

# Kartierung von Rückegassen aus flugzeugbasierten Laserscan-Daten durch ein CNN

## Mapping of Skid Trails from Airborne Laser Scanning Data Using a CNN

Tanja Kempen

### Zusammenfassung

Böden spielen eine entscheidende Rolle im Natur- und Klimaschutz. Bei der Waldbewirtschaftung müssen der Erhalt und die Wiederherstellung der Bodenfunktionen höchste Priorität erhalten. Ziel dieser Untersuchung war es, bestehende Fahrspuren von Forstmaschinen, sogenannte Rückegassen, aus Daten der Fernerkundung zu erfassen und digital zu kartieren. Hierzu wurden Messdaten flugzeuggetragener Laserscanner (ALS) mit Hilfe eines gefalteten neuronalen Netzwerkes (engl.: ‚Convolutional Neural Network, CNN‘) ausgewertet. Das entwickelte Verfahren kann dazu beitragen, Waldböden vor Verdichtung zu schützen und deren Funktion zur Speicherung von Wasser und Kohlendioxid zu erhalten.

*Rückegassen, Airborne Laser Scanning, Künstliche Intelligenz, Bodenschutz, Fernerkundung*

### Abstract

Soils play a crucial role in nature and climate protection. In forest management, preserving and restoring soil functions must be of utmost priority. The aim of this study was to detect existing forest machine tracks, known as skid trails, from remote sensing data and digitally map them. Airborne laser scanning (ALS) data were analysed using a convolutional neural network (CNN). The developed method may help protect forest soils from compaction and preserve their function in storing water and carbon dioxide.

*Skid Trails, Airborne Laser Scanning, Artificial Intelligence, Soil Protection, Remote Sensing*

doi: 10.23766/NiPF.202401.02

### Einleitung

Wälder erfüllen vielfältige Funktionen, die weit über die Produktion von Holz hinausgehen. Sie nehmen beispielsweise eine entscheidende Rolle beim Schutz des Klimas, des Wasserhaushalts und der Bodenfruchtbarkeit ein. Diese Nutz- und Schutzfunktionen im Rahmen einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung in Einklang zu bringen, stellt Waldbewirtschaftende insbesondere in Zeiten des Klimawandels vor große Herausforderungen.

Waldbewirtschaftung erfolgt in Deutschland überwiegend mit Hilfe von Forstmaschinen. Hierzu sind bewirtschaftete Wälder in Deutschland durch dauerhaft und systematisch angelegte Rückegassen erschlossen (Abb. 1). Um die Bodenverdichtung durch den Auflagedruck schwerer Forstmaschinen möglichst gering zu halten, sollten diese im Wald ausschließlich auf bestehenden Rückegassen fahren. Schon das einmalige Befahren unversehrten Waldbodens kann diesen über Jahrzehnte in seinen Funktionen beeinträchtigen (DEARMOND et al., 2021). In Folge von Bodenverdichtung kann der Gasaustausch mit der Atmosphäre aufgrund der Abnahme der Porenkontinuität sinken (AMPOORTER et al., 2010). Auch die Anzahl der Poren im Boden nimmt ab, wodurch



Abbildung 1: Eine Rückegasse im Laubmischwald nahe Menteroda in Nordthüringen im Dezember 2023. Nach starken Niederschlägen sammelt sich Regenwasser in den Fahrspuren.

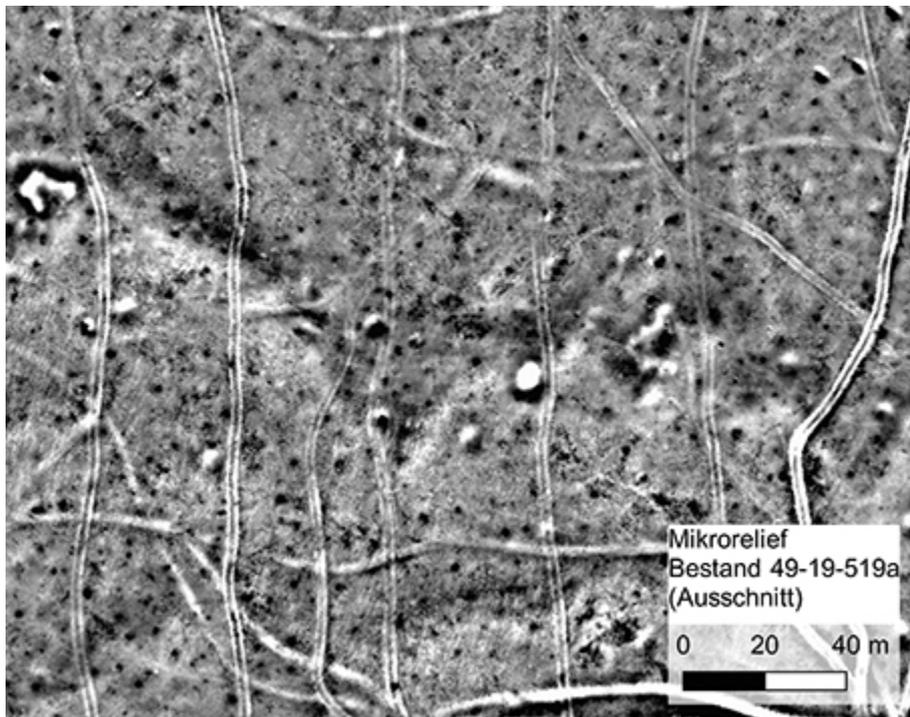


Abbildung 2: Visualisierung der ALS-Daten als Mikrorelief am Beispiel eines Laubmischwaldbestandes nahe Langula in Thüringen. Die Rückegassen sind gut an den Doppellinien zu erkennen, die im Bild überwiegend von oben nach unten verlaufen.

die Durchwurzelung aufgrund schlechterer Wasserversorgung und Belüftung erschwert wird (SOLGI et al., 2016). Diese Veränderungen des Lebensraums Waldboden können sich auf die Biodiversität auswirken und dadurch Arten verdrängen (GODEFROID & KOEDAM, 2004a, 2004b; MERCIER et al., 2019). Auch der Wirtschaftsfaktor Holzzuwachs kann durch eine Abnahme der Produktivität des Bodens und der Nährstoffverfügbarkeit beeinträchtigt werden (AROCENA, 2000; CLEVE & DYRNESS, 1983; GRIGAL, 2000). Schlechtere Keimungs- und Wachstumsbedingungen als Folge der Bodenverdichtung können die Naturverjüngung von Wäldern, z. B. bei Stieleiche (*Quercus robur L.*), erschweren (CAMBI et al., 2017, 2018). Nachhaltige Waldbewirtschaftung sollte deshalb ausschließlich auf dauerhaft angelegten Feinerschließungslinien (syn. Rückegassen) erfolgen (FAO, 1979).

#### Herausforderungen durch die Folgen des Klimawandels

In der Praxis werden vorhandene Rückegassen mit Sprühfarbe an den begrenzenden Bäumen markiert. Insbesondere durch Stürme und Trockenheit als Folgen des Klimawandels wird es zunehmend schwerer, die Fahrspuren im Gelände wiederzufinden. Wenn ganze Waldbestände absterben, verschwinden auch die Markierungen. Aufkommende Bodenvegetation kann vorhandene Rückegassen schnell überwachsen und unauffindbar machen. Hierdurch steigt die Gefahr einer flächigen Befahrung und Verdichtung im Zuge von Räum- und Aufforstungsarbeiten. Eine digitale Kartierung von Rückegassen könnte hier Abhilfe schaffen. Eine manuelle Erfassung im Bestand ist jedoch aufwändig, oft ungenau oder unvollständig (KEMPEN et al., 2024).

#### Flugzeuggetragene Laserscanner als Datenquelle

Mit Hilfe der Fernerkundung können Informationen über Waldbestände großflächig und effizient erhoben werden. Um Boden-

strukturen wie z. B. Rückegassen erfassen zu können, ist das Airborne Laserscanning (ALS) eine besonders geeignete Methode. ALS-Sensoren erfassen aktiv dreidimensionale Strukturinformationen, indem sie mit einer sehr hohen Wiederholungsrate Abstandsmessungen durchführen. Der Laserscanner durchdringt das Kronendach der überflogenen Waldbestände und liefert somit auch Informationen aus den unteren Bestandesschichten bis hin zum Waldboden (MAGDON et al., 2020). Ziel der hier vorgestellten Arbeit war es, Rückegassen aus ALS-Daten mithilfe eines maschinellen Lernverfahrens automatisiert zu erkennen. Außerdem sollte untersucht werden, wie sich der Bestandestyp auf die Erkennung der Rückegassen auswirkt.

#### Methodik

Zur Auswertung der ALS-Daten wurden Visualisierungstechniken verwendet, welche auch in der Archäologie eingesetzt werden. Beispielsweise wurden mit ähnlichen Verfahren Maya-Siedlungen in Süd- und Mittelamerika (CHASE et al., 2020), keltische Felder (BANASIAK et al., 2022) oder mittelalterliche Hohlwege (VER-SCHOOOF-VAN DER VAART & LANDAUER, 2021) in Waldbeständen kartiert. Mit der Statistiksoftware R (R CORE TEAM, 2022) und dem RVT-Programm (KOKALJ & HESSE, 2017) wurden zweidimensionale Mikrorelief-Karten (Abb. 2), Vegetationshöhen-, Gelände- und Vegetationsdichtemodelle aus den ALS-Daten abgeleitet.

#### Objekterkennung mithilfe von künstlicher Intelligenz

Um eine automatisierte Klassifikation der Feinerschließungslinien zu ermöglichen, wurden die Visualisierungstechniken mit maschinellen Lernverfahren kombiniert. Die dafür notwendigen Trainingsdaten wurden in sieben Trainingsgebieten in Thüringen mit



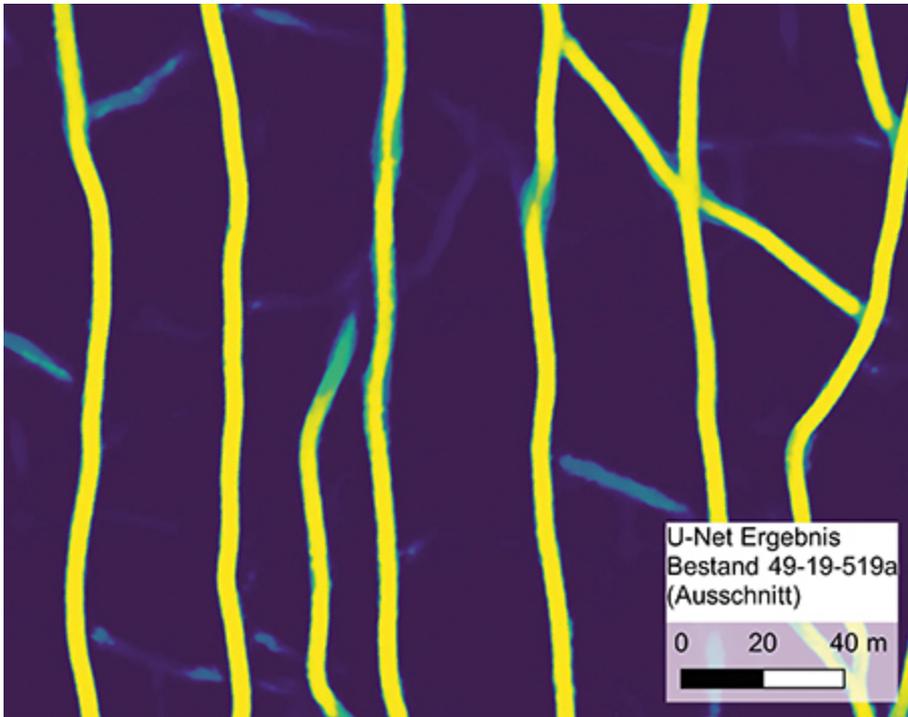


Abbildung 3: BildraSTER-Ausgabe der U-Net-Klassifikation für den in Abb. 2 gezeigten Laubmischwaldbestand. Gelbe Pixel zeigen an, wo mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eine Rückegasse erkannt wurde, dunkelblaue Pixel stehen für eine niedrige Wahrscheinlichkeit.

über 180 Beständen (~790 ha) mit unterschiedlichen Methoden erfasst: manuelle GNSS-Aufzeichnungen, Tachymeter-Messungen sowie Positionsdaten moderner Forstmaschinen. Diese Referenzdaten wurden manuell ergänzt und teilweise korrigiert, um eine möglichst exakte digitale Karte der vorhandenen Feinerschließung zu erhalten. Besonders die Maschinenpositionsdaten, welche ohne differenzielle Korrektur aufgezeichnet worden waren, mussten hierbei aufgrund zu großer Ungenauigkeiten nachbearbeitet werden. Als maschinelles Lernverfahren kam ein Convolutional Neural Network (CNN) bzw. ein sogenanntes U-Net zum Einsatz (RONNEBERGER et al., 2015). Das maschinell angelernte U-Net erkennt in den visualisierten ALS-Daten die vorhandene Feinerschließung und gibt diese als BildraSTER aus (Abb. 3). In der weiteren Prozessierung wurden alle Bildpixel mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p > 0,3$  in ein navigationsfähiges Linienvektor-Format umgewandelt.

Zur Bewertung des Verfahrens in der Praxis wurde das trainierte Netzwerk an 12 unabhängigen Beständen in sechs Gebieten validiert. Hierfür wurden die Rückegassen mithilfe des Netzwerkes automatisiert kartiert und anschließend die Übereinstimmung mit den tatsächlich vorhandenen Rückegassen anhand der vektorisierten Daten visualisiert (Abb. 4) und in R (R CORE TEAM, 2022) berechnet.

## Ergebnisse

Für die ausgewerteten Laubmischwaldbestände und Fichtenaltersklassenwälder war die Übereinstimmung mit 97 % bzw. 98 % sehr hoch. Mit 81 % schnitten die untersuchten Kiefernbestände etwas schlechter ab (Abb. 5).

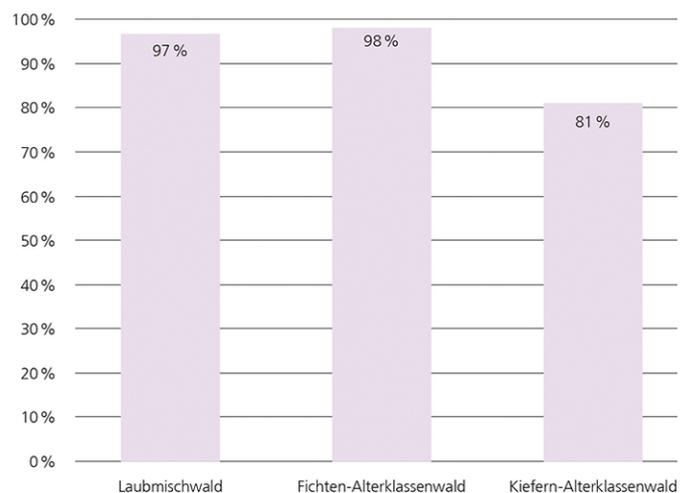


Abbildung 5: Ergebnisse der Validierung. Dargestellt ist der Anteil der durch das U-Net erkannten Rückegassen in den ausgewerteten Laubmischwald-, Fichten- und Kiefernbeständen bei einer angenommenen Gassenbreite von 5 m.

## Diskussion

Die hohe Übereinstimmungsrate von 97 % in den untersuchten Laubmischwäldern korreliert mit den guten Aufnahmebedingungen in den Wintermonaten: Durch die unbelaubten Baumkronen kann ein hoher Anteil der Laser-Messimpulse bis zum Waldboden durchdringen. Es ist anzunehmen, dass hierdurch die Visualisierung und Kombination mit einem maschinellen Lernverfahren sehr gut funktionieren. Vitale Fichtenwälder können hingegen auch im Winter zu schwierigeren Messbedingungen führen. Alle

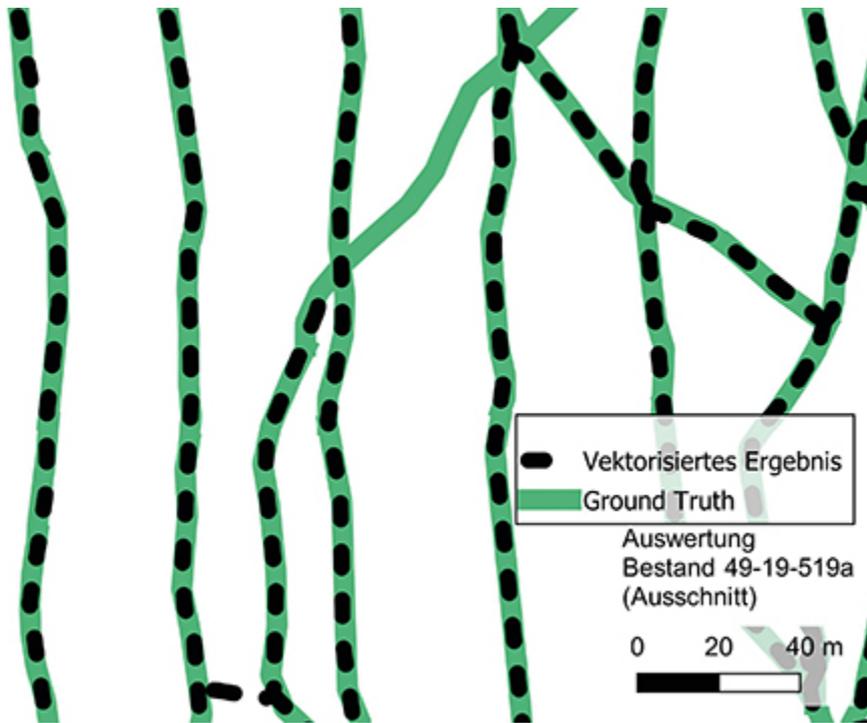


Abbildung 4: Ergebnisse der Klassifikation für den in Abb. 2 gezeigten Laubmischwaldbestand. Die grünen Linien zeigen die real vorhandenen Rückegassen an (sog. „Ground Truth“), die schwarz gestrichelten Linien stellen die vorhergesagte Feinerschließung dar, welche das trainierte Netzwerk in den visualisierten ALS-Daten erkannt hat.

in dieser Untersuchung ausgewerteten Fichtenaltersklassenwälder waren älter als 30 Jahre. Es ist anzunehmen, dass die Erkennungswahrscheinlichkeit in jüngeren Beständen mit dichter Vegetation geringer ausfällt (vgl. ABDI et al., 2022) als die hier erzielten 98 %. Für die etwas geringere Genauigkeit der Kiefernaltersklassenwälder von 81 % kommen verschiedene Erklärungsmöglichkeiten in Betracht, die noch näher untersucht werden müssen. So wiesen die ALS-Daten für diese Bestände beispielsweise geringere Messpunktdichten auf. Eine mögliche Erklärung sind abweichende Messbedingungen, da die Befliegung des Freistaats Thüringen in mehreren aufeinander folgenden Jahren erfolgte (TLBG, 2021).

## Fazit und Ausblick

Das hier vorgestellte automatisierte Verfahren erkennt vorhandene Rückegassen zuverlässig. Zusätzliche Trainingsdaten könnten dazu beitragen, die Genauigkeit der Erkennung von Rückegassen weiter zu verbessern. Insbesondere erscheint es hier sinnvoll, Forstmaschinen mit echtzeitkinematischen Satellitennavigations-Empfängern (RTK-GNSS) auszustatten, um Positionsdaten zuverlässig aufzuzeichnen (KEMPEN et al., 2024). Entsprechende Arbeitsabläufe zur systematischen Erfassung und Archivierung solcher Positionsdaten müssen entwickelt und in betriebliche Prozesse integriert werden, um geeignete Trainingsdatenbestände aufzubauen (KEMPEN et al., 2024). Der trainierte U-Net-Algorithmus erkennt nicht nur aktuell genutzte, sondern auch ältere Fahrspuren. Zukünftig könnten hieraus Naturschutzanwendungen entwickelt werden. So können Rückegassen insbesondere in Hanglagen zu erhöhtem Oberflächenabfluss führen und sind damit auch beim Hochwasserschutz in Betracht zu ziehen. Die Hochwassergefahr kann durch Rückegassen lokal erhöht und die Regenerationsfä-

higkeit der Wälder beeinträchtigt werden. Für die aktuellen großen Herausforderungen bei der Wiederaufforstung von Kalamitätsflächen nach Dürre und Massenvermehrung von Borkenkäfern könnten Rückegassen, die zwischenzeitlich durch Vegetation und Naturverjüngung überwachsen sind, digital aus ALS-Daten rekonstruiert werden. Hierdurch würden Forstmaschinen weiterhin auf der bestehenden Feinerschließung navigieren und damit unversehrten Boden vor Verdichtung schützen.

Das trainierte neuronale Netzwerk steht online zur Verfügung (KEMPEN, 2023). Erste Tests in unterschiedlichen Beständen der Niedersächsischen Landesforsten zeigen sehr gute Ergebnisse, so dass berechtigte Hoffnung besteht, dass die trainierten Klassifikationsmodelle mit geringem Aufwand auf weitere Regionen und Bestandestypen übertragen werden können. Weitere Untersuchungen dazu finden aktuell an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Göttingen statt (KEMPEN et al., 2024).

## Danksagung

Ich danke der Landesforstanstalt ThüringenForst A.ö.R. Ebenso möchte ich dem Nds. Forstplanungsamt für die Unterstützung sowie Ulrich Prusitzki für die Bereitstellung der Tachymeterdaten im Hainich danken. Mein besonderer Dank gilt M.Sc. Maximilian Freudenberg, der mit seiner Expertise und Begeisterung für die Baumartenerkennung in Fernerkundungsdaten mit CNNs einen großen Beitrag zum Gelingen dieses Projekts geleistet hat. Auch meiner Kommilitonin Laura Meitingen, die im Rahmen ihrer Bachelorarbeit an den Felddatenerhebungen und bei der Erstellung der Trainingsdaten beteiligt war, möchte ich hiermit meinen Dank aussprechen.

## Quellenverzeichnis

- ABDI, O., UUSITALO, J. & KIVINEN, V.-P. (2022). Logging Trail Segmentation via a Novel U-Net Convolutional Neural Network and High-Density Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 14(2), 349. <https://doi.org/10.3390/rs14020349>
- AMPOORTER, E., VAN NEVEL, L., DE VOS, B., HERMY, M. & VERHEYEN, K. (2010). Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1664–1676. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.002>
- AROCENA, J. M. (2000). Cations in solution from forest soils subjected to forest floor removal and compaction treatments. *Forest Ecology and Management*, 133(1–2), 71–80. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00299-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00299-6)
- BANASIAK, P. Z., BEREZOWSKI, P. L., ZAPŁATA, R., MIELCAREK, M., DURAJ, K. & STEREŃCZAK, K. (2022). Semantic Segmentation (U-Net) of Archaeological Features in Airborne Laser Scanning – Example of the Białowieża Forest. *Remote Sensing*, 14(4), 995. <https://doi.org/10.3390/rs14040995>
- CAMBI, M., HOSHIKA, Y., MARIOTTI, B., PAOLETTI, E., PICCHIO, R., VENANZI, R. & MARCHI, E. (2017). Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management*, 384, 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045>
- CAMBI, M., MARIOTTI, B., FABIANO, F., MALTONI, A., TANI, A., FODERI, C., LASCHI, A. & MARCHI, E. (2018). Early response of *Quercus robur* seedlings to soil compaction following germination. *Land Degradation & Development*, 29(4), 916–925. <https://doi.org/10.1002/ldr.2912>
- CHASE, A. S. Z., CHASE, D. & CHASE, A. (2020). Ethics, New Colonialism, and Lidar Data: A Decade of Lidar in Maya Archaeology. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 3(1), 51–62. <https://doi.org/10.5334/jcaa.43>
- CLEVE, K. V. & DYRNESS, C. T. (1983). Effects of forest-floor disturbance on soil-solution nutrient composition in a black spruce ecosystem. *Canadian Journal of Forest Research*, 13(5), 894–902. <https://doi.org/10.1139/x83-119>
- DEARMOND, D., FERRAZ, J. B. S. & HIGUCHI, N. (2021). Natural recovery of skid trails: A review. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(7), 948–961. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0419>
- FAO (Hrsg.). (1979). *Planning forest roads and harvesting systems* (2. print). FAO.
- GODEFROID, S. & KOEDAM, N. (2004a). Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. *Biological Conservation*, 119(2), 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2003.11.009>
- GODEFROID, S. & KOEDAM, N. (2004b). The impact of forest paths upon adjacent vegetation: Effects of the path surfacing material on the species composition and soil compaction. *Biological Conservation*, 119(3), 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.01.003>
- GRIGAL, D. F. (2000). Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management*, 138(1–3), 167–185. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00395-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00395-9)
- KEMPEN, T. (2023). Skidtrail Detection. <https://gitlab.gwdg.de/tanja.kempen/skidtrail-detection>
- KEMPEN, T., FREUDENBERG, M., FUCHS, H. & MAGDON, P. (2024). Automatisierte Kartierung forstlicher Feinerschließung. *AFZ Der Wald*, 3, 12–15.
- KOKALJ, Ž. & HESSE, R. (2017). *Airborne laser scanning raster data visualization: A guide to good practice* (Bd. 14). Založba ZRC.
- MAGDON, P., FEHRMANN, L., FUCHS, H., KLEINN, C. & STAUPENDAHL, K. (2020). Fernerkundungsbasierte Bestandesinventur. *AFZ Der Wald*, 15, 36–39.
- MERCIER, P., AAS, G. & DENGLER, J. (2019). Effects of skid trails on understory vegetation in forests: A case study from Northern Bavaria (Germany). *Forest Ecology and Management*, 453, 117579. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117579>
- R CORE TEAM. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- RONNEBERGER, O., FISCHER, P. & BROX, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1505.04597>
- SOLGI, A., NAJAFI, A., EZZATI, S. & FERENCIK, M. (2016). Assessment of ground-based skidding impacts on the horizontally rate and extent of soil disturbance along the margin of the skid trail. *Annals of Forest Science*, 73(2), 513–522. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0544-7>
- TLBG. (2021). Informationen zur Datenstruktur der Höhendaten von 2014 bis 2019. [https://geoportal.geoportal-th.de/hoehendaten/Uebersichten/2014-2019\\_README\\_Hoehendaten.pdf](https://geoportal.geoportal-th.de/hoehendaten/Uebersichten/2014-2019_README_Hoehendaten.pdf)
- UMWELTBUNDESAMT. (2023). The upcoming European Soil Health Law – chances and challenges for an effective soil protection. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/20230118\\_eu\\_soil\\_law\\_sciopp\\_final\\_clean\\_final\\_bf\\_korrektur-titelseite.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/20230118_eu_soil_law_sciopp_final_clean_final_bf_korrektur-titelseite.pdf)
- VERSCHOOF-VAN DER VAART, W. B. & LANDAUER, J. (2021). Using CarcassonNet to automatically detect and trace hollow roads in LiDAR data from the Netherlands. *Journal of Cultural Heritage*, 47, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.10.009>

### Kontakt

Tanja Kempen, M.Sc.  
Georg-August-Universität Göttingen  
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie  
Büsgenweg 5  
37077 Göttingen  
[Tanja.kempen@posteo.de](mailto:Tanja.kempen@posteo.de)

