

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN



**Bestimmung der Wuchshöhe von Klee grasflächen mittels
drohnenbasierten Oberflächenmodellen**

Bachelorarbeit

David Hauswirth

Bachelorstudiengang 2015

Studienrichtung: Umweltingenieurwesen

Abgabedatum: 23.08.2018

Fachkorrektor 1

Pascal Ochsner

ZHAW, IUNR

Fachstelle Geoinformatik

Campus Grüental

8820 Wädenswil

Fachkorrektor 2

Martin Geilhausen

ZHAW, IUNR

Fachstelle Geoinformatik

Campus Grüental

8820 Wädenswil

Impressum

Titelbild

Versuchsfelder auf dem Campus Grüental

Schlagworte

UAV; drohnenbasiertes Oberflächenmodell; RGB; Differenzmethode; Vegetationshöhe; eBee; eBee Plus; DJI Phantom 4; Flughöhe; räumliche Auflösung; Kleegrasmischung;

Zitiervorschlag

Hauswirth, D. (2018). *Bestimmung der Wuchshöhe von Klee grasflächen mittels drohnenbasierten Oberflächenmodellen*. Bachelorarbeit. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Wädenswil. (unveröffentlicht).

Institut

IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Grüental / Postfach
CH-8820 Wädenswil

Autor

David Hauswirth
Moosweg 4
3296 Arch
Mail: husi7@hotmail.com

Abstract

Due to the rapid development and falling prices of drones (or unmanned aerial vehicles UAVs), new areas of application arise. UAVs are increasingly being used in agriculture, whether for the precise delivery of pesticides or for the large-scale monitoring of fields in the area of precision farming.

In this thesis it has been investigated, whether the height growth of clover grass surfaces can be monitored by means of drone-based surface models. From an experimental area, a terrain model and then at intervals of one month, three surface models were created over the growing season. The surface models were created using three different types of drones (eBee, eBee Plus and Phantom 4) as well as three different spatial resolutions (1cm / pixel, 3cm / pixel and 6cm / pixel). After each exposure of the vegetation surface, the height of the vegetation was measured by hand to obtain reference heights that were compared with the heights of the surface models.

A comparison of the heights of the surface models with the reference heights measured by hand gave a correlation value of $R^2 = 0.85$ for the exposure of the eBee drone with a resolution of 3cm / pixel. The correlation values of the further exposures were slightly lower with R^2 values from 0.77 to 0.68. Significant height differences of the surface models were observed at different times of recording during the growth phase of the vegetation. In order to be able to investigate the method for measuring the vegetation height even better, the reference heights measured by hand would have to be determined even more precisely in the future. The method has potential to be used in research of agriculture.

Zusammenfassung

Durch die rasante Entwicklung und die sinkenden Preise von Drohnen (oder Unmanned Aerial Vehicles UAVs) ergeben sich neue Einsatzgebiete. UAVs werden immer mehr in der Landwirtschaft eingesetzt, sei es für die präzise Abgabe von Pestiziden oder für das grossflächige Monitoring der Felder, im Gebiet des "Precision Farming".

In dieser Bachelorarbeit wurde untersucht, ob sich das Höhenwachstum von Klee grasflächen mittels drohnenbasierten Oberflächenmodellen überwachen lässt. Von einem Versuchsfeld wurden über die Vegetationsperiode ein Geländemodell und anschliessend im Abstand von je einem Monat, drei Oberflächenmodelle erstellt. Die Oberflächenmodelle wurden mit drei unterschiedlichen Drohnentypen (eBee, eBee Plus und Phantom 4) sowie drei verschiedenen räumlichen Bildauflösungen (1cm/Pixel, 3cm/Pixel und 6cm/Pixel) erstellt. Nach jeder Aufnahme der Vegetationsoberfläche wurde die Höhe der Vegetation von Hand gemessen, um Referenzhöhen zu erhalten, die mit den Höhen der Oberflächenmodellen verglichen werden konnten.

Ein Vergleich der Höhen der Oberflächenmodelle mit den Referenzhöhen, die von Hand gemessen wurden, ergab einen Korrelationswert $R^2 = 0.85$ für die Aufnahmen der eBee Drohne mit einer Auflösung von 3cm/Pixel. Die Korrelationswerte der weiteren Aufnahmen lagen leicht darunter mit R^2 -Werten von 0.77 bis 0.68. Es konnten signifikante Höhenunterschiede der Oberflächenmodelle, zu den unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten während der Wachstumsphase der Vegetation festgestellt werden. Um die Methode zum Messen der Vegetationshöhe noch besser untersuchen zu können, müssten die Referenzhöhen die von Hand gemessen wurden zukünftig noch präziser bestimmt werden. Die Methode hat Potential in der Agrarforschung eingesetzt zu werden.

Danksagung

Für die Unterstützung bei der vorliegenden Arbeit möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken:

- Pascal Ochsner und Martin Geilhausen für die Betreuung der Arbeit.
- Johann Müller für die Unterstützung bei den ersten Befliegungen mit den unterschiedlichen Drohnen und der dazugehörigen Software.
- Bei Alex Mathis der die Versuchsflächen zur Verfügung gestellt hat.
- Nils Ratnaweera für die Unterstützung bei den Visualisierungen mit der Software R.
- Fabia Pfeifer für das Korrekturlesen der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangslage / Praxisbezug.....	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Fragestellungen / Hypothesen	2
1.4	Rechtliche Grundlagen	3
2	Literaturübersicht	5
2.1	Stand der Forschung	5
3	Material und Methoden	7
3.1	Untersuchungsgebiet.....	7
3.2	Versuchsanordnung Befliegung	10
3.3	Messmethoden	11
3.3.1	“Differenzmethode“	11
3.3.2	Handmessung	11
3.4	Verwendete Hard-und Software.....	12
3.4.1	Flugplanung.....	13
3.4.2	Verwendete Drohnen (Sensoren)	14
3.4.3	GNSS Messgerät.....	15
3.4.4	Bildprozessierung	15
3.4.5	Verarbeiten und Darstellen der Oberflächenmodelle.....	17
3.4.6	Statistische Methoden.....	17
3.4.7	Datenanalyse.....	18
3.5	Structure from Motion (SfM) Photogrammetrie.....	19
4	Resultate	20
4.1	Feststellung der Höhenunterschiede während der Vegetationsperiode.....	20
4.1.1	Resultate Boxplots.....	26
4.1.2	Resultate T-Tests	29
4.2	Vergleich der Oberflächenmodelle (hier auch CSM genannt) mit den Handmessdaten	30

4.3	Vergleich der Drohnen respektive Sensoren	33
4.4	Vergleich der Auflösungen 1cm, 3cm und 6cm	34
5	Diskussion	36
5.1	Beantwortung der Fragestellungen und Überprüfung der Hypothesen	36
5.2	Diskussion Messmethoden	39
5.3	Diskussion äussere Einflüsse	40
6	Schlussfolgerung	41
7	Literaturverzeichnis	43

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage / Praxisbezug

Drohnen (oder UAVs Unmanned Aerial Vehicles) gibt es schon eine Weile, auch Anwendungsfelder in der Forst und Landwirtschaft sind bekannt. Die Forschung und die Anwendung in der Praxis waren in den Nullerjahren jedoch noch gehemmt wegen teuren UAVs und ungenügenden preiswerten Sensoren (Digitalkameras) (Grenzdörffer et al., 2008). In Bezug auf Bedienung, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Drohnen und ihren Sensoren hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung stattgefunden. Zudem werden UAVs immer erschwinglicher und dadurch werden sie zunehmend interessant für den Einsatz in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten im Umfeld der angewandten Forschung und in der Praxis der Geoinformatik (Candiago et al., 2015) (Huber, 2014). Mittels photogrammetrischer Verfahren und mit entsprechender Software (bsp. Pix4Dmapper) können aus überlappenden Luftbildern georeferenzierte Ortholuftbilder und Oberflächenmodelle generiert werden. Im Vergleich zu laserbasierten Aufnahmen mit hochpreisigen und schweren Geräten, stellen die leichten und handlichen Drohnen eine ernst zunehmende Alternative dar, um hochaufgelöste Ortholuftbilder und Oberflächenmodelle zu gewinnen (Dandois & Ellis, 2010).

Oberflächenmodelle kommen in verschiedenen Anwendungsgebieten zum Einsatz wie z.B. in der Raum- und Umweltplanung, bei der Untersuchung von agronomischen Fragestellungen, im Betrieb von Kiesgruben, im Auenmonitoring oder in der Vegetationsanalyse. Im Bereich der Vegetationsanalyse können auf der Grundlage von Oberflächenmodellen unterschiedliche Vegetationshöhen detektiert und basierend darauf die Pflanzen- respektive Biomasse sowie Pflanzenvitalität abgeleitet werden. Im Bereich des "precision farming" (Präzisionslandwirtschaft) ist das Monitoring der Biomasse während der Wachstumsphase der Vegetation ein wichtiger Indikator für die Gesundheit der Pflanzen (Mulla, 2013).

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird untersucht, inwiefern Höhenunterschiede einer Grasfläche (Kleegrasmischung) während einer Vegetationsperiode mittels drohnenbasierten Oberflächenmodellen festgestellt werden können. Es werden Aussagen darüber gemacht, ob signifikante Höhenunterschiede vorhanden sind und ob sie mit Höhen korrelieren, die von Hand gemessen werden. Dafür werden Oberflächenmodelle eines Versuchsfeldes auf dem Campus Grüental während der Vegetationsperiode Frühling/Sommer 2018 erarbeitet. Die Oberflächenmodelle werden mit Luftbildern von unterschiedlichen Drohrentypen erstellt. Die Rohdaten (Luftbilder) werden mit unterschiedlichen RGB Kameras an vier verschiedenen Tagen im Abstand von ca. einem Monat durch Beflie-

gungen des Versuchsfeldes erhoben. Nebst den Luftbildaufnahmen für die Erstellung der Oberflächenmodelle werden Handmessungen der Vegetationshöhe an den Tagen der Befliegung durchgeführt. Ausserdem wird untersucht, welche Flughöhe respektive Bildauflösung die bestmöglichen Resultate liefert.

1.3 Fragestellungen / Hypothesen

Aus den erhobenen Daten werden folgende Fragestellungen und Hypothesen beantwortet:

Frage 1

Welche Flughöhe respektive räumliche Auflösung liefert die genaueren Oberflächenmodelle?

Frage 2

Welche Unterschiede gibt es in der Praxistauglichkeit der beiden Drohnentypen Flächenflügler "eBee" und Quadrocopter "DJI Phantom 4" in Bezug auf die Erstellung von Oberflächenmodellen?

Hypothese 1

- H0 Die Oberflächenmodelle aus den vier Aufnahmen mit unterschiedlichen Vegetationshöhen unterscheiden sich signifikant voneinander.
- H1 Die Oberflächenmodelle aus den vier Aufnahmen mit unterschiedlichen Vegetationshöhen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

Hypothese 2

- H0 Die Höhen der Oberflächenmodelle aus den Aufnahmen A2 bis A4 korrelieren mit den von Hand gemessenen Höhen der Vegetation zu den jeweiligen Messzeitpunkten mit einem Korrelationskoeffizienten $R^2 = >0.7$.
- H1 Die Höhen der Oberflächenmodelle aus den Aufnahmen A2 bis A4 korrelieren nicht mit den von Hand gemessenen Höhen der Vegetation zu den jeweiligen Messzeitpunkten.
- H2 Die Höhen der Oberflächenmodelle aus den Aufnahmen A2 bis A4 korrelieren mit den von Hand gemessenen Höhen der Vegetation zu den jeweiligen Messzeitpunkten mit einem Korrelationskoeffizienten $R^2 = <0.7$ bis $R^2 = >0.5$.

1.4 Rechtliche Grundlagen

Durch die steigende Zahl an zivilen unbemannten Luftfahrzeugen am Schweizer Himmel steigt der Bedarf an Regulierungen, um Konflikte in der Luft und am Boden zu verhindern (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL, 2016). Aus diesem Grund hat das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) die Verordnung des UVEK über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien (VLK) in den letzten Jahren mit einigen Artikeln ergänzt.

Die Drohnen, die in dieser Studie verwendet werden, gehören alle zur Kategorie "Unbemannte Luftfahrzeuge bis 30kg Gewicht". Drohnen dieser Kategorie dürfen ohne Bewilligung auf Sichtkontakt geflogen werden, es gelten jedoch folgende Einschränkungen: Es ist untersagt, in einem Umkreis von 5km um einen zivilen oder militärischen Flugplatz zu fliegen. Es ist untersagt, in aktiven Kontrollzonen (CTR) zu fliegen, sofern eine Höhe von 150m über Grund überstiegen wird. Ausnahmen sind bewilligungspflichtig. Weiter ist auf Menschenansammlungen ein Abstand von 100m einzuhalten (Verordnung des UVEK über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien (VLK), 2017).

Das Befliegen von eidgenössischen Jagdbanngebieten mit UAVs ist verboten (Verordnung über die eidgenössischen Jagdbanngebiete (VEJ), 2015). Der Betrieb von zivilen unbemannten Luftfahrzeugen in Wasser- und Zugvogelreservaten von internationaler und nationaler Bedeutung ist verboten (Verordnung über die Wasser- und Zugvogelreservate von internationaler und nationaler Bedeutung (WZVV), 2015). Ausnahmen in Schutzgebieten für Wildtiere sind gestützt auf Art. 14 Abs. 3 des eidgenössischen Jagdgesetzes (JSG) möglich (Bundesgesetz über die Jagd und den Schutz wildlebender Säugetiere und Vögel (JSG), 2017). Gestützt auf Art. 1 des Bundesgesetzes über den Schweizerischen Nationalpark (Nationalparkgesetz) und der Kantonalen Verordnung über den Nationalpark (Nationalparkordnung) ist der Nationalpark ein Reservat in dem die Natur vor allen menschlichen Eingriffen und somit auch vom Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen geschützt ist (Bundesgesetz über den Schweizerischen Nationalpark im Kanton Graubünden (Nationalparkgesetz), 2017). Ausnahmen im Nationalpark können gestützt auf Art. 6 der Nationalparkordnung bewilligt werden (Verordnung über den Schutz des Schweizerischen Nationalpark (Nationalparkordnung), 2011).

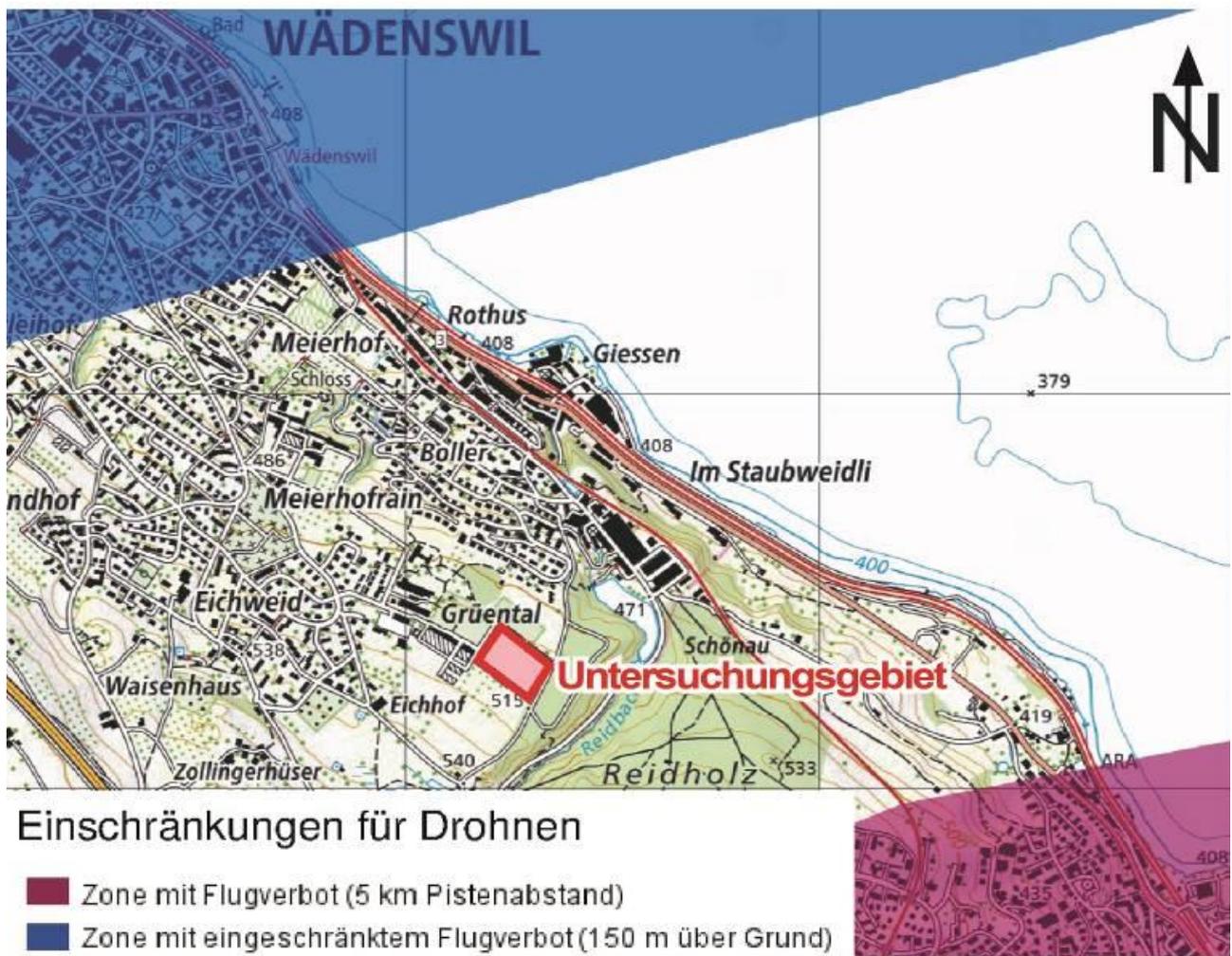


Abbildung 1: Kartenausschnitt mit eingezeichneten Flugverbotszonen («Swiss Geoportal», 2018).

Kartografische Informationen zu den Flugverbotszonen können auf map.geo.admin.ch unter der Rubrik "Einschränkungen für Drohnen" abgerufen werden («Swiss Geoportal», 2018). Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, befindet sich ausserhalb der Flugverbotszonen und darf somit befliegen werden (vgl. Abbildung 1).

Für das Fliegen eines unbemannten Luftfahrzeugs bis 30kg Gewicht ist eine Haftpflichtversicherung mit einer Garantiesumme von mindestens 1 Million Franken Pflicht. Ausgenommen davon sind Fluggeräte unter 0.5kg Gewicht (Verordnung des UVEK über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien (VLK), 2017).

2 Literaturübersicht

Im folgenden Kapitel wird ein Blick auf Forschungsarbeiten geworfen die sich mit dem Thema der Aufnahme von drohnenbasierten Oberflächenmodellen befassen. Im Focus stehen Arbeiten die sich auf die Erstellung von Oberflächenmodellen von Vegetation spezialisiert haben. Weiter wird kurz darauf eingegangen, inwiefern Drohnen bereits in der Praxis der Landwirtschaft angekommen sind.

2.1 Stand der Forschung

Der Einsatz von UAV's ist in der Praxis der Landwirtschaft bereits seit einigen Jahren angekommen («Agweb.com», 2017). Unternehmen bieten als Service den Einsatz von Drohnen an, um Spritzmittel bei Schädlingsbefall präzise in den Kulturflächen abzugeben. Dies verspricht eine hohe Effizienz und verringert die Bodenverdichtung («AGRAiR», 2017). Andere Firmen bieten komplett einsatzbereite Systeme aus Hard- und Software an, die z.B. eine präzise Abgabe der Düngermenge ermöglichen, um die Ernte zu optimieren und die Düngerabgabe zu minimieren («senseFly - Agriculture», 2017). Diese Systeme basieren jedoch auf RGB und NIR Luftbilder und nicht auf Oberflächenmodellen der Vegetation. Im Bereich des Vegetationsmonitorings mittels Oberflächenmodell wird noch geforscht. Da die Vegetationshöhe gut mit der gewachsenen Biomasse korreliert, ist sie ein guter Indikator für die Erhebung des Faktors Biomasse (Lati et al., 2013).

In der Studie von (Bendig et al., 2014) ist ein grösser angelegter Versuch beschrieben, bei dem Versuchsfelder von Sommergerste über die Vegetationsperiode von April bis Juli mit einem UAV befliegen worden sind, um Oberflächenmodelle zu erstellen (räumliche Auflösung 1cm/Pixel). Gleichzeitig wurden die Pflanzhöhen sowie das Gewicht der Biomasse (frisch und trocken) nach jedem Flug gemessen. In den Resultaten wurden Korrelationswerte von $R^2 = 0.8$ zwischen den durch Drohnen erhobenen Pflanzhöhen und der gewogenen Biomasse (frisch und trocken) erreicht. Weiter wurde in dieser Arbeit die Höhe des Sommergersten von Hand gemessen und mit der Höhe des Oberflächenmodells minus der Höhe des Geländemodells verglichen. In diesem Vergleich wurde ein Korrelationswert von $R^2 = 0.92$ erreicht (Bendig et al., 2014). Diese zwei Faktoren werden auch in dieser Arbeit miteinander in Beziehung gesetzt und verglichen.

In einer Studie von (G. J. Grenzdörffer, 2014) werden zwei verschiedene Methoden zur Bestimmung der Vegetationshöhe mittels UAVs untersucht.

Die erste Methode ist die "Differenzmethode", bei welcher der Höhenunterschied zwischen einem Geländemodell und einem Oberflächenmodell gemessen wird. Die Differenzmethode wird auch in dieser Arbeit angewendet.

Die zweite Methode ist die "3D-point cloud Methode", bei der durch eine statistische Analyse der 3D-Punktwolke zwischen Punkten, die auf dem Boden aufgenommen wurden, und Punkten auf der Pflanze unterschieden werden kann. Die zweite Methode benötigt kein digitales Geländemodell, was ein Vorteil sein kann, da dieses nicht vorgängig (vor oder direkt nach der Saat) erstellt werden muss.

Die Resultate der Studie zeigten, dass die "Differenzmethode" gute Resultate bei der Messung der Vegetationshöhe von Winterweizen, Raps Luzerne und Mais liefert. Die "3D-point cloud Methode" hat sich im Vergleich zur "Differenzmethode" hingegen nicht bewährt, weil sie in der Anwendung komplexer ist und mehr Expertenwissen benötigt. Weiter ist die "3D-point cloud Methode" zeitintensiver in der Durchführung, da bei jeder Untersuchung auf verschiedene Faktoren wie Pflanzenhöhe und Vegetationsdeckungsgrad eingegangen werden muss (G. J. Grenzdörffer, 2014).

In einer Studie von (Malambo et al., 2018) werden zwei unterschiedliche Methoden zur Erhebung von Vegetationshöhen untersucht. Mit der ersten Methode werden Punktwolkendatensätze mit einem terrestrischen LiDAR erhoben. Hingegen werden mit der zweiten Methode die Punktwolkendatensätze mit einem UAV und der "Structure from Motion" Technik generiert (darauf wird in Kapitel 3.5 eingegangen). Mit den Punktwolken kann die Höhe der Vegetation bestimmt werden. Während der Vegetationsperiode wurden mehrere Datensätze mit beiden Methoden aufgenommen und gleichzeitig die Vegetationshöhe von Hand gemessenen. Diese beiden Höhen wurden miteinander verglichen. Als Versuchsflächen dienten Mais- und Hirsefelder. Für beide Methoden ergaben die Resultate zwischen den von Hand gemessenen Vegetationshöhen und den Höhen der Punktwolkendatensätze eine statistisch signifikante Korrelation (Malambo et al., 2018).

In den oben aufgeführten Studien und weiteren wie von (Bendig et al., 2013) (Versuch mit Gerste) oder (Goodwin et al., 2006) (Versuch mit LiDAR und Wald) werden unterschiedliche Vegetationsoberflächen mit UAVs befliegen und Aufnahmen erstellt. Aus den resultierenden Aufnahmen werden Oberflächenmodelle generiert. So werden die Möglichkeiten von UAV basierenden Aufnahmemethoden für zukünftige Einsatzgebiete untersucht.

In der vorliegenden Studie wird mit der "Differenzmethode" (Ausführungen in Kapitel 3.3.1) gearbeitet wie in der Arbeit von Grenzdörffer 2014 beschrieben. Diese Methode wurde in weiteren Untersuchungen von (Bendig et al., 2013) und (Bendig et al., 2014) angewendet, jedoch dort nicht mit "Differenzmethode" benannt. In den Arbeiten von (Bendig et al., 2013), (Bendig et al., 2014), (G. J. Grenzdörffer, 2014) und (Malambo et al., 2018) werden Handmessungen (Ausführungen in Kapitel 3.3.2) der Vegetationshöhen als Referenzwerte verwendet. Diese Methode wird ebenso in dieser Arbeit angewendet. Im Unterschied zu den oben erwähnten Studien werden Aufnahmen einer neuen Vegetationsoberfläche (Kleegrasmischung) mit den gleichen Methoden untersucht. Der Unterschied zwischen der Vegetation eines Kleegrasgemischs und der Vegetation eines Gersten- oder Maisfelds liegt darin, dass die Oberflächenstruktur viel heterogener ist. Die Heterogenität der Oberflächenstruktur kommt daher, dass die Kleegrasmischung aus unterschiedlichen Pflanzen besteht und nicht aus einer Monokultur.

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird das Untersuchungsgebiet vorgestellt und die Versuchsanordnung respektive der Versuchsaufbau beschrieben. Die Messmethoden werden erläutert. Weiter werden die verwendeten Programme sowie Geräte aufgeführt und beschrieben, wie und wo sie im Arbeitsprozess zur Anwendung kommen. Die Methoden zur statistischen Auswertung sowie die Methode zur Erstellung der Oberflächenmodelle (Structure from Motion SfM) werden erklärt.

3.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf dem Gelände des Campus Grüental der ZHAW in Wädenswil ($47^{\circ}13'01.2''N$, $8^{\circ}40'59.5''E$, Höhe 514 m ü. M.), Schweiz. Die Versuchsfelder für die Befliegung bestehen aus 12 einzelnen Flächen mit einer Abmessung von je 3.0 m x 4.0 m (vgl. Abbildung 2).



Abbildung 2: Situation der Versuchsfelder auf dem Gelände des Campus Grüental der ZHAW. Anordnung der Versuchsfelder mit Abmessung.

Die Flächen sind im Jahr 2015 mit einer Kleeegrasmischung (20% Leguminosen, 80% Gräser) ange-sät worden. Die Kleeegrasmischung eignet sich für die Silofutterproduktion. Eine aktuelle Begutach-tung der Versuchsfelder zeigt, dass die Gräser dominieren und nur noch ein geringer Anteil an Le-guminosen vorhanden ist (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 3: Ausschnitt aus Versuchsfeld, Gräser dominierend mit einzelnen Leguminosen

Die Flächen sind Bestandteil eines mehrjährigen Kalkversuchs mit Pfannenschlacke aus der Stahl-industrie und konventionellem Kalk. Da kein Effekt auf die Höhe der Vegetation der Felder erkennbar ist (siehe Kapitel 4 Resultate), wird die unterschiedliche Behandlung der Flächen in die Auswertung der Resultate nicht miteinbezogen.

Die Versuchsfelder liegen innerhalb eines 1.6 ha grossen Gebietes, welches mit den UAVs befliegen und aufgenommen wurde (vgl. Abbildung 4, oranger Perimeter).

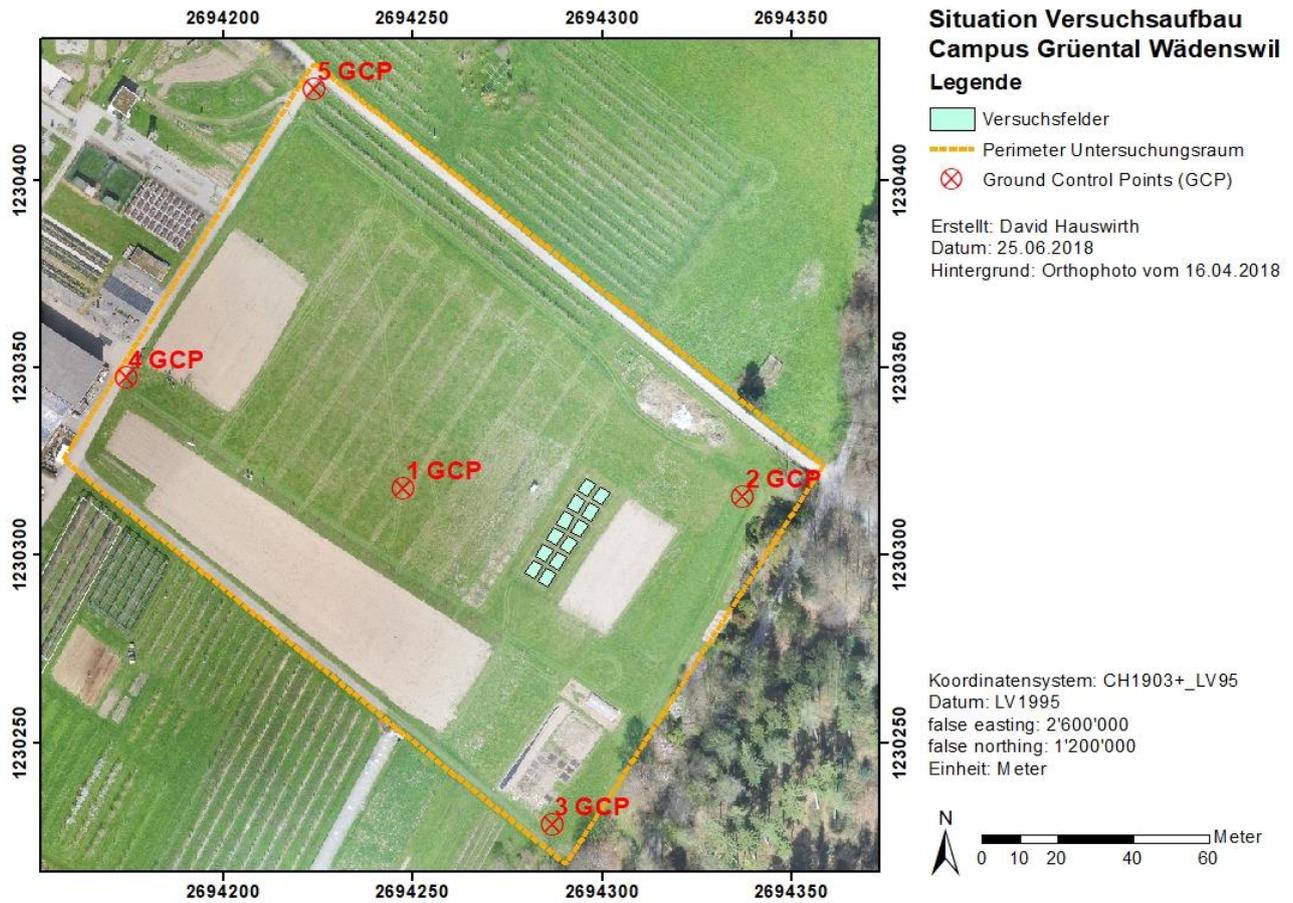


Abbildung 4: Untersuchungsgebiet mit den Versuchsfeldern und den gleichmässig verteilten GCPs

Um die Lagegenauigkeit der aufgenommenen Orthofotos und der Oberflächenmodelle erheblich zu erhöhen, wurden fünf "Ground Control Points" (GCPs) auf dem Gelände gesetzt (vgl. Abbildung 4) und mit einem GNSS Gerät eingemessen. Näher auf das verwendete Gerät wird in Kapitel 3.4.3 eingegangen. Für die GCPs 1 bis 3 wurden angemalte Gartenplatten (Abbildung 5) für die Dauer der Untersuchung gesetzt. Die GCPs 4 und 5 bestehen aus zwei Abwasserkanaldeckeln, die sich an geeigneter Position im Gelände befinden.



Abbildung 5: GCP Betongartenplatte angemalt 60 cm x 60 cm

3.2 Versuchsanordnung Befliegung

Die Untersuchung wurde mit drei unterschiedlichen Drohnen und Bildauflösungen durchgeführt Tabelle 1.

Die Versuchsflächen wurden zu Beginn vor der ersten Befliegung mit den Drohnen gemäht. Danach wurden mit der ersten Befliegung A1 Daten gesammelt um ein Geländemodell (oder Digitales Terrain Modell (DTM)) der Versuchsfelder zu erstellen. Für jede Drohne und Bildauflösung wurde so ein separates Geländemodell erstellt. Weiter wurden während der Hauptwachstumsphase von Mai bis Juli drei Aufnahmen realisiert (A2, A3 und A4), die das Wachstum der Kleeegrasmischung zu drei verschiedenen Zeitpunkten festhalten (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht des Versuchsaufbau mit durchgeführten Aufnahmen, Drohnentyp, Kamera, Flughöhe respektive Bild Auflösung und Datum.

Übersicht Befliegung der Versuchsfelder							
Aufnahme Nr.	Drohnen Typ	Kamera	Auflösung**	Flughöhe	Datum Aufnahme	Anzahl Bilder	Bildüberlappung*
A1	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	3cm/pixel	85m	11.04.2018	74	>5
A1	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	6cm/pixel	170m	11.04.2018	54	>5
A1	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	3cm/pixel	128m	11.04.2018	37	>5
A1	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	6cm/pixel	255m	11.04.2018	20	>5
A1	DJI Phantom 4	FC6310_8.8 (RGB)	1cm/pixel	38m	11.04.2018	172	>5
A2	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	3cm/pixel	85m	07.05.2018	70	>5
A2	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	6cm/pixel	170m	07.05.2018	54	>5
A2	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	3cm/pixel	128m	07.05.2018	34	>5
A2	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	6cm/pixel	255m	07.05.2018	20	>5
A2	DJI Phantom 4	FC6310_8.8 (RGB)	1cm/pixel	38m	07.05.2018	172	>5
A3	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	3cm/pixel	85m	08.06.2018	74	>5
A3	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	6cm/pixel	170m	08.06.2018	54	>5
A3	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	3cm/pixel	128m	08.06.2018	37	>5
A3	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	6cm/pixel	255m	08.06.2018	20	>5
A3	DJI Phantom 4	FC6310_8.8 (RGB)	1cm/pixel	38m	08.06.2018	172	>5
A4	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	3cm/pixel	85m	02.07.2018	70	>5
A4	eBee	CanonPowerShotS110 (RGB)	6cm/pixel	170m	02.07.2018	54	>5
A4	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	3cm/pixel	128m	02.07.2018	34	>5
A4	eBee plus	S.O.D.A_10.6 (RGB)	6cm/pixel	255m	02.07.2018	20	>5
A4	DJI Phantom 4	FC6310_8.8 (RGB)	1cm/pixel	38m	02.07.2018	172	>5

*Anzahl der Bilder, die die gleiche Stelle Abdecken innerhalb des Untersuchungsgebietes

**Die Auflösung ist auf cm gerundet je nach Flug gab es Abweichungen im Millimeterbereich.

Die Aufnahmen wurden alle über die Mittagszeit zwischen 10:30 Uhr und 13:30 Uhr erstellt, um negative Effekte durch Schattenwurf zu minimieren. Bei Wind wurde nicht geflogen, damit die Qualität der Luftbilder durch ein unruhiges Flugverhalten der Drohnen nicht beeinflusst wird. Bei aufkommendem Wind während der Aufnahmen wurde abgebrochen und der Aufnahmetag verschoben, um alle Aufnahmen an einem Tag bei gleichen Verhältnissen durchführen zu können.

3.3 Messmethoden

3.3.1 “Differenzmethode“

Um die Vegetationshöhe mittels drohnenbasierten Oberflächenmodellen zu ermitteln, wurde die “Differenzmethode“ angewendet. Hierbei wurde vorgängig (bevor die Vegetation anfängt zu wachsen) ein Geländemodell erstellt (Aufnahme A1), um eine Referenzhöhe zu erhalten. Die Wuchshöhe der Vegetation wurde anhand der Differenz zwischen der Höhe des Geländemodells und den Höhen der aufgenommenen Oberflächenmodelle ermittelt.

3.3.2 Handmessung

Im Anschluss an die Befliegungen A2, A3 und A4 wurde immer eine Handmessung der Vegetationshöhe durchgeführt (vgl. Abbildung 6). In jedem der 12 Plots wurde die Höhe fünfmal gemessen (Tabelle in Anhang 4). Die Messpunkte wurden regelmässig über die Versuchsfelder verteilt. Die grosse Heterogenität des Grasbewuchses mit Senken und einzelnen weit aufsteigenden Gräser erschwerte eine genaue Bestimmung der Wuchshöhe. Diese Problematik bei der Messung der Vegetationshöhe wird in der Studie von (Bendig et al., 2014) angesprochen. Eine Verbesserung oder Lösung dieses Problems ist in der Literatur jedoch nicht zu finden. Als Höhe wurde ein Durchschnittswert der am Messpunkt vorhanden Grashöhen angenommen Abbildung 7.

Aus den fünf Werten jedes einzelnen Plots wurde der Mittelwert errechnet, um diesen mit den Mittelwerten aus den Oberflächenmodellen vergleichen zu können.

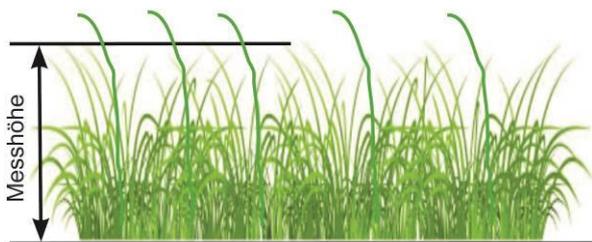


Abbildung 7: Schema Messung Bewuchs Höhe.



Abbildung 6: Foto Messung der Bewuchshöhe im Feld von Hand.

3.4 Verwendete Hard- und Software

Abbildung 8 zeigt einen Überblick über die im Arbeitsprozess verwendete Hard- und Software. Die Grafik veranschaulicht ausserdem den groben zeitlichen Ablauf der durchgeführten Arbeitsschritte. Jeder Arbeitsschritt ist anschliessend an die Abbildung 8 beschrieben.

Im Voraus wurden die Versuchsfelder bestimmt und die fehlenden GCPs gesetzt sowie der allgemeine Versuchsablauf definiert (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2).

Workflow-Grafik über verwendete Hard und Software:

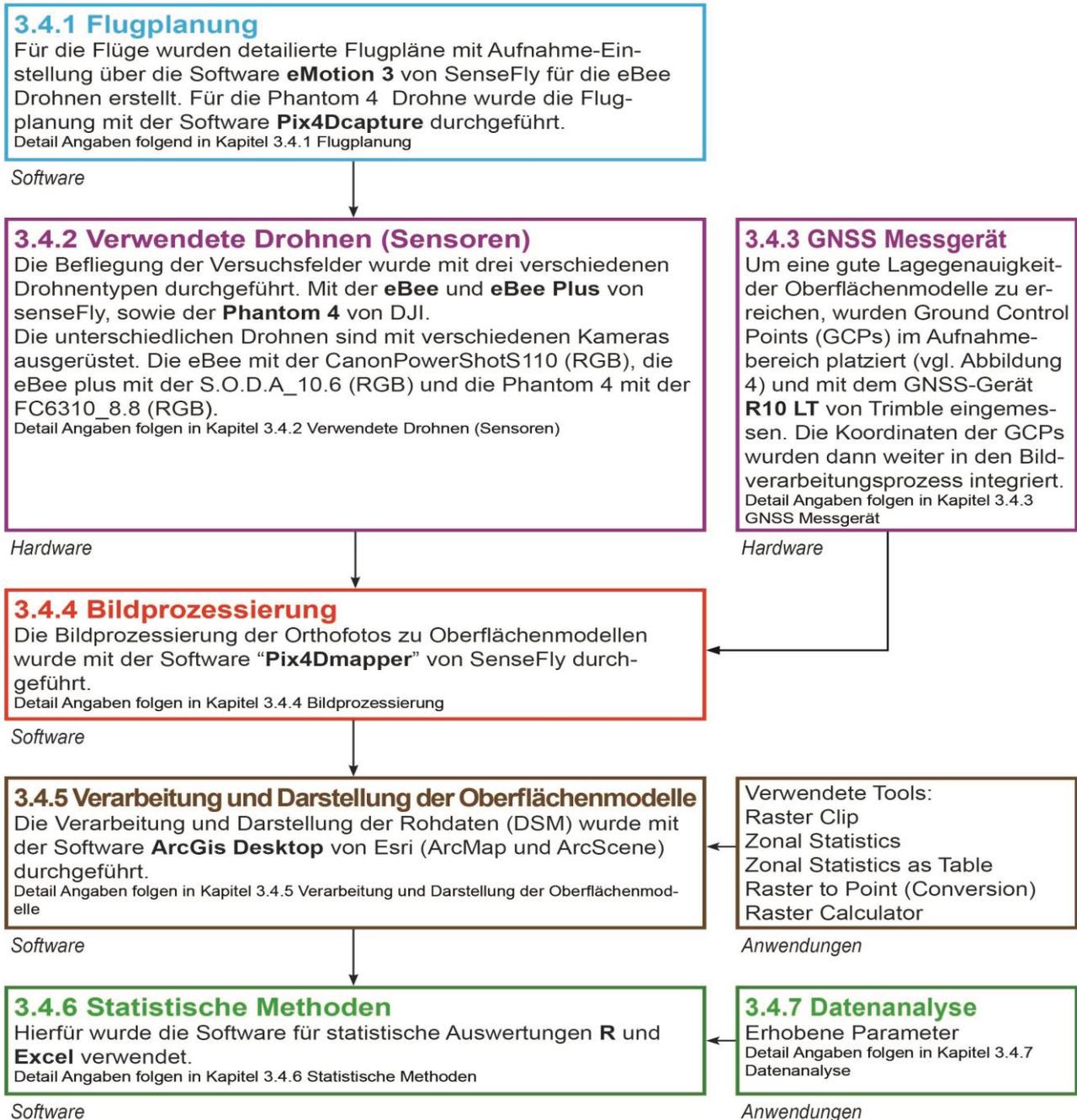


Abbildung 8: Prozessmodell der einzelnen Schritte dieser Arbeit mit verwendeter Hard- und Software.

3.4.1 Flugplanung

Für die Flugplanung der eBee und eBee Plus Drohnen wurde mit der Software eMotion 3 von SenseFly («senseFly - eMotion3», 2018) gearbeitet.

In diesem Programm wurde der Bereich definiert, der mit den Drohnen aufgenommen werden soll. Flughöhe, Landepunkt mit Anflugschneise, verwendete Kamera und Überlappung der Bildaufnahmen wurden festgelegt. In Abbildung 9 ist exemplarisch ein Flugplan dargestellt.

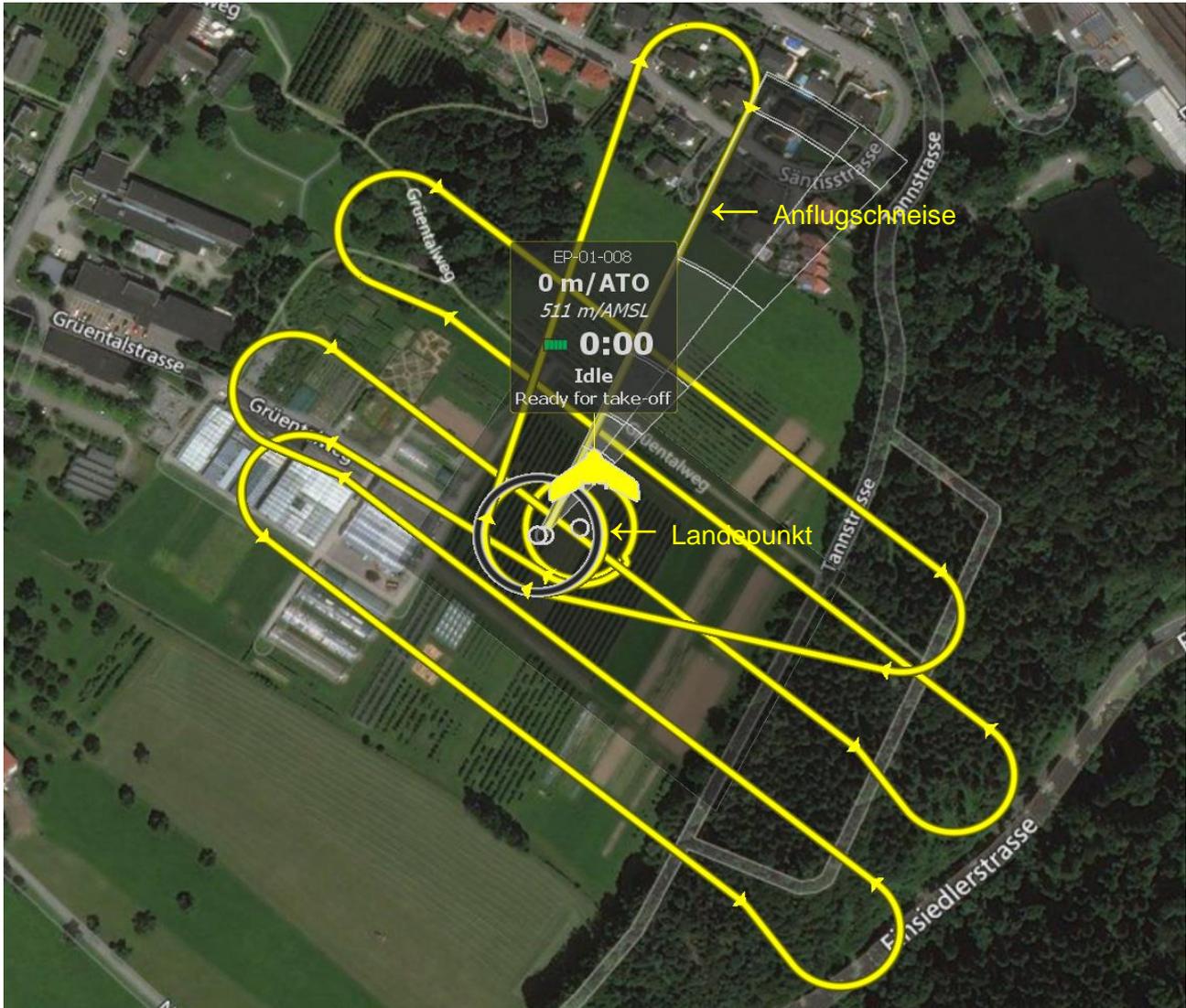


Abbildung 9: Befliegungsplan von oben für die Drohne eBee Plus bei einer Flughöhe von 128m und einer räumlichen Auflösung von 3cm mit der Software eMotion3.

Für die Flugplanung der Phantom 4 Drohne wurde die App Pix4Dcapture verwendet, welche direkt auf einem Tablet angewendet wurde («Pix4Dcapture», 2018). Mit dieser Software wurden die gleichen Parameter eingestellt (Flughöhe, Landepunkt, verwendete Kamera und Überlappung) wie bei der Software eMotion3.

3.4.2 Verwendete Drohnen (Sensoren)

In dieser Untersuchung wurden die Drohnen eBee, eBee Plus und Phantom 4 verwendet (vgl. Abbildung 10). Jede dieser Drohnen ist mit einer unterschiedlichen Kamera ausgestattet und hat andere Flugeigenschaften in Bezug auf Flugzeit und Geschwindigkeit (vgl. Tabelle 2).

Die Phantom 4 wird im Handel hauptsächlich als Drohne für den privaten Gebrauch angeboten. Durch ihre Spezifikationen (vgl. Tabelle 2) eignet sie sich jedoch auch für professionelle Anwendungen.

Die eBee Drohnen sind für professionelle Anwendungen gedacht. Für Aufnahmen der eBee Drohnen gibt der Hersteller eine Genauigkeit (Horizontal und Vertikal) von 3 bis 5cm an unter Verwendung von GCPs («senseFly - Compare», 2018).

Für die Aufnahmen der Phantom 4 sind keine Angaben seitens des Herstellers zur Genauigkeit vorhanden.



Abbildung 10: Die verwendeten Drohnen: eBee und eBee Plus von SenseFly, Phantom 4 von DJI
Die unterschiedlichen Eigenschaften der Drohnen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Vergleich der Drohnen und Kamera-Sensoren

Drohne:	eBee Plus	eBee	Phantom 4
Typ:	Flächenflügler	Flächenflügler	Quadrokopter
Max. Aufnahmefläche:	+++	++	+
Preis:	+++	++	+
Von Hand steuerbar:	Nein	Nein	Ja
Hersteller:	SenseFly	SenseFly	DJI
Max. Flugzeit:	59min	50min	30min
Max. Geschwindigkeit:	40-110km/h	40-90km/h	72km/h
Gewicht:	1.1kg	0.69kg	1.38kg
Sensor:	RGB	RGB	RGB
Kamera:	S.O.D.A_10.6	CanonPowerShot S110	FC6310_8.8
Bildauflösung:	5472x3648 (20 Megapixel)	4000x3000 (12 Megapixel)	5472x3648 (20 Megapixel)

3.4.3 GNSS Messgerät

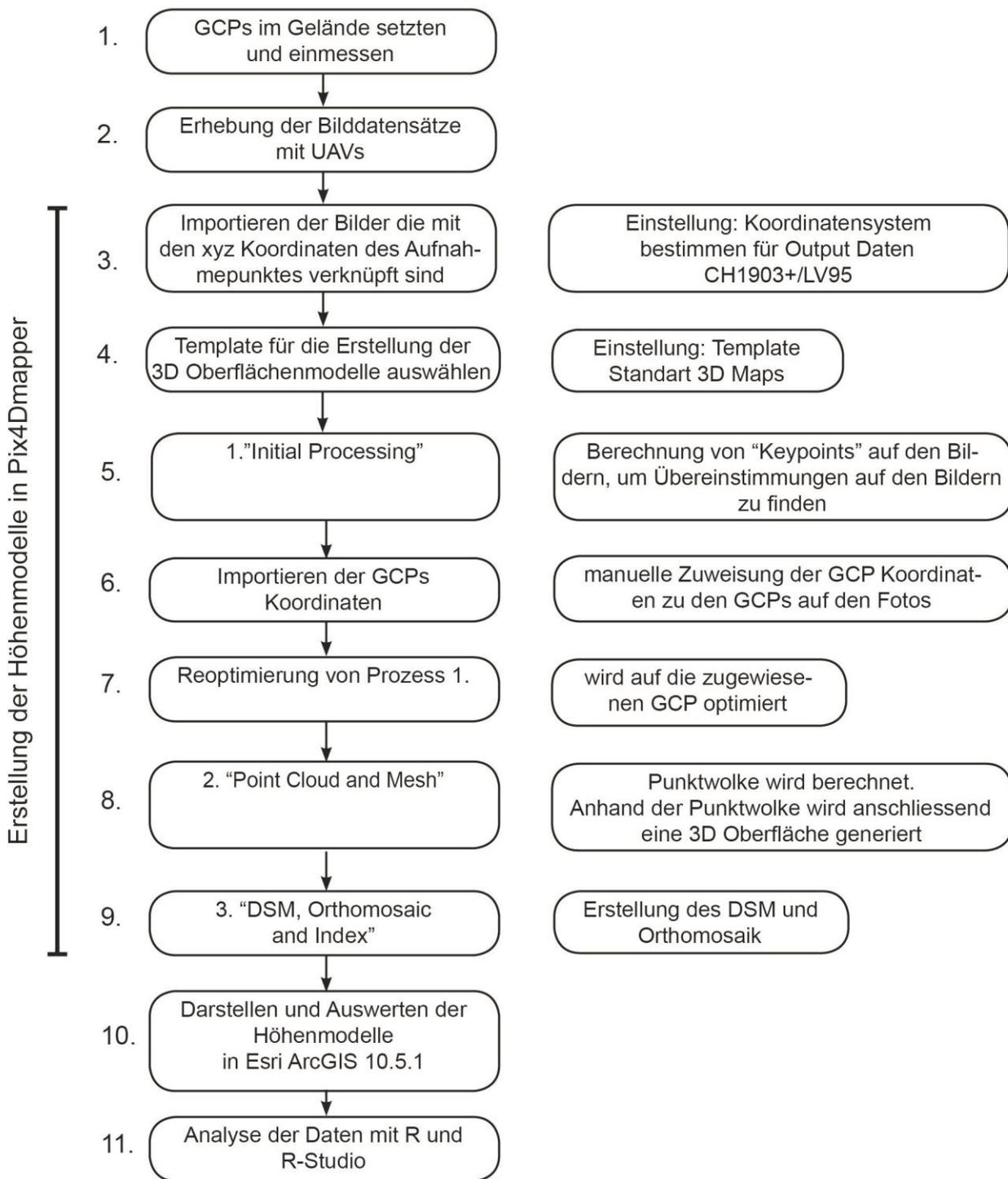
Für das Einmessen der Ground Control Points wurde das GNSS Gerät R10 LT von Trimble verwendet. Das Messgerät R10 LT erlaubt differentielle GNSS-Positionsmessungen, welche eine hohe Genauigkeit erreichen. Mit diesem Gerät ist das Einmessen der GCPs auf eine horizontale Genauigkeit von 10-20mm und einer vertikalen Genauigkeit von 20-30mm möglich. Das exakte Einmessen der GCPs ist ein wichtiger Punkt für die Genauigkeit der später generierten Oberflächenmodelle, da die Oberflächenmodelle auf diese Punkte in Bezug auf die Lage referenziert werden.

3.4.4 Bildprozessierung

Pix4Dmapper: Für die Erstellung der Oberflächenmodelle und Punktwolken mittels Structure from Motion (SfM) Photogrammetrie wurde die Software Pix4Dmapper 4.2.13 verwendet, die auch in der professionellen Vermessung Anwendung findet («Pix4Dmapper», o. J.). Mehr zur Methode von SfM in Kapitel 3.5.

Die Arbeitsschritte und Prozesse, die in der Pix4Dmapper Software ablaufen und ausgeführt werden, werden in der folgenden Grafik dargestellt (vgl. Abbildung 11). Bei der Anwendung der Software mussten nur wenige Einstellungen getätigt werden. Das Koordinatensystem musste bestimmt werden, das Template für die Ausgabe der Oberflächenmodelle musste festgelegt und die GCPs auf den Luftbildern den entsprechenden gemessenen Koordinaten auf dem Feld zugewiesen werden.

Workflow-Grafik über die Erstellung der Oberflächenmodelle:



links: Arbeitsschritte 1. bis 11.

rechts: Einstellungen und Hintergrundabläufe

Abbildung 11: Grafik der ablaufenden Arbeitsschritte und Prozesse beim Erstellen der Oberflächenmodelle mit der Pix4mapper Software.

3.4.5 Verarbeiten und Darstellen der Oberflächenmodelle

Für die Verarbeitung und Darstellung der Oberflächenmodelle aus der Bildprozessierung wurde die Software ArcGIS 10.5.1 von Esri verwendet («ArcGIS for Desktop | Esri Schweiz», o. J.). Diese enthält verschiedene Softwarekomponenten wie ArcMap und ArcScene, welche hier zum Einsatz kamen. Die Oberflächenmodelle wurden auf die Versuchsflächen zugeschnitten und mit den Tools “Zonal Statistics as Table“ und “Raster to Point“ bearbeitet, um Tabellen für die Analyse und Auswertung der Daten zu erstellen (vgl. Abbildung 12).

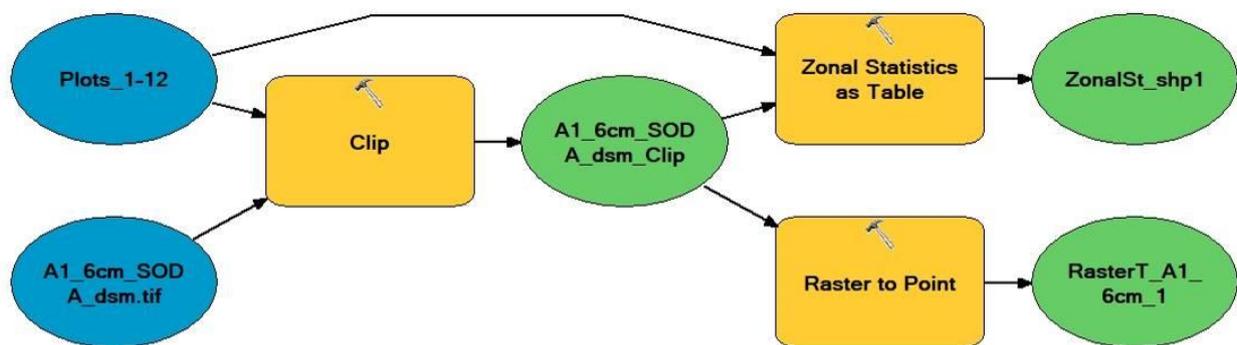


Abbildung 12: Modell der zusammenhängenden Prozesse in ArcMap. Beispiel Verarbeitung des Oberflächenmodells von Aufnahme 1 mit einer Auflösung von 6cm mit der eBee Plus (Kameratyp SODA_10.6).

Mit “Zonal Statistics as Table“ wurde die Minimalhöhe, Maximalhöhe, Standardabweichung und Mean Höhe der einzelnen Plots als Tabelle exportiert (vgl. Tabelle 3 und Anhang 2).

Die Funktion “Raster to Point“ erstellte aus jeder Rasterzelle einen Punkt in einem shp File. Für drei einzelne, zufällig ausgewählte Plots (Nr. 6, 8 und 12) wurden Tabellen mit den Höhen jedes einzelnen Punktes erstellt.

Mit der Funktion “Raster calculator“ wurden Differenzmodelle von zwei Oberflächenmodellen erstellt (vgl. Abbildung 14 bis 17 und Anhang 1).

Für eine 3D Darstellung der Oberflächenmodelle wurde die Software ArcScene 10.5.1 von Esri verwendet. Mit dieser Anwendung konnte ein subjektiver Vergleich der Oberflächenmodelle gewonnen werden.

3.4.6 Statistische Methoden

Die Datentabellen die mit ArcMap generiert wurden, wurden mithilfe von Microsoft Excel 2013 verwaltet. Zur statistischen Analyse wurde R (Version 3.2.2) in Kombination mit R-Studio (Version 0.99.486) verwendet. Das Signifikanzniveau wurde standardmässig auf Alpha = 95% festgelegt. Die Normalverteilung wurde mit Hilfe von QQPlots (visuelle Analyse) sowie den Tests nach Kolmogorov-

Smirnof und Shapiro-Wilk überprüft.

Korrelationen wurden mit dem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten berechnet, da abhängige sowie unabhängige Variablen numerisch waren und die Normalverteilung der Residuen (zu einer Regressionsgerade) erfüllt war. In diesem Fall wurde zusätzlich eine Regressionsanalyse durchgeführt. (Draper & Smith, 1998)

Um Unterschiede zwei verschiedener Mittelwerte auf ihre Signifikanz zu testen, wurde der T-Test angewendet.

Die Resultate wurden mithilfe von Boxplots und Scatterplots visualisiert (vgl. Kapitel 4. Resultate). Die R-Scripte zu den durchgeführten Analysen sind im Anhang 6 zu finden, die Resultate zur Prüfung der Daten auf Normalverteilung in Anhang 5.

3.4.7 Datenanalyse

Für die Beantwortung der Fragestellungen wurden folgende Parameter aus den Rohdaten (Oberflächenmodelle) extrahiert und zueinander in Beziehung gesetzt:

1. Es wurde für jeden der 12 Plots (vgl. Abbildung 2), Befliegung (A1-A4), Drohrentyp (eBee, eBee Plus und Phantom 4) und räumliche Auflösung (1x 1 cm, 2x 3 cm und 2x 6 cm) den Mittelwert (Mean) der Vegetationshöhe erhoben. Diese Werte wurden dann mit den von Hand erhobenen Mittelwerten der Vegetationshöhe mittels Regressionsanalyse verglichen. Das Ziel dieses Vergleichs ist die Antwort auf die Frage, ob die Vegetationshöhen der Oberflächenmodelle mit den von Hand gemessenen Werten korrelieren. Die Korrelationswerte R^2 werden in $R^2 > 0.7$ (hohe Korrelation), $R^2 < 0.7$ bis $R^2 > 0.5$ (mittlere Korrelation) und $R^2 < 0.5$ (geringe Korrelation) eingeteilt.
2. Für die Plots Nr. 6, 8 und 12 wurde für jeden Rasterpunkt die Höhe in eine Tabelle extrahiert. Dies wurde für sämtliche Aufnahmen A2-A4 und die räumliche Auflösung 1 cm, 3 cm und 6 cm durchgeführt. Die Punkthöhen der einzelnen Plots wurden in Boxplots dargestellt (vgl. Kapitel 4. Resultate). Die einzelnen Boxplots wurden pro Aufnahme (A2-A4) miteinander verglichen und es wurde analysiert, ob ein signifikanter Unterschied der Höhen feststellbar ist. Die Signifikanz des Höhenunterschieds zur vorangehenden Aufnahme (A1 zu A2, A2 zu A3 und A3 zu A4) wurde mit einem T-Test überprüft. Höhenunterschiede zwischen einer zur vorangegangenen Aufnahme die kleiner als 5cm sind, werden hier nicht als signifikant gewertet, weil Ungenauigkeiten in der Messmethode (GNSS Messgerät und UAV Aufnahmen (vgl. Kapitel 3.4.2 und 3.4.3) dies nicht zulassen.
3. Um herauszufinden, welche Drohne und welche räumliche Auflösung ein Oberflächenmodell der Vegetation liefert, das am nächsten an die von Hand gemessenen Vegetationshöhen kommt, werden die R^2 -Werte aus den Regressionsanalysen von Punkt 1. miteinander verglichen.

3.5 Structure from Motion (SfM) Photogrammetrie

In diesem Unterkapitel wird kurz auf die Methode "Structure from Motion" (SfM) eingegangen, die das Programm Pix4Dmapper anwendet, um damit die Oberflächenmodelle zu erstellen.

SfM ist eine photogrammetrische Technik, die aus zweidimensionalen Fotos dreidimensionale Strukturen z.B. Terrainmodelle erstellt. Auf Grundlage zentralperspektivischer Abbildungen wird mit Hilfe von mathematischen Modellen aus den Bildinformationen eine dreidimensionale Oberfläche (z.B. ein Geländemodell) rekonstruiert. Für die Umwandlung der Bildaufnahmen in räumliche Objekte müssen folgende Parameter bekannt sein:

Parameter der Inneren Orientierung: Kamerakonstante (Brennweite), X,Y Koordinaten des Bildhauptpunktes H

Parameter der Äusseren Orientierung: X,Y,Z Koordinaten des Aufnahmeorts (Kamerakoordinaten), 3 unabhängige Drehwinkel z.B. Azimut, Neigung und Kantung oder bei Senkrechtaufnahmen die Flughöhe

Für die Rekonstruktion eines Objektes reicht jedoch ein Messbild nicht, es müssen mindestens zwei überlappende Bilder vorhanden sein Abbildung 13 (Kraus, 2004) (Luhmann, 2010).

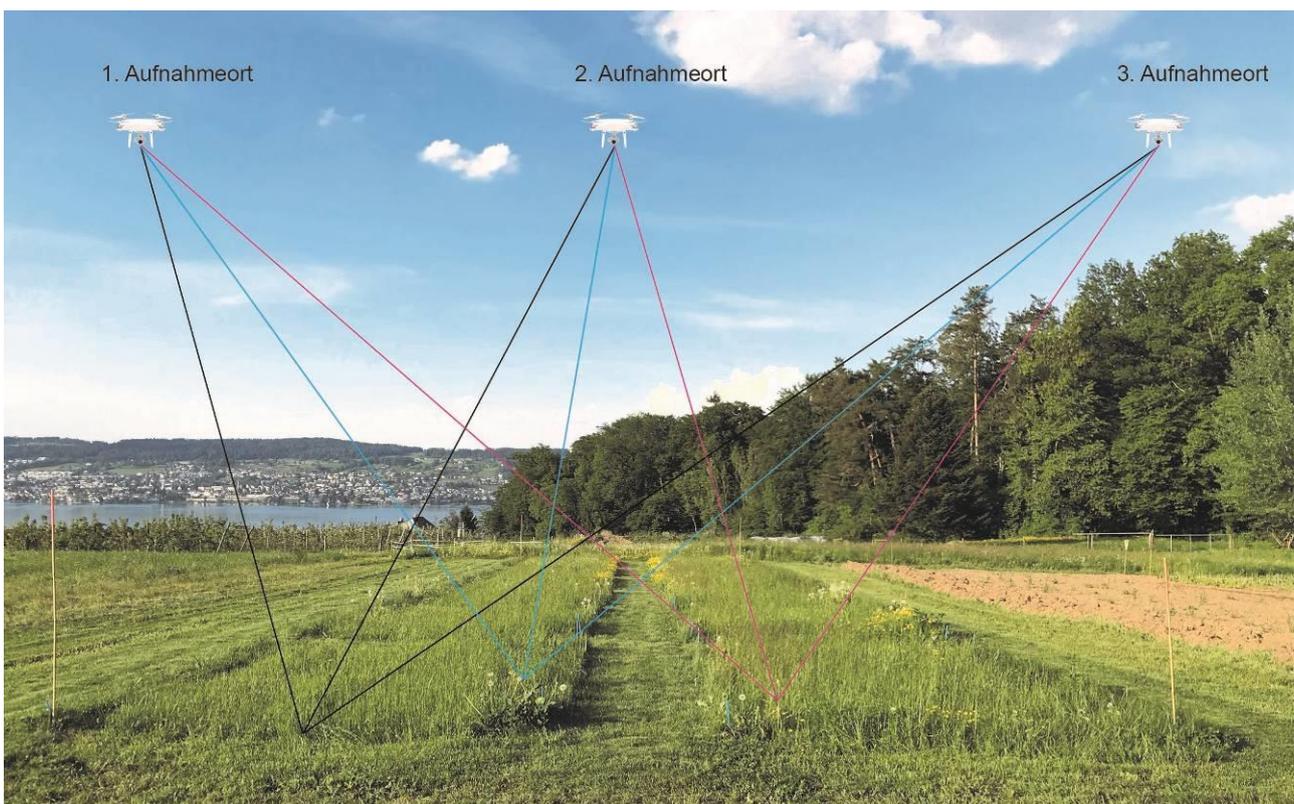


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Aufnahme identischer Bildpunkte von drei verschiedenen Aufnahmestandorten.

4 Resultate

Insgesamt wurden mit den unterschiedlichen Drohnen (eBee, eBee Plus, Phantom 4), Auflösungen (1 cm, 3 cm, 6 cm) und Aufnahmezeitpunkten (A1 11.04.2018, A2 07.05.2018, A3 08.06.2018, A4 02.07.2018) 20 unterschiedliche Oberflächenmodelle erstellt. Gleichzeitig wurde die Vegetationshöhe dreimal von Hand gemessen zu den Zeitpunkten A2, A3, und A4 (zum Zeitpunkt A1 wurde das Geländemodell aufgenommen, was den Nullpunkt angibt und somit keine Vegetationshöhen gemessen).

4.1 Feststellung der Höhenunterschiede während der Vegetationsperiode

Die Oberflächenmodelle oder "crop surface model" (CSM) der einzelnen Plots zeigen einen Höhenunterschied zu den unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (A1 - A4) auf. Die Differenzmodelle und die 3D-Visualisierungen der Aufnahmen in den Abbildung 14 bis 16 veranschaulichen das Vegetationswachstum über die Untersuchungsperiode. Exemplarisch sind hier die Aufnahmen der eBee Drohne mit der Kamera CanonPowerShotS110 und der Auflösung 3 cm dargestellt. Für die weiteren Drohnen und unterschiedlichen Auflösungen sind die Abbildungen der Differenzmodelle und 3D-Visualisierungen in Anhang 1 zu finden. Sie zeigen alle ein ähnliches Bild, einzig mit höherer Auflösung ist die heterogene Struktur der Oberfläche besser ersichtlicher.

Das Vegetationswachstum fällt über die 12 Plots unterschiedlich aus. Die Plots Nr. 1 bis 6 zeigen ein geringeres Wachstum als die Plots 7 bis 12. Dies ist besonders in der ersten Aufnahme A2 sichtbar (Meanhöhen der Plots Nr. 1 bis 6 zwischen 6cm und 13cm, Meanhöhe der Plots Nr. 7 bis 12 zwischen 13 cm und 19 cm) (vgl. Abbildung und Tabelle 3). Das grösste Wachstum hat zwischen der Aufnahme A2 und A3 stattgefunden (Höhenzuwachs der Meanhöhe zwischen 29 cm und 40 cm) (vgl. Abbildung 17 und Tabelle 3). Zwischen den letzten Aufnahmen A3 und A4 gab es fast kein Wachstum mehr, in gewissen Bereichen der Plots konnte sogar eine Abnahme der Vegetationshöhe detektiert werden (vgl. Abbildung 17). Die Meanhöhen der Plots haben von der Aufnahme A3 zu A4 zwischen 11 cm und 17 cm abgenommen (vgl. Tabelle 3). In Abbildung 16, Aufnahme A4, sind die Vegetationshöhen an den Rändern der Plots meist tiefer. Dies ist auch auf Abbildung 15 Aufnahme A3 sichtbar, jedoch weniger ausgeprägt. Die hier in diesem Abschnitt angegebenen Werte beziehen sich auf die Aufnahmen der Kamera CanonPowerShotS110, Auflösung 3 cm. Die Werte für die weiter untersuchten Drohnen und Auflösungen sind in Anhang 2 zu finden. Die Tendenzen im Wachstumsverlauf, die für die CanonPowerShotS110 beschrieben wurden, unterscheiden sich von den restlichen Kameratypen und Auflösungen nicht.

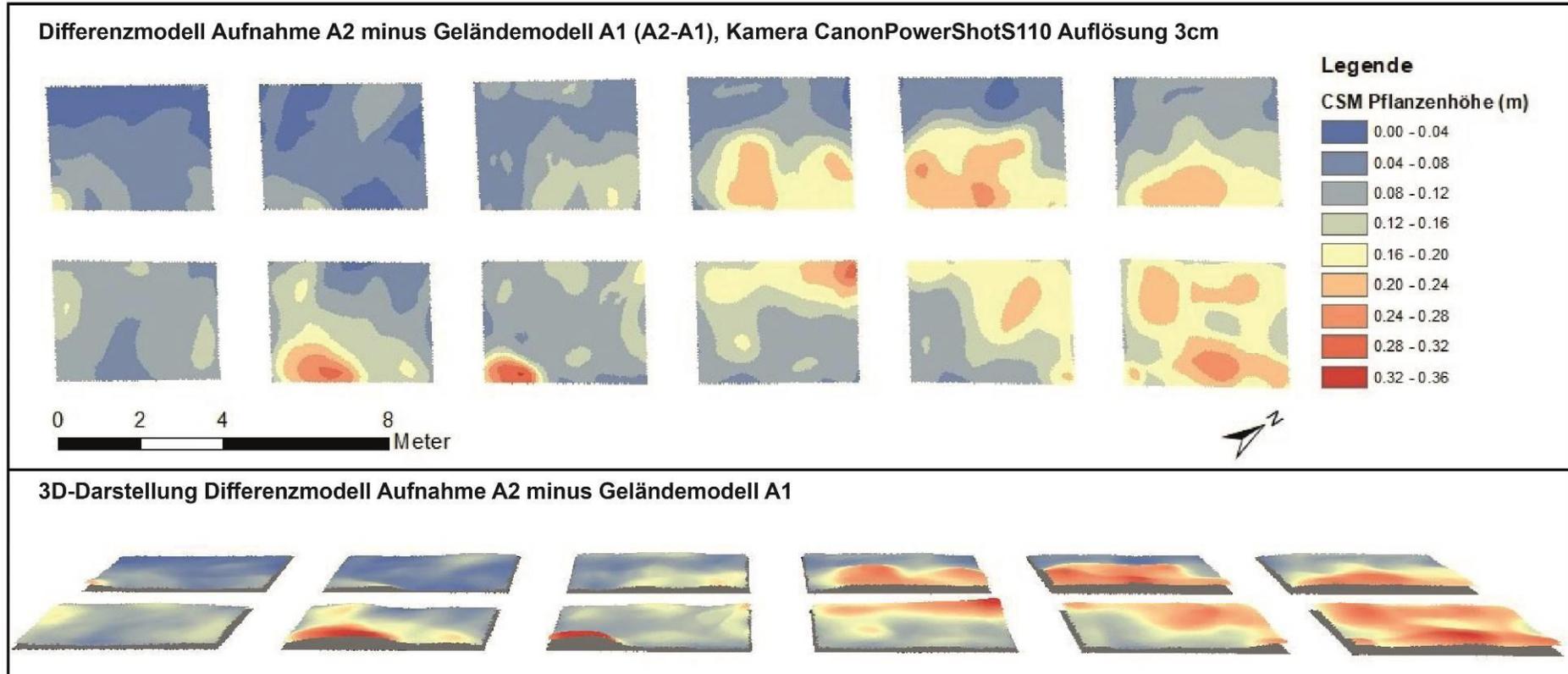


Abbildung 14: Differenzmodell Aufnahme A2 minus Geländemodell A1, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).

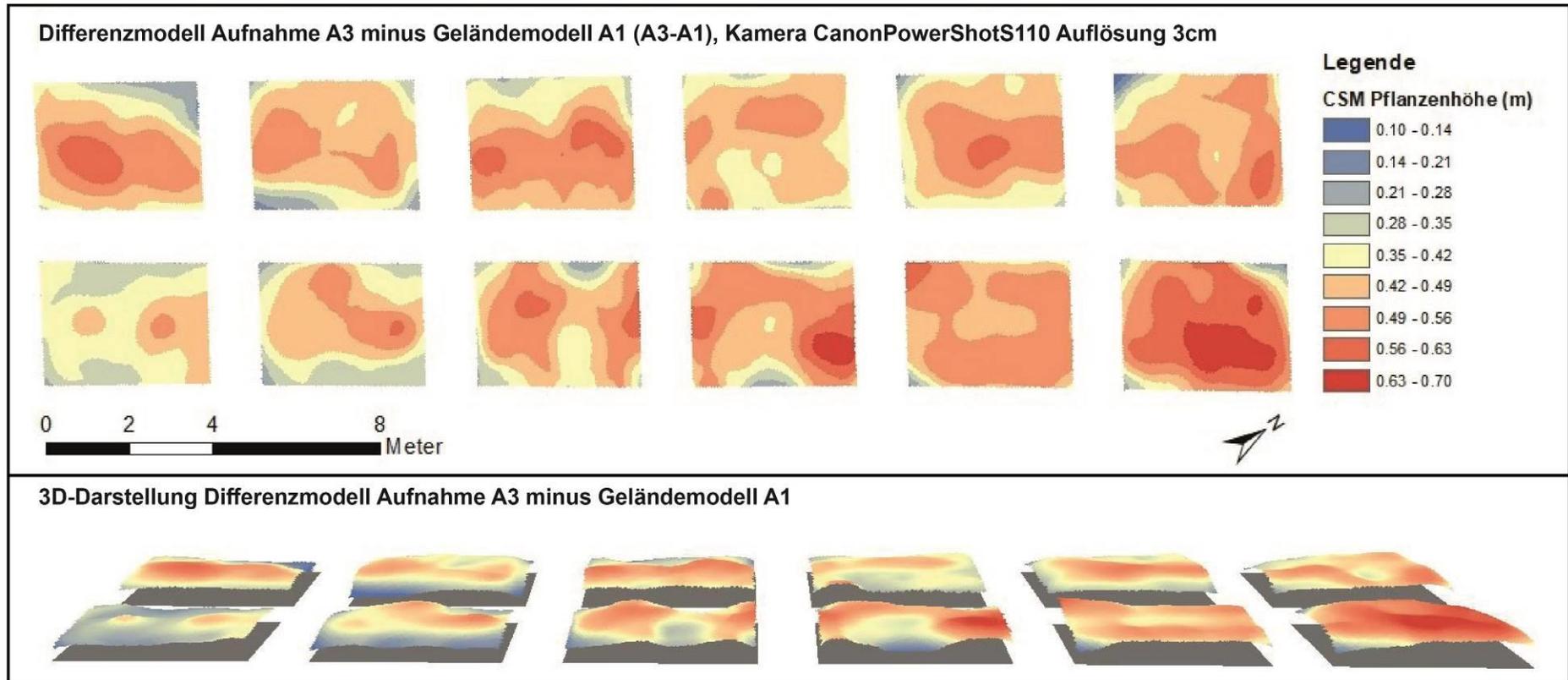


Abbildung 15: Differenzmodell Aufnahme A3 minus Geländemodell A1, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).

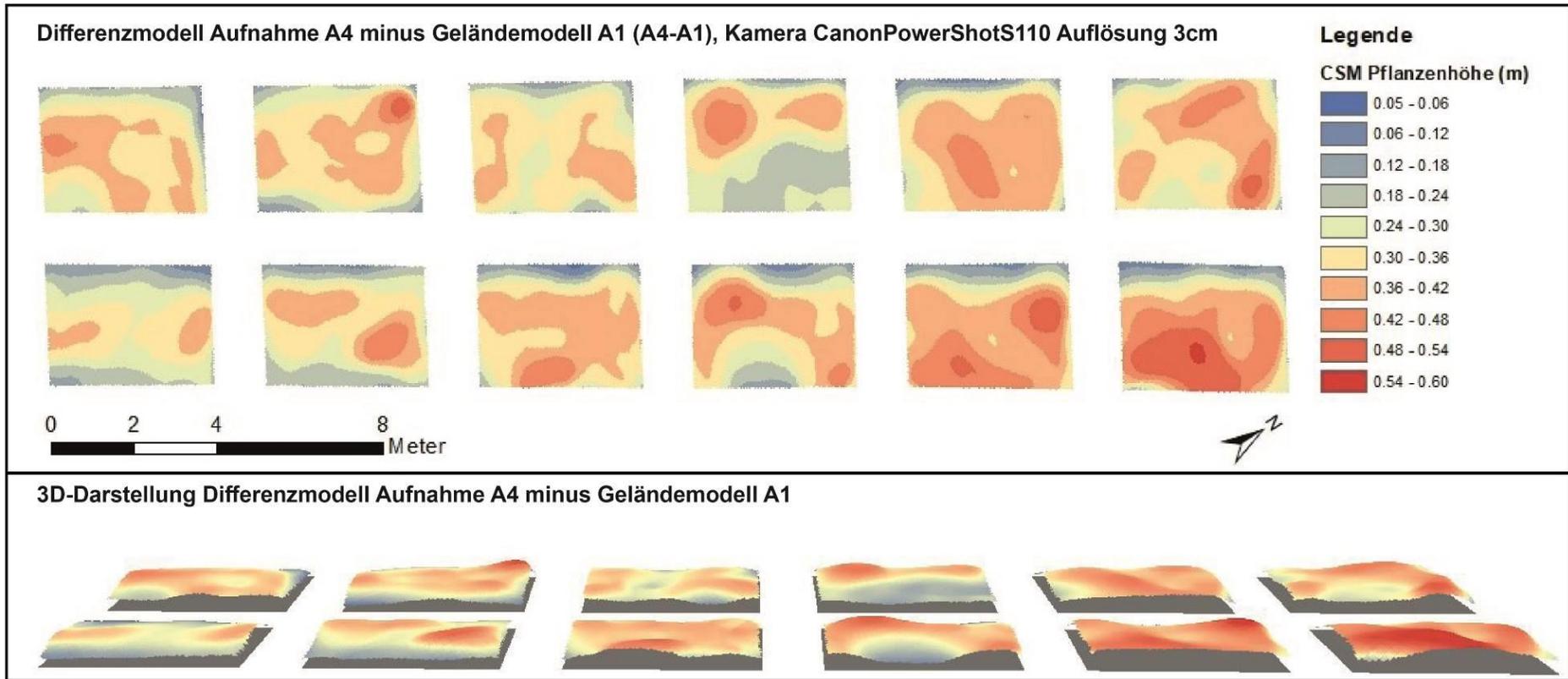


Abbildung 16: Differenzmodell Aufnahme A4 minus Geländemodell A1, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).

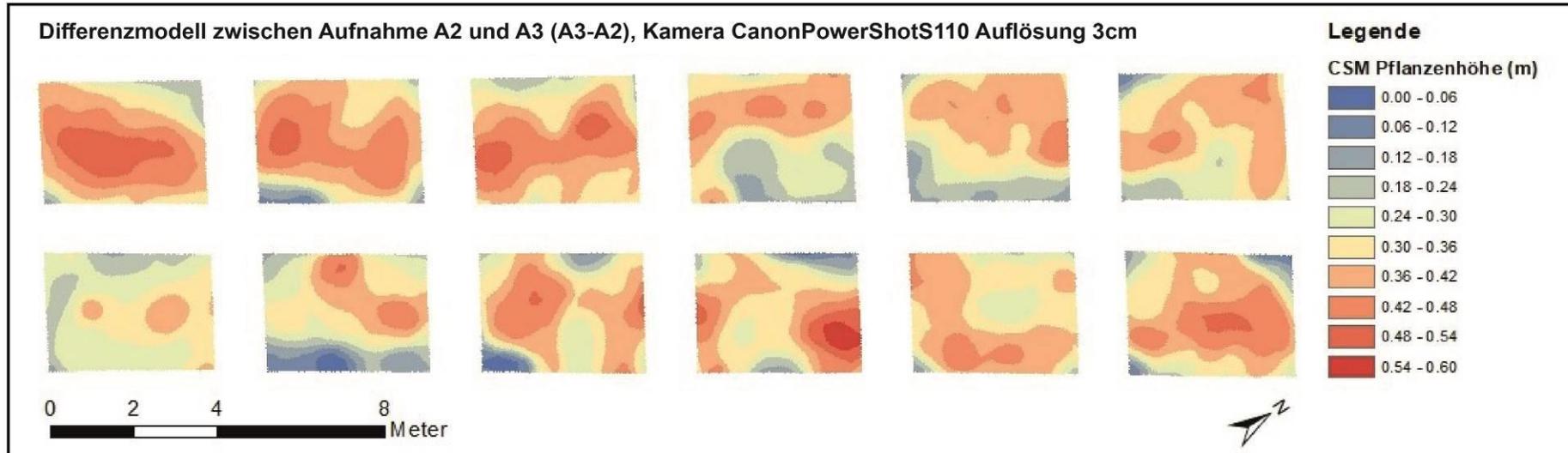


Abbildung 17: Differenzmodell Aufnahme A3 minus A2, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), Differenzmodell Aufnahme A4 minus A3, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).

Tabelle 3: Differenzwerte der Vegetationshöhen zum Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1, sowie Höhenunterschiede der Vegetation zwischen den Aufnahmen A2 zu A3 und A3 zu A4. Die Resultate sind für jeden Plot (Nr. 1 bis 12) einzeln aufgeführt und als Mittelwert über die 12 Plots angegeben.

Aufnahmen eBee, Kamera CanonPowerShotS110, räumliche Auflösung 3cm							Höhenunterschied der Vegetation zwischen den Aufnahmen A3-A2 und A4-A3						
Wachstumshöhe der Vegetation ab Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1							Höhenunterschied der Vegetation zwischen den Aufnahmen A3-A2 und A4-A3						
Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m	Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m
A2-A1	1	0.01	0.18	0.17	0.06	0.03	A3-A2	1	0.15	0.53	0.38	0.40	0.08
A2-A1	2	0.05	0.16	0.11	0.10	0.02	A3-A2	2	0.16	0.42	0.26	0.29	0.05
A2-A1	3	0.02	0.13	0.11	0.06	0.02	A3-A2	3	0.09	0.50	0.41	0.38	0.08
A2-A1	4	0.02	0.29	0.26	0.13	0.05	A3-A2	4	0.00	0.49	0.48	0.29	0.10
A2-A1	5	0.04	0.17	0.12	0.09	0.03	A3-A2	5	0.18	0.51	0.33	0.38	0.07
A2-A1	6	0.05	0.32	0.27	0.12	0.04	A3-A2	6	0.03	0.51	0.48	0.35	0.09
A2-A1	7	0.03	0.23	0.20	0.13	0.06	A3-A2	7	0.15	0.44	0.29	0.32	0.08
A2-A1	8	0.06	0.29	0.22	0.14	0.04	A3-A2	8	0.04	0.56	0.53	0.36	0.10
A2-A1	9	0.03	0.26	0.23	0.14	0.07	A3-A2	9	0.12	0.47	0.34	0.33	0.08
A2-A1	10	0.06	0.23	0.17	0.15	0.04	A3-A2	10	0.11	0.47	0.36	0.35	0.05
A2-A1	11	0.04	0.23	0.19	0.13	0.05	A3-A2	11	0.07	0.45	0.38	0.34	0.06
A2-A1	12	0.11	0.28	0.16	0.19	0.03	A3-A2	12	0.04	0.51	0.47	0.37	0.08
A2-A1	1 bis 12	0.04	0.23	0.19	0.12	0.04	A3-A2	1 bis 12	0.09	0.49	0.39	0.35	0.08
A3-A1	1	0.20	0.60	0.41	0.46	0.09	A4-A3	1	-0.25	-0.01	0.25	-0.13	0.06
A3-A1	2	0.26	0.50	0.24	0.39	0.05	A4-A3	2	-0.26	0.03	0.30	-0.11	0.05
A3-A1	3	0.18	0.54	0.36	0.44	0.07	A4-A3	3	-0.22	0.11	0.33	-0.11	0.05
A3-A1	4	0.21	0.57	0.36	0.42	0.07	A4-A3	4	-0.37	0.04	0.41	-0.12	0.06
A3-A1	5	0.26	0.58	0.32	0.48	0.07	A4-A3	5	-0.28	-0.03	0.25	-0.16	0.05
A3-A1	6	0.22	0.60	0.38	0.46	0.07	A4-A3	6	-0.42	0.06	0.48	-0.12	0.08
A3-A1	7	0.29	0.55	0.26	0.45	0.04	A4-A3	7	-0.32	-0.01	0.31	-0.15	0.06
A3-A1	8	0.24	0.66	0.42	0.49	0.08	A4-A3	8	-0.33	0.00	0.33	-0.17	0.07
A3-A1	9	0.18	0.58	0.40	0.47	0.06	A4-A3	9	-0.33	0.05	0.37	-0.11	0.06
A3-A1	10	0.20	0.61	0.42	0.50	0.04	A4-A3	10	-0.50	0.16	0.66	-0.13	0.10
A3-A1	11	0.11	0.58	0.47	0.48	0.06	A4-A3	11	-0.22	0.06	0.28	-0.12	0.05
A3-A1	12	0.18	0.70	0.51	0.56	0.09	A4-A3	12	-0.46	0.09	0.56	-0.17	0.09
A3-A1	1 bis 12	0.21	0.59	0.38	0.47	0.07	A4-A3	1 bis 12	-0.33	0.05	0.38	-0.13	0.07
A4-A1	1	0.10	0.44	0.34	0.33	0.06							
A4-A1	2	0.07	0.40	0.32	0.28	0.07							
A4-A1	3	0.11	0.51	0.40	0.33	0.06							
A4-A1	4	0.09	0.47	0.38	0.31	0.08							
A4-A1	5	0.13	0.41	0.28	0.32	0.05							
A4-A1	6	0.05	0.47	0.42	0.34	0.08							
A4-A1	7	0.11	0.46	0.35	0.30	0.07							
A4-A1	8	0.06	0.48	0.42	0.33	0.09							
A4-A1	9	0.08	0.45	0.37	0.35	0.07							
A4-A1	10	0.09	0.54	0.45	0.37	0.09							
A4-A1	11	0.10	0.49	0.40	0.35	0.06							
A4-A1	12	0.06	0.54	0.48	0.39	0.11							
A4-A1	1 bis 12	0.09	0.47	0.38	0.33	0.07							

Die Fotos in Abbildung 18 zeigen die Versuchsfelder zu den unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten während der Wachstumsphase der Vegetation. Die Vegetation hat sich auf den Aufnahmen A3 und A4 bräunlich verfärbt, dies wird durch die Reifung und spätere Abtrocknung der Grashalme verursacht.



Abbildung 18: Fotos der Versuchsfelder zu den unterschiedlichen Aufnahme Zeitpunkten A2 bis A4.

4.1.1 Resultate Boxplots

Die Boxplots zeigen ein ähnliches Bild wie die Differenzmodelle der Versuchsfelder oben (vgl. Abbildung 14 bis 17). In den Abbildungen 19 bis 23 sind die Boxplots der unterschiedlichen Auflösungen und Kameratypen exemplarisch dargestellt für den Plot Nr. 12. (Weitere Boxplots für die Plots Nr. 6 und 8 und die unterschiedlichen Auflösungen und Kameratypen sind in Anhang 3 zu finden.) Am meisten Ausreisser zeigt die Aufnahme A3 und A4 über alle Auflösungen und Kameratypen hinweg.

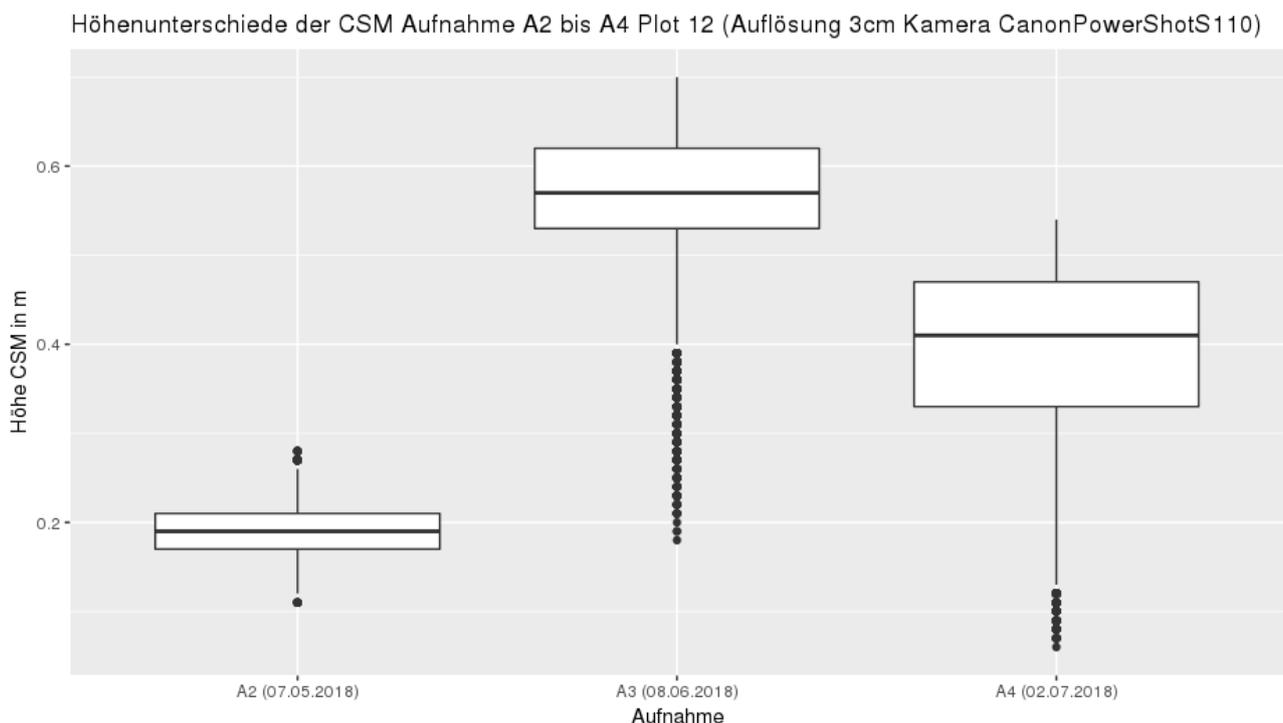


Abbildung 19: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 Plot Nr. 12, **Auflösung 3cm mit der Kamera CanonPowerShotS110**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 9600.

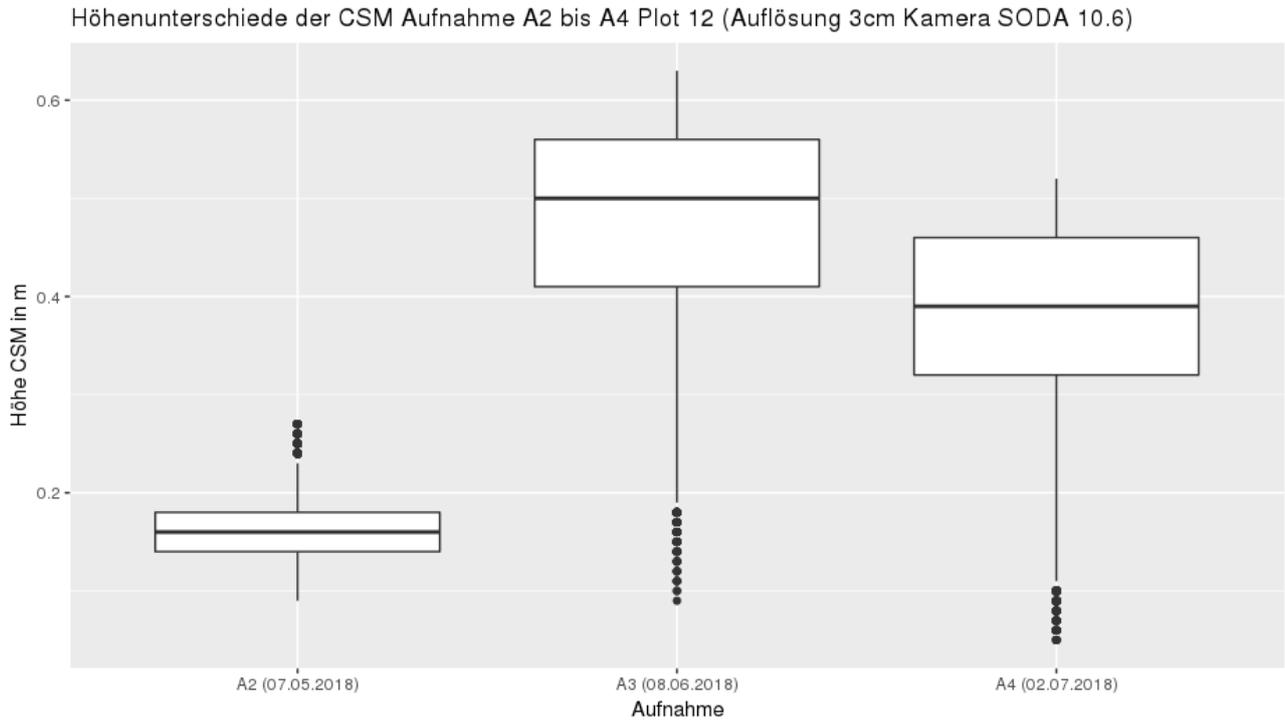


Abbildung 20: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, **Auflösung 3cm mit der Kamera SODA 10.6**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 11600.

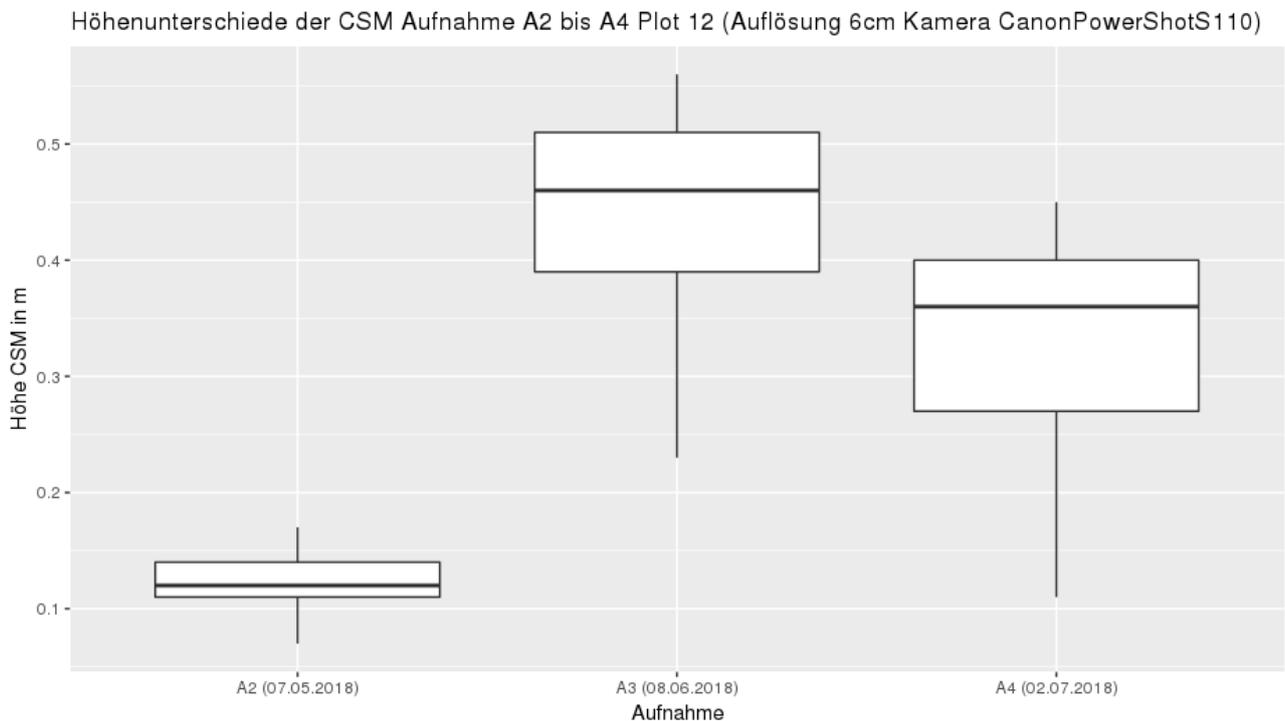


Abbildung 21: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, **Auflösung 6cm mit der Kamera CanonPowerShotS110**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 2700.

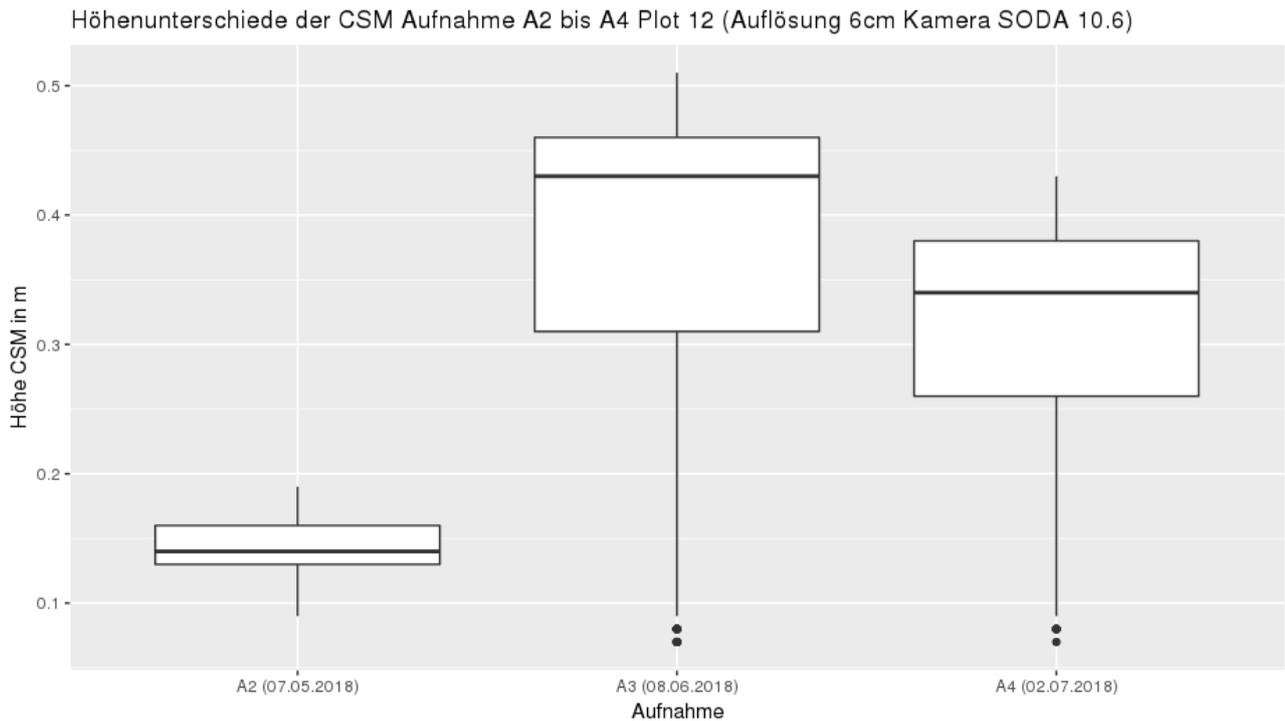


Abbildung 22: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, **Auflösung 6cm mit der Kamera SODA 10.6**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 3000.

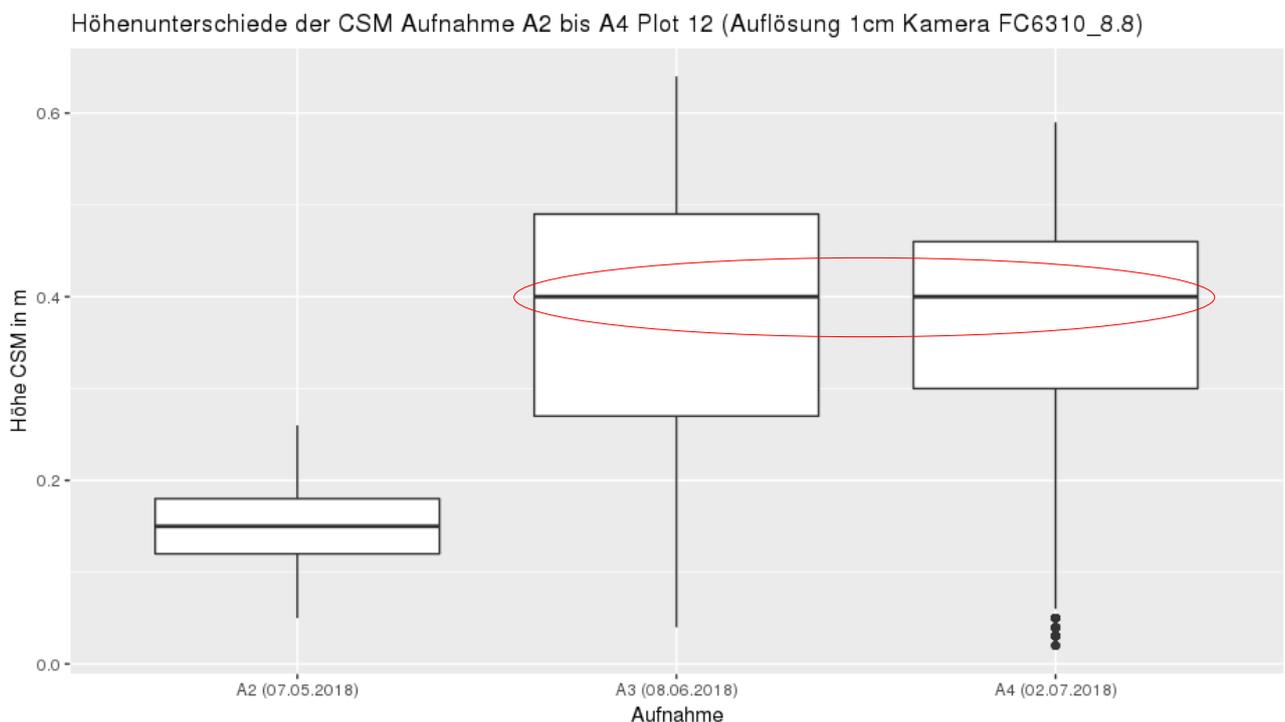


Abbildung 23: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, **Auflösung 1cm mit der Kamera FC6310_8.8** Anzahl Samples pro Boxplot ca. 117000. (Rot umkreist fast kein unterschied erkennbar)

Mit Ausnahme der Aufnahmen A3 – A4 des Plot Nr. 6 mit der Auflösung 6cm und des Plot Nr. 12 mit der Auflösung 1 cm, ist bei allen Boxplots ein deutlicher Unterschied der Mittelwerte erkennbar (besagte Boxplots auf Abbildung 23 und Anhang 3 oder als Werte in der Tabelle 4 ersichtlich).

4.1.2 Resultate T-Tests

Die Resultate der T-Tests zeigen, dass sich alle Mittelwerte der Aufnahmen von den vorangehenden Aufnahmen signifikant mit einem p-Wert von $2.2e-16$ bis $5.769e-16$ (vgl. Tabelle 4) unterscheiden. Durch die hohe Anzahl an Samples können sich jedoch auch Höhenunterschiede von 1cm signifikant unterscheiden. Da Höhenunterschiede von weniger als 5 cm in diesem Versuch nicht als signifikant angesehen werden können (Ungenauigkeiten in der Messmethode beschränken die Genauigkeit der Resultate, vgl. Kapitel 3.4.2 und 3.4.3), können diese Messwerte trotz statistisch korrektem signifikantem Unterschied nicht so gewertet werden.

Die Mittelwerte der Höhenunterschiede bewegen sich bei A1 zu A2 zwischen 0.05cm und 0.18cm, bei A2 zu A3 zwischen 0.25cm und 0.37cm und bei A3 zu A4 zwischen -0.17cm und 0.01cm. Somit ist beim ersten Set (A1-A2) ein geringeres Wachstum feststellbar als beim zweiten Set (A2-A3) bei dem der grösste Wachstumsschub stattgefunden hat. Beim letzten Set (A3-A4) ist ein grösstenteils negativer Höhenverlauf der Vegetationsoberfläche feststellbar (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Resultate T-Test sämtlicher Mittelwert vergleiche der Plots 6, 8 und 12 mit den Auflösungen 1, 3 und 6 cm und den Kameratypen FC6310_8.8, CanonPowerShotS110 und SODA 10.6. Rot markiert sind die Tests bei denen der Unterschied der getesteten Mittelwerte kleiner 5 cm ist.

Aufnahme:	Plot Nr.	Test:	Vergleich Aufnahme	Meanhöhe in m ü. M. (x)	Meanhöhe in m ü. M. (y)	Differenz Höhe in m $y - x$	p-value
Auflösung 3cm CanonPower- erschotS110	6	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	514.10	514.22	0.12	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.22	514.57	0.35	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.57	514.44	-0.13	< 2.2e-16
Auflösung 6cm CanonPower- schotS110	6	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	514.13	514.23	0.10	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.23	514.50	0.27	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.50	514.49	-0.01	< 5.769e-16
Auflösung 3cm SODA 10.6	6	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	514.17	514.22	0.05	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.22	514.53	0.31	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.53	514.48	-0.05	< 2.2e-16
Auflösung 6cm SODA 10.6	6	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	514.19	514.29	0.10	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.29	514.53	0.24	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.53	514.54	0.01	< 2.2e-16
Auflösung 1cm FC6310_8.8	6	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	514.15	514.22	0.07	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.22	514.51	0.29	< 2.2e-16
	6	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.51	514.48	-0.03	< 2.2e-16
Auflösung 3cm CanonPower- schotS110	8	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.86	513.99	0.13	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	513.99	514.35	0.36	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.35	514.18	-0.17	< 2.2e-16
Auflösung 6cm CanonPower- schotS110	8	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.88	513.99	0.11	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	513.99	514.30	0.31	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.30	514.21	-0.09	< 2.2e-16
Auflösung 3cm SODA 10.6	8	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.92	514.01	0.09	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.01	514.33	0.32	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.33	514.22	-0.11	< 2.2e-16

Auflösung 6cm SODA 10.6	8	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.95	514.05	0.10	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.05	514.31	0.26	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.31	514.25	-0.06	< 2.2e-16
Auflösung 1cm FC6310_8.8	8	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.91	514.01	0.10	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	514.01	514.26	0.25	< 2.2e-16
	8	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	514.26	514.21	-0.05	< 2.2e-16
Auflösung 3cm CanonPower- shotS110	12	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.43	513.61	0.18	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	513.61	513.98	0.37	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	513.98	513.81	-0.17	< 2.2e-16
Auflösung 6cm CanonPower- shotS110	12	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.46	513.58	0.12	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	513.58	513.90	0.32	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	513.90	513.79	-0.11	< 2.2e-16
Auflösung 3cm SODA 10.6	12	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.49	513.65	0.16	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	513.65	513.96	0.31	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	513.96	513.86	-0.10	< 2.2e-16
Auflösung 6cm SODA 10.6	12	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.52	513.66	0.14	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	513.66	513.91	0.25	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	513.91	513.84	-0.07	< 2.2e-16
Auflösung 1cm FC6310_8.8	12	Two Sampled T -Test	A1x - A2y	513.47	513.62	0.15	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A2x - A3y	513.62	513.85	0.23	< 2.2e-16
	12	Two Sampled T -Test	A3x - A4y	513.85	513.84	-0.01	< 2.2e-16

4.2 Vergleich der Oberflächenmodelle (hier auch CSM genannt) mit den Handmessdaten

Die Regressionsanalysen in den Abbildungen 24 bis 28 zeigen eine gute Korrelation zwischen den Mittelwerten der einzelnen Plots der Oberflächenmodelle und der Mittelwerte der Handmessdaten der Vegetationshöhe. Der p-Wert liegt bei allen Regressionsanalysen bei 0, somit kann bei allen eine Korrelation bestätigt werden. Der Pearson-Korrelationskoeffizient liegt zwischen $R^2 = 0.678$ und $R^2 = 0.853$ und weist somit eine hohe ($R^2 > 0.7$) bis mittlere ($R^2 < 0.7 > 0.5$) Korrelation aus.

Die beste Korrelation wurde mit der eBee Drohne und der 3cm Auflösung erreicht, die schlechteste mit der Phantom 4 mit einer Auflösung von 1cm.

In den Grafiken (vgl. Abbildung 24 bis 28) sind die grünen Punkte der letzten Messung A4 klar tiefer angesetzt als die blauen Punkte der Aufnahmen A3. Daraus lässt sich ablesen, dass sich die Vegetationshöhe zwischen Aufnahmezeitpunkt A3 und A4 verringert hat.

Trotz der guten Korrelation der Mean Höhe CSM und Mean Höhe Handmessung ist gut ersichtlich, dass die Korrelationsgerade (gestrichelte schwarze Linie) etwa um 15cm nach rechts verschoben ist im Vergleich zur schwarzen Linie (Korrelation von $R^2 = 1$). Dies zeigt, dass die Handmessungen etwa 15cm höher angesetzt sind als die Höhe der CSMs. Je höher die Vegetation steht, desto mehr nimmt dieser Effekt zu. Auf Abbildung 27 (SODA 10.6, Auflösung 6 cm) und Abbildung 28 (FC6310_8.8, Auflösung 1 cm) ist dies besonders gut sichtbar.

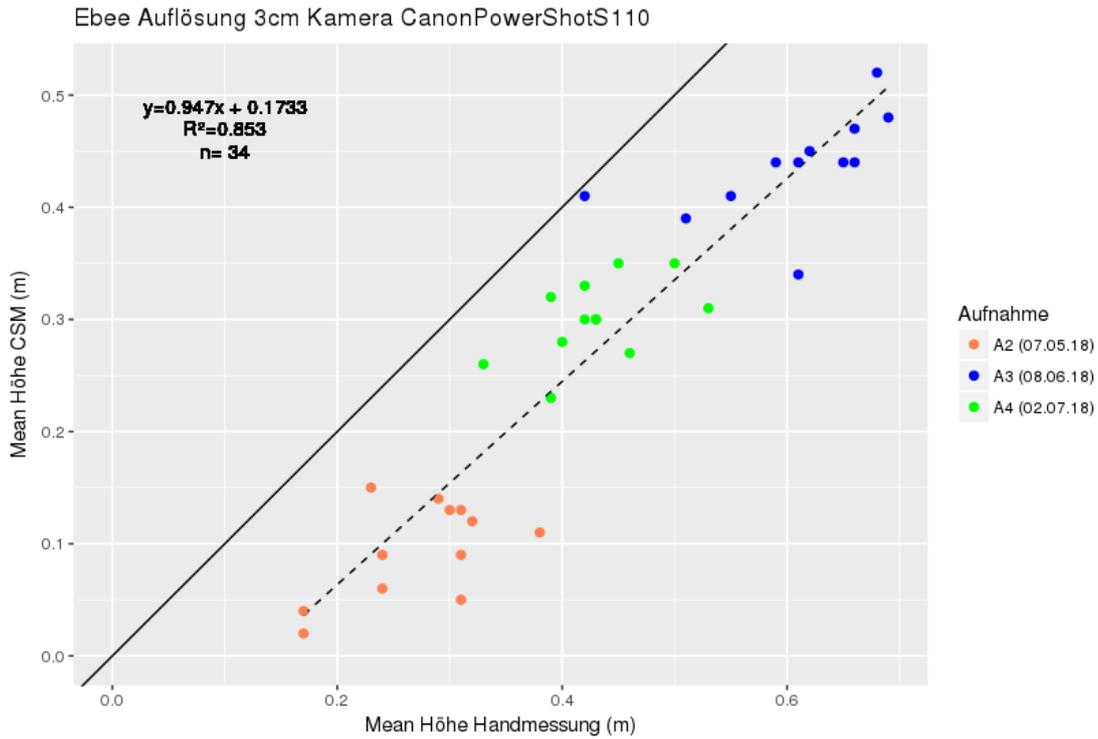


Abbildung 24: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. **3cm CanonPowerShotS110**

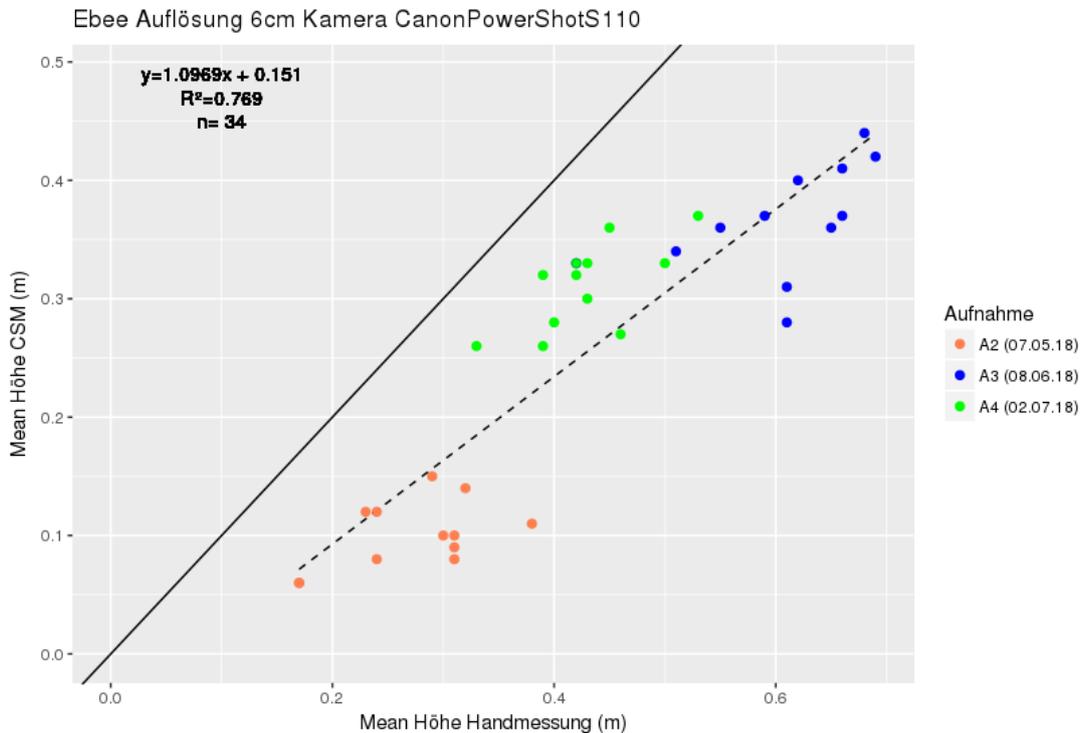


Abbildung 25: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. **6cm CanonPowerShotS110**

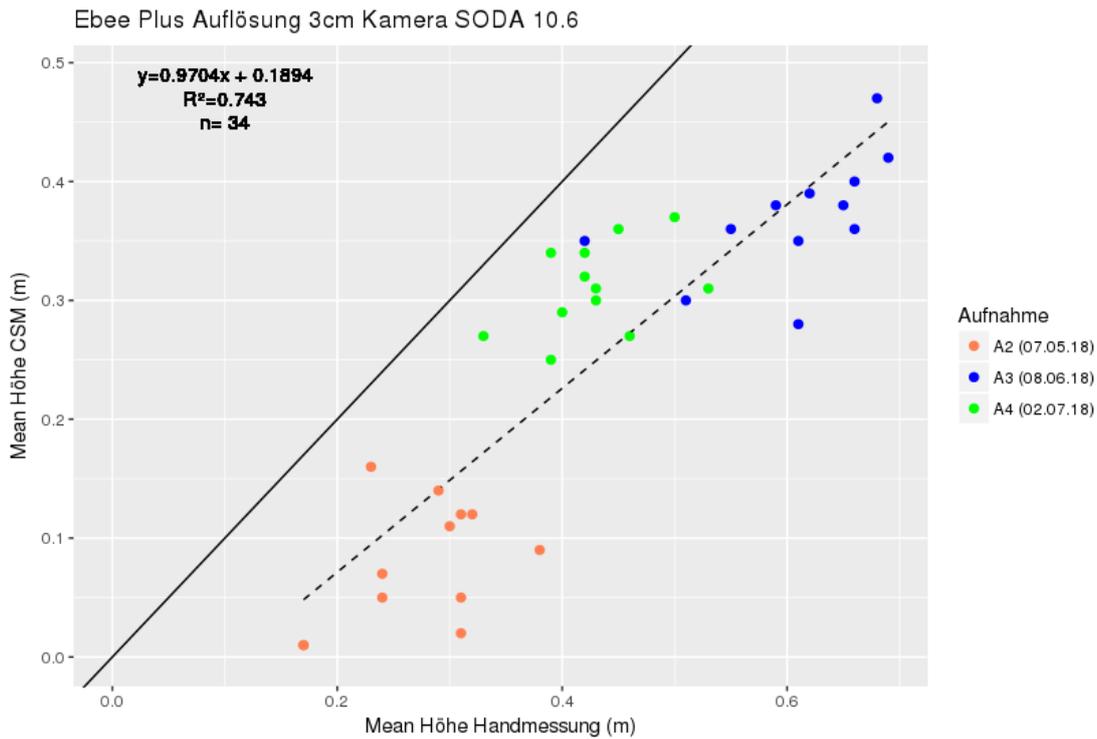


Abbildung 26: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. **3cm SODA 10.6**

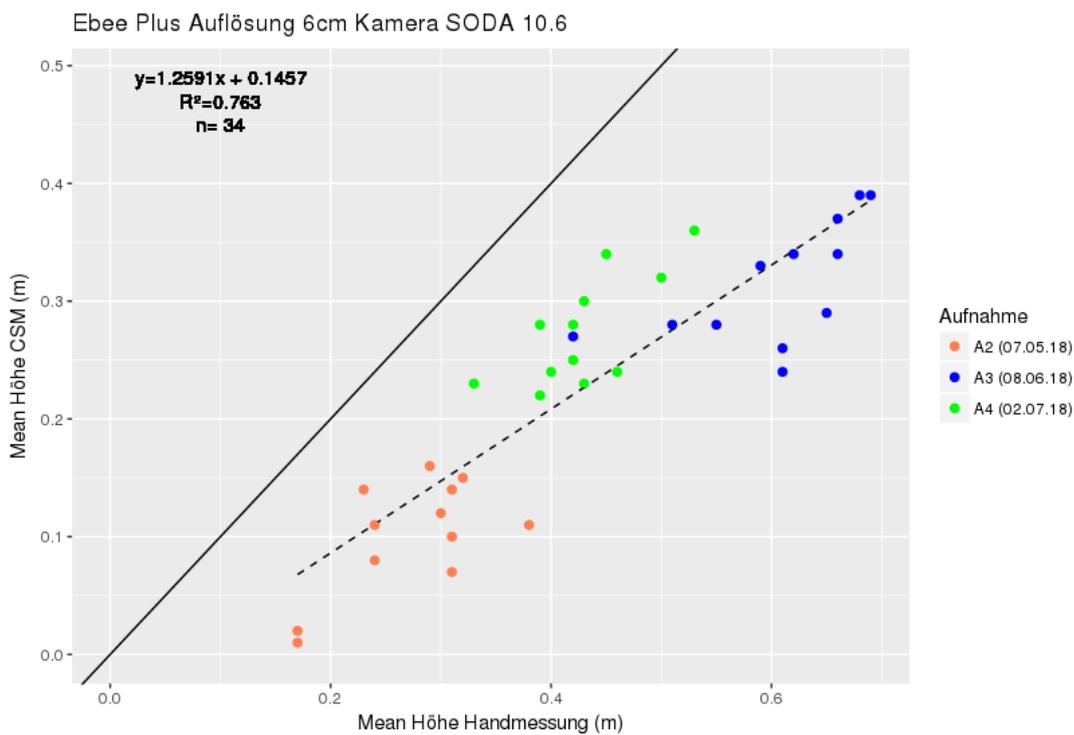


Abbildung 27: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. **6cm SODA 10.6**

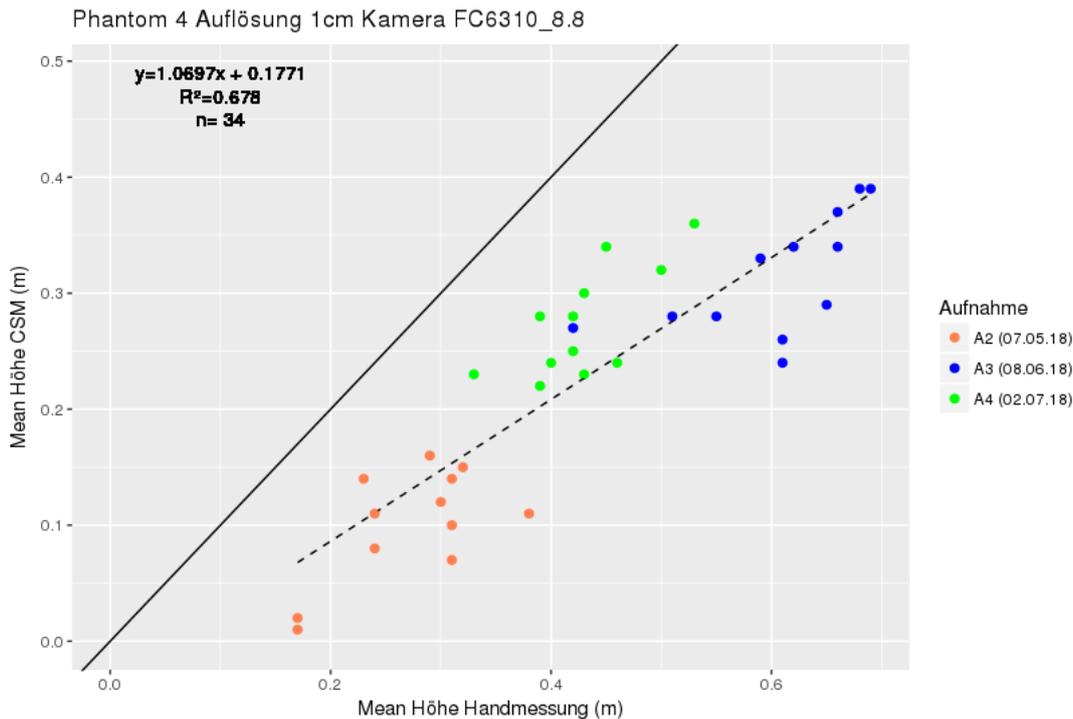


Abbildung 28: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. **1cm FC6310_8.8**

4.3 Vergleich der Drohnen respektive Sensoren

Die Gegenüberstellung der Korrelationsgeraden für die Daten der CanonPowerShotS110 und der SODA 10.6 für die Auflösungen 3 cm und 6 cm zeigt, dass die Kamera der eBee bessere Resultate liefert. Dazu wurden die Mean Höhe CSM und die Mean Höhe Handmessung miteinander verglichen (vgl. Abbildung 29). Die Korrelationswerte der CanonPowerShotS110 liegen beide mit Werten von $R^2=0.853$ und $R^2 = 0.769$ über den Werten der SODA 10.6 mit $R^2 = 0.763$ und $R^2 = 0.743$. Die Korrelationswerte liegen jedoch nicht weit auseinander. Die Resultate der Kamera FC6310_8.8 (Drohne Phantom 4) wurden in diesen Vergleich nicht miteinbezogen, da sich die räumliche Auflösung der Aufnahmen unterscheidet. Dies verunmöglicht einen Vergleich der Kameras ohne Einfluss der Auflösung. Im folgenden Kapitel 4.4 werden die Resultate der FC6310_8.8 in den Vergleich der unterschiedlichen Auflösungen miteinbezogen.



Abbildung 29: Vergleich der Mean Höhe CSM und Mean Höhe Handmessung der beiden Kameras CanonPowerShotS110 (links) und SODA 10.6 (rechts). Die zwei Farben zeigen die unterschiedlichen Auflösungen 3cm und 6cm.

4.4 Vergleich der Auflösungen 1 cm, 3 cm und 6 cm

Die Gegenüberstellung der Korrelationsgeraden der drei Auflösungen 1 cm, 3 cm und 6 cm zeigt, dass die mittlere Auflösung von 3cm die besseren Resultate liefert, wenn die Mean Höhe CSM und die Mean Höhe Handmessung miteinander verglichen werden. Auf Abbildung 30 ist der Vergleich der CanonPowerShotS110 und der FC6310_8.8 mit den drei verschiedenen Auflösungen abgebildet und auf der Abbildung 31 der Vergleich der SODA 10.6 und der FC6310_8.8 mit den drei verschiedenen Auflösungen. Beim Vergleich auf Abbildung 30 liefert die 3 cm Auflösung der CanonPowerShotS110 die genauesten Resultate mit einem R-Werten von $R^2 = 0.853$. In der Grafik auf Abbildung 31 liefern die Auflösungen 3 cm und 6 cm der SODA 10.6 ähnliche Resultate mit R-Werten von $R^2 = 0.763$ und $R^2 = 0.743$. Die 1cm Auflösung der Kamera FC6310_8.8 ergibt den schlechtesten R-Wert mit $R^2 = 0.678$.

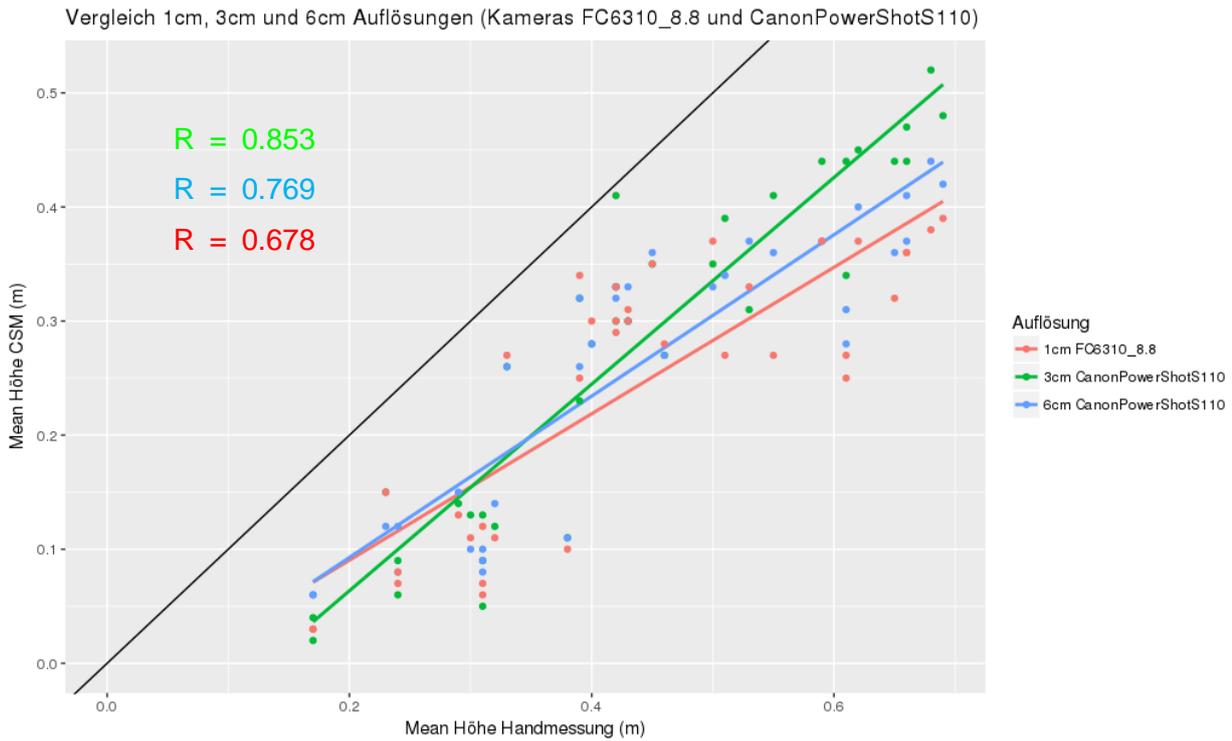


Abbildung 30: Vergleich der Mean Höhe CSM und Mean Höhe Handmessung der Auflösungen 1cm, 3cm und 6cm mit den Kameras CanonPowerShotS110 und FC6310_8.8. Die drei Farben zeigen die unterschiedlichen Auflösungen.

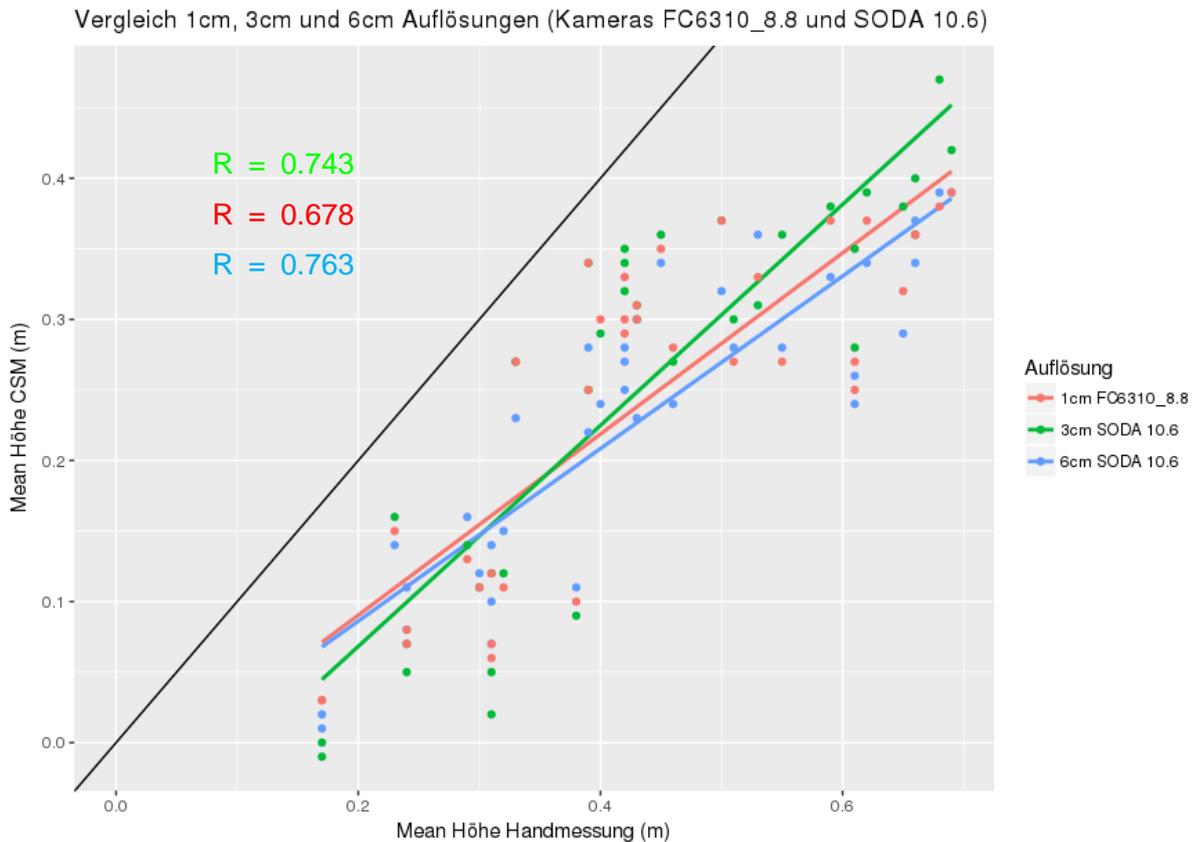


Abbildung 31: Vergleich der Mean Höhe CSM und Mean Höhe Handmessung der Auflösungen 1cm, 3cm und 6cm mit den Kameras SODA 10.6 und FC6310_8.8. Die drei Farben zeigen die unterschiedlichen Auflösungen.

5 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass es möglich ist, anhand von drohnenbasierten Luftbildern Oberflächenmodelle zu erstellen, die eine Aussage über den Wachstumsstand einer Klee grasfläche zulassen. Weiter belegen die Ergebnisse, dass sich nicht alle Bildpunktauflösungen und Drohnen/Kameras gleich gut eignen für die Aufnahme der Luftbilder. Im folgenden Kapitel werden die Hypothesen und Fragestellungen aus dem Kapitel 1.3 überprüft und beantwortet sowie die Methode und äussere Einflüsse diskutiert.

5.1 Beantwortung der Fragestellungen und Überprüfung der Hypothesen

Hypothese 1

- H0 Die Oberflächenmodelle aus den vier Aufnahmen mit unterschiedlichen Vegetationshöhen, unterscheiden sich signifikant voneinander.
- H1 Die Oberflächenmodelle aus den vier Aufnahmen mit unterschiedlichen Vegetationshöhen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

Die Hypothese 1 H0, wonach sich die vier Aufnahmen (A1 bis A4), mit unterschiedlichen Vegetationshöhen signifikant unterscheiden, kann verifiziert werden. Alle Aufnahmen der einzelnen Aufnahmeset (A1 bis A4) mit unterschiedlichen Auflösungen und Drohnen zeigten einen signifikanten Höhenunterschied der Mean Höhe zur vorangegangenen Aufnahme.

Obwohl die Hypothese 1 H0 verifiziert werden konnte und die Höhenunterschiede der getesteten Aufnahmen statistisch einen signifikanten Unterschied aufzeigten (vgl. Tabelle 4), muss angemerkt werden, dass durch die hohe Stichprobenzahl (Samples) auch ein Höhenunterschied von wenigen Zentimetern ein hoch signifikantes Resultat ergeben kann. Durch die Festlegung eines minimalen Höhenunterschieds (vgl. Kapitel 3.4.7), der von zwei Aufnahmen erreicht werden musste, wurden solche Resultate erkannt. Die Resultate der Höhenunterschiede der einzelnen getesteten Sets variierten je nach Auflösung und Kameratyp.

Hypothese 2

- H0 Die Höhen der Oberflächenmodelle aus den Aufnahmen A2 bis A4 korrelieren mit den von Hand gemessenen Höhen der Vegetation zu den jeweiligen Messzeitpunkten mit einem Korrelationskoeffizienten $R^2 = >0.7$.
- H1 Die Höhen der Oberflächenmodelle aus den Aufnahmen A2 bis A4 korrelieren nicht mit den von Hand gemessenen Höhen der Vegetation zu den jeweiligen Messzeitpunkten.

H2 Die Höhen der Oberflächenmodelle aus den Aufnahmen A2 bis A4 korrelieren mit den von Hand gemessenen Höhen der Vegetation zu den jeweiligen Messzeitpunkten mit einem Korrelationskoeffizienten $R^2 = <0.7$ bis $R^2 = >0.5$.

Die Hypothese 2 H0, wonach die Höhen aus den Oberflächenmodellen der Aufnahmen A2 bis A4 mit den von Hand gemessenen Höhen der Vegetation zu den jeweiligen Messzeitpunkten mit einem Korrelationsfaktor $R^2 = >0.7$ korrelieren, kann verifiziert werden. Die Resultate für die eBee und eBee Plus liegen zwischen R-Werten von 0.743 und 0.853. Ausnahme sind die Aufnahmen der Drohne Phantom 4, bei der ein R-Wert von nur 0.678 festgestellt wurde, womit H2 verifiziert werden kann.

In anderen Studien mit ähnlicher Methodik von (Bendig et al., 2014) wurden Korrelationswerte von $R^2 = 0.92$ erreicht mit Sommergerste und einer Auflösung von rund 1 cm/Pixel oder bei (G. Grenz-dörffer & Zacharias, 2014) wurden Korrelationswerte zwischen $R^2 = 0.6$ und 0.76 mit Grasland erreicht. Mit einem terrestrischen Laserscanner und dem Vergleich der Vegetationshöhe mit der frischen oder getrockneten Biomasse erreichte (Ehlert et al., 2008) Korrelationswerte für Grasland von $R^2 = 0.88$ bis 0.94.

Ein Direktvergleich der Korrelationswerte ist meist schwierig, weil unterschiedliche Aufnahmebedingungen (Auflösungen), andere Messgeräte oder verschiedene Vegetationen dies nicht erlauben. Es gibt jedoch einen Eindruck, wie gut die Methode funktioniert, mit Drohnen Vegetationshöhen zu messen. Auffällig bei allen Korrelationen zwischen den Höhen der Oberflächenmodellen und den Höhen der Handmessungen ist, dass die Handmessungen im Schnitt immer etwa 10 bis 15cm höher angesetzt sind als die Höhen der Oberflächenmodelle. Dieser Effekt wurde auch schon in einer anderen Studie von (Bendig et al., 2014) beobachtet. Erklärt wird dieser Effekt damit, dass bei der Berechnung des Oberflächenmodells aus der Punktwolke (vgl. Abbildung 11, Punkt 8) eine gewisse Generalisierung stattfindet und somit vereinzelt hohe Pflanzen abgeflacht/vernachlässigt werden. Bei der Handmessung hingegen können einzelne Hohe Pflanzen eher zu höheren Messungen führen.

Frage 1

Die Antwort auf die Frage, welche Auflösung die genaueren Oberflächenmodelle liefert, ist (vgl. Abbildungen 27 und 28), dass die Oberflächenmodelle mit mittlerer Auflösung (3 cm/Pixel) im Schnitt die besseren Resultate liefern. Die Oberflächenmodelle mit der höchsten Auflösung (1 cm/Pixel) lieferten den schlechtesten Korrelationswert (vgl. Abbildungen 27 und 28).

Die Werte der Phantom 4 (Auflösung 1 cm) sind nur bedingt mit den anderen Auflösungen vergleichbar, da es sich bei der Phantom 4 um eine andere Aufnahmeplattform mit einem unterschiedlichen Sensor (Kamera) handelt.

In dieser Arbeit zeigte sich, dass eine höhere Auflösung keine besseren Resultate liefert. Wenn die 3D-Darstellungen der Oberflächenmodelle (Anhang 1) betrachtet werden, ist erkennbar, dass die

höchste Auflösung von einem 1 cm das detaillierteste Modell liefert, welches die Realität der Oberfläche am nächsten abbildet. Dies deutet darauf hin, dass etwas an den Vergleichswerten (Handmessungen) angepasst werden sollte.

Die Handmessmethode beeinflusst diese Resultate, da eine gewisse Subjektivität bei der Messung der sehr heterogenen Klee grasflächen mitspielt. Somit kann hier auch eine gewisse Generalisierung der Vegetationshöhe stattfinden, die bei einer sehr hohen Auflösung (1 cm) nicht stattfindet, wobei die Generalisierung der Vegetationshöhe bei einer tiefen Auflösung (6 cm) zu hoch ist.

Ein Nachteil einer sehr hohen Auflösung ist in der Verarbeitung der Rohdaten (Luftbilder) zu den Oberflächenmodellen sichtbar geworden. Gewisse Prozesse benötigen sehr viel Rechenleistung, sodass sich die Rechenzeit von einer 3 cm Auflösung zu einer 1 cm Auflösung um den Faktor 5 verlängern kann. In der Praxis spielt ein schneller Verarbeitungsprozess der Daten eine wichtige Rolle, um in kurzer Zeit Resultate zu erhalten, die ein mögliches Handeln auslösen können. Somit ist die Wahl der richtigen Auflösung in der Vorbereitung von Aufnahmen zu beachten, um zufriedenstellende Resultate zu erhalten.

Um den Einfluss der Auflösung auf die Qualität der Oberflächenmodelle von Klee grasflächen genauer evaluieren zu können, müsste das Setting der Untersuchung besser auf diese Fragestellung angepasst werden, z.B. müssten Aufnahmen mit drei verschiedenen Auflösungen mit ein- und derselben Drohne durchgeführt werden, um Kamera- oder Drohnenmodell bedingte Einflüsse ausschliessen zu können. Weiter müsste die Methode zur Erhebung der Vegetationshöhe von Hand überarbeitet werden (mehr in Kapitel 5.2 Diskussion Methoden).

Frage 2

Die Antwort auf die Frage nach der Praxistauglichkeit der beiden Drohnentypen Flächenflügler "e-Bee" und Quadrocopter "DJI Phantom 4" in Bezug auf die Erstellung von Oberflächenmodellen in der Forschung kann hier nur subjektiv beantwortet werden.

Für kleinflächige Aufnahmen ist die Phantom 4 zweckmässiger als die eBee Drohnen, da sie keine grossen Start- und Landeflächen benötigt. Das Erstellen des Flugplans über ein Tablet mit der Software Pix4Dcapture geht einfacher und schneller bei der Phantom 4 als bei den eBee Drohnen mit der Software eMotion 3.

Die eBee Drohnen, besonders die eBee Plus, eignen sich besser für grossflächige Aufnahmen, da sie ein grösseres Gebiet abfliegen können mit einem Akku. Im Hinblick auf die professionelle Anwendung in der Landwirtschaft, Raum- und Umweltplanung oder bei Aufnahmen von Kiesgruben ist dies ein wichtiger Aspekt und auch in der Forschung kann dies bei grossen Versuchsflächen von Bedeutung sein. Bei der Bedienung der beiden Drohnentypen z.B. beim Starten und Landen bestehen keine grossen Unterschiede. Beide Drohnentypen sind einfach zu bedienen, sodass vergleichbare Ergebnisse ohne menschliche Beeinflussung möglich sind.

5.2 Diskussion Messmethoden

Die Methode des Vergleichs von drohnenbasierten Oberflächenmodellen mit von Hand gemessenen Vegetationshöhen wurde schon in mehreren Studien angewendet z.B. von (G. J. Grenzdörffer, 2014), (Bendig et al., 2014), (Bendig et al., 2013). Dies ermöglicht einen Vergleich der Resultate. Die Messung von Hand hat sich vorliegend mit der Vegetation Kleegrasmischung nur bedingt geeignet, da die grosse Heterogenität der Oberfläche ein exaktes Bestimmen der Höhe erschwerte (vgl. Kapitel 3.3.2 Handmessung). Eine Möglichkeit, um die Höhe der Vegetationsoberfläche genauer erfassen zu können, wäre, in einem Raster alle 30cm die Höhe zu messen. Mehr Messungen können die heterogene Oberfläche besser abbilden. Dies würde den Aufwand für die Handmessungen jedoch beträchtlich erhöhen.

Bei Feldbegehungen der Versuchsflächen konnte bereits in der frühen Wachstumsphase eine grosse Heterogenität der Vegetationsoberfläche beobachtet werden. Dieses Phänomen ist bei einer Versuchsanordnung mit einer Kleegrasmischung besonders ausgeprägt, da auf den Flächen unterschiedliche Arten von Gräsern (Poaceae) und Kleearten (Fabaceae) wachsen, die verschiedene Höhen aufweisen. Bei einer Monokultur aus Weizen oder Gerste ist dieser Effekt kleiner. Für das Erfassen der Höhe von Hand oder mittels Oberflächenmodellen bringt diese Heterogenität gewisse Schwierigkeiten mit sich. Da es nicht sinnvoll ist, jede Pflanze einzeln zu messen, muss eine gewisse Generalisierung stattfinden. Bei der Erstellung von Oberflächenmodellen beeinflusst die Auflösung der Luftbilder wie stark die heterogene Oberfläche generalisiert wird (dieser Effekt ist gut auf den 3D-Darstellungen Oberflächenmodellen im Anhang 1 sichtbar), somit ist hier der Effekt objektiv beeinflussbar. Auch bei Handmessungen der Höhe auf Versuchsflächen an verschiedenen Orten findet eine gewisse Generalisierung statt, da nicht einzelne Grashalme gemessen werden. Diese Generalisierung bei der Handmessung ist jedoch subjektiv und kann die Resultate von der Korrelation zwischen Höhe der Oberflächenmodelle und Höhe der Handmessung beeinflussen.

Eine andere Methode zur Überprüfung der Oberflächenmodelle ist der Vergleich der Biomasse frisch oder getrocknet anstelle der von Hand gemessenen Höhen. Hier ist die Objektivität bei der Messung gegeben. Diese Methode wurde in Studien von (Tilly et al., 2014) und (Bendig et al., 2014) angewendet, ist jedoch mit merklich mehr Aufwand verbunden. Die Korrelationswerte bewegen sich in einem ähnlichen Bereich von $R^2 = 0.8$ bei Bendig et al., 2014 und $R^2 = 0.9$ bei Tilly et al., 2014, wobei bei letzterer Studie mit einem terrestrischen Laserscanner gearbeitet wurde.

In dieser Arbeit wurden GCPs eingesetzt, um die gewünschte Genauigkeit der Oberflächenmodelle zu erreichen. Für den Einsatz in der Praxis ist dies eher unpraktisch, da diese Punkte immer gut sichtbar sein müssen und sich einer der GCPs in der Mitte des zu befliegenden Feldes befinden muss, um gute Resultate zu erhalten («Pix4Dmapper 4.1 User Manuel», 2018). Bei der Drohne eBee Plus von SenseFly gibt es die Möglichkeit mit RTK (Real Time Kinematic) zu fliegen, wobei die

Lagegenauigkeit der Drohne in der Luft viel genauer erfasst werden kann. Mit dieser Technik wird laut Hersteller eine Lagegenauigkeit von 3 cm bis 5 cm erreicht («senseFly - Compare», 2018). Dies wäre eine Möglichkeit, ohne GCPs Aufnahmen zu erstellen.

5.3 Diskussion äussere Einflüsse

Äussere Einflüsse bei der Erhebung der Grunddaten (Luftbilder) können die Resultate beeinflussen. Aufkommende Winde können ab einer gewissen Stärke das Flugverhalten der Drohnen beeinflussen und die sichere Landung gefährden. Bei dieser Studie wurde darauf geachtet, dass nur bei sehr schwachem Wind Aufnahmen durchgeführt wurden. Wenn nötig, wurden die Aufnahmen um einen Tag verschoben, wenn durch zu starke Winde oder Regen die Qualität der Aufnahmen hätten beeinflusst werden können. Um den Einfluss von Schatten möglichst klein zu halten, wurden die Aufnahmen immer über die Mittagszeit durchgeführt.

Die Heterogenität der Grasversuchsflächen wurde nicht nur durch die unterschiedlichen Arten erhöht, sondern auch durch Regen und Wind bedingtes Abknicken der Gräser. Diese Effekte sind besonders bei den Aufnahmen A3 und A4 sichtbar, da zu diesen Zeitpunkten das Wachstum schon fortgeschritten ist. Vermehrte Ausreisser gegen unten deuten auf Löcher in der Vegetationsdecke (vgl. Abbildung 19 bis 23 und Anhang 3), die durch Regen und Wind verursacht wurden.

Die Resultate zeigten, dass sich bei der letzten Aufnahme im Juli die Höhe der Vegetation verringert hatte. Dieser Effekt ist auch in den Resultaten der Studien von (Bendig et al., 2013) und (Bendig et al., 2014) ersichtlich. Gründe für die Reduktion der Höhe bestehen vermutlich im Umstand, dass die grossen Grashalme nach der Blüte langsam austrocknen, an Substanz verlieren und leichter abknicken.

Die eher geringen Plotgrössen von 3x4 m beeinflussen die Werte der Standardabweichung der Plots, da Löcher oder einzelne hohe Gräser einen grösseren Einfluss haben. Dies kann höhere Werte der Standardabweichung ergeben. Die Plotgrösse hat auch einen Einfluss auf die Randeffekte, die in Kapitel 4.1 beschrieben und in Abbildung 15 und Abbildung 16 sichtbar sind. Je kleiner die Plots, desto schwerer fallen Störungen (hier tiefere Höhen am Rand) ins Gewicht und beeinflussen die Resultate. In dieser Studie könnten die Resultate der Meanhöhen der einzelnen Plots leicht tiefer ausgefallen sein durch die tieferen Ränder. Um die Randeffekte auch bei kleinen Versuchsflächen gering zu halten, müssten bei zukünftigen Untersuchungen die Plots für die Messungen (in ArcMap) in Bezug auf die Plots im Feld z.B. um 30 cm nach innen verschoben werden. So könnten die Randeffekte ausgeschlossen werden.

6 Schlussfolgerung

In dieser Studie wurde ein einfacher Arbeitsablauf vorgestellt, wie mit unterschiedlichen Drohnen und normalen RGB Kameras Oberflächenmodelle von Vegetationsflächen erstellt werden können, die eine hohe Genauigkeit erreichen. Die Studie beschreibt eine Möglichkeit, wie mittels Drohne das Höhenwachstum einer Klee grasfläche überwacht werden kann. Weiter wird aufgezeigt wie unterschiedliche Faktoren, räumliche Auflösungen und Drohnentyp, die Ergebnisse beeinflussen können.

Die Resultate zeigen, dass Vegetationshöhen von Klee grasflächen mittels drohnenbasierten Oberflächenmodellen modelliert werden können und unterschiedliche Wachstumsstadien unterschieden werden können. Die besten Resultate ($R^2 = 0.85$) werden mit einer mittleren Auflösung von 3 cm/Pixel erreicht. Eine der grössten Schwierigkeiten war, die sehr heterogene Vegetationsoberfläche der Klee gras Mischung mit Handmessungen realitätsnah zu messen, damit gute Vergleichswerte vorhanden sind.

Gestützt auf die Erfahrungen dieser Arbeit empfehle ich folgendes Vorgehen, um gute Oberflächenmodelle zu erhalten:

1. Auf kleineren Gebieten bis 1 ha können mit einem Quadropter wie der Phantom 4 Aufnahmen erstellt werden. Für grössere Gebiete eignen sich Flächenflügler wie die eBee Drohnen, da diese ein grösseres Gebiet mit einem Akku abdecken können.
2. Die räumliche Auflösung ist besonders für heterogene Oberflächen klein (1 cm/Pixel) zu wählen, da mit dieser die Oberflächen am realitätsnahesten modelliert werden können. Für homogenere Oberflächen ist eine grössere Auflösung (3 cm/Pixel) zu wählen, da die Datenmenge überschaubarer bleibt, die Modelle schneller prozessiert werden und trotzdem gute Resultate erwartet werden können.
3. Für flache Oberflächen, die visuell eine homogene Struktur aufweisen wie Agrarflächen, ist einer hohen Überlappung (85%) der Aufnahmen den Vorzug zu geben, um genügend gemeinsame Punkte (Keypoints) beim Prozessieren der Bilder zu erhalten.
4. Es sind mindestens fünf GCPs regelmässig zu verteilen und diese mit einem Gerät, das differentielle GNSS-Positionsmessungen ermöglicht, einzumessen. Die GCPs sollten gut sichtbar platziert und angemalt (vgl. Abbildung 5) werden, damit sie später im Bildverarbeitungsprozess einfach den aufgenommenen Koordinaten zugewiesen werden können.
5. Äussere Aufnahmebedingungen: Aufnahmezeitpunkt Mittag (wenig Schatten), bei Sonnenschein (gute Beleuchtung), kein Wind (ruhiger Flug der Drohne), kein Regen (negative Beeinflussung der Bildqualität)

Für die Anwendung in der Praxis im Bereich "Precision Farming" sind noch einige Hürden zu bewältigen. Der Einsatz müsste ohne GCPs möglich sein und trotzdem eine hohe Genauigkeit ermöglichen, da sonst der Arbeitsaufwand zu gross ist. Es gibt heute schon Pakete von Drohnenherstellern, mit Drohne, Sensor und Software, die mit NIR (Nahinfrarot) Luftbilder gute Resultate erzielen und so die Fitness der Pflanzen erheben können («senseFly - Agriculture», 2017). Die Höhe der Pflanzen kann jedoch mit dieser Methode nicht gemessen werden.

Da in der Forschung ein erhöhter Arbeitsaufwand möglich ist, wäre die in dieser Arbeit beschriebene Methode mit dem heutigen Stand der Entwicklung einsetzbar. Es könnte z.B. das Wachstum eines Weizenfeldes mit einer Befliegung alle paar Tage genau beobachtet und mit anderen Faktoren wie Düngerzugabe verglichen werden. Für das Monitoring von Klee gras- und Grasflächen schätze ich die Methode als bedingt geeignet ein, da wechselnde und sehr heterogene Vegetationsoberflächen schwieriger realitätsnah zu modellieren sind.

Eine Validierung der Resultate mit einem weiteren Versuch in einem anderen Jahr könnte die Aussagekraft der Ergebnisse noch stärken.

7 Literaturverzeichnis

AGRAiR. (2017). Abgerufen 8. August 2018, von <https://www.agrair.ch/>

Agweb.com. (2017). Abgerufen 8. August 2018, von <https://www.agweb.com/search/?keyword=drones>

ArcGIS for Desktop | Esri Schweiz. (o. J.). Abgerufen 7. Juli 2018, von <https://www.esri.ch/de/produkte/arcgis-for-desktop>

Bendig, J., Bolten, A., & Bareth, G. (2013). UAV-based Imaging for Multi-Temporal, very high Resolution Crop Surface Models to monitor Crop Growth Variability Monitoring des Pflanzenwachstums mit Hilfe multitemporaler und hoch auflösender Oberflächenmodelle von Getreidebeständen auf Basis von Bildern aus UAV-Befliegungen. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2013(6), 551–562. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2013/0200>

Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–10412. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>

Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL. (2016). *Bericht «Zivile Drohnen in der Schweiz»*. Abgerufen von <https://www.bazl.admin.ch/rpas>

Bundesgesetz über den Schweizerischen Nationalpark im Kanton Graubünden (Nationalparkgesetz), Pub. L. No. 454 (2017).

Bundesgesetz über die Jagd und den Schutz wildlebender Säugetiere und Vögel (JSG), Pub. L. No. 922.0 (2017).

Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating Multi-spectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026–4047. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>

- Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2010). Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. *Remote Sensing*, 2(4), 1157–1176. <https://doi.org/10.3390/rs2041157>
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (Third ed.). New York: Wiley-Interscience Publication.
- Ehlert, D., Horn, H.-J., & Adamek, R. (2008). Measuring crop biomass density by laser triangulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.09.013>
- Goodwin, N. R., Coops, N. C., & Culvenor, D. S. (2006). Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment*, 103(2), 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.03.003>
- Grenzdörffer, G., Engel, A., & Jütte, K. (2008, April 26). Low-cost UAV's in der Land- und Forstwirtschaft - Eine vergleichende Untersuchung von zwei Mini-UAV's.
- Grenzdörffer, G. J. (2014). Crop height determination with UAS point clouds. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1, 135–140. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-135-2014>
- Grenzdörffer, G., & Zacharias, P. (2014). Bestandeshöhenermittlung landwirtschaftlicher Kulturen aus UAS-Punktwolken. DGPf Tagungsband, 23.
- Huber, F. (2014, September). Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement Drohnen im Praxiseinsatz, 9.
- Kraus, K. (2004). *Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen* (7., vollst. bearb. und erw. Aufl., Bd. Band 1, Ed. 7). Berlin: De Gruyter.
- Lati, R. N., Filin, S., & Eizenberg, H. (2013). Estimating plant growth parameters using an energy minimization-based stereovision model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.012>

- Luhmann, T. (2010). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen* (3., völlig neu bearb. und erw. Aufl.). Berlin: Wichmann.
- Malambo, L., Popescu, S. C., Murray, S. C., Putman, E., Pugh, N. A., Horne, D. W., ... Bishop, M. (2018). Multitemporal field-based plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems high-resolution imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 31–42.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.014>
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Pix4Dcapture: free drone flight planning mobile app. (2018). Abgerufen 7. Juli 2018, von <https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>
- Pix4Dmapper 4.1 User Manuel. (2018, April 15).
- Pix4Dmapper: Professional Photogrammetry software. (o. J.). Abgerufen 7. Juli 2018, von <https://pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/>
- senseFly - Agriculture. (2017). Abgerufen 24. Juni 2018, von <https://www.sensefly.com/industry/agriculture>
- senseFly - Compare. (2018). Abgerufen 24. Juli 2018, von <https://www.sensefly.com/drones/compare>
- senseFly - eMotion3. (2018). Abgerufen 7. Juli 2018, von <https://www.sensefly.com/software/emotion>
- Swiss Geoportal. (2018, Juli 4). Abgerufen 4. Juli 2018, von <https://map.geo.admin.ch>

- Tilly, N., Hoffmeister, D., Cao, Q., Huang, S., Lenz-Wiedemann, V., Miao, Y., & Bareth, G. (2014). Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1), 083671. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083671>
- Verordnung des UVEK über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien (VLK), Pub. L. No. 748.941 (2017).
- Verordnung über den Schutz des Schweizerischen Nationalpark (Nationalparkordnung), Pub. L. No. 498.200 (2011).
- Verordnung über die eidgenössischen Jagdbannggebiete (VEJ), Pub. L. No. 922.31 (2015).
- Verordnung über die Wasser- und Zugvogelreservate von internationaler und nationaler Bedeutung (WZVV), Pub. L. No. 922.32 (2015).

Abbildverzeichnis

Abbildung 1: Kartenausschnitt mit eingezeichneten Flugverbotszonen («Swiss Geoportal», 2018).	4
Abbildung 2: Situation der Versuchsfelder auf dem Gelände des Campus Grüental der ZHAW. Anordnung der Versuchsfelder mit Abmessung.	7
Abbildung 3: Ausschnitt aus Versuchsfläche, Gräser dominierend mit einzelnen Leguminosen.....	8
Abbildung 4: Untersuchungsgebiet mit den Versuchsfeldern und den gleichmässig verteilten GCPs	9
Abbildung 5: GCP Betongartenplatte angemalt 60cm x 60cm.....	9
Abbildung 7: Schema Messung Bewuchs Höhe.....	11
Abbildung 6: Foto Messung der Bewuchshöhe im Feld von Hand.....	11
Abbildung 8: Prozessmodell der einzelnen Schritte dieser Arbeit mit verwendeter Hard- und Software.	12
Abbildung 9: Befliegungsplan von oben für die Drohne eBee Plus bei einer Flughöhe von 128m und einer räumlichen Auflösung von 3cm mit der Software eMotion3.	13
Abbildung 10: Die verwendeten Drohnen: eBee und eBee Plus von SensFly, Phantom 4 von DJI	14
Abbildung 11: Grafik der ablaufenden Arbeitsschritte und Prozesse beim Erstellen der Oberflächenmodelle mit der Pix4mapper Software.	16
Abbildung 12: Modell der zusammenhängenden Prozesse in ArcMap. Beispiel Verarbeitung des Oberflächenmodells von Aufnahme 1 mit einer Auflösung von 6cm mit der eBee Plus (Kameratyp SODA_10.6).	17
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Aufnahme identischer Bildpunkte von drei verschiedenen Aufnahmestandorten.....	19
Abbildung 14: Differenzmodell Aufnahme A2 minus Geländemodell A1, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).	21
Abbildung 15: Differenzmodell Aufnahme A3 minus Geländemodell A1, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).	22

Abbildung 16: Differenzmodell Aufnahme A4 minus Geländemodell A1, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).	23
Abbildung 17: Differenzmodell Aufnahme A3 minus A2, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung oben), Differenzmodell Aufnahme A4 minus A3, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 3cm (Abbildung unten).	24
Abbildung 18: Fotos der Versuchsfelder zu den unterschiedlichen Aufnahme Zeitpunkten A2 bis A4.	26
Abbildung 19: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 Plot Nr. 12, Auflösung 3cm mit der Kamera CanonPowerShotS110 . Anzahl Samples pro Boxplot ca. 9600.....	26
Abbildung 20: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, Auflösung 3cm mit der Kamera SODA 10.6 . Anzahl Samples pro Boxplot ca. 11600.	27
Abbildung 21: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, Auflösung 6cm mit der Kamera CanonPowerShotS110 . Anzahl Samples pro Boxplot ca. 2700.	27
Abbildung 22: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, Auflösung 6cm mit der Kamera SODA 10.6 . Anzahl Samples pro Boxplot ca. 3000.	28
Abbildung 23: Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2, A3 und A4 Plot Nr. 12, Auflösung 1cm mit der Kamera FC6310_8.8 Anzahl Samples pro Boxplot ca. 117000. (Rot umkreist fast kein unterschied erkennbar)	28
Abbildung 24: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. 3cm CanonPowerShotS110	31
Abbildung 25: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. 6cm CanonPowerShotS110	31
Abbildung 26: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. 3cm SODA 10.6	32

- Abbildung 27: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. **6cm SODA 10.6** 32
- Abbildung 28: Korrelation zwischen Mean Höhe CSM (Mean Höhe CSM steht in dieser Grafik relativ zur Aufnahme A1 Geländemodell) und der Mean Höhe der Handmessung. Die drei Farben zeigen die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte. Die schwarze Linie eine Korrelation von $R^2 = 1$ und die schwarze gestrichelte Linie die effektive Korrelation der beiden Werte. **1cm FC6310_8.8**..... 33
- Abbildung 29: Vergleich der Mean Höhe CSM und Mean Höhe Handmessung der beiden Kameras CanonPowerShotS110 (links) und SODA 10.6 (rechts). Die zwei Farben zeigen die unterschiedlichen Auflösungen 3cm und 6cm. 34
- Abbildung 31: Vergleich der Mean Höhe CSM und Mean Höhe Handmessung der Auflösungen 1cm, 3cm und 6cm mit den Kameras CanonPoweShotS110 und FC6310_8.8. Die drei Farben zeigen die unterschiedlichen Auflösungen. 35
- Abbildung 32: Vergleich der Mean Höhe CSM und Mean Höhe Handmessung der Auflösungen 1cm, 3cm und 6cm mit den Kameras SODA 10.6 und FC6310_8.8. Die drei Farben zeigen die unterschiedlichen Auflösungen. 35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht des Versuchsaufbau mit durchgeführten Aufnahmen, Drohnentyp, Kamera, Flughöhe respektive Bild Auflösung und Datum.....	10
Tabelle 2: Vergleich der Drohnen und Kamera-Sensoren	14
Tabelle 3: Differenzwerte der Vegetationshöhen zum Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1, sowie Höhenunterschiede der Vegetation zwischen den Aufnahmen A2 zu A3 und A3 zu A4. Die Resultate sind für jeden Plot (Nr. 1 bis 12) einzeln aufgeführt und als Mittelwert über die 12 Plots angegeben.....	25
Tabelle 4: Resultate T-Test sämtlicher Mittelwert vergleiche der Plots 6, 8 und 12 mit den Auflösungen 1, 3 und 6cm und den Kameratypen FC6310_8.8, CanonPowerShotS110 und SODA 10.6. Rot markiert sind die Tests bei denen der Unterschied der getesteten Mittelwerte kleiner 5cm ist.....	29

Anhangs Verzeichnis

Anhang 1: Differenzmodelle und 3D-Darstellungen der CSMs

Anhang 2: Tabellen der Vegetationshöhen (Differenzhöhen)

Anhang 3: Boxplots Plots Nr. 6 und 8

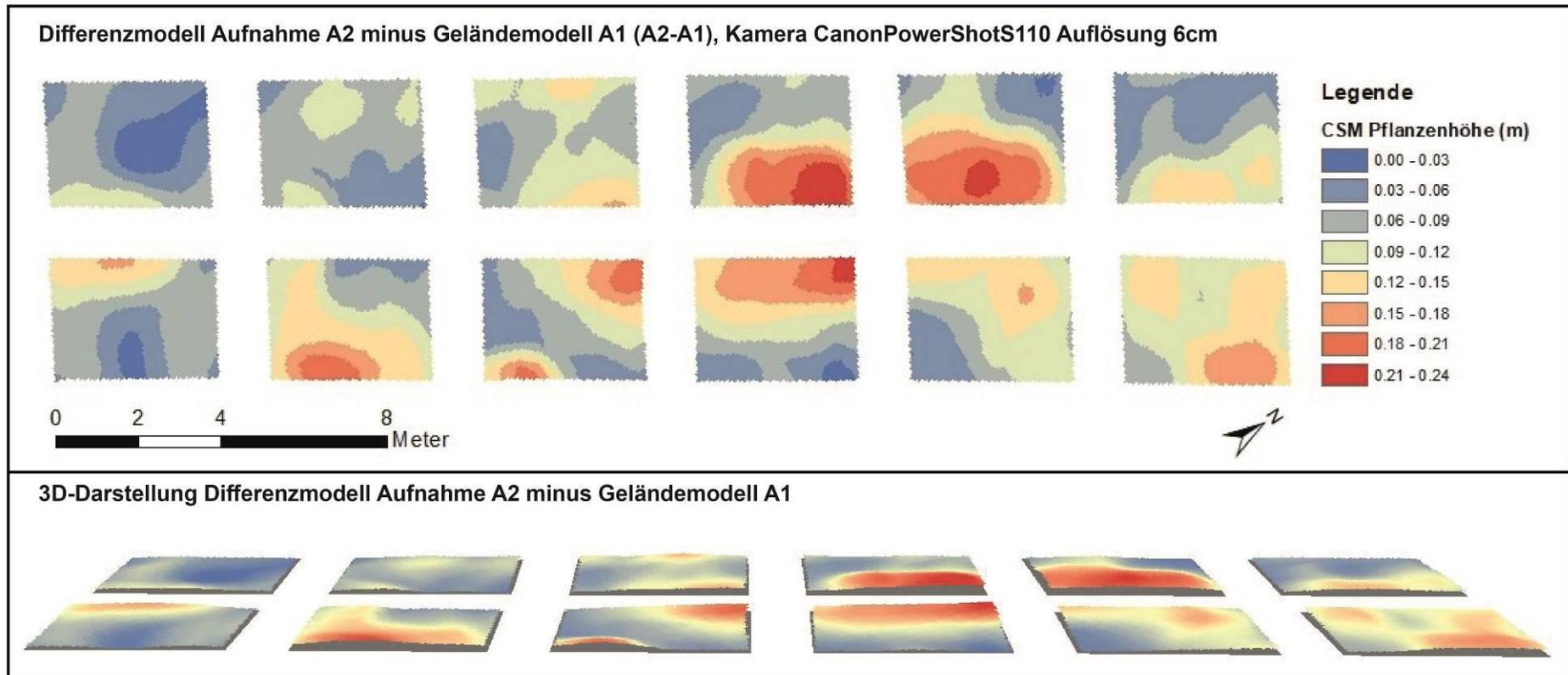
Anhang 4: Tabellen Handmessungen

Anhang 5: Prüfung auf Normalverteilung der Daten

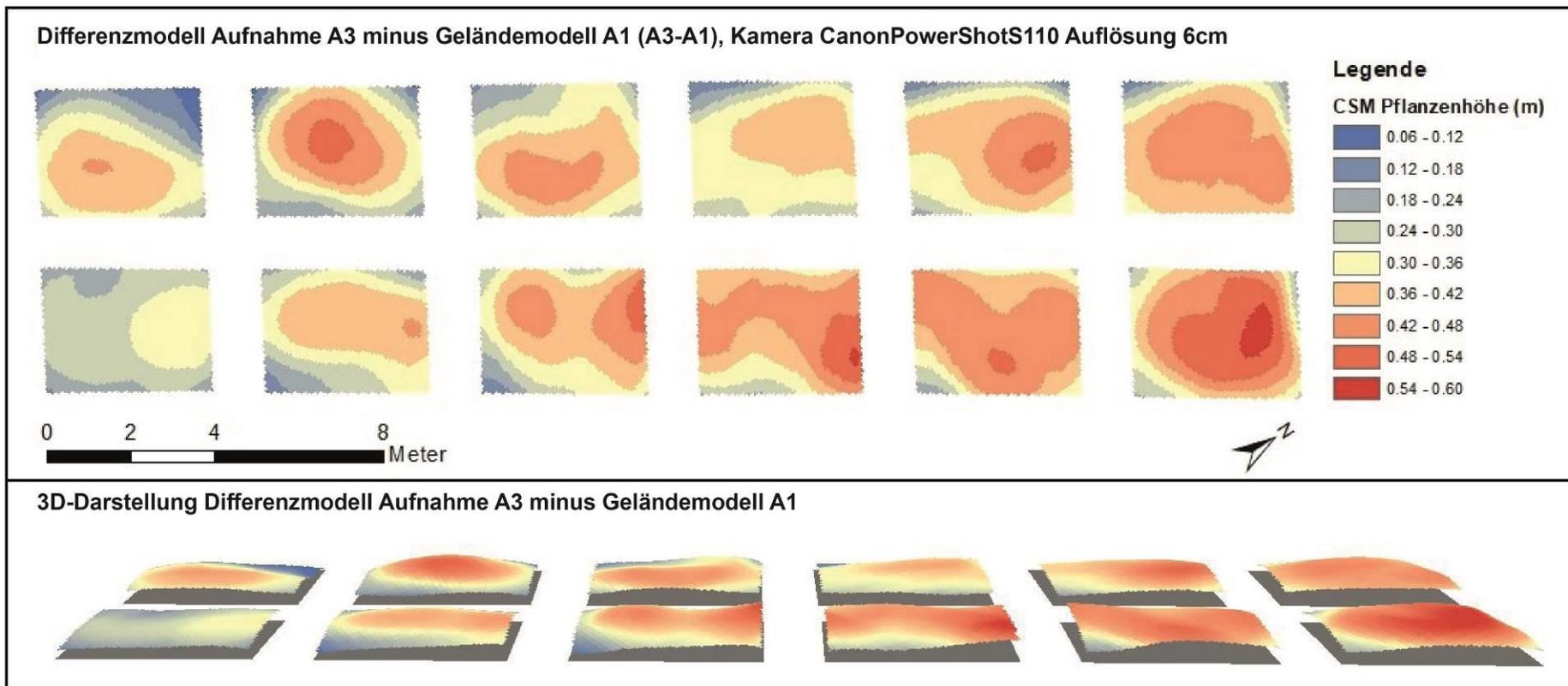
Anhang 6: R-Scripte

Anhang 7: Plagiatserklärung

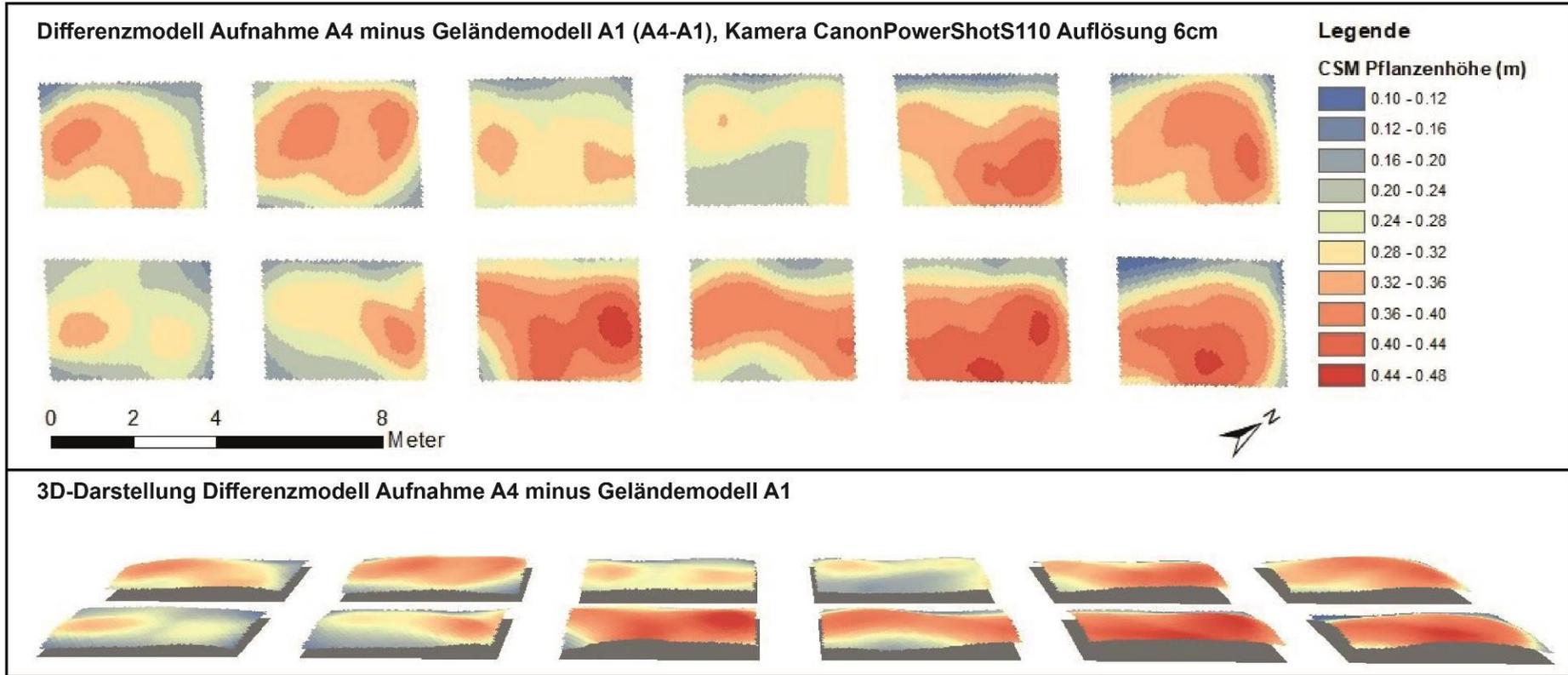
Anhang 1 Differenzmodelle und 3D-Darstellungen der CSMs



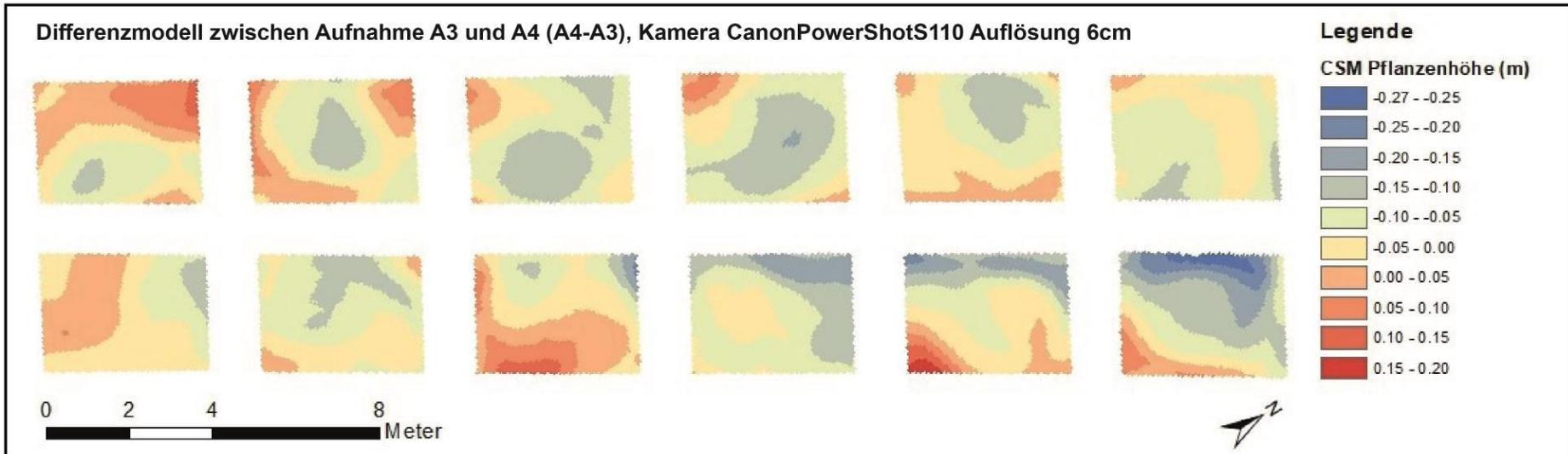
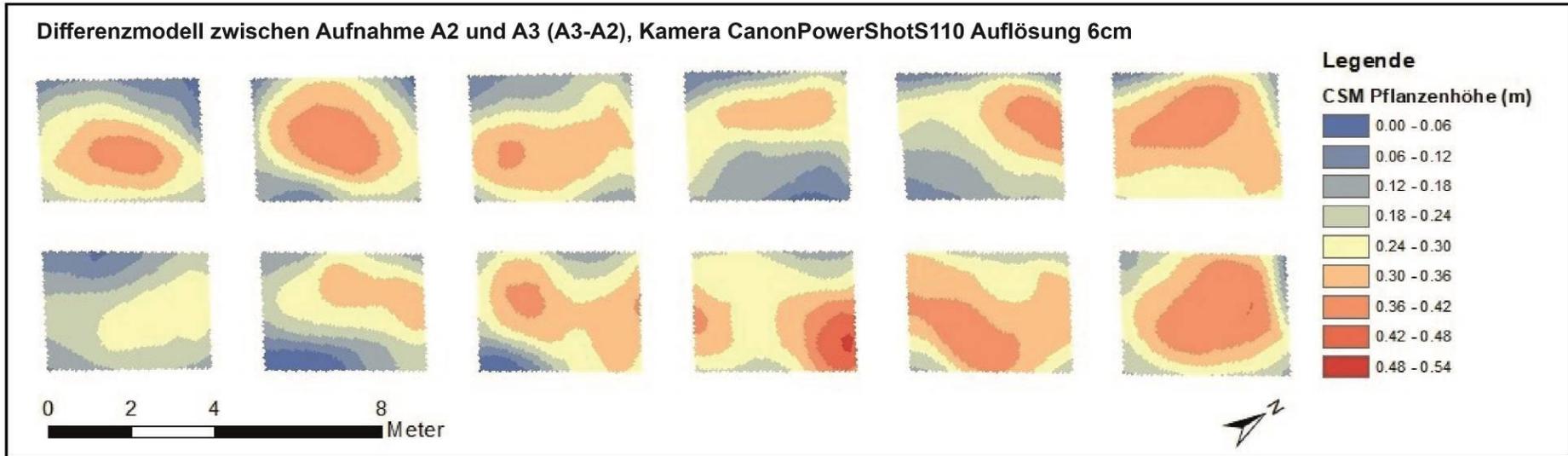
Differenzmodell Aufnahme A2 minus Geländemodell A1, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm (Abbildung unten).



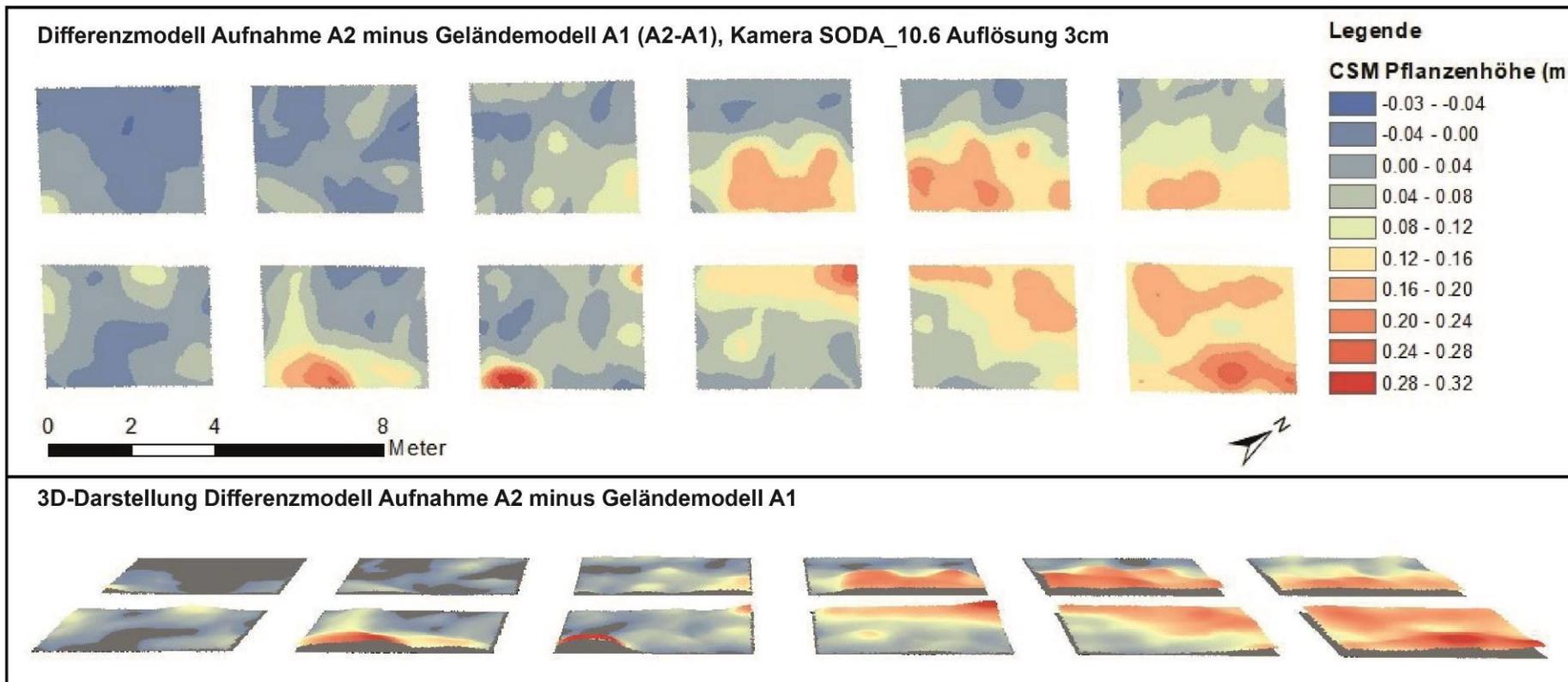
Differenzmodell Aufnahme A3 minus Geländemodell A1, **Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm (Abbildung unten).



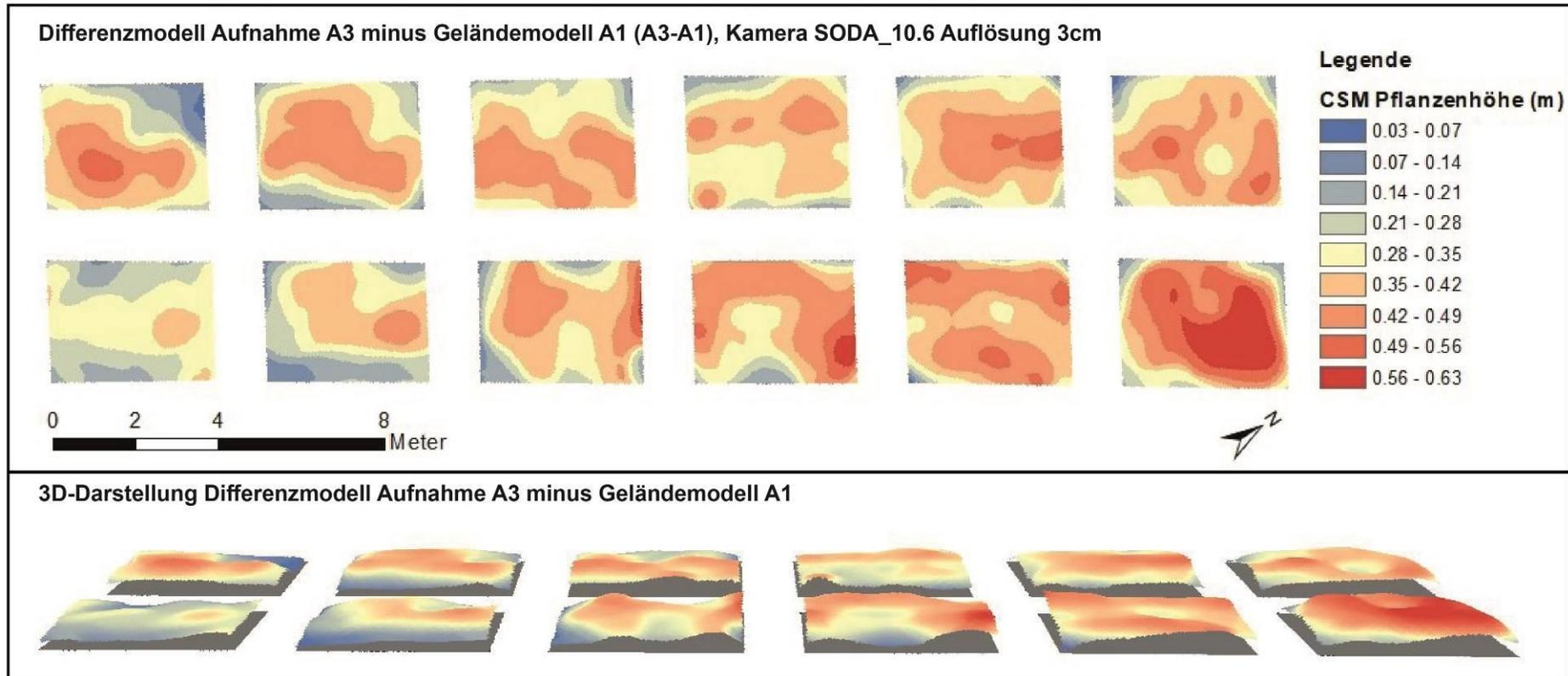
Differenzmodell Aufnahme A4 minus Geländemodell A1, **Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm (Abbildung unten).



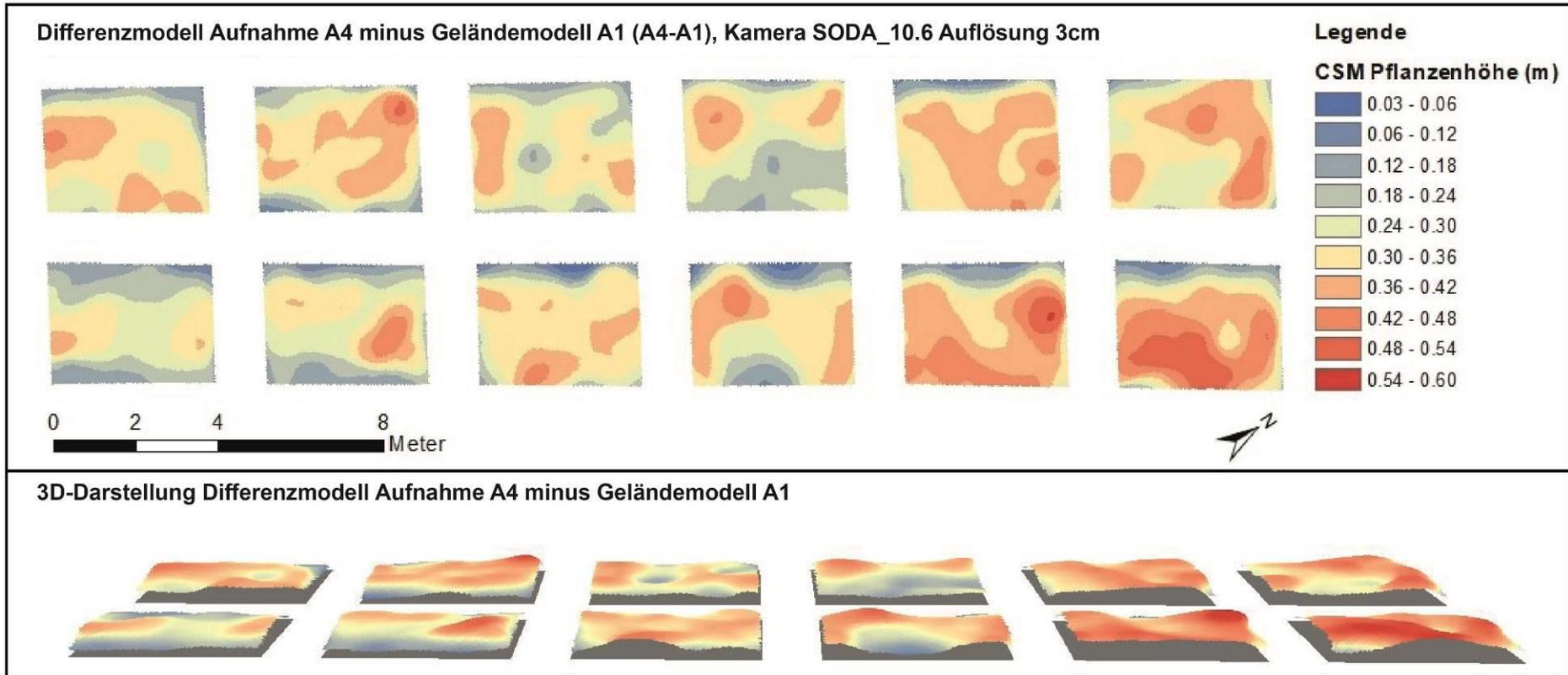
Differenzmodell Aufnahme A3 minus A2, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm (Abbildung oben), Differenzmodell Aufnahme A4 minus A3, Kamera CanonPowerShotS110 Auflösung 6cm (Abbildung unten).



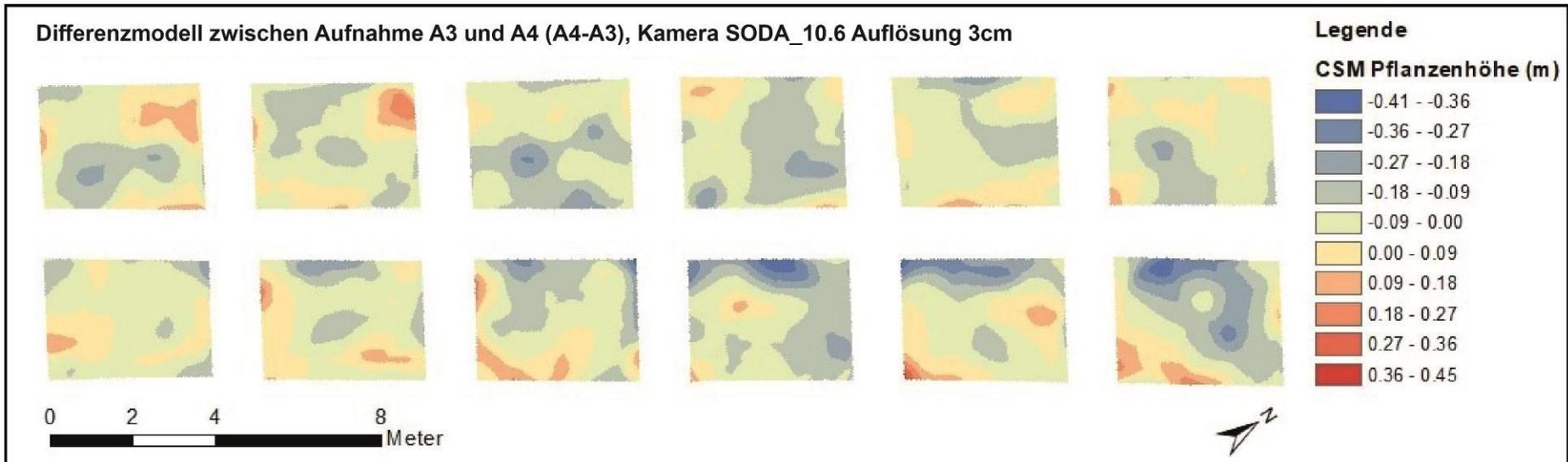
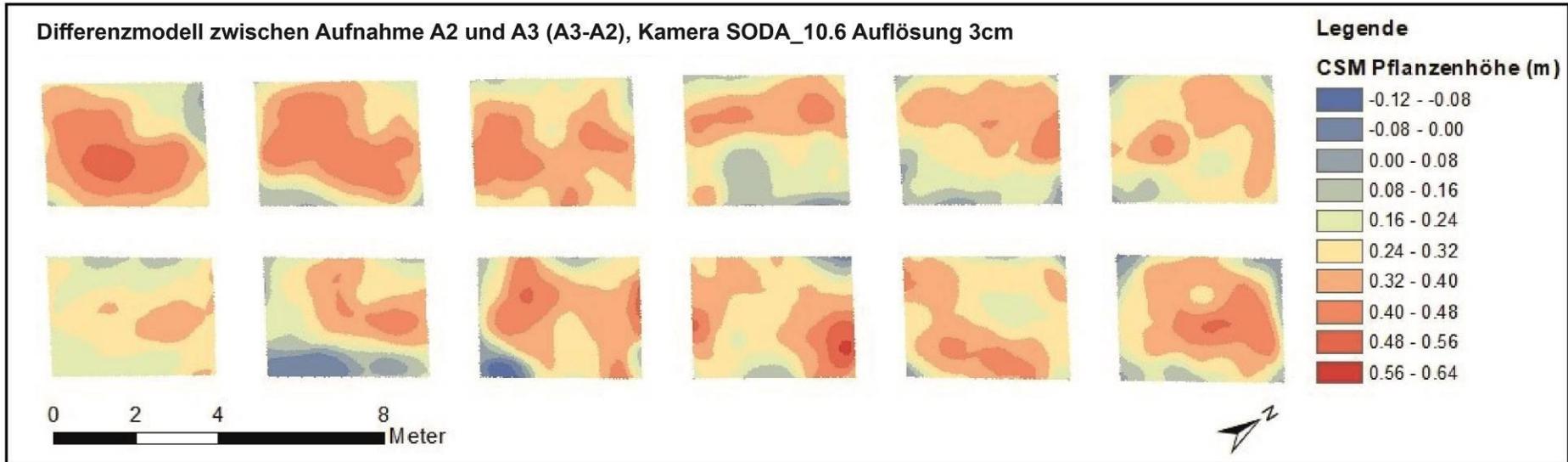
Differenzmodell Aufnahme A2 minus Geländemodell A1, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm (Abbildung unten).



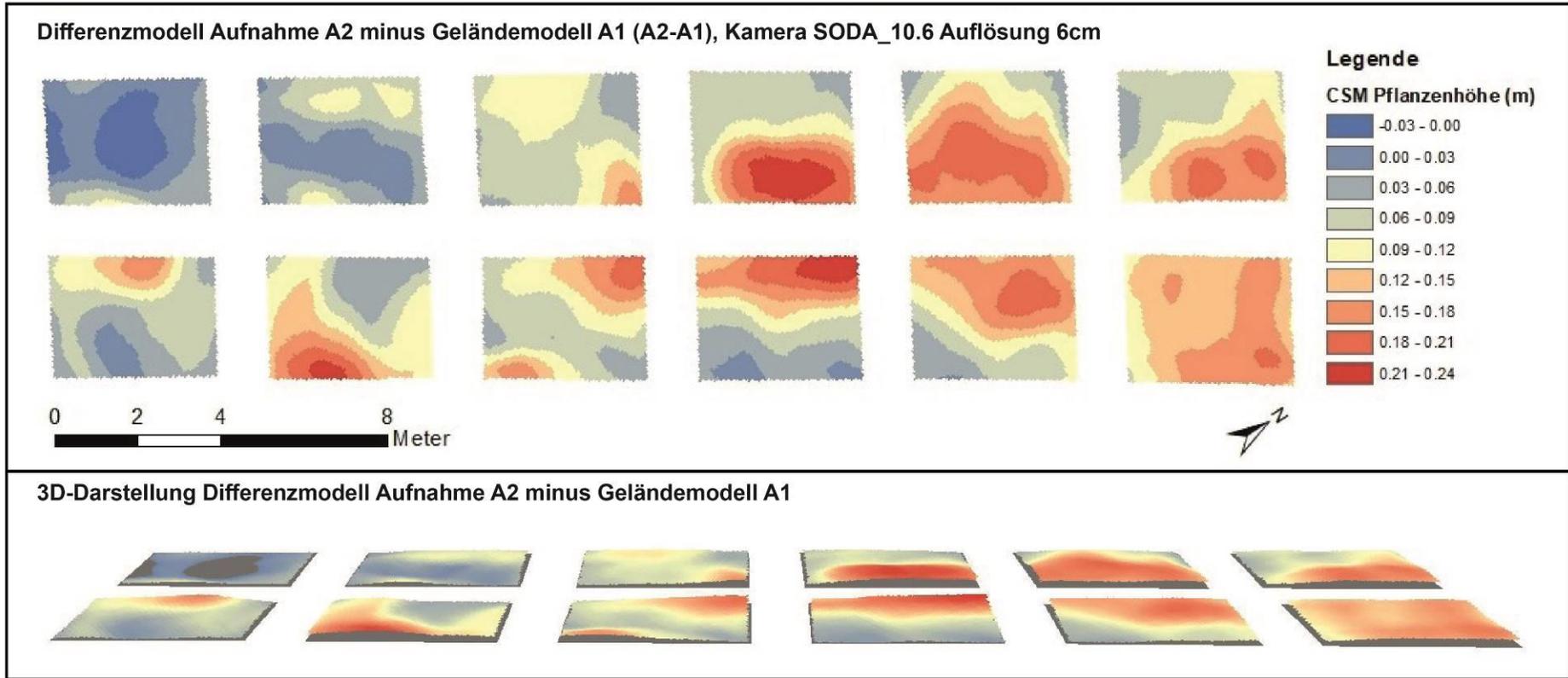
Differenzmodell Aufnahme A3 minus Geländemodell A1, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm (Abbildung unten).



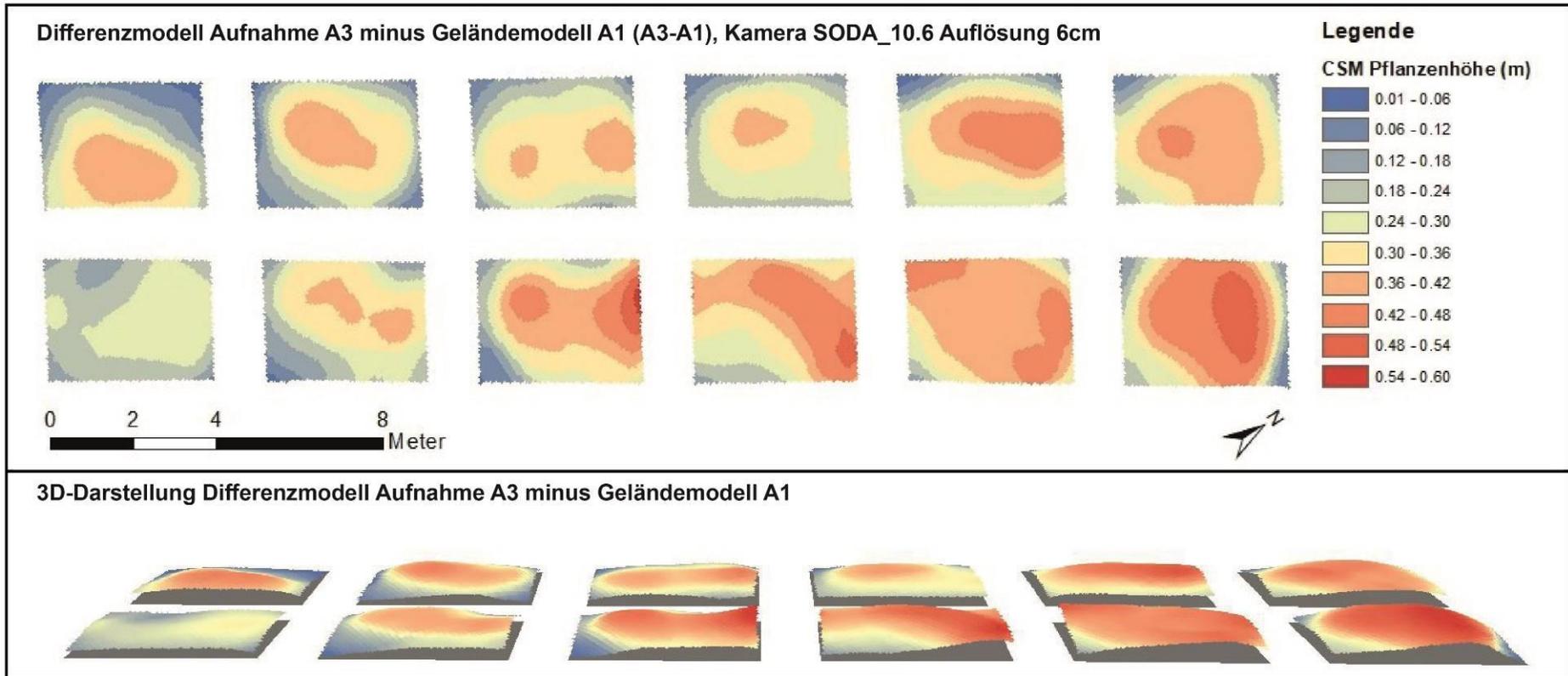
Differenzmodell Aufnahme A4 minus Geländemodell A1, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm (Abbildung unten).



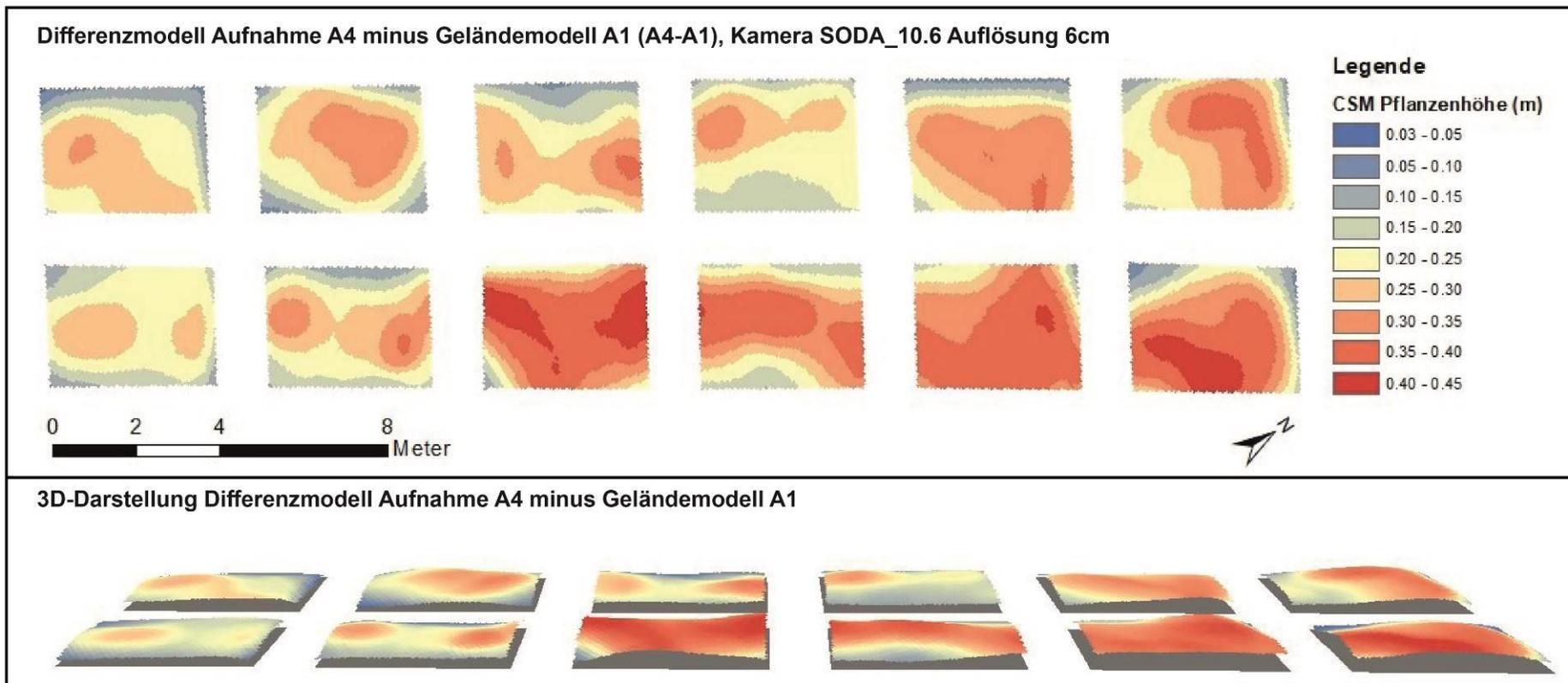
Differenzmodell Aufnahme A3 minus A2, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm** (Abbildung oben), Differenzmodell Aufnahme A4 minus A3, Kamera SODA_10.6 Auflösung 3cm (Abbildung unten).



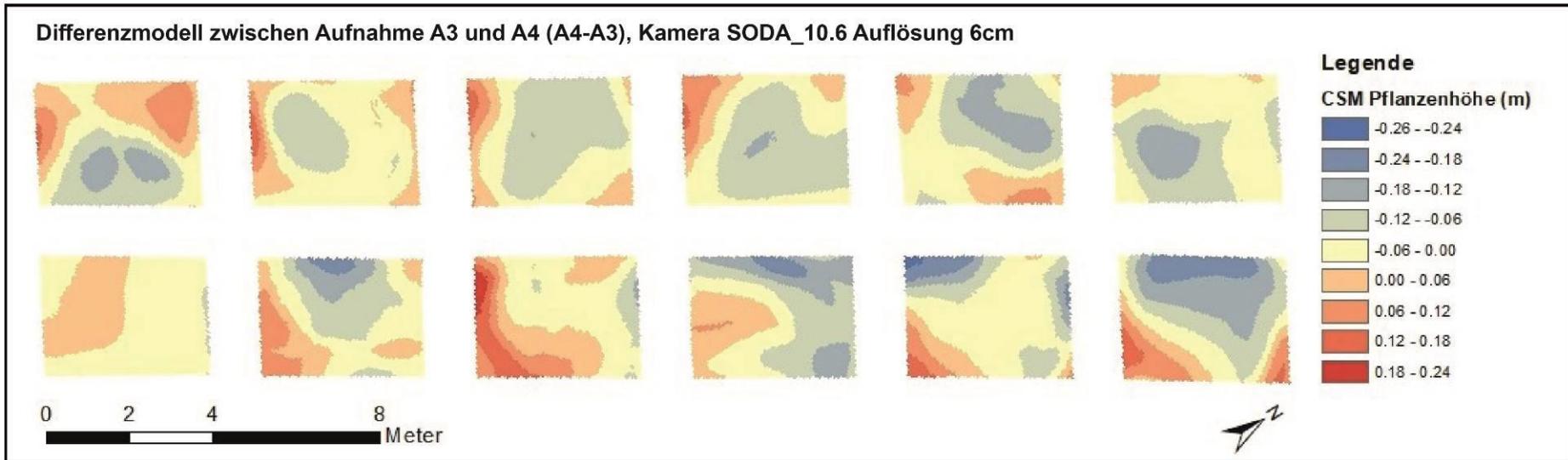
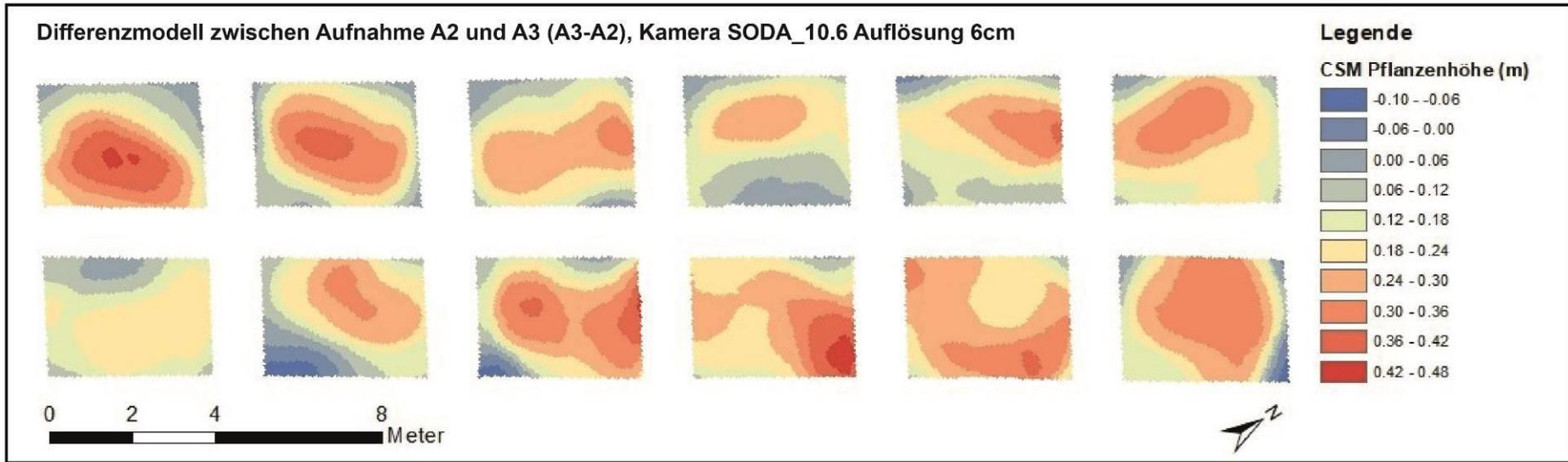
Differenzmodell Aufnahme A2 minus Geländemodell A1, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm (Abbildung unten).



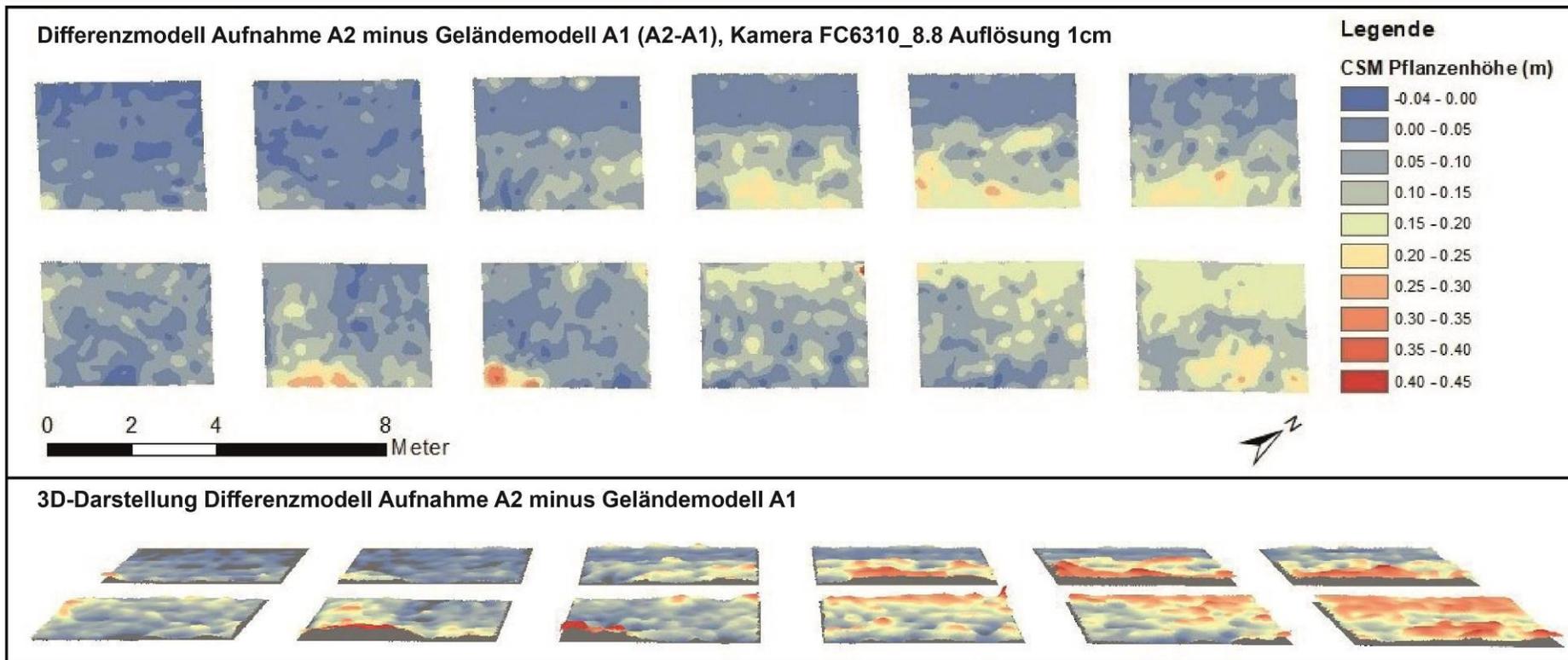
Differenzmodell Aufnahme A3 minus Geländemodell A1, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm (Abbildung unten).



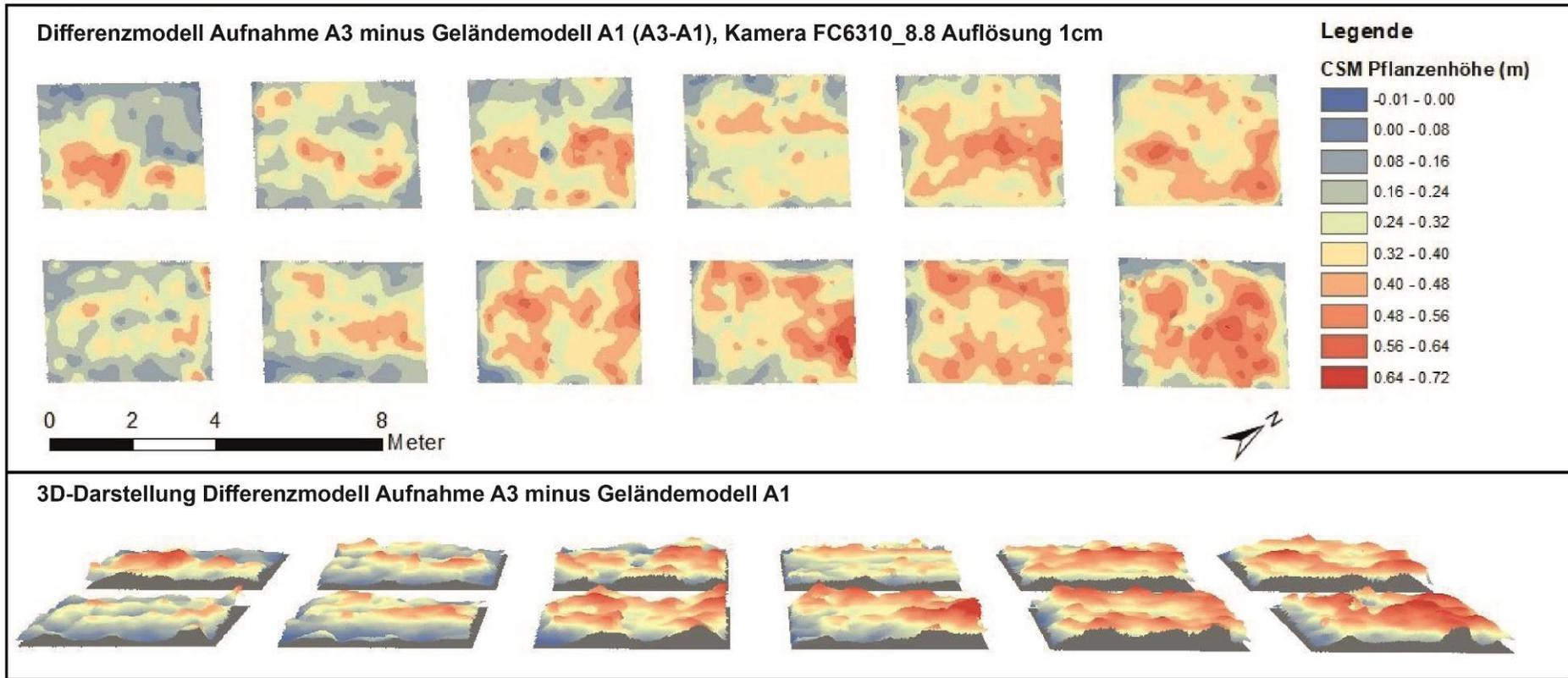
Differenzmodell Aufnahme A4 minus Geländemodell A1, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm (Abbildung unten).



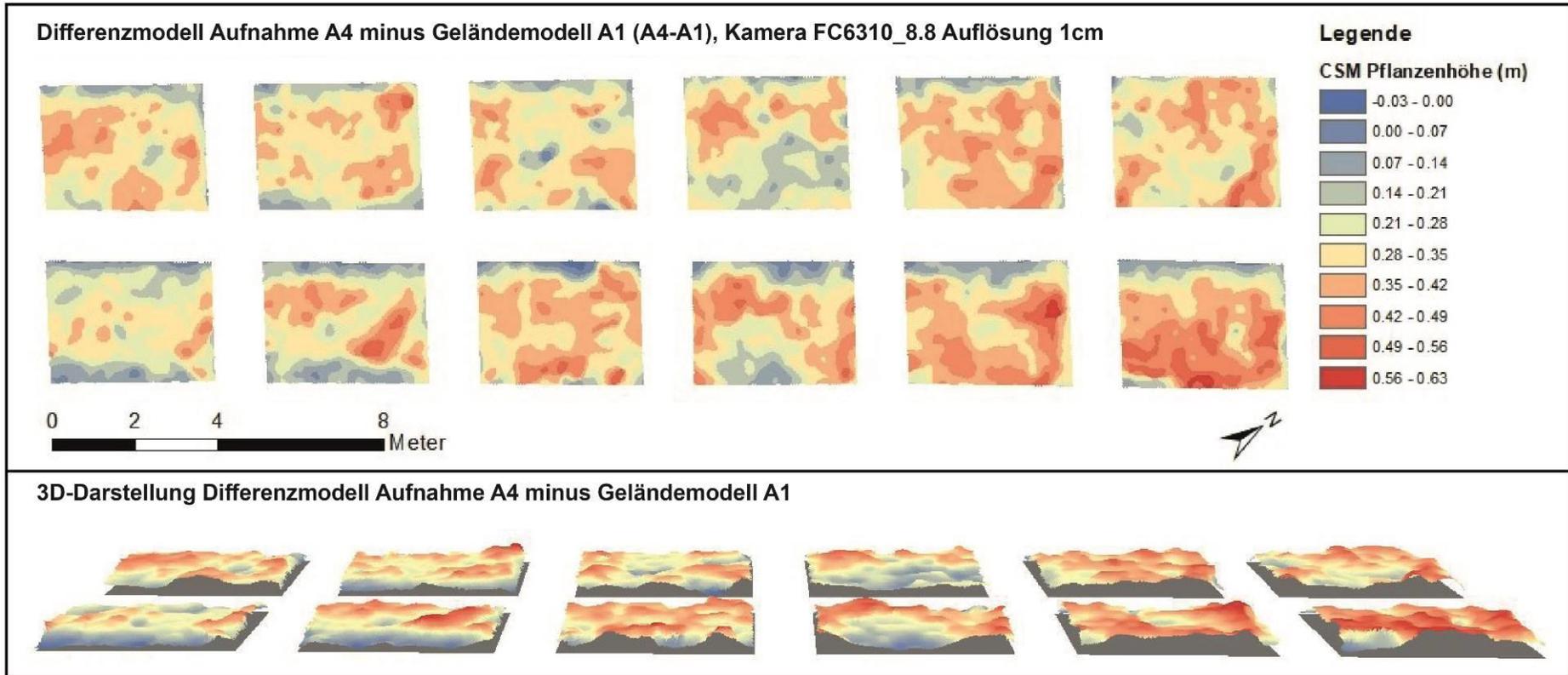
Differenzmodell Aufnahme A3 minus A2, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm** (Abbildung oben), Differenzmodell Aufnahme A4 minus A3, **Kamera SODA_10.6 Auflösung 6cm** (Abbildung unten).



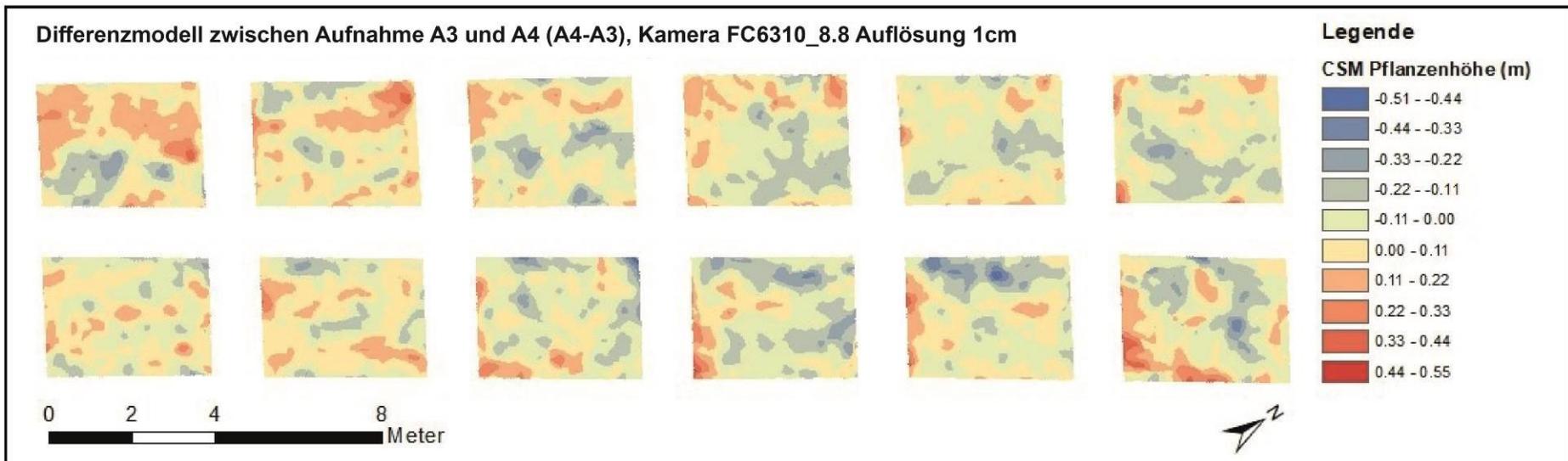
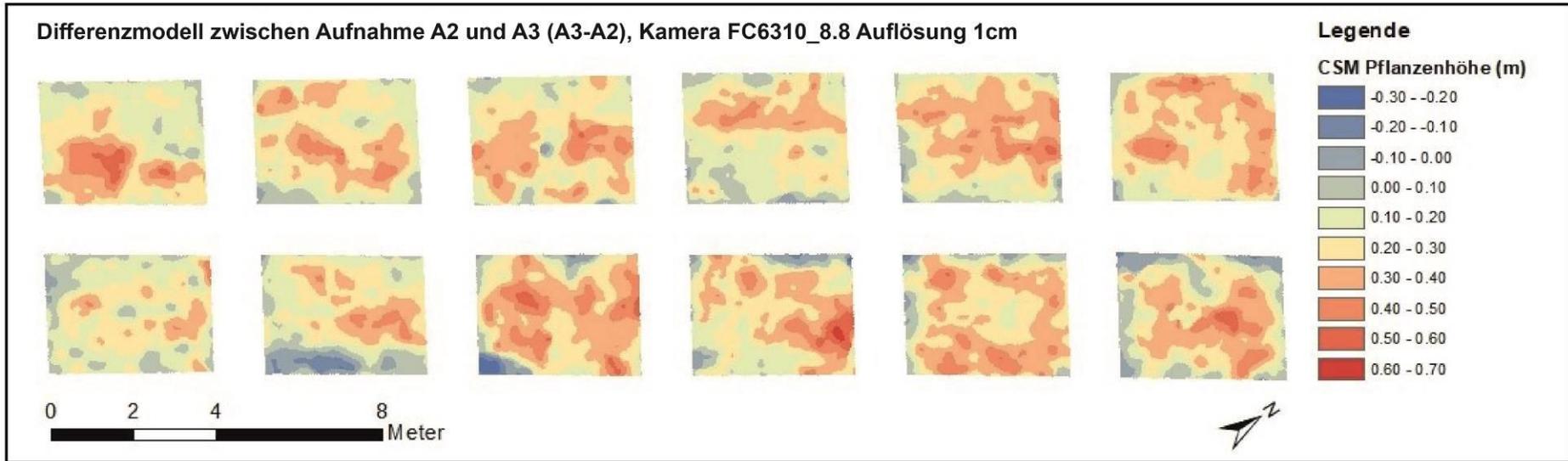
Differenzmodell Aufnahme A2 minus Geländemodell A1, **Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm (Abbildung unten).



Differenzmodell Aufnahme A3 minus Geländemodell A1, **Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm (Abbildung unten).



Differenzmodell Aufnahme A4 minus Geländemodell A1, **Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm** (Abbildung oben), 3D-Visualisierung der CSMs über Grundlevel 0 in grau dargestellt, Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm (Abbildung unten).



Differenzmodell Aufnahme A3 minus A2, **Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm** (Abbildung oben), Differenzmodell Aufnahme A4 minus A3, Kamera FC6310_8.8 Auflösung 1cm (Abbildung unten).

Anhang 2 Tabellen der Vegetationshöhen (Differenzhöhen)

Differenzwerte der Vegetationshöhen zum Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1, sowie Höhenunterschiede der Vegetation zwischen den Aufnahmen A2 zu A3 und A3 zu A4. Die Resultate sind für jeden Plot einzeln aufgeführt und als Mittelwert über die 12 Plots angegeben.

Aufnahmen eBee, Kamera CanonPowerShotS110, räumliche Auflösung 6cm							Höhenunterschied der Vegetation zwischen den Aufnahmen A3-A2 und A4-A3						
Wachstumshöhe der Vegetation ab Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1													
Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standard-abweichung in m	Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standard-abweichung in m
A2-A1	1	0.01	0.12	0.11	0.05	0.03	A3-A2	1	0.03	0.40	0.37	0.26	0.09
A2-A1	2	0.02	0.16	0.14	0.08	0.03	A3-A2	2	0.05	0.27	0.22	0.20	0.05
A2-A1	3	0.03	0.11	0.08	0.07	0.02	A3-A2	3	0.04	0.41	0.37	0.29	0.08
A2-A1	4	0.04	0.21	0.17	0.12	0.04	A3-A2	4	0.00	0.34	0.34	0.22	0.09
A2-A1	5	0.05	0.16	0.11	0.09	0.02	A3-A2	5	0.06	0.37	0.31	0.27	0.07
A2-A1	6	0.04	0.20	0.16	0.10	0.04	A3-A2	6	0.00	0.39	0.39	0.28	0.08
A2-A1	7	0.04	0.24	0.20	0.12	0.06	A3-A2	7	0.03	0.33	0.30	0.22	0.08
A2-A1	8	0.01	0.22	0.21	0.11	0.05	A3-A2	8	0.13	0.49	0.36	0.30	0.07
A2-A1	9	0.03	0.22	0.19	0.13	0.06	A3-A2	9	0.07	0.40	0.33	0.24	0.08
A2-A1	10	0.03	0.15	0.12	0.10	0.03	A3-A2	10	0.17	0.39	0.22	0.32	0.05
A2-A1	11	0.04	0.15	0.11	0.08	0.03	A3-A2	11	0.05	0.40	0.35	0.32	0.06
A2-A1	12	0.07	0.17	0.10	0.12	0.02	A3-A2	12	0.10	0.42	0.32	0.32	0.07
A2-A1	1 bis 12	0.03	0.18	0.14	0.10	0.04	A3-A2	1 bis 12	0.06	0.38	0.32	0.27	0.07
A3-A1	1	0.07	0.43	0.36	0.31	0.09	A4-A3	1	-0.11	0.12	0.23	-0.01	0.06
A3-A1	2	0.17	0.35	0.19	0.28	0.04	A4-A3	2	-0.14	0.05	0.19	-0.02	0.04
A3-A1	3	0.09	0.49	0.40	0.36	0.09	A4-A3	3	-0.13	0.10	0.24	-0.04	0.06
A3-A1	4	0.12	0.42	0.31	0.34	0.06	A4-A3	4	-0.13	0.04	0.17	-0.06	0.04
A3-A1	5	0.16	0.44	0.28	0.36	0.06	A4-A3	5	-0.15	0.06	0.21	-0.07	0.04
A3-A1	6	0.15	0.52	0.37	0.37	0.07	A4-A3	6	-0.21	0.14	0.35	-0.01	0.06
A3-A1	7	0.14	0.42	0.28	0.33	0.05	A4-A3	7	-0.15	0.07	0.22	-0.08	0.05
A3-A1	8	0.23	0.55	0.32	0.41	0.06	A4-A3	8	-0.20	0.01	0.21	-0.09	0.04
A3-A1	9	0.13	0.49	0.36	0.37	0.07	A4-A3	9	-0.14	0.04	0.17	-0.05	0.04
A3-A1	10	0.21	0.49	0.28	0.42	0.05	A4-A3	10	-0.23	0.19	0.41	-0.05	0.07
A3-A1	11	0.11	0.45	0.34	0.40	0.05	A4-A3	11	-0.13	0.03	0.17	-0.06	0.03
A3-A1	12	0.23	0.56	0.33	0.44	0.08	A4-A3	12	-0.27	0.07	0.34	-0.11	0.08
A3-A1	1 bis 12	0.15	0.47	0.32	0.37	0.06	A4-A3	1 bis 12	-0.17	0.08	0.24	-0.05	0.05
A4-A1	1	0.12	0.38	0.26	0.30	0.05							
A4-A1	2	0.14	0.34	0.19	0.26	0.04							
A4-A1	3	0.17	0.40	0.23	0.32	0.05							
A4-A1	4	0.16	0.39	0.22	0.28	0.05							
A4-A1	5	0.15	0.34	0.19	0.28	0.04							
A4-A1	6	0.20	0.46	0.26	0.37	0.05							
A4-A1	7	0.14	0.32	0.18	0.26	0.04							
A4-A1	8	0.18	0.41	0.22	0.33	0.06							
A4-A1	9	0.13	0.42	0.29	0.32	0.07							
A4-A1	10	0.17	0.45	0.28	0.37	0.07							
A4-A1	11	0.12	0.41	0.29	0.33	0.05							
A4-A1	12	0.11	0.45	0.34	0.33	0.09							
A4-A1	1 bis 12	0.15	0.40	0.25	0.31	0.05							

Differenzwerte der Vegetationshöhen zum Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1, sowie Höhenunterschiede der Vegetation zwischen den Aufnahmen A2 zu A3 und A3 zu A4. Die Resultate sind für jeden Plot einzeln aufgeführt und als Mittelwert über die 12 Plots angegeben.

Aufnahmen eBee Plus, Kamera SODA_10.6, räumliche Auflösung 3cm													
Wachstumshöhe der Vegetation ab Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1							Höhenunterschied der Vegetation zwischen den Aufnahmen A3-A2 und A4-A3						
Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m	Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m
A2-A1	1	-0.04	0.12	0.16	-0.01	0.02	A3-A2	1	0.06	0.53	0.47	0.36	0.10
A2-A1	2	-0.02	0.11	0.13	0.03	0.03	A3-A2	2	0.12	0.40	0.27	0.26	0.06
A2-A1	3	-0.04	0.07	0.12	0.01	0.02	A3-A2	3	0.07	0.48	0.41	0.35	0.09
A2-A1	4	-0.02	0.25	0.27	0.07	0.06	A3-A2	4	-0.07	0.43	0.50	0.24	0.14
A2-A1	5	-0.02	0.13	0.15	0.04	0.03	A3-A2	5	0.10	0.47	0.37	0.34	0.07
A2-A1	6	-0.01	0.30	0.31	0.05	0.05	A3-A2	6	-0.11	0.53	0.64	0.31	0.12
A2-A1	7	-0.01	0.20	0.20	0.09	0.07	A3-A2	7	-0.01	0.45	0.45	0.27	0.10
A2-A1	8	0.01	0.26	0.25	0.09	0.05	A3-A2	8	-0.05	0.57	0.61	0.32	0.09
A2-A1	9	-0.01	0.22	0.23	0.10	0.07	A3-A2	9	0.04	0.45	0.41	0.28	0.09
A2-A1	10	0.01	0.20	0.19	0.11	0.04	A3-A2	10	0.00	0.45	0.45	0.31	0.07
A2-A1	11	0.00	0.19	0.19	0.10	0.04	A3-A2	11	0.02	0.43	0.40	0.29	0.07
A2-A1	12	0.09	0.27	0.18	0.16	0.03	A3-A2	12	-0.04	0.50	0.54	0.31	0.11
A2-A1	1 bis 12	-0.01	0.19	0.20	0.07	0.04	A3-A2	1 bis 12	0.01	0.47	0.46	0.30	0.09
A3-A1	1	0.04	0.52	0.48	0.35	0.11	A4-A3	1	-0.19	0.18	0.37	-0.04	0.08
A3-A1	2	0.13	0.40	0.27	0.28	0.05	A4-A3	2	-0.23	0.14	0.37	-0.03	0.05
A3-A1	3	0.10	0.48	0.38	0.36	0.08	A4-A3	3	-0.17	0.24	0.41	-0.04	0.08
A3-A1	4	0.07	0.47	0.41	0.30	0.09	A4-A3	4	-0.25	0.22	0.47	-0.03	0.07
A3-A1	5	0.12	0.49	0.37	0.38	0.07	A4-A3	5	-0.28	0.07	0.35	-0.08	0.06
A3-A1	6	0.08	0.59	0.51	0.36	0.09	A4-A3	6	-0.40	0.22	0.62	-0.05	0.09
A3-A1	7	0.13	0.47	0.34	0.35	0.06	A4-A3	7	-0.24	0.12	0.36	-0.08	0.07
A3-A1	8	0.14	0.60	0.47	0.40	0.08	A4-A3	8	-0.43	0.14	0.57	-0.11	0.09
A3-A1	9	0.08	0.53	0.45	0.39	0.07	A4-A3	9	-0.22	0.15	0.36	-0.04	0.06
A3-A1	10	0.03	0.56	0.53	0.42	0.06	A4-A3	10	-0.43	0.37	0.80	-0.06	0.11
A3-A1	11	0.04	0.52	0.48	0.39	0.07	A4-A3	11	-0.20	0.14	0.34	-0.04	0.06
A3-A1	12	0.09	0.63	0.54	0.47	0.11	A4-A3	12	-0.40	0.21	0.62	-0.10	0.12
A3-A1	1 bis 12	0.09	0.52	0.43	0.37	0.08	A4-A3	1 bis 12	-0.29	0.18	0.47	-0.06	0.08
A4-A1	1	0.11	0.43	0.32	0.31	0.07							
A4-A1	2	0.07	0.39	0.31	0.25	0.07							
A4-A1	3	0.08	0.49	0.40	0.32	0.07							
A4-A1	4	0.07	0.47	0.39	0.28	0.08							
A4-A1	5	0.11	0.41	0.29	0.29	0.06							
A4-A1	6	0.03	0.43	0.40	0.31	0.08							
A4-A1	7	0.11	0.42	0.32	0.27	0.07							
A4-A1	8	0.03	0.46	0.42	0.30	0.09							
A4-A1	9	0.07	0.43	0.36	0.34	0.07							
A4-A1	10	0.09	0.54	0.45	0.36	0.09							
A4-A1	11	0.09	0.46	0.38	0.34	0.06							
A4-A1	12	0.05	0.52	0.47	0.37	0.11							
A4-A1	1 bis 12	0.08	0.45	0.38	0.31	0.08							

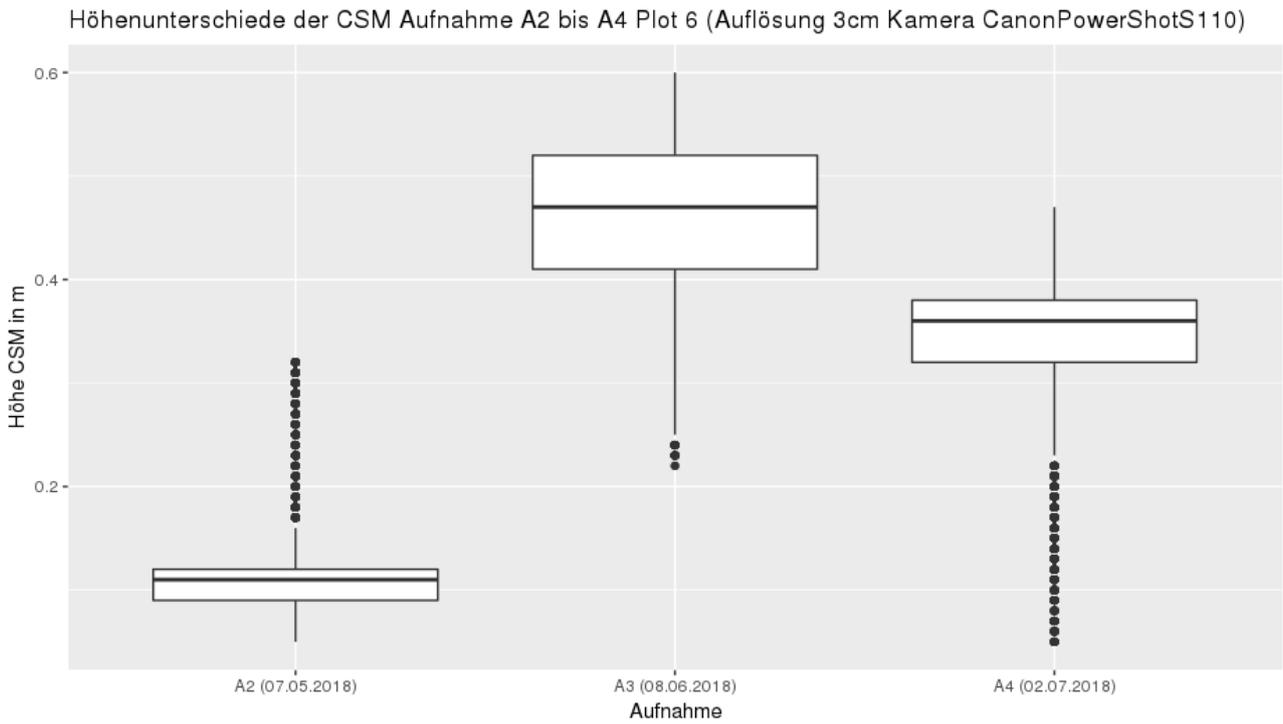
Differenzwerte der Vegetationshöhen zum Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1, sowie Höhenunterschiede der Vegetation zwischen den Aufnahmen A2 zu A3 und A3 zu A4. Die Resultate sind für jeden Plot einzeln aufgeführt und als Mittelwert über die 12 Plots angegeben.

Aufnahmen eBee Plus, Kamera SODA_10.6, räumliche Auflösung 6cm													
Wachstumshöhe der Vegetation ab Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1							Höhenunterschied der Vegetation zwischen den Aufnahmen A3-A2 und A4-A3						
Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m	Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m
A2-A1	1	-0.03	0.10	0.13	0.02	0.02	A3-A2	1	0.00	0.43	0.43	0.25	0.11
A2-A1	2	0.02	0.17	0.16	0.07	0.03	A3-A2	2	0.02	0.23	0.21	0.16	0.05
A2-A1	3	0.01	0.11	0.11	0.05	0.03	A3-A2	3	0.00	0.38	0.38	0.23	0.10
A2-A1	4	0.04	0.22	0.18	0.11	0.05	A3-A2	4	-0.12	0.32	0.44	0.17	0.11
A2-A1	5	0.04	0.17	0.13	0.09	0.02	A3-A2	5	0.01	0.34	0.33	0.20	0.07
A2-A1	6	0.04	0.20	0.16	0.10	0.04	A3-A2	6	-0.08	0.44	0.52	0.24	0.10
A2-A1	7	0.03	0.23	0.19	0.13	0.06	A3-A2	7	0.00	0.29	0.29	0.15	0.08
A2-A1	8	0.02	0.23	0.21	0.11	0.06	A3-A2	8	0.05	0.45	0.40	0.26	0.08
A2-A1	9	0.03	0.20	0.17	0.14	0.04	A3-A2	9	-0.01	0.37	0.39	0.19	0.08
A2-A1	10	0.03	0.20	0.17	0.12	0.05	A3-A2	10	0.06	0.37	0.30	0.26	0.05
A2-A1	11	0.04	0.19	0.15	0.12	0.04	A3-A2	11	0.00	0.34	0.34	0.22	0.07
A2-A1	12	0.09	0.19	0.10	0.14	0.02	A3-A2	12	-0.07	0.36	0.43	0.24	0.10
A2-A1	1 bis 12	0.03	0.19	0.16	0.10	0.04	A3-A2	1 bis 12	-0.01	0.36	0.37	0.21	0.08
A3-A1	1	0.03	0.41	0.38	0.26	0.11	A4-A3	1	-0.15	0.14	0.29	-0.03	0.07
A3-A1	2	0.08	0.30	0.22	0.24	0.04	A4-A3	2	-0.08	0.06	0.14	-0.01	0.03
A3-A1	3	0.04	0.41	0.37	0.28	0.09	A4-A3	3	-0.12	0.17	0.29	-0.03	0.05
A3-A1	4	0.03	0.38	0.35	0.28	0.08	A4-A3	4	-0.20	0.12	0.32	-0.04	0.07
A3-A1	5	0.07	0.41	0.34	0.29	0.07	A4-A3	5	-0.12	0.16	0.28	-0.05	0.06
A3-A1	6	0.06	0.58	0.52	0.34	0.10	A4-A3	6	-0.15	0.23	0.37	0.01	0.07
A3-A1	7	0.07	0.38	0.31	0.28	0.06	A4-A3	7	-0.12	0.14	0.26	-0.05	0.06
A3-A1	8	0.13	0.50	0.37	0.37	0.08	A4-A3	8	-0.23	0.06	0.29	-0.07	0.07
A3-A1	9	0.02	0.47	0.45	0.33	0.09	A4-A3	9	-0.14	0.10	0.24	-0.05	0.06
A3-A1	10	0.15	0.47	0.32	0.39	0.05	A4-A3	10	-0.27	0.17	0.43	-0.05	0.07
A3-A1	11	0.06	0.44	0.38	0.34	0.07	A4-A3	11	-0.18	0.04	0.22	-0.06	0.05
A3-A1	12	0.07	0.51	0.44	0.39	0.10	A4-A3	12	-0.24	0.13	0.37	-0.07	0.10
A3-A1	1 bis 12	0.07	0.44	0.37	0.31	0.08	A4-A3	1 bis 12	-0.17	0.13	0.29	-0.04	0.06
A4-A1	1	0.04	0.31	0.27	0.23	0.06							
A4-A1	2	0.10	0.29	0.19	0.23	0.04							
A4-A1	3	0.07	0.35	0.27	0.25	0.06							
A4-A1	4	0.12	0.36	0.24	0.24	0.05							
A4-A1	5	0.08	0.36	0.28	0.24	0.06							
A4-A1	6	0.12	0.43	0.31	0.36	0.06							
A4-A1	7	0.14	0.33	0.20	0.23	0.04							
A4-A1	8	0.15	0.41	0.26	0.30	0.07							
A4-A1	9	0.08	0.36	0.28	0.28	0.07							
A4-A1	10	0.12	0.41	0.28	0.34	0.05							
A4-A1	11	0.10	0.37	0.28	0.28	0.06							
A4-A1	12	0.07	0.43	0.35	0.32	0.09							
A4-A1	1 bis 12	0.10	0.37	0.27	0.28	0.06							

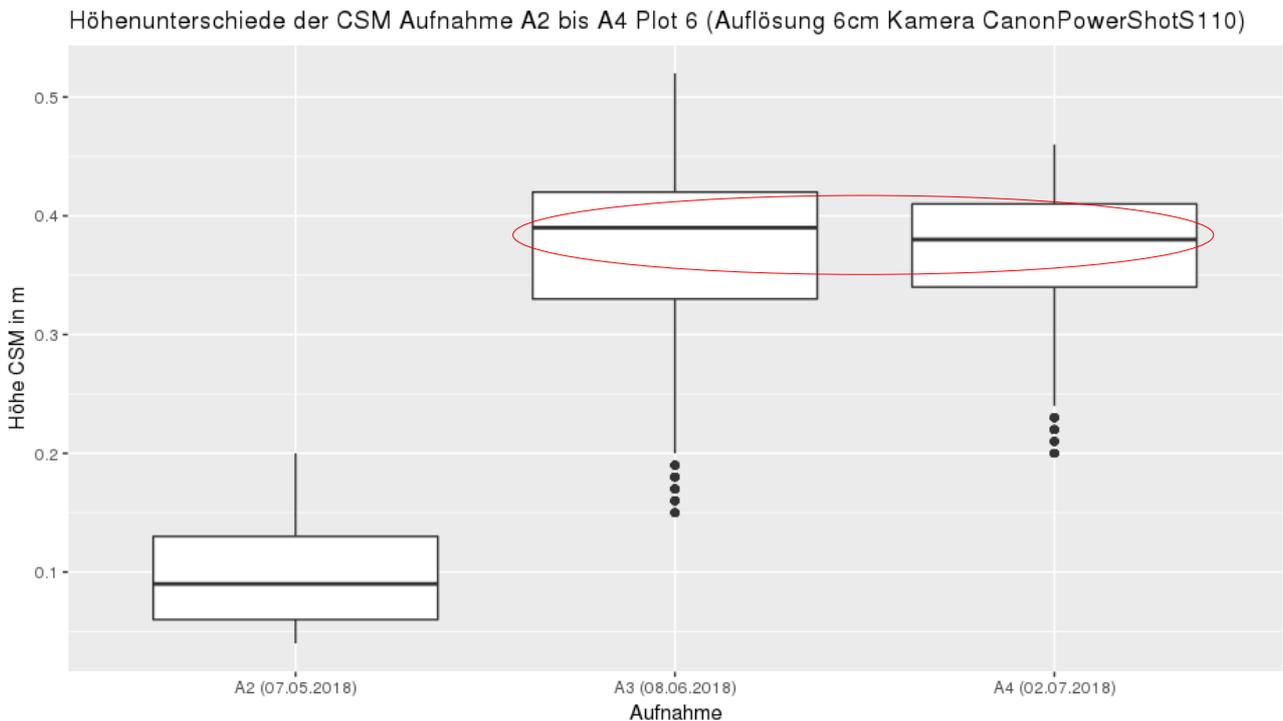
Differenzwerte der Vegetationshöhen zum Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1, sowie Höhenunterschiede der Vegetation zwischen den Aufnahmen A2 zu A3 und A3 zu A4. Die Resultate sind für jeden Plot einzeln aufgeführt und als Mittelwert über die 12 Plots angegeben.

Aufnahmen Phantom 4, Kamera FC6310 8.8, räumliche Auflösung 1cm							Höhenunterschied der Vegetation zwischen den Aufnahmen A3-A2 und A4-A3						
Wachstumshöhe der Vegetation ab Geländemodell A2-A1, A3-A1 und A4-A1							Höhenunterschied der Vegetation zwischen den Aufnahmen A3-A2 und A4-A3						
Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m	Differenz Aufnahme	Plot Nr.	Minimalhöhe in m	Maximalhöhe in m	Spannweite in m	Meanhöhe Vegetation in m	Standardabweichung in m
A2-A1	1	-0.03	0.19	0.22	0.02	0.03	A3-A2	1	0.01	0.58	0.57	0.24	0.11
A2-A1	2	-0.02	0.18	0.20	0.06	0.03	A3-A2	2	-0.05	0.48	0.53	0.19	0.09
A2-A1	3	-0.03	0.14	0.17	0.02	0.03	A3-A2	3	-0.03	0.51	0.53	0.24	0.10
A2-A1	4	-0.04	0.29	0.33	0.08	0.06	A3-A2	4	-0.20	0.46	0.66	0.18	0.14
A2-A1	5	-0.02	0.18	0.20	0.06	0.04	A3-A2	5	-0.07	0.51	0.57	0.26	0.10
A2-A1	6	-0.03	0.36	0.39	0.07	0.06	A3-A2	6	-0.30	0.61	0.90	0.29	0.14
A2-A1	7	-0.01	0.23	0.24	0.09	0.06	A3-A2	7	-0.08	0.47	0.55	0.21	0.10
A2-A1	8	-0.02	0.40	0.42	0.10	0.05	A3-A2	8	-0.27	0.65	0.92	0.26	0.13
A2-A1	9	-0.01	0.29	0.29	0.10	0.07	A3-A2	9	-0.07	0.54	0.61	0.27	0.11
A2-A1	10	-0.01	0.26	0.27	0.11	0.05	A3-A2	10	-0.18	0.51	0.69	0.28	0.11
A2-A1	11	-0.01	0.27	0.28	0.10	0.06	A3-A2	11	-0.10	0.53	0.62	0.28	0.09
A2-A1	12	0.05	0.26	0.22	0.15	0.04	A3-A2	12	-0.12	0.56	0.69	0.23	0.14
A2-A1	1 bis 12	-0.02	0.25	0.27	0.08	0.05	A3-A2	1 bis 12	-0.12	0.53	0.65	0.24	0.11
A3-A1	1	0.04	0.57	0.54	0.27	0.12	A4-A3	1	-0.29	0.38	0.67	0.04	0.12
A3-A1	2	0.07	0.52	0.45	0.25	0.08	A4-A3	2	-0.30	0.30	0.59	0.00	0.08
A3-A1	3	0.01	0.53	0.52	0.27	0.09	A4-A3	3	-0.23	0.37	0.59	0.03	0.10
A3-A1	4	0.03	0.50	0.47	0.27	0.10	A4-A3	4	-0.26	0.35	0.61	0.02	0.09
A3-A1	5	0.02	0.58	0.57	0.32	0.11	A4-A3	5	-0.35	0.23	0.59	-0.02	0.11
A3-A1	6	0.00	0.65	0.65	0.36	0.11	A4-A3	6	-0.49	0.33	0.82	-0.03	0.11
A3-A1	7	0.05	0.48	0.43	0.29	0.09	A4-A3	7	-0.25	0.28	0.52	-0.02	0.11
A3-A1	8	0.00	0.68	0.69	0.36	0.12	A4-A3	8	-0.36	0.45	0.81	-0.06	0.12
A3-A1	9	0.04	0.61	0.57	0.37	0.10	A4-A3	9	-0.25	0.28	0.53	-0.03	0.08
A3-A1	10	0.01	0.60	0.58	0.39	0.10	A4-A3	10	-0.51	0.40	0.91	-0.04	0.12
A3-A1	11	-0.01	0.59	0.59	0.37	0.09	A4-A3	11	-0.26	0.37	0.63	-0.04	0.09
A3-A1	12	0.04	0.64	0.60	0.38	0.14	A4-A3	12	-0.43	0.37	0.81	-0.01	0.14
A3-A1	1 bis 12	0.03	0.58	0.56	0.33	0.10	A4-A3	1 bis 12	-0.33	0.34	0.67	-0.01	0.11
A4-A1	1	0.05	0.50	0.45	0.31	0.08							
A4-A1	2	0.02	0.47	0.45	0.25	0.08							
A4-A1	3	0.06	0.56	0.50	0.30	0.08							
A4-A1	4	0.05	0.55	0.50	0.28	0.11							
A4-A1	5	0.03	0.47	0.44	0.30	0.08							
A4-A1	6	-0.03	0.56	0.59	0.33	0.09							
A4-A1	7	0.04	0.47	0.43	0.27	0.08							
A4-A1	8	0.00	0.52	0.52	0.30	0.11							
A4-A1	9	0.06	0.53	0.46	0.34	0.08							
A4-A1	10	0.01	0.60	0.59	0.35	0.11							
A4-A1	11	0.03	0.57	0.54	0.33	0.07							
A4-A1	12	0.02	0.59	0.56	0.37	0.12							
A4-A1	1 bis 12	0.03	0.53	0.50	0.31	0.09							

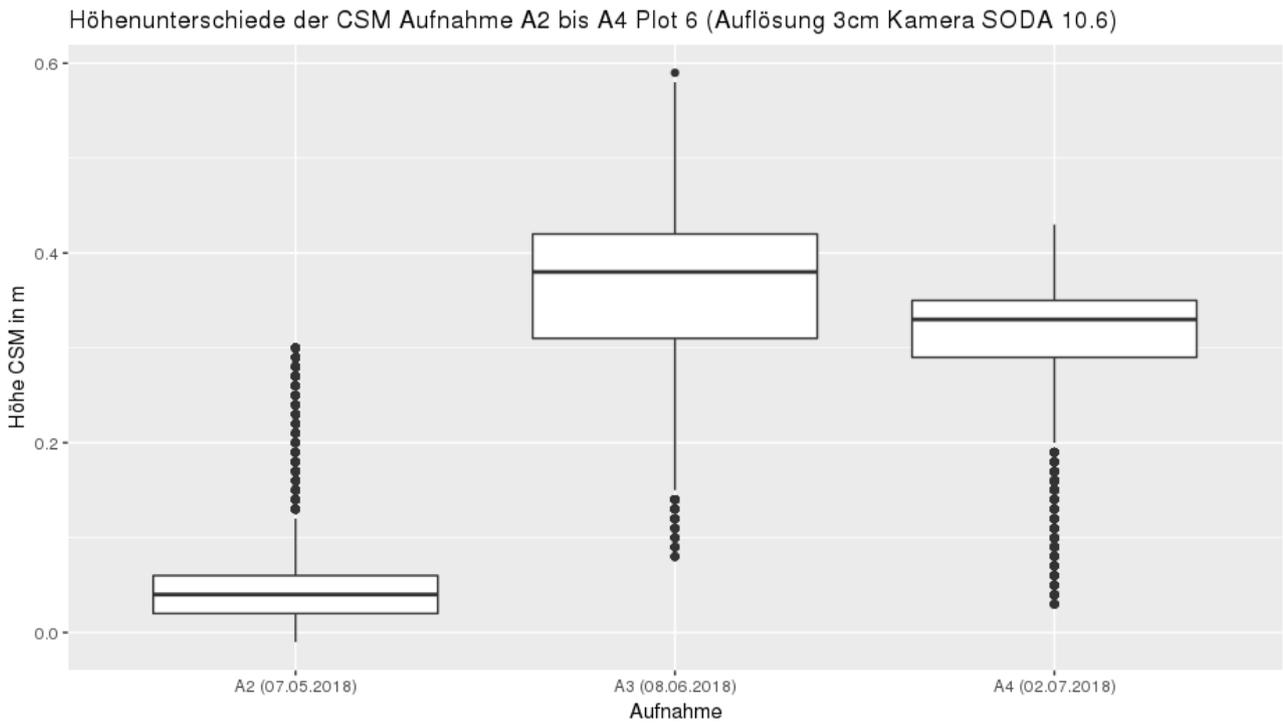
Anhang 3 Boxplots Plots Nr. 6 und 8



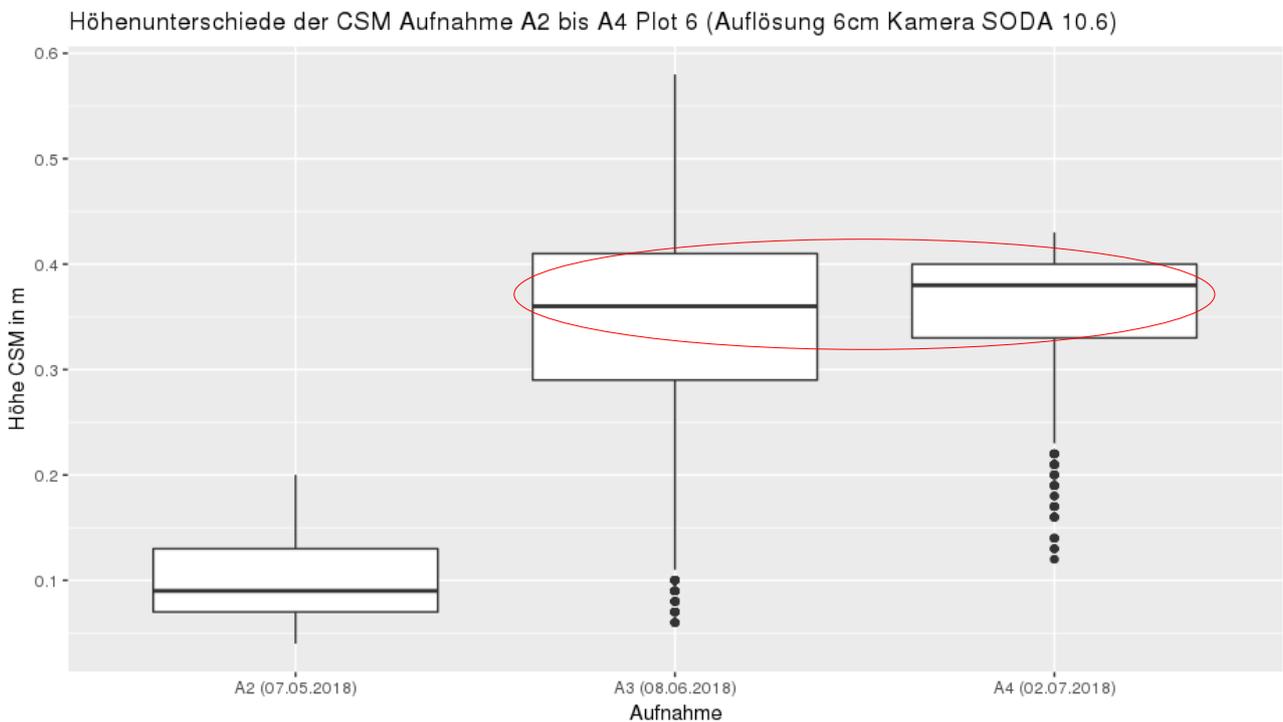
Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 6, Auflösung 3cm mit der Kamera CanonPowerShotS110**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 9600.



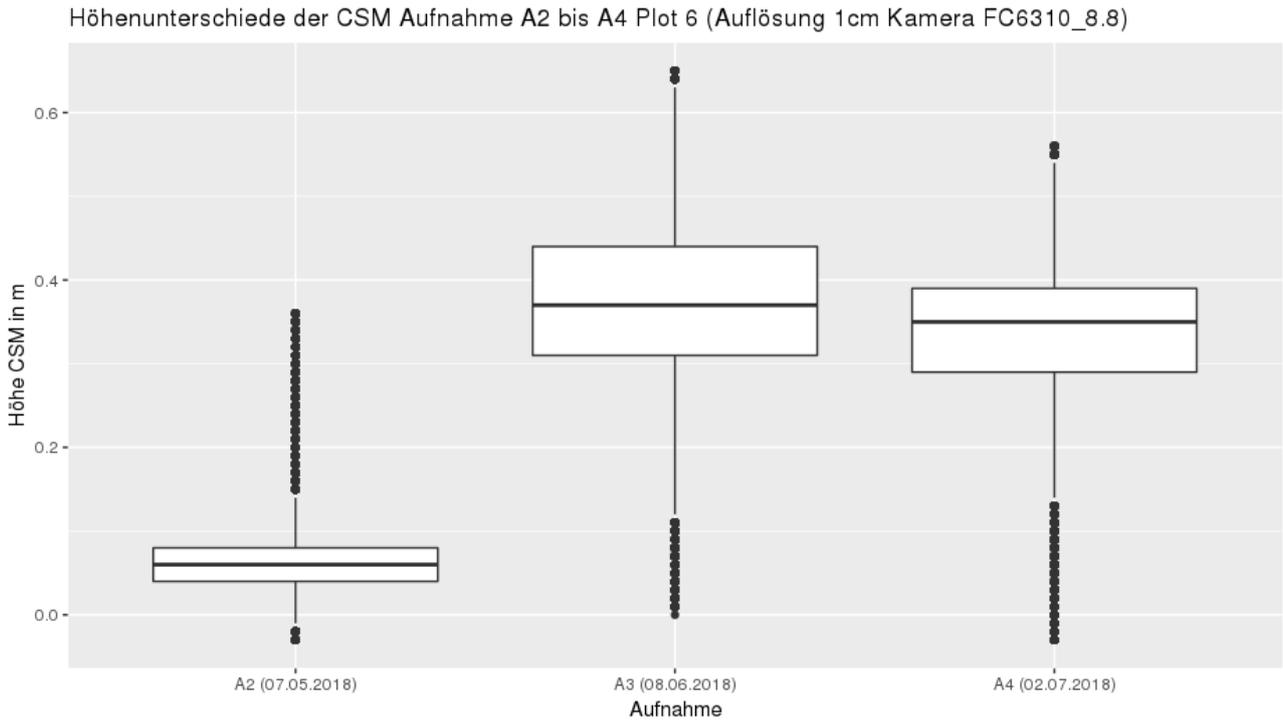
Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 6, Auflösung 6cm mit der Kamera CanonPowerShotS110**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 2700.



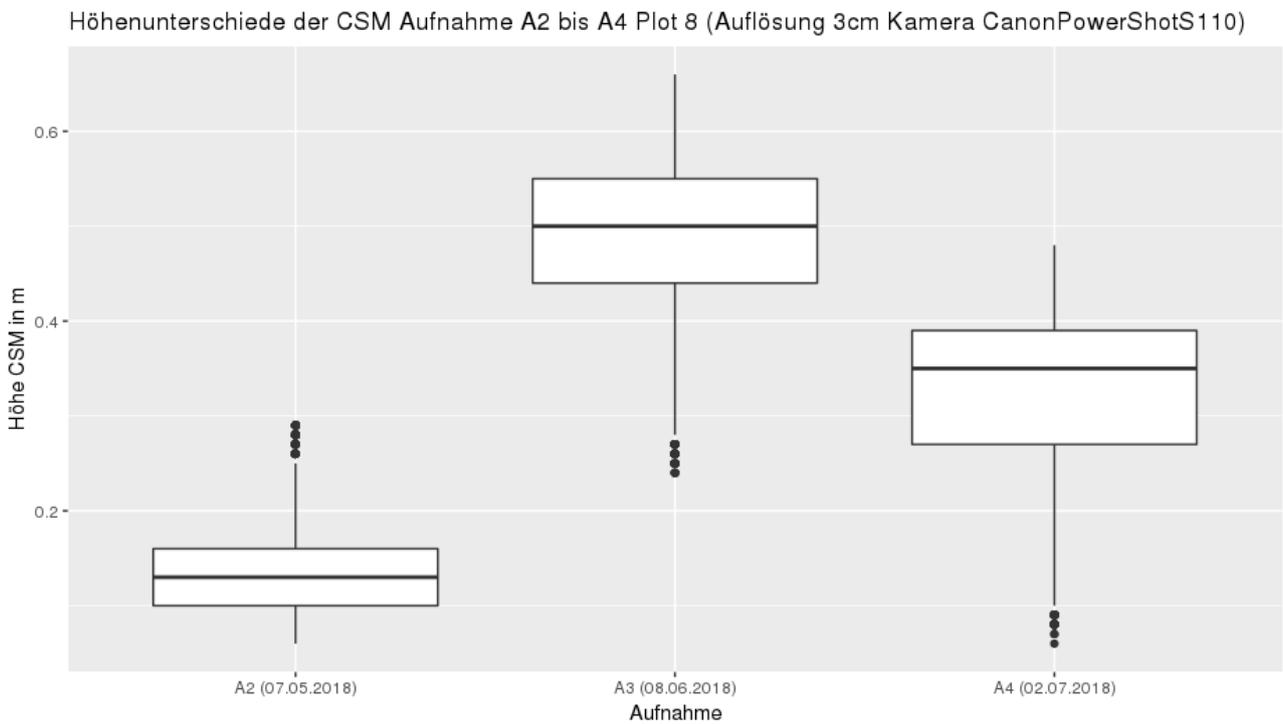
Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 Plot **Nr. 6**, **Auflösung 3cm** mit der Kamera **SODA 10.6**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 11600.



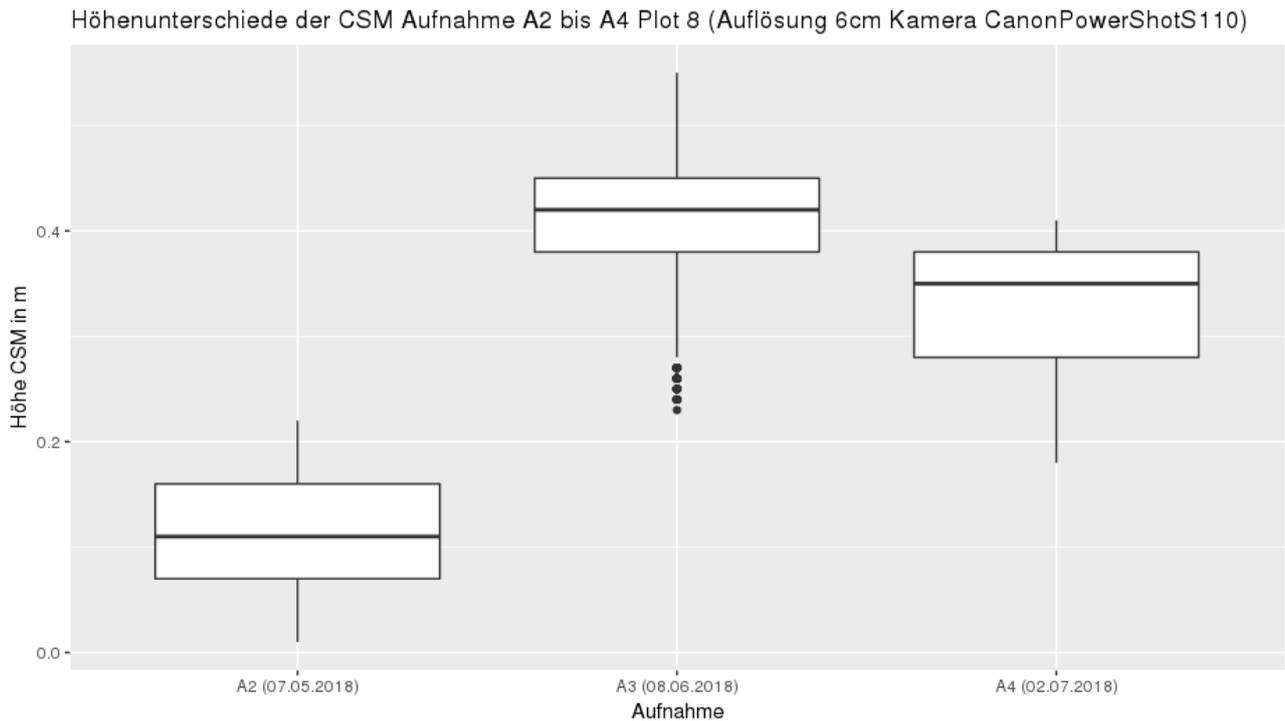
Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 6**, **Auflösung 6cm** mit der Kamera **SODA 10.6**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 3000.



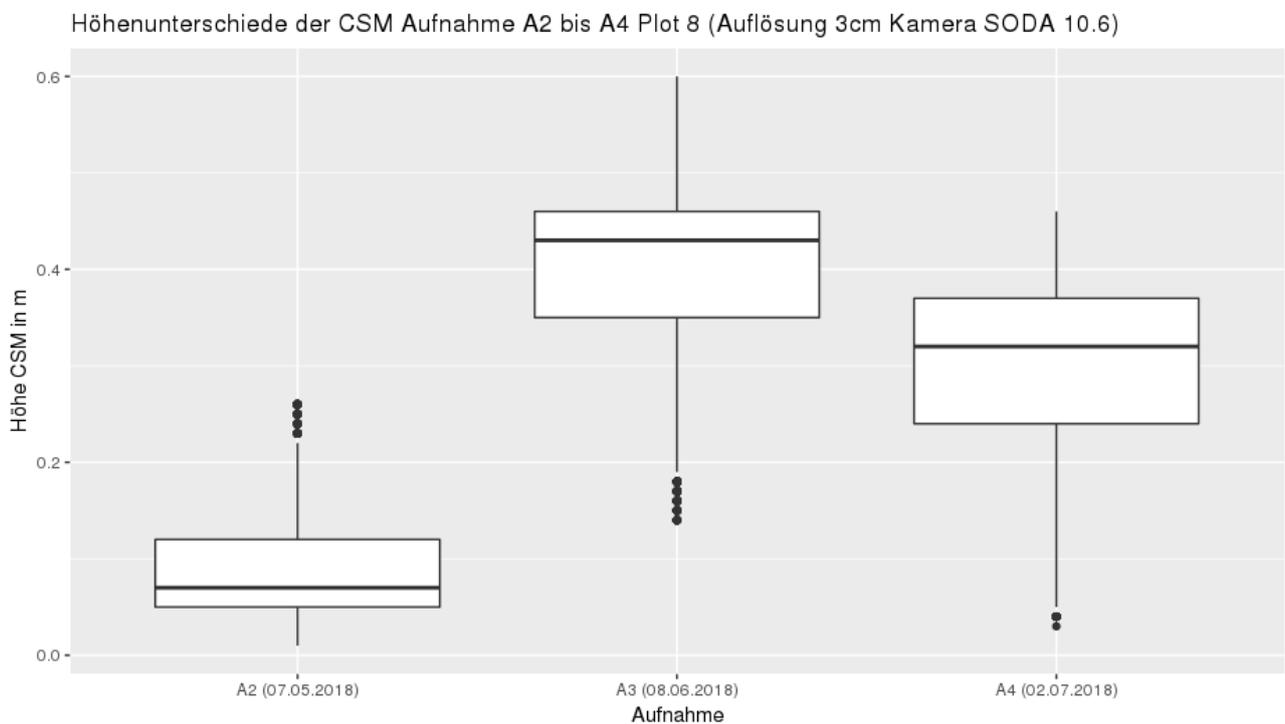
Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 6, Auflösung 1cm mit der Kamera FC6310_8.8**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 117000.



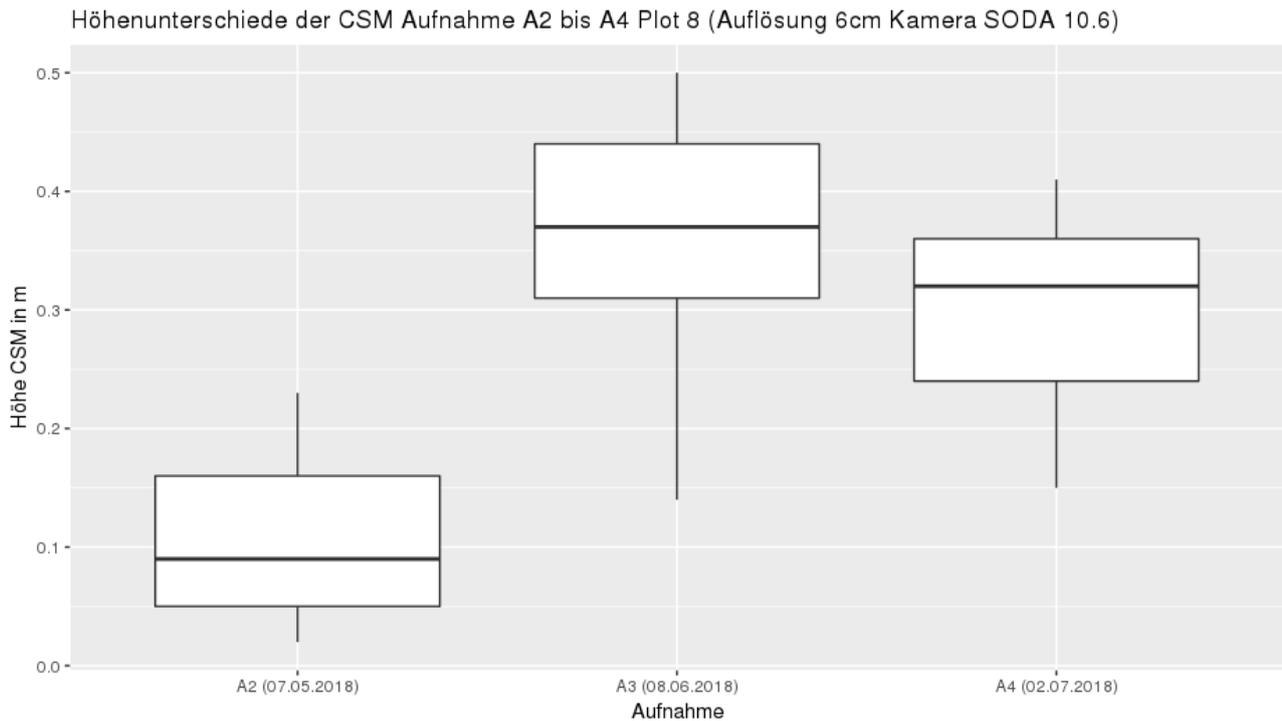
Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 8, Auflösung 3cm mit der Kamera CanonPowerShotS110**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 9600.



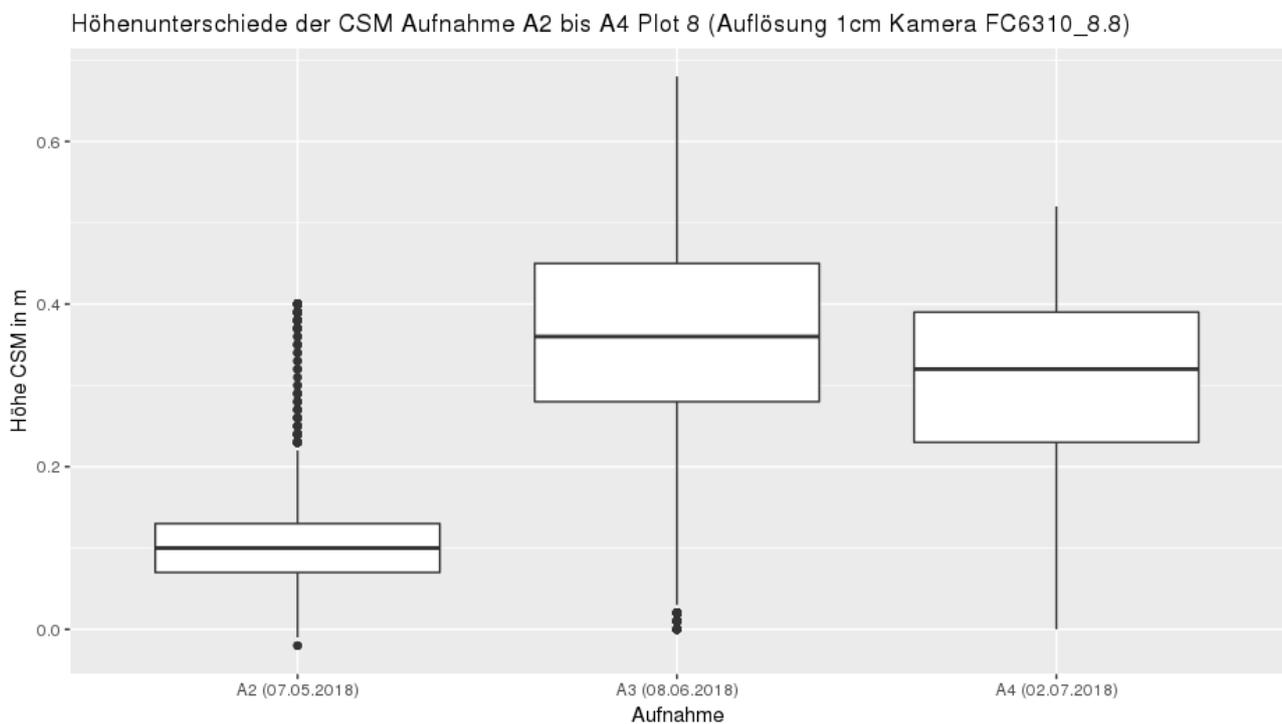
Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 8, Auflösung 6cm mit der Kamera CanonPowerShotS110**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 2700.



Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 8, Auflösung 3cm mit der Kamera SODA 10.6**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 11600.



Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 8, Auflösung 6cm mit der Kamera SODA 10.6**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 3000.



Boxplots der CSM Höhen der Aufnahmen A2 bis A4 **Plot Nr. 8, Auflösung 1cm mit der Kamera FC6310_8.8**. Anzahl Samples pro Boxplot ca. 117000.

Anhang 4 Tabellen Handmessungen

Tabellen der Höhenmessungen von Hand für die Aufnahmen A2 bis A4 mit gemittelter Höhe (Mean Höhe) pro Plot.

Manuelle Erfassung der Vegetationshöhe 2 Aufnahme (A2)						
Plot Nr.	Höhe vr	Höhe vl	Höhe mitte	Höhe hr	Höhe hl	Mean Höhe
1	0.15	0.16	0.18	0.15	0.20	0.17
2	0.25	0.37	0.34	0.22	0.38	0.31
3	0.20	0.50	0.15	0.20	0.25	0.26
4	0.28	0.29	0.20	0.22	0.20	0.24
5	0.15	0.30	0.15	0.25	0.35	0.24
6	0.36	0.30	0.20	0.35	0.35	0.31
7	0.35	0.35	0.30	0.30	0.28	0.32
8	0.45	0.46	0.30	0.44	0.25	0.38
9	0.27	0.30	0.30	0.35	0.25	0.29
10	0.30	0.33	0.33	0.30	0.25	0.30
11	0.40	0.30	0.30	0.30	0.25	0.31
12	0.25	0.20	0.25	0.25	0.18	0.23

*vr = vorne rechts, vl = vorne links, hr = hinten rechts, hl = hinten links (Blick richtung Nord), **Angaben in m

Manuelle Erfassung der Vegetationshöhe 3 Aufnahme (A3)						
Plot Nr.	Höhe vr	Höhe vl	Höhe mitte	Höhe hr	Höhe hl	Mean Höhe
1	0.58	0.60	0.60	0.60	0.65	0.61
2	0.54	0.64	0.54	0.70	0.62	0.61
3	0.50	0.50	0.55	0.55	0.65	0.55
4	0.47	0.60	0.70	0.20	0.60	0.51
5	0.60	0.65	0.65	0.65	0.70	0.65
6	0.70	0.70	0.60	0.75	0.55	0.66
7	0.45	0.50	0.40	0.45	0.30	0.42
8	0.70	0.68	0.60	0.75	0.55	0.66
9	0.65	0.60	0.55	0.60	0.55	0.59
10	0.75	0.65	0.65	0.65	0.75	0.69
11	0.65	0.65	0.55	0.65	0.60	0.62
12	0.65	0.65	0.75	0.70	0.65	0.68

*vr = vorne rechts, vl = vorne links, hr = hinten rechts, hl = hinten links (Blick richtung Nord), **Angaben in m

Manuelle Erfassung der Vegetationshöhe 4 Aufnahme (A4)						
Plot Nr.	Höhe vr	Höhe vl	Höhe mitte	Höhe hr	Höhe hl	Mean Höhe
1	0.30	0.47	0.50	0.40	0.48	0.43
2	0.45	0.25	0.40	0.45	0.38	0.39
3	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.42
4	0.45	0.48	0.45	0.45	0.48	0.46
5	0.40	0.45	0.35	0.40	0.40	0.40
6	0.48	0.50	0.50	0.60	0.55	0.53
7	0.45	0.45	0.25	0.25	0.25	0.33
8	0.40	0.45	0.45	0.50	0.35	0.43
9	0.30	0.40	0.40	0.40	0.45	0.39
10	0.50	0.45	0.30	0.50	0.50	0.45
11	0.40	0.40	0.40	0.50	0.40	0.42
12	0.50	0.45	0.45	0.60	0.50	0.50

*vr = vorne rechts, vl = vorne links, hr = hinten rechts, hl = hinten links (Blick richtung Nord), **Angaben in m

Anhang 5 Prüfung auf Normalverteilung der Daten

Resultate aus dem Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnoff Test, zur Prüfung der Daten auf Normalverteilung. Die Daten sind Normalverteilt und dürfen somit für die weiteren Tests verwendet werden.

Resultate: Tests auf Normalverteilung (Residual Analysis)		
Aufnahme	Tests	P-value
Auflösung 3cm CanonPowershotS110	Shapiro-Wilk	0.977
	Kolmogorov-Smirnoff	0.999
Auflösung 6cm CanonPowershotS110	Shapiro-Wilk	0.247
	Kolmogorov-Smirnoff	0.722
Auflösung 3cm SODA 10.6	Shapiro-Wilk	0.441
	Kolmogorov-Smirnoff	0.942
Auflösung 6cm SODA 10.6	Shapiro-Wilk	0.594
	Kolmogorov-Smirnoff	0.986
Auflösung 1cm FC6310_8.8	Shapiro-Wilk	0.359
	Kolmogorov-Smirnoff	0.894

Anhang 6 R-Scripte

R-Script Visuelle Regression und Pearson-Korellationstest

```
#####6cm S110#####
```

```
hvergleich = read.delim("R_6c110.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(hvergleich)
xtabs(~hvergleich$h_csm)
plot(hvergleich)

plot(hvergleich$h_handmessung~hvergleich$h_CSM)

vis_regr(hvergleich$h_CSM,hvergleich$h_handmessung,ylim=c(0.2,0.6),xlab="Pflanzenhöhe ab Grund Handmessung (m)",ylab="Pflanzenhöhe CSM (m)")

cor.test(as.numeric(hvergleich$h_handmessung),hvergleich$h_CSM,method="pearson") #für metrische Daten
```

```
#####3cm S110#####
```

```
hvergleich = read.delim("R_3c110.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(hvergleich)
xtabs(~hvergleich$h_csm)
plot(hvergleich)

plot(hvergleich$h_handmessung~hvergleich$h_CSM)

vis_regr(hvergleich$h_CSM,hvergleich$h_handmessung,ylim=c(0.2,0.6),xlab="Pflanzenhöhe ab Grund Handmessung (m)",ylab="Pflanzenhöhe CSM (m)")

cor.test(as.numeric(hvergleich$h_handmessung),hvergleich$h_CSM,method="pearson") #für metrische Daten
```

```
#####6cm SODA#####
```

```
hvergleich = read.delim("R_6csoda.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(hvergleich)
xtabs(~hvergleich$h_csm)
plot(hvergleich)

plot(hvergleich$h_handmessung~hvergleich$h_CSM)

vis_regr(hvergleich$h_CSM,hvergleich$h_handmessung,ylim=c(0.2,0.6),xlab="Pflanzenhöhe ab Grund Handmessung (m)",ylab="Pflanzenhöhe CSM (m)")

cor.test(as.numeric(hvergleich$h_handmessung),hvergleich$h_CSM,method="pearson") #für metrische Daten
```

```
#####3cm SODA#####
```

```
hvergleich = read.delim("R_3csoda.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(hvergleich)
xtabs(~hvergleich$h_csm)
plot(hvergleich)

plot(hvergleich$h_handmessung~hvergleich$h_CSM)

vis_regr(hvergleich$h_CSM,hvergleich$h_handmessung,ylim=c(0.2,0.6),xlab="Pflanzenhöhe ab Grund Handmessung (m)",ylab="Pflanzenhöhe CSM (m)")

cor.test(as.numeric(hvergleich$h_handmessung),hvergleich$h_CSM,method="pearson") #für metrische Daten
```

```
#####1cm phantom#####
```

```

hvergleich = read.delim("R_1cphantom.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(hvergleich)
xtabs(~hvergleich$h_csm)
plot(hvergleich)

plot(hvergleich$h_handmessung~hvergleich$h_CSM)vis_regr(hvergleich$h_CSM,hvergleich$h_handmessung,y-
lim=c(0.2,0.6),xlab="Pflanzenhöhe ab Grund Handmessung (m)",ylab="Pflanzenhöhe CSM(m)")

cor.test(as.numeric(hvergleich$h_handmessung),hvergleich$h_CSM,method="pearson") #für metrische Daten

```

R-Script T-Tests

```

#t-test:TP_h3s110p_6

dat=read.delim("TP_h3s110p_6.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h6s110p_6

dat=read.delim("TP_h6s110p_6.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h3sodap_6

dat=read.delim("TP_h3sodap_6.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h6sodap_6

dat=read.delim("TP_h6sodap_6.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h1php_6

dat=read.delim("TP_h1php_6.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h3s110p_8

dat=read.delim("TP_h3s110p_8.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric

```

```
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h6s110p_8

dat=read.delim("TP_h6s110p_8.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h3sodap_8

dat=read.delim("TP_h3sodap_8.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h6sodap_8

dat=read.delim("TP_h6sodap_8.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h1php_8

dat=read.delim("TP_h1php_8.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h3s110p_12

dat=read.delim("TP_h3s110p_12.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h6s110p_12

dat=read.delim("TP_h6s110p_12.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

#t-test:TP_h3sodap_12

dat=read.delim("TP_h3sodap_12.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric
```

```

##-test:TP_h6sodap_12

dat=read.delim("TP_h6sodap_12.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

##-test:TP_h1php_12

dat=read.delim("TP_h1php_12.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
str(dat)
t.test(dat$A1, dat$A2) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A2, dat$A3) # where y1 and y2 are numeric
t.test(dat$A3, dat$A4) # where y1 and y2 are numeric

```

R-Script Visualisierung der Daten Scatterplots mit Regressionsgeraden mit tidyverse

```

library(tidyverse)

cam3110 <- read_delim("R_3c110.csv",";")
cam6110 <- read_delim("R_6c110.csv",";")
cam6soda <- read_delim("R_6csoda.csv",";")
cam3soda <- read_delim("R_3csoda.csv",";")
cam1phantom <- read_delim("R_1cphantom.csv",";")

#####Vergleich Ebee Auflösung 3cm Kamera S110#####

plot(cam3110$h_CSM,cam3110$h_handmessung)
ggplot(data = cam3110, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Aufnahme)) +
  geom_point(aes(colour = Aufnahme), size = 2) +
  ggtitle("Ebee Auflösung 3cm Kamera CanonPowerShotS110") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  scale_color_manual(values=c("coral", "blue", "green")) +
  geom_smooth(aes(x = h_handmessung, y = h_CSM),method = "lm", lty=2, lwd=0.5, se = F, inherit.aes = F, colour = "black") +
  geom_point() +
  expand_limits(x = 0, y = 0)+
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.49, label = "y=0.947x + 0.1733"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.47, label = "R²=0.853"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.45, label = "n= 34"), colour = "black") +
  geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))

#####Vergleich Ebee Auflösung 6cm Kamera S110#####

plot(cam6110$h_CSM,cam6110$h_handmessung)
ggplot(data = cam6110, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Aufnahme)) +
  geom_point(aes(colour = Aufnahme), size = 2) +
  ggtitle("Ebee Auflösung 6cm Kamera CanonPowerShotS110") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  scale_color_manual(values=c("coral", "blue", "green")) +
  geom_smooth(aes(x = h_handmessung, y = h_CSM),method = "lm", lty=2, lwd=0.5, se = F, inherit.aes = F, colour = "black") +
  geom_point() +
  expand_limits(x = 0, y = 0)+
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.49, label = "y=1.0969x + 0.151"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.47, label = "R²=0.769"), colour = "black") +

```

```
geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.45, label = "n= 34"), colour = "black") +
geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))
```

#####Vergleich Ebee Plus Auflösung 3cm Kamera SODA#####

```
plot(cam3soda$h_CSM,cam3soda$h_handmessung)
ggplot(data = cam3soda, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Aufnahme)) +
  geom_point(aes(colour = Aufnahme), size = 2) +
  ggtitle("Ebee Plus Auflösung 3cm Kamera SODA 10.6") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  scale_color_manual(values=c("coral", "blue", "green")) +
  geom_smooth(aes(x = h_handmessung, y = h_CSM),method = "lm", lty=2, lwd=0.5, se = F, inherit.aes = F, colour = "black") +
  geom_point() +
  expand_limits(x = 0, y = 0)+
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.49, label = "y=0.9704x + 0.1894"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.47, label = "R²=0.743"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.45, label = "n= 34"), colour = "black") +
  geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))
```

#####Vergleich Ebee Plus Auflösung 6cm Kamera SODA#####

```
plot(cam6soda$h_CSM,cam6soda$h_handmessung)
ggplot(data = cam6soda, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Aufnahme)) +
  geom_point(aes(colour = Aufnahme), size = 2) +
  ggtitle("Ebee Plus Auflösung 6cm Kamera SODA 10.6") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  scale_color_manual(values=c("coral", "blue", "green")) +
  geom_smooth(aes(x = h_handmessung, y = h_CSM),method = "lm", lty=2, lwd=0.5, se = F, inherit.aes = F, colour = "black") +
  geom_point() +
  expand_limits(x = 0, y = 0)+
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.49, label = "y=1.2591x + 0.1457"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.47, label = "R²=0.763"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.45, label = "n= 34"), colour = "black") +
  geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))
```

#####Vergleich Phantom Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8#####

```
plot(cam1phantom$h_CSM,cam1phantom$h_handmessung)
ggplot(data = cam6soda, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Aufnahme)) +
  geom_point(aes(colour = Aufnahme), size = 2) +
  ggtitle("Phantom 4 Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  scale_color_manual(values=c("coral", "blue", "green")) +
  geom_smooth(aes(x = h_handmessung, y = h_CSM),method = "lm", lty=2, lwd=0.5, se = F, inherit.aes = F, colour = "black") +
  geom_point() +
  expand_limits(x = 0, y = 0)+
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.49, label = "y=1.0697x + 0.1771"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.47, label = "R²=0.678"), colour = "black") +
  geom_text(aes(x = 0.1, y = 0.45, label = "n= 34"), colour = "black") +
  geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))
```

#####

```

cam1phantom$Auflösung <- "1cm FC6310_8.8"
cam1phantom$camera <- "phantom"

cam3110$Auflösung <- "3cm CanonPowerShotS110"
cam3110$camera <- "S110"

cam6110$Auflösung <- "6cm CanonPowerShotS110"
cam6110$camera <- "S110"

cam6soda$Auflösung <- "6cm SODA 10.6"
cam6soda$camera <- "soda"

cam3soda$Auflösung <- "3cm SODA 10.6"
cam3soda$camera <- "soda"

all_data <- bind_rows(cam3110,cam6110,cam1phantom)

#####Regression Vergleich 1cm, 3cm und 6cm Phantom S110#####

ggplot(data = all_data, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Auflösung)) +
  geom_smooth(method = "lm",se = F) +
  geom_point() +
  ggtitle("Vergleich 1cm, 3cm und 6cm Auflösungen (Kameras FC6310_8.8 und CanonPowerShotS110)") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  expand_limits(x = 0, y = 0) +
  geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))

#####Regression Vergleich 1cm, 3cm und 6cm Phantom, SODA#####

all_data <- bind_rows(cam3soda,cam6soda,cam1phantom)
ggplot(data = all_data, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Auflösung)) +
  geom_smooth(method = "lm",se = F) +
  geom_point() +
  ggtitle("Vergleich 1cm, 3cm und 6cm Auflösungen (Kameras FC6310_8.8 und SODA 10.6)") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  expand_limits(x = 0, y = 0) +
  geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))

#####Regression Vergleich 3cm und 6cm#####

all_data <- bind_rows(cam3110,cam6110,cam6soda,cam3soda)
ggplot(data = all_data, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Kamera)) +
  geom_smooth(method = "lm",se = F) +
  geom_point() +
  ggtitle("Vergleich Auflösung (3cm und 6cm) und Kamera (S110 und SODA)") +
  xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
  expand_limits(x = 0, y = 0)+
  geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))+
  facet_wrap(~Auflösung)

#####Regression Vergleich S110 und Soda#####

all_data <- bind_rows(cam3110,cam6110,cam6soda,cam3soda)
ggplot(data = all_data, aes(x = h_handmessung, y = h_CSM, colour = Auflösung)) +
  geom_smooth(method = "lm",se = F) +
  geom_point() +
  ggtitle("Vergleich Kamera (S110 und SODA) und Auflösung (3cm und 6cm)") +

```

```
xlab("Mean Höhe Handmessung (m)") + ylab("Mean Höhe CSM (m)") +
expand_limits(x = 0, y = 0)+
geom_abline(aes(intercept = 0, slope = 1))+
facet_wrap(~camera)
```

R-Script Visualisierung der Daten Boxplots mit tidyverse

```
library(tidyverse)
```

```
#####Boxplot Plot 6 (Auflösung 3cm Kamera CanonPowerShotS110#####
```

```
h3s110 <- read_delim("P_h3s110p_6.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 6 (Auflösung 3cm Kamera CanonPowerShotS110) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()
```

```
#####Boxplot Plot 6 (Auflösung 6cm Kamera CanonPowerShotS110#####
```

```
h6s110 <- read_delim("P_h6s110p_6.csv",";")
ggplot(h6s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 6 (Auflösung 6cm Kamera CanonPowerShotS110)") + xlab("Auf-
nahme") + ylab("Höhe CSM in m.") +
  geom_boxplot()
```

```
#####Boxplot Plot 6 (Auflösung 3cm Kamera SODA 10.6#####
```

```
h3s110 <- read_delim("P_h3sodap_6.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 6 (Auflösung 3cm Kamera SODA 10.6) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()
```

```
#####Boxplot Plot 6 (Auflösung 6cm Kamera SODA 10.6#####
```

```
h3s110 <- read_delim("P_h6sodap_6.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 6 (Auflösung 6cm Kamera SODA 10.6) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()
```

```
#####Boxplot Plot 6 (Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8#####
```

```
h3s110 <- read_delim("P_h1php_6.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 6 (Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()
```

```
#####Boxplot Plot 8 (Auflösung 3cm Kamera CanonPowerShotS110#####
```

```
h3s110 <- read_delim("P_h3s110p_8.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 8 (Auflösung 3cm Kamera CanonPowerShotS110) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()
```

```
#####Boxplot Plot 8 (Auflösung 6cm Kamera CanonPowerShotS110#####
```

```

h6s110 <- read_delim("P_h6s110p_8.csv",";")
ggplot(h6s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 8 (Auflösung 6cm Kamera CanonPowerShotS110)") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()

#####Boxplot Plot 8 (Auflösung 3cm Kamera SODA 10.6#####

h3s110 <- read_delim("P_h3sodap_8.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 8 (Auflösung 3cm Kamera SODA 10.6) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()

#####Boxplot Plot 8 (Auflösung 6cm Kamera SODA 10.6#####

h3s110 <- read_delim("P_h6sodap_8.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 8 (Auflösung 6cm Kamera SODA 10.6) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()

#####Boxplot Plot 8 (Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8#####

h3s110 <- read_delim("P_h1php_8.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 8 (Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()

#####Boxplot Plot 12 (Auflösung 3cm Kamera CanonPowerShotS110#####

h3s110 <- read_delim("P_h3s110p_12.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 12 (Auflösung 3cm Kamera CanonPowerShotS110) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()

#####Boxplot Plot 12 (Auflösung 6cm Kamera CanonPowerShotS110#####

h6s110 <- read_delim("P_h6s110p_12.csv",";")
ggplot(h6s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 12 (Auflösung 6cm Kamera CanonPowerShotS110)") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()

#####Boxplot Plot 12 (Auflösung 3cm Kamera SODA 10.6#####

h3s110 <- read_delim("P_h3sodap_12.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 12 (Auflösung 3cm Kamera SODA 10.6) ") +
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +
  geom_boxplot()

#####Boxplot Plot 12 (Auflösung 6cm Kamera SODA 10.6#####

h3s110 <- read_delim("P_h6sodap_12.csv",";")
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +

```

```
ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 12 (Auflösung 6cm Kamera SODA 10.6) ") +  
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +  
  geom_boxplot()
```

```
#####Boxplot Plot 12 (Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8#####
```

```
h3s110 <- read_delim("P_h1php_12.csv",";")  
ggplot(h3s110, aes(Flug, hoehe)) +  
  ggtitle("Höhenunterschiede der CSM Aufnahme A2 bis A4 Plot 12 (Auflösung 1cm Kamera FC6310_8.8) ") +  
  xlab("Aufnahme") + ylab("Höhe CSM in m") +  
  geom_boxplot()
```

Anhang 7 Plagiatserklärung



Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Semesterarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Unterschrift

Arch, 23. August 2018

David Hauswirth