

Tanja Riedel¹, Stephan Estel², Christoph Federle³, Aurelia Maria Moanță⁴, Burkhard Golla¹

Methodik zur teilflächenspezifischen Ermittlung der Hangneigung mittels digitaler Höheninformationen im Pflanzenschutz-Anwendungs-Manager (PAM)

Methodology for site-specific determination of slope inclination using digital height information in the Plant Protection Application Manager (PAM)

140

Zusammenfassung

In der Landwirtschaft werden viele Pflanzenschutzmittel im Zuge des Zulassungsverfahrens mit Hangneigungsaufgaben belegt. Ziel ist es, den durch Oberflächenabfluss und Bodenerosion bedingten Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in angrenzende Gewässer zu vermeiden. Aktuell existieren keine praktikablen, deutschlandweit verfügbaren Instrumente, die den Landwirt in einer zuverlässigen und nachvollziehbaren Weise bei der objektiven Ermittlung der Hangneigung unterstützen. Mit dem entwickelten PAM3D-Dienst wird dem Nutzer ein internetbasiertes Entscheidungshilfesystem zur Einhaltung von Hangneigungsaufgaben zur Verfügung stehen. Gleichzeitig wird diese Methode für die zuständigen Kontrollbehörden der Länder zur Diskussion gestellt. Die Ermittlung der Hangneigung eines Feldes erfolgt automatisiert auf Grundlage von digitalen Höheninformationen mittels eines neuartigen Algorithmus, der Randpixelmethode. Im Gegensatz zu anderen Services gibt diese nicht nur einen Durchschnittswert pro Feld aus, sondern erlaubt eine teilflächenspezifische Beurteilung der Hangneigung. Die Methode ist gegenüber gängigen rasterbasierten Verfahren flexibel genug, Höheninformation aus verschiedenen Quellen (Laserscan-, Traktor-, Drohnen- und Satellitendaten) zu verarbeiten und ist zudem robust gegenüber unterschiedlichen räumlichen Auflösungen dieser Datensätze.

Stichwörter: Pflanzenschutz, Hangaufgaben, Webservice, Entscheidungshilfesystem, Digitales Geländemodell

Abstract

In agriculture, many plant protection products (PPP) are subject to slope restrictions as part of their approval process. The aim is to prevent the discharge of pesticides into adjacent water bodies caused by surface runoff and soil erosion. There are currently no practicable instruments available throughout Germany, supporting farmers to determine the slope inclination in a reliable and verifiable manner. The PAM3D-service will provide an internet-based decision support system for complying with slope requirements in the context of PPP risk management. The slope inclination of a field is determined automatically based on digital elevation information using a novel algorithm. Contrary to other services providing an unreliable average field value, this new methodology allows for a site-specific slope assessment. The service supports various sources of elevation information including official laser, tractor, satellite, and drone data, and it is robust to the spatial resolution of input elevation data.

Key words: plant protection, slope requirements, webservice, decision support system, digital elevation model

Affiliationen

¹ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Kleinmachnow

² Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP), Bad Kreuznach

³ Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion e. V. (ISIP), Bad Kreuznach

⁴ John Deere European Technology Innovation Center (ETIC), John Deere GmbH & Co. KG, Kaiserslautern

Kontaktanschrift

Tanja Riedel, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow, E-Mail: tanja.riedel@julius-kuehn.de

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen

22. Februar 2021/16. April 2021

Einleitung

In der heutigen Landwirtschaft stellt der Pflanzenschutz aufgrund einer Vielzahl an Vorschriften und Rahmenbedingungen eine der informationsintensivsten ackerbaulichen Maßnahmen dar. Im Zuge der Zulassung werden zahlreiche Pflanzenschutzmittel mit Anwendungsbestimmungen gegen Abschwemmung, sogenannte Hangneigungsauflagen, belegt (BVL 2021, z. B. NG 402, 404, 412, NW 701, 705, 706), die bei der Applikation von Pflanzenschutzmitteln auf Schlägen in Gewässernähe mit einer Hangneigung von über 2 % einzuhalten sind. Die Auflagen sehen 5 bis 20 m breite, bewachsene Randstreifen vor oder alternativ Mulch- oder Direktsaatverfahren sowie Auffangsysteme für den abgeschwemmten Boden. Ziel dieser Maßnahmen ist, den durch Oberflächenabfluss und Bodenerosion bedingten Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in angrenzende Gewässer sowie ins Grundwasser zu vermindern (Abb. 1). Kontrollen mit Schwerpunkt auf der Einhaltung von Anwendungsbestimmungen zum Schutz der Oberflächengewässer, die in der Saison 2017 in Schleswig-Holstein durchgeführt wurden, haben in vielen Fällen Beanstandungen nach sich gezogen. Festgestellt wurden hierbei insbesondere Verstöße gegen die Hangneigungsauflagen (PFEIL, 2018).

In der Praxis gestaltet sich die Einhaltung der Hangaufgaben für die Landwirtschaft häufig schwierig. Die Einstufung von schwach geneigten Schlägen mit einer Hangneigung im Bereich des vom Gesetzgeber vorgegebenen 2 %-Schwellwertes (2 m Höhenunterschied auf 100 m Länge), ist mit bloßem Auge ohne zusätzliche Vermessung kaum möglich. Erschwerend kommt häufig die komplexe Oberflächenstruktur des Schlages hinzu. So kann dieser in verschiedene Richtungen geneigt sein, Senken aufweisen oder sogar in Richtung Gewässer wieder ansteigen.

Trotz dieser Schwierigkeiten und obwohl Cross-Compliance-relevant und bußgeldbewehrt, existieren nach unseren Recherchen aktuell keine praktikablen und deutschlandweit verfügbaren Instrumente bzw. Online-Tools, die die Landwirtschaft auf eine nachvollziehbare und kostengünstige Art und Weise bei der objektiven Berechnung der schlagspezifischen Hangneigung unterstützen.

Für Rheinland-Pfalz arbeitet die RLP AgroScience GmbH aktuell an der Visualisierung der Randstreifen für die Hangneigungsauflagen des Wasserhaushaltsgesetzes



Abb. 1. Schematische Darstellung eines Schlages, für den aufgrund der Hangneigung (> 2 %) ein Gewässerrandstreifen erforderlich ist.

und der Düngeverordnung über den GeoBox-Viewer der DIENSTLEISTUNGSZENTREN LÄNDLICHER RAUM IN RHEINLAND-PFALZ (2021). Mit Xarvio healthy fields steht zwar ein Produkt zur Berechnung der Abstandauflagen und Applikationskarten zur Verfügung, Hangneigungsauflagen werden jedoch noch nicht berücksichtigt (XARVIO DIGITAL FARMING SOLUTIONS, 2021). Ähnliches gilt für die Software-Funktion NatShield, die in der Schlagkartei von BASF und Helm Verwendung finden. Für Bayern steht mit dem im Internet frei verfügbaren BayernAtlas ein Werkzeug zur Ermittlung des Höhenunterschiedes entlang einer vom Nutzer vorgegebenen Hanglinie zur Verfügung. Die Hangneigung zwischen den zwei einzelnen Feldpunkten kann anschließend vom Nutzer über die Hanglänge sowie den Höhenunterschied mittels einfacher trigonometrischer Beziehungen berechnet werden (AELF ANSBACH, 2021). Das Online-Tool unterstützt die manuelle Kontrolle einzelner Schläge, eine automatisierte Abfrage oder die Erstellung von Applikationskarten zur Einhaltung der Abstands- oder Hangneigungsauflagen ist nicht möglich. Fehlende praxistaugliche Lösungen zur effizienten und objektiven Bestimmung der Hangneigung können zu Fehlanwendungen führen.

Im Verbundprojekt PAM3D (FKZ: 2814905315) wurde vor diesem Hintergrund mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft ein Webdienst zur teilflächenspezifischen, automatisierten Berechnung der Hangneigung entwickelt (ESTEL et al., 2020a). Webservices (auch als Webdienste bezeichnet) ermöglichen Funktionalitäten, die von einem elektronischen Gerät einem anderen elektronischen Gerät angeboten werden, wobei die Geräte über das Internet miteinander kommunizieren. Der PAM3D-Webservice wird in die bereits bestehende Systemarchitektur des Pflanzenschutz-Anwendungsmanagers PAM integriert (SCHEIBER et al., 2016). Der PAM-Webservices ist eine sogenannte Servicekomposition und ermöglicht über ein Farmmanagementinformationssystem (FMIS) die Ermittlung von Abstandsauflagen und die Darstellung von Pufferstreifen ohne PSM-Applikation bzw. mit erforderlicher abdriftmindernder Technik (AMT) sowie deren Ausgabe in Applikationskarten. Im vorliegenden Artikel soll die für den Service neu entwickelte Methodik zur Abschätzung der Hangneigung vorgestellt werden.

Material und Methoden

Die Berechnung der Hangneigung im PAM3D-Service erfolgt automatisiert auf Grundlage von digitalen Höhenmodellen (DHM). Derartige 3D-Informationen können durch verschiedene Verfahren generiert werden. Die gängigsten Methoden sind die Stereo-Photogrammetrie, die SAR-Interferometrie, das Laserscanning sowie das Scannen/Digitalisieren von existierenden Kartenbeständen. Bei der Auswertung von digitalen Höheninformationen ist zu beachten, dass die topographischen Informationen in Abhängigkeit von der Erfassungsmethode als digitales Geländemodell (DGM) oder digitales Oberflächenmodell (DOM) vorliegen können. DGMs beschreiben dabei

die tatsächlichen Höheninformationen der topographischen Erdoberfläche, wohingegen im DOM die Erdoberfläche inklusive ihrer Bedeckung, wie Vegetation, Gebäude etc., dargestellt wird. Diese Nomenklaturen werden in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet (ZHOU, 2017).

Der Webservice erlaubt die Verarbeitung von amtlichen Laserscandaten, Satellitendaten sowie privaten Traktor- und Drohnendaten und unterstützt damit die wesentlichen DGM-Quellen, die eine stark automatisierte Verarbeitung erlauben und die in den Analysen im Rahmen dieser Studie berücksichtigt wurden. Als Untersuchungsgebiet wurde dabei das Bundesland Rheinland-Pfalz gewählt. Dieses sehr walddreiche Bundesland ist durch eine relativ kleinparzellierte Agrarlandschaft gekennzeichnet. Die landwirtschaftlichen Flächen nehmen mit 719.400 ha rund 36 % des Landes ein und spielen insbesondere im Rheinhessischen Hügelland und im Oberreingraben eine wichtige Rolle. Flächendeckend für das gesamte Bundesland stehen durch das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo RLP) bereitgestellte, laserbasierte DGM-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 1 m (DGM1) sowie die DGM-Datenprodukte des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit einer räumlichen Auflösung von 5 und 10 Metern (DGM5, DGM10) zur Verfügung. Weiterhin wurde im Projekt auf frei verfügbare, satellitenbasierte DGM-Produkte (z. B. AW3D30, SRTM, Aster) zurückgegriffen. Für einzelne Testflächen wurden zusätzlich hochauflösende Traktor GNSS-RTK Daten sowie Drohnendaten erhoben. Zur Generierung von Raster-DGM-Daten aus den Punktinformationen der Traktor GNSS-RTK Daten wurde im PAM3D Projekt ein eigener Workflow entwickelt und implementiert (MOANȚA et al., 2020).

Um die Landwirtschaft bei Anwendungsbestimmungen mit Hangneigungsaufgaben zu unterstützen und um Eingangshöhendaten unterschiedlicher Quelle verarbeiten zu können, sind bei der Auswahl der Methodik zur schlagspezifischen Berechnung der Hangneigung folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Robustheit gegenüber der räumlichen Auflösung der Inputdaten/Anwendbarkeit auf unterschiedliche DHM-Datenquellen,
- Möglichkeit zur teilflächenspezifischen Bestimmung der Hangneigung,
- geringe Prozessierungsdauer (Bereitstellung und on-the-fly Berechnung via Webservice),
- Berücksichtigung der Topographie (Neigung des Hanges zum Feltrand hin),
- Plausibilität/Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse im Gelände (Dienst als Entscheidungshilfe für Landwirt),
- Unterschätzung der abflussrelevanten Feltrandbereiche ist zu vermeiden (Umweltaspekte/Kosten für Bußgelder).

Die Berechnung der Hangneigung auf Grundlage von digitalen Höheninformationen kann durch verschiedene

Verfahren erfolgen (WARREN et al., 2004). Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei Ansätze (kernel-basierend, Fließpfad-basierend) berücksichtigt und mit der hier entwickelten Randpixelmethode verglichen.

Die kernel-basierte Berechnung der Hangneigung unter Berücksichtigung von 8 benachbarten Pixeln (auch Rasterzellen) nach dem Finite-Differenzen-Verfahren (HORN, 1981) ist eine weit verbreitete Methode und in gängige geographische Informationssysteme (GIS) wie ArcGIS und QGIS implementiert.

Zusätzlich wurde ein Ansatz zur Abschätzung der Hangneigung getestet, der verschiedene, aus den Höhen-daten abgeleitete Parameter kombiniert. Die Abflussakkumulation (Fließmodellalgorithmus D-Infinity nach TARBOTON, 1997) gibt für jedes Pixel an, wieviel hangaufwärts gelegene Rasterzellen bzw. Teilflächen in diese entwässern. Dies gibt einen Hinweis darauf, in welchen Feldbereichen mit einer Konzentration des Oberflächenabflusses zu rechnen ist. Kombiniert man diese Information mit der Hanglänge, so können abflussintensive Feldbereiche identifiziert werden, die eine Hangneigung von über einem bestimmten Neigungswert, z. B. 2 %, aufweisen. Die Hangneigung wird dabei – ähnlich der Bestimmung der Hangneigung im Gelände – über die maximale und minimale Höhe entlang des Hanges bestimmt.

Für eine gemäß den o.g. Anforderungen optimierte Berechnung der Hangneigung wird ein neuartiger Ansatz vorgeschlagen, der im Folgenden als Randpixelmethode bezeichnet wird. Die Ermittlung der Hangneigung erfolgt nach der in Abb. 2 dargestellten Prozesskette.

Die für die Anwendung des Verfahrens notwendigen Inputdaten umfassen ein digitales Geländemodell des Feldes sowie die zugehörige Feldgrenze (z. B. GeoJson oder Vektorformat). Bei Hangauflagen ist die Hangneigung bis zu einer Entfernung von 100 Metern hangaufwärts, gemessen ab der Böschungsoberkante, relevant (LfL, 2021). Im ersten Schritt werden alle DGM-Rasterzellen entlang der vorgegebenen Feldgrenze extrahiert. Optional können auch nur Randpixel in bis zu 100 Meter Abstand zur Böschungsoberkante berücksichtigt werden (Abb. 2, in blau). Die Berechnung der Hangneigung erfolgt einzeln für jedes dieser Randpixel. Dabei werden alle Höhenwerte mit einem Abstand von 20 bis 100 Meter zum jeweiligen Randpixel berücksichtigt. Abbildung 2 zeigt exemplarisch ein Randpixel sowie den zugehörigen DGM-Ausschnitt, der in die Berechnung der Hangneigung für diesen Punkt eingeht. Ein Mindestabstand von 20 Metern zwischen dem Randpixel und dem betrachteten Geländepunkt ist erforderlich, da andernfalls der Einfluss von mikromorphologischen Strukturen sowie Höhendifferenzen im Bereich der relativen Höhengenaugigkeit der DGM-Daten vereinzelt zu hohen Hangneigungswerten bei gleichzeitig kurzen Hanglängen führen und die Berechnung der Hangneigung des betrachteten Randpixels beeinflussen. Geländepunkte mit einer Entfernung von über 100 Metern zum Randpixel werden aufgrund der Vorgabe der LfL ebenfalls nicht betrachtet. Zusätzlich besteht ab Hanglängen von über 100 m die Verpflichtung zu erosionsmindernden Maßnahmen. Im

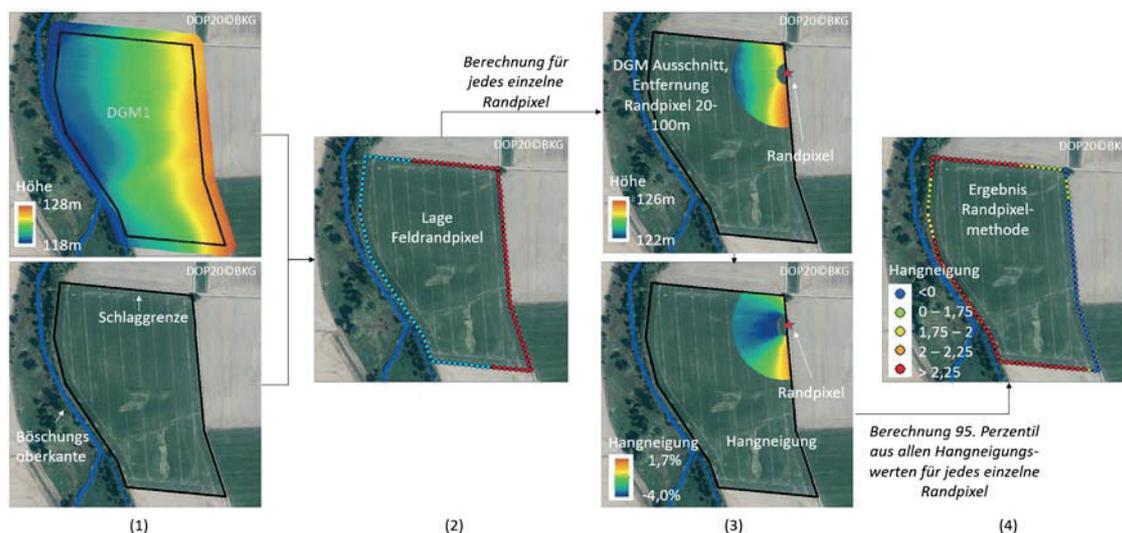


Abb. 2. Prozesskette zur Ermittlung der teilflächenspezifischen Hangneigung nach der Randpixelmethode. Von links nach rechts: (1) Inputdaten, (2) Extraktion Feldrandpixel – Randpixel innerhalb eines 100 Meter Puffers blau dargestellt, (3) Berechnung Hangneigung für jedes Feldrandpixel und (4) Ergebniskarte (eigene Darstellung, Hintergrund: DOP20 © BKG).

nächsten Prozessierungsschritt wird für alle DGM-Pixel die Entfernung zum Randpixel sowie der Höhenunterschied zwischen den beiden Geländepunkten ermittelt. Auf Grundlage beider Parameter kann mittels Trigonometrie für jedes DGM-Pixel die Neigung nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$\text{Hangneigung}[\%] = \frac{DGM_{\text{Feld}} - DGM_{\text{Rand}}}{\text{Entfernung}_{\text{Feld-Rand}}} \times 100$$

wobei

DGM_{Feld} = Höhenwert am Geländepunkt innerhalb des Feldes
 DGM_{Rand} = Höhenwert des Randpixels
 Entfernung-Feld-Rand = Entfernung zwischen den beiden Geländepunkten

Als Ergebniswert für ein Feldrandpixel wurde das 95. Perzentil der Hangneigungswerte festgelegt, d. h. 5 % der Werte weisen eine höhere Neigung auf. Negative Werte sind ein Indiz für den Abfluss in das Feld hinein bzw. für einen Geländeanstieg oder eine Senke vor der Böschungsoberkante (BOK). In diesem Fall ist ein Oberflächenabfluss in das angrenzende Gewässer nicht möglich. Auf Grundlage der ermittelten Hangneigung berechnet der PAM-Webservice die Gewässerrandstreifen und Applikationskarten.

Ergebnisse

Die dargestellten Methoden zur Ermittlung der Hangneigung auf Grundlage von digitalen Höhenmodellen wurden auf alle DGMs und DOMs der Testflächen angewandt und in Hinblick auf ihre Eignung zur Einhaltung

von Hangneigungsauflagen im Pflanzenschutz evaluiert.

Kernel-basierte Verfahren

Zur Abschätzung der Hangneigung auf Grundlage von Raster-DGM-Daten kommen häufig kernel-basierte Verfahren zum Einsatz, wie z. B. die Finite Differenzen Methode nach HORN (1981). Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass die kernel-basiert ermittelten Hangneigungswerte sehr stark von der Auflösung des zugrundeliegenden DGMs beeinflusst werden (CHOW & HODGSON, 2009, GROHMANN, 2015), was in der vorliegenden Studie bestätigt werden konnte. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der Hangneigung nach HORN (1981) für amtliche DGM1 und DGM10 auf Grundlage einer zufälligen Stichprobe von 3000 Schlägen in Rheinland-Pfalz. Ziel des PAM-Dienstes ist eine teilflächenspezifische Beurteilung der Hangneigung. Um dies zu erreichen sowie zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den auf Grundlage der Randpixelmethode ermittelten Werten, wurden zusätzlich für alle Randpixel entlang der Feldgrenze die mittlere kernel-basierte Hangneigung in einem Radius von 20–100 m (entsprechend Randpixelmethode, Abb. 2) berechnet. Die mit DGM1 Daten berechnete Hangneigung (Feldmittelwerte sowie teilflächenspezifische Mittelwerte für einzelne Randpixel) ist dabei höher als die mit DGM10 Daten. Ausnahme bilden hier lediglich Schläge, die unmittelbar an steilere Hanglagen angrenzen sowie sehr kleine Schläge. Das heißt: würde die Notwendigkeit von Gewässerrandstreifen auf Grundlage des Flächenmittelwertes entschieden, wären bei Verwendung von DGM1 Daten für 96,9 % und von DGM10-Daten für 75,3 % der Schläge Randstreifen anzulegen. Bei Verwendung von DGM1 Daten wären in einigen Fällen sogar für Felder mit einer maximalen Höhendifferenz unter 2 Meter Randstreifen erforderlich. Mit zunehmenden

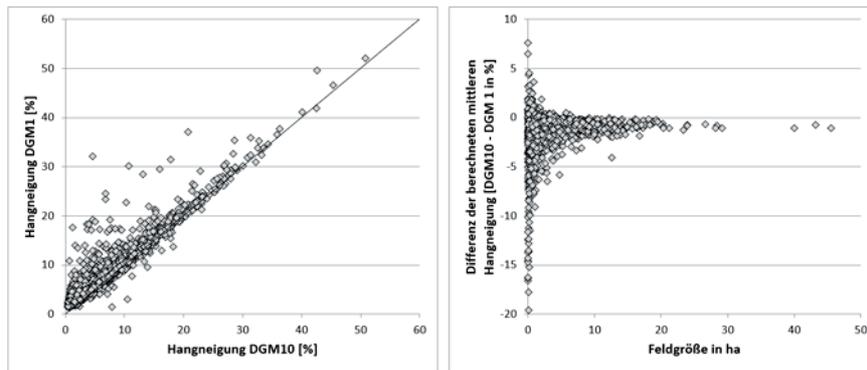


Abb. 3. Vergleich der aus DGM1 und DGM10 Daten abgeleiteten, mittleren Hangneigung für 3000 zufällig ausgewählte Felder in Rheinland-Pfalz.

der Auflösung werden das Mikorelief und somit auch geringe Unebenheiten, z. B. durch Bearbeitungszustand des Feldes, abgebildet und fließen in die Berechnung der Hangneigung ein. Bei sehr hochauflösenden digitalen Höheninformationen (z. B. Drohnen-Daten mit Auflösung im cm-Bereich) ist im Vorfeld der Hangneigungsberechnung eine Verringerung der räumlichen Auflösung zwingend erforderlich. Ohne diesen Schritt ergeben sich extrem hohe mittlere Hangneigungen (für Beispielfelder > 100 %). Eine Alternative stellen Tools wie z. B. die ArcGIS Erweiterung ArcSIE dar (SHI, 2017), die Hangneigungen für eine deutlich größere Kernelgröße berechnen können. Allerdings zeigte sich diese Vorgehensweise in Hinblick auf die Rechenzeit als ineffizient. Eine weitere Möglichkeit, um die Einflüsse der mikromorphologischen Strukturen auszugleichen, ist das Filtern des DGMS vor der Hangneigungsbestimmung (GRIEVE et al., 2016; VAZE et al., 2010). Insbesondere für Schläge, die direkt an sehr steile Hanglagen angrenzen, kann sich in Folge der Filterung der DGM-Daten die berechnete Hangneigung in Feldrandnähe erhöhen und die Ergebnisse beeinflussen. Dies ist insofern relevant, da für Hangauflagen nicht die Neigung im gesamten Schlag relevant ist, sondern lediglich die in einer Entfernung von 100 m zur Böschungsoberkante. Dies erfordert eine kleinräumige Betrachtung.

Fließpfadanalysen-basierte Bestimmung der Hangneigung

Die Hangneigung allein gibt keine Auskunft über die Fließrichtung des Abflusses innerhalb des Feldes und somit darüber, ob der Oberflächenabfluss in Richtung

eines Gewässers erfolgt. Erst dadurch wird der Eintrag von Pflanzenschutzmitteln ins Gewässer überhaupt möglich. Die Berücksichtigung der Topographie ist durch die Einbindung weiterer, aus den DGM-Daten abgeleiteter Parameter, wie z. B. der Hangexposition oder Abflussakkumulation, möglich. Allerdings hat sich im Zuge der Analysen gezeigt, dass diese Parameter für die unterschiedlichen DGM-Inputdaten nicht robust sind (vgl. Abb. 4) und die modellierten Wasserübertrittsbereiche am Feldrand nicht übereinstimmen, was dazu führt, dass das tatsächliche Abflussrisiko für einen bestimmten Feldrandbereich falsch eingeschätzt werden kann. Vor diesem Hintergrund wurde dieser Ansatz mit dem Ziel einer teilflächenspezifischen Ausweisung der Hangneigung im PAM-Service nicht weiterverfolgt.

Randpixelmethode

Im Projekt PAM3D wurde mit der Randpixelmethode ein innovativer Ansatz entwickelt und umgesetzt, der eine teilflächenspezifische Beurteilung der Hangneigung entlang der Außengrenze einer vorgegebenen Geometrie erlaubt. Negative Werte sind ein Indiz für den Abfluss in das Feld hinein und erlauben somit die Berücksichtigung der Topographie.

Zur Abschätzung der Robustheit des vorgeschlagenen Verfahrens gegenüber der räumlichen Auflösung der Inputdaten sowie der Anwendbarkeit der Methodik auf unterschiedliche DGM-Datenquellen, wurden für alle Randpixel die absoluten Differenzen der Hangneigung gegenüber den mit den DGM1 Daten berechneten Werten ermittelt (Abb. 5). Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse für alle Randpixel der Felder, für die DHM-Daten aus

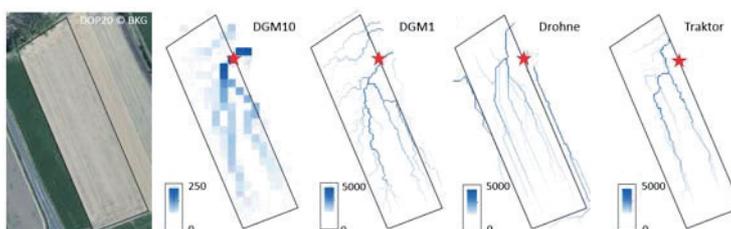


Abb. 4. Aus DGM-Daten unterschiedlicher Quellen abgeleitete Abflussakkumulation. Der rote Stern markiert die maximale Wasserakkumulation laut DGM1 und DGM10 (eigene Darstellung).

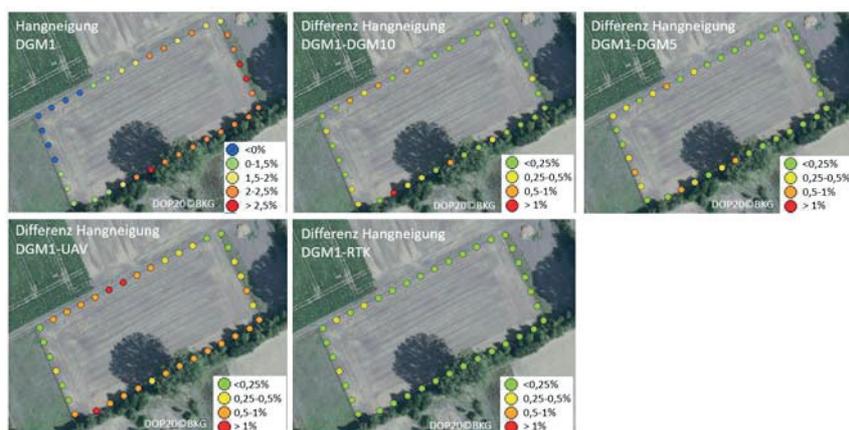


Abb. 5. Ergebnis der Randpixelmethode für DGM1 Daten sowie Abweichungen zu den mit DGM10, DGM5, RTK und UAV-Daten berechneten Hangneigungen.

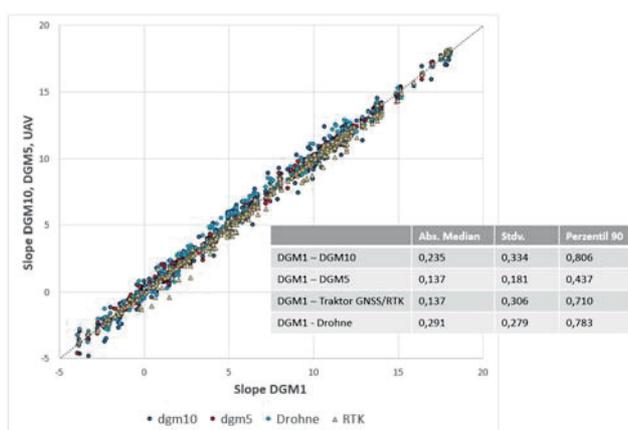


Abb. 6. Vergleich der Hangneigung nach der Randpixelmethode zwischen DGM1 und DGM10, DGM5, RTK und UAV. Das Diagramm sowie die statistischen Kennwerte zeigen die Robustheit und die Anwendbarkeit der Randpixelmethode auf DGM-Daten unterschiedlicher Quellen und Auflösungen.

allen Datenquellen (amtliches DGM, Traktor, Drohne) zur Verfügung standen (6 Felder, 410 Randpixel mit Abstand von 10 m). Die Abweichungen der ermittelten Hangneigungen sind im Vergleich zu den kernel-basierten Werten sehr gering. Der Medianwert der absoluten Differenzen lag für alle Datenquellen unter 0,3 %. Auch für Testfelder, die aufgrund mikromorphologischer Strukturen sehr hohe Differenzen zwischen den kernel-basierten Hangneigungen auf Grundlage der amtlichen DGM-Daten mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen zeigten, konnten mit dem Randpixelverfahren sehr robuste Ergebnisse erzielt werden (z. B. Differenzen DGM10 vs. DGM1: kernel-basierter Feldmittelwert: 1,43 % gegenüber Median der Absolutwerte aller Randpixel: 0,095 %). Für Gebiete, in denen DGM1 Daten nicht zur Verfügung stehen, bieten DGM5 Daten eine gute Alternative (abs. Median: 0,137 %, Standardabweichung: 0,181 %). Eine Anwendung der Randpixelmethode auf privaten DGM-Daten ist möglich. Dabei sind aus Traktor GNSS/RTK Daten extra-

hierte Höheninformationen gegenüber Drohnen Daten zu bevorzugen.

Weiterhin wurde analysiert, inwieweit die einzelnen Randpixel für die unterschiedlichen Datenquellen gleichermaßen den gesetzlich vorgegebenen Grenzwert von 2 % überschreiten und somit in diesen Feldbereichen ein Randstreifen erforderlich ist. Für nahezu alle Flächen zeigte sich mit über 95 % für DGM10 vs. DGM1 und mit 98 % für DGM5 vs. DGM1 eine sehr hohe Übereinstimmung. Ausnahmen bildeten lediglich, wie bei der kernel-basierten Berechnung, sehr schmale, spitz zulaufende Feldbereiche sowie Felder in direkter Nachbarschaft zu Steilhängen. Weiterhin haben die Analysen gezeigt, dass auf Grundlage des kernel-basierten Verfahrens deutlich mehr Feldrandbereiche als auflagenrelevant eingestuft werden. Ein Hauptgrund hierfür ist darin zu sehen, dass bei einer kernel-basierten Berechnung die Topographie nicht berücksichtigt wird. Für Feldbereiche mit Abfluss ins Feldinnere und deren Hangneigung den gesetzlich vorgegebenen Schwellwert, z. B. 2 %, überschreitet, wären demnach die Hangauflagen einzuhalten. Dies ist bei der Randpixelmethode nicht der Fall.

Diskussion

Im Folgenden soll das Potential der vorgestellten Verfahren zur Einhaltung von Hangneigungsaufgaben im Pflanzenschutz kurz diskutiert werden. Besonderer Wert soll dabei u. a. darauf gelegt werden, dass eine teilschlagspezifische Beurteilung von Risikozonen möglich ist. Die Einschätzung der Hangneigung eines Feldes auf Grundlage von Rasterdaten erfolgt heutzutage noch oft über die Berechnung des Flächenmittelwertes. Eine einfache Mittelwertbildung ist dahingehend als kritisch zu betrachten, da sie keine Beurteilung von Teilflächen oder Risikozonen zulässt und zudem immer die Gefahr besteht, dass durch die Mittelwertbildung, insbesondere bei topographisch heterogenen Schlägen, das tatsächliche Abflussrisiko unter- oder überschätzt wird.

Eine gängige Methode zur Bestimmung der Hangneigung sind kernel-basierte Verfahren. Diese geben allerdings keine Auskunft darüber, ob der Oberflächenabfluss in Richtung des Gewässers erfolgen kann (Topographie wird nicht berücksichtigt). Weiterhin haben die Analysen gezeigt, dass diese Algorithmen zur Anwendung auf DGM-Daten aus unterschiedlichen Quellen und mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung nur bedingt geeignet sind. Diese Skalenabhängigkeit kann auch nicht durch gängige Verfahren zur Aufbereitung der DGM-Daten, wie eine Filterung im Vorfeld der Hangneigungsrechnung, vollständig behoben werden.

Mit der Randpixelmethode konnte ein Verfahren entwickelt werden, das den unter den Methoden beschriebenen Anforderungen zur Einbindung in den PAM-Service entspricht und sich, wie oben dargestellt, als robust gegenüber der räumlichen Auflösung der Inputdaten erwiesen hat. Das Verfahren nutzt zur Berechnung der Hangneigung einfache trigonometrische Beziehungen. Dieser sehr simple Ansatz wird u. a. auch im Zuge der vorgeschlagenen Hangneigungsermittlung mit dem BayernAtlas angewandt und ist in der landwirtschaftlichen Praxis eine Option zur Vor-Ort-Vermessung der Hangneigung, die teilweise auch durch zertifizierte Vermessungsbüros, die mit der Ermittlung der schlagspezifischen Hangneigung beauftragt werden, vorgeschlagen und angewandt wird. Die Rechenzeit ist sehr gering, so dass das Verfahren problemlos in einen Web-Service eingebunden und die Ermittlung der Hangneigung on-the-fly erfolgen kann. Ein weiterer großer Vorteil des Verfahrens liegt in der leichten Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse im Gelände, was in Hinblick auf eine Akzeptanz des vorgeschlagenen Verfahrens durch Landwirte, aber auch durch Kontrollbehörden von besonderer Bedeutung ist. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass neben der Hangneigung des Randpixels weitere Parameter ausgegeben werden, wie z. B. Lage und Wert des Maximums innerhalb des betrachteten 100-m-Radius oder eine Visualisierung der Lage der Pixel, die in die Hangneigungsrechnung für die einzelnen Randpixel eingegangen sind (Abb. 7).

Eine Unterschätzung der abflussrelevanten Feldrandbereiche kann durch das Verfahren ausgeschlossen werden. In der Prozesskette werden bei der Berechnung der Hangneigung für jeden Punkt entlang der Feldgrenze

alle möglichen Kombinationen/DGM-Werte zwischen dem betrachteten Randpixel und den Pixeln im Umkreis von 20 bis 100 m berücksichtigt. Die Berechnung der Hangneigung erfolgt dabei über die Entfernung der beiden betrachteten Geländepunkte sowie deren Höhenunterschied. Unter realen Bedingungen verlaufen die Abflusspfade nicht exakt entlang dieser linearen Verbindung zwischen zwei Punkten, d. h. die Entfernung wird unterschätzt und die Hangneigung folglich überschätzt.

Ein Nachteil der aktuellen Verfahrensweise ist darin zu sehen, dass es prinzipiell zu einer Überschätzung der auflagenrelevanten Flächen kommen kann. Beispielsweise werden gegenwärtig ausgeprägte Senken und Rinnen innerhalb des betrachteten 100-m-Radius nicht gesondert berücksichtigt, was aber in Zukunft angestrebt wird.

Prinzipiell wird die Nutzung eines hochauflösenden DGMs mit 1 m Auflösung empfohlen. Insbesondere für sehr schmale, spitz zulaufende Feldrandbereiche sowie an Gräben bzw. Hänge angrenzende Schläge, ist beim Einsatz von grob aufgelösten DGM-Daten mit Fehleinschätzungen zu rechnen. Für die Umsetzung von Hangauflagen im Pflanzenschutz ist weiterhin insbesondere die Hangneigung in einer Entfernung von bis zu 100 m zur Böschungsoberkante relevant. Eine kleinräumige Betrachtung ist somit erforderlich. Zusätzlich variiert die Geländehöhe im Bereich der Böschung/der Böschungsoberkante oft auf kleinsten Raum sehr stark. Diese Reliefunterschiede werden in den gröber aufgelösten DGM-Daten nicht abgebildet, d. h. die anhand der DGM-Daten extrahierte Geländehöhen der Böschungsoberkante repräsentieren häufig nicht die realen Bedingungen. Abbildung 8 zeigt exemplarisch einen der PAM3D Testschläge. Zwischen der Böschungsoberkante und dem Feldrand fällt das Gelände in Schlagrichtung hin ab (siehe Profile Abb. 8), was insbesondere anhand der DGM1 Daten ersichtlich ist. Momentan sind diese für die Bundesländer Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Hamburg, Berlin, Brandenburg, Sachsen (Sachsen-Anhalt: 2m-Daten) frei verfügbar. Für eine deutschlandweite automatisierte Abfrage von Hangneigungsauflagen ist daher eine konsequente Umsetzung der Open-Data-Regelung dringend erforderlich. Wollen Nutzer mit Schlägen in anderen Bundesländern den Dienst nutzen, müssen die amtlichen DGM1-Daten zunächst durch den Nutzer erworben und hochgeladen werden. Die Untersuchungen haben

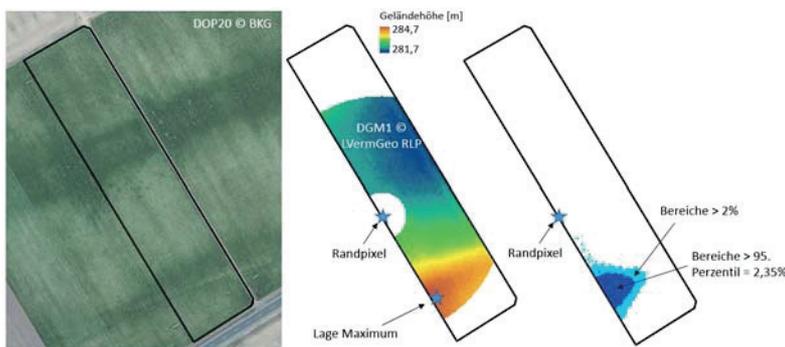


Abb. 7. Zusätzliche Ausgabeoptionen der Randpixelmethode zur einfacheren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse im Gelände (eigene Darstellung).

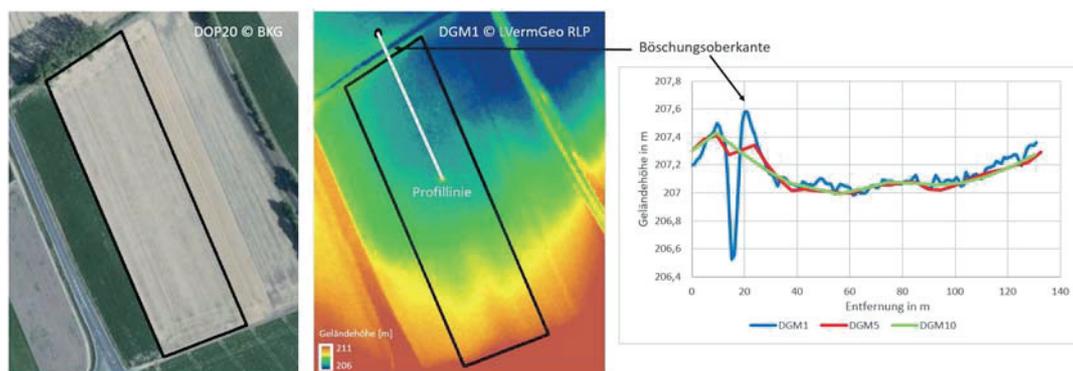


Abb. 8. Darstellung der Böschungsoberkante in DGM-Daten mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung.

gezeigt, dass die DGM5-Daten eine gute Alternative zu den DGM1-Daten bieten (ausgenommen komplexe Feldgeometrien). Das DGM5 entspricht aktuell den digitalen Höheninformationen mit der höchsten räumlichen Auflösung, die bundesweit als einheitlicher, konsistenter Datensatz zur Verfügung stehen.

In Hinblick auf die Verwendung privater Höhendaten hat sich gezeigt, dass das Verfahren auf die aus den Traktor GNSS-RTK-Daten extrahierten Höheninformationen übertragen werden kann. Bei der Verwendung von aus Drohnendaten mittels photogrammetrischen Verfahren generierten DHM-Daten ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um DOM-Daten handelt, die Werte also die Geländeoberfläche inklusive Vegetation darstellen. Die Datenakquisition sollte folglich zu Zeitpunkten ohne Vegetationsbedeckung erfolgen. Fehler bei der Verwendung von Drohnendaten können zudem durch Vegetationsinseln oder Feldrandvegetation, z. B. Bäume und Hecken entstehen, wenn deren Kronen in das Feld hineinragen. Die Verwendung dieser Daten ist nur bedingt zu empfehlen ist. Kostenlose, frei verfügbare, satellitenbasierte Höhendaten, bei denen es sich ebenfalls um DOM-Daten handelt, sind aufgrund ihrer deutlich geringeren Auflösung und Genauigkeit für die Umsetzung von Hangaufgaben im Pflanzenschutz ungeeignet (ESTEL et al., 2020b).

Fazit und Ausblick

Mit der Randpixelmethode wurde ein neuartiges Verfahren zur Umsetzung von Hangaufgaben im Pflanzenschutz entwickelt, das im Gegensatz zu einer visuellen Schätzung oder der Angabe eines pauschalen Feldmittelwertes eine objektive und teilflächenspezifische Beurteilung der Hangneigung entlang der Feldrandkante erlaubt. Der vorgestellte Algorithmus kann auf Höhendaten aus unterschiedlichen Quellen und unterschiedlichen räumlichen Auflösungen angewandt werden. Die Ergebnisse können durch den Anwender im Gelände leicht nachvollzogen werden und erlauben somit problemlos auch für Grenzfälle nahe dem gesetzlich vorgegebenen Schwellwert von 2 % eine Vor-Ort-Überprüfung.

Die Randpixelmethode wurde in den PAM3D-Web-Service implementiert, der momentan als funktioneller Prototyp existiert, und soll in einem Folgeprojekt weiterentwickelt und 2021/2022 in den Markt eingeführt werden. Die Berechnung der Hangneigung mit Hilfe der Feldrandpixelmethode ist ein zentrales Element des Service und bildet mit einer Reihe weiterer Hintergrunddienste ein internetbasiertes Entscheidungshilfesystem, das konform zu den Abstands- und Hangneigungsaufgaben Randstreifen berechnet, in denen Pflanzenschutzmittel zum Schutz von Gewässern, Siedlungen und Saumstrukturen nicht ausgebracht werden dürfen. Der PAM-Service für die Abstandsauflagen (ohne Hangneigungsaufgaben) ist bereits jetzt kommerziell verfügbar und kann in gängige Ackerschlagkarteien integriert werden (Kontakt: office@isip.de).

Weiterhin wird über das Web-Portal des JKIs in naher Zukunft ein Service zur Verfügung stehen, der deutschlandweit auf Grundlage des amtlichen 5-m-DGMs des BKGs die Berechnung der Hangneigung nach dem hier vorgestellten Verfahren für eine beliebige Eingangsfläche (z. B. Feld, Schlag, Flurstück) erlaubt. Für Bundesländer, in denen die Open-Data Strategie bereits umgesetzt ist und die amtlichen DGM1-Daten frei verfügbar sind, können alternativ diese höher aufgelösten Höheninformationen genutzt werden.

Zukünftig ist eine Optimierung und Weiterentwicklung des vorgestellten Ansatzes in weiteren Forschungsvorhaben vorgesehen. In diesem Zusammenhang sowie zur Validierung und Förderung der Akzeptanz des Verfahrens sind umfangreiche Praxistests sowie die Einbindung von Prüf- und Pflanzenschutzdiensten etc. vorgesehen. Letztendlich wird die Integration des PAM-Dienstes in weitere existierende Entscheidungshilfesysteme angestrebt, wodurch eine weite Verbreitung der Methodik bzw. ein schneller Wissenstransfer in die landwirtschaftlichen Betriebe erreicht werden kann. Zudem ist eine Erweiterung des PAM-Dienstes um die Abstands- und Hangaufgaben der Düngerverordnung und des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG § 38) geplant, wodurch aus dem Pflanzenschutz-Anwendungsmanager der Produktionsmittel-Anwendungsmanager werden wird.

Danksagung

Die Förderung des PAM3D Projektes erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgte über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung (FKZ: 2814905315).

Interessenkonflikte

Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte vorliegen.

Literatur

- ARBEITSGEMEINSCHAFT PFLANZENSCHUTZMITTELKONTROLLE AP PMK, 2014: Handbuch Pflanzenschutz-Kontrollprogramm. Bund-Länder-Programm zur Überwachung des Inverkehrbringens und der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln nach dem Pflanzenschutzgesetz. Access: 09. Februar 2021, URL: https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/06_Pflanzenschutzkontrollprogramm/psm_Pflanzenschutzkontrollprogramm_node.html.
- AELF AMT FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN ÜFFENHEIM, 2021: Mit dem BayernAtlas Hangneigung selbst ermitteln. Access: 09. Februar 2021, URL: <https://www.aelf-uf.bayern.de/landwirtschaft/pflanzenbau/186568/index.php>.
- BVL BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT, 2021: Kodeliste für Kennzeichnungen und sonstige Auflagen zugelassener Pflanzenschutzmittel. Access: 08. Februar 2021, URL: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/PSM_Kodeliste.html.
- CHOW, T.E., M.E. HODGSON, 2009: Effects of lidar post-spacing and DEM resolution to mean slope estimation. *International Journal of Geographical Information Science* **23** (10), 1277-1295 DOI: 10.1080/13658810802344127.
- DIENSTLEISTUNGSZENTREN LÄNDLICHER RAUM IN RHEINLAND-PFALZ, 2021: Geobox-Viewer. Access: 08. Februar 2021, URL: <https://www.geobox-i.de/GBV-RLP-Pflanzenbau/>.
- ESTEL, S., K. ALBRECHT, C. BARTOLEIN, C. FEDERLE, B. GOLLA, B. KLEINHEINZ, et al., 2020a: Hangneigungen digital ermitteln. *Landwirtschaftliche Zeitschrift Rheinland LZ* **21**, 22.05.2020, 37-39.
- ESTEL, S., K. ALBRECHT, C. BARTOLEIN, C. FEDERLE, B. GOLLA, B. KLEINHEINZ, D. MARTINI, et al., 2020b: Abstände bei Schrägen. *agrarheute* **2020/9**, 106-111.
- GRIEVE, S.W.D., S.M. MUDD, D.T. MILODOWSKI, F.J. CLUBB, D.J. FURBISH, 2016: How does grid-resolution modulate the topographic expression of geomorphic processes? *Earth Surface Dynamics Discussions* **4**, 627-653, DOI: 10.5194/esurf-4-627-2016.
- GROHMANN, C.H., 2015: Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Computers & Geosciences* **77** (4), 111-117, DOI: 10.1016/j.cageo.2015.02.003.
- HLNUG HESSISCHE LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE, 2021: S-Faktor. Access: 08. Februar 2021, URL: <https://www.hlnug.de/themen/boden/auswertung/bodenerosionsbewertung/bodenerosionsatlas/s-faktor>.
- HORN, B., 1981: Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* **69**, 14-47 DOI: 10.1109/PROC.1981.11918.
- LfL Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2021: Anwendungsbestimmungen gegen Abschwemmung (Hangauflagen). Access: 08. Februar 2021, URL: <https://www.lfl.bayern.de/ips/recht/102762/index.php>.
- LOP LANDWIRTSCHAFT OHNE PFLUG, 2017: Abstandsaufgaben automatisiert einhalten. *Fachmagazin für den professionellen Pflanzenbau*. Access: 08. Februar 2021, URL: <https://www.pfluglos.de/nachrichten/abstandsaufgaben-automatisiert-einhalten>.
- MOANTĂ, A.M., O. ROSTANIN, T. RIEDEL, S. ESTEL, C. FEDERLE, C. BARTOLEIN, 2020: Digital Terrain Models Generation based on GNSS-Acquired Data. In: *Commercial Vehicle Technology 2020/2021, Proceedings of the 6th Commercial Vehicle Technology Symposium*. BERNIS, K., K. DRESSLER, R. KALMAR, N. STEPHAN, R. TEUTSCH, M. THUL (Eds.), Wiesbaden, Deutschland, Springer Fachmedien, p. 27-38.
- PFEIL, W., 2018: Pflanzenschutzmittelwirkstoffe im Gewässer gefunden – Wo muss besonders aufgepasst werden? *Bauernblatt* 2018 (März), 36-39.
- SCHIEBER, M., C. FEDERLE, J. FELDHAUS, B. GOLLA, B. HARTMANN, B. KLEINHEINZ, D. MARTINI, M. RÖHRIG, 2016: Pflanzenschutz-Anwendungs-Manager (PAM): Automatisierte Berücksichtigung von Abstandsaufgaben. *Praktische Vorführung und Testergebnisse*. In: *Intelligente Systeme Stand der Technik und neue Möglichkeiten, Lecture Notes in Informatics (LNI)*. RUCKELSHAUSEN, A. et al., (Eds.), Bonn, Deutschland, Gesellschaft für Informatik, p. 15-18.
- SHI, X., 2017: ArcSIE. Access: 08. Februar 2021, URL: <http://www.arcsie.com/index.htm>.
- TARBOTON, D.G., 1997: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* **33** (2), 309-319, DOI: 10.1029/96WR03137.
- VAZE, J., J. TENG, G. SPENCER, 2010: Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, **25** (10), 1086-1098, DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.03.014.
- WARREN, S.D., M.G. HOHMANN, K. AUERSWALD, H. MITASOVA, 2004: An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. *Catena* **58**, 215-233, DOI: 10.1016/j.catena.2004.05.001.
- XARVIO DIGITAL FARMING SOLUTIONS, 2021: HEALTHY FIELDS Digital unterstützter Pflanzenschutz für Deine Felder – von der Entscheidung bis zur Umsetzung. Access: 08. Februar 2021, URL: <https://www.xarvio.com/de/de/products/healthy-fields.html>.
- ZHOU, Q., 2017: Digital elevation model and digital surface model. In (Richardson, D. et al., Hrsg.): *The International Encyclopedia of Geography*, John Wiley & Sons, DOI: 10.1002/9781118786352.wbieg0768.

© Der Autor/Die Autorin 2021.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2021.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).