

Landesamt für Digitalisierung,
Breitband und Vermessung



Fakultät für Geoinformation



Bachelorarbeit

Konzept zur Qualitätssicherung des bildbasierten digitalen Oberflächenmodells von Bayern

angefertigt von
Henri Buschmann

Studiengang: Kartographie und Geomedientechnik

Betreuer: Prof. Dr. Peter Kammerer

Die Arbeit wurde angefertigt in Kooperation mit:

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung

Wintersemester: 2014/2015

Abgabetermin: 30.4.2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	4
1 Einleitung	7
2 Darlegung der Datengrundlage und Prozessierungskette	9
2.1 Bildflugplanung	9
2.2 Beschreibung der gelieferten Daten	10
2.3 Prozessierungskette des bildbasierten digitalen Oberflächenmodells.....	12
2.4 Aktueller Produktionsstand	16
3 Aufstellung eines Konzepts zur Qualitätssicherung.....	17
3.1 Qualitätsplanung anhand einer Produktanalyse	18
3.1.1 Einteilung in Fehlertypen	18
3.1.1.1 Anschlussfehler	19
3.1.1.2 Dynamische Objekte	21
3.1.1.3 Statische Objekte	26
3.1.2 Amtliche Qualität beim Produkt bDOM.....	31
3.2 Qualitätssteuerung	36
3.3 Qualitätskontrolle und deren Machbarkeit	38
3.3.1 Exemplarischer Vergleich mit Referenzdaten.....	38
3.3.2 Bewertung globaler Kontrollmöglichkeiten.....	41
3.3.2.1 Qualitative Kontrollmöglichkeiten	42
3.3.2.2 Quantitative Kontrollmöglichkeiten	45
3.3.3 Bewertung lokaler Kontrollmöglichkeiten	47
3.3.3.1 Qualitative Kontrollmöglichkeiten	47
3.3.3.2 Quantitative Kontrollmöglichkeiten	51
3.4 Vorschläge für Korrekturmöglichkeiten.....	52
3.5 Entwurf eines Prüfprotokolls	55
4 Fazit.....	56
5 Ausblick	57

6	Anhang	58
6.1	Python Script zur globalen quantitativen Kontrolle.....	58
6.2	Beispiel einer Ausgabe der automatischen Auswertung	61
6.3	Python Script zur Ausreißererkenung.....	62
6.4	Prüfprotokoll.....	63
7	Literaturverzeichnis	65

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Einteilung der Landkreise Bayerns nach Befliegungsjahr.....	7
Abb. 2-1: Die Unterteilung Bayerns in Lose.	10
Abb. 2-2: Bildmittenübersicht der Befliegung des Loses Pfaffenhofen 2013.	11
Abb. 2-3: Beispiel für optische Mängel in Luftbildern. Links: Lichtreflexionen; Rechts: Wolken.....	13
Abb. 2-4: Aktueller Stand der bDOM-Berechnung	16
Abb. 3-1: Die drei wesentlichen Teilfunktionen der Qualitätssicherung	17
Abb. 3-2: Einteilung in Fehlertypen.....	18
Abb. 3-3: Höhenversatz an der A93. Der Messbereich ist im oberen rechten Bild farbig markiert.	20
Abb. 3-4: Lageversatz zwischen den Losen Pfaffenhofen(unten) und Ingolstadt(oben).....	20
Abb. 3-5: Fehlerhafte Höhenwerte durch ein bewegtes Fahrzeug.	22
Abb. 3-6: Durch eine Wolke verursachte Ausreißer in der Seitansicht (Parallelprojektion).....	23
Abb. 3-7: Durch Fließgewässer verursachte Ausreißer.	24
Abb. 3-8: Zusammenfluss von Donau und Inn.	25
Abb. 3-9: Freileitungen des Stromnetzes. Links: Echtfarben; Rechts: Schräglichtschummerung	27
Abb. 3-10: Reflexionen im Luftbild.	27
Abb. 3-11: Das transparente Dach des Olympiastadions im bDOM.	28
Abb. 3-12: Der Nürnberger Fernsehturm als RGB-TIN in Schrägansicht.....	29
Abb. 3-13: Kacheln des bDOM am Chiemsee in Nadir-Ansicht.	30
Abb. 3-14: Solarfläche des Solarparks Bayern. Rechts: Schummerungsansicht	30
Abb. 3-15: Der in Abb. 3-14 markierte Bereich in Schrägbildansicht.	31
Abb. 3-16: KVP-Zyklus nach W.E. Deming.....	38
Abb. 3-17: Übersicht über die Testgebiete zur Höhenkontrolle im Los München.....	39
Abb. 3-18: Markierte Testflächen (Fußballplätze) im jeweiligen Testgebiet	40
Abb. 3-19 Markierte Testflächen (Hart- und Parkplätze) im jeweiligen Testgebiet.....	40
Abb. 3-20: Echtfarbansicht des bDOM als orthogonale Parallelprojektion	42
Abb. 3-21: Höhereinfärbung des bDOM.....	43
Abb. 3-22: Schräglichtschummerung des bDOM	44
Abb. 3-23: Seitansicht einer bDOM-Kachel.....	45
Abb. 3-24: Ergebnis aus der automatische Auswertung eines Loses	46
Abb. 3-25: Punktwolke in der Schrägansicht	48
Abb. 3-26: Vergleich von Schummerung (links) mit Ambient Occlusion (rechts).....	49
Abb. 3-27: Lagevergleich zwischen DFK (gelbe Linie) und bDOM anhand eines Gebäudeumrisses.	50
Abb. 3-28: Lagevergleich zwischen DFK (gelbe Linie) und bDOM anhand eines Dachfirsts.	50
Abb. 3-29: Manuelle Anpassung von Höhenwerten.	53
Abb. 3-30: Überlagerung des bDOM mit Gewässerpolygonen bei Passau	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: <i>Metadaten am Beispiel eines Luftbildes aus dem Los Würzburg</i>	11
Tabelle 2-2: <i>Relative und absolute Genauigkeit des OLB</i>	14
Tabelle 3-1: <i>Qualitätsmerkmale des bDOM</i>	34
Tabelle 3-2: <i>Ergebnisse für Testflächen (Fußballplätze)</i>	41
Tabelle 3-3: <i>Ergebnisse für Testflächen (Hart- und Parkplätze)</i>	41

Abkürzungsverzeichnis

ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
bDOM	Bildbasiertes digitales Oberflächenmodell
DFK	Digitale Flurkarte
DGM	Digitales Geländemodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DOP	Digitales Orthophoto
INS	Inertiales Navigationssystem
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in the European Community
GB	Gigabyte
GIS	Geografisches Informationssystem
GNSS	Globales Satellitennavigationssystem
GSD	Ground sample distance (dt. Bodenpixelgröße / Bodenpixelauflösung)
LDBV	Landesamt für Breitband, Digitalisierung und Vermessung
MB	Megabyte
NABau	Normenausschuss Bauwesen
nDOM	Normalisiertes digitales Oberflächenmodell
OLB	Orientiertes Luftbild
SGM	Semi-Global Matching
TB	Terabyte

1 Einleitung

Das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) erfasst seit 1987 im gesetzlichen Rahmen der Bayernbefliegung systematisch und flächendeckend Luftbilder von Bayern. Durch ihre hohe Informationsdichte sind Luftbilder zur Erforschung und Dokumentation unseres Lebensraumes prädestiniert. Bis heute hat sich ihre Qualität durch den Rhythmus der Befliegung und die Aufnahmetechnik immer wieder gesteigert und den technischen Möglichkeiten angepasst.

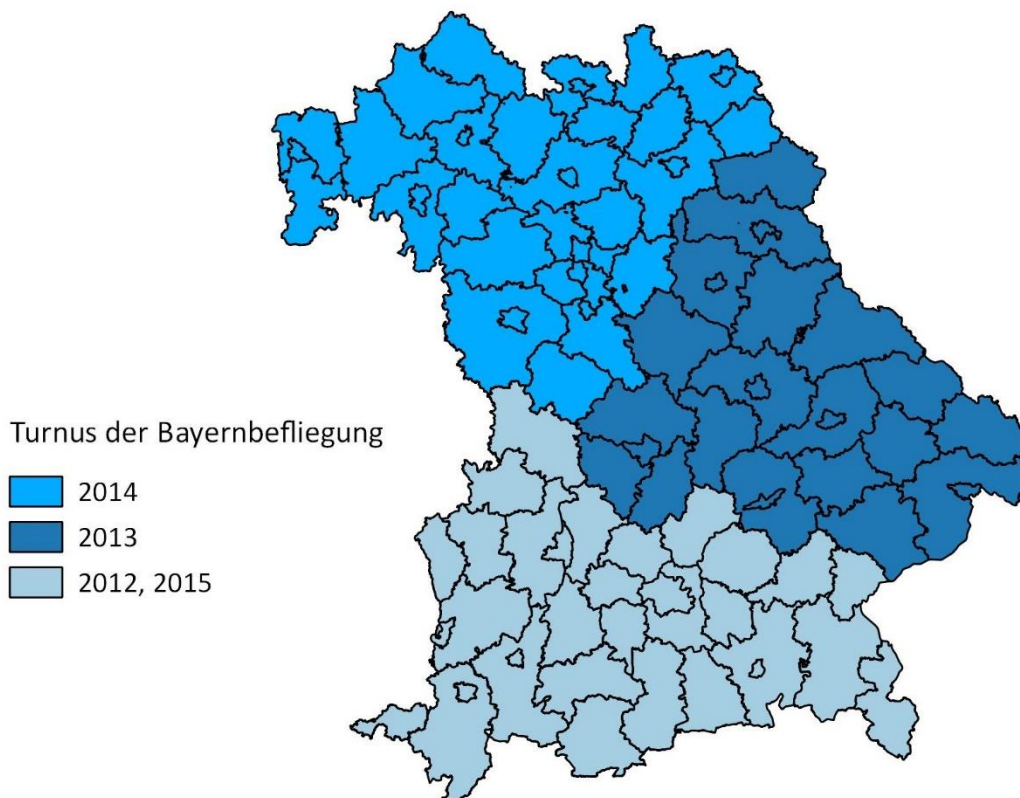


Abb. 1-1: Einteilung der Landkreise Bayerns nach Befliegungsjahr

Im LDBV beschränkte sich die Anwendung der orientierten Luftbilder (OLB) bisher neben der Archivierung im Landesluftbildarchiv und Bereitstellung der OLB auf ihre stereoskopische Auswertung und die Erstellung Digitaler Orthophotos (DOP).

Mit der Umstellung auf digitale Luftbilder ab 2009 hat sich das Anwendungsspektrum noch einmal einschneidend vergrößert. Seitdem wird nicht nur zusätzlich mit einem Kanal der nahe Infrarotbereich (NIR) erfasst, auch die Längs- und Querüberlappung der Luftbilder wurde entscheidend vergrößert. Parallel entstanden effiziente Strategien zur dichten Bildkorrelation¹.

¹ Engl. Dense Image Matching (DIM)

Erst mit digitalen Luftbildern lässt sich das Potenzial dieser Bildkorrelationsalgorithmen voll ausschöpfen, da die eingesetzten Sensoren den analogen Luftbildkameras durch geringeres Bildrauschen und höhere radiometrische Auflösung überlegen sind (Stolz 2013: S. 139).

Die Vorstellung der semi-globalen Bildkorrelation² stellt dabei einen Paradigmenwechsel dar, da seitdem mit überschaubarer Rechenzeit und dichter, pixelweiser Bildkorrelation hochauflösende Oberflächenmodelle aus orientierten Luftbildern erstellt werden können.

Seit 2013 wird im Rahmen einer Testproduktion am LDBV ein flächendeckendes bildbasiertes digitales Oberflächenmodell (bDOM) von Bayern erstellt. Um dieses Produkt anbieten zu können, müssen passende Qualitätskriterien zur Qualitätssicherung definiert und kontrolliert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept zur Qualitätssicherung erarbeitet, das in die Produktion des bDOM eingebunden werden kann. Dabei wird die Qualitätssicherung in den drei Schritten Qualitätsplanung, -steuerung und -kontrolle untersucht (Springer Gabler Verlag). Zur Qualitätsplanung werden dafür nach der Erläuterung des Erstellungsprozesses die verschiedenen Fehlertypen des bDOM untersucht, wobei alle zum Untersuchungszeitpunkt verfügbaren bDOM-Daten berücksichtigt werden. Eine Einschränkung auf ein Testgebiet fand nicht statt. Aus diesen Erkenntnissen und der vom LDBV erstellten Produktdefinition sollen Qualitätsmerkmale abgeleitet werden. Anschließend werden Möglichkeiten der Qualitätssteuerung durch Dokumentation und Überwachung der Produktion untersucht. In Kapitel 3.3 werden verschiedene von mir gefundene Methoden zur Qualitätskontrolle vorgestellt. Zur Darstellung und Kontrolle wird die Software LAStools³, CloudCompare und QGIS genutzt. Die Kontrollmöglichkeiten werden dabei in globale Methoden zur Kontrolle des kompletten bDOM und lokale Methoden zur stichprobenartigen Kontrolle einzelner Gebiete unterteilt. Zur Qualitätsverbesserung des bDOM wird auf die Fragestellung eingegangen, wie mit Fehlern im Modell umgegangen werden kann, und automatische, halbautomatische und manuelle Korrekturmöglichkeiten untersucht.

Aus den vorgestellten Möglichkeiten wird abschließend eine wirtschaftlich sinnvolle Vorgehensweise zur Qualitätssicherung herausgefiltert.

² Engl. Semi-global matching (kurz: SGM)

³ Hrsg. Rapidlasso GmbH

2 Darlegung der Datengrundlage und Prozessierungskette

Um die Datengrundlage des Oberflächenmodells zu erläutern, wird im Folgenden kurz auf die Bayernbefliegung, die entstehenden Luftbilder und die Erstellung der orientierten Luftbilder eingegangen, die als Grundlage der Digitalen Orthophotos und zur Berechnung des bildbasierten digitalen Oberflächenmodells dienen.

2.1 Bildflugplanung

Für die Luftbildbefliegung ist die Fläche Bayerns in 3 Gebiete eingeteilt, die wiederum jeweils in 23 bis 30 sogenannte Lose unterteilt sind. Die Grenzen der Lose sind so gewählt, dass die eingeschlossenen Areale möglichst rechteckig sind und etwa gleichgroße Flächen einschließen. So entstehen 77 Lose für das Gesamtgebiet von Bayern. Von diesen 3 Gebieten wird in einem 3-Jahres-Turnus jeweils eines pro Jahr durch Zulieferfirmen befliegen. Die Auftragsvergabe erfolgt aufgrund des hohen Gesamtvolumens von jährlich ca. 200.000 – 300.000 € über das EU-Portal für das öffentliche Auftragswesen SIMAP. Dabei werden an jede ausgewählte Zulieferfirma mindestens 2 Lose vergeben. Die Luftbildanforderungen sind in den Vergabeunterlagen definiert (Landesamt für Vermessung und Geoinformation 2013: S. 3ff).

Dazu gehört die jährlich festgelegte Längs- und Querüberdeckung der Luftbilder. Im Jahr 2014 betrug diese 75 % längs und 40 % quer. Die geforderte Bodenpixelgröße (engl. GSD) beträgt aktuell $20 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ im panchromatischen Kanal. Es wird kein bestimmtes Kamerasystem gefordert. (S. 6) Allerdings wurde in die Ausschreibung für das Befliegungsjahr 2015 das Kriterium des maximalen Öffnungswinkels und daraus resultierend die möglichen Objektiv-Brennweiten aufgenommen. In Losen, die Landschaften mit Hochgebirgscharakter enthalten, wird ein maximaler Öffnungswinkel von 70° vorgeschrieben. Das soll zu große Umklappungen von Objekten am Bildrand vermeiden, um die Berechnung des Oberflächenmodells zu verbessern.

Weiterhin wird die Befliegung in Ost-West-Richtung gefordert. Daraus resultiert, dass die Zeitspanne zwischen den Aufnahmen sehr gering ist. Die Zeitspanne zur angrenzenden Aufnahme im danebenliegenden Flugstreifen variiert je nach zurückgelegter Strecke des Flugzeugs. Der Zeitraum, in dem die zugeteilten Lose von den Zulieferfirmen befliegen werden darf, wird vom LDBV festgelegt und richtet sich nach dem Sonnenstand sowie Höhenlage und dem Fortschritt der Vegetation. Er liegt üblicherweise zwischen Mitte April und August. (S. 7)

Zudem wird für jedes Luftbild eine direkte Georeferenzierung gefordert. Dazu gehört die Erfassung der Kameraposition mittels Globalem Navigationssatellitensystem (GNSS) und Inertialem Navigationssystem (INS) sowie der inneren Orientierung der Kamera. Die Kalibrierung der Luftbildkamera und des INS muss nachgewiesen werden. (S.4f)

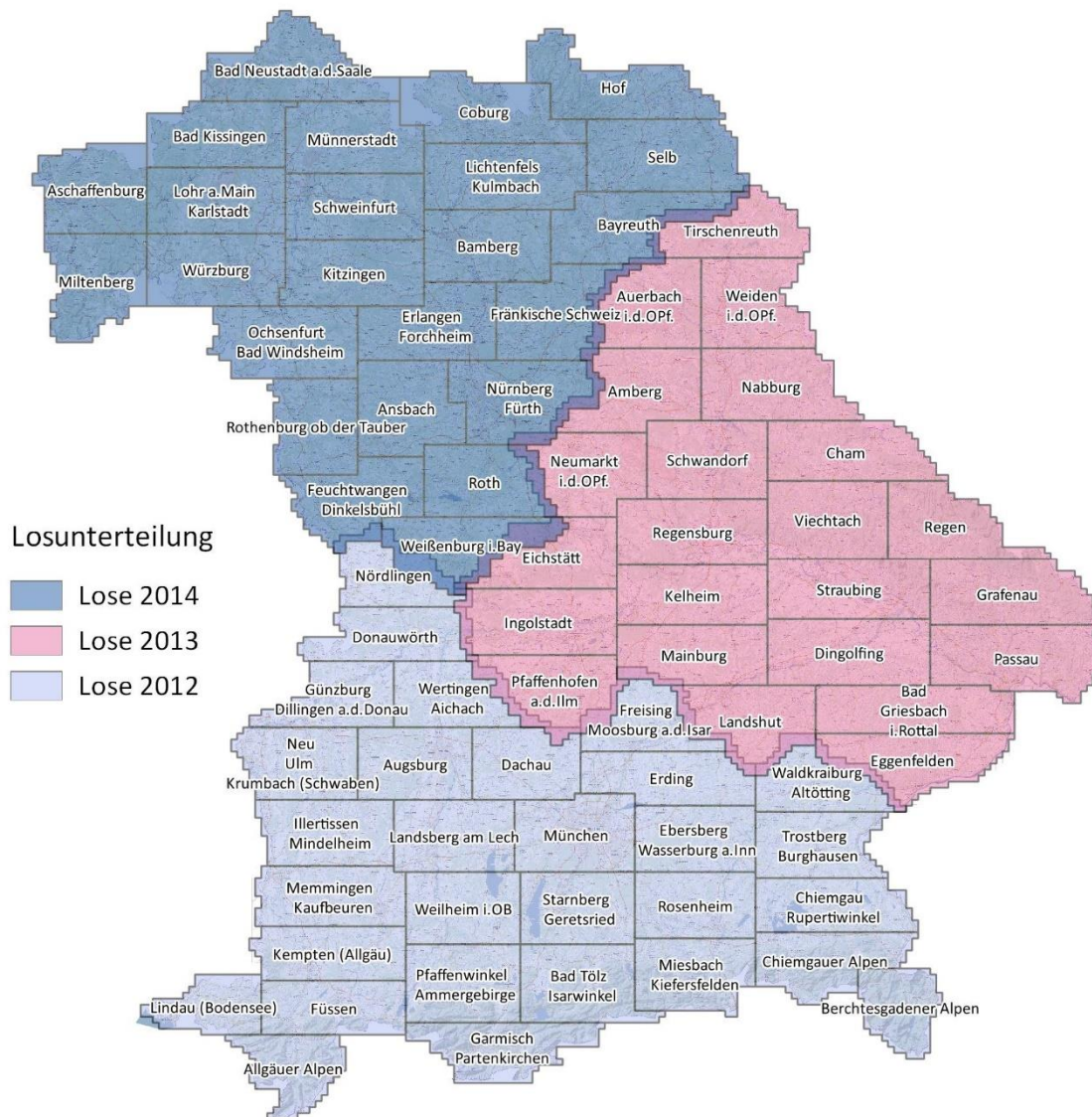


Abb. 2-1: Die Unterteilung Bayerns in Lose. Zwischen den jährlich beflogenen Landesdritteln ergeben sich Überlappungsgebiete.

2.2 Beschreibung der gelieferten Daten

Ebenso wird vorgeschrieben, welche Daten von den Zulieferfirmen nach der Befliegung geliefert werden. Dazu gehört der panchromatische Kanal der Luftbilder im Tiff-Format, sowie Vierkanalbilder, die mit Hilfe von Pansharpening von den Zulieferfirmen im Tiff-Format berechnet werden. In beiden Fällen sind 16 bit pro Kanal gefordert. Mit 8 bit pro Kanal werden zusätzlich Vorschau-Bilder⁴ im JPG-Format geliefert. Diese erweisen sich in der anschließenden optischen Qualitätskontrolle im

⁴ Sogenannte Quick-View Bilder

Landesamt als nützlich, da der Datenumfang eines Loses beträchtlich ist. (Landesamt für Vermessung und Geoinformation 2013: S.9)

Die resultierende Dateigröße pro Luftbild hängt von Kamerasystem ab. Ein Vierkanalbild ist etwa 1,6 GB groß, das Bild im panchromatischen Kanal etwa 400 MB. Somit ist der exakte Speicheraufwand für die Luftbilder eines Loses zwar abhängig von der fotografierten Fläche, da aber Bayern in 77 Lose von ähnlicher Größe eingeteilt ist, ergeben sich im Schnitt pro Los 916 km². Dazu kommen fotografierte Überlappungsflächen mit dem Nachbarlos am Rand des Gebiets. Daraus resultieren bei der geforderten Längs- und Querüberlappung von 75% / 40% im Jahr 2014 abhängig von der Losgröße ca. 1000 Luftbilder pro Los, oder 2 Terabyte Speicherbedarf für die gelieferten Luftaufnahmen. Dazu kommen noch die erfassten Metadaten jeder Aufnahme, die eine ID, Erfassungszeitpunkt sowie innere und äußere Orientierung enthalten (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Metadaten am Beispiel eines Luftbildes aus dem Los Würzburg (Landesamt für Vermessung und Geoinformation 2013: S. 10).

#ID	Time[s]	HW[m]	RW[m]	Height[m]	Phi[gon]	Omega[gon]	Kappa[gon]	Dpos[gon]	dPhi/Omega[gon]	Dkappa[gon]
114012_0_0001	292910.456	4469406.546	5333516.933	2901.846	-0.0421	0.0522	198.7520	0.05	0.003	0.005

Zusätzlich werden noch eine Bildmittenübersicht (siehe Abb. 2-2) im Shape-Format sowie ein Flugprotokoll geliefert.

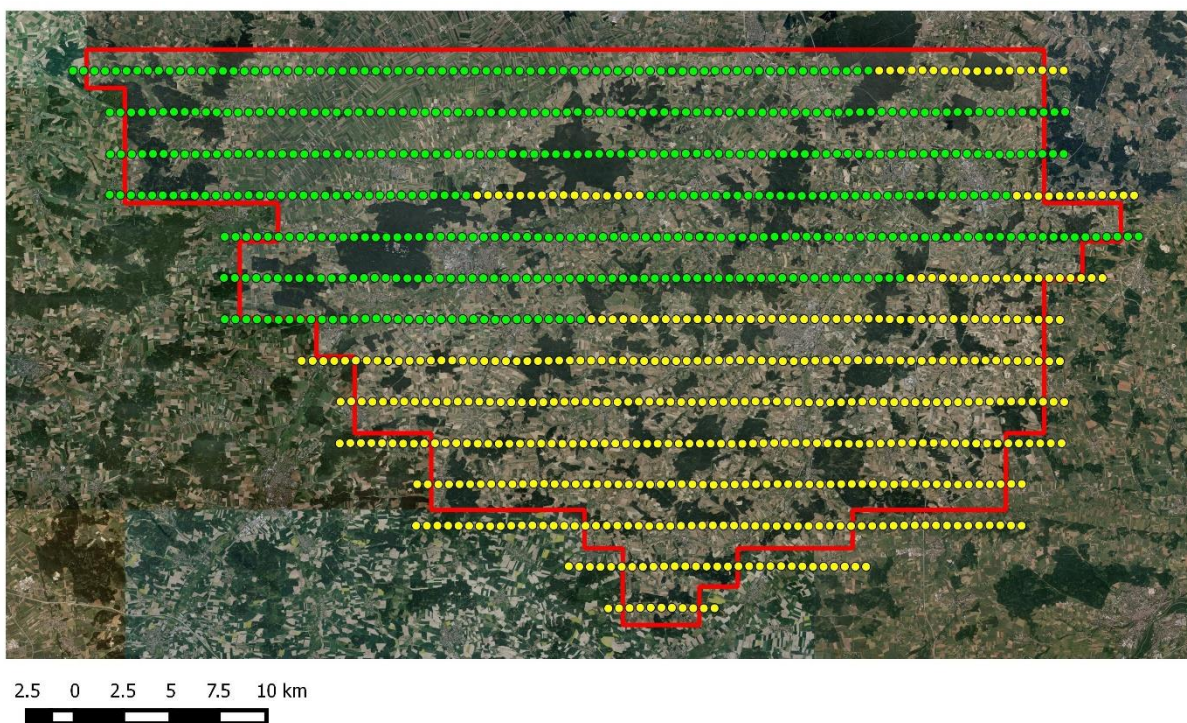


Abb. 2-2: Bildmittenübersicht der Befliegung des Loses Pfaffenhofen 2013. Sie zeigt jede Bildmitte als Punkt auf der Oberfläche. Rot: Losgrenze; Grün: Flugtag 1; Gelb: Flugtag 2

Zur einfacheren Kontrolle des Bildflugs sowie der Bilder ist eine Namenskonvention für jede gelieferte Datei vorgegeben: „Losnummer_Flugtag_Bildnummer_Kanäle.tiff“ (Landesamt für Vermessung und Geoinformation 2013: S. 9).

2.3 Prozessierungskette des bildbasierten digitalen Oberflächenmodells

Die Luftbilder werden von der Bildflugfirma vor ihrer Auslieferung vorprozessiert. Dabei werden die Metadaten der Bilder gespeichert, Farbbilder mit Hilfe von Pansharpeneing erstellt und die Bilder mit passenden inneren Koordinaten (x, y) versehen. Im Bildsystem liegt der Ursprung im Bildmittelpunkt. Die Abzisse des Luftbildes muss dabei in Flugrichtung zeigen, da in der weiteren Verarbeitung mit der Software Inpho ApplicationsMaster daraus die Flugrichtung automatisch abgeleitet wird. Bei der Abnahme im LDBV erfolgt nach Lieferung die Qualitätskontrolle aller Luftbilder eines Loses. Dabei wird jedes Bild auf enthaltene Mängel untersucht und diese erfasst.

Im ersten Schritt der Qualitätsuntersuchung werden alle Bilder auf ihre Vollständigkeit, Lesbarkeit, Farbigkeit und Vorprozessierung hin überprüft. Sind alle 4 Farbkanäle vorhanden, kann mit Hilfe eines GIS die Überlappung mit allen Nachbarbildern auf Einhaltung der geforderten Mindestwerte überprüft werden, ebenso ob die Bodenpixelgröße im Bild innerhalb der Toleranz von ± 5 cm liegt. Dies erfordert gerade in bergigem Gelände unter Umständen niedrige oder wechselnde Flughöhen von der ausführenden Bildflugfirma und erhöht somit ihren Aufwand. Gerade in diesen Fällen wird durch Kontrolle der Qualitätsanspruch des LDBV gesichert. Neben Bodenauflösung und Pixelmaßen müssen auch Metadaten, wie das verwendete Kamerasystem und Kalibrierungsdaten vorhanden sein. Da Luftbildkameras im Gegensatz zu handelsüblichen Fotokameras über mehr als einen Sensor verfügen, und deshalb aus mehreren Sensoren zusammengerechnet werden, liegt beispielsweise der Bildmittelpunkt nicht unbedingt in der pixelgenauen Mitte der Bilddaten. Diese von der Kamera abhängigen Daten werden von der Software ILIAS eingelesen.

In einem zweiten Schritt werden alle inhaltlichen Mängel jedes Luftbild von einem Mitarbeiter optisch erfasst. Dabei wird zwischen 2 Mängelgruppen unterschieden. Schärfe und Schärfeeindruck bilden die schwerwiegendere Gruppe 1. Zu Mängeln kann es hier kommen, wenn schon vor Erreichen der passenden Flughöhe Aufnahmen gemacht werden, also meist im Anflug. Die zweite Gruppe schließt Wolken, Wolkenschatten und Lichtreflexionen (siehe Abb. 2-3) als am häufigsten auftauchende Mängel ein.



Abb. 2-3: Beispiel für optische Mängel in Luftbildern. Links: Lichtreflexionen; Rechts: Wolken

Falls bei der Abnahme Mängel gefunden werden, kann von der Bildflugfirma eine Nachprozessierung der Bilder gefordert werden oder eine Preisminderung erfolgen wenn eine Nachbefliegung des Loses nicht möglich oder nicht sinnvoll ist.

Nach der Abnahme erfolgt die Aerotriangulation. Hier werden zunächst mit der Software Image Commander Pyramidenstufen für jedes Bilder berechnet. Dabei wird die Originalauflösung des Bildes als Level 0 bezeichnet. Die nächstkleinere Pyramidenstufe Level 1 enthält durch Halbierung der Pixelmaße noch ein Viertel der Level 0 Daten und braucht dementsprechend nur noch ein Viertel des Speichers. Im Falle des Kamerasystems Ultracam Eagle ist ein Level 0 Bild ca. 2 GB groß, Level 1 nimmt demensprechend noch ca. 500 MB ein.

Die relative Orientierung der Bilder eines Loses wird mit der von Dr. Erwin Kruck entwickelten Software BINGO erstellt. Die Software berechnet die Bündelblockausgleichung des Bildverbands mit automatisch ermittelten Korrelationspunkten. Die absolute Orientierung der Bilder erfolgt in der Software Inpho Match-AT mit terrestrischen Passpunkten, die im Außen- oder Innendienst erfasst wurden. Solche Punkte sind im Gelände immer möglichen Änderungen unterworfen. Giebelpunkte, die für die Lage verwendet werden, können durch Anbauten, Gebäudeabrisse und ähnliches obsolet werden. Bodenpunkte, wie etwa Gullideckel und Grasnaben, sind ebenso gefährdet. Da zum Zweck der Aerotriangulation momentan keine neuen Passpunkte im Außendienst eingemessen werden, veralten diese Daten zunehmend. Um dem entgegenzuwirken können im Innendienst an 3D-Workstations neue Passpunkte gemessen werden.

Nach erfolgter relativer und absoluter Orientierung stehen als Zwischenprodukt zum bildbasierten Oberflächenmodell und als Endkundenprodukt die orientierten Luftbilder (OLB) zur Verfügung. Die Lage- und Höhengengenauigkeit des bildbasierten Oberflächenmodells wird hier als Folgeprodukt direkt von den erreichten Genauigkeiten der orientierten Luftbilder (siehe Tabelle 2-2) beeinflusst.

Tabelle 2-2: *Relative und absolute Genauigkeit des OLB*

	Lage:	Höhe:
Absolut	0,4 m (2-fache GSD)	0,6 m (3-fache GSD)
Relativ	Im Subpixelbereich < 40 cm	-

Ebenso wie die Qualitätssicherung und OLB-Erstellung losweise erfolgt, wird auch das bDOM getrennt für jedes Los einzeln mit allen aktuellen vorliegenden Luftbildern erstellt. Dabei werden die Bilder nach Flugtagen getrennt, so dass nur die Luftbilder jeweils eines Flugtags in jeweils eine Berechnung einfließen. Zur Berechnung wird die Software SURE der Firma nFrames verwendet. Bei dieser Anwendung können nach Anlegen des Bildkorrelationsprojektes Berechnungsparameter angepasst werden. Zum Anlegen des Projekts werden panchromatische Bilder für die Bildkorrelation und Farbbilder zur Berechnung der Farbe jedes Oberflächenmodellpunkts benötigt, ebenso wie die Orientierungsdaten. Die Software bietet verschiedene Voreinstellungen an, die sich nach der Überlappung der Luftbilder richten.

SURE korreliert überlappende Bildpaare und generiert für jedes Bildpaar jeweils eine rohe Punktwolke. Dabei sollen nur Bildnachbarn aus demselben Flugstreifen genutzt werden, da diese Aufnahmen zeitlich nah beieinander liegen. Durch geänderten Schattenwurf und andere zeitliche Veränderungen ist die Bildkorrelation mit Nachbarbildern aus einem anderen Flugstreifen fehleranfälliger und wird vermieden. Da SURE nicht zwischen Flugstreifen unterscheidet muss infolgedessen die minimale genutzte Überlappung zur Bildkorrelation über dem Wert der Querüberlappung liegen.

Die Luftbilder werden nicht bis zur maximal möglichen Bodenpixelgröße (Pyramidenstufe Level 0) korreliert, sondern in der aktuellen Produktion zur Einsparung von Speicherplatz und Rechenzeit bis zur halben Bodenpixelgröße (Level 1). SURE nutzt dabei eine Variante des semi-global matching Algorithmus mit hierarchischer Annäherung⁵ (Wenzel, K., Rothermel, M., Haala, N. u.a. (2013): S.62). Semi-globales Matching ist ein aktueller Algorithmus im Gebiet der dichten Bildkorrelation. Er sucht für jeden Bildpunkt im Basisbild den homologen Pixel im Referenzbild. Eine Kostenfunktion beschreibt den Grad der Verschiedenheit zweier Pixel. (Stolz 2013: S. 142) Aus den verschiedenen Aufnahmezentren beider Bilder und ihren korrespondierenden Pixelkoordinaten ergibt sich für jeden zugeordneten Bildpunkt eine Disparität, die die Höhe des Bildpunkts definiert. „Die Kombination von

⁵ „hierarchical approach“

pixelweisem (globalem) Matching mit einer lokalen Kostenapproximation wird als semi-globales Matching bezeichnet“ (Stolz 2013: S.142).

Um das Endprodukt, ein Oberflächenmodell mit einer festen Gitterweite von 40 cm zu erreichen, werden alle ermittelten rohen Punktwolken übereinander gelegt. Aus allen Punkten, die dabei in eine 40 x 40 cm große Gitterzelle fallen, wird dann ein Höhenmittelwert gebildet und gespeichert. SURE schließt Datenlöcher, die durch sichttote Räume oder gescheiterte Korrelation entstanden sind. Dadurch sind in jeder vollständigen 1 x 1 km großen Kachel immer 6.250.000 Punkte enthalten. Die Farbe jedes gespeicherten Punktes wird abschließend aus den Farbwerten der orientierten Luftbilder abgeleitet. Das Speicherformat LAS lässt in seiner aktuellen Version dafür vier Farbkanäle zu (ASPRS 2013: S. 18f). SURE unterstützt die neueste Version des Las-Formats allerdings noch nicht und lässt nur die drei Farbkanäle RGB zu.

Als Endprodukt entsteht die 2,5 D - Punktwolke mit einer Gitterweite von 40 cm in 1 x 1 km großen Kacheln im Format LAZ. LAZ ist die komprimierte Variante des Formats LAS, das in der aktuellen Version 1.4 von der American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS) definiert ist. Zusätzlich wird von SURE eine farbige orthogonale Parallelprojektion jeder Kachel im tiff-Format erzeugt. Diese Bilddatei stellt die Oberfläche ohne Umklappung dar und entspricht damit einem True Orthophoto.

Die Berechnung des bDOM findet losweise statt. Der Projektordner jeder bDOM Berechnung enthält direkt nach Prozessende folgende Daten:

- fertige bDOM Punktwolke, unterteilt in Kacheln
- True Orthophoto Darstellung jeder Kachel im Tiff-Format
- die zugrundeliegenden rohen Punktwolken aus der Bildkorrelation
- Textdateien mit allen verwendeten Berechnungsparametern, sogenannte Control Files
- Disparitätsbilder für jede rohe Punktwolke. Ein Disparitätsbild stellt alle ermittelten Disparitäten eines Bildpaares mit einer linearen Farbskala von Minimum (Schwarz) bis Maximum (Weiss) dar.

Der dabei anfallende Rechen- und Speicheraufwand ist enorm. Auf einer Prozessor Arbeitsspeicher Workstation braucht beispielsweise die Berechnung des Digitalen Oberflächenmodells des Loses Würzburg 102 Stunden. Die Berechnung des Modells mit 20 cm Gitterweite würde dementsprechend etwa die vierfache Zeit beanspruchen. Jede unkomprimierte Kachel im las-Format braucht ca. 160 MB Speicher, komprimiert im laz-Format zwischen 12 und 24 MB. Jedes True Orthophoto benötigt 24 MB Speicher. Die während dem Prozess berechneten rohen Punktwolken benötigen ein Vielfaches an Speicherplatz. Die komplette Berechnung des Loses Würzburg nahm etwa 2,2 TB Speicher ein, während alle komprimierten Kacheln als Endprodukt des bDOM lediglich 20 GB benötigen. Würde man alle rohen Punktwolken aller Lose speichern wollen, ergäben sich daraus beträchtliche

Mehrkosten und Verwaltungsaufwand. Daher werden die erzeugten rohen Punktdaten nach Prozessende gelöscht.

2.4 Aktueller Produktionsstand

In der aktuellen Testproduktion des bDOM werden die Daten aus der Bayernbefliegung seit 2012 genutzt. Los für Los wird damit ein vollständiges Oberflächenmodell Bayerns berechnet. Im Moment sind alle Lose aus der Befliegung 2013 berechnet, für die Jahre 2012 und 2014 werden die Lose aktuell fertiggestellt (siehe Abb. 2-4).

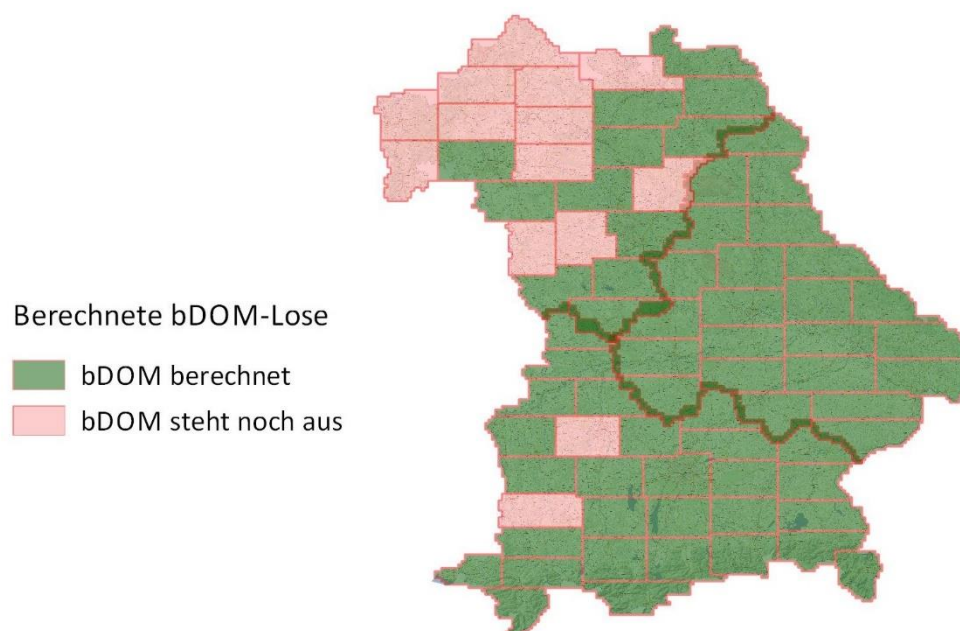


Abb. 2-4: Aktueller Stand der bDOM-Berechnung

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich sowohl Software-Version als Berechnungsparameter seit Beginn dieser Testproduktion immer wieder geändert und weiterentwickelt haben. Deswegen sind qualitative Unterschiede zwischen den Losen allgegenwärtig. Das Gesamtmodell Bayerns kann insofern noch nicht als homogen betrachtet werden.

3 Aufstellung eines Konzepts zur Qualitätssicherung

Vor Aufstellung einer Qualitätssicherung sollen zunächst grundsätzliche Forderungen an dessen Eigenschaften gestellt werden. Sie soll zum Erstellungsprozess des Oberflächenmodells sowie zum Einsatzort und Unternehmensstruktur im LDBV passen. Weitreichende Organisationsänderungen im Sinne eines zertifizierten Qualitätsmanagements sind kaum umsetzbar. Weiterhin kann von zukünftigen Änderungen der Ausgangsdaten sowie der Berechnungsmethoden ausgegangen werden, etwa durch Verfeinerung der Bildkorrelation oder Erhöhung der Bildüberlappung. Im Folgenden soll also ein Konzept aufgestellt werden, das von Mitarbeitern anpassbar umgesetzt werden kann und wirtschaftlich bleibt.

Hierbei wird im Gutachterstil vorgegangen, wobei zu kontrollierende Eigenschaften zunächst mit Hilfe einer Produktanalyse gesucht werden. Das umfasst im alle im Oberflächenmodell auftauchenden Fehler. Anhand dieser Analyse werden Qualitätsmerkmale festgelegt. Diese Reihenfolge dient dazu, Qualitätsmerkmale zu finden, denen das Produkt bDOM gerecht werden kann. Dieser Schritt wird in der klassischen Qualitätssicherung als Qualitätsplanung bezeichnet (Springer Gabler Verlag).

Darauf folgt die Qualitätssteuerung. Hier sollen Mittel gefunden werden, welche die Überwachung und Dokumentation während der bDOM-Produktion ermöglichen.

Im letzten Schritt werden verschiedene globale und lokale Kontrollmöglichkeiten vorgestellt. Damit werden die im Gabler Wirtschaftslexikon enthaltenen drei wesentlichen Teilfunktionen der klassischen Qualitätssicherung, nämlich Planung, Steuerung und Kontrolle (siehe Abb. 3-1) in das Konzept zur Qualitätssicherung eingebunden (Gabler Springer Verlag).



Abb. 3-1: Die drei wesentlichen Teilfunktionen der Qualitätssicherung

3.1 Qualitätsplanung anhand einer Produktanalyse

3.1.1 Einteilung in Fehlertypen

Zunächst ist bei allen folgenden Untersuchungen auf die Trennung der Begriffe Auflösung und Genauigkeit zu achten. Zuvor wurde aufgeführt, dass die absolute Lage- und Höhengenaugkeit der orientierten Luftbilder schlechter ist als deren Bodenpixelauflösung (GSD = 20 cm). Diese Genauigkeiten gehen in die Berechnung des bDOM mit ein. Die Lage- und Höhengenaugkeit ist in den Oberflächenmodelldateien in 0,0001 m Schritten definiert. Dabei besteht die Gefahr diese hohe Auflösung mit einer vermeintlich gleichgestellten Genauigkeit zu verwechseln. Die Lagegenauigkeit wird schon durch die feste Gitterweite von 40 cm beschränkt. Die absolute Lage- und Höhengenaugkeit resultiert aus der Orientierungsgenauigkeit der orientierten Luftbilder und der Qualität der Bildkorrelation.

Fehlertypen wurden im gesamten verfügbaren Oberflächenmodell gesucht, es wurde sich dabei nicht auf kleinere abgeschlossene Testregionen beschränkt. Die Unterteilung der Fehler wurde nach Anschlussfehlern zu angrenzenden Losen, dynamischen und statischen Fehlern sowie deren eingenommener Fläche vorgenommen.

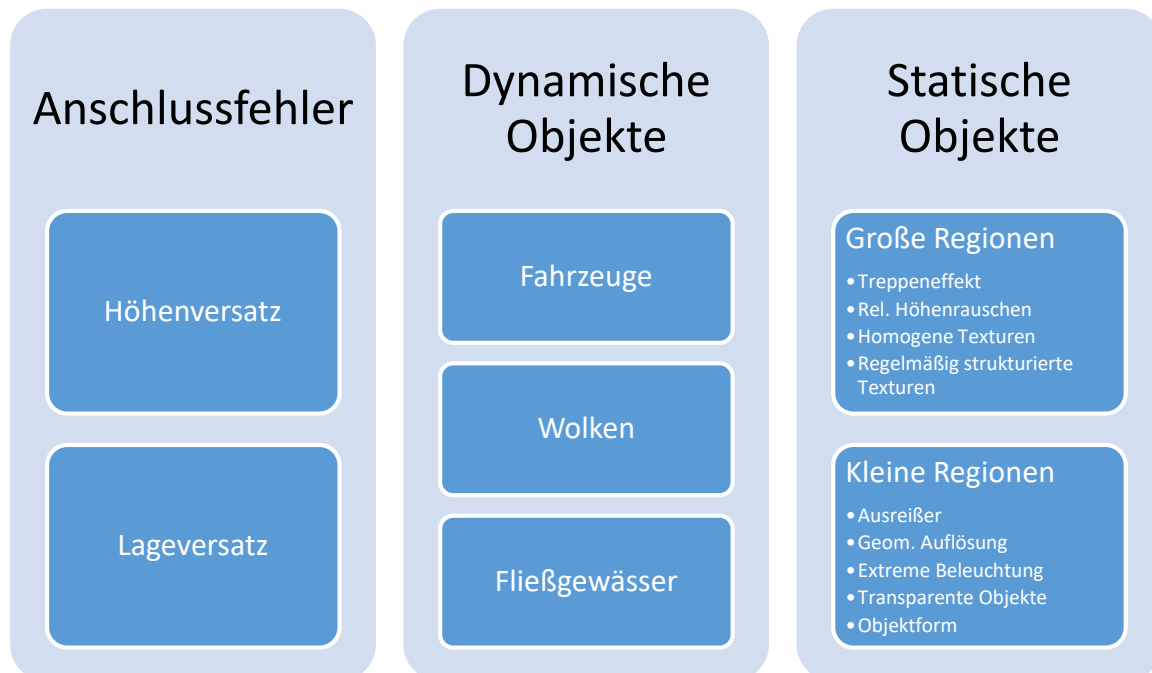


Abb. 3-2: Einteilung in Fehlertypen

Ursachenermittlung

Da die redundanten rohen Punktwolken aus der Modellberechnung nicht dauerhaft gespeichert werden, konnten sie nicht zur Ermittlung der Ursachen jedes Fehlertyps herangezogen werden. Zur Ursachenuntersuchung wurden die Bildinhalte der orientierten Luftbilder und das bDOM selbst benutzt.

3.1.1.1 Anschlussfehler

Höhenversatz an Losgrenzen

Die Bündelblockausgleichung wird ebenso wie die absolute und relative Orientierung der Luftbilder für jedes Los getrennt vorgenommen. Auch in der Berechnung des Oberflächenmodells werden die Orientierungen der Nachbarlose nicht berücksichtigt. Weichen die errechneten Orientierungen zwischen Nachbarlosen relativ voneinander ab, kann es an den Grenzen zwischen den Losen zu einem Höhenversatz kommen. Im Beispiel wurde an der Autobahn A93 bei Siegenburg zwischen den Losen Mainburg und Kelheim ein Höhenversatz von 1,4 m festgestellt (siehe Abb. 3-3).

Lageversatz an Losgrenzen

So wie eine ungenaue Orientierung der Grunddaten zu einem Höhenversatz führen kann, kann sie ebenso ursächlich für einen Lageversatz zwischen einzelnen Losen sein. Gut beurteilen lässt sich die Lage an Objekten, die über Losgrenzen hinweg laufen. Straßen bieten durch Fahrbahnmarkierungen feine Indikatoren, die einen Lageversatz schnell sichtbar machen. Bei Reichertshofen, zwischen dem Los Pfaffenhofen a.d. Ilm und dem Los Ingolstadt wurde per Hand ein Versatz von 1,8 m in der orthogonalen Parallelprojektion gemessen (siehe Abb. 3-4).

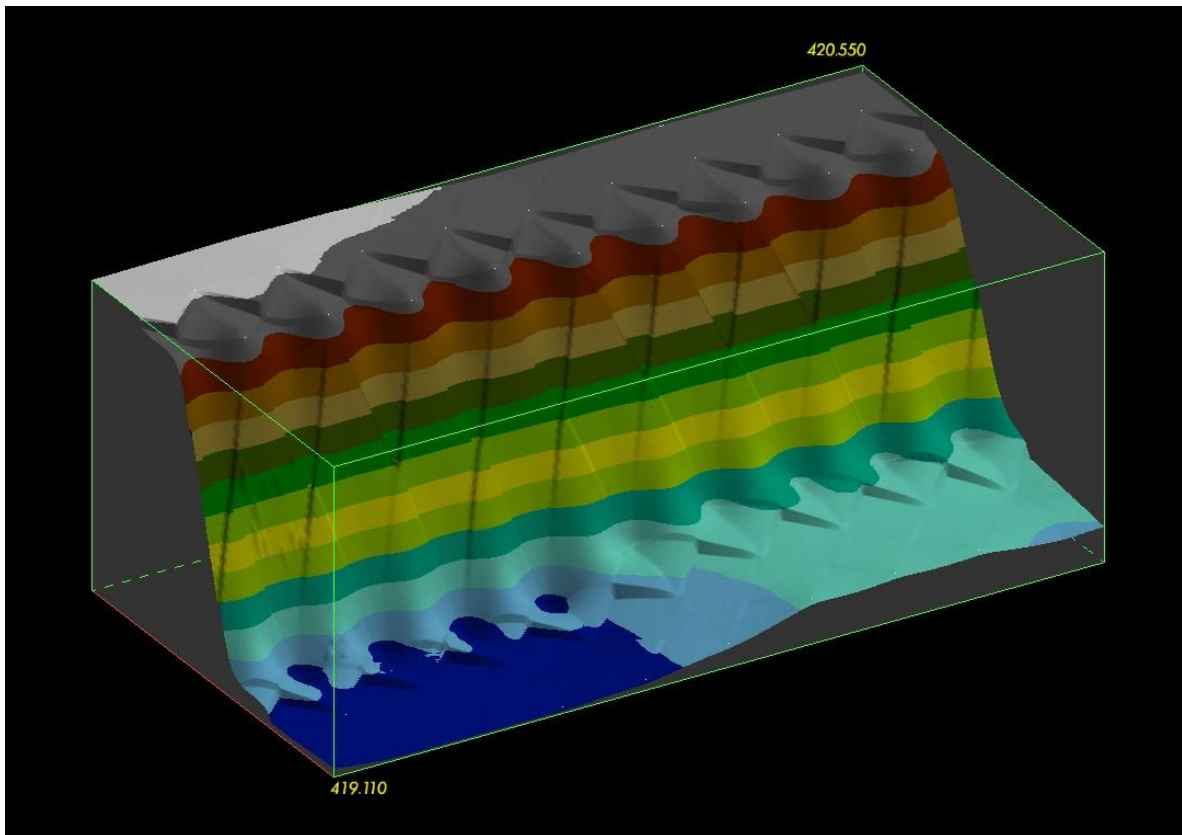
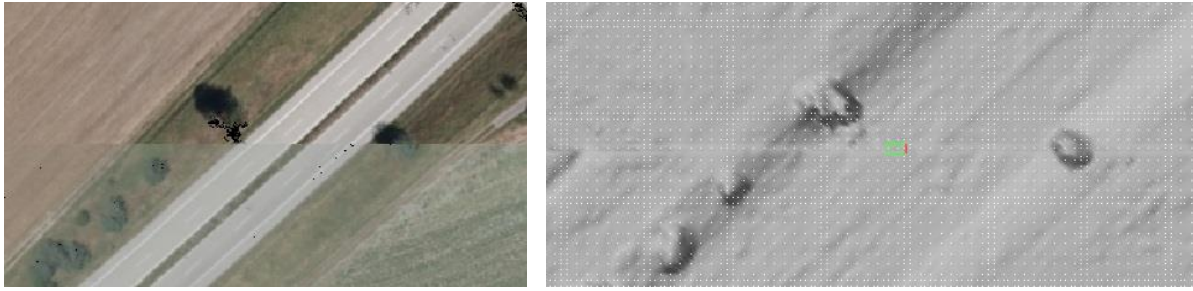


Abb. 3-3: Höhenversatz an der A93. Der Messbereich ist im oberen rechten Bild farbig markiert.

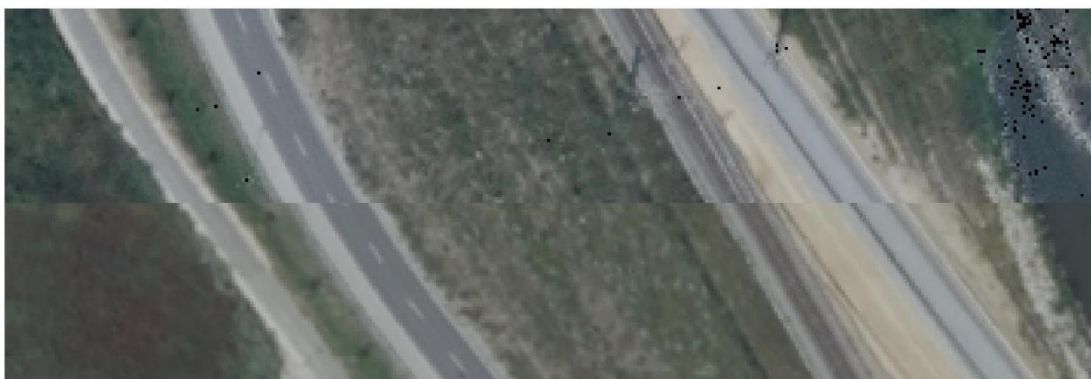


Abb. 3-4: Lageversatz zwischen den Losen Pfaffenhofen(unten) und Ingolstadt(oben)

3.1.1.2 Dynamische Objekte

Unter den Begriff dynamische Objekte fallen Abbildungsfehler der Geometrie, die durch bewegte Objekte im Bildbereich entstehen. Hier wurden Fahrzeuge, Wolken und Fließgewässer getrennt betrachtet.

Fahrzeuge

Parkende oder stehende Fahrzeuge sind im Zeitraum der Bildaufnahme Teil der abzubildenden Oberfläche. Im Gegensatz dazu ist ein bewegtes Fahrzeug während des Aufnahmezeitraums von mehreren Luftbildern keinem festen Ort zuzuordnen. Geometrieveränderungen des Oberflächenmodells durch bewegte Fahrzeuge können demnach als Fehler verstanden werden.

Betrachten wir dabei zunächst ein einzelnes Fahrzeug. Ein zur Bildkorrelation genutztes Luftbildpaar wird zu nah beieinander liegenden Zeitpunkten t_1 und t_2 aufgenommen. In diesem kurzen Zeitraum ändert ein bewegtes Fahrzeug seine Position von Position A (t_1) nach Position B (t_2). Die zwei Bildbereiche, auf dem sich das Fahrzeug in Basis- und Referenzbild befindet, unterscheiden sich beim Bildmatching. Dadurch findet an beiden Positionen keine Bildkorrelation statt und Datenlücken entstehen. Diese können jedoch von Punktwolken aus weiteren Bildpaaren geschlossen werden, so dass keine Abbildungsfehler entstehen.

Anders verhält es sich, wenn ein zweites Fahrzeug die Position A zum Zeitpunkt t_2 einnimmt. In diesem Fall könnten Basis- und Referenzbild auf Position A ähnlich genug sein, um vom Algorithmus zumindest teilweise korreliert zu werden. Das bDOM enthält dann an dieser Stelle falsche Höhenwerte. Als Illustration dient ein Teil des Autobahndreiecks Holledau. Dabei wurden zur Betrachtung der entstandenen Fehler durch ein bewegtes Fahrzeug die Höhenwerte an der Stelle mit Inpho DTMaster trianguliert und Höhenwerte seitlich betrachtet (siehe Abb. 3-5).

Wolken

Wolken können trotz der Forderung nach wolkenfreier Befliegung bei guten Wetterbedingungen nicht ausgeschlossen werden, sind allerdings durch die gewählten Befliegungszeiträume selten.

Wolken verursachen dasselbe Problem wie Rauch und Dampf aus Industrieanlagen. Je nach ihrer Fläche und Durchsichtigkeit verdecken Wolken die darunterliegende Oberfläche. Gerade in den leicht durchsichtigen Bereichen einer Wolke können durch verfälschte radiometrische Wiedergabe der darunterliegenden Oberfläche fehlerhaft Bildpunkte korreliert werden.

Durch redundante Punktwolken aus weiteren Bildpaaren wird die Oberfläche unter der Wolke erhalten, so dass sich im bDOM die Wolkenposition nicht unbedingt durch Farbe, sondern durch zahlreiche Ausreißer in der Höhe bemerkbar machen. Im Beispiel in Abb. 3-6 ist der Kellerberg bei Zwiesel zu sehen. Die Höhenwerte der Ausreißer im Bild rangieren zwischen 431 m bis 985 m.

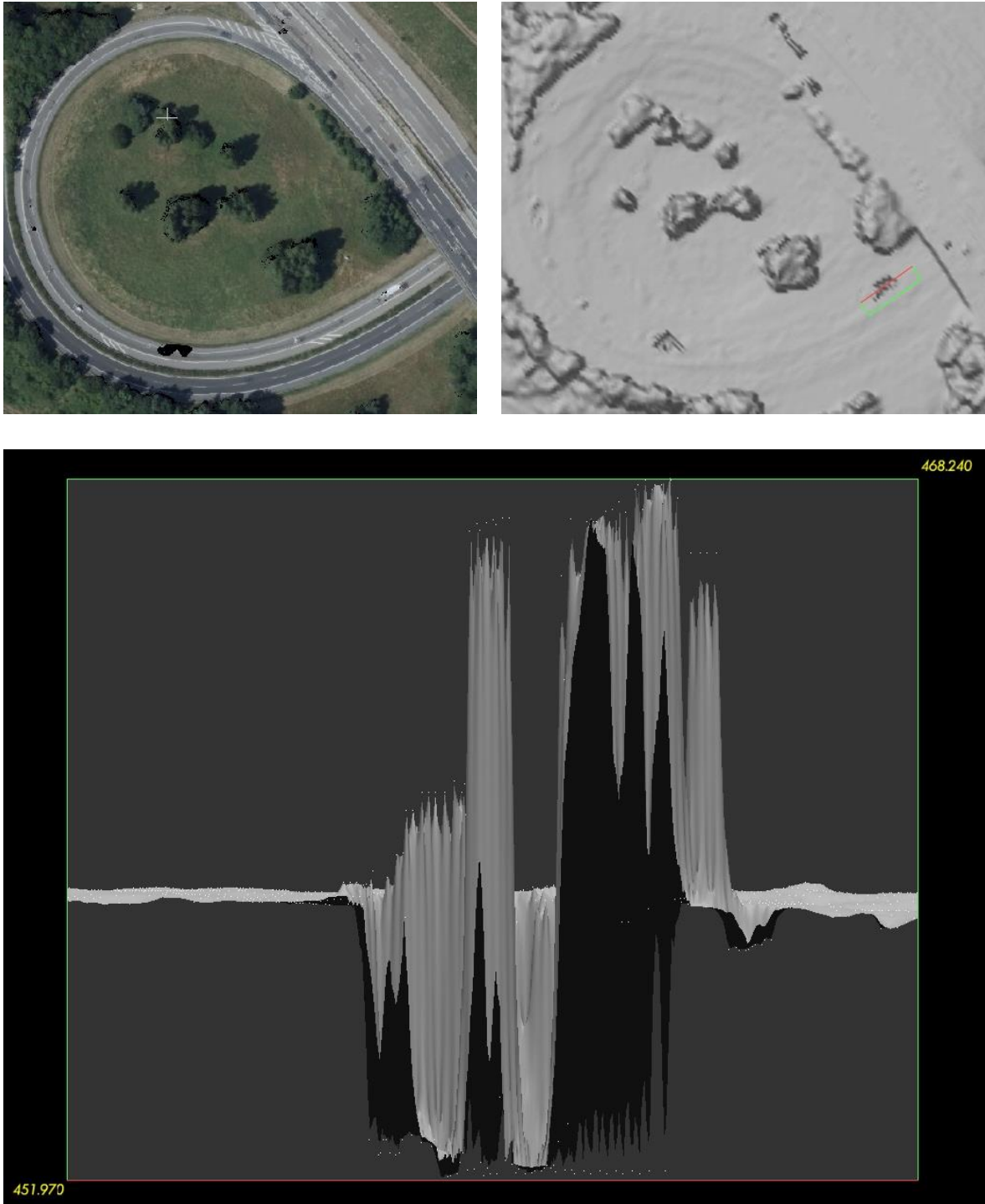


Abb. 3-5: Fehlerhafte Höhenwerte durch ein bewegtes Fahrzeug. Weiße Punkte repräsentieren tatsächliche Höhenwerte

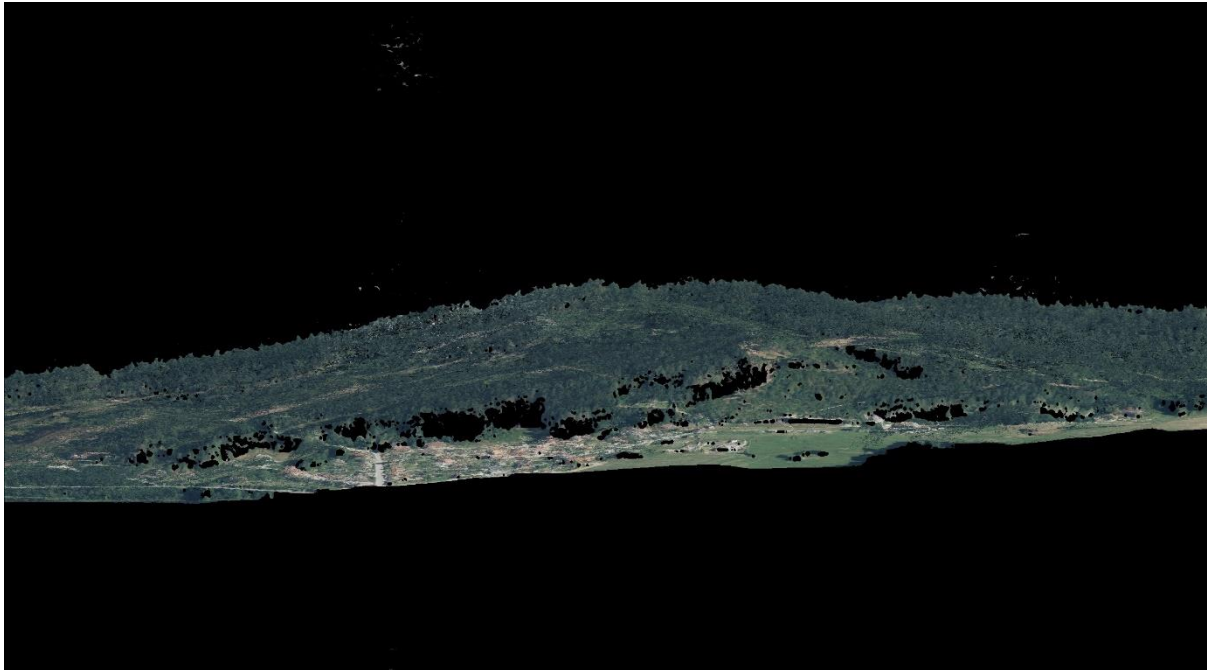


Abb. 3-6: *Durch eine Wolke verursachte Ausreißer in der Seitansicht (Parallelprojektion) einer einzelnen bDOM-Kachel. Ausreißer sind durch Punkte ober- und unterhalb der Oberfläche erkennbar.*

Fließgewässer

Gewässerflächen zählen zu den größten Problemflächen im bDOM. Die bewegte Oberfläche und homogene Farbe von Fließgewässerflächen führt durch Reflexionen zu unterschiedlichen Texturen in Basis- und Referenzbild. Die verwechselbare Struktur der reflektierenden Wellen verursacht dabei zahlreiche fehlerhafte Pixelzuordnungen. Im Oberflächenmodell drückt sich das durch außerordentlich unruhige Flächen aus. Im Beispiel der Donau bei Regensburg zeigt der Querschnitt (Rot-Grün markiertes Rechteck) eine Höhenschwankung von ca. 39 m. Die rote Linie zeigt die Sichtrichtung auf den Querschnitt (siehe Abb. 3-7).

Treffen zwei Fließgewässer unterschiedlicher Wasserfarbe zusammen, kann ein weiteres Problem auftreten. Als Beispiel wurde der Zusammenfluss von Donau und Inn bei Passau betrachtet (siehe Abb. 3-8). Hier zeigt sich, dass die Grenzfläche, die durch das Vermischen beider Gewässer entsteht, im Oberflächenmodell einen großflächigen Höhensprung innerhalb der Gewässerfläche verursacht. Dabei wurde ein Ausschnitt einer Visualisierung mit Höheneinfärbung in fünffacher Frequenz gewählt, das heißt dass sich die lineare Farbwiedergabe (Blau - Rot) über alle Höhenwerte vom minimalen bis zum maximalen Höhenwert des Oberflächenmodells fünfmal wiederholt. Durch die große Spannbreite an Ausreißern in diesem Gebiet des Oberflächenmodells wäre bei einer einfachen linearen Höheneinfärbung (Minima - Blau bis Maxima - Rot) nur wenig zu erkennen.

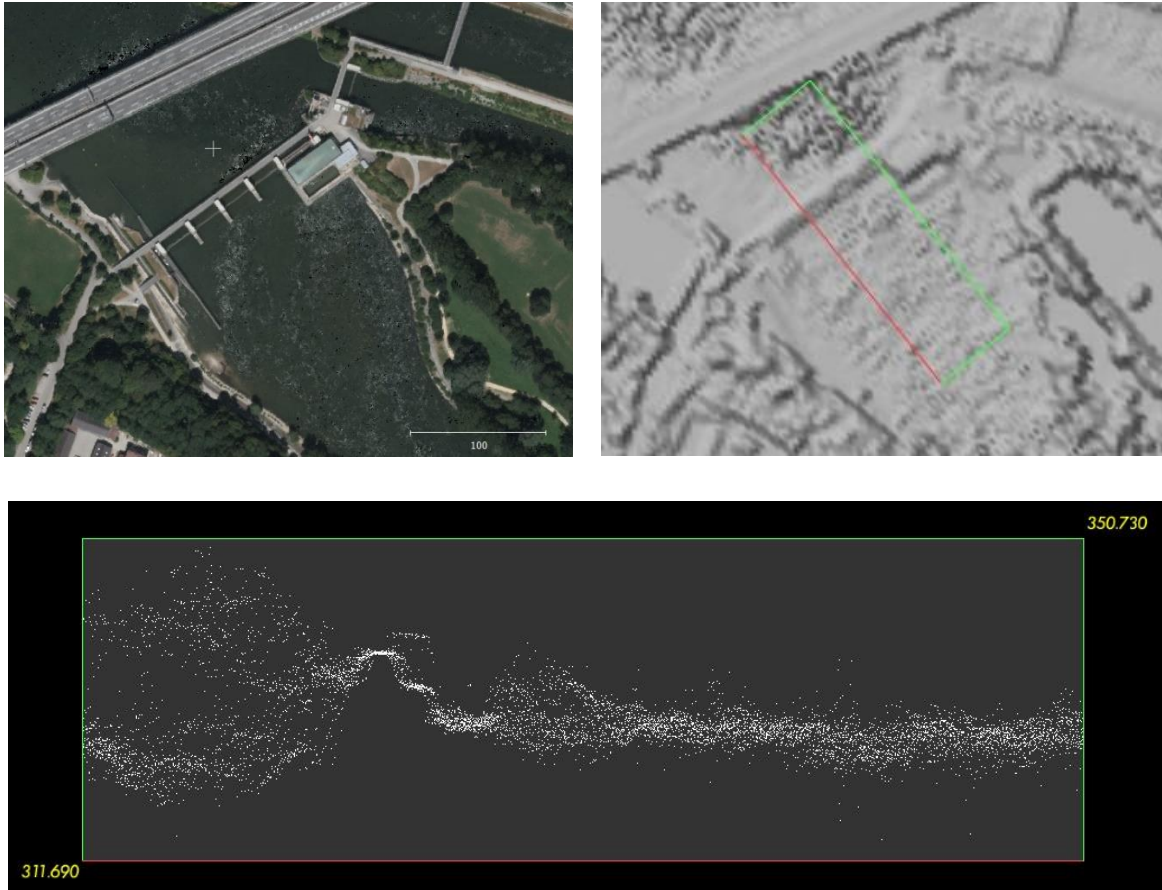


Abb. 3-7: Durch Fließgewässer verursachte Ausreißer. Donau bei Regensburg. Der im oberen rechten Bild markierte Bereich wird im unteren Bild im Querschnitt gezeigt.

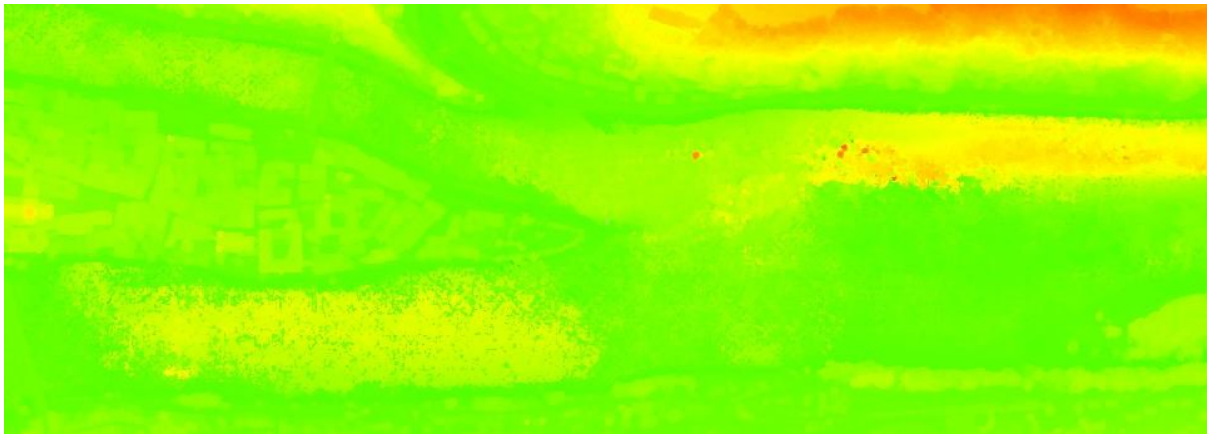
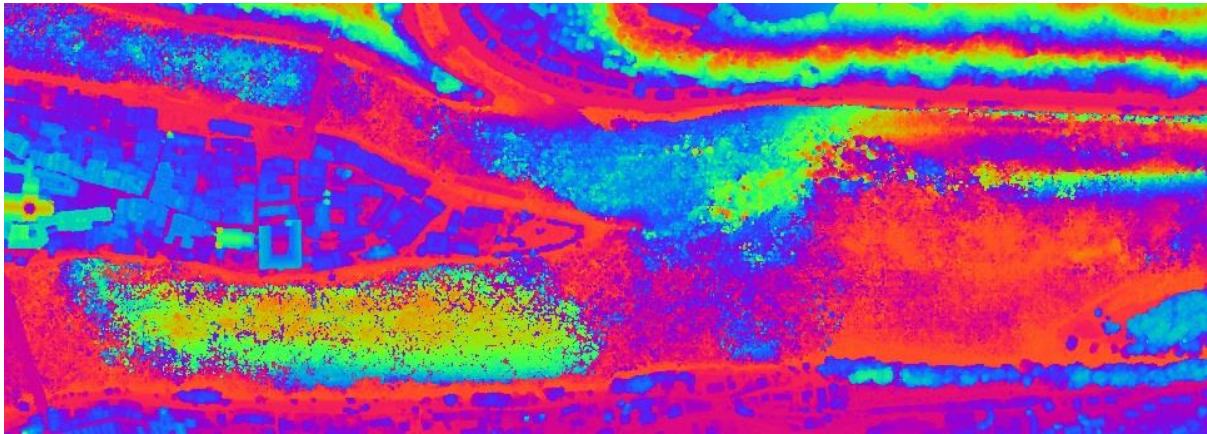


Abb. 3-8: Zusammenfluss von Donau und Inn. Von Oben nach Unten: RGB-Farben , Höheneinfärbung mit fünffacher Frequenz, Höheneinfärbung einfach.

3.1.1.3 Statische Objekte

Kleine Regionen

Grobe Ausreißer

Grobe Ausreißer⁶ sind markante fehlerhafte Höhengsprünge in ansonsten richtiger Modellgeometrie. Sie treten vereinzelt und nicht flächig auf. Ein konkreter Auslöser in den zugrundeliegenden Luftbildern konnte nicht ausgemacht werden. Häufig sind sie allerdings in unzureichend texturierten Flächen zu finden, wie etwa Baumschatten oder Baumkronen, Texturen, die in der Umgebung des Ausreißers häufig vorkamen. Ein fehlerhaft zugeordneter Pixel führt dann zu einem falschen Höhenwert.

Solche Höhengsprünge können im Extremfall mehrere hundert Meter betragen. Durch ihre sehr geringe Fläche sind sie im Oberflächenmodell schwer zu finden. Im Oberflächenmodell wurden meist Ausreißer nach unten (in negativer z-Richtung) gefunden. Ausreißer nach oben konnten meist anderen Fehlertypen zugeordnet werden.

Abbildung von Objekten am Rand der geometrischen Auflösung

Bei der Berechnung des Oberflächenmodells wird als feinste Auflösungsstufe die Pyramidenstufe Level 1 der Luftbilder genutzt. Die Bodenpixelgröße in dieser Stufe beträgt etwa 40 cm. Die feste Gitterweite von 40 cm des bDOM ergibt die wahre geometrische Auflösung des Modells. Filigrane Objekte wie Hochspannungsleitungen und Gitterstrukturen von Baukränen oder Hochspannungsmasten liegen am Rand des Auflösungsvermögens der zugrundeliegenden Luftbilder und resultieren in lückenhafter Darstellung der eigentlichen geometrischen Struktur (siehe Abb. 3-9).

Dadurch wird die Oberfläche weder mit allen darauf befindlichen Objekten vollständig abgebildet, noch werden Objekte unterhalb des Auflösungsvermögens komplett weggelassen. Hier muss sich erst noch zeigen, welche der beiden Varianten für den Endkunden attraktiver erscheint.

⁶ Engl. outlier



Abb. 3-9: Freileitungen des Stromnetzes. Links: Echtfarben; Rechts: Schräglightschummerung

Extreme Beleuchtung

Zu helle oder zu dunkle Objekte im Luftbild können radiometrisch nicht mehr hinreichend aufgelöst werden und erscheinen als homogen texturierte Fläche. Zuverlässige Bildkorrelation ist an diesen Stellen nicht mehr möglich (siehe Abb. 3-10). Dieser Fehler hängt damit vom Sonnenstand zum Aufnahmezeitpunkt sowie der Belichtungseinstellung des Fotos ab. Dazu zählen zum Beispiel überstrahlte weiße Flachdächer. Im extremsten Fall kommt es während der Aufnahme im Sensor zum Bleeding, bei dem die Ladung in einem Pixel des Kamerasensors durch Überstrahlung so hoch wird, dass sie auf Nachbapixel überspringt.



Abb. 3-10: Reflexionen im Luftbild. Links: DOP; Rechts: Streulicht-Visualisierung durch berechnete Umgebungsverdeckung (siehe Kap. 3.3.3)

Schattenwurf im Randbereich von Objekten kann die zugrundeliegende Textur ebenso verschlechtern. Auch auf Dächern kann sich die sonnenabgewandte Seite, beispielsweise bei einem Satteldach, durch zu homogene Texturierung bemerkbar machen.

Transparente Objekte

Die Erfassung der Oberfläche von transparenten Objekten kann, abhängig von der Beleuchtung, zu falscher Geometrie im bDOM führen. Beispiele für solche Objekte sind Bauwerke mit transparenten Dächern oder Gewächshäuser. Am Beispiel des berühmten Zeltdachs des Münchner Olympiastadions sieht man, wie das Dach je nach Winkel zum Sonnenstand durchsichtig wirkt oder die Struktur des Daches erkennbar ist. Im Ergebnis sieht man im Modell einen Versatz der eigentlichen Dachgeometrie nach unten.

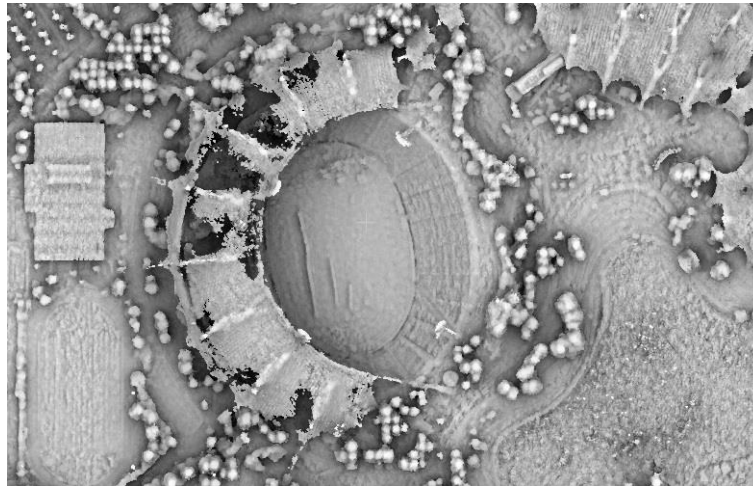


Abb. 3-11: *Das transparente Dach des Olympiastadions im bDOM. Darstellung als Streulicht-Visualisierung*

Geometriefehler durch die Objektform

Bei hohen Objekten wie Fernsehtürmen kann es zur unzureichenden Ermittlung der Objektgeometrie kommen (siehe Abb. 3-12). Dadurch, dass ein hoher Objektpunkt wie eine Turmspitze bei verschiedenen Aufnahmepositionen durch den Umklappungseffekt einer Zentralperspektive scheinbar über den Untergrund wandert, kann es zwischen Basis- und Referenzbild zu großen Disparitäten bei der Pixelzuordnung kommen. Der Disparitätswert gibt die Ungleichheit zwischen korrespondierenden Pixeln an. In der Bildkorrelation ergibt sich daraus die geometrische Höhe des Objektpunktes. Der Schluss liegt nahe, dass in solchen Fällen der ermittelte Disparitätswert vom Korrelationsalgorithmus als unrealistisch hoch abgelehnt wird.



Abb. 3-12: Der Nürnberger Fernsehturm als RGB-TIN in Schrägansicht

Große Regionen

Treppeneffekt

Bei diesem Fehler wird eine eigentlich glatt verlaufende Steigung im Gelände im Oberflächenmodell gestuft dargestellt.

Relatives Höhenrauschen bei dichter Bildkorrelation

Bei relativem Höhenrauschen im Oberflächenmodell handelt es sich um einen systematischen Fehler in der dichten Bildkorrelation. Dabei wird eine eigentlich ebene Fläche künstlich rau und uneben dargestellt. Dieser Fehler ist von den Berechnungsparametern der Bildkorrelation abhängig.

Als Beispiel dient die Einstellung "refined Disparity" (= verfeinerte Disparität) der Software SURE, die in zahlreichen Losen der bisherigen Testproduktion zum Einsatz kam. Sie soll den Treppeneffekt minimieren. Mit Disparität ist ein Wert gemeint, der die Ungleichheit korrespondierender Pixel wiedergibt. In der Bildkorrelation ergibt sich daraus die geometrische Höhe des Bildpunktes. Der Einsatz dieser Einstellung vermindert dabei zwar das Auftreten des Treppeneffekts, führt jedoch im ganzen Los zu künstlichen rauen Bodenstrukturen.

Homogene Texturen

Trübe oder tiefe Stehgewässer, bei denen der Gewässergrund keinen Einfluss auf die aus der Luft sichtbare Textur hat, bilden auf Luftbildern homogen texturierte Flächen. Bei der Bildkorrelation kommt es dabei zu fehlerhafter oder fehlschlagender Pixelzuordnung und damit zu Ausreißern und großflächigen Datenlücken (siehe Abb. 3-13).

Handelt es sich bei dem Stehgewässer um sehr große Seen, bildet die Sonnenreflektion auf dem Wasser ein weiteres Problem. In dem Fall kann die Sonnenreflexion auf dem Wasser bei Nachbarbildern eines Flugstreifens immer in den gleichen Bildkoordinaten stehen. Mit zunehmender Uferentfernung scheitert die Bildkorrelation und verursacht große Datenlücken im Modell, die nicht mehr durch Interpolation aufgefüllt werden.



Abb. 3-13: Kacheln des bDOM am Chiemsee in Nadir-Ansicht.

Regelmäßig strukturierte Texturen

Auch regelmäßige und wiederholende Strukturen in Bildtexturen bieten die Gefahr von falscher Bildkorrelation. Wird in einer Textur des Luftbilds das Helligkeitsmuster einer Pixelnachbarschaft oft wiederholt, kann der Korrelationsalgorithmus falsche homologe Pixel zuordnen. Gefährdete Flächen sind beispielsweise landwirtschaftliche Flächen mit Ackerfurchen oder große Photovoltaikanlagen.

Am Beispiel des Solarparks Bavaria wurden Auswirkungen betrachtet. Dabei fiel ein Höhenversatz in einer der beiden Anlagenflächen auf, der in zwei Stufen auftrat. Es handelte sich um die engere und feinere Struktur der beiden Solarflächen (siehe Abb. 3-14). In der Schrägansicht (siehe Abb. 3-15) ist der entstandene Höhenversatz klar erkennbar.

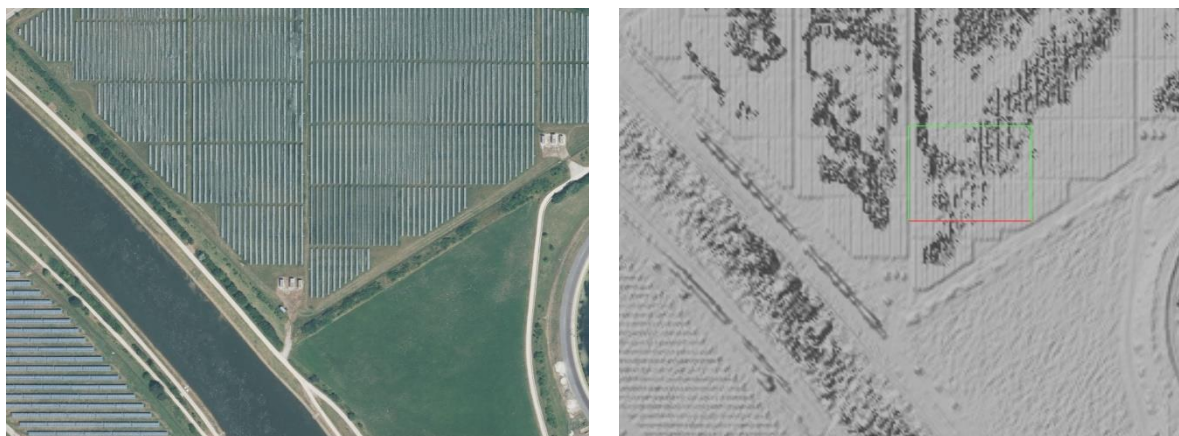


Abb. 3-14: Solarfläche des Solarparks Bayern. Rechts: Schummerungsansicht

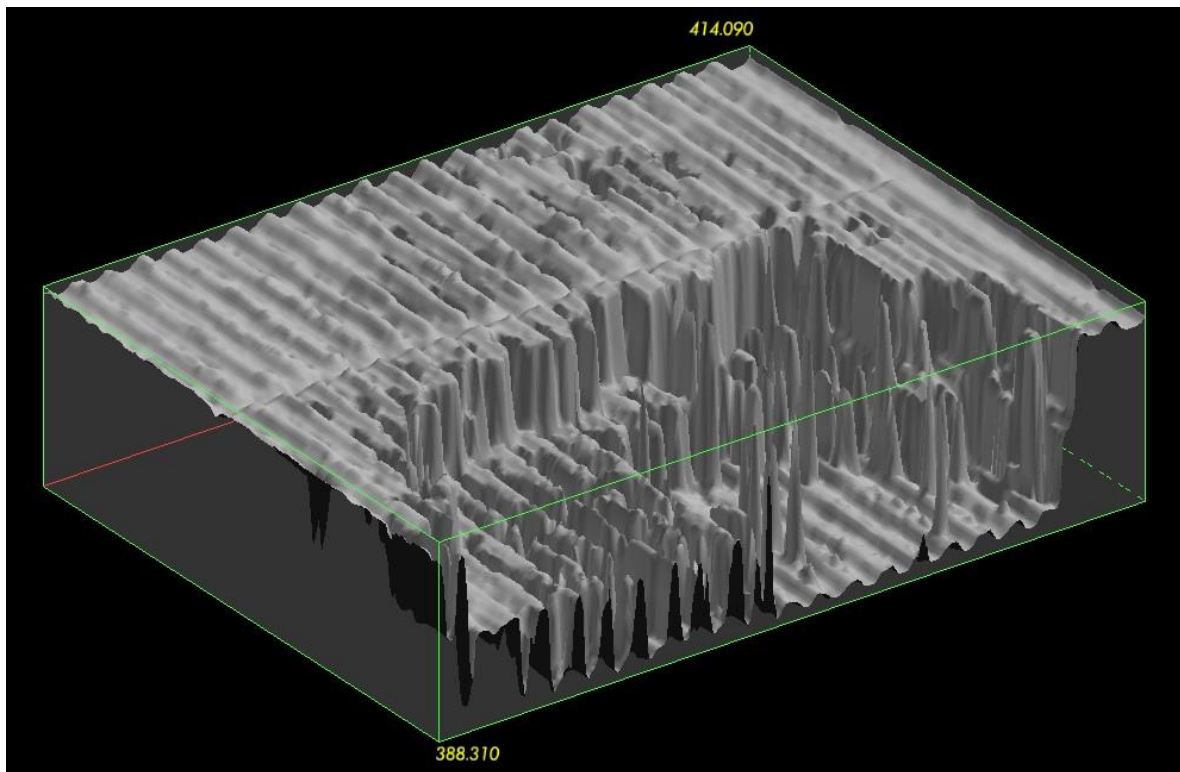


Abb. 3-15: Der in Abb. 3-14 markierte Bereich in Schrägbildansicht.

3.1.2 Amtliche Qualität beim Produkt bDOM

Die Frage nach kontrollierbaren Qualitätsmerkmalen schließt die Fragestellung mit ein, wie amtliche Produktqualität im Falle des bDOM zu definieren ist. Noch befindet sich das bDOM in einer Testproduktionsphase und wird als Produkt noch nicht auf dem Markt angeboten. Deswegen gibt es noch kein Kundenfeedback, dass beim Festlegen der gewünschten Produktqualität berücksichtigt werden könnte. In Zukunft kann bei einer Anpassung des Produkts an Kundenwünsche eine Änderung der Produktdefinition sinnvoll werden.

Vor dem Aufstellen der Produktdefinition sollen noch Empfehlungen und Vorgaben zweier Institutionen zu digitalen Höhenmodellen betrachtet werden.

INSPIRE:

Die "Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE) ist das Vorhaben der Europäischen Kommission für eine gemeinsame Geodateninfrastruktur in Europa." (GDI-DE: <http://www.geoportal.de/DE/GDI-DE/INSPIRE/inspire.html?lang=de>).

Diese Initiative veröffentlichte 2013 technische Richtlinien zur Datenspezifikation von Höhendaten⁷.

Darin werden verschiedene Elemente der Datenqualität für Höhenwerte in einem Gitterdatensatz genannt (INSPIRE Thematic Working Group Elevation 2013: S.84f):

- Vollständigkeit der Daten („Completeness“)
- Logische Konsistenz („Logical consistency“)
- Positionsgenauigkeit („Positional accuracy“)

Weiter wird empfohlen, die Evaluierung eines dieser Qualitätselemente, welche nicht quantitativ ausgedrückt werden kann, durch textliche Aussagen zu beschreiben. ("Where it is impossible to express the evaluation of a data quality element in a quantitative way, the evaluation of the element should be expressed with a textual statement as a data quality descriptive result." ,S. 85)

Zu Zielergebnissen der minimal anzustrebenden Datenqualität werden Empfehlungen gegeben (S.94):

- Vollständigkeit der Daten mit einer Fehlerquote von 0 %
- Logische Konsistenz mit einer Fehlerquote von 0 %
- Vertikale Positionsgenauigkeit: Maximaler RMSE = GSD / 3
- Horizontale Positionsgenauigkeit: Maximaler RMSE = GSD / 6

Dabei muss beachtet werden, dass es sich allgemein um Empfehlungen zu Höhendatensätzen handelt. Auf die Art der zugrundeliegenden Berechnungsmethode wird keine Rücksicht genommen.

DIN Entwurf 18740-6: Anforderungen an digitale Höhenmodelle (Ausgabedatum Oktober 2013):

"Diese Norm gilt für die Ableitung von digitalen Höhenmodellen, die auf der Grundlage von flugzeug-beziehungsweise satellitengestützten Erfassungsmethoden hergestellt werden." (Normenausschuss Bauwesen im DIN 2013: S. 6) Laut dem Normentwurf muss ein digitales Oberflächenmodell eine Modellierungsgenauigkeit aufweisen, die in Abhängigkeit von Genauigkeitskriterien und dem Anwendungszweck neben relevanten Geländestrukturen auch detailliert Gebäude- und Vegetationsstrukturen abbildet (S. 22).

Die Qualität von digitalen Höhenmodellen setzt hier sich zusammen aus (S. 22):

- Modellgenauigkeit
- Punktdichte
- Vollständigkeit
- Inhaltlicher Genauigkeit
- Fehlerbehandlung

⁷ INSPIRE *Data Specification on Elevation - Technical Guidelines*

Der Entwurf fordert, aus einem digitalen Höhenmodell grobe und systematische Fehler zu entfernen, die zu einer Abweichung von der beschriebenen Höhengenaugkeit führen. Verbleibende zufällige Fehler sollen die Genauigkeit nicht im Rahmen einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % beeinflussen. (Normenausschuss Bauwesen im DIN 2013: S. 22) Zur Kontrolle der absoluten Genauigkeit sollen kleine, im Gesamtgebiet verteilte Kontrollflächen mit dem digitalen Höhenmodell verglichen werden, die eine um den Faktor 3 höhere Genauigkeit als die zu untersuchenden digitalen Höhenmodelle besitzen (S. 23).

Zusätzlich erwähnt der Normenausschuss Bauwesen in seinem Entwurf eine Reihe von Visualisierungsmethoden für digitale Höhenmodelle vor, mit denen die flächenhafte Qualität beurteilt werden kann, um grobe Fehler, Artefakte und Datenlücken zu erkennen, u.a. (S.25):

- 2D-Plot farbcodierter Höhenmodelle
- Perspektivansichten mit farbcodierten Höhenwerten
- Profile mit farbcodierten Höhenwerten
- Shaded Relief
- Differenzhöhenmodelle

Amtliche Qualität beim bDOM von Bayern

Um nun eine Definition der amtlichen Qualität im Falle des bDOM von Bayern zu finden, müssen bisherige Fehleruntersuchungen, vorgestellte Entwürfe zum Datenmodell öffentlicher Stellen, sowie die Produktdefinition des bDOM, wie sie im Landesamt vorliegt, berücksichtigt werden.

Die Produktdefinition des bildhaften digitalen Oberflächenmodells von Bayern enthält folgende Punkte (LDBV 2014: S. 4ff):

- Das Oberflächenmodell entsteht im Zyklus der Bayernbefliegung, parallel zur Produktion des digitalen Orthophotos. Das bedeutet, dass im aktuellen 3-Jahres-Zyklus jedes Jahr für 23 bis 30 Lose das Oberflächenmodell aus Luftbildern berechnet werden muss. Die Qualitätssicherung muss demnach in diesem Produktionstempo möglich sein.
- Das Oberflächenmodell wird aus redundanten Single-Stereo-Punktwolken fusioniert. Single-Stereo-Punktwolken werden aus der Bildkorrelation von Basis- mit Referenzbild erstellt. In diesem Modus wird die Bildkorrelation nur in eine Richtung ausgeführt, das heißt, dass ein Bildpaar Basisbild A - Referenzbild B nur einmal zur Bildkorrelation genutzt wird. Es findet keine zweite Bildkorrelation mit vertauschtem Bildpaar, also Basisbild B - Referenzbild A, statt. Diese redundante Korrelation kann zwar zu weiteren redundanten Punktdaten führen, wird aber zur Einsparung von Rechenzeit aktuell nicht vorgenommen.
- Das bildbasierte Oberflächenmodell wird flächendeckend als 2,5 D Modell erstellt, mit einer festen Gitterweite von 40 cm. Das führt pro Quadratmeter zu 6,25 Punkten. Die Abgabe

erfolgt in 1 x 1 km großen Kacheln. Bei einem 2,5 D Modell hat jeder durch x und y definierte Punkt nur einen eindeutigen Höhenwert (z-Wert). Aus mathematischer Sicht bedeutet das:

$$f(x, y) = z$$

- Datenlücken im Modell werden geometrisch und radiometrisch interpoliert
- Die Speicherung erfolgt als Punktwolke im laz-Format. Für jeden Punkt werden neben x-, y-, und z-Wert die Farbinformationen des Punktes für die Kanäle Rot, Grün und Blau gespeichert.

An dieser Stelle möchte der Autor zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten des bDOM-Produkts empfehlen, in Zukunft zusätzlich die Speicherung des Nahinfrarotkanals für jeden Oberflächenpunkt in Betracht zu ziehen. Seit der aktuellen Version 1.4 des laz-Dateiformats sind für den NIR-Kanal 2 byte pro Punkt reserviert. In der verwendeten Version 1.2 können die 2 byte des Intensitätskanals für die Speicher der NIR-Farbwerte genutzt werden.

Nun können Qualitätsmerkmale für das bildbasierte digitale Oberflächenmodell festgelegt werden (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Qualitätsmerkmale des bDOM

Qualitätsmerkmal	Untersuchte Daten	Maß
Vollständigkeit der geometrischen Daten	Gemessene Gesamtpunkanzahl	Gesamtanteil fehlender Punkte
Vollständigkeit der radiometrischen Daten	Punktdatei ohne Farbwert	Gesamtanteil fehlender Punkte
Logische Konsistenz des Oberflächenmodells	Fehler in der Objektgeometrie	Gesamte Fehleranzahl
relative Höhengenaugigkeit	Höhenpunkte	Maximale Streuung 2*GSD
absolute Höhengenaugigkeit	Testflächen und unabhängige Referenzdaten	Abstand zu Referenzdaten

Vollständigkeit

In der Produktdefinition wird die Vollständigkeit der Daten gefordert. Datenlücken werden durch Interpolation während der Produktion automatisch geometrisch und radiometrisch gefüllt. Die Überprüfung kann durch Messung der Gesamtpunkanzahl erfolgen. Damit können jedoch keine

geometrisch korrekten Punkte mit fehlenden Farbwerten identifiziert werden. Diese können durch optische Betrachtung der Daten gefunden werden.

Logische Konsistenz des Oberflächenmodells

Falsche Abbildungen von Objekten im Oberflächenmodell äußern sich als Ausreißer in den Punktdaten. In Kapitel 3.1.1. wurden zahlreiche Fehlertypen verschiedener Ursache vorgestellt. Die Anzahl solcher Fehler in der Objektgeometrie lässt sich theoretisch quantitativ messen. In der Praxis ist abzusehen, dass eine quantitative Erfassung aller Fehler jedoch nicht wirtschaftlich ist, da keine automatischen Messmethoden zur Verfügung stehen.

Relative Höhengenaugkeit

Die relative Höhengenaugkeit bezieht sich auf die Genauigkeit der Höhenwerte innerhalb des bDOM zueinander und ist das Resultat der dichten Bildkorrelation.

Als Maß für die relative Höhengenaugkeit bietet sich ein fester Multiplikator der zugrundeliegenden GSD an, um ein Streuungsmaß zu finden. Die GSD des bDOM wird durch die Gitterweite von 40 cm bestimmt. Vorgeschlagen wird hier vom Autor der Multiplikator 1. Nimmt man den Multiplikator 2, führt das zu einer maximalen relativen Höhenstreuung von $2 \times 40 \text{ cm} = 80 \text{ cm}$.

Betrachtet man ein ebenes Testgebiet im bDOM, lassen sich statistische Werte für die Verteilung aller enthaltenen Höhenwerte berechnen. Geeignet erscheinen:

- Minimum
- Maximum
- Durchschnitt
- Median
- 1. Perzentil
- 99. Perzentil

Mit diesen Werten lässt sich eine messbare Aussage zum Streuungsmaß der relativen Höhengenaugkeit für Testgebiete im Oberflächenmodell treffen. Die Berechnung kann als Nebenprodukt zur Zeitersparnis mit den Testflächen aus der Kontrolle der absoluten Höhengenaugkeit (Kap. 3.3.1) erfolgen.

Absolute Höhengenaugkeit

Die absolute Höhengenaugkeit des bDOM resultiert aus der zur Berechnung verwendeten Datengrundlage, den orientierten Luftbildern. Die Orientierung der Luftbilder entscheidet über die absolute Höhe des bDOM, die absolute Höhengenaugkeit wird sozusagen an das bDOM weitervererbt.

Um eine eigene Aussage zur absoluten Höhengenaugkeit treffen zu können, werden unabhängige Kontrollpunkte benötigt, die nicht in die Orientierung der Luftbilder einfließen. Im Idealfall liegen solche Kontrollpunkte in großer Anzahl und möglichst gleichmäßig verteilt vor. Kap. 3.3.1 stellt eine Kontrolle anhand der DGM1 Daten des LDBV vor.

3.2 Qualitätssteuerung

Die Qualitätssteuerung "beinhaltet die Vorgabe der Produkt- und Ausführungsanforderungen sowie die Überwachung der Erfüllung dieser Anforderungen bei der Leistungserstellung mit ggf. erforderlichen Korrekturen." (Quelle Gabler) Die Produkthanforderungen des bDOM werden durch die Produktdefinition und Qualitätsmerkmale bestimmt.

Die Ausführungsanforderungen ergeben sich aus der Benutzung und Einstellung der verwendeten Software SURE, deren Einsatz den gesamten Produktionsablauf darstellt. Die Erstellung eines bildbasierten Oberflächenmodells von gleichbleibender Qualität macht ebenso gleichbleibende Berechnungsparameter erforderlich. Durch eine detaillierte Dokumentation der aktuellen Einstellungsparameter lässt sich deren wiederholte Ausführung erst überwachen.

Bei der bDOM-Erstellung handelt es sich momentan noch um eine Testproduktion. Um den Mitarbeitern das Finden möglichst optimaler Berechnungsparameter zu erleichtern, erscheint es während dieser Phase noch nicht sinnvoll, auf die wiederholte exakte Einhaltung aller Berechnungsparameter zu bestehen. Die Dokumentation ist in der Testproduktion sinnvoll, um Verbesserungen nachvollziehbar festzuhalten.

Die Dokumentation erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt müssen die verwendeten Berechnungsparameter erfasst werden. Die Berechnungsparameter werden vor dem Start des Berechnungsprozesses in sogenannten Control Files editiert. Dabei handelt es sich um einfache Textdateien, aus denen zum Programmstart alle Einstellungen ausgelesen werden. Diese Dateien werden nach der Berechnung nicht gelöscht. Sie verbleiben im Projektordner und sind so jedem berechneten Los komplett zuzuordnen.

Im zweiten Schritt werden allgemeine Daten zur Berechnung jedes Loses nach Prozessende gesammelt werden. Dazu gehören:

- Losname
- Losgröße in km²
- verwendete Softwareversion
- Datum des Berechnungsstarts
- Datum des Berechnungsendes
- benötigte Rechenzeit

- kompletter benötigter Speicheraufwand für das Oberflächenmodell inklusive aller rohen Punktwolken
- Speicherbedarf für alle Kacheln des Oberflächenmodells

Diese Daten werden bis auf den Speicherbedarf der bDOM-Kacheln bereits zentral in einer Excel-Tabelle erfasst. Diese Dokumentation soll den Mitarbeitern als Mittel zur Verfügung stehen, um ihr Vorgehen direkt vor dem Beginn der Berechnung zu überprüfen. Mit Überwachung der Rechenzeit und Eckdaten der Berechnung können direkt nach der Prozessierung Unregelmäßigkeiten auffallen. Als zusätzliche Unterstützung sollen diese Daten zukünftig auch in einem Prüfprotokoll nach der Prozessierung erfasst werden.

Die Überwachung während der bDOM-Berechnung ist nur eingeschränkt möglich, da es sich nicht um einen klassischen Herstellungsprozess handelt, bei dem Produkte während der Fertigung entnommen werden können. SURE bietet die Option, während der Bildkorrelation ein Disparitätsbild für jedes korrelierte Bildpaar anzuzeigen. Dadurch könnten Fehler im Oberflächenmodell frühzeitig auffallen. Allerdings ist die Anzeigedauer zur detaillierten Betrachtung zu kurz. Die Überwachung während der Modellberechnung erscheint zudem wirtschaftlich nicht sinnvoll, da Eingriffe in den Prozess ohnehin nicht möglich sind.

Zur Qualitätssteigerung sind immer wieder Änderungen der Produktionsparameter notwendig. Dafür kann ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) in den Produktionsablauf integriert werden. "KVP ist ein Grundprinzip des Qualitätsmanagements und unverzichtbarer Bestandteil der ISO 9001." (http://de.wikipedia.org/wiki/Kontinuierlicher_Verbesserungsprozess). Ein möglicher Ablauf lässt sich durch den von W.E. Deming entwickelten PDCA-Zyklus darstellen. PDCA steht hier für die englischen Begriffe Plan - Do - Check - Act (<http://de.wikipedia.org/wiki/Demingkreis>):

- **Plan:** Das Verbesserungspotenzial in der standardisierten Produktionsausführung wird erkannt und ein Vorschlag eines Verbesserungskonzepts erstellt.
- **Do:** Das Konzept wird im kleinen Rahmen für ein Testgebiet ausgeführt.
- **Check:** Das Resultat wird überprüft und bei Erfolg für die eigentliche Hauptproduktion freigegeben.
- **Act:** Das Verbesserungskonzept wird in die Hauptproduktion integriert und festgeschrieben. Damit wird ein neuer Standard für die Ausführungsanforderungen festgelegt.

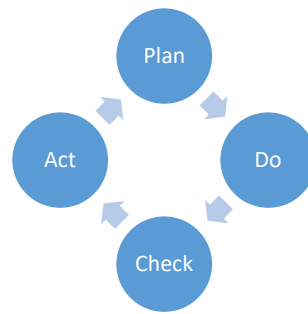


Abb. 3-16: KVP-Zyklus nach W.E. Deming

"Voraussetzung ist der Wille der Geschäftsführung, Ergebnisse aus der KVP unmittelbar umzusetzen (...)", sowie die mit der Produktverbesserung betrauten Mitarbeiter "zur direkten Umsetzung ihrer Ideen zu ermächtigen". Dafür ist ein Arbeitsklima nötig, das fortwährende Kommunikation und Ideenaustausch unterstützt. (http://de.wikipedia.org/wiki/Kontinuierlicher_Verbesserungsprozess)

3.3 Qualitätskontrolle und deren Machbarkeit

Im Folgenden sollen nun verschiedene Methoden der Qualitätskontrolle vorgestellt werden, die auch auf Ihre Wirtschaftlichkeit hin beleuchtet werden. Allgemein lässt sich anmerken, dass eine Steigerung der Genauigkeit der Methoden häufig mit einer Steigerung der dadurch verursachten Kosten einhergeht. In der Forschung ist die oberste Priorität die Genauigkeit der Qualitätskontrolle. In der Produktionspraxis ist dagegen die Wirtschaftlichkeit der Kontrollmethoden ausschlaggebend.

3.3.1 Exemplarischer Vergleich mit Referenzdaten

Hier soll exemplarisch für das bildbasierte Oberflächenmodell eines Loses durch den Vergleich mit Referenzdaten eine messbare Aussage über dessen Höhengenaugigkeit getroffen werden.

Referenzdaten sollen unabhängig vom bDOM sein, also nicht für die Orientierung der Datengrundlage (orientierte Luftbilder) verwendet worden sein. „Die Kontrollpunkte dürfen nicht in weiteren qualitätsverbessernden Schritten der Modellgenerierung zum Einsatz gebracht werden.“ (Normenausschuss Bauwesen im DIN 2013: S. 23). Idealerweise sollen sie in großer Anzahl und gleichmäßiger Verteilung vorliegen.

Im Innen- oder Aussendienst eingemessene Passpunkte eignen sich hier nur eingeschränkt, da für jeden schon bekannten Passpunkt belegt werden müsste, dass er nicht mit in die Berechnung der Orientierung einfluss. Müssen zusätzliche Passpunkte vermessen werden, ist die Anforderung vieler Punkt mit gleichmäßiger Verteilung mit hohem Aufwand verbunden und daher nicht wirtschaftlich umsetzbar.

Als Referenzdatensatz bietet sich jedoch das digitale Geländemodell von Bayern an. Es ist unabhängig durch Airborne Laserscanning vermessen, ist für das LDBV verfügbar und liegt mit einer Punktdichte von mindestens einem Punkt pro Quadratmeter flächendeckend für ganz Bayern vor. Die Höhengenaugkeit des DGM gibt Joseph Dorsch et al. folgendermaßen an: „Für 95% der Laserpunkte darf der mittlere Höhenfehler in ebenem oder gleichmäßig geneigtem Gelände den Wert von $\pm 0,08$ m nicht überschreiten.“ (Dorsch, J., Fischer, A., Hahn, T. u.a. (2011): S. 138).

Der Vergleich wurde exemplarisch am bDOM des Loses München durchgeführt. Es ist 1000 km^2 groß und besteht aus 1000 einzelnen Kacheln. Um eine Aussage für die Höhengenaugkeit des gesamten Loses treffen zu können, wurden 5 Testgebiete von jeweils 1 bis 2 km^2 im Los ausgesucht. Dabei wurde darauf geachtet, das jeweils sich jeweils ein Testgebiet am oberen, unteren, rechten und linken Rand des Loses befindet sowie eines möglichst in der Mitte des Loses (siehe Abb. 3-17). Die Testgebiete wurden danach ausgewählt, ob sich geeignete Testflächen darauf befinden. Testflächen sollen möglichst eben, groß und frei von Oberflächenobjekten sein, die sich nicht im Geländemodell befinden. Straßen kommen daher kaum in Frage, da im bDOM nur schwer erkennbar ist, ob an einer bestimmten Position Fahrzeuge in die Oberflächenberechnung eingingen.

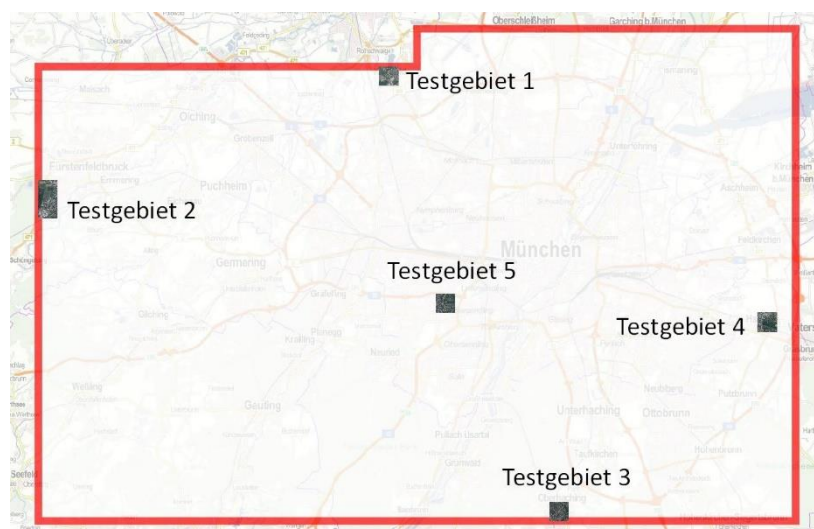


Abb. 3-17: Übersicht über die Testgebiete zur Höhenkontrolle im Los München

Gesucht wurden Testgebiete in Digitalen Orthophotos, die von einem Webmapping-Server in der Software QGIS betrachtet wurden. Durch die höhere Bodenpixelgröße von 20 cm sind störende Objekte darin besser zu identifizieren. Kam innerhalb eines Testgebietes eine Testfläche in Frage, wurde sie über der eingeblendeten orthogonalen Parallelprojektion des bDOM als Polygon erfasst.

Daraus wurden nun zwei getrennte Sätze von Testflächen gebildet und als Polygone in jeweils einer Shape-Datei gespeichert. Der erste Satz nutzt ausschließlich die Mitte von Fußballplätzen, aufgestellte Tore wurden nicht in die Testfläche mit aufgenommen (siehe Abb. 3-18). Sie haben bei nachfolgenden Messungen den Nachteil, das weder die Höhe des Wiesenbewuchses bekannt ist, noch lässt sich

zweifelsfrei feststellen, ob Kuhlen oder Erhebungen in der Wiese vorkommen. Vorteilhaft ist, dass jede Testfläche mit durchschnittlich 150 m² relativ groß ausfällt.

Der zweite Satz von Testflächen enthält sowohl Hartplätze als auch Parkplatzflächen. Um keine umliegenden Oberflächenobjekte mit einzubeziehen, sind die Flächen relativ klein (siehe Abb. 3-19). Sie haben jedoch den Vorteil, dass keine Vegetation die Oberflächenhöhe beeinflusst.



Abb. 3-18: Markierte Testflächen (Fußballplätze) im jeweiligen Testgebiet. Von links nach rechts: Testgebiet 1-5



Abb. 3-19 Markierte Testflächen (Hart- und Parkplätze) im jeweiligen Testgebiet. Von links nach rechts: Testgebiet 1-5

Mit den Polygonen wurde nun jede Testfläche aus dem bDOM und DGM ausgeschnitten. Durch den Abzug der Geländehöhe des DGM von der Oberflächenhöhe des bDOM ergibt sich das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM) für jede Testfläche. Mit dem Tool lascanopy wurde das normalisierte Oberflächenmodell jeder Testfläche statistisch ausgewertet:

Folgende Größen wurden für die Verteilung der Höhenwerte ermittelt:

- Minimum [m]
- Maximum [m]
- Durchschnitt [m]
- Standardabweichung [m]
- 50. Perzentil (P50) [m]
- Gesamtpunktzahl

Tabelle 3-2: Ergebnisse für Testflächen (Fußballplätze)

Testgebiet	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Standardabweichung	P50	Punktzahl
1	-0.3001	0.3859	0.1452	0.085	0.1599	34449
2	0.2339	0.8819	0.5083	0.1047	0.4899	32543
3	0.1941	0.7659	0.4207	0.0632	0.4221	17305
4	-0.2139	0.4579	0.0682	0.1303	0.0359	31175
5	0.1341	0.5719	0.3318	0.0691	0.3299	32156

Tabelle 3-3: Ergebnisse für Testflächen (Hart- und Parkplätze)

Testgebiet	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Standardabweichung	P50	Punktzahl
1	0.0421	0.3279	0.188	0.0561	0.1919	2955
2	0.2319	0.7939	0.6054	0.1441	0.6679	731
3	0.2139	0.4561	0.3539	0.0414	0.3579	2037
4	0.0679	0.3201	0.2283	0.0325	0.2301	485
5	0.3426	0.5601	0.4733	0.0349	0.4759	1094

Nicht unerwartet ist die ungleich höhere Punktzahl der Testflächen auf Fußballplätzen. Vergleicht man die ermittelten Durchschnittswerte von Fußball- und Hartplätzen aus dem jeweils gleichen Testgebiet liegen diese erwartungsgemäß fast durchgehend in ähnlichen Bereichen. Auffällig sind die fast durchweg niedrigeren Standardabweichungen bei den Hartplätzen. Weiterhin sticht Testgebiet 2 mit dem höchsten Durchschnittswert in beiden Testfällen heraus, was auf einen Höhenversatz des bDOM am linken Losrand hindeutet.

Das Verfahren lässt sich hinreichend zügig anwenden und eignet sich dadurch zur Kontrolle jedes Loses. Zur Verfeinerung des Ergebnisses können noch mehr Testgebiete genutzt werden. Mit minimal fünf Testflächen lässt sich jedoch schon eine abschätzende Aussage zur Höhengenaugigkeit für das gesamte Los treffen. Fussballplätze erscheinen mir wegen der höheren Punktzahl als die geeigneten Kontrollflächen.

3.3.2 Bewertung globaler Kontrollmöglichkeiten

Als globale Kontrollmöglichkeiten sollen Methoden bezeichnet werden, die auf das bDOM eines gesamten Loses angewendet werden können. Durch Kontrolle des kompletten bDOM kann eine verlässliche Aussage zu inhaltlichen Fehlern getroffen werden.

Ich unterscheide zwischen qualitativen Kontrollmöglichkeiten, als Methoden, die die manuelle optische Kontrolle durch einen Mitarbeiter umfassen, und quantitativen Kontrollmöglichkeiten, die automatisch oder halbautomatisch mit Softwarehilfe durchgeführt werden und numerische Ergebnisse haben.

Die optische manuelle Kontrolle aller Punktdaten mit einem Betrachtungsprogramm für Punktwolken durch einen Operateur ist durch Ladezeiten der Daten recht zeitintensiv und wird zur kompletten Kontrolle eines Loses nicht berücksichtigt. Das bDOM eines Loses mit 1.000 km² enthält 1.000 * 6.250.000 Höhenwerte. Alle Daten gleichzeitig zur Ansicht in ein Betrachtungsprogramm zu laden ist durch zu hohen Rechen- und Arbeitsspeicheraufwand nicht möglich. Der Zeitaufwand, alle Kacheln eines Loses als Punktdaten einzeln zu untersuchen, erscheint ebenso unwirtschaftlich.

3.3.2.1 Qualitative Kontrollmöglichkeiten

Manuelle Sichtprüfung (Echtfarbansicht, Höheneinfärbung, Schummerung)

Zur manuellen Sichtprüfung erwiesen sich verschiedene Visualisierungen der Kacheln eines Loses sinnvoll. Die Auslegung der Ergebnisse der Sichtkontrolle hängt von Wissen und Erfahrung des Operateurs ab. Alle vorgestellten Visualisierungen wurden als orthogonale Parallelprojektionen jeweils einer Kachel mit dem Tool "blast2dem" erstellt, das in der Software LAStools enthalten ist. Das Tool erstellt eine Dreiecksvermaschung (TIN = Triangulated Irregular Network) aller Punktdaten, berechnet die gewünschte Farbgebung und speichert das Ergebnis als Bilddatei in einem gewünschten Format wie JPEG ab. Da die Bilddateien georeferenziert sind, können sie in ihrer Gesamtheit in einer GIS-Software betrachtet werden.

Echtfarbansicht

Die Darstellung der Kachelinhalte in Echtfarben mit den Kanälen Rot, Grün und Blau kann bereits zahlreiche Fehler aufdecken. Schwarze Flächen in der Landschaft deuten auf fehlende Höhenwerte oder fehlende Farbinformationen der Punktdaten hin (siehe Abb. 3-20). Verwaschene oder unscharf wirkende Farbfelder im Bild lassen auf interpolierte Flächen schließen. Interpolierten Flächen liegt immer ein Fehlen von gemessenen Daten in der Bildkorrelation zugrunde. Scharf abgegrenzte Farbpunkte und -flächen in Gewässern können auf Ausreißer hinweisen.

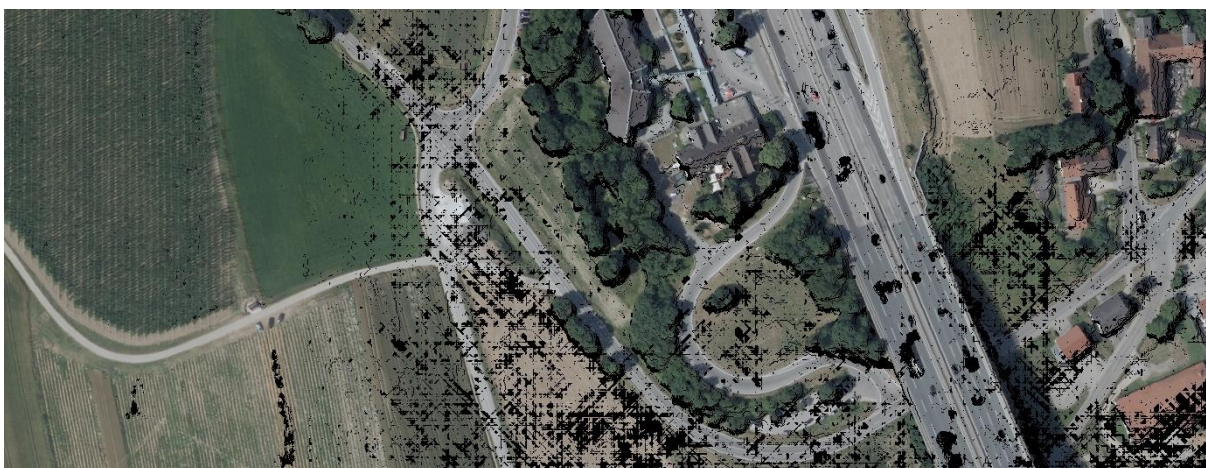


Abb. 3-20: Echtfarbansicht des bDOM als orthogonale Parallelprojektion. Die Interpolation ist erkennbar lückenhaft.

Die natürliche Farbgebung täuscht jedoch fälschlicherweise vor, dass alle Höhenänderungen des Oberflächenmodells durch Farbänderungen erkennbar sind. Die Farbwerte der Punktdaten stammen nicht aus der eigentlichen Bildkorrelation, sondern werden in einem zweiten Rechenschritt aus den Farbwerten der orientierten Luftbilder interpretiert. Die Radiometrie lässt also keinen sicheren Rückschluss auf die Geometrie zu. Besonders auffällig wird das bei dynamischen Objekten im Bild. Fahrzeuge, die farblich korrekt wiedergegeben werden, sind nicht zwingend im Oberflächenmodell korrekt vorhanden.

Höheneinfärbung

Bei der Höheneinfärbung erhält jeder Bildpunkt einen Farbwert entsprechend seiner Höhe. Der verwendete Farbverlauf ist Blau - Grün - Gelb - Rot, wobei die Farbwerte linear von Blau (Minimaler Höhenwert) nach Rot (Maximaler Höhenwert) verteilt sind. Damit lässt sich in der orthogonalen Parallelprojektion das Oberflächenmodell der Kachel betrachten. Fehlerhafte Objektgeometrie lässt sich gut identifizieren. Eingeschränkt gilt das auch für grobe Ausreißer der Höhendaten, falls sie gehäuft vorkommen, wie etwa in Gewässerflächen. Kommen nur einzelne Ausreißer vor, sind sie in der Höheneinfärbung aufgrund der geringen Fläche von wenigen Pixeln nur schwer auszumachen.

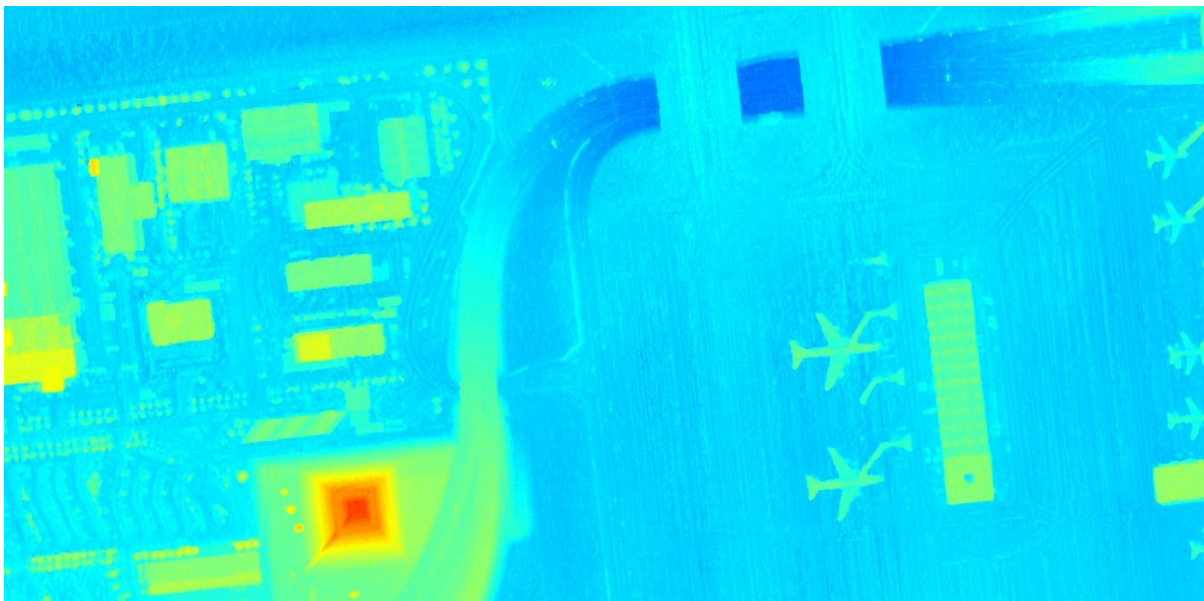


Abb. 3-21: Höheneinfärbung des bDOM

Eine Schwäche der Darstellung offenbart sich bei Kacheln, in denen das Oberflächenmodell keine großen Höhenunterschiede enthält, gleichzeitig aber sehr hohe einzelne Höhenausreißer vorkommen. Damit ist der Spannweite zwischen Minimum und Maximum aller Höhenwerte sehr hoch. Durch die lineare Verteilung der Farbwerte entfallen bei einem ansonsten flachen Oberflächenmodell nur wenige Farbstufungen auf den Hauptteil des Oberflächenmodells. Manuelle Anpassung der Minimum und Maximum Werte der Farbverteilung erfordert eine kachelweise Neuberechnung der Bilddatei und eignet sich daher nicht, wenn viele Kacheln eines Loses angepasst werden müssen.

Schräglichtschummerung

Eine Schummerungsansicht des Oberflächenmodells gibt Höhenänderungen der Oberflächenform detailliert wieder. Sie eignet sich besonders um die Form des bDOM an eigentlich ebenen Flächen wie beispielsweise Straßen zu beurteilen. Wellen, Erhebungen und Vertiefungen fallen leicht auf. Zur Suche von lückenhaft erfassten Objekten lässt sie sich ebenso gut nutzen wie die Höheneinfärbung.

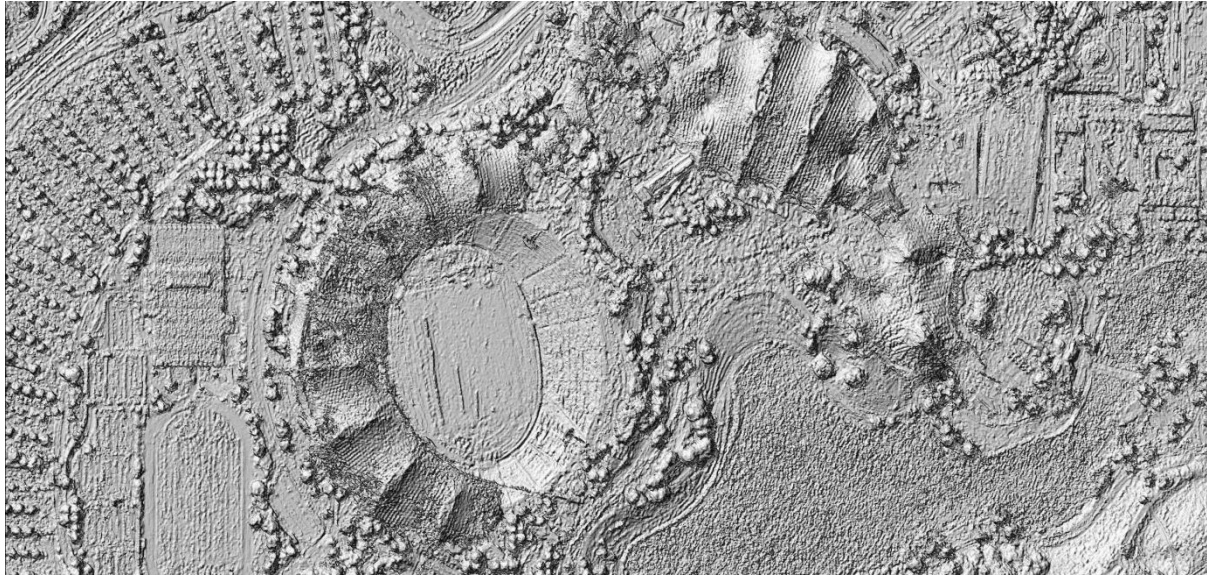


Abb. 3-22: *Schräglichtschummerung des bDOM*

Fehlerhafte Objekte lassen sich zwar gut identifizieren, die Ausprägung des Fehlers ist mitunter aber schwer abzuschätzen. Ein Gebäudedach mit Geometriefehlern fällt leicht auf, ob die fehlerhaften Höhenwerte allerdings nach Oben oder Unten abweichen ist nicht gut zu erkennen.

Seitansicht

Einen Sonderfall der Darstellung bildet die Seitansicht. Dabei wird eine orthogonale Parallelprojektion einer Kachel berechnet, die im Lot auf eine Seite der Kachel blickt. Dafür werden in einem ersten Rechenschritt die y- und z-Werte von jedem Punkt einer Kachel vertauscht. Dadurch liegt das Oberflächenmodell auf der Seite, wenn man es "von oben" in Nadir-Ansicht betrachtet. Nun kann man wie in den zuvor vorgestellten Visualisierungsvarianten ein eingefärbtes Bild in Parallelprojektion berechnen. Das Ergebnis ist eine Seitansicht der Kachel. Die Bildausmaße gleichen der Bounding Box der Punktwolke. Die Bounding Box schließt alle Punktdaten einer Punktwolke ein.

Damit sind sehr schnell Höhenausreißer in den Punktdaten zu finden, da man als Operateur leicht die Oberflächenstruktur erkennt und vergleichen kann, ob sie zu den Ausmaßen der Bounding Box passt. Ist ein großer Freiraum zwischen Oberfläche und Bildrand zu sehen, muss dort mindestens ein Höhenwert vorkommen der den Bildrand erreicht und somit einen Ausreißer darstellt.

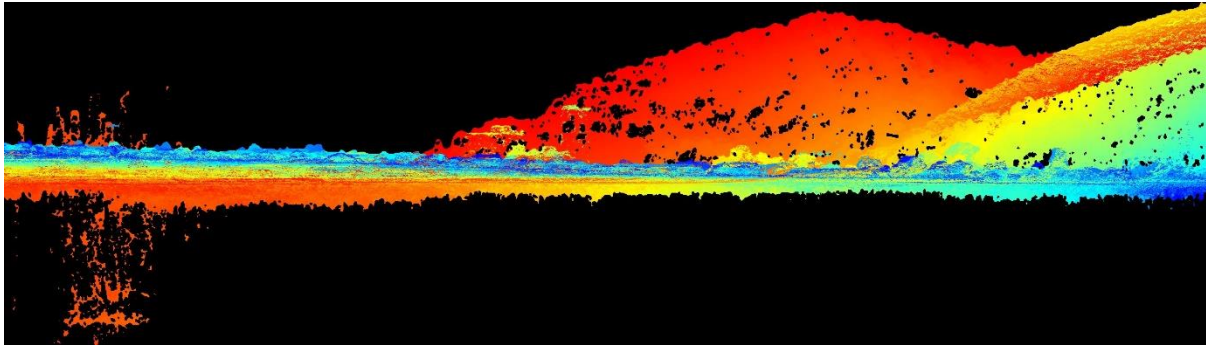


Abb. 3-23: Seitansicht einer bDOM-Kachel. Ausreißer im Modell sieht leicht sichtbar. Die Einfärbung erfolgt von hinten (rot) linear nach vorne (blau). Die grellen Farben in dieser Einfärbung lassen Ausreißer schneller als in Echtfarbdarstellung erkennen.

3.3.2.2 Quantitative Kontrollmöglichkeiten

Liest man die Höhenwerte aller Punkte einer bDOM-Kachel ein, lassen sich die Gesamtpunktzahl und statistische Werte zur Mengenverteilung berechnen. Mit dem Softwaretool lascanopy können diese Werte tabellarisch für eine beliebige Anzahl an Kacheln in einer csv-Datei ausgegeben werden.

Sinnvoll erscheinende statistische Werte für die Verteilung der Höhenwerte sind:

- Minimum
- Maximum
- Durchschnitt
- Quadratischer Durchschnitt
- Median
- 1. Perzentil
- 99. Perzentil
- Gesamtpunktzahl

Ich habe ein Skript (Anhang 6.1) mit Python erstellt, das solch eine Tabelle automatisch erstellt und kachelweise auswertet. Potenziell fehlerhafte Kacheln werden namentlich in einer Textdatei (Beispiel Anhang 6.2) erfasst. Dabei nutze ich aus, dass der Höhenwert des 1. Perzentils einer Kachel bei nicht zu steilem Gelände in der Nähe der tatsächlichen niedrigsten Bodenhöhe der Oberfläche einer bDOM-Kachel liegt. Da nur ein Prozent aller Punkte unter dem 1. Perzentil vorkommen, gehe ich davon aus, dass der Wert nahe der wirklichen unteren Geländehöhe liegt. Eine Ausnahme bilden Kacheln mit sehr steilem Gelände, beispielsweise im Hochgebirge.

Folgende Kriterien für fehlerhafte Kacheln haben sich in Tests als erfolgreich erwiesen:

- Anzahl der Punkte (Erwartungswert 6.250.000)
- Unterhalb der Höhe $h = 1.\text{Perzentil} - 2 \cdot \text{Durchschnitt}$ liegen noch Punkte, aber weniger als 200 pro Meter der verbleibenden Höhendifferenz $\Delta h_{\min} = \min - h$

ODER

In den untersten 2 Höhenmetern $\Delta h = \min + 2$ Meter sind insgesamt weniger als 25 Punkte

- In den obersten 2 Höhenmetern $\Delta h = \max - 2$ Meter sind insgesamt weniger als 25 Punkte

Trifft eines dieser Kriterien zu, wird der Kachelname sowie die für das jeweilige Kriterium ausschlaggebende Punktzahl in eine Textdatei geschrieben. Zusätzlich wird automatisch eine Seitansicht der Kachel berechnet. So hat der Operateur sofort nach der automatischen Auswertung ein Hilfsmittel, um zügig diese potenziell fehlerbehafteten Kacheln zu verifizieren.

Das Verfahren wurde neben kleineren Testgebieten am gesamten Los Würzburg ausprobiert. Die Rechendauer betrug ca. 4 Stunden. Abb. 3-24 zeigt alle potenziell fehlerbehafteten Kacheln des Loses.

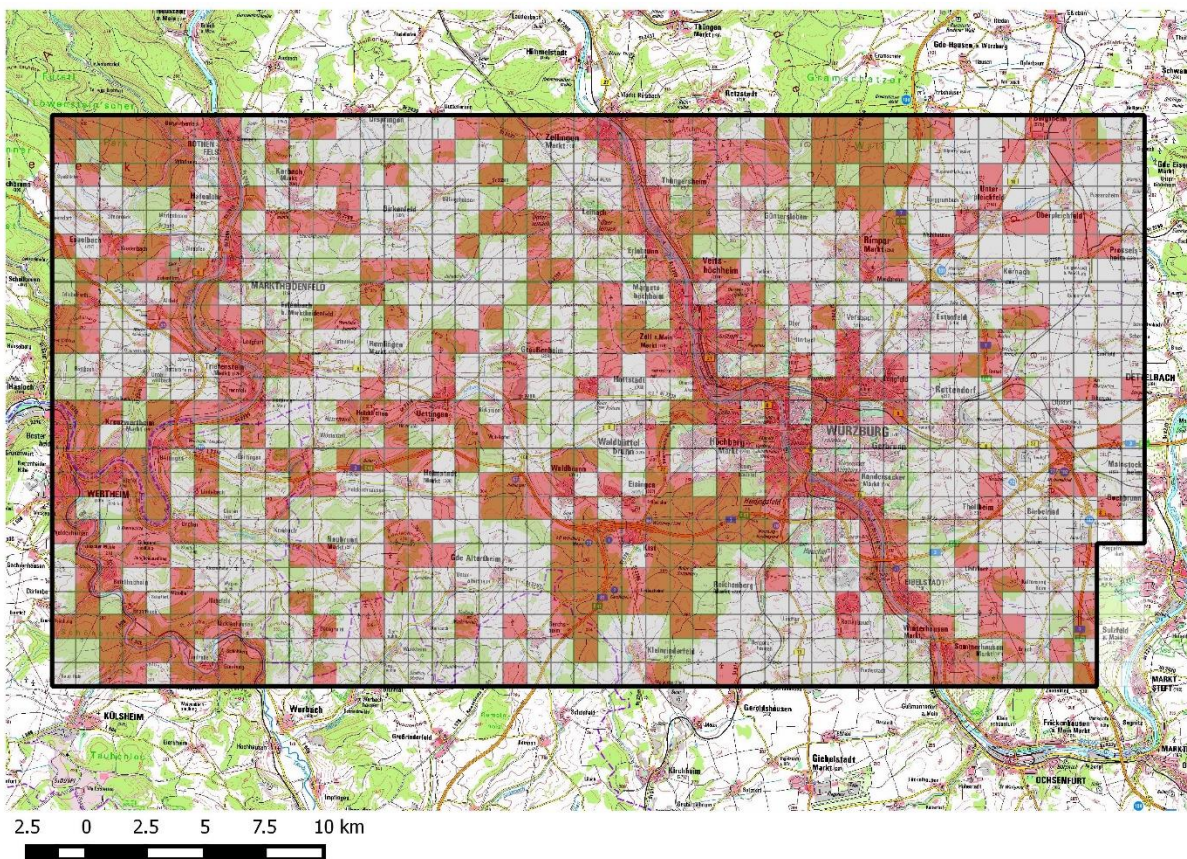


Abb. 3-24: Ergebnis aus der automatische Auswertung eines Loses. Alle roten Kacheln enthalten potenziell Ausreißer.

Es fällt auf, dass fast alle Kacheln, in denen eine Gewässerfläche liegt, als fehlerhaft identifiziert wurden. Da Gewässer einen der größten Fehlerherde der Bildkorrelation darstellen, verwundert das nicht, zeigt aber die Funktion der automatischen Auswertung.

Mit diesem Verfahren lassen sich keine Geometriefehler innerhalb einzelner Kacheln mit ihrer Position bestimmen. Es soll vielmehr den Operateur beim Auffinden von fehlerbehafteten bDOM-Kacheln unterstützen.

3.3.3 Bewertung lokaler Kontrollmöglichkeiten

Als lokale Kontrollmöglichkeiten bezeichne ich Methoden, die die genaue Auffindung einzelner Fehler in der bDOM-Geometrie ermöglichen. Die Suche nach der genauen Position und Art eines fehlerhaften Höhenwertes ist zeitaufwendig und erfordert die Betrachtung einzelner Kacheln eines Loses. Diese Methoden erscheinen daher nicht wirtschaftlich genug um alle Kacheln eines Loses vollständig zu kontrollieren.

3.3.3.1 Qualitative Kontrollmöglichkeiten

Betrachtung der Punktwolke

Zur qualitativen Betrachtung eignen sich hier ebenso die in den globalen Kontrollmöglichkeiten vorgestellten Visualisierungen von orthogonalen Parallelprojektionen, um einzelne Fehlerherde zu identifizieren. Um jedoch die genauen Punkte im bDOM zu identifizieren, die fehlerhafte Höhenwerte enthalten, muss die Punktwolke selbst betrachtet werden. Dazu eignen sich verschiedene Betrachtungsprogramme, getestet wurden CloudCompare (Freeware), Quick Terrain Reader der Firma Applied Imagery und Inpho DTMaster der Firma Trimble. Laden und Betrachtung einzelner Punktwolken benötigt hohe Rechenleistung und einen Operateur.

Vorteil ist bei Betrachtung der Punktwolke ist dabei, dass alle enthaltenen fehlerhaften Punkte in einer Kachel gefunden werden können. Alle Betrachtungsprogramme erleichtern diese Suche mit verschiedenen Renderoptionen. Damit können die Punkte zum Beispiel nach Klasse, Echtfarben oder Höhenwert unterschiedlich eingefärbt werden.

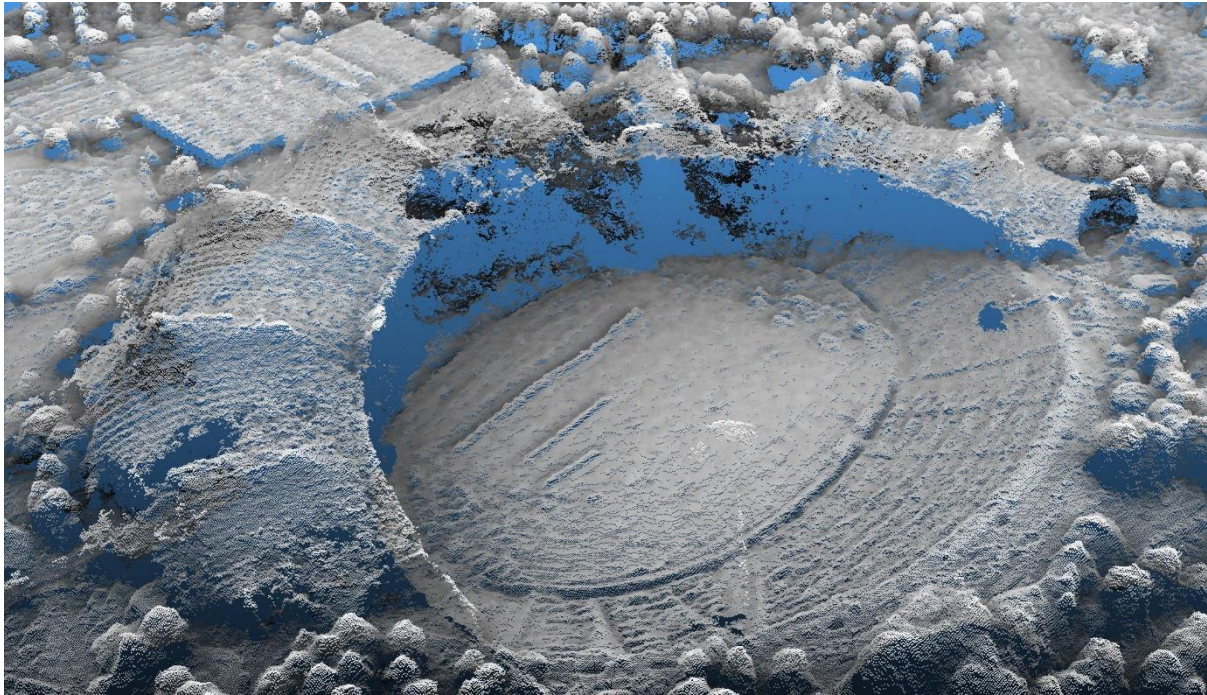


Abb. 3-25: *Punktwolke in der Schrägansicht*

Die Software Inpho DTMaster kann zusätzlich die Punktwolke eines vom Operateur festgelegten Ausschnitts drehbar anzeigen und bietet Auswahl- und Modifizierungstools für Punkte. So lässt sich beispielsweise der Querschnitt eines Hauses oder Straße im bDOM auf fehlerfreie Geometrie der Form prüfen.

CloudCompare bietet mit dem Plugin PCV (portion de ciel visible) eine nützliche Schummerungsansicht der Punktwolke, die die Shadingmethode Umgebungsverdeckung (Ambient Occlusion) verwendet. Sie berechnet für jeden Punkt der Punktwolke dessen Sichtbarkeit. (CloudCompare 2012: S. 53ff) "Das Umgebungsverdeckungsverfahren beruht auf der Grundannahme, dass ein Objekt, eine Menge von Objekten oder eine ganze Szene von einer Einheitskugel aus Licht umgeben wird. Ankommendes Licht kann also nur mittels Selbstverdeckung durch diese Geometrie blockiert oder prozentual abgeschwächt werden." (de.wikipedia.org/wiki/Umgebungsverdeckung).

Diese Visualisierungsmethode des bDOM scheint der Schräglichtschummerung überlegen, da hier leicht die Richtung eines fehlerhaften Höhenwertes erkennbar ist. Liegt ein Fehlerwert in der Tiefe, so ist er dunkel, reißt der Wert "nach oben" aus, ist er hell.

Nachteil des Verfahrens ist die erforderliche Rechenzeit. Das Plugin kann aktuell nur manuell aus der CloudCompare Software gestartet werden, eine automatisierte Berechnung ist daher nicht möglich.

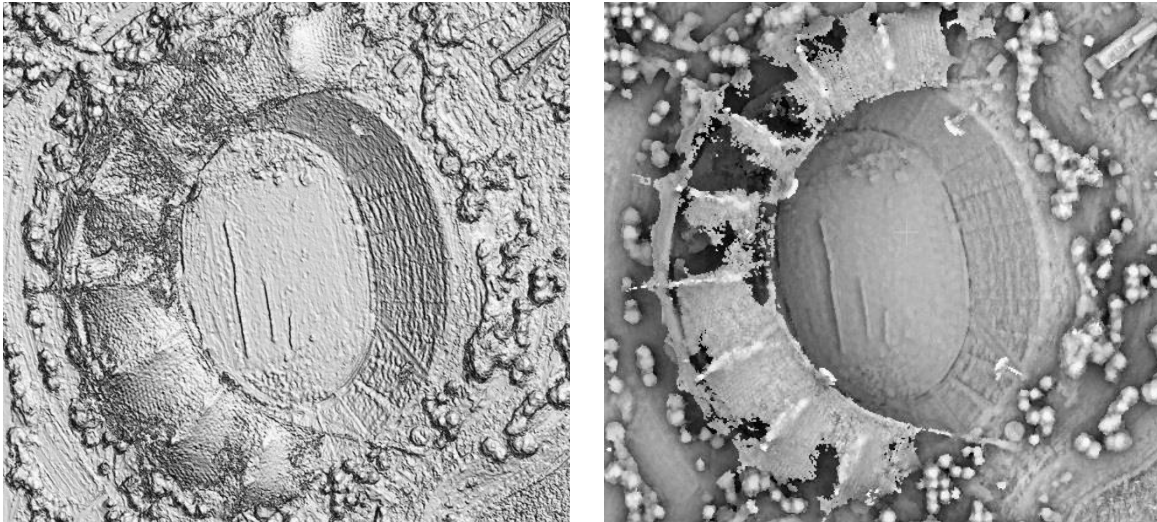


Abb. 3-26: Vergleich von Schummerung (links) mit Ambient Occlusion (rechts)

Lagekontrolle mit Referenzdaten

Die Lagegenauigkeit einzelner Kacheln kann mithilfe von Referenzdaten überprüft werden. Als Referenz bietet sich die digitale Flurkarte (DFK) des LDBV an, da sie genau, aktuell und per Web Map Service intern verfügbar ist. In der DFK sind Gebäudegrundrisse auf Bodenhöhe erfasst. Orthogonale Parallelprojektionen einzelner bDOM-Kacheln können mit der DFK überlagert werden. Zur Untersuchung dienen Gebäudeobjekte, da sie markant und ausreichend hoch sind. Hier sollen zwei Untersuchungsmethoden gezeigt werden:

- Der Vergleich des Dachumrisses im bDOM mit dem in der DFK erfassten Umriss. Um Überhänge von Dächern im Oberflächenmodell zu vermeiden, dürfen dabei nur Flachdächer ohne Überhang berücksichtigt werden, so dass die Dachform im bDOM mit dem Gebäudegrundriss übereinstimmt. Dafür bieten sich zum Beispiel Hallen in Industriegebieten an.
- Der Vergleich der Firstlinie eines Satteldaches zwischen bDOM und DFK.

Gebäude besitzen im bDOM im Gegensatz zur wahren Objektform oft keine exakt glatten und senkrechten Wände. Man spricht hier vom "Vorhangeffekt", wenn eine Gebäudewand wellig verläuft und der Übergang von Wand zu Straße bzw. Wand zu Dach nicht scharf und rechtwinklig sondern fließend erfolgt.

Dadurch lassen sich die exakten Gebäudeumrisse aus dem bDOM nicht einfach bestimmen, da die Wand selbst eine fehlerhafte Steigung enthält. Um im Vergleich mit Kontrolldaten nur die Geometrie des bDOM zu berücksichtigen, kann hier nicht auf eine Echtfarbdarstellung zurückgegriffen werden. Zum Vergleich mit der DFK wurde daher manuell eine Höheneinfärbung gewählt, deren Minimal- und Maximalwert (Blau-Rot) eng über und unter der Höhe des Daches liegen.

Damit wird nicht mehr die Form des kompletten Gebäudes verglichen, sondern lediglich der Dachumriss im bDOM mit dem Gebäudegrundriss der DFK.

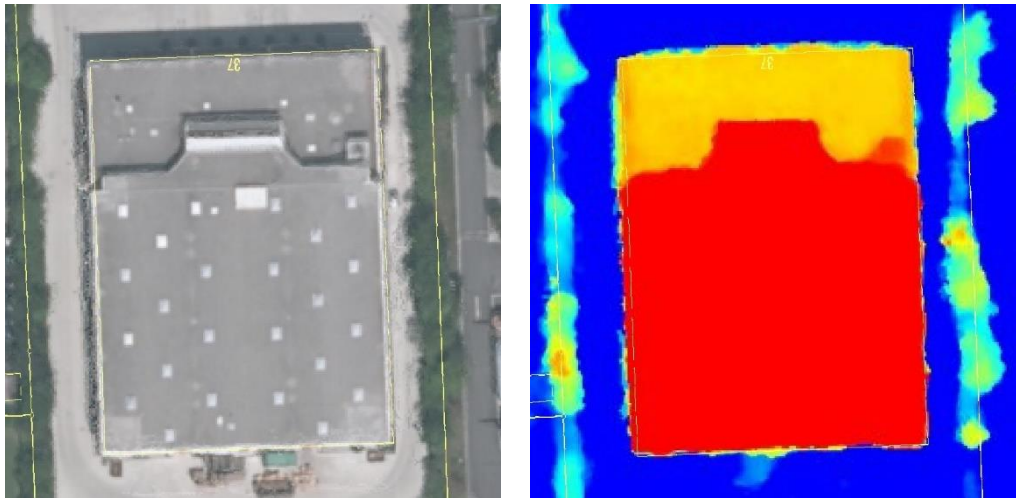


Abb. 3-27: Lagevergleich zwischen DFK (gelbe Linie) und bDOM anhand eines Gebäudeumrisses.

Gleiches gilt für den First eines Satteldaches im bDOM. Die Dachform ist hier nicht eindeutig spitz, sondern verläuft rundlich. Die Lage des Firsts kann dadurch nur visuell durch einen Operateur eingeschätzt werden (siehe Abb. 3-28). Auch hier eignet sich eine manuelle Höhereinfärbung des bDOM, bei der sich Minimal- und Maximalwert an der ermittelten Höhe des Satteldachs orientieren.

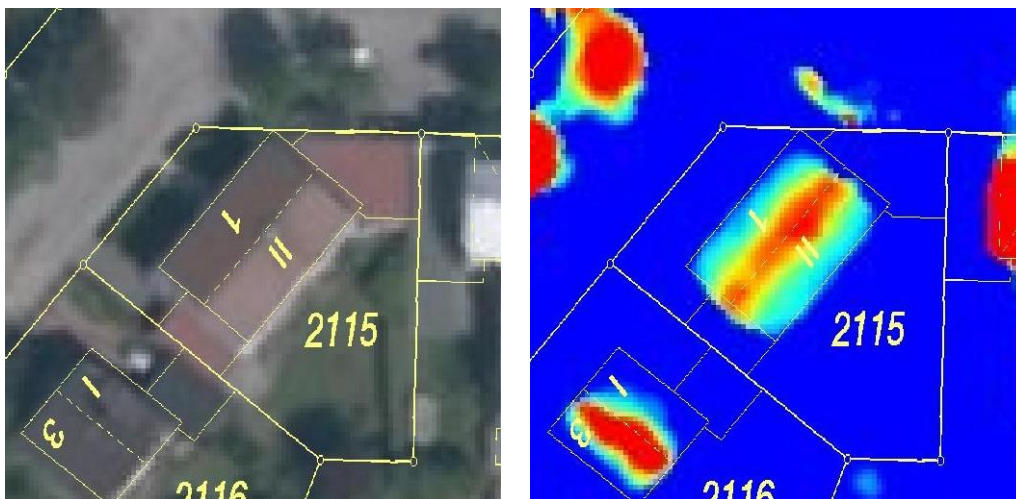


Abb. 3-28: Lagevergleich zwischen DFK (gelbe Linie) und bDOM anhand eines Dachfirsts. Die Höhereinfärbung wurde manuell an die Höhe des Satteldachs angepasst. Der First des unteren linken Hauses wirkt in x- und y-Richtung versetzt.

3.3.3.2 Quantitative Kontrollmöglichkeiten

Automatische Ausreißererkenung

Die automatische Ausreißererkenung wurde anhand der Ergebnisse des Softwaretools lasnoise⁸ untersucht. Das Tool bestimmt isolierte Punkte in einer Punktwolke anhand der Anzahl ihrer Nachbarn. Es erstellt um jeden Punkt der Wolke ein Suchraster aus 3*3*3 dreidimensionalen Zellen, in deren Mitte der zu untersuchende Punkt liegt. Anschließend werden alle Punkte in diesen Zellen gezählt. Liegt die Punktzahl unterhalb eines Schwellwertes, wird der zu untersuchende mittlere Punkt als isolierter Höhenwert betrachtet und als Ausreißer klassifiziert. In einer las-Datei kann für jeden Punkt eine Klasse angegeben werden, 16 stehen standardmäßig zu Verfügung. Alle Punkte des bDOM befinden sich in Klasse 0 Diese entspricht einer Klassifizierung als „created, never classified“ (ASPRS 2013: S. 11). Die Ausreißererkenung durch lasnoise ordnet alle gefundenen Ausreißerpunkte der Klasse 7 zu. Diese enthält laut Spezifikation „low point (noise)“ (S. 11). Dadurch werden keine Punkte gelöscht und die Klassifizierung kann nach Abschluss durch einen Operateur überprüft werden. Im Randbereich einer Kachel besteht das Risiko, Punkte, die zu hereinragenden Objekten aus Nachbarkacheln gehören, fälschlicherweise als Ausreißer zu klassifizieren. Das kann mit dem Anlegen von Pufferzonen, die zusätzlich Punktdaten aus benachbarten Kacheln enthalten, um jede untersuchte Kachel vermieden werden.

Es wurden verschiedene Suchzellgrößen und Schwellwerte getestet. Dabei wurden Werte gesucht, bei denen der Suchalgorithmus möglichst wenige fehlerfreie Punkte als Ausreißer klassifiziert und trotzdem alle "echten" Ausreißer findet. Als sinnvoll erwiesen sich große Suchzellen (Kantenlänge x, y = 5m; z = 5m) und ein Schwellwert von 50 Punkten. Bei 3 * 3 * 3 Suchzellen ergibt sich ein Suchbereich in Würfelform mit 15 m Kantenlänge. Ein Punkt in einer Ebene von 15*15 Metern wird von $x = 15 * 15 * 6,25 = 1405$ Punkten umgeben, der Schwellwert ist demnach als verhältnismäßig niedrig anzusehen.

Ich habe zur einfacheren Anwendung ein Skript mit Python erstellt (Anhang 6.3), dass aus den zu untersuchenden Kacheln neue Kacheln mit Pufferzonen errechnet und nach automatischer Ausreißererkenung die Pufferzonen wieder entfernt.

Die Treffsicherheit hängt von Gebäude- und Vegetationsdichte sowie Steilheit des Geländes ab. Die Gefahr der Fehlklassifizierung besteht vor allem bei Baumspitzen und anderen alleinstehenden Objekten, sowie bei Punkten die Teil einer Gebäudefassade sind.

Die lange Rechendauer und nötige manuelle Kontrolle macht diese Methode nur für Teilgebiete eines Loses interessant.

⁸ In LAStools enthalten

Automatische Oberflächenklassifizierung

Mit dem Tool lasclassify (Bestandteil von LAStools) wurden Versuche unternommen, die Punkte einzelner Punktwolken nach ihrer Zugehörigkeit zu Grund, Vegetation oder Gebäuden zu klassifizieren. Die Ergebnisqualität schwankte abhängig von Gebäude- und Vegetationsdichte sowie Geländeform und konnte insgesamt nicht überzeugen. Auffällig war die kaum stattfindende Klassifizierung von Gebäude oder Vegetation. Doch auch die Erfassung der Punkte, die zum Geländegrund gehören, war lücken- und fehlerbehaftet.

Die ungenügende Qualität und lange Rechenzeit ließen diese Methode aktuell wenig nützlich erscheinen.

3.4 Vorschläge für Korrekturmöglichkeiten

Im Folgenden sollen Methoden zur Korrektur von fehlerhaften Punktdaten vorgeschlagen und dabei auftretende Fragestellungen beleuchtet werden. Korrekturmöglichkeiten können grundsätzlich in automatische, halbautomatische und manuelle Methoden unterteilt werden. Dabei wird die Frage aufgeworfen, wie mit fehlerhaften Punkten im bDOM umgegangen werden soll. Vier allgemeine mögliche Vorgehensweisen werden hier genannt:

- Fehlerhafte Punkte werden gelöscht. So entstandene Lücken werden durch Interpolation geschlossen.
- Fehlerhafte Punkte werden zu Klasse 7 (entspricht Ausreißer, siehe Kap. 3.3.3.2) umklassifiziert. Der Kunde erhält so Punktinformationen zu Ausreißern im Produkt ohne dass die ursprüngliche Geometrie des bDOM verändert wird.
- Fehlerhafte Punkte werden gelöscht. Der Kunde erhält ein bDOM mit Lücken, aber ohne Ausreißer.
- Der Höhenwert fehlerhafter Punkte wird von einem Operateur der Höhe der wahren Objektgeometrie angepasst.

Eine automatische Korrekturmethode stellt die komplette Neuberechnung des bDOM eines Loses dar. Sind großflächig Fehler oder Datenlücken im bDOM eines Loses festgestellt worden, ist die Neuberechnung mit anderen oder weiteren Luftbildern oder geänderten Berechnungsparametern sinnvoll, sofern diese verfügbar sind. Eine Neuberechnung erfordert zwar viel Rechenzeit, aber lediglich die Arbeitszeit, die zum Starten des Prozesses und der erneuten Qualitätssicherung nötig ist.

Die Löschung aller automatisch klassifizierten Ausreißer stellt eine halbautomatische Methode dar, da vor der Löschung von Ausreißern das Ergebnis der Klassifizierung geprüft werden muss. Durch die verschiedensten Landschaftstypen in Bayern von flachem Gelände bis zum Hochgebirge ist das Risiko von Fehlklassifizierungen ohne Mitarbeiterprüfung als recht hoch einzuschätzen.

Die vollständig manuelle Bearbeitung von Punkten durch einen Operateur wurde mit der Software Inpho DTMaster an einem beispielhaften Fehler getestet. Ausreißer, die durch ein bewegtes Fahrzeug verursacht wurden, wurden markiert und der umliegenden Straße angepasst. In der Benutzung zeigte sich, dass die manuelle Änderung der Höhenwerte für einen Operateur sehr aufwendig ist. Die Anpassung der Punkte an die Oberflächenhöhe ist im Fall von einer schrägen Oberfläche schwierig, da die Ausreißer nur in kleinen Gruppen ausgewählt werden können, wenn sie der umliegenden Oberflächenform angepasst werden sollen. Werden große Punktgruppen ausgewählt und einer Oberflächenhöhe zugewiesen, entstehen durch den abrupten Übergang zum umliegenden Gelände Stufen um die ausgewählte Punktgruppe.

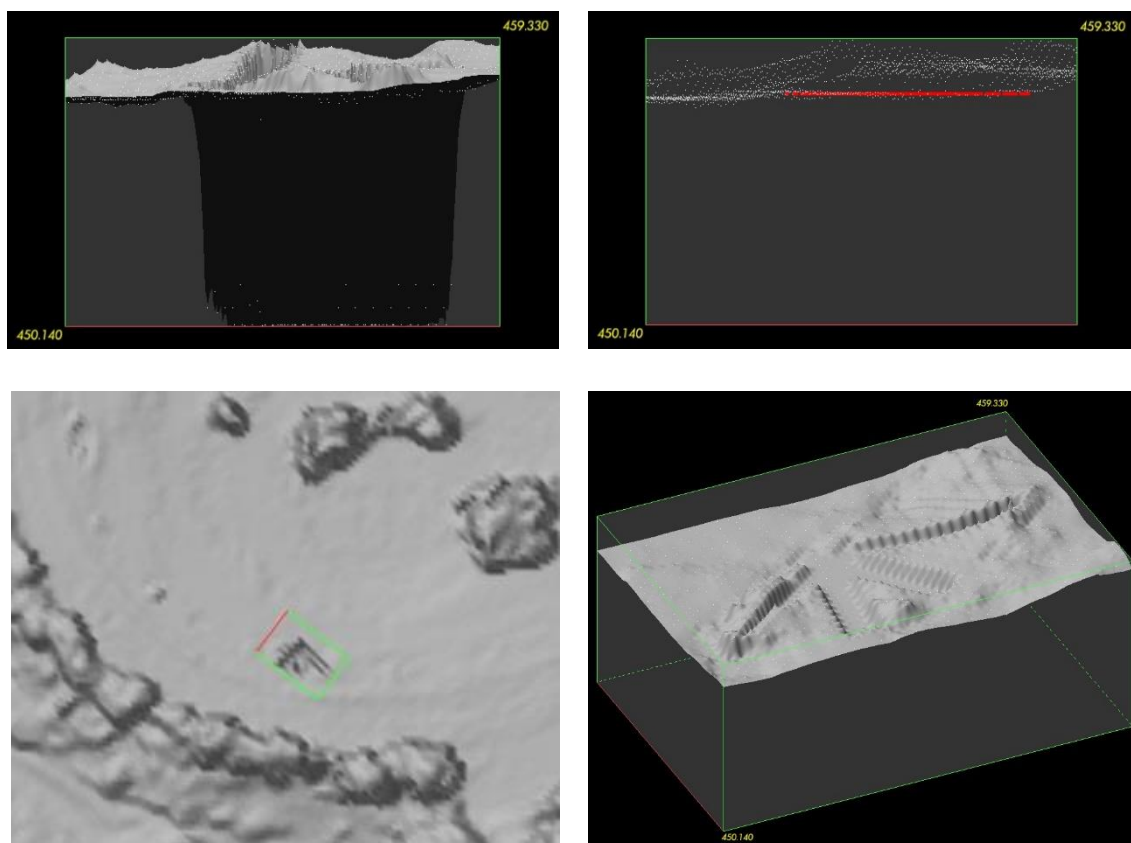


Abb. 3-29: Manuelle Anpassung von Höhenwerten. Links unten: Nadiransicht von Ausreißern; links oben: Ausreißer im Profil; rechts oben: angepasste Höhenwerte; rechts unten: Ergebnis in Schrägansicht.

Weiteres großes Verbesserungspotenzial liegt in der Rauschentfernung in Gewässerflächen. Gewässer zählen zu den größten Problemflächen des bDOM. Ein möglicher Ansatz für Ausreißer in Gewässerflächen ist, alle Punkte des bDOM innerhalb von Gewässerflächen zu ermitteln. Manuell durch einen Mitarbeiter können zwar Uferlinien aus bDOM-Kacheln in Parallelprojektion digitalisiert werden, das steht aber für die gesamte Fläche Bayerns durch den dramatischen Arbeitsaufwand nicht zur Debatte.

Eine Option ist daher die Verwendung von Gewässerpolygonen aus ATKIS. Diese Uferlinien decken sich jedoch teilweise nicht mit der Uferlinie im bDOM. Sie berücksichtigen auch keine Vegetation, die über die Gewässerfläche ragt (siehe Abb. 3-30).



Abb. 3-30: Überlagerung des bDOM mit Gewässerpolygonen bei Passau (Rot ist die Uferlinie des Polygons)

Für eine akurate Erfassung der Uferlinien im bDOM empfiehlt sich daher eine unüberwachte Klassifikation der Gewässerflächen auf der Grundlage einer orthogonalen Parallelprojektion des bDOM mit den Farbkanälen NIR (Nahes Infrarot), Rot, Grün. Für so eine Klassifikation könnte sich beispielsweise der normalisierte differenzierte Vegetationsindex (NDVI) anbieten. Noch werden solche Bilddateien, die den NIR-Kanal enthalten, allerdings nicht in der bDOM-Produktion erstellt. Als Alternative kommen Falschfarben-Orthophoto Kacheln (NIR,R,G) in Frage, hier ist allerdings technisch bedingt die Vegetation und Bebauung am Rand von Gewässerflächen durch den Umklappungseffekt nicht an derselben Position wie im bDOM, was den Aufwand der Klassifikation in Frage stellt.

Bei der Behandlung der Gewässerflächen tritt schließlich noch die Fragestellung auf, auf welchen Höhenwert die ermittelten Oberflächenpunkte innerhalb eines Gewässers gesetzt werden sollten. Punkten innerhalb eines Stehgewässers kann eine einheitliche Höhe zugewiesen werden. Im Gegensatz dazu ändern Fließgewässer ständig ihre Höhe. Verfahrensmöglichkeiten sind hier:

- Die Punkte im Fließgewässer erhalten in einer festen Schrittweite entlang des Flusslaufs einen neuen Höhenwert. Dieser Schritt muss vermutlich manuell durch einen Operateur erfolgen.
- Die Punkte im Fließgewässer erhalten zwischen allen Bauwerken (Wehre, Brücken), die sich über dem Wasserlauf befinden, jeweils eine einheitliche Höhe.
- Die Punkte im Fließgewässer werden komplett gelöscht und die Datenlücke durch Interpolation automatisch gefüllt.
- Die Punkte im Fließgewässer werden komplett gelöscht. Zur Auffüllung werden Fremddaten wie das DGM1 verwendet.

3.5 Entwurf eines Prüfprotokolls

Um die Kontrolle jedes Loses übersichtlich zu protokollieren habe ich ein Prüfprotokoll entworfen (Anhang Prüfprotokoll).

Der für die Qualitätskontrolle zuständige Mitarbeiter kann damit die ausgeführten Schritte und deren Ergebnis erfassen und Anmerkungen einfügen. Falls eine zweite Berechnung für Teile des Loses nötig war, kann vermerkt werden, welche Kacheln neu berechnet wurden und welche Kacheln in das Endprodukt aufgenommen wurden. Die Speicherung des Protokolls bietet sich in der Projektdatei des zugehörigen Loses an. So sind nach der Qualitätskontrolle die Ergebnisse zentral erfasst. Das Ausfüllen direkt am Computer erleichtert die Protokollierung und macht Ausdrücke des Dokuments unnötig.

4 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde das bildbasierte digitale Oberflächenmodell von Bayern hinsichtlich enthaltener Fehlertypen untersucht, Qualitätsmerkmale festgelegt und Kontrollmöglichkeiten dargelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Qualitätssicherung nur begrenzt detailliert erfolgen kann, sofern sie ohne zu hohen Kosten- und Personalaufwand durchgeführt werden soll. Zur Erfassung von Position, Umfang und Ausprägung aller im bDOM auftretenden Fehler, geometrischer wie radiometrischer Natur, stehen keine automatischen Prozesse zur Verfügung, sie kann nur manuell durch einen Operateur erfolgen. Der damit verbundene Aufwand stellt jedoch den Nutzen solch einer vollständigen Erfassung in Frage, solange nicht abschließend definiert ist, wie mit Fehlern umgegangen wird. Die in Kapitel 3.4 vorgestellte manuelle Korrektur von einzelnen Fehlern ist durch den damit verbundenen Aufwand und die erzielbare Qualität ebenso fragwürdig.

Dennoch haben sich mehrere sinnvolle Kontrollmöglichkeiten herauskristallisiert, um die Konsistenz, Genauigkeit und allgemeine Qualität der bDOM-Produktion zu prüfen. Dazu gehört die in Kapitel 3.3.1 durchgeführte exemplarische Beurteilung der Höhengenaugkeit. Da die Auswertung des normalisierten Oberflächenmodells automatisch abläuft, entfällt der manuelle Aufwand hier hauptsächlich auf die Suche nach geeigneten verteilten Testflächen im Los. Der Zeitaufwand ist damit überschaubar.

Die in Kapitel 3.3.2.2 entwickelte automatische Überprüfung auf potenzielle enthaltene Höhenausreißer empfiehlt sich zur Kontrolle aller Kacheln eines Loses. Die ausgegebene Liste von lückenhaften oder potenziell schadhaften Kacheln kann in die Metadaten eines Loses einfließen.

Auch die vollständige Sichtkontrolle eines Loses durch einen Operateur ist empfehlenswert. Dabei erscheint eine Visualisierung der orthogonalen Ansicht mit Schummerung sinnvoll, um geometrische Fehler schnell zu erkennen. Eine einmalige komplette Sichtprüfung erscheint dabei ausreichend. Diese sollte mindestens durch stichprobenartige Kontrolle durch eine Echtfarbansicht ergänzt werden um eventuelle falsche Farbwerte im Modell zu entdecken. Durch eine Überblendung mit Gebäudeumrandungen der digitalen Flurkarte kann die Sichtkontrolle jedoch mit stichprobenartiger Lagekontrolle der Geometrie verbunden werden. Der Arbeitsaufwand lässt sich durch fehlende Erfahrungswerte nur abschätzen und kann pro Los je nach Erfahrung des Operateurs mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, wie er in Kapitel 3.1 vorgestellt wurde, ist die manuelle stichprobenartige genaue Erfassung von Position und Umfang einzelner Fehler sinnvoll, um Verbesserungen des bDOM zu beurteilen.

Im vorgestellten Konzept zur Qualitätssicherung nimmt die Dokumentation der Produkterstellung sowie die darauf folgende Überprüfung der verwendeten Berechnungsparameter und Kontrollschritte durch ein Prüfprotokoll die zentrale Stellung ein. Sie erleichtert dem Operateur die Selbstkontrolle und hält die Ergebnisse aller Kontrollschritte fest.

5 Ausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse ließen sich durch eine Untersuchung ergänzen, in wieweit Oberflächeninformationen aus anderen Abteilungen des LDBV in die Metadaten des bDOM mit einbezogen werden können, um dem Endkunden gegenüber zusätzliche Informationen zur Qualität seines Produkts zu geben. So ist beispielsweise vorstellbar, in den Metadaten jeder Kachel zu hinterlegen, ob sich im abgebildeten Gebiet Freileitungen oder Freileitungsmaste befinden, da diese im aktuellen Produkt lediglich mit lückenhafter und fehlerhafter Geometrie abgebildet sind. Informationen dazu könnten möglicherweise sich aus der Überlagerung der Kacheln mit dem digitalen Landschaftsmodell (BASIS-DLM) ergeben. In dessen Objektartenkatalog sind mit der Objektart AX_Leitung (Kennung 51005) solche Objekte hinterlegt.

Die Ergebnisse aus Kapitel 3.4 und die zukünftige Speicherung von Nahinfrarotwerten in den las-Dateien des bDOM führen zu der Frage, ob eine Erfassung der Uferlinien anhand der orthogonalen Parallelproduktion und damit eine Korrektur von Gewässerflächen wirtschaftlich umgesetzt werden kann.

Weitere Forschungsfragen ergeben sich aus dem Verbesserungspotenzial des Bildkorrelationsprozesses. Einen Vorschlag zur Verbesserung der Filterung von Fehlerwerten aus den ermittelten Höhenwerten stellt der Vergleich des Ergebnisses zweier unabhängiger Bildkorrelationen von Basis- und Referenzbild mit unterschiedlichen Kostenfunktionen und Korrelationsparametern dar. Pablo d'Angelo stellt dazu fest, dass „die zweite Bildkorrelation zusätzliche Informationen liefert, da die Korrelation in uneindeutigen Regionen instabil wird und kleine Änderungen der Korrelationsparameter die Disparitätswerte in gut rekonstruierten Regionen nicht beeinflusst“⁹ (übersetzt aus D'Angelo, P. 2010: S.2). Eine Konsistenzprüfung beider berechneter Disparitätsbilder kann enthaltene Fehler aufdecken. (S. 2)

Abschließend steht noch eine Definition aus, wie genau mit erkannten Fehlern im bDOM umgegangen werden soll. Eine Untersuchung, ob an ihrer Stelle vom Endkunden eher Datenlücken oder Korrekturversuche akzeptiert werden, könnte darüber Klarheit verschaffen.

⁹ „The second matching provides additional information, as the matching becomes unstable in ambiguous areas, and small changes in matching parameters do not affect the disparity values in well reconstructed areas.“

6 Anhang

6.1 Python Script zur globalen quantitativen Kontrolle

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-
import subprocess
import csv
import os
from decimal import *

# Aufruf von lascanopy, schreibt "avg_med_heights.csv"-Datei
subprocess.call(["lascanopy", "-i", "*_40.laz", "-files_are_plots" \
, "-height_cutoff", "0", "-names", "-min", "-max", "-avg", "-qav", "-std" \
, "-p", "1", "50", "99" \
, "-c", "0", "3000", "-o", "avg_med_heights.csv"])

# Definition von zulässiger Punktzahl pro Kachel; 6 250 000 entspricht
Gitterauflösung 40 cm
# Threshold von 0.00005 entspricht dabei
punktmax = Decimal(6250000)
upperThreshold = 25
lowerThreshold = 300
# Definition des STARTWERTS des Abstands über dem Punkte als Ausreißer gelten
abstand_unten = 5
abstand_oben = 30
# Öffnet die zu beschreibende txt-Datei, vorhandene wird überschrieben
writefile = open("schadhafte_Kacheln.txt", "w")

# Öffnet die csv-Datei mit statistischen Werten, Punktzahl der Kachel befindet
sich in Spalte 12
# Testet ob es sich um die erste Zeile handelt und ob Punktzahl der zulässigen
Punktzahl pro Kachel ist
# Kachelname und Punktzahl wir bei Ungleichheit in txt-Datei geschrieben
f = open("avg_med_heights.csv", "r")
csvfile = csv.reader(f, delimiter=",")
writefile.write("### Tiles with point count unequal to {}
###\n\n".format(punktmax))
for row in csvfile:
    if row[0]!="file_name":
        anzahl = Decimal(row[9])
        if anzahl != punktmax:
            writefile.write( "{} , {} \n".format(row[0], anzahl))

writefile.write("\n\n### Tiles with probable outliers ###\n\n")
f.close()

# Öffnet die csv-Datei mit statistischen Werten
# Testet ob Abstand zwischen Minimum Höhenwert und 1. Perzentil der Kachel zu groß
ist
# Schwellwert entspricht 2*Standardabweichung, mindestens aber 5m
f = open("avg_med_heights.csv", "r")
csvfile = csv.reader(f, delimiter=",")
writefile.write("### UNDER terrain outliers ##\n")
writefile.write("### Distance between minimum height and 1st percentile greater than
2*sigma ##\n\n")
count = 0
```

```

for row in csvfile:
    if row[0]!="file_name":
        abstand_unten = 5
        min = Decimal(row[1])
        max = Decimal(row[2])
        p1 = Decimal(row[6])
        stddev = Decimal(row[5])
        gap = p1 - min
        if 2*stddev > abstand_unten:
            abstand_unten = 2*stddev
        if gap > abstand_unten:
            subprocess.call(["lascanopy","-i","{}".format(row[0]),"-
files_are_plots"
            ,"-height_cutoff","0","-names","-c","0","{}".format(p1-
abstand_unten),"3000","-o","test.csv"])
            newcsv = open("test.csv","r")
            testfile = csv.reader(newcsv,delimiter=",")
            for ro in testfile:
                if ro[0] != "file_name":
                    threspoints = Decimal(ro[1])
                    #if threspoints < 1000:
                        writefile.write("{} , P1={}, {} - {}m, {} Punkte
\n".format(row[0], p1, min, p1-abstand_unten, threspoints))
                            count += 1
                newcsv.close()
            else:
                first2meters = min + 2
                subprocess.call(["lascanopy","-i","{}".format(row[0]),"-
files_are_plots"
                ,"-height_cutoff","0","-names","-
c","0","{}".format(first2meters),"3000","-o","test.csv"])
                newcsv = open("test.csv","r")
                testfile = csv.reader(newcsv,delimiter=",")
                for ro in testfile:
                    if ro[0] != "file_name":
                        threspoints = Decimal(ro[1])
                        if threspoints < lowerThreshold:
                            writefile.write("{} , P1={}, {} - {}m, {}
Punkte \n".format(row[0], p1, min, first2meters, threspoints))
                                count += 1
                    newcsv.close()
            writefile.write("\n{} tiles found with probable outliers under
terrain".format(count))
            f.close()

# Öffnet die csv-Datei mit statistischen Werten
# Testet ob Abstand zwischen 99. Perzentil und Maximum Höhenwert der Kachel zu groß
ist
# Schwellwert entspricht 4*Standardabweichung
f = open("avg_med_heights.csv","r")
csvfile = csv.reader(f,delimiter=",")
writefile.write("\n\n\n## OVER terrain outliers ##\n")
#writefile.write("## Distance between 99th percentile and maximum height greater
than 4*sigma ##\n\n")
writefile.write("## Minimal number of points in highest 5 meters of Z lower than
{} ##\n\n".format(upperThreshold))
count = 0
for row in csvfile:
    if row[0]!="file_name":

```

```

        max = Decimal(row[2])
        p99 = Decimal(row[8])
        stddev = Decimal(row[5])
#         gap = max - p99
#         abstand_oben = 4*stddev
#         if gap > abstand_oben:
#             subprocess.call(["lascanopy","-i","{}".format(row[0]),"-
files_are_plots"\
#                 ,"-height_cutoff","0","-names","-
c","0","{}".format(p99+abstand_oben),"3000","-o","test.csv"])
#                 newcsv = open("test.csv","r")
#                 testfile = csv.reader(newcsv)
#                 for ro in testfile:
#                     if ro[0] != "file_name":
#                         threspoints = Decimal(ro[2])
#                         if threspoints < 1000:
#                             writefile.write("{} , {} , {} Punkte \n".format(row[0],
gap, threspoints))
#                                 count += 1
#                     else:
#                         last5meters = max - 2
#                         subprocess.call(["lascanopy","-i","{}".format(row[0]),"-
files_are_plots"\
#                             ,"-height_cutoff","0","-names","-
c","0","{}".format(last5meters),"3000","-o","test.csv"])
#                             newcsv = open("test.csv","r")
#                             testfile = csv.reader(newcsv,delimiter=",")
#                             for ro in testfile:
#                                 if ro[0] != "file_name":
#                                     threspoints = Decimal(ro[2])
#                                     if threspoints < upperThreshold:
#                                         writefile.write("{} , P99={}, {} - {}m, {} Punkte
\n".format(row[0], p99, last5meters, max, threspoints))
#                                             count += 1
#                             newcsv.close()
writefile.write("\n{} tiles found with probable outliers over
terrain".format(count))
f.close()

# Schließt die zu beschreibende txt-Datei
writefile.close()
os.remove("test.csv")

```

6.2 Beispiel einer Ausgabe der automatischen Auswertung

```
### Tiles with point count unequal to 6250000 ###
```

```
4609_5382_40.laz, 6249989
```

```
### Tiles with probable outliers ###
```

```
## UNDER terrain outliers ##
```

```
## Distance between minimum height and 1st percentile greater than  
2*sigma ##
```

```
4608_5382_40.laz, P1=288.956, 226.39 - 230.4084m, 2 Punkte
```

```
4608_5383_40.laz, P1=290.1, 143.34 - 194.992m, 34 Punkte
```

```
4609_5382_40.laz, P1=288.95, 220.1 - 226.4758m, 54 Punkte
```

```
4609_5383_40.laz, P1=291.66, 252.2 - 254.2m, 11 Punkte
```

```
4 tiles found with probable outliers under terrain
```

```
## OVER terrain outliers ##
```

```
## Minimal number of points in highest 2 meters of Z lower than 25  
##
```

```
4608_5383_40.laz, P99=424.05, 470 - 472m, 5 Punkte
```

```
4609_5383_40.laz, P99=413.41, 454.59 - 456.59m, 12 Punkte
```

```
2 tiles found with probable outliers over terrain
```

6.3 Python Script zur Ausreißerererkennung

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

""" Lasnoise.py takes lasnoise.exe to search for outliers, which are then
classified to class 7 (default).
It prevents false classification by adding a buffer of 10m to every tile, which is
removed afterwards"""

__author__ = "Henri Buschmann, LDBV"

import subprocess
import os
from decimal import *

# Ordner, der lastools exe-Dateien (z.b. lasmerge) enthält
whereLasTools = "R:/24_Gemeinsam/Testdaten/lastools_2014/bin/"

# Anzulegendes Unterverzeichnis für Kacheln
directory = "tiles"
directory2 = "Denoised_Unbuffered"

# Dimensionen der von lasnoise aufgespannten 3x3x3 Zellen. Das Maß gilt pro Zelle.
# Die Zellen definieren den Suchbereich um den zentralen Untersuchungspunkt,
# in dem die Punktzahl mit isolated verglichen wird. Ist die Punktzahl kleiner als
isolated,
# wird der Punkt als Ausreißer in Klasse 7 (= noise) verschoben
stepXY = 5
stepZ = 5
isolated = 50

def makeTileDir(dir, dir2):
    try:
        os.mkdir(dir)
    except Exception:
        print "Tiles Ordner existiert bereits, wird nicht neu angelegt"
    try:
        os.mkdir(dir2)
    except Exception:
        print "Denoised_Unbuffered Ordner existiert bereits, wird nicht neu
angelegt"

def makeBufferedTiles(buffer):
    subprocess.call(["{}lastile.exe".format(whereLasTools), "-i", "*_40.laz" \
, "-buffer", "{}".format(buffer) \
, "-o", "tiles/.laz"])

def removeNoise(whereLasTools, stepXY, stepZ, isolated):
    subprocess.call(["{}lasnoise.exe".format(whereLasTools), "-i", "tiles/*.laz" \
, "-step_xy", "{}".format(stepXY) \
, "-step_z", "{}".format(stepZ) \
, "-isolated", "{}".format(isolated) \
, "-ignore_class", "7" \
, "-olaz", "-odix", "_noise_c7", "-odir", "tiles"])

def unbufferTiles():
    subprocess.call(["{}lastile.exe".format(whereLasTools), "-
i", "tiles/*_noise_c7.laz" \
, "-remove_buffer", "-odir", "Denoised_Unbuffered", "-ocut", "9", "-olaz"])

makeTileDir(directory, directory2)
makeBufferedTiles(10)
removeNoise(whereLasTools, stepXY, stepZ, isolated)
unbufferTiles()
```

6.4 Prüfprotokoll

Die hier eingebundene Fassung wurde im Layout als Bild in die Arbeit eingefügt. Die Originalfassung liegt auf CD bei.

Prüfprotokoll <u>bDOM</u>		Losnr.:	Unternr.:
		Fläche:	Überlappung: Kamera:
Berechnung			
Parameter:		<u>Anmerkungen:</u>	Dat.
SURE-Version:			
Rechendauer:			
Speicheraufwand:			
Min. Überlappung:			
Höhengenaugigkeit (Referenz DGM 1)			
Anzahl Testflächen:		<u>Ergebnis:</u>	Dat.
Typ (Rasen-, Hart-, Parkplatz):			
Globale Kontrolle			
Qualitativ:		<u>Anmerkungen:</u>	Dat.
Visualisierungsmethode: (Echtfarben, Höheneinfärbung, Schummerung)			
Quantitativ:			
Kachelanzahl gesamt:			
Kachelanzahl unvollständig			
Kachelanzahl mit Ausreißern:			

Stichproben

Lage

Anmerkungen:

Dat.

Automatische
Ausreißerererkennung

Sichtkontrolle

Welche Kacheln gehen/gehen nicht in das Endprodukt ein?

7 Literaturverzeichnis

- ASPRS (Hrsg.) (2013): *LAS SPECIFICATION VERSION 1.4 – R13. Maryland*. Aufgerufen am 7.11.2014 von http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf
- CloudCompare (Hrsg.) (2012): *User's Manual for Version 2.1*. Aufgerufen am 22.9.2014 von http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation_CloudCompare_version_2_1_eng.pdf
- D'Angelo, Pablo (2010): *Image Matching and Outlier Removal for Large Scale DSM Generation*. Aufgerufen am 24.9.2014 von http://elib.dlr.de/68543/1/outrm_calgary2010_final.pdf
- de.wikipedia.org/wiki/Kontinuierlicher_Verbesserungsprozess. Aufgerufen am 4.11.2014
- de.wikipedia.org/wiki/Umgebungsverdeckung. Aufgerufen am 29.9.2014
- de.wikipedia.org/wiki/Demingkreis. Aufgerufen am 11.11.2014
- Dorsch, J., Fischer, A., Hahn, T. u.a. (2011): *Das hochauflösende digitale Geländemodell von Bayern – Von der Datenerfassung zu Anwendungen im Umweltbereich*. In: Mitteilungen der DVW-Bayern e.V., Heft 2 – 2. Quartal 2011, S. 135 – 150.
- GDI-DE (Hrsg.) (kein Datum): *Grenzen aufheben mit INSPIRE*. Aufgerufen am 27.2.2015 von <http://www.geoportal.de/DE/GDI-DE/INSPIRE/inspire.html?lang=de>
- INSPIRE Thematic Working Group Elevation (Hrsg.) (2013): *D2.8.II.1 INSPIRE Data Specification on Elevation – Technical Guidelines*. Aufgerufen am 15.12.2014 von http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_EL_v3.0.pdf
- Landesamt für Vermessung und Geoinformation (2013): *Vergabeverfahren Bayernbefliegung 2014 – Vergabeunterlagen*. (PDF)
- LDBV (2013): *Entwurf bDOM-Prozesskette*. Version 15. (Office Word-Dokument)
- Normenausschuss Bauwesen im DIN (2013): *Entwurf DIN 18740-6 Photogrammetrische Produkte – Teil 6: Anforderungen an digitale Höhenmodelle*. Erscheinungsdatum: 25.10.2013. Berlin.
- Springer Gabler Verlag (Hrsg.) (kein Datum): *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Qualitätssicherung*. Abgerufen am 25.9.2014 von <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57713/qualitaets-sicherung-v5.html>

Stolz, M. (2013): *Digitale Oberflächenmodelle aus Bildkorrelation*. In: Mitteilungen des DVW-Bayern e.V, Heft 2 – 2. Quartal 2013, S. 139 -150.

Wenzel, K., Rothermel, M., Haala, N. u.a. (2013): *SURE – The ifp Software for Dense Image Matching*. In: Fritsch, D. (Hrsg.): Photogrammetric Week '13, S. 59 – 70. Berlin.

Erklärung

gemäß § 15 Abs. 5 APO in Zusammenhang mit § 35 Abs. 7 RaPO

Name: Buschmann

Vorname: Henri

Geburtsdatum: 10.09.1984

Studiengang: Kartographie und Geomedientechnik

Matrikel-Nr.: 02443408

Winter-/Sommersemester: 2014/2015

Betreuer: Prof. Dr. Peter Kammerer

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift