



# Variabel statt einheitlich

Wie lässt sich die räumliche Variabilität als Entscheidungsgrundlage für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung nutzen? An der Technischen Universität München beschäftigt man sich mit Themen der digitalen Bestimmung von Ertragspotenzialen und des standortbasierten Trinkwasserschutzes.

Dr. Martin Mittermayer, Technische Universität München

Die räumliche Variabilität von Boden- und Standortbedingungen sowie deren Einfluss auf den Ertrag sind seit Jahrzehnten Gegenstand agrarwissenschaftlicher Forschung. Dennoch werden Ackerflächen in der landwirtschaftlichen Praxis überwiegend schlageinheitlich bewirtschaftet. Insbesondere in klein strukturierten Agrarlandschaften wie Bayern werden weiterhin über 90 % der Ackerflächen schlageinheitlich gedüngt, ohne teilflächenspezifische Ertragspotenziale zu berücksichtigen. Dadurch bleiben Potenziale in leistungsfähigen Zonen ungenutzt, während in ertragschwächeren Bereichen das Risiko von Stickstoffverlusten in Wasser und Atmosphäre steigt.

Ertragspotenzial und Stickstoffverluste variieren aber innerhalb eines Schlags deutlich – eine schlageinheitliche Betrachtung greift daher zu kurz. Erst die systematische Erfassung dieser Unterschiede schafft die Grundlage für eine differenzierte N-Strategie mit höherer Effizienz und geringeren Umweltwirkungen.

## Bedeutung der räumlichen Variabilität

Die Ursachen der räumlichen Variabilität innerhalb landwirtschaftlicher Flächen sind vielfältig und umfassen unter anderem Unterschiede in der Topografie, der Bodentextur, der nutzbaren Feldkapazität, dem pH-Wert sowie von Humus- und Nährstoffgehalten. Diese Standortparameter können selbst innerhalb kleiner Schläge erheblich variieren, auch wenn diese über viele Jahre hinweg einheitlich bewirtschaftet wurden.

Die genannten Unterschiede führen zu mehr oder weniger stabilen Ertragszonen. Werden sie schlageinheitlich bewirtschaftet, können daraus sowohl ökonomische Nachteile als auch umweltrelevante Auswirkungen resultieren. Während in Hohertragszonen höhere Erträge möglich wären, werden gleichzeitig die Niedrigtragszonen überdüngt und der über-



Heterogene Schläge bedeuten ungleiche Wachstumsbedingungen für Kulturpflanzen. Werden die ertragsstarken und die -schwachen Teilflächen gleich gedüngt, können Nährstoffverluste und Grundwassereinträge die Folge sein.

Foto: Landpixel

schüssige Stickstoff kann verloren gehen (Abb. 1). Der Klimawandel kann diese Effekte zusätzlich verstärken, wenn das pflanzenverfügbare Wasser insbesondere in Trockenregionen weiter zum ertragslimitierenden Faktor wird. Insbesondere in Trockenjahren treten daher Ertragsunterschiede verstärkt hervor, wobei Zonen mit geringer Wasser- und Nährstoffverfüg-

barkeit deutlich stärkere Ertragseinbußen aufweisen als Hohertragszonen (Abb. 2).

## Teilflächenspezifische Bewirtschaftung

Die teilflächenspezifische Bewirtschaftung bietet einen wirksamen Ansatz, um

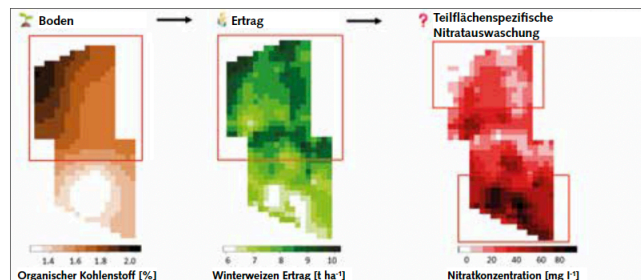


Abb. 1: Heterogene Bodeneigenschaften bedingen unterschiedliche Ertragsniveaus, die bei einheitlicher Bewirtschaftung zu differenzierter Nitratbelastung des Unterbodens führen.

Fotos: Mittermayer/TUM

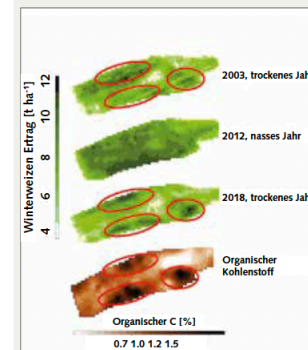


Abb. 2: Verteilung der Weizenerträge auf einem Schlag der Versuchsstation Roggenstein (TUM). Dargestellt sind die Erträge in zwei Trockenjahren und einem nassen Jahr sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Oberboden (0–30 cm).

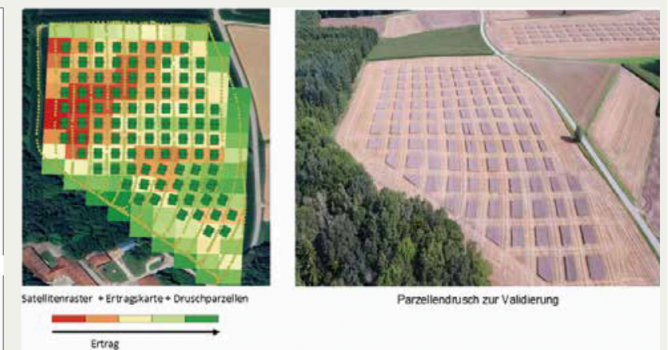


Abb. 3: Ertragskarte auf Basis satellitengestützter Daten (links) und Parzellendruschmessungen (rechts) mit einem Parzellenmähdrescher zur hochgenauen Ertrags Erfassung. Beide Datensätze sind georeferenziert, sodass für jedes Raster ein Ertrags- und N-Entzugswert vorliegt und eine optimale Kalibrierung der Modelle und Systeme ermöglicht wird. Dargestellt ist das Beispielfeld „Hoffeld“ (6,4 ha) der Versuchsstation Thalhausen (TUM), etwa 30 km nördlich von München.

die beschriebenen Zielkonflikte zwischen Ertrag und Umweltwirkung zu reduzieren. In der landwirtschaftlichen Praxis hat sie sich bislang jedoch nur begrenzt etabliert. Oft genannte Hemmnisse sind hohe Investitionskosten für Sensortechnik, die Komplexität bestehender Systeme, eine eingeschränkte Praxistauglichkeit sensorbasierter Düngesysteme sowie ein häufig unsicherer wirtschaftlicher Nutzen, insbesondere unter klein strukturierten Betriebsbedingungen. Hinzu kommt das Fehlen eines durchgängigen, einfachen und praxisnahen Workflows zur Umsetzung teilflächenspezifischer Maßnahmen.

Viele Ansätze erfordern einen hohen manuellen Aufwand, beispielsweise bei der Auswahl und Interpretation von Satellitenbildern oder der eigenständigen Eingabe standortspezifischer Düngemengen. Dieser zusätzliche Zeit- und Arbeitsaufwand stellt für viele Betriebe verständlicherweise eine weitere Hürde dar.

Daneben sind auch zentrale fachliche Fragestellungen, insbesondere im Bereich der N-Düngung, weiterhin nicht abschließend geklärt. Von immenser Bedeutung ist dabei die belastbare Bestimmung des standortspezifischen Ertragspotenzials als Grundlage einer bedarfsgerechten Düngung. Zielderträge sind dabei keineswegs einheitlich oder regional pauschal festzulegen, sondern variieren erheblich zwischen Regionen, Betrieben und einzelnen Schlägen. Selbst innerhalb eines Feldes können sich die Ertragspotenziale deutlich unterscheiden – in Extremfällen bis zur Verdopplung der Erträge. Einheitliche oder regional pauschal festgelegte Zielderträge

können also die heterogene Standortstruktur landwirtschaftlicher Flächen nicht abbilden. Boden- und Klimaräume sind natürlich geprägt und nicht deckungsgleich mit administrativen Einheiten.

## Wissenschaftliche Basis und Ertragspotenzial

An der Technischen Universität München werden seit vielen Jahren pflanzenbaulich fundierte Modelle und Algorithmen zur Ertrags- und Biomassemodellierung sowie zur Ableitung der N-Düngung entwickelt. Die Basis dafür bilden große Datenmengen, agronomisches Fachwis-

sen sowie eine systematische Kalibrierung und Validierung. Die Daten kommen u. a. aus aufwendig erhobenen Ground-Truth-Daten, insbesondere aus Parzellendruschmessungen sowie weiteren quantitativen Ertrags- und Standortdaten (Abb. 3). Ziel der Modelle ist, das Ertragspotenzial kleinräumig und standortgerecht für jede Teilfläche abzubilden. Ihre korrekte Kalibrierung ist dafür unerlässlich. Denn werden Düngedarfsermittlungen auf Basis unrealistischer oder fehlerhaft modellierter Ertragspotenziale durchgeführt, können diese Fehlannahmen auch durch eine Anpassung der Düngung während der Vegetation nur unzureichend kompensiert werden.

**BetaSil®**  
Der Halmstabilisator

**Biochim**  
Wir verstehen Pflanzen

Biostimulanz mit Silizium und Glycin Betain für starke Zellwände und mehr Widerstandskraft!

Biochim Deutschland GmbH  
Rendsburger Str. 5  
30659 Hannover

Tel.: 0511 - 646 664 90  
Fax: 0511 - 646 664 99

info@biochim.de  
www.biochim.de

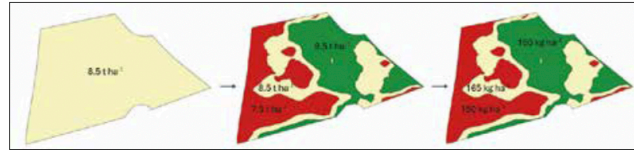


Abb. 4: Düngedarstellung auf Basis differenzierter Zielerträge (t/ha). Statt einheitlicher werden teilflächenspezifische Zielerträge mit angepassten N-Gaben angestrebt.

#### YieldXperts GmbH

Um die entwickelten wissenschaftlichen Modelle und Verfahren in die landwirtschaftliche Praxis zu überführen und anwendungsorientiert weiterzuentwickeln, wurde die YieldXperts GmbH als eigenständige Ausgründung etabliert. Die YieldXperts GmbH ist eine wissenschaftliche Ausgründung aus dem Umfeld der Technischen Universität München und der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf ([www.yieldxperts.de](http://www.yieldxperts.de)). Sie ist in die Struktur der TUM Venture Labs eingebunden. Die dort entwickelten Methoden basieren auf agronomisch fundierten Modellen, mehrjährigen Ground-Truth-Daten sowie KI-gestützten Verfahren, die unter Praxisbedingungen standortübergreifend validiert wurden. Im Mittelpunkt steht die Erfassung der räumlichen Variabilität von Biomassebeständen und Ertragspotenzialen. Auf Basis dieser kleinräumigen Ertragspotenzialbestimmung werden teilflächenspezifische Bewirtschaftungsstrategien abgeleitet, insbesondere für eine bedarfsgerechte N-Düngung. Damit können N-Verlustrisiken reduziert und Maßnahmen im Trinkwasserschutz standortangepasst umgesetzt werden. Die Daten eignen sich aber auch als Basis für weitergehende agronomische und landschaftsbezogene

Maßnahmen. Die Anwendungen sind praxisnah konzipiert, rechtssicher ausgestaltet und in bestehende Farm-Management-Systeme integrierbar. Ziel ist ein durchgängiger, anwenderfreundlicher Workflow, der fachliche Präzision mit wirtschaftlicher Umsetzbarkeit verbindet und sowohl für konventionelle als auch für ökologische Betriebe geeignet ist.

#### Ertragspotenzialbestimmung und Düngedarstellung

Eine zentrale Anwendung ist die Bestimmung des absoluten, standortspezifischen Ertragspotenzials als Grundlage der Düngedarstellung, da regionale Richtwerte oder betriebliche Durchschnittserträge die kleinräumige Variabilität innerhalb eines Schrages nur eingeschränkt abbilden können. Die Ertragspotenzialbestimmung mithilfe mehrjähriger Satellitendaten ermittelt stabile Potenziale auf Teilflächenebene. Die anschließende Düngedarstellung kann die zulässige Obergrenze der N-Düngung standort- und bedarfsgerecht verteilen. Über die Anbindung an bestehende Farm-Management-Systeme können die Maßnahmen automatisiert übernommen und regelbasiert mit rechtlichen Vorgaben abgeglichen wer-



Abb. 5: Erweiterter Anstrombereich eines Trinkwasserschutzgebiets. Die teilflächenspezifische Erfassung ermöglicht eine standortangepasste Bewirtschaftung. Hohertragszonen können gestärkt und Niedrigertragszonen ressourcenschonend und risikoarm bewirtschaftet werden.

den. Das Ergebnis ist eine unmittelbar einsetzbare Applikationskarte ohne zusätzlichen Bearbeitungsaufwand (Abb. 4).

#### Digital basierter Trinkwasserschutz

In nitratsensiblen Regionen beruhen regulatorische Maßnahmen häufig auf flächenbezogenen oder gebietsweiten Vorgaben. Dieses Vorgehen berücksichtigt die räumliche Variabilität von Bodenparametern, Wasserhaltevermögen und Ertragspotenzialen jedoch nur eingeschränkt (Abb. 5). Nitratauswaschung tritt nicht flächendeckend auf (Abb. 1), sondern konzentriert sich häufig auf ertragsschwächere Zonen. Diese weisen wie eingangs beschrieben ein erhöhtes Verlustrisiko auf, während leistungsfähige Bereiche häufig unter ihrem Ertragspotenzial bleiben.

Erste Pilotprojekte mit Wasserversorgern zeigen, dass sich standortbasierte Ansätze bürokratiearm in bestehende Kooperationsmodelle integrieren lassen und von landwirtschaftlichen Betrieben gut angenommen werden. Die gezielte Priorisierung von Risikoflächen erhöht die Maßnahmenwirkung, ohne zusätzliche Mittel zu erfordern.

Neben regulatorischen Ansätzen spielen freiwillige Kooperationsmodelle zwischen Wasserversorgern und landwirtschaftlichen Betrieben eine zentrale Rolle. In solchen Modellen werden Maßnahmen zur Reduktion von N-Einträgen finanziell gefördert. Auch hier gilt: Einsparungspotenzial wird nicht genutzt, wenn Maßnahmen flächenbezogen und pauschal umgesetzt werden, obwohl die zugrunde liegenden Risiken kleinräumig variieren.

Die standortbasierte Ertragspotenzialbestimmung ermöglicht die Identifikation stabiler Niedrigertragszonen und risikorelevanter Teilflächen. Damit können Maßnahmen gezielt priorisiert werden – sei es durch differenzierte N-Düngung oder weitere standortangepasste Schutzmaßnahmen. Damit können Budgets effizienter eingesetzt werden, ohne den Mitteleinsatz zu erhöhen. Gleichzeitig steigert eine transparente, datenbasierte Entscheidungsgrundlage die Akzeptanz bei landwirtschaftlichen Betrieben und schafft Planungssicherheit für Wasserversorger. <<

Dr. Martin Mittermayer  
martin.mittermayer@tum.de