

Entwicklung eines Werkzeugs zur landesweit flächendeckenden Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen in Bayern

Thomas Machl, Wolfgang Ewald, Andreas Donaubauer und Thomas H. Kolbe

Zusammenfassung

Galt die Landwirtschaft bereits seit jeher als »Transportgewerbe wider Willen« so haben strukturelle Veränderungsprozesse in den vergangenen Jahrzehnten zu einer klaren Intensivierung des landwirtschaftlichen Transportgeschehens beigetragen. Trotz der großen Relevanz des Themas »landwirtschaftliche Transporte« fehlten – abgesehen von lokalen Erhebungen oder Expertenmeinungen – bislang detaillierte flächendeckende Informationen zu regionalen Hof-Feld-Transportentfernungen in der Landwirtschaft sowie zur Erschließung landwirtschaftlicher Parzellen durch das bestehende Wegenetz. Dieser Beitrag beschreibt ein Werkzeug und Konzepte zur performanten und insbesondere landesweit flächendeckenden und genauen Abschätzung und Analyse aller landwirtschaftlichen Hof-Feld-Transportprozesse. Für die Analysen werden dabei sowohl landesweit verfügbare Geodaten der Landwirtschaftsverwaltung als auch amtliche Geobasisdaten zusammengeführt. Neben der Verarbeitung enormer Datenmengen bestand eine wesentliche Herausforderung insbesondere in der Harmonisierung und Integration heterogener Geodaten verschiedener Quellen in einem gemeinsamen semantischen Datenmodell.

Summary

Although agriculture has always been considered as a »transportation industry against its will« during the last decades structural changes in agriculture intensified agricultural transportation processes. Despite the importance of the sub-

ject »transportation in agriculture« – apart from local surveys and expert's opinion – detailed, reliable, and comprehensive information about local transportation distances or the quantity of area that can be accessed by a single road segment is missing. This paper presents a tool and concepts for a high-performant, detailed and especially comprehensive assessment and analysis of all agricultural farm-field transportation processes. Analyses are both based on nationwide available geospatial data from the Agricultural Administration as well as geospatial data from the ordnance survey. Apart from processing large amounts of data major challenges were the harmonization and integration of heterogenous geospatial data from different sources in one single comprehensive semantic data model.

Schlüsselwörter: Kernwegenetz, Erschließungsfläche, Transportentfernung, Monitoring, semantische Datenmodellierung

1 Wege für die Zukunft – Anforderungen an das landwirtschaftliche Wegenetz in Bayern damals, heute und morgen

Der landwirtschaftliche Strukturwandel der vergangenen Jahrzehnte hat hauptsächlich im früheren Bundesgebiet zu einer deutlichen Veränderung bzw. insbesondere zu einer Intensivierung landwirtschaftlicher Transportpro-

zesse beigetragen. Als treibende Kräfte seien neben veränderten Betriebsgrößen- und Flächenstrukturen einhergehend mit steigenden bzw. anhaltend hohen Pachtquoten (StMELF 2014) insbesondere auch veränderte Güter- bzw. Massenströme bedingt durch die Ausweitung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe angeführt. Pachtflächen liegen nicht selten verstreut und sind immer häufiger weit von der Hofstelle entfernt (vgl. Süß 2014) – überregionale



Bildquelle: Privatarchiv, Fotograf: S. Martin, 2009

Abb. 1:
60 Jahre Entwicklung in der Landtechnik – Leistungsfähigkeit, Abmessungen und Gewichte landwirtschaftlicher Fahrzeuge haben sich in dieser Zeit vervielfacht.

d.h. gemarkungs- und gemeindeübergreifende Transportbeziehungen gewinnen damit zunehmend an Bedeutung (vgl. Bromma 2014, Sobot 2012).

Gleichzeitig haben sich mit dem Einsatz immer leistungsfähigerer und schlagkräftigerer Landtechnik in den vergangenen Jahrzehnten auch die Ansprüche an das Wegenetz deutlich gewandelt (s. Abb. 1). Die zunehmende Verbreitung von LKW als Zubring- oder Abfuhrfahrzeuge (vgl. Kröhl 2012), die deutliche Verschiebung der Dimensionen hin zu immer größeren und insbesondere breiteren Fahrzeugen, steigende Transportgeschwindigkeiten von bis zu 60 km/h und Fahrzeuggespanne mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t seien an dieser Stelle beispielhaft angeführt (vgl. BBV-LandSiedlung 2014). Immer häufiger stoßen landwirtschaftliche Fahrzeuge heute bereits hinsichtlich ihrer Abmessungen, Achslasten und Fahrzeuggesamtmassen an die von der StVO bzw. StVZO gesetzten Grenzen. Vielfach ist das bestehende Wegenetz bereits nicht mehr in der Lage, den veränderten Anforderungen gerecht zu werden (vgl. BLW 2014a und 2014b, Moninger 2014, BBV-LandSiedlung 2014). Verbrauchte Wege sowie Straßen- und Brückenschäden sind die Folge.

Ziel des Ländlichen Wegebaus ist daher neben der Ertüchtigung des bestehenden Wegenetzes insbesondere auch der bedarfsgerechte Aus- und Aufbau eines überregionalen und multifunktionalen Kernwegenetzes. In zahlreichen Bundesländern werden vor diesem Hintergrund derzeit Konzepte zur Schaffung zukunftsorientierter, leistungsfähiger und gleichzeitig umweltverträglicher Wegenetze entwickelt (statt vieler DLKG 2010, 2012). Zukunftsfähig ausgebauten Hauptwirtschaftswege sollten heute eine Fahrbahnbreite von mindestens 3,5 m aufweisen und für Geschwindigkeiten von bis zu 50 km/h sowie auf eine Tragfähigkeit bis zu 40 t bzw. für Achs-

lasten von 11,5 t ausgelegt sein. Ein so ausgestaltetes Hauptwirtschaftswegenetz fehlt in vielen Teilen Bayerns. Hinzu kommen neue Anforderungen aus dem Bereich der interkommunalen Gemeindeentwicklung zur Funktion ländlicher Wege (z.B. aus dem Bereich Tourismus und Mobilität). Der bundesweit bestehende Investitionsstau im Bereich des ländlichen Wegenetzes war eine wesentliche Erkenntnis der gemeinsamen Wegebautagung 2013 des Deutschen Bauernverbandes (DBV), der ArgeLänderdwicklung und der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) im Bundesverkehrsministerium (DBV 2013).

Das Wirtschaftswegenetz in Bayern umfasst derzeit rund 200.000 km Feldwege sowie 110.000 km Waldwege und stellt einen enormen volkswirtschaftlichen Wert dar. Allein in den vergangenen 60 Jahren wurden etwa 120.000 km Feldwege (dies entspricht rund 60 % aller Feldwege) in der Flurneuordnung geschaffen – darunter rund 84.000 km befestigte Wege. Für eine komplette Neuanlage müssten nach heutigen Preisen allein in der Flur wohl ca. 17 Mrd. Euro aufgewendet werden. Ein fachgerechter Erhalt des Wegenetzes erfordert jährliche Kosten von etwa 300 Mio. Euro. Der Erhalt ist in Bayern in Art. 54 BayStrWG geregelt und wird auch künftig im Rahmen von (nicht förderfähigen) Unterhaltungsmaßnahmen erfolgen müssen. Damit sind jedoch in der Regel nicht die oft dringend notwendigen strukturellen Verbesserungen verbunden. Um bei der Erneuerung des Wegenetzes schneller voranzukommen, müssen daher Schwerpunkte gebildet und neue Herangehensweisen gefunden werden.

Diese Herausforderungen waren 2014 Anlass zum Start der »Initiative Ländliche Kernwegenetze« (Brunner 2014). Mit dieser Initiative setzt die Bayerische Verwaltung für Ländliche Entwicklung einen neuen Schwerpunkt auf die Verbesserung der Agrarinfrastruktur. Bei der Schaffung von Kernwegenetzen geht es um eine gemeindeübergreifende und multifunktional angelegte Ertüchtigung des Hauptwirtschaftswegenetzes. Fachliche Grundlage dafür sind die derzeit noch in Überarbeitung befindlichen Richtlinien für den Ländlichen Wegebau (RLW), deren baldiges Inkrafttreten von den Landentwicklungsverwaltungen der Länder dringend erwartet wird. Das neue Wegenetz wird weitmaschiger und mit höherer Ausbauqualität konzipiert. Zur Unterstützung einer ganzheitlichen Gemeindeentwicklung wird das neue Wegenetz zudem in eine interkommunale Gesamtplanung eingebunden. Die Konzepterstellung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Gemeinden und Landwirten. Angesichts der nur begrenzten Ressourcen ist eine klare Setzung von inhaltlichen und zeitlichen Prioritäten erforderlich. Eine wesentliche Voraussetzung für die Planung und Priorisierung des landwirtschaftlichen Wegeausbaus sind detaillierte Informationen zu bestehenden Hof-Feld-Transportentfernungen, zur Erschließungsfläche einzelner Segmente sowie zum überregionalen Transitverkehr. In einem einzelnen Flurneuordnungsverfahren fehlen diese Informationen

zumeist – die Erhebung dieser relevanten Informationen ist mit enormem Aufwand verbunden.

2 Transportentfernungen und Erschließungsfläche in der Landwirtschaft

Eine entscheidende Rolle im landwirtschaftlichen Transportgeschehen spielen insbesondere Fahrten zwischen Hofstelle und zugehörigen Parzellen. Exemplarisch seien die Anfahrt für die Bearbeitung landwirtschaftlicher Parzellen, das Ausbringen von Wirtschaftsdüngern oder die Abfuhr von Erntegütern genannt. Angaben zu regional vorherrschenden Transportentfernungen Hof-Feld stützen sich jedoch fast ausschließlich auf Befragungen (vgl. u.a. Bernhardt 2002) oder Annahmen. In der Literatur finden sich bezüglich Hof-Feld-Entferungen unterschiedliche und meist stark einzelfallbezogene Angaben: Bernhardt et al. (2005) bzw. Reckleben et al. (2013) geben für den bundesdeutschen Durchschnitt der Hof-Feld-Entfernung 3,9 km bzw. 4,0 km an. Für Biogasanlagen bewegen sich die Angaben bzw. Annahmen zur mittleren Transportentfernung in einem Bereich von 2 km (für Bayern, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2008) bis 7,5 km (KTBL 2013).

Neben belastbaren Informationen zu regional üblichen Transportentfernungen fehlen bislang auch flächendeckende Angaben zu landwirtschaftlichen Transportflüssen auf einzelnen Wegen bzw. Wegabschnitten. Beides sind jedoch wesentliche Grundlagen für die Entwicklung regionaler Wegebaukonzepte. Im Zuge der Entwicklung von Konzepten für den ländlichen Wegebau wird meist versucht, diese Informationen durch eine teils sehr aufwändige Befragung der Landwirte innerhalb des Projektgebiets zu generieren. Die mittels Befragung ermittelten Informationen sind jedoch nicht immer lückenlos und vollständig objektiv, zudem bleibt auch der überregionale landwirtschaftliche Transitverkehr außer Betracht. Vor diesem Hintergrund entwickelten Bertling et al. (2015) einen Ansatz zur Abschätzung landwirtschaftlicher Verkehrsflüsse auf Basis der Lagebeziehung von landwirtschaftlichen Betrieben und zugehörigen Feldblöcken. Obwohl das Untersuchungsgebiet in Sachsen-Anhalt nur wenige tausend Hektar umfasst, ist die Abschätzung der Verkehrsflüsse mit einem enormen Arbeitsaufwand von rund sechs Mann-Wochen verbunden.

3 Zielstellung: Landesweit flächendeckendes Monitoring bei hoher Detailschärfe auf Einzelobjektebene

Im Auftrag der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung beschäftigt sich derzeit im Zusammenhang mit der Initiative »Ländliche Kernwegenetze« ein Teilpro-

jekt des Forschungsprojekts »LandModell« (s. Kap. 4) am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München (TUM) mit der Entwicklung von Methoden zur flächendeckenden Analyse der Transportentfernungen in der Landwirtschaft sowie der Erschließung landwirtschaftlicher Parzellen durch das bestehende Wegenetz. Das entwickelte Werkzeug soll in der Lage sein, mit hoher Performanz und Genauigkeit landesweit flächendeckend sowie vollständig automatisiert alle Hof-Feld-Pfade zu berechnen. Die Berechnungen sollen dabei auf Grundlage landesweit verfügbarer Geodaten erfolgen. Im Sinne eines mehrskaligen Monitorings sollen die Ergebnisse des Analysewerkzeugs Aufschlüsse zu regionalen Transportentfernungen geben und regionale Unterschiede aufzeigen. Gleichzeitig sollen die Ergebnisse mit hoher Detailschärfe Auskunft auf der Ebene von Einzelobjekten geben. Beispielaufgaben an dieser Stelle die Länge und Zusammensetzung eines einzelnen Hof-Feld-Pfades für eine landwirtschaftliche Parzelle oder die Summe der durch ein einzelnes Wegsegment erschlossenen landwirtschaftlichen Nutzfläche angeführt. Mögliche Fragestellungen in diesem Kontext sind:

- Welche landwirtschaftlichen Parzellen sind nicht oder nur unzureichend durch das bestehende Wegenetz erschlossen?
- Können durch Flächentausch bessere Bedingungen für mehrere Betriebe erreicht werden?
- Wo gibt es Schwachstellen im bestehenden Wegenetz, die mehrere Betriebe oder ein großes Einzugsgebiet betreffen?
- Wie kann der Ausbau bzw. die Ertüchtigung des bestehenden Wegenetzes priorisiert werden?
- Wie groß sind regionale Hof-Feld-Entferungen?
- Welche landwirtschaftlichen Parzellen sind nicht per LKW erreichbar, da sie von teils unbefestigten Wegen erschlossen sind?
- Wie groß ist die Belastung einzelner Wegabschnitte durch landwirtschaftlichen Transportverkehr?

Neben der Bereitstellung von Information für Monitoring- und Planungszwecke soll das entwickelte Werkzeug auch zur objektiven Evaluierung durchgeföhrter oder in Planung befindlicher Wegebaumaßnahmen bzw. -konzepte einsetzbar sein. Als zentrale Fragestellungen sind hier anzuführen:

- Welche Effekte hatte der Flächentausch für die Transportentfernung der Betriebe innerhalb einer Region?
- Konnten durch den Bau neuer Wege die Transportentfernungen oder -zeiten reduziert werden?
- Welche Umwege entstehen durch den Bau neuer Trassen (z.B. Umgehungsstraßen, Autobahn- oder Bahntrassen)?

4 Hintergrund – Forschungslinie »4D LandModell«

Am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München (TUM) werden derzeit im Zuge des Forschungsprojekts »LandModell« Methoden und Konzepte zur flächendeckenden Erkennung, Dokumentation und Analyse raum-zeitlicher Veränderungsprozesse in der Agrarlandschaft auf Ebene einzelner Objekte entwickelt.

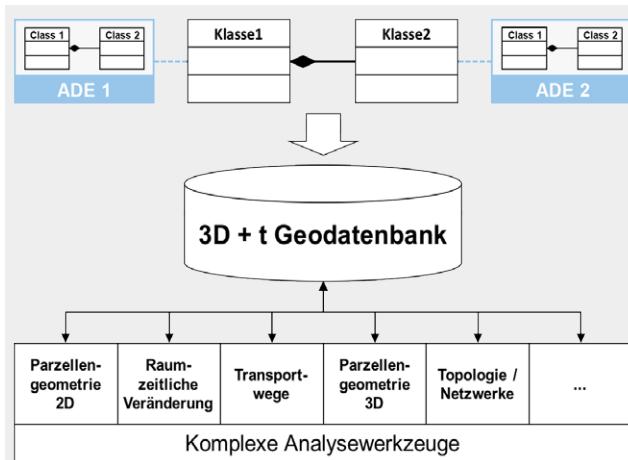


Abb. 2: Kopplung von semantischem Datenmodell und komplexen Analysewerkzeugen – das Datenmodell als interdisziplinäre Integrationsplattform

Wesentliches Rückgrat dieses Monitoring-Systems bildet ein objektorientiertes semantisches 3D + t Datenmodell zur Abbildung der Agrarlandschaft als komplexes System interagierender und sich verändernder Elemente und Subsysteme.

Um ein hohes Maß an Interoperabilität zwischen Analysewerkzeugen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen sowie Datenhaltungs-, Bereitstellungs- und Visualisierungskomponenten aus dem GIS-Bereich zu erlangen, wird das Datenmodell auf konzeptueller Ebene mit UML unter Berücksichtigung der ISO 19100 Normenserie beschrieben. Ein wesentlicher Grundgedanke bei der Konzeption des Monitoring-Systems besteht in der engen Kopplung des semantischen Datenmodells mit komplexen Analysewerkzeugen (vgl. Abb. 2). So wurden im Kontext des Forschungsprojekts bereits Werkzeuge und Konzepte für ein landesweit flächendeckendes Monitoring bestehender Parzellenformen (vgl. Machl et al. 2013) sowie für die Erkennung und Dokumentation raum-zeitlicher Veränderungen auf Basis von Einzelobjekten (vgl. Machl et al. 2015) entwickelt. Die im Zuge von Analyseprozessen gewonnenen Ergebnisse dienen zur semantischen Anreicherung des Datenmodells und fließen entsprechend zurück zu den betreffenden Objekten – das Datenmodell (mit entsprechender Implementierung) dient somit als Integrationsplattform verschiedener Fachdisziplinen. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Bereiche Landentwicklung, Agrarökonomie oder Agrarökologie angeführt.

5 Methoden zur Abschätzung und Speicherung landwirtschaftlicher Hof-Feld-Transportpfade

5.1 Werkzeug zur Abschätzung der Hof-Feld-Transportpfade

Wesentliche Datengrundlage zur Abschätzung der Hof-Feld-Transportpfade sind neben einem topologischen Netzwerk der Verkehrswägen (beispielsweise aus ATKIS) insbesondere Daten zur Lage der Hofstelle sowie den zugehörigen landwirtschaftlichen Parzellen. Als zentrale Annahmen zur Abschätzung der Hof-Feld-Pfade gelten dabei:

- Adresse des Betriebsinhabers entspricht der Lage der Hofstelle.
- Fahrweg Hof-Feld entspricht dem Pfad mit den geringsten Kosten.
- Start- bzw. Endsegment sind die dem Feldstück bzw. der Hofstelle nächstgelegenen Straßensegmente.

Den Kern des entwickelten Werkzeugs bildet der Kürzeste-Wege-Algorithmus nach Dijkstra (1959). Die Gesamtkosten des Pfades lassen sich sowohl hinsichtlich der Distanz als auch hinsichtlich der benötigten Fahrzeiten minimieren. Den einzelnen Kanten des Graphen (= Segmente des Wegenetzes) werden dazu Kosten zugeordnet. Das mit Hilfe der Software FME entwickelte Werkzeug erlaubt dabei eine durch den Nutzer definierte Gewichtung der Kanten entweder pauschal nach Wegekategorie (z.B. mögliche Fahrgeschwindigkeit auf einzelnen Wegetypen), Lage des Wegsegments (z.B. Meidung der Durchfahrung von Wohngebieten durch höhere Kantengewichte für Wege innerhalb dieser Gebiete) oder aber für Einzelsegmente (z.B. unendlich hohe Gewichte für nicht passierbare Unterführungen oder Brücken mit geringer Tragfähigkeit). Zudem ist es möglich, durch eine Verringerung der Kantengewichte gezielt einzelne Wege oder Wegekategorien – beispielsweise gut ausgebauten Hauptwirtschaftswege – bei der Pfadabschätzung zu bevorzugen.

Als Start- bzw. Endsegmente für die Abschätzung der Hof-Feld-Pfade dienen die n der landwirtschaftlichen Parzelle bzw. die m der Hofstelle nächstgelegenen Wegsegmente, welche sich innerhalb einer maximal zulässigen Entfernung d_h zur Hofstelle bzw. d_f zum Feldstück befinden. Die Parameter m , n , d_f und d_h sind vorab durch den Anwender festzulegen. Ausgehend von temporär auf Start- bzw. Endsegmenten eingefügten Ausgangs- bzw. Zielknoten erfolgt die Berechnung der Hof-Feld-Pfade unter Minimierung der entstehenden Gesamtkosten. Das Einfügen temporärer Start- und Endknoten verbessert insbesondere bei langen Straßensegmenten die Genauigkeit der Routenabschätzung. Der gewählte Ansatz unterscheidet sich damit auch vom gängigen Ansatz des Routings ausgehend ausschließlich von bereits existierenden Knoten des Wegenetzes.

5.2 Speicherung der Pfade über lineare Referenzierung und Verlinkung

Die Speicherung der Hof-Feld-Pfade erfolgt kleinteilig in Form linearer Referenzen auf Elemente des Wegenetzes – die errechneten Pfade setzen sich dadurch aus ihren Einzelbestandteilen zusammen. Die Abb. 3 veranschaulicht das Prinzip anhand eines Beispiels. Abzubilden ist die Route von Parzelle A1 zur Hofstelle A. Im Beispiel werden Positionen auf Segmenten relativ zum Startpunkt des Liniensegments angegeben.

Der Pfad beginnt bei der Parzelle A1 auf dem Straßensegment *h* an Position 0,8 und führt von dort zum Ende dieses Segments bei Position 1,0. Anschließend werden

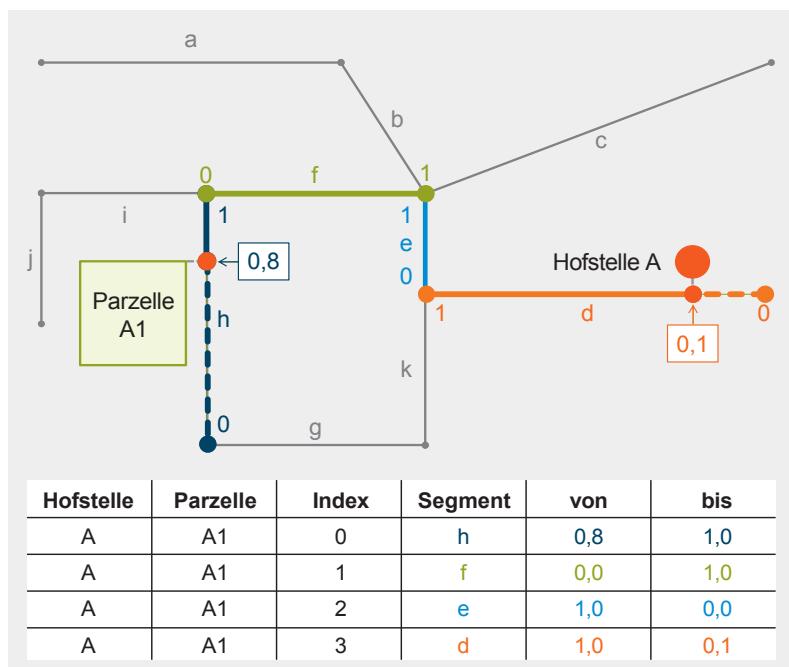


Abb. 3: Prinzip der linearen Referenzierung ermittelter Hof-Feld-Pfade. Abzubilden ist der Pfad von Parzelle A1 zur Hofstelle A.

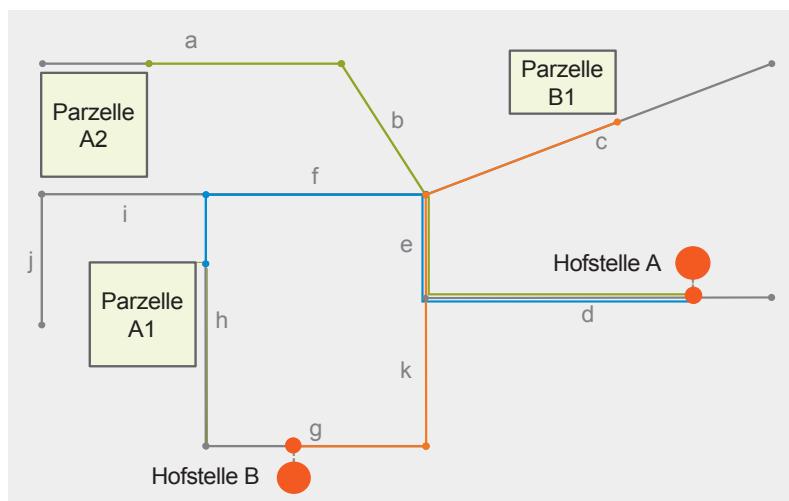


Abb. 4: Abschätzung der Erschließungsfläche bzw. der Wegebelastung durch landwirtschaftlichen Transportverkehr für einzelne Wegsegmente

die Segmente *f* und *e* vollständig in Zeichenrichtung (von Position 0,0 bis 1,0) bzw. entgegen der Zeichenrichtung (von Position 1,0 bis 0,0) befahren. Abschließend führt der Pfad über Segment *d* entgegen der Zeichenrichtung von Position 1,0 bis zur Position 0,1 und erreicht dort die Hofstelle A.

Die kleinteilige Speicherung der Pfade in Form von Referenzen auf die beteiligten Wegsegmente bietet gegenüber der expliziten Speicherung der Gesamttrouengeometrie eine Vielzahl an Vorteilen. So besteht beispielsweise für weiterführende Analysen uneingeschränkter Zugriff auf alle beteiligten Objekte sowie die vollständige Nutzbarkeit aller Attribute der beteiligten Objekte. Zudem ist es möglich, das komplexe Geflecht regionaler Fahrwegbeziehungen aufzulösen und auf Ebene einzelner Entitäten – beispielsweise auf Ebene einzelner Straßensegmente – zu betrachten. Die Abb. 4 soll dies anhand der Fahrwegbeziehungen zwischen drei Parzellen (A1, A2 und B1) und zwei Hofstellen (A und B) veranschaulichen. Im Beispiel ist ersichtlich, dass die Segmente *i* und *j* nicht an einer Erschließung der dargestellten landwirtschaftlichen Parzellen beteiligt sind. Über die Segmente *a*, *b*, *c*, *f*, *g*, *h* und *k* wird jeweils eine Parzelle erschlossen. Segment *d* trägt zur Erschließung zweier Parzellen (A1 und A2) ausschließlich für Betrieb A bei. Das Segment *e* ist für die Erschließung aller Parzellen (A1, A2 und B1) bedeutend – davon betroffen sind sowohl Betrieb A als auch Betrieb B.

6 Erste flächendeckende Analysen und Ergebnisse zu Hof-Feld-Transporten in Bayern

Mit Hilfe des oben beschriebenen Werkzeugs wurden landesweit flächendeckend die Hof-Feld-Transportpfade für alle landwirtschaftlichen Betriebe zu den jeweils zugehörigen Feldstücken in Bayern berechnet. In diesem Abschnitt werden zunächst die wesentlichen Datengrundlagen vorgestellt bevor beispielhaft für die Vielzahl möglicher Analysen einige Ergebnisse kurz beleuchtet werden.

6.1 Datengrundlage

Die Analyse der Transportwege stützt sich im Wesentlichen auf flächendeckend vorhandene Daten des Bayerischen Staats-

ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) sowie auf amtliche Geobasisdaten des Bayerischen Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV). Die Daten des BayStMELF entstammen dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsysteams (InVeKoS) – genauer dem Land Parcel Identification System (LPIS) – und umfassen neben Geodaten zu rund 1,8 Mio. landwirtschaftlichen Referenzparzellen (in Bayern: Feldstücke) mit einer Gesamtfläche von ca. 3,1 Mio. ha insbesondere auch anonymisierte Adressdaten der etwa 112.000 bewirtschaftenden Landwirte. Letztere werden auf Basis amtlicher Hauskoordinaten (HK) mit Hilfe eigens entwickelter Werkzeuge geokodiert. Bei den Analysen liegt großes Augenmerk auf einer vollständigen Wahrung des Datenschutzes – Angaben zur Lage einzelner Betriebe sowie einzelbetriebliche Untersuchungen sind nicht Bestandteil späterer Betrachtungen. Eine wesentliche Grundlage der Analysen sind zudem Daten zum bestehenden Wegenetz des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS). Das ATKIS-Wegenetz repräsentiert ein flächendeckend durchgängig topologisch verbundenes Netzwerk aus Knoten und Kanten und ist daher für eine Routenberechnung geeignet. Die Daten verfügen jedoch nicht über Angaben zu Zufahrtsbeschränkungen, Einbahnstraßen oder Abbiegevorschriften – diese Einschränkungen sind daher bei den Analysen nicht zu berücksichtigen. Der verwendete Datensatz zum bayerischen Verkehrsnetz umfasst rund 3,3 Mio. einzelne Wegsegmentobjekte.

6.2 Erste Ergebnisse für Bayern

Als Ausgangs- bzw. Endsegment für die Abschätzung des Hof-Feld-Transportpfades werden für die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse das einer Hofstelle ($m = 1$) bzw. das einer zugehörigen Parzelle nächstgelegene Wegsegment ($n = 1$) innerhalb einer maximalen Distanz von 100 m ($d_f = 100$ m, $d_h = 100$ m) angenommen. Die Zufahrt auf das Verkehrsnetz erfolgt damit über die kürzeste Verbindung zwischen Hofstelle bzw. Parzelle und dem jeweils nächstgelegenen Straßensegment. Im Einzelfall ergibt sich dadurch eine gewisse Unschärfe bezüglich der tatsächlichen Zufahrt auf Segmente des Verkehrsnetzes. Die Gewichtung der einzelnen Straßensegmente erfolgt in den gezeigten Beispielen zunächst ausschließlich über die Länge der einzelnen Segmente. Die ermittelten Pfade entsprechen damit den bezogen auf die Gesamtstrecke kürzesten Wegen zwischen den Hofstellen und den jeweils zugehörigen landwirtschaftlichen Parzellen. Nicht für den landwirtschaftlichen Verkehr geeignete Wegsegmente – beispielsweise Autobahnen oder Fußwege – werden mit extrem hohen Gewichten versehen und sind somit nicht Bestandteil der ermittelten Pfade.

Für die Analysen wurde ein Rechner mit Intel® Xeon® CPU E5-2660 v2 mit einer Grundtaktfrequenz von 2,2 GHz verwendet. Der Rechner verfügt über 10 Kerne,

20 Threads, 128 GB Arbeitsspeicher und SSD Festplatten. Als Betriebssystem ist Ubuntu Linux 14.04 LTS installiert, als Datenbankmanagementsystem wird PostgreSQL 9.4 mit der Erweiterung PostGIS 2.1.8 verwendet. Die bayernweite Berechnung der Pfade erfolgte in 16 parallelen Prozessen, die Rechenzeit betrug für die errechneten 1.779.637 Routen einschließlich des Einlesens der Ausgangsdaten, Schreibens der Ergebnisse sowie der datenbankseitigen Indexerzeugung weniger als 18 Stunden. Die bestimmten Pfade setzen sich aus insgesamt 43.876.848 Referenzen auf ATKIS-Straßensegmente zusammen. 417.912 der errechneten 1.779.637 Pfade in Bayern setzen sich aus Straßensegmenten zusammen, die sich geometrisch in verschiedenen Gemeinden befinden, damit also »gemeindeübergreifende Fahrwegbeziehungen« darstellen.

Exemplarisch für die Vielzahl möglicher Analysen sollen in diesem Abschnitt einige ausgewählte Ergebnisse herausgegriffen und kurz beleuchtet werden.

6.2.1 Abschätzung der Hof-Feld-Pfade für einzelne Parzellen

Bedingt durch die kleinteilige Speicherung der Ergebnisse in Form von Referenzen auf die beteiligten Objekte setzen sich die ermittelten Hof-Feld-Pfade aus einzelnen Wegsegmenten zusammen. Werden diese Wegsegmente nun durch Aggregation zu einer Route zusammengesetzt, lässt sich für jede landwirtschaftliche Parzelle beispielsweise die Geometrie, Länge und Zusammensetzung des Pfades analysieren. Die Abb. 5 verdeutlicht dies anhand einer zufällig ausgewählten landwirtschaftlichen Parzelle.

Die Angaben zur Zusammensetzung des Pfades entstehen durch Aggregation der relativen Längenanteile einzelner Wegekategorien (Kartensignaturbezeichnung aus ATKIS) am Gesamtpfad. Alternativ könnten beispielsweise auch die relativen Längenanteile unbefestigter oder schadhafter Abschnitte angegeben werden (sofern diese Information auf Ebene der Einzelsegmente verfügbar ist).



Abb. 5: Exemplarischer Hof-Feld-Pfad für ein Feldstück in Bayern; neben der Distanz können auch Angaben zu Längenanteilen einzelner Wegekategorien gemacht werden.

6.2.2 Abschätzung der Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente

Neben Informationen zu Geometrie, Länge und Zusammensetzung der einzelnen Hof-Feld-Pfade lassen sich durch Aggregation der feldstücksbezogenen Daten auf Ebene der Wegsegmente bayernweit Informationen zur



Abb. 6: Erschließungsfläche einzelner Segmente des bestehenden Wegenetzes (2014); die Linienstärke ist dabei proportional zur Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente.

Erschließungsfläche der einzelnen Wegabschnitte ableiten. Der überregionale – d.h. gemeinde- bzw. gemarkungsübergreifende – landwirtschaftliche (Transit-)Verkehr ist dabei ebenso in der Abschätzung berücksichtigt wie die über ein Segment in beiden Fahrtrichtungen erschlossene landwirtschaftliche Nutzfläche. Neben der Flächensumme erschlossener Parzellen lassen sich beispielsweise auch Angaben zu den erschlossenen Kulturen ableiten – eine wesentliche Grundlage für die Abschätzung der Masse an Erntegütern, die über Einzelsegmente fließen. Abb. 6 veranschaulicht dies anhand eines zufällig ausgewählten Wegsegments.

Die Angaben zum Wegetyp entstammen dabei der Kartensignaturbezeichnung aus ATKIS, die Angaben zu den landwirtschaftlichen Kulturen der erschlossenen Parzellen aus InVeKoS bzw. LPIS.

6.2.3 Hof-Feld-Entferungen in Bayern

Im Sinne eines flächendeckenden Monitorings lassen sich die Hof-Feld-Entferungen auf verschiedenen statistischen Aggregationseinheiten zusammengefasst betrachten. Die Abb. 7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Hof-Feld-Entfernung in Bayern für Acker- bzw. Grünlandflächen. Auf der x-Achse sind jeweils die Hof-Parzelle-Transport-Entfernungen angetragen, auf der y-Achse die kumulative Häufigkeit der berechneten Distanzen. Die Diagramme zeigen zusätzlich Quartile (Q25, Q50, Q75) und Mittelwert (MW) als relevante Lagemaße.

Neben bayernweiten Kennzahlen zu bestehenden Hof-Feld-Transportentfernungen lassen sich auf Grundlage

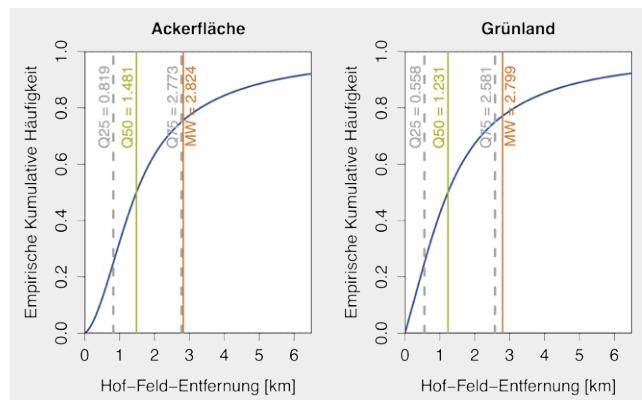


Abb. 7: Empirische Kumulative Häufigkeit der Hof-Feld-Entfernung aller Feldstücke in Bayern für Acker- und Grünlandflächen (2014)

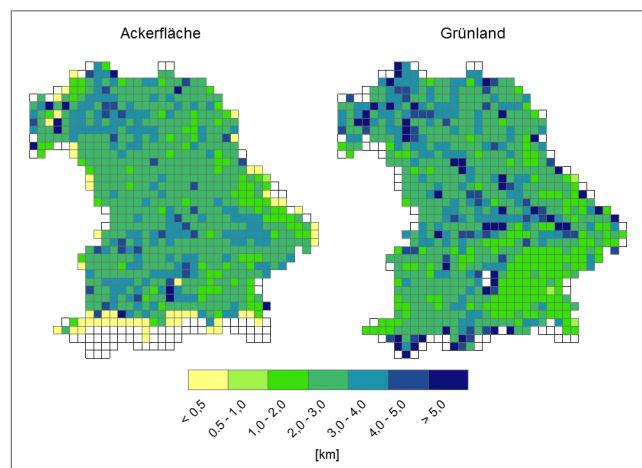


Abb. 8: 75 % Quantil der Hof-Feld-Entfernung in Bayern aggregiert nach Lage des Feldstücks auf 10 km × 10 km Raster für das Jahr 2014.

der Analyseergebnisse auch regionale Muster sichtbar machen. Abb. 8 zeigt dies beispielhaft anhand einer Karte des 75 % Quantils der errechneten Hof-Feld-Entferungen in Bayern aggregiert auf einem 10 km × 10 km Raster. In anderen Worten sind 75 % der Hof-Parzellen-Entfernungen innerhalb einer Rasterzelle kleiner als der dargestellte Wert. Die Zuordnung der Pfadlängen zu den einzelnen Rasterzellen erfolgt dabei über die Lage des Schwerpunkts der landwirtschaftlichen Parzelle. Rasterzellen, welche weniger als 30 Parzellen der Kategorie »Acker« bzw. »Grünland« enthalten, sind weiß dargestellt.

Bayernweit betrachtet sind nach den Berechnungen 75 % der Ackerflächen weniger als 2,8 km von der zugehörigen Hofstelle entfernt. Tendenziell größere Entferungen bestehen im Bereich der niederbayerischen und fränkischen Gäulagen sowie um größere Städte in Schwaben und Oberbayern. Eine deutliche Arrondierung von Ackerflächen um die zugehörige Hofstelle lässt sich insbesondere in den Grünlandregionen Nieder- und Oberbayerns sowie im Bereich des Voralpenraums beobachten.

Grünlandflächen tendieren bayernweit betrachtet etwas stärker zu einer Arrondierung der Flächen um zugehörige Hofstellen. So sind etwa dreiviertel der Grün-

landflächen Bayerns weniger als 2,6 km von der Hofstelle entfernt. Insbesondere in Grünlandregionen Ober- und Niederbayerns sowie der Oberpfalz und Teilen Schwabens lässt sich eine stärkere Arrondierung der Parzellen beobachten. Tendenziell größere Distanzen zwischen Grünlandparzellen und zugehörigen Hofstellen finden sich insbesondere im Alpen- und Voralpenraum, in großen Teilen Frankens, der südlichen Oberpfalz, nördlichen Oberbayern sowie dem westlichen Teil Niederbayerns.

7 Überlegungen zur Anwendung in der Landentwicklung aus Sicht der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung

Die »Initiative Ländliche Kernwegenetze« wird von den Gemeinden und Landwirten stark nachgefragt. Aufgrund des interkommunalen Bezugs der Initiative sind die Planungen derzeit im Wesentlichen auf die Gebiete der Integrierten Ländlichen Entwicklung (ILE) beschränkt, die in Bayern auf die Initiierung und Unterstützung der interkommunalen Zusammenarbeit ausgerichtet ist (Ewald 2013). Die Umsetzung der Planungen soll vorrangig in einfachen Flurneuordnungsverfahren erfolgen. In Bereichen, in denen keine Bodenordnung erforderlich ist, ist eine Wegebauförderung auch außerhalb der Flurneuordnung möglich. Hier übernimmt die Gemeinde die Bauträgerschaft. Bis auf geringere Lückenschlüsse ist ein Ausbau auf alter Trasse vorgesehen. Angesichts der begrenzten Ressourcen wird von einem Umsetzungszeitraum der Kernwegenetzplanungen von 20 bis 25 Jahren ausgegangen. Selbst bei diesen Rahmenvorgaben kann bei Weitem nicht jeder Kernwegebau in diesem Zeitraum finanziert werden.

Es bedarf daher auch weiterer inhaltlicher Schwerpunktsetzungen bei der Auswahl der Wege und Festlegung der Förderung. Das von der Technischen Universität München (TUM) entwickelte Werkzeug bietet hierfür eine hervorragende Grundlage. Darüber hinaus ist vorgesehen, das Werkzeug als festen Bestandteil aller Wegenetzplanungen in der Flurneuordnung und auch für ein flächendeckendes und kontinuierliches Monitoring der Fahrbeziehungen in der Landwirtschaft einzusetzen. So können beispielsweise Schwachstellen im bestehenden Wegenetz, die mehrere Betriebe oder ein größeres Einzugsgebiet betreffen, schnell erkannt und planerische Überlegungen zur Abhilfe begleitet werden. Aus Sicht der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung lässt das entwickelte Werkzeug sowie das Forschungsprojekt »LandModell« insgesamt einen großen Entwicklungsprung bei der Analyse und planerischen Begleitung von agrarstrukturellen Entwicklungen erwarten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte Werkzeug erlaubt eine performante, landesweit flächendeckende sowie vollständig automatisierte Abschätzung aller Hof-Feld-Pfade in hoher Detailschärfe. Grundlage der Analysen sind neben Daten der Landwirtschaftsverwaltung (LPIS) insbesondere flächendeckend verfügbare Geobasisdaten der Deutschen Vermessungsverwaltungen (ATKIS und Hauskoordinaten) – ein Transfer der Analysen auf andere Bundesländer wäre daher mit überschaubarem Aufwand verbunden. Durch die kleinteilige Speicherung der errechneten Pfade über den Ansatz der Linearen Referenzierung setzen sich die errechneten Hof-Feld-Pfade aus der Summe ihrer Teile zusammen. Zudem verfügen die errechneten Pfade über Verweise auf die beteiligten Parzellen bzw. die bewirtschaftenden Betriebe. Dieser Ansatz zur Speicherung der Ergebnisse eröffnet eine große Vielzahl möglicher weiterführender Analysen zum landwirtschaftlichen Transportgeschehen, von der nur ein sehr kleiner Teil in diesem Beitrag exemplarisch vorgestellt werden konnte. So ist es beispielsweise möglich, einerseits für Einzelparzellen Angaben zur Entfernung und Zusammensetzung des Hof-Feld-Pfades abzuleiten sowie andererseits im Sinne eines landesweit flächendeckenden Monitorings regionale Unterschiede der Transportentfernung aufzuzeigen. Gleichzeitig lassen sich für einzelne Segmente des bestehenden Wegenetzes überregionale Erschließungsflächen abschätzen oder aber auch Schwachstellen im bestehenden landwirtschaftlichen Wegenetz mit großer Relevanz für mehrere Bewirtschafter detektieren.

Bedingt durch den modularen Charakter könnte das entwickelte Werkzeug neben Monitoring-Zwecken des Ist-Zustandes im Kontext der Entwicklung von Wegebaukonzepten auch zur objektiven Bewertung verschiedener Planungsszenarien im Sinne eines Geodesign-Ansatzes eingesetzt werden (vgl. Steinitz 2012). Die Effekte des Neu- oder Ausbaus von Wegen bezüglich Belastung bzw. Erschließung würden damit bereits früh im Planungsprozess sichtbar und könnten – verbunden mit weiteren Geodatenthemen – im geografischen Kontext analysiert und bewertet werden; verschiedene Planungsszenarien ließen sich dadurch anhand objektiver Kriterien gegenüberstellen und vergleichen. Zudem könnte das Werkzeug auch zur objektiven Bewertung der durch Großbau-Projekte – beispielsweise von Autobahn- oder Bahntrassen – entstehenden Umwege herangezogen werden.

Dank

Die Finanzierung des Projekts »2D + t Landmodellierung« erfolgt durch die Bayerische Verwaltung für Ländliche Entwicklung. Weitere Projektpartner sind folgende Einrichtungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Abteilung Informations- und Wissensmanagement (AIW), Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur (IBA) sowie das Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz (IAB).

Literatur

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2008): Biogas – Was kosten Substrate frei Fermenter? LfL-Information, Eigenverlag, Freising-Weihenstephan.
- Bayerisches Staatsministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) (2014): Bayerischer Agrarbericht 2014. www.agrarbericht-2014.bayern.de/politik-strategien/index.html, letzter Zugriff 11.03.2016.
- BBV-LandSiedlung (2014): Konzept für ein Kernwegenetz im Gebiet der Interkommunalen Allianz Fränkischer Süden. www.fraenkischer-sueden.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Abgeschlossene_Projekte/2014_Konzept_fuer_ein_Kernwegenetz_im_Gebiet_der_Interkommuna.pdf, letzter Zugriff 11.03.2016.
- Bernhardt, H. (2002): Schüttguttransport in landwirtschaftlichen Betrieben Deutschlands. Dissertation, Universität Gießen, Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Bernhardt, H., Fröba, N., Knechtges, H., Kühlbach, K. (2005): Landwirtschaftliche Transporte und Entwicklungstendenzen. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL, Hrsg.): Landwirtschaftliche Wege. Ktbl-Schrift 443, S. 9–18.
- Bertling, H., Kriese, H., Lütkemeier, H. (2015): Neue Planungsansätze im ländlichen Wegebau. In: zfv 140, Heft 5, S. 320–326.
- Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt (BLW) (2014a): Der Weg zum Wegekonzept. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 204, Heft 34, S. 26.
- Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt (BLW) (2014b): In die Wege geleitet – Interview mit Sebastian Grimm. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 204, Heft 34, S. 28.
- Bromma, R. (2014): Konzeption und Umsetzung eines ländlichen Kernwegenetzes in der Allianz »Fränkischer Süden«. In: Mitteilungen des DVW Bayern 66, Heft 4, S. 379–389.
- Brunner, H. (2014): Vielfalt erhalten. Zukunft gestalten – Der Bayerische Weg in der Land- und Forstwirtschaft. Regierungserklärung am 1. Juli 2014.
- Deutsche Landeskulturgesellschaft (DLKG, Hrsg.) (2010): Wege in die Zukunft?! – Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen. Schriftenreihe der DLKG, Sonderheft 3.
- Deutsche Landeskulturgesellschaft (DLKG, Hrsg.) (2012): Wege in die Zukunft?! – Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen. Schriftenreihe der DLKG, Heft 9.
- Deutscher Bauernverband (DBV) (2013): Wegebau: Bund und Länder gefordert – Tagung zum ländlichen Wegebau in Berlin. Pressemeldung vom 18.04.2013.
- Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik 1, Heft 1, S. 269–271.
- Ewald, W.G. (2013): Dörfer vitalisieren durch Bündeln, Entflechten und Flexibilisieren – Wie können die Erfahrungen und Ideen der interkommunalen Zusammenarbeit auf Dorf-Stadt-Partnerschaften übertragen werden? In: Arbeitsgemeinschaft der Akademien Ländlicher Raum in den deutschen Ländern (Arge Ländlicher Raum): Kleine Städte und Dörfer: Schrumpfung in ländlichen Räumen für Kooperationen und Vitalisierung nutzen?! Dokumentation der Veranstaltung im Rahmen des »Zukunftsforums Ländliche Entwicklung« am 24. Januar 2013 in Berlin, S. 21–25.
- Kröhl, M. (2012): Anforderungen des Flottenmanagements für Lohnunternehmen und überbetrieblichen Maschineneinsatz in der Landwirtschaft – Was müssen ländliche Wegenetze in der Zukunft leisten? In: DLKG (Hrsg.): Wege in die Zukunft?! – Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen. Schriftenreihe der DLKG, Heft 9, S. 89–101.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2013): Logistik rund um die Biogasanlage. Ktbl-Schrift 498.
- Machl, T., Donaubauer, A., Auernhammer, H., Kolbe, T. H. (2013): Shape and Ergonomics: Methods for Analyzing Shape and Geometric Parameters of Agricultural Parcels. EFITA-WCCA-CIGR Conference »Sustainable Agriculture through ICT Innovation«, 24–26 June, 2013, Turin, Italy.
- Machl, T., Donaubauer, A., Kolbe, T. H. (2015): LandModell = CityGML für die Agrarlandschaft? In: Kolbe, T. H., Bill, R., Donaubauer, A. (Hrsg.): Geoinformationssysteme 2015 – Beiträge zur 2. Münchener GI-Runde. Wichmann Verlag im VDE Verlag, Berlin und Offenbach, CD-Rom, <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1241299/309563.pdf>, letzter Zugriff 11.03.2016.
- Moninger, S. (2014): Viele Wege führen letztlich zum Ziel. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 204, Heft 34, S. 27.
- Rleckleben, Y., Schäfer, N., Weißbach, M. (2013): Steigerung der Effizienz bei Straßentransporten mit unterschiedlichen Reifentypen für Traktoren. In: Landtechnik 68, Heft 3, S. 196–201.
- Soboth, A. (2012): Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Kooperationen gemeindeübergreifender Wegenetze. In: DLKG (Hrsg.): Wege in die Zukunft?! – Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen. Schriftenreihe der DLKG, Heft 9, S. 39–44.
- Steinitz, C. (2012): A Framework for Geodesign – Changing Geography by Design. Esri Press, Redlands.
- Süß, H. (2014): Größer und effizienter. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 204, Heft 34, S. 29–30.

Anschrift der Autoren

Thomas Machl, M. Sc.
 Dr.-Ing. Andreas Donaubauer
 Prof. Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe
 Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik
 Arcisstraße 21, 80333 München
thomas.machl@tum.de
andreas.donaubauer@tum.de
thomas.kolbe@tum.de

Dipl.-Ing. Wolfgang Günther Ewald
 Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bayerische Verwaltung für Ländliche Entwicklung
 Ludwigstraße 2, 80539 München
wolfgang-guenther.ewald@stmelf.bayern.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaeis.info.