

# Drohnenbefliegung zur Luftbilderfassung und Höhenvermessung im Wurzacher Ried





# Drohnenbefliegung zur Luftbilderfassung und Höhenvermessung im Wurzacher Ried

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 76231 Karlsruhe, Postfach 10 01 63, <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>GEFÖRDERT DURCH</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
<b>BEARBEITUNG</b>	Terrana Geophysik - Dr. Patzelt & Partner, Mössingen Herr Dipl.-Geol. Dr. Martin Waldhör
<b>REDAKTION</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat 22 - Boden, Heinz-Otto Kühl
<b>BEZUG</b>	Download unter: <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>STAND</b>	März 2017
<b>SATZ/GRAFIK</b>	LUBW, Referat 22 - Boden
<b>BILDER</b>	Abb. 3.2-1: Luftbild der Drohne: 20 cm Bodenauflösung - Bildbreite: ca. 40 m (b). Quelle: Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, <a href="http://www.lgl-bw.de">www.lgl-bw.de</a> , Az.: 2851.9-1/19 Alle anderen Fotos: Martin Waldhör, Terrana Geophysik
<b>TITELBILDER</b>	Links: Hexacopter des Typs XR6; Rechts oben: Auslegung und Einmessung von Markerplatten zur Georeferenzierung des Luftbilds; Rechts Mitte: Luftbild der Drohne; Rechts unten: 3D-Darstellung aus DGM_10cm mit Ortholuftbild 4 cm der Drohnenbefliegung

Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

<b>1</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>BEFLIEGUNG MIT DER DROHNE</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>AUSWERTUNG DER DATEN DER DROHNENBEFLIEGUNG</b>	<b>10</b>
3.1	Verarbeitung und Bereitstellung der Daten	10
3.2	Qualität der Luftbilder	12
3.3	Digitales Oberflächenmodell	13
3.4	Baumhöhen	16
<b>4</b>	<b>VERGLEICH DER HÖHEN AUS DROHNEN-, GPS- UND LIDAR-DATEN</b>	<b>17</b>
4.1	Geländehöhenvergleich der GPS-Messungen von 2014 und 2016	17
4.2	Übersicht Drohne- und Lidar-Daten	18
4.3	Detailvergleich Drohne-, Lidar- und GPS-Daten	19
<b>5</b>	<b>FAZIT</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>GLOSSAR</b>	<b>22</b>
	<b>ANHANG</b>	<b>24</b>
	<b>ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>34</b>



# 1 Aufgabenstellung

In den Jahren 2013-2014 wurde die Fa. Terrana Geophysik durch das Referat Boden, Altlasten der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Karlsruhe beauftragt, geodätische GPS-Messungen in neun ausgewählten Mooren Baden-Württembergs durchzuführen mit dem Ziel, eine Datenbasis zu schaffen, die in Zukunft zur Beurteilung des Höhenwachstums von Mooren bzw. der Moorsackung herangezogen werden kann<sup>1</sup>.

Mittlerweile wurde das Verfahren der Drohnenbefliegung mit hochauflösender Luftbildvermessung anwendungsreif entwickelt. Es sollte geprüft werden, ob mit dem Verfahren auch große Flächen rasch und zentimetergenau zu erfassen sind. Dieses Verfahren erschien somit geeigneter und kostengünstiger als die landgestützte und oft unwegsame GPS-Messung entlang von einzelnen Profilen. Um die Einsetzbarkeit der Drohnen-Vermessung in Mooren festzustellen, wurde ein rund 100 Hektar großes Teilgebiet des Wurzacher Rieds untersucht. Die Daten wurden anschließend mit vorhandenen Lidar-Daten<sup>2</sup> (Oktober 2002) sowie älteren (Juni 2014) und neu durchgeführten GPS-Messungen (September 2016) verglichen.

---

<sup>1</sup> Bericht Nr. TG705B-14 vom 03.09.14: *Höbennivellements und Pegel in Mooren, Los 1: Höbennivellement (unveröffentlicht)*

<sup>2</sup> Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, [www.lgl-bw.de](http://www.lgl-bw.de)

## 2 Befliegung mit der Drohne

Die Befliegung selbst wurde von der Firma R2 Drone Solutions (Aalen) durchgeführt. Zum Einsatz kam ein professioneller Hexacopter des Typs XR6 (Abb. 2-1, a+b), nachfolgend kurz Drohne genannt. Das Gerät ist speziell für die hochauflösende photogrammetrische Vermessung konzipiert. Die Drohne verfügt über eine schwenkbare Kamera an der Unterseite, die Schwankungen während des Flugs verzögerungsfrei ausgleicht und dadurch lotrechte Aufnahmen erstellt. Die Steuerung der Drohne erfolgt über einen eingebauten Autopiloten mit GPS, Höhenmesser und digitalem Kompass.

Das System fliegt entlang von vorprogrammierten Linien und kann Windgeschwindigkeiten bis zu 50 km/h ausgleichen. Während des Fluges wird ein Videobild an die Steuereinheit am Boden übertragen. Die in kurzen Abständen von rund 10 Metern aufgenommenen Luftbilder werden in der Kamera gespeichert. Die maximale Flugzeit beträgt ca. 30 Minuten. Die Reichweite ist aufgrund von gesetzlichen Vorgaben auf zirka einen Kilometer begrenzt (Sichtweite), kann jedoch im Einzelfall erweitert werden.

Die Befliegung erfolgte in 80 m Höhe entlang von 14 Flugstreifen im Abstand von 50 m. Kameraaufnahmen wurden etwa alle 13 m ausgelöst. Bei der Befliegung herrschte klares, sonniges Spätsommerwetter ohne Bewölkung oder Nebel, somit waren ideale Bedingungen für gute Luftbilder gegeben. Die eigentliche Befliegung dauerte rund drei Stunden, zusätzlich zu rund drei Stunden Vor- und Nachbereitung. [Abbildung A.2-1](#) (Anhang) zeigt das Messgebiet innerhalb des gesamten Wurzacher Rieds, [Abb. A.2-2](#) (Anhang) das Ortholuftbild mit den neu aufgenommenen GPS-Vermessungspunkten.

Um das Luftbild zu georeferenzieren, wurden am Boden insgesamt fünf Markerplatten mit einem von oben gut sichtbaren Koordinatenkreuz (Abb. 2-1, c) ausgelegt und geodätisch mit GPS eingemessen. Hierfür ist ein einigermaßen ebener und freier Untergrund erforderlich, der im Hochmoorbereich gegeben ist. Mit hohem Gras bestandene Flächen sind nicht geeignet. Die Einmessung und Georeferenzierung erfolgte in UTM32-Koordinaten.



Abb. 2-1: Aufnahmen während der Befliegung. (a) Hexacopter des Typs XR6 (Drohne). (b) Das Drohnen-System im Wurzacher Ried im Einsatz. (c) Auslegung und Einmessung von Platten mit Koordinatenkreuz als Referenzpunkte für die Georeferenzierung des Luftbilds.



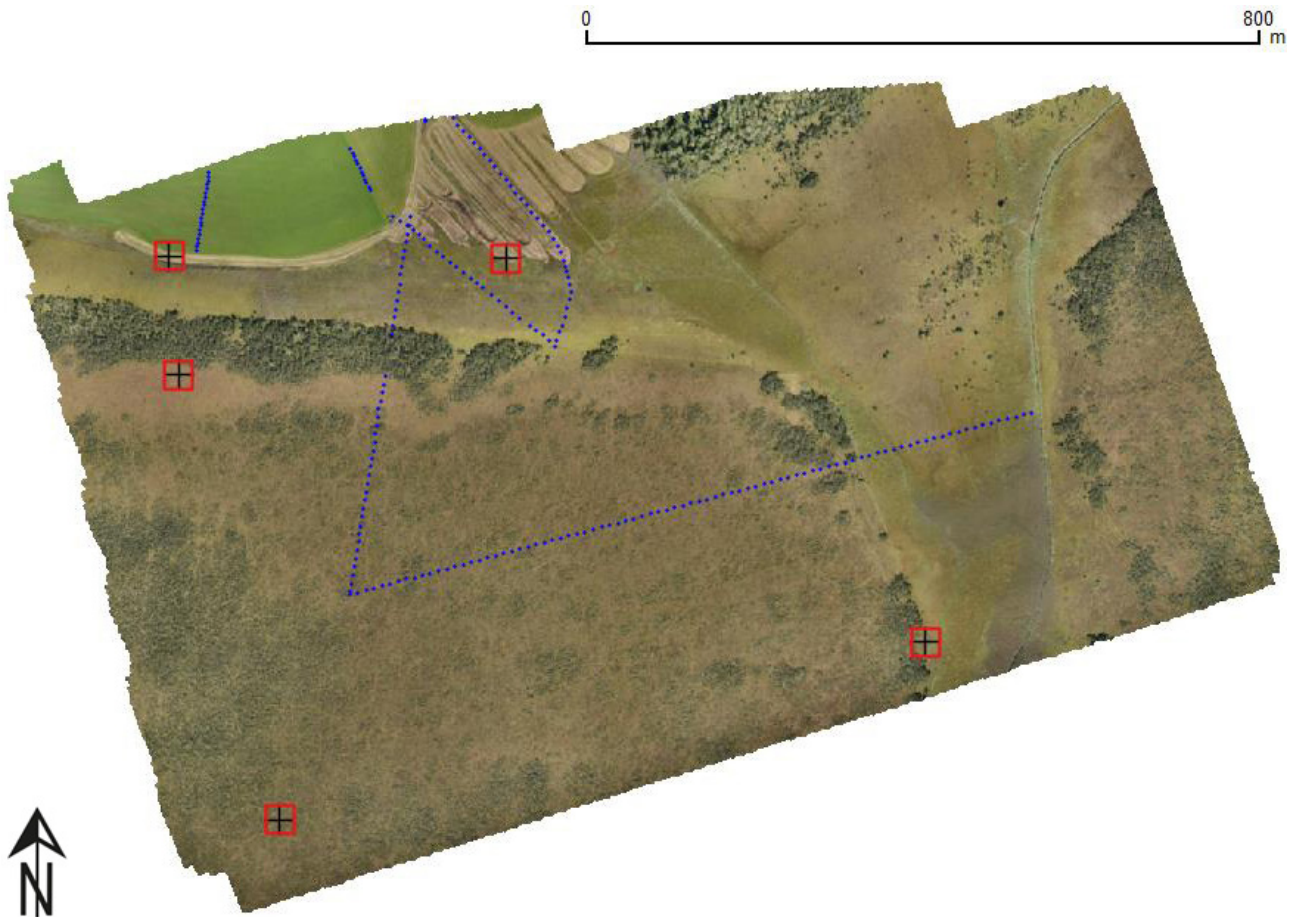


Abb. 2-2: Luftbild der Befliegung mit der Position der Markerplatten (rote Quadrate mit Kreuz) und den neuen GPS-Messpunkten (blau)

Die Platten sollen sich nach der allgemeinen Empfehlung an den Ecken des Messgebiets befinden. Aufgrund des extrem nassen und unwegsamen Geländes wurden die Platten im östlichen Teil des Messgebiets nicht ganz in Randlage positioniert. Abbildung 2-2 zeigt die Position der fünf Markerplatten sowie die neuen GPS-Messungen.

# 3 Auswertung der Daten der Drohnenbefliegung

## 3.1 Verarbeitung und Bereitstellung der Daten

Mit Hilfe der photogrammetrischen Auswertesoftware AgiSoft PhotoscanPro wurden 1175 Luftbilder zu einem Ortholuftbildmosaik zusammengesetzt, entzerrt und georeferenziert. Das Ergebnis ist ein zusammenhängendes, georeferenziertes digitales Oberflächenmodell (DOM) und ein Ortholuftbild, beides als Dateien im GeoTiff-Format.

Das Orthomosaik wurde mit 1,5 cm Auflösung ausgegeben und anschließend zusätzlich auf 10 cm Pixelaufklärung reduziert. Das Geländemodell wurde mit 10 cm pro Pixel berechnet und anschließend auf 80 cm Auflösung pro Pixel reduziert und zusätzlich tiefpassgefiltert, um das Mikrelief bedingt durch Vegetation herauszufiltern.

Tabelle 3.1-1 fasst die Objekte/Dateien aus der Luftbildbefliegung zusammen.

Tab. 3.1-1: Objekte aus der Befliegung (Tiff-Dateien mit Georeferenzierung in UTM32-Projektion)

Objekte aus der Befliegung	
Ortho_Tiles_15mm_UTM32-....tif	30 Ortholuftbilder mit 1,5 cm Pixelaufklärung
Ortho_4cm_UTM32.tif	Ortholuftbild mit 4 cm Pixelaufklärung
DOM_10cm_UTM32.tif	Digitales Oberflächenmodell in 10 cm Pixelaufklärung
Daraus abgeleitet	
DGM_Boden_10cm.tif	DGM in 10 cm Pixelaufklärung mit Baumkorrektur
DGM_Boden_80cm.tif	DGM in 80 cm Pixelaufklärung mit Baumkorrektur
DGM_Boden_80cm_lowpass.tif	DGM in 80 cm Pixelaufklärung mit Baumkorrektur, tiefpassgefiltert

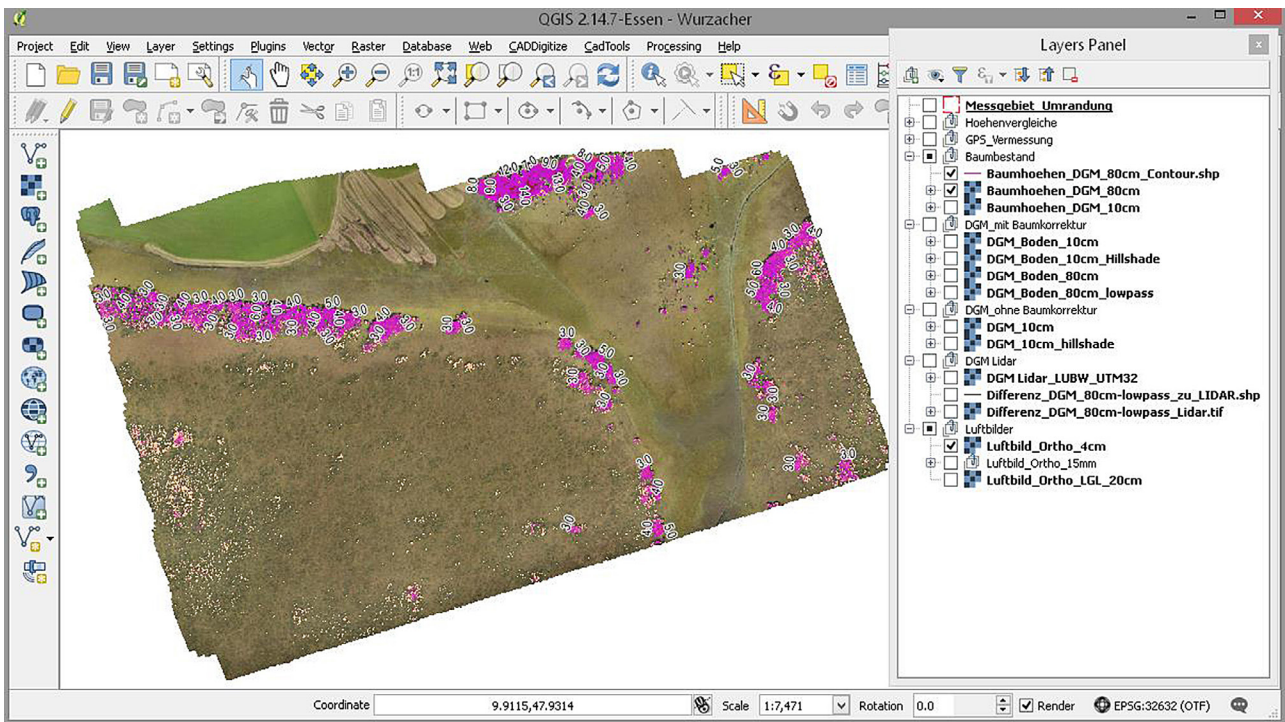


Abb. 3.1-1: Die Daten im Programm QGIS. Rechts die Layerstruktur

Die Luftbilder und DOM/DGM's sowie Shape-Dateien sind in einer Verzeichnisstruktur in entsprechend benannten Unterverzeichnissen geordnet. Zur Darstellung und Auswertung wurde das frei verfügbare und weit verbreitete Open-Source-Programm Quantum GIS<sup>3</sup> verwendet, im folgenden QGis genannt (Abb. 3.1-1). Alternativ können die Daten im Programm Surfer geladen werden. Hier ist eine dreidimensionale Darstellung möglich, der Bildaufbau jedoch vergleichsweise langsam. [Abbildung A.3.1-1](#) (Anhang) zeigt eine dreidimensionale Darstellung, erzeugt aus der Kombination von DOM und Luftbild.

Aufgrund der Größe des Gebiets bei gleichzeitig sehr hoher Auflösung sind selbst großformatige Ausdrücke, die auch die Details noch zeigen, nicht mehr sinnvoll. Die Betrachtung und Analyse der Daten kann daher nur noch in einem GIS-System erfolgen. Im Folgenden werden beispielhaft Auszüge daraus gezeigt und erläutert. Die einzelnen Objekte wie Rasterdateien und Shapedateien werden als Layer bezeichnet.

---

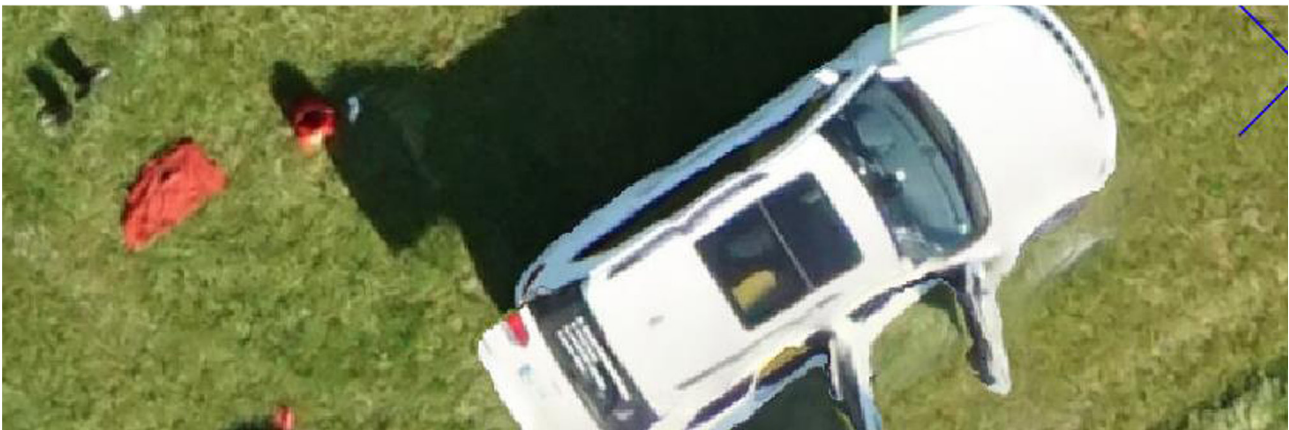
<sup>3</sup> <http://www.qgis.org> - ca. 300 MByte plus zusätzlich erforderlicher Plugins

### 3.2 Qualität der Luftbilder

Abbildung 3.2-1 zeigt Beispiele der verschiedenen Luftbilder und vergleicht ihre Qualität. Das Luftbild des LGL<sup>4</sup> mit 20 cm Bodenauflösung (b) ist dabei von geringerer Qualität. Während der Befliegung kam Wind bis ca. 10 m/s auf. Wenn dieser das hohe Gras und die Baumwipfel zwischen einzelnen Bildaufnahmen bewegt, entstehen an diesen Stellen verschwommene Pixel-/Raster-Strukturen im Luftbild (in Abb. 3.2-1 nicht dargestellt). Das Drohnen-Bild mit 1,5 cm Bodenauflösung (e), aufgenommen aus 80 m Flughöhe, hat

insgesamt eine überragende Auflösung, die den Entwicklungsstand von Vegetation detailliert erkennen lässt, beispielsweise für den Vergleich mit künftigen Luftbildern.

Vergleichende GPS-Messungen an einem Hochstand am Nordrand (nicht dargestellt) sowie der Vergleich mit den Lidar-Daten und Luftbildern des LGL lassen keine horizontalen Verschiebungen erkennen. Das Luftbild sollte lateral auf mindestens  $\pm 0,5$  m genau positioniert sein, wahrscheinlich sogar besser.



(a) Luftbild der Drohne: 1,5 cm Bodenauflösung



(b) Luftbild des LGL<sup>4</sup>: 20 cm Bodenauflösung - Bildbreite: ca. 40 m



(c) Luftbild der Drohne: 4 cm Bodenauflösung - gleicher Ausschnitt



(d) Luftbild der Drohne: 4 cm Bodenauflösung über Teich - Bildbreite: ca. 6 m



(e) Luftbild der Drohne: 1,5 cm Bodenauflösung - gleicher Ausschnitt

Abb. 3.2-1: Vergleich von Luftbildern

<sup>4</sup> Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg

### 3.3 Digitales Oberflächenmodell

Im digitalen Oberflächenmodell (DOM\_10cm) sind alle visuell geschlossenen Erhebungen, hier insbesondere die Baumkronen und dichtes Gras, als Oberfläche enthalten. Entscheidend für die Höhenbestimmung ist die Sicht auf den Boden. Sieht die Kamera bis zur Geländeoberfläche durch, z.B. auf Asphalt oder kurz gemähter Wiese, entspricht die resultierende Höhe dieser Oberfläche. Verdecken dichtes Gras oder undurchsichtige Baumkronen die Sicht, wird die Höhe dieser Objekte bestimmt. Abbildung 3.3-1 zeigt Luftbild und DOM\_10cm im Bereich eines Wäldchens am Nordrand des Hochmoors.

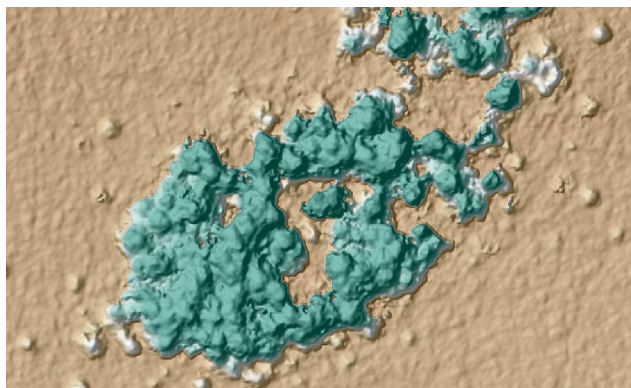


Abb. 3.3-1: Oben: Luftbild der Drohne mit 1,5 cm Bodenauflösung. Unten: DOM\_10cm der Drohne. Farbliche Darstellung des DOM transparent über Hillshade-Hintergrund.

Zur weiteren Verarbeitung wird die Oberflächenstruktur als dreidimensionale Punktwolke erfasst und analysiert. Objekte, die in einem Winkel von mehr als 45° von der Oberfläche abstehen, werden ab z.B. 100 cm Höhe als Vegetation klassifiziert, der Rest als Bodenpunkte. Über ein mehrstufiges System erhält man auf diese Weise unterschiedliche Punktklassen. Bei der Erstellung des DOM\_10cm zur Entzerrung des Ortholuftbildes wurden alle Klassen benutzt, damit auch die Bäume im Luftbild entzerrt werden. Für die

Boden-DGM's wurden nur die Bodenpunkte benutzt und dazwischen, wo die Lücken sind, interpoliert. Dadurch entstehen an Stelle der Bäume glatte Flächen. Im folgenden Text wird dies als Baumkorrektur bezeichnet.

Abbildung 3.3-2 zeigt den Effekt der Baumkorrektur. Die mindestens ca. 1 m hohen Bäume sind vollständig verschwunden zugunsten von glatten Flächen, auf denen die Umgebungshöhe näherungsweise gegeben ist. Nicht entfernt wird das Feld mit dichtem, hohem Gras.

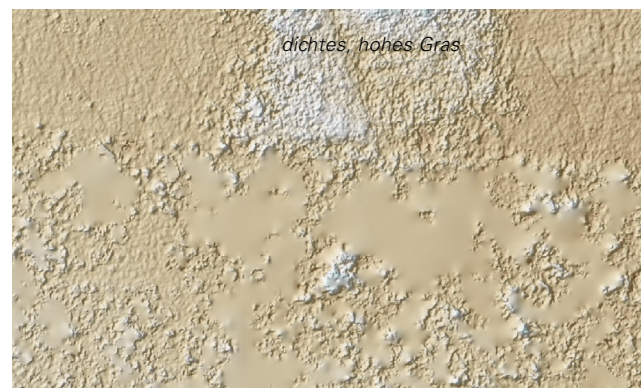
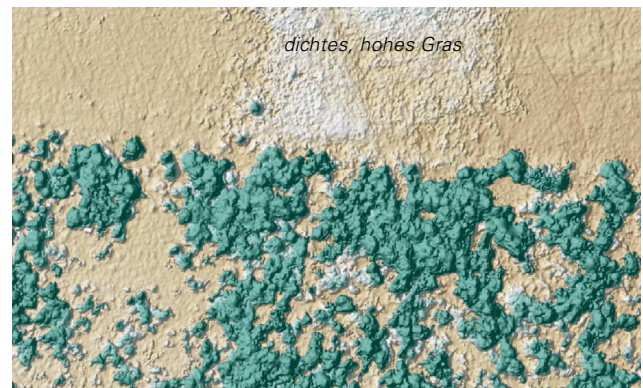


Abb. 3.3-2: Effekt der Baumkorrektur. Oben: Oberflächenmodell DOM\_10cm der Drohne am Nordrand des Hochmoors. Unten: DGM\_10cm nach Baumkorrektur. Nicht entfernt werden Bereiche mit dichtem, hohem Gras.

Bei niedrigeren Büschen und Baumgruppen funktioniert dieses Korrekturverfahren nicht mehr vollständig (Abb. 3.3-3). Durch die Baumkorrektur werden sie in einigen Bereichen nur teilweise oder gar nicht entfernt, außerdem bleiben Erhebungen bestehen (Profilschnitt in Abb. 3.3-3). Die Mooroberfläche wird nicht korrekt wiedergegeben.

Die Abbildungen 3.3-4 und 3.3-5 verdeutlichen, wie sich der Bestand mit dichtem, hohem Gras und Schilf bei der Erfassung der Oberfläche auswirkt. Es zeigt sich

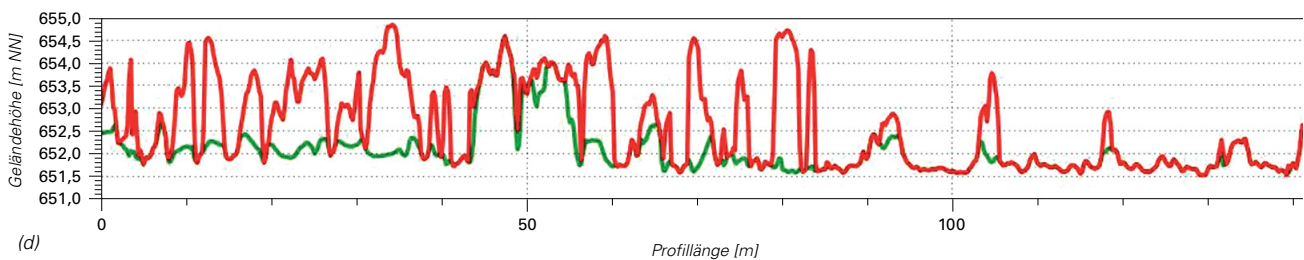
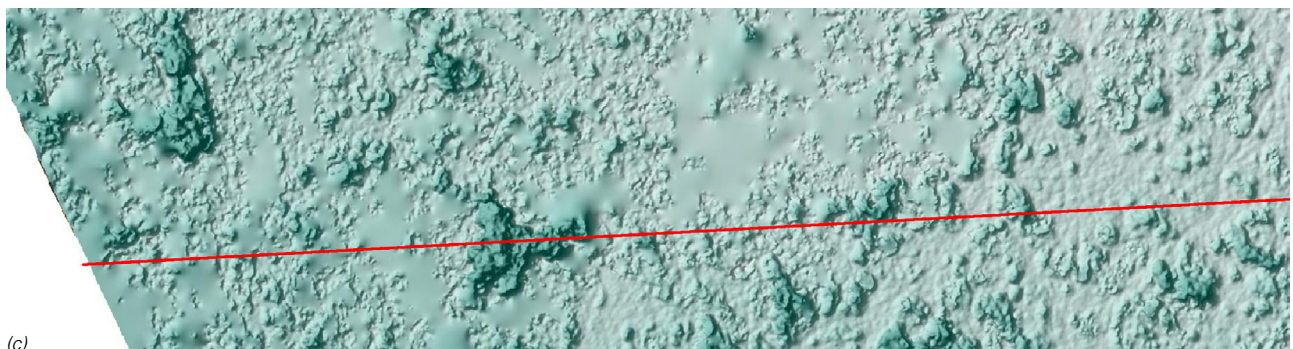
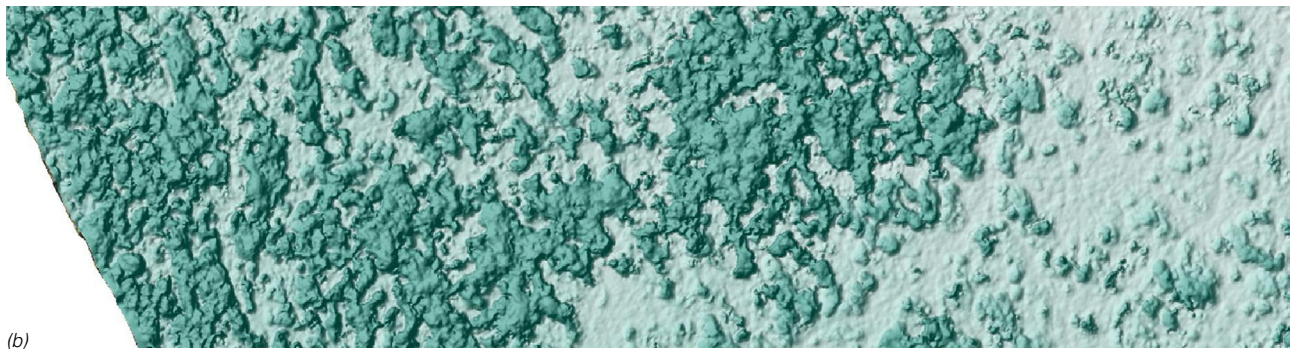


Abb. 3.3-3: (a) Luftbild der Drohne, (b) DOM\_10cm und (c) DGM\_10cm am Westrand des Hochmoors, wo zunehmender Kiefernbewuchs einsetzt. Einzelne höhere Bereiche/Büsche bleiben erhalten, außerdem niedrigerer Buschbewuchs. (d) Profilschnitt entlang der roten Linie. Rote Linie: DOM\_10cm ohne Baumkorrektur; Grüne Linie: DGM\_10cm mit Baumkorrektur. Die Mooroberfläche wird nur unzureichend wiedergegeben.

ein Höhengsprung beim Gras von ca. 0,5 m und beim Schilf von ca. 1 m. Da Teile des Moors dicht mit hohem Gras überwachsen waren, sind an diesen Stellen größere Abweichungen zu der tatsächlichen Geländehöhe zu erwarten. Der Vergleich der DGM's mit 10 cm und 80 cm Auflösung ergab, dass letzteres die Geländehöhe zutreffender wiedergibt. Mittels Tiefpassfilterung können weiterhin noch einzelne kleinräumige Erhebungen von Büschen geglättet werden, was aber oftmals dennoch nicht zu einer vollständigen Entfernung der Büsche führt.

Insgesamt ist festzustellen, dass nur im offenen Hochmoorbereich gute Sicht auf die Geländeoberfläche herrscht, so dass eine Höhenbestimmung der organischen Geländeoberfläche möglich wird. Mit Schilf, dichtem Gras und niedrigen Büschen bewachsene Flächen erlauben keine zuverlässige Bestimmung. Eine Befliegung in Mooren sollte daher vorteilhafterweise im Frühjahr nach der Schneeschmelze erfolgen, wenn das Gras noch nicht gewachsen ist oder durch die kürzliche Schneeaufgabe noch auf dem Boden liegt.

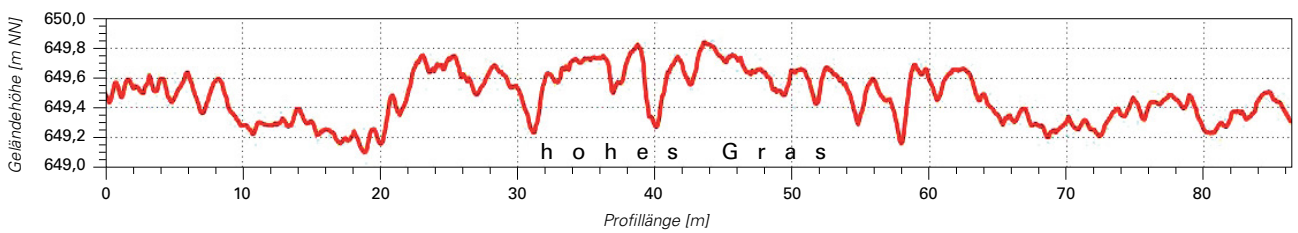


Abb. 3.3-4: Profilschnitt vom Hochmoorbereich in einem dicht mit Binsengras bewachsenen Bereich. Das DGM\_10cm dürfte überwiegend die Grashöhe wiedergeben, die Geländeoberfläche wird nur vereinzelt erreicht.

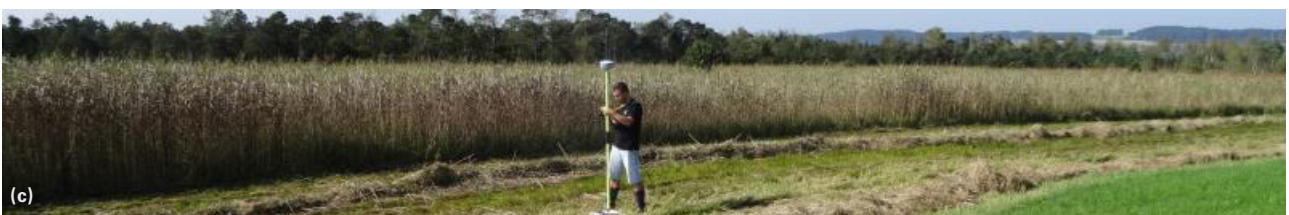
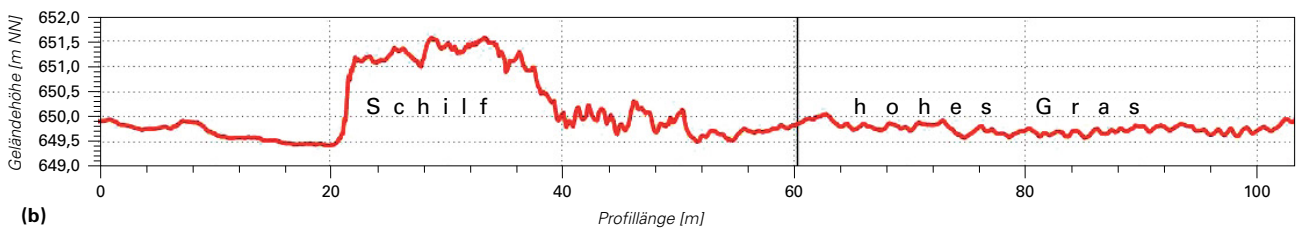


Abb. 3.3-5: (a) Planansicht. (b) Profilschnitt von der Wiese am Nordrand durch den rund 2 m hohen Schilfgürtel. Das DGM\_10cm gibt die Schilfhöhe wieder. (c) Vor dem ca. 2 m hohen Schilffeld.

### 3.4 Baumhöhen

Durch Differenzbildung von DOM und DGM lassen sich die Baumhöhen bestimmen. Ein eventueller systematischer Fehler in der absoluten Geländehöhe kann durch die Differenzbildung nicht mehr auftreten.

In der QGIS-Datei wurde die Karte der Baumhöhen als GeoTiff und als Höhenlinienplan<sup>5</sup> ein-

gearbeitet (siehe entsprechend benannte Layer). Abbildung 3.4-1 zeigt einen Ausschnitt daraus. Auf diese Weise ist eine detaillierte Zustandserfassung des Baumbestandes möglich, um in Zukunft Veränderungen erkennen zu können. Es wird angenommen, dass die Baumhöhe auf  $\pm 10$  bis 20 cm genau zu bestimmen ist.

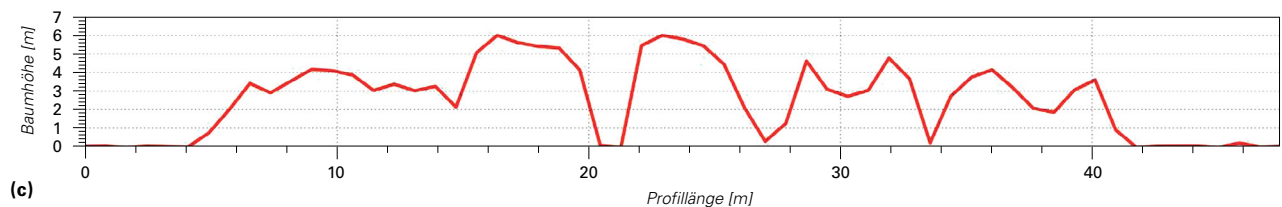
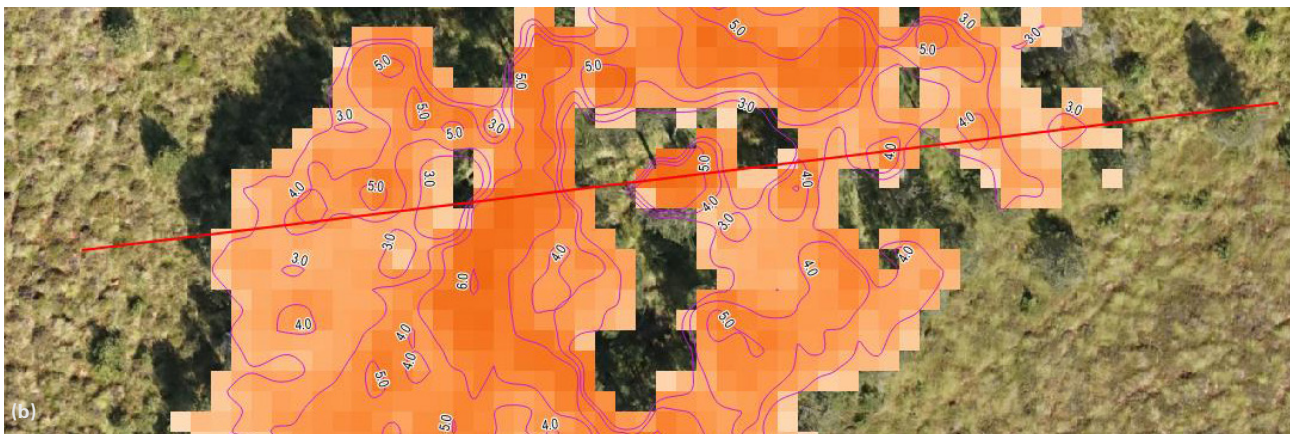
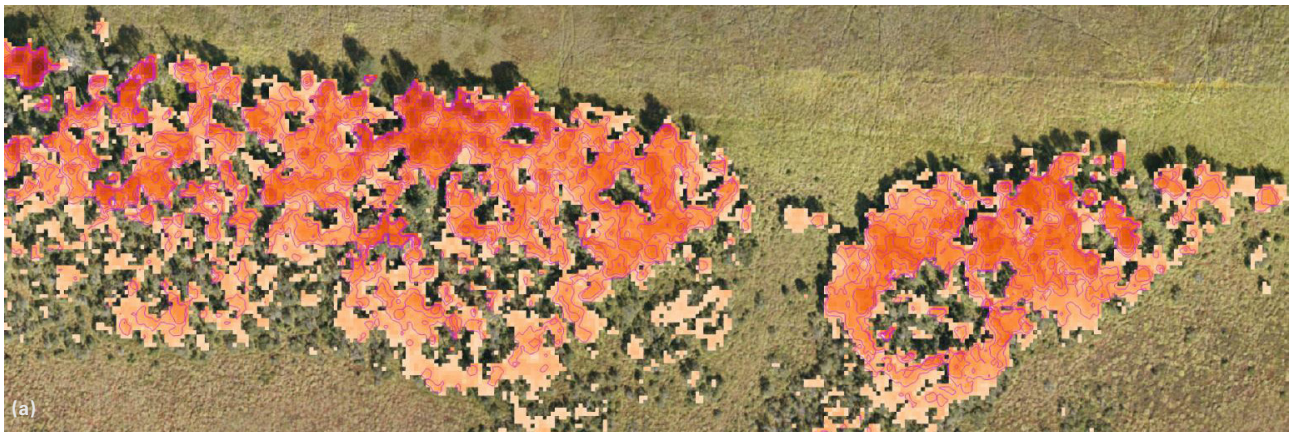


Abb. 3.4-1: (a)+(b) Darstellung der Baumhöhen als GeoTiff (Wertebereich bis 1 m durchsichtig) kombiniert mit Höhenlinienplan ab 3 m Höhe. (c) Profilschnitt quer durch Baumbestand.

<sup>5</sup> Isolienpläne werden vorteilhafterweise im Programm Surfer erstellt, als Shape-Datei ohne Linienlabel exportiert und dann im QGIS mit Höhen-Label versehen. QGIS hat nur rudimentäre Interpolations- und Isolienoptionen.



# 4 Vergleich der Höhen aus Drohnen-, GPS- und Lidar-Daten

Um die per Drohnen-Flug ermittelte Geländehöhe prüfen und vergleichen zu können, wurden separat GPS-Messungen entlang von Profilen durchgeführt (Abb. A.4.1-1 im Anhang). In diesem Rahmen wurde auch untersucht, ob sich Veränderungen ergeben im Vergleich zu den GPS-Messungen im Jahr 2014. Verwendet wurde hierzu ein geodätisches Trimble R4 mit Sofortkorrektur über SAPOS. Die Genauigkeit wird mit 2-3 cm in Lage und Höhe angegeben.

## 4.1 Geländehöhenvergleich der GPS-Messungen von 2014 und 2016

Vermessungspunkte von zwei Profilausschnitten durch das Hochmoor in der vorangegangenen Untersuchung im Jahr 2014 wurden nun möglichst punktgenau nachgemessen. Abbildung A.4.1-1 (Anhang) stellt die insgesamt 187 Punkte mit Höhenangabe auf dem Plan dar und vergleicht sie im Profilschnitt. Abbildung 4.1-1 zeigt daraus auszugsweise das Profil 1.

Aufgrund von Vegetation und des unruhigen Geländes konnte nicht immer genau der gleiche Punkt getroffen werden, so dass leichte Streuungen bestehen, dennoch ergibt sich ein klarer Trend. Die neuen Geländehöhen vom 13.09.2016 (rote Punkte) liegen im Mittel 7,5 cm niedriger als die am 26.06.2014 (schwarze Punkte) erfassten Geländehöhen. Die Messfehlertoleranz liegt laut SAPOS bei  $\pm 3$  cm.

Möglicherweise handelt es sich hier um einen Effekt des trockenen Sommers 2016 mit einem niedrigen Wasserstand im Projektbereich (sog. Mooratmung). Die aufgezeichneten Wasserstände im benachbarten Pegel Wurzach Nord ca. 1 km im Westen geben hierzu allerdings keinen Hinweis (Wurzach Nord: 26.06.14: 652,14 m vs. 652,22 m am 13.09.16).

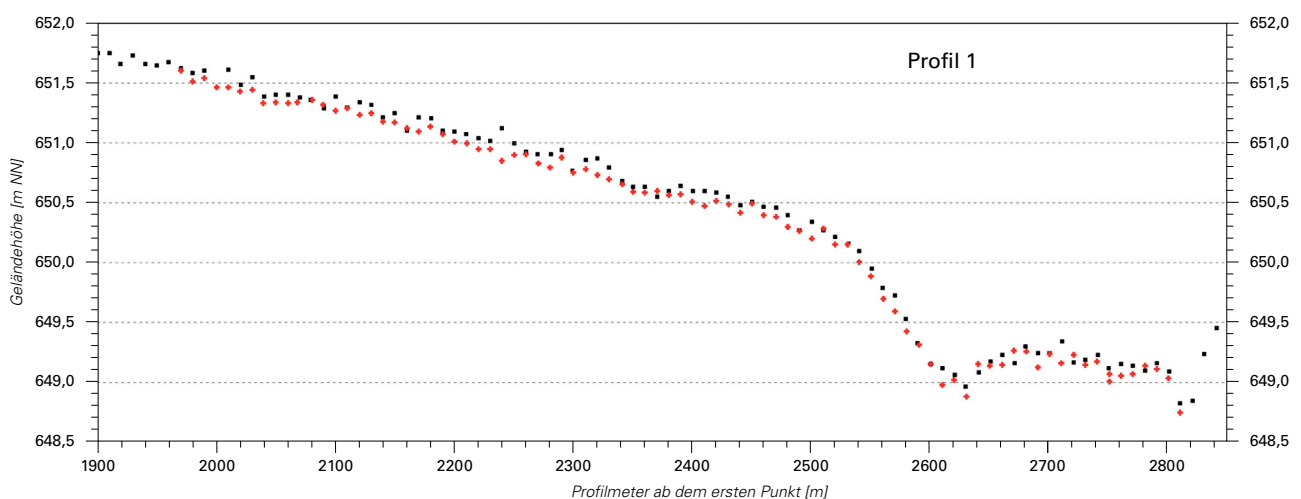
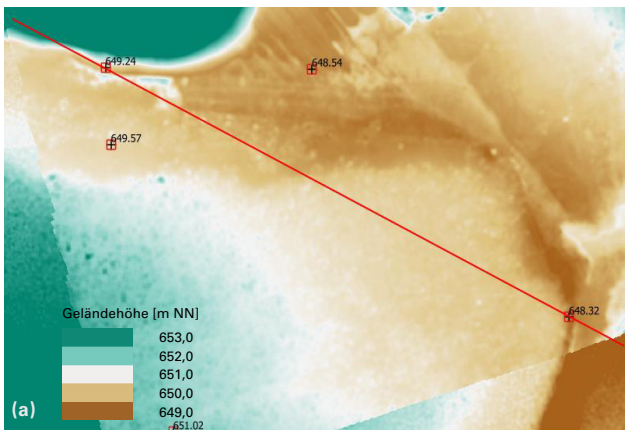


Abb. 4.1-1: Mit GPS nachgemessenes Profil 1. Schwarze Punkte: Messung 26.06.2014, rote Punkte: Messung 13.09.2016. Die neu vermessenen Punkte liegen im Mittel 7,5 cm tiefer.

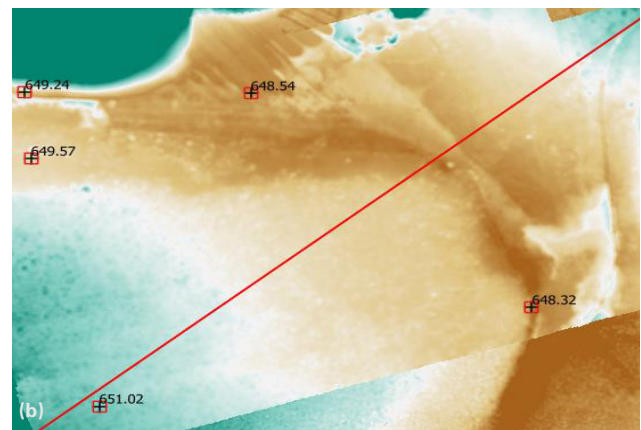
## 4.2 Übersicht Drohne- und Lidar-Daten

Zuerst werden die Höhen aus Lidar- und Drohnen-Vermessung verglichen. Das Lidar-DGM stammt von einer Befliegung am 3.10.2002. Es hat eine Bodenauflösung von 1 m<sup>2</sup>. Beim Import ins QGIS musste es von Gauß-Krüger auf UTM32 umprojiziert werden<sup>6</sup>. Die Höhengenaugigkeit des Lidar wird allgemein mit ± 15 bis 30 cm beziffert. Abbildung 4.2-1 zeigt zwei Profilschnitte quer durch das Gebiet.

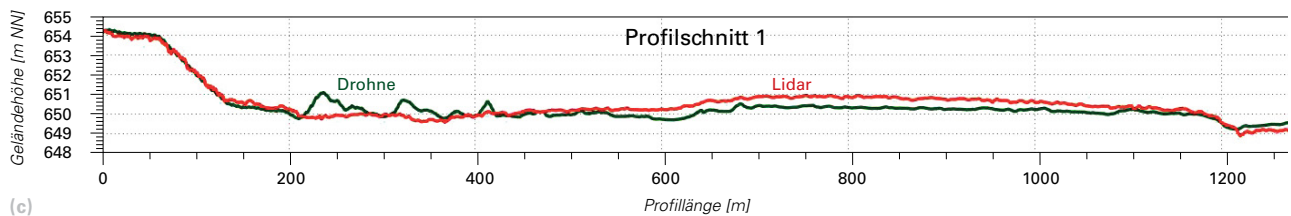
Im oberen Profilschnitt 1 verlaufen die ermittelten Höhen ähnlich. Ganz links im mineralischen Boden bis ca. 100 m Profilstrecke liegen beide Kurven noch aufeinander. Bei etwa 125 m beginnt das Moor. Die dann folgenden Ausschläge der grünen Drohnen-Kurve nach oben sind durch Felder aus Schilf und hohem Gras bedingt, während das Lidar die Vegetation durchdringt. Im Hochmoor ab ca. 550 m (Profillänge) beginnen dann beide Kurven leicht auseinander zu laufen, wobei die mit Drohne ermittelte Höhe ca. 30 cm tiefer liegt.



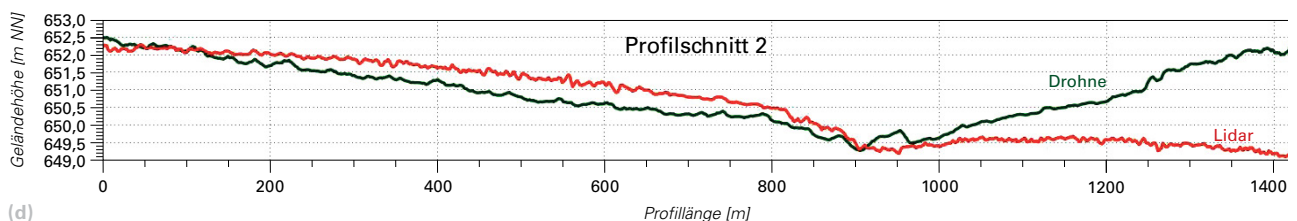
Profilschnitt 1



Profilschnitt 2



(c)



(d)

Abb. 4.2-1: Zwei Profilschnitte quer über das Messfeld, oben mit Verlauf auf dem DGM\_80cm der Drohne. Die Markerplatten sind eingezeichnet (a, b). In den Geländehöhendiagrammen (c, d) gibt die grüne Linie die Geländehöhe aus DGM\_Drohne 80cm lowpass, die rote Linie die Geländehöhe aus Lidar-DGM wieder. Die Höhenachsen sind unterschiedlich skaliert. Die mit Drohne ermittelte Höhe weicht innerhalb des Markerpolygons um bis zu 50 cm nach unten ab, außerhalb davon bis zu 3 m nach oben (d).

<sup>6</sup> Bei der einfachen Umprojektion im QGIS wird keine Transformationssoftware verwendet, welche die zentimetergenaue Position im DHDN-System sicherstellt. Ohne die Transformationssoftware kommt es zu Abweichungen von bis zu einem Meter in der Lage.

Beim Marker im Südosten laufen die Kurven wieder zusammen. Im unteren Profilschnitt 2 beträgt die Abweichung der per Drohne ermittelten Höhe bis zu 0,5 m nach unten. Sobald das Profil das Markerpolygon nach Nordosten verlässt, steigt die per Drohne ermittelte Höhe stark an und liegt am Ende mehr als 3 m über der Lidar-Geländehöhe.

Es wird angenommen, dass die Lidar-Daten innerhalb der angegebenen Genauigkeit zutreffen. Hierfür sprechen die übereinstimmenden Höhen an den Markerpunkten. Die Höhe aus der Drohnen-Vermessung ist somit starken Abweichungen unterworfen. Sie trifft nur in der Nähe der Markerpunkte zu. Insbesondere außerhalb des Markerpolygons kann sie meterweit abweichen. Im folgenden Abschnitt werden die verfügbaren Höhendaten detaillierter verglichen.

### 4.3 Detailvergleich Drohne-, Lidar- und GPS-Daten

Die Lidar-Daten sind am 3.10.2002 aufgenommen worden. Es handelt sich um sogenannte Last-Pulse-Daten, die den Baum- und Grasbewuchs durchdringen und die Erdoberfläche wiedergeben. Hierbei stellt sich die grundsätzliche Frage, welche Geländehöhe das Lidar auf Moorböden erfasst, bei denen Lagerungsdichte, Wasserstand und Bewuchs stark schwanken können. Wird der Laserstrahl schon von der visuellen Oberfläche reflektiert oder dringt er einige Zentimeter in den Torf ein, bis er auf Nässe trifft und von dort reflektiert wird? Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Beim Vergleich ist weiterhin zu beachten, dass das Lidar-DGM eine Bodenabbildung von einem Quadratmeter besitzt, während die GPS-Geländehöhe punktuell auf einer Fläche von ca. 1 cm<sup>2</sup> gemessen wird. Auch ist zu beachten, dass das Lidar-Bild durch die Umprojektion ins UTM32-System einen lateralen Positionierungsfehler von bis zu einem Meter erfahren haben könnte. Im Hangbereich können dadurch Höhenunterschiede zu GPS-Messungen entstehen.

[Abbildung A.4.3-1](#) (Anhang) enthält drei Profilschnitte mit den Höhenkurven aus Lidar-, Drohne- und GPS-Daten. Es ist festzustellen, dass Lidar- und GPS-Geländehöhen auf dem mineralischen Boden, zum Zeitpunkt der Befliegung eine kurz gemähte Wiese, gut übereinstimmen (Profil 2, mineralischer Boden ab ca. 470 m Profillänge). Die Lidar-Geländehöhe liegt im Schnitt ca. 3-5 cm über der vom GPS ermittelten Geländehöhe bei einer Anzahl von 12 Messpunkten.

Diese Übereinstimmung ist auch an den weiteren Messpunkten auf mineralischem Boden im Nordwesten (siehe blaue Punkte im Luftbild auf [Abb. A.4.3-1](#) im Anhang) der Fall, wobei das Lidar hier mit 3 bis maximal 10 cm etwas weiter über der GPS-Geländehöhe liegt. Nach diesem bisherigen Befund passen Lidar- und GPS-Geländehöhen auf mineralischem Boden gut zusammen, die bisher festzustellenden Abweichungen liegen sogar weit unterhalb des angegebenen Fehlerbereichs in der Höhe von  $\pm 15$  bis 30 cm.

Die per Drohnen-Flug ermittelte Geländehöhe verläuft im Hochmoorbereich überwiegend tiefer als die von Lidar und GPS, abgesehen von einzelnen Spitzen verursacht durch Büsche und dichtem Gras. Außerhalb des Markerpolygons weicht sie stark nach oben ab (in Profil 1 ab 700 m, in Profil 2 ab 450 m im mineralischen Boden).

Die per Drohnen-Flug ermittelte Geländehöhe scheidet somit für genauere Vergleiche aus, mithin reduziert sich der weitere Vergleich auf GPS und Lidar. Im Moorbereich verläuft die Höhenkurve des Lidar fast durchweg über der GPS-Messung, im Hochmoorbereich im Schnitt ca. 20 cm über den GPS-Daten vom September 2016 (d.h. ca. 12 cm über den GPS-Daten vom Juni 2014). Der Unterschied bewegt sich innerhalb des Bereichs der Lidar-Höhengenauigkeit von  $\pm 15 - 30$  cm und erscheint zunächst nicht signifikant. Die Daten von GPS und Lidar auf mineralischem Boden stimmen jedoch innerhalb von rund 5 cm überein. Schwankungen von Punkt zu Punkt treten im Lidar ebenfalls nicht auf. Es ist damit wahrscheinlich, dass die aufgenommenen Lidar-Daten relativ gut zutreffen und für den Vergleich herangezogen werden können.

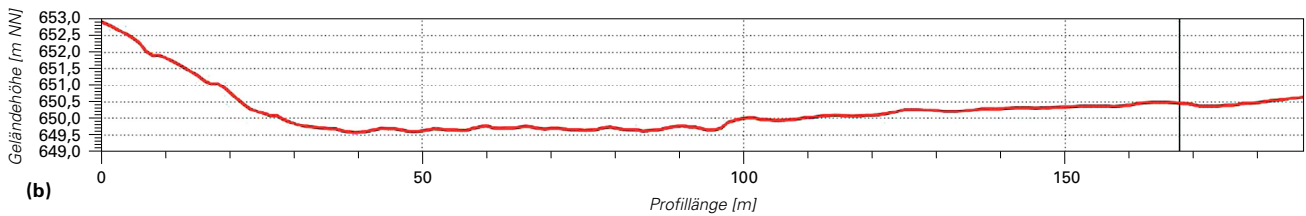
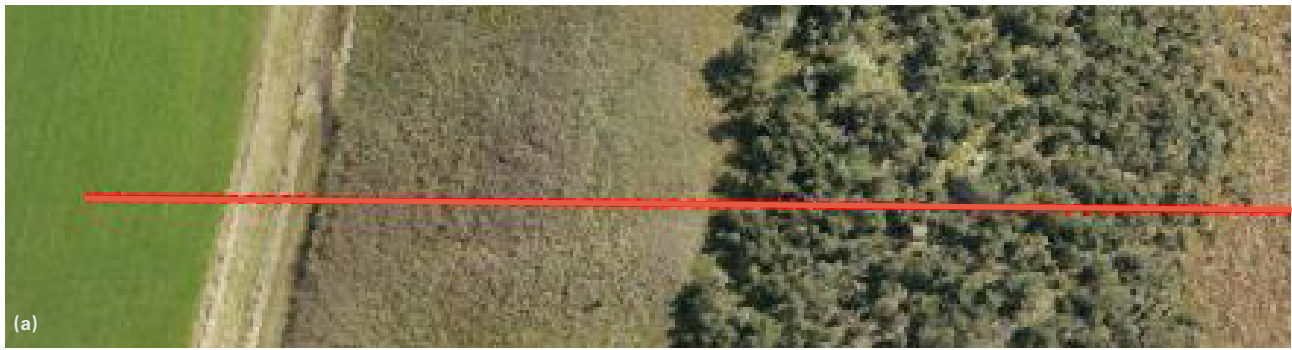


Abb. 4.3-1: (a) Lidar durchdringt dichte Schilf- und Grasfelder bis zum Boden. (b) Profilschnitt mit Lidar-Höhe durch das Schilffeld am Nordrand des Moors (Luftbild 80° nach links gedreht). Links bis ca. 20 m Profillänge mineralischer Boden, 35 - 60 m Schilf, dann dichtes Gras bis zum Wald, ab 170 m Profillänge Hochmoor.

In Profil 3 ist die Differenz von GPS- zu Lidar-Daten mit ca. 50 cm bedeutend größer und deutlich außerhalb der Fehlertoleranz des Lidar. Der Profilabschnitt von 0 bis ca. 200 m unterliegt landwirtschaftlicher Nutzung, ab 200 m bis Profillänge 300 m jedoch nicht mehr. Auswirkungen der Landbewirtschaftung als Ursache der beobachteten Absenkung sind damit unwahrscheinlich. Ein sehr dichter Grasbewuchs zur Zeit der Lidar-Messung ist als Grund der beobachteten Differenzen ebenfalls nicht anzunehmen.

Wie Abb. 4.3-1 belegt, zeigt die Lidar-Geländehöhe bei Schilffeldern und starkem Grasbewuchs keinerlei Erhebungen, so dass diese Art von Vegetation bis zum Boden durchdrungen wird und davon auch im bewachsenen Hochmoor auszugehen ist. Als weitere Ursache käme noch ein möglicherweise ungewöhnlich hoher Wasserstand im Oktober 2002 in Betracht, da im August 2002 eine Hochwasserkatastrophe in Deutschland stattgefunden hat. Die tiefer gelegenen Randbereiche könnten stärker aufgeschwemmt worden sein als das Hochmoor selbst.

## 5 Fazit

- Am Nordrand des Wurzacher Rieds wurde eine Drohnenbefliegung auf einer Fläche von rund 100 Hektar durchgeführt, um hochaufgelöste Luftbilder und eine flächenhafte Höhenvermessung zu erhalten. Ziel war zu klären, ob das Verfahren Moorflächen genau genug erfassen kann, um künftige Veränderungen insbesondere der Geländehöhe erkennen zu können. Zu Vergleichszwecken fanden im Jahr 2016 GPS-Messungen statt, außerdem lagen Lidar-Daten aus dem Jahr 2002 vor und GPS-Messungen aus dem Jahr 2014.
- Die Drohnen-Vermessung kann in der Standardausführung mehr als 100 Hektar Fläche pro Tag erfassen. Die Luftbilder, aufgenommen aus 80 m Flughöhe, sind mit 1,5 cm Abbildungsgröße am Boden sehr hochauflösend und dokumentieren den Zustand der Vegetation detailliert. Hinweise auf größere Fehler in der horizontalen Positionierung der Luftbilder gibt es nicht.
- Die Höhenbestimmung der Geländeoberfläche mit einer Drohne nach heutigem Stand der Technik ist nur in offenen Hochmoorbereichen möglich. Schon auf etwas dichter bewachsenen Flächen (Gras, Schilf, Büsche), auf denen von oben keine Sicht zum Boden herrscht, wird zumindest teilweise die Bewuchsoberfläche erfasst.
- Der Vergleich der per Drohnen-Flug ermittelten Höhe mit GPS- und Lidar-Messungen ergibt, dass die absolute Höhenerfassung mit der Drohne im Moorbereich eine Genauigkeit von nur rund  $\pm 1$  m erreicht. An den geodätisch eingemessenen Referenzmarkern ist die Höhe noch stimmig, dazwischen kommt es mit zunehmendem Abstand vom Marker zu einer Drift bis zu minus 0,7 m, außerhalb des Polygons der Referenzmarker bis zu mehreren Metern. Möglich ist hingegen die Bestimmung von Baumhöhen auf ca.  $\pm 0,2$  m Genauigkeit.
- Die Drohnen-Vermessung in der derzeitigen Standardausführung liefert hochauflösende Luftbilder und kann Baumhöhen in guter Genauigkeit feststellen. Zur Erfassung der Geländehöhe im Hochmoor auf besser als  $\pm 10$  cm war sie in dieser Form, mit Markerplatten nur am Rand eines Messgebiets, nicht geeignet. Mit einem flächigen Netz aus Markerplatten ließe sich die Höhenerfassung im Hochmoor wahrscheinlich verbessern, auch mit einer Reduzierung der Flughöhe auf z.B. 50 m. Für eine Geländehöhenerfassung von besser als  $\pm 10$  cm erscheint ein Raster aus Markerplatten im Abstand von 200 m x 200 m erforderlich, unter Umständen sogar noch enger. Die geodätische Vermessung mit GPS ist in Mooren aber nach wie vor das sicherste und vertrauenswürdigste Mittel. Auf mit Gras, Schilf, Büschen und Bäumen verwachsenen Flächen ist sie die einzige Möglichkeit für präzise Messungen.
- Im Messgebiet am Nordrand des Wurzacher Rieds stimmen GPS- und Lidar-Daten auf mineralischem Boden überraschend gut überein. Auf der Moorfläche selbst treten Differenzen zu Tage. Die Lidar-Geländehöhen liegen meist ca. 20 cm, teilweise bis zu 50 cm über den GPS-Geländehöhen.
- Weiterhin zeigen die Wiederholungsmessungen mit GPS eine um ca. 7,5 cm niedrigere Mooroberfläche von Juni 2014 zu September 2016. Dass eine Sackung der Mooroberfläche stattgefunden hat, liegt im Bereich des Möglichen, lässt sich aber anhand der vorhandenen Daten nicht abschließend bestätigen. Eine weitere denkbare Ursache der Höhendifferenzen könnte auch die Mooratmung sein.

# 6 Glossar

## ■ DGM

Digitales Gelände-Modell: Erdoberfläche ohne Bebauung, Bewuchs, etc.; i.d.R. eine georeferenzierte Rasterdatei (Tiff oder vergleichbar).

## ■ DOM

Digitales Oberflächen-Modell: Erdoberfläche samt allen darauf befindlichen Objekten wie Bebauung, Bewuchs, Gewässer; i.d.R. eine georeferenzierte Rasterdatei.

## ■ DHDN

Deutsches Hauptdreiecks-Netz ist das übergeordnete Triangulationsnetz der Bundesrepublik Deutschland, auf dem die Gebrauchskordinaten der Landesvermessung in den alten Bundesländern beruhen. Wird überführt werden in das UTM32-System.

## ■ GeoTiff-Datei

Dateiformat zur Speicherung von georeferenzierten Bilddaten. Die Datei (oder eine Begleitdatei gleichen Namens) enthält die Georeferenz sowie spezifische Angaben über das Koordinatenreferenzsystem.

## ■ GIS

Geographisches Informations-System; Software-Familie zur Verarbeitung von raumbezogenen Raster- und Vektor-Daten.

## ■ GNSS

Global Navigation Satellite System. Allgemeine Bezeichnung für Satellitenpositionierungssysteme (GPS, Glonass, etc.).

## ■ GPS

Global Positioning System; verwendet hier als Überbegriff für alle Satellitenpositionierungsdienste.

## ■ Golden Software Graph

Weit verbreitete Software zur Darstellung von Profildaten ([www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com)).

## ■ Golden Software Surfer

Weit verbreitete Software zur Darstellung von Flächen-daten ([www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com))

## ■ Hillshade

Graustufen-3D-Darstellung der Oberfläche mit Schum-merung durch Beleuchtungseffekt. I.d.R. eine separate GeoTiff-Datei.

## ■ Lidar

Abkürzung für engl. Light Detection and Ranging. Lidar ist eine dem Radar verwandte Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung. Statt der Radiowellen beim Radar werden Laserstrah-len verwendet.

## ■ Ortholuftbild

Entzerrtes Luftbild mit lotrechter Blickrichtung.

## ■ Photogrammetrie

Verfahren der Fernerkundung, um aus Fotografien und genauen Messbildern eines Objektes seine räumliche Lage oder dreidimensionale Form zu bestimmen.

## ■ QGIS

Open-Source-Geographisches-Informationssystem.

Internetadresse: [www.qgis.org](http://www.qgis.org)

## ■ Rasterdatei, Rasterdaten

Rasterdaten sind neben Vektordaten raumbezogene computerlesbare Daten (Geodaten) mit bildhaftem Informationsgehalt, meist eine georeferenzierte Tiff-Datei.

## ■ RTK-Korrektur

Real Time (Echtzeit) Korrektur von satellitengestütz-ten Vermessungsdaten.

## ■ SAPOS

Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landes-vermessung; dient der sofortigen, sog. Echtzeit-Korrektur von GPS-Daten bereits bei der Messung.

Internetadresse: [www.sapos.de](http://www.sapos.de)

## ■ UTM

Globales Koordinatensystem basierend auf der transversalen Mercator-Projektion. UTM Zone 32N (= UTM32) ist das neue, für Deutschland gültige Pro-jektionssystem, welches das bisherige DHDN (Gauß-Krüger-Koordinaten) ablösen soll. Die zentimeter-genaue Überführung von Gauß-Krüger zu UTM erfor-dert Transformationssoftware mit Passpunkten.



# Anhang



Abb. A.2-1: Übersicht Messgebiet Wurzacher Ried. Rote Umrandung mit Drohne aufgenommenes Gebiet.





Luftbild: LGL





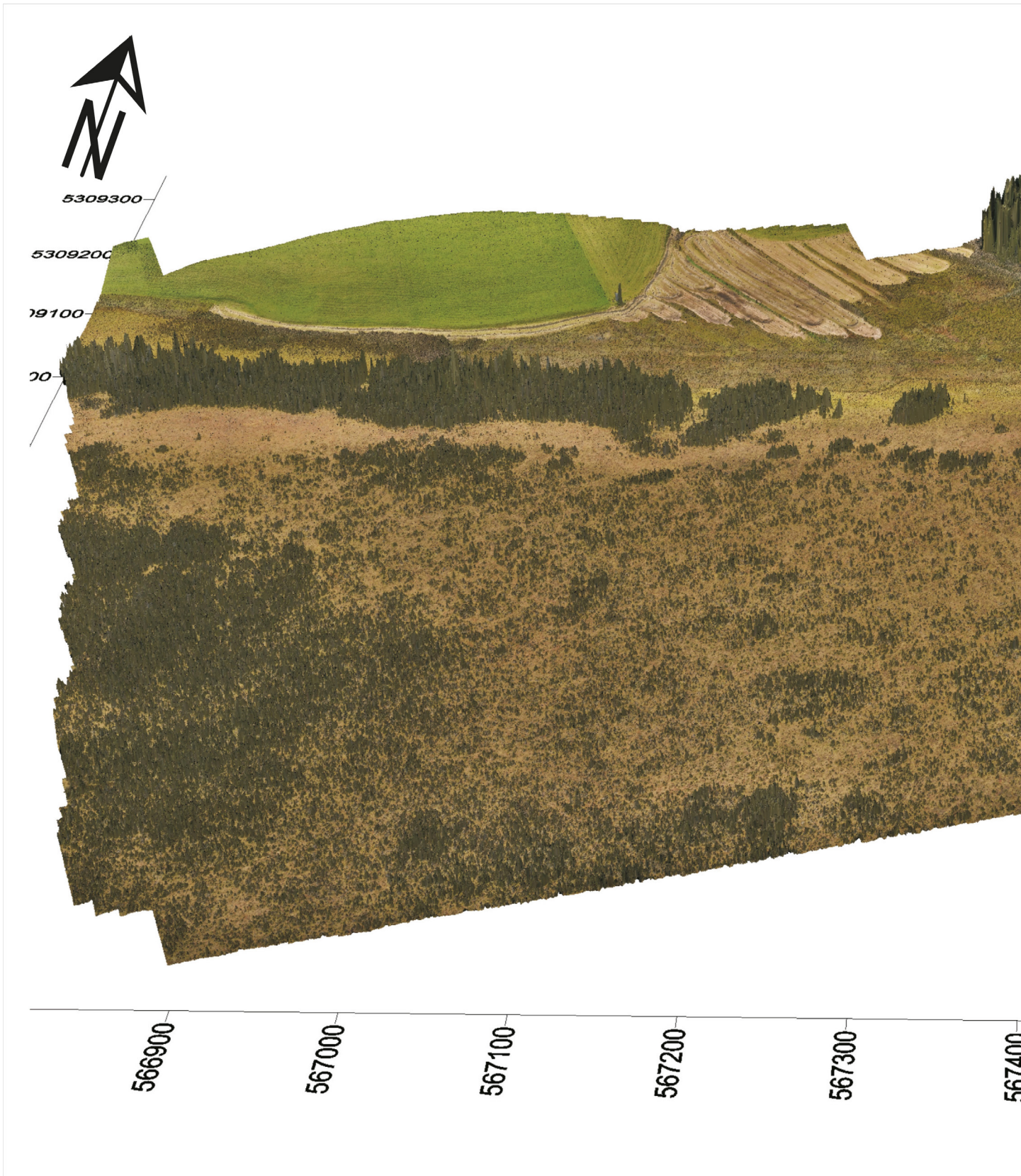
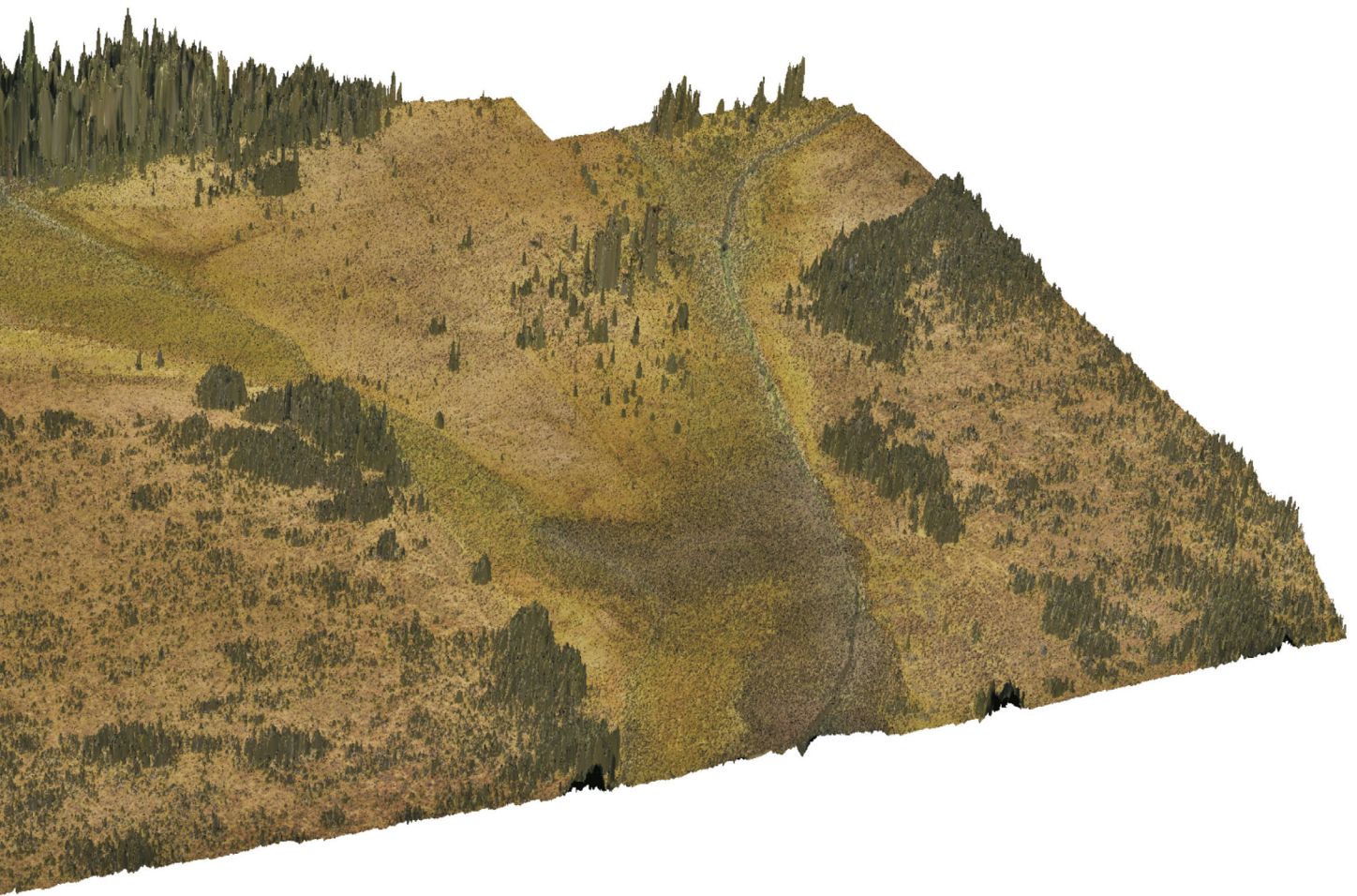


Abb. A.3.1-1: 3D-Darstellung des untersuchten Teilgebiets im Wurzacher Ried. Blockbild erzeugt aus DGM\_10cm mit Ortholuftbild der Drohnenbefliegung, 4 cm Bodenaufösung.



Koordinatensystem: UTM32

567500

567600

567700

567800

567900

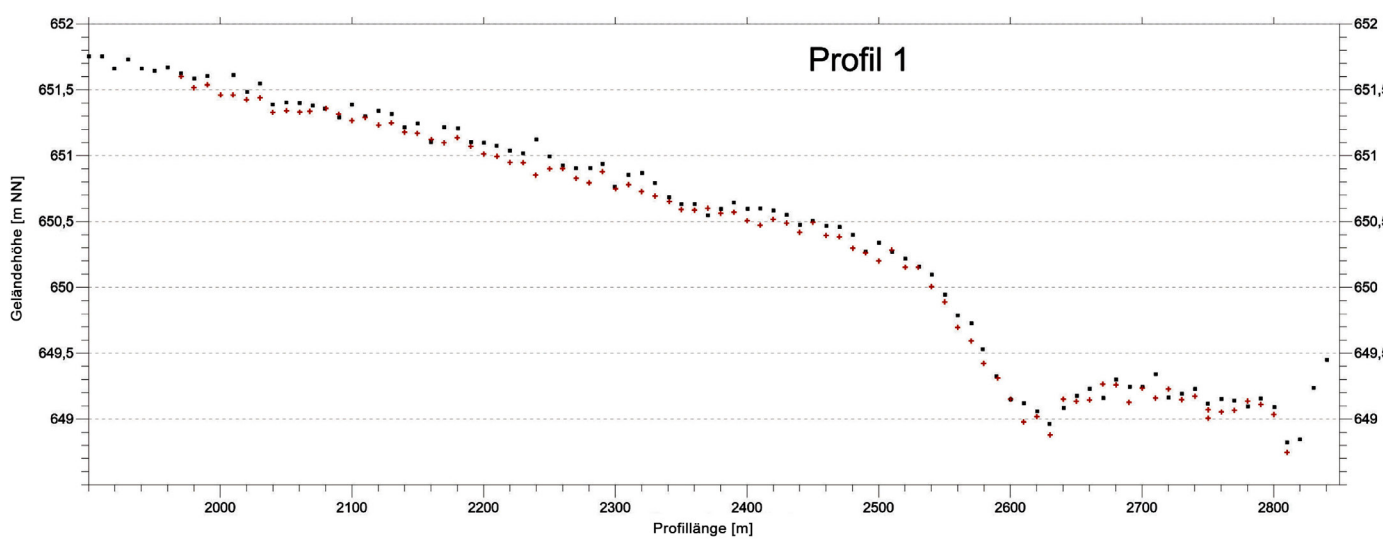
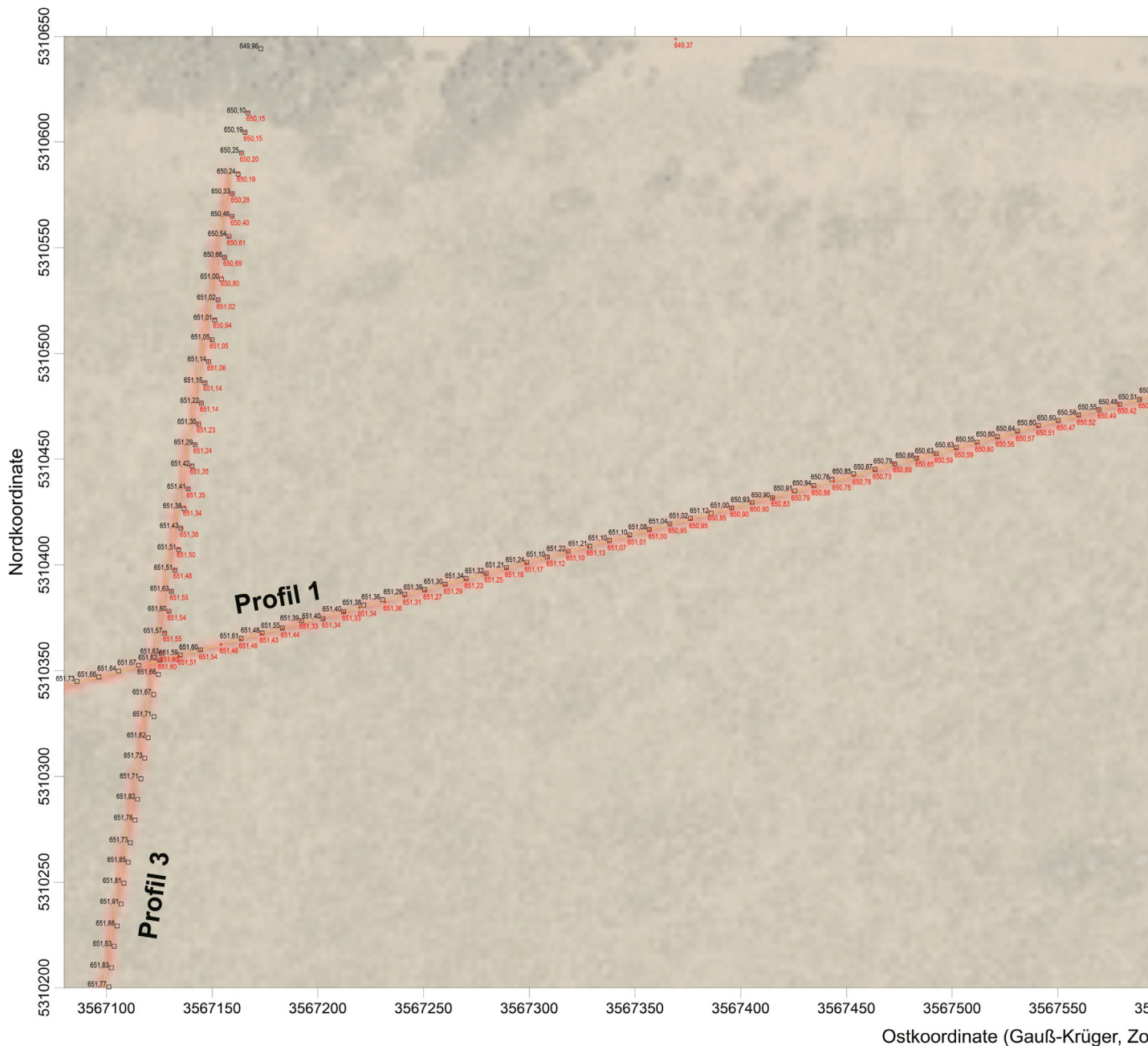


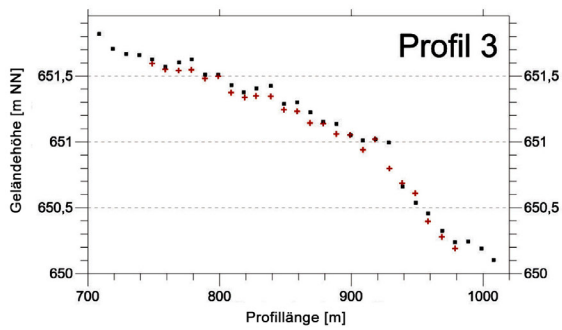
Abb. A.4.1-1: Höhenvergleich der GPS-Messungen aus den Jahren 2016 und 2014 auf Teilabschnitten der Profile 1 und 3 im untersuchten Teilgebiet des Wurza...



ne 3)

**Messpunkte/Höhenangaben:**

- Schwarz: Messung 26.06.14
- + Rot: Messung 13.09.16



cher Rieds.

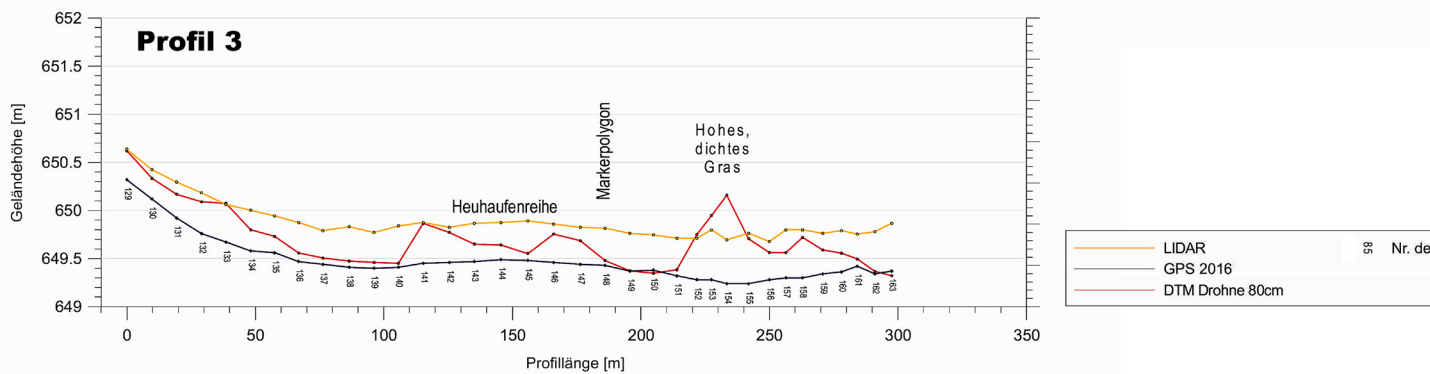
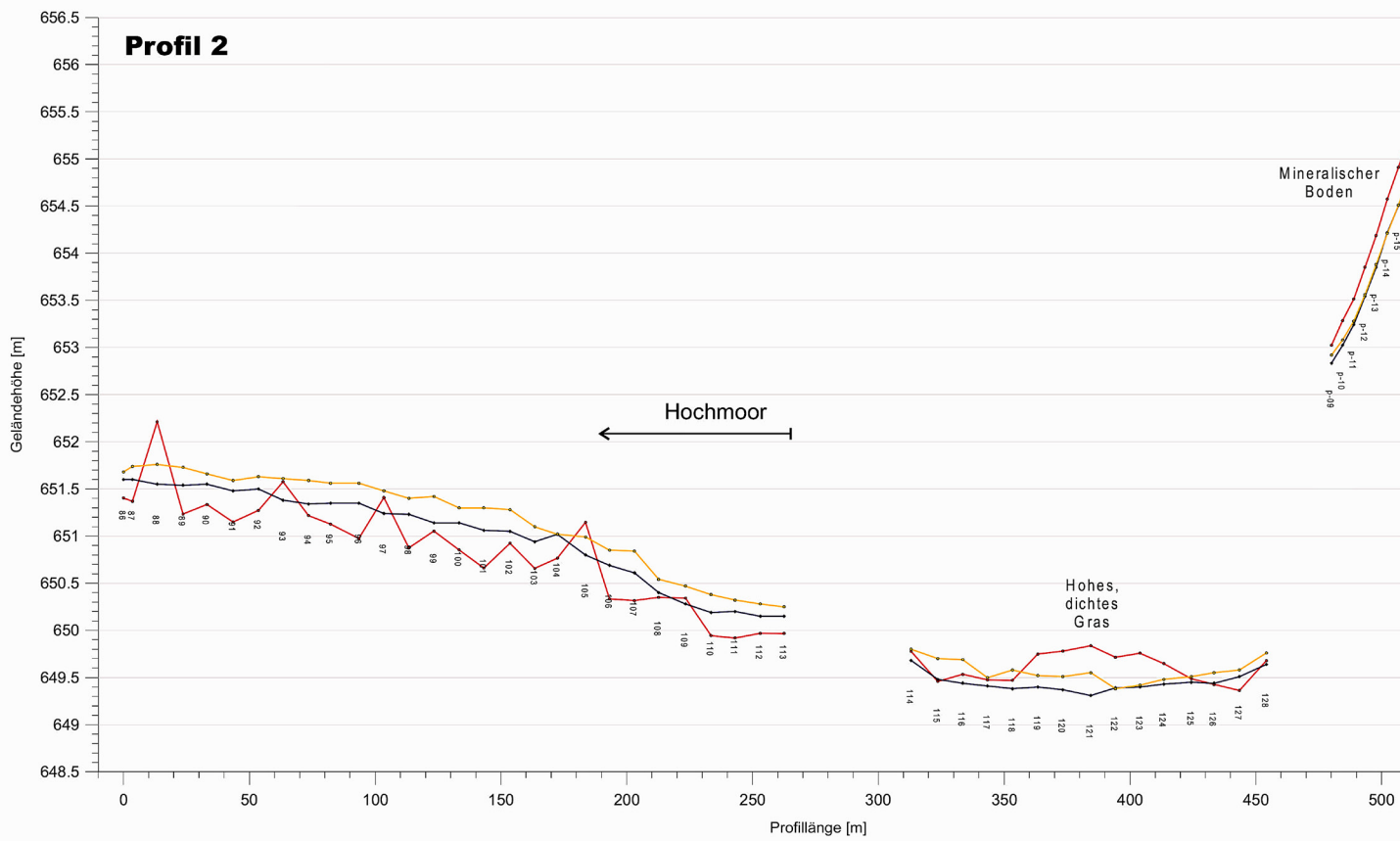
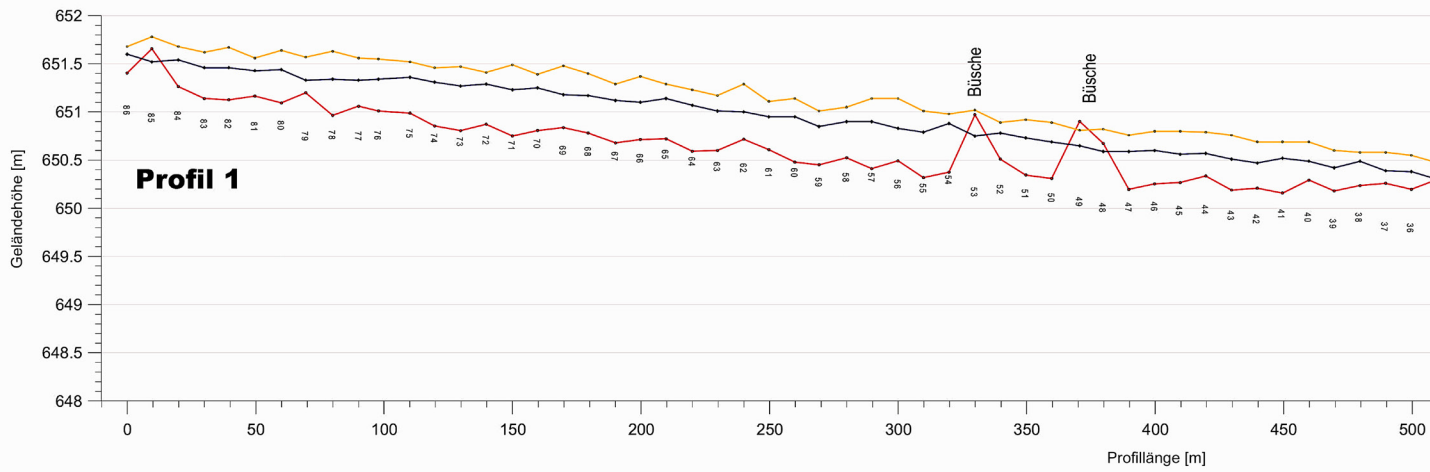
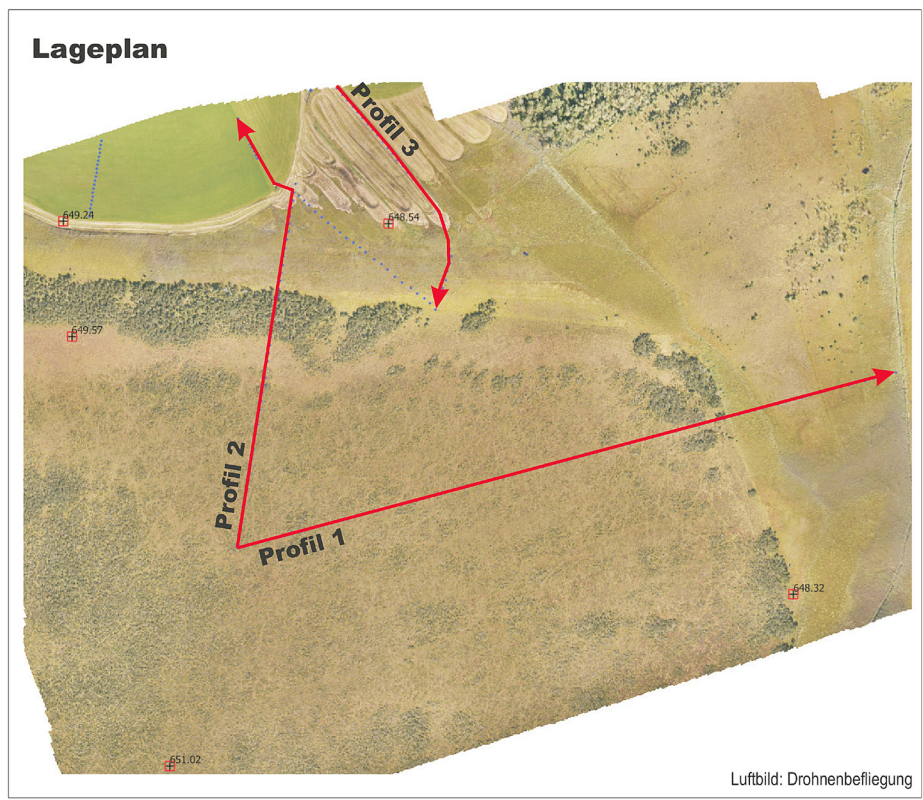
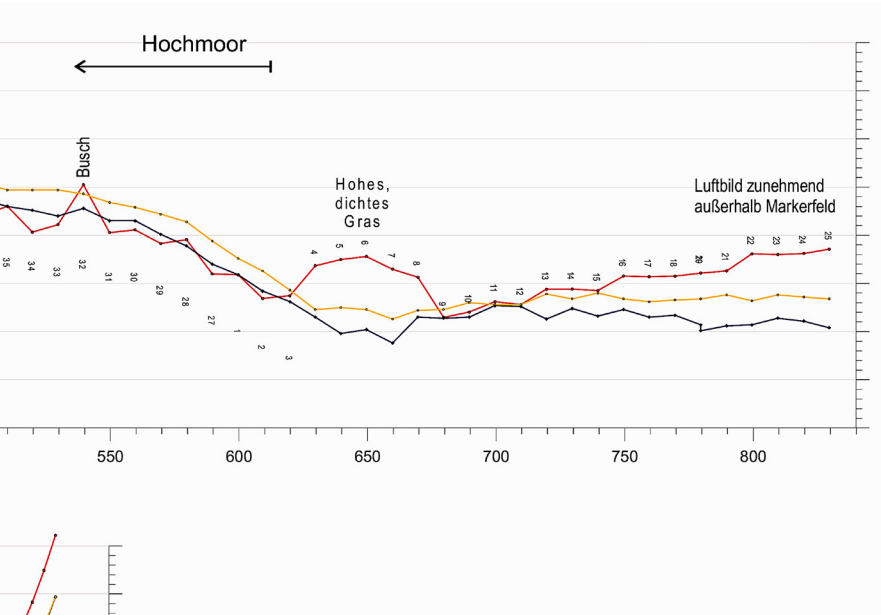


Abb. A.4.3-1: Höhenvergleiche entlang der GPS-Profile (Teilgebiet des Wurzacher Rieds).





s GPS-Punkts

# Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Kurztitel: genauer Bildtitel / Tabellentitel incl. Quellenangabe siehe Bildunterschrift / Tabellenüberschrift

Abb. 2-1:	Hexacopter des Typs XR6. Einmessung von Platten für Georeferenzierung des Luftbilds.	8
Abb. 2-2:	Luftbild der Befliegung mit der Position der Markerplatten u. den GPS-Messpunkten.	9
Abb. 3.1-1:	Die Daten im Programm QGIS.	10
Tab. 3.1-1:	Objekte aus der Befliegung (Tiff-Dateien mit Georeferenzierung in UTM32-Projektion).	10
Abb. 3.2-1:	Vergleich von Luftbildern.	12
Abb. 3.3-1:	Farbliche Darstellung des DOM transparent über Hillshade-Hintergrund.	13
Abb. 3.3-2:	Effekt der Baumkorrektur.	13
Abb. 3.3-3:	Luftbild der Dohne, DOM_10cm und DGM_10cm am Westrand des Hochmoors.	14
Abb. 3.3-4:	Profilschnitt vom Hochmoorbereich in einem dicht mit Binsengras bewachsenen Bereich.	15
Abb. 3.3-5:	Planaufsicht. Profilschnitt von der Wiese am Nordrand durch den rund 2 m hohen Schilfgürtel.	15
Abb. 3.4-1:	Darstellung der Baumhöhen als GeoTiff kombiniert mit Höhenlinienplan ab 3 m Höhe.	16
Abb. 4.1-1:	Mit GPS nachgemessenes Profil 1.	17
Abb. 4.2-1:	Zwei Profilschnitte quer über das Messfeld (DGM_80cm; DGM_Drohne 80cm lowpass; Lidar-DGM).	18
Abb. 4.3-1:	Profilschnitt mit Lidar-Höhe durch das Schilffeld am Nordrand des Moors.	20
Abb. A.2-1:	Übersicht Messgebiet Wurzacher Ried.	24
Abb. A.2-2:	Ortho-Luftbild vom untersuchten Teilgebiet des Wurzacher Rieds.	26
Abb. A.3.1-1:	3D-Darstellung des untersuchten Teilgebiets im Wurzacher Ried.	28
Abb. A.4.1-1:	Höhenvergleich der GPS-Messungen aus den Jahren 2016 und 2014 im Teilgebiet des Wurzacher Rieds.	30
Abb. A.4.3-1:	Höhenvergleiche entlang der GPS-Profile (Teilgebiet des Wurzacher Rieds).	32



