

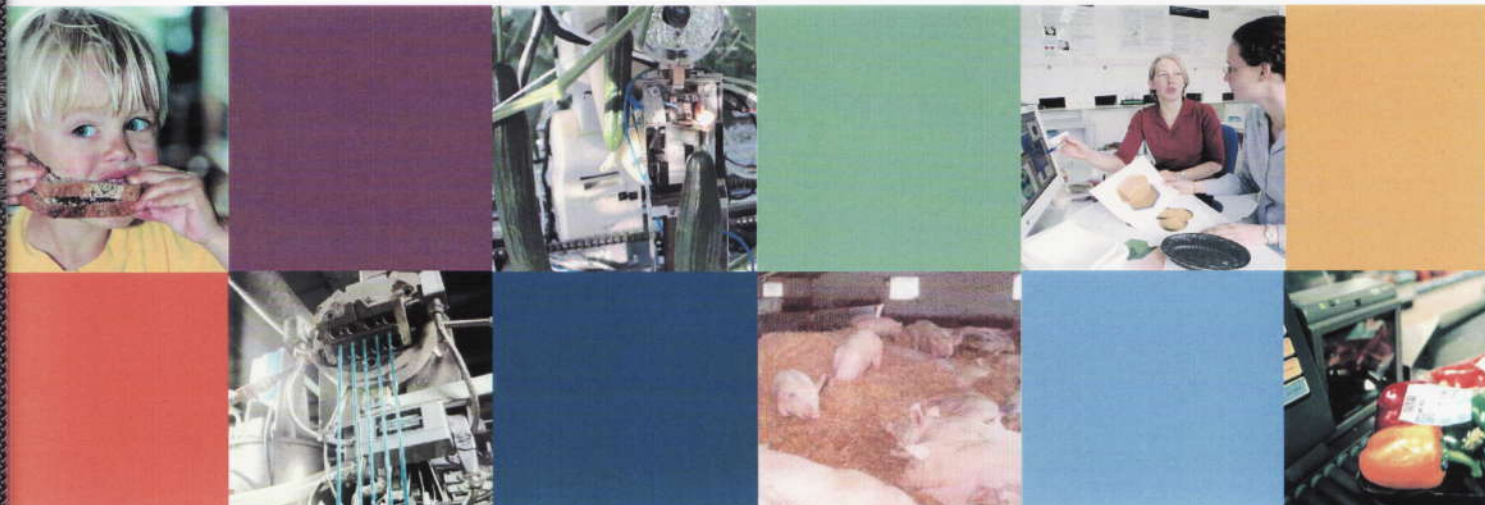
Rechtgeleiding: hoe recht is recht?

Ontwikkeling en validatie van een meetsysteem voor de bepaling van de nauwkeurigheid van



Ir. V.T.J.M. Achten
Dr. G.D. Vermeulen
Ing. B.A.J. van Tuijl
Ir. R.P. van Zuydam

Rapport 152



Rechtgeleiding: hoe recht is recht?

Ontwikkeling en validatie van een meetsysteem voor de bepaling van de nauwkeurigheid van rechtgeleidingssystemen

Ir. V.T.J.M. Achten
Dr. G.D. Vermeulen
Ing. B.A.J. van Tuijl
Ir. R.P. van Zuydam

Colophon

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van Strategische Expertise Ontwikkeling (SEO) en is mogelijk gemaakt door bijdragen van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV).

Wageningen, 4 mei 2004

Title	Rechtgeleiding: hoe recht is recht? Ontwikkeling en validatie van een meetsysteem voor de bepaling van de nauwkeurigheid van rechtgeleidingssystemen
Author(s)	V.T.J.M. Achten, G.D. Vermeulen, B.A.J. van Tuijl, R.P. van Zuydam
A&F number	152
ISBN-number	If applicable, insert ISBN-number
Date of publication	mei 2004
Confidentiality	non
Project code.	650-51614

Agrotechnology & Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: info.agrotechnologyandfood@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© Agrotechnology & Food Innovations 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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.

This report is authorised by: G.D. Vermeulen



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

Abstract

Rectilinear guidance systems can be very useful when applied in organic farming systems. Using these modern aids can increase the accuracy of agricultural field operations. Hoeing closely to the crop rows is one possible application that may reduce the amount of hours needed for manual weed control significantly.

Several rectilinear guidance systems designs exist; ranging from simple light bar steering assists to autonomous machine control. Measuring the linear accuracy of the various systems is not simple. Often the accuracy of the Global Positioning System (GPS) itself is quoted as an indication of the accuracy of the whole system.

In the past, several ways of measuring the linear accuracy of these systems was attempted. However, most of the measurement systems were either too laborious or too inaccurate. Therefore a new measurement system has been developed using LASER, GPS and image processing.

A LASER beam is directed along the vehicle's intended path. The deviations of the vehicle from this LASER beam are measured using a so-called 'laserbox', mounted on the vehicle. The LASER beam is projected on a semi-transparent acrylate plate and the position of the resulting spot is recorded with a webcam from the backside. Using image processing software, the center of the spot is determined, taking into account spot size and lens distortion. A GPS receiver, placed exactly above the acrylate plate, records the time and position of the measurement.

The system was tested by measuring the accuracy of 'AutoMate', a light-weight autonomous vehicle. The tests showed that the system is capable of recording the deviations from a straight line with millimeter-accuracy.

Keywords: guidance, accuracy measurement, GPS, LASER, image processing

Inhoudsopgave

Abstract	3
1 Inleiding	5
2 Methode	7
2.1 Componenten	7
2.2 Meetmethode	8
3 Resultaten	12
4 Discussie	13
5 Conclusies	14
Literatuur	15
Bijlagen	16

Door de jaren heen zijn diverse systemen ontwikkeld die om machines een taak te laten volgen. Met de introductie van zeer nauwkeurige GPS posities is het zelfs mogelijk om op basis van satellietgegevens machines automatisch te sturen. Een van de grootste uitdagingen op de markt is het mogelijk maken van een machine om te navigeren in een gebied met obstakels. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied.

In het verleden is op verschillende manieren de prestatie van dergelijke systemen gemeten. Niet alleen de nauwkeurigheid van de positie, maar ook de tijd die nodig is om de taak te voltooien. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied.

Het doel van dit onderzoek is de nauwkeurigheid van een zelfsturend navigatiesysteem te meten. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied. Dit kan worden gedaan door de machine te laten navigeren op basis van een kaart van het gebied.

1 Inleiding

Het toepassen van rechtgeleidingssystemen binnen de biologische landbouw biedt perspectieven. Met deze systemen kan een machine telkens weer een zelfde (rechte) lijn volgen. Hiermee wordt de nauwkeurigheid van bewerkingen vergroot waardoor er bijvoorbeeld kaarsrecht gezaaid kan worden. Vervolgbewerkingen, zoals mechanische onkruidbestrijding, kunnen langs dezelfde lijn worden uitgevoerd waardoor met grote precisie langs de gewasrij gewerkt kan worden. Door nauwkeurig te werken blijft er slechts een smal strookje weerszijde van de gewasrij onbewerkt. Omdat deze strook veelal handmatig wordt bewerkt kunnen arbeidsuren bespaard worden. De kosten en de beschikbaarheid van arbeid wordt vaak als problematisch ervaren. Methoden om de hoeveelheid arbeid te reduceren zijn dan ook zeer welkom.

Een andere toepassing van rechtgeleidingssystemen is de zogenaamde rijbanenteelt. Hier worden jaar op jaar dezelfde lijnen gevolgd bij zo mogelijk alle bewerkingen. Het systeem vraagt aanpassingen aan de mechanisatie maar biedt ook duidelijke voordelen. Omdat het gewas in niet bereden grond groeit zijn de omstandigheden (vochttoestand, bodemdichtheid, etc.) voor het gewas gunstig. Door de frequente berijding ontstaat in de rijbanen een verdichte laag waardoor een soort van verharde weg ontstaat die onder natte omstandigheden beter berijdbaar is. Hierdoor neemt het aantal werkbare dagen toe.

Door de jaren heen zijn diverse systemen ontwikkeld om machines een rechte lijn te laten volgen. Met de introductie van zeer nauwkeurige GPS ontvangers is het zelfs mogelijk om op basis van satellietsignalen machines met centimeterprecisie te sturen. Inmiddels zijn verschillende systemen op de markt die het mogelijk maken om een machine (semi-)autonoom te sturen. De rechtgeleidingsnauwkeurigheid van deze systemen is niet eenvoudig te meten. Vaak worden de specificaties van de GPS ontvanger gebruikt om een indicatie te geven van de nauwkeurigheid van het gehele systeem.

In het verleden is op verschillende manieren de precisie van dergelijke systemen gemeten. Naast low-tech benaderingen zoals het trekken van een streep op papier (van Zuydam *et al.*, 1995) zijn er ook high-tech benaderingen gekozen zoals 'LASER-tracking' (Freimann, 2000). Aan de meeste ontwikkelde meetsystemen kleven echter nadelen. Sommige meetsystemen zijn zeer bewerkelijk (in het opzetten en/of verwerken van een meting) maar daarentegen wel heel nauwkeurig; met andere meetsystemen kan snel data vergaard worden, maar de nauwkeurigheid laat te wensen over.

Het doel van dit onderzoek is de ontwikkeling van een doeltreffend meetsysteem voor de bepaling van de precisie van rechtgeleidingssystemen. Daarvoor moet het systeem met voldoende nauwkeurigheid (nauwkeuriger dan het rechtgeleidingssysteem zelf) meten en moet het resultaat van de meting op een relatief eenvoudig manier verwerkt kunnen worden.

In hoofdstuk 2 wordt het meetprincipe, de componenten en de werking van een nieuw te ontwikkelen meetsysteem beschreven. Om het nieuwe meetsysteem te testen zijn een aantal metingen verricht aan een licht autonoom voertuig. De proefopzet wordt aan het eind van hoofdstuk 2 toegelicht. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de metingen weergegeven. Besloten wordt met een discussie (hoofdstuk 4) en conclusies (hoofdstuk 5).

2.1 Componenten

Het ontwikkelde meetsysteem maakt gebruik van digitale beeldverwerking om de positie van de landbouw machine op het veld van de machine vast te leggen. Het meetsysteem bestaat uit een LAMR, een meetstation (de 'basistank') en een computer (laptop) en een GPS ontvanger. Het meetsysteem is schematisch afgebeeld in figuur 1.



Figuur 1: Schematische afbeelding van het ontwikkelde meetsysteem.



Figuur 2: Afbeelding van het licht autonoom voertuig.

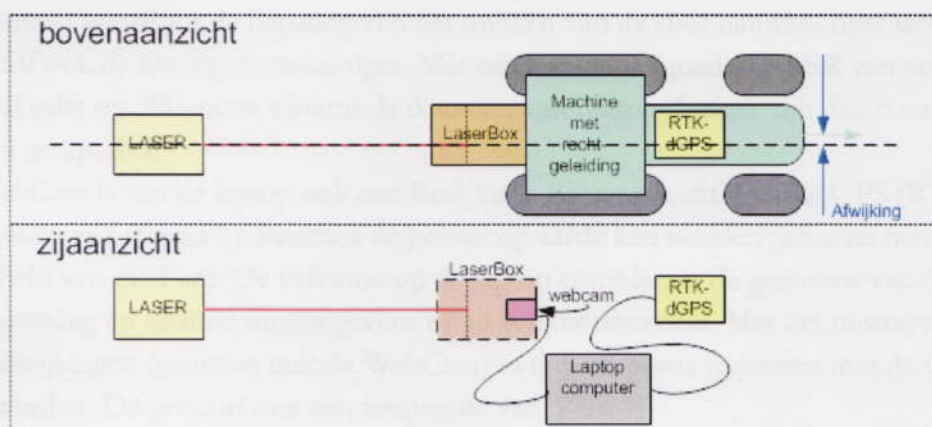
2 Methode

Om de nauwkeurigheid van een rechtgeleidingssysteem te meten wordt een LASER als uitgangspunt gebruikt. Een LASER zendt een parallelle lichtbundel uit. Deze lichtbundel zal op grotere afstand divergeren en verzwakken, afhankelijk van de kwaliteit en het vermogen van de LASER en van de weersgesteldheid. Wanneer de laserstraal een object raakt, wordt op dit object een zogenaamde 'spot' waargenomen. De spotgrootte is afhankelijk van de divergentie van de bundel. Een kwalitatief goede LASER kan gemakkelijk een nauwelijks divergerende en goed waarneembare bundel uitzenden over een afstand van minimaal 300 meter. De spotgrootte blijft dan beperkt tot 1 á 2 cm.

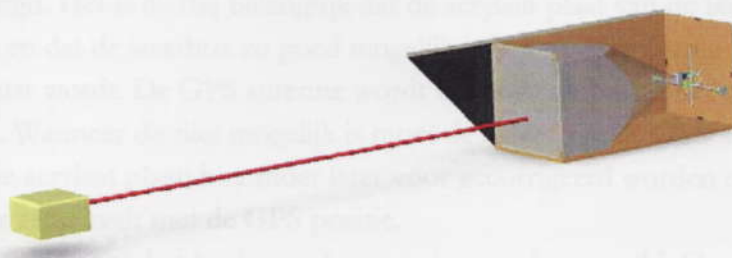
De laserstraal wordt precies over de door een machine te volgen rechte lijn gericht. Op de machine die de rechte lijn volgt kan de laserspot in een opgebouwde 'laserbox' worden waargenomen. Wanneer de machine slingert zal de positie van de spot in de laserbox veranderen. Om de nauwkeurigheid van het rechtgeleidingssysteem te bepalen moet de positie van de spot in de laserbox in tijd en plaats vastgelegd worden.

2.1 Componenten

Het ontwikkelde meetsysteem maakt gebruik van digitale beeldverwerking om de positie van de laserstraal ten opzichte van de machine vast te leggen. Het meetsysteem bestaat uit: een LASER, een meetkast (de 'laserbox'), een computer (laptop) en een GPS ontvanger. Het meetsysteem is schematisch afgebeeld in figuur 1.



Figuur 1 Boven- en zijaanzicht van het ontwikkelde meetsysteem.



Figuur 2 Schematische weergave van de laserbox.

In het bovenaanzicht (figuur 1) is de te volgen rechte lijn weergegeven met een stippellijn. De LASER is precies over deze lijn gericht. Aan de achterzijde van de machine is de laserbox (figuur 2) bevestigd. De laserbox is in feite een houten kist met daarin een semi-transparante acrylaat plaat. Het laserlicht vormt een spot aan de voor- en achterzijde van de acrylaat plaat. De grootte van de plaat is 50x50 cm zodat afwijkingen kleiner dan 25 cm in hoogte en breedte opgevangen worden op de plaat. In de doos is een camera ('WebCam') gemonteerd aan een verstelbare constructie. Aan de camera is een PC gekoppeld met beeldverwerkingssoftware waarmee de digitale beelden van de camera on-line verwerkt kunnen worden. Het beeldformaat van de WebCam is 640 pixels horizontaal. Daarmee is in principe een resolutie van 0,78 mm/pixel haalbaar. Dit maakt het mogelijk om rechtgeleidingssystemen op millimeterniveau te beoordelen. De acrylaat plaat laat relatief weinig licht door waardoor de binnenzijde van de laserbox vrij donker is. De spot aan de binnenzijde van de box is relatief helder en dus ook gemakkelijk te vinden met digitale beeldverwerking. Door te corrigeren voor lensvervorming, grootte van de spot en de afstand van de camera tot de acrylaat plaat kan de positie van de laserbox (en de machine) ten opzichte van de laserstraal on-line berekend worden.

De LASER zorgt voor een kaarsrechte referentielijn. Door verstrooiing in de atmosfeer zal de lichtbundel enigszins verzwakken en divergeren. Dicht bij de LASER vormt de LASER een kleine spot en wanneer de afstand groter wordt, wordt deze spot ook steeds groter. Hoewel de beeldverwerkingssoftware het midden van de spot bepaald, is het van belang om een zo geconcentreerd mogelijke spot te hebben. Een scherpe parallelle lichtbundel zorgt namelijk voor een goed contrast waardoor de bepaling van het midden van de spot nauwkeuriger wordt; hiermee wordt ook de meting nauwkeuriger. Met een kwalitatief goede LASER van voldoende vermogen zal zelfs op 300 meter afstand de diameter van de spot kleiner zijn dan 3 cm; dit is voor dit doel acceptabel.

Naast de WebCam is aan de laptop ook een Real Time Kinematic-differential GPS (RTK-dGPS) ontvanger gekoppeld (figuur 1) waarmee de positie op aarde kan worden gemeten met een nauwkeurigheid van ca. 1 cm. De software op de laptop combineert de gegevens van de GPS en de beeldverwerking en slaat de meetgegevens op in een meetbestand. Met het meetsysteem kunnen de afwijkingen (gemeten met de WebCam) in tijd- en plaats (gemeten met de GPS) vastgelegd worden. Dit gebeurt met een frequentie van 5 Hz.

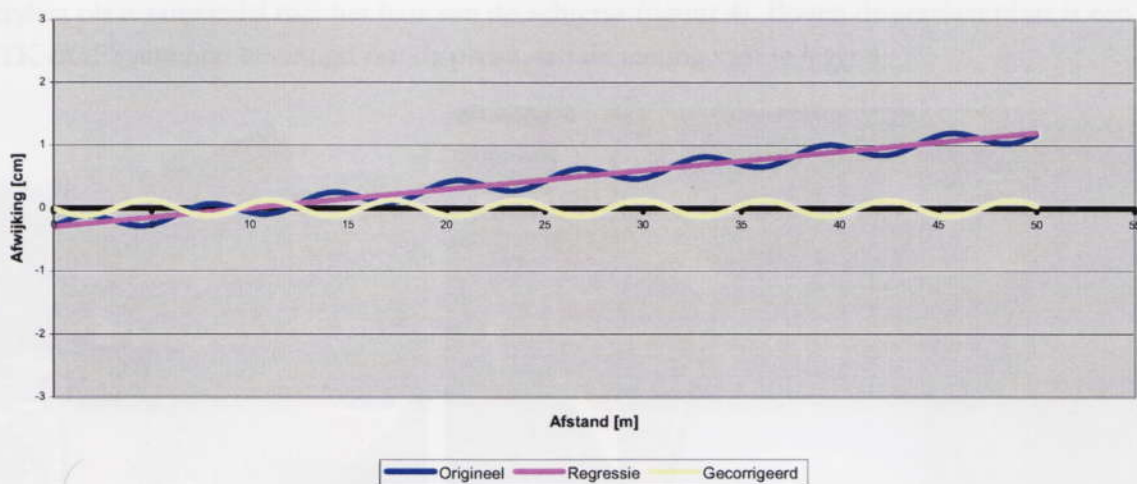
2.2 Meetmethode

Om de nauwkeurigheid van een rechtgeleidingssysteem te bepalen wordt de laserbox aan de machine bevestigd. Het is hierbij belangrijk dat de acrylaat plaat van de laserbox loodrecht op de rijrichting staat en dat de laserbox zo goed mogelijk in het midden (van achteren gezien) van de machine geplaatst wordt. De GPS antenne wordt zo mogelijk boven het midden van de acrylaat plaat bevestigd. Wanneer dit niet mogelijk is moet de offset van de GPS antenne gemeten worden t.o.v. de acrylaat plaat; hier moet later voor gecorrigeerd worden omdat de vastgelegde plaats niet meer samenvalt met de GPS positie.

De machine wordt nu aan het begin van het te volgen pad opgesteld. Omdat de hoogte van de laserbox 50 cm is moet het pad redelijk vlak zijn zodat de spot van de LASER gedurende het

afleggen van het gehele traject op de acrylaat plaat te zien is. De LASER wordt vervolgens aan het begin van het te volgen meettraject opgesteld zodat de spot van de LASER midden in de laserbox schijnt. Vervolgens wordt de machine naar het einde van het traject geleid en wordt de LASER eventueel bijgesteld zodat gedurende het gehele traject de laserstraal in de laserbox valt. Om een meting uit te voeren wordt de machine naar het begin van het meettraject terug gereden. Op de laptop wordt de meetsoftware gestart. De machine wordt vervolgens met behulp van het rechtgeleidingssysteem naar het einde van het traject gereden. Tijdens de rit legt de meetsoftware de meetgegevens vast in een meetbestand. Op het eind van het traject wordt de meting op de laptop beëindigd.

In bijvoorbeeld Microsoft Excel kunnen nu op eenvoudige wijze de meetresultaten grafisch in beeld worden gebracht. In een grafiek kan de plaats van de spot tegen de afgelegde weg of de tijd uitgezet worden. Omdat het in de praktijk vrijwel onmogelijk is om de LASER exact over het te volgen pad te richten is het zeer waarschijnlijk dat er zich een offset (omdat de LASER niet precies in het midden van het pad stond of de laserbox was niet precies in het midden van de machine gemonteerd) en een trend (de laserstraal was niet parallel aan het pad) in de gemeten waarden bevinden. Om hiervoor te corrigeren wordt ervan uitgegaan dat de machine het bedoelde rechte pad volgt met een gemiddelde afwijking van nul. Met behulp van lineaire regressie kan dan gecorrigeerd worden voor offset en trend; figuur 3 geeft dit weer.



Figuur 3 Correctie van de gemeten lijn voor offset en trend.

De x-as in figuur 3 stelt het te volgen pad voor. De blauwe lijn geeft de afwijking van de machine weer ten opzichte van het midden van de laserbox. De paarse lijn geeft de regressielijn van de blauwe lijn weer. Uit de figuur blijkt dat er sprake is van een offset omdat het snijpunt van de regressielijn met de x-as in het meettraject ligt. Wanneer er geen sprake van offset zou zijn, bevindt het snijpunt van de regressielijn met de x-as op de plaats van de LASER. Naast een offset is er ook sprake van een trend omdat de paarse regressielijn niet parallel is aan de x-as.

Om te corrigeren voor offset en trend wordt de regressielijn van de originele blauwe lijn afgetrokken. Dit resulteert in de gele lijn die de gecorrigeerde afwijking van de machine ten opzichte van het te volgen pad weergeeft.

2.3 Testen van het systeem; proefopzet

Om het ontwikkelde meetsysteem te testen zijn proeven uitgevoerd op het IMAG terrein aan de Mansholtlaan te Wageningen met 'AutoMaatje'. AutoMaatje is een licht autonoom voertuig dat ontwikkeld is voor (onder meer) het nauwkeurig schoffelen van diverse gewassen.

De nauwkeurigheid van AutoMaatje is beoordeeld op asfalt en op grasland met zowel een hoge als een lage rijsnelheid. De metingen zijn in vijf herhalingen uitgevoerd. In tabel 1 zijn de meetobjecten weergegeven.

Tabel 1 Objecten gebruikt voor de bepaling van de nauwkeurigheid van AutoMaatje.

Object nr.	Ondergrond	Snelheid	Aantal herhalingen
1	asfalt	laag (0,75 m/s)	5
2	asfalt	hoog (1,25 m/s)	5
3	gras	laag (0,75 m/s)	5
4	gras	hoog (1,25 m/s)	5

De laserbox werd met lijklemmen onder het AutoMaatje bevestigd zodat de semi-transparante acrylaat plaat samenviel met het hart van de achteras (figuur 4). Boven de acrylaat plaat is een RTK-dGPS antenne bevestigd om de plaats van de meting vast te leggen.



Figuur 4 De bevestiging van de laserbox aan AutoMaatje. In de rechtse figuur is de spot van de LASER op de acrylaat plaat waar te nemen.

Omdat het AutoMaatje relatief eenvoudig te programmeren is, is eerst de LASER opgesteld. Met behulp van de RTK-dGPS zijn twee punten in de lijn van de LASER gemeten; één dichtbij de LASER en één op het einde van het meettraject. Met de gemeten punten is een zodanige route

geprogrammeerd dat het AutoMaatje op de heenweg het ruim 100 meter lange meettraject volgt, dan terug rijdt, vervolgens het meettraject weer te volgt, enzovoort. Doordat de route een gesloten lus was kon relatief snel een aantal metingen worden uitgevoerd.



Figuur 5 De meting op gras. In de linker figuur bevindt het AutoMaatje zich aan het begin van het meettraject; op de rechter figuur is de meting voltooid.

Naast een grafische weergave zijn de resultaten van de metingen ook in tabel 2 weergegeven. Als maat voor de nauwkeurigheid kunnen diverse criteria gebruikt worden: de gemiddelde (absolute) afwijking, de standaardafwijking, de maximumafwijking, de 95- en 99 percentiel waarden en het percentage afwijkingen kleiner dan één centimeter gebruikt.

Tabel 2 De meetresultaten van AutoMaatje in tabelvorm. Per object zijn het aantal meetpunten, de gemiddelde afwijking, de standaard afwijking, de maximum afwijking, de 95- en 99 percentiel waarden en het percentage afwijkingen kleiner dan één centimeter weergegeven.

Object	Aantal meetpunten	Gemiddelde afwijking (cm)	Standaard afwijking (cm)	Maximum afwijking (cm)	95 percentiel (cm)	99 percentiel (cm)	Afwijking < 1 cm (%)
1	4120	0,67	0,49	2,65	1,85	2,01	75,30
2	4302	1,13	0,95	6,75	2,71	4,20	57,10
3	3454	0,95	0,75	4,71	2,83	3,08	62,90
4	3816	1,14	0,87	5,48	2,85	3,94	52,30

Uit tabel 2 blijkt dat de nauwkeurigheid afneemt bij hogere snelheden en dat ook een ouder object leidt tot grotere afwijkingen van het geplande pad.

3 Resultaten

In bijlagen 1, 2, 3 en 4 worden de resultaten van de metingen weergegeven van resp. objecten 1, 2, 3 en 4 (zie tabel 1). De afwijkingen van de vijf herhalingen zijn zowel afzonderlijk als in één figuur weergegeven. De grafieken geven een duidelijke weergave van de afwijkingen van AutoMaatje op het meettraject. Opvallend is de slingerende beweging van het voertuig rond het te volgen pad. Dit wordt veroorzaakt door het aan/uit type stuurschuif van het AutoMaatje; die zorgt voor vrij forse stuurcorrecties. Naast de laagfrequente slingerbeweging is ook hoogfrequente ruis in de grafieken waar te nemen. Deze wordt veroorzaakt door het trillen van het voertuig en oneffenheden in het te volgen pad. Omdat het meettraject voor de objecten 3 en 4 (gras) minder vlak is dan het traject voor objecten 1 en 2 (asfalt) is hier dan ook meer ruis in de grafieken te vinden.

De laatste grafiek in de bijlagen geeft alle herhalingen weer. Omdat op de x-as de afstand is weergegeven kunnen afwijkingen die afhankelijk zijn van de plaats op het meettraject worden waargenomen. Zo zijn de afwijkingen in de figuren 23 en 29 op ca. 40 meter van het meettraject allemaal naar rechts (negatief). Dit is hoogstwaarschijnlijk een gevolg van een terreinoneffenheid in het meettraject.

Naast een grafische weergave zijn de resultaten van de metingen ook in tabel 2 weergegeven. Als maat voor de nauwkeurigheid kunnen diverse criteria gebruikt worden; de gemiddelde (absolute) afwijking, de standaardafwijking, de maximumafwijking, de 95- en 99 percentiel waarden en het percentage afwijkingen kleiner dan één centimeter gebruikt.

Tabel 2 De meetresultaten van AutoMaatje in tabelvorm. Per object zijn het aantal meetpunten, de gemiddelde afwijking, de standaard afwijking, de maximum afwijking, de 95- en 99 percentiel waarden en het percentage afwijkingen binnen één centimeter weergegeven.

Object	Aantal meetpunten	Gemiddelde afwijking (cm)	Standaard afwijking (cm)	Maximum afwijking (cm)	95 percentiel (cm)	99 percentiel (cm)	Afwijkingen binnen 1 cm (%)
1	4130	0.67	0.49	2.46	1.63	2.01	76.90
2	4302	1.13	0.95	6.79	2.91	4.20	57.10
3	5864	0.93	0.75	4.71	2.43	3.08	62.80
4	5838	1.14	0.87	5.49	2.83	3.84	52.38

Uit tabel 2 blijkt dat de nauwkeurigheid afneemt bij hogere rijsnelheden en dat ook een oneffen terrein leidt tot grotere afwijkingen van het geplande pad.

4 Discussie

Door de GPS ontvanger en de beeldverwerking is het systeem in staat om de afwijking van de machine tijd- en plaatsgebonden vast te leggen. Omdat een rechtgeleidingssysteem de machine over een (rechte) lijn ter hoogte van het grondvlak zou moeten geleiden, zou ook op het grondvlak gemeten moeten worden. Omdat het onmogelijk is de laserbox op deze hoogte te plaatsen kunnen verstoringen ontstaan doordat de machine heen en weer beweegt bij het rijden over oneffen terrein. De laserbox meet dan een afwijking terwijl de machine een rechte lijn volgt. Het is daarom van belang om de laserbox zo laag mogelijk te bevestigen en een relatief vlak meettraject te kiezen.

Daarnaast zijn meettrajecten met een hoogteverschil van meer dan 50 (cm) ongeschikt omdat de laserstraal dan buiten de laserbox zal vallen. Met een verstelbare (omhoog/omlaag) LASER (standaard) zou dit ondervangen kunnen worden mits deze absoluut spelingsvrij is.

Het karakteriseren van de nauwkeurigheid van een rechtgeleidingssysteem kan op verschillende manieren. In tabel 2 van hoofdstuk 3 worden de gemiddelde (absolute) afwijking, de standaardafwijking, de maximumafwijking, de 95- en 99 percentiel waarden en het percentage afwijkingen kleiner dan één centimeter gebruikt. De vereiste nauwkeurigheid van een rechtgeleidingssysteem is sterk afhankelijk van de toepassing en het is dus moeilijk om één van deze kengetallen aan te duiden als de maat van nauwkeurigheid voor dergelijke systemen.

Wanneer een automatische verwerking en het plaatsgebonden vastleggen van de meetgegevens van ondergeschikt belang zijn, kunnen ook low-tech varianten van het meetsysteem ontwikkeld en gebruikt worden. De high-tech laserbox zou vervangen kunnen worden door een bord met een raster van bijvoorbeeld één bij één centimeter. Dit bord kan eenvoudig achter op een machine te geplaatst worden. De laserspot zal gedurende het meettraject over het raster verschuiven. Door een (digitale) videocamera op het bord te richten kan de afwijking worden vastgelegd. De video kan naderhand geanalyseerd worden door op bijvoorbeeld vaste tijdsintervallen de afwijking af te lezen en in tabelvorm vast te leggen. Het verwerken van de gegevens zal aanzienlijk meer tijd in beslag nemen en de plaats van de meting wordt niet vastgelegd. Het vastleggen van de plaats van de meting zou eventueel mogelijk zijn door een afstandsmeter mee te filmen in een hoek van het beeld. Het 'handmatig' verwerken van de beelden is echter tijdrovend en foutgevoelig. Het schatten van het middelpunt van een spot met een diameter van ca. 2 cm met millimeterprecisie kan erg lastig zijn.

5 Conclusies

Met het ontwikkelde meetsysteem kan op relatief eenvoudige wijze de precisie van diverse rechtgeleidingssystemen objectief beoordeeld worden. Het systeem heeft een meetnauwkeurigheid van ?? één millimeter en meet met een frequentie van 5 Hz. De plaats en tijd van de meting worden vastgelegd met centimeter- en millisecondenprecisie met behulp van een RTK-dGPS ontvanger.

Om de metingen met het meetsysteem uit te kunnen voeren moet het meettraject redelijk vlak zijn om te voorkomen dat de laserstraal buiten de laserbox valt. Meettrajecten met een hoogteverschil van meer dan 50 cm zijn ongeschikt. Uit de testresultaten blijkt dat het ontwikkelde systeem goed functioneert en in staat is om de afwijkingen van rechtgeleidingssystemen gedetailleerd in kaart te brengen.

Literatuur

- Freimann, R., 2000. Investigation of Position accuracy of an autonomous, off-road vehicle navigation. AgEng2000, Warwick, Verenigd Koninkrijk.
- Zuydam, R.P. van, C. Sonneveld & H. Naber, 1995. Weed control in sugar beet by precision guided implements, Crop protection Vol. 14, No 4. pp. 335-340.



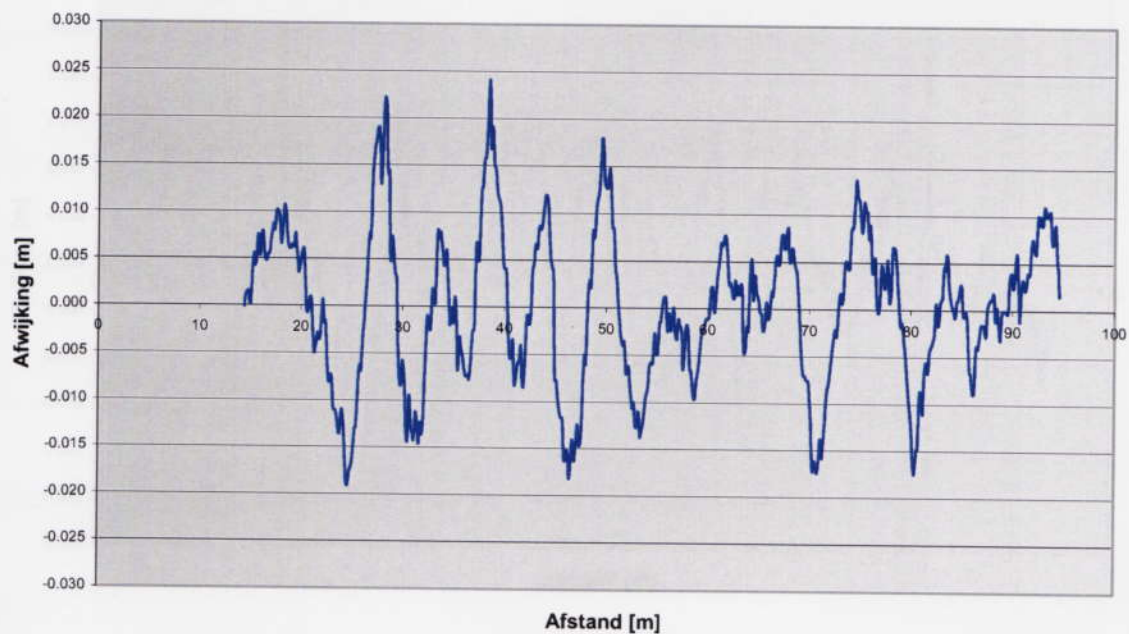
Figure 6: De afwijking van de wielbelasting op de linker wiel (in kg) over tijd (in s).



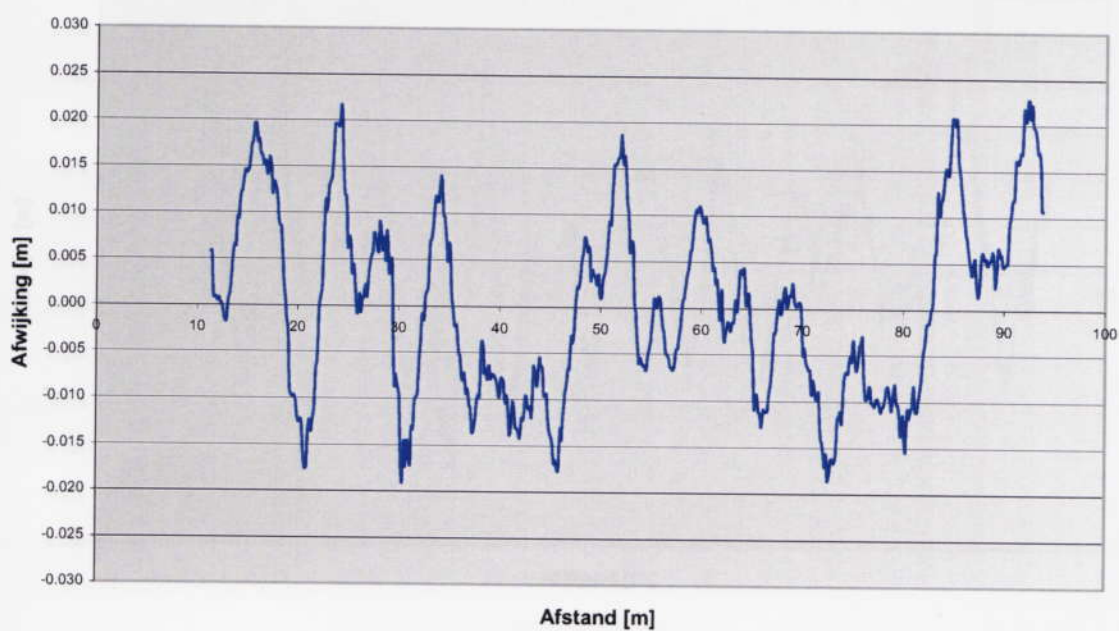
Figure 7: De afwijking van de wielbelasting op de rechter wiel (in kg) over tijd (in s).

Bijlagen

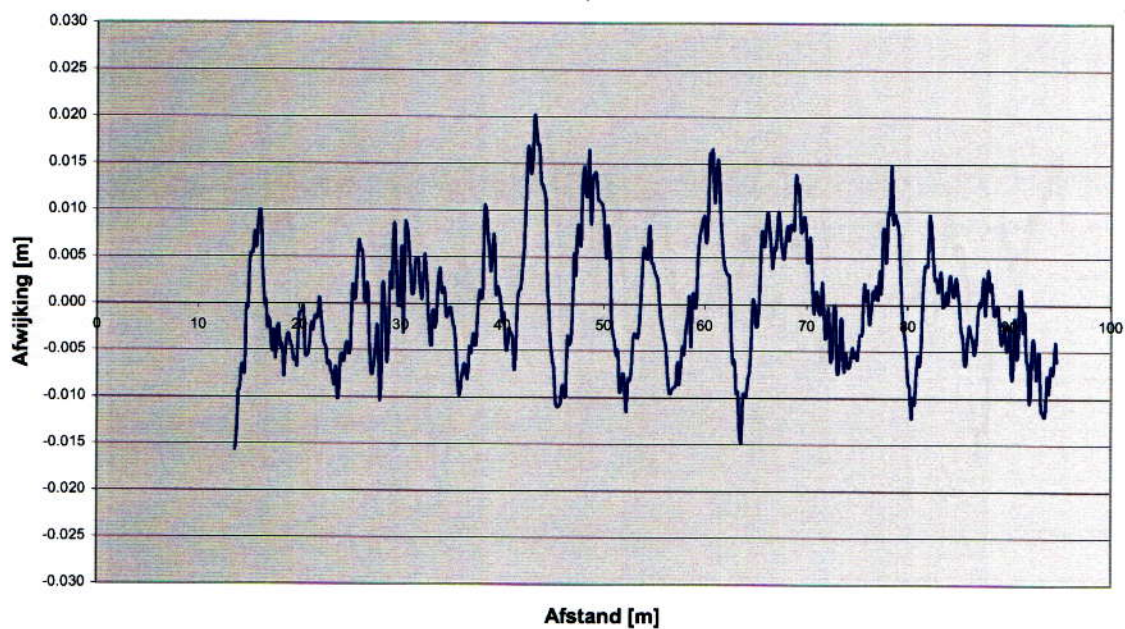
Bijlage 1 Meetresultaten van AutoMaatje op object 1 (asfalt, langzaam)



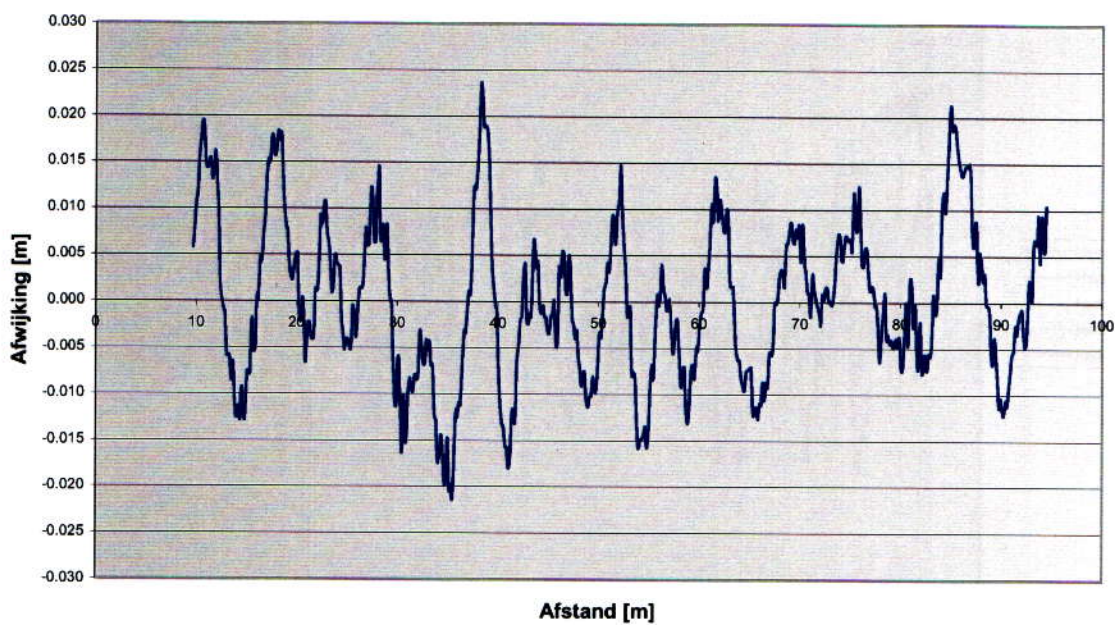
Figuur 6 De afwijking van AutoMaatje op object 1; herhaling 1.



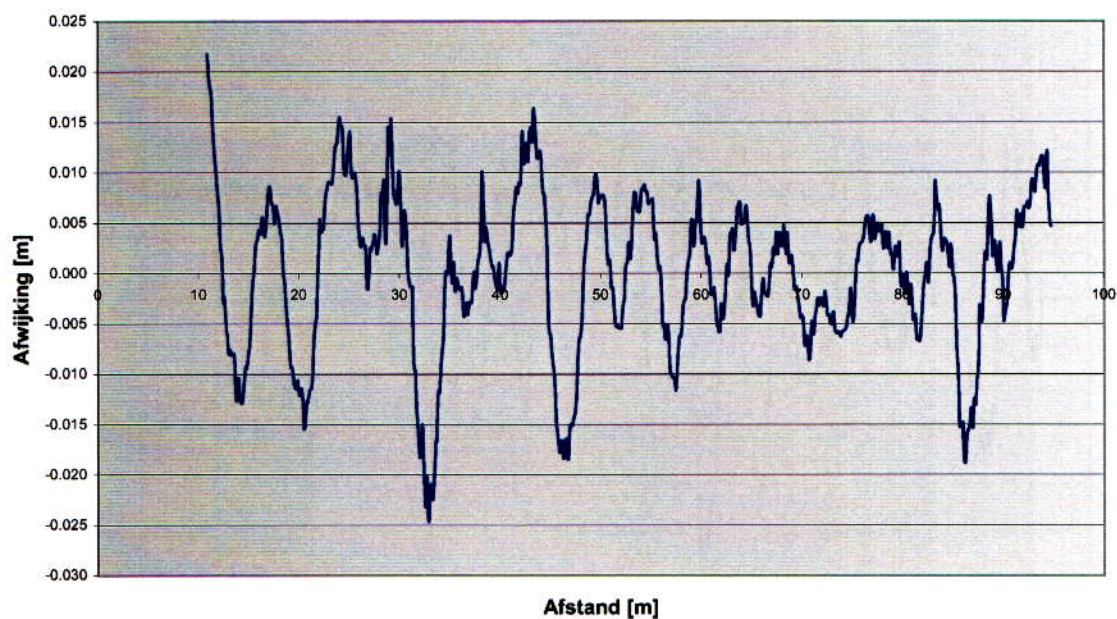
Figuur 7 De afwijking van AutoMaatje op object 1; herhaling 2.



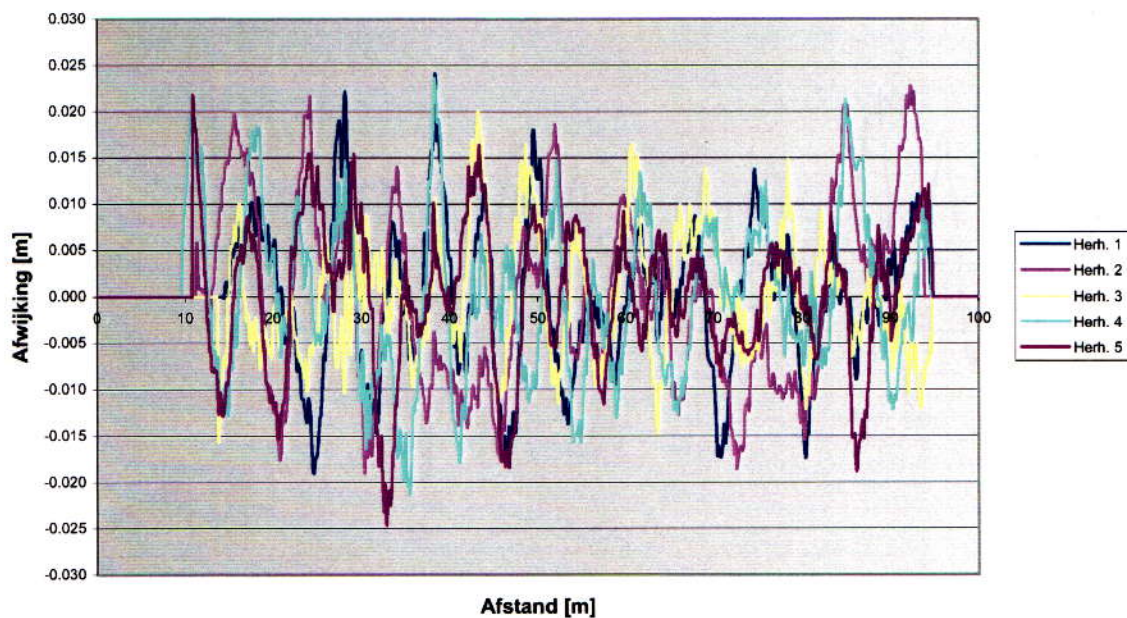
Figuur 8 De afwijking van AutoMaatje op object 1; herhaling 3.



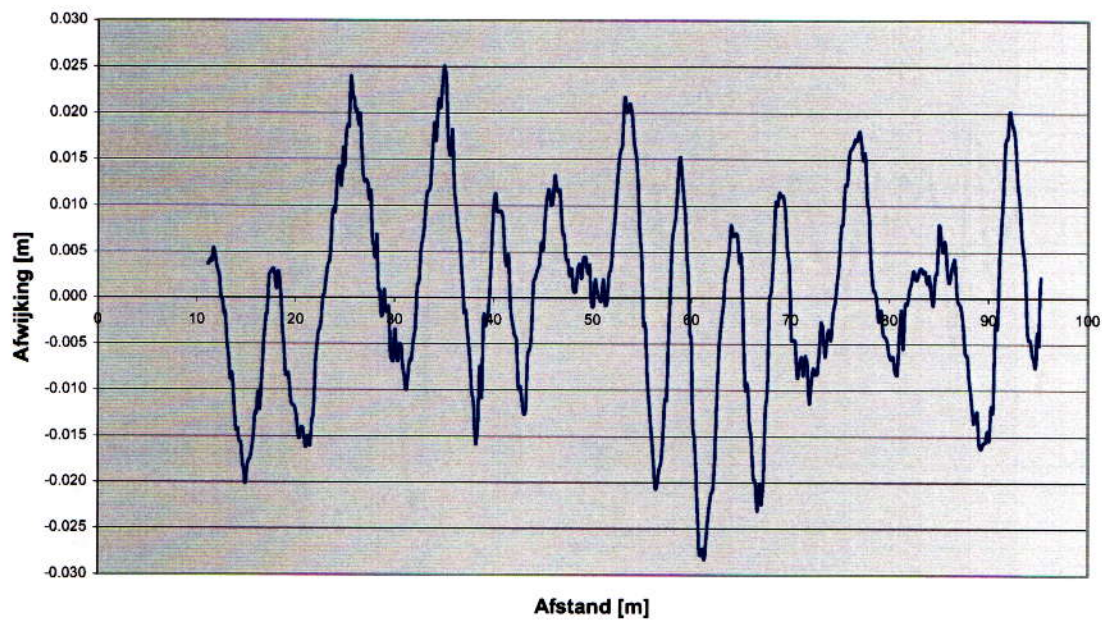
Figuur 9 De afwijking van AutoMaatje op object 1; herhaling 4.



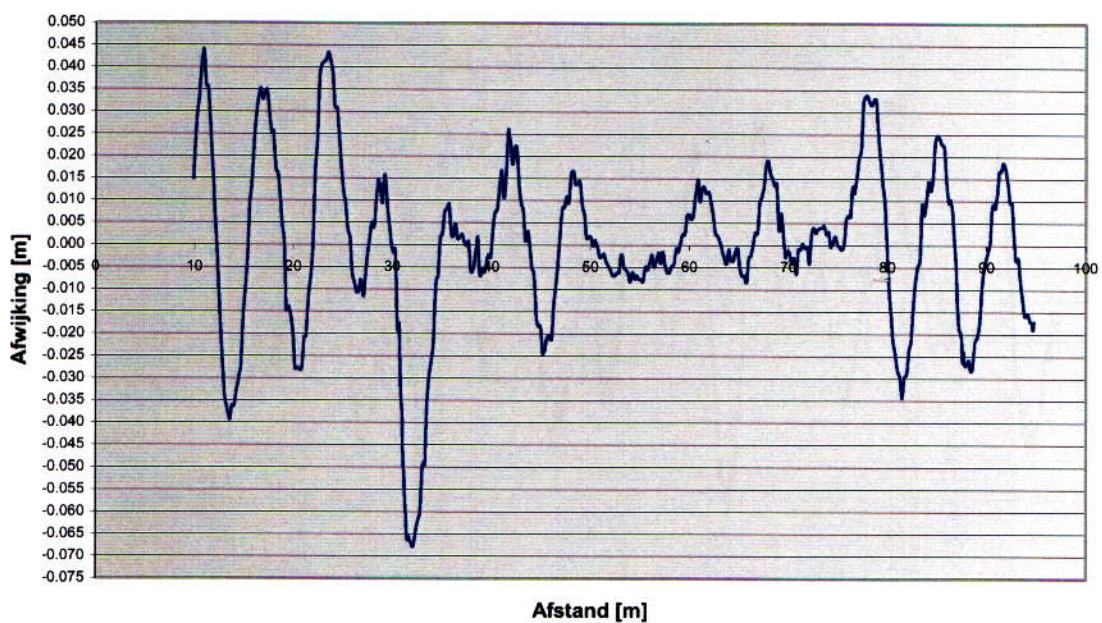
Figuur 10 De afwijking van AutoMaatje op object 1; herhaling 5.



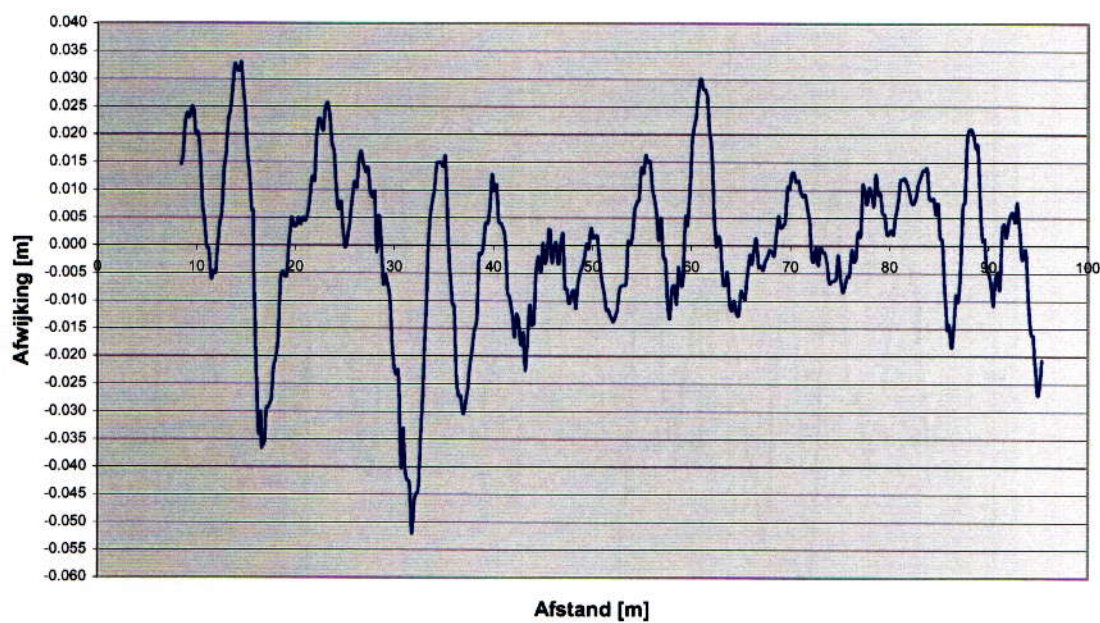
Figuur 11 De afwijking van AutoMaatje op object 1; alle herhalingen.



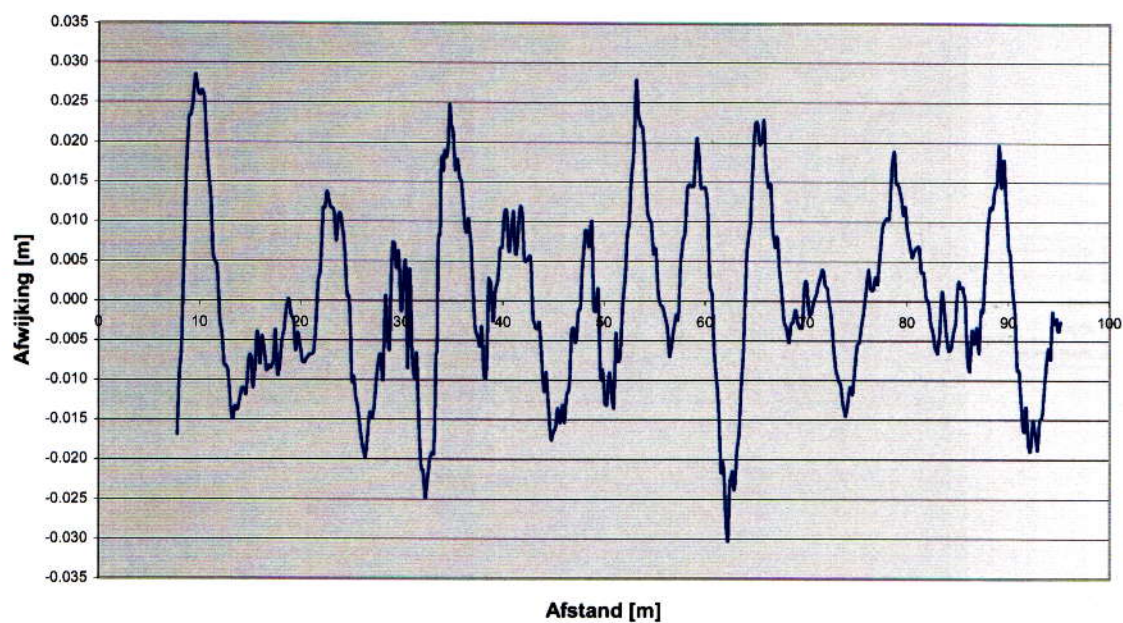
Figuur 12 De afwijking van AutoMaatje op object 2; herhaling 1.



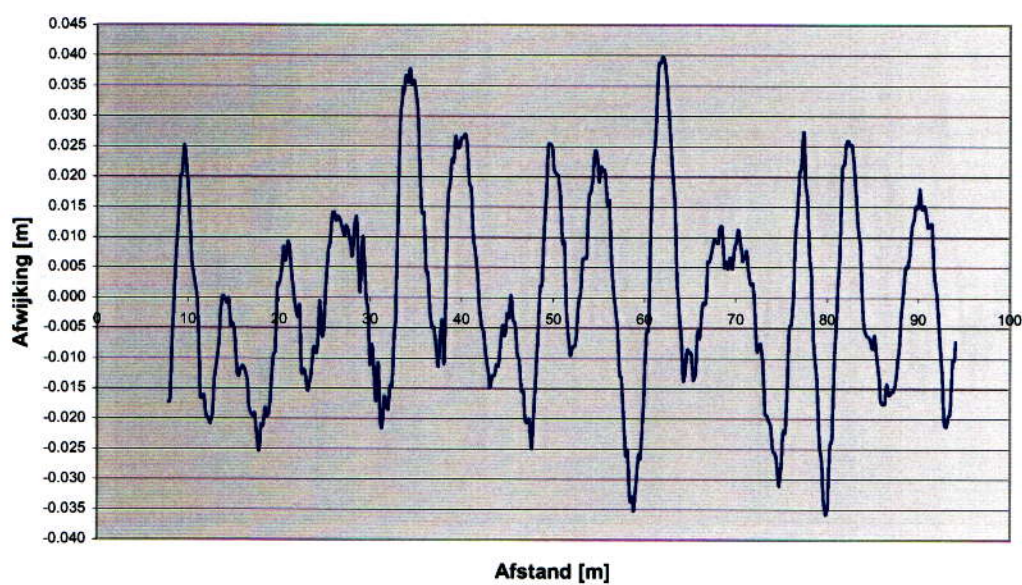
Figuur 13 De afwijking van AutoMaatje op object 2; herhaling 2.



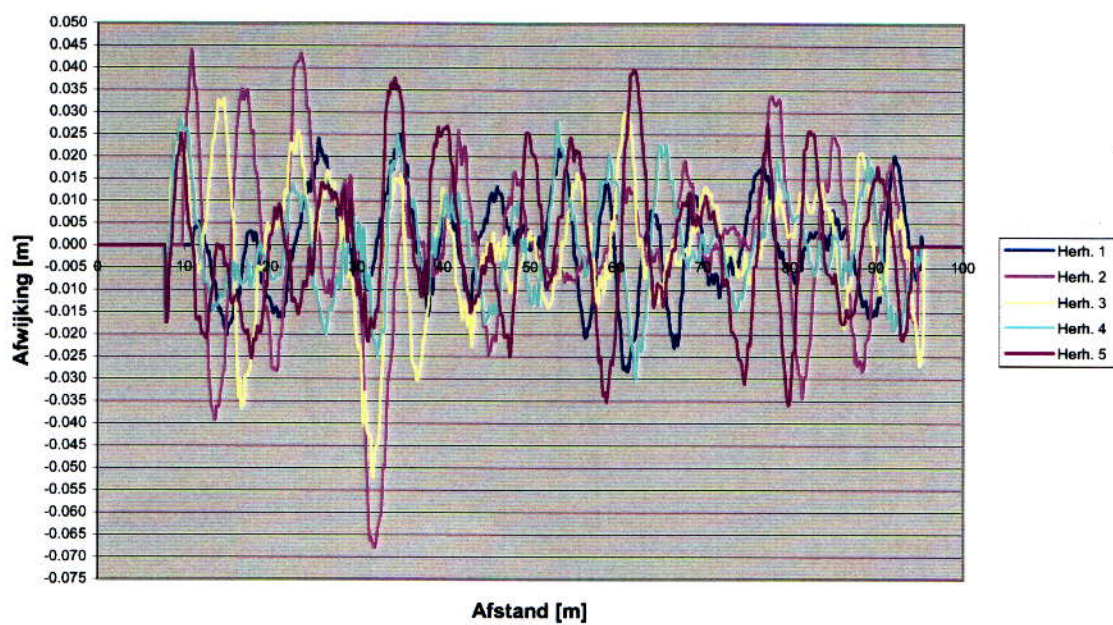
Figuur 14 De afwijking van AutoMaatje op object 2; herhaling 3.



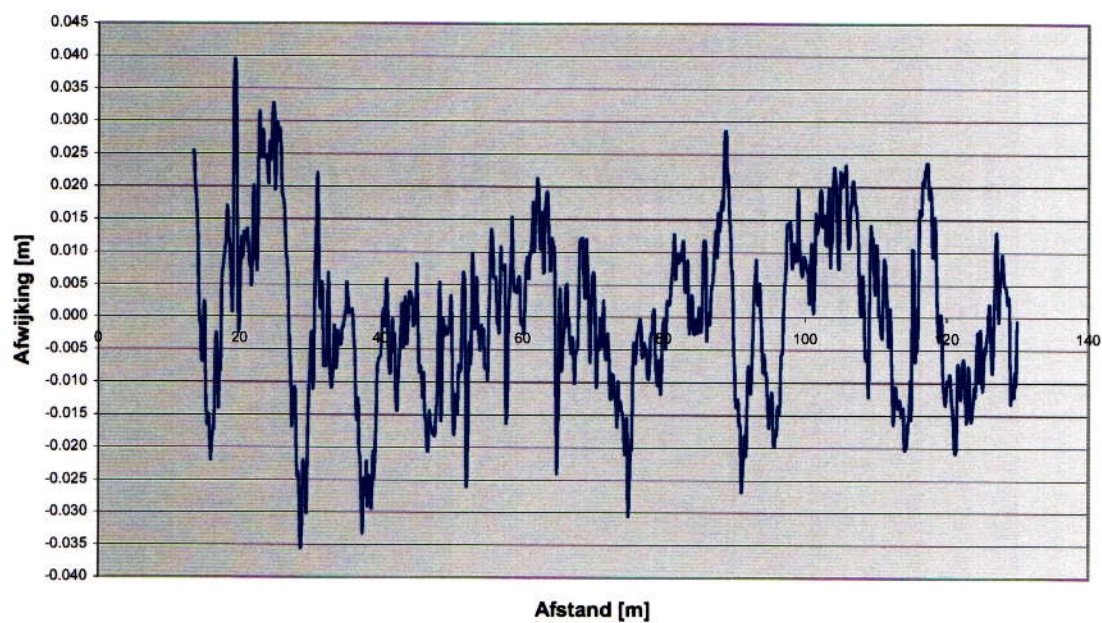
Figuur 15 De afwijking van AutoMaatje op object 2; herhaling 4.



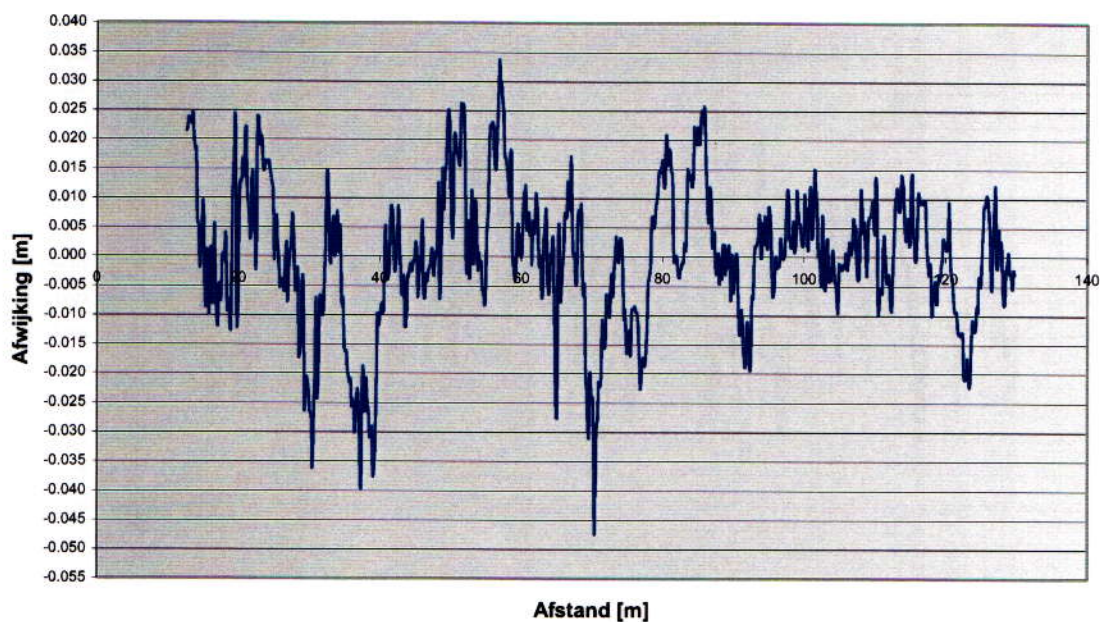
Figuur 16 De afwijking van AutoMaatje op object 2; herhaling 5.



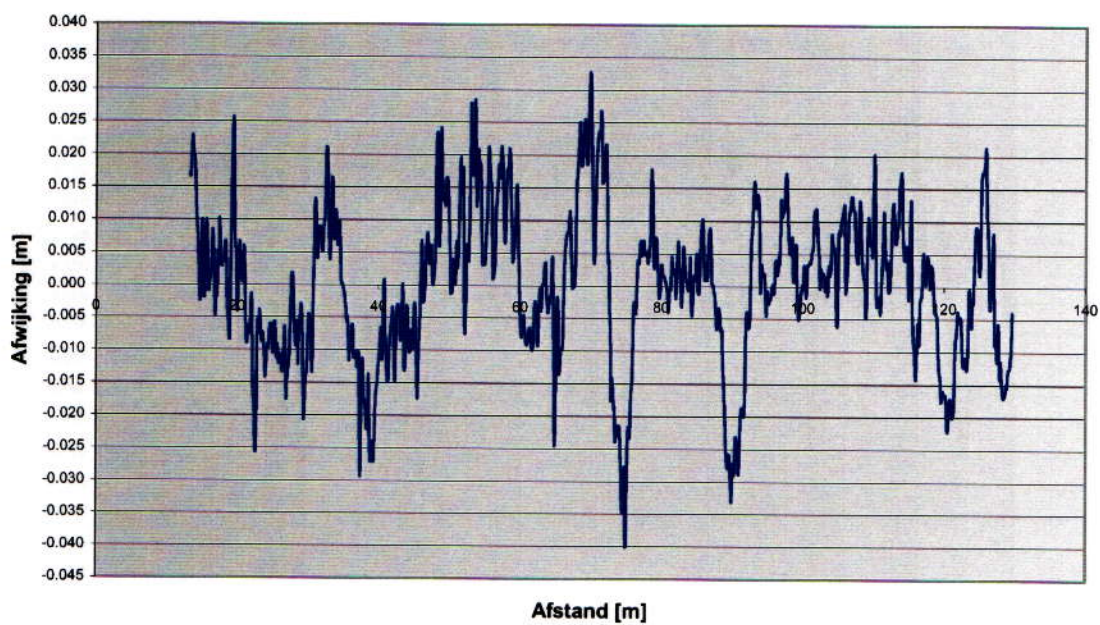
Figuur 17 De afwijking van AutoMaatje op object 2; alle herhalingen.



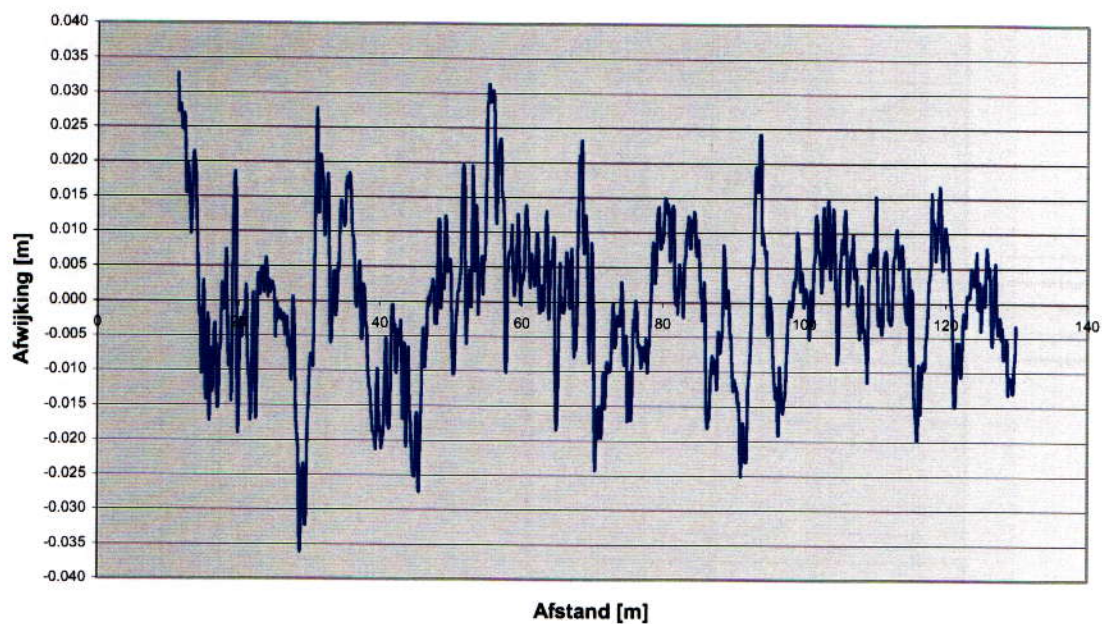
Figuur 18 De afwijking van AutoMaatje op object 3; herhaling 1.



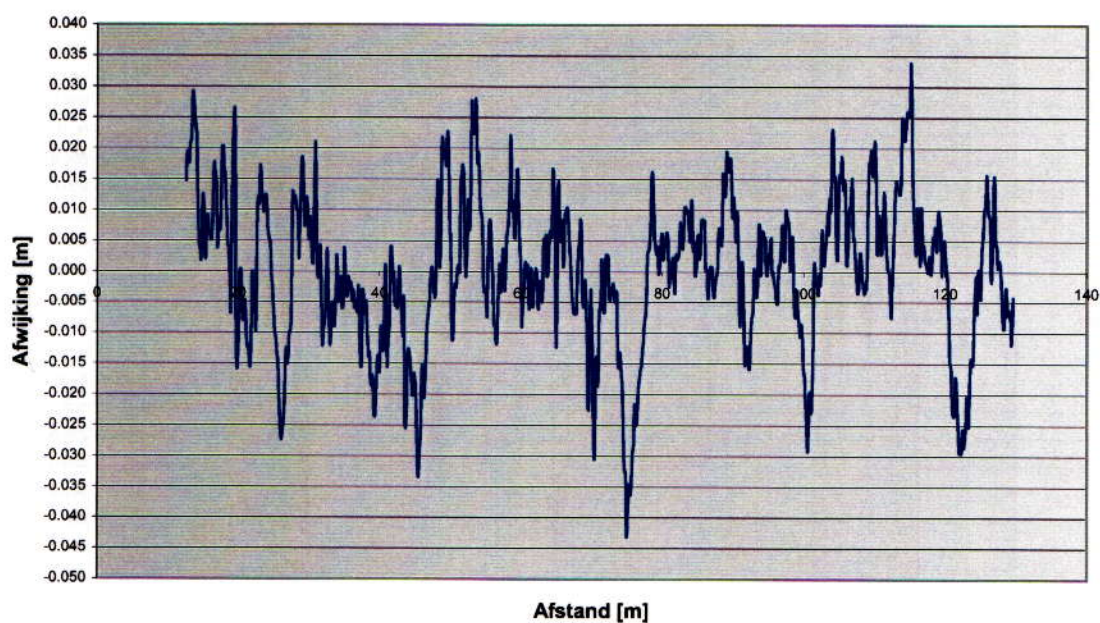
Figuur 19 De afwijking van AutoMaatje op object 3; herhaling 2.



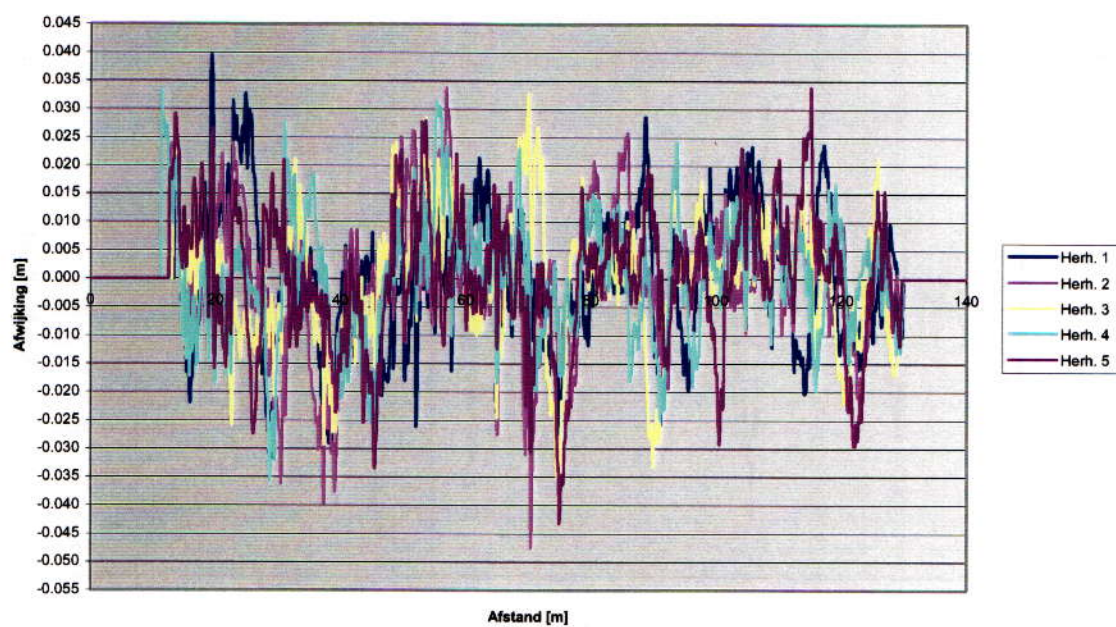
Figuur 20 De afwijking van AutoMaatje op object 3; herhaling 3.



Figuur 21 De afwijking van AutoMaatje op object 3; herhaling 4.

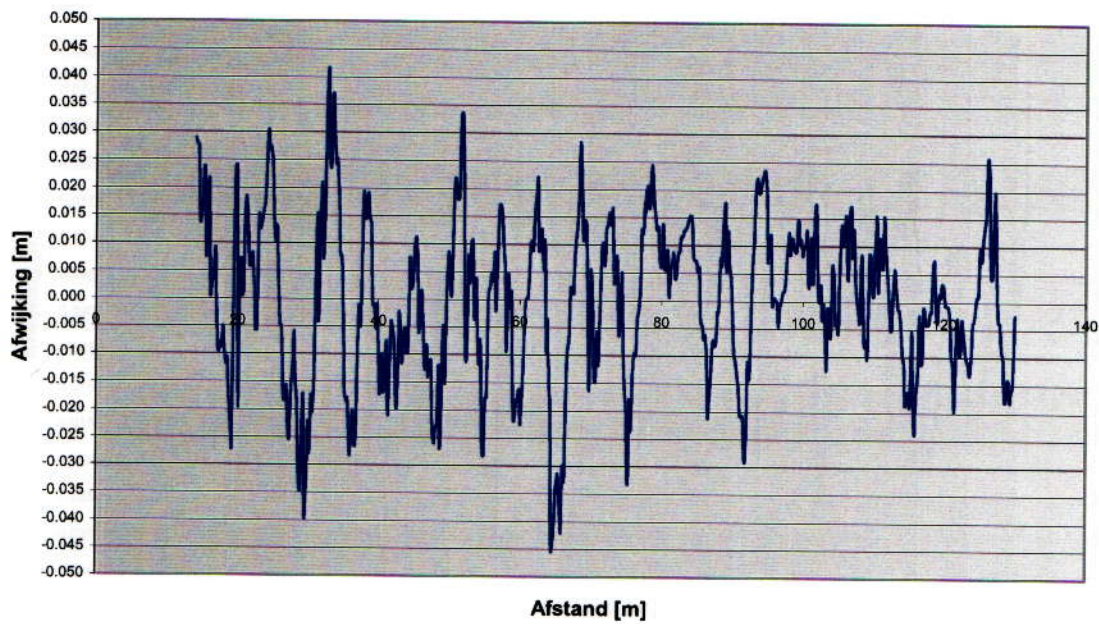


Figuur 22 De afwijking van AutoMaatje op object 3; herhaling 5.

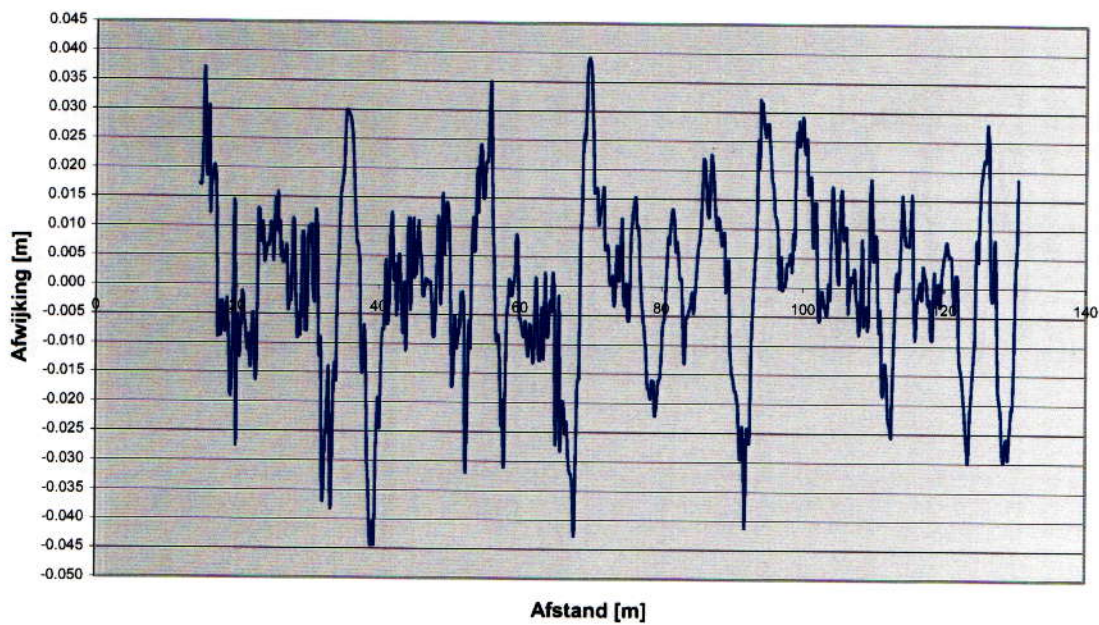


Figuur 23 De afwijking van AutoMaatje op object 3; alle herhalingen.

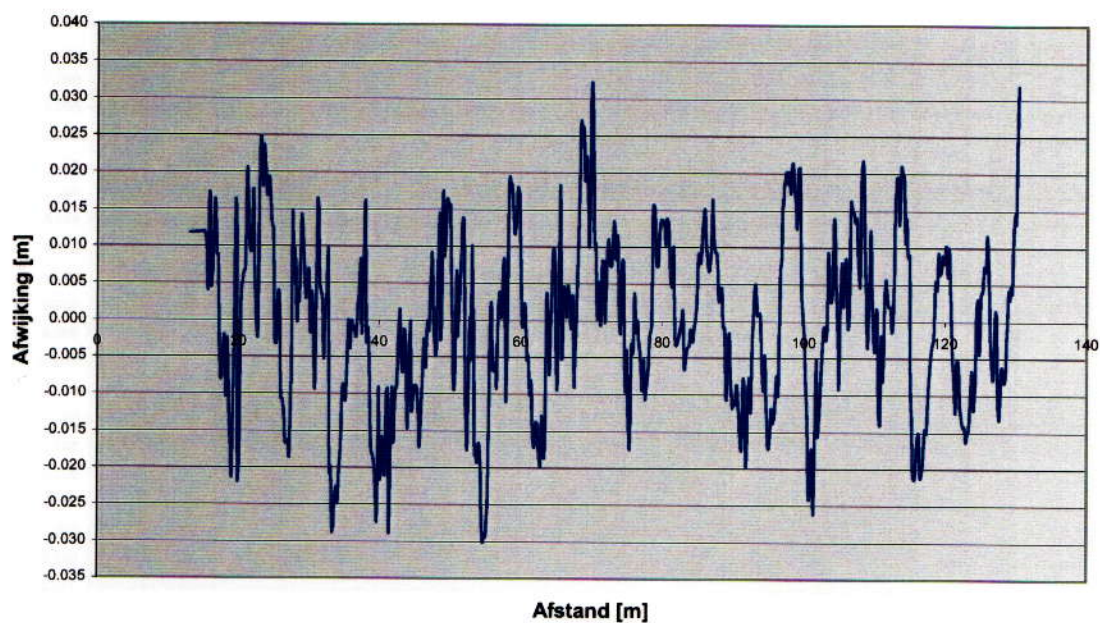
Bijlage 4 Meetresultaten van AutoMaatje op object 4 (gras, snel)



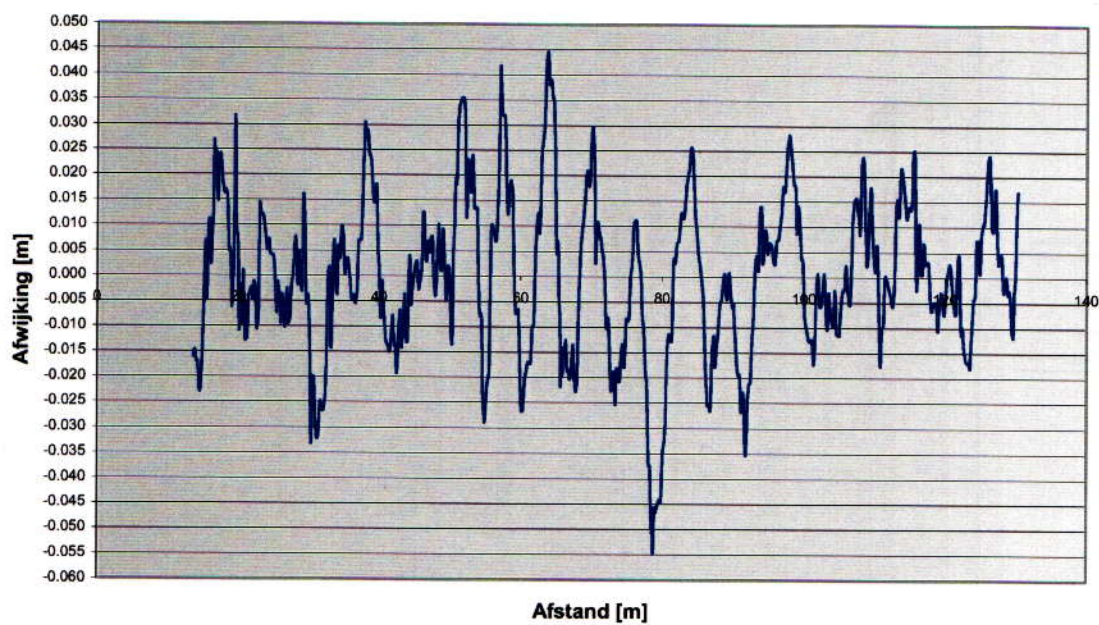
Figuur 24 De afwijking van AutoMaatje op object 4; herhaling 1.



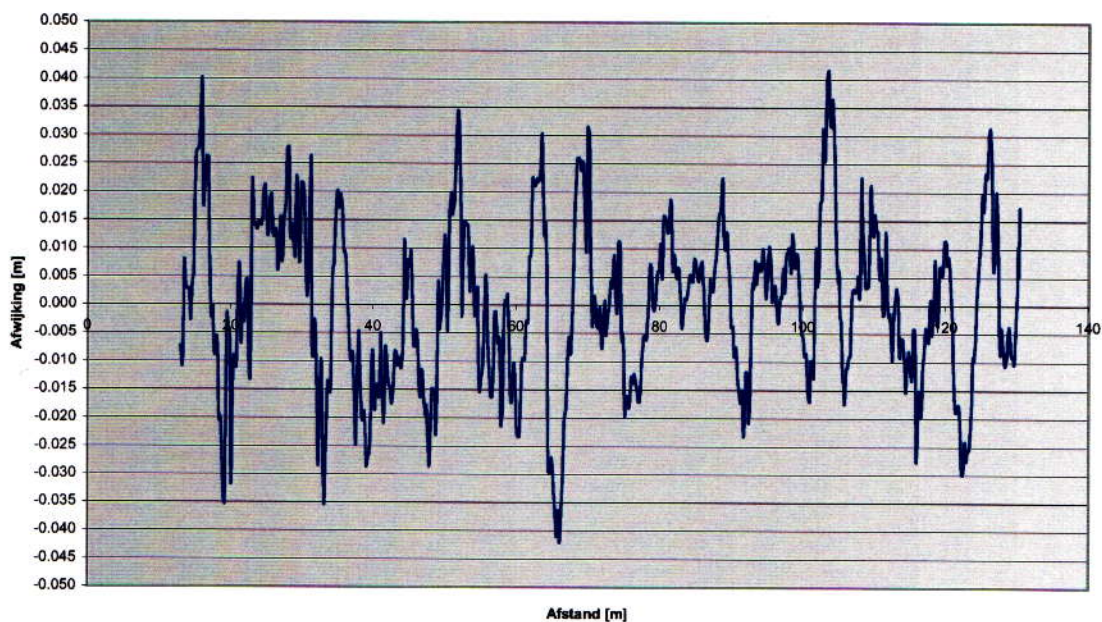
Figuur 25 De afwijking van AutoMaatje op object 4; herhaling 2.



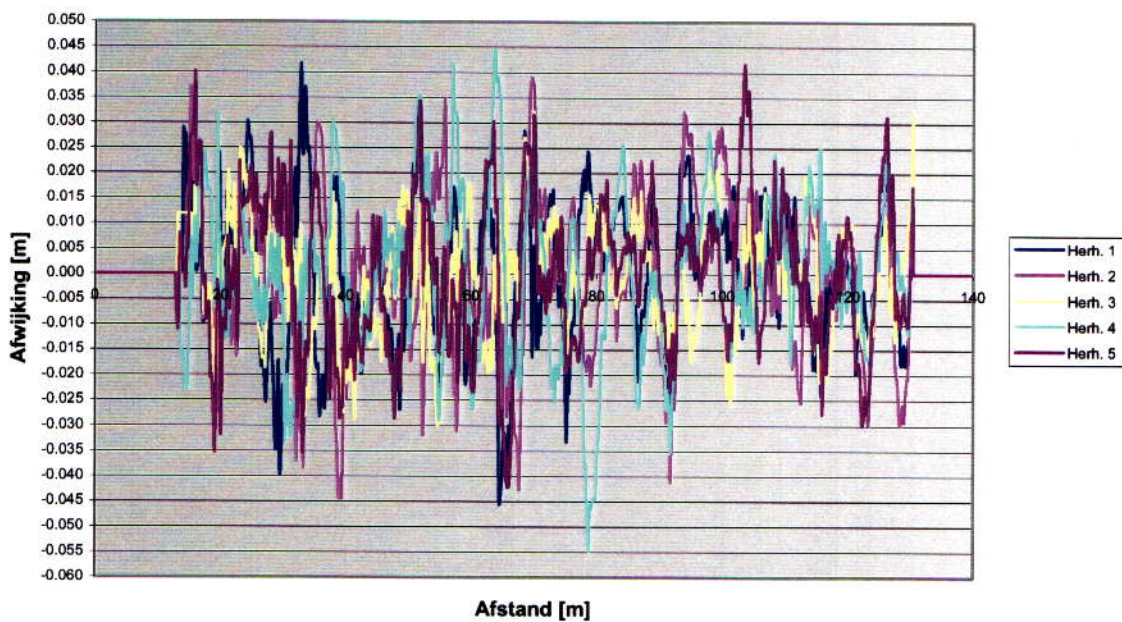
Figuur 26 De afwijking van AutoMaatje op object 4; herhaling 3.



Figuur 27 De afwijking van AutoMaatje op object 4; herhaling 4.



Figuur 28 De afwijking van AutoMaatje op object 4; herhaling 5.



Figuur 29 De afwijking van AutoMaatje op object 4; alle herhalingen.