

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 171 (2020)

Heft: 2

Artikel: Grossflächige Klassifikation von Gebüschwald mit Fernerkundungsdaten

Autor: Weber, Dominique / Rüetschi, Marius / Small, David

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097279>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Grossflächige Klassifikation von Gebüschwald mit Fernerkundungsdaten

Dominique Weber Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, HAFL (CH)*
Marius Rüetschi Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)
David Small Geografisches Institut, Universität Zürich (CH)
Christian Ginzler Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

Grossflächige Klassifikation von Gebüschwald mit Fernerkundungsdaten

Informationen über die Ausdehnung und die Entwicklung von Gebüschwäldern sind für verschiedene forstliche und ökologische Fragestellungen von Bedeutung, jedoch sind aktuelle und flächendeckende Datensätze kaum verfügbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kartierung des Gebüschwaldes mit Dominanz von Alpenenerle, Legföhre und Hasel für den Kanton Graubünden auf Basis von landesweit verfügbaren Fernerkundungsdaten untersucht. Es wurden die Satellitendaten von Sentinel-1 und Sentinel-2 sowie ein Vegetationshöhenmodell und ein Geländemodell verwendet. Für die überwachte Klassifikation mit Random Forest, einem auf Entscheidungsbäumen basierendem Verfahren des maschinellen Lernens, wurden vom Kanton bereitgestellte und durch Luftbildinterpretation ergänzte Trainingsflächen verwendet. Die unabhängige Validierung der Ergebnisse wurde mit Daten des Landesforstinventars (LFI) durchgeführt. Alpenenerlen- und Legföhrenwälder liessen sich mit einer hohen Genauigkeit von 92.1% bzw. 86.7% klassifizieren, für Haselwälder betrug die interne Modellgüte hingegen nur 66.7%. Die resultierende Flächenausdehnung des Gebüschwaldes war vergleichbar mit den Angaben des LFI. Beim direkten Vergleich mit den LFI-Luftbildinterpretationspunkten wurden grössere Abweichungen festgestellt. Der Hauptgrund dafür ist der unterschiedliche räumliche Detaillierungsgrad. LFI-Flächen mit einem hohen Strauchanteil wurden jedoch zuverlässig als Gebüschwald klassifiziert. Die hier vorgestellte Methode unterstreicht das Potenzial von schweizweit verfügbaren Fernerkundungsdaten für eine weitgehend objektive, kosteneffiziente und grossflächige Kartierung von Gebüschwäldern in einer für die Praxis genügenden Genauigkeit.

Keywords: remote sensing, shrub forest, classification, sentinel-1, sentinel-2, vegetation height model
doi: 10.3188/szf.2020.0051

* Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen, E-Mail dominique.weber@bfh.ch

In der Schweiz kommen Gebüschwälder im Alpenraum und auf der Alpen Südseite vor. Sie werden von den beiden Gehölzarten Alpenenerle (70%) und Legföhre (20%) dominiert, gefolgt von Hasel (4%) und strauchförmigen Weiden (3%; Cioldi et al 2010). Gebüschwälder finden sich meistens als Pioniervegetation auf kargen Standorten wie Lawinenzügen oder Geröllhalden (Mauri & Caudullo 2016, Ballian et al 2016). Im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) zählt der Gebüschwald zum Wald und ist durch einen Strauchanteil von mehr als zwei Dritteln des massgebenden Bestandes definiert (Keller 2013). Im LFI4b machte der Gebüschwald in der Schweiz mit 658 km² ca. 5% der Waldfläche aus (Abegg et al 2014). Dabei handelte es sich zu 56% um reine und zu 44% um mit Einzelbäumen durchmischte Gebüschwälder.

Wie die Arealstatistik des Bundesamtes für Statistik (BFS) und das LFI zeigen, nimmt die Gebüschwaldfläche zu (Hotz & Weibel 2005, Abegg et al

2014). Gründe dafür liegen in der extensiveren Nutzung oder der Aufgabe von Alpweiden (Cioldi et al 2010). Dies hat einen Einfluss auf die Sukzession zu Hochwald, die Schutzwirkksamkeit, die Schutzwaldpflege und die Biodiversität (Anthelme et al 2001, Tasser & Tappeiner 2002, Huber & Frehner 2013, Bühlmann et al 2014, Ballian et al 2016). Gebüschwälder sind spezielle Lebensräume, die sich von klassischen Lebensräumen im Wald in diversen Aspekten unterscheiden. Deshalb sind, obwohl sie in der Schweiz heutzutage für die Holznutzung kaum eine Bedeutung haben, detaillierte Informationen über ihre Ausdehnung und Entwicklung von Interesse. Daten zu Gebüschwäldern werden im Auftrag des Bundes (LFI und Arealstatistik) stichprobenartig erhoben. Aktuelle und flächendeckende Datensätze sind nach unserem Wissensstand kaum vorhanden. Gebüschwälder sind oft nicht oder nur teilweise in den Waldmasken der Kantone und des Bundes enthalten bzw. werden bei automatischen Waldausschei-

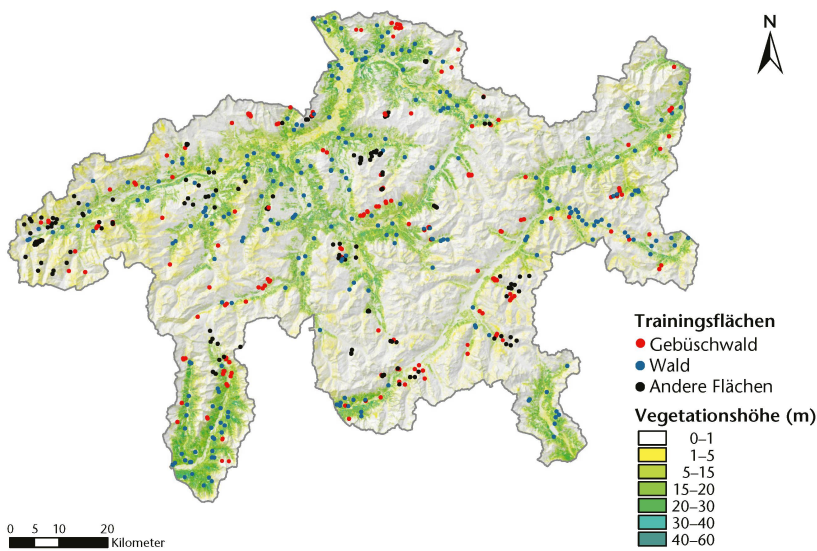


Abb 1 Der Kanton Graubünden als Untersuchungsgebiet und die für die Klassifikation verwendeten Trainingsflächen ($n=602$), dargestellt auf dem halbtransparenten Vegetationshöhenmodell des Landesforstinventars (Ginzler 2018) und der Reliefdarstellung des Geländemodells swissALTI3D (© 2019 swisstopo).

dungen, die auf Höhenkriterien basieren, nicht ausgediegt (Waser et al 2015). Für flächendeckende Kartierungen werden traditionellerweise Feldaufnahmen oder Luftbildinterpretationen durchgeführt, diese sind jedoch kostenintensiv. Insbesondere für grosse Flächen und das langfristige Monitoring sind neue Möglichkeiten zu erkunden. Vermehrt stehen Fernerkundungsdaten und Methoden zur Verfügung, die eine automatisierte Kartierung des Gebüschwaldes nach einheitlichen Kriterien und mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit ermöglichen könnten. Im Rahmen dieser Studie wurde die Kartierung des Gebüschwaldes mit Dominanz von Alpenlerle, Legföhre und Hasel für den Kanton Graubünden auf Basis von landesweit und möglichst frei verfügbaren Fernerkundungsdaten untersucht. Es

wurden Daten der Satelliten Sentinel-1 und Sentinel-2, das Vegetationshöhenmodell des LFI und ein Geländemodell verwendet. Diese Datensätze eignen sich sowohl für die Waldabgrenzung als auch für die Unterscheidung der drei Gebüschwaldarten (Ginzler & Hobi 2016, Immitzer et al 2016, Rüetschi et al 2018). Das Ziel dieser Studie war es, mit einer praxistauglichen und kosteneffizienten Methode einen kantonalen Datensatz zur aktuellen Verbreitung der drei Gebüschwaldarten bereitzustellen.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Der Kanton Graubünden hat eine Fläche von 7105 km², wovon gemäss Auswertungen des LFI4b 2098 km² Wald (29.5%) inklusive 246 km² Gebüschwald (3.5% der Kantons- bzw. 11.7% der Waldfläche) sind (Abegg et al 2014). Damit ist der Kanton Graubünden jener Kanton mit der grössten Gebüschwaldfläche der Schweiz. Als Gebüschwald gelten insbesondere Alpenlerle- und Legföhrenwälder, die fast ausschliesslich in der subalpinen Stufe vorkommen. Dazu kommen Haselwälder, die auch in etwas tieferen Lagen, jedoch selten unter 1000 m ü.M. anzutreffen sind. Als Untersuchungsgebiet wurde die ganze Kantonsfläche verwendet (Abbildung 1).

Übersicht über den Arbeitsfluss

Für die Erarbeitung der Gebüschwaldkarte für den Kanton Graubünden wurde eine überwachte Klassifikation mit dem Algorithmus Random Forest (RF) durchgeführt (Breiman 2001). Dabei wurden Fernerkundungsdaten von aktiven und passiven Sensoren sowie über den Kanton verteilte Trainingsflächen verwendet. In einem iterativen Prozess wurde

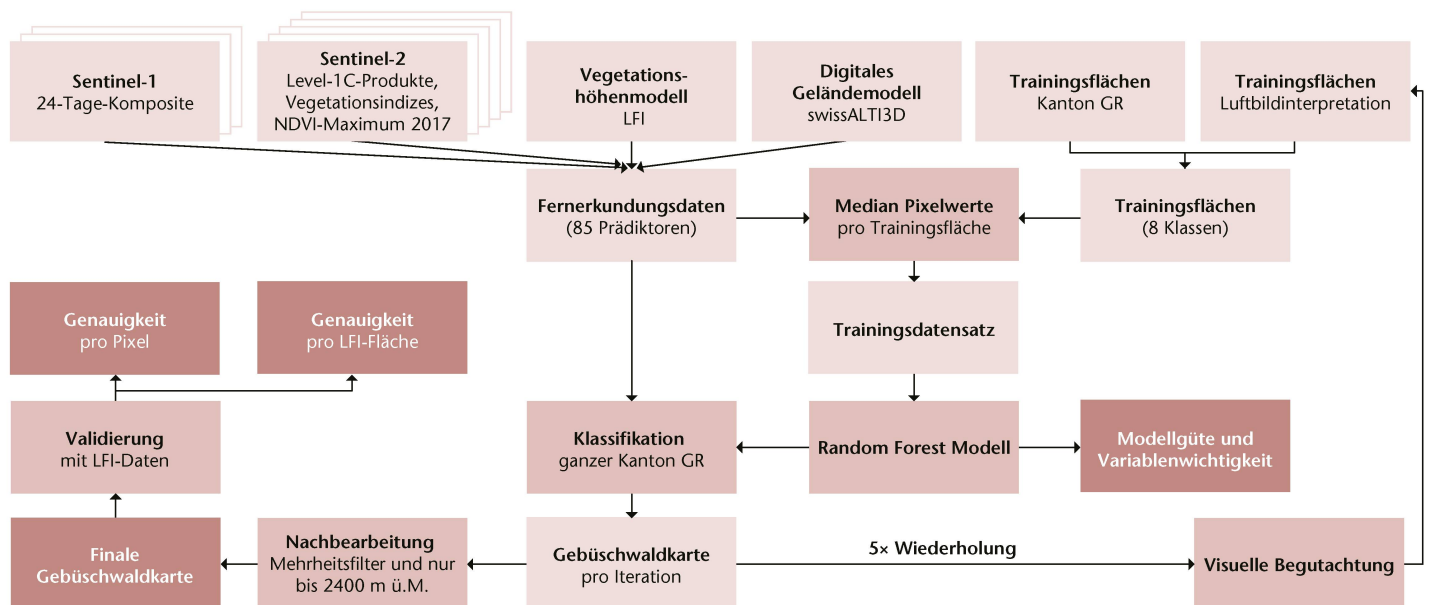


Abb 2 Arbeitsfluss der überwachten Klassifikation mit Random Forest zur Erstellung und Validierung der Gebüschwaldkarte für den Kanton Graubünden. In einem iterativen Verfahren wurde die Karte nach jedem der fünf Durchgänge visuell begutachtet und durch neu hinzugefügte Trainingsflächen verbessert.

Bodenbedeckung	Anzahl Trainingsflächen		
	Kanton Graubünden	Luftbildinterpretation	Summe
Gebüschwald			
Alpenerle	38	38	76
Legföhre	42	41	83
Hasel	17	7	24
Wald			
Nadelwald		130	130
Laubwald		96	96
Lärchen		41	41
Andere Flächen			
Sonstige Vegetation		115	115
Keine Vegetation		37	37
Summe	97	505	602

Tab 1 Anzahl Trainingsflächen nach Datenherkunft und Bodenbedeckung.

Vegetationsindex	Formel mit Sentinel-2-Bändern (B)	Referenz
NDVI	$(B8-B4)/(B8+B4)$	Rouse et al (1974)
NDI45	$(B5-B4)/(B5+B4)$	Delegido et al (2011)
MCARI	$B5-B4-0.2 \times (B5-B3) \times (B5-B4)$	Daughtry et al (2000)
GNDVI	$(B7-B3)/(B7+B3)$	Gitelson et al (1996)
IRECI	$(B7-B4)/(B5/B6)$	Frampton et al (2013)

Tab 2 Die verwendeten Sentinel-2-Vegetationsindizes.

Datensatz	Beschreibung	Anzahl Variablen
Sentinel-1 (S1) März 2017 Juni 2017 September 2017	Radar-Sensor, 24-Tage-Rückstreungskomposite	6
	Mittlere VV- und VH-Rückstreuung für 2.3–25.3.2017	
	Mittlere VV- und VH-Rückstreuung für 10.6–03.07.2017	
	Mittlere VV- und VH-Rückstreuung für 29.8–21.9.2017	
Sentinel-2 (S2) 28. März 2017 27. Mai 2017 26. Juni 2017 14. Oktober 2017 NDVI-Maximum 2017	Optischer Sensor, Level-1C-Produkte	73
	13 Spektralbänder und 5 Vegetationsindizes	
	13 Spektralbänder und 5 Vegetationsindizes	
	13 Spektralbänder und 5 Vegetationsindizes	
	13 Spektralbänder und 5 Vegetationsindizes	
Maximaler NDVI-Wert aller Aufnahmen von 2017		
Vegetationshöhenmodell (VHM) VHM max. VHM SD	Vegetationshöhenmodell des LFI aus Luftbildern 2012–2016 (Ginzler 2018)	2
	Maximale Vegetationshöhe pro 10 m × 10 m	
	Standardabweichung der Vegetationshöhe pro 10 m × 10 m	
Digitales Geländemodell (DGM) Höhe über Meer Hangneigung Nordausrichtung Ostausrichtung	Basierend auf dem digitalen Höhenmodell swissALTI3D (Auflösung 10 m)	4
	in Meter (m)	
	in Grad (°)	
	von –1 (südexponiert) bis 1 (nordexponiert)	
	von –1 (westexponiert) bis 1 (ostexponiert)	
Summe		85

Tab 3 Übersicht über die verwendeten Datensätze.

das Modell mit der Erfassung zusätzlicher Trainingsflächen kontinuierlich verbessert. Der angewendete Arbeitsfluss ist in Abbildung 2 dargestellt.

Trainingsflächen

Vom Kanton Graubünden wurden Trainingsflächen zu den drei Gebüschwaldarten Legföhre (*Pinus mugo*), Alpenerle (*Alnus viridis*) und Hasel (*Corylus avellana*) als georeferenzierte Polygone mit einer mittleren Flächengrösse von 1011 m² (Standardabweichung: 488 m²) zur Verfügung gestellt (Tabelle 1). Die Ausscheidung dieser Flächen basierte auf existierenden Datensätzen des Kantons (z.B. Bestandeskarte) und der Auswertung von Luftbildern. Es wurde darauf geachtet, dass innerhalb eines Polygons nur eine Gebüschwaldart vorkam. Für Haselwälder konnte nur eine beschränkte Anzahl Trainingsflächen bereitgestellt werden, da diese aufgrund ihres seltenen Vorkommens deutlich schwieriger aufzufinden waren als die anderen Gebüschwaldarten. Zusätzlich wurden Trainingsflächen für fünf weitere Bodenbedeckungsklassen (Tabelle 1) durch eigene Luftbildinterpretation auf Basis des Orthofotomosaiks Swisstopo 25 cm (swisstopo 2019b) erstellt. Diese wurden für die Abgrenzung der Gebüschwälder von den übrigen Klassen, zum Beispiel Laubwald oder vegetationslose Fläche, benötigt. Es wurde kein systematisches Stichprobenverfahren verwendet, jedoch darauf geachtet, dass alle Klassen über den ganzen Kanton verteilt waren. Da zu Beginn des Verfahrens wenig Gebüschwald-Trainingsflächen zur Verfügung standen, wurden diese in einem iterativen Verfahren erweitert (Abbildung 2). Bei jedem Durchgang wurde die Klassifikation mittels Luftbildinterpretation evaluiert und an Orten, wo offensichtlich Fehler vorlagen, wurden gezielt neue Trainingsflächen erstellt. Dieser iterative Prozess wurde fünfmal wiederholt, bis gutachterlich keine offensichtlichen Fehler mehr vorhanden waren. Für alle per Luftbildinterpretation erhobenen Trainingsflächen wurde eine Kreisfläche von 702 m² gewählt, um sicherzustellen, dass die angesprochene Fläche grösser als die räumliche Auflösung der verwendeten Fernerkundungsdaten ist (Fläche eines Pixels entspricht 100 m²). Aufgrund des nicht probabilistischen Stichprobenverfahrens ist die interne Modellgüte mit Vorsicht zu betrachten. Für die Schätzung der effektiven Kartengenauigkeit war eine zusätzliche Validierung mit unabhängigen Daten notwendig (siehe weiter unten).

Fernerkundungsdaten

Es wurden Aufnahmen der Satelliten Sentinel-1A, Sentinel-1B (Radar-Sensoren) und Sentinel-2A, Sentinel-2B (multispektrale optische Sensoren) der Europäischen Weltraumorganisation ESA (Torres et al 2012, Drusch et al 2012), das Vegetationshöhenmodell des LFI (Ginzler 2018) und ein digitales Geländemodell (swisstopo 2019a) verwendet. Für Sentinel-1 und Sentinel-2 wurden Aufnahmen aus mehreren Jahreszeiten genutzt, um wichtige Phasen der Vegetationsentwicklung abzudecken. Um den

Einfluss des Rauschens in einzelnen Sentinel-1-Aufnahmen abzuschwächen, wurden drei Sentinel-1-Komposite mit Zeitfenstern von 24 Tagen für März, Juni und September 2017 generiert. Dabei wurde aus allen in den jeweiligen Zeitfenstern gemachten Aufnahmen nach radiometrischen Terrainkorrekturen ein mittlerer Rückstreuungswert für beide verfügbaren Polarisationen (VV und VH) gerechnet (Small 2012). Von Sentinel-2 wurden Aufnahmen vom 28. März, 27. Mai, 26. Juni und 14. Oktober 2017 als radiometrisch und geometrisch korrigierte Level-1C-Produkte verwendet. Bei der Auswahl dieser Bilder wurde auf einen minimalen Bewölkungsgrad geachtet. Für die Klassifikation wurden alle 13 Spektralbänder verwendet, wobei die 20-m- und 60-m-Bänder auf eine Pixelgrösse von 10 m umgerechnet wurden. Zusätzlich zu den Spektralbändern wurde für jede Aufnahme eine Auswahl von gängigen Vegetationsindizes (Tabelle 2) sowie der maximale NDVI-Wert (Normalized Difference Vegetation Index) aller Sentinel-2-Aufnahmen aus dem Jahr 2017 berechnet.

Aus dem Vegetationshöhenmodell wurden der maximale Wert sowie die Standardabweichung pro 10 m × 10 m verwendet. Aus dem Geländemodell in einer Auflösung von 10 m × 10 m wurden die Höhe über Meer, die Hangneigung und die Exposition (Nord- und Ostausrichtung) als zusätzliche topografische Prädiktoren genutzt. Hangneigung und Exposition wurden mit ArcGIS Desktop 10.6.1 und den Funktionen «Slope» und «Aspect» mit den Standardeinstellungen berechnet. Alle Fernerkundungsdaten wurden als Rasterdaten in einer Pixelgrösse von 10 m × 10 m aufbereitet. Eine Übersicht über die verwendeten Datensätze und Prädiktorvariablen gibt Tabelle 3.

Klassifikationsverfahren

Die überwachte Klassifikation der Pixel erfolgte mit RF, einem auf Entscheidungsbäumen basierenden Verfahren des maschinellen Lernens. Dabei werden diverse individuelle Entscheidungsbäume mit sogenannten Bootstrap-Stichproben erzeugt. Pro Entscheidungsbaum wird nur ein Teil der Trainings-

daten verwendet. Mit den nicht verwendeten Trainingsdaten, den sogenannten OOB-Daten (engl. «out-of-bag»), kann später die Genauigkeit insgesamt und pro Klasse (OOB-Fehler) berechnet werden. Zusätzlich kann die Variablenwichtigkeit mittels Permutation, also dem zufälligen Austauschen von Werten in den Prädiktorvariablen und der damit verbundenen Abnahme der Modellgenauigkeit, ermittelt werden. Für die Klassifikation wurde das in R implementierte RF-Paket mit den Standardeinstellungen (abgesehen vom Parameter $n_{trees}=1000$, Anzahl der Entscheidungsbäume) verwendet (Liaw & Wiener 2002). Als Prädiktoren wurden alle 85 aus den Fernerkundungsdaten generierten Variablen genutzt (siehe Tabelle 3). Das RF-Modell wurde mit den Medianwerten pro Trainingsfläche ($n=602$, Tabelle 1) trainiert und danach für die räumliche Vorhersage aller acht Bodenbedeckungsklassen für den ganzen Kanton Graubünden eingesetzt. Im Nachgang wurden Gebüschwald- und Waldflächen über 2400 m ü.M. als Fehlklassifikationen automatisch entfernt. Zusätzlich wurde ein Mehrheitsfilter (3×3 majority filter) angewendet, um kleinräumiges Rauschen auf der finalen Karte zu reduzieren.

Validierung mit LFI-Daten

Für die Validierung wurden die LFI-Luftbildinterpretationspunkte verwendet, wobei im Klassifikationsprodukt nur zwischen Gebüschwald und Nichtgebüschwald unterschieden wurde. Die LFI-Luftbildinterpretation erfolgt anhand von ADS-Stereo-Luftbildstreifen, die von swisstopo für die Produktion von Swissimage und des topografischen Landschaftsmodells (TLM) aufgenommen werden (Ginzler et al 2005). Die Bodenbedeckung wird auf jeder Interpretationsfläche von 50 m × 50 m («LFI-Fläche») an 25 Gitterpunkten im Abstand von 10 m interpretiert. Werden auf einer LFI-Fläche mindestens zwei Drittel des massgebenden Deckungsgrads als Strauch interpretiert, gilt die ganze Fläche im LFI als Gebüschwald (Ginzler et al 2005). In einem ersten Schritt wurde eine pixelbasierte Validierung durchgeführt. Dafür wurde mittels einer Konfu-

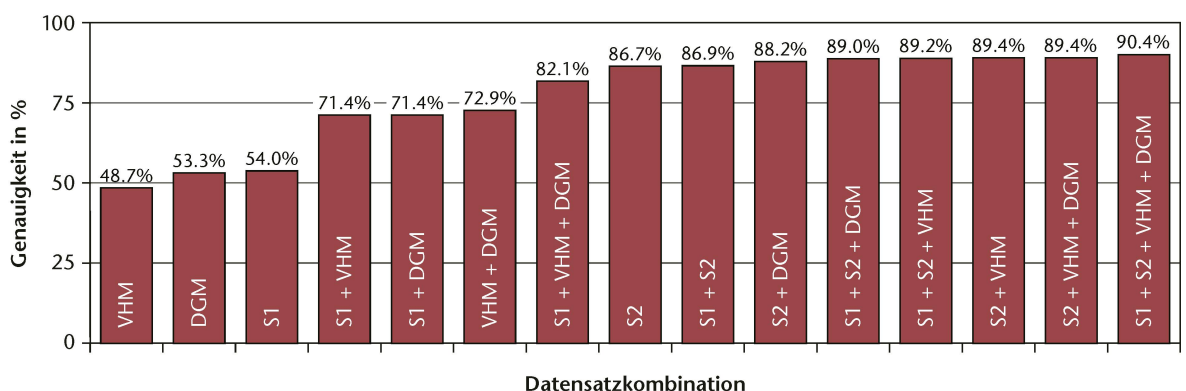


Abb 3 Genauigkeit der RF-Klassifikation unter Verwendung der vier Fernerkundungsdatensätze (Sentinel-1: S1, Sentinel-2: S2, Vegetationshöhenmodell des LFI: VHM, digitales Geländemodell: DGM) einzeln und in Kombination.

Modell	Referenz									
	Alpenerle	Legföhre	Hasel	Nadelwald	Laubwald	Lärche	Sonstige Vegetation	Keine Vegetation	Summe	UA
Alpenerle	70	1	0	0	0	4	3	1	79	88.6%
Legföhre	3	72	0	8	0	0	0	0	83	86.7%
Hasel	0	0	16	0	3	0	0	0	19	84.2%
Nadelwald	1	3	0	119	1	5	0	0	129	92.2%
Laubwald	0	0	8	1	92	0	0	0	101	91.1%
Lärche	0	1	0	2	0	30	0	0	33	90.9%
Sonstige Vegetation	2	5	0	0	0	2	111	2	122	91.0%
Keine Vegetation	0	1	0	0	0	0	1	34	36	94.4%
Summe	76	83	24	130	96	41	115	37	602	
PA	92.1%	86.7%	66.7%	91.5%	95.8%	73.2%	96.5%	91.9%		

Tab 4 Die Konfusionsmatrix für den Vergleich der Klassifikation der acht Bodenbedeckungsklassen (Modell) mit den Trainingsflächen (Referenz) mit Angaben zur Produzentengenauigkeit (Producer Accuracy; PA) und Nutzergenauigkeit (User Accuracy; UA) basierend auf dem Out-of-Bag-Fehler von Random Forest.

sionsmatrix die Klassifikation Gebüschwald/Nichtgebüschwald mit dem im LFI am Gitterpunkt getroffenen Entscheid Strauch/Nichtstrauch verglichen. Da sich jedoch der räumliche Detaillierungsgrad der Klassifikation und der Luftbildentscheide stark unterscheiden, wurde in einem zweiten Schritt eine flächenbasierte Validierung vorgenommen. Dafür wurde pro LFI-Fläche die Anzahl der als Gebüschwald klassifizierten Pixel mit der im LFI als Strauch interpretierten Gitterpunkte verglichen.

Resultate

Klassifikation

Es wurde eine Gesamtgenauigkeit von 90.4% erreicht (Abbildung 3). Die mittlere Kartengenauigkeit für die drei Gebüschwaldarten, gemessen mit der sogenannten Produzentengenauigkeit (engl. Producer Accuracy; PA), betrug 81.8%. Die Kartengenauigkeit für Alpenerle (92.1%) war etwas höher als für Legföhre (86.7%) und deutlich höher als für Hasel (66.7%; Tabelle 4). Die Konfusionsmatrix (Tabelle 4) deutet darauf hin, dass es zwischen den drei Gebüschwaldarten wenig Verwechslungen gab. Am häufigsten gab es Verwechslungen zwischen Leg-

föhre und Nadelwald sowie zwischen Hasel und Laubwald. Die Nutzergenauigkeit (engl. User Accuracy; UA) war bei allen Klassen hoch (>84%) und zeigt, dass die auf der Karte repräsentierten Klassen in den meisten Fällen der Ansprache in den Trainingsflächen entsprechen. Die Angabe beider Genauigkeitsmasse (PA, UA) ist wichtig, um zum Beispiel die Über- oder Unterschätzung einzelner Klassen beurteilen zu können.

Um den Beitrag der verschiedenen Fernerkundungsdatensätze zu bewerten, wurde die Klassifikation mit RF für alle Datensätze einzeln und in allen verschiedenen Kombinationen durchgeführt. Die höchste Genauigkeit (90.4%) wurde mit der Kombination aller vier Datensätze erreicht (Abbildung 3). Unter den Modellen mit nur einem Datensatz erreichte das Modell mit den Sentinel-2-Daten mit Abstand die höchste Genauigkeit (86.7%). Diese lag sogar höher als bei der Verwendung aller drei anderen Datensätze zusammen (82.1%). Unter den zehn wichtigsten Sentinel-2-Variablen befanden sich Spektralinformationen aus allen vier Aufnahmezeitpunkten, vertreten durch Spektralbänder im sichtbaren und infraroten Wellenbereich, die Vegetationsindizes NDVI und MCARI sowie das NDVI-Maximum 2017.

Insgesamt wurde eine Fläche von 239 km² als Gebüschwald klassifiziert, davon 118 km² als Alpenerle, 94 km² als Legföhre und 27 km² als Hasel. Für die Schätzung der Flächen wurde die nachbearbeitete finale Gebüschwaldkarte verwendet, die den Mehrheitsfilter und das Ausmaskieren von Flächen über 2400 m ü.M. bereits beinhaltet. Ein Ausschnitt der finalen Karte ist in Abbildung 4 dargestellt.

Validierung mit LFI-Daten

Die pixelbasierte Validierung mit LFI-Daten zeigte, gemessen an der Produzentengenauigkeit, für Flächen ohne Gebüschwald eine hohe (98.1%) und für solche mit Gebüschwald eine geringere (52.1%) Übereinstimmung (Tabelle 5). Die Anzahl der als Gebüschwald klassifizierten Pixel (n=3058) wurde im

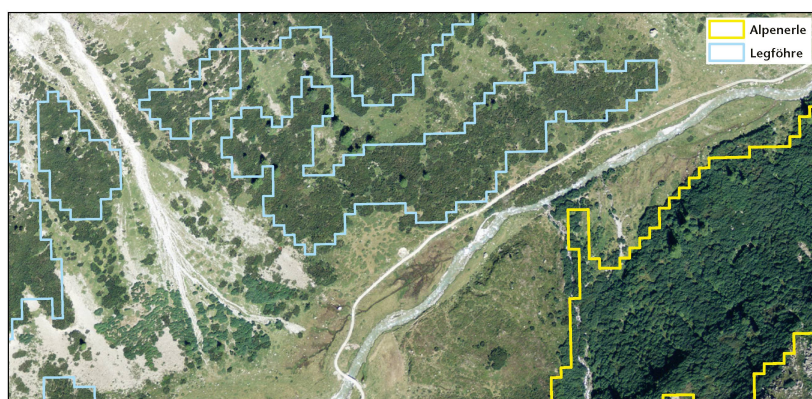


Abb 4 Ausschnitt der Gebüschwaldklassifikation mit dem Luftbild im Hintergrund (Swissimage © 2019 swisstopo).

Modell	Referenz			
	Kein Strauch	Strauch	Summe	UA
Kein Gebüschwald	84 362	1305	85 667	98.5%
Gebüschwald	1637	1421	3058	46.5%
Summe	85 999	2726	88 725	
PA	98.1%	52.1%		

Tab 5 Die Konfusionsmatrix für den pixelbasierten Vergleich der Klassifikation (Modell) mit den LFI-Luftbildinterpretationspunkten (Referenz) mit Angaben zur Produzentengenauigkeit (Producer Accuracy; PA) und Nutzergenauigkeit (User Accuracy; UA).

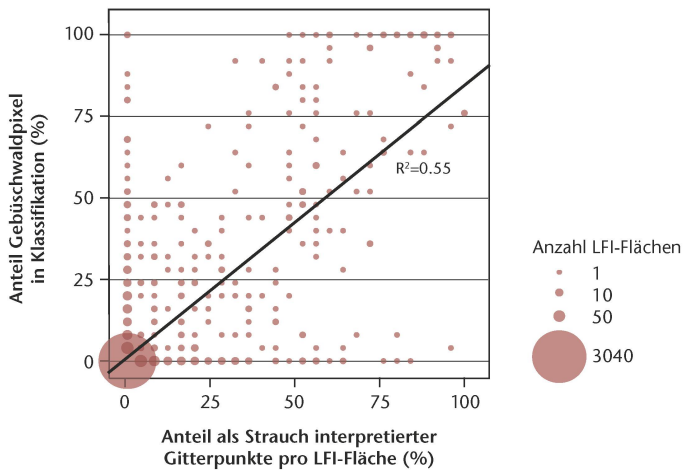


Abb 5 Zusammenhang zwischen dem Anteil Gebüschwaldpixel in der Klassifikation (Modell) und dem Anteil im Luftbild als Strauch interpretierter Gitterpunkte pro LFI-Fläche (n = 3549). Die Punktgrösse repräsentiert die Anzahl LFI-Flächen im Diagramm.

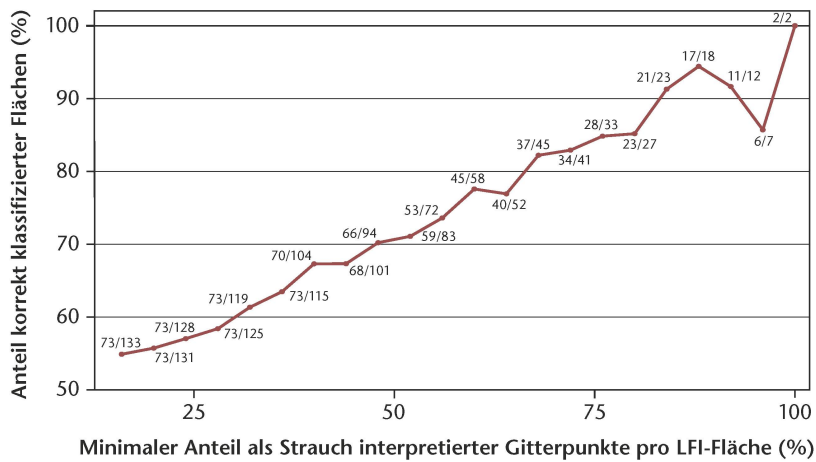


Abb 6 Anteil korrekt klassifizierter LFI-Gebüschwaldflächen in Abhängigkeit des minimalen Strauchanteils aus der LFI-Luftbildinterpretation. In Schwarz angegeben sind die Anzahl korrekt klassifizierter sowie die Gesamtzahl der LFI-Gebüschwaldflächen beim jeweiligen minimalen Strauchanteil.

Vergleich zu den LFI-Luftbildinterpretationspunkten (n=2726) um 12.1% überschätzt.

Bei der flächenbasierten Validierung (n=3549) manifestierte sich ein klarer positiver Zusammenhang zwischen dem Anteil Gebüschwaldpixel in der Klassifikation und dem Anteil der im Luftbild als Strauch interpretierter Gitterpunkte pro LFI-Fläche (Abbildung 5). Das lineare Regressionsmodell erklärte 55% der Variation (R^2). Flächen mit einem hohen Strauchanteil wurden häufiger übereinstimmend als

Gebüschwaldflächen klassifiziert (Abbildung 6). Als Gebüschwald galt im Rahmen der Klassifikation, wenn die Mehrheit der Pixel innerhalb der LFI-Fläche als Gebüschwald klassifiziert wurde. Im LFI kann dagegen eine Fläche bereits ab einem Deckungsgrad von 20% der Gesamtfläche als Gebüschwald gelten. Von 133 solchen Flächen wurden nur 73 (54.9%) auch in der Klassifikation als solche erkannt. Hingegen war die Übereinstimmung ab einem Strauchanteil von mehr als 50% bereits grösser als 70%, und sie nahm mit zunehmendem Strauchanteil weiter zu.

Diskussion

Klassifikation

Alpenenerlen- und Legföhrenwälder liessen sich mit einer hohen Genauigkeit (>85%) klassifizieren. Für Haselwälder wurde eine deutlich geringere und vermutlich für die Praxis nicht ausreichende Genauigkeit von unter 70% erreicht. Hauptgrund dafür ist wahrscheinlich die beschränkte Anzahl Trainingsflächen, die für Hasel zur Verfügung stand. Zudem werden Hasel oft von anderen Laubbaumarten überschirmt und können in solchen Fällen mit den hier verwendeten Fernerkundungsdaten nicht erkannt werden (Enescu et al 2016). Grundsätzlich bleibt dies eine Herausforderung bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten, da 44% der Schweizer Gebüschwälder mit Einzelbäumen durchmischte sind (Abegg et al 2014). Ebenso wurden Fehler bei den Übergängen zwischen Legföhre und Nadelwald sowie zwischen Alpenenerle und Wiese beobachtet. Diese Übergänge sind in der Natur oft fließend, und die damit verbundenen Überlappungen in den Spektralinformationen erschweren die Klassifikation. Weitere Probleme wurden bei der Unterscheidung von Zwergsträuchern (z.B. Alpenrose) und Gebüschwald festgestellt.

Das Vegetationshöhenmodell des LFI und die Satellitendaten von Sentinel-1 und Sentinel-2 hatten alle einen wesentlichen Einfluss auf die Modellgenauigkeit. Dies ist damit zu begründen, dass die verschiedenen Datensätze komplementäre Informationen über die spektralen, strukturellen und phänologischen Eigenschaften der acht Bodenbedeckungsklassen liefern. Zum Beispiel lässt sich Gebüschwald vom restlichen Wald primär über die Vegetationshöhe unterscheiden, für die Differenzierung der drei Gebüschwaldarten hingegen sind spektrale und phänologische Eigenschaften wie Blattfarbe und Blattentwicklung entscheidend.

Validierung und Vergleich mit LFI-Daten

Die als Gebüschwald klassifizierte Fläche von 239 km² im Kanton Graubünden liegt sehr nahe bei den Schätzungen aus dem LFI4b (246 km² ± 8%; Abegg et al 2014). Für eine differenzierte Analyse nach Alpenenerle, Legföhre und Hasel standen keine

flächendeckenden Informationen zur Verfügung. Im Gegensatz zum LFI liefert das hier verwendete Klassifikationsverfahren keinen Standardfehler zur Flächenangabe. Um mögliche Unsicherheiten diesbezüglich besser beurteilen zu können, sollte der Einfluss variierender Modellinputdaten und die Schätzung für einzelne Regionen weiter untersucht werden.

Die pixelbasierte Validierung mit LFI-Daten zeigte für Gebüschwald eine Übereinstimmung von nur knapp über 50% mit den Gitterpunkten der Luftbildinterpretation. Als Hauptgrund dafür wird der unterschiedliche räumliche Detaillierungsgrad vermutet. Bei der LFI-Luftbildinterpretation wird punktgenau zwischen Strauch bzw. anderer Bodenbedeckungsklasse unterschieden. Fällt ein Interpretationspunkt auf einen einzelnen Strauch, wurde dieser Stichprobenpunkt als «Gebüschwald» für die Validierung verwendet. Das hier verwendete Klassifikationsverfahren hingegen basiert auf Fernerkundungsdaten mit einer räumlichen Auflösung von 10 m × 10 m oder gröber, wodurch zum Beispiel einzelne Sträucher nicht erkannt werden. Abbildung 7 illustriert unter anderem diesen Sachverhalt: Einzelne Sträucher, aber auch der Rand von Gebüschwaldflächen, wo die Strauchdichte abnimmt, werden teilweise nicht korrekt klassifiziert. Deshalb wurde die zusätzliche, flächenbasierte Validierung pro LFI-Fläche (50 × 50 m) durchgeführt. Die Übereinstimmung war im Vergleich zur pixelbasierten Validierung deutlich höher und bestätigte unsere Vermutung, dass LFI-Flächen mit einem hohen Strauchanteil zuverlässig als Gebüschwald klassifiziert wurden, solche mit nur wenigen Sträuchern hingegen eine deutlich geringere Übereinstimmung aufwiesen (Abbildung 6). Diese Einschätzung entspricht auch den durch die visuelle Interpretation mit Luftbildern gemachten Erfahrungen, dass die

Resultate insgesamt plausibel sind, jedoch lokal gewisse Unsicherheiten aufweisen können.

Bekannte Herausforderungen

In sehr steilen Felsgebieten kann es aufgrund der topografiebedingten Schatten in den Sentinel-1- und Sentinel-2-Daten zu Fehlklassifikationen kommen. In den meisten Fällen können diese jedoch rasch von Auge erkannt werden. Die meteorologischen Einflüsse Bewölkung und Schnee beeinflussen die Klassifikation ebenfalls. Obwohl möglichst wolkenfreie Sentinel-2-Aufnahmen ausgewählt wurden, gab es in einzelnen Aufnahmen aufgrund von Bewölkung teilweise keine Information zur Bodenbedeckung. Auch muss, vor allem beim Märzkomposit von Sentinel-1, davon ausgegangen werden, dass an Orten mit Schneeschmelze dieselbe die Rückstreuung beeinflusst hat. Da aber 85 Prädiktoren für das Modell verwendet wurden, gehen wir davon aus, dass Fehler in einzelnen Prädiktoren nur einen geringen Einfluss auf die Gebüschwaldkarte hatten. Das VHM des LFI hat bekannte Ungenauigkeiten ab 2000 m ü.M., die daher rühren, dass das für die Berechnung benötigte Geländemodell swissALTI3D ab dieser Höhenlage aktuell noch auf dem digitalen Höhenmodell DHM25 (swisstopo 2005) beziehungsweise auf Daten aus der Bildkorrelation beruht.

Übertrag- und Reproduzierbarkeit

Die hier verwendeten Fernerkundungsdaten sind schweizweit verfügbar. Sie könnten damit die Basis für die Klassifikation der Gebüschwaldflächen in weiteren Kantonen oder in der ganzen Schweiz bilden. Die Hauptherausforderung für die Übertragung der im Kanton Graubünden entwickelten Klassifikationsmethode auf andere Gebiete besteht darin, einen für das jeweilige Gebiet passenden Trainings-

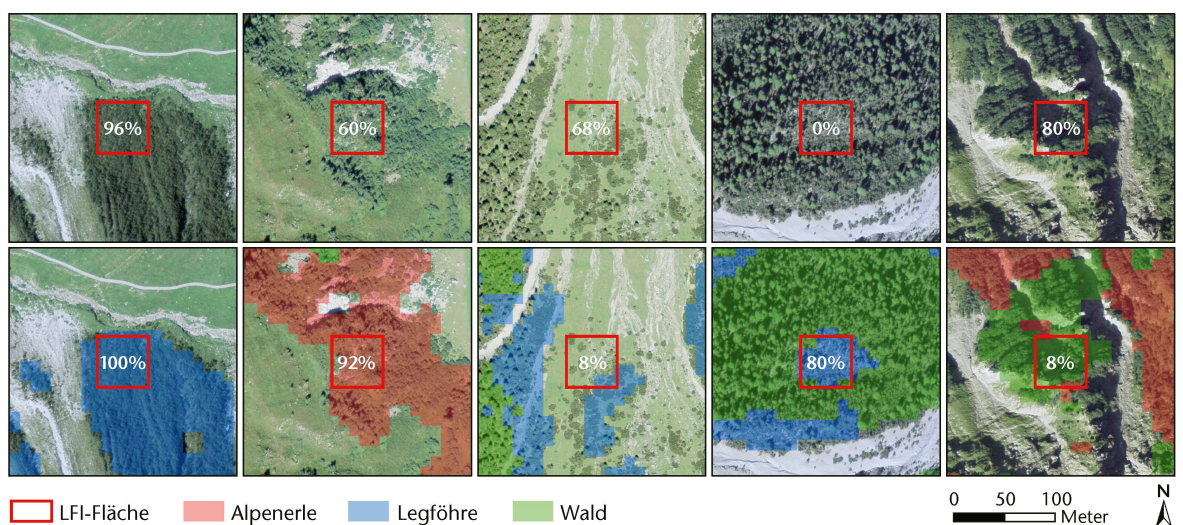


Abb 7 Vergleich von Strauchanteil (Landesforstinventar, oben) und Gebüschwaldanteil (Klassifikation, unten) für fünf Beispiele. Von links nach rechts: 1) Gute Übereinstimmung, 2) Überschätzung Gebüschwald, 3) Unterschätzung Gebüschwald, 4) Unterschiedliche Abgrenzung von Föhrenwald und Legföhren-Gebüschwald, 5) Schwierigkeiten bei der Klassifikation in topografisch anspruchsvollem Gelände. Im Hintergrund ist ein hochauflösendes Luftbild dargestellt (Swissimage © 2019 swisstopo).

datensatz aufzubauen. Nicht ganz einfach könnte sich auch die Suche nach geeigneten Sentinel-2-Aufnahmen gestalten, da sich die Wetterlagen und somit die Bewölkung in der Schweiz regional und von Jahr zu Jahr stark unterscheiden. Gleichwohl sollte die regelmässige Wiederholung einer solchen Klassifikation für das langfristige Monitoring von Gebüschwaldflächen in Betracht gezogen werden.

Die vorgestellte Methode kann auch für die Klassifikation anderer Wald- oder Vegetationstypen in der Schweiz verwendet werden, was die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten von Fernerkundungsdaten hervorhebt. Entscheidend ist in jedem Fall die Bereitstellung von hochwertigen Trainingsflächen.

Im Rahmen des LFI wurde im Jahr 2015 eine Waldmaske der Schweiz basierend auf der Walddefinition des LFI erstellt. Im Jahr 2016 wurde sie mit dem VHM des LFI aktualisiert. Diese Waldmaske verwendet die Vegetationshöhe als Eingangsgrösse. Gebüschwald wurde nur erfasst, wenn er höher als 3 m ist. Für eine Waldmaske, die auch den Gebüschwald niedriger als 3 m beinhaltet, wäre die vorgestellte Methode ein gangbarer Weg.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Gebüschwälder Alpenerle, Legföhre und Hasel konnten mithilfe von einigen Trainingsflächen und landesweit verfügbaren Fernerkundungsdaten weitgehend objektiv für die grosse Fläche des Kantons Graubünden kartiert werden. Es wurde eine hohe und für die Praxis ausreichende Genauigkeit erreicht. Der generierte Datensatz wird bereits operationell eingesetzt. Aufgrund des beschränkten räumlichen Detaillierungsgrades der Satellitendaten und der teilweise offensichtlichen Fehler ist eine visuelle Überprüfung mit Luftbildern und eine allfällige Nachbearbeitung für gewisse Anwendungen erforderlich. Anzahl und Qualität der Trainingsflächen haben den grössten Einfluss auf die Kartengenauigkeit. Zusätzliche Prädiktorvariablen oder zum Beispiel ein detaillierteres Vegetationshöhenmodell könnten weitere Verbesserungen bringen oder gar einen höheren Detaillierungsgrad ermöglichen. Zum Beispiel könnte mit Angaben zum Deckungsgrad mithilfe der Modelle von Duggelin & Abegg (2011) auch die Biomasse im Gebüschwald geschätzt werden. ■

Eingereicht: 26. September 2019, akzeptiert (mit Review): 27. Januar 2020

Dank

Dieses Projekt wurde durch den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung und das Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden unterstützt. Wir bedanken uns insbesondere bei Riet Gordon für die zur Verfügung gestellten Daten.

Literatur

- ANTHELME F, GROSSI JL, BRUN JJ, DIDIER L (2001) Consequences of green alder expansion on vegetation changes and arthropod communities removal in the northern French Alps. *For Ecol Manage* 145: 57–65.
- BALLIAN D, RAVAZZI C, DE RIGO D, CAUDULLO G (2016) *Pinus mugo* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J, de Rigo D, Caudullo G, Houston Durrant T, Mauri A, editors. *European atlas of forest tree species*. Luxembourg: Publication Office European Union. pp. 124–125.
- BREIMAN L (2001) Random Forests. *Machine Learning* 45: 5–32.
- BÜHLMANN T, HILTBRUNNER E, KÖRNER C (2014) *Alnus viridis* expansion contributes to excess reactive nitrogen release, reduces biodiversity and constrains forest succession in the Alps. *Alp Bot* 124: 187–191.
- CIOLDI F, BALTENSWEILER A, BRÄNDLI UB, DUC P, GINZLER C ET AL (2010) Waldressourcen. In: Brändli UB, editor. *Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006*. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. pp. 31–113.
- DAUGHTRY CST, WALTHALL CL, KIM MS, DE COLSTOUN EB, MCMURTREY JE (2000) Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens Environ* 74: 229–239.
- DELEGIDO J, VERRELST J, ALONSO L, MORENO J (2011) Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors* 11: 7063–7081.
- DRUSCH M, DEL BELLO U, CARLIER S, COLIN O, FERNANDEZ V ET AL (2012) Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens Environ* 120: 25–36.
- DÜGGELIN C, ABEGG M (2011) Modelle zur Biomasse- und Holzvolumenschätzung im Schweizer Gebüschwald Schweiz *Z Forstwes* 162: 32–40. doi: 10.3188/szf.2011.0032
- ENESCU CM, HOUSTON DURRANT T, DE RIGO D, CAUDULLO G (2016) *Corylus avellana* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J, de Rigo D, Caudullo G, Houston Durrant T, Mauri A, editors. *European atlas of forest tree species*. Luxembourg: Publication Office European Union. pp. 86–87.
- FRAMPTON WJ, DASH J, WATMOUGH G, MILTON EJ (2013) Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS J Photogram Remote Sens* 82: 83–92.
- GINZLER C, BÄRTSCHI H, BEDOLLA A, BRASSEL P, HÄGELI M (2005) Luftbildinterpretation LFI3. Interpretationsanleitung zum dritten Landesforstinventar. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 87 p.
- GINZLER C, HOBI ML (2016) Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. *Schweiz Z Forstwes* 167: 128–135. doi: 10.3188/szf.2016.0128
- GITELSON AA, KAUFMAN YJ, MERZLYAK MN (1996) Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens Environ* 58: 289–298.
- HOTZ MC, WEIBEL F (2005) Arealstatistik Schweiz: Zahlen, Fakten, Analysen. Neuenburg: Bundesamt Statistik. 104 p.
- HUBER B, FREHNER M (2013) Die Verbreitung und Entwicklung der Grünerlenbestände in der Ostschweiz. *Schweiz Z Forstwes* 164: 87–94. doi: 10.3188/szf.2013.0087
- IMMITZER M, VUOLO F, ATZBERGER C (2016) First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe. *Remote Sens* 8: 166.
- KELLER M, EDITOR (2013) Schweizerisches Landesforstinventar. Feldaufnahme-Anleitung 2013. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 223 p.
- LIAW A, WIENER M (2002) Classification and regression by randomForest. *R News* 2: 18–22.

- MAURI A, CAUDULLO G (2016)** *Alnus viridis* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J, de Rigo D, Caudullo G, Houston Durrant T, Mauri A, editors. European atlas of forest tree species. Luxembourg: Publication Office European Union. p. 68.
- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA, DEERING DW (1974)** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden SC, Mercanti EP, Becker MA, editors. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, NASA SP-351. pp. 309–317.
- RÜETSCHI M, SCHAEPMAN M, SMALL D (2018)** Using multitemporal Sentinel-1C-band backscatter to monitor phenology and classify deciduous and coniferous forests in northern Switzerland. *Remote Sens* 10: 55.
- SMALL D (2012)** SAR backscatter multitemporal compositing via local resolution weighting. Proc 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, München, Deutschland. pp. 4521–4524.
- TASSER E, TAPPEINER U (2002)** Impact of land use changes on mountain vegetation. *Appl Veg Sci* 5: 173–184.
- TORRES R, SNOEIJ P, GEUDTNER D, BIBBY D, DAVIDSON M ET AL (2012)** GIMES Sentinel-1 mission. *Remote Sens Environ* 120: 9–24.
- WASER L, FISCHER C, WANG Z, GINZLER C (2015)** Wall-to-wall forest mapping based on digital surface models from image-based point clouds and a NFI forest definition. *Forests* 6: 4510–4528.

Quellen

- ABEGG M, BRÄNDLI UB, CIOLDI F, FISCHER C, HEROLD-BONARDI A ET AL (2014)** Viertes Schweizerisches Landesforstinventar – Ergebnistabellen und Karten im Internet zum LFI 2009–2013 (LFI4b). Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. doi: 10.21258/1000001
- GINZLER C (2018)** Vegetation Height Model NFI. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. doi: 10.16904/1000001.1
- SWISSTOPO (2005)** DHM25 – das digitale Höhenmodell der Schweiz. Bern: Bundesamt Landestopografie. https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/height_models/dhm25 (18.1.2020)
- SWISSTOPO (2019A)** swissALTI3D. Bern: Bundesamt Landestopografie. https://shop.swisstopo.admin.ch/en/products/height_models/alti3d (18.1.2020)
- SWISSTOPO (2019B)** Swisimage 25 cm. Bern: Bundesamt Landestopografie. https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/images/ortho_images/SWISSIMAGE (18.1.2020)

Classification de grandes surfaces de forêt buissonnante grâce aux données de télé-détection

Bien que les informations sur l'étendue et l'évolution des forêts buissonnantes soient importantes pour diverses questions forestières et écologiques, rares sont les jeux de données actuels et complets disponibles. Dans le cadre de ce travail, la cartographie des forêts buissonnantes du canton des Grisons dominées par l'aulne vert, le pin mugo et le noisetier a été analysée d'après les données de télédétection disponibles au niveau national. Les données satellites de Sentinel-1 et Sentinel-2 ont été utilisées avec un modèle de hauteur de la végétation et un modèle de terrain. Des placettes d'entraînement mises en place par le canton, complétées par une interprétation d'images aériennes, ont été utilisées pour la classification supervisée par Random Forest, une méthode d'apprentissage automatique basée sur des arbres de décision. La validation indépendante des résultats a été réalisée avec des données de l'inventaire forestier national (IFN). Les forêts d'aulne vert et de pin mugo sont classifiées avec une grande précision, de respectivement 92.1% et 86.7%; pour les forêts de noisetiers en revanche, la qualité interne du modèle n'est que de 66.7%. La superficie de la forêt buissonnante ainsi obtenue est comparable aux données de l'IFN. La comparaison directe avec les points d'interprétation des images aériennes a révélé des écarts importants. La raison principale est un degré de détail spatial différent. Les placettes IFN avec une grande proportion de buissons ont cependant été classifiées de manière fiable en forêt buissonnante. La méthode présentée ici souligne le potentiel des données de télédétection disponibles pour toute la Suisse pour une cartographie des forêts buissonnantes très objective à un coût raisonnable pour de grandes superficies et avec une précision appropriée pour une utilisation pratique.

Large-scale classification of shrub forest with remote sensing data

Information on shrub forest distribution and development is important for a range of forestry- and ecologically-related questions, but current and area-wide datasets have been characterized by limited availability. In this study, the mapping of shrub forests dominated by green alder, mountain pine and hazel for the canton of Grison was investigated, based on available nationwide remote sensing data. Satellite data from Sentinel-1 and Sentinel-2, as well as a vegetation height and an elevation model were used. Training areas provided by the canton and supplemented by aerial imagery interpretation were used for a supervised classification with Random Forest, a decision tree-based machine learning algorithm. Independent validation of the results was carried out with data from the National Forest Inventory (NFI). Green alder and mountain pine forests were classified with high accuracy of 92.1% respectively 86.7%, whereas for hazel shrub forests, the internal model accuracy was only 66.7%. The resulting area expansion of the shrub forest was comparable with findings based on the NFI. A direct comparison with the NFI aerial imagery interpretation points revealed major discrepancies. The main reason for this is the different degree of spatial detail. However, NFI areas with a high percentage of shrubs were reliably classified as shrub forest. The method presented here underscores the potential of remote sensing data available throughout Switzerland for an essentially objective, cost-efficient and large-scale mapping of shrub forests with an accuracy applicable in practice.