

# Precisie rechtgeleiding werktuig met RTK GPS

Een onderzoek naar verschillende stuursystemen op basis van nauwkeurige GPS systemen

Auteur(s): Mark Slot, David van der Schans, Pieter Bleeker, Wim van den Berg

© 2009 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

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 Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

PPO Publicatienr. ....; € .....,...

Dit is een vertrouwelijk document, uitsluitend bedoeld voor intern gebruik binnen PPO dan wel met toestemming door derden. Niets uit dit document mag worden gebruikt, vermenigvuldigd of verspreid voor extern gebruik.

Projectnummer: 3250031508

**Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.**

Akkerbouw Vollegrondsgroenten en Groene Ruimte

Adres : Edelhertweg 1, Lelystad  
: Postbus 430, 8200 AK Lelystad

Tel. : 0320 - 291111

Fax : 0320 - 230479

E-mail : [info.ppo@wur.nl](mailto:info.ppo@wur.nl)

Internet : [www.ppo.wur.nl](http://www.ppo.wur.nl)

# Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	4
1 INLEIDING .....	5
2 MATERIAAL EN METHODE .....	7
2.1 Proefopzet en uitvoering .....	8
2.2 Metingen.....	10
2.2.1 Vlakligging.....	10
2.2.2 Afwijking rechtgeleiding .....	11
2.3 Dataverwerking en statistische analyse.....	11
3 RESULTATEN .....	13
3.1 Vlakligging .....	13
3.2 Afwijkingen rechtgeleiding .....	13
3.3 Verband tussen vlakligging en afwijkingen in rechtgeleiding .....	18
4 DISCUSSIE .....	19
5 CONCLUSIES .....	21
BIJLAGE 1 .....	22
BIJLAGE 2A.....	23
BIJLAGE2B.....	24

# Samenvatting

In oktober 2008 werd bij op het proefbedrijf van PPO in Lelystad onderzoek gedaan naar de invloed van RTK GPS stuursystemen op de rechtgeleiding van een werktuig. Het werktuig was in de hefinrichting van een tractor bevestigd en bestond uit een werktuigbalk waaraan een markeerschijf was gemonteerd. Voor de aansturing werden RTK GPS stuursystemen van SBGuidance gebruikt. De stuursystemen die werden vergeleken waren: tractorbesturing met een RTK GPS ontvanger op de cabine van een Fendt 312 tractor met een spoorbreedte van 150 cm. Tractor en machine besturing met SBGuidance Twin besturing. Bij de Twin besturing was naast de RTK GPS ontvanger op de tractor ook een RTK GPS ontvanger op een stuurmechanisme op het werktuig geplaatst. Er werden twee stuurmechanismes toegepast: een side shift of met een stuurschijf.

Het proefveld bestond uit zes velden van 30 meter lengte. Op 21 meter werd elke meter de vlakligging van de sporen bepaald en de werd afstand gemeten van het spoor van de markeerschijf tot de basislijn. Op drie velden werd elk tractorspoor over een lengte van 3 meter 5 cm diep uitgegraven, Hierdoor helde de tractor en machine tijdens de werkgang beurtelings naar links en naar rechts. De overige drie velden lagen vlak. Uit de variantie analyse bleek dat een combinatie van tractor en machine besturing betrouwbaar nauwkeuriger is dan aansturing via de tractor alleen. De afwijkingen die optraden bleven bij tractor en werktuigbesturing binnen een marge van +/- 2 cm ten opzichte van de basislijn. Bij tractorbesturing liepen de afwijkingen bij een hoge werksnelheid en oneffen terrein op tot +/- 6 cm

De oorzaak van de grotere afwijkingen bij tractorbesturing zijn de hoge positie (3 meter) van de RTK GPS ontvanger die op oneffen sporen 12 cm heen en weer beweegt dwars op de rijrichting. Ook bij vlakke ligging met maximale hoogteverschillen tussen de twee tractorsporen van 2 cm bleek tractorbesturing minder precies dan tractor en werktuigbesturing.

De tweede RTK GPS ontvanger bij werktuig besturing was ca 150 cm boven de grond gemonteerd waardoor deze slechts 6 cm heen en weer beweegt.

Bij tractor en werktuigbesturing bleef de afwijking van de rechtgeleiding binnen de marge van +/- 2 cm op vlak land en 3 cm op ongelijk terrein. Vlakke grond en een lagere werksnelheid houden de afwijkingen bij alleen tractorbesturing binnen een marge van +/- 3 cm.

Investeren in precisie met RTK GPS is vrij kostbaar. Als je ervan uitgaat dat die precisie echt nodig is om het doel van de aanschaf te realiseren speelt moet bij de beslissing ook de manier van aansturing van het werktuig worden betrokken. Hoe hoger de vereiste nauwkeurigheid hoe hoger de eisen aan de hele tractor werktuigcombinatie en de aansturing daarvan.

# 1 Inleiding

De afgelopen jaren hebben veel bedrijven geïnvesteerd in toepassingen van GPS plaatsbepaling voor geleiding van tractoren en werktuigen in de landbouw. De voordelen van GPS geleiding zijn:

- Gemakkelijk brede spuitpaden aanleggen, weergave op beeldscherm
- Bij mist of 's nachts met dezelfde precisie doorwerken
- Overlapping of onderdosering behoort tot het verleden
- Altijd dezelfde aansluitrijen
- Maximale benutting van de percelen

De nauwkeurigheid van plaatsbepaling met het gratis GPS signaal is onvoldoende voor deze toepassingen. De systemen die voor tractorgeleiding op de markt zijn, maken daarom gebruik van signaalcorrecties (DGPS). Deze correcties worden berekend op basis van referentie stations. Deze manier van correctie verhoogt de nauwkeurigheid van positiebepaling tot een nauwkeurigheid van minder dan 30 cm, afhankelijk van het systeem.

Veel gebruikers verlangen echter een zeer grote nauwkeurigheid. Hiervoor zijn speciale referentie stations nodig, zogenaamde RTK stations. Vanuit deze RTK stations worden correcties via een radiosignaal naar de GPS ontvanger op de tractor gestuurd

Door het gebruik van RTK correcties kan een nauwkeurigheid van enkele centimeters worden bereikt. De afstand van correctie station tot ontvanger bedraagt bij RTK maximaal 10 km. In een aantal akkerbouwgebieden is een netwerk van RTK stations beschikbaar. Gebruikers van het signaal kopen zich bij aanschaf van stuursysteem in voor deelname aan het RTK netwerk.

Er werd begonnen met het alleen aansturen van de tractor. Dit is nog steeds een veel gebruikt systeem. Het probleem is echter, dat het werktuig dat zich achter de tractor bevindt weleens kan gaan 'zoeken' in het veld. De GPS ontvanger op het dak van de tractor bevindt zich relatief ver van het werktuig. Hierdoor ontstaat verlies aan nauwkeurigheid met name als het terrein onregelmatig is. Bij een richtingcorrectie van een werktuig achter een trekker door aansturing van de (voor)wielen van de tractor ontstaat in eerste instantie een tegengestelde beweging van het werktuig. Daardoor blijkt het resultaat van de hoge investering in grote nauwkeurigheid soms in de praktijk tegen te vallen .

Dit probleem kan worden opgelost door niet alleen de tractor uit te rusten met RTK GPS maar daarnaast ook het werktuig uit te rusten met een eigen RTK GPS ontvanger en een eigen aansturing.

Voor de aansturing van het werktuig kan gebruik worden gemaakt van een side-shift tussen de tractor en werktuig of een stuurschijf op het werktuig.

Bij de side-shift zijn er verschillende constructies mogelijk:

- De side-shift hangt "star" in de hefarmen van de tractor. Als de positie van het werktuig wordt gecorrigeerd, worden zijwaartse krachten op de achterkant van de tractor uitgeoefend.
- De side shift is op een vaste bok in de hefinrichting gemonteerd. Deze bok staat op schijven die door de grond lopen. Zo is deze in de grond "verankerd". De stabilisatie van de hefarmen is los en de zijwaartse krachten door richtingcorrectie van het werktuig worden door de schijven opgevangen.

Voor dit onderzoek is de tweede manier van side-shift constructie toegepast met een bok met vaste schijven en de stabilisatie van de hefarmen los.

De stuurschijf op het werktuig heeft het voordeel dat deze zich in de grond kan afzetten en het werktuig geleidelijk naar het juiste spoor stuurt. De stabilisatie van de hefinrichting blijft los, waardoor het werktuig relatief onafhankelijk van de trekker kan bewegen.

In 2007 en 2008 zijn een aantal oriënterende metingen gedaan naar de invloed van verschillende manieren

van RTK GPS sturen van werktuigen. Hierbij is gebruik gemaakt van het RTK stuursysteem SBGuidance Twin van SBG Innovatie uit Middenmeer. In het najaar van 2008 is een proef opgezet om antwoord te geven op de volgende vragen:

Wat is het meest nauwkeurige stuursysteem?

Wat is de invloed van vlakligging op de nauwkeurigheid van stuursystemen?

Wat is de invloed van werksnelheid op de nauwkeurigheid van de geleiding door verschillende stuursystemen?

Om deze vragen te beantwoorden is een meetprotocol ontwikkeld voor het testen van stuursystemen. Met het meetprotocol is de rechtgeleiding van de volgende stuursystemen op basis van RTK-GPS onderzocht:

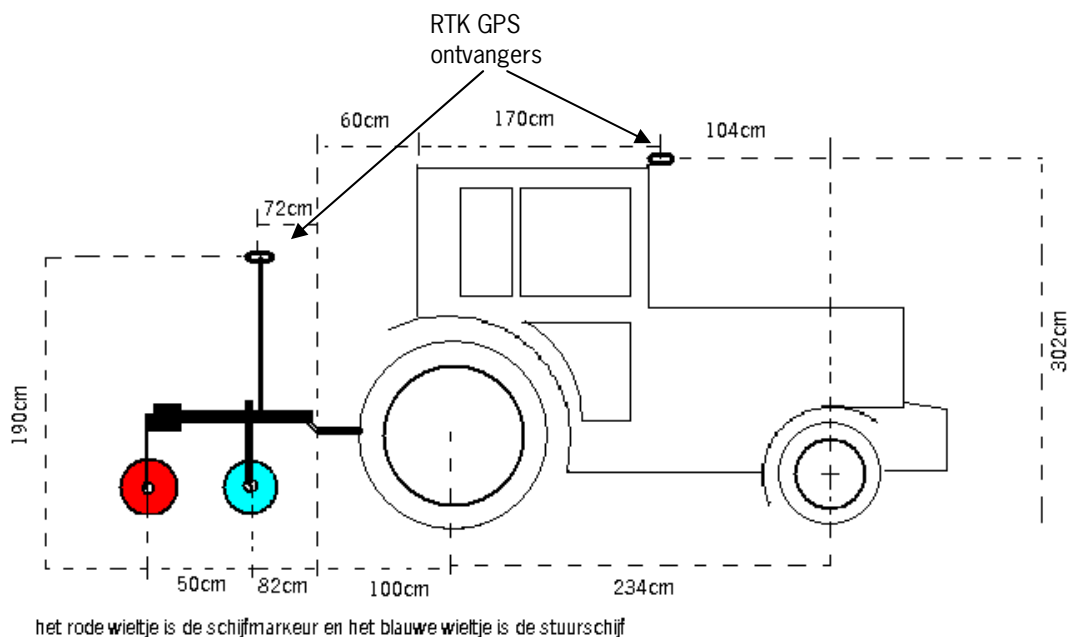
- Tractorsturing
- Tractorsturing + machinebesturing met behulp van side shift
- Tractorsturing + machinebesturing met behulp van een stuurschijf

## 2 Materiaal en methode

Op 13 en 14 oktober 2008 is op perceel C6 te PPO Lelystad het proefveld aangelegd voor het testen van de nauwkeurigheid van het aansturen van een werktuig met RTK-GPS. De grondsoort van het perceel is zavel van ongeveer 25% afslibbaar. De grond was redelijk droog en goed bereikbaar. De weersomstandigheden waren droog. Er trad weinig insporing op.

Het onderzoek werd uitgevoerd met een tractor van het merk Fendt 312 met een spoorbreedte van 150 cm. Er werd gereden met banden van het merk: Alliance (row crop radial) bandenmaat: 12.4 R46. De bandendruk is niet gemeten. De gangbare bandendruk voor deze band is ca 2 bar. Figuur 1 is een schematische weergave van de tractor met bijbehorende maten. Als er gereden wordt met tractorsturing, wordt alleen de voorste GPS ontvanger op de cabine gebruikt. Bij tractor en machine besturing worden beide GPS ontvangers gebruikt, met de ontvanger op de cabine wordt de tractor gestuurd en de ontvanger op het werktuig stuurt de side shift of de stuurschijf.

Het doel is om niet alleen de tractor maar vooral het werktuig op de ideale plaats te houden. De afstand van de GPS ontvanger op de tractor naar het werktuig bedraagt in dit geval 334cm. Bij alleen tractor aansturing voert het stuursysteem een correctie uit op basis van de positie van de ontvanger die relatief ver van de tractor is. De voorwielen van de tractor voeren de correctie uit, wat resulteert in een omgekeerde beweging van het werktuig (werktuig zwenkt de andere kant uit). Bij aansturing van het werktuig met de tweede GPS ontvanger is de positie van de ontvanger gelijk aan de positie van het werktuig en wordt de positie gecorrigeerd met stuurschijf of side shift onder de ontvanger.



*Figuur 1: schematische weergave van de configuratie van tractor-werktuig-GPS ontvanger waarmee het onderzoek naar de nauwkeurigheid van RTK-GPS stuursystemen is uitgevoerd.*

## 2.1 Proefopzet en uitvoering

De tractor was uitgerust met een RTK GPS ontvanger van SBGuidance en automatisch aansturing via het hydraulische stuursysteem.

### *Tractor- en werktuigbesturing*

In de hefarmen van de tractor was een werktuigbalk opgehangen met daaraan een schijf die een spoor trok door de grond. Bij tractor besturing waren de hefarmen vastgezet zodat koerscorrecties van de tractor direct werden overgenomen door de schijf aan de balk.

### *Besturing werktuig met side shift*

Besturing van het werktuig werd verkregen door een tweede RTK GPS ontvanger(het SBGuidance Twin systeem) op de balk met schijfmarkeur. Bij Side-shift besturing was een hydraulische stuercilinder (side shift) in de hefarmen bevestigd. De side shift liep op 2 schijven door de grond om te voorkomen dat deze naar links en rechts bewoog. De spanners van de hefarmen waren losgemaakt zodat koers correcties van de tractor niet meteen werden overgedragen op het werktuig. Achter de side shift was de balk met RTK GPS ontvanger bevestigd. Via de stuercilinder van de side shift werd de positie van de balk gecorrigeerd.

### *Besturing werktuig met stuurschijf*

Bij besturing met de schuurschijf werd ook gebruik gemaakt van het SBGuidance Twin systeem. De spanners van de hefarmen waren ook los. Naast de stuurschijf was de RTK GPS ontvanger bevestigd. De balk liep op twee steunwielen en met de hydraulisch gestuurde stuurschijf werd de positie van de markeerschijf geregeld.

Afbeelding 2 toont de markeerschijf achter de werktuigbesturing met stuurschijf. In afbeelding 3 zijn de geultjes die door de markeerschijf zijn getrokken duidelijk te zien. Verder toont afbeelding 3 de stukken in het spoor die over drie meter tot een diepte van ongeveer 5 cm zijn uitgegraven.



*Afbeelding 2: Stuursysteem "stuurschijf" met schijfmarkeur.*



*Afbeelding 3: Drie markeersporen tussen wielsporen die over een lengte van 3 meter, 5 cm zijn uitgegraven.*

Er werden zes veldjes met een lengte van 30 meter en een breedte van ongeveer 8 meter uitgezet. De veldjes lagen in twee rijen van drie velden naast elkaar. Tussen deze rijen was een nylonlijn (basislijn) strak gespannen op enkele centimeters boven de grond, (de blauwe lijn in figuur 4 ). Deze lijn diende als basislijn voor de sporen en de metingen. De velden zijn voor het uitzetten bewerkt met een rotorkoepel. Op elk veld werden twee rijbanen met het RTK GPS systeem parallel aan de nylon lijn ingereden. Drie velden bleven vlak. Op drie andere veldjes werd op een vaste plek in elk wielspoor over een lengte van 3 meter het wielspoor tot een diepte van 5 cm uitgegraven. (zie figuur 4). Dit werd op beide rijbanen identiek uitgevoerd.

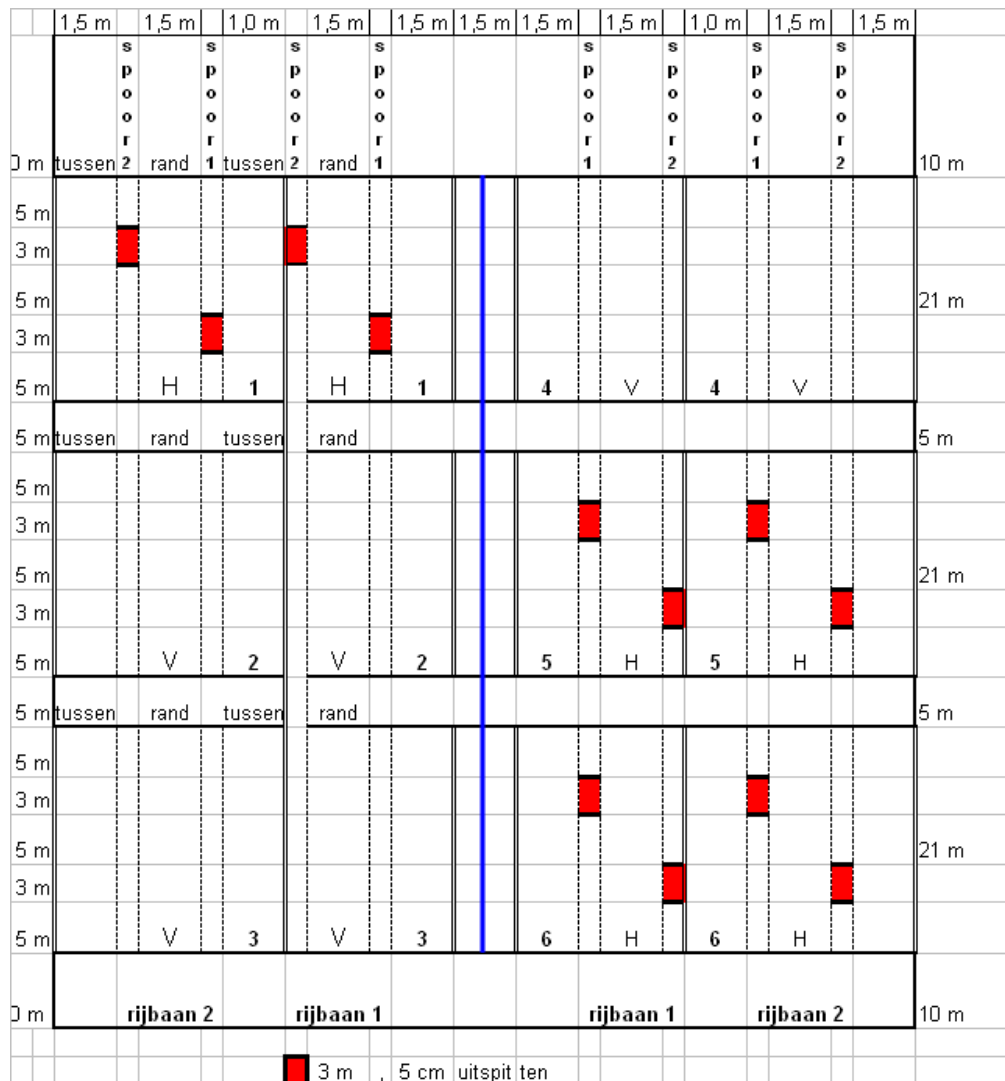
Elk veld had een lengte van bruto 30 meter en netto 21 meter. Tussen elk proefveld is 5 meter tussenruimte gehouden. Voor en achter het proefveld werd een buffer van 10 meter aangehouden. De buffer van 10 meter is nodig omdat het stuursysteem tijd nodig heeft om de juiste positie te bepalen. Omdat door herhaald berijden van dezelfde rijbaan de ligging van de sporen kan wijzigingen, werd er drie



maal over dezelfde baan gereden.

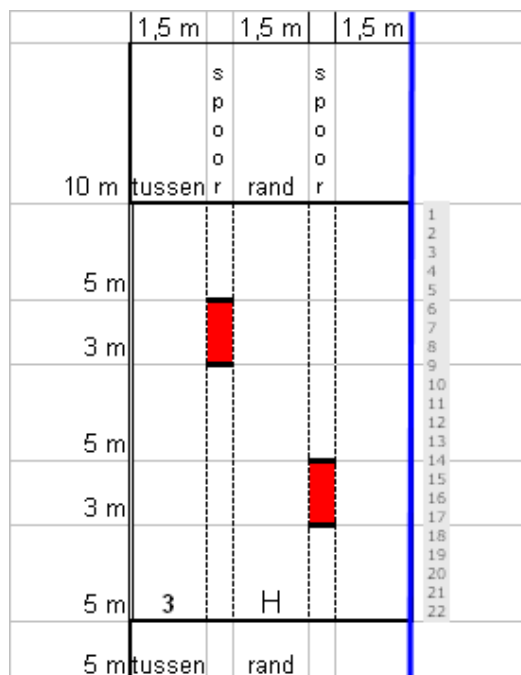
Er werd 3 maal over dezelfde rijbaan gereden en daarna werd naar een tweede rijbaan op hetzelfde veld gegaan. Op de velden waar stukken in een spoor werden uitgegraven, werd dit ook in de tweede rijbaan op exact dezelfde positie gedaan.

*Figuur 4: Proefveldschema met twee rijbanen per veld en drie velden met in rood aangegeven kuilen van de wielsporen.*



*Figuur 5: Detailtekening één veldje op het proefveld.*

In figuur 5 is één veldje in detail weergegeven. Het is een veldje waar in elk van de sporen op een vaste plaats over een lengte van 3 meter het spoor ca 5 cm is uitgegraven. Over een lengte van 21 meter werd elke meter een meetpunt uitgezet met stokjes. Ter hoogte van de stokjes werden de metingen gedaan om de horizontale en verticale variatie vast te stellen.



### *Snelheden*

Omdat de rijsnelheid ook van invloed is op de nauwkeurigheid van de rechtgeleiding werd de nauwkeurigheid bij elk stuursysteem bij twee snelheden, 4 km/uur en 8 km/uur, vastgesteld.

In totaal werd zes maal gereden. Er werd drie maal door rijbaan 1 gereden: tractor + side shift bij 4 en 8 km/uur en tractor besturing bij 4 km/uur. Daarna werd drie maal door rijbaan 2 gereden: tractorbesturing bij 8 km/uur en schijfbesturing bij 4 en 8 km/uur.

Na elke keer berijden werd de markeerschijf ca 30 cm verzet en werd weer gereden. Na drie maal berijden werden de afstanden van de drie markeerspooren t.o.v. de basislijn gemeten.

## 2.2 Metingen

Om de aard en de oorzaak van de afwijkingen van de rechtgeleiding te analyseren is het nodig ook de afwijkingen ten opzichte van horizontaal haaks op de rijrichting te meten. De GPS op het tractordak schommelt heen en weer door verschillen in hoogte tussen het rechter en linker wiel van de tractor. In de volgende paragrafen is beschreven hoe vlakligging en afwijkingen ten opzichte van de basislijn zijn bepaald.

### 2.2.1 Vlakligging

Met behulp van een waterpas toestel werd elke meter de hoogte van de rijsporen gemeten (Afbeelding 6). Hierdoor kon de verandering van de vlakligging haaks op de rijrichting worden vastgesteld. Dit is nodig om een relatie te leggen met de afwijkingen in de rechtgeleiding van de systemen. Deze meting werd voor en na het uitvoeren van de behandelingen gedaan om vast te stellen of door insporing veranderingen in de vlakligging zijn ontstaan. De hoogtemeting werd elke meter, ter hoogte van de piketjes langs de basislijn gedaan in het linker en rechterspoor



*Afbeelding 6: Met een waterpastoestel werd elke meter de hoogte van de wielspooren gemeten.*

van de rijbaan.

Om de vlakligging te karakteriseren is de variatie coëfficiënt berekend en er is een variantie analyse gedaan om verschillen tussen de objecten weer te geven.

## 2.2.2 Afwijking rechtgeleiding

Door de afstand van de schijf markeur tot de basislijn te meten, kun je de afwijking rechtgeleiding berekenen. De afstand werd als volgt gemeten: Door een reflectiebordje rechttop in de markeurgeul te plaatsen wordt met een afstandsmeter vanaf de basislijn de afstand tot het reflectiebordje gemeten. Vervolgens worden met de PDA de afstanden direct ingevoerd (zie afbeeldingen 7 en 8).



*Afbeelding 7: Een nylon draad vlak boven de grond gaf de positie van de basislijn weer. Een kunststof bordje werd in het spoor van de markeurschijf geplaatst.*



*Afbeelding 8: Met een optisch afstandsmeter werden de afstanden gemeten van de basislijn tot het bordje in het markeurspoor. De waarnemingen werden meteen in een veld computer ingevoerd.*

## 2.3 Dataverwerking en statistische analyse

De dataset die werd opgebouwd door de hiervoor beschreven metingen per veldje per combinatie van stuursysteem en snelheid bestond uit:

- Hoogtemetingen (vlakligging)
  - Elke netto meetveld was 21 meter lang en had 22 meetpunten in beide wielsporen.
  - Elk meetpunt een hoogtemeting van beide wielsporen (hoogte1 en hoogte2).
  - Deze metingen werden voor en na het uitvoeren van drie behandelingen gedaan (hoogte1-voor, hoogte1-na, hoogte2-voor en hoogte2-na)
- Afstanden tot basislijn (rechtgeleiding)
  - Elk meetpunt (22) de afstand van basislijn tot markeurspoor.

### *Verwerking hoogtemetingen*

De metingen van elk meetpunt per wielspoor voor en na driemaal berijden werden gemiddeld.

$Hoogte1 = ((hoogte1\text{-voor} + hoogte1\text{-na}) / 2)$  en  $Hoogte2 = ((hoogte2\text{-voor} + hoogte2\text{-na}) / 2)$ .

Het verschil in gemiddelde hoogte per meetpunt tussen het linker en het rechter wielspoor geeft de helling van de tractor haaks op de rijrichting weer ( $Helling = Hoogte1 - Hoogte2$ ). Bij een positieve waarde helt de tractor naar links, bij een negatieve waarde helt de tractor naar rechts.

### *Verwerking afstanden tot basislijn.*

Als de sturing perfect verloopt, zijn de afstanden van de basislijn tot het markeurspoor steeds het zelfde.

Variatie in de afstanden is dus een goede maat om functioneren van de stuursystemen onder de verschillende omstandigheden te beoordelen en de prestaties van de stuursystemen onder de verschillende omstandigheden, vlakligging en rijsnelheid, te vergelijken. In paragraaf 3.2 worden de resultaten van de variantieanalyse van de rechtgeleiding besproken.

De gebruikers van de stuursystemen zijn vooral geïnteresseerd in de reële afwijking van de rechtgeleiding in centimeters. Hiermee kan namelijk worden bepaald hoeveel schade er mogelijk kan ontstaan als gevolg van een kleinere nauwkeurigheid van het stuursysteem.

Om hierin inzicht te krijgen is er een frequentieverdeling gemaakt van de grootte van de afwijking en is de afstand tot de basislijn berekend waarbinnen 95% van de afwijkingen vallen.

#### *Invloed vlakligging op rechtgeleiding.*

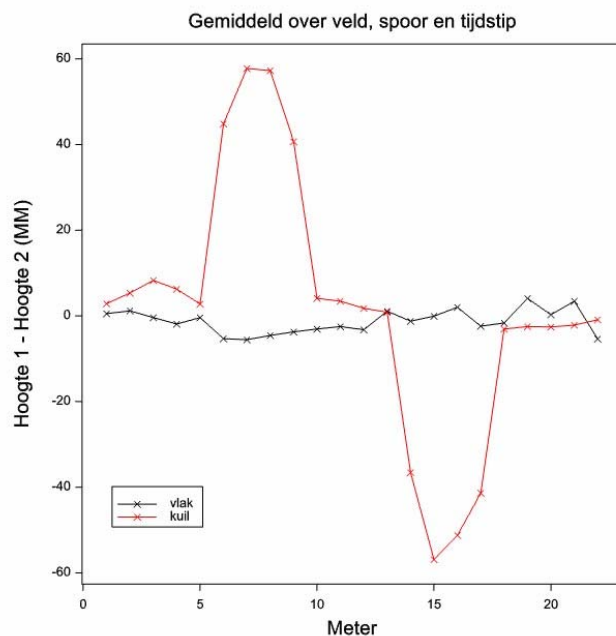
Tenslotte is het verband gelegd tussen de veranderingen in de helling van de tractor en de afwijkingen in de rechtgeleiding van de markeerschijf. Dit is grafisch uitgezet in paragraaf 3.3. Bij analyse bleek geen direct verband tussen de vlakligging en de afwijkingen van het markeerspoor deze analyse wordt daarom niet gepresenteerd.

### 3 Resultaten

De resultaten van de metingen van de helling van het spoor (berekend uit: HoogteSpoor1-HoogteSpoor2 ) worden besproken in paragraaf 3.1 vlakligging. In paragraaf 3.2 rechtgeleiding, worden de resultaten van de variantieanalyse van de afstanden van het markeerspoor tot een denkbeeldige ideale lijn parallel aan de basislijn gepresenteerd. In paragraaf 3.3 staat het resultaat van de berekening van het verband tussen helling van het spoor en de rechtgeleiding.

#### 3.1 Vlakligging

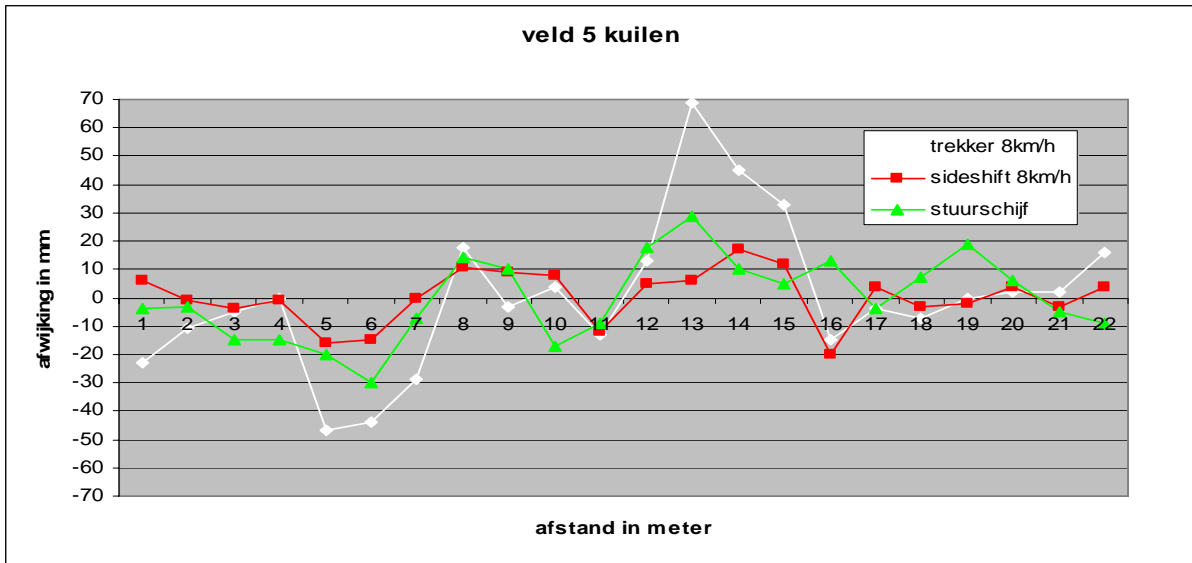
Op figuur 9 is de helling van het spoor dwars op de rijrichting weergegeven. De lijnen geven het gemiddelde van het hoogteverschil tussen spoor1 en spoor2 van de metingen voor en na berijden van alle velden weer. De rode lijn geeft de situatie weer van de sporen waarin een stukken zijn uitgegraven en de zwarte lijn van de situatie op de velden met een vlakke ligging. Bij de velden waar het spoor is uitgegraven was het de bedoeling om het spoor steeds op dezelfde plaats te verdiepen met 5 cm over een lengte van 3 meter. Op figuur 9 is goed te zien hoe dit tot welke helling dit heeft geleid. Als de tractor aan 1 kant 5 cm in de kuil zakt, betekent het dat de GPS ontvanger op de tractor 10 cm naar links of naar rechts kantelt. Het waterpas die aan het GPS ontvanger is gekoppeld moet voor veranderingen in de helling corrigeren. De helling bij de velden waar de sporen niet zijn uitgegraven (zwarte lijn) laten geen grote variatie zien. Gemiddeld blijven de afwijkingen van de 0 (waterpas) binnen +/- 5 mm. De helling tussen individuele paren waarnemingen in de sporen per veldje zijn bij de vlakke velden groter maar zijn < +/- 20 mm. De figuren per veldje van hoogteverschillen tussen de sporen van zowel rijbaan 1 als 2 zijn in bijlage 1 weergegeven.



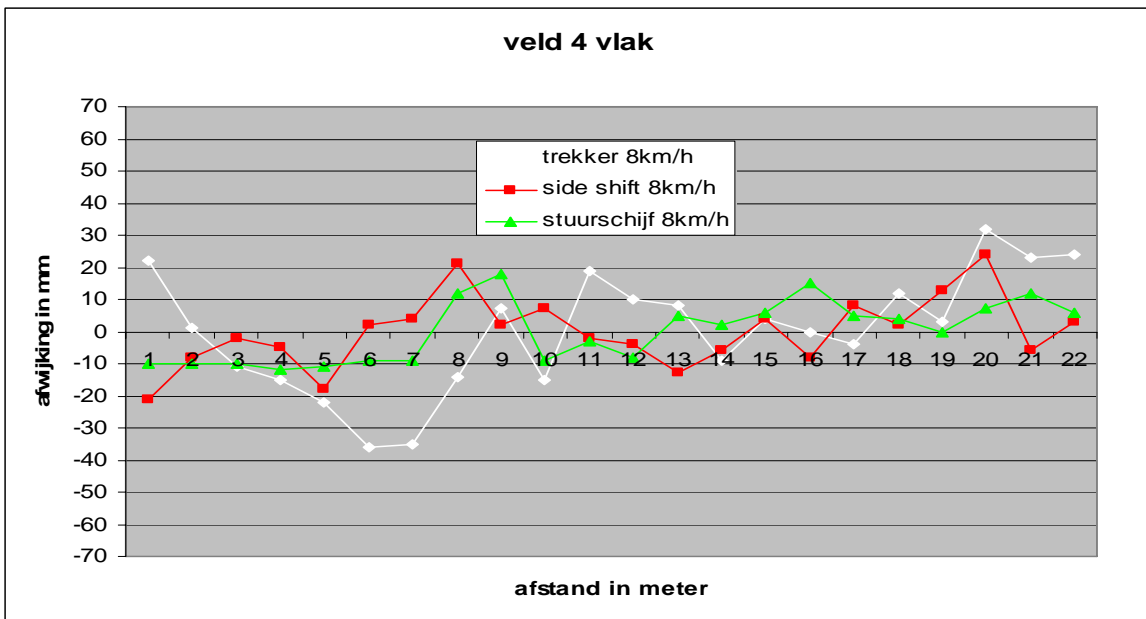
Figuur 9: Gemiddelde vlakligging over de object (gemiddeld over 3 velden).

#### 3.2 Afwijkingen rechtgeleiding

De figuren 10 en 11 laten zien hoe de rechtgeleiding wordt beïnvloed door de vlakligging. Beide figuren geven de afwijkingen van de basislijn weer bij de drie stuursystemen en een hoge snelheid (8 km/uur). In figuur 10 is de situatie weergegevens op een veld met grote verschillen tussen de hoogte van de sporen (veld 5 hobbels). Figuur 11 laat de rechtgeleiding zien bij een veld met een vlakke ligging (veld 4). De witte lijn (tractorbesturing) wijkt op beide velden het meeste af, met uitschieters van meer dan ongeveer 60 mm op het veld met kuilen en ruim 30 mm op het veld met een vlak spoor. De machine aansturing met side shift of stuurschijf, de rode en groene lijn, geven een veel kleinere afwijking van de basislijn. In de figuren een afwijking van maximaal 30 mm bij kuilen en maximaal 20 mm bij een vlak spoor. In de volgende paragraaf wordt de variantieanalyse besproken.



Figuur 10: De afwijkingen van de afstanden van de basislijn tot het markeerspoor op de 22 meetpunten op veld 5 met "kuilen" voor de drie stuursystemen bij 8 km/uur.



Figuur 11: De afwijkingen van de afstanden van de basislijn tot het markeerspoor op de 22 meetpunten op veld 4 met vlak spoor voor de drie stuursystemen bij 8 km/uur.

#### Variantie analyse

Van de gemeten afstanden tussen het spoor van de markeur en de basislijn is de variantie berekend. In onderstaande tabel 12 staat de variantie analyse hiervan.

Tabel 12: Analyse van de variantie van de afstanden van het RTK gestuurde markeerspoor tot een basislijn volgens drie stuurprincipes: GPS en stuurhydrauliek op tractor, GPS en besturing op machine Side Shift, GPS en besturing op machine Stuurschijf. Waarbij Object betekent 2 niveaus van vlakligging. Vlak en kuilen.

Source of variation	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F probability
Veld Stratum					
Object (vlakligging)	1	388393	388393	27.41	0.006
Residual	4	56675	14169	1.75	
Veld.*Units* stratum					
Snelheid	1	122511	122511	15.14	<.001
Stuursysteem	2	424310	212155	26.23	<.001
Object.Snelheid	1	100555	100555	12.43	0.002
Object.Stuursysteem	2	118241	59120	7.31	0.004
Snelheid.Stuursysteem	2	132555	66278	8.19	0.003
Object.Snelheid.Stuursysteem	2	99034	49517	6.12	0.008
Residual	20	161787	8089		
Total	35	1604062			

Uit de waarschijnlijkheid (F prob) blijkt dat de verschillen op alle niveaus zeer betrouwbaar te zijn. De invloed van vlakligging, snelheid en stuursysteem op de rechtgeleiding is zeer significant. Maar ook interacties zijn zeer significant. Dit betekent dat een stuursysteem dat slechter presteert, bij ongelijke ligging (kuiltjes) nog slechter presteert en bij hoge snelheden de grootste afwijkingen geeft. Dit zien we terug in onderstaande tabel 13.

In het algemeen geldt dat bovenstaande F-probability waarden wijzen op zeer sterke significantie bij waarden <0.001, sterk significante verschillen tussen 0.001 en 0.01, significante verschillen als de F-prob ligt tussen 0.01 en 0,05 en een aanwijzing geven dat er betrouwbare verschillen zijn tussen 0.05 en 0.1.

Dit betekent dat op alle niveaus er een zeer betrouwbare invloed is van de behandeling op de rechtgeleiding. Vlakligging, werksnelheid en stuursysteem verklaren de opgetreden verschillen tussen objecten. In onderstaande tabel 13 zijn de varianties bij de verschillende behandelingsvarianten weergegeven in mm. De LSD waarden geven marges aan waarbinnen de verschillen significant zijn. Tractor besturing wijkt steeds betrouwbaar af van besturing met side shift of stuurschijf. De variantie van de afwijking van de rechte basislijn gemiddeld over de stuursystemen bij een snelheid van 4 km/uur is 183 mm<sup>2</sup>, bij 8 km/uur is dat 299 mm<sup>2</sup>.

Bij vlakke ligging is de variantie betrouwbaar kleiner dan bij kuilen. De grootste afwijkingen in de rechtgeleiding treedt op bij tractorbesturing op het object met kuilen bij een snelheid van 8 km/uur.

Tabel 13 Variantie van afstanden (mm<sup>2</sup>) van meetpunten markeerspoor tot de basislijn

Snelheid	4km/h				8km/h			
	side shift	tractor	schijf	gem	side shift	tractor	schijf	gem
Object\stuursysteem								
Vlak	110	192	92	132	107	227	93	143
Kuilen	176	310	216	234	281	849	239	456
gemiddeld	143	251	154	183	194	538	166	299

LSD waarden: vlakligging (object) 110.2; Snelheid 62.5; Stuursysteem 76.6; object.snelheid 112.0; object.stuursysteem 124.1; snelheid.stuursysteem 108.3; object, stuursysteem snelheid 161.3.

De onderlinge verschillen tussen besturing met sideshift en stuurschijf zijn niet significant, de LSD is namelijk groter dan het onderlinge verschil.

De vraag die de gebruiker zich stelt zal veel praktischer van aard zijn dan de vraag of er verschillen zijn. Hij zal zich bijvoorbeeld afvragen: "hoe ver moet ik uit de plantrij blijven (met schoffels) om een mogelijk plantverlies te voorkomen? Daarom is uit de gegevens de afstand berekend waarbinnen de schoffel met

95% zekerheid niet komt. Dit is Bandbreedte genoemd. In onderstaande tabellen is de variantie analyse van de bandbreedte weergegeven.

*Tabel 14: Variantie analyse van de Bandbreedte (afstand tot de virtuele plantrij bij de gemeten variantie) bij een RTK gestuurde markeur volgens 3 stuurprincipes: GPS en stuurhydrauliek op tractor, GPS en besturing op machine side Shift, GPS en besturing op machine Stuurschijf. Waarbij Object betekent 2 niveaus van vlakligging. Vlak en kuilen.*

Source of variation	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F probability
Veld Stratum					
Object	1	1413.50	1413.50	37.80	0.004
Residual	4	149.58	37.50	0.96	
Veld.*Units* stratum					
Snelheid	1	299.44	299.44	7.69	0.012
Stuursysteem	2	1308.23	654.12	16.80	<.001
Object.Snelheid	1	202.55	202.55	5.20	0.034
Object.Stuursysteem	2	146.74	73.37	1.88	0.178
Snelheid.Stuursysteem	2	227.55	113.77	2.92	0.077
Object.Snelheid.Stuursysteem	2	162.58	81.29	2.09	0.150
Residual	20	778.79	38.94		
Total	35	4688.97			

Uit de waarschijnlijkheid (F prob) blijkt dat verschillen die optreden niet op alle niveaus betrouwbaar zijn. Wel zijn de hoofdeffecten zeer betrouwbaar. De invloed van stuursysteem, vlakligging en werksnelheid blijkt weer groot. Maar ook een aantal interacties zijn significant.

*Tabel 15: Variantie van afstanden (mm) van meetpunten markeurspoor tot de basislijn met een overschrijdingskans van 5%. In 95% van de gevallen blijft de afwijking kleiner of gelijk aan de gegeven afstand.*

snelheid	4km/uur				8km/uur			
	sideshift	tractor	schijf	gem	sideshift	tractor	schijf	gem
object/stuursysteem								
vlak	21	27	18	22	21	30	19	23
kuilen	26	35	29	30	32	58	31	40
gemiddeld	24	31	24	26	26	44	25	32

*LSD waarden: vlakligging (object) 5.66; Snelheid 4.34; Stuursysteem 5.31; object.snelheid 6.26; object.stuursysteem 7.46; snelheid.stuursysteem 7.52; object, stuursysteem snelheid 10.48.*

De bovenstaande bandbreedtes zijn afwijkingen in mm. Dit betekent dat er zowel links als rechts afgeweken kan worden. Een schoffel achter de tractor zal ten opzichte van de basislijn bijvoorbeeld 21mm naar links of naar rechts verschuiven (=42mm). Dit betekent met een zaai breedte van 50cm er in theorie geschoffeld kan worden met een schoffel breedte van 45,8mm (side shift 4km/h op een vlakke bodem).

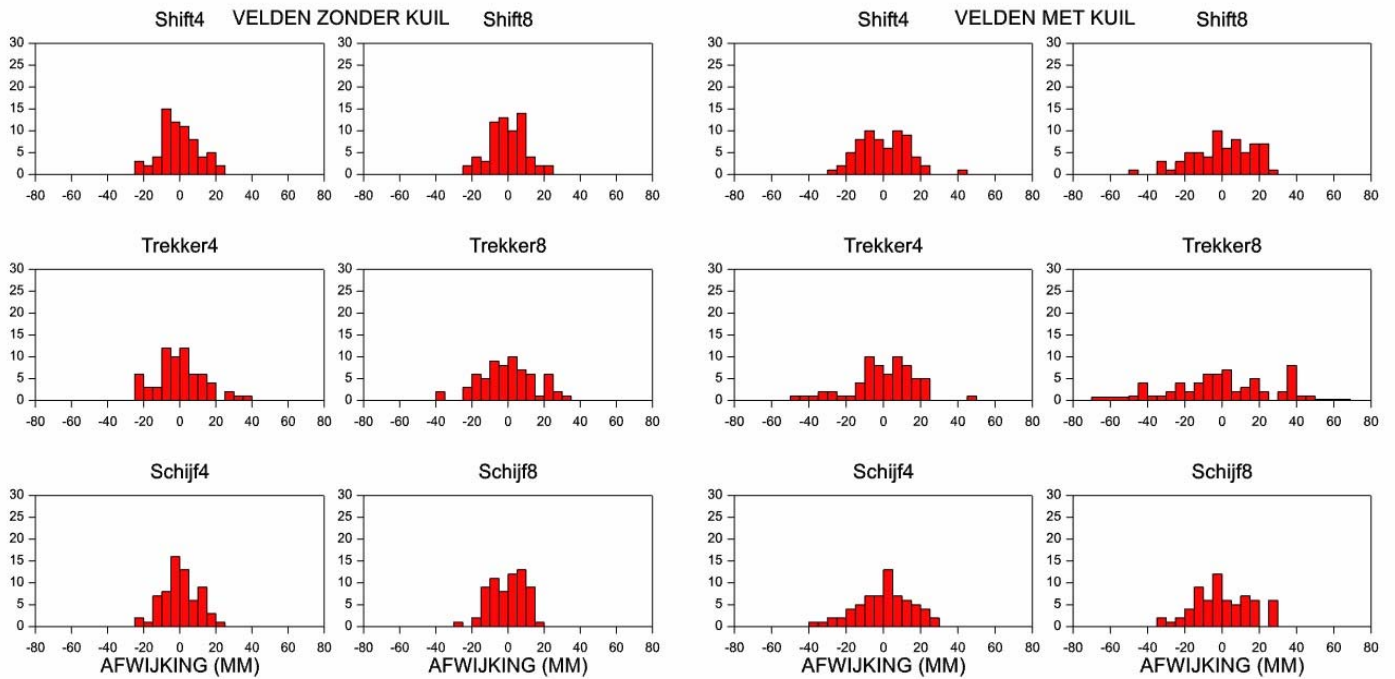
Net als bij de bespreking van tabel 15 komt ook hier naar voren dat tractorbesturing veel minder nauwkeurig werkt dan tractor besturing. De bandbreedte bij lage werksnelheid is +/- 31 mm bij tractor en 24 mm bij schijf of sideshift aansturing. Bij hoge snelheid bedraagt het +/- 44 mm bij tractor aansturing en 25 en 26 mm bij machine aansturing. De onnauwkeurigheid bij tractor aansturing op een hobbelig terrein met een snelheid van 8 km/uur bedraagt +/- 58 mm.

De invloed van werksnelheid op nauwkeurigheid van sturen is bij vlakke ligging van het terrein bij aansturing



van de machine heel klein. Alle waarden liggen dan op ca +/- 20 mm

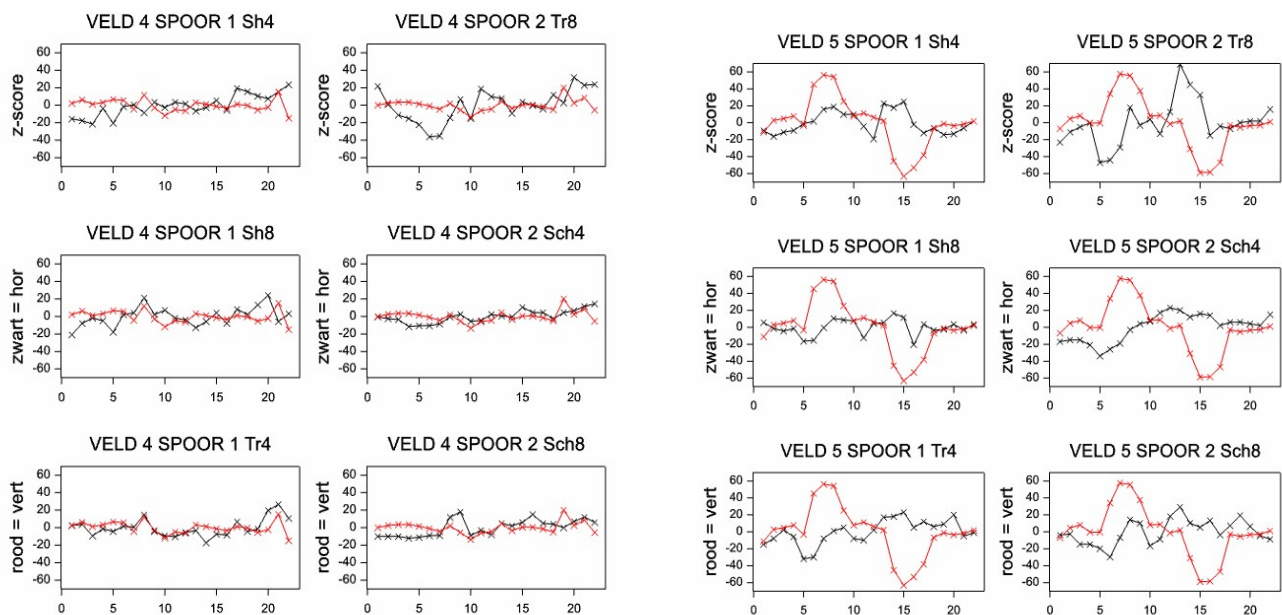
Op figuur 16 is de frequentie verdeling van de velden (vlak en kuilen) te zien. Ook deze afbeelding bevestigt dat alleen tractorsturing de meeste afwijking vertoont op zowel velden met als zonder kuil. Ook is te zien dat een hogere snelheid een negatieve invloed heeft op de rechtgeleiding, de histogrammen shift8, Tractor8 en Schijf8 zijn breder en vlakker dan de histogrammen 4km/h.



*Figuur 16: Frequentie verdeling van de afwijkingen van de basislijn bij drie RTK GPS stuursystemen side shift (shift), tractor (tractor) en Stuurschijf (schijf) bij twee werksnelheden 4 en 8 km/uur. De basislijn is positie 0.*

### 3.3 Verband tussen vlakligging en afwijkingen in rechtgeleiding

Ter illustratie van deze paragraaf zijn de metingen van vlakligging en rechtgeleiding van twee velden in onderstaande figuur 17 weergegeven. De figuren voor de overige velden staan in bijlage 2a en 2b. Veld 4 is een vlak veld en op veld 5 is uit elk wielspoor een stuk van 3 meter 60 mm diep uitgegraven. De rode lijn geeft het verschil in hoogte tussen het linker en het rechter wielspoor weer. Op veld 5 is duidelijk te zien waar het spoor is uitgegraven. De rode lijnen bij veld 4 hebben heel geringe hoogteverschillen. Bij deze weergave is het verband tussen de rode en de zwarte lijn interessant. De zwarte lijn geeft namelijk de afwijking van de parallel van de basislijn weer.



*Figuur 17: Hoogteverschillen op een vlak veld (veld 4) tussen linker en rechter wielspoor van de tractor bij alle behandelingen (—) en de afwijking van de basislijn van de schijfmarkeur (—) in mm. Verklaring objecten: Sh4, Sh8= tractor + side shift aansturing 4km/uur resp. 8km/uur; Tr4, Tr8 = tractor aansturing, 4km/uur resp 8 km/uur; Sch4, Sch8= tractor + stuurschijf aansturing 4km/uur resp. 8km/u.*

Ogenschoonlijk is er bij veld 4 geen verband tussen de vlakligging van het spoor en de afwijkingen van de parallel aan de basislijn. Het spoor kent kleine schommelingen naar links en rechts en de afwijkingen van de schijfmarkeur laten eenzelfde beeld zien. De afwijkingen liggen binnen +/- 20 mm. Bij de 6 figuren van veld 5 verlopen de afwijkingen veel grilliger. Bij tractor aansturing bij 8 km/uur worden de afwijkingen van de parallel van de basislijn zelfs even groot als het hoogteverschil in de sporen. Er zijn geen statistische verbanden berekend tussen de afwijken van de basislijn en de vlakligging.

## 4 Discussie

Hoge eisen aan de nauwkeurigheid van machineaansturing is de belangrijkste reden om in RTK GPS te investeren. Plaatsbepaling met RTK GPS geeft een nauwkeurigheid van plaatsbepaling met afwijkingen van minder dan 20 mm. Dit onderzoek gaat ervan uit dat de nauwkeurigheid van plaatsbepaling van de gebruikte RTK GPS ontvanger binnen de grens van 20 mm ligt. Nauwkeurige plaatsbepaling betekent niet automatisch dat ook de positie van werktuigen tijdens bewerkingen met dezelfde precisie wordt gestuurd. Voorwaarden waaraan moet worden voldaan bij precieze aansturing zijn:

- Tijdens het werk moet de positie van de RTK GPS ontvanger ten opzichte van het werktuig dat wordt aangestuurd constant zijn.
- Het stuurmechanisme, om de positie van het werktuig te corrigeren, moet het werktuig zo direct mogelijk aansturen.
- Speling tussen stuurinrichting en werktuig moet minimaal zijn.

Het onderzoek laat zien dat er grote variaties in nauwkeurigheid kunnen optreden bij sommigen varianten. Uit de metingen blijkt:

- Dat bij aansturing met Side shift en Stuurschijf de afwijkingen van de schijfmarkeur van de basislijn veel kleiner zijn dan bij aansturing van alleen de tractor.
- Oneffenheden, kuilen, verminderen de precisie van de besturing van het werktuig.
- Bij een hogere rijsnelheid neemt de precisie af.

Als ervan wordt uitgegaan dat de precisie van aansturing zodanig moet zijn dat de afwijkingen van de basislijn niet groter mag zijn dan 20 mm moeten we uit tabel 15 concluderen dat dit criterium in maar in een paar objecten met machineaansturing en vlakke ligging van het veld wordt bereikt. Bandbreedte, de afstand tot de basislijn waarbinnen 95% van de afwijkingen vallen, is de maat op basis waarvan de nauwkeurigheid wordt beoordeeld. De bandbreedte, verschilde niet significant tussen de twee onderzochte systemen van machineaansturing. Bij vlakke ligging varieerde de bandbreedte tussen +/- 18 mm en +/- 21 mm. Bij tractoraansturing was de bandbreedte +/- 27 mm bij 4 km/uur en +/- 30 mm bij 8 km/uur. Op de velden waar kunstmatig ongelijkheid is aangebracht liepen de afwijkingen bij tractor besturing op tot +/- 58 mm bij een werksnelheid van 8 km/uur. Ook bij machine aansturing liepen de afwijkingen op tot +/- 32 mm.

Uit de grote invloed van vlakligging kunnen we opmaken dat dit een belangrijke voorwaarde is voor precisiebesturing. De redenen waarom bij ongelijke ligging de nauwkeurigheid afneemt is voor de ontwikkeling van stuursystemen relevant.

Bij een extra RTK GPS antenne bij de side shift of stuurschijf is de aansturing direct gekoppeld aan de GPS positie. Directe aansturing van het werktuig verschilt op drie punten van aansturing via de tractor.

- De Hoogte van de RTK GPS ontvanger boven de grond
- De horizontale afstand tussen RTK GPS ontvanger en het stuurmechanisme
- De afstand tussen het feitelijke stuurmechanisme en het werktuig, de markeurschijf.

Uit de waarnemingen kan niet zonder meer worden opgemaakt welke invloed de positie van de RTK GPS ontvanger heeft. Bij ongelijke ligging beweegt de ontvanger bij dezelfde verschillen in vlakligging meer naarmate hij hoger is gemonteerd. De beweging van de GPS ontvanger verhoudt zich tot de ongelijkheid tussen de wielsporen als:

Verplaatsing GPS ontvanger = (hoogte GPS + maaiveld) / (spoorbreedte) x hoogteverschil tussen linker en rechterspoor.

Bij een spoorbreedte van 150 cm en een hoogte van ruim 300 cm beweegt de GPS ontvanger twee maal het hoogteverschil tussen de sporen. Het hoogte verschil tussen de sporen was maximaal 60 mm. Bij een abrupte overgang beweegt de GPS ontvanger in een fractie van een seconde 120 mm opzij. Is de ontvanger lager gemonteerd bv 190 dan is de zijwaartse beweging 76 mm.

Bij plotselinge bewegingen van de GPS ontvanger zal ook onmiddellijk een correctie volgen als de GPS ontvanger op het dak van de tractor staat, ca 300 cm voor de markeerschijf, corrigeert het stuursysteem met de voorwielen van de tractor waardoor theoretisch het werktuig te vroeg en eerst in tegengestelde richting beweegt.

Dit verklaart de reactie van het markeerspoor op het hoogteverschil tussen de wielsporen zoals de figuren 17 en in bijlage 2 laten zien. Maar er zijn waarschijnlijk nog andere oorzaken dan alleen de beweging van de GPS antenne en stuurcorrectie omdat er geen goed verband is tussen beide bewegingen.

Eén van deze oorzaken ligt in het abrupte karakter van de tractorbeweging. De plotselinge 'val' van 60 mm veroorzaakt een roterende beweging van de tractor dwars op de rijrichting. Wanneer het vallende wiel de grond raakt, wordt de verticale versnelling gestopt. Dit veroorzaakt een zijdelingse inverting van de rubber banden of zelfs een zijdelingse verschuiving van de gehele trekker. De mate van inverting of verschuiving hangt sterk af van het type band, starheid van de wangen en de bandenspanning.

Naast bovengenoemde factoren kan het systeem van correctie van de positie als gevolg van scheefhangen onnauwkeurigheden veroorzaken. Bij het SBGuidance systeem verloopt deze correctie op basis van een elektronische waterpas waarmee veranderingen in de helling dwars op de rijrichting worden betrokken bij stuurcorrectie. In hoeverre dit een rol kan spelen op de nauwkeurigheid is onbekend.

## 5 Conclusies

Bij aansturing met centimeter precisie op basis van RTK GPS plaatsbepaling kan de nauwkeurigheid van plaatsbepaling alleen worden overgebracht op het werktuig bij een vlakke ligging van het veld. Aandacht hiervoor bij de grond bewerking is een voorwaarde voor precieze aansturing.

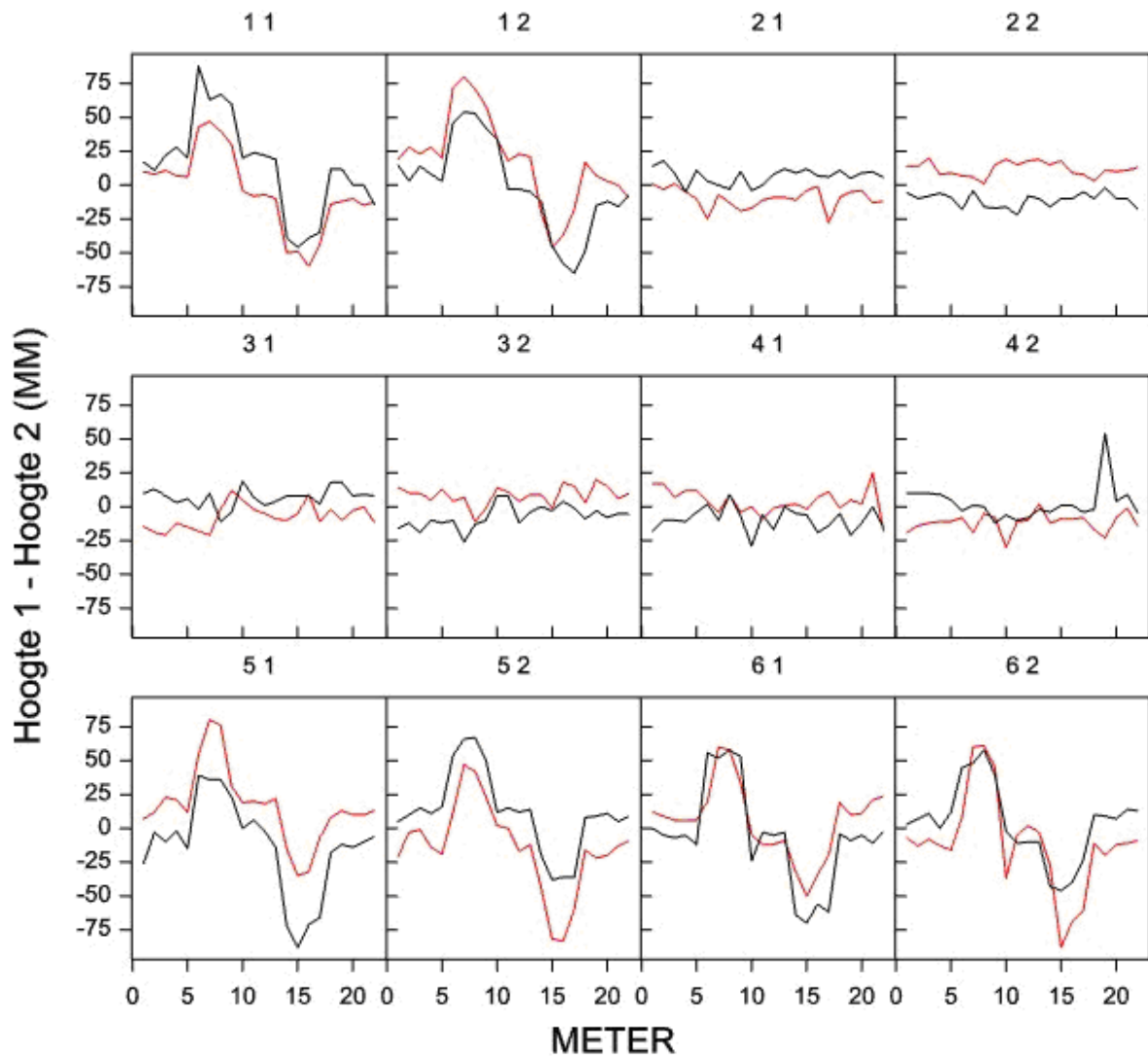
Aansturing van tractor en machine geeft een betrouwbaar betere precisie van aansturing. Er is daarbij geen verschil in methode van aansturing zoals dit onderzoek toegepast (schijfbesturing of side-shift).

Als er op een perceel toch ongelijkheden in ligging zijn kan met een lage werksnelheid en machine aansturing toch een redelijke nauwkeurigheid worden bereikt.

Bij het gebruik van machine aansturing moet de machine "ruimte" hebben om onafhankelijk van de tractor te worden gestuurd. De hefarmen mogen niet zijn gefixeerd. Bij toepassing van side-shift moet deze op een bok zijn geconstrueerd die met schijven in de grond is verankerd. De schijven voorkomen dat de stuurcilinder de tractor opzij drukt in plaats van het werktuig in de juiste positie brengt.

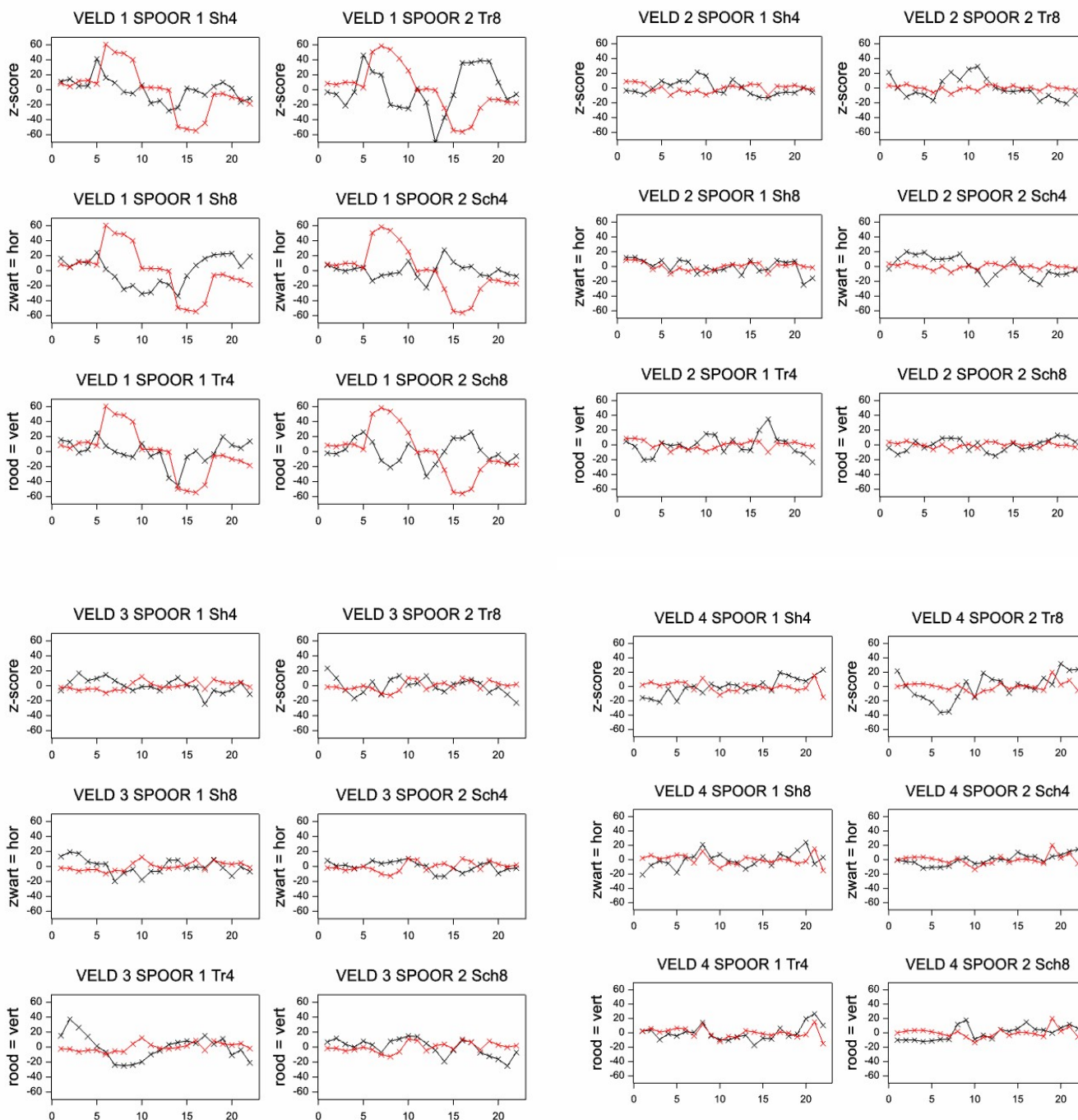
# Bijlage 1

## Ligging rijbaan; rijbaan 1/2



# Bijlage 2a.

Grafische weergave gegevens per veldje: hoogte verschil tussen linker en rechter wielspoor (—) en de afwijking van de parallel van de basislijn (—)



## Bijlage2b.

Grafische weergave gegevens per veldje: hoogte verschil tussen linker en rechter wielspoor (—) en de afwijking van de parallel van de basislijn (—)

