

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Kron, Andreas; Jutzi, Boris; Leitloff, Jens; Musall, Mark; Nestmann, Franz; Hinz, Stefan; Bockmann, Norbert**

## **Ableitung von Vorlandrauheiten für Strömungssimulationen auf der Basis von Full-Waveform-Airborne-Laserscannerdaten (FW-ALS)**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103376>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kron, Andreas; Jutzi, Boris; Leitloff, Jens; Musall, Mark; Nestmann, Franz; Hinz, Stefan; Bockmann, Norbert (2015): Ableitung von Vorlandrauheiten für Strömungssimulationen auf der Basis von Full-Waveform-Airborne-Laserscannerdaten (FW-ALS). In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 161-170.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Ableitung von Vorlandrauheiten für Strömungs-simulationen auf der Basis von Full-Waveform-Airborne-Laserscannerdaten (FW-ALS)

Andreas Kron, Boris Jutzi, Jens Leitloff, Mark Musall  
Franz Nestmann, Stefan Hinz, Herbert Brockmann

Moderne Messtechniken und Methoden der Fernerkundung bieten verschiedene Möglichkeiten für die Strömungssimulation erforderliche Daten entweder direkt zu erheben oder über erweiterte Auswerteverfahren abzuleiten. Hierzu wurde am Karlsruher Institut für Technologie untersucht inwieweit eine automatisierte Ableitung von Rauheitsparametern aus FW-ALS-Daten möglich ist und insgesamt 5 Mrd. 3D- Datenpunkte aus Messungen am Niederrhein analysiert. Es wurden 19 Rauheitsklassen definiert, die sich in Flächennutzung, Vegetationshöhe und -dichte unterscheiden und jeweils Referenzflächen kartiert. Die Messdaten innerhalb dieser Flächen wurden auf charakteristische Muster hin untersucht, indem statistische und eigenwertbasierte Merkmale unter Berücksichtigung benachbarter Messwerte analysiert wurden. Basierend auf diesen Merkmalen wurde ein Klassifikationsverfahren entwickelt und auf das gesamte Untersuchungsgebietes angewendet. Daraus liegen 1x1m große Rasterzellen mit Angaben der Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den 19 Rauheitsklassen vor. Zur Verwendung der Ergebnisse in der Strömungssimulation wurde ein Filter- und Generalisierungsverfahren entwickelt, um die vorliegenden Ergebnisse in größere Flächeneinheiten (rasterbasiert oder als Umrißpolygone) zu transformieren. Als Ergebnis steht ein Verfahren zur Verfügung, mit dem aus hochauflösten FW-ALS-Daten automatisiert Flächen mit einheitlicher Rauheitswirkung in unterschiedlichen Detaillierungsgraden abgeleitet werden können. Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines F&E-Projektes der Bundesanstalt für Gewässerkunde durchgeführt.

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Zur Modellierung von Fließgewässern werden Parameter benötigt, die den Fließwiderstand im Gewässer und auf den Vorländern charakterisieren. Messbare geometrische Größen, wie z. B. Korndurchmesser, Baumabstände und -durchmesser, werden über Modellgesetze mit Parametern korreliert, die i. A. aus hydraulischen Laboruntersuchungen abgeleitet wurden. Eine Anpassung der Rauheitsparameter erfolgt üblicherweise im Zuge einer Modellkalibrierung, um die Strömungsverhältnisse in der Natur möglichst gut nachbilden zu können. Dabei gilt, je genauer Rauheitsparameter und unterschiedliche Rauheitsbereiche erfasst werden, desto präziser lässt sich ihr Strömungswiderstand im Rahmen

der Modellierung beschreiben, was sich auch auf die Genauigkeit der Strömungsmodellierung auswirkt. Da räumlich hoch aufgelöste Angaben zur Vorlandvegetation oft nicht verfügbar sind, werden die Widerstandsparameter derzeit meist aus großräumigen Landschaftsmodellen abgeleitet. Andererseits sind zunehmend hoch aufgelöste Full-Waveform-Airborne-Laserscannerdaten verfügbar, die die Möglichkeit bieten, zusätzlich zur Entfernungsmessung weitere Parameter (z.B. Amplitude und Breite) des rückgestreuten Laserpulses abzuleiten, um z.B. auch Vegetationsstrukturen besser zu charakterisieren. Hier setzt das im Folgenden vorgestellte Projekt an.

## 2 Festlegung der Rauheitsklassen

Der Gesamtwiderstand eines Fließgewässers ergibt sich aus der Überlagerung der auf die Strömung wirkenden Oberflächen- und Formwiderstände. Der Oberflächenwiderstand resultiert aus den Reibungskräften, die bei Überströmen der Geländeoberfläche auf das Fluid wirken. Die Abbildung des Oberflächenwiderstandes erfolgt in Strömungsmodellen dementsprechend auch flächenhaft, i.d.R. in direkter Abhängigkeit der Landnutzung. Sind Rauheitselemente vorhanden, die in die Strömung hineinragen treten zusätzliche Verluste auf, die durch An- und Umströmung der Elemente entstehen. Diese werden über den Formwiderstand abgebildet. Im Hinblick auf die Vegetationshydraulik sind Bäume, Büsche und Sträucher (als Einzelemente oder in Gruppen) als wesentliche Formwiderstände zu betrachten.

Nach [DVWK, 1991] kann der Strömungseinfluss der Vegetation über die auf die Fließtiefe bezogene Vegetationshöhe wie folgt charakterisiert werden:

- Kleinbewuchs: Vegetationshöhe  $h_v \ll$  Wassertiefe  $h$

Das Widerstandsverhalten kann näherungsweise mit den Verfahren zur Parametrisierung von Oberflächenrauheiten beschrieben werden.

- Mittelbewuchs: Vegetationshöhe  $h_v \approx$  Wassertiefe  $h$

Für höhere Vegetation entspricht das Widerstandsverhalten der Vegetation nicht mehr in allen Fällen dem einer Oberflächenrauheit. In Abhängigkeit der Steifigkeit der Vegetation weicht der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils tlw. signifikant von dem logarithmischen Verlauf ab.

- Großbewuchs: Vegetationshöhe  $h_v >$  Wassertiefe  $h$

Es findet eine Umströmung der Vegetation statt. Aufgrund der Höhe des Bewuchses ist in den meisten Fällen von starren Strukturen auszugehen.

Neben dem Einfluss der Vegetationshöhe sind die Art der Vegetation sowie die Bewuchsdichte von maßgebendem Einfluss auf die Strömungswiderstände. Der Begriff der Bewuchsdichte bezieht sich hierin sowohl auf die Abstände einzelner Vegetationselemente, z.B. Abstände einzelner Bäume und Büsche als auch auf die Dichte des Blatt- bzw. Astwerks.

Die Festlegung der projektspezifischen Rauheitsklassen erfolgt unter der Berücksichtigung der Landnutzung sowie in Abhängigkeit der Vegetationshöhe und -dichte in einem dreistufigen Verfahren (Tabelle 1).

**Tabelle 1** Projektspezifisch festgelegte Rauheitsklassen

Stufe 1 Rauheitshöhe	Stufe 2 Rauheitsklasse		Stufe 3 Bewuchsdichte
	Objekt- kennung	Bezeichnung	
$0 < h < 1,0 \text{ m}$	1100	Wasserflächen	-
	1200	befestigte Wege und Flächen	-
	1300	erodierbare Wege und Flächen	-
	1400	Ackerland	-
	1500	Grünland	-
	1610	niedriges Buschwerk	aufgelöst
	1620	niedriges Buschwerk	geschlossen
	1700	Steinschüttungen, Buhne	-
	1899	Weidezaun	-
$1,0 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$	2100	Feuchtgebiete	-
	2210	mittelhohes Buschwerk	aufgelöst
	2220	mittelhohes Buschwerk	geschlossen
	2300	niedrige Gebäude/Bebauung	-
$h > 2,5 \text{ m}$	3110	hohes Buschwerk	aufgelöst
	3120	hohes Buschwerk	geschlossen
	3210	Baum	ohne/wenig Unterholz
	3220	Baum	mit mitteldichtem Unterholz
	3230	Baum	mit dichtem Unterholz
	3300	hohe Gebäude/Bebauung	-

In Stufe 1 der Rauheitsklassifizierung erfolgt die Festlegung der Klassengrenzen aus der statistischen Analyse eines aus den FW-ALS-Daten abgeleiteten normierten digitalen Oberflächenmodells. Aus der Betrachtung der lokalen Minima des Höhenhistogramms sowie der hydraulisch relevanten Vegetationshöhen wurden als Klassengrenzen die Vegetations- bzw. Rauheitshöhen von 1,0 m und 2,5 m festgelegt.

In Stufe 2 erfolgt eine Festlegung der Rauheitsklassen, die sich in ihrer hydraulischen Rauheitswirkung signifikant unterscheiden.

In Stufe 3 erfolgt für die Klassen *Buschwerk* und *Baum* eine weitere Differenzierung nach der Dichte des Vegetationsbestandes. Für die Klasse(n) *Buschwerk* bezieht sich die Dichte auf den Abstand einzelner Büsche zueinander. Unterschieden wurde hier in *aufgelöstes Buschwerk* (Einzel- bzw. freistehende Büsche) und *geschlossenes Buschwerk* (Buschreihe). In der Rauheitsklasse Baum wurde nach der Dichte des Unterstandes unterschieden. Als Beispiel für *Baum ohne/wenig Unterholz* können Einzelbäume oder kleine Baumgruppen in Parkanlagen oder Grünstreifen, als *Baum mit mitteldichtem Unterholz* bewirtschaftete Waldflächen und als *Baum mit dichtem Unterholz* nicht bewirtschaftete Auwälder genannt werden.

Als Basisdaten für die überwachte Klassifikation werden Flächen für jede Rauheitsklasse benötigt, die als Trainingsflächen für den Klassifikator verwendet werden können. Innerhalb dieser Flächen soll zum einen eine möglichst weitgehende Bedeckung mit der entsprechenden Rauheitsklasse vorliegen (90-95%), zum anderen sollen diese innerhalb der Klasse eine gewisse „Streubreite“ an Signalen aufweisen, um eine robuste Klassifizierung zu erreichen. Hierzu wurden für jede Rauheitsklasse mehrere, nicht zusammenhängende Flächen kartiert, mit einer Mindestgesamtfläche von ca. 1.000 m<sup>2</sup> für jede Rauheitsklasse.

### 3 Klassifizierung der FW-ALS-Daten

Bei der Klassifikation kommen Methoden der statistischen Mustererkennung zur Anwendung, sogenannte Support Vector Machines (SVM). Die gesuchten Rauheitsklassen werden mit Hilfe von Merkmalsvektoren beschrieben und anhand deren Lage im Merkmalsraum klassifiziert. Die Parameter zur Charakterisierung einzelner Rauheitsklassen werden bei der überwachten Klassifikation durch Training aus Beispielsdaten bzw. Referenzdaten gewonnen. Diese sind durch die Rauheitsklassen gegeben.

#### 3.1 Merkmalsberechnung

Charakteristische Strukturen sind in Abhängigkeit der gegebenen Rauheitsklassen zu erwarten [Jutzi & Stilla, 2003]. Ebene Strukturen, wie Wiesen oder Ackerland, können unter Umständen durch klein gewählte Nachbarschaften ausreichend beschrieben werden. In Wälder kann es dagegen notwendig sein, größere Nachbarschaftsbereiche zu wählen, um die darin enthaltenen Baum- und Unterholzstrukturen zu erfassen. Die optimale Nachbarschaftsgröße ist abhängig von den gegebenen Rauheitsklassen und den verwendeten Merkmalswerten. Für jede Rauheitsklasse wird durch separates Training und Klassifikation die optimale Größe der lokalen Nachbarschaft bestimmt. Deshalb werden für die

Klassifikation aus den Full-Waveform Laserdaten signifikante und deskriptive Merkmale unter Berücksichtigung der lokalen Nachbarschaft für jedes Pixel generiert. Für die Größe dieser Nachbarschaft wird eine Kantenlänge von 3, 5, 7, 9, 11 und 13 m verwendet.

Pro Pixel werden jeweils Merkmale aus vier verschiedenen Kategorien berechnet und zu einem Merkmalsvektor zusammengefasst. Bei den Kategorien handelt es sich um statistische Merkmale (minimaler Wert, maximaler Wert, Mittelwert, Median, Standardabweichung, Differenz zwischen maximalem und minimalem Wert), eigenwertbasierte Merkmale [Gross et al., 2007; Weinmann et al., 2013; Weinmann et al., 2014], Shape Distributions [Blomley et al., 2014] und ein Höhenhistogramm. Der Merkmalsvektor besteht aus insgesamt 105 Elementen, welche sich aus 30 statistischen Merkmalselementen, 15 eigenwertbasierten Merkmalselementen, 50 Shape Distribution Elementen und 10 Höhenhistogramm Elementen ergibt. Die Merkmalsberechnung muss für jede verwendete Nachbarschaft erfolgen, d.h. pro Pixel werden aus sechs verschiedenen Größen die resultierenden Merkmale berechnet.

### 3.2 Training des Klassifikators

Ziel des Trainings ist die Bestimmung der beiden optimalen Parameter der SVM. Für jeden Parameter werden 11 verschiedene Werte untersucht, woraus sich 121 Parameterkombinationen ergeben. Die Klassifikationsleistung jeder einzelnen Kombination wird durch 3-fache Kreuzvalidierung bestimmt.

Es wird erwartet, dass sich für eine optimale Erkennung der unterschiedlichen Rauheitsklassen aufgrund ihrer geometrischen Beschaffenheit unterschiedliche Nachbarschaftsgrößen ergeben werden. Das Training wird daher für jede Klasse mit jeder Nachbarschaftsgröße durchgeführt. Es werden aus Parameterkombinationen (121), Kreuzvalidierung (3), Nachbarschaftsgrößen (6) und Rauheitsklassen (18) insgesamt  $121 \times 3 \times 6 \times 18 = 9204$  Klassifikatoren trainiert und validiert.

Zur Beurteilung der Klassifikationsleistung werden die Maße: *Quality*, *Completeness* und *Correctness* verwendet, welche richtige, falsche und fehlende Zuordnungen berücksichtigen. In Tabelle 2 ist die *Quality* der besten Parameterkombination pro Rauheitsklasse und Nachbarschaftsgröße dargestellt.

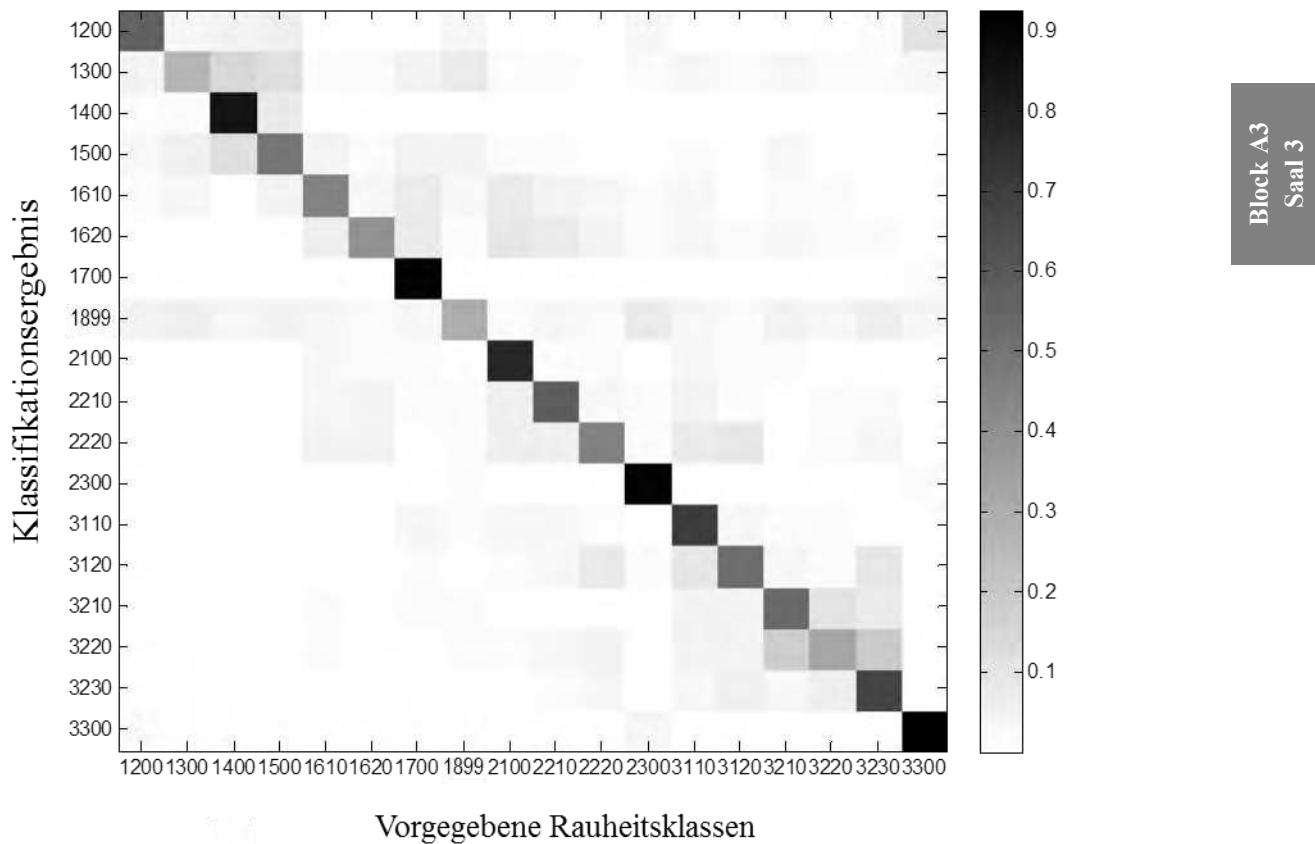
Wie vermutet, ist die Klassifikation der einzelnen Rauheitsklassen abhängig von der jeweiligen Nachbarschaftsgröße. Die in der Tabelle hervorgehobenen Werte stellen den jeweils besten Wert einer Rauheitsklasse dar. Der dafür verwendete Klassifikator wird zur endgültigen Klassifizierung herangezogen. Das finale Ergebnis der umfangreichen Untersuchung sind dem entsprechend 18 Klassifikatoren, die jeweils eine Klasse mit einer fest definierten Nachbarschaftsgröße klassifizieren.

**Tabelle 2** Ergebnis für die *Quality* mit optimaler Nachbarschaft je Rauheitsklasse

Rauheitsklasse	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Nachbarschaftsgröße [m]							Max
		3	5	7	9	11	13		
1200	befestigte Wege & Flächen	228.798	<b>22,6</b>	20,5	20,1	17,3	19,6	16,6	<b>22,6</b>
1300	erodierbare Wege & Flächen	121.001	<b>9,9</b>	8,6	8,4	6,7	6,8	6,4	<b>9,9</b>
1400	Ackerland	1.072.101	26,7	<b>27,3</b>	26	23,2	26,1	20,6	<b>27,3</b>
1500	Grünland	1.515.365	<b>11,2</b>	9,6	10,1	9,8	9	8,7	<b>11,2</b>
1610	niedriges Buschwerk - aufgelöst	113.072	10,4	<b>10,6</b>	7,8	8,6	9,2	8,6	<b>10,6</b>
1620	niedriges Buschwerk - geschlossen	27.871	9,2	7,7	9,8	<b>11,1</b>	9,6	9,0	<b>11,1</b>
1700	Steinschüttungen, Buhne	24.594	<b>38,1</b>	36,2	36,2	32,6	33,2	25,7	<b>38,1</b>
1899	Weidezaun	30.846	<b>5,9</b>	<b>5,9</b>	4,1	5,3	5,2	4,9	<b>5,9</b>
2100	Feuchtgebiete	28.000	<b>19,0</b>	17,1	16,7	17,1	18,1	18,2	<b>19,0</b>
2210	mittelhohes Buschwerk - aufgelöst	19.195	12,9	13,5	11,9	<b>15,5</b>	10,9	13,4	<b>15,5</b>
2220	mittelhohes Buschwerk - geschlossen	40.404	14,9	14,9	<b>15,1</b>	13,8	13,6	11,9	<b>15,1</b>
2300	niedrige Gebäude/Bebauung	3.686	<b>39,3</b>	32,7	30,8	28,1	26,4	27,7	<b>39,3</b>
3110	hohes Buschwerk - aufgelöst	6.721	16,3	17,5	17,2	<b>22,5</b>	17,8	20,6	<b>22,5</b>
3120	hohes Buschwerk - geschlossen	32.898	<b>20,3</b>	16,9	17,4	16,3	14,1	14,2	<b>20,3</b>
3210	Baum/Wald - ohne/wenig Unterholz	217.777	15,6	15,2	<b>16,1</b>	13,9	13,7	12,3	<b>16,1</b>
3220	Baum/Wald - mitteldichtes Unterholz	271.091	<b>11,4</b>	10,7	9,7	9,3	9,6	9,8	<b>11,4</b>
3230	Baum/Wald - dichtes Unterholz	57.287	<b>23,5</b>	22,9	23,0	23,1	21,8	20,2	<b>23,5</b>
3300	hohe Gebäude/Bebauung	53.926	<b>45,7</b>	41,2	38,0	31,3	31,8	24,5	<b>45,7</b>

## 4 Evaluierung und Bewertung

Zur quantitativen Evaluierung der Klassifikationsergebnisse wird die Konfusionsmatrix berechnet. Hierzu werden die vorgegebenen Klassen (Referenzklassen) mit den aus der Klassifizierung gewonnenen Klassen (Ergebnisklassen) verglichen. Es wird gezählt wie oft eine Klasse richtig und wie oft sie falsch klassifiziert wurde. Wenn falsch klassifiziert wurde, wird berücksichtigt welcher Klasse das Pixel zugeteilt wird. Das Ergebnis wird in einer Matrix gespeichert (Abbildung 1). Die Spalten enthalten die vorgegebenen Klassen, die Zeilen die Klassen des Ergebnisses. Die Summe der Werte in jeder Zeile ergeben einen Wert von 1. Idealerweise ist die Hauptdiagonale der Matrix mit 1 besetzt und die Nebenelemente mit 0. Nachfolgend werden die Ergebnisse anhand der Konfusionsmatrix erläutert. Neben der Evaluierung auf Basis der Referenzdaten erfolgt eine Validierung der Klassifizierungsergebnisse für das gesamte Projektgebiet über den Vergleich mit Orthofotos sowie vor-Ort-Kartierungen. Die Ergebnisse stimmen in beiden Fällen weitgehend überein.



**Abbildung 1:** Grafische Darstellung der Konfusionsmatrix (in Graustufen dargestellt sind die Zuordnungswahrscheinlichkeiten)

Aus der Konfusionsmatrix können folgende auffällige Zusammenhänge abgeleitet werden:

- Die Hauptdiagonale ist ausgeprägt, d.h. prinzipiell ist eine gute Zuordnung zwischen den einzelnen Referenzklassen und den dazugehörigen Ergebnisklassen gegeben.
- *Befestigte Wege und Flächen (RK 1200)*: Es erfolgt in vielen Fällen eine korrekte Zuordnung. Teilweise ist eine Fehlzuordnung zur Klasse *hohe Bebauung* zu beobachten. Dies ist dadurch zu erklären, dass beide Klassen größtenteils künstliche Objektoberflächen (z.B. Dach oder Asphalt) aufweisen, die üblicherweise eine planare Geometrie und homogene Radiometrie besitzen.
- *Erodierbare Wege und Flächen (RK 1300), Ackerland (RK 1400), Grünland (RK 1500)*: Eine zuverlässige Unterscheidung der Klassen *Erodierbare Wege und Flächen* und *Grünland* ist eingeschränkt möglich. *Ackerland* wird sehr gut erkannt. Bei diesen Klassen handelt es sich um geometrisch „flache“

Strukturen. Es findet teilweise eine gegenseitige Zuordnung statt. Dies ist dadurch erklärbar, dass für viele Flächen eine eindeutige Trennung zwischen Grün- und Ackerland auch in der Realität nicht möglich ist, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Befliegungsdaten in der vegetationsfreien Periode aufgenommen wurden.

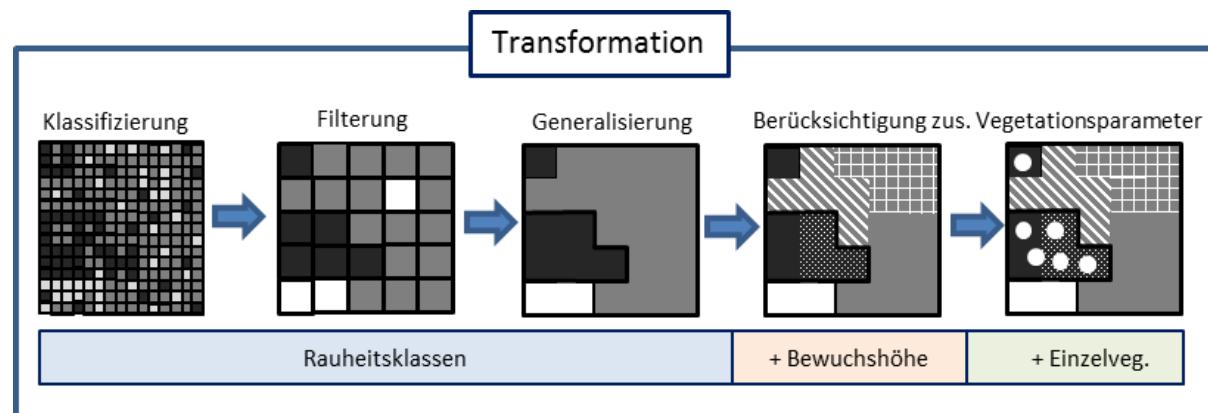
- *Niedriges Buschwerk (RK 1610, RK 1620)*: Die Klassen können nicht durchgehend zuverlässig klassifiziert werden. Dies ist vermutlich auch dadurch begründet, dass im Projektgebiet nur wenige Flächen mit niedrigem Buschwerk vorhanden sind, die zudem sehr heterogene Bewuchsstrukturen aufweisen.
- *Steinschüttung, Buhne (RK 1700), Feuchtgebiet (RK 2100)*: Diese Klassen werden mit hoher Zuverlässigkeit zugeordnet.
- *Mittelhohes Buschwerk (RK 2210, RK 2220)*: Die Zuverlässigkeit liegt im mittleren Bereich, bei *geschlossenem Buschwerk* ist eine schwache Verwechselung mit *hohem Buschwerk* gegeben.
- *Hohes Buschwerk (RK 3110, RK 3120)*: *Aufgelöstes Buschwerk* wird sehr gut erkannt, bei *geschlossenem Buschwerk* liegt die Zuverlässigkeit im mittleren Bereich.
- *Baum (RK 3210, RK 3220, RK 3230)*: Grundsätzlich werden nahezu alle Bäume zuverlässig erkannt. Eine Unterscheidung nach der Dichte des Unterwuchses ist jedoch nicht möglich, dies ist an der hohen gegenseitigen Zuordnung der drei Klassen untereinander zu erkennen.
- *Gebäude (RK 2300, RK 3300)*: Sowohl niedrige als auch hohe Gebäude werden sehr gut erkannt.

## 5 Aufbereitung der Klassifikationsergebnisse für die Strömungsmodellierung

Als Ergebnis der Klassifikation liegen für jedes Pixel des 1x1m-Raster im Projektgebiet die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu jeder der 19 Rauheitsklassen vor. Bei einer Größe des Projektgebietes von ca. 49 km<sup>2</sup> ergibt dies eine Datenmenge von 19 x 49 x 10<sup>6</sup> Einzelwerten. In der Strömungsmodellierung sind jeder Zelle eindeutige Beiwerte zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit und ggf. der Formrauheit zuzuordnen. Aus diesem Grund wird jedem Pixel zunächst diejenige Rauheitsklasse zugeordnet, die im Rahmen der Klassifikation mit der höchsten Zuordnungswahrscheinlichkeit ermittelt wurde. Die Zuordnung erfolgt zunächst singulär für jede einzelne Rasterzelle, d.h. ohne Berücksichtigung der

benachbarten Zellen. Dadurch entsteht ein stark gegliedertes und inhomogenes Rauheitsraster, das für die direkte Anwendung in Strömungsmodellen ungeeignet ist.

Zur „Homogenisierung“ des Rauheitsrasters sowie zur Reduktion der zu verarbeitenden Datenmenge wurde ein mehrstufiges Filter- und Generalisierungsverfahren entwickelt mit dem Flächen geringer Größe eliminiert werden können (Abbildung 2) und gleichzeitig sichergestellt ist, dass kleinräumige, aber hydraulisch relevante Vegetationsflächen bei der Übertragung auf das Berechnungsnetz ausreichend berücksichtigt werden.



**Abbildung 2:** Projektspezifisch festgelegte Rauheitsklassen

In einem ersten Bearbeitungsschritt werden über einen Mehrheitsfilter isolierte Rasterdaten herausgefiltert. Die Filterung erfolgt dabei in Abhängigkeit der benachbarten Zellen, wobei die Größe der berücksichtigten Nachbarschaft frei gewählt werden kann. Aus einer Studie mit unterschiedlicher Nachbarschaftsgröße hat sich mit der gegebenen Zielsetzung eine Kantenlänge von 7 m als optimal ergeben.

Im Weiteren werden in Abhängigkeit der Rauheitsklasse Mindestgrößen von Flächen mit einheitlicher Rauheit definiert, bei deren Unterschreiten eine Berücksichtigung aus hydraulischer Sicht nicht erforderlich ist. Eine Festlegung der Mindestgröße der einzelnen Teilflächen kann und muss dabei nicht allgemeingültig vorgenommen werden, diese sind vielmehr in Abhängigkeit der allgemeinen Zielsetzung der Modellierung, der Rauheitsklasse, der Gebietsgröße, der räumlichen Auflösung der Eingangsdaten etc. festzulegen.

Im Ergebnis liegt ein flächendeckendes generalisiertes Netz mit eindeutiger Zuordnung zu einer der definierten Rauheitsklassen vor. Den einzelnen Teilflächen, die sowohl rasterbasiert als auch als Umrißpolygone vorliegen, können zur Anwendung in der Strömungsmodellierung entsprechende Rauheitsbeiwerte zugewiesen werden. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, aus den FW-ALS-Daten

ableitbare Vegetationsparameter in der Festlegung der Rauheitsflächen zu berücksichtigen, z.B. die Bewuchshöhe oder Baumabstände, was jedoch nicht in der Zielsetzung des Projektrahmens lag.

## 6 Literatur

- DWK (1991): Hydraulische Berechnungen von Fließgewässern, Merkblätter zur Wasserwirtschaft des deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Heft 220, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1991
- Blomley, R., Weinmann, M., Leitloff, J., Jutzi, B., (2014) Shape Distribution Features for Point Cloud Analysis – A Geometric Histogram Approach on Multiple Scales. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3, 2014: 9-16
- Gross, H.; Jutzi, B.; Thoennessen, U. (2007): Segmentation of tree regions using data of a full-waveform laser. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W49A): 57-62
- Jutzi, B.; Stilla, U. (2003): Analysis of laser pulses for gaining surface features of urban objects. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and data fusion on urban areas, URBAN 2003. IEEE: 13-17 [ISBN 0-7803-7719-2]
- Musall, M., Oberle, P., Nestmann, F.; 2011: Hydraulic Modelling, Flood Risk Assessment and Management , Springer Verlag, S. 187-209
- Musall, M., Kron, A., Oberle, P., Beffa, C.; 2008: GIS-gestütztes Werkzeug zur operationellen Hochwassersimulation auf Basis eines 1D/2D-gekoppelten HN-Verfahrens, Internationales Symposium „Neue Anforderungen an den Wasserbau“, ETH Zürich, Mitteilung 208, Band 2
- Weinmann, M., Jutzi, B., Mallet, C., (2013) Feature relevance assessment for the semantic interpretation of 3D point cloud data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W2.
- Weinmann, M., Jutzi, B., Mallet, C., (2014) Semantic 3D Scene Interpretation: A Framework Combining Optimal Neighborhood Size Selection with Relevant Features. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3, 2014: 181-188

Autoren:

Dr.-Ing Andreas Kron

Dr.-Ing. Mark Musall

Prof. Dr.-Ing. Franz Nestmann

Inst. für Wasser und Gewässerentwicklung

Karlsruher Institut für Technologie

E-Mail: [kron@kit.edu](mailto:kron@kit.edu)

Dr.-Ing. Boris Jutzi

Dr.-Ing Jens Leitloff

Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz

Inst. für Photogrammetrie u. Fernerkundung, Karlsruher Institut für Technologie

E-Mail: [boris.jutzi@kit.edu](mailto:boris.jutzi@kit.edu)

Dipl.-Ing. Herbert Brockmann

Bundesanstalt für Gewässerkunde

E-Mail: [brockmann@bafg.de](mailto:brockmann@bafg.de)