

# Concept studie autonoom oogsten van appels en peren

Auteur(s) Ing. E.J. Pekkeriet, Ing. G. Heijerman, Ir. G.W. Otten, Ing. B. van Tuijl, M.L.I. Wigham, Dr. H. Jalink

<sup>1</sup> Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen 2009



## Samenvatting voor internet

Bij de oogst van appels en peren is in een korte periode veel arbeid nodig. Het vraagt een forse inspanning om voldoende kwalitatief juiste arbeid te krijgen op het juiste moment tegen de juiste prijs, de kosten voor arbeid zijn hoog. Voor NFO en het PT hebben initiatief genomen om te komen tot robotisering van deze handeling te automatiseren.

Doelstelling van dit project is één of meerdere concepten te ontwerpen voor het automatisch oogsten van appels en peren, waarbij kritische deelfuncties op eerste haalbaarheid zijn getoetst om de drempel te verlagen om een vervolg te starten.

Aansluitend is het doel ontwikkelingstraject te starten dat binnen een afzienbare periode zal leiden tot implementatie.

In het rapport zijn enkele perspectiefvolle concepten uitgewerkt. Verschillende deelfuncties zijn ontworpen en getest op haalbaarheid zoals: het sensorconcept globaal (waar zitten de appels); het sensorconcept lokaal (Is de appel voldoende rijp); manipulatie en end-effector en logistiek en buffering.

Voor de verschillende functies zijn goede oplossingen voorhanden. De studie betreft met name een papieren studie. In een vervolg zal moeten blijken of het ook daadwerkelijk technisch haalbaar is. De focus in een vervolg dient te liggen bij de plukhandeling zelf en de daarbij horende sensoriek (de ogen, de arm en het handje). Het afvoeren van de geoogste appels, het bufferen en het transport door de boomgaard lijkt niet het probleem te zijn.

Aan het einde heeft een herijking van de businesscase plaatsgevonden. De NFO/PT acht het project voldoende perspectiefvol om te starten met een initiatief voor verdere implementatie als vervolg op de conceptontwikkeling.

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

## Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen  
: Postbus 664, 6700 AP Wageningen  
Tel. : 0317 - 47 70 01  
Fax : 0317 - 41 80 94  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	pagina
1 Aanleiding	3
2 Projectkader	4
2.1 Probleemstelling	4
2.1.1 Arbeid moet betaalt worden	4
2.1.2 Seizoensgebonden arbeid	4
2.1.3 Kwaliteit van de arbeid	4
2.1.4 Dataverwerking mens machine	4
2.2 Businesscase	5
2.2.1 Robotisering en de businesscase	5
2.3 Doelstelling	6
2.3.1 Beoogde resultaten	6
2.3.2 Risico's	6
3 Aanpak	6
3.1 Onderzoek machineconcept	6
3.1.1 Oogstrobots wereldwijd	6
3.1.2 Ontwerpmethode	7
3.1.3 Functioneel ontwerp	7
3.2 Onderzoek sensorconcept globaal	8
3.2.1 Literatuuronderzoek	8
3.2.2 Meetopstelling globaal sensor concept	8
3.3 Onderzoek sensorconcept lokaal	8
3.3.1 Literatuuronderzoek	8
3.3.2 Kansen voor oogsten van betere kwaliteit	8
3.3.3 Kwaliteitsmetingen	9
3.4 Onderzoek end-effector en manipulatorconcept	9
3.4.1 Literatuuronderzoek	9
4 Resultaten	9
4.1 Machineconcept deel A	9
4.1.1 Literatuuronderzoek	9
4.1.2 Leren van bestaande robots	14
4.2 Teeltsystemen	16
4.3 Sensorconcept globaal	16
4.3.1 Appels vinden	16
4.3.2 Meetopstelling	16
4.3.3 Meetresultaten sensorconcept globaal	18
4.4 Sensorconcept lokaal	21
4.4.1 Meetresultaten sensorconcept lokaal	22
4.4.2 Rijpheidmetingen	24
4.5 End-effector en manipulatorconcept	32
4.5.1 End-effector design, functie bepaling	32
4.5.2 Bepalen van End-effector werkwijzen, patent onderzoek.	34
4.5.3 End-effector werkwijzen, literatuur onderzoek	36
4.5.4 Werkwijzen samenvatting	37
4.5.5 Onderzoek naar verschillende losmaak methoden van de vrucht, door handmatige plukproeven	38
4.5.6 Onderzoek naar verschillende losmaak methoden van de vrucht, door end-effector modellen	39
4.5.7 Samenvatting van de praktijk test met vinger end-effector	40
4.5.8 Samenvatting van de praktijk test met beker end-effector	41
4.5.9 Algemene conclusies end-effector ontwerp	41
4.5.10 Meetresultaten vrijmaken van de vrucht	42

4.6	Bepaling van functies en samenstelling van totaal concepten	45
4.6.1	Van hoofdfuncties naar systeem concepten	45
4.7	Machineconcept deel B	46
4.7.1	Conceptkeuze	46
4.7.2	Concept 1. ACRO	46
4.7.3	Concept 2. bewezen techniek	50
4.7.4	Concept 3. Uniek Ontwerp	50
4.7.5	Overige conceptoverwegingen	51
4.8	Herijking van de businesscase	51
4.8.1	Optimistisch scenario	52
4.8.2	Kostprijs concepten	52
5	Conclusies	53
5.1	Kern van het technische probleem	53
5.2	Businesscase kritisch	53
5.3	Gevoeligheid op de businesscase	53
5.4	Markt mechanisatie van hoogwaardige producten	54
5.5	Conceptkeuze	54
6	Aanbevelingen voor vervolg	54
6.1	Plan van aanpak	54
6.2	Blijvende collectieve ondersteuning nodig	54
6.3	Aansluiten bij Wageningen UR en actueel wetenschappelijke agrarisch robotprogramma	55
6.4	Businessmodel	55
6.5	Pitch	55
	Literatuur	55
	Bijlage 1. Relevante literatuur	56
	Bijlage 2. Functies uit systeem	60
	Bijlage 3. Systeemkeuze	66



# 1 Aanleiding

Bij de oogst van appels en peren is in een korte periode veel arbeid nodig. Het vraagt een forse inspanning om voldoende kwalitatief juiste arbeid te krijgen op het juiste moment tegen de juiste prijs. Ieder jaar moeten weer nieuwe oogsters getraind worden in het oogsten van de juiste appel van de juiste kwaliteit. En deze blijkt over de dag niet constant te zijn. De vraag groeit dan ook naar techniek dat hierbij kan helpen. De techniek staat niet stil. Eerste oogstrobots in de glastuinbouw lijken door te gaan breken. Robots worden steeds goedkoper en kunnen steeds meer. "In hoeverre is een robot voor oogsten van appels en peren op dit moment rendabel te maken". Dat is de centrale vraag in dit project en moeten we hiervoor dan ook een project starten.

Met dit project wordt getracht een concept neer te zetten dat de businesscase kan verslaan en als dit zo is dan moet er ook een partij te vinden zijn die hem wil ontwikkelen en bouwen. Ook dit wordt in dit project meegenomen.

In de rapportage wordt veel gesproken over appels en minder over peren. Appels zijn leidend geweest in dit project, maar de verschillen zijn niet zo groot dat er met peren andere resultaten zijn te verwachten. Daarom mag bij het lezen van appels in de meeste gevallen ook gelezen worden: appels en peren.

## 2 Projectkader

### 2.1 Probleemstelling

#### 2.1.1 Arbeid moet betaald worden

Arbeid moet betaald worden. Een gemiddelde oogster op een modern bedrijf oogst zo'n 160 kg per uur. De sector blijkt nog steeds voldoende creatief in het vasthouden van het lage uurloontarief van € 15 - € 20. Toch besteedt de Nederlandse appel en perensector per jaar zo'n 51 miljoen euro aan oogstarbeid om 550.000 ton de appels en peren van de bomen te krijgen.

Ook op bedrijfsniveau zijn de kosten aanzienlijk. Een gemiddeld modern bedrijf van 20 Ha geeft jaarlijks € 61.000 uit aan enkele weken oogstarbeid.

#### 2.1.2 Seizoensgebonden arbeid

Gedurende 7 weken van het jaar vindt de oogst van appels en peren plaats. In deze korte periode is veel arbeid nodig. Vaak wordt gebruik gemaakt van buitenlandse arbeid waarvoor reis, huisvesting, vergunning en alles moet worden geregeld, met of zonder tussenpersoon of uitzendbureau. Een enorme organisatielast is nodig om de oogst gedaan te krijgen.

De arbeiders verschillen sterk per seizoen. Ieder jaar zal weer geïnvesteerd moeten worden in de nodige instructie en opleiding om de optimale kwaliteit te kunnen oogsten, veelal uitgevoerd door de beste oogsters die hiervoor van hun taak worden ontheven terwijl ze hier juist zo goed in zijn.

#### 2.1.3 Kwaliteit van de arbeid

De kwaliteit van de arbeid laat soms te wensen over. De fruitweker heeft een scherp beeld van de te oogsten kwaliteit en de juiste behandelwijze, maar moet dit snel zien over te dragen aan niet ervaren oogsters. Het oogsten van een nauwkeurige rijpheid is met de komst van nieuwe rassen niet makkelijker geworden en vraagt de nodige kennis en scherpheid van de oogsters. Dergelijke handelingen worden nu niet door techniek ondersteund, waardoor verloop in rijpheid, kwaliteit, vallende appels en mechanische behandeling bij het afleggen sterk verschilt per persoon. Een automatisch systeem zal dit constanter doen, waarmee ook winst te behalen is.

#### 2.1.4 Dataverwerking mens machine

Het menselijke brein is uniek, maar wanneer we per boom willen weten hoeveel appels er van af komen en van welke kwaliteit de appels waren gaat de prestatie snel achteruit. Een geautomatiseerd systeem kan automatisch data verzamelen over de boom, aantal appels, de kwaliteit de verkregen behandelingen en kan zinvolle data genereren voor het beter laten presteren van het teeltsysteem.

## 2.2 Businesscase

Voor de start van het project is een vereenvoudigde businesscase opgesteld om te onderzoeken in hoeverre de haalbaarheid van het oogsten van appels en peren binnen handbereik is. De businesscase is de basis geweest voor dit onderzoek. In hoofdstuk 4 heeft een belangrijke herijking van deze businesscase plaatsgevonden. Een robot zal in ieder geval de businesscase moeten kunnen verslaan.

<b>Sector</b>				
Productie Appel en Peren in NL	550,000	ton		
Arbeidsprestatie	160	kg/uur	3,437,500	Arbeidsuren
Arbeidsloon (inleen)	€ 15,00	per uur	51,562,500	Arbeidskosten
Sector omvang	17000	ha	3,033	Arbeidskosten/ha
<b>Bedrijf</b>				
Voorloper	20	Ha	€ 60,662	
Investeringsruimte robots				
Afschrijving	5	jaar	20%	
Gemiddelde rente bij lineair afschrijven			2.5%	
Jaarlijks onderhoud			2.5%	
Jaarlijkse kosten van investering			25%	
Investeringsruimte robots			€ 242,647	
<b>Robot</b>				
<b>Plukprestatie</b>				
Aantal appels per kg	7			
Aantal appels per	20	ha is:	4,529,412	appels
			647	ton
<b>Robotprestatie</b>				
Beschikbare uren				
Seizoen	7	weken		
Gemiddelde inzet/dag	24	uur		
Aantal werkdagen/week	6	dagen		
Aantal uren	1008	uur		
Cyclustijd van plukactie	8	sec		
Aantal plukacties	453600			
<b>Benodigd aantal robot armen</b>				
			10	
Aantal armen per robot	3			
Benodigd aantal robots	3.495		4	(afgerond)
<b>Prijs per robot en bedieining</b>			€ 60,662	

Tabel 1: Businesscase

### Toelichting businesscase:

Status van de tabel is een eerste gevoel te krijgen van de gevoeligheid van bepaalde parameters. De gevoelige parameters zijn: afschrijftermijn, cyclustijd van de plukactie, inzetbaarheid per dag/per week en het aantal armen per robot. De ingestelde parameters zijn een vertrekpunt, maar moeten worden gezien als knoppen waar aan gedraaid kan worden. Bijvoorbeeld: indien de cyclustijd naar 6 seconden kan, neemt het benodigde aantal armen af en kan gekozen worden voor een robot met slechts 2 armen, kostprijs van een robot beter gehaald kan worden.

### 2.2.1 Robotisering en de businesscase

Uit de praktijk komt naar voren dat oogst-robots doorgaans een beperkte capaciteit hebben. Robots doen het al goed als ze de mens bij kunnen houden. Het voordeel is dat robots geen pauze houden, robots kunnen in theorie 168 uur per week werken (4-5 arbeiders) en worden afgeschreven over meerdere kalenderjaren. Arbeid wordt steeds duurder en robots goedkoper. De markt voor robots is daardoor ook groot. Een groot bedrijf heeft meerdere dezelfde robots nodig, de kostprijs kan daardoor laag blijven. Hierdoor kan ook een kleiner bedrijf een robot rendabel inzetten.

## 2.3 Doelstelling

Doelstelling van dit project is één of meerdere concepten op papier te ontwerpen voor het automatisch oogsten van appels en peren, waarbij kritische deelfuncties op eerste haalbaarheid zijn getoetst teneinde de drempel te verlagen waarmee een projectstart gerealiseerd kan worden. Aansluitend is het doel een breed gedragen ontwikkelingstraject te starten dat binnen een afzienbare periode zal leiden tot implementatie.

Na dit project zal in een ontwikkelingsproject een consortium van kennisleveranciers, financiers en marktpartijen dit vervolg starten (projectresultaat).

Uitgangspunten (afbakening) bij de conceptontwikkeling zijn:

- Bruikbaar in gangbare teeltsystemen
- Betrouwbaar, eenvoudig, doch intelligent, passend in de omstandigheden van de sector
- 80% - 100% van het appel en peren assortiment dient te kunnen worden geoogst (ook selectief oogsten)
- Economisch haalbaar: capaciteit en parameters conform haalbaarheidsberekening (zie businesscase)
- Kwaliteit geplukte appels minimaal vergelijkbaar met handmatig oogsten
- Infrastructuur (transport en buffering) van appels maken onderdeel uit van de studie
- Machine gaat uit van volcontinue verwerking 16-24 uur per dag

### 2.3.1 Beoogde resultaten

- Minimaal 1 en maximaal 3 technisch en bedrijfseconomisch perspectiefvolle machine-robotconcepten
- Schetsontwerpen beschikbaar van 1 en maximaal 3 concepten, werkend op papier
- Sensorfuncties op haalbaarheid getoetst in oogstbaar praktijkgewas en inschatting van haalbaarheid gepresenteerd (antwoord op de vraag kunnen we de oogstbare vruchten in voldoende mate met de robot zien).
- End-effector handmatig globaal getest
- Inschatting investeringsniveau, herijking van de businesscase, incl. inschatting capaciteit
- Plan van aanpak voor vervolg en partners gereed, businessmodel en financieringsperspectief gereed.

### 2.3.2 Risico's

- Haalbaarheid is kritisch (technisch en bedrijfseconomisch)
- Onvoldoende commitment consortium

## 3 Aanpak

### 3.1 Onderzoek machineconcept

#### 3.1.1 Oogstrobots wereldwijd

Het oogsten van hard- en citrusfruit heeft al jaren de aandacht van menig onderzoeksgroep. Er is veel gepubliceerd en af en toe neemt ook het bedrijfsleven initiatieven om een commerciële toepassing te bouwen. Binnen het project zijn de volgende acties uitgevoerd om te komen tot een goed beeld van de wereld om ons heen:

- Literatuuronderzoek onder wetenschappelijke publicaties
- Octrooionderzoek

- Directe inventarisatie onder onderzoekers actief binnen agrorobotica, zoals:
  - Kondo, Kyoto University, Japan
  - ACRO Diepenbeek, KU Leuven, België
  - Hayashi, IAM BRAIN, Japan
- Verzamelen van videobeeldmateriaal
- Brede oriëntatie op internet

Publicaties zijn samengevat in verzameldocument.

### 3.1.2 Ontwerpmethode

Om te komen tot werkende concepten is gebruik gemaakt van twee achtereenvolgende ontwerp methodes:

1. Methode om het minimum aantal functies vast te stellen met behulp van het Information Based Design van Wageningen UR. Deze methode is ontwikkeld door Wageningen UR en gaat uit van de informatievraag die een systeem achtereenvolgens stelt om tot de oplossing te komen (Van Tuijl 2004). In dit geval het oogsten van een appel. In deze methode zijn de verschillende robots uit het literatuuronderzoek geprojecteerd om de ontwerp richting te bepalen. Doel van deze ontwerpfase is het bepalen van het minimum aantal deelfuncties in een functioneel ontwerp.
2. De tweede methode gaat uit van het gebruikelijke systematisch ontwerpen. Hierbij worden de volgende stappen doorlopen:
  - a. Conceptideeën, mede ingegeven door onderdeel 1.
  - b. Definiëren van de deelfuncties
  - c. Brainstormen op deelfuncties en opties uitzetten in een matrix (functies verticaal, opties horizontaal)
  - d. Uitwerken van de verschillende functies (scoren op kostprijs, performance, betrouwbaarheid, technische risico's, benodigde r&d inspanning)
  - e. Het samen bouwen van concepten door de interessante deelfuncties middels een lijn door de matrix te verbinden tot een hoofdfunctie
  - f. Interessante concepten uitwerken tot functioneel ontwerp

### 3.1.3 Functioneel ontwerp

Na het vaststellen van technische oplossingen voor de verschillende functies ontstaat een functieschema. De functieschema's zijn verwerkt in een functioneel ontwerp. Van de kansrijke ontwerpen zijn schetsen gemaakt om de werking te visualiseren. Het functioneel ontwerp is getoetst op:

- Kostprijs niveau
- Capaciteit/prestatieverwachting
- Technische risico's/uitdagingen
- Benodigde R&D inspanning
- Toets aan de businesscase

Het ontwerp proces is een iteratief proces, waarbij parallel gewerkt is aan de sensorconcepten globaal en lokaal, het, end-effector en manipulator concept en het concept voor infrastructuur, buffer, verplaatsing en stabilisatie.

## 3.2 Onderzoek sensorconcept globaal

### 3.2.1 Literatuuronderzoek

Het globale sensorconcept richt zich op de vraag: "Waar zitten mogelijk oogstbare appels (of peren)". Op deze specifieke functie is literatuur onderzocht. Hierbij zijn de volgende bronnen gebruikt:

1. Patentonderzoek
2. Wetenschappelijke literatuur
3. Internet

Daarnaast zijn brainstormsessies met experts uitgevoerd. Mogelijke technische oplossingen zijn bediscussieerd.

### 3.2.2 Meetopstelling globaal sensor concept

Uiteindelijk hebben onderzoek en brainstorms geleid tot een potentieel kansrijk globaal sensorconcept, waarbij in het ACRO-robotproject uit België de meest recente ervaring is opgedaan.

Dit concept is door Wageningen UR gevalideerd op een gangbaar Nederlands teeltsysteem met als doel:

- Maak een inschatting van hoeveel appels eigenlijk zichtbaar zijn voor een systeem dat via een camera naar de boom kijkt
- Probeer verschillende kijkposities en evalueer welke ervan effectief zijn
- Maak opnames van appels en peren

Het eerste doel draagt bij aan het maken van een baseline voor het project – een robot zal zeker niet meer appels kunnen zien dan een mens. Het draagt ook bij aan een inschatting van de moeilijkheid van het globale detectie probleem. Het tweede doel levert informatie over de effectiviteit van de meetposities. Het laatste geeft testmateriaal voor testen van detectiealgoritmes in een latere fase van het project en wordt gebruikt voor het tellen van de zichtbare appels. Op basis hiervan is een meetopstelling ontwikkeld en is data gegenereerd.

## 3.3 Onderzoek sensorconcept lokaal

### 3.3.1 Literatuuronderzoek

Het lokale sensorconcept richt zich op de vraag: "Mag ik de oogstbare appels (of peren) oogsten en waar moet ik ze vastpakken." Op deze specifieke functie is literatuur onderzocht. Hierbij zijn de volgende bronnen gebruikt:

1. Patentonderzoek
2. Wetenschappelijke literatuur
3. Internet

Daarnaast zijn brainstormsessies met experts uitgevoerd. Mogelijke technische oplossingen zijn bediscussieerd.

### 3.3.2 Kansen voor oogsten van betere kwaliteit

Indien de oogstmethode een hoger aandeel klasse I appels in de koelcel realiseert geeft dit een hogere winstmarge. Deze vruchten hangen immers al aan de boom en hoeven alleen geoogst te worden. Pluuschade is directe schade en daarmee verlies. De centrale vraag is dan ook in hoeverre nauwkeuriger oogsten resulteert in een hoger aandeel klasse I. Hiervoor zijn de gevolgen van een lager oogstverlies en een lager bewaarverlies berekend aan de hand van de saldobegroting voor Elstar in het 4<sup>e</sup> groeijaar.



### 3.3.3 Kwaliteitsmetingen

Meerdere metingen zijn uitgevoerd om de rijpheid van dezelfde vruchten te bepalen aan de hand van verschillende methoden:

- Chlorofyl Fluorescentietechniek
- Streiff-index (hardheid/suiker x zetmeel). Dit is de standaard meetwijze voor het bepalen van de rijpheid van de vruchten in de fruitteelt.
- DA-meting: Non-destructive fruit kwaliteitscontroletester welke gebruik maakt van near-infrared spectrometer (NIRS). Het apparaat meet de chlorofyl inhoud van de vruchten. Welke als index wordt gebruikt voor de rijpheid van de vruchten.
- NIR-metingen (NearInfraRed). Deze meetwijze is non-destructief, snel (groot aantal metingen per seconde), volledig automatiseerbaar, in-line toepasbaar, eenvoudig te gebruiken en kent lage kosten.

## 3.4 Onderzoek end-effector en manipulatorconcept

### 3.4.1 Literatuuronderzoek

Op deze specifieke functies is literatuur onderzocht. Hierbij zijn de volgende bronnen gebruikt:

1. Patentonderzoek
2. Wetenschappelijke literatuur
3. Internet

Daarnaast zijn brainstormsessies met experts uitgevoerd. Mogelijke technische oplossingen zijn bediscussieerd. In patent databases en op internet zijn verschillende zoekopdrachten uitgevoerd naar "fruit harvesting methodes, fruit end-effector(s), robot end-effector(s)" en of combinaties daarvan. De gevonden resultaten zijn gepresenteerd/gebruikt tijdens een brainstorm sessie en zijn als modellen gebruikt en verwerkt in twee proefmodellen. Uit de brainstormsessie zijn de functies bepaald die een end-effector moet hebben, deze worden in de komende paragrafen gepresenteerd.

## 4 Resultaten

### 4.1 Machineconcept deel A

#### 4.1.1 Literatuuronderzoek

Wereldwijd is gekeken naar robotsystemen die individuele vruchten of bloemen oogsten. Hierbij is zowel het totaalconcept beschouwd als ook de afzonderlijke oplossingen voor de deelfuncties. In het literatuur onderzoek blijkt dat zeer uiteenlopende totaalconcepten zijn ontworpen, gebouwd en getest, zoals:

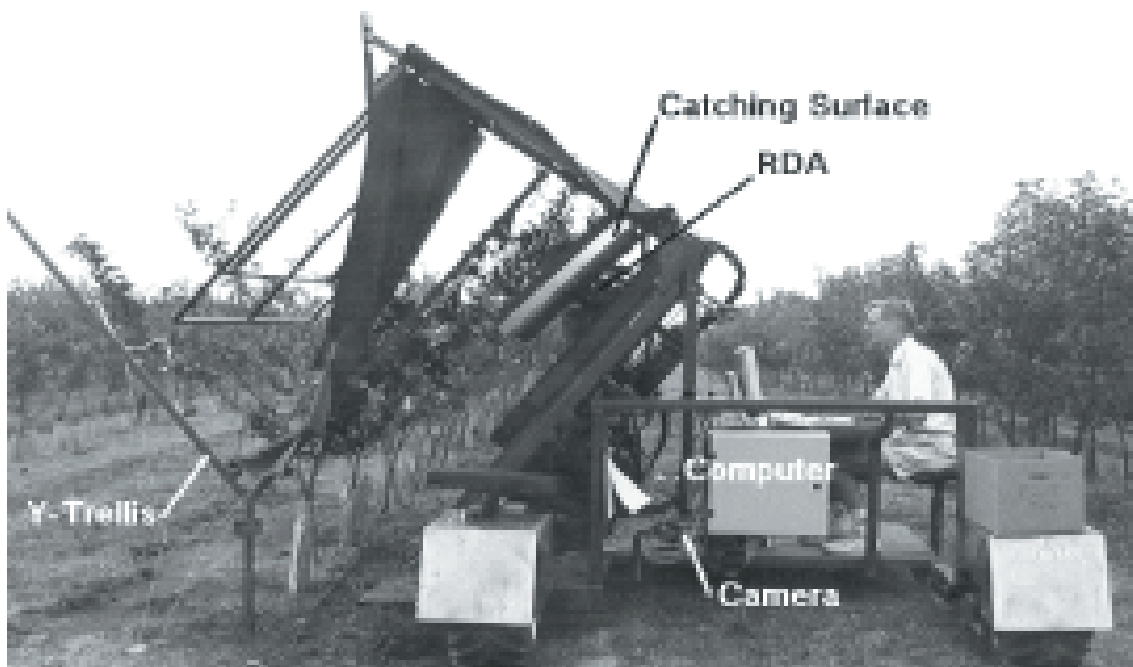
- Het geven van een impuls aan de tak waardoor appels van de boom vallen en in een net worden opgevangen
- Het voorscannen met een visionsysteem en veel later daarna "blind" oogsten op basis van de voorscan
- Methoden die gebruik maken van gescheiden globaal detectiesysteem van een lokaal detectiesysteem
- Methoden die geïntegreerd gebruik maken globaal en lokaal detectiesysteem

In het literatuuronderzoek zijn gerealiseerde robots gevonden voor gewassen als: Appel/peer, sinaasappel (soms breder getest op citrusvruchten), komkommer, tomaat, aubergine, aardbei, kers, meloenen, olijven, druiven (wijn), rozen, gerbera's en chrysant, champignon.

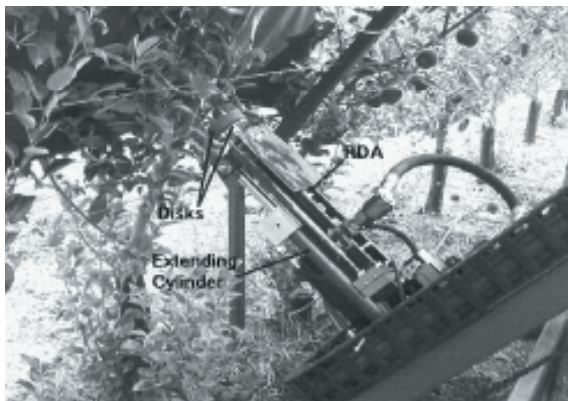
Op het eerste gezicht lijken robots voor appel/peer, roos, aardbei, roos en komkommer het dichtst bij praktijkintrotuctie te staan. Hierna worden enkele aansprekende totaalconcepten toegelicht met sterk uiteenlopende functies. De totaalconcepten hier opgenomen om een goed breed beeld te geven van de mogelijkheden. Een beperkte literatuurlijst is opgenomen in Bijlage 1.

#### 4.1.1.1 Literatuur voorbeeld 1. Robot-bulk-oogst-systeem voor appels (US)

Het "robot bulk harvest" systeem is ontwikkeld in de verenigde staten (1999, Peterson). En alleen geschikt voor het zogenaamde Y-teeltsysteem. Een camerasysteem zoekt naar takken, hiervoor is het zwarte doek aangebracht om instraling van direct zonlicht te voorkomen. In bijgevoegde test was er echter nog een operator nodig om de actuator (RDA = Rapid Displacement Actuator), voor de tak te bewegen. De RDA geeft een sterke impuls aan de tak waardoor de appels van de boom vallen. De appels worden opgevangen op een schuimgevormd bed. Op deze wijze kon 95% van de appels verwijderd worden, met een kwaliteit van 99% U.S. Extra Fancy (97.7% butsvrij). Wel geeft de methode aanzienlijk meer uitgetrokken steeltjes.



Figuur 1: Het robot-bulk-oogst-systeem



Figuur 2: RDA (Rapid Displacement Actuator)

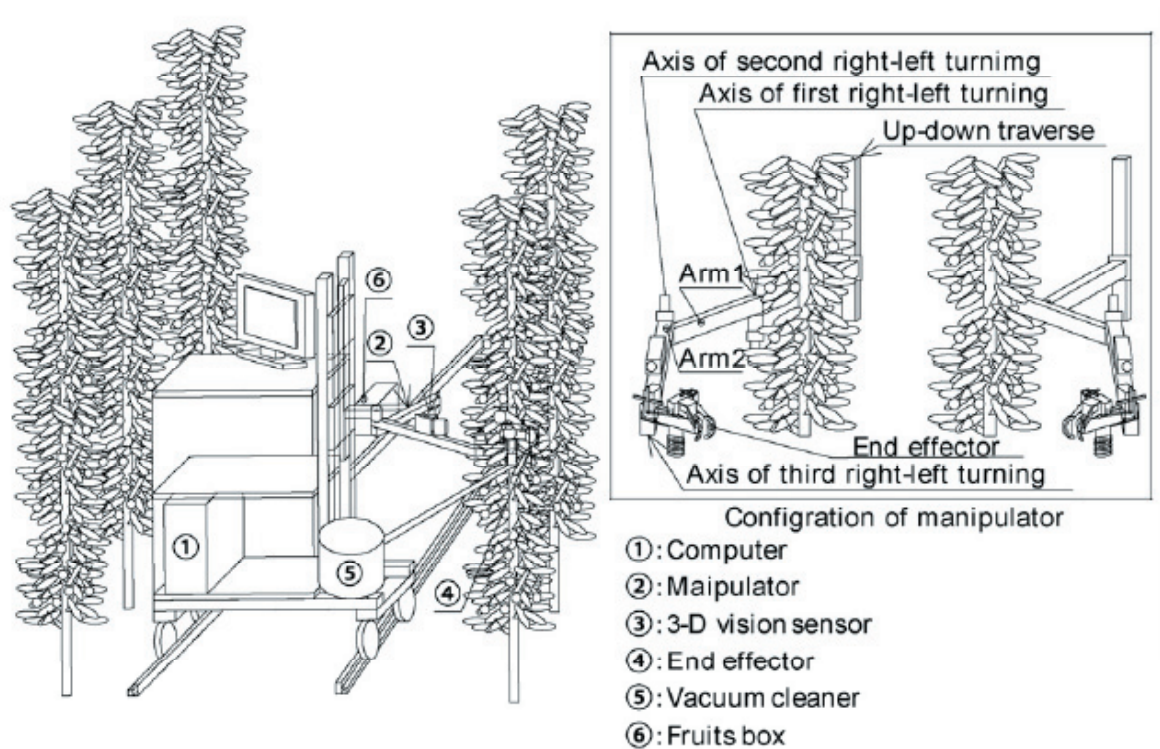


Figuur 3: Appel opvang systeem

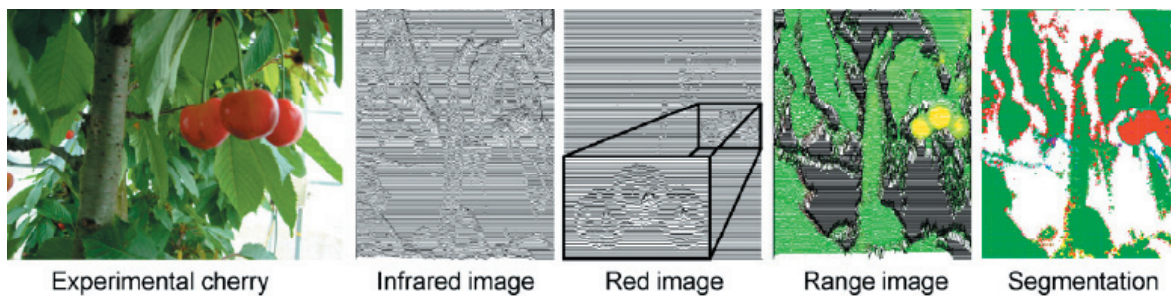
#### 4.1.1.2 Literatuurvoorbeeld 2. Kersen oogst robot (Japan)

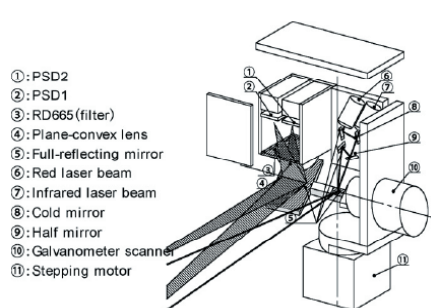
In Japan zijn veel oogstrobots ontwikkeld. Een robot waarbij veel goed doordachte vindingen bij elkaar komen is de kersen oogst robot (2008, Tanigaki). Voor het detecteren van de appels worden twee lasers gebruikt (rood en infrarood). Samen met een foto detector en spiegels voor het scannen worden 3D beelden opgebouwd. De verschillende kleuren lasers maken het mogelijk om onderscheid te kunnen maken tussen kersen en bladeren. Filters zijn toegevoegd om ook de invloed van zonlicht te beheersen.

Voor de manipulatie zijn lineaire motoren gebruikt en de end effector bestaat uit een combinatie van aanzuigen en met twee mechanische vingers de kers omklemmen zodat ook het steeltje van de kers meekomt. Als resultaat wordt genoemd dat 10 van de 12 kersen gepulkt konden worden. Onduidelijk is hoe dit resultaat precies tot stand is gekomen en of dit ook volledig autonoom heeft plaatsgevonden. Over de kwaliteit van de geoogste producten wordt niets gezegd.

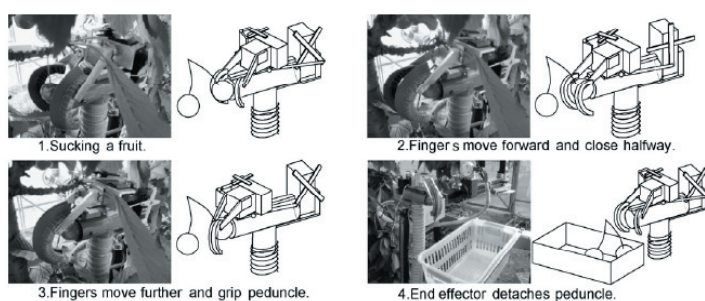


Figuur 4: Kersen oogst robot





Figuur 5: Detectiesysteem met lasers



Figuur 6: End-effector

### 4.1.1.3 Literatuurvoorbeeld 3. Appel-oogstrobot ACRO (België)

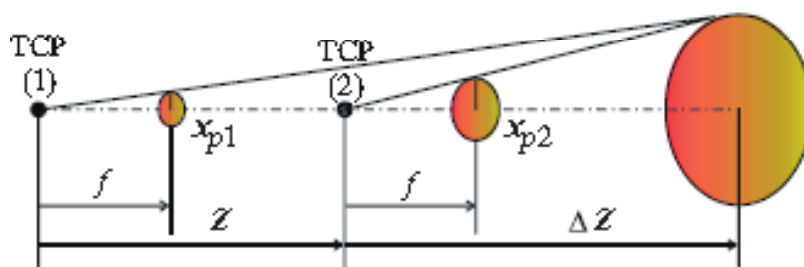
De Acro robot (zie Figuur 7: Acro robot) gaat uit van ongeveer 30 vaste startposities rond een boom van waaruit de robot begint te kijken. In het hart van de end-effector (zuignap), begint de camera te kijken naar appels. Vanuit de startpositie wordt een zone leeggeplukt door de appels één voor één van de plant te verwijderen. Bij het losmaken van de appel wordt een wrikactie gemaakt in een vaste richting, zonder rekening te houden met het cluster of de tak. De appels worden afgevoerd op een lopend band en verder gebufferd in een kist zoals bij de pluk-o-track. Huidige beperkingen van de vision zijn:

- Geen 3D informatie, dus geen kennis van appels die voor of achter liggen.
- Kan in clusters geen afzonderlijke appels onderscheiden
- Geen real-time feedback. De camera maakt steeds een opname en geeft op basis van de opname nieuwe coördinaten. De robot verschuift hier naar toe en er wordt een volgende opname gemaakt.
- Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen takken, vruchten of bladeren. Het systeem houdt ook geen rekening met voorliggende obstakels. Collision detection (bots-detectie) of padplanning (juiste route om de vrucht schadevrij te bereiken) is dan ook niet mogelijk. Ook de ideale wrikrichting kan hierdoor niet worden bepaald.
- Rijpeheidsdetectie gebeurt op basis van kleur. Hoeveelheid rood in één aanzicht zonder obstakels er voor. Deze methode is beperkt.
- Er zijn veel problemen met de belichting. Afscherming is vereist en volledige afscherming is vereist om ook groene appels te kunnen oogsten.

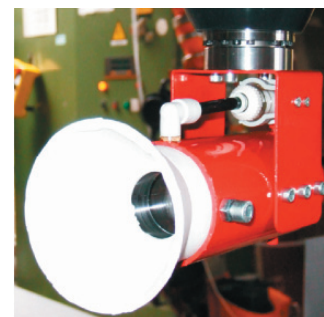




Figuur 7: Acro robot



Figuur 8: Beeldherkenningsaanpak om diepte afstand te bepalen



Figuur 9: Acro end-effector

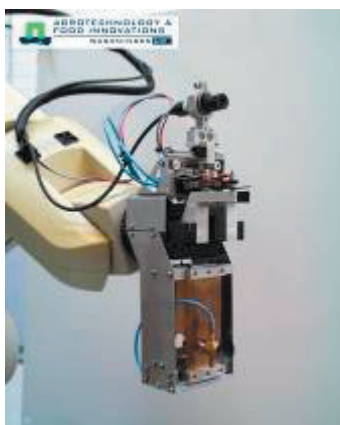
#### 4.1.1.4 Literatuurvoorbeeld 4. Komkommeroogstrobot (Wageningen)

Wageningen UR heeft in 1996 een robot ontwikkeld voor het oogsten van komkommer. De robot was in staat zichzelf te verplaatsen over een buisrailsysteem en in een regulier hogedraad teeltsysteem komkommers te oogsten. Op deze wijze werd een volledig pad komkommers geoogst. Van de te oogsten komkommers werd 95% gedetecteerd en 75% werd daadwerkelijk in de eerste keer geoogst.

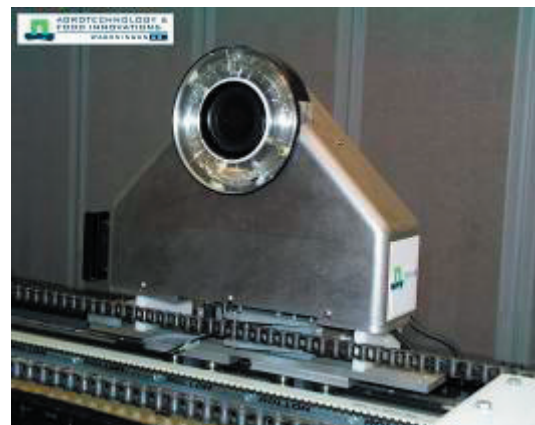
Het sensorsysteem bestond uit een infrarood camera met twee spectrale banden. De opname werd ondersteund met een sterke ringflits, waardoor negatieve invloeden van daglicht werden voorkomen (Het daglicht werd overflitst zogezegd). Een tweede voordeel van de flits was dat belichting exponentieel afneemt waardoor alleen de eerste rij goed in beeld kwam. Hierdoor werd voorkomen dat achterliggende komkommers uit andere paden het beeld zouden verstoren. De end-effector bestond uit een kleine klem die de steel pakt en een chirurgisch mes die de steel doorbrandde om overdracht van virussen te voorkomen.



Figuur 10: Komkommeroogst robot



Figuur 11: Komkommer robot End-effector



Figuur 12: Komkommer robot camera systeem

#### 4.1.2 Leren van bestaande robots

Om een appel of peer in een kist te krijgen heeft de techniek veel informatie nodig. In het ontwerp proces hebben we dan ook gebruik gemaakt van de methode: [Information Based Design Wageningen](#). In deze methode wordt vanaf het moment dat we een systeem ergens in het de boomgaard loslaten afgevraagd welke informatie een systeem nodig heeft om iets te kunnen doen.








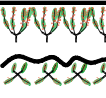



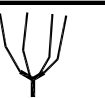







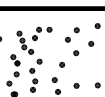
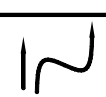
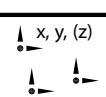
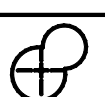
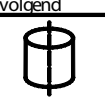
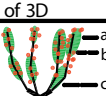
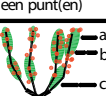
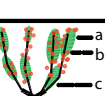
Achtereenvolgens dienen de volgende informatie vragen beantwoord te worden:

1. Vanaf waar wordt gestart met informatie verzamelen
2. Wat wordt er gebruikt om informatie te verzamelen
3. Op welk moment wordt gestart om informatie te verzamelen
4. Op welk moment en in welke frequentie
5. Hoe en waarvoor wordt de informatie gebruikt

Indien het doel nog niet is bereikt volg de kaart nog eens. Op deze wijze zijn verschillende robots in kaart gebracht in de hoop te traceren wat de gemeenschappelijke gedachte is en waar de variatie ligt. Dit ter ondersteuning van het ontwerpproces.

Gemeenschappelijke strategieën zullen sneller leiden tot succes doordat het vaker is toegepast (meer kennis).

De verschillende opties zijn uitgezet in een kaart. Zie Figuur 13: Information Based Design Wageningen

Welke informatie is nu aanwezig en van welke kwaliteit? Bijvoorbeeld uit modellen, voorafgaande metingen of voorspellingen)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Vanaf waar start wordt gestart met informatie verzamelen?									A
	rij	gereedschap	systeem	sub-systeem	onderdeel van boom	nergens			
Wat wordt er gebruikt om informatie van te verzamelen?									B
	boom rij	gehele boom	appel clusters	appel en blad clusters	takken	appel	stam	teelt onderdelen	
Op welk moment en in welke frequentie?									C
	nu	in verleden	eenmalig	continue, volgend	willekeurig	geen			
Wat voor informatie is er dan verkregen en van welke kwaliteit?									D
	vector(en) 2 of 3D	coördinaten van een punt(en)	vlak	volume	geur, kleur, fotosynthese	geen			
Hoe en waarvoor wordt de informatie gebruikt?									E
	positioneren naar:	voed model om:	grijpen naar:	niet					
Is het doel bereikt? Zo niet volg de kaart nogmaals.									

Figuur 13: Information Based Design Wageningen

Op basis van deze analyse zijn de volgende zaken vastgesteld:

- Veel systemen hebben een sensor in de end-effector
- Het gebruik van één sensor is mogelijk en vereenvoudigt het concept. Er zijn minder stappen nodig om een vrucht te kunnen oogsten.
- Er wordt sterk direct gefocust op de te oogsten vruchten, meer dan op omliggende takken en bladeren en andere informatie die in een boom aanwezig is (touwtjes, palen, e d.).

Het ACRO concept blinkt uit in eenvoud. Als het werkt is het een mooie aanpak. Belangrijk is om dit concept te valideren en vast te stellen hoe goed het systeem in potentie is of kan zijn.

In de hierna volgende aanpak is gekeken vanuit de ACRO-gedachte, maar niet uitsluitend. Kennis en ideeën voor andere oplossingen zijn ook getest. Vooral op functies waar de ACRO-robot moeite heeft.

## 4.2 Teeltsystemen

In de uitgangspunten van het project werd een oplossing beoogd in een gangbaar modern teeltsysteem. Er is gekeken naar de volgende teeltsystemen:

- Spilboom
- Snoerboom
- V-Haag
- Kolomboom

Aangezien de kolombomen niet commercieel worden toegepast, is besloten ons niet te richten op de kolomboom. Kolombomen komen pas weer in beeld wanneer blijkt dat andere systemen niet haalbaar zijn voor de robot.

Ook is vastgesteld dat de Spilboom bij appels en peren het meeste voorkomt en ook de V-Haag bij peer komt veel voor. De snoerboom komt minder vaak voor.

Vanuit dit oogpunt is besloten ons te focussen op de spilboom voor appel (en peer) en het V-haag ststeem voor Peer.

## 4.3 Sensorconcept globaal

### 4.3.1 Appels vinden

Diverse brainstormsessies en literatuurstudies hebben zich gericht op het vinden van de appels in de boom. De ACRO-aanpak is eenvoudig. De gedachte om vanuit vaste posities rond de boom te starten is mogelijk. Slim. Besloten is dan ook om deze techniek te valideren. Hiervoor is een meetopstelling gebouwd met als doel:

- Hoeveel appels (peren) kan ik vinden in de boom en zijn voor de robot bereikbaar
- Hoeveel startposities heb ik nodig om nagenoeg alle appels te kunnen zien
- Wat zijn handige kijkhoeken om te starten met kijken

### 4.3.2 Meetopstelling

De metingen werden uitgevoerd op 12 en 19 september 2008, in respectievelijk de boomgaarden van Johan van Haarlem te Buren en Fruitbedrijf Veens te Herveld. Er werden metingen uitgevoerd op twee takken van een Conference perenboom (V-haag) en op een Jonagold appelboom (spilboom). Voortaan waar het woord "appel" gebruikt wordt, wordt "appel of peer" bedoeld.



*Figuur 14: Appelgewas*



*Figuur 15: Perengewas*

Om de meting te beschermen tegen effecten van direct zonlicht, werd een tent opgezet over de boom. Deze had een achterwand van blauwe kleur, om achtergrondeffecten bij eventuele algoritmeontwikkeling te vermijden.



*Figuur 16: Meetopstelling*

- Stickers werden op de appels geplakt om deze te kunnen identificeren. Dit was van belang voor het evalueren van camera posities – om te kunnen vaststellen welke posities belangrijk zijn is het nodig om te weten in hoeveel en in welke posities een bepaald fruit zichtbaar is.



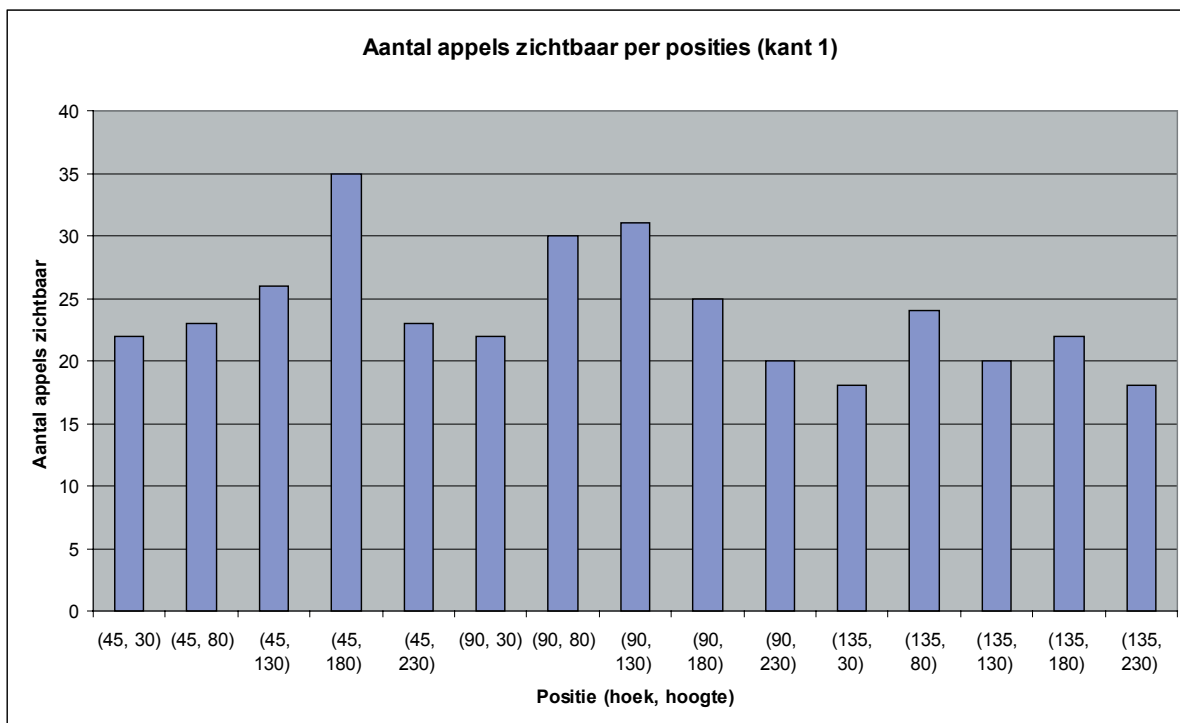
Figuur 17: Cameraposities

- Een camera met een breedhoeklens werd gebruikt om opnames te maken. Dit werd via Firewire aan een laptop verbonden.
- De camera werd op een statief gezet en vervolgens werden opnames gemaakt vanuit 5 verschillende hoogtes en 3 verschillende hoeken voor de appelboom, en 5 verschillende hoogtes en 2 verschillende hoeken per tak van de perenboom.
- Via een eenvoudige Labview applicatie op de laptop was het mogelijk voor een gebruiker om het camerabeeld te bekijken en daarop aan te geven waar hij welke appels kon zien. De applicatie bewaarde alle gegevens over welke appels vanuit elke positie zichtbaar waren samen met hun coördinaten in een XML bestand.

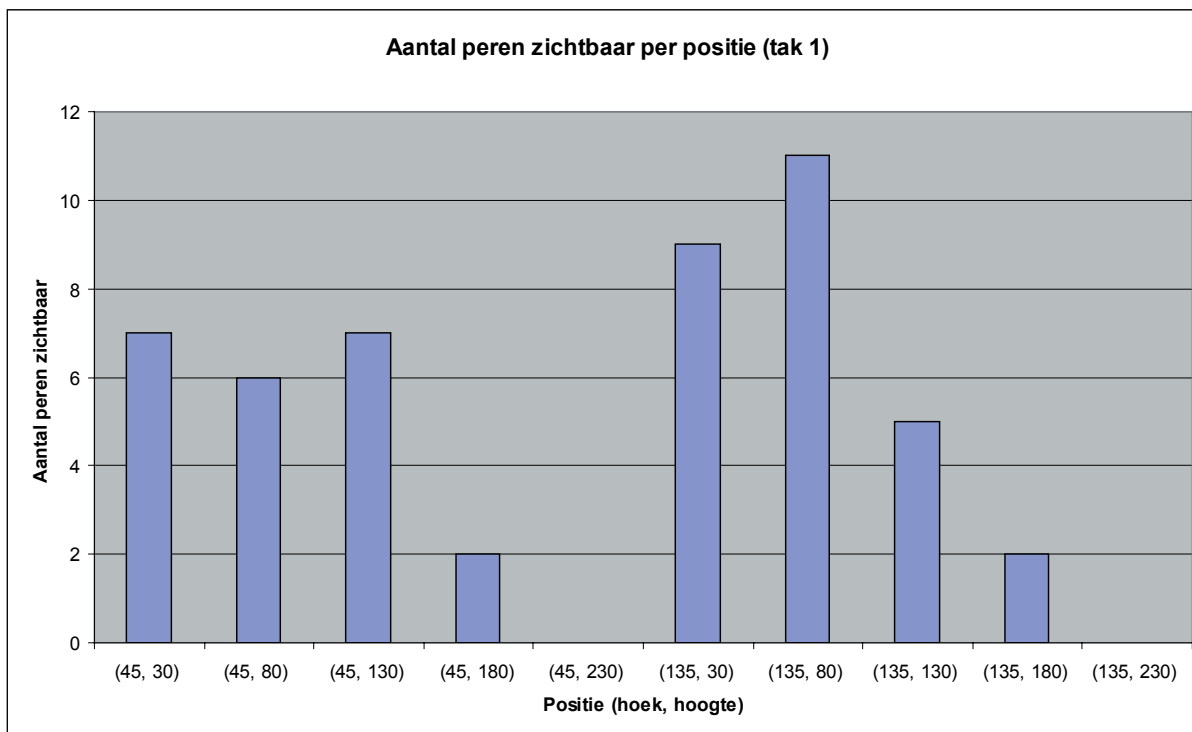
### 4.3.3 Meetresultaten sensorconcept globaal

De meetresultaten zijn als volgt tot stand gekomen. Bij iedere opname is handmatig gekeken welke appels door de camera te zien zijn. Appels worden gekenmerkt als “gezien” als tenminste 1/3 deel van een eenzijdige opname van de appel in beeld is en je van visionsoftware redelijkerwijs mag verwachten dat de identificatie van de appel met vision goed mogelijk is en er tevens een beperkt aangrijppunt denkbaar is. De appels zijn per opname gescoord voor zowel een appel spilboom (één volledige zijde) als een éézijdige perentak in het V-systeem.

De resultaten voor appel zijn uitgezet in Figuur 18. Aantal appels in beeld per camerapositie. De resultaten voor peer zijn uitgezet in Figuur 19. Aantal peren in beeld per camerapositie.



Figuur 18. Aantal appels in beeld per camerapositie



Figuur 19. Aantal peren in beeld per camerapositie

In een volgende stap is gekeken welke gestickerde appels werden gezien en welke niet, gebruikmakend van meerdere cameraposities. Deze analyse is uitgevoerd bij appels en peren.

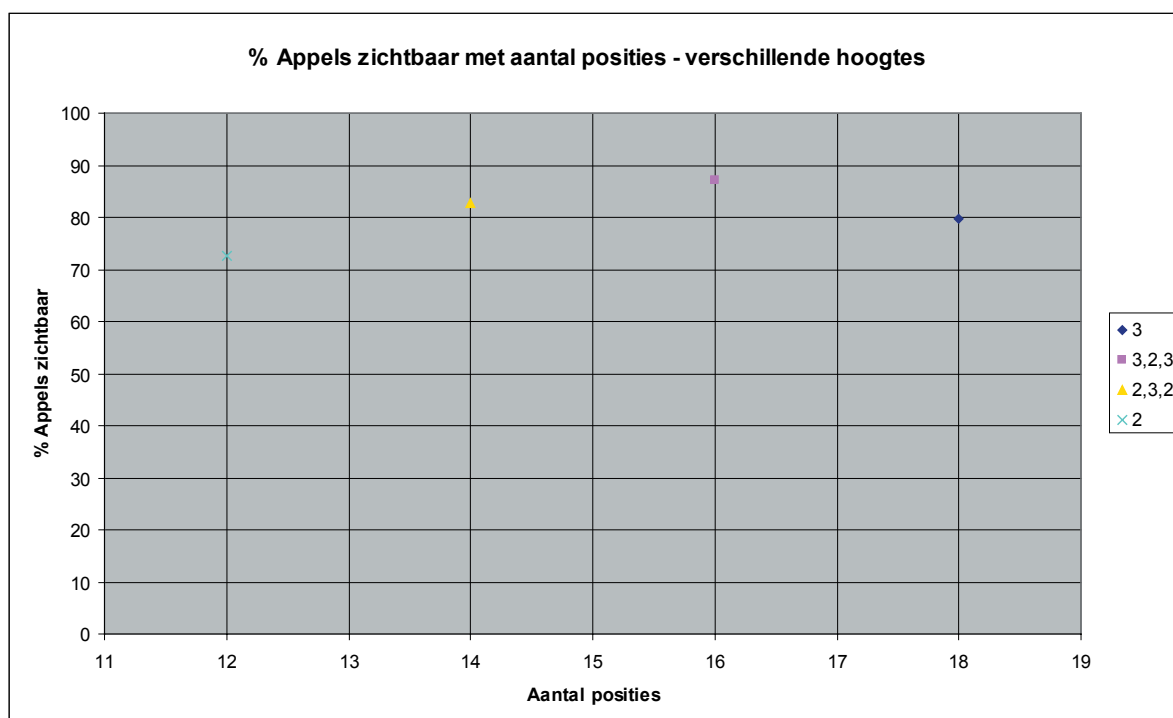
Uit het analyseren van alle beelden waren gemiddeld 90,6% van de peren zichtbaar. Bij appel blijkt dat 91,4% van alle appels goed zichtbaar zijn. Het totaal aantal peren was 32, het totaal aantal appels was 139. De rijpere appels zijn het beste in beeld doordat deze richting de zon zijn geïmponeerd. Dit betekent dat wanneer deze appels zijn geoogst er nieuwe appels in beeld komen. Het percentage kan dus in de praktijk verder oplopen.

Vanuit de resultaten was het duidelijk dat niet alle kijkposities nodig waren. Voor de appelboom konden net zoveel appels gezien worden vanuit 15 posities als vanuit de gebruikte 30 posities. Per perenboomtak waren respectievelijk 3 en 4 van de gebruikte 15 posities nodig. Natuurlijk is het onmogelijk om met zo weinig posities te werken want deze posities werden achteraf gekozen. Tijdens de analyse werd gekeken naar welke mogelijke strategieën voor de keuze van kijkposities succesvol zouden zijn.

Hierbij zijn voor appel de volgende 4 verschillende scenario's betrokken:

1. Kijkend vanuit 3 hoogte posities loodrecht op de boom
2. Kijkend vanuit 8 posities, waarvan 2 verschillende hoogteposities loodrecht op de boom en 3 hoogteposities onder een hoek van  $45^\circ$  en 3 hoogteposities onder een hoek van  $-45^\circ$  ten opzichte van de posities loodrecht op de boom
3. Kijkend vanuit 7 posities, waarvan 3 verschillende hoogteposities loodrecht op de boom en 2 hoogteposities onder een hoek van  $45^\circ$  en 2 hoogteposities onder een hoek van  $-45^\circ$  ten opzichte van de posities loodrecht op de boom
4. Kijkend vanuit 2 posities loodrecht op de boom

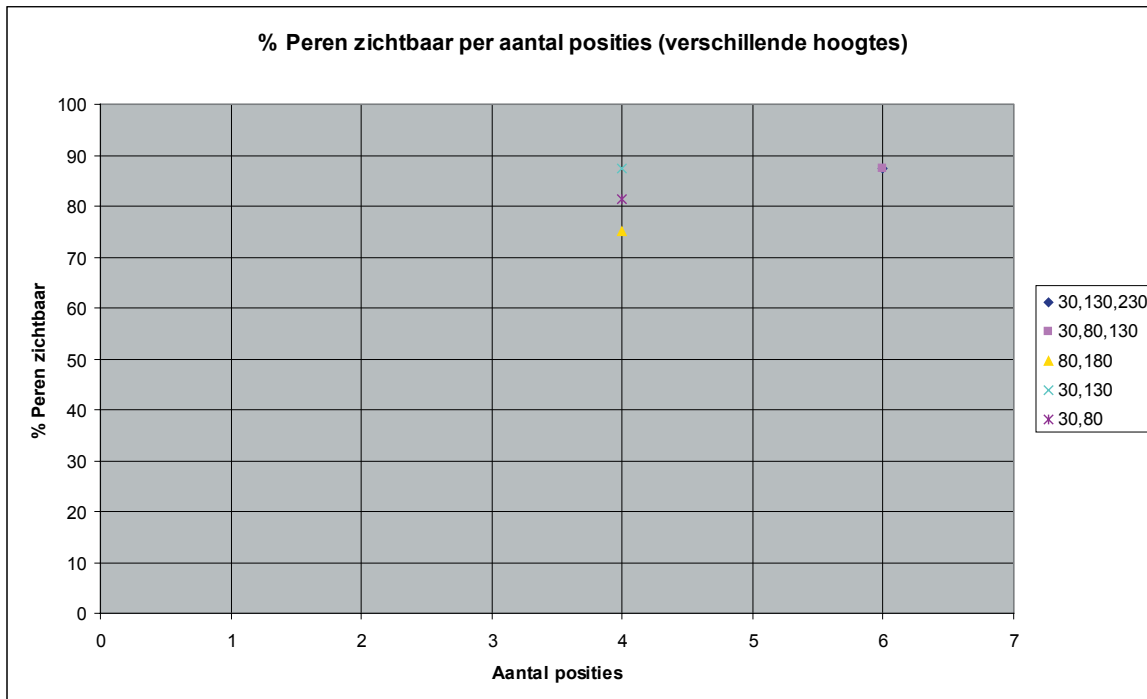
De resultaten zijn weergegeven in Figuur 20. Percentage appels zichtbaar.



Figuur 20. Percentage appels zichtbaar



Bij appels zijn er geen posities die duidelijk veel slechter/beter zijn. Er zijn wat meer appels zichtbaar in het midden van de boom dan heel laag/hog in de boom. Bij peren is het duidelijk dat meer peren laag in de boom hangen dan hoog. Een interessant feit is dat de essentiële posities (posities waaruit een appel gezien kan worden die vanuit geen andere posities zichtbaar is) voor zowel appels als peren meestal op lage hoogtes waren. Dit lijkt erop te duiden dat het moeilijker is om appels en peren onderaan de boom te zien.



Figuur 21. Percentage peren zichtbaar

Bij peren ontstaat een vergelijkbaar beeld als bij appels. Zie Figuur 21. Percentage peren zichtbaar.

Bij deze resultaten zijn de volgende conclusies te trekken:

- Het percentage zichtbare appels en peren is behoorlijk hoog (appels: 91,4%, peren: 90,6%), dus detectie via visuele inspectie is in principe mogelijk. Het percentage zal verder toenemen wanneer de rijpere appels zijn geoogst. De nu niet zichtbare appels zullen in hogere mate zichtbaar worden.
- De percentage zichtbare appels is waarschijnlijk niet 100%, dus er kan nooit van een robotsysteem verwacht worden dat alle appels kan zien
- Het aantal kijkposities hoeft niet hoog te zijn  $((2-3-2) \times 2 (14))$
- Het aantal kijkposities kan verminderd worden door ze goed uit te kiezen. Hiermee dient rekening gehouden te worden met het patroon van de verspreiding van appels over de boom
- Bij vermindering van het aantal kijkposities lijkt het verstandiger om mindere hoogtes te gebruiken eerder dan mindere hoeken
- Het materiaal van deze opnames kan gebruikt worden voor initiële testen van detectiealgoritmes.

## 4.4 Sensorconcept lokaal

Binnen het sensorconcept globaal kan bepaald worden waar appels zich bevinden. De 3D-positie van de appel is bekend als ook een aangrijppunt. Een tweede sensorconcept (lokaal) is echter nodig om te bepalen of de appel mag worden geoogst. Het belangrijkste criterium hiervoor is de rijpheid van de appel en de kwaliteit van de appel. Een rotte of bescha-

digde appel kan omliggende appels ook laten rotten of beschadigen en dient uit het proces genomen te worden. Het sensorconcept lokaal richt zich primair op het bepalen van de rijpheid. Dit criterium bepaalt of de appel geoogst mag worden of nog enkele dagen moet blijven hangen. Voor een goede kwaliteitscontrole moet de appel rondom gemeten worden. Dit is vanuit een eenzijdige benadering van de end-effector niet mogelijk. In het verdere transport van een individuele appel naar de buffer is dit wel mogelijk, maar wordt binnen het robotconcept buiten beschouwing gelaten.

## 4.4.1 Meetresultaten sensorconcept lokaal

### 4.4.1.1 Verlagen plukschade

In de huidige situatie worden ook appels en peren beschadigd en worden ook onrijpe en overrijpe appels geoogst. Dit is voor een de robot met een goed lokaal sensorconcept een kans. Wanneer een geautomatiseerd systeem nauwkeuriger op rijpheid kan oogsten kan mogelijk extra waarde aan de robot worden toegekend. Dit hoofdstuk probeert inzicht te geven in dit aspect.

Het percentage butsen als gevolg van het oogsten is echter afhankelijk van meerdere factoren:

- Het ras
- De plukmethode en hulpmiddelen
- Het bedrijf: grasmat, betonpaden ed
- Plukker zelf
- Instructie door teler (uitleg, lange nagels..)
- Weer (nat weer: meer spanning in appel = meer butsen)

Gemiddeld genomen geldt bij peer:

- Conference: +/- 1 % plukschade
- Doyenné du Comice: 2,5 % plukschade (agv hardere stelen en zwakkere schil)

Gemiddeld genomen geldt bij appel:

- Gevoelige rassen: 3-4 % plukschade
- Minder gevoelige rassen: nihil

Bronnen: Gerard Pronk, Pascal Rietveld ('t Goy) en sorteerstation van Fruitmasters

Met name bij de gevoelige rassen zou dus een verbetering van de plukmethode waardoor de plukschade verlaagd wordt, extra winst kunnen opleveren. De grote sorteerstations sorteren naast uiterlijke kwaliteitsvoorschriften tevens op basis van innerlijke rijpheidkenmerken van de vruchten zoals hardheid en suikergehalte.

Om inzicht te krijgen in wat een betere oogstmethode zou kunnen opleveren zijn enkele scenario's doorgerekend. In Tabel 2 Gemiddelde veilingprijzen 1998/1999 t/m 2002/2003 voor Klasse 1,2 en 3 zijn de gemiddelde veilingprijzen per klasse weergegeven.

Tabel 2 Gemiddelde veilingprijzen 1998/1999 t/m 2002/2003 voor Klasse 1,2 en 3.

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Appel totaal	33	21	11
Elstar	39	25	11
Jonagold	31	21	12
Conference	70	55	10

### **Geen 3% maar 2% oogstverlies**

In een saldobegroting wordt normaal gesproken gerekend met 3% oogstverlies. Indien dit verbeterd kan worden met 1% en er dus 2% oogstverlies gerealiseerd wordt is het verschil in bruto opbrengst € 162,- per ha. Hierbij wordt er van uitgegaan dat het oogstverlies niets opbrengt (onder de boom achter blijft). Dit geldt voor Elstar in het 4<sup>e</sup> groeijaar. De berekening staat in Tabel 3.

Tabel 3: Verschil in bruto opbrengst bij 2 en 3% oogstverlies per ha bij Elstar in het 4<sup>e</sup> groeijaar.

<b>Omschrijving</b>	<b>Wijze van berekening</b>	<b>Hoeveelheid</b>	<b>Hoeveelheid</b>
<u>Opbrengsten</u>		3% oogstverlies	2% oogstverlies
Productie per ha	Hoeveelheid aan de boom	42.000	42.000
Verkochte aantal kg Bewaarverlies = %	Geogoste aantal kg – oogstverlies. Niet bewaarde hoeveelheid (=20%) + (bewaarde hoeveelheid(=80%) – 5% bewaarverlies)	39.110	39.514
Opbrengst prijs	In € per kg	0,40	0,40
<b>Bruto geldopbrengst (A)</b>		<b>15.644</b>	<b>15.806</b>

### **Geen 5% maar 3% bewaarverlies**

In een saldobegroting wordt normaal gesproken gerekend met 5% bewaarverlies. Indien dit verbeterd kan worden met 2% en er dus 3% oogstverlies gerealiseerd wordt is het verschil in bruto opbrengst € 261,- per ha. Hierbij wordt er van uitgegaan dat het bewaarverlies niets opbrengt. Indien bewaarverlies € 0,11 per kg opbrengt is het verschil in bruto opbrengst € 188,- per ha. De berekening is uitgevoerd voor Elstar in het 4<sup>e</sup> groeijaar (Tabel 4)

Tabel 4: Verschil in bruto-opbrengst bij 5 en 3% bewaarverlies per ha bij Elstar in het 4<sup>e</sup> groeijaar.

<b>Omschrijving</b>	<b>Wijze van berekening</b>	<b>Hoeveelheid</b>	<b>Hoeveelheid</b>
<u>Opbrengsten</u>		5% bewaarverlies	3% bewaarverlies
Productie per ha	Hoeveelheid aan de boom	42.000	42.000
Verkochte aantal kg Bewaarverlies = %	Geogoste aantal kg – oogstverlies. Niet bewaarde hoeveelheid (=20%) + (bewaarde hoeveelheid(=80%) – % bewaarverlies)	39.110	39.762
Opbrengst prijs	In € per kg	0,40	0,40
<b>Bruto geldopbrengst (A)</b>		<b>15.644</b>	<b>15.905</b>
	Bewaarverlies * 11€cent	1.646*0,11 = € 181	978*0,11 = € 108
<b>Bruto geldopbrengst (A)</b>		<b>15.825</b>	<b>16.013</b>

Declassering van klasse I naar klasse II kan meerdere redenen hebben, zoals:

- Te weinig bloskleur
- Te groene grondkleur
- Niet rijp genoeg
- Verruwing
- Hagelschade
- Afzetkanaal (sorteervoorwaarden)
- Teler/bedrijf

Gemiddeld wordt tijdens het sorteren rond de 5% gedeclasseerd (over rassen, jaren en telers heen). Enkele grote sorteerbédrijven gaven het volgende aan:

1. 4-5 % naar klasse II en 1,5-2 % naar klasse III
2. 5-15 % naar klasse II + III
3. 5% (1<sup>e</sup> pluk 1%, laatste pluk 8%), is toenemend agv verdwijnen van middelen voor afsputten

Indien de robot op de rijpheid van de vruchten kan beoordelen en op basis daarvan plukt, zou het percentage dat gedeclasseerd wordt verlaagd kunnen worden. Bij de nieuwe clubrassen geldt dat alleen de klasse I appels onder de merknaam verkocht mogen worden, de klasse II vruchten worden onder een aparte merknaam afgezet. Het prijsverschil tussen klasse I en klasse II is daardoor groter dan bij Elstar. Hierdoor is het percentage pack-out dat als klasse I verkocht mag worden ontzettend belangrijk om een ras rendabel te kunnen telen. Indien de oogstmethode kan bijdragen aan het % pack-out dat als klasse I verkocht mag worden, levert dit direct voordeel op.

Bij het verlagen van de plukschade en declassering naar klasse 2 en 3 zijn de volgende conclusies te maken:

- Het verhogen van het aantal geoogste appels van klasse 1 heeft een sterk prijsopdrijvend effect. Er dient veel aandacht te zijn om nauwkeurig op rijpheid te oogsten om het aantal appels in klasse 1 te maximaliseren.
- Het is met de huidige informatie moeilijk te bepalen welke verbetering in klasse 1 te realiseren is door nauwkeuriger op rijpheid te oogsten. Hier is aanvullend onderzoek voor nodig.
- Pluwschade en declassering naar klasse 2 of 3 is met de hand al beperkt (5-10%). Het zal een opgave zijn dit met de robot te verbeteren, maar iedere procent heeft een groot effect in een markt met flinterdunne marges.

#### 4.4.2 Rijpheidmetingen

Op dit moment is er geen eenduidige rijpheidmeting voor appel. De sorteermachine kijkt naar kleur en kan op basis van NIR het suikergehalte bepalen en bepaald de hardheid door op de appel te kloppen. Deze parameters zijn instelbaar en veelal wordt een combinatie van factoren ingesteld om de rijpheid te bepalen. Daarnaast is er nog een destructieve methode die kijkt naar suikers, hardheid en zetmeel met andere grootheden. Een dergelijke cocktail van sensoren is voor een robot niet mogelijk. Ook de mens beschikt niet over al deze zintuigen met een grote nauwkeurigheid.

Belangrijk en wenselijk is het om de rijpheidmeting beter te doen dan een gemiddelde oogster. Hiertoe zijn de volgende metingen verricht:

1. Bepaling van de rijpheid handmatig door een ervaren oogster
2. NIR spectrometrie
3. Chlorofylfluorescentie
4. DA-meting en destructieve meting (hardheid, zetmeel, suiker=streiff)

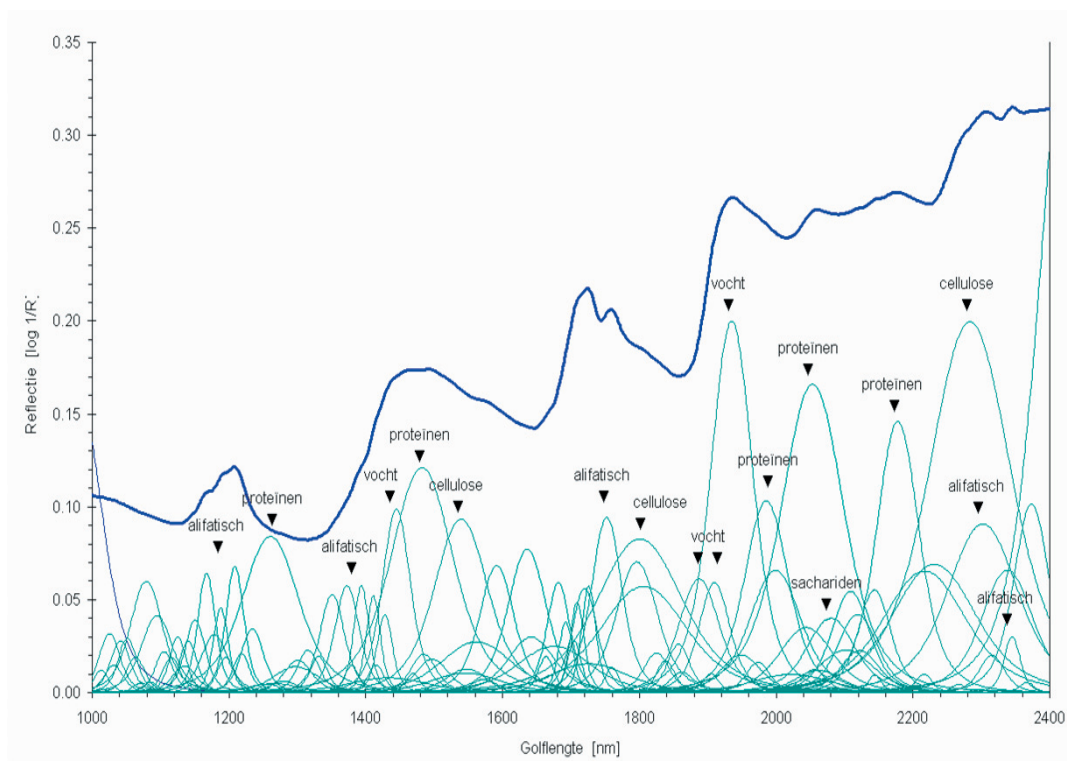
Aanvankelijk was het idee om de destructieve meting leidend te laten zijn voor de andere metingen aangezien deze naar verwachting de nauwkeurigste relatie met de rijpheid kan weergeven. Deze meting zou dan ook als referentie gebruikt kunnen worden voor het kalibreren van de NIR-spectrometrie en Chlorofylfluorescentie meting. De destructieve meting vertoont echter nauwelijks correlatie met de handmatig geoogste appels. Om deze reden is hiervan afgestapt en is de rijpheidbepaling van een ervaren oogster als referentie genomen. Zo gebeurt dit in de praktijk ook. Achtereenvolgens zullen de resultaten van de verschillende metingen worden besproken.

#### 4.4.2.1 Bepaling van de rijpheid handmatig door een ervaren oogster

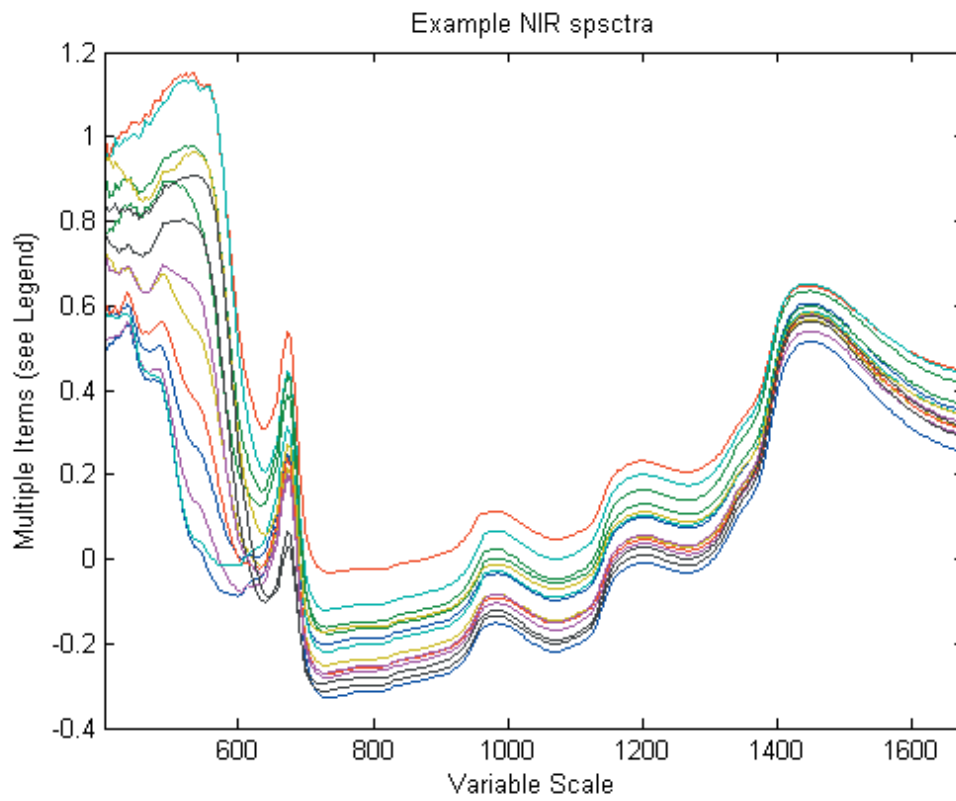
Een ervaren oogster heeft 75 appels geoogst. De appels zijn gestickerd en genummerd. Hiervan waren naar zijn mening 60 appels rijp en 15 appels onrijp. De nummers 1-60 zijn rijp en de nummer 61-75 zijn onrijp. Verschil in rijpheid kon de oogster niet (moeilijk) nauwkeuriger bepalen. De oogster kijkt naar de kleur (grootte van de blos). Hoe meer rood hoe rijper hij de appel kwalificeert.

#### 4.4.2.2 NIR spectrometrie

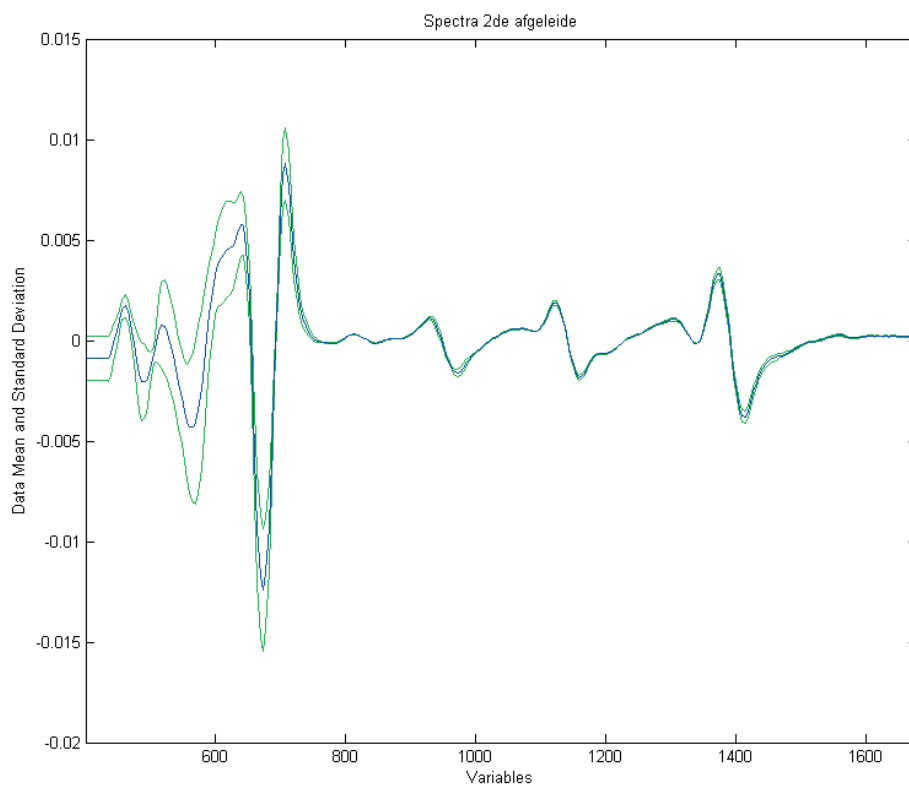
In de meting van NIR Spectrometrie is gebruik gemaakt van een lichttransmissie meting. Een lichtbron staat opgesteld aan één zijde van de appel en aan de andere zijde wordt de responsie waargenomen bij een verschillende golflengte. Door kennis die aanwezig is over de aanwezigheid van suikers, eiwitten en andere inhoudsstoffen kunnen correlaties worden gelegd. Zie hiervoor: Figuur 22. Principe van NIR-spectrometrie.



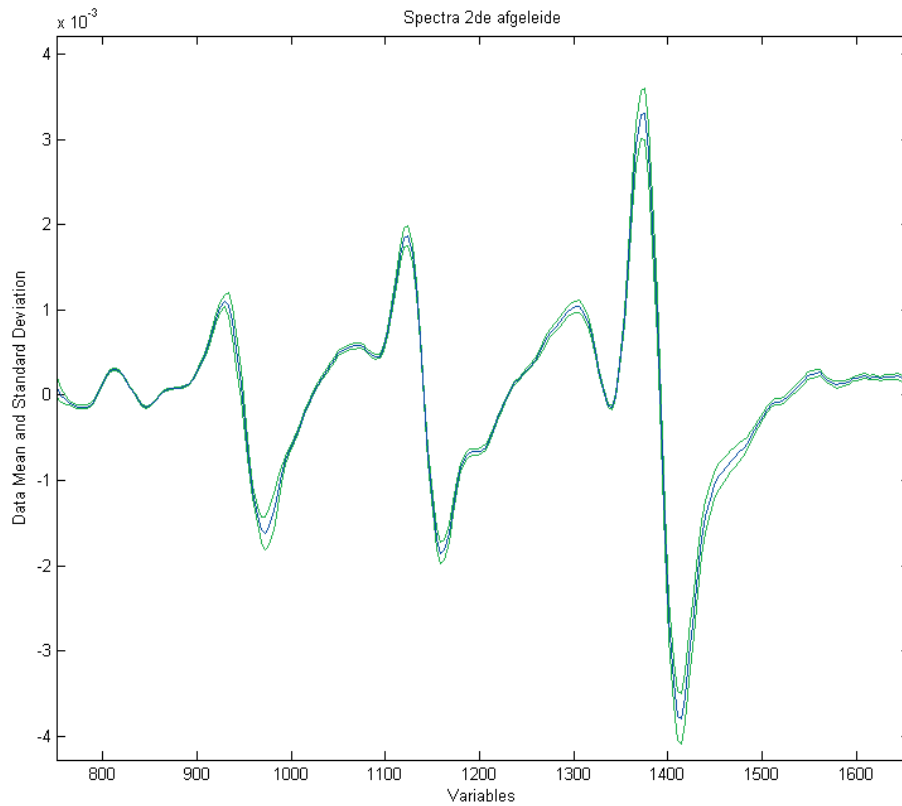
Figuur 22. Principe van NIR-spectrometrie



Figuur 23 voorbeelden van gemeten spectra



Figuur 24 Spectra met als preprocessing 2de afgeleide



Figuur 25 Spectra met als preprocessing 2de afgeleide (NIR)

Bij de resultaten van de meting is gekeken op welke golflengtegebieden variaties ontstaan tussen verschillende appels. Golflengtes zijn hiervoor geselecteerd. Zie hiervoor Tabel 5 Geselecteerde golflengtes

0669	0838	1094	1297
0673	0907	1107	1310
0686	0912	1137	1397
0760	1042	1284	1553

Tabel 5 Geselecteerde golflengtes

De waarden van de geselecteerde golflengtes zijn getraind met de resultaten van een representatieve meetset uit de handmatige meting. Dit resulteert in de volgende resultaten. Missclassification training data: 0.01.

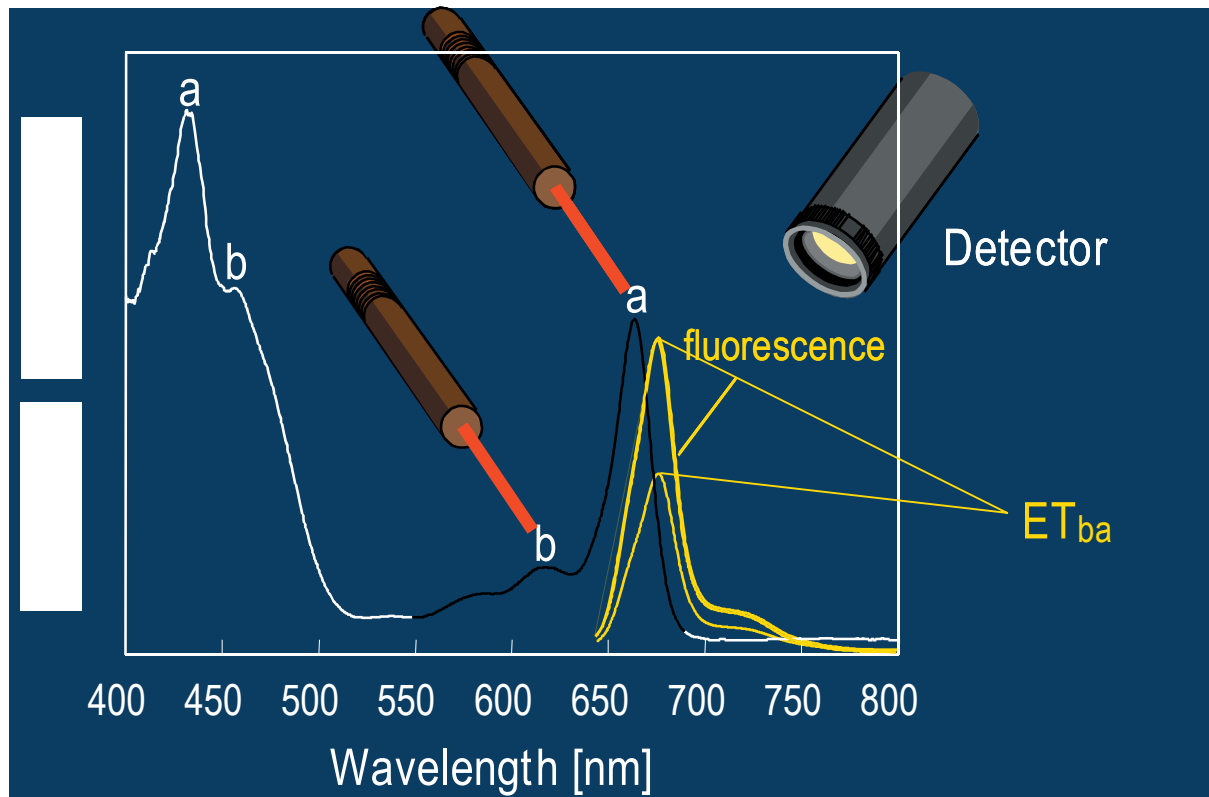
Vervolgens is de volledige testset van 75 door de meting gehaald. Missclassification test data: 0.04 (SD 0.02)

Hieruit blijkt dat het mogelijk is deze techniek in te zetten voor het meten van rijpheid. Nadeel op dit moment is dat we hebben gemeten met een transmissie meting. Op een robot zal er gemeten moeten worden met een reflectiemeting (Sensoren (camera) en lichtbron vanaf één zijde). De verwachting is echter dat dit vergelijkbare meetresultaten geeft, maar dient wel nader onderzocht te worden.



### 4.4.2.3 Chlorofylfluorescentie

De groene plantdelen hebben de eigenschap te fluoresceren wanneer het wordt belicht. Dat wil zeggen dat het licht in een andere golflengte reflecteert dan waarmee het wordt aangestraald (denk aan het fluorescerende blacklight op wit katoen in een disco). Deze zogenoemde chlorofylfluorescentie is gerelateerd aan de fotosynthese van de plant. Rijpe appels bevatten minder chlorofyl en zijn daarmee te discrimineren van onrijpe appels. Zie hiervoor Figuur 26. Principe chlorofyl fluorescentie.

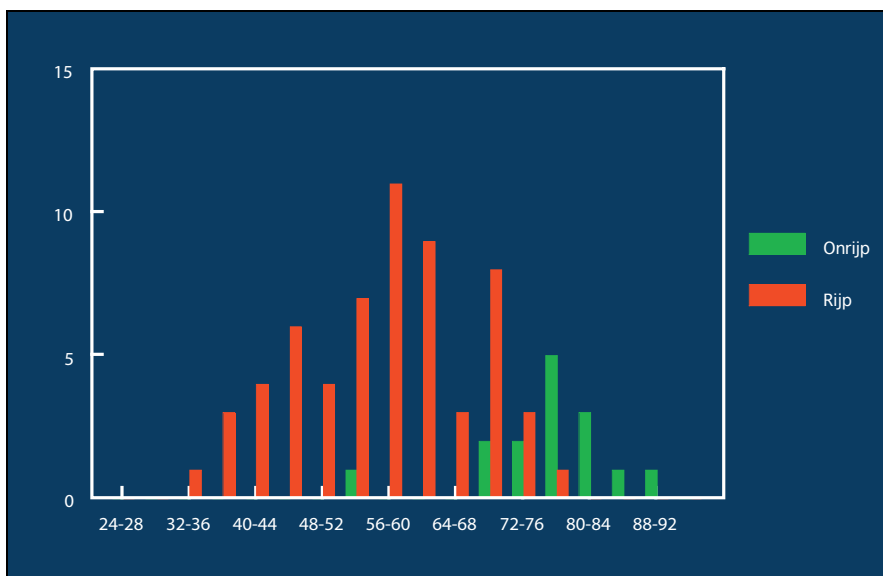


Figuur 26. Principe chlorofyl fluorescentie

Voor de meting is gebruik gemaakt van een scannende rode laser over het appeloppervlak en een camera voor de opname. Met name in rode golflengte bereik van de laser is de fluorescentie het sterkst. De laser is niet noodzakelijk, een opname met een rood LED-paneel had naar verwachting vergelijkbare resultaten opgeleverd.

Iedere appel is van drie zijden contactloos gemeten. De metingen zijn gemiddeld. Vervolgens zijn de waarden vergeleken met de handmatig gemeten appels. Zie hiervoor Figuur 27 Metingen appels chlorofyl fluorescentie

Uit de resultaten blijkt dat er een sterke relatie is tussen de handmatig gemeten door de ondernemer en de meting met chlorofylfluorescentie. Er is een overlappend gebied waarbij het nog maar de vraag is welke methode het beste resultaat geeft. Één meting lijkt uit de toom te vallen. De verwachting is dat deze methode geschikt is voor het meten van rijpheid van appels aan de boom.



Figuur 27 Metingen appels chlorofyl fluorescentie

#### 4.4.2.4 DA-meting en destructieve meting (hardheid, zetmeel, suiker=streiff)

Van een vruchtmonster van 75 vruchten van het ras Elstar is de hardheid van de vruchten bepaald, het suikergehalte gemeten, de zetmeelwaarden vastgesteld en met behulp van de DA-meter is de rijpheid waargenomen. Deze meetmethoden zijn standaard meetmethodes bij onderzoek en kwaliteitsmetingen in het afzetkanaal.

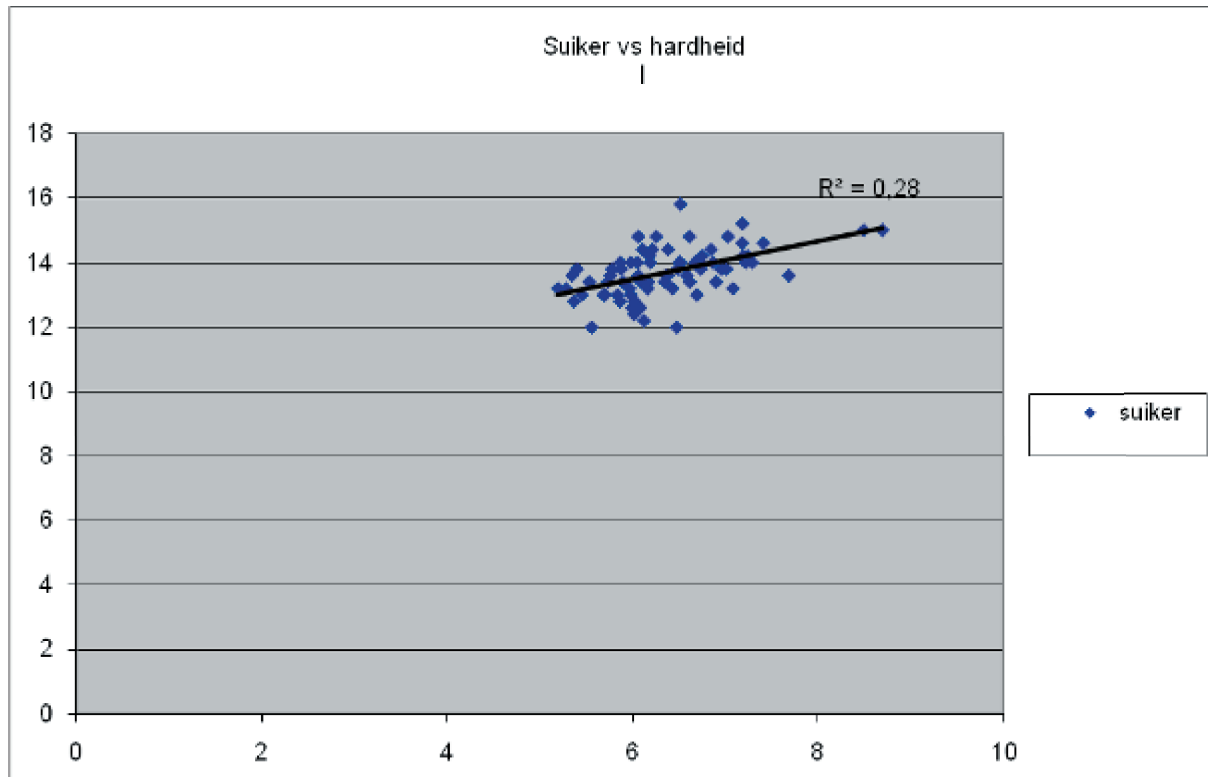
Het vruchtmonster was door een ervaren fruitteler gesorteerd op rijp en onrijp aan de hand van een visuele beoordeling. Het aantal gemeten vruchten was klein en de verhouding erg scheef (60 rijpe vruchten / 15 onrijpe vruchten). Figuur 28 tot en met Figuur 31 geeft de uitkomsten van de kwaliteitsmetingen weer.

Om de rijpheid van vruchten te bepalen wordt normaal gesproken de Streiff-index gebruikt. Er blijkt uit de kwaliteitsmetingen dat de hardheid- en suikermetingen niet overeenkomen met de visuele rijpheidbeoordeling. De uitkomsten van de draaitabellen geven aan dat er nogal wat overlap is, want zelfs de laagste hardheid meting uit de groep 'onrijp' is nog hoger dan de laagste hardheid meting uit de groep 'rijp'. Misschien is het echter niet terecht dat alleen hardheid aan rijpheid gekoppeld wordt, omdat de Streiff berekening uit 3 factoren bestaat. De suiker meting lijkt meer overeen te komen met de visuele rijpheidbeoordeling.

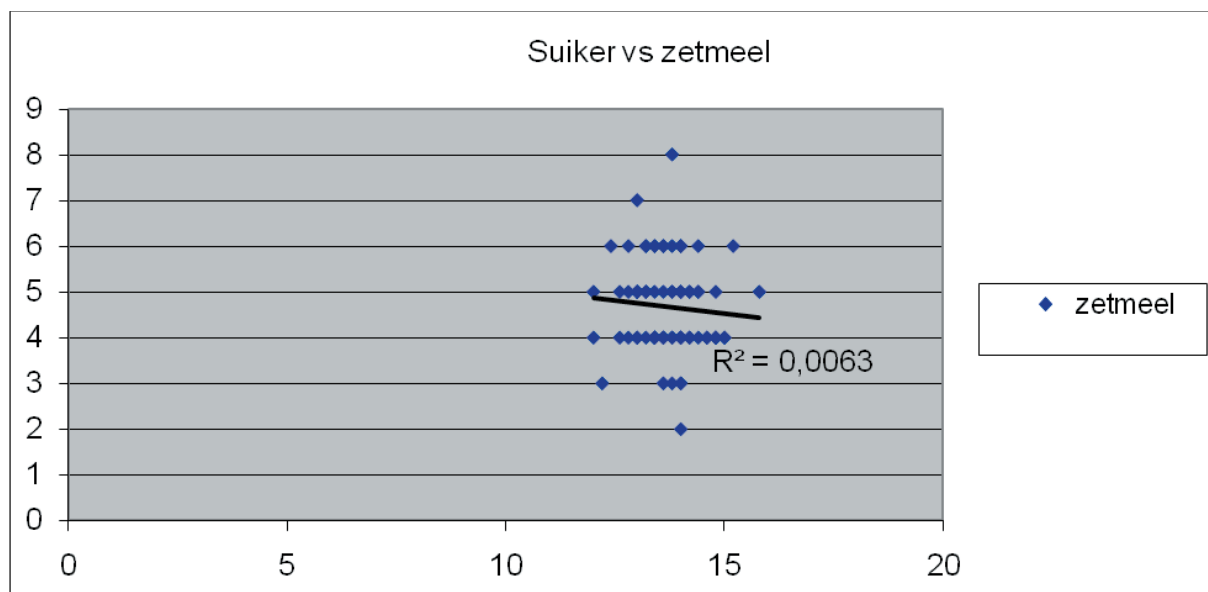
De DA meting komt het meest in de buurt van de visuele rijpheidbeoordeling, dit is te verklaren doordat de DA-metingen de uiterlijke kleur van de vruchten meet en zo de rijpheid bepaald. Deze DA meting gerelateerd aan de suiker meting heeft de hoogste R2 (0,33), en lijkt dus het meest overeen te komen.

Het is niet mogelijk een conclusie te trekken uit deze kwaliteitsmetingen, omdat daarvoor het aantal vruchten te beperkt was en de verhouding rijp en onrijpe vruchten te scheef was. Wel is naar voren gekomen dat de DA-metmethode het meest overeenkomt met de visuele rijpheidbeoordelingen zoals de mens die maakt. Er kan echter niet vastgesteld worden of de uiterlijke rijpheidbeoordeling ook overeenkomt met de innerlijke rijpheid van de vruchten.

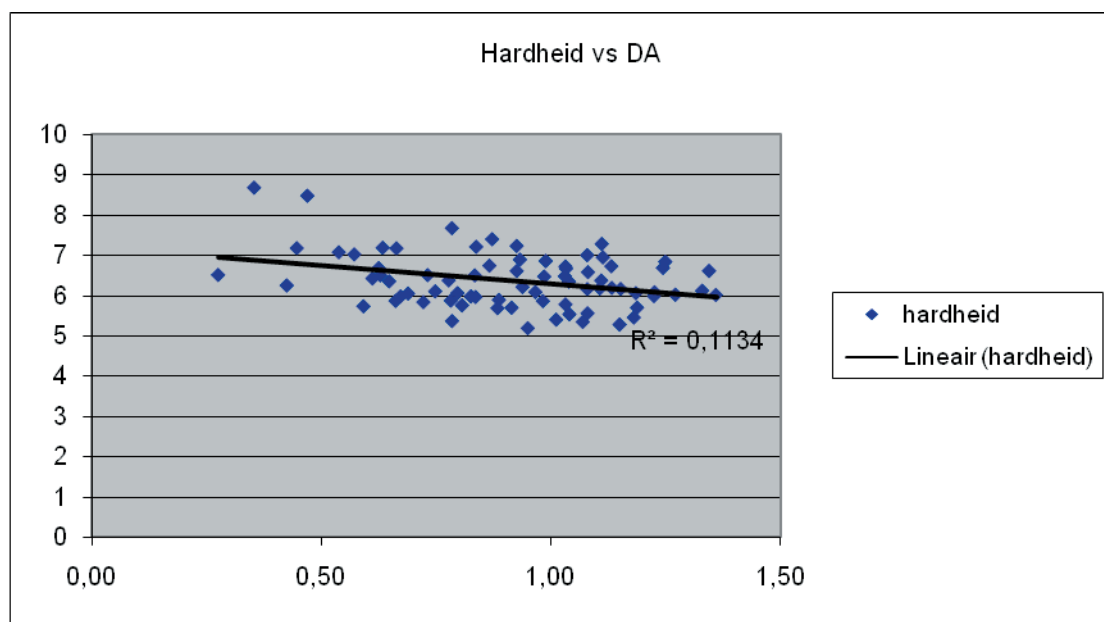
Destructief (hardheid, zetmeel, suiker=streiff)



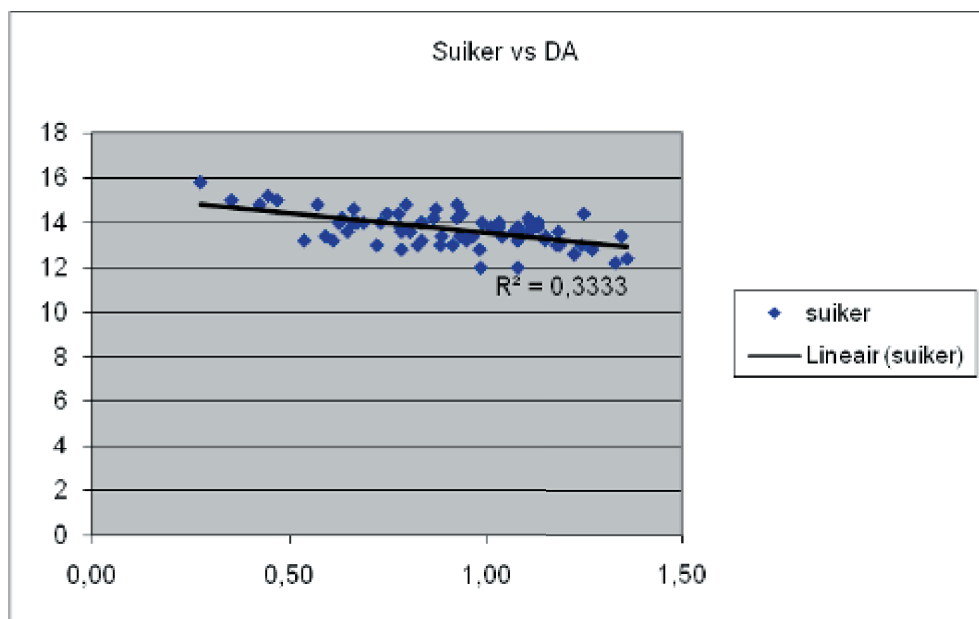
Figuur 28: Uitkomsten van de suikermetingen en hardheidmetingen aan elkaar gerelateerd.



Figuur 29: Uitkomsten van de suikermetingen en zetmeelbeoordelingen aan elkaar gerelateerd.



Figuur 30: uitkomsten van de hardheidmetingen en de DA-meetresultaten aan elkaar gerelateerd.



Figuur 31: Uitkomsten van de suikermetingen en de DA-meetresultaten aan elkaar gerelateerd.

Gemiddelde van hardheid	rijping		
	onrijp	rijp	Eindtotaal
Totaal	6,178466667	6,422383333	6,3736

Max van hardheid	rijping		
	onrijp	rijp	Eindtotaal
Totaal	6,849	8,694	8,694
Min van hardheid	rijping		
	onrijp	rijp	Eindtotaal
Totaal	5,563	5,19	5,19

Gemiddelde van suiker	rijping		
	onrijp	rijp	Eindtotaal
Totaal	13,01333333	13,86666667	13,696

Max van suiker	rijping		
	onrijp	rijp	Eindtotaal
Totaal	14,8	15,8	15,8

Min van suiker	rijping		
	onrijp	rijp	Eindtotaal
Totaal	12	12,8	12

Tabel 6: Draaitabellen met relaties tussen de verschillende meetresultaten.

#### 4.4.2.5 Conclusies sensorconcept lokaal

Voor het meten van de rijpheid zijn verschillende sensoren beschikbaar. De kleur kan gemeten worden met een kleuren-camera, maar het zal moeilijk worden om in dat geval de meting van de mens te overtreffen. Een camera ziet meestal maar een deel van de appel en bovendien zijn kleurmetingen erg gevoelig voor omgevingslicht, stand van de zon, schaduw-effecten en de mate waarop de appel is gepresenteerd richting de camera.

Technieken als Chlorofylfluorescentie en NIR spectrometrie zijn onafhankelijk van deze factoren en geven naar verwachting een beter en betrouwbaarder beeld. Een techniek als chlorofylfluorescentie kan naar verwachting gebruik maken van standaard camera's aan gevuld met een rode lichtbron (LED, laser) en lijkt daarmee de meest voor de hand liggende optie, maar ook een spectrale-camera die in een specifiek golflengtegebied de rijpheid beoordeeld kan een betere techniek zijn. Aanvullend onderzoek is hiervoor nodig.

## 4.5 End-effector en manipulatorconcept

### 4.5.1 End-effector design, functie bepaling

De end-effector is het deel van het totale robotsysteem dat in contact komt met de vrucht. De end-effector heeft als primaire taak het koppelen van de vrucht aan de manipulator en daarna het gecontroleerd ontkoppelen van de vrucht van de boom. Dit is kort de *pluktaak* van de end-effector, daarna moet de ge oogste appel/peer verplaatst worden van de boom naar een specifieke afleg plek, dit is de *transporttaak* van de end-effector. De end-effector heeft dan de taak om de appel/peer voldoende te ondersteunen tijdens dit transport en een gecontroleerde beweging van de vrucht toe te laten. De vrucht moet bijvoorbeeld in een horizontale positie af te leggen zijn als het buffer of vulsysteem daar om vraagt, dit is de *manipulatietaak* van de end-effector.

Samengevat:

Primaire taken of functies		
Vrucht koppelen aan manipulator	→	Pluktaak
Vrucht ontkoppelen van boom		
Vrucht ondersteunen tijdens transport	→	Transporttaak
Vrucht manipulatie toestaan naar gewenste eind positie	→	Manipulatietaak

De primaire taken van de end-effector zijn voorgelegd aan het projectteam waarbij in een brainstorm sessie de functies verder zijn uitgediept en er verschillende eisen en wensen aan de functies zijn toegevoegd, dat is hieronder weergegeven.

Pluktaak /functies	Eis, Wens, Werkwijze
Vrucht niet beschadigen	E
Door gewas kunnen manoeuvreren (klein)	W
Geen appel/peer van tak stoten	W
Geen andere vruchten beschadigen (scherpe randen)	E
Geen schade aan takken (breken van vrucht van tak)	E
Steeltje appel/peer niet beschadigen	E
Steeltje aan appel/peer laten zitten	E
Appel/peer natuurlijk breken van tak (gebruik van breukvlak)	W
Andere vruchten ondersteunen/opvangen (voorkomen verlies)	W

Transporttaak /functies	Eis, Wens, Werkwijze
Vrucht niet beschadigen	E
Vrij kunnen manoeuvreren	WE
Geen andere vruchten beschadigen	E
Geen schaden aan takken	E
Andere (gevallen en opgevangen) vruchten dragen	W

Manipulatietaak /functies	Eis, Wens, Werkwijze
Vrucht niet beschadigen tijdens manipuleren	E
Vrij kunnen manoeuvreren	W
Andere (gevallen en opgevangen) vruchten dragen	W
Afleggen in willekeurige en gewenste positie	W

Algemene taken/functies	Eis, Wens, Werkwijze
Bedrijfszeker werken	W
Bestand tegen weer en middelen	W
Eenvoudige constructie	W
Goedkoop te maken	W
Voorkomen overdracht ziekten (schoonhouden/maken)	W
Snelheid, korte cyclus tijden	W
Mogelijk maken meten van rijpheid/suikergehalte bij end-effector	WE
Opnemen van extra meting voor nauwkeurige plaatsbepaling vrucht	WE

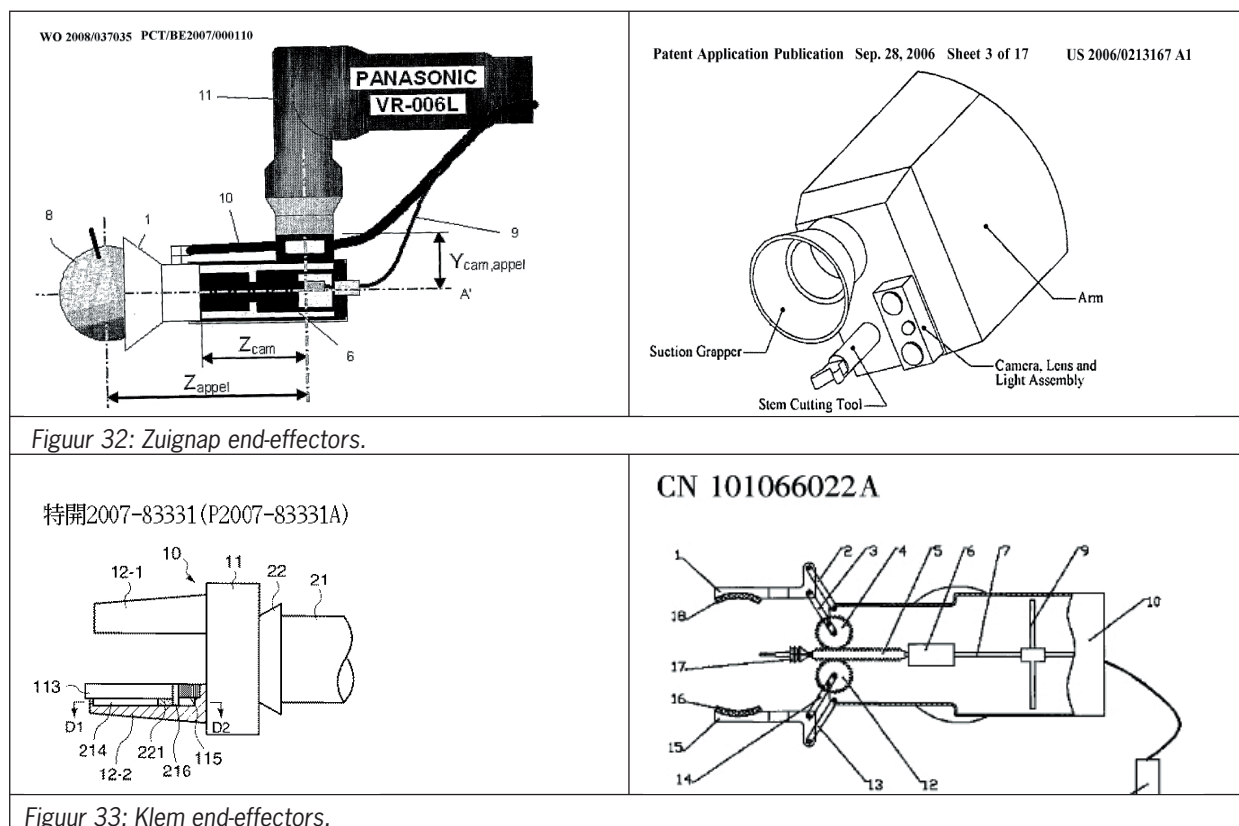


De gevonden benodigde functies van de end-effector zijn specifiek gedefinieerd waarmee gezocht kan worden naar werkwijzen van de te ontwerpen end-effector. Dit is gebeurd door een literatuur en patent onderzoek. Hieronder volgen deze definities.

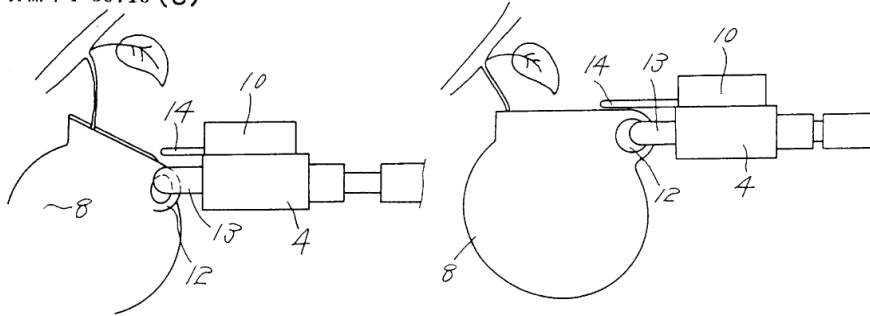
- De functie "vrucht koppelen aan manipulator" laat zich als volgt beschrijven: over een bepaald deel van de vrucht voldoende druk aanbrengen zodat deze ten opzichte van de manipulator in een voorspelbare positie vastgelegd wordt.
- De functie "vrucht ontkoppelen van boom" laat zich als volgt beschrijven: het ontkoppelen van de vrucht door druk uitoefenen waarbij de vruchtsteel zodanig belast wordt dat de verbinding tussen boom/tak en vrucht wegvalt.
- De functie "vrucht ondersteunen tijdens transport" laat zich als volgt beschrijven: de end-effector van de oogstrobot koppelt de geogste vrucht zodanig aan de robotarm zodat deze de vrucht met zekerheid naar een gewenste plek en in een gewenste positie kan brengen.
- De functie "vrucht manipulatie toestaan naar gewenste eindpositie" laat zich als volgt beschrijven: de geogste vrucht is zodanig aan de robotarm gekoppeld zodat deze met zekerheid naar een gewenste positie en oriëntatie gebracht kan worden.

#### 4.5.2 Bepalen van End-effector werkwijzen, patent onderzoek.

Uit de gevonden functies wordt door het uitvoeren van een literatuur en patent onderzoek gezocht naar werkwijzen. Een werkwijze is de gematerialiseerde uitvoering van de functie. In de patentdatabase (nl.espacenet.com) is gezocht naar patenten van oogstrobotssystemen en end-effectors via de classificatie zoekopdracht categorie "A01" is via "robot OR end-effectors OR hand". (De zoekopdracht "apple AND robot" of "apple AND harvest" leverde geen resultaten op). Binnen de 127 resultaten, vooral uit Azië, zijn de meest realistische end-effectors uit gesorteerd en geëvalueerd. Hieronder zijn een aantal tekeningen van patenten weergegeven, de patent nummers (voor zover aanwezig) staan in de tekening.

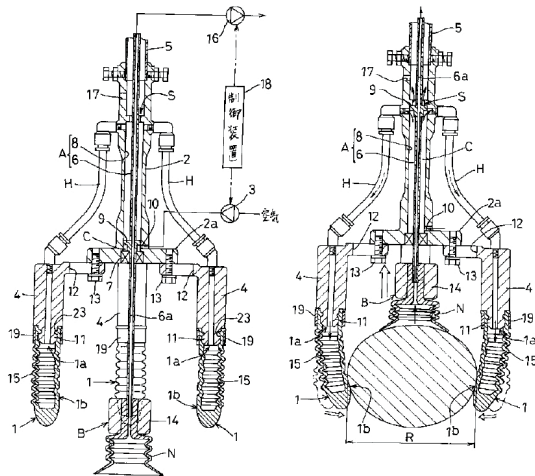


特開平4-30716 (6)



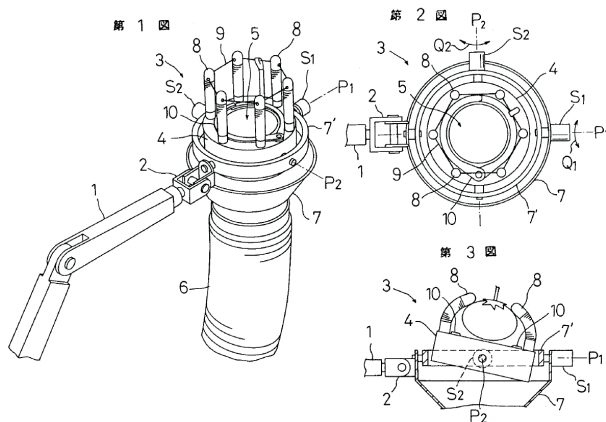
Figuur 34: Vang end-effector.

特開平9-123080

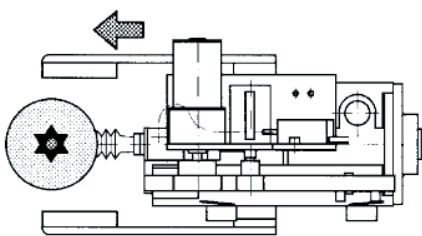


Figuur 35: Zuignap/vinger end-effector.

特開昭59-220115 (3)



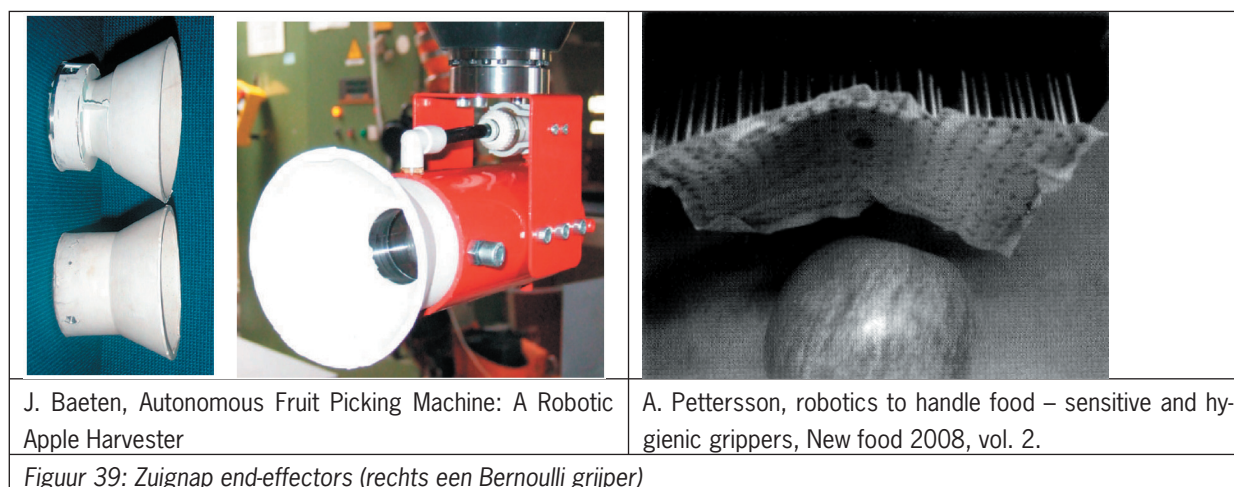
Figuur 36: Vinger omsluitende end-effector.

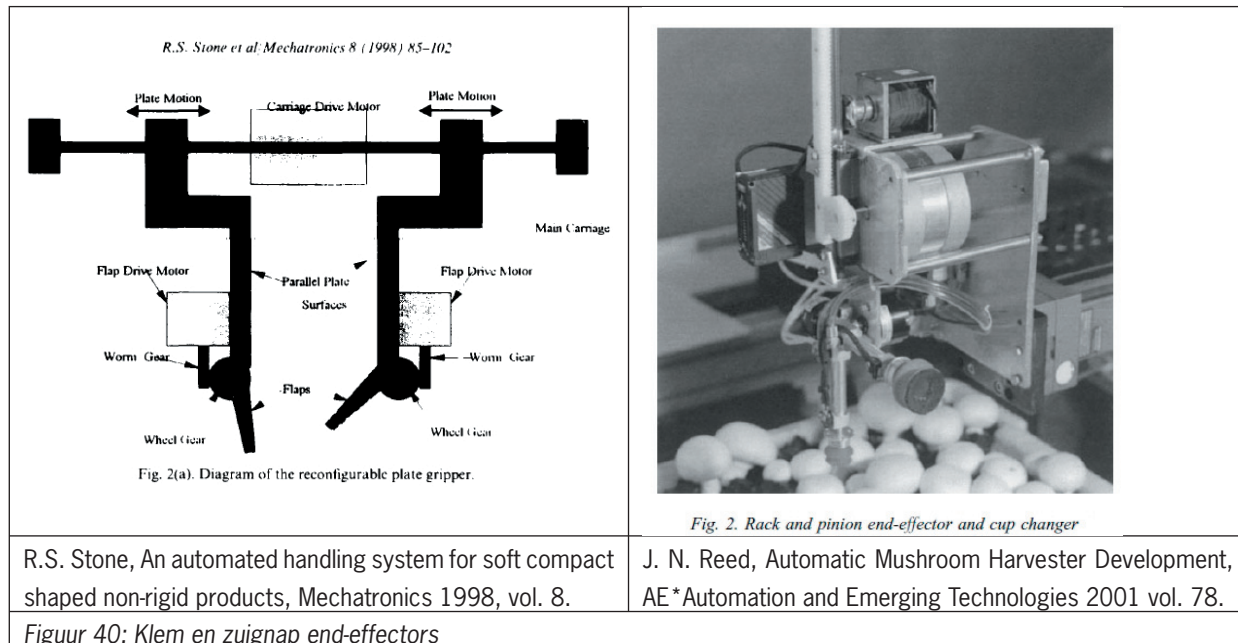


Figuur 37: Zuignap/klem end-effector

### 4.5.3 End-effector werkwijzen, literatuur onderzoek

De gevonden patenten bieden een aantal aardige ideeën. De gevonden patenten en de daarbij horende auteurs zijn via internet opgezocht waarbij gelet is op onderzoek en ontwikkelingen op het gebied van end-effectoren van agri-robots. En via deze webpagina: <http://www.emeraldinsight.com/Insight/ViewContentServlet?contentType=Article&Filename=Published/EmeraldFullTextArticle/Articles/0490300409.html> is een overzicht gegeven van "Robotic manipulation of food products ". Enkele resultaten zijn hieronder weergegeven.





De achterliggende gedachte bij de gevonden end-effectors is een methode om voldoende druk op een bepaald deel van de vrucht aan te leggen zodat daarna een gewenste actie (snijden, breken of verplaatsen) uitgevoerd kan worden zonder de vrucht te beschadigen. De druk wordt op de vrucht verdeeld door:

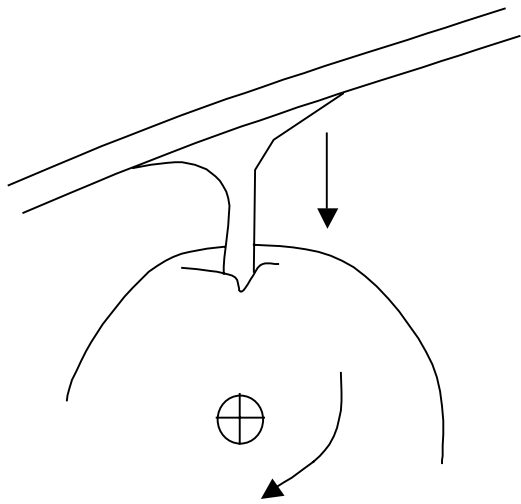
- klemmen met twee vingers
- klemmen/omsluiten met meerdere vingers
- zuignappen
- zuignappen in combinatie met vingers
- vangende end-effectors in de vorm van bekken

In veel onderzoek naar agrirobots krijgt de end-effector weinig aandacht wat de resultaten ook laten zien. Er is en wordt veel ontwikkeld op het gebied van vision en regelalgoritmen voor het aansturen van manipulators, helaas weinig op het vlak van de end-effector. De gevonden oplossingen zijn voornamelijk gewas specifiek wat duidt op een benodigd gewas/vrucht specifiek ontwerp.

#### 4.5.4 Werkwijzen samenvatting

**Fixeren:** de meest veilige variant is om op een zo groot mogelijk oppervlak een zo klein mogelijke kracht aan te brengen maar toch voldoende om de krachten door versnellingen en verplaatsingen te kunnen overwinnen. Zuignappen, meerdere flexibele vingers, Bernoulli en beker grippers komen hiervoor in aanmerking. "Harde" vingers en klemmen worden door de grote vorm variatie van appels/peren lastiger te implementeren, een vinger ontwerp zou een compromis worden tussen al deze verschillende vormen en mogelijk voor sommige appel of peren rassen slecht presteren. Als over een groot oppervlak een kracht moet worden aangeboden is het van belang om de grote van de end-effector te kiezen dat deze makkelijk langs takken en bladeren kan manoeuvreren.

**Losmaken:** Vanuit gesprekken met tuinders en PPO Randwijk is naar voren gekomen dat het ontkoppelen van de vrucht door gebruik te maken van het natuurlijk breukvlak de meest ideale manier is om een appel te oogsten. Daardoor vallen veel snij technieken af. Er moet gezocht worden naar een combinatie van de functies koppelen en ontkoppelen van de vrucht door de end-effector waardoor deze in 1 werkwijze wordt bereikt. Het volgende mechanisch model laat zien wat er gebeurt tijdens het breken via het natuurlijk breukvlak en hoe dit vertaald kan worden naar een mechanische oplossing in een end-effector.



Figuur 41: draaien van de appel t.o.v. de tak veroorzaakt een natuurlijke breuk van de steel.

Het aantal plukhandelingen uitgevoerd door de end-effector is in de 7 weken oogst periode op een bedrijf:

Tabel 7: Snelheid en aantal plukhandelingen

Robotprestatie	
Seizoen	7 weken
Gemiddelde inzet/dag	20 uur
Aantal werkdagen/week	6 dagen
Aantal uren	840 uur
Cyclustijd van plukactie	6 sec
Aantal plukacties $(840 \cdot 3600 / 6) = 504000$	

Wat betekend dat de end-effector per seizoen meer dan een half miljoen keer een appel of peer moet aan- en ontkoppelen van de boom. Dit vraagt om een eenvoudige end-effector zonder bewegende delen die kunnen slijten, vervuilen en nog belangrijker tijd vragen. Dat maakt het gebruik van meerdere flexibele vingers vanwege de benodigde gecontroleerde sluittijd, de fijnmechansche techniek geen valide oplossing en blijven zuignappen en beker-grijpers als concept staan.

#### 4.5.5 Onderzoek naar verschillende losmaak methoden van de vrucht, door handmatige plukproeven

Bij PPO in Randwijk zijn op 6 oktober 2008 2 verschillende appelrassen en een perenras (Conference) op diverse wijzen geplukt. Er is gekozen om een appelras met een lange steel en een appelras met een korte steel te plukken. Het doel was om duidelijk te krijgen op welke wijze het losmaken van de vruchten van de boom het minste kwaliteitsverlies realiseert. Hierbij is getracht een robothand na te bootsen en zijn minimaal 100 vruchten op verschillende wijzen geplukt. Er is hierbij onderscheid gemaakt tussen 3 plukmethoden:

- Het losmaken van de vrucht door middel van trekken (zonder te draaien); hierbij is de vrucht zoals het aan de boom hing beetgepakt en recht achteruit getrokken.
- Het losmaken van de vrucht door de vrucht beet te pakken, vervolgens 2 keer te draaien (roteren) en vervolgens naar achteren te trekken om zo los van de boom te komen.
- Het losmaken van de vrucht door de vrucht vast te pakken en naar boven toe weg te draaien (losbreken).

Er zijn van alle rassen minimaal 100 aantal bomen volledig leeggeplukt, dus zowel de vruchten boven- en onderin de boom en de vruchten aan de buitenzijde en de binnenkant van de boom.

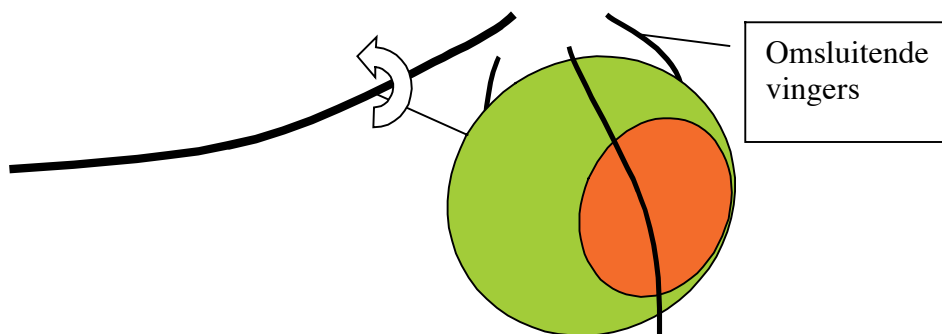
Van de geplukte vruchten is genoteerd of ze goed loslieten (met succes), of de vruchten vielen, of de steel aan de boom bleef hangen en de vrucht dus zonder steel geplukt werd (klasse III), of er naast de vrucht ook lot met bloemknoppen van boom loskwam of dat er lot met blad van de boom loskwam.

## 4.5.6 Onderzoek naar verschillende losmaak methoden van de vrucht, door end-effector modellen

Uit voorgaande overwegingen is voor het maken van twee proefmodellen gekozen om te bestuderen hoe een appel/peer zodanig omsloten kan worden zodat de vrucht verzekerd in de end-effector gevangen blijft. Beide modellen laten enige beweging toe zodat het natuurlijk breken van de steel mogelijk is. De plukmethoden die de modellen toelaten zijn min of meer gelijk aan de methode die zijn gebruikt om het handmatig oogsten te beproeven zoals beschreven in 4.5.5. Gelijktijdig met de handplukproef zijn in de boomgaard van PPO randwijk de twee modellen op hun werking getoetst. Er is daarbij gelet op de principiële werking van de modellen er zijn geen kwantitatieve metingen uitgevoerd. De proeven zijn op film vastgelegd en voorzien van commentaar zodat ze in een latere design review gebruikt kunnen worden om de modellen te verbeteren en aan te passen naar de gevonden resultaten. Om tot een goed ontwerp te komen van de toekomstige end-effector is het van belang uiteenlopende end-effector concepten te toetsen. Daarom is er bij de proeven een duidelijk ander concept gekozen dan de door Acro ontworpen zuignap end-effector. De Acro end-effector is al in voldoende mate getest en de prestaties daarvan zijn bekend. Vandaar dat in proeven gekozen is voor een end-effector met vingers en een model zonder bewegen delen in de vorm van een bekergrijper. De resultaten van de proefneming van beide concepten worden in de volgende paragrafen besproken.

### 4.5.6.1 End-effector test met vinger model

Dit model omsluit de appel met drie vingers. De vingers zijn zodanig vormgegeven dat de appel nog kan roteren in de end-effector. Het idee daarbij is dat de door de vingers omsloten appel roteert bij het omhoog bewegen van de end-effector waarbij de steel langs natuurlijke weg breekt van de tak, zie onderstaande figuren.



Figuur 42: loswrikken van de appel door deze in de vinger end-effector te roteren.





Figuur 43: test van het vinger model, PPO Randwijk.

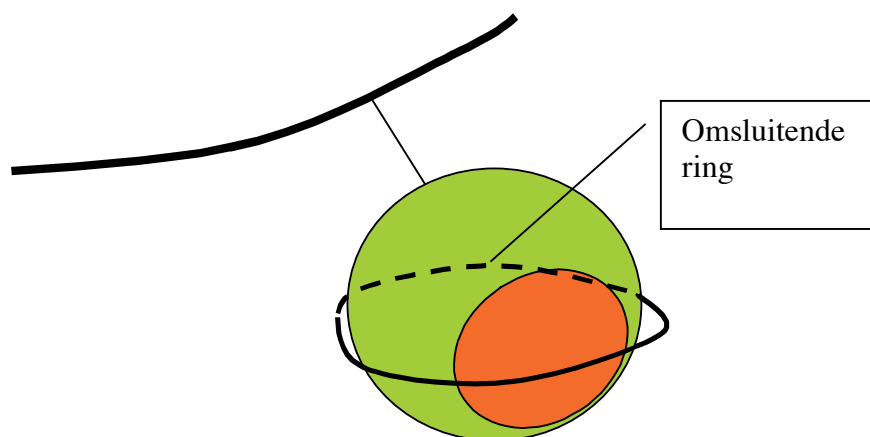
#### 4.5.7 Samenvatting van de praktijk test met vinger end-effector

Nadat de film zijn geanalyseerd is de volgende lijst samengesteld ter verbetering naar een toekomstige end-effector.

- Appel is niet altijd van onder te benaderen door takken
- Constructie moet eerst klein zijn om eenvoudig tussen takken door te kunnen bewegen en daarna groot genoeg om de appel te grijpen (opvouwbaar constructie).
- Vingers kunnen naast de appel ook delen van takken en bladeren grijpen, deze worden dan meegenomen.
- Het omhoog bewegen en het dan breken van de steel wordt bemoeilijkt door takken
- Het op de plaats roteren en dan breken van de steel is alleen bij kort-stelige rassen succesvol.
- Bij het roterend breken komt er regelmatig blad en of stuk tak mee.
- De appel draait in sommige gevallen niet voldoende in de end-effector waardoor de steel in de appel breekt.
- Door het draaien worden andere appels van de tak gestoten.
- De toekomstige end-effector moet om beschadigingen tegen te gaan een terugkoppelings mechanisme hebben om de druk op de vrucht te regelen. Daardoor kost het bewegen en sturen van de vingers enige tijd.

##### 4.5.7.1 End-effector test met beker model

Dit ringvormig model vangt de appel/peer van onderen. Door een omhoog gaande beweging draait de appel ten opzichte van de tak waardoor deze op natuurlijke wijze van de tak wordt gebroken. Het model is zeer eenvoudig, klein en heeft geen bewegende delen waardoor pluktijd bespaard kan worden en deze minder gehinderd wordt door takken of bladeren.



Figuur 44: loswrikken van de appel door deze in de beker end-effector te roteren.



Figuur 45: test van het beker model, PPO Randwijk.

#### 4.5.8 Samenvatting van de praktijk test met beker end-effector

Nadat de film zijn geanalyseerd is de volgende lijst samengesteld ter verbetering naar een toekomstige end-effector.

- De diameter van de ring moet binnen een bepaalde grote vallen en passen op de grote van de vrucht.
- Als de vrucht weerstand ondervindt van een boven liggende tak schiet de end-effector door waardoor de vrucht uit de beker valt, een extra flexibele fixatie is nodig.
- Sommige kort-stelige appels groeien dwars of onderste boven aan een tak, deze zijn niet met dit model te grijpen.
- Conferance peren zijn met dit model uitstekend te oogsten, het succes resultaat is nagenoeg 100% (meting bij 30 peren).

#### 4.5.9 Algemene conclusies end-effector ontwerp

- Voorgaande concepten hebben beide last van takken die de beoogde omhoog gaande brekende beweging bemoeilijken.
- Mist goed uitgevoerd geeft dezelfde beweging wel het beste resultaat, de steel breekt van de tak op het natuurlijk breuk vlak.
- In beide modellen breekt ook in sommige gevallen een deel van de tak.
- De verbinding tussen de vrucht en end-effector is met deze modellen niet volledig gezekerd door het kleine contact oppervlak, een meer omsluitende methode zou mogelijkwijs beter resultaat geven.
- Het laten draaien van de vrucht in de modellen geeft mogelijk beschadigingen.
- Terugkoppeling, mechanische bewegingen in de end-effector moeten worden vermeden in het uiteindelijke model om tijdsverlies te voorkomen.
- De end-effector moet zo klein mogelijk worden uitgevoerd om door het gewas heen te kunnen manouvreren.
- De end-effector moet of zeer robuust of eenvoudig uitwisselbaar (goedkoop) zijn om de 500.000 plukhandelingen in een seizoen te kunnen doorstaan.
- De brekende beweging moet in een zo klein mogelijke ruimte uitgevoerd worden om het afstoten van andere vruchten te voorkomen.
- Idealiter moet de koppeling aan de vrucht en de breekhandeling zo kort mogelijk na elkaar plaats vinden met een zo groot mogelijk contact oppervlak tussen end-effector en de vrucht om beschadigingen te voorkomen en dit alles in een zo klein mogelijke verpakking.

## 4.5.10 Meetresultaten vrijmaken van de vrucht

Op 6 oktober 2008 zijn bij PPO in Randwijk meerdere appels op diverse wijzen geplukt, waarbij een soort van robohand is nagebootst. De resultaten daarvan staan in Tabel 8. Naar voren is gekomen dat er nogal verschil blijkt te zijn in het loslaten van de vruchten van de boom tussen appels met lange en appels met korte stelen.

### Appels met lange stelen

Naar voren komt dat bij appels met lange stelen het naar boven breken van de appel de beste plukwijze was omdat daar het hoogste percentage (73%) met succes geplukt werd, echter daarbij kwamen ook relatief veel (10%) bloemknoppen mee en daarnaast nog 11% met blad aan de steel. Als de vruchten van de boom getrokken werden kwamen er minder bloemknoppen mee (3%), maar was het succespercentage gedaald naar 59% en maar liefst 26% had dan geen steel. Vruchten zonder steel zijn klasse III (industrie). De uitkomsten voor eerst de vruchten draaien en daarna trekken kwam overeen met alleen trekken. Draaien heeft geen zin bij appelrassen met lange stelen omdat de vrucht om de steel wordt gedraaid en de steel niet mee draait en daardoor niet makkelijk van de boom loskomt.

### Appels met korte stelen

Het blijkt dat appels met korte stelen over het algemeen moeilijker te plukken waren omdat er veel meer vruchten vielen. Dit kwam mede doordat de vruchten veelal met 2 in een cluster groeiden. Als 1 vrucht geplukt werd, moest de andere ondersteund worden om val te voorkomen. Bij appelrassen met korte stelen had het draaien van de vruchten voordat ze van de boom getrokken werden een negatief effect, want het percentage vruchten zonder steel is hoger (27%) dan bij alleen trekken (19%). Echter, bij alleen trekken is het percentage val hoger (26%) dan bij de plukwijze waarbij eerst de vruchten gedraaid werden (21,5%). Bij het naar boven breken van de appels met korte steel geldt net als bij appels met lange steel dat hierbij nogal bloemknoppen (6%) en lot met blad (6%) mee kwam.

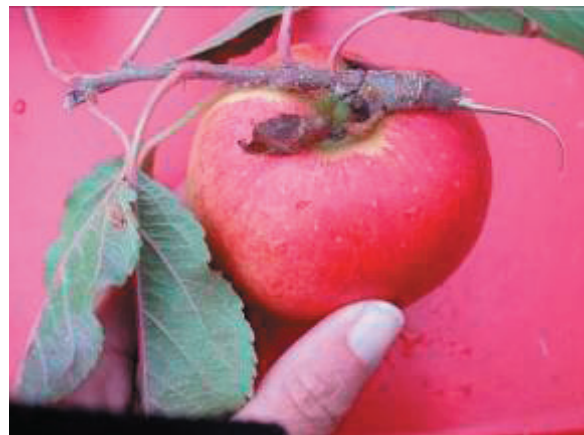
Het appelras met de lange steel hing veelal enkel aan de boom en de het appelras met de korte steel in clusters van 2 appels. Dit is echter niet algemeen geldend, dit verschilt tussen rassen. Appelrassen met lange stelen hebben ook vaak dunne buigzame stelen en korte stelen zijn vaak wat dikker en stugger.

### Peer

Bij peer blijkt dat het naar boven breken van de vruchten de beste plukwijze was met een succespercentage van 82%. Hierbij geldt nog wel dat 10% zonder steel geplukt werd, maar bij het alleen trekken en draaien en trekken was het percentage zonder steel nog hoger, respectievelijk 13% en 22%. Opvallend was dat vruchten zonder steel ook nogal eens open vruchtvlies voorkwam, soms was zelfs een stuk van de hals afgebroken. Dit is echter beide klasse III. Er kwamen bij het naar boven breken wel enkele vruchten met gebroken stelen voor. Bij alleen trekken kwam nogal veel val voor (17%). Als de vruchten eerst gedraaid werden en dan van de boom getrokken werden was er geen val.



Figuur 46: beschadigde peer agv afbreken steel.



Figuur 47: Appel waarbij lot met bloemknop met plukken van de boom loskwam.



*Figuur 48: geplukte appel zonder steel.*



*Figuur 49: cluster van 2 appels die tegelijkertijd loskwamen van de boom met plukken.*

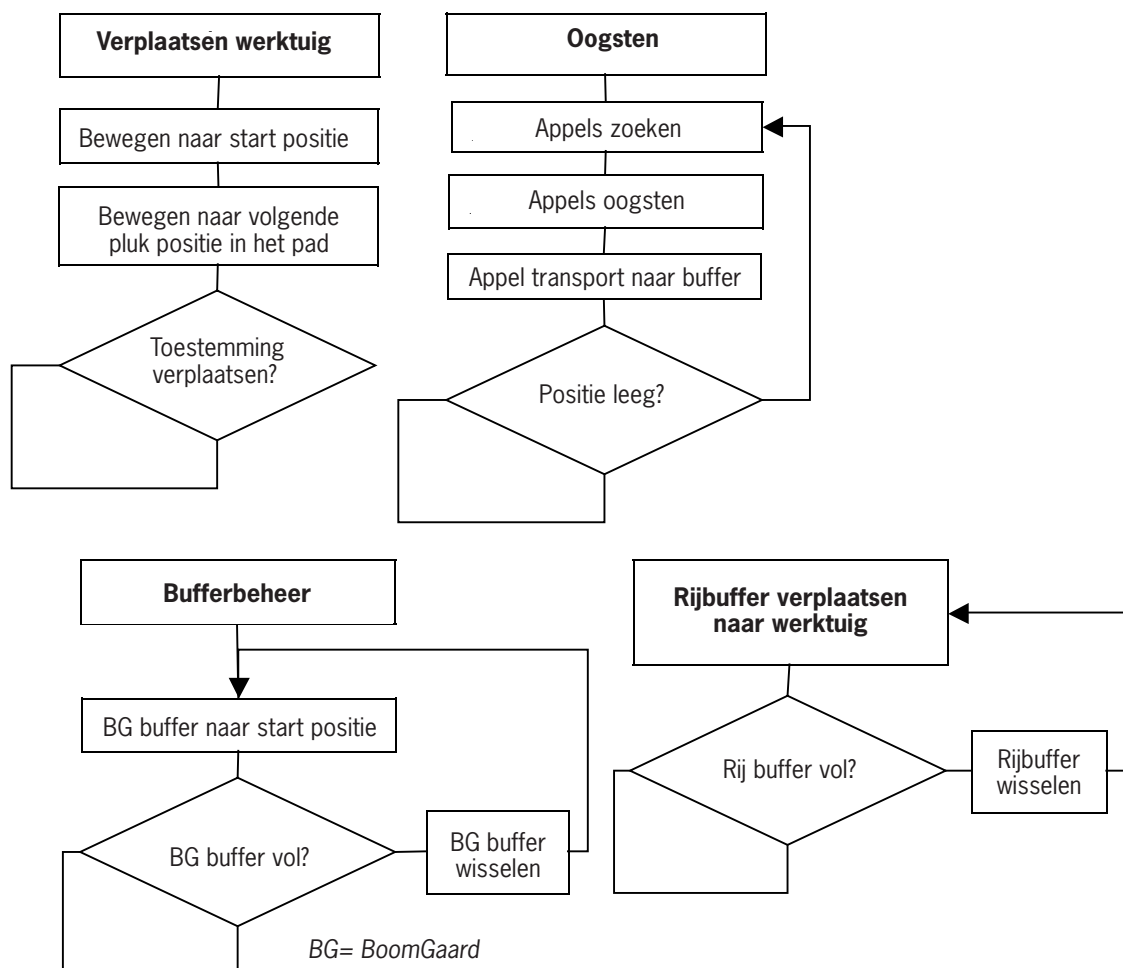
	Succes	Vallen	Zonder steel	Lot met bloem-knop komt mee	Lot en blad komt mee	Vrucht laat niet los	Opmerkingen
<b>Appel lange steel</b>							
Trekken	59	7	26	3	5	0	Soms zeer hard trekken en soms zit een tak in de weg
Draaien en trekken	59	3,5	26	8	3,5	0	Nogal wat half en gebroken stelen, niet op breukvlak losgelaten. Appel draait om steel heen, steel draait niet mee, beschadiging door ander takken bij loslaten.
Naar boven breken	73	1	1	10	11	4	Dunne twijgen buigen mee, appel laat niet los of je trekt lot mee.
<b>Appel korte steel</b>							
Trekken	55	26	19	0	0	0	Veel vruchten die met 2 in een cluster samen hangen, waarbij 2 <sup>e</sup> vrucht valt
Draaien en trekken	50,5	21,5	27	1	0	0	Veel vruchten die met 2 in een cluster samen hangen, waarbij 2 <sup>e</sup> vrucht valt
Naar boven breken	52	19	15	6	6	2	Veel vruchten die met 2 in een cluster samen hangen, waarbij 2 <sup>e</sup> vrucht valt. Dunne twijgen buigen mee, je trekt lot mee.
<b>Peer</b>							
Trekken	52	17	13	13	5	0	
Draaien en trekken	62	0	22	12	2	2	
Naar boven breken	82	4	10	0	4	0	Enkele vruchten met gebroken stelen.

Tabel 8: Resultaat van verschillende plukwijzen bij appel met lange en korte steel en peer (in procenten).

## 4.6 Bepaling van functies en samenstelling van totaal concepten

### 4.6.1 Van hoofdfuncties naar systeem concepten

Om tot een aantal totaal concepten te komen zijn er twee brainstorm sessies gehouden i.s.m. Thijmen Bakker van Tyker technology, een expert op het gebied van machine veiligheid en (RTK) DGPS systemen van akkerbouw voertuigen. In deze sessies zijn stroomschema's samengesteld van de minimaal benodigde functies die de toekomstige robot zou moeten hebben. Onderstaande stroomschema's geven de hoofdfuncties weer die een weergave zijn van de belangrijkste logistieke bewegingen van en naar de robot en van transporttaken binnen de robot.



Figuur 50: stroomschema's van transport en handelingstaken van en rondom de robot.

De stroomschema's zijn verder in detail uitgewerkt en weergegeven in Bijlage 2. De detail stroomschema's geven drie systemen of concepten weer die gebaseerd zijn op: 1) een bestaande robot 2) opgebouwd uit bewezen technieken en 3) een uniek ontwerp. Dit om zo veel mogelijk diversiteit te krijgen binnen de ontwerpen waardoor er verschillende technieken en functies tegen elkaar kunnen worden afgewogen. Het is uiteraard mogelijk dat er binnen de concepten kruisbestuivingen ontstaan waar technieken overstappen van concept naar concept.

Van de gevonden functies binnen de concepten zijn technische oplossingen gevonden, deze zijn gepresenteerd in **bijlage 2**. De samengestelde stroomschema's en gevonden technische oplossingen van functies zijn vertaald naar machineconcepten, deze worden in de volgende paragraaf beschreven.



## 4.7 Machineconcept deel B

### 4.7.1 Conceptkeuze

Na het bepalen van het minimum aantal functies en het onderzoeken van de mogelijkheden van de afzonderlijke functies, zijn de functies uiteengezet in een morfologisch overzicht. Dit morfologisch overzicht is uitgewerkt in bijlage x). Al discussiërend heeft het team 3 conceptkeuzes gemaakt. Te weten:

1. Concept ACRO (één op één doorontwikkeld).
2. Concept Max..bewezen techniek en modulariteit (proven technology & modularity)
3. Concept Uniek ontwerp (dedicated design)

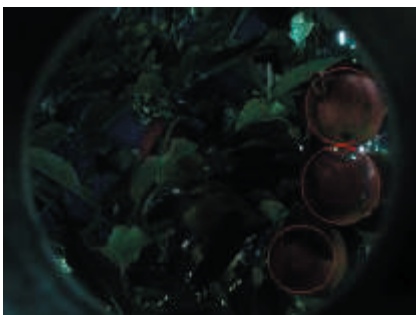
### 4.7.2 Concept 1. ACRO

Acro beoogd om snel, tegen minimale R&D kosten een volledig werkend prototype te kunnen demonstreren en later ook te verkopen. De werking is als volgt:

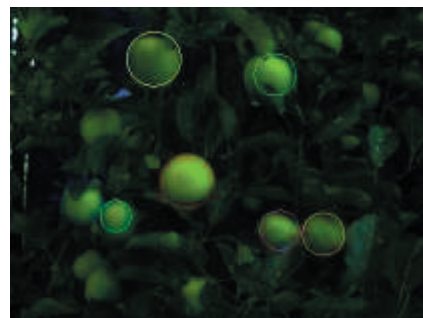
De robot bestaat uit de volgende hoofd componenten:

- Robot met twee armen, links en rechts die de gehele boom bestrijken
- De robot bestaat uit een Panasonic manipulator en een zuignap als end-effector. In de end-effector zit een kleurencamera en een slang voor blazen en zuigen door de zuignap heen. Blazen wordt gemaakt om baldere n weg te blazen voor een beter beeld en grijpkans voor de camera en end-effector. De zuigfunctie wordt gebruikt om de end-effector (zuignap) aan te koppelen.
- Robot constructie wordt op de hef van een trekker geplaatst. De trekker doet tevens dienst voor het leveren van krachtstroom. Hydrauliek en stuurinrichting
- De robot steunt enerzijds op de hef en anderzijds op één set wielen die ook de trekker voortduwen.
- Producten worden afgelegd op een Munckhoff-vulsysteem zoals op de pluk-o-trak. Dit buffervulsysteem bevindt zich middels een aanhangwagenconstructie achter de robot
- Het stuur van de trekker wordt mechanisch bediend met een opbouwconstructie op het stuur.
- De rij wordt gevolgd door massadetectie sensoren

Hierna volgen enkele afbeeldingen van de verschillende functies:



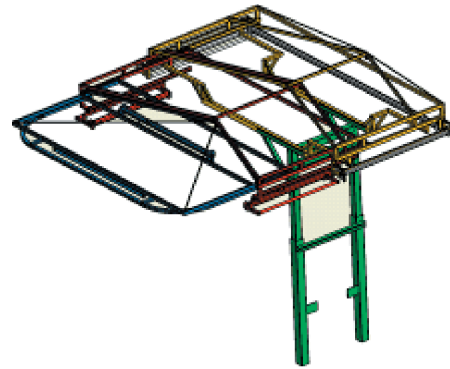
Detectie van gekleurde appels



Detectie van groene appels



Oude afscherming

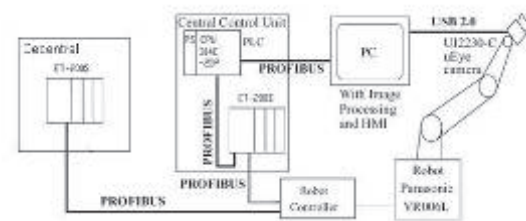


Nieuwe afscherming

Figuur 51: concept 1 ACRO



Panasonic manipulator



Globaal besturingsschema



Bufferwagen



Robot achter trekker

Figuur 52: concept 1 ACRO

Achtereenvolgens worden de volgende stappen doorlopen

1. De robot wordt manueel voor de eerste boom geplaatst in een rij
2. De robot wordt gestabiliseerd door 2 hydraulisch cilinders die het robot platform op de bodem afstempelen.
3. De robot arm beweegt zich naar de eerste kijkhoek om appels te zoeken (Voor beide van de boom zijn 40 startposities gedefinieerd. Te weten: 4 horizontale posities onder verschillende hoeken rond de boom en 10 posities verticaal op een vaste afstand van elkaar)
4. Wanneer een appel wordt gevonden in het beeld zal de robot hiernaar toe bewegen.
5. De end-effector blaast tijdens de beweging naar de appel toe. Eenmaal bij de appel aangekomen, slaat de luchtstroom om in zuigen en wordt de appel aangekoppeld aan de end-effector
6. De end-effector maakt een wrikbeweging zodat de appel loskomt
7. De manipulator beweegt de appel naar een opvangdoek waar de appel weer losgekoppeld wordt door te blazen.
8. Het valdoek heeft de vorm van een trechter, waarna de appel uitkomt op een transportband van het Munckhoffvulsysteem.
9. Het Munckhoffvulsysteem legt de appel af in een roterende kuubskist
10. Wanneer de kuubskist vol is, zal deze handmatig (door een rondrijdende trekker met hefmast) worden verwisseld
11. De robot arm gaat weer terug naar de uitgangspositie
12. Wanneer er geen appels meer worden gevonden, beweegt de robot naar de volgende positie
13. Is de appelboom aan één zijde leeggeogst, dan verplaatst de appelrobot zich naar de volgende boom

#### 4.7.2.1 Validatie concept ACRO

Met de ontwikkelaars van ACRO zijn een viertal intensieve gesprekken gevoerd en is een eenvoudige demo aan ons verstrekt. De gezamenlijke bevindingen zijn:

De huidige beperkingen van het visionsysteem zijn:

- Beeldvorming moet in algemene zin nog beter (beslisalgoritmen)
- Geen 3D-beeldvorming van de omgeving mogelijk. Daardoor geen onderscheidt tussen voor en achterliggende appels/obstakels
- Systeem heeft probleem met clusters. Robot kan geen appels in clusters onderscheiden. Appels moeten vrij hangen
- Systeem detecteert geen andere objecten dan appels. Door ook takken te detecteren kom ook informatie beschikbaar over de wrikroute en ook de padplanning (collision detection)
- Beperkte rijpheids detectie, alleen op basis van kleur
- Nog veel problemen met direct instralend zonlicht. Zeker bij de bepaling van rijpheid. Hiervoor is een "volledig" afsluitbare tentconstructie ontwikkeld.
- Realtime visiesoftware is niet beschikbaar. Het systeem maakt een opname, geeft positie door aan robot, robot verplaatst zich naar nieuwe positie. Dit proces duurt steeds een seconde en maakt het systeem traag. Vision kan nog niet direct ingrijpen in de besturing.

Overige beperkingen:

- Schade door end-effector is niet onderzocht
- Ontwerp end-effector is niet ideaal. Te grote uitslag, waardoor grote wrikactie noodzakelijk is
- Pluk performance is niet onderzocht en niet bekend (snelheid, aantal appels geoogst en aantal appels laten hangen, beschadigingen aan appel en boom, uitgetrokken steeltjes, etc.)

Capaciteit

- Er zijn geen testgegevens over de capaciteit van de robot. Handmatig geklokte cyclustijden laten een cyclus zien van ongeveer 5 seconden per appel. Dit is een ideale cyclus, waarbij niet is meegenomen. Gemiste appels, transport van de robot, kleine storingen, e.d. Ook moet deze tijd worden gezien als een eerste test met een eerste prototype, met de beperkingen van het visionsysteem. En tegen dat licht is de score niet slecht.

#### 4.7.2.2 Sterke punten ACRO-concept

Het ACRO concept is een volledig concept, waarbij alle functies zijn ingevuld. Er is veel over nagedacht.

- De eenvoud van het concept voor het zoeken en grijpen van de appel spreekt ons aan, met name:
  - Gebruikmaking van industriële robot
  - Als uitgangspunt een aantal vaste voorgeprogrammeerde startposities rond de boom nemen onder verschillende kijkhoeken
  - Eenvoudige, en naar onze inschatting, beproefde en robuuste zuignap, die ook kan blazen om wat ruimte te maken voor visie en aankoppelen. Waarbij de camera in de zuignap zit, dus de beste uitgangspositie heeft om te kijken.
- Eenvoudige goedkope massarijdetectie om te navigeren in de boomgaard
- Aflegsteemband met Munckhoff kistenvuller

De sterke punten uit het ACRO concept komen in alle oplossingen terug.

#### 4.7.2.3 Artist impression concept 1.



Figuur 53: concept 1 artist impression

#### 4.7.3 Concept 2. bewezen techniek

In het concept bewezen techniek hebben we geprobeerd om maximaal de modules te gebruiken die al voorhanden zijn. Het idee is dan om zoveel mogelijk samen te klikken tot een werkend concept. Dit bespaart R&D kosten.

In het concept willen we de volgende bewezen technieken gebruiken:

1. Pluk-o-trak
2. Trekker met twee RTK-DGPS units voor navigatie, hydrauliek en krachtstroom
3. ACRO-robotarm (incl. vision en end-effector) en gemonteerd op de pluk-o-trak en getrokken door trekker.
4. Onderdeel van de robot vormt ook het hydraulisch stabiliseren (afstempelen) voor iedere boom
5. De kisten bufferwagens van Munckhoff is wel voorzien van een automatisch kisten wisselsysteem

Voordelen t.o.v. ACRO

- Door toepassing van RTS-DGPS kunnen we gebruik maken van de GPS-posities van de boomgaard. Bomen zijn bekend en hoeven niet meer gedetecteerd te worden. Ook is het voordeel van GPS dat de toetst kan worden of de beoogde uitgestuurde positie ook bereikt wordt (continue feedback over positie).
- Met RTK DGPS kan een goede map van de boomgaard aangelegd worden en moet het geen probleem zijn om ook automatisch naar een volgende rij te navigeren.

- Door de Munckhoff bufferwagen toe te voegen wordt arbeidstijd bespaard en kan een volledig pad worden geoogst zonder tussenkomst van personeel
  - Door maximaal gebruik te maken van bestaande techniek kan bespaard worden op R&D-kosten
- Door te kiezen voor concept 2 kan de focus van de ontwikkeling liggen op de robot arm met gripper en sensoren en een stukje toegevoegde stabilisatie. De robot wordt dan vooral de vervanger van de menselijke oogsthandeling, niet meer en niet minder.

#### 4.7.3.1 Artist Impression concept 2



Figuur 54: concept 2 artist impression

#### 4.7.4 Concept 3. Uniek Ontwerp

In het concept "Uniek Ontwerp" wordt de robot zo goedkoop en mogelijk ontworpen en specifiek afgestemd voor haar taak. Hierbij wordt wel rekening gehouden met bestaande bewezen techniek. Maar is wel de gedachte dat een hogere R&D inspanning gerechtvaardigd is om het beste concept naar boven te halen voor alle hoofd en deelfuncties, teneinde bij een succesvolle ontwikkeling het goedkoopste concept met de "best effort performance" te kunnen leveren aan de markt.

Belangrijkste wijzigingen ten opzichte van de voorgaande concepten zijn:

- Geen trekker, maar een eigen generator voor krachtstroom waarop alles is aangesloten
- Sterk aansluiten bij pluk-o-trak concept, waarbij op de voorkant van de pluk-o-trak een extra robot met stabilisatie wordt gepositioneerd en sensoren voor de rijdetectie en veiligheid.
- Ook hierbij zal het kisten automatisch moeten geschieden.

De focus bij de ontwikkeling kan in eerste instantie beperkt blijven tot de robotarm, end-effector, sensoren en stabilisatie van het robotgedeelte.

#### 4.7.4.1 Artist Impression concept 3 Uniek Ontwerp



Figuur 55: concept 3 artist impression



## 4.7.5 Overige conceptoverwegingen

- Acro besteedt veel aandacht aan de afscherming. Het is terecht dat direct zonlicht voor problemen zorgt bij de oogst. Het is daarom de vraag of een complexe tentconstructie van ACRO met vele motoren in die mate noodzakelijk is. Dit zal nader onderzocht moeten worden.
- In de concepten is niet uitgewerkt in hoeverre robotonderdelen, zoals het Munckhof Platform, ingezet kan worden bij andere werkzaamheden als spuiten, dunnen en snoeien. Het meervoudig gebruik van een aantal componenten ligt voor de hand.

## 4.8 Herijking van de businesscase

Onderstaande berekening geeft de herijking van de businesscase weer. Hierin zijn de volgende belangrijke wijzigingen opgenomen ten opzichte van de oorspronkelijke businesscase en is tevens gekeken naar de kostprijs van de beoogde concepten.

1. 24 uur productie is niet realistisch. De machine zal af en toe storen, moet omgezet worden naar een volgende rij, moet wachten op nieuwe kisten e.d. Hiervoor zijn in de nieuwe businesscase 20 uur genomen.
2. De cyclustijd van een robot kan vrijwel zeker terug naar 6 seconden. Dit geeft echter nog geen garanties over de performance van de plukactie (hoe goed worden de appels geplukt en worden alle appels geplukt)
3. 3 robots die tegelijkertijd op één zijde van 1 boom werken is te complex. Rekening zal moeten worden gehouden met de bewegingen van de andere robot. En afstemmingsverliezen tellen zwaar door.

Onderstaande berekening kan gezien worden als realistisch. De cyclustijden zijn eerder gehaald bij vergelijkbare producten. Grote vraag blijft wel de totale performance van de robot. Denk aan: gevallen appels, beschadigde appels, aantal geogoste appels. Hiervoor is nader onderzoek nodig.

De haalbaarheidsberekening wordt als volgt:

<b>Sector</b>					
	Productie Appel en Peren in NL	550,000	ton		
	Arbeidsprestatie	160	kg/uur	3,437,500	Arbeidsuren
	Arbeidsloon (inleen)	€ 20.00	per uur	68,750,000	Arbeidskosten
	Sector omvang	17000	ha	4,044	Arbeidskosten/ha
<b>Bedrijf</b>					
	Voorloper	20	Ha	€ 80,882	
	Investeringsruimte robots				
	Afschrijving	8	jaar	13%	
	Gemiddelde rente bij lineair afschrijven			2.5%	
	Jaarlijks onderhoud			2.5%	
	Jaarlijkse kosten van investering			18%	
	Investeringsruimte robots			€ 462,185	
<b>Robot</b>					
<b>Plukprestatie</b>					
	Aantal appels per kg	7			
	Aantal appels per	20	ha is:	4,529,412	appels
				647	ton
<b>Robotprestatie</b>					
	Beschikbare uren				
	Seizoen		7	w eken	
	Gemiddelde inzet/dag		20	uur	
	Aantal werkdagen/w eek		6	dagen	
	Aantal uren		840	uur	
	Cyclustijd van plukactie		6	sec	
	Aantal plukacties		504000		
<b>Benodigd aantal robot armen</b>				9	
Aantal armen per robot			2		
Benodigd aantal robots			4.493		
<b>Prijs per robot en extra bedieining</b>				€ 102,857	



## 4.8.1 Optimistisch scenario

Het project kan ook meevallen. Met name de cyclustijd is erg gevoelig in de haalbaarheidsberekening. Een cyclustijd van 3-4 seconden is ook nog heel goed voorstelbaar. Daarnaast is de inzetbaarheid van 7 weken laag, waardoor afgevraagd moet worden of een afschrijving van 10 jaar niet meer gerechtvaardigd is, hij wordt immers beperkt gebruikt.

Tenslotte is het niet te verwachten dat de arbeid op het niveau van € 20 blijft. Deze zal de komende jaren eerder groeien naar € 25,- Met deze drie maatregelen (afschrijving van 10 jaar; cyclustijd van 4 seconden; € 20 uurtarief handoogst/ uur), groeit de investeringsruimte naar: € 225.000,- Dit geeft de gevoeligheid van de parameters weer.

Wanneer de robot ook ingezet kan worden op het zuidelijk halfrond, verdubbeld de investeringsruimte nog eens.

## 4.8.2 Kostprijs concepten

Hieronder is een vereenvoudigde opgave gegeven van de kostprijs van de drie verschillende concepten,

Haalbaarheid				Concept 1	Concept 2	Concept 3.
Modules				Acro	Proven tech	Dedicated tech
Trekker		€ 45,000	€ 45,000	€ 45,000		
Pluk-o-trak dedicated, incl bufferw agen		€ 20,000	€ 20,000	€ 20,000	€ 20,000	
Generator & energievoorziening		€ 7,500			€ 7,500	
RTK DGPS bestuurbaar maken		€ 30,000		€ 30,000		
Robotsysteem (incl. softw are&sensors)		€ 40,000	€ 80,000	€ 80,000	€ 80,000	
Veiligheid		€ 1,500	€ 1,500	€ 1,500	€ 1,500	
Navigatie		€ 1,500	€ 1,500		€ 1,500	
Afscherming		€ 1,500	€ 4,500	€ 1,500	€ 1,500	
Stabilisatie		€ 1,000	€ 1,000	€ 1,000	€ 1,000	
Totaal			€ 152,500	€ 178,000	€ 113,000	
Bediening (arbeid)		€ 2,804	€ 2,804	€ 2,804	€ 2,804	
Desinvesteringen						
Pluk-o-trak						
Aantal op 20 Ha = 3		€ 26,800	€ 17,893	€ 17,893	€ 17,893	
Netto investering			€ 137,411	€ 162,911	€ 97,911	

### Toelichting

- Concept 1 en 2 hebben een trekker nodig die krachtstroom en hydrauliek kunnen leveren Wel is het zo dat een trekker mogelijk een langer afschrijving kent dit is niet meegenomen.
- Bij de module pluk-o-trak wordt uitgegaan van een pluk-o-trak met twee opvoerbanden i.p.v. 4 en geen motor voor de aandrijving. Deze wordt van de trekker betrokken of van een aparte generator. Wel is het inclusief de bufferwagen die automatisch kisten wisselt en aanvoert, voldoende voor één pad.
- RTK-DGPS bestaat uit twee ontvangers op het dak, abonnementskosten, hardware voor het actief ingrijpen op de besturing en de nodige software en interfaces.
- Robotssystemen zijn de manipulator, sensoren, blaas-zuigunit, end-effector en de benodigde besturingscomponenten en kasten
- Navigatie bestaat uit extra sensoren voor het volgen van de boomrij met massa- en boomdetectie.
- Afscherming bestaat uit een tent tegen direct instralend zonlicht
- Bediening bestaat uit de extra bediening die nodig is voor het verplaatsen van de robot naar een ander pad en verhelpen van storingen
- Stabilisatie bestaat uit enkele lineaire cilinders die de robot stabiel afstempelen op de bodem
- Daarnaast zijn er ook desinvesteringen te benoemen. Zo is de oude pluk-o-trak niet meer nodig.

### 4.8.2.1 Conclusie

- Concept 3 is het goedkoopst
- Concept 3 valt binnen de businesscase
- Perspectief kan in de toekomst verder worden vergroot door:
  - Continue stijgende arbeidskosten
  - De moeilijkheid en hoge kosten van het beschikbaar krijgen van oogst arbeid (niet in de businesscase meegenomen)
  - Goedkoper wordende robottechnologie en steeds beter beschikbaar komen van standaard componenten waardoor R&D tijd en productiekosten worden verlaagd
  - Er zijn naar de toekomst toe goede mogelijkheden, om de prestaties en cyclustijden verder te minimaliseren, kosten te delen door ook op het zuidelijke halfrond te produceren en door een langere afschrijving te nemen.

Met een looptijd van 3-5 jaar robotontwikkeling is het gerechtvaardigd om een dergelijk besluit te nemen.

## 5 Conclusies

### 5.1 Kern van het technische probleem

De sector heeft niet stilgezeten. Systemen zijn beschikbaar voor het transport van appels van de oogster naar de kuubskisten waar appels automatisch gebufferd worden. Kisten zijn automatisch te lossen. Ook het autonoom navigeren door de boomgaard is state of the art. Kern van het technische probleem is de detectie van oogstbare appels van de juiste kwaliteit en om deze appels mechanisch "schadevrij" te verwijderen van de boom. Dit probleem dient eerst opgelost te worden. De stap om dit vervolgens in te bouwen lijkt haalbaar

In het verleden is meerdere malen aangetoond dat het mogelijk is een appel van de boom te verwijderen. De uitdaging zal zijn om nu appels in een behoorlijke snelheid, schadevrij, van de juiste kwaliteit vrijwel allemaal te oogsten.

### 5.2 Businesscase kritisch

De businesscase is kritisch. De oogst is seizoensgebonden, waardoor de inzetbaarheid beperkt is. De mens oogst snel en het zal voor een robot een uitdaging zijn dit te evenaren. Er is hoogwaardige technologie nodig wat ook hoge investeringen vraagt. Toch achten wij de businesscase voldoende perspectiefvol voor een vervolg. De komst van robots in de glastuinbouw en autonome voertuigen in het veld doen hun intrede. Het arbeidsprobleem (kosten en beschikbaarheid) groot.

### 5.3 Gevoeligheid op de businesscase

De gevoeligheid is groot. 2 seconden sneller oogsten, de machine ook inzetten op het zuidelijk halfrond in landen als Chili en Zuid Afrika, te verwachten loonkostenstijgingen van enkele procenten per jaar en betere prijsvorming kunnen de investeringsruimte de komende jaren nog verder met een factor 2. tot 3. verhogen. Daartegenover staan steeds beter beschikbare en betaalbare robots, embedded systemen en software tools, waarmee de investeringskosten kunnen worden gereduceerd.

## 5.4 Markt mechanisatie van hoogwaardige producten

De agrarische sector en dan met name de oogst van hoogwaardige producten als appels, peren, citrusvruchten, steenvruchten, tomaten en komkommers is wereldwijd in hoge mate afhankelijk van de menselijke arbeid bij de oogst. De overeenkomsten zijn groot. Detectie van oogstbare producten en het verwijderen daarvan. De handelingen zijn kortcyclisch en repeterend, vanuit dat oogpunt ideaal voor mechanisatie. Het is ook nog één van de weinige industriële takken waar kortcyclisch en repeterend werk nog niet gemechaniseerd is.

## 5.5 Conceptkeuze

Een conceptkeuze is gegeven. Hierbij wordt uitgegaan van het principe van de Munckhof Pluk-o-trak, waarbij het afvoeren van de appels, het bufferen en het transport in één systeem voor handen is. Alleen de functie sensor en automatische pluk moet ingevuld worden zo is de simpele redenering. De werkelijkheid zal naar verwachting weerbarstiger zijn en een op maat (dedicated) ontworpen voertuig licht meer voor de hand met gebruikmaking van de principes uit de pluk-o-trak.

# 6 Aanbevelingen voor vervolg

NFO heeft op basis van de conclusies de wens uitgesproken om een traject te starten tot implementatie.

## 6.1 Plan van aanpak

Het plan van aanpak dient zich in eerste instantie te richten op het totaalconcept en de technische haalbaarheid van de sensor, manipulatie en actuatie van het oogsten van een appel. Met andere woorden. Zet een robot op een blok beton voor een realistische (kunst)boom en oogst de boom zo snel en zo goed mogelijk leeg (fase 1).

In tweede instantie kunnen andere functies worden ontwikkeld en samengebracht in een eerste prototype (fase 2).

In een derde stap kan verdere engineering en introductie plaatsvinden (fase3) richting de praktijk. Rekening dien te worden gehouden met een doorlooptijd van enkele jaren en een investering in onderzoek en ontwikkeling van enkele miljoenen euro's.

## 6.2 Blijvende collectieve ondersteuning nodig

Het project is technisch risicovol. Veel onderzoek en ontwikkeling is nog nodig voordat implementatie gerealiseerd is. Binnen de fruitsector is de mechanisatiegraad in de boomgaard beperkt. Huidige aanbieders van mechanisatie beschikken niet over een geavanceerd R&D-apparaat om dergelijke ontwikkelingen uit te voeren.

Een bedrijf dat een dergelijk R&D-traject kan trekken zal buiten de fruitsector verworven moeten worden. Voor ieder bedrijf betreft het daarom een nieuw product in een nieuwe markt. Door het technische risico en het ontbreken van een eigen marktkanaal zal de investeringsbereidheid beperkt zijn. NFO en het Productschap Tuinbouw zouden in het eerste traject tot aan het eerste prototype hieraan ondersteuning moeten blijven leveren.

## 6.3 Aansluiten bij Wageningen UR en actueel wetenschappelijke agrarisch robotprogramma

Halverwege 2010 start een 4 jarig robotprogramma onder de titel "Crobs" (subtitel: Robots for crops). In het programma waar Wageningen UR programmaleider wordt ook gewerkt aan een oogstrobot voor appel. Werkpakketeleider van dit deelproject is de KU Leuven. Het wetenschappelijke programma mist mogelijk de commerciële ambitie, maar kan wel degelijk aangesproken worden om relevante onderzoeksvragen te helpen beantwoorden.

Wageningen UR is wereldwijd marktleider in visionsystemen op plantaardige producten. Er is veel ervaring opgedaan met beeldverwerking bij robotisering (vision guided navigation) van o.a. rozenoogstrobot, komkommeroogstrobot, bladbrekrobot en een robot voor het stekken van lidcactus. In het programmam Crobs gaat Wageningen UR de komende vier jaar werken aan de oogst van paprika. Wageningen UR heeft de ambitie uitgesproken graag deel te willen nemen in een project naar implementatie van de oogst van appels en peren. Ook NFO en Productschap tuinbouw zien in Wageningen UR een relevante partner voor de toekomst.

## 6.4 Businessmodel

Creatieve businessmodellen zijn denkbaar die recht doen aan collectieve investeringen door de fruitsector zelf. In het verleden is het mogelijk gebleken om dergelijke collectieve financiering ook te verdubbelen met subsidie. De keuze en het vertrouwen in een technische partij (of het consortium) is hierbij belangrijk. Het is wenselijk dat de technische partij in staat is om de robot te ontwikkelen, te produceren (assembleren), te verkopen en te onderhouden. De hoofdschakels dienen ingevuld te zijn alvorens een dergelijk project te starten.

## 6.5 Pitch

Om te komen tot de keuze van een partner kan het idee/concept voorgelegd worden aan een aantal gerenommeerde bedrijven. Dit kan tijdens een informatieve sessie waarvoor partijen uitgenodigd worden (Pitch).

Partijen die hiervoor in aanmerking komen moeten bij voorkeur de volgende eigenschappen bezitten:

1. Technologische multidisciplinaire kennis en vaardigheden passend bij de complexiteit van het probleem
2. Trackrecord in robotisering, bij voorkeur in een omgeving waar gewerkt wordt met bio-divers materiaal
3. Affiniteit met de fruitsector cultuur en omgeving
4. Uitstralen van een duidelijk commitment om de eindstreep te halen en bereidheid hier ook de nodige risico's zelf te nemen.

Het aantal partijen dat deel neemt aan de Pitch moet beperkt zijn zodat iedere partij voldoende mogelijkheden krijgt te investeren in een gedegen plan van aanpak. Dit plan van aanpak wordt aan de initiatiefnemers gepresenteerd.

De initiatiefnemers kiezen een partij waarmee het plan verder wordt opgebouwd en gestart.

## Literatuur

Van Tuijl, B.A.J. , E.J. Van Henten, G.-J. Hoogakker, M.J. Van der Weerd, J. Hemming, J.G. Kornet and J. Bontsema, (2004). An Information Based Systematic Design Method For Robotics In Greenhouses. Proceedings Greensys 2004.

Beaten, J., K. Donné, S. Boedrij, W. Beckers, E. Claesen, 2008. Autonomous Fruit Picking Machine: A Robotic Apple Harvester. Proceedings Field and Service Robotics, STAR 42, pp. 531-539, Chamonix 2008

# Bijlage 1. Relevante literatuur

Overview of literature relevant to apple robot

## [1992 author Ripeness Sensor Development](#)

Sugar content is highly related to ripeness. Sugar content has been measured in thin-skinned fruits with NIR but this fails for fruits with thicker-skins. This measurement can damage skin. This paper describes the development of a non-contact ripeness sensor using proton magnetic resonance (H-MR) to measure the sugar in a sample. It was tested on samples of apple and banana, and on intact bananas and grapes. For intact fruit it could distinguish differences of 6%, which is not yet sensitive enough for a practical application.

## [1995 Edan Design of an Autonomous Agricultural Robot](#)

This paper presents the state-of-the-art for agricultural robots as it stood in 1995. Fruit location techniques used were vision, infrared and structured light. These could identify a maximum of 85% of the total fruits. An implementation of a melon harvester is described; this uses colour, shape and size to detect the fruit. Ripeness detection was not implemented. Colour-based detection suffered from problems with yellow leaves. Preliminary analysis of thermal imaging showed that melons could be distinguished from leaves but that warm patches of ground could cause confusion. A combination of colour and infrared was suggested for further work. In artificial tests (melons placed by hand) 85% were picked.

## [1999 Peterson A Systems Approach to Robotic Bulk Harvesting of Apples](#)

The proof-of-concept shown in the presentation on 5<sup>th</sup> June is described in this paper (video BulkRoboticHarvester.wmv). It harvests apples using computer vision (threshold segmentation) to detect the apples and a Rapid Displacement Actuator (RDA) to shake them loose from the branches, after which they land on a specially designed foam rubber surface. The system is limited to use on narrow inclined "Y" trellises. A black sheet was suspended over the limb being harvested to block direct sunlight. The system was tested on red apples, and operator intervention was possible both in apple detection and in selecting where to apply the actuator (no indication is given how often this was used). Quality was similar to handpicking although slightly more stem pulls occurred with the system. Average fruit removal was 95% and quality was 99% U.S. Extra Fancy (of which 97.7% bruise-free).

## [2000 Jimenez A Survey of Computer Vision Methods for Locating Fruit on Trees](#)

This document reviews computer vision methods for fruit location as of 2000. It was found that colour-based techniques were good for rapid detection and determination of ripeness, while shape-based techniques were slower but could detect fruit of a similar colour to the background. CCD sensors gave a certain amount of false detections, in most cases >5%. Approaches using range images and shape analysis did not generate false alarms and gave precise information about the 3D position of the fruit. The problem of total fruit occlusion is a serious limitation, affecting 40-100% of the harvest. There is a reasonable amount of detail given as to how each vision technique worked, plus consideration for other factors such as screening sunlight and avoiding occlusion. A convenient table of comparisons is given on page 14.

## [2000 Jimenez A vision system based on a laser range-finder applied to robotic fruit harvesting](#)

This paper describes a laser-based system to locate fruit. The infrared laser range-finder provides range and reflectance information. Algorithms are used to generate four primitives from this operation which give evidence for the presence of spherical objects. The result is 3D position, radius and surface reflectivity for each spherical object. Primitives are used instead of direct template matching due to occlusion. Finally a rule-based rejection step is applied to eliminate possible false detections. There is quite a lot of detail given about how the reflectance values must be processed to obtain meaningful information. Tests were performed on an artificial orange tree with fruits placed with different degrees of visibility. 80-90% of visible fruits were detected with a precision of 10mm. The vision system is intended for use in the AGRIBOT project.

### [2003 Holm Food Quality Sensors](#)

This document discusses food quality sensors in general so only a subsection is relevant to the apple harvester. On page 13 there is a list of sensors which can be used for ripeness and grading of fruits: NMR, NIR/VIS, VIS-fluorescence, Thermography, Acoustic impulse sensors and Electronic Noses. This is followed by a brief discussion of various projects which have tested these sensors.

### [2003 Peterson Fresh-Market Quality Tree Fruit Harvester Part II - Apples](#)

This paper discusses further testing of the bulk apple harvester described in 1999\_Peterson. By this stage the imaged-based detection of apple location and where to apply the RDA had been discarded in favour of a human-operated machine using joysticks. The tests include a wider range of cultivars and it is shown that different cultivars vary widely in their suitability for the bulk harvester. Certain types suffered more damage. The percentage of stem pulls was high – 20.2-57.2% depending on the cultivar, which is a potentially serious problem.

### [2003 Zhao On-tree Fruit Recognition Using Texture Properties and Color Data](#)

Here a vision-based algorithm for apple detection is presented. It uses texture data, the R channel of RGB, edge detection and Laplacian filters. Apples in a cluster are found by splitting the contour of the cluster at “necking points” and applying a circle-fitting algorithm. They state that it works for red and green apples, however their examples of “green” apples still have quite a large amount of red on them.

### [2004 Hannan Current Developments in Automated Citrus Harvesting](#)

This document discusses the current possibilities for detection and picking of oranges by a robot, together with their advantages and disadvantages. Computer vision techniques, control of the robot and types of robotic arms/grippers are discussed. The paper concludes with a brief overview of the research team’s prototype for an orange picker which uses a hand-based actuator with the camera mounted on the end-effector.

### [2004 Stajanko Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging](#)

Thermal images were made of apple trees at regular points during the growing season. These images were processed to count the apples in the tree. The tests were carried late in the afternoon to ensure a temperature gradient between fruit and leaves. Good results were achieved compared to manual counting. Apples deep within the tree caused a problem as these were not warmed by the sun as much, and so were harder to differentiate from the leaves.

### [2005 Burks Engineering and Horticultural Aspects of Robotic Fruit Harvesting - Opportunities and Constraints](#)

The first half of this article discusses how orchards can be adapted to allow easier robotic harvesting. The second half, “Engineering design aspects of robotic harvesting” discusses the design problems of detection, end effectors and navigation, with examples of how some research projects have tackled these issues.

### [2005 Unay Thresholding-based Segmentation and Apple Grading by Machine Vision](#)

This paper examines the classification of picked apple fruits based on defects. Various thresholding techniques are tested to segment the defects on the fruit. As the stem end/calyx on an apple are not defects, these are first detected and removed from the image. Finally image features are calculated for the fruit and fed into a classifier to determine the grade of the apple – healthy or defective. Various classifiers are tested, the best results were obtained with AdaBoost and SVM, the most complex methods tested. The best recognition rate was 89.2%, however no indication is given as to how the reference classification was obtained.

### [2006 Sivaraman Using Modern Robot Synthesis and Analysis Tools for the Design of Agricultural Manipulators](#)

This article describes how the tools “Robotics Toolbox for Matlab” and “Robotect” can be used to model robot arm designs.



#### [2006 Stajko Application of Thermal Imaging for Visualisation of High Density Orchards and Counting Apple Fruits](#)

Apple trees were captured using thermal imaging, both with static images and in movie acquisition mode. As the tree rows were too narrow to allow the camera to view the entire tree, a modified Winter's formula was used to extrapolate the total number of fruits from those found by thermal imaging. The final counts acquired by manual counting and thermal imaging were similar except in one case where the driving speed was too high, resulting in a serious underestimate of the number of fruits. The algorithm used to extract the apples from the image is that described in 2004\_Stajko.

#### [2006 Tabb Segmentation of Apple Fruit from Video Via Background Modelling](#)

In this paper the Global Mixture of Gaussians (GMOG) method is used to model the background (which is defined as anything other than the apples – leaves, branches, trellis poles, wires etc.). Tests were carried out on trees on a “Y” trellis, with a black curtain suspended between the arms of the trellis so that one side at a time could be examined. The background model was created from footage of trees from which the fruit had already been picked. Red and yellow apples were detected with a success rate of 85.6-95.6%.

#### [2007 Baeten Autonomous Fruit Picking Machine - A Robotic Apple Harvester](#)

This paper describes the AFPM fruit picking machine developed by ACRO, which was also shown in the course of the presentation on 5<sup>th</sup> June. Elements of the AFPM include a safety scanning device, a camera mounted in the centre of a flexible gripper, and a canopy and surrounding curtain to block out light. The tree is scanned from 40 positions, and from each position ripe apples are noted and picked. The gripper uses vacuum suction to hold the apple in a flexible funnel. The gripper design is patented. About 80% of apples are detected and harvested, but with a 30% rate of stem pulls (which is undesirable). Further work will be aimed at reducing the rate of stem pulls and decreasing the picking cycle from an average of 9 to 5 seconds.

#### [Patentaanvraag- MACHINE CUEILLEUSE DE FRUITS AUTONOME](#)

This is the patent application for the AFPM.

#### [2007 Hannan A Real-time Machine Vision Algorithm for Robotic Citrus Harvesting](#)

This algorithm aims to tackle the problems of occlusion and variable lighting when picking oranges. First the fruit is segmented out of the image by thresholding, then regions of a suitable size are found and their perimeters determined. Finally circle detection is used to find the centres of the oranges, sliding the circle segment around the perimeter in order to identify multiple oranges in a cluster. The threshold is adaptively calculated, allowing adaptation to different lighting conditions. More than 90% of the fruit was detected in tests.

#### [2008 Feng Fruit Detachment and Classification Method for Strawberry Harvesting Robot](#)

In this paper the robot detects the strawberries on the basis of colour. A blob-based algorithm is used to locate the strawberry and the principal axis is found to help locate the stalk. Ripeness is judged by the ratio of red to non-red areas on the strawberry. Histogram similarity measures are used to assign the strawberry to a quality class based on its shape and symmetry. 93% of fruit were found and 5% were damaged during detachment (note this was in a very artificial lab test). The accuracy of the quality classifier was about 90%.

#### [2008 Tanigaki Cherry-harvesting robot](#)

In this system the difference in spectral-reflection characteristics between red and infrared laser beams is used to distinguish the fruit. The 3D position is calculated using the ratio of the currents generated in the light detectors. The laser beams are blinked at high frequency in order to distinguish them from sunlight.

Cherry trees were used which had been trained vertically with the branches pruned so that the fruits were located around the trunk. In order to avoid obstacles, the manipulator approaches the fruit from the trunk, moving up and down the trunk

and turning to picking the fruit. The fruit is sucked into the end effector, and the fingers of the effector move up the stalk to grasp it near its root. The picking method mimicks human action – the effector lifts the fruit upward to detach.

The system was tested on a small sample of cherries of which 12 were recognised and 10 of these were harvested. There were problems with fruit not being visible, and with fruit being crushed while another fruit was being picked. To tackle the latter, pneumatic nozzles were added to the end-effector to blow other fruit out of the way, but this modification was not tested in the field.

#### [Year Bei Apple Maturity Discrimination and Position](#)

A red laser beam and an infrared laser beam are focussed together and shone on the fruit. The reflectance is used to calculate the coordinates of the apple, and the ratio of red to infrared reflected signal is used to calculate the ripeness of the fruit. No test results are given. Date of paper must be 2004 or later given the references.

#### [Year Herrero Multispectral images for monitoring fruit ripeness - validation methods](#)

In this document a procedure is described to assess the ripeness of peaches by looking at the ratio of the red and IR spectra of the fruit. The fruit were segmented from the background in the IR image using a technique based on the Triangle Algorithm. Non-supervised classification was used to group the R/IR histograms of the tested fruit into 6 ripeness clusters. Histograms of new fruit were then compared with reference histograms of the 6 clusters to classify the fruit. No success rate is given but there was a good correlation between the results and those obtained by testing the firmness of the fruit. Date of the document must be 2007 or 2008 as tests were carried out in 2007.

#### [Year Qinchuan Manipulator with underactuated multi-fingered end-effector for fruit and vegetable harvesting](#)

This brief document describes a 3-fingered end-effector which uses only one actuator. The hand is self-adaptive – it can grasp different sizes and shapes of fruit. To combat instability caused by the self-adaptation there is an anti-reversion device in each finger. Using under-actuation can apparently save system costs.

#### [Year Vittor Modular Decentralized Control of Fruit Picking Redundant Manipulator](#)

This paper describes a concept of decentralised modular control for a robot arm. This would in theory allow it to reach around obstacles as each module in the arm can be shifted to a different position. Simulations in Matlab Simulink appear to show the method to be versatile and robust, with smooth motion.

#### [Year Wawrzynczak Tractor Driven Continuous Move Harvester for Sour Cherry](#)

This paper describes a harvester for sour cherries. It is manually driven. Fruit are removed from the trees by “shaking fingers” which vibrate at a given frequency and collected in bins. 40% of the trees suffered minor damage from the harvester and 14% significant damage (damage to one branch or multiple shoots). 95% of the fruit was picked, although no information is given as to its quality. Date of the document must be 2007 or 2008 as trials took place in 2007.

## Bijlage 2. Functies uit systeem

### Start:

#### Invoeren van data

- Input van tuinder, veranderlijk



- Geen, tuinder rijdt robot naar start

#### Bepaal positie

- Rtk-dgps



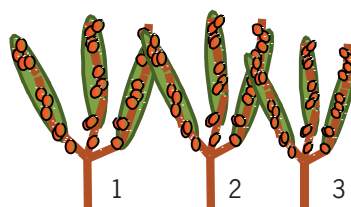
- Laser bakens



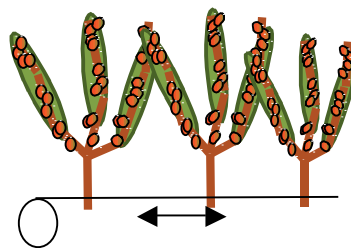
- Afstandsensoren (wiel rotaties)



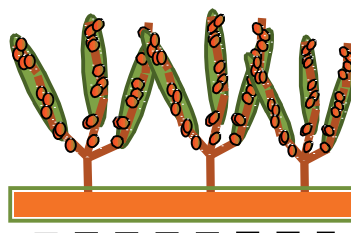
- Stammen detecteren/tellen



- Geleide kabel



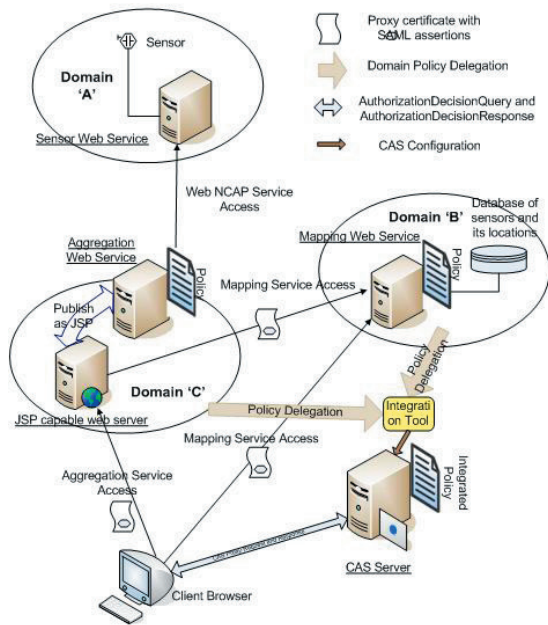
- Kabel onder grond



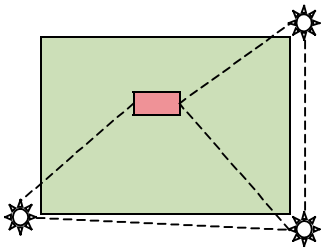
- Kabel tussen bomen



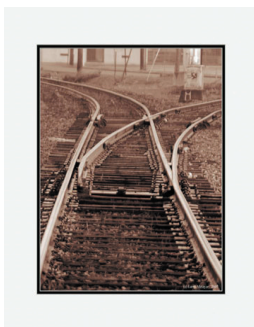
- Draadloos sensor netwerk



- Triangulatie/bakens



- Betonpaden/geleide rail



### Verplaatsen machine:

Verplaats robotplatform naar boomgaard

- Door tuinder



- Over rails
- Autonoom (gps)



- Via webcam interface (drive by distance)
- Via vaste routine
- Boomstammen meten
- Bakens tellen
- 

### Buffers:

Buffer vol?

Buffer wisselen

Plaatsen buffer achter plukrobot

- In trays, individueel
- 



- Kuub kist

- Op lange band



### Beeld opnemen: Camera verplaatsen

- Door robotarm



- Camera op bewegend statief
- Tweede robotarm
- Meerdere vaste camera's

### Appel(s) gevonden in beeld?

- Kleur herkenning
- Vorm
- Voorspellen via groei-model
- NIR (verschillen vrucht en blad)
- 

### Appel manipuleren:

Naar appel (n) toe bewegen

- Robotarm
- Luchtcilinders



- Hydraulische cilinders



- Elektrische cilinders (cartesisch systeem)



### Aangekomen bij target appel?

- Tast sensor
- Beeldverwerking (stereo)
- Kleur meting
- Geur meting
- Kloppen (hamertje op appel)



### Appel aan arm koppelen

- Acro zuignap



- Tweezijdige klem



- Omsluitende vingers



- Meerdere zuignappen (veren nest)
- Zuigen en grijpen
- 

### Appel los maken

- Draaien
- Wrikken
- Trekken
- Knippen
- Trillen
- Combinaties

### Appel transporteren naar afleg positie

- Met robotarm
- Tweede robotarm
- Lopende band in de buurt



### Appel transporteren naar buffer

- Afleggen met robotarm in kist
- Afleggen met robotarm op band
- Tweede robotarm neemt appel over en legt weg
- Laten vallen in net
- Afzuigen uit de end-effector

### Veiligheid:

Is persoon binnen bereik van machine?

- Whiskers
- Laser
- Bumpers
- Touw rondom
- Ultrasoon
- Infra-rood gordijn
- Beeld verwerking stereo visie
- Bedrijf omheinen
- Voertuig omheinen
- Borden ophangen
- Zeer langzaam rijden










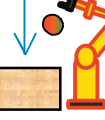


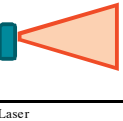
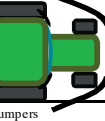

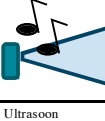
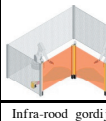




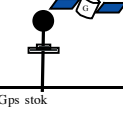
### Boomgaard in meten:

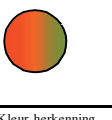
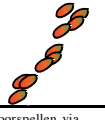






Locatie van bomen meten/ Kaart maken



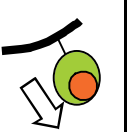
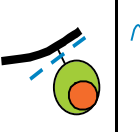
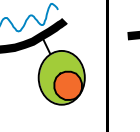
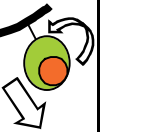
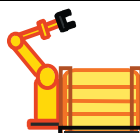


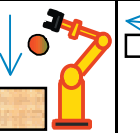
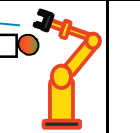
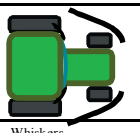
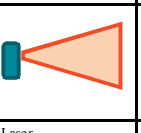
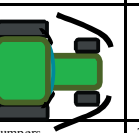
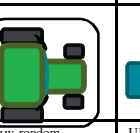
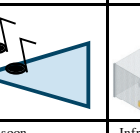
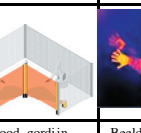

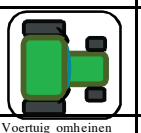
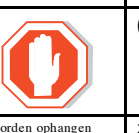

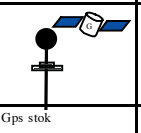
- ren tijdens oogst



## Morfologische overzichten

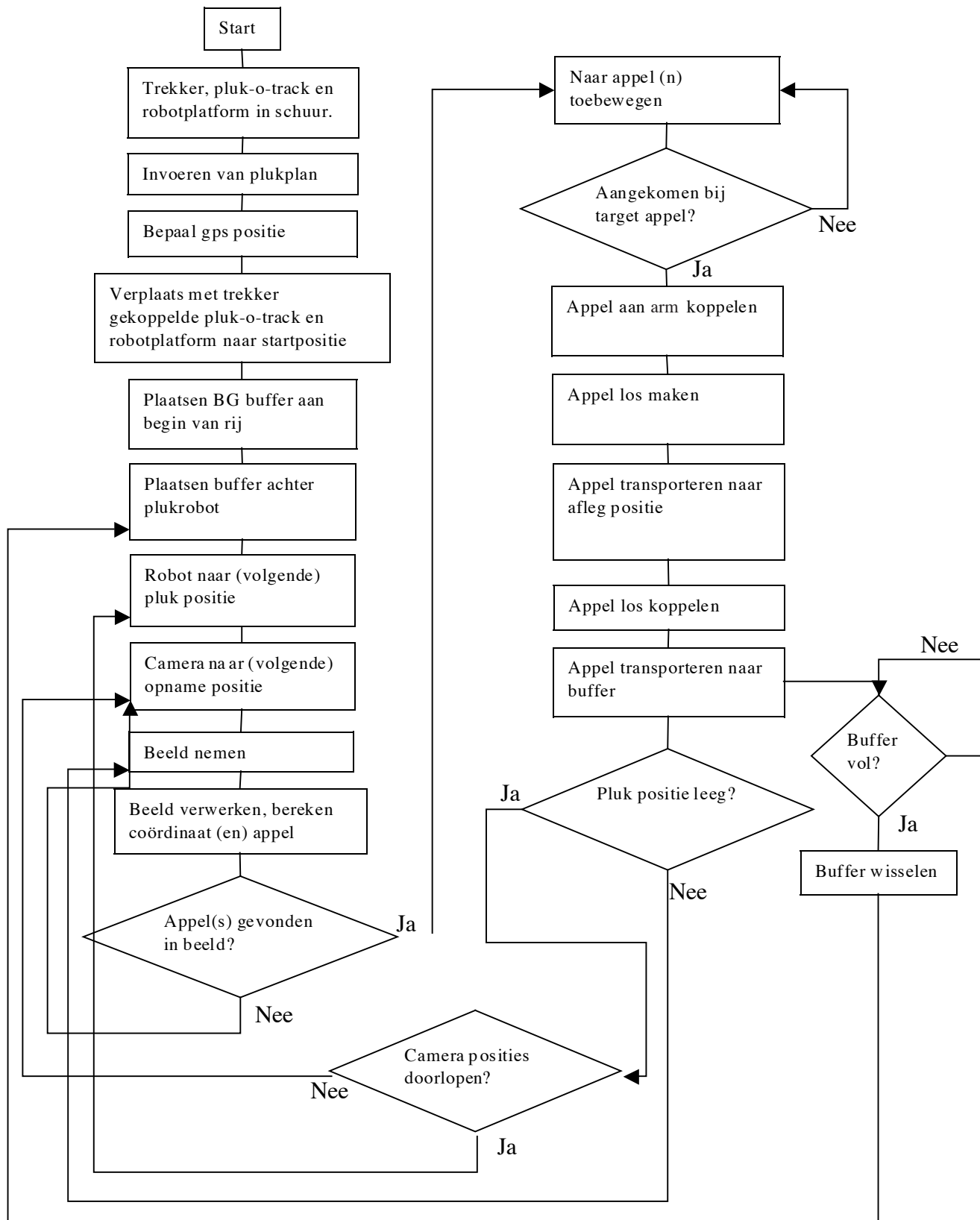
Appel los maken							
	Draaien	Wrikken	Trekken	Knippen	Trillen	Combinaties	
Appel transporteren naar buffer							
	Met robotarm in kist	Tweede robotarm	Lopende band in de buurt	Laten vallen in net	Afzuigen uit de endeffector		
Veiligheid							
	Whiskers	Laser	Bumpers	Touw rondom	Ultrasoon	Infra-rood gordijn	Beeld verwerking stereo visie
				0,5 km/u			
	Bedrijf omheinen	Voertuig omheinen	Borden ophangen	Zeer langzaam rijden			
Boomgaard in meten							
	Laser afstand meten	Gps stok	Tast sensor op trekker	Opname vanuit vliegtuig	Nauwkeurig aanplanten	Niet, alles op sensoren tijdens oogst	

Beeld opnemen, camera verplaatsen.							
	Door robotarm	Camera op bewegend statief	Tweede robotarm	Meerdere vaste camera's			
Appel(s) gevonden in beeld							
	Kleur herkenning	Vorm	Voorspellen via groei-model	NIR (verschillen vrucht en blad)			
Appel manipuleren							
	Robotarm	Luchtcilinders	Hydraulische cilinders	Electrische cilinders			
Aangekomen bij t ar get appel?							
	Tast sensor	Beeldverwerking (stereo)	Kleur meting	Geur meting	Kloppen (hamertje)		
Appel aan arm koppelen							
	Acro zuignap	Tweezijdige klem	Omsluitende vingers	Meerdere zuignappen (veren nest)	Zuigen en grijpen		

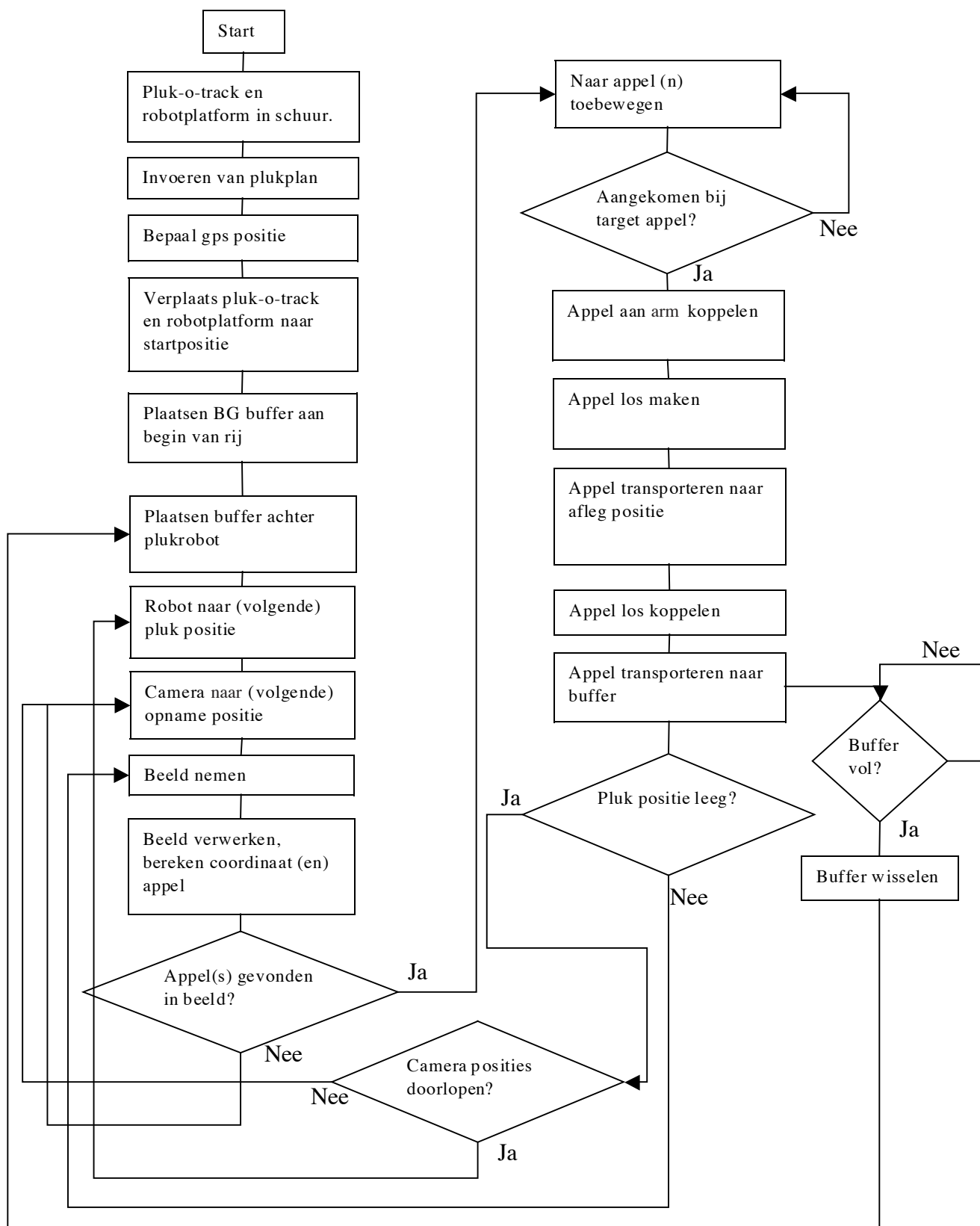
Appel los maken							
	Draaien	Wrikken	Trekken	Knippen	Trillen	Combinaties	
Appel transporteren naar buffer							
	Met robotarm in kist	Tweede robotarm	Lopende band in de buurt	Laten vallen in net	Afzuigen uit de endeffector		
Veiligheid							
	Whiskers	Laser	Bumpers	Touw rondom	Ultrasoon	Infra-rood gordijn	Beeld verwerking stereo visie
				0,5 km/u			
	Bedrijf omheinen	Voertuig omheinen	Borden ophangen	Zeer langzaam rijden			
Boomgaard in meten							
	Laser afstand meten	Gps stok	Tast sensor op trekker	Opname vanuit vliegtuig	Nauwkeurig aanplanten	Niet, alles op sensoren tijdens oogst	

## Bijlage 3. Stroomkeuze

Systeem 1: RTK-Dgps pluk-o-track trekker (maximaal gebruik van bestaande technieken)



Systeem 2: Alles zelf ontworpen, geheel geautomatiseerd



Stelsel 3: Acro systeem

