

# Voxelbasierte Änderungsdetektion des Gewässerbodens in ALB Daten unter Verwendung von semantischen Referenzdaten

RICHARD BOERNER<sup>1</sup>, LUDWIG HOEGNER<sup>1</sup> & UWE STILLA<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Dieser Beitrag befasst sich mit der Änderungsdetektion in bathymetrischen Punktwolken, die mit einem Airborne Laserscanner (ALS) aufgenommen worden sind. Ziel ist es, Änderungen der Wasseroberfläche und des Gewässerbodens automatisch zu erkennen. Hierfür ist neben der Schätzung der Wasseroberfläche aus der Punktwolke auch eine Refraktionskorrektur für Punkte unter der Wasseroberfläche nötig. Für den Referenzdatensatz liegen dabei aus einer vorangegangenen Klassifikation bereits auf Punktebene Label vor, um zwischen statischen, für die Koregistrierung geeigneten, und dynamischen Bereichen mit potentiellen Änderungen zu unterscheiden. In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Label des Referenzdatensatzes über einen diskreten Voxelraum auf die neue Punktwolke übertragen. Falsch zugeordnete Label im dynamischen Bereich werden basierend auf einer Histogrammanalyse identifiziert und entsprechend geändert. Aus den so klassifizierten Punkten wird die Wasseroberfläche geschätzt und für die darunterliegenden Punkte eine Refraktionskorrektur durchgeführt. Die Belegungsanalyse im Voxelraum liefert eine Aussage darüber, welche dynamischen Bereiche der neuen Punktwolke mit der Referenzpunktwolke verglichen werden können, in welchen Bereichen eine Refraktionskorrektur anzubringen ist aber fehlende Wasserechos die Korrektur erschweren und welche Bereiche zwar korrigiert werden konnten aber hier keine Daten in der Referenz vorliegen.*

## 1 Einleitung

Die Grundvoraussetzung für eine Änderungsdetektion des Gewässergrundes in der Airborne Laserbathymetrie (ALB) ist die Klassifikation von Wasseroberfläche und Gewässerboden. Die Schätzung der Wasseroberfläche ist notwendig, da der Laserstrahl beim Übergang vom Medium Luft ins Medium Wasser gebrochen wird und die Nichtberücksichtigung dieser Brechung zu fehlerhaften 3D Koordinaten der Bodenpunkte führt. Im besonderen Fall der Fließgewässervermessung können diese beiden Klassen als zeitlich veränderbar angenommen werden. So ändert sich sowohl der Wasserstand in seiner Höhe als auch der Gewässerboden in seiner Geometrie aufgrund von morphodynamischen Einflüssen des Flusses. Eine Überwachung der morphodynamischen Einflüsse erfordert eine multitemporale Erfassung des Untersuchungsgebietes und dementsprechend multitemporale gelabelte Daten.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Übertragung von klassifizierten Referenzdaten auf zusätzliche Befliegungsdaten. Hierbei sollen sowohl die Möglichkeit der Kombination von Daten verschiedener Sensoren als auch die dynamische Natur der Klassen berücksichtigt werden. Die Übertragung der Labels des Referenzdatensatzes wird dazu verwendet, um eine Vorklassifikation von Änderungen im Gewässerboden vorzunehmen. Diese Klassifikation der Änderung beinhaltet die Klas-

---

<sup>1</sup> Technische Universität München, Photogrammetrie und Fernerkundung, Arcisstraße 21, D-80333 München, E-Mail: [richard.boerner, ludwig.hoegner, stilla]@tum.de

sen: „Vergleichbar“, „im Wasserbereich keine Refraktionskorrektur anbringbar“ und „ohne Referenzinformation“. Dadurch lässt sich der Suchbereich für einen Signifikanztest auf geometrische Änderungen eingrenzen und die Genauigkeit je nach vorhandener Refraktionskorrektur oder Referenzdaten angleichen.

Das vorgestellte Verfahren baut auf der Diskretisierung von 3D Punktwolken in einem Voxelgitter auf. Ein solches Voxelgitter wurde bereits zur Bodendetektion in BOERNER et al. (2017) verwendet. Jeder Punkt des neuen Datensatzes kann hierbei einem Voxel im Referenzdatensatz zugeordnet werden und demzufolge das Klassenlabel des Voxels übernehmen. Die Labelübertragung im geometrisch veränderlichen Fall ist aber schwieriger als im statischen Fall, da die sich bewegenden Punkte (Wasser, Flussboden) in nicht gelabelte Voxel projiziert, bzw. ein Bodenpunkt in ein als Wasser klassifizierten Voxel projiziert werden könnte.

Aus diesem Grund wird im Nachgang zur Übertragung der Labels geprüft, ob Falschzuweisungen der Wasserlabels erkennbar sind. Für diese Probe wird ein Höhenhistogramm bestimmt und den Voxeln korrespondierend zur geringsten Höhe die Klasse Boden zugeordnet. Dieses Verfahren beruht auf der Annahme, dass hauptsächlich Bodenechos aufgezeichnet werden. Eine Belegungsanalyse der korrigierten Punkte liefert dann die Klassen „vergleichbar“ oder „in Referenz nicht belegt“. Die Klasse „nicht korrigiert“ ergibt sich, wenn aufgrund einer Lücke im WassermodeLL kein Schnitt mit der Wasseroberfläche bestimmbar ist.

Das vorgestellte Verfahren wird an einem Befliegungsdatensatz vom Jahre 2012 vom Mangfallgebiet in Gmund getestet und evaluiert. Von diesem Gebiet liegen neuere Befliegungsdaten vom Jahr 2017 vor, welche mit einem neueren SensormodeLL aufgenommen wurden und eine erhöhte Punktdichte aufweisen.

Der Vorteil des vorgestellten Verfahrens besteht darin, dass es auch auf multisensoriellen Daten anwendbar ist und so für eine Übertragung von semantischer Information und eine Qualitätsbeurteilung von zusätzlichen UAV Daten verwendet werden kann. Vorarbeiten zur Registrierung von Referenz- und UAV-Daten wurde in BOERNER et al. (2018) vorgestellt.

## 2 Vorarbeiten

In den letzten Jahren sind ALB Sensoren immer weiterentwickelt worden und stellen nun eine Möglichkeit zur genauen Vermessung von großflächigen Flachwasserbereichen dar (MANDLBURGER et al. 2011; PFENNIGBAUER et al. 2010; STEINBACHER et al. 2012). Besonders Interessant im Bereich der Gewässervermessung ist die Änderungsdetektion des Flussbettes, womit sich z.B. Aussagen über die Lebensqualität von Fischen treffen lassen (WHEATON et al. 2010a).

Für die Änderungsdetektion finden sich je nach Anwendung und verwendeten Sensoren unterschiedliche Herangehensweisen und Lösungsansätze. Im Kontext der Gewässervermessung und im Bereich der Laserbathymetrie erfolgt eine Änderungsdetektion meistens zur Erstellung von Änderungskarten des Gewässerbodens. Hierbei werden die Daten zunächst in Boden- und Wasserpunkte klassifiziert und anschließend ein Geländemodell auf Grundlage der korrigierten Bodenpunkte berechnet. Dies geschieht für den Referenz- und den Änderungsdatensatz und der Vergleich beider Datensätze erfolgt durch eine Bildung der Differenz der Oberflächenmodelle. Die Beträge der Differenz werden dann einem statistischen Test unterzogen und auf Signifikanz getestet, um eine tatsächliche geometrische Änderung von einer auf Messrauschen basierten Änderung zu unterscheiden (WHEATON et al. 2010b).

Hierbei ist die Klassifikation in Wasser- und Bodenpunkte ausschlaggebend für die Erzeugung des Geländemodells. Zum einen sollen nur Bodenpunkte zur Berechnung des Modells benutzt werden und zum anderen wird die Wasseroberfläche benötigt, um die Punkte am Gewässergrund aufgrund der Refraktion des Laserstrahls am Medienübergang von Luft zu Wasser zu korrigieren. Eine Klassifikation in Wasser und Boden erfolgt hierbei entweder semiautomatisch (MANDLBURGER et al. 2015) oder auf Grundlage der Fullwaveform-Auswertung des Laserstrahls. In der Praxis ergeben sich aber hier Probleme, wenn nicht genügend Wasserechos vorliegen oder der Laserstrahl das Wassermedium nicht bis zum Boden durchdringen kann.

Mit der Annahme, dass semantische Referenzdaten mit räumlich zugeordneten Klassenlabels vorliegen, ergibt sich nun die Frage, ob diese zur Klassifikation neuer Daten verwendet werden können. Hierbei soll auch eine Klassifikation von Änderungen erfolgen, welche Bereiche maskiert, die sich geometrisch geändert haben, Bereiche die in der Referenz nicht aufgenommen wurden oder zu denen keine Aussage gemacht werden kann, da die Refraktionskorrektur aufgrund fehlender Echos nicht vorgenommen werden konnte.

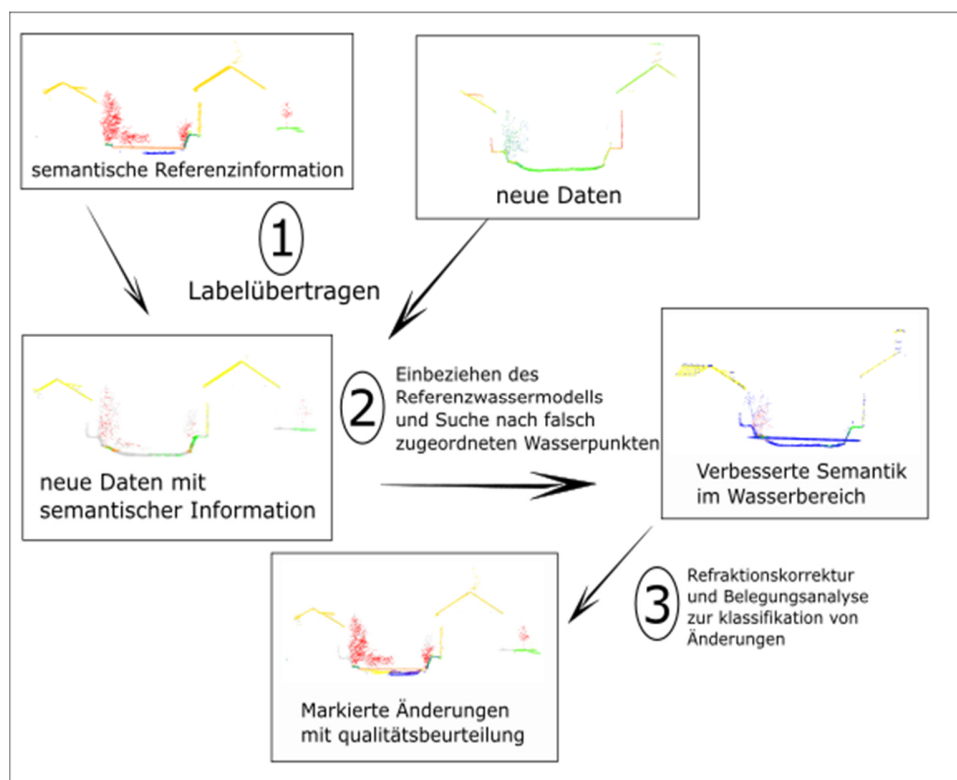


Abb. 1: Prinzipskizze des vorgestellten Verfahrens

### 3 Methode

Das vorgestellte Verfahren ist in Abbildung 1 schematisch veranschaulicht. Der erste Schritt besteht in der Übertragung der semantischen Label der Referenzpunktwolke auf die neu aufgenommene Punktwolke. Dies geschieht unter Verwendung eines Voxelgitters. Das Voxelgitter wird in die Referenzpunktwolke gelegt und jeder Voxel mit einer räumlichen ID versehen. Bei gleicher

Unterteilung des Voxelgitters in der anderen Punktwolke lässt sich so die Belegung jedes semantischen Referenzvoxels im neuen Datensatz prüfen. Wird ein entsprechend belegtes Voxel in den Referenzdaten gefunden, wird hier der Median der enthaltenen Klassenlabels der Punkte der Referenzpunktwolke auf die Punkte der neuen Punktwolke im entsprechenden Voxel übertragen. Neue Voxel ohne entsprechende Korrespondenz werden hierbei als geändert gelabelt. Dieses Verfahren funktioniert im Bereich von statischen Objekten ohne Erweiterung. Im Bereich des dynamischen Flussgebietes werden hier zusätzlich kleine Änderungen eingefügt.

Der Bereich des Flusses wird aus den Referenzdaten als 2.5D Wassermodel übernommen. Die Klassen „Änderung“, „Boden“ und „Wasser“ im Flussbereich werden von den entsprechenden Klassenlabels des statischen Bereiches durch eine andere Klassen ID abgegrenzt. Diese Abgrenzung ist nötig, um im folgenden Schritt zwischen statischen und dynamischen Bereichen zu unterscheiden. Anders als im statischen Bereich werden im dynamischen Bereich die neuen Label nicht durch den Median im Referenzvoxel bestimmt. Stattdessen werden als Wasserpunkte diejenigen Punkte markiert, welche dem Wassermodel am nächsten liegen. Hierfür werden in den Referenzdaten die Mittelwerte der Höhen der Boden- und Wasserpunkte berechnet. Zur Bestimmung des Klassenlabels in den neuen Daten wird nun das nearest neighbour Verfahren zu den Mittelwerten benutzt. Lässt sich kein nearest neighbour finden, weil die Lage der Mittelwerte einen Schwellwert überschreitet wird die Klasse wie im statischen Fall bestimmt.

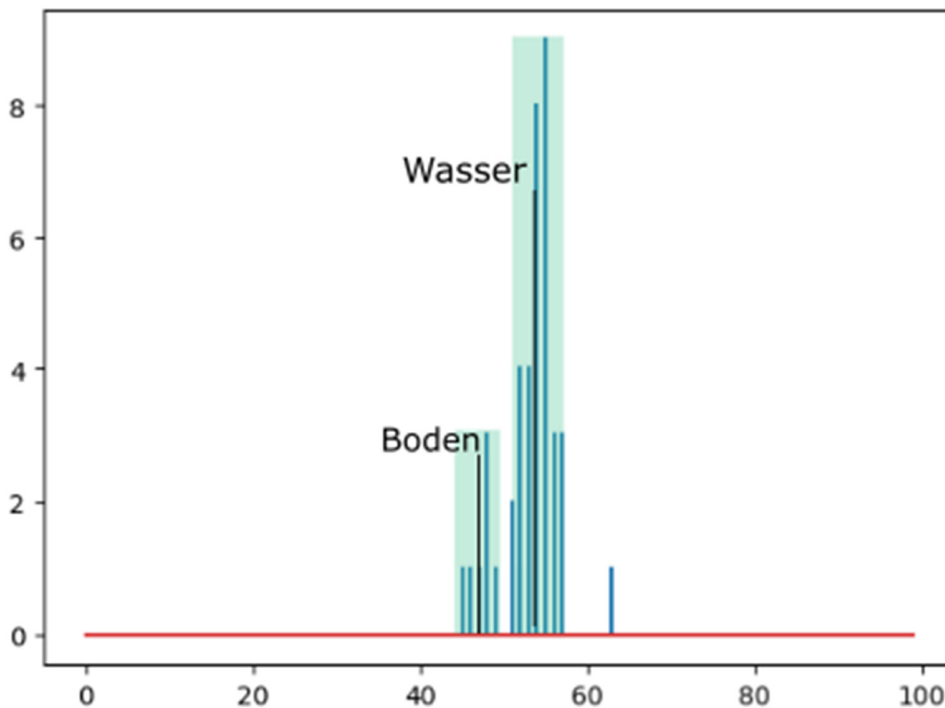


Abb. 2: Histogrammbasierte Bestimmung der Konfidenzbereiche von Wasser und Boden Punkten.

Aufgrund der Dynamik im Flussgebiet, muss nun getestet werden, ob Wasserlabels im Flussbereich zu Bodenlabels geändert werden sollten. Dies kann passieren, wenn sich die Lage des Bodens zur Wasseroberfläche hin verändert hat oder nur Bodenechos aufgenommen wurden (diese würden

dann dem niedrigsten Signifikanzbereich zugeordnet werden). Hierfür wird im Flussbereich ein Höhenhistogramm der Boden- und Wasserpunkte erzeugt. Unter der Prämisse, dass Bodenechos häufiger aufgenommen werden als Wasserechos, wird der unterste Signifikanzbereich der Bodenklasse zugeordnet. Findet sich also ein Wasserpunkt innerhalb dieses Bereiches, wird er neu der Bodenklasse zugeordnet. Die Signifikanzniveaus sind an einem Beispielhistogramm in Abbildung 2 veranschaulicht.

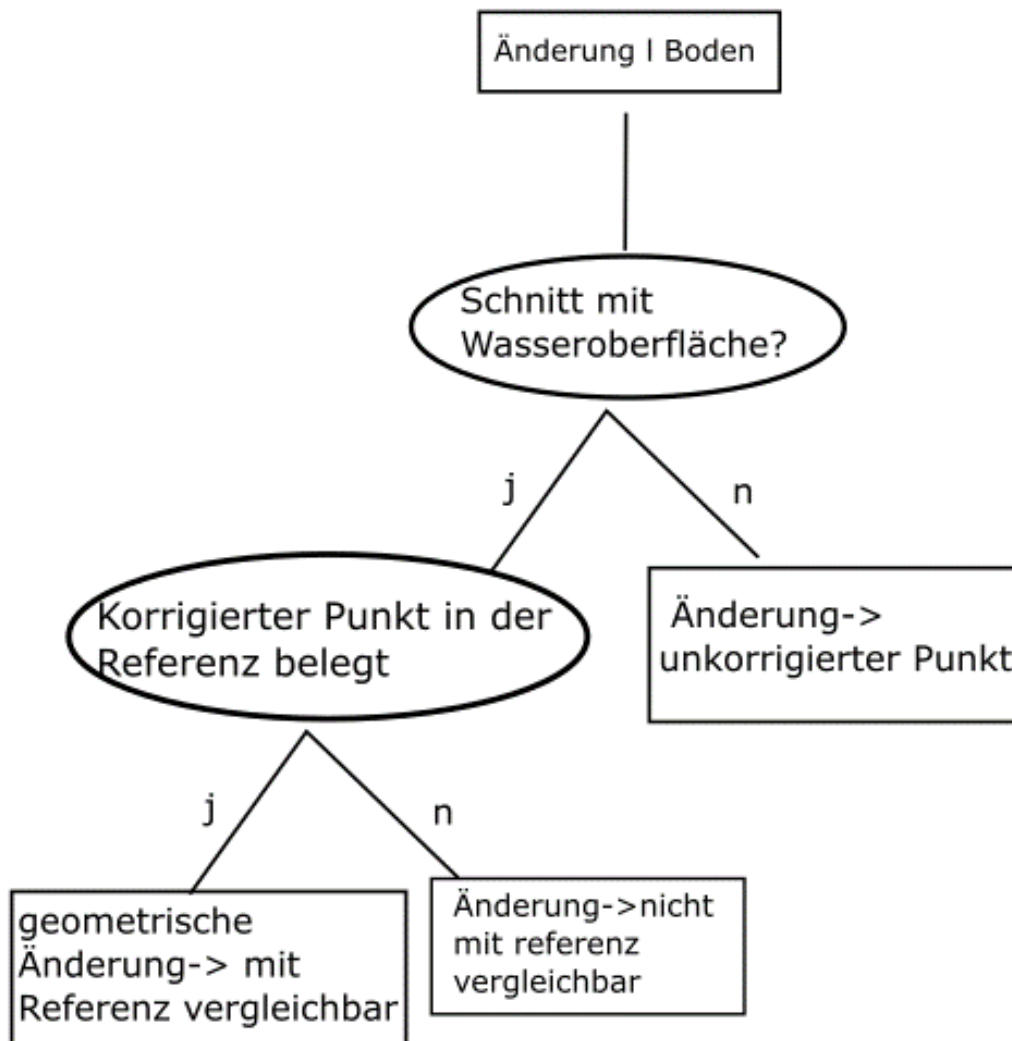


Abb. 3: Entscheidungsbaum zur Klassifikation der Änderungen

Im letzten Schritt werden die Änderungslabels für die Klassen im Flussbereich aufgrund eines Entscheidungsbaumes vergeben (Abbildung 3). Diese so übertragenen Label auf den neuen Datensatz werden dann verwendet, um das Wassermodell der neuen Daten zu berechnen. Lässt sich der Laserstrahl zum konkreten Bodenpunkt mit dem neuen Wassermodell schneiden, wird die Refraktionskorrektur angebracht, andernfalls wird das Label für „keine Korrektur möglich“ vergeben. Die korrigierten Bodenpunkte werden dann erneut mit den korrigierten Bodenpunkten der

Referenzdaten auf Belegung überprüft. Finden sich Bodenpunkte in der Referenz, wird das Label für einen vergleichbaren Bereich vergeben, andernfalls für „keine Referenzdaten vorhanden“. Diese Änderungslabels können dann verwendet werden, um die Änderung der Bodengeometrie auf Signifikanz zu prüfen und mit einem absoluten Wert der Änderung zu versehen. Der Vorteil dieser Methode besteht nun darin, dass Bereiche, welche unterschiedliche Sichtbarkeiten und unterschiedliche Anzahl von Wasserechos aufweisen, mit einem entsprechenden Label versehen werden, um ebenfalls die Qualität der Daten zu beurteilen.

## 4 Daten

Als Testgebiet dient das Gebiet der Mangfall vom Tegernsee bis zur Autobahn A8 im Südosten Bayerns, Deutschland. Hier liegen zwei Befliegungskampagnen vor, welche das Gebiet mit einem bathymetrischen LiDAR system aufgenommen haben. Die erste Befliegung fand 2012 statt, wobei ein Riegl VQ 860 verwendet wurde und die zweite Befliegung fand 2017 mit einem Riegl VQ 880 statt. Die Auflösung des 1. Datensatzes ist mit ca. 5 dm sowohl zwischen als auch entlang einer Scanzeile etwas geringer als die des zweiten Datensatzes, welcher 1dm entlang einer Scanzeile hat. Des Weiteren besitzt das Gebiet stellenweise sehr flache Wasserstände als auch wenige Wasseroberflächenechos in der 2. Befliegung. Für einen ausgewählten Bereich um eine Ortschaft am Tegernsee (Gmund) wurden semantische Referenzdaten manuell erzeugt. Die Rohdaten der jeweiligen Befliegung sind in Abbildung 4 dargestellt, die semantische Referenz in Abbildung 5.

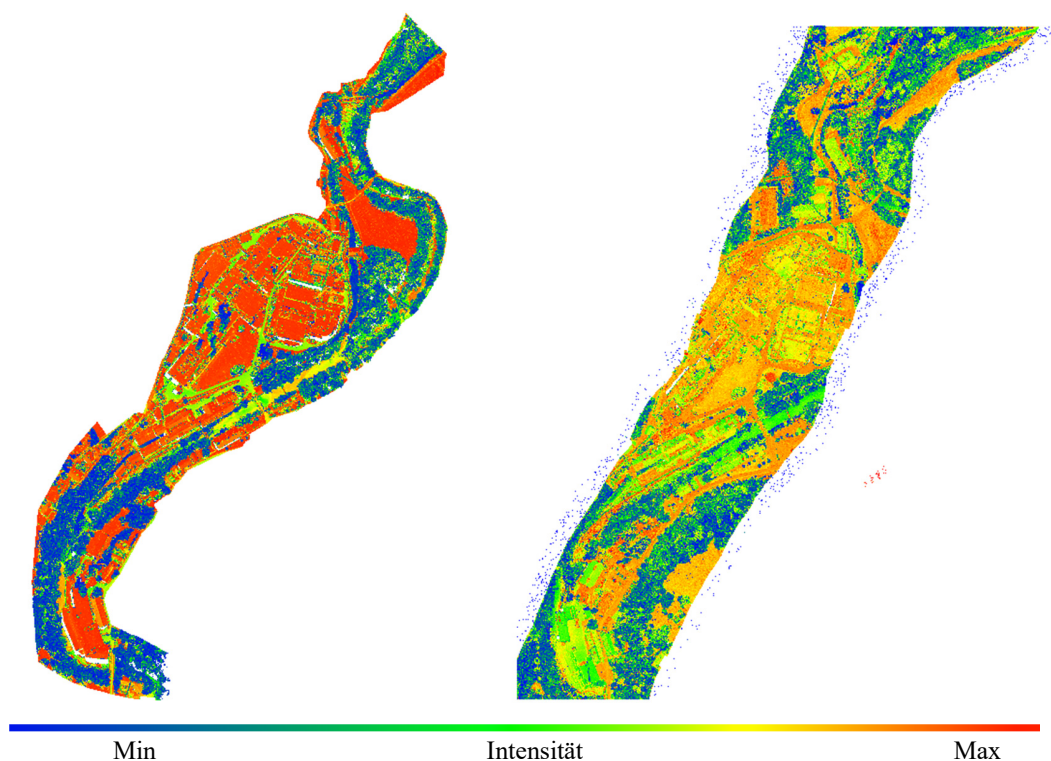


Abb. 4: Rohdaten. Links Datensatz von 2012, rechts: Datensatz von 2017

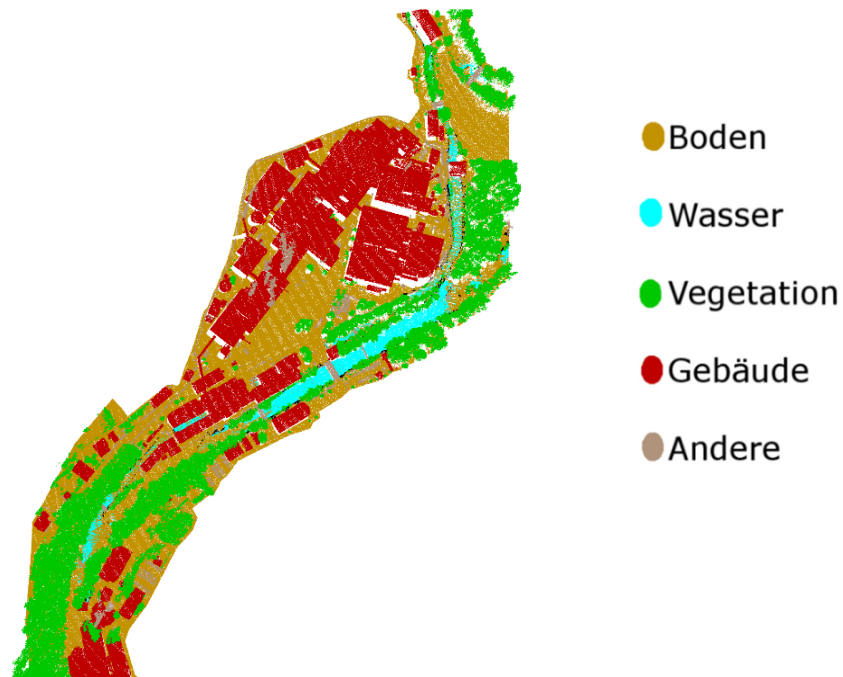


Abb. 5: Referenzlabel des Datensatzes aus 2012

## 5 Ergebnisse

Die gezeigten Testdaten wurden zur visuellen Inspektion des vorgestellten Verfahrens verwendet. Da für die Änderungsanalyse keine Referenzdaten vorliegen, muss in diesem Beitrag auf eine numerische Evaluierung verzichtet werden.

Als Sampling Parameter werden je nach Teil des Verfahrens unterschiedliche Werte verwendet. Zum einen führen kleinere Voxel zu einer genaueren Abgrenzung der einzelnen Klassen, erhöhen aber zeitgleich den nicht belegten Raum. So werden weniger Klassenlabels übertragen, wenn die Voxel zu klein gewählt werden. Auf der anderen Seite führen zu große Voxel zu mehr falschen Klassenzuweisungen, besonders am Grenzbereich der Klassen. Des Weiteren werden im Bereich des Flusses, verformte Voxel entlang der Z-Achse verwendet, um eine zylindrische Nachbarschaft zu verwenden. Da solch eine Nachbarschaft mehr Punkte entlang der Höhe beinhaltet sind die Höhenhistogramme besser gefüllt und es kann nach einer Trennlinie zwischen Boden und Wasser gesucht werden.

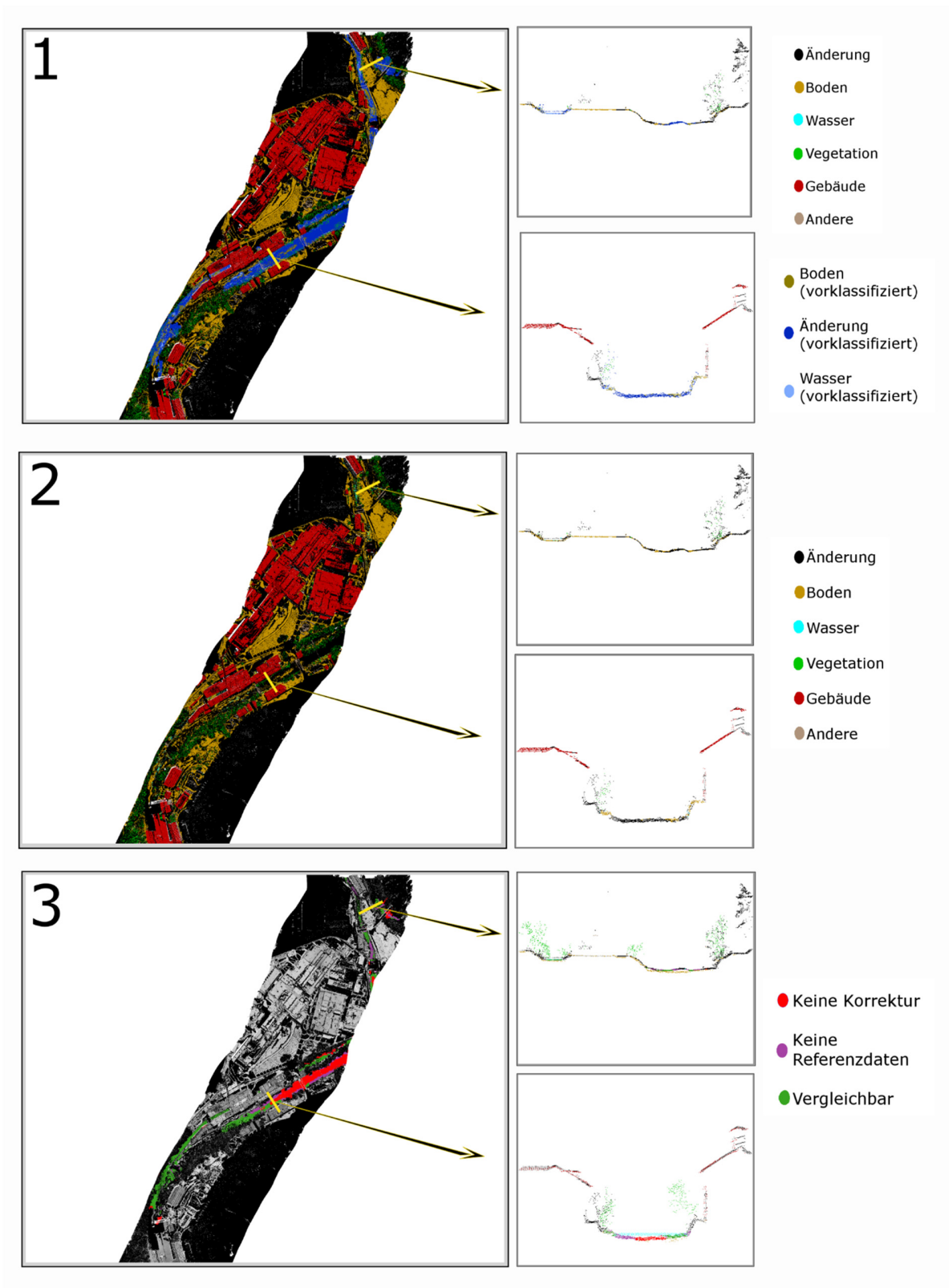


Abb. 6: Übersicht der Ergebnisse



Die Ausdehnungen der Voxel werden somit an die Auflösung des Scanners und die erwartete Durchdringungstiefe der Wassersäule gekoppelt. Bei einer Auflösung der Referenzdaten von ca. 0.5m wird für die erste Übertragung der Label eine quadratische Voxelauflösung von maximal 1m gewählt. Zum Testen der Label im Wasserbereich wird eine zylindrische Auflösung von maximal  $3 \times 3 \times 12$  m gewählt um sowohl in der Fläche als auch in der Höhe mehr Punkte im Voxel zu erhalten. Bei der Klassifizierung der Änderungen wurde eine Auflösung von  $2 \times 2 \times 6$  m verwendet.

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der jeweiligen Schritte dargestellt. Die linke Seite zeigt einen Blick von oben über den Datensatz und auf der rechten Seite sind die markierten Profile zur genaueren Begutachtung dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass im statischen Bereich die Label erfolgreich übertragen werden konnten. Hier sind auch einige Änderungen sichtbar, welche aus Anbauten der Gebäude bestehen oder aus einer geänderten Bebauung. Profil 2 zeigt die Notwendigkeit der Probe auf falsch zugeordnete Wasserpunkte. Hier befindet sich auf der linken Seite ein Kanal, welcher zwischen den Aufnahmen erhöht wurde. Das führt dazu, dass sich der Boden im zweiten Datensatz auf der Höhe des alten Wasserstandes befindet, was wiederum zu einer falschen Zuordnung führt. Das histogrammbasierte Verfahren zur Neuordnung der wasserpunkte funktioniert hier sichtlich gut. Es basiert allerdings auf der Annahme, dass eher Bodenechos aufgezeichnet werden, als Wasserechos. Diese Annahme passt zum neuen Datensatz, aber nicht unbedingt zum alten. Somit müsste die Probe auf falsche Zuordnungen auf ein präferiertes Verhalten angepasst werden.

Als Endergebnis ist besonders in den Profilen ersichtlich, dass die Änderungsklassen eine gute Abschätzung zur Qualität und Vergleichbarkeit der Daten liefern. Die wichtigen Klassen „vergleichbar“ und „nicht in Referenz“ können weiterhin verwendet werden, um die vergleichbaren Bereichen mit einer quantitativen Aussage der Änderung zu versehen.

## 6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt ein Verfahren zur geometrischen Übertragung von semantischen Labels einer Referenzpunktwolke auf einen neuen Datensatz. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Punktwolken koregistriert sind. Die Übernahme der Referenzlabel basiert hierbei im Kern auf einer Belegungsanalyse zweier Voxelstrukturen. Hierbei wird zwischen statischen Bereichen und dynamischen Bereichen im Flussgebiet unterschieden. Die wichtigen Klassen zur Gewässervermessung, Boden und Wasser, werden in einem Folgeschritt auf Falschzuordnungen geprüft. Hier muss eine präferierte Klasse definiert werden und basierend auf einem Höhenhistogramm wird für die jeweils andere Klasse entschieden, ob eine falsche Zuordnung vorliegt oder nicht. Aufgrund der wenigen Wasserechos des neuen Datensatzes und des vollständigen Bodenlayers, wurde in diesem Beitrag der Boden als präferierte Klasse gewählt. Zur weiteren Analyse erfolgt im letzten Schritt des vorgestellten Verfahrens eine Unterteilung des dynamischen Bereiches in Punkte, welche eine Refraktionskorrektur erhalten haben und mit Punkten in der Referenz verglichen werden können, in Bodenpunkte innerhalb des Referenz Wasserbereiches aber ohne Wasserecho (sprich ohne Refraktionskorrektur in den neuen Daten) und in Punkte welche eine Korrektur erhalten haben, aber keine passenden Bodenpunkte in der Referenz auffindbar sind.

Diese sogenannten Änderungsklassen lassen sich zukünftig verwenden um den Bereich der Signifikanzanalyse abzugrenzen und innerhalb der Signifikanzanalyse unterschiedliche Genauigkeiten für nicht korrigierte Bodenpunkte oder Bodenpunkte innerhalb von Bereichen mit keinen Beobachtungen zu bestimmen.

## 7 Danksagung

Diese Arbeit ist gefördert von der Bayerischen Forschungsstiftung, Projekt “Schritthaltende 3D-Rekonstruktion und –Analyse (AZ-1184-15)”, Sub-Projekt „Änderungsdetektion in Punktwolken“. Die Luftbefliegung wurde von der Firma „SteinbacherConsult“ durchgeführt.

## 8 Literatur

- BOERNER, R., HOEGNER, L. & STILLA, U., 2017: Voxel based segmentation of large airborne topobathymetric LiDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **42**, 107-114.
- BOERNER, R., XU, Y., HOEGNER, L. & STILLA, U., 2018: Registration of UAV data and ALS data using point to DEM distances for bathymetric change detection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **42**(1), 51-58.
- MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M., STEINBACHER, F. & PFEIFER, N., 2011: Airborne Hydrographic LiDAR Mapping–Potential of a new technique for capturing shallow water bodies. In *Proceedings of the 19th International Congress on Modelling and Simulation*, Perth, Australia, 12-16.
- MANDLBURGER, G., HAUER, C., WIESER, M. & PFEIFER, N., 2015: Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats - A case study at the Pielach River. *Remote Sensing*, **7**(5), 6160-6195.
- PFENNIGBAUER, M., STEINBACHER, F., ULLRICH, A. & AUFLEGER, M., 2010: A novel approach to laser-based hydrographic data acquisition. In *European LiDAR Mapping Forum*, Salzburg, Austria.
- STEINBACHER, F., PFENNIGBAUER, M., AUFLEGER, M. & ULLRICH, A., 2012: High resolution airborne shallow water mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39**(B1), 55-60.
- WHEATON, J. M., BRASINGTON, J., DARBY, S. E., MERZ, J., PASTERNAK, G. B., SEAR, D. & VERICAT, D., 2010a: Linking geomorphic changes to salmonid habitat at a scale relevant to fish. *River research and applications*, **26**(4), 469-486.
- WHEATON, J. M., BRASINGTON, J., DARBY, S. E. & SEAR, D. A., 2010b: Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth surface processes and landforms: the Journal of the British Geomorphological Research Group*, **35**(2), 136-156.