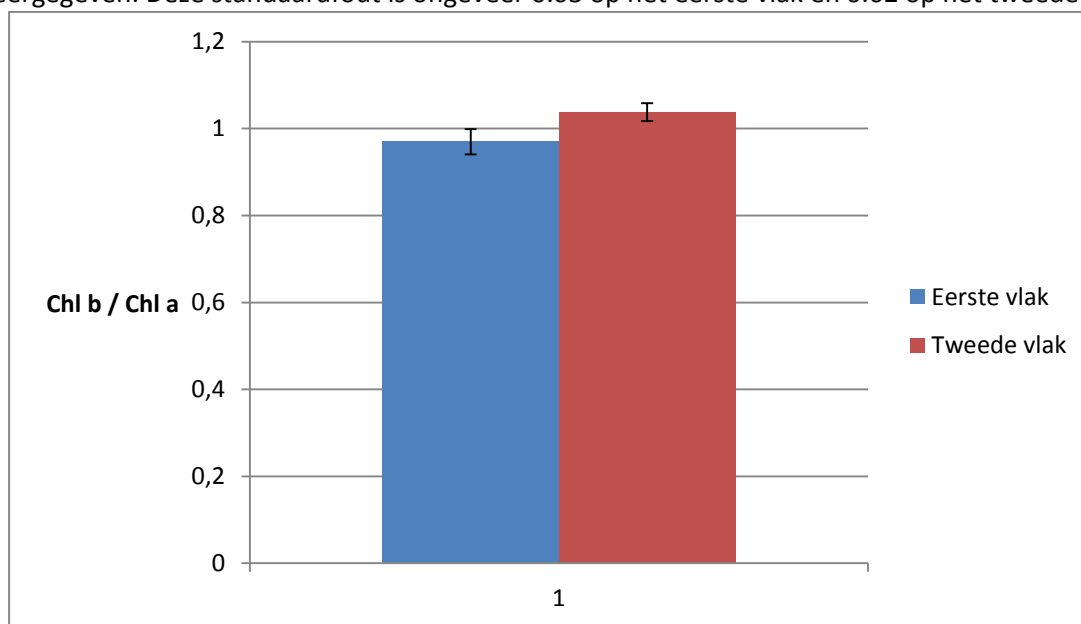
4 Resultaten

De paprika's zijn niet vanaf één bepaald stadium in de groei gevolgd. Het begin van de metingen is min of meer willekeurig gebeurd. De ene paprika kan dus verder zijn geweest in de ontwikkeling dan de andere, dit terwijl er wel op dezelfde datum is begonnen met meten. Het is dus niet mogelijk om de verschillende paprika's één op één te vergelijken in veranderingen door de tijd. Er kan wel worden gekeken of er bepaalde trends zijn van de gemeten parameters die bij meerdere paprika's voorkomen.

4.1 Resultaten precisie bepaling

De rode en gele paprika's gaven een te lage fluorescentie om betrouwbaar te zijn (< 1.0 microvolt).

Van de groene paprika's is het resultaat wel de moeite waard om ze te vermelden. De resultaten zijn in *Figuur 4.1* weergegeven. Op een vlak van de paprika was op het oog het midden bepaald. In de buurt (schatting: ongeveer 2 cm vanaf) van dit punt is vijf keer een meting uitgevoerd. Van al deze metingen is de ratio bepaald en van deze ratio's is het gemiddelde genomen, voor allebei de vlakken lag de gemiddelde ratio in de buurt van de 1. De standaardfout van de ratio's is ook berekend en in de onderstaande grafiek weergegeven. Deze standaardfout is ongeveer 0.03 op het eerste vlak en 0.02 op het tweede vlak.



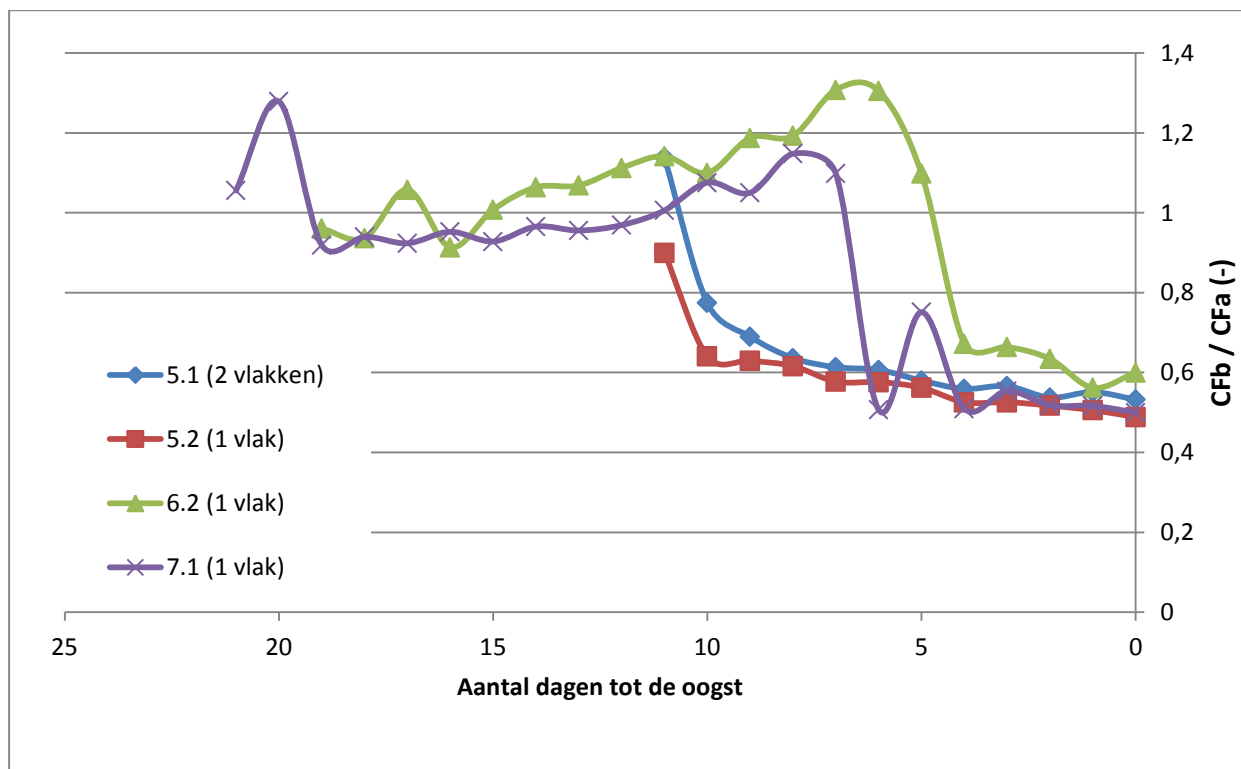
Figuur 4.1 Twee vlakken gemeten bij een groene paprika. Op ieder vlak is in totaal vijf keer achtereenvolgens gemeten. In de grafiek is de gemiddelde ratio weergegeven en de standaardafwijking.

4.2 De gele paprika's

De gele paprika's waren al verder in ontwikkeling dan de rode paprika's toen ze naar Wageningen kwamen. Bij de gele paprika's konden er daarom al een paar paprika's gevolgd worden die al net begonnen te verkleuren. Bij de komende resultaten is dat duidelijk terug te zien.

4.2.1 Verloop van de chlorofylratio

Figuur 4.2 geeft de chlorofylratio weer van vier gele paprika's (cultivar: Stayer). Dag 0 is de dag van oogsten. De dagen ervoor zijn het aantal dagen totdat er geoogst is. Sommige meetreeksen in *Figuur 4.2* zijn korter omdat er op dezelfde dag begonnen is met meten. Op de eerste dag van de metingen bevonden de paprika's zich namelijk in verschillende rijpheidsstadia.



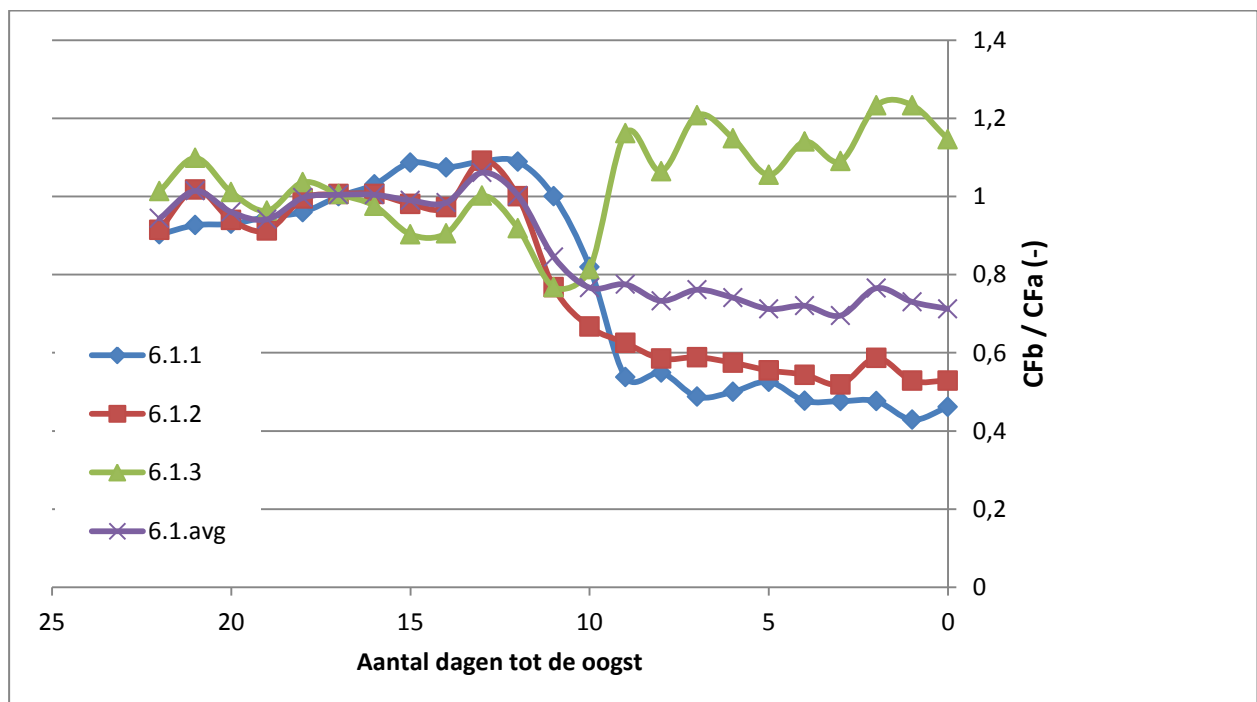
Figuur 4.2 Het verloop van de chlorofylratio van vier gele paprika's (cultivar Stayer). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot de oogst aan. Op alle paprika's is er op één of twee vlakken gemeten, in de grafiek is de gemiddelde chlorofylratio weergegeven.

Bij alle vier de paprika's is op het moment van oogsten de chlorofylratio vrijwel het laagst. Bij paprika 6.2 is dit niet het geval, de afwijking is echter klein. Dit komt waarschijnlijk door een afleesfout, of een afwijkend (ten opzichte van de vorige) meetpunt. Tijdens het rijpen verandert de eerste periode de chlorofylratio maar langzaam. Bij paprika 6.2 en 7.1 neemt de chlorofylratio eerst lange tijd toe. Er zitten wel wat schommelingen in, echter is de algemene trend van deze twee paprika's toch dat de chlorofylratio tot 6-7 dagen voor de oogst langzaam stijgt. Vooral paprika 6.2 laat dit duidelijk zien. Op 6-7 dagen voor de oogst neemt de chlorofylratio binnen een dag flink af, om vervolgens weer langzamer af te nemen.

Op het moment van oogsten lag de chlorofylratio tussen de 0.5 en 0.6. Dit geldt voor alle vier de paprika's in de grafiek. Paprika 5.1 en 5.2 hebben langer aan de plant gehangen toen de chlorofylratio al sterk was afgenomen. Het zou goed kunnen dat deze paprika's rijper waren toen ze geoogst werden dan paprika 6.2 en 7.1. Verder begonnen paprika 5.1 en 5.2 net met verkleuren toen er begonnen werd met de metingen. De andere twee paprika's waren nog helemaal groen bij het starten van de metingen. Paprika 7.1 maakt op 5 dagen voor de oogst een rare sprong in de chlorofylratio. Dit komt bij de andere paprika's niet voor. De sprong komt waarschijnlijk doordat de paprika niet helemaal goed voor de sensor was geplaatst. Bij paprika 7.1 was het namelijk altijd erg manoeuvreren om de paprika in de buurt van de sensor te krijgen.



Figuur 4.3 Paprika's 5.1 (links) en 5.2. Deze twee paprika's waren al enigszins verkleurd toen er begonnen werd met meten. De paprika's begonnen te verkleuren vanuit de groef tussen de vlakken, en van boven af. Bij paprika 5.1 is er ook net links van de plakker gemeten. Deze foto is 10 dagen voor de oogst genomen.



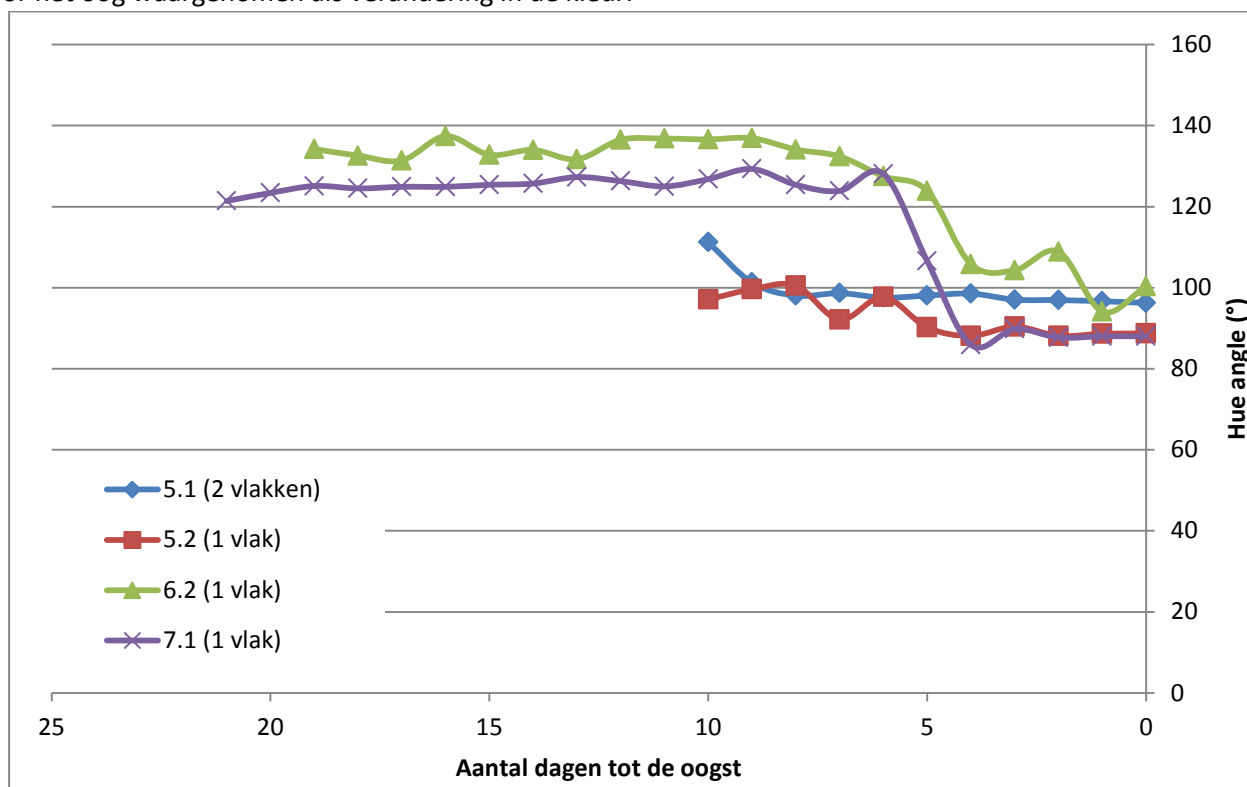
Figuur 4.4 Het verloop van de chlorofylratio van één gele paprika (cultivar: Stayer). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot de oogst aan. Er is op een drie vlakken gemeten, met de meetpunten over de lengte verdeeld. Punt 6.1.3 laat een afwijkend resultaat zien ten opzichte van de andere twee meetpunten.

Figuur 4.4 geeft het verloop van de chlorofylratio van paprika 6.1 weer. De drie meetpunten waren van boven naar beneden verdeeld allemaal op hetzelfde vlak. De chlorofylratio van punt 6.1.1 en 6.1.2 laten

ongeveer tien dagen voor de oogst een scherpe daling zien, deze daling duurt ongeveer twee dagen. Daarna neemt de ratio van beide punt langzaam af. Op dag 0, dag van oogsten zitten ze rond een chlorofyl ratio van 0.5. Punt 6.1.3 daalt tussen de 13 en 11 dagen voor de oogst. 9 dagen voor de oogst is de chlorofylratio echter weer flink gestegen. Na 9 dagen voor de oogst blijft de chlorofylratio op punt 6.1.3 boven de 1 schommelen. Door het afwijkende punt 6.1.3 is het gemiddelde van alle drie de punten ook hoger dan 0.6 op de dag van oogsten. Punt 6.1.3 zat aan de onderkant van de paprika, dit geeft een scherpe hoek, waardoor het meetpunt misschien niet recht tegen de glas plaat is gekomen. Dit kan een aantal metingen hebben verstoord, waardoor de chlorofylratio hoger is uitgevallen.

4.2.2 Het verloop van de Hue angle

De verandering van de Hue angle is in *Figuur 4.5* weergegeven. Paprika 5.1 en 5.2 waren al net begonnen met verkleuren toen de metingen werden gestart. Een verandering in de Hue angle wordt ook door het oog waargenomen als verandering in de kleur.

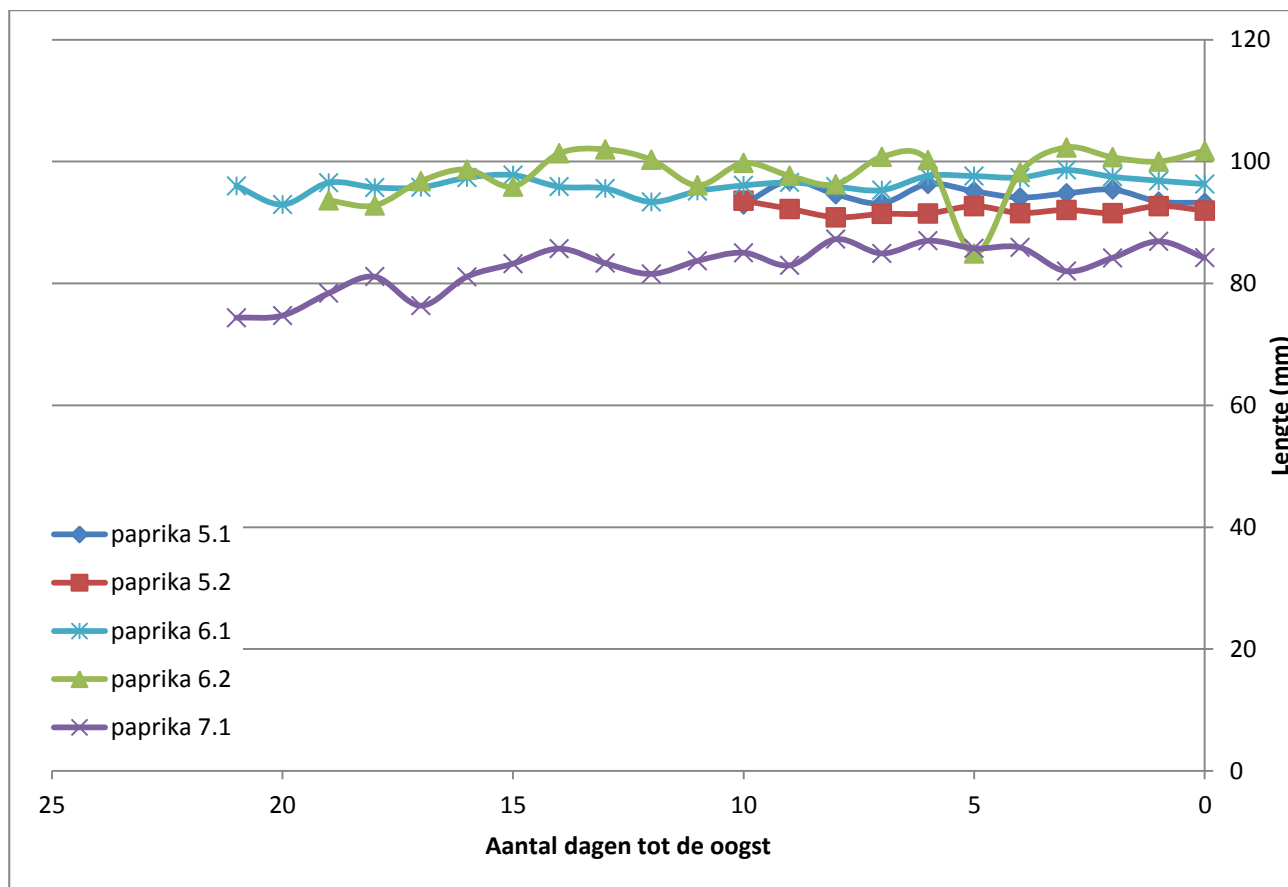


Figuur 4.5 Het verloop van de Hue angle van vier gele paprika's (cultivar:Stayer). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot de oogst aan. Op de paprika's is er op één of twee vlakken gemeten. In de grafiek is het gemiddelde weergegeven. Paprika 6.2 en 7.1 laten voor de oogst een sterke daling zien van de Hue angle.

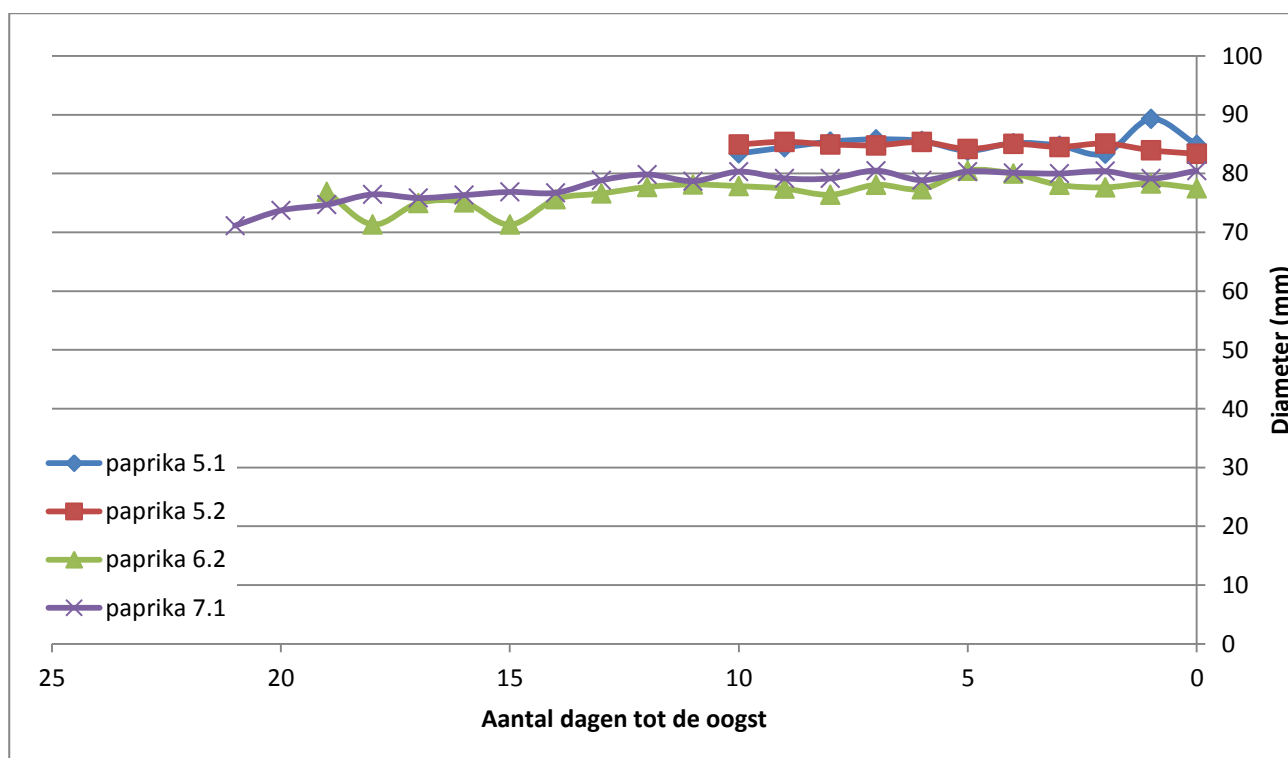
Voordat de paprika's beginnen te verkleuren blijft de Hue angle constant tussen de 120° en 140°. In de laatste fase van het rijpen daalt de Hue angle tot 90°-100°. Wanneer de Hue angle gedaald is blijft deze weer constant. Bij paprika 7.1 is de daling van de Hue angle het scherpst. Bij de paprika's 5.1 en 5.2 was de Hue angle al erg laag tijdens de eerste meting omdat ze toen al begonnen waren met verkleuren.

4.2.3 Het verloop van de lengte en diameter

In *Figuur 4.6* en *Figuur 4.7* zijn de lengte en diameter van vijf Stayer paprika's weergegeven. Dit geeft aan hoelang de paprika's nog blijven groeien tot ze rijp zijn.



Figuur 4.6 Het verloop van de lengte van alle gele paprika's (cultivar:Stayer) . Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot het oogsten aan. De lengte van de paprika's neemt de laatste twee weken voor de oogst nauwelijks meer toe.

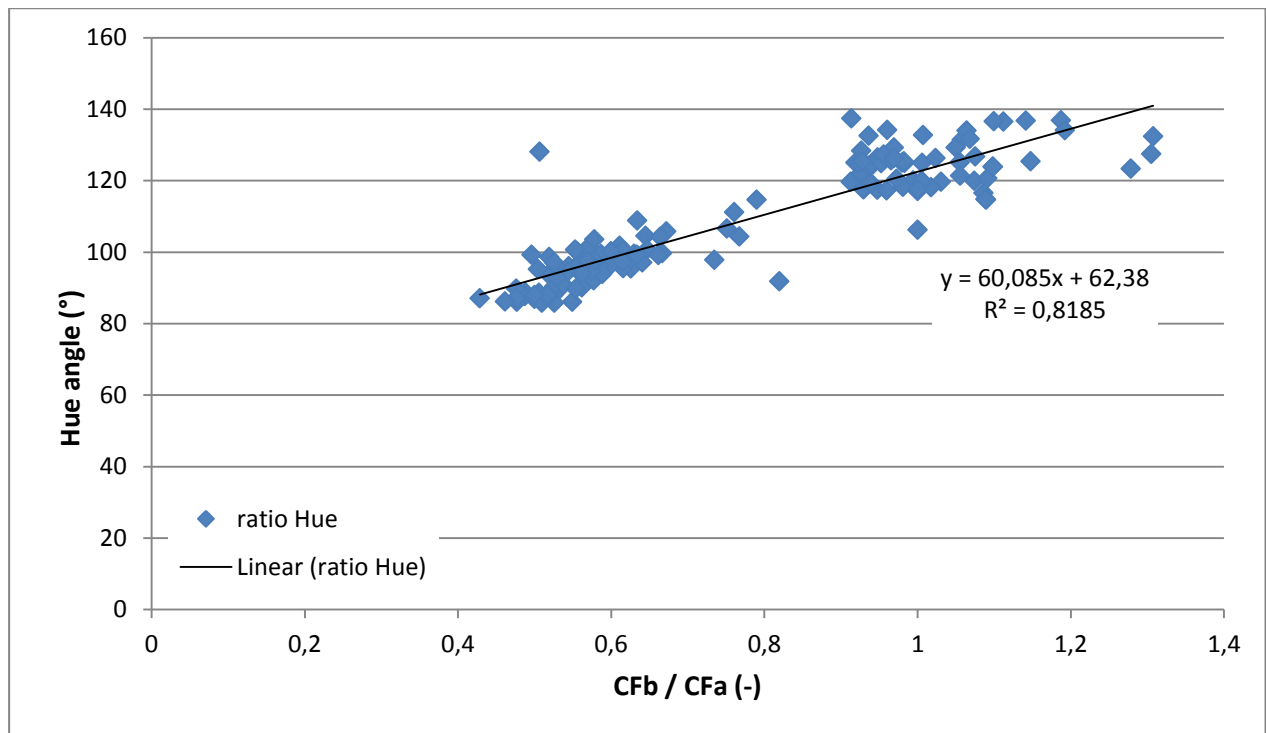


Figuur 4.7 Het verloop van de diameter van alle gele paprika's (cultivar:Stayer). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot het oogsten aan. De diameter van de paprika's neemt de laatste twee weken voor de oogst nauwelijks meer toe.

De lengte en de diameter van de paprika's is nauwelijks meer veranderd in de periode dat er is gemeten. Paprika 6.2 en 7.1 laten in het begin van de metingen nog een kleine groei zien in de lengte en diameter, maar ongeveer 15 tot 10 dagen voor de oogst groeien de paprika's niet meer. Paprika 5.1 en 5.2 zijn gedurende de meetperiode helemaal niet van lengte en diameter veranderd. De verhouding tussen de lengte en de breedte van de vier paprika's is ook niet veranderd gedurende de metingen, wat een logisch gevolg is van de weinige verandering in de lengte en diameter.

4.2.4 Correlatie tussen verschillende parameters

De verschillende parameters die zijn onderzocht, kunnen aan elkaar zijn gecorreleerd. Omdat uit onderzoek van Van der Helm (2011) is gebleken dat bij de kleurmeting vooral de Hue angle sterk (sterker dan lightness en chroma) met de chlorofylratio correleert is deze nog een keer bekeken om te kijken of de eerder gevonden correlatie ook geldt wanneer de paprikavruchten nog aan de plant rijpen. Uit het onderzoek van Van der Helm is gebleken dat er een sterk verband bestaat tussen de chlorofylratio en de Hue angle van een paprikavrucht. *Figuur 4.8* geeft het verband weer tussen de chlorofylratio en de Hue angle van alle vijf de gele paprika's die gevolgd zijn.



Figuur 4.8 De Hue angle uitgezet tegen de chlorofylratio, van alle vijf de gele paprika's (cultivar: *Stayer*) waaraan gemeten is. In het figuur zijn alle metingen van de Hue angle meegenomen en tegenover de chlorofylratio van hetzelfde meetpunt op dezelfde dag gezet.

De grafiek laat een correlatie zien van $R^2=0.82$. Dit is bijna dezelfde correlatie die Van der Helm (2011) eerder vond bij reeds geplukte paprika's ($R^2=0.8$). Wanneer de metingen van paprika 6.1 (die op iets andere wijze gemeten waren) worden weggehaald verandert de correlatie niet noemenswaardig. De grafiek laat twee wolken zien waar de gemeten chlorofylratio's liggen. Dit is het verschil tussen de meetpunten die nog niet verkleuren en al wel verkleuren. Er is bij de gele paprika's nauwelijks een chlorofylratio gemeten die tussen de 0.7 en 0.9 lag. Dit geeft ook aan dat er tijdens het rijpen zich ergens een omslagpunt moet zitten, waarna de chlorofylconcentratie sterk afneemt en daarna rustiger daalt. De wolk met de lagere chlorofylratio's lijkt geconcentreerder dan de wolk met hogere chlorofylratio's. Bij de wolk met de hogere ratio's hebben de gemeten waarden van de Hue angle een grotere spreiding.

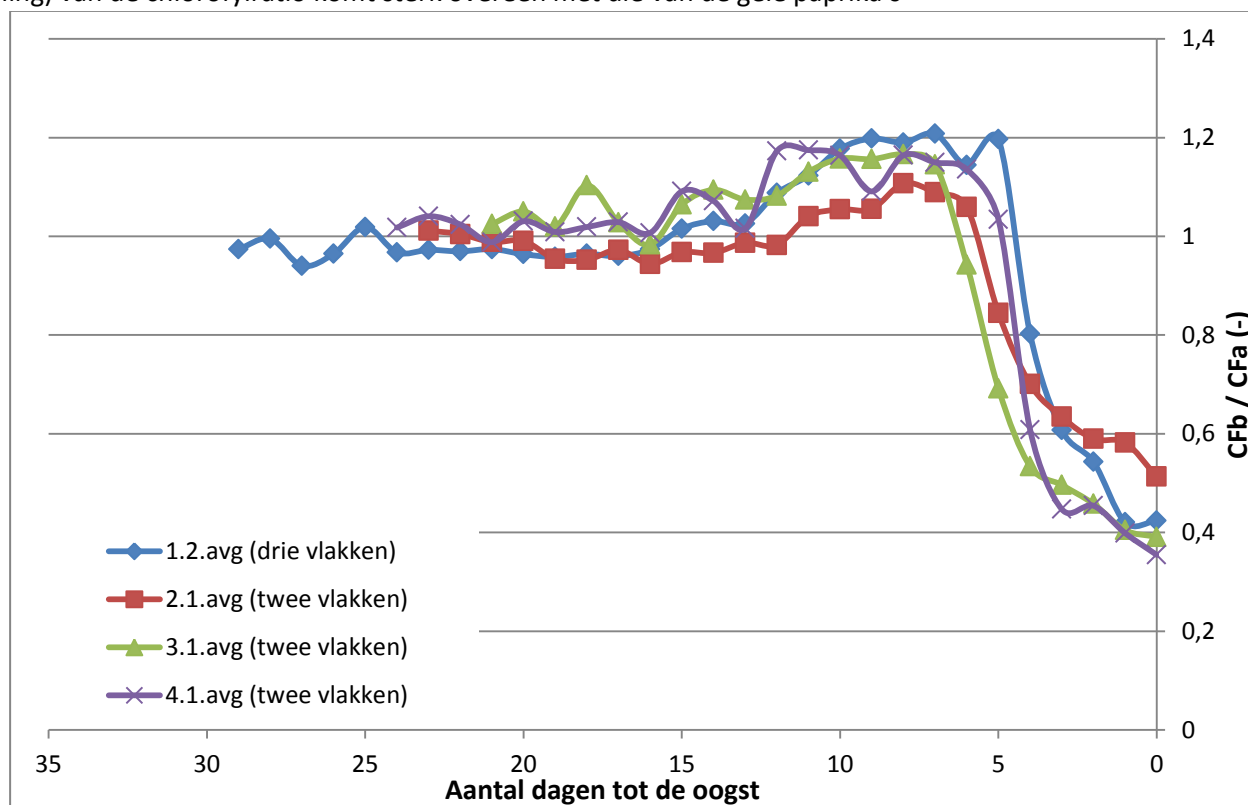
De lengte en diameter zijn bijna niet veranderd tijdens de laatste fase van het rijpen, maar in de chlorofylratio juist wel, hierdoor zit er tussen de lengte, diameter alsmede de vorm van de paprika (lengte/diameter) en de chlorofylratio geen correlatie.

4.3 De rode paprika's

De laatste paar weken dat er gemeten zou worden begonnen de rode paprika's eindelijk te verkleuren. Uiteindelijk zijn er maar twee rode paprika's niet geoogst. Een hiervan was nog erg jong en is pas na een paar weken gevolgd. Deze paprika liet in het begin wel duidelijk een snelle toename zien in lengte en diameter.

4.3.1 Verloop van de chlorofylratio

Figuur 4.9 laat het verloop van de chlorofylratio zien van vier rode paprika's (cultivar: Spider). De paprika's komen van vier verschillende planten, en de gemiddelde chlorofylratio van de paprika's is in de grafiek uitgezet. De dag van oogsten is op dag 0, vanaf die dag wordt er terug gekeken tot de eerste dag van meten. Dit geeft een duidelijke vergelijking ondanks dat de paprika's op de eerste dag van meten nog niet allemaal even lang gerijpt waren. Er moet wel rekening mee worden gehouden dat de paprika's tussen de 90% en 99% verkleuring waren geoogst, en dat dit op het oog is beoordeeld. Voor een exacte één op één vergelijking zit er dus waarschijnlijk nog een te grote afwijking op dag 0. Het algemene plaatje (sterke daling) van de chlorofylratio komt sterk overeen met die van de gele paprika's



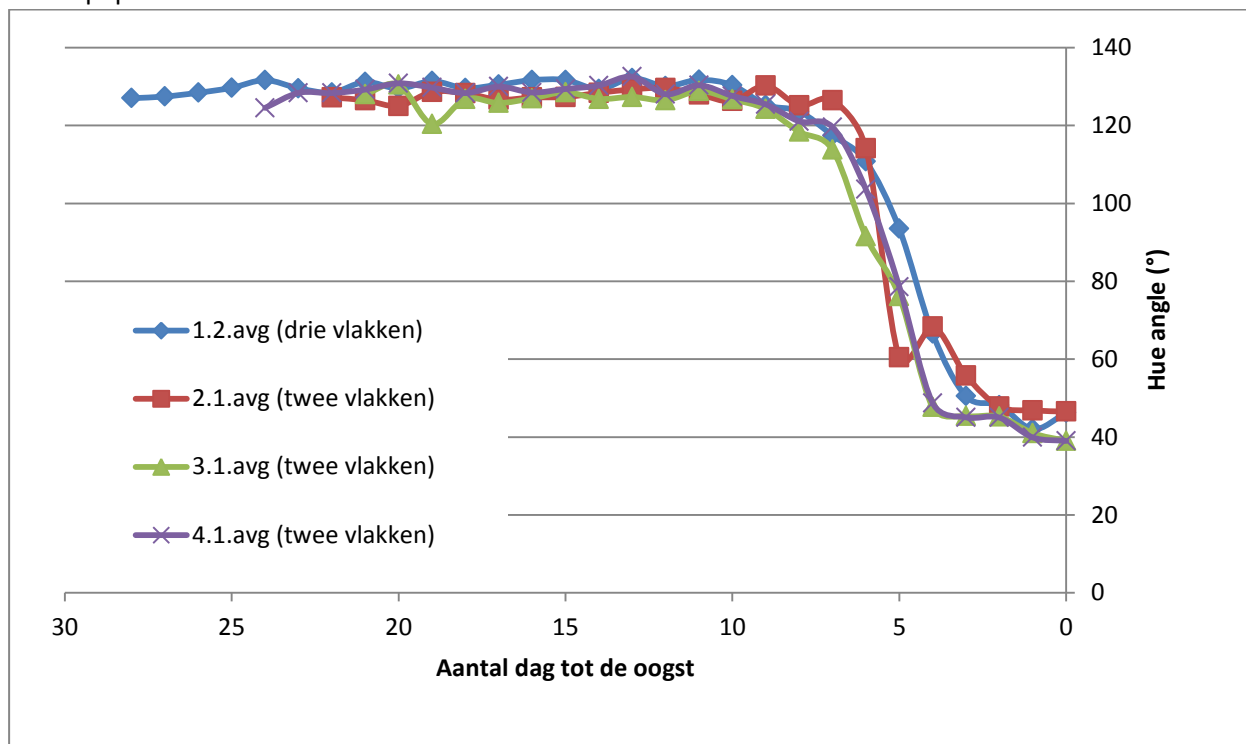
Figuur 4.9 Het verloop van de chlorofylratio van vier rode paprika's (cultivar: Spider). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot de oogst aan. Op alle paprika's is er op twee of drie vlakken gemeten, in de grafiek is de gemiddelde chlorofylratio weergegeven. Het is duidelijk dat er ongeveer een week voor de oogst een sterke afname is van de chlorofylratio.

Figuur 4.9 laat duidelijk zien dat het verloop van de chlorofylratio voor de vier rode paprika's een zelfde vorm aanneemt. Voor alle vier de paprika's geldt dat op de dag van oogsten de chlorofylratio het laagst is. Ongeveer een week voor de oogst laat de chlorofylratio een paar dagen een zeer sterke daling zien. Na een paar dagen lijkt de sterkte van de daling een klein beetje af te nemen, maar blijft duidelijk afnemen tot ongeveer een chlorofylratio van 0.4. Voor paprika 2.1 is dit iets hoger. Het zou kunnen dat deze ietsje minder rijp is geoogst. De daling van de chlorofylratio in de laatste paar dagen voor de oogst verloopt steiler dan bij de gele paprika's het geval is. De chlorofylratio die is gemeten op de dag van oogsten is ook lager dan die bij de gele paprika's.

Wat ook opvalt in Figuur 4.9 is dat voordat de chlorofylratio een sterke daling inzet, de chlorofylratio eerst langzaam toeneemt. Deze toename begint rond de 16 dagen voor de oogst. De toename in de chlorofylratio is niet groot en gebeurt maar langzaam, ongeveer een toename van 0.2 in 10 dagen. De maximale chlorofylratio die bij deze paprika's gemeten is verschilt wel per paprika. Het verschil in de maximale chlorofylratio is groter dan het verschil in de minimale chlorofylratio bij de oogst.

4.3.2 Verloop van de Hue angle

Tijdens het rijpen zijn de paprika's een kleurverandering ondergaan, van groen naar rood. Dit vertaalt zich naar een daling van de Hue angle wanneer de primaire kleur rood op 0° is gesteld. De Hue angle zal dus bij de paprika's dalen wanneer ze verkleuren. *Figuur 4.10* laat de verandering van de Hue angle zien van de vier rode paprika's.

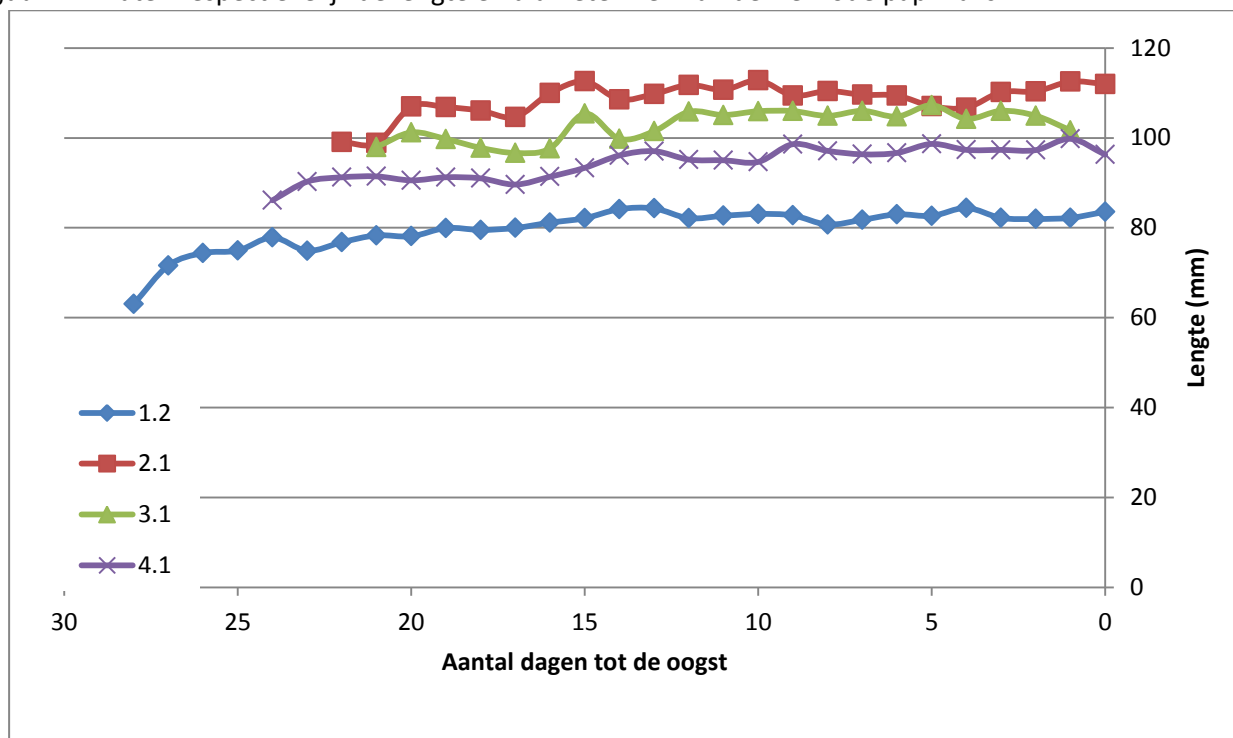


Figuur 4.10 Het verloop van de Hue angle van vier rode paprika's (cultivar: Spider). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot de oogst aan. Op alle paprika's is er op twee of drie vlakken gemeten, in de grafiek is de gemiddelde Hue angle weergegeven. De Hue angle blijft eerst constant, ongeveer een week voor de oogst laat de Hue angle een sterke daling zien. Alle vier de paprika's laten eenzelfde soort trend zien.

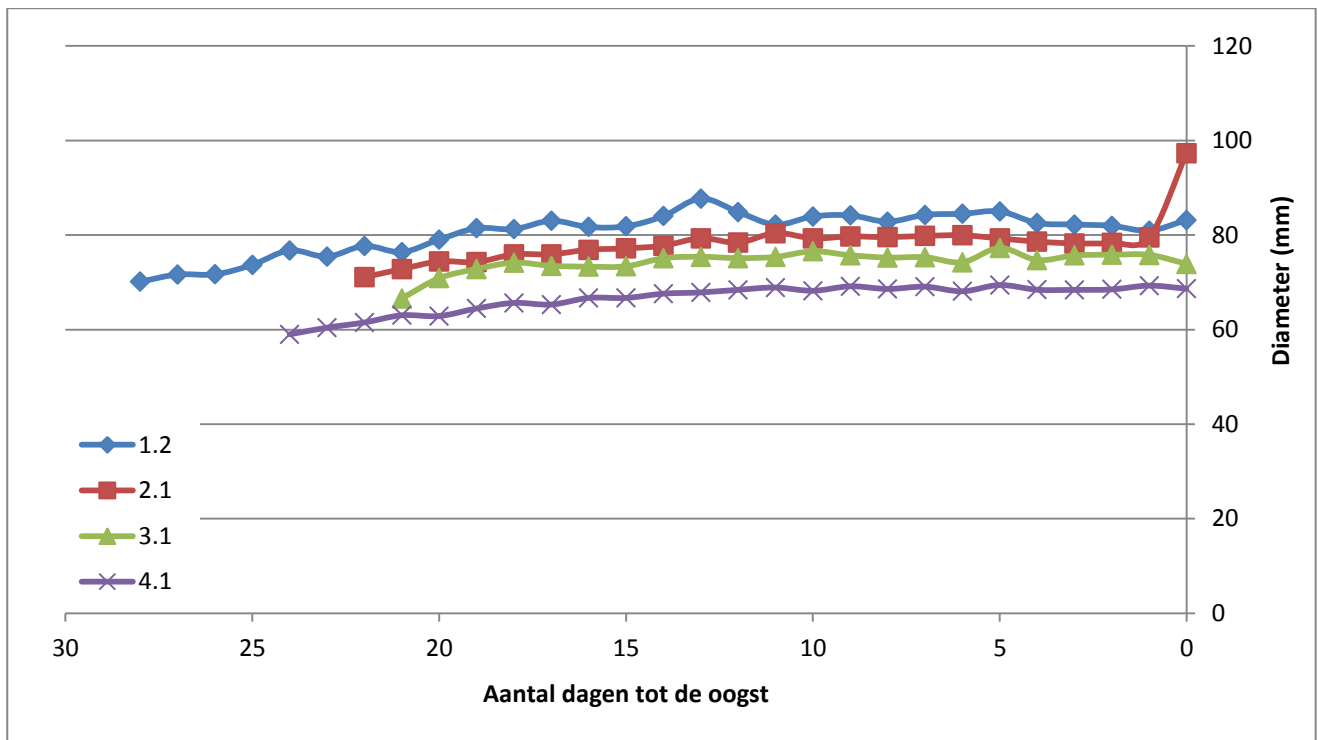
Ongeveer een week voor de oogst laat de Hue angle een daling zien. De eerste dagen dat de Hue angle daalt, is deze daling erg sterk. Na een paar dagen vlakt de daling af. Bij paprika 2.1 ziet hier een afwijking in, dit komt waarschijnlijk doordat vijf dagen voor de oogst een vlak is gemeten met een veel te kleine Hue angle. Op het moment van oogsten is de Hue angle 40-50°. Voordat de Hue angle een scherpe daling laat zien blijft deze redelijk constant. Voor alle vier de paprika's is de daling ongeveer even scherp. De Hue angle laat voor de daling geen lichte stijging zien, zoals dit bij de chlorofylratio het geval is.

4.3.3 Verloop van de lengte en diameter

De lengte en de diameter laten zien hoelang de paprika door blijft groeien aan de plant. *Figuur 4.11* en *Figuur 4.12* laten respectievelijk de lengte en diameter zien van de vier rode paprika's



Figuur 4.11 Het verloop van de lengte van vier rode paprika's (cultivar: Spider). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot de oogst aan. De lengte van de paprika's neemt toe tot ongeveer twee weken voor de oogst. Bij paprika 1.2 lijkt het erop dat de groei langzaam afvlakt, en twee weken voor de oogst helemaal stopt.

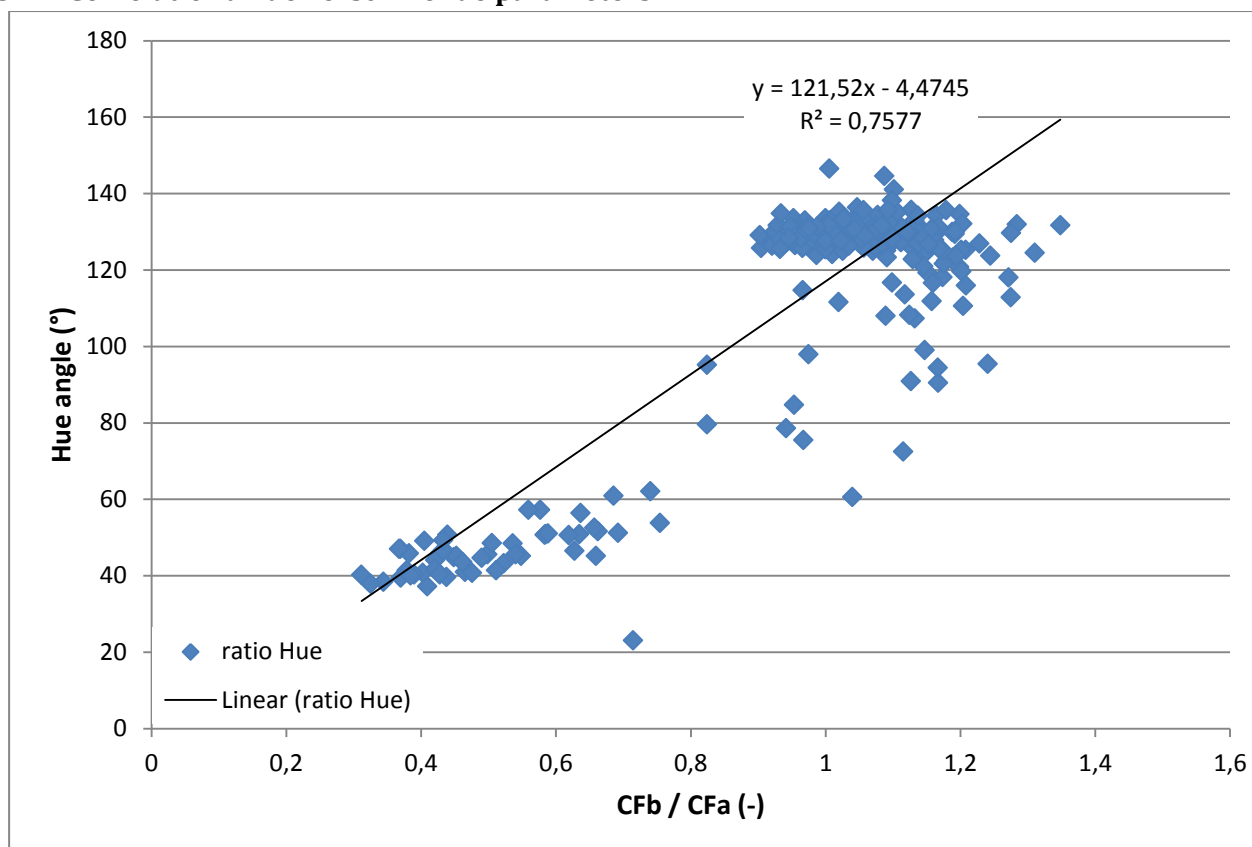


Figuur 4.12 Het verloop van de diameter van vier rode paprika's (cultivar Spider). Dag 0 is de dag van oogsten, de x-as geeft het aantal dagen tot de oogst aan. De diameter neemt tot ongeveer twee weken voor de oogst toe. Twee weken voor de oogst laten de paprika's geen toename meer zien in de diameter.

Zowel de lengte en diameter laten voor alle vier de rode paprika's een toename zien. De paprika's groeien door tot ongeveer twee weken voor de oogst. Deze laatste twee weken dat de paprika's nog aan de plant zitten blijft de grote gelijk. Tussen de paprika's onderling zit er wel verschil in grootte, ook nog op het moment van oogsten. Deze onderlinge verschillen treden niet op bij metingen van de chlorofylratio en de Hue angle.

De verhouding tussen de lengte en de diameter is bij de meeste paprika's niet veranderd gedurende de meetperiode. Alleen bij paprika 1.2 stijgt de lengte/diameter verhouding na de eerste dag. Deze stijging duurt echter maar een dag, het kan ook zijn dat de eerste dag niet helemaal goed is gemeten. De verhouding tussen de lengte en diameter is bij de rode paprika's wel anders dan bij de gele paprika's.

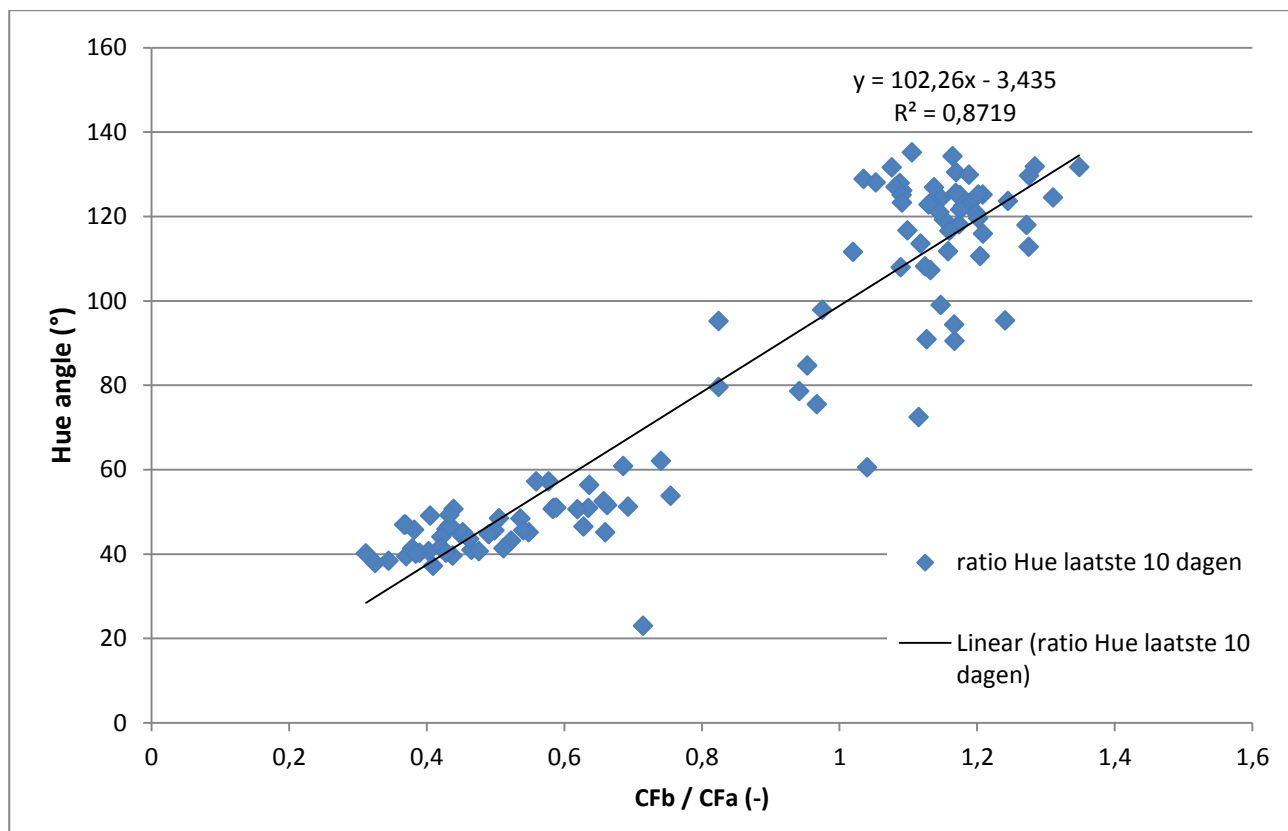
4.3.4 Correlatie van de verschillende parameters



Figuur 4.13 *Correlatie tussen de chlorofylratio en Hue angle van alle rode paprika's. De grafiek geeft alle meetpunten van de chlorofylratio waarbij op de zelfde dag en punt de Hue angle is gemeten. Voor de dagen dat er vijf keer achter elkaar de chlorofylratio is gemeten is de gemiddelde chlorofylratio genomen.*

Figuur 4.13 geeft de correlatie tussen de chlorofylratio en de Hue angle van de rode paprika's weer. Ook de metingen aan de paprika's die niet zijn geoogst zijn in deze figuur opgenomen. Net als bij de gele paprika's zit er bij de rode paprika's een verband tussen de chlorofylratio en de Hue angle. Dit verband is al eerder aangetoond (Van der Helm 2011). Het verband wat Figuur 4.13 weergeeft is echter minder sterk dan die Van der Helm (2011) heeft gevonden. Dit komt waarschijnlijk omdat het over grote deel van de metingen is gedaan bij paprika's die nog niet aan het verkleuren waren. Dit verklaart ook de dikke wolk van metingen met een chlorofylratio van 0.9-1.2 en een Hue angle van 120°-140°. De eerdere grafieken lieten al zien dat er een lichte stijging in de chlorofylratio zit voordat deze afneemt, maar dat deze stijging bij de Hue angle uit blijft.

De wolk van meetpunten bij de rijpere paprika's (chlorofylratio: 0.3-0.6) telt veel minder metingen. Net als bij de gele paprika's maken de twee wolken van metingen weer duidelijk dat de overgang van een chlorofylratio van 0.9-1.2 naar 0.3-0.6 erg snel verloopt.



Figuur 4.14 De chlorofylratio tegen de Hue angle voor de rode paprika's van slechts de laatste 10 dagen voor de oogst. De laatste 10 dagen voor de oogst laten de rode paprika's een duidelijk verband zien tussen de chlorofylratio en de Hue angle.

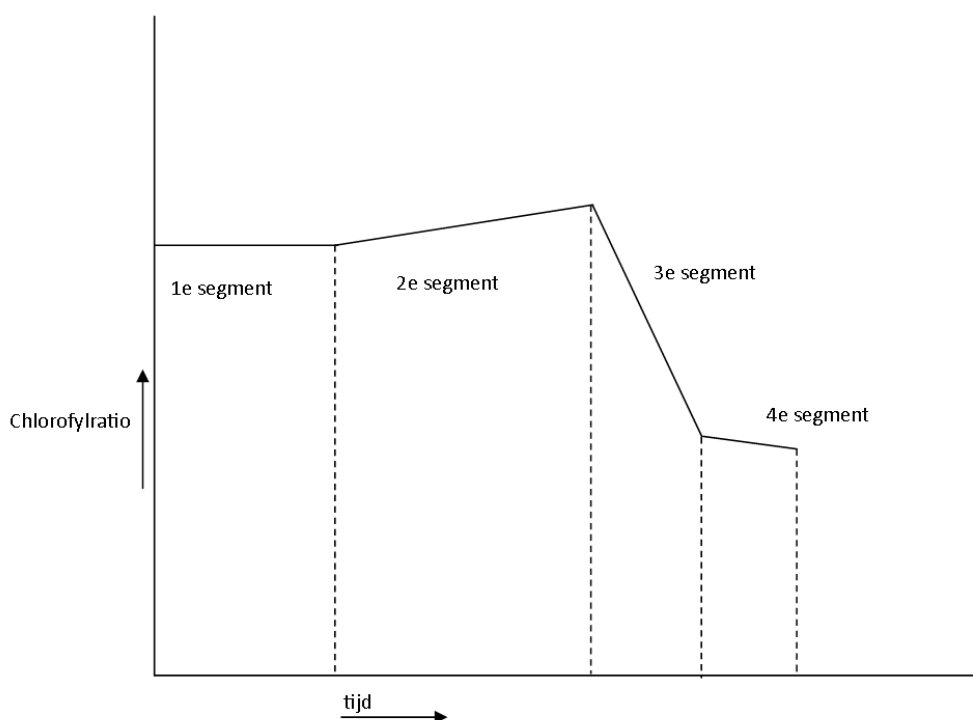
Figuur 4.14 geeft een hogere correlatie aan tussen de chlorofylratio en de Hue angle dan Figuur 4.13. In Figuur 4.14 zijn alleen de metingen van de laatste 10 dagen voor de oogst weergegeven. Tijdens het verkleuren is de correlatie dus hoger dan daarvoor. Deze correlatie lijkt ook meer op die van Van der Helm (2011) heeft gevonden ($R^2=0.84$).

4.4 Ratio verloop per dag

Uit § 4.2.1 en § 4.3.1 blijkt dat het verloop van de chlorofylratio verschillende fases laat zien. De fases verschillen in de snelheid waarmee de chlorofylratio toe of afneemt. Zo kan er worden gezegd hoeveel de ratio per dag toeneemt in iedere fase. In Figuur 4.15 zijn deze fases schematisch weergegeven, de grafiek in het figuur is opgedeeld in vier segmenten, waarbij ieder segment een fase in het verloop van de chlorofylratio representeert.

Tabel 4-1 laat de gemiddelde toename per dag zien voor de gele en rode paprika's in iedere fase. De gele paprika's zijn direct in de tweede fase geplaatst, omdat deze paprika's bij het begin van de metingen geen constante chlorofylratio hadden. Dit komt waarschijnlijk omdat de gele paprika's aan het begin van de metingen al wat rijper waren dan de rode paprika's.

Om de ratioverandering per dag te bepalen is er voor iedere paprika bepaald wanneer deze overgaat naar de volgende fase. Hierbij is geprobeerd om een duidelijk omslagpunt te vinden voor de fase, hiervoor is er gekeken naar de grafieken waarin het gemiddelde verloop van de chlorofylratio is weergegeven per paprika (Figuur 4.2 en Figuur 4.9). De lengte (aantal dagen) voor een zelfde fase kan dus verschillen per paprika. Om het verloop van de chlorofylratio per dag te bepalen in een bepaalde fase voor iedere paprika is de MS Excel (versie 2010) functie 'SLOPE' gebruikt.



Figuur 4.15 Het verloop van de chlorofylratio schematisch weergegeven en verdeeld in vier segmenten. Ieder segment of fase heeft een eigen afnamesnelheid in de chlorofylratio.

Tabel 4-1 De toename van de chlorofylratio per dag voor de gele en rode paprika's in de vier segmenten. De gele paprika's zijn aan het begin van de metingen al in het tweede fase geplaatst.

Fase	Gele paprika's	Rode paprika's
1	-	0.00
2	0.03	0.01
3	-0.28	-0.25
4	-0.02	-0.03

5 Discussie

De paprika's nemen aan het einde van het rijpingsproces niet of nauwelijks meer toe in de lengte en diameter. Dit is in overeenstemming met onderzoek van Tadesse et al. (2002). Het is echter niet helemaal duidelijk hoeveel de paprika's van het onderzoek van Tadesse et al. (2002) waren verkleurd de laatste weken. Het zou goed kunnen dat dit afwijkt van dit onderzoek. Tadesse et al. (2002) heeft de paprika's namelijk tot 11 WAA (Weeks After Anthesis, weken na de bloei) gevolgd en iedere week een aantal paprika's geoogst om metingen aan te verrichten. Een exacte vergelijking kan daarom niet gemaakt worden tussen Tadesse et al. (2002) en dit onderzoek. Er kan wel een algemenere vergelijking worden gemaakt tussen Tadesse et al. (2002) wat betreft de Hue angle en de lengte en diameter. Gezien de diameter alweer begint af te nemen in 11 WAA en de Hue angle erg ver afneemt waren de paprika's in het onderzoek van Tadesse et al. (2002) waarschijnlijk al erg sterk verkleurd op 11 WAA.

Zowel de gele als de rode paprika's laten nogal een verschil zien in lengte en diameter op het moment dat ze worden geoogst, namelijk 8 cm – 10 cm voor de lengte en 7 cm – 10 cm voor de diameter bij de rode paprika's. Bij de gele paprika's is dit 8 cm – 10 cm en rond de 8 cm voor de lengte en de diameter. De laatste twee weken ondervinden de lengte en diameter weinig verandering. Om de rijpheid te bepalen zijn de lengte en diameter waarschijnlijk minder geschikt dan parameters als chlorofylratio en Hue angle die zijn onderzocht.

De paprika's van Tadesse et al. (2002) laten ook een flinke daling in de Hue angle zien gedurende de laatste weken. Deze daling is overeenkomstig met de resultaten van dit onderzoek. Bij Tadesse et al. (2002) duurt de daling van de Hue angle echter 3-4 weken terwijl in dit onderzoek de Hue angle binnen 10 dagen al ver is gedaald. Ook is het verschil in de Hue angle tussen het begin en het eind van het onderzoek van Tadesse et al. (2002) veel groter dan bij dit onderzoek.

De rijpende paprika's laten allemaal een overeenkomstige trend zien in de chlorofylratio. Het lijkt er dus op dat de gebruikte sensor om de chlorofylratio tussen chlorofyl a en b te bepalen, een geschikte methode is om een indicatie te geven van de rijpheid van een paprikavrucht. De paprika's van eenzelfde kleur (tevens zelfde cultivar) laten een zelfde chlorofylratio (geel: 0.5-0.6, rood: 0.4-0.6) zien op het moment van oogsten. Sommige paprika's lijken hiervan af te wijken, maar dit komt waarschijnlijk omdat het oogstmoment op het oog is bepaald. De 90% tot 99% verkleuring wanneer de paprika's werden geoogst brengt een grote onnauwkeurigheid met zich mee. Er zit wel verschil in de chlorofylratio tussen de gele en rode paprika's toen deze geoogst waren, een verschil van ongeveer 0.1.

Dat de chlorofylratio zou afnemen tijdens het rijpen was verwacht. Dit kan onder andere komen doordat bij het afbreken van chlorofyl de chlorofyl b moleculen eerst in chlorofyl a moleculen worden omgezet. De daling is echter zeer plotseling, de grootste afname vindt binnen één dag plaats. Er is dus een duidelijk omslagpunt in de chlorofylratio, hier was op gehoopt omdat na het omslagpunt duidelijk is dat de paprika snel geoogst kan worden.

Beide paprika soorten laten tot ongeveer twee weken voor de oogst een toename in de chlorofylratio zien, deze toename duurt ongeveer een week. Vooral bij de rode paprika's is dit erg duidelijk na voren gekomen, omdat deze langer zijn gevolgd. Dit betekent dat in verhouding tot chlorofyl a de hoeveelheid chlorofyl b toeneemt, in die week. De toename van de chlorofylratio begint op het zelfde punt als waar de groei in lengte en diameter stoppen. Een goede verklaring voor de kleine toename in de chlorofylratio is er echter nog niet. Wanneer de lengte en diameter niet meer toenemen zal het gewicht van de paprika ook niet meer toenemen, om dat deze sterk aan elkaar zijn gecorreleerd (Tadesse et al. 2002). Misschien is het dus mogelijk om aan de hand van de chlorofylratio te bepalen of een paprika nog zal groeien. Wanneer de paprika stopt met groeien is dit misschien ook het juiste moment om groene paprika's te oogsten. Verder onderzoek zou moeten uitwijzen of dit mogelijk is, en of de paprika dan voldoende smaak heeft ontwikkeld.

De gebruikte methode is nogal vatbaar voor fouten. Op de eerste plaats is er iedere dag op het oog bepaald waar er gemeten moest worden. Met behulp van een papiertje met een gat (straal: 5 mm) en foto's is er geprobeerd om dit zo goed mogelijk te doen. De schatting is dat er iedere meting ± 2 cm naast heeft kunnen zitten. Dit is slechts een schatting op gevoel. Echter, door het gebruikte papiertje met gat staat iedere meting van de chlorofylfluorescentie tegenover de meting van de Hue angle wel op de juiste plek.

De lasers die onderdeel uitmaakte van de chlorofylfluorescentiemeter liet een klein streepje licht zien van 1 mm bij 5 mm. De gebruikte chromameter had een meetoppervlak van 3 mm in de diameter. De afwijkingen in de apparatuur staan niet in verhouding tot de fout die de mens er in kan brengen. Bij het meten met de chlorofylfluorescentiemeter werd de paprika met de hand tegen een doorzichtige plaat gehouden. Hierbij moest er opgelet worden dat het licht wel op de juiste plek viel, tijdens het meten wordt er toch altijd wat bewogen. Hetzelfde geldt voor de chromameter, deze moest tegen de paprika's worden gedrukt. Ook hierbij kan beweging van de persoon die meet van invloed zijn op de meting, en is bovendien groter dan de standaardfout van het meetinstrument. In theorie is de chlorofylfluorescentiemeting wel veel preciezer dan de kleurmeting. Dit komt door de hoge resolutie van de lock-in-versterkers.

Bij het aflezen en opschrijven kunnen er ook weer fouten zijn gemaakt. Vooral het aflezen van de lock-in-versterkers was moeilijk, omdat beide piekwaarde onthouden moesten worden. De met de hand opgeschreven waarde werden vervolgens in Excel overgezet. Bij het invoeren in Excel kunnen er foutieve waarde zijn ingevoerd, grote uitschieters kwamen echter duidelijk in een grafiek naar voren, en zijn ook later gecorrigeerd.

De lengte en diameter laten nogal schommelingen zien in de resultaten. Dit komt waarschijnlijk door het gebruik van de schuifmaat. Vooral bij de lengte is het moeilijk om vast te stellen wat de langste lengte is van de paprika. Dit vertaalt zich vervolgens in schommelingen van de lengte in de resultaten.

Ondanks dat er nog wat fouten in de gegevens kunnen zitten geven de resultaten toch een duidelijke trendweer van het verloop van de chlorofylratio en het verloop van de Hue angle van de paprika's. De resultaten van de verschillende paprika's van dezelfde cultivar komen toch met elkaar overeen. Het algemene beeld van de dalende chlorofylratio en Hue angle komt bij alle paprika's naar voren als ze begonnen zijn met verkleuren.

Bij dit onderzoek is er vanuit gegaan dat de energie-overdracht van chlorofyl b naar chlorofyl a, zoals beschreven in het patent van Jalink en van der Schoor (2002) overeenkomt met de chlorofylratio die wordt bepaald uit gemeten hoeveelheden chlorofyl b en a van een paprika. Aan het eind van dit onderzoek is er nog literatuur naar boven gekomen die dit waarschijnlijk tegen spreekt. Bij dat onderzoek werd de hoeveelheid chlorofyl a en b bepaald. Daarvoor werd de chlorofyl eerst van de rest van de vrucht onttrokken en gescheiden. Vervolgens werd de chlorofyl gemeten met een fotospectrummeter (chlorofyl a op 432 nm en chlorofyl b op 466 nm). Met kalibratiecuvetten waarin zich standaardoplossingen van chlorofyl bevonden kon de uiteindelijke hoeveelheid chlorofyl a en b worden vastgesteld. Uit deze hoeveelheden werd de ratio tussen de twee chlorofyltypes bepaald. Hierbij werd echter chlorofyl a door chlorofyl b gedeeld. Het lijkt erop dat er altijd veel meer chlorofyl a dan chlorofyl b aanwezig is in de paprika, niet alleen wanneer deze rijp is (Hornero-Méndez and Mínguez-Mosquera 2002). Voor het gebruik van de sensor om de rijpheid van de paprika's te beoordelen zal dit echter weinig uitmaken. In het onderzoek van Hornero-Méndez and Mínguez-Mosquera (2002) is de chlorofyl ratio a / b bepaald, terwijl in dit onderzoek de chlorofyl b / a is bepaald. Om de twee onderzoeken te vergelijken moet daar wel rekening mee worden gehouden.

6 Conclusie

Gedurende de laatste week dat de paprika rijpt, daalt de chlorofylratio erg snel. De chlorofylratio heeft een sterk omslagpunt van een lichte stijgende waarde naar een snel dalende waarde laten zien. De snelle daling (0.28 per dag gele paprika's en 0.25 per dag rode paprika's) van de chlorofylratio duurt ongeveer één á twee dagen, daarna neemt de chlorofylratio langzamer af (0.02 per dag gele paprika's en 0.03 per dag rode paprika's). Wanneer het omslag punt eenmaal is bereikt duurt het nog ongeveer een week voordat de paprika's geoogst kunnen worden. Op het moment van oogsten is de chlorofylratio voor de paprika's van een bepaalde kleur vrijwel hetzelfde. Dit kan erg belangrijk zijn om aan de hand van de chlorofylratio de rijpheid van een paprika te bepalen.

De chlorofylratio geeft een zelfde soort beeld weer als de kleur (Hue angle) karakteristiek in de laatste week dat de paprika's aan de planten hangen. Wanneer de paprika's worden geoogst zijn zowel de Hue angle als de chlorofylratio van de paprika's hetzelfde, er zit wel verschil in beide waardes bij verschillende cultivars. De chlorofylratio stijgt wel rond twee weken voor de oogst. Bij de Hue angle is hier niks van terug te zien. De chlorofylratio geeft dus verandering weer, die niet aan de kleur van de paprika af te lezen zijn.

Op het moment van oogsten is zowel het verschil in de Hue angle en de chlorofylratio maar klein bij de paprika's. Ook zijn de paprika's aan de hand van de kleur geoogst. Het valt dus moeilijk te zeggen dat de karakteristiek van de chlorofylratio betrouwbaarder is op het moment van oogsten dan de gemeten kleur (Hue angle). Wel heeft de lock-in-versterker in theorie een grotere precisie dan de chromameter, maar deze hoge precisie wordt grote deels te niet gedaan door de paprika's vast te houden met de hand.

Het is moeilijk om te zeggen of de gebruikte sensor van Henk Jalink en Rob van der Schoor geschikt is om de rijpheid van groene paprika's te beoordelen. Alle paprika's lieten een verhoging zien van de chlorofylratio voordat de paprika begon te verkleuren. De chlorofylratio neemt dan toe met 0.03 per dag voor de gele paprika's en met 0.01 per dag voor de rode paprika's. In de periode (twee weken voor het oogsten) dat de chlorofylratio een verhoging laat zien stopt ook de groei van de paprika, dit betekent dat het gewicht van de paprikavrucht ook niet meer zal toenemen. De onderzochte rode paprika's kunnen voordat ze verkleuren ook als groen worden verkocht. Wanneer de chlorofylratio bij de rode paprika's een verhoging laat zien, zijn deze nog groen. Dit is misschien een goed moment om de paprika's te oogsten die verkocht moeten worden als groene paprika's. Het gewicht neemt namelijk niet meer toe, en hier wordt de teler meestal op uitbetaald.

De lengte en diameter van de paprika nemen tot twee weken voor de oogst toe, daarna blijven deze parameters constant. Een paprika die toeneemt in lengte en diameter is nog niet geschikt om te oogsten, de paprika moet dan nog beginnen met verkleuren. De lengte (8- 11 cm rode paprika's en 8-10 cm gele paprika's) en diameter (7-8 cm rode paprika's en 8 cm gele paprika's) van de paprika's op het moment van oogsten verschilt ook bij de paprika's. Bij de rode paprika's zijn de verschillen iets groter. Omdat de paprika's nog moeten gaan verkleuren als ze zijn uitgegroeid, is de lengte en breedte geen geschikte parameter om aan het eind van de het rijpingsproces te zeggen of een paprika geoogst moet worden.

7 Aanbevelingen

Bij het gebruik van de nieuw ontwikkelde chlorofylfluorescentiesensor, waarmee de chlorofylratio is bepaald, stond de sensor op een vaste plek. Daarom moesten de planten naar de sensor toe worden gebracht, en de paprikavruchten tegen de glasplaat aan worden gedrukt. De lock-in-versterkers moesten tevens door het menselijk oog worden afgelezen. Dit was erg onpraktisch. Wanneer de sensor mobieler zou zijn, kan er makkelijker aan paprikavruchten worden gemeten.

Met een mobielere sensor kunnen er ook paprika's gemeten worden die in een kas groeien. Het meten van de chlorofylratio in de kas kan wenselijk zijn om een goed beeld te krijgen van het verloop van de ratio bij productie paprika's.

Het direct kunnen verwerken van de gemeten waardes door een computer kan ook veel tijd besparen. Er kan dan ook makkelijker op meerdere plekken op de vrucht gemeten worden. Hierdoor hoeft het niet perse noodzakelijk te zijn om iedere keer op dezelfde plek een meting uit te voeren, maar kan er door een groot aantal metingen op een zelfde vrucht het verloop van de gemiddelde chlorofylratio van een vrucht worden geplot.

De resultaten gaven een kleine indicatie dat er een verschil zit tussen de chlorofylratio van verschillende cultivars, op het moment dat de paprika geoogst kan worden. Het aantal paprika's wat gevolgd is, is eigenlijk te klein om dit met zekerheid te kunnen zeggen. Tevens kunnen de eindwaardes van de chlorofylratio verschillen doordat er een grote kans was op afleesfouten. Ook kunnen er andere factoren zijn die de chlorofylratio hebben beïnvloed. Of er kunnen verschillen in zitten bij verschillende kleuren paprika's, maar dat de chlorofylratio bij rijpe paprika's van eenzelfde kleur wel hetzelfde is. Wanneer de sensor zal worden toegepast op een paprika-oogstrobot zal dit zeker interessant zijn om te weten.

Er is in deze bachelorafsluiting hoofdzakelijk gekeken naar gekleurde paprika's. Voordat deze paprika's begonnen te verkleuren lieten ze een lichte stijging zien in de chlorofylratio, de paprika's werden toen niet meer groter. Misschien is op het punt van de stijging in de chlorofylratio wel een juist moment om te oogsten voor groene paprika's. Paprika's die groen blijven zijn bij deze bachelorafsluiting niet meegenomen. Het blijkt dat het nog moeilijk kan zijn om groene paprika's op het juiste moment te oogsten, er zou nog onderzoek gedaan kunnen worden hoe de chlorofylratio verloopt bij paprika's die groen blijven en niet verkleuren.

In dit onderzoek zijn er rode paprika's die voor de verkleuring als groen verkocht kunnen worden. Ook deze paprika's lieten ongeveer twee weken voor de oogst een stijging zien in de chlorofylratio. De paprika's waren toen nog groen, maar stopte met groeien. Dit kan een goed moment zijn om de paprika's te oogsten en als groen te verkopen. Er moet echter nog wel worden gekeken of deze paprika's dan al wel voldoende smaak hebben ontwikkeld.

Met de huidige methode van de chlorofylfluorescentiesensor wordt er op een bepaalde plek op de vrucht gemeten. De chlorofylratio kan echter sterk variëren op de vrucht. Een sensor of meerdere sensoren die op meerde plekken/vlakken kunnen meten zou uitkomst bieden. Het is waarschijnlijk het beste als er op het midden van een vlak wordt gemeten door de sensoren.

Misschien kan de sensor van Henk Jalink ook worden gebruikt bij andere vruchten. Bij appels die lang bewaard moeten blijven zou een preciezere indicatie voor het oogstmoment bijvoorbeeld ook beter kwaliteit kunnen geven. Wanneer een appel te vroeg wordt geoogst zal deze weinig smaak ontwikkelen, en bij te laat oogsten is de appel moeilijker te bewaren.

Referentielijst

- Borovsky, Y. and I. Paran (2008). Chlorophyll breakdown during pepper fruit ripening in the chlorophyll retainer mutation is impaired at the homolog of the senescence-inducible stay-green gene. TAG Theoretical and Applied Genetics **117**(2): 235-240.
- Gonzalez, R. C. and R. E. Woods (2008). Digital Image Processing. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education.
- Helm, B. T. v. d. (2011). Chlorofylfluorescentie als parameter voor rijpheidbepaling van paprika's. Wageningen. BSc thesis Agrarische Bedrijfstechnologie. Wageningen University.
- Heuvelink, E., L. F. M. Marcelis and O. Körner (2004). How to Reduce Yield Fluctuations in Sweet Pepper? Acta Hort. **633**: 349-355.
- Hornero-Méndez, D. and M. I. Mínguez-Mosquera (2002). Chlorophyll disappearance and chlorophyllase activity during ripening of Capsicum annuum L fruits. Journal of the Science of Food and Agriculture **82**(13): 1564-1570.
- Hörtensteiner, S. and B. Kräutler (2010). Chlorophyll breakdown in higher plants. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics **1807**(8): 977-988.
- Jalink, H. and R. v. d. Schoor (2002). Werkwijze voor het bepalen van de kwaliteit van plantaardig materiaal en inrichting voor het scheiden van plantaardig materiaal. Patent:1036677
- Kays, S. J. and R. E. Paull (2004). Postharvest Biology. Athens, Georgia: Exon Press.
- Krause, G. H. and E. Weis (1991). Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. Annual Review of Plant Biology **42**: 313-349.
- Kräutler, B. and P. Matile (1999). Solving the Riddle of Chlorophyll Breakdown. Accounts of Chemical Research **31**(1).
- Luning, P. A., T. de Rijk, H. J. Wichers and J. P. Roozen (1994). Gas Chromatography, Mass Spectrometry, and Sniffing Port Analyses of Volatile Compounds of Fresh Bell Peppers (Capsicum annuum) at Different Ripening Stages. Journal of Agricultural and Food Chemistry **42**(4): 977-983.
- Marcelis, L. F. M. and L. R. B. Hofman-Eijer (1997). Effects of Seed Number on Competition and Dominance among Fruits in Capsicum annuum L. Annals of Botany **79**(6): 687-693.
- Maxwell, K. and G. N. Johnson (1999). Chlorophyll fluorescence - a practical guide. Journal of Experimental Botany **51**(345).
- Pérez-López, A. J., F. M. del Amor, A. Serrano-Martínez, M. I. Fortea and E. Núñez-Delicado (2007). Influence of agricultural practices on the quality of sweet pepper fruits as affected by the maturity stage. Journal of the Science of Food and Agriculture **87**(11): 2075-2080.
- Pilarski, J. and M. Kocurek (2005). The content of photosynthetic pigments and the light conditions in the fruits and leaves of sweet pepper. ACTA Physiologiae Plantarum **27**(5): 173-182.
- Raven, P. H., R. F. Evert and S. E. Eichhorn (2005). Biology of Plants. New York, NY: W. H. Freeman and Company.

Tadesse, T., E. W. Hewett, M. A. Nichols and K. J. Fisher (2002). Changes in physicochemical attributes of sweet pepper cv. Domino during fruit growth and development. Scientia Horticulturae **93**(2): 91-103.

Tadesse, T., M. A. Nichols and E. W. Hewett (1998). Ripening of Attached and Detached Sweet Pepper Fruit cv. 'Domino'. Acta Horticulturae **464**: 503-503.

Tijsskens, L. M. M., R. E. Schouten and W. C. Lin (2005). Predicting Harvest Labour Allocation in Bell Pepper Production. Acta Hort. **682**: 1435-1442.