



Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten

Verbundvorhaben „Entwicklung von Methoden und
Verfahren zur flächendeckenden und homogenen
Generierung von Waldparametern auf der Basis digitaler
Oberflächenmodelle aus Luftbilddaten (F³)“

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)
Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg

*Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
(BMEL). Förderkennzeichen: 22025014 (FVA), 22024816 (NW-FVA)*

Dokumentation zu Meilenstein 3

„Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter
Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“

Meilenstein 3

Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Software	1
2.1	Image Matching Software	1
2.1.1	SURE	1
2.1.2	Match-T DSM.....	1
2.2	Python	2
2.3	ArcGIS	2
2.4	LASTools	2
3	Benötigte Daten	2
3.1	Luftbilder	2
3.2	Digitales Geländemodell 1 m (DGM1).....	2
4	Organisation der Daten	3
5	Prozessierung	3
5.1	Prozessierung des digitalen Geländemodells (DGM)	3
5.2	Image Matching.....	5
5.3	Qualitätsprüfung	10
5.4	Berechnung von DOM und nDOM mit dem Python-Skript „cloud2ndom_F3.py“	11
5.4.1	Bereinigung und Vereinheitlichung der Eingangsdaten	12
5.4.2	Filterung der Punktwolke	14
5.4.3	Generierung des nDOM im .tif-Format	18
5.4.4	Generierung des DOM im .tif-Format	19
5.4.5	Zuweisung einer Farbskala	19
	Literatur.....	19

1 Einleitung

Im F³-Projekt (Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten) werden Methoden und Verfahren zur standardisierten Ableitung und kartenmäßigen Darstellung von Waldstrukturparametern basierend auf Fernerkundungsdaten entwickelt. Hierdurch wird die Basis für eine standardisierte Datengrundlage bezüglich Bestandeshöhe, Holzvolumen etc. für eine nachhaltige Waldwirtschaft in Deutschland geschaffen. Die entwickelten Methoden sind deutschlandweit einsetzbar und die Ergebnisse flächendeckend, hoch aufgelöst und regelmäßig aktualisierbar. Die Methoden und Verfahren basieren auf deutschlandweit verfügbaren Datensätzen. Die genutzten Fernerkundungsdaten umfassen Luftbilder der regulären Bildflüge der Landesvermessungsverwaltungen, Sentinel-2 Satellitenbilddaten und laserscanningbasierte digitale Geländemodelle (DGM). Forstliche Daten stammen aus der dritten Bundeswaldinventur („BWI3“) oder den Betriebsinventuren („BI“; Stichprobenerhebung) sowie den Bestandesinventuren (bestandesweise Forsteinrichtung). Zusätzlich werden Klima- und Standortdaten verwendet.

Das im Folgenden beschriebene Verfahren zur Ableitung digitaler Oberflächenmodelle (DOM) und normalisierter digitaler Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern baut auf ein an der FVA entwickeltes Verfahren (Schumacher et al., 2019) auf. Dieses wurde für die Verarbeitung von Punktwolken entwickelt, welche mit der Image Matching-Software SURE generiert wurden. Im Rahmen des F³-Projekts wurde das Verfahren zur Filterung der Punktwolken und Erzeugung von DOM und nDOM grundlegend überarbeitet. Zusätzlich fand eine Erweiterung und Verallgemeinerung statt, sodass nun auch Punktwolken der Image Matching-Software MATCH-T DSM prozessiert werden können. Die nachfolgende Beschreibung zeigt detailliert die Schritte des Verfahrens.

2 Software

Die im Folgenden aufgeführte Software wurde innerhalb des F³-Projekts für die DOM-/nDOM-Generierung genutzt. Das entwickelte und hier beschriebene Verfahren ist bei Vorhandensein dieser Software implementierbar.

2.1 Image Matching Software

2.1.1 SURE

Das Image Matching für die Oberflächengenerierung an der FVA wird mit der nFrames Software SURE (“SURface REconstruction”; Version 2.3.1.41) durchgeführt. Die Software implementiert Semi-Global Matching (SGM; Hirschmüller 2005 und 2008).

2.1.2 Match-T DSM

Das Image Matching für die Oberflächengenerierung an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) wird mit der Trimble/Inpho Software MATCH-T DSM (Version 9.2) durchgeführt.

2.2 Python

Das Verfahren zur DOM-/nDOM-Berechnung aus photogrammetrischen Punktwolken ist in einem Python-Skript implementiert, das über ArcPy die Verwendung von ArcGIS-Funktionalitäten ermöglicht.

2.3 ArcGIS

Für die DOM-/nDOM-Berechnung werden ArcGIS-Funktionalitäten genutzt. Neben der Lizenzstufe „Basic“ (ArcView) wird die Extension „Spatial Analyst“ benötigt. Das hier vorgestellte Verfahren wurde in ArcGIS 10.5 (ESRI) umgesetzt.

2.4 LAStools

Das hier beschriebene Verfahren zur DOM-/nDOM-Berechnung stützt sich zu einem großen Teil auf die Funktionalitäten von LAStools (rapidlasso GmbH). Folgende LAStools-Funktionen werden verwendet: lasinfo, lastile, lasheight, lasnoise, lasgrid, lasthin, las2las, las2dem, lasduplicate, lasindex. Die hier vorgestellten Methoden wurden entwickelt unter Verwendung der LAStools Version vom 19. November 2018.

3 Benötigte Daten

3.1 Luftbilder

Für die DOM-/nDOM-Berechnung sind digitale Luftbilddaten aus den regelmäßigen Befliegungen der Landesvermessungsverwaltungen vorgesehen. Dies sind 4-Kanal-Bilder (RGBI) mit einer nominellen geometrischen Auflösung von 20 cm und einer Überlappung von 60/30- bzw. 80/30. Das hier beschriebene Verfahren beinhaltet nicht die Orientierung der Luftbilder. Es wird vorausgesetzt, dass diese von den Landesvermessungsverwaltungen mit Hilfe von Kontrollpunkten und direkt erfasster äußerer Orientierungsparameter in einem Bündelblockausgleich hergeleitet und mit den Bildern bereitgestellt wird. Es ist möglich, dass Bildblöcke, die ohne Kontrollpunkte orientiert wurden (nur direkt erfasste äußere Orientierungsparameter und Bündelblockausgleich), einen zu großen Versatz, vor allem in der Höhe, aufweisen. Dies verhindert die Ableitung qualitativ hochwertiger Oberflächenmodelle.

- Dateiformat der Luftbilder: TIFF
- Dateiformat der Orientierungsdaten: Inpho .prj Datei

3.2 Digitales Geländemodell 1 m (DGM1)

Für das Image Matching (mit MATCH-T DSM) und für die Normalisierung der Oberflächenmodelle wird das von den Landesvermessungsverwaltungen bereitgestellte Digitale Geländemodell mit 1 m räumlicher Auflösung benötigt. Die Landesvermessungsverwaltungen generieren das DGM1 aus hochgenauen Laserscannerdaten.

- Dateiformat des DGM1: ASCII (.xyz)

4 Organisation der Daten

Um große Gebiete und die damit einhergehenden großen Datenmengen prozessieren zu können, werden die Daten in quadratische Kacheln von 1 km² unterteilt. Eine solche Einteilung der Daten in Kacheln wird im Zuge des Image Matchings vorgenommen und bis zum Ende der Prozessierung beibehalten. Die quadratischen Kacheln werden so zugeschnitten, dass ihre Kanten mit den vollen Kilometern des jeweiligen Koordinatensystems (Gauß-Krüger oder UTM) zusammenfallen. Die Dateinamen der einzelnen Kacheln beinhalten die Koordinaten der linken unteren Kachelecke (Südwestecke), um sie geografisch zuordnen zu können.

Im Falle von Daten im Gauß-Krüger Koordinatensystem besteht der Dateiname aus 8 Ziffern, wobei die ersten vier Ziffern für den Rechtswert und die letzten vier Ziffern für den Hochwert stehen. Für Daten im UTM-Koordinatensystem beinhaltet der Name 9 Ziffern, mit den ersten fünf Ziffern für den Rechtswert (inklusive Zonenindex, z. B. 32) und den letzten vier Ziffern für den Hochwert. In beiden Fällen fallen die letzten drei Ziffern der Koordinaten (000) weg. Alle nach dem Image Matching durchzuführenden Prozessierungsschritte werden kachelweise ausgeführt. Den Kacheln wird entsprechend ihres Themas ein Präfix im Dateinamen zugeordnet, z. B. „DTM_“ für das Geländemodell (DGM), „DSM_“ für das Oberflächenmodell (DOM) und „nDSM_“ für das normalisierte Oberflächenmodell (nDOM).

5 Prozessierung

5.1 Prozessierung des digitalen Geländemodells (DGM)

Das DGM wird während des Image Matchings (mit MATCH-T DSM) sowie während der Weiterverarbeitung der Punktwolken in verschiedenen geometrischen Auflösungen und Dateiformaten benötigt. Je nach verwendeter Image Matching Software unterscheiden sich die benötigten Formate. Bei der Nutzung von SURE muss das DGM in 1 m Auflösung (DGM1) im .laz-Format vorliegen. Wird das Image Matching mit MATCH-T DSM durchgeführt, wird zusätzlich zum DGM1 im .laz-Format auch noch ein DGM mit 25 m Auflösung (DGM25) im .tif- bzw. .dtm-Format benötigt. Die Aufbereitung der DGM Daten erfolgt mit der Software LAsTools. Es wird in der nachfolgenden Beschreibung davon ausgegangen, dass das DGM1 in der von den Vermessungsverwaltungen üblicherweise verwendeten Kachelung von 1000 x 1000 m im .xyz-Format vorliegt.

Konvertierung von .xyz zu .laz: Um die .xyz Dateien in .laz Dateien zu konvertieren, wird das LAsTools Modul „txt2laz.exe“ mit den folgenden Einstellungen gestartet:

- „process all files“ ausgewählt
- (x), (y) und (z) ausgewählt
- parse string: xyz
- format: laz

Während der Konvertierung wird allen Punkten die Klasse 0 zugewiesen. Über die Kommandozeile kann der Prozess nach folgendem Muster gestartet werden:

```
txt2las.exe -lof "dgm\xyz\file_list_xyz.txt"
           -parse xyz
           -odir "dgm\laz" -olaz
```

Die nun vorliegenden .laz-Dateien werden im weiteren Verlauf unter anderem für die Normalisierung des Oberflächenmodells verwendet, die vom Python-Skript „cloud2ndom.py“ durchgeführt wird. Um die DGM .laz Dateien hierfür nutzen zu können, müssen sie nach dem im Abschnitt 4 erläuterten Muster benannt werden. Für UTM-Daten wäre der Dateiname, z. B., „DTM_32XXXXYYYY.laz“. Wobei XXX für die ersten 3 Ziffern des UTM 32 Ostwert (ohne Zonenindex) und YYYY für die ersten 4 Ziffern des UTM 32 Nordwert steht. Sollten die DGM Dateien nicht nach dem genannten Schema benannt sein, muss eine Umbenennung stattfinden. Das Python-Skript „rename_F3.py“, das vom Skript „cloud2ndom_F3.py“ aufgerufen wird (siehe Abschnitt 5.4), implementiert bereits die entsprechende Umbenennung der DGM-Namensmuster des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) sowie des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL-BW). So werden die auf UTM-Koordinaten basierende DGM-Namensmuster 2XXXXYYYY.laz und DGM_32XXX_YYYY.laz umbenannt in DTM_32XXXXYYYY.laz sowie das auf Gauß-Krüger-Koordinaten basierende DGM-Namensmuster DGM_XXXX_YYYY.laz umbenannt in DTM_XXXXYYYY.laz. Bei abweichenden Namensmustern der DGM-Kacheln muss der Code im Skript „rename_F3.py“ entsprechend modifiziert werden (Anpassung der *Regular Expressions*).

Erstellung des DGM25 im .tif-Format: Um das DGM1 auf eine Auflösung von 25 m zu vergrößern und vom .laz-Format in das .tif-Format zu konvertieren, wird das LAsTools Modul „lasgrid.exe“ verwendet. Da das DGM25 später für das Image Matching mit der Software MATCH-T DSM (Abschnitt 5.2) verwendet werden soll, ist zu beachten, dass das entstehende DGM25 als eine Datei (keine Kachelung) abgespeichert werden muss (Aktivierung der Option „merge files into one“). In der GUI wird der Prozess mit folgenden Einstellungen gestartet:

- „process all files“ ausgewählt
- „merge files into one“ ausgewählt
- Filename: dgm25merg
- Pixel/step size: 25
- item: elevation
- op: average
- format: tif

Über die Kommandozeile kann der Prozess nach folgendem Muster gestartet werden:

```
lasgrid.exe -lof "dgm\laz\file_list_laz.txt"
           -merged
           -step 25
           -elevation
           -average
           -odir "dgm" -o "dgm25merg.tif"
```

5.2 Image Matching

Für das Image Matching muss Software verwendet werden, die große Datenmengen prozessieren kann und Punktwolken hoher Dichte (Ziel: ein 3D-Punkt je Bildpixel) erzeugt. Hierfür existieren mehrere kommerzielle Softwarepakete (z. B. SURE, MATCH-T DSM, ERDAS, PhotoScan). Diese unterscheiden sich zum Teil stark in den Matching-Methoden und in den Parametern, die eingestellt werden können. Die Entwicklungen in diesem Bereich sind sehr dynamisch. Daher konnten im Rahmen des F³-Projekts nicht alle möglichen Softwarelösungen getestet werden. Grundsätzlich gilt, dass für jede Software eigene, für Waldflächen optimierte Parametereinstellungen gefunden werden müssen.

Im Folgenden werden die im F³-Projekt als optimal befundenen Parametereinstellungen für SURE und MATCH-T DSM beschrieben. Die Einstellungen für das Image Matching mit der Software MATCH-T DSM wurden durch einen Vergleich der bildbasierten Oberflächenmodelle mit hochgenauen Referenzdaten, d.h. einem laserscanningbasierten Oberflächenmodell, ermittelt. Die Abweichungen der bildbasierten Modelle vom Referenzmodell wurden mittels des Root Mean Square Errors (RMSE) quantifiziert und es wurde ein visueller Vergleich der Modelle anhand eines Differenzbildes durchgeführt.

Für das Image Matching mit SURE wurden bereits vor Beginn des F³-Projekts Parametereinstellungen festgelegt, die für Luftbilder mit Längsüberlappung von 60 bzw. 67% und Querüberlappung von 30% optimale Ergebnisse liefern, da zu diesem Zeitpunkt keine regelmäßigen Aufnahmen höher überlappende Luftbilder in Baden-Württemberg durchgeführt wurden. Die Parametereinstellungen wurden durch einen Vergleich der Höhen im nDOM mit stereoskopisch gemessenen Baumhöhen ermittelt. Seit 2017 werden in Baden-Württemberg regelmäßige Befliegungen mit einer Überlappung von 80/30 durchgeführt. Für die stärkere Überlappung optimierte Parametereinstellungen wurden im F³-Projekt festgelegt. Zur Feststellung der optimalen Parameter wurden die bildbasierten DOM anhand von RMSE und Differenzbildern mit laserscanningbasierten DOM verglichen. Zusätzlich wurde die Menge der „no data“-Pixel (NA) miteinander verglichen.

Bei SURE wie auch bei MATCH-T DSM hat sich (bei einer 80/30-Überlappung) das Image Matching bis zur obersten Pyramidenstufe (20 cm Pixelgröße) als vorteilhaft erwiesen, auch wenn dies eine höhere Rechenzeit bedeutet. Selbst wenn später die geometrische Auflösung wieder herabgesetzt wird, z. B. auf 50 oder 100 cm, wurden die Baumhöhen besser erfasst. Für Waldbestände ist es sinnvoll, dass die Software übermäßige Glättung vermeidet.

Nachfolgend werden die im Rahmen des F³-Projekts ermittelten optimalen Parametereinstellungen für SURE (60 bzw. 67/30- sowie 80/30-Überlappung) und MATCH-T DSM (80/30-Überlappung) für Luftbilder mit einer nominellen geometrischen Auflösung von 20 cm dargestellt.

▪ SURE-Einstellungen

Die nFrames Software SURE wird bei der F³-Projektpartnerin FVA zum Image Matching für die Oberflächengenerierung verwendet. Die Software implementiert Semi-Global Matching (SGM). SURE erzeugt zwei verschiedene, regelmäßige Punktwolken: (a) „Cloud“, in der Lücken im Grid durch Verdeckung und Schatten nicht durch Interpolation aufgefüllt wurden. Und (b) „Cloud_Refined“, in der fehlende Werte bereits interpoliert wurden. Die Punktwolke „Cloud_Refined“ wird für die weiteren Prozessierungsschritte zur nDOM-Berechnung verwendet.

Für SURE (Version 2.3.1.41) werden größtenteils die Grundeinstellungen der Software für das Szenario „Aerial Nadir“ mit 60% bzw. 67% sowie 80% „forward overlap“ und 30% „sideward overlap“ beibehalten. Im SURE-GUI werden folgende Einstellungen manuell gesetzt:

- Parameters:
 - Quality: High (Längsüberlappung < 80%: Berechnung nur bis zur Pyramidenstufe 1)
 - Quality: Ultra (Längsüberlappung ≥ 80%: Berechnung bis zum Originalbild)
- Advanced configuration:
 - Xmin/Xmax“ und „Ymin/Ymax“: 2D-Projektfläche die genau mit den vollen Kilometer-Koordinaten des entsprechenden Koordinatensystems zusammenfallen und gleichzeitig alle zu prozessierenden Luftbilder beinhalten (Haken bei „auto“ entfernen)
 - Tile size: Kachelgröße auf „manual“ und 1000 m setzen
 - GSD: Ground Sampling Distance auf „manual“ und $0,25 \times 2 = 0,5$ m (Längsüberlappung < 80%) bzw. $0,2 \times 1 = 0,2$ m (Längsüberlappung ≥ 80%) setzen
 - Pointcloud format: „laz“ (reduziert den benötigten Speicherplatz; als Ausgabeformat könnte auch „las“ gewählt werden, was die Prozessierung beschleunigt, aber mehr Speicherplatz benötigt.)
 - Minimum model count (fold): 1 (berechnet die größtmögliche Gebietsausdehnung).
 - Minimum detections per cell: 1

Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie man SURE mit den Einstellungen für 80% Längsüberlappung über die Kommandozeile starten kann:

```
sure.exe -inphoprj P:\luftbilder\orientation\image_block.prj -basepath
P:\SURE_output -scenario AERIAL 80 30 -tilesize 1000 -gsd 0.2 -area2d
595000 610000 5716000 5729000 -apply_area_based_image_selection -laz -
fold 1 -ignore_earth_curv
```

Beim Image Matching mit SURE werden verschiedene Produkte erzeugt. Relevant für das hier beschriebene Verfahren zur Oberflächengenerierung sind die „Cloud_Refined“-Daten. Diese Punktwolke wird von SURE für die Orthophotoerstellung produziert (wenn keine Orthophotos berechnet werden, wird auch kein Cloud_Refined berechnet). Im Vergleich zur Punktwolke „Cloud“ ist „Cloud_Refined“ in ihrer Qualität verbessert und kleinere NA-Flächen wurden interpoliert und mit Punkten gefüllt. „Cloud“ ist für die DOM/nDOM-Berechnung nicht von Bedeutung, kann aber einen Hinweis auf die Qualität des Image Matching in Bezug auf Vollständigkeit geben (Erstellung einer NA-Maske).

Die hier gemachten Angaben beziehen sich auf SURE Versionen bis einschließlich 3, mit denen auch die Berechnungen im F³-Projekt durchgeführt wurden. Ab Version 4, die erst im letzten Drittel der Projektlaufzeit (1. Quartal 2020) verfügbar wurde, haben sich die Einstellmöglichkeiten (besonders für die Kommandozeile) geändert. Zum Beispiel muss nun auch der Speicherort der Bilddaten (-i) angegeben werden und die Befehle „-gsd“ und „-laz“ wurden zu „--gsd“ bzw. „--laz“ geändert. Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie man SURE Version 4.1 mit den Einstellungen für 80% Längsüberlappung über die Kommandozeile starten kann:


```
sure.exe -o P:\luftbilder\orientation\image_block.prj -i P:\luftbilder
-p P:\SURE_output -s AERIAL_NADIR 80 30 -q ULTRA -t 1000 --gsd 0.2 -a
595000 610000 5716000 5729000 --laz --ignore-earth-curvature
```

▪ MATCH-T DSM-Einstellungen

a. Vorbereitung der Daten

Um mit MATCH-T DSM eine Punktwolke zu erstellen, müssen die Eingangsdaten zuvor aufbereitet werden. Es müssen die Dateipfade zu den Bilddateien angepasst werden, Bildpyramiden und ein Übersichtsbild des Projektgebietes erzeugt werden, außerdem muss die DGM25 .tif Datei in das .dtm Format konvertiert werden. Hierzu sind folgende Schritte durchzuführen:

Nach dem Start des Applications Master wird über den Button „Open...“ die .prj Datei der Luftbilder geöffnet. Die Eigenschaften des nun geöffneten Projekts können im „Project Editor“ eingesehen und geändert werden.

Anpassen der Pfade zu den Bilddateien: Doppelklick auf „Frame Type“ → Auswahl aller Listeneinträge → „Edit“ → Im Fenster „Frame Photo Properties“ den Eintrag „Image path“ auswählen und anschließend zum Dateiordner, der die Luftbilder enthält, navigieren.

Im selben Menü („Frame Photo Properties“) den Eintrag „Terrain Height“ auswählen und die durchschnittliche Geländehöhe eintragen → „OK“.

Das Berechnen der Bildpyramiden erfolgt über das Hauptmenü: „Imaging“ → „Image Commander“ → Auswahl aller Listeneinträge → „Process Image Overviews“ → Häkchen bei „Enforce tile rather than scanline organization“ entfernen → „Start“.

Das Erzeugen eines Übersichtsbilds der Projektregion (optional) erfolgt über: „Imaging“ → „Image Commander“ → „Process Project Overview“ → „Generate Quick-Ortho“ → „Start“.

Für das gesamte Gebiet, für welches das Image Matching durchgeführt werden soll, muss ein zusammenhängendes DGM (eine Datei, keine Kacheln!) in den Inpho-eigenen Formaten .dtm oder .ras vorliegen. Mit dem „DTM Toolkit“ muss dazu das in Schritt 4.2 erzeugten DGM25 (.tif Format) in das .dtm Format konvertiert werden („Capture“ → „DTM Toolkit“ → „Convert“).

b. Image Matching

Nachdem die Eingangsdaten, wie zuvor beschrieben, aufbereitet wurden, können die Einstellungen für das eigentliche Image Matching gewählt werden. Hierbei müssen Einstellungen sowohl über die graphische Benutzeroberfläche von MATCH-T DSM vorgenommen werden als auch über die Match.status-Datei.

b.1. Einstellungen: Match.status Datei

Um eine Match.status Datei zu erzeugen, muss über MS Windows eine leere Textdatei erstellt werden („Windows“ → „Zubehör“ → „Editor“). In diese Datei wird der unten folgende Text eingefügt. Anschließend wird die Datei unter dem Namen „Match.status“ in dem Ordner, der auch die .prj Datei der zu prozessierenden Luftbilder enthält, gespeichert. Im unten gezeigten Text der Match.staus Datei müssen die gelb hinterlegten Koordinaten an das zu prozessierende Gebiet angepasst werden. Es müssen die Koordinaten der linken unteren Ecke des Gebiets angegeben werden. Die Werte müssen auf volle Tausender gerundet sein, was dazu führen kann,

dass die Koordinate außerhalb des Gebietes liegt (siehe Beispielkoordinaten in Gelb im Text unten).

Text für die Match.status Datei:

```
*** 3D point cloud: ***

-z_factor 1.0 ..... Factor for Z discontinuity of 2.5D filtering
                (default: 1.0 * [5*sigma])

-z_smooth 0.5 ..... Factor for Z smoothing in 2.5D filtering
                (default: 2.0 * [sigma])

-PtsFormat  "las12" ..... Output format of 3D point cloud
                (pts,dxf,xyz,wnp,bwnp,bxyz,-->las,las12,xyzc)

-dtmshift ..... Top/lower cloud points preferred for DEM
                interpolation

*** Tile manager application: ***

-TpixPts ..... Create point cloud tile manager files

-TpixPtsCoordName ..... Tile manager file names with
                coordinates

-TpixPtsOriginX 591000 ..... X origin of point cloud tile manager
                files

-TpixPtsOriginY 5715000 ..... Y origin of point cloud tile manager
                files

-TpixPtsSizeX 1000 ..... X tile size of point cloud tile manager
                files

-TpixPtsSizeY 1000 ..... Y tile size of point cloud tile manager
                files

*** Miscellaneous: ***

-stddev2las ..... Output of standard deviation to LAS intensity
                (shift: 10000)

*** User interface: ***

-filtering ..... Display additional Finite Element Filter
                settings
```

b.2. Einstellungen: MATCH-T DSM graphische Benutzeroberfläche

Nachdem die Match.status Datei erstellt wurde, muss der Applications Master geschlossen und anschließend neu gestartet werden. Das Projekt wird über den Button „Open...“ des Applications Master geöffnet. Im Applications Master wird dann über den Menüpunkt „Capture“ → „MATCH-T DSM“ der „MATCH-T DSM Commander“ geöffnet und dort über den Button „Add“ ein neuer Task hinzugefügt und parametrisiert. Im sich öffnenden Fenster „Parameter Settings“ (Abbildung 1) muss die Area ID: „DSM_Cloud“ vergeben werden. Im Menübereich „Output“ muss unter Directory: der Ausgabeordner festgelegt und die Option „Enable LasZip format for point cloud files“ markiert werden. Anschließend wird über den Button „...“ neben dem Feld „Strategy“ das

Fenster „Surface Generation Parameter Dialog“ geöffnet (Abbildung 2). Im „Surface Generation Parameter Dialog“ werden die in Abbildung 2 gezeigten Einstellungen gewählt und mit „OK“ gespeichert.

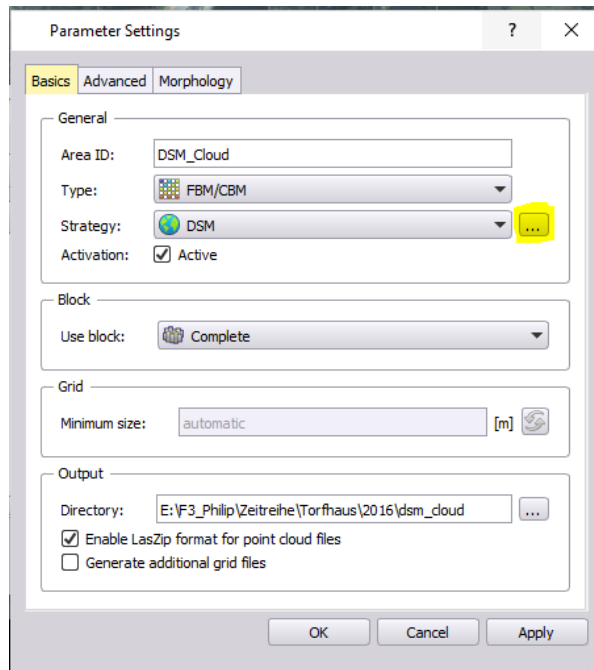


Abbildung 1: Darstellung des Parameter Settings Fensters (Tabellenreiter Basics) der Software MATCH-T DSM und der zu wählenden Einstellungen.

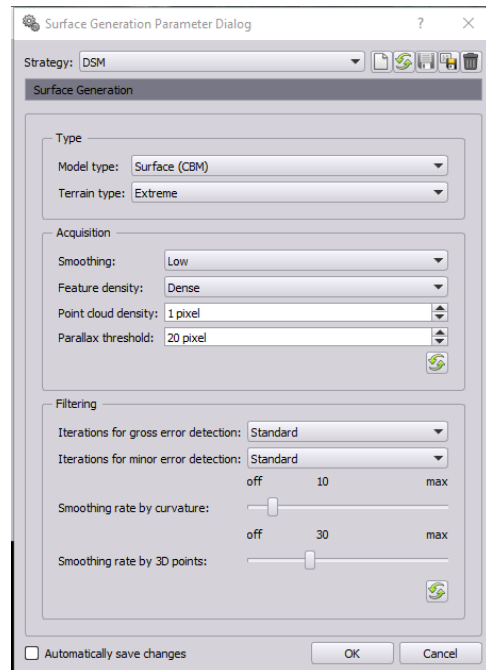


Abbildung 2: Darstellung des Surface Generation Parameter Dialog Fensters der Software MATCH-T DSM und der zu wählenden Einstellungen.

Zuletzt wird im Fenster „Parameter Settings“ der Tabellenreiter „Advanced“ geöffnet. Unter Options müssen die Werte „Optimize“ = Balance, „Start at“ = Level 10 und „Stop at“ = Level 0 spezifiziert werden. Dann muss die Option „Consider initial height model“ markiert und der Pfad zum DGM25 (.dtm Format) spezifiziert (Abbildung 3) werden. Über „OK“ wird das Parameter Set gespeichert und das Fenster „Parameter Settings“ geschlossen.

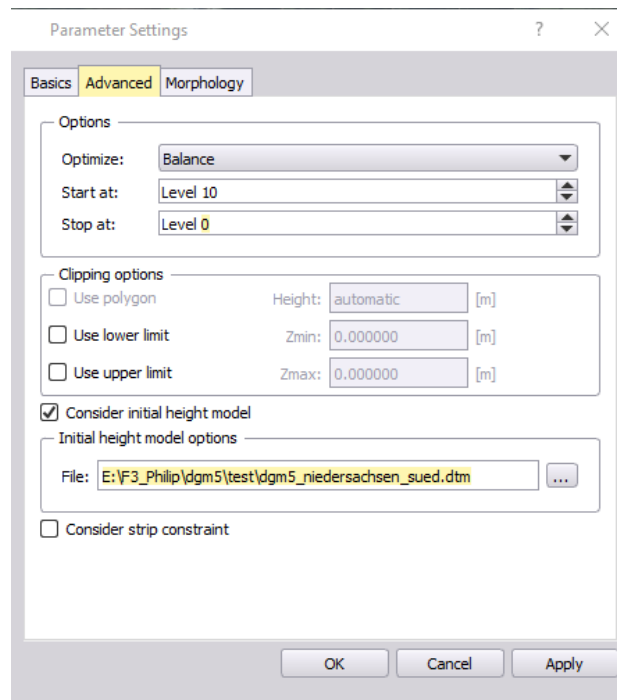


Abbildung 3: Darstellung des Parameter Settings Fensters (Tabellenreiter Advanced) der Software MATCH-T DSM und der zu wählenden Einstellungen.

Im MATCH-T DSM Commander erscheint der soeben parametrisierte Matching Task nun als Listeneintrag (Abbildung 4). Nachdem das Safe-Icon (Diskettensymbol) angeklickt wurde, kann der Matching Task gestartet werden („Process“ → „Start“).

Als Output generiert MATCH-T DSM .laz Dateien mit einer Ausdehnung von 1000 x 1000 m.

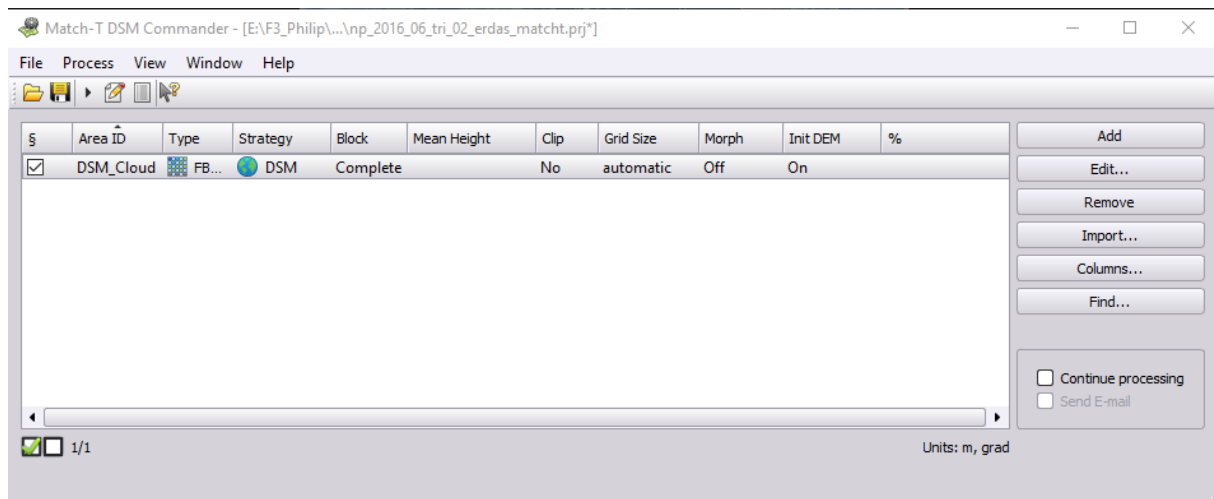


Abbildung 4: Darstellung des MATCH-T DSM Commander Fensters und der zu wählenden Einstellungen.

5.3 Qualitätsprüfung

Bevor mit der nDOM-Berechnung fortgefahren wird, sollte eine erste (visuelle) Qualitätsprüfung der Punktwolken erfolgen, bei der vor allem die Vollständigkeit der prozessierten Fläche überprüft wird. Dadurch können Fehler aufgrund von Wolken oder unzureichender Bildorientierung erkannt werden. Wie eine Qualitätsprüfung durchgeführt werden kann, variiert von Software zu Software. Je nach bereitgestellten Informationen und Daten können Statistiken einen Hinweis auf die Qualität liefern, sich Messabweichungen graphisch darstellen lassen oder die Vollständigkeit in abgeleiteten

Rasterprodukten (z. B. Orthophotos) visuell erkennbar gemacht werden. In MATCH-T DSM ist eine visuelle Überprüfung der generierten Punktwolken mit Hilfe des „DTMaster“ möglich („Capture“ → „DTMaster“). Nach Öffnen des DTMaster kann über „File“ → „Import“ → „Tile Manager“ eine Übersicht über alle erzeugten Punktwolkekacheln visualisiert werden. Nach Auswahl einzelner Kacheln per Mausklick können sie über den Button „Load“ in den DTMaster geladen und im Detail betrachtet werden. Über den Button „Display Points“ können z. B. verschiedene Farbschemata für die Darstellung gewählt werden und über den Button „Profile Area“ kann per drag-and-drop ein Bereich der Punktwolke für die Darstellung in einem 3D-Viewer ausgewählt werden.

Die Ergebnisse des Image Matchings mit SURE wurden in diesem Projekt mit Hilfe eines ArcGIS Mosaic Datasets aller Orthophotokacheln überprüft. Falsche Höhen aufgrund von Matchingfehlern führen in einem Orthophoto, das auf Basis des DOM berechnet wurde, zu Artefakten und Bildbereichen, in denen das Bild verschmiert erscheint. Werden solche Strukturen erkannt, können die entsprechenden Punktwolkekacheln, z. B. mit LAStools („lasview“) oder in der Software Cloud Compare (<http://cloudcompare.org/> [letzter Zugriff 17.02.2020]), genauer untersucht werden.

5.4 Berechnung von DOM und nDOM mit dem Python-Skript „cloud2ndom_F3.py“

Die nachfolgend beschriebene Berechnung von DOM und nDOM ist im F³-Projekt in einem Python-Skript (Nutzung von ArcPy) implementiert und läuft vollautomatisch. Es ist zu beachten, dass der Ordner, der das Skript cloud2ndom_F3.py enthält, ebenfalls das Python-Skript rename_F3.py enthalten muss. Das Skript rename_F3.py wird während der Prozessierung durch cloud2ndom.py aufgerufen und verwendet. Ebenfalls enthalten sein müssen der Ordner „lyr_files“ und das darin abgelegte Farbschema. Andernfalls kann den nDOM-Ausgabedateien nicht das für die Darstellung angepasste, aussagekräftige Farbschema (Abbildung 5) zugewiesen werden. Im Skript müssen folgende Einstellungen angepasst werden:

1. cloud: Pfad zu den Punktwolkekacheln (Zeile 76)
z. B. r"S:\project_area_1\image_matching\Cloud_Refined"
2. dtm: Pfad zu den 1000 x 1000 m DGM1-Kacheln (Zeile 78)
z. B. r"S:\project_area_1\image_matching\cloud2ndsm\dgm1"
3. output_path: Pfad zur Ablage von DOM und nDOM (Zeile 80)
z. B. r"S:\project_area_1\image_matching\cloud2ndsm"
4. lastools: Pfad zum LAStools-Ordner (Zeile 82)
z. B. r"S:\Projekte\Hinweise\software\LAStools18"
5. epsg: EPSG-Code des verwendeten Koordinatensystems der Eingangsdaten (Zeile 86)
z. B. 31467 für Gauß-Krüger Zone 3 oder 25832 für UTM Zone 32 N
6. min_area: Mindestfläche (in %) für die pro Kachel Höhendaten vorhanden sein müssen, damit diese Kachel prozessiert wird (Zeile 88). Voreinstellung ist 10 (%).

Gestartet wird das Skript über eine Batch-Datei (.bat), die den Pfad zur zu nutzenden Python-Installation sowie zum Python-Skript angibt. Sie kann beispielsweise mit einem Texteditor erstellt werden, indem folgender Text eingefügt und die Datei mit der Endung .bat gespeichert wird:

```
C:\Python27\ArcGIS10.5\python.exe C:\Pfad\zum\Skript\cloud2ndom_F3.py
PAUSE
```

Während der Prozessierung werden temporäre Daten im „output_path“ Verzeichnis abgelegt, die nach Abschluss der DOM- und nDOM-Berechnung wieder gelöscht werden.

Nachdem das Skript gestartet wurde, werden die in den Abschnitten 4.4.1 bis 4.4.5 detailliert erläuterten Operationen zur Harmonisierung, Filterung, Normalisierung und Rasterung der Punktwolke durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisdateien sind:

- 1.) Oberflächenmodell als Punktwolke (50 cm Punktabstand) im laz-Format. Die Ausdehnung der Kacheln beträgt 1000 x 1000 m.
- 2.) Oberflächenmodell als Rasterdatei im tif-Format. Die tif-Dateien haben eine Auflösung von 1 m und eine Ausdehnung von 1000 x 1000 m.
- 3.) Normalisiertes Oberflächenmodell (50 cm Punktabstand) im laz-Format. Jede Kachel ist mit einem 100 m Puffer umgeben, der als „withheld“ klassifiziert ist. Die Ausdehnung der Kacheln beträgt inklusive des Puffers 1200 x 1200 m.
- 4.) Normalisiertes Oberflächenmodell im tif-Format. Die tif-Dateien haben eine Auflösung von 1 m und eine Ausdehnung von 1000 x 1000 m.

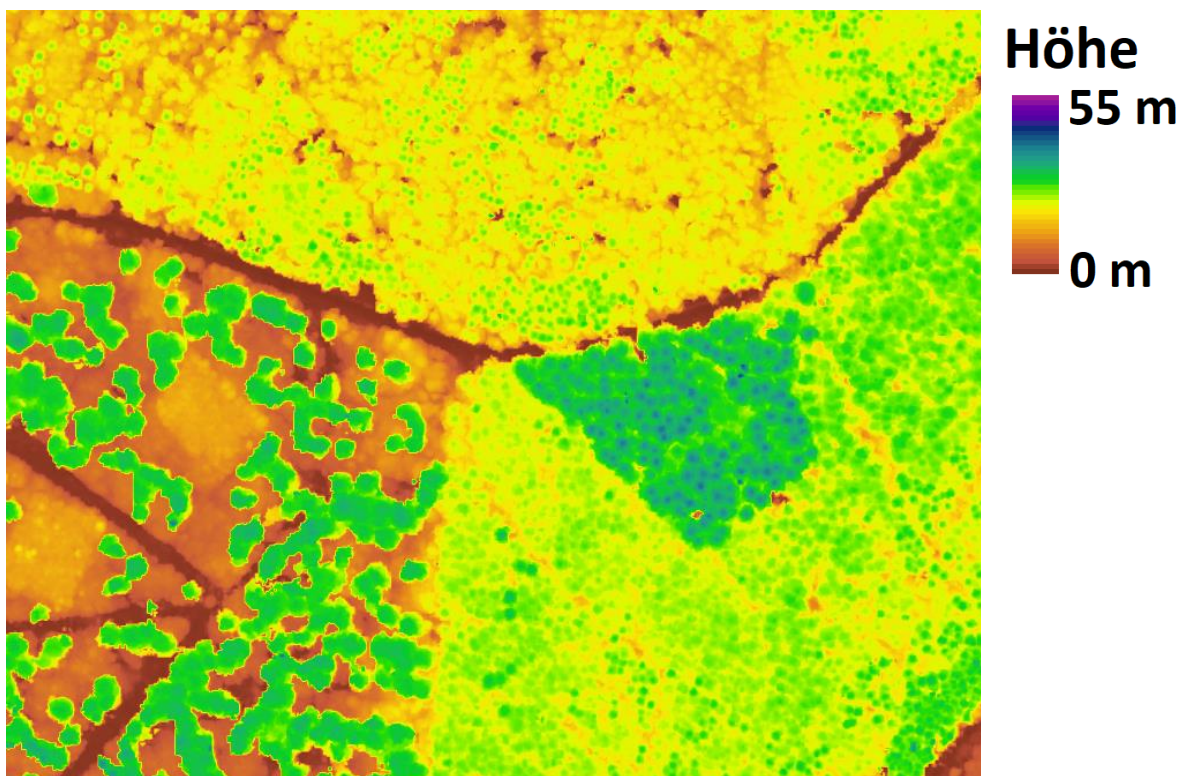


Abbildung 5: Illustration des nDOM Farbschemas.

5.4.1 Bereinigung und Vereinheitlichung der Eingangsdaten

Um die Ableitung von DOM und nDOM aus der Punktwolke zu optimieren, werden die Eingangsdaten zunächst in mehreren Schritten bereinigt und vereinheitlicht:

- 1.) Löschen (nahezu) leerer Dateien: Aufgrund der vorgegebenen Kachelung der Daten, können nach dem Image Matching Punktwolkenkacheln existieren, die keine oder nur

sehr wenige Punkte enthalten. Diese befinden sich im Randbereich des Matching-Gebietes und entstehen abhängig vom Gebietszuschnitt und der Verteilung der Stereo-Luftbilder. Leere oder nahezu leere Punktwolkendateien werden aufgrund ihrer Dateigröße (<1500 byte) erkannt und gelöscht.

- 2.) Harmonisierung der Namensgebung der Eingangsdaten: Für die weiterer Prozessierung muss die Namensgebung der Eingangsdaten (Punktwolken- und DGM-Dateien) harmonisiert werden. Hierfür wird das Python-Skript `rename_F3.py` aufgerufen. Basierend auf den dort definierten „Regular Expressions“ werden Dateien mit bestimmter Namensstruktur erkannt und entsprechend den Vorgaben (siehe Abschnitt 4) umbenannt. Je nach Muster der Namensgebung der Eingangsdaten, müssen die Regular Expressions zur Erstellung des neuen Dateinamens im Skript `rename_F3.py` angepasst werden.
- 3.) Vergleich der Abdeckung von DGM und Punktwolke: Das nDOM kann nur für Kacheln erstellt werden, für die auch ein DGM vorhanden ist. In Grenzgebieten werden Luftbildbefliegungen üblicherweise etwas über die Grenze hinaus durchgeführt, um Datenlücken im grenznahen Bereich zu vermeiden. Dadurch können beim Image Matching Punktwolkekacheln entstehen, für die keine DGM Daten vorliegen. Um einen Abbruch der nDOM-Berechnung aufgrund fehlender DGM-Kacheln zu vermeiden, wird eine Liste der Kacheln erstellt, die sowohl von der photogrammetrischen Punktwolke als auch vom DGM abgedeckt sind.
- 4.) Beschränkung auf Kacheln, die zu mindestens 10% mit Daten gefüllt sind: Kacheln in denen nur zu einem geringen Anteil Höhendaten vorhanden sind, verlängern die Prozessierungszeit und erhöhen den benötigten Speicherplatz ohne viel zusätzliche Informationen bereitzustellen. Zudem liegen diese Kacheln üblicherweise in den Randbereichen von Befliegungsblöcken, in denen die Qualität der Bildorientierung und des Image Matchings und somit auch der Höhenwerte vermindert ist. Daher werden nur Kacheln prozessiert, die auf mindestens 10% (= 100.000 m²) der Fläche Höheninformationen enthalten. Der Datenanteil einer Kachel wird mit dem LAsTools-Befehl „`lasinfo`“ erfragt.

```
lasinfo -lof i"intermediate\pc_common_tile_list.txt" ^
-nh -nv -cd -nmm ^
-odir "intermediate\info_dir" -otxt
```

Für jede Punktwolkenkachel wird eine Textdatei erstellt, aus der die Größe der mit Höhendaten gefüllten Fläche („*covered area in square units/kilounits*“) ausgelesen werden kann. Nur Kacheln mit Flächenanteilen von mindestens 10% werden für die weitere Prozessierung verwendet. Der Wert 10% ist hier voreingestellt, kann aber durch den/die NutzerIn in Zeile 88 angepasst werden.

- 5.) Harmonisierung des Punktabstands: Da alle im Folgenden verwendeten Filter (siehe Abschnitt 5.4.2) für Punktwolken mit einem nominellen Punktabstand von 50 cm optimiert wurden, müssen Punktwolken mit höherer Punktdichte ausgedünnt werden. Dies hat auch den positiven Effekt, dass die zu prozessierenden Dateien weniger Speicherplatz in Anspruch nehmen und die Verarbeitung mit höherer Geschwindigkeit abläuft. Zuerst wird geprüft, ob ein Ausdünnen der Punktwolke nötig ist. Dafür wird aus

der ersten Punktwolkekachel mit dem LAStools-Befehl „lasinfo“ die benötigte Information in eine Textdatei geschrieben.

```
lasinfo -i "Point_Cloud\DSM_Cloud_*.las" ^
        -nh -nv -cd -nmm ^
        -odir "intermediate\las_info.txt" -otxt
```

Aus dieser Textdatei wird der mittlere Punktabstand extrahiert. Ist dieser kleiner als 0,5 m, wird die Punktwolke ausgedünnt. Dafür wird eine Liste der auszudünnenden Kacheln (list_thin.txt) erstellt und der LAStools Befehl „lasthin“ mit den folgenden Parametereinstellungen verwendet. Lasthin legt ein Raster mit einer Weite von 50 cm über die Punktwolke und wählt pro Rasterzelle den Punkt aus, der dem 95. Perzentil der in der Zelle vorhandenen Punkte am nächsten kommt.

```
lasthin -cpu 64 -lof i"intermediate\pc_tile_list.txt" ^
        -percentile 95 ^
        -step 0.5
        -odir "intermediate\lasthin" -olaz ^
```

5.4.2 Filterung der Punktwolke

Die Parameter der Filter wurden so gewählt, dass sie ein optimales Ergebnis für Waldflächen in Mitteleuropa liefern. Bevor die aus dem Image Matching der Luftbilder entstandene Punktwolke gefiltert werden kann, müssen die zu prozessierenden Kacheln gepuffert werden, um Randeffekte bei der Filterung zu vermeiden. Unter Verwendung des DGM1 wird die Punktwolke normalisiert und anschließend werden Punkte, die mehr als 1 m unter oder mehr als 55 m über dem DGM1 liegen, entfernt (Abbildung 6). Allerdings ist zu bedenken, dass Punkte auf Bäumen die größer als 55 m sind, teilweise als Ausreißer behandelt und gelöscht werden. Der obere Schwellwert 55 m wurde als Kompromiss zwischen Entfernung möglichst vieler Ausreißer und vollständiger Erfassung sehr großer Bäume gewählt. Es wird angenommen, dass Bäume die größer 55 m sind, nur sehr selten vorkommen (meistens beschränkt auf Douglasienbestände). Der untere Schwellwert -1 m berücksichtigt Ungenauigkeiten in den Höhenwerten sowie einen potentiellen Höhenversatz zwischen DGM1 und der Punktwolke und vermeidet die Löschung von Punkten, die tatsächlich keine Ausreißer sind. Mit dem LAStools Befehl „lasnoise“ werden außerdem isolierte Punkte bzw. Punktgruppen entfernt (Abbildung 6).

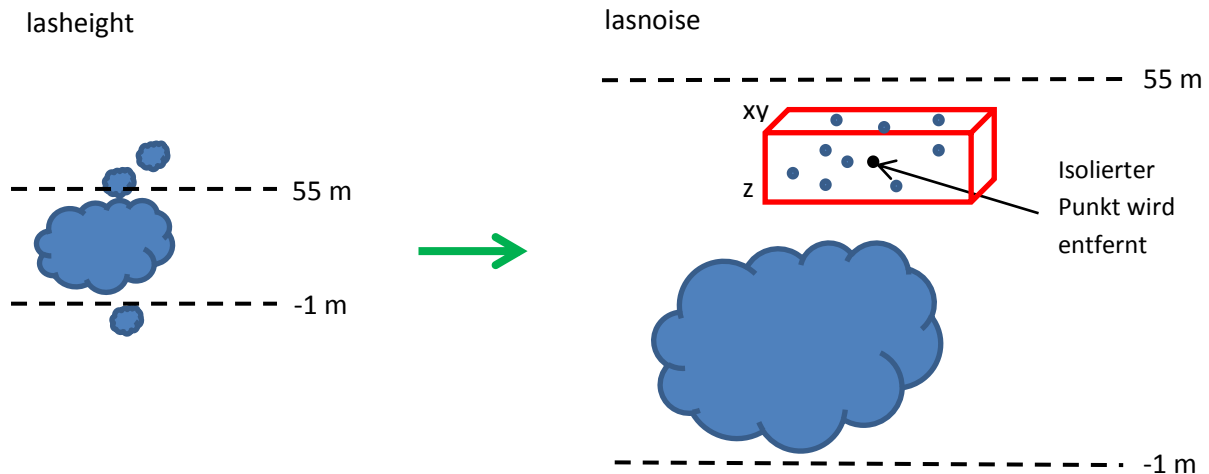


Abbildung 6: Einsatz von lasheight (Ausreißer werden entfernt) und lasnoise (isolierte Punkte werden entfernt) zur Punktwolkenfilterung.

Aus der so entstandenen gefilterten Punktwolke können anschließend Waldstrukturattribute abgeleitet und als Rasterdaten abgespeichert werden. Zudem werden daraus ein DOM (Abschnitt 5.4.4) und ein nDOM (Abschnitt 5.4.3) im Rasterformat (.tif) erstellt. Die Details des Filterprozesses sind im Folgenden beschrieben:

- 1.) Normalisieren der Punktwolke: Um die Punktwolke zu normalisieren, d. h. das Geländemodell von der Punktwolke zu subtrahieren, müssen die Punkte des Geländemodells sowie die Punkte der Punktwolke unterschiedlichen Klassen zugeordnet sein. Den DGM-Punkten wurde schon bei der Erstellung die Klasse 0 zugewiesen (Abschnitt 5.1) bei der photogrammetrischen Punktwolke wird dies mit LAStools: las2las erreicht. Hierfür werden alle zu prozessierenden Kacheln in einer Textdatei (list_class.txt) aufgelistet und an las2las übergeben. Anschließend müssen die Datensätze zu einer Datei zusammengefasst werden, welche dann um 100 m pro Seite gepuffert wird (LAStools: lastile), um Randeffekte zu vermeiden. Hierfür müssen zwei Listen erstellt werden, die jeweils nur die Kacheln enthalten, die sowohl von der klassifizierten, photogrammetrischen Punktwolke (pc_tile_list.txt) als auch vom DGM (dtm_tile_list.txt) abgedeckt sind. Im nächsten Schritt wird dann die Höhe des Geländes von der ursprünglichen Punktwolke subtrahiert. Ab diesem Schritt läuft die Prozessierung kachelweise.

- Weist den Punkten der Punktwolke die Klasse 5 zu:

```
las2las -lof "intermediate\list_class.txt" ^
-set_classification 5 ^
-odir "intermediate\class_5"
-olaz
```

- Fasst die Punkte der Punktwolke und die des DGM1 in einer Datei zusammen und schneidet sie in 1000 x 1000 m Kacheln mit 100 m Puffer pro Seite. Damit dieser Vorgang auf mehr als einem Prozessor laufen kann, wird zuvor der LAStools Befehl lasindex sowohl auf die Punktwolke als auch DGM Daten angewendet.

```
lastile -lof "intermediate\pc_tile_list.txt" ^
        -lof "intermediate\dtm_tile_list.txt" ^
        -tile_size 1000 -buffer 100 ^
        -rescale 0.01 0.01 0.01 ^
        -flag_as_withheld ^
        -odir "intermediate\lastile" -olaz
```

- Mit dem Befehl `lasheight` wird nun die Geländehöhe von den z-Koordinaten der Punktwolke subtrahiert. Außerdem werden alle Punkte, die sich mehr als 55 m über bzw. -1 m unter der Geländehöhe befinden, aus der Punktwolke entfernt (Abbildung 6):

```
lasheight -i "intermediate\lastile\tile_*.laz" ^
          -class 0 ^
          -drop_below -1 ^
          -drop_above 55 ^
          -replace_z ^
          -o "intermediate\lasheight_1_*.laz" -olaz
```

- Abschließend werden die Punkte des Geländemodells wieder aus der Punktwolke entfernt:

```
las2las -i "intermediate\lasheight_1_*.laz" ^
        -drop_classification 0 ^
        -o "intermediate\las2las_*.laz" -olaz
```

- 2.) Klassifizieren der Punktwolke: Die nächsten zwei Prozessierungsschritte dienen dazu die Punktwolke in zwei Klassen zu unterteilen: (a) Punkte die oberhalb des 75. Perzentils liegen und (b) Punkte die unterhalb des 75. Perzentils liegen. Hierzu wird zuerst mit dem LAsTools Befehl `lasthin` ein 4 x 4 m Grid über die Punktwolke gelegt und innerhalb jeder Zelle der Punkt ausgewählt, der dem 75. Perzentil aller in dieser Zelle vorkommenden Punkte am nächsten ist. Diesen Punkten wird die Klasse 8 zugewiesen. Anschließend werden mit dem LAsTools Befehl `lasheight` die Punkte der Klasse 8 zu einem TIN verknüpft und allen Punkten die sich unterhalb des TINs befinden die Klasse 3 zugewiesen:

```
lasthin -i "intermediate\las2las_*.laz" ^
        -step 4 ^
        -percentile 75 ^
        -classify_as 8 ^
        -o "intermediate\lasthin_2_*.laz" -olaz

lasheight -i "intermediate\lasthin_2_*.laz" ^
          -class "8" ^
          -classify_below 0 3 ^
          -o "intermediate\lasheight_2_*.laz" -olaz
```

- 3.) Filtern der Punktwolke: Der im Folgenden angewendete Filter ist das LAStools Werkzeug „lasnoise“, welches verwendet wird, um isolierte Punkte bzw. Punktgruppen zu entfernen. Isolierte Punkte werden definiert als Punkte, die maximal 40 Nachbarpunkte innerhalb einer Umgebung von 10 x 10 x 4 m haben. Diese Definition wird auf jeden Punkt separat angewandt und alle als isoliert definierte Punkte werden gelöscht (Abbildung 6). Nach der Anwendung wird das Werkzeug „lasnoise“ abermals angewendet. Diesmal sind isolierte Punkte definiert als Punkte, die maximal 8 Nachbarpunkte innerhalb einer Umgebung von 3 x 3 x 3 m haben. Auch diese Punkte werden aus dem Datensatz entfernt. Um nur Punkte zu löschen, die nach oben aus der Punktwolke ausreißen, wird mit dem Argument „-ignore_class 3“ der Zugriff des Filters auf die im vorherigen Schritt als Klasse 3 klassifizierten Punkte ausgeschlossen. Das Endprodukt ist das finale nDOM im laz-Format, aus dem das nDOM und das DOM im tif-Format abgeleitet werden (Abschnitt 4.4.3):

```
lasnoise -i "intermediate\lasheight_2_*.laz" ^
        -ignore_class 3 ^
        -step_xy 10 -step_z 4 ^
        -isolated 40 ^
        -remove_noise ^
        -o "intermediate\lasnoise_1_*.laz" -olaz

lasnoise -i "intermediate\lasnoise_1_*.laz" ^
        -ignore_class 3 ^
        -step_xy 3 -step_z 3 ^
        -isolated 8 ^
        -remove_noise ^
        -o "nDSM_laz\nDSM_*.laz" -olaz
```

- 4.) Erstellen des digitalen Oberflächenmodells (DOM) im laz-Format: Um ein DOM zu erstellen, verwenden wir die ungefilterte und nicht normalisierte Punktwolke. (Bevor die Punktwolken miteinander verglichen werden können, müssen sie in einer Datei zusammengefasst werden; LAStools lasindex & lastile.) Auf diesem Wege werden aus der ursprünglichen Punktwolke alle Punkte, die während der bisherigen Prozessierung ausgedünnt oder als Ausreißer identifiziert und gefiltert wurden, entfernt. Ergebnis dieses Schritts sind zwei Punktwolken je Kachel. Nur die Punktwolke (laz-Datei) mit dem Namenszusatz „_removed“ wird weiter verwendet, die andere wird gelöscht. Bei der verbleibenden Datei wird der Namenszusatz „_removed“ aus dem Namen entfernt. Das Resultat ist das finale DOM im laz-Format:

```
lastile -i "nDSM_laz\nDSM_*.laz" ^
        -i "intermediate\lastile\tile_*.laz" ^
        -o "intermediate\lastile2_*.laz" -olaz

lasduplicate -i "intermediate\lastile2_*.laz" ^
        -record_removed -drop_withheld^
        -o "DSM_laz\DSM_*.laz" -olaz
```

5.4.3 Generierung des nDOM im .tif-Format

Die Generierung von nDOM Kacheln im .tif-Format wird in ein bzw. zwei Stufen durchgeführt, abhängig davon, ob die Kachel NA-Pixel enthält oder nicht.

Raster Erzeugung aus gefilterten nDOM Punktwolken

Die nDOM Punktwolke (.laz-Format) wird mit dem LAStools-Werkzeug „lasgrid“ in ein Raster mit 1 x 1 m-Pixel Auflösung konvertiert. Für jedes Pixel des resultierenden Rasters im .tif-Format wird jeweils der Höhenwert des höchsten Punktes innerhalb des Pixelbereichs übernommen. Alle Werte < 0 werden auf 0 gesetzt. Kleine Lücken im Raster (NA-Pixeln ohne Datenwert) werden aufgefüllt (3 x 3 m Suchfenster).

```
lasgrid -i "nDSM_laz\nDSM_*.laz" ^
        -elevation -highest -clamp_z_below 0^
        -fill 3 -step 1 -drop_withheld^
        -o "intermediate\*_grid.tif" -otif
```

Die resultierenden Dateien werden anschließend auf das Vorhandensein weiterer NA-Pixel überprüft. Hierfür wird das ArcGIS-Werkzeug „GetRasterProperties“ genutzt. Kacheln, die keine NA-Pixel beinhalten, werden als fertige nDOM Kacheln behandelt, in „nDSM_*.tif“ umbenannt und in den Endergebnisordner „nDSM“ kopiert.

nDOM Erstellung für Rasterkacheln mit NA-Pixeln

Kacheln, die NA-Pixel enthalten, werden weiter prozessiert, um die NA-Pixel mit interpolierten Werten zu füllen. Hierfür wird aus den entsprechenden Kacheln mit dem LAStools-Werkzeug las2dem ein flächendeckendes TIN (Triangulated Irregular Network) erzeugt, das in ein Raster mit 1 x 1 m-Pixeln konvertiert wird. Der 100 m breite Puffer, der das nDOM (.laz-Format) umgibt, wird während der Prozessierung entfernt.

```
las2dem -i "intermediate\nDSM_laz\nDSM_*.laz" ^
        -elevation -step 1 -use_tile_bb ^
        -clamp_z_below 0 ^
        -o "intermediate\*_dem.tif" -otif
```

Anschließend werden die nDOM-Kacheln (.tif-Format) mit dem TIN-Raster verschnitten, sodass die NA-Pixel der nDOM-Kacheln mit den interpolierten Werten der TIN-Raster gefüllt werden. Dies geschieht mittels ArcGIS „raster calculator“ (Extension „Spatial Analyst“). Auf diese Weise werden NA-Flächen von kleiner bis mittlerer Größe mit interpolierten Datenwerten gefüllt (Abbildung 7). Da die Interpolation über große Flächen sehr fehlerhaft sein kann, werden große NA-Flächen nicht gefüllt. Die maximale Flächengröße ist durch das zur Erzeugung des TIN-Rasters verwendete LAStools Modul „las2dem“ begrenzt, welches keine Dreiecke mit einer Seitenlänge von mehr als 100 m erzeugt. Große NA-Flächen, die z. B. durch das Image Matching von Wasserflächen entstehen können, bleiben daher als NA-Werte erhalten.

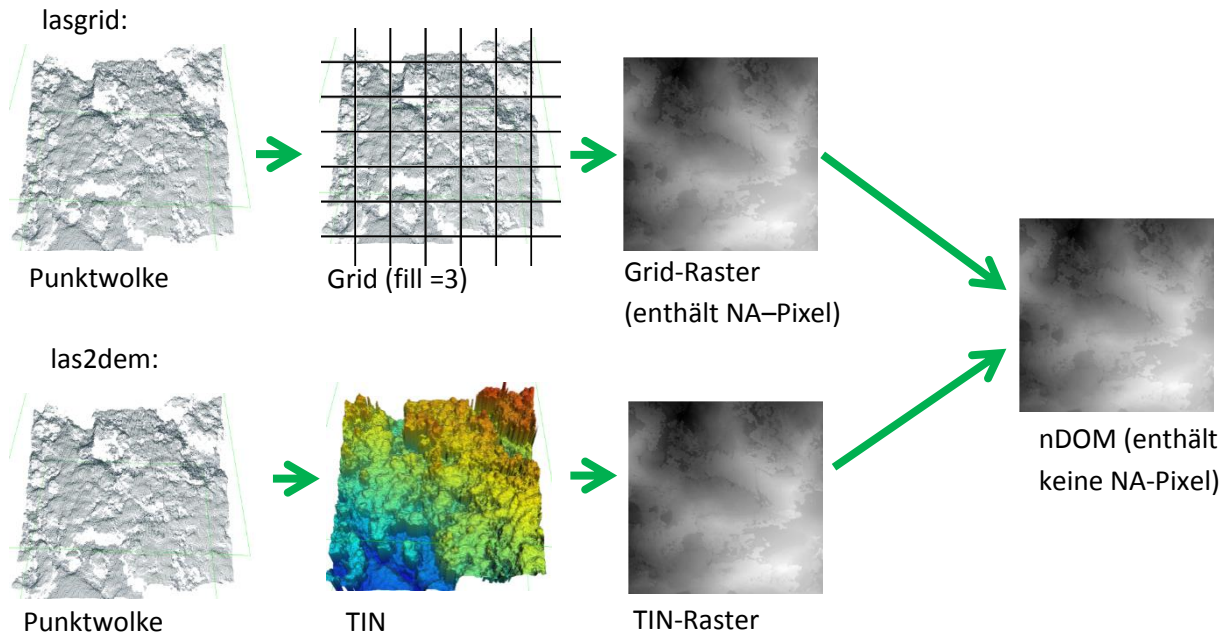


Abbildung 7: nDOM-Erstellung für Grid-Raster mit NA.

5.4.4 Generierung des DOM im .tif-Format

Zum soeben erzeugten nDOM im .tif-Format (Abschnitt 4.4.3) wird nun das DGM addiert um das finale DOM zu erzeugen. Hierzu wird zuerst das DGM1 in eine Rasterdatei konvertiert, welche dann unter Nutzung des ArcGIS Spatial Analyst Raster Calculators zum nDOM addiert wird ($\text{DOM} = \text{nDOM} + \text{DGM1}$).

5.4.5 Zuweisung einer Farbskala

Jeder nDOM-Rasterkachel wird eine Farbskala (siehe Abbildung 9) zur einheitlichen Darstellung zugewiesen indem eine ArcGIS-Layer-Datei erstellt wird. Hierfür wird das .tif-Raster im Ordner „lyr_files“ als Vorlage genutzt.

Literatur

- Hirschmüller, H., 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference: IEEE. 807-814.
- Hirschmüller, H., 2008: Stereo processing by semi-global matching and mutual information. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 30: 328-341.
- Schumacher, J., Rattay, M., Kirchhöfer, M., Adler, P., Kändler, G., 2019. Combination of Multi-Temporal Sentinel 2 Images and Aerial Image Based Canopy Height Models for Timber Volume Modelling. Forests, 10 (746), available online < <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/9/746/pdf> > [accessed 17 February 2020].