

Bestandeshöhenermittlung landwirtschaftlicher Kulturen aus UAS-Punktwolken

GÖRRES GRENZDÖRFFER¹ & PHILIPP ZACHARIAS¹

Zusammenfassung: Flächenhafte Informationen über die Wuchshöhe landwirtschaftlicher Kulturen können aus 3D-Punktwolken hochauflösender UAS-Aufnahmen gewonnen werden. Diese stellen für verschiedene Precision Farming Anwendungen und zur Ertragsvorhersage eine wichtige Informationsquelle dar. Es werden zwei verschiedene Methoden der Bestandeshöhenermittlung methodisch erläutert und anhand praktischer Beispiele vorgestellt.

1 Einleitung

Die Bestimmung der Wuchshöhe landwirtschaftlicher Kulturen ist in mehrerer Hinsicht von großer Bedeutung. Zum Beispiel lässt die Entwicklung der Wuchshöhe von Mais sehr gute Rückschlüsse auf die kommenden Ernteerträge zu, z.B. YIN ET AL., 2011. Ähnliche, wenn auch weniger eindeutige Beziehungen ist für Wintergetreide beobachtet worden, z.B. GIRMA ET AL., 2006. Grundsätzlich bestehen statistisch sehr enge Beziehungen zwischen der Wuchshöhe und der Biomasse, z.B. EHLERT ET AL., 2009, ZHANG UND GRIFT, 2012.

Zur Messung der Bestandeshöhe mit Hilfe eines Fahrzeuges (Traktor) sind verschiedene Technologien einzeln oder in Kombination ausprobiert worden, z.B. Ultraschall, Radarentfernungsmesser, Stereokamerasysteme, Laserscanner und Lichtgitter, vgl. BUSEMEYER ET AL., 2013. Unabhängig von der eingesetzten Sensorik sind die Anforderungen an traktorbasierte Technologien hoch. So sollte die Bestandeshöhe mit einer Genauigkeit von ca. 1 cm und am besten unabhängig von den äußeren Bedingungen, d.h. Staub, Vibrationen und Sonnenstand bestimmt werden können. EHLERT ET AL., 2009 haben grundsätzlich gezeigt, dass z.B. Laserscanner in der Lage sind, diese Anforderungen zu erfüllen. Jedoch sind traktorbasierte Systeme nur in der Lage innerhalb bzw. eng umgrenzt um die Fahrgassen die Bestandeshöhe zu messen und damit lassen sich leider flächenhaften Aussagen nur über Interpolation für den gesamten Bestand treffen.

2 Photogrammetrische Höhenbestimmung

Die Bestimmung eines Oberflächenmodells mit Hilfe photogrammetrischer Methoden hat sich in den letzten Jahren drastisch verbessert. Aus dem Bereich der Computer Vision kamen in den letzten Jahren mehrere Entwicklungen, die mittlerweile eine automatische Orientierung von Bildern ermöglichen. Voraussetzung ist eine robuste Identifikation von Bildkorrespondenzen. Hier haben sich SIFT- und SURF-Algorithmen durchgesetzt, die mit einem entsprechenden Deskriptor rotations- und skaleninvariante Merkmale extrahieren können. Diese Deskriptoren können auf alle Bilder angewandt werden, um Korrespondenzen zwischen allen Bildern zu ermitteln. Bei der Bildorientierung hat sich die Structure from Motion (SfM)-Methode durchgesetzt, die mit herkömmlichen Verfahren der Photogrammetrie (Blocktriangulation) kombiniert wurden,

1) Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer, Philipp Zacharias, Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, email: {goerres.grenzdoerffer}, {philipp.zacharias}@uni-rostock.de

STRECHA, 2011. Unter Nutzung so genannter "Dense Matching" Verfahren kann aus Luftbildern quasi für jedes Pixel ein Koordinatentriplet berechnet werden, z.B. HAALA, 2013.

Aus der klassischen Photogrammetrie gibt es Faustwerte von 0,015 - 0,02 % der Flughöhe für die Höhengenaugigkeit photogrammetrischer Punktbestimmungen. Dieser Wert beruht auf der Verwendung hochgenauer weitwinkliger Kameras und Senkrechtaufnahmen mit einer Längsüberlappung von 60 % (Standardnormalfall). Allerdings schätzt KRAUS (2000) die übliche Faustformel für die Höhengenaugigkeit (Standardabweichung) auf „0,015 % der Flughöhe“ als „optimistisch“ für große Bildmaßstäbe ein, da viele natürliche Oberflächen nicht eindeutig sind, wie z.B. Vegetationsoberflächen. Unabhängig von den genannten Bedenken ergibt sich bei Flughöhen von 50 - 100 m eine theoretische Messgenauigkeit der Photogrammetrie von 7,5 - 15 mm. Diese ist jedoch in der Praxis mit UAS-Bildflügen nicht immer zu erreichen. Warum ist das so? Die absolute Genauigkeit der 3D-Punktwolke hängt von der Anzahl der Bilder und der Schnittgeometrie sowie der Genauigkeit der Äußeren und Inneren Orientierung ab. Sie liegt bei der Verwendung handelsüblicher Digitalkameras in der Regel bei 0.5 - 2 Pixel. Das bedeutet bei einer Flughöhe von 50 - 100 m und der Verwendung weitwinkliger Objektive theoretische Genauigkeiten von 6 - 50 mm. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die für die photogrammetrische Prozessierung notwendigen Passpunkte in der Regel mit RTK-GNSS und damit kaum besser als 10 - 25 mm eingemessen und schlussendlich im Bild bestimmt werden können. Deshalb liegen die praktisch erzielbaren absoluten Höhengenaugigkeiten von UAS-Bildflügen oftmals bei 15 - 30 mm, vgl. auch BENDIG ET AL., 2013. Allerdings spielt auch die verwendete Software eine große Rolle, vgl. z.B. HAALA, 2013. So verwendet z.B. die Software Agisoft Photoscan zur Punktwolkenberechnung immer nur einzelne Bildpaare, während die Software SURE die Redundanz der überlappenden Bilder vollständig nutzt und darüber hinaus auch die Qualität der 3D-Punktbestimmung ermittelt, WENZEL ET AL., 2013. Das führt dazu, dass die innere Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Höhenbestimmung zunehmen, vgl. auch Abb. 1. Im vorliegenden Fall konnte bei einer Flughöhe von ca. 50 m eine Höhengenaugigkeit von 6 - 11 mm erzielt werden, was durchaus den theoretischen Erwartungswerten entspricht.

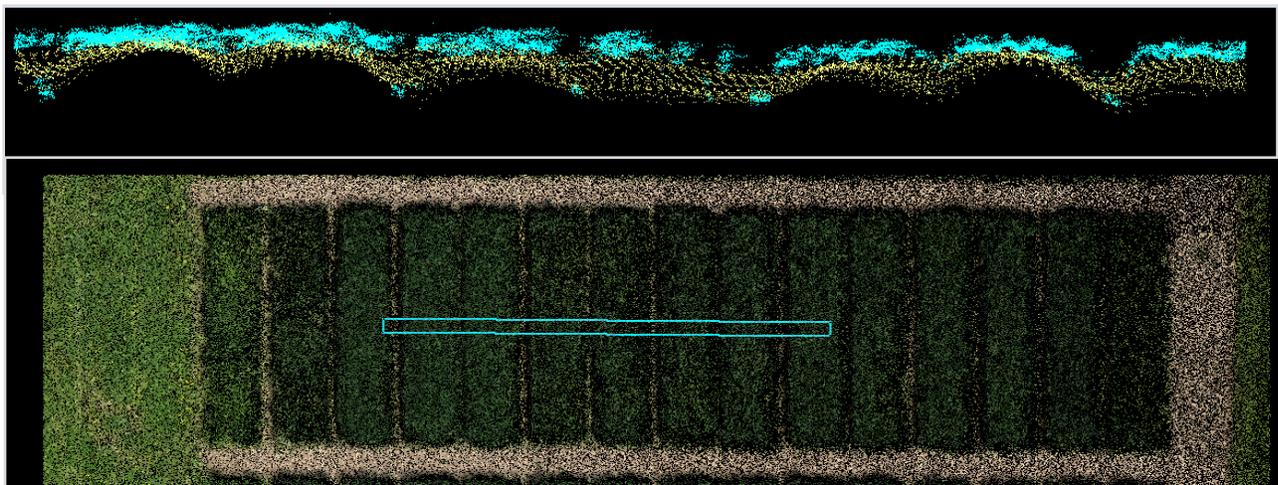


Abbildung 1: Softwareeinfluss bei der photogrammetrischen Höhenbestimmung am Beispiel eines Weizenversuchs, (Gelb SURE, Cyan, Agisoft Photoscan). Während SURE sowohl die Pflanzenoberfläche mit ihrer Heterogenität bestimmt und gleichzeitig den Boden zwischen den Reihen erfasst, liefert Agisoft eine eher geglättete Punktwolke. Details der Befliegungsparameter, vgl. Kap. 3.1

Grundsätzlich ist zu beachten, dass 3D-Punkte nicht für bewegte oder strukturlose Objekte berechnet werden können.

2.1 Photogrammetrische Höhenbestimmung von Vegetationsoberflächen

Im Falle einer Vegetationsoberfläche sind noch zwei Besonderheiten zu beachten:

1. Wie an obiger Stelle erwähnt ist es für erfolgreiches Matching bzw. eine hochgenaue Positionsbestimmung unabdingbar, dass sich die betrachteten Objekte während der Bildaufnahme nicht bewegen. Das kann bei landwirtschaftlichen Flächen nicht ausgeschlossen werden. Gerade bei reiferem Getreide reicht schon wenig Wind, um Probleme zu verursachen.
2. Während die Vegetationsoberfläche bei gröber aufgelösten Daten relativ homogen erscheint, weil innerhalb eines Pixels mehrere Pflanzen und der durch sie geworfene Schatten zu einem Signal verschmelzen (Canopy Level), wird bei Bodenauflösungen von wenigen cm die einzelne Pflanze, der durch sie geworfene Schatten und der Boden dazwischen aufgelöst (Leaf Level). Dadurch wird es prinzipiell möglich die Höhe eines Bestandes mit Hilfe der 3D-Punktwolke zu erfassen. Allerdings nur dann, wenn der Bewuchs nicht zu dicht ist, bzw. der Blattflächenindex gering ist. Nichtsdestotrotz sind die Schnittbedingungen von Bodenpunkten ungünstig und dadurch auch fehleranfällig, vgl. Abb. 2.

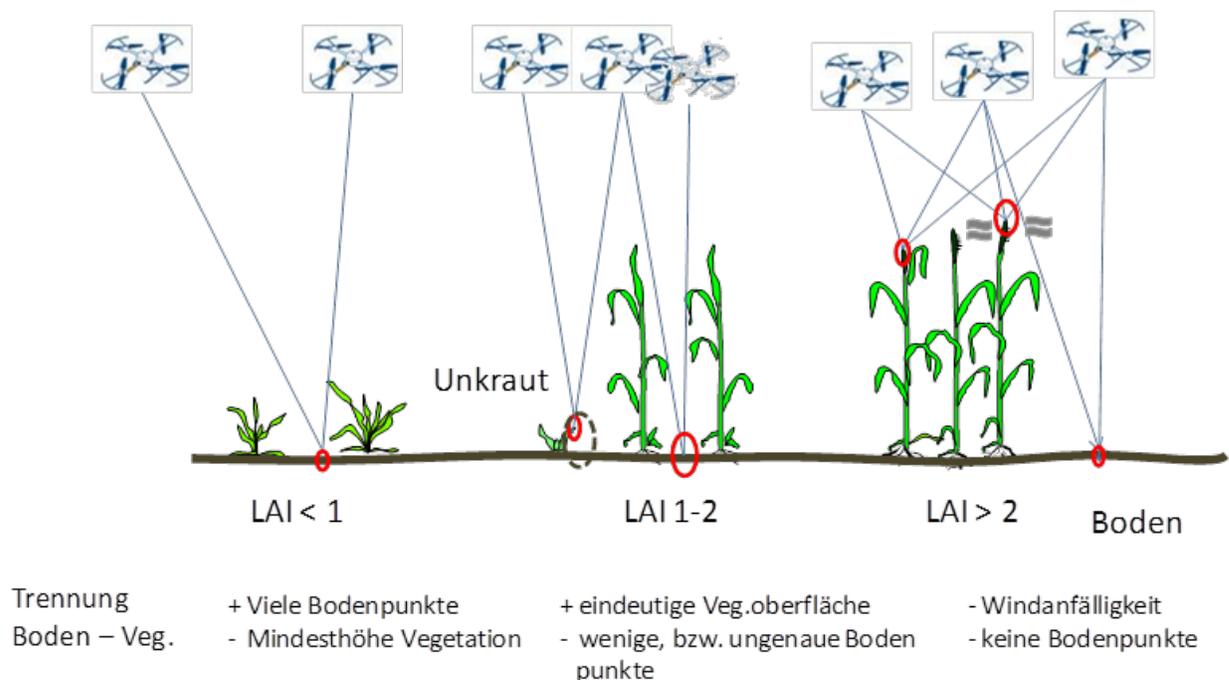


Abbildung 2: Genauigkeiten und Probleme bei der UAS-gestützten photogrammetrischen Erfassung von Vegetationsoberflächen

3 Material und Methoden

Im nachfolgenden sollen zwei verschiedene Ansätze der Bestandeshöhenbestimmung mit Hilfe von UAS-Daten vorgestellt und exemplarisch untersucht werden:

1. Bestimmung der Bestandeshöhe durch Bildung der Differenz zwischen einem aktuellen UAS-Oberflächenmodell und einem bereits vorhandenen digitalen Geländemodell, das z.B. durch ein Parallelfahrssystem oder einen initialen UAS-Bildflug gewonnen wurde. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Referenzfläche immer gleich ist und die Höhenmessung der Bestandesoberfläche, wie an obiger Stelle erläutert, genau und zuverlässig während der gesamten Vegetationsperiode funktioniert. Voraussetzung ist allerdings, dass das Referenz-DGM entsprechend genau ist.
2. Bestimmung der Bestandeshöhe durch eine statistische Analyse der 3D-Punktwolke. Die 3D-Punktwolkenmethode, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt und untersucht wird, wurde speziell zur Auswertung monotemporaler Bildflugdaten konzipiert. Die besondere Schwierigkeit liegt darin, auch ohne ein DGM die Wuchshöhe der Pflanzen zu ermitteln. Durch die hohe Bodenauflösung der Ausgangsbilder enthält diese Punktwolke nicht nur die Vegetationsoberfläche, sondern teilweise auch den Boden zwischen den Pflanzen. Durch eine Klassifizierung in Boden- und Vegetationspunkte kann ein DGM sowie ein DOM aus der Punktwolke abgeleitet werden. Diese dienen dann, wie bei der Differenzmethode, als Grundlage um die Wuchshöhe der Pflanzen zu ermitteln. Das LAS-Dateiformat, wie auch die Software zur Auswertung bzw. zur Klassifikation von LAS-Daten in dem die Punktwolken abgespeichert werden ist eigentlich für LiDAR Datensätze entwickelt worden. Deshalb sind die Parametereinstellungen für den vorliegenden Fall anzupassen.
Es ist anzumerken, dass es bei dieser Methode nicht darum geht, Wuchshöhen einzelner Pflanzen zu ermitteln. Vielmehr wird eine möglichst genaue flächenbezogene Messgröße für die Wuchshöhe angestrebt. Daher werden Bezeichnungen „Bodenpunkt“ und „Vegetationspunkt“ verwendet. Damit sind Punkte der 3D-Punktwolke gemeint, die bei der Klassifizierung mit LAS-Tools dem Erdboden beziehungsweise der Vegetationsdecke zugeordnet wurden. Im engeren Sinne wird also nicht die Höhe einzelner Pflanzen berechnet, sondern die von Vegetationspunkten, welche die Pflanzendecke repräsentieren.
Alternativ können bestimmte Perzentile der Höhenwerte der Punkte, innerhalb einer vorgegebenen Abtastweite (in X-Y-Richtung), berechnet werden. Für das DGM ist das 5 %-Perzentil angemessen, während für das Oberflächenmodell das 95 %- oder das 99 %-Perzentil berechnet werden können. Der Vorteil dabei, gegenüber der ersten Methode ist, dass durch die statistische Berechnung des Perzentils nie einzelne Ausreißerpflanzen die Höhenwerte einer Rasterzelle bestimmen können. Dieses Verfahren konnte unter anderem auf natürlichen Grünlandstandorten, erfolgreich eingesetzt werden bei denen kein DGM oder nur ein sehr grobes DGM vorliegt, vgl. GRENZDÖRFFER UND BOGDANOV, 2013.

3.1 Untersuchungsgebiet und UAS Bildflüge

Auf den Feldversuchsflächen der Universität Rostock wird mit verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen eine Vielzahl pflanzenbaulicher Experimente durchgeführt. Um die Möglichkeiten Genauigkeit der Punktwolkenmethode an mehreren landwirtschaftlichen Kulturen zu untersuchen wurden bei allen Bildflügen mehrere Versuchsflächen der Versuchsstation überflogen.

- Eine Winterweizen-Versuchsfläche auf der ein Kalium-Steigerungsversuch, sowie ein Schwefelversuch stattfanden,

- eine Raps-Versuchsfläche als Teil eines Fruchtfolge-Versuchs,
- eine Luzerne- und Gräser-Versuchsfläche, als Teil eines Ackerfuttersversuchs, und
- eine Mais-Versuchsfläche mit verschiedenen Unterfrüchten.

Für die Untersuchungen wurden im Laufe der Vegetationsperiode 2013 zu den folgenden vier Zeitpunkten (Epochen) Bildflüge mit dem UAS durchgeführt: 03. Mai, 24. Mai, 02. Juli und 22. August. Da die Flächen auch direkt nach der Ernte noch einmal überflogen wurden (Epoche 4), konnte ein DOM der Geländeoberfläche erstellt werden, dass die Wuchshöhenberechnung mit der Differenzmethode ermöglicht und als Referenz dienen kann. Die so gewonnenen Ergebnisse werden genutzt, um sie mit denen der 3D-Punktwolkenmethode zu vergleichen.

Für die UAS-Aufnahmen der Versuchsflächen wurde der Quadrocopter MD4-1000 der Firma Microdrones GmbH eingesetzt. Als Kamera wurde eine Olympus PEN e-P2 mit einer Festbrennweite von 17 mm verwendet. Die Auflösung der Bilder beträgt 4032×3024 Pixel. Bei allen Bildflügen wurde dieselbe Flugroute abgeflogen. Dabei wurden jeweils 298 Bilder auf einer Strecke von circa 1,6 km aufgenommen. Die Flugzeit betrug etwa 10 Minuten, bei einer durchschnittlichen Flughöhe von 52 m über Grund, was bei der verwendeten Kamera einem GSD von ca. 1,3 cm entspricht. Bei den Aufnahmen wurden eine Längsüberlappung von 80 % und eine Querüberlappung von 60 % angestrebt. Bei einem Flug wurden ca. 3,8 ha überflogen. Zur Georeferenzierung wurden jeweils 18 Passpunkte ausgelegt und mit einem Leica GX1230 hochgenau eingemessen. Die Prozessierung der Daten und die Berechnung der Punktwolken erfolgte mit der Software Photoscan Agisoft. Die Residuen an den Passpunkten lagen zwischen 1 – 2 cm in der Lage und 1 – 5 cm in der Höhe, ZACHARIAS, 2013. Die erzielten Genauigkeiten liegen im Rahmen vergleichbarer Projekte, z.B. BENDIG ET AL., 2013.

3.2 3D-Punktwolkenanalyse

Die Klassifizierung der Punktwolke in Boden- und Vegetationspunkte erweist sich als sehr schwierig, da diese von vielen Faktoren beeinflusst wird. Wie zu erwarten war, spielt die Kulturart und der Pflanzenbedeckungsgrad eine herausragende Rolle. Das führt leider dazu, dass für jeden Termin und jede Kultur individuelle Anpassungen notwendig sind.

Beispielsweise waren für eine ansprechende Klassifizierung der Punktwolke waren die Bestände des Winterweizens in der ersten und zweiten Epoche noch deutlich zu klein.

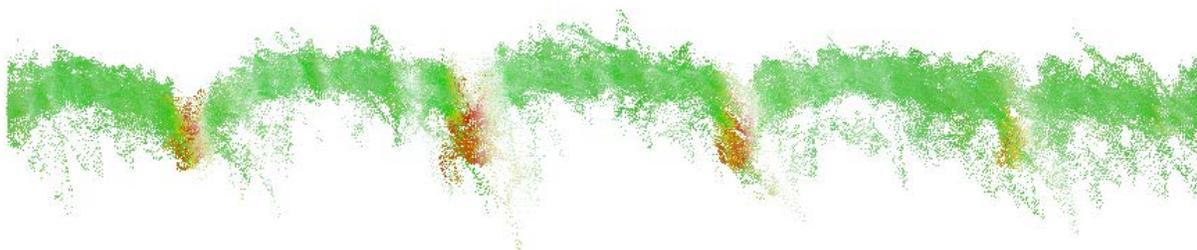


Abbildung 3: Querschnitt einer Punktwolke einer Winterweizen-Versuchsfläche. Braun dargestellt, die als Erdboden klassifizierte Punkte der Punktwolke. Grüne Punkte wurden bei der Klassifikation als Vegetation erkannt.

Die Punktwolke der dritten Epoche wiederum enthält so gut wie keine Bodenpunkte mehr, außer denen, die durch die Wege zwischen den Parzellen und den Randbereichen entstehen (Abb. 3). Unter Versuchsbedingungen kann dennoch eine Höhenbestimmung durchgeführt werden. Dazu werden die Punkte der Wege zwischen den Parzellen und die Randzonen für die Berechnung des DGM genutzt.

3.3 3D-Punktwolkenanalyse

Die Flächen des Ackerfutter-Versuchs sind zu mehreren Zeitpunkten geschnitten worden. Daher wurden aus den vorhandenen Ertragsdaten zwei Gruppen gebildet, welche dann jeweils mit ihren korrespondierenden Bildflügen analysiert wurden (Tab. 1).

	Gruppe 1			Gruppe 2		
	Polygon-Nr	Parzelle	Ertrag (kg TM)	Polygon-Nr	Parzelle	Ertrag (kg TM)
Luzerne	3	3A	22.71	3	3A	14.48
	8	3B	12.77	8	3B	7.37
	10	3C	42.72	10	3C	24.78
	13	3D	44.34	13	3D	32.64
Gräser	2	4A	5.49	2	4A	14.25
	5	4B	7.58	5	4B	21.71
	12	4C	10.28	12	4C	22.75
	15	4D	9.84	15	4D	26.24

Tabelle 1: Die zwei untersuchten Gruppen des Ackerfuttersversuchs

Gruppe 1 wurde am 13. Juni (Luzerne) und 19. Juni (Gräser) geschnitten und mit den Wuchshöhen der zweiten Epoche (24. Mai) verglichen. Gruppe 2 stellt den Schnitt vom 16. Juli dar und wurde mit den Wuchshöhen der dritten Epoche (02. Juli) verglichen.

Aufgrund der starken Höhenunterschiede zwischen den Parzellen ließ sich die Punktwolke nicht optimal klassifizieren. Bei der Differenzmethode ergeben sich Bestimmtheitsmaße (R^2) von 0,60 und 0,76, sowie Standardabweichungen von 0,04 m und 0,03 m, worin sich der Zusammenhang zwischen Wuchshöhe und Ertrag klar widerspiegelt. Bei der 3D-Punktwolkenmethode dagegen deuten die Trendlinien, vermutlich aufgrund der Vielzahl an fehlerhaften Messwerten, auf eine negative Korrelation hin (Gruppe 1: $R^2 = 0,05$, $S_d = 0,11$ m und Gruppe 2: $R^2 = 0,1$, $S_d = 0,05$ m). Das Höhenraster der Punktwolkenmethode weist im Gegensatz zum Raster der Differenzmethode viele Lücken auf (grüne und gelbe Flächen) (Abb. 4). An diesen Stellen konnte das DGM nicht korrekt erstellt werden. Gerade in der zweiten Epoche waren die Gräser oft noch zu klein um sich ausreichend vom Boden abzuheben und so bei der Klassifikation als Vegetation erkannt zu werden. Es ist davon auszugehen, dass auch durch das Vorhandensein mehrerer Pflanzenarten auf den Flächen (Luzerne, Gräser) mit unterschiedlicher Morphologie die Wuchshöhenermittlung erschwert wurde. Zusätzlich ist zu bemerken, dass sich die Ackerfutter-Versuchsfläche am äußersten Rand der beflogenen Flächen befindet. Das bedeutet hier stehen dem Programm Agisoft Photoscan weniger Bilder für die Berechnung der Punktwolke zur Verfügung. Dadurch nimmt die Genauigkeit der Punktwolke hier ab.

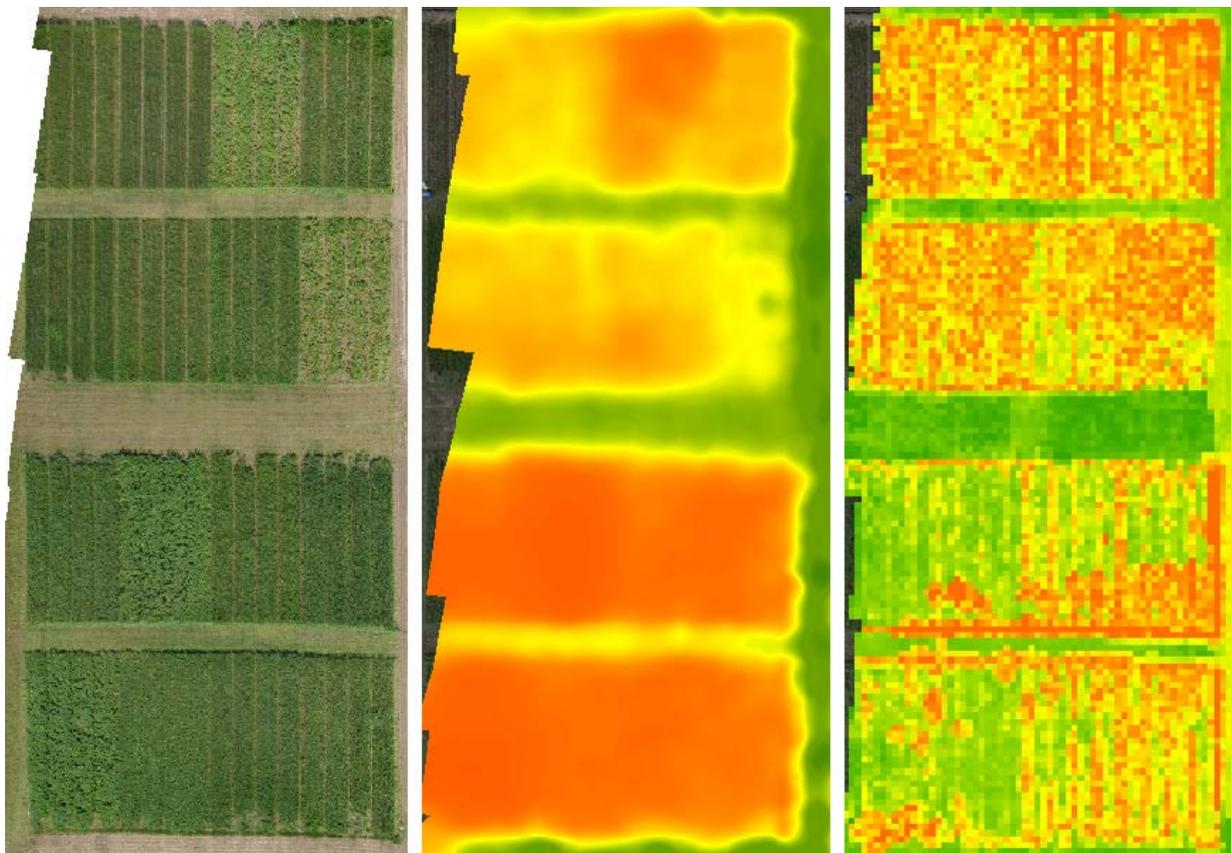


Abbildung 3: Vergleich des Orthophotos des Ackerfuttersversuches der zweiten Epoche (links) und der Höhenraster der Differenzmethode (mittig) sowie der 3D-Punktwolkenmethode (rechts).

4 Diskussion

In dem Beitrag konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich zwei Verfahrenswege zu Bestimmung der Vegetationshöhe (Differenzmethode und 3D-Punktwolkenmethode) gibt. Die Anwendung der 3D-Punktwolkenmethode bei einheitlich aufwachsenden landwirtschaftlichen Kulturen ist in der Praxis schwierig. Ursachen sind in erster Linie der manuelle, iterative Aufwand bei der Klassifizierung der Punktwolke. Dies trifft besonders auf landwirtschaftliche Flächen mit hoher Heterogenität im Bestand zu. Auch niedrige Bestände, die sich noch nicht stark genug vom Boden abheben führen zu Schwierigkeiten bei der Trennung von Boden und Vegetation.

Um überhaupt Wuchshöhenmessungen möglich zu machen, müssen Punktwolken mit hoher Punktmenge (mehrere Millionen Punkte) und Punktdichte erstellt werden. Dabei werden auch beträchtliche Dateigrößen erreicht. Beispielsweise ergaben sich für die Punktwolke der Winterweizen-Versuchsfläche (Fläche 0,24 Hektar) Dateigrößen von bis zu 1 GB. Außerdem nehmen die nötigen Schritte zur Berechnung, Klassifizierung und Raster-Umwandlung der LAS-Punktwolken deutlich mehr Zeit in Anspruch als die vergleichsweise relativ einfache Differenzmethode.

Es hat sich durch die Untersuchungen gezeigt, dass in den Punktwolken deutlich weniger Bodenpunkte direkt im Bestand vorzufinden sind als erwartet, was teilweise auch auf die verwendete Software zurückzuführen ist. Generell ist bei den Ergebnissen der 3D-Punktwolkenmethode

zu beobachten, dass die gemessenen Wuchshöhen deutlich niedriger ausfallen, als bei der Differenzmethode. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Trennung zwischen Boden und Vegetationspunkten nicht ausreichend genau vorgenommen werden kann. Dadurch nähern sich die beiden Höhenraster, deren Differenz die Bestandeshöhe bildet, immer weiter an. Für das Erkennen von Heterogenitäten im Bestand ist die Punktwolkenmethode ungeeignet. Durch die genannten Effekte entstehen neue Variabilitäten bei den gemessenen Wuchshöhen, die von der wahren Bestandesheterogenität nicht mehr zu unterscheiden sind.

In der Konsequenz ist die untersuchte Methode für eine flächendeckende Bestandeshöhenermittlung einheitlicher ackerbaulicher Kulturen nicht geeignet. Die Differenzmethode ist einfacher, schneller und benötigt beträchtlich weniger Fachwissen um brauchbare Ergebnisse zu erzeugen. Das zusätzliche DGM bei unbewachsener Fläche, das für die Differenzmethode benötigt wird, kann heutzutage mit einem UAS schnell und relativ kostengünstig direkt nach der Aussaat erstellt werden. Da die Differenzmethode dafür deutlich bessere Ergebnisse liefert, als die 3D-Punktwolkenmethode, ist dies auch zu empfehlen.

5 Literaturverzeichnis

- BENDING, J., BOLTEN, A. UND BARETH, G. (2013): UAV-based Imaging for Multi-Temporal, very high Resolution Crop Surface Models to monitor crop growth variability.- PFG 2013/&, S. 551 – 562.
- BUSEMEYER, L., MENTRUP, D., MÖLLER, K., WUNDER, E., ALHEIT, K., HAHN, V., MAURER, H.-P., REIF, J.C., WÜRSCHUM, T., MÜLLER, J., RAHE, J. UND RUCKELSHAUSEN, A. (2013): BreedVision — A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding.- *Sensors* **2013**, *13*, 2830-2847
- EHLERT, D. ADAMEK, R. UND HORN, H.-J. (2009): Laser rangefinder-based measuring of crop biomass under field conditions.- *Precision Agriculture* *10*: S.395–408
- GIRMA, K. MARTIN, K. L. ANDERSON, R. H. ARNALL, D. B. BRIXEY, K. D. CASILLAS, M. A. CHUNG, B. DOBEY, B. C. KAMENIDOU, S. K. KARIUKI, S. K. KATSALIROU, E. E. MORRIS, J. C. MOSS, J. Q. ROHLA, C. T. SUDBURY, B. J. TUBANA, B. S. UND RAUN, W. R. (2006): Mid-Season Prediction of Wheat-Grain Yield Potential Using Plant, Soil, and Sensor Measurements.- *Journal of Plant Nutrition* **29**: S. 873 – 897
- GRENZDÖRFFER, G. UND BOGDANOV, S. (2013): UAS-basierte automatisierte Vogelzählung am Beispiel einer Sturmmöwenkolonie der Vogelschutzinsel Langenwerder, DGPF-Jahrestagung 27.2-01.03.2013, Freiburg, S. 141 - 157.
- HAALA, N. (2013): The Landscape of dense Image Matching Algorithms.- In: Fritsch, D. [Hrsg.]: *Photogrammetric Week 2013*.- S. 271 - 284. Wichmann Verlag.
- KRAUS, K. (2000): *Photogrammetrie. Band 3: Topographische Informationssysteme*. Dümmler. Bonn. 419 S.
- WENZEL, K., ROTHERMEL, M. UND HALLA, N. (2013): SURE – The ifp Software for Dense Image Matching.- In: Fritsch, D. [Hrsg.]: *Photogrammetric Week 2013*.- 59 - 70. Wichmann Verlag.
- YIN, X., MCCLURE, M.A. JAJA, N. TYLER, D.D. UND HAYES R.M. (2011): In-Season Prediction of Corn Yield Using Plant Height under Major Production Systems.- *Agronomy Journal* **103**: S. 923-929.
- ZACHARIAS, P. (2013): Untersuchung zur direkten Bestandeshöhenermittlung verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen aus UAS-Punktwolken.- unveröff. Bachelorarbeit. 39 S.
- ZHANG, L., GRIFT, T. E. (2012): A LIDAR-Based Crop Height Measurement System for *Miscanthus giganteus*, *Computers and Electronics in Agriculture* **85**.