



# Handlungsanleitung zu Potentialkarten

Schriftenreihe, Heft 10/2024



# Erarbeitung einer Handlungsanleitung zur Erstellung und Überprüfung von Potentialzonen mit Hilfe mehrjähriger Satellitendaten in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben

AgUmenda GmbH

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b> .....	<b>9</b>
3.1	Beschreibung der Standorte .....	9
3.2	Erstellung der Ertragspotentialkarten .....	10
3.2.1	Allgemeine Anforderungen an Ertragspotentialkarten .....	11
3.2.2	Beteiligte Anbieter von Ertragspotentialkarten .....	11
3.3	Zonierung der Felder und untersuchte Parameter .....	12
3.3.1	Erstellung der Referenz-Ertragspotentialkarte – QGIS.....	13
3.4	Jahreswitterung.....	15
3.5	Bodenbeprobung.....	16
3.5.1	Festlegung der Beprobungspfade .....	16
3.5.2	Technische Durchführung der Bodenprobenahme.....	16
3.6	Untersuchungen im Vegetationsverlauf.....	16
3.6.1	Pflanzenanalyse.....	16
3.6.2	Getreideernte .....	17
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>18</b>
4.1	Ertragspotentialkarten der Anbieter und Plausibilität.....	18
4.1.1	Validierung der Ertragspotentialkarte .....	18
4.1.2	Ergebnisse der Bodenbeprobung.....	22
4.1.2.1	Mineralisierter Stickstoff im Frühjahr und nach der Ernte .....	22
4.1.2.2	Grundnährstoffuntersuchung und weitere Bodenproben .....	24
4.1.2.3	Beziehungen zwischen den Ergebnissen und den Ertragszonen .....	24
4.1.3	Pflanzenschnitte während der Vegetationsperiode .....	25
4.1.4	Kornertrag und Vorhersagegenauigkeit der Anbieter von Ertragspotentialkarten .....	27
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b> .....	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>30</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>31</b>
<b>A 1</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>32</b>
A 1.1	Zusätzliches Daten- und Kartenmaterial.....	32
A 1.2	Handlungsanleitung zur Bewertung von Potentialkarten - Checkliste .....	43
A 1.3	Handlungsanleitung zur Erstellung von Potentialkarten .....	45

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ackerzahl (Bodenpunkte) nach Reichsbodenschätzung ohne (links) und mit Flurstücksgrenzen (rechts) (Quelle: GeoSN, dl-de/by-2-0).....	7
Abbildung 2: Satellitenaufnahme vom 23.07.2019 (links) und übersetzt in den Vegetationsindex NDVI (rechts) (Quelle: GeoSN, dl-de/by-2-0) .....	7
Abbildung 3: Standorte der Kooperationsbetriebe in Sachsen (Luftbild: GeoSN, dl-de/by-2-0).....	9
Abbildung 4: Einfluss der aktiven Blattfläche auf den Vegetationsindex, hier auf den NDVI (NASA, 2000).....	10
Abbildung 5: Jahreswitterung 01.01.-30.09.2023 in Köllitsch und Chemnitz (Quelle: Agrar-meteorologisches Messnetz Sachsen) .....	15
Abbildung 6: Pfade der Bodenbeprobung, hier am Standort 3 (Luftbild: GeoSN, dl-de/by-2-0)...	16
Abbildung 7: Ertragspotentialkarten der Anbieter für Standort 1, Feld 2 (Luftbilder: GeoSN, dl-de/by-2-0).....	21
Abbildung 8: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Potentialkarte.....	21
Abbildung 9: $N_{min}$ -Gehalt je Zone im Frühjahr für die intensiv beprobten Felder .....	22
Abbildung 10: $N_{min}$ -Gehalt je Zone nach der Ernte für die intensiv beprobten Felder.....	23
Abbildung 11: $N_{min}$ -Gehalt in Abhängigkeit des Feinbodenteils.....	23
Abbildung 12: Biomassen und N-Aufnahme der Hauptkulturen der intensiv untersuchten Felder zu Beginn des Schossens.....	26
Abbildung 13: Relative Abweichung der Vorhersagegenauigkeit des Ertrages aller Ertragspotentialkarten von der Referenzpotentialkarte (n = 3).....	28

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Schlagkenndaten .....	9
Tabelle 2: Übersicht über die Anbieter .....	12
Tabelle 3: Übersicht über die Untersuchungen, die auf den Feldern durchgeführt wurden .....	13
Tabelle 4: Verwendete Aufnahmedaten des Sentinel-2-Satelliten .....	14
Tabelle 5: Ertragspotentialkarten der Intensivfelder aller Anbieter aller Standorte .....	19
Tabelle 6: Eigens erstellte Ertragspotentialkarten und Abreifebilder der Intensivfelder aller Standorte .....	20
Tabelle 7: Ergebnisse der Grundnährstoffuntersuchungen in 0-30 cm Bodentiefe .....	25
Tabelle 8: Kornertrag, Proteingehalt im Korn und -N-Entzug je Ertragszone und Standort .....	27

## **Tabellenverzeichnis im Anhang**

Tabelle A 1: Verwendete Daten zur Erstellung der Ertragspotentialkarten .....	32
Tabelle A 2: Ertragspotentialkarten der »Standardfelder« von Standort 1, Torgau .....	33
Tabelle A 3: Ertragspotentialkarten der »Standardfelder« von Standort 2, Riesa .....	34
Tabelle A 4: Ertragspotentialkarten der »Standardfelder« von Standort 3, Zwickau .....	35
Tabelle A 5: Ergebnisse der Grundnährstoffuntersuchungen nach Bodentiefen .....	39
Tabelle A 6: Bewertungsbogen zur Einschätzung unterschiedlicher Anbieter .....	44
Tabelle A 7: Eignung von verschiedenen Kulturpflanzen/-arten zur Erstellung einer Ertragspotentialkarte .....	47

# 1 Aufgabenstellung

Das Projekt »Handlungsanleitung zur Erstellung von Potentialzonen« beschäftigte sich mit Ertragspotentialkarten verschiedener Hersteller, welche aus mehrjährigen Biomassekarten von Satellitenaufnahmen erstellt werden. Ziel war es einerseits, eine Hilfestellung für Landwirte und Landwirtinnen in Form einer Handlungsanleitung (Video) zu erarbeiten und ihnen so die eigenständige Erstellung zu ermöglichen. Andererseits sollten verschiedene Online-Portale und Dienstleister von Potentialkarten verglichen und eine Checkliste erarbeitet werden, mit der Landwirte und Landwirtinnen die Güte dieser Karten besser einschätzen können. Ziel dieses Vergleichs auf insgesamt neun Feldern von drei landwirtschaftlichen Betrieben verteilt über Sachsen ist es, die Aussagen der erstellten Dokumente und deren Plausibilität zu stützen und zu festigen. Die Ergebnisse sollen im Folgenden vorgestellt werden.

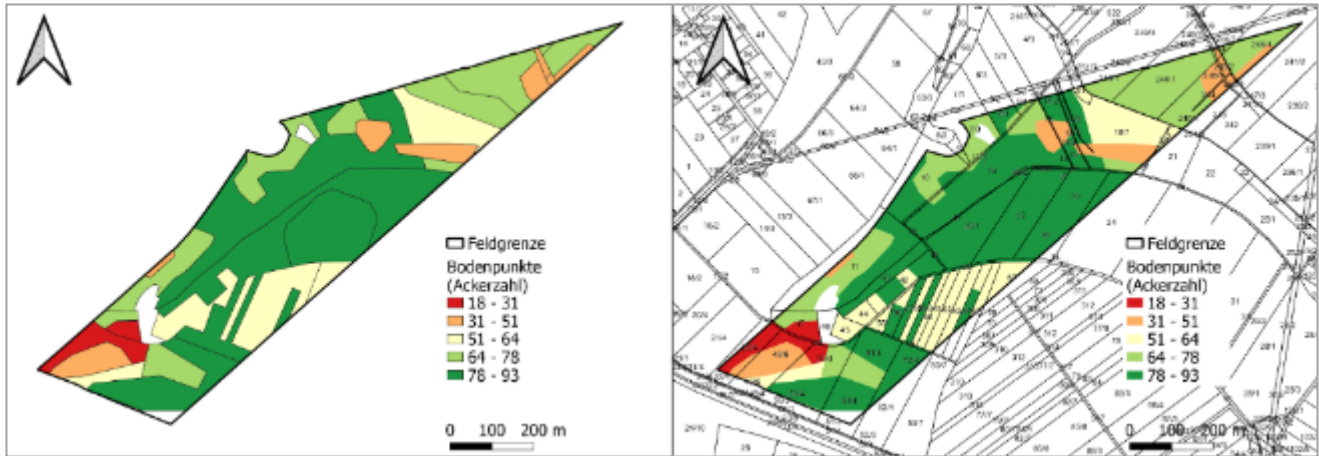
Die Handlungsanleitungen sind in den Anhängen A 1.2 und 0 zu finden. Die dritte Handlungsanleitung wurde in Form eines Videotutorials erstellt. Dieses ist unter folgendem Link abrufbar:

<http://www.youtube.com/watch?v=X4zR2dcxXI>.

# 2 Einleitung

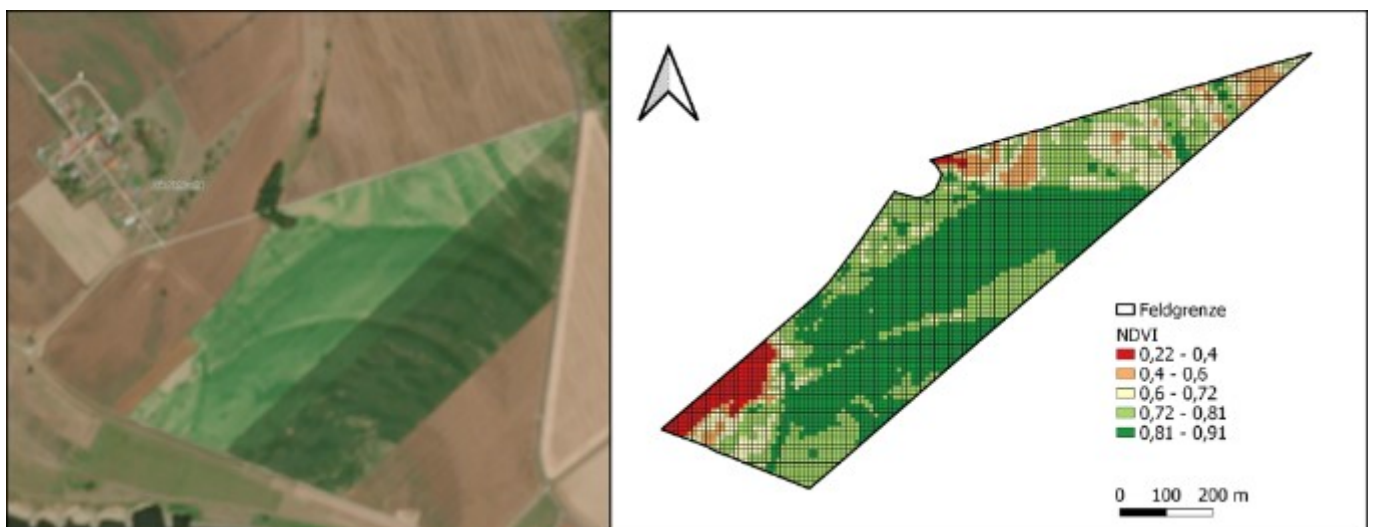
Teilflächenspezifische Bewirtschaftung wird bereits von vielen Landwirten und Landwirtinnen durchgeführt. Ob mit einem Sensor, der die Stickstoffaufnahme der Pflanzen misst, nach Erfahrungswerten, in dem zum Beispiel nährstoffreiche Senken weniger Dünger erhalten oder auch nach der Ertragserfassung des Mähreschers. Ihnen allen ist gemein, dass ein Feld in unterschiedliche Bereiche eingeteilt wird und deren Pflanzenbestände nach kleinräumigem Bedarf geführt werden. Ein Problem dieser Verfahren ist jedoch, dass die Ertragsfähigkeit des Bodens bislang kaum bzw. nur mit großem Aufwand berücksichtigt werden kann. Ertragspotentialkarten hingegen teilen das Feld in unterschiedliche Zonen ein, abhängig von der »Durchhaltefähigkeit der Pflanzen«, also davon, ob Pflanzen in einem Bereich des Feldes länger Photosynthese betreiben können als in anderen Bereichen. Da dies in erster Linie von der Bodenart abhängig ist, kann mit dieser »Durchhaltefähigkeit« die Heterogenität eines Feldes beschrieben werden.

Die erste systematische Erfassung kleinräumiger Bodenunterschiede wurde im Rahmen der Reichsbodenschätzung der frühen 1930er Jahre durchgeführt. Dabei wurden als Grundlage für die Besteuerung der Landwirte und Landwirtinnen Bodenunterschiede erhoben und diese in Ertragsmesszahlen mit einem einheitslosen Wertebereich von 0 bis 100 (höchster Wert) ausgedrückt. Doch eignen sich diese auch für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung? Prinzipiell kann man die Karten der Reichsbodenschätzung als erste Ertragspotentialkarten verstehen, denn sie zeigen Bodenunterschiede und damit die Ertragsfähigkeit der jeweiligen Teilfläche recht sicher an. Doch auch wenn die damals erhobenen Ertragsmesszahlen noch heute einen wichtigen Stellenwert in der Beschreibung landwirtschaftlicher Flächen einnehmen, so eignen sie sich nur bedingt für die moderne teilflächenspezifische Bewirtschaftung, mit der die Betriebsmittel punktgenau ausgebracht werden können. Abbildung 1 zeigt die Ackerzahlen eines Feldes in Nord-sachsen, die von 18 im südlichen Teilbereich bis zu 93 im mittleren Bereich des Feldes variieren. Legt man die Grenzen der Flurstücke darüber, erkennt man, dass die Ackerzahlen oft durch diese beschränkt sind. Somit liegen Bereiche mit 18 und solche mit 64 Bodenpunkten direkt nebeneinander, ohne Übergangsbereich.



**Abbildung 1: Ackerzahl (Bodenpunkte) nach Reichsbodenschätzung ohne (links) und mit Flurstücksgrenzen (rechts) (Quelle: GeoSN, dl-de/by-2-0)**

Durch die Satelliten Sentinel-2, die im Rhythmus von zwei bis drei Tagen Bilder eines Standortes aufnehmen, ist es möglich, Bodenunterschiede noch kleinräumiger und somit genauer, anzeigen zu lassen und plausibler darzustellen. Zu Nutze macht man sich dafür die Eigenschaften, die mit unterschiedlichen Bodenarten einhergehen: Pflanzen auf eher sandigem Boden reifen in durchschnittlichen Jahren eher ab als solche, die auf eher lehmigem Boden wachsen. Unter anderem ist das auf die unterschiedliche Tiefgründigkeit, die Wasserhaltekapazität sowie die Nährstoffverfügbarkeit zurückzuführen. Werden diese Abreifeunterschiede dargestellt, zeigen sich auch Bodenunterschiede. Der Vorteil dieser Methode ist, dass mit ihr ausgesprochen kleinräumige Daten generiert werden können (1 Pixel/100 m<sup>2</sup>), welche kostengünstig und unabhängig von der bereits genannten Reichsbodenschätzung sind. Die Abbildung 2, links, zeigt die Aufnahme des Satelliten während der Abreife des Feldes. Zu sehen sind Bereiche, in denen die Pflanzen keine grüne Färbung mehr zeigen und solche, in denen die Pflanzen noch ausgesprochen »grün« sind. Die Abbildung 2, rechts, zeigt den NDVI-Index desselben Tages, mit dem diese Daten visualisiert und beschrieben werden.



**Abbildung 2: Satellitenaufnahme vom 23.07.2019 (links) und übersetzt in den Vegetationsindex NDVI (rechts) (Quelle: GeoSN, dl-de/by-2-0)**

Werden mehrere Abreifebilder verschiedener Jahre miteinander verrechnet, ergeben sich stabile Zonen, deren Boden und damit auch deren Ertragsfähigkeit, sich unterscheidet. Werden die Karten einmal valide erstellt, sind sie über mehrere Jahre stabil und können einen der größten Einflüsse auf die Ertragsfähigkeit wiedergeben, den Boden. Auf ihrer Basis kann teilflächenspezifisch gewirtschaftet, Betriebsmittel eingespart sowie die Umwelt entlastet werden.



### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Beschreibung der Standorte

Zentraler Bestandteil des Projektes war die Zusammenarbeit mit Landwirtschaftsbetrieben, um einerseits die Potentialkarten zu validieren und andererseits die Handrechen auf Bedürfnisse aus der Praxis anzupassen. Für die Zusammenarbeit konnten drei Betriebe gewonnen werden (Abbildung 3), welche jeweils drei ihrer Felder für das Projekt zur Verfügung stellten.

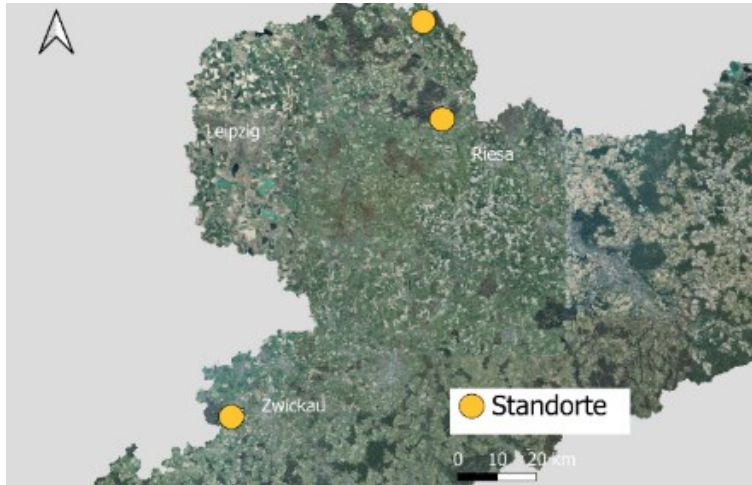


Abbildung 3: Standorte der Kooperationsbetriebe in Sachsen (Luftbild: GeoSN, dl-de/by-2-0)

Betrieb 1 bewirtschaftet seine Flächen nördlich von Torgau, in Nordsachsen. Betrieb 2 ist nach Kriterien des ökologischen Landbaus zertifiziert und hat seinen Standort in der Nähe von Riesa, der dritte Betrieb liegt westlich von Zwickau in Südsachsen. Je Standort wurde ein Feld ausgewählt, welches intensiver beprobt wurde (im Folgenden »Intensivfeld«). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Kenndaten der untersuchten Felder, wobei jeweils die Daten des Intensivfeldes fett markiert sind.

Tabelle 1: Schlagkenndaten

Betriebsstandort	Flächengröße [ha]	durchwurzelbare Bodentiefe [cm]	Bodenwertzahl	nFK [l/(m <sup>2</sup> x Bodentiefe)]	Hauptkultur 2023
1: Torgau	<b>47</b>	<b>110</b>	<b>62</b>	<b>240</b>	<b>Winterweizen</b>
	44	110	65	240	Winterweizen
	28	110	54	220	Silomais
2: Riesa	<b>15</b>	<b>80</b>	<b>52</b>	<b>200</b>	<b>Winterdinkel</b>
	45	80	51	200	Winterraps
	32	60-80	40	154	Winterweizen
3: Zwickau	<b>30</b>	<b>90</b>	<b>48</b>	<b>180</b>	<b>Winterweizen</b>
	68	90	48	180	Silomais
	43	110	43	180	Winterweizen

Legende: nFK = nutzbare Feldkapazität. Hervorgehoben sind die intensiv untersuchten Felder. Datenquelle: Datenportal für »Interdisziplinäre Daten und Auswertungen (iDA)«; aufgeführt sind die durchschnittlichen Bodenwertzahlen.

### 3.2 Erstellung der Ertragspotentialkarten

Die Sentinel-2 Satelliten nehmen im Rhythmus von zwei bis drei Tagen an einem Standort Bilder der Erdoberfläche auf. Diese bestehen aus 13 verschiedenen Spektralbändern (im Weiteren »Bänder«) unterschiedlicher Auflösung und stehen im allgemeinen – je nach Spektralband – mit 10 m, 20 m oder 60 m Auflösung zur Verfügung. Durch Verrechnung einzelner Wellenlängenbereiche, die in den Bändern gebündelt sind, erhält man Indices, die das Pflanzenwachstum beschreiben können. Mit ihnen lässt sich darstellen, wie viel Biomasse an einem bestimmten Standort wächst und somit auch Rückschlüsse auf dessen Nährstoffversorgung ziehen (NASA, 2000). Pflanzen absorbieren sichtbares Licht während sie Photosynthese betreiben und reflektieren vor allem das Licht des unsichtbaren Wellenlängenbereiches. Je größer also die aktive Blattfläche von Pflanzen ist, desto stärker beeinflussen sie die Reflektion des Lichtes (Abbildung 4). Ertragspotentialkarten bestehen aus dem Mittelwert mehrerer Bildaufnahmen des Satelliten. Für deren Erstellung wird je verwendeter Bildaufnahme der Vegetationsindex errechnet und dieser dann über alle Bildaufnahmen gemittelt. Wie viele Bildaufnahmen letztlich verwendet werden, hängt von der individuellen Erstellungsmethodik des Kartenanbieters ab.

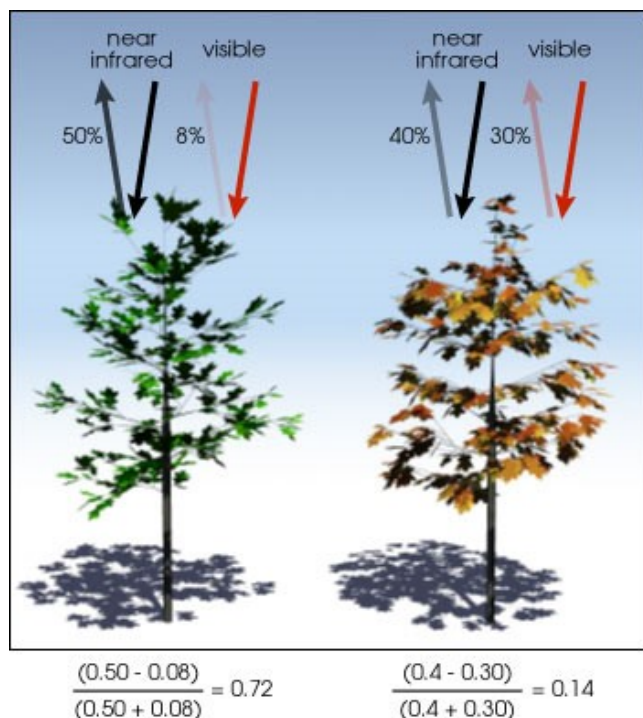


Abbildung 4: Einfluss der aktiven Blattfläche auf den Vegetationsindex, hier auf den NDVI (NASA, 2000)

### 3.2.1 Allgemeine Anforderungen an Ertragspotentialkarten

Das Ziel von Ertragspotentialkarten ist es, unterschiedliche Bodenarten eines Feldes kleinräumig darzustellen. Dazu ist es notwendig Störgrößen soweit wie möglich zu reduzieren. Störgrößen beeinflussen die Berechnung des Vegetationsindex, indem sie die Reflektion der Pflanzen verändern. Beispielsweise können Wolken und Wolkenschatten für eine gänzlich falsche Einschätzung eines Feldes sorgen. Doch nicht nur Wolken(-schatten) zählen zu Störgrößen, auch pflanzenbauliche Maßnahmen können sich auf die Qualität der späteren Ertragspotentialkarte auswirken. Zu berücksichtigen sind daher die verschiedenen Störgrößen, die auftreten können und die nachfolgend aufgezählt sind:

#### Störgrößen »Satellit«

- Wolken und Wolkenschatten

#### Störgrößen »Management«

- uneinheitliche Schlagbewirtschaftung; Schlagteilung
- Bestandeslücken und Frostschäden
- Bereiche mit hohem Unkraut- und Ungrasdruck

Auch durch Vorgewende ergeben sich gewisse Einflüsse. Durch doppelte Überfahrten entstehen in diesen Bereichen oft unvermeidbare Bodenverdichtungen, die das Pflanzenwachstum beeinflussen. Andererseits können Baumkronen und Baumschatten den Vegetationsindex beeinflussen, da entweder die Blätter der Bäume oder die Verschattung der Hauptkultur durch ihn beschrieben werden. Aus diesen Gründen ist es ratsam, das Vorgewende aus der Betrachtung auszuschließen.

Zu betonen ist, dass durch die Anzahl der verwendeten Satellitenbilder, also über die Grundgesamtheit, Einfluss auf die Intensität der Störgröße genommen werden kann. Wird eine Vielzahl von Bildern verwendet, können Störgrößen überlagert werden und die Karte ist somit dennoch nutzbar, sollte das Bild mit Störgröße in die Berechnung einfließen. Werden Ertragspotentialkarten nur aus wenigen Einzelbildern erstellt, ist die Bereinigung von Störgrößen unabdingbar. Näheres dazu ist in den beiden Handreichen in den Anhängen A 1.2 und 0 vermerkt.

### 3.2.2 Beteiligte Anbieter von Ertragspotentialkarten

Insgesamt werden im Projekt Ertragspotentialkarten von sechs verschiedenen Anbietern genutzt (Tabelle 2). Dabei werden jeweils drei Cloudbasierte Softwareanwendungen eingesetzt sowie drei Dienstleister für die Erstellung beauftragt.

In cloudbasierten Anwendungen stellt der Anbieter eine Umgebung bereit, in der die Karte erstellt werden kann. In der Regel lädt der Nutzer die Feldgrenzen eigenständig in die Webanwendung, kann die Karte dort bearbeiten und sie im Anschluss zu fertigen Applikationskarten weiterverarbeiten. Somit nimmt der Anbieter meistens den Schritt der Erstellung der Ertragspotentialkarte durch Algorithmen ab und stellt sie im Anschluss dem Anwender zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Dadurch besteht die Möglichkeit, viele Einstellungen, die zur Erstellung einer Applikationskarte notwendig sind, eigenständig vorzunehmen.

Der Dienstleister fertigt nach Erhalt der Feldgrenzen und eventuell benötigter zusätzlicher Informationen die Ertragspotentialkarte an und stellt sie dem Auftraggeber zur Verfügung, der sie nun eigenständig weiterverarbeiten muss. Für die Nutzung von Dienstleistern ist somit eine eigene Software notwendig, mit der die erhaltene Ertragspotentialkarte zu einer Applikationskarte verarbeitet werden kann. Diese stellt der Anbieter einer cloudbasierten Lösung bereits mit seinem Produkt zur Verfügung.

**Tabelle 2: Übersicht über die Anbieter**

Anbieter »Cloud«		Anbieter »Dienstleistung«	
1	365FarmNet GmbH	2	Agvolution GmbH
5	OneSoil AG	3	EXAgT GmbH
6	Xarvio BASF Digital Farming GmbH	4	NEXT Farming Sales GmbH

Legende: Die Nummern entsprechen den internen Bezeichnungen.

### 3.3 Zonierung der Felder und untersuchte Parameter

Nach der in Kapitel 3.2 erläuterten Methodik wurde jedes Feld in fünf Ertragszonen eingeteilt. Dazu wurde der im Programm QGIS standardmäßig implementierte Modus »Natürliche Unterbrechungen (Jenks)« zur Darstellung von Eigenschaften verwendet. Dieser teilt das entsprechende Feld in die gewünschte Anzahl Zonen ein (im vorliegenden Fall fünf), minimiert dazu die Varianz innerhalb der Klassen und maximiert sie zwischen den unterschiedlichen Klassen (QGIS.org, 2024). So wurden folgende Ertragszonen definiert: sehr hoch, hoch, mittel, niedrig und sehr niedrig. Im Projekt lag der Fokus bei den Untersuchungen dann auf den Ertragszonen sehr hoch, mittel und sehr niedrig.

Der Boden der Felder wurde neben dem Nmin-Gehalt auch auf die Grundnährstoffe sowie pH-Wert, Phosphorfreisetzungsrates, C:N-Verhältnis und Bodenart untersucht. Während das Intensivfeld in 30 cm Schichten bis 90 cm Bodentiefe untersucht wurde, fanden die Bodenuntersuchungen der verbleibenden Felder bis in eine Tiefe von 60 cm statt. Ziel der umfangreichen Untersuchungen war die Bereitstellung von Ergebnissen, anhand derer die Ertragszonen auf Plausibilität überprüft wurden. Im Idealfall sind Zonenunterschiede auf Bodenunterschiede zurückzuführen, auf welche der Landwirt oder die Landwirtin – im Gegensatz zu Nährstoffunterschieden – keinen Einfluss nehmen kann. Auf den Intensivfeldern wurden während der Vegetationsperiode Pflanzenproben in drei Zonen genommen (sehr hoch, mittel, sehr niedrig). Mit ihnen wurden die Biomasseaufwüchse bestimmt und im Labor erfolgte die Untersuchung der Proben auf deren Nährstoffzusammensetzung, um letztlich die Nährstoffaufnahme bestimmen zu können. Zur Ernte wurden in drei Zonen die Erträge samt Rohproteinkonzentration erfasst sowie der Nmin-Gehalt nach Ernte bestimmt. Geplant war außerdem die Befahrung der Intensivfelder mit dem Leitfähigkeitsmessgerät »Geophilus«, welche jedoch aufgrund anhaltender Trockenheit nicht durchgeführt werden konnte. Tabelle 3 zeigt die durchgeführten Untersuchungen.

**Tabelle 3:Übersicht über die Untersuchungen, die auf den Feldern durchgeführt wurden**

Untersuchungszeitpunkt	Intensivuntersuchung in 0-90 cm Bodentiefe; ein Feld je Betrieb	Standarduntersuchung in 0-60 cm Bodentiefe; zwei Felder je Betrieb
Vegetationsbeginn	<ul style="list-style-type: none"> <li>- N<sub>min</sub>- und Wassergehalt</li> <li>- pH-Wert, Grundnährstoffe</li> <li>- C:N-Verhältnis</li> <li>- Phosphor-Freisetzungsrate</li> <li>- Bodenart</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- N<sub>min</sub>- und Wassergehalt</li> <li>- pH-Wert, Grundnährstoffe</li> <li>- C:N-Verhältnis</li> <li>- Phosphor-Freisetzungsrate</li> <li>- Bodenart</li> </ul>
Vegetationsbeginn	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklung der Bodenfeuchte in drei Zonen (sehr hoch, mittel, sehr niedrig)</li> <li>- komplexe Pflanzenanalyse in drei Zonen (sehr hoch, mittel, sehr niedrig)</li> </ul>	
Ernte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung des Ertrages und des Proteingehaltes in drei Zonen (sehr hoch, mittel, sehr niedrig)</li> <li>- N<sub>min</sub>-Gehalt nach der Ernte</li> </ul>	

### 3.3.1 Erstellung der Referenz-Ertragspotentialkarte – QGIS

Zur Validierung der verschiedenen Ertragspotentialkarten wurde eine solche mit OpenSource Software erstellt. Dadurch war es möglich, alle Parameter eigenständig zu beeinflussen, wie zum Beispiel die Auswahl der Satellitenaufnahmen. Dazu wurde auf die vom Copernicus Projekt<sup>1</sup> zur Verfügung gestellten Aufnahmen der Sentinel-2 Satelliten zugegriffen, welche nicht vorgefiltert werden. Damit standen alle Aufnahmen zur Verfügung, die dieser Satellit tätigte. Es wurde eine »Musterkarte« erstellt, welche keine Störgrößen enthält, hoch aufgelöst und frei von Algorithmen ist, die z. B. die einzelnen Zonen der Karte glätten, um sie »schöner« darstellen zu können.

Zur Berechnung der Ertragspotentialkarte wurde das Programm QGIS, Version 3.28, mit dem Plugin Semi-Automatic Classification (Congedo, 2016), genutzt. Tabelle 4 zeigt die verwendeten Aufnahmedaten des Sentinel-2 Satelliten. Dargestellt sind auch die jeweiligen Hauptfrüchte je Feld, die im entsprechenden Jahr wuchsen und deren Abreifebild letztlich verwendet wurde. Da der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), der wohl am häufigste genutzte Vegetationsindex (Huang, et al., 2021) ist, wurde sich für dessen Nutzung entschieden.

Die Formel zur Berechnung des NDVI, des Vegetationsindex, lautet nach (Tucker & Sellers, 1986):

$$NDVI = \frac{(NIR - rot)}{(NIR + rot)}$$

Mit  
 NIR = Nahinfrarot  
 rot = roter Spektralbereich

---

<sup>1</sup> <https://dataspace.copernicus.eu/browser>

Die Formel zur Berechnung des NDVI mit den Spektralbändern des Sentinel-2 Satelliten (European Space Agency) lautet:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{Band 8} - \text{Band 4})}{(\text{Band 8} + \text{Band 4})}$$

Mit den Wellenlängenbereichen

Band 8 = 832,8 ± 105 nm

Band 4 = 664,6 ± 30 nm

**Tabelle 4: Verwendete Aufnahmedaten des Sentinel-2-Satelliten**

Betrieb/Standort	Feld	verwendetes Datum	Hauptkultur
1: Torgau	Intensivfeld	16.08.2022 21.09.2019	Mais Zuckerrüben
	Feld 2	17.06.2022 25.08.2019 08.06.2018	Weizen Mais Weizen
	Feld 3	17.06.2022 25.08.2019 06.06.2018	Weizen Mais Weizen
2: Riesa	Intensivfeld	15.06.2022 12.06.2020 26.06.2019 08.06.2018	Luzernegras Hafer Dinkel Hafer
	Feld 2	15.06.2022 26.06.2019 06.06.2018	Dinkel Hafer Dinkel
	Feld 3	15.06.2022 12.06.2020 26.06.2019 08.06.2018	Winterraps Luzerne Luzerne Hafer
3: Zwickau	Intensivfeld	11.08.2022 13.06.2019 03.07.2018	Silomais Wintergerste Silomais
	Feld 2	27.06.2022 26.06.2019	Winterweizen Hafer
	Feld 3	30.06.2022 01.07.2018	Winterraps Winterroggen

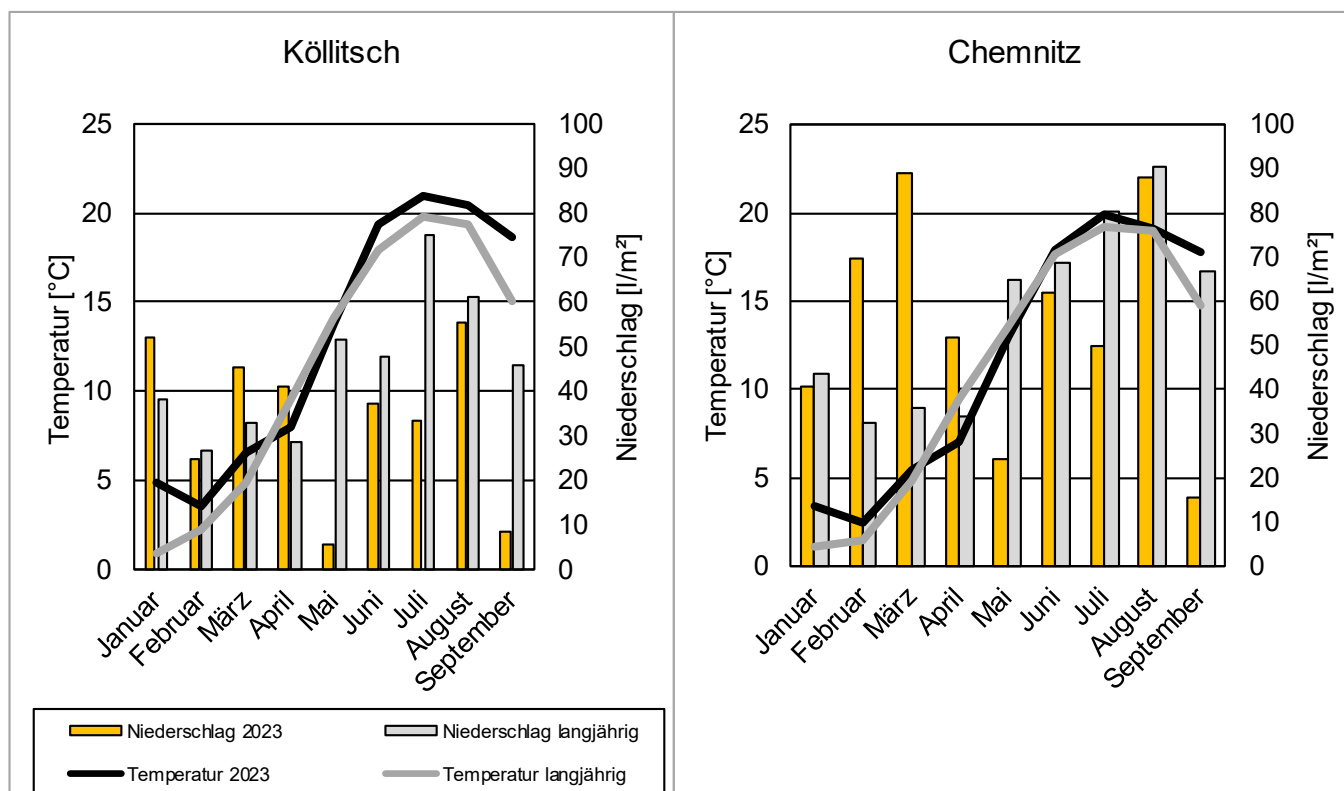
Über die Internetseite des Copernicus Projektes<sup>2</sup> erfolgte eine Auswahl der Einzelbilder. Dies ermöglichte einerseits die Identifikation eines Satellitenbildes zum Zeitpunkt der Abreife der Hauptfrucht, andererseits den Ausschluss von Satellitenbildern, die z. B. durch Wolkeneinfluss unbrauchbar sind. Wurde ein passendes Datum gefunden, folgte der Download der Satellitenbilder mit der Gis-Software QGIS, mit dem PlugIn Semi-Automatic Classification.

<sup>2</sup> <https://dataspace.copernicus.eu/browser>

Da für die Berechnung des NDVI lediglich die Bänder 4 (rot) und 8 (infrarot) des Sentinel-2 Satelliten benötigt werden, wurden nur diese heruntergeladen. Die räumliche Auflösung beträgt 10 m x 10 m, also 100 m<sup>2</sup>. Im Anschluss wurden die drei, bzw. in Ausnahmefällen zwei, Abreifebilder zusammengeführt und der mittlere NDVI, bestehend aus den NDVI-Daten der Einzeljahre, gebildet und prozentual zum Mittelwert berechnet.

### 3.4 Jahreswitterung

In beiden Gebieten (Nordsachsen; Köllitsch / Südsachsen; Chemnitz) fiel im Frühjahr 2023 mehr Niederschlag als im langjährigen Mittel. Vor allem der März und April waren in beiden Gebieten überdurchschnittlich feucht, bei mittlerer bzw. leicht unterdurchschnittlicher Durchschnittstemperatur. Während ab Juni die Temperatur, ebenfalls in beiden Gebieten, überdurchschnittlich war, fiel gleichzeitig deutlich weniger Niederschlag, wodurch der »Niederschlagsüberschuss« schnell aufgezehrt wurde und vermehrt Trockenstress bei den Pflanzen beobachtet werden konnte. Erst der August brachte erneut durchschnittliche Niederschlagsmengen mit 55 l/m<sup>2</sup> in Köllitsch und 88 l/m<sup>2</sup> in Chemnitz, wodurch sich die angespannte Bodenswassersituation zumindest kurzfristig entspannte (Abbildung 5).



Legende: Die Wetterstationen sind aufgrund ihrer räumlichen Nähe repräsentativ für die Untersuchungsfelder.

**Abbildung 5: Jahreswitterung 01.01.-30.09.2023 in Köllitsch und Chemnitz (Quelle: Agrarmeteorologisches Messnetz Sachsen)**



## 3.5 Bodenbeprobung

### 3.5.1 Festlegung der Beprobungspfade

Die Festlegung der Beprobungspfade erfolgte auf Grundlage der eigens erstellten Ertragspotentialkarten (Abbildung 6). Diese teilen die Felder in jeweils fünf Ertragszonen auf (sehr niedrig, niedrig, mittel, hoch, sehr hoch). Für die Gewinnung repräsentativer Bodenproben wurden Mischproben je Zone gezogen, die aus jeweils 15 Einzelproben bestanden. Diese Proben wurden im Anschluss homogenisiert und am gleichen Tag in den Laboren abgegeben.

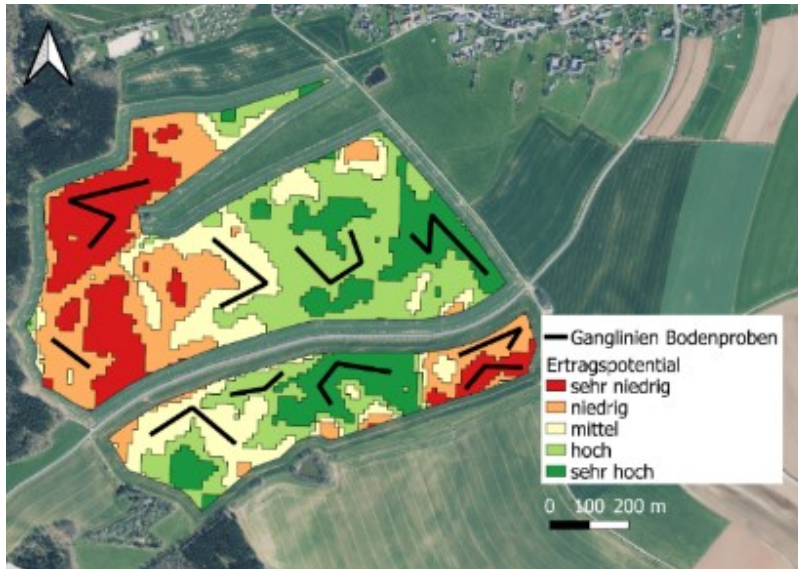


Abbildung 6: Pfade der Bodenbeprobung, hier am Standort 3 (Luftbild: GeoSN, dl-de/by-2-0)

### 3.5.2 Technische Durchführung der Bodenprobenahme

Die Bodenproben wurden am 01.03.2023 auf Standort 1 und 2 sowie am 28.03.2023 auf Standort 3 jeweils auf allen drei Feldern gezogen. Dafür kam das hydraulische Bodenprobeentnahmeggerät der Firma Bodenproben Peters, welches an einem Mitsubishi L200 befestigt war, zum Einsatz. Es wurden Proben in den Schichten 0–30 cm und 30–60 cm gezogen. Die auf den Intensivfeldern zusätzlich beprobte Schicht in 60–90 cm Bodentiefe wurde mit einem Pürckhauer Bohrstock entnommen. Dazu wurde der Bohrstock in die Entnahmelöcher der automatischen Bodenentnahme getrieben. Im Anschluss daran wurden alle Bodenproben sofort auf  $-18\text{ °C}$  tiefgekühlt und gelagert. Die Bodenproben wurden in das Analyselabor des Sächsischen Landeskontrollverbandes e. V. (LKV) geliefert und anschließend auf die Parameter, welche in Tabelle 3 aufgeführt sind, untersucht. Die Phosphorfreisetzungsrate wurde vom Labor AGROLAB Agrarzentrum GmbH in Leinefelde untersucht.

## 3.6 Untersuchungen im Vegetationsverlauf

### 3.6.1 Pflanzenanalyse

Die Pflanzenanalysen wurden auf dem Standort 1 zu BBCH 30 (20.04.2023) und auf den Standorten 2 und 3 zu BBCH 32 genommen (26., bzw. 27.04.2023). Dazu wurde ein  $0,25\text{ m}^2$  großer Zählrahmen viermal zufällig in den Pflanzenbestand geworfen und die Pflanzen entnommen. Im Anschluss wurde direkt auf dem Feld mit einer Zugwaage das Gewicht des geernteten Quadratmeters ermittelt. Die Analyse der Pflanzenproben auf Makro- und Mikronährstoffe («komplexe Pflanzenanalyse») erfolgte im Labor JenaBios GmbH mit Sitz in Jena.



### **3.6.2 Getreideernte**

Zur Getreideernte erfolgte die Ernte der Pflanzen nach der in Kapitel 3.6.1 beschriebenen Methodik. Geerntet wurden die Pflanzen am 13.07.2023 bei Standort 1 und 2 sowie am 09.08.2023 bei Standort 3. Zusätzlich erfassten alle Betriebe den Flächenertrag mit ihren jeweiligen Mähdreschern. Die Auswertung dieser Daten erfolgte in QGIS. Dazu wurden die eingegangenen Rohdaten bereinigt, indem Ertragswerte oberhalb von 12 t/ha sowie unterhalb von 2 t/ha entfernt wurden. Zusätzlich wurden alle Ertragspunkte des Vorgewendes entfernt sowie solche, die sich entlang von Hindernissen (z. B. Strommasten) befanden. Die bereinigten Daten wurden im Anschluss auf ein erzeugtes virtuelles Gitter mit Kantenlängen von 5x5 m projiziert und durch inverse Distanzgewichtung (IDW) auf eine Rastergröße von 10x10 m interpoliert. Dadurch konnten kleinräumige Schwankungen der Rohdaten ausgeglichen werden, welche nicht mehr manuell selektierbar waren.

## 4 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen auf den erwähnten Ackerschlägen vorgestellt. Dargestellt werden jeweils die für die Interpretation der Ergebnisse wichtigen Fakten. Neben den erstellten Potentialkarten dienen die im Labor von den Bodenproben ermittelten Wassergehalte zur Beurteilung der Bodenunterschiede. Ein Vergleich der Frühjahrswerte mit denen nach der Ernte soll Auskunft über die natürliche Wasserhaltefähigkeit geben, die im engen Zusammenhang mit der Ertragsfähigkeit (u. a. Ton-, Humusgehalt) in den jeweiligen Potentialzonen steht.

Auf Grundlage der Bodenuntersuchungen und Ertragserhebungen wurden die Potentialkarten der verschiedenen Anbieter auf ihre Plausibilität untersucht. Dadurch wurde die Eignung des jeweiligen Herstellers einschätzbar. Auf allen Feldern wurde der Nmin-Gehalt sowie der Feinbodenanteil und die P-Freisetzungsrate bestimmt.

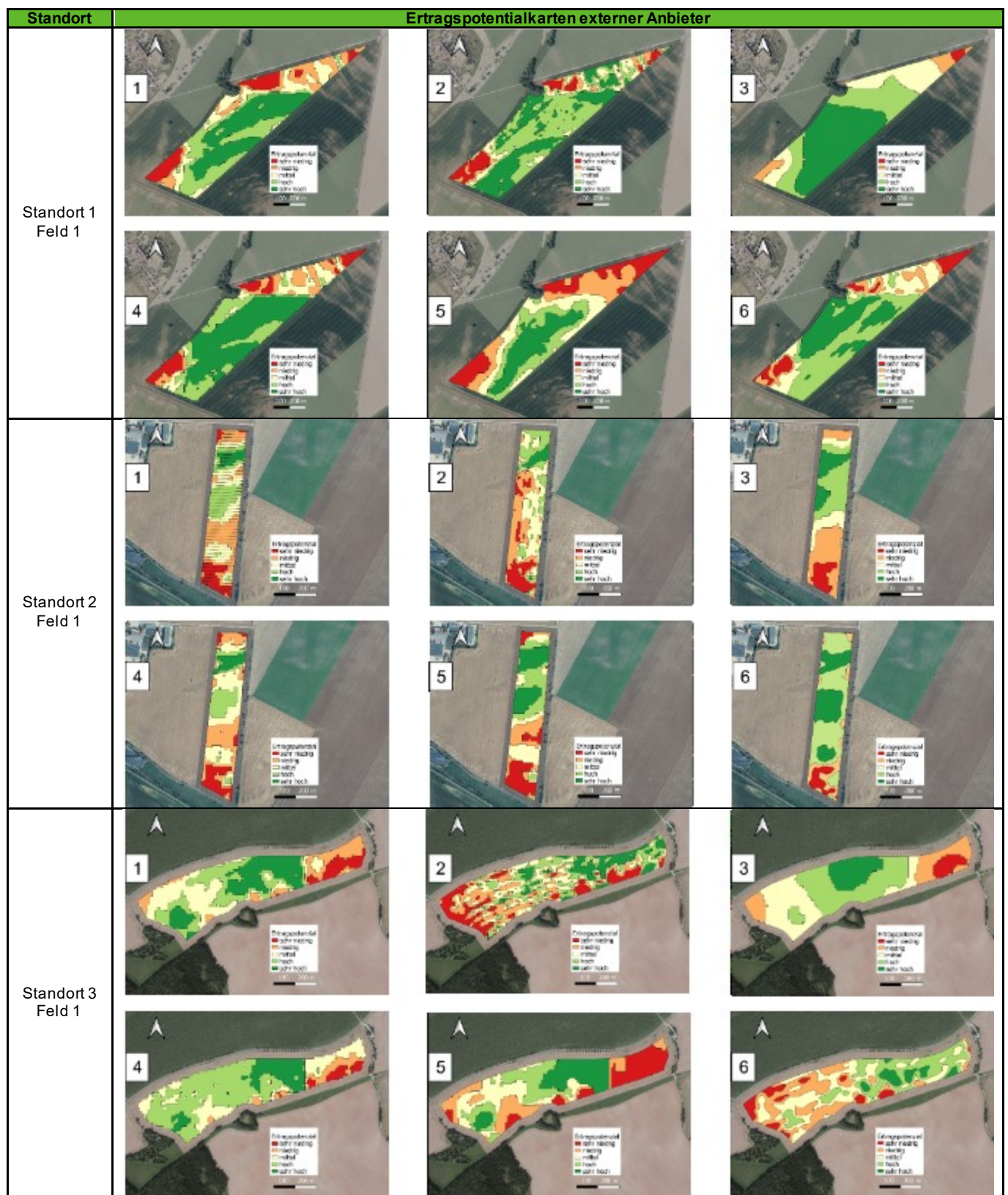
### 4.1 Ertragspotentialkarten der Anbieter und Plausibilität

Tabelle 5 zeigt die sechs Ertragspotentialkarten der unterschiedlichen Anbieter aller intensiv untersuchten Felder eines jeden Standortes. Betrachtet man Standort 1, ist auffällig, dass sich die Karten auf den ersten Blick zwar unterscheiden, die grundlegende Zonierung aber dennoch übereinstimmt. Gemeint sind dabei vor allem der Grenzbereich im nördlichen Teil des Feldes, wo die »hohe«, bzw. »sehr hohe« Zone von der »mittleren« bis »niedrigen« Zone abgelöst wird. Auch im südwestlichen Teil des Feldes erkennen alle Karten eine relativ niedrigere Ertragszone, während die Mitte des Feldes als ertragreich identifiziert wird.

#### 4.1.1 Validierung der Ertragspotentialkarte

Die Tabelle 6 zeigt die mit QGIS eigens erstellten Ertragspotentialkarten sowie die Abreifebilder (NDVI) des Jahres 2023. Betrachtet man die Ertragspotentialkarten und vergleicht sie mit denen der Tabelle 5 fällt auf, dass die eigens erstellte Karte zum Teil deutlich granularer ist als die der Anbieter. Dies liegt daran, dass die eigens erstellte Potentialkarte nicht durch Berechnungen geglättet oder verändert wurde. Hingegen weicht das Abreifebild, welches im Jahr 2023 zur Abreife der jeweiligen Hauptkultur erstellt wurde (Datum siehe Legende in Tabelle 6), stärker von der mehrjährigen Ertragspotentialkarte ab. Unter anderem ist dies durch jahresbedingte Effekte begründet, die durch die Verwendung mehrerer Bilder geglättet werden können. Zusätzlich sind Satellitenaufnahmen von der Bewölkung abhängig: stehen keine Aufnahmen von kurz vor der Ernte zur Verfügung, muss auf Aufnahmen ausgewichen werden, welche zu früheren Entwicklungsstadien aufgenommen worden. Je nach individuellem Fall kann dies zu Lasten der Detailgenauigkeit gehen. Dennoch zeigt sich über alle Standorte eine grundlegende Übereinstimmung der Zonen, was für die Validität der erstellten Ertragspotentialkarten spricht und diese untermauert.

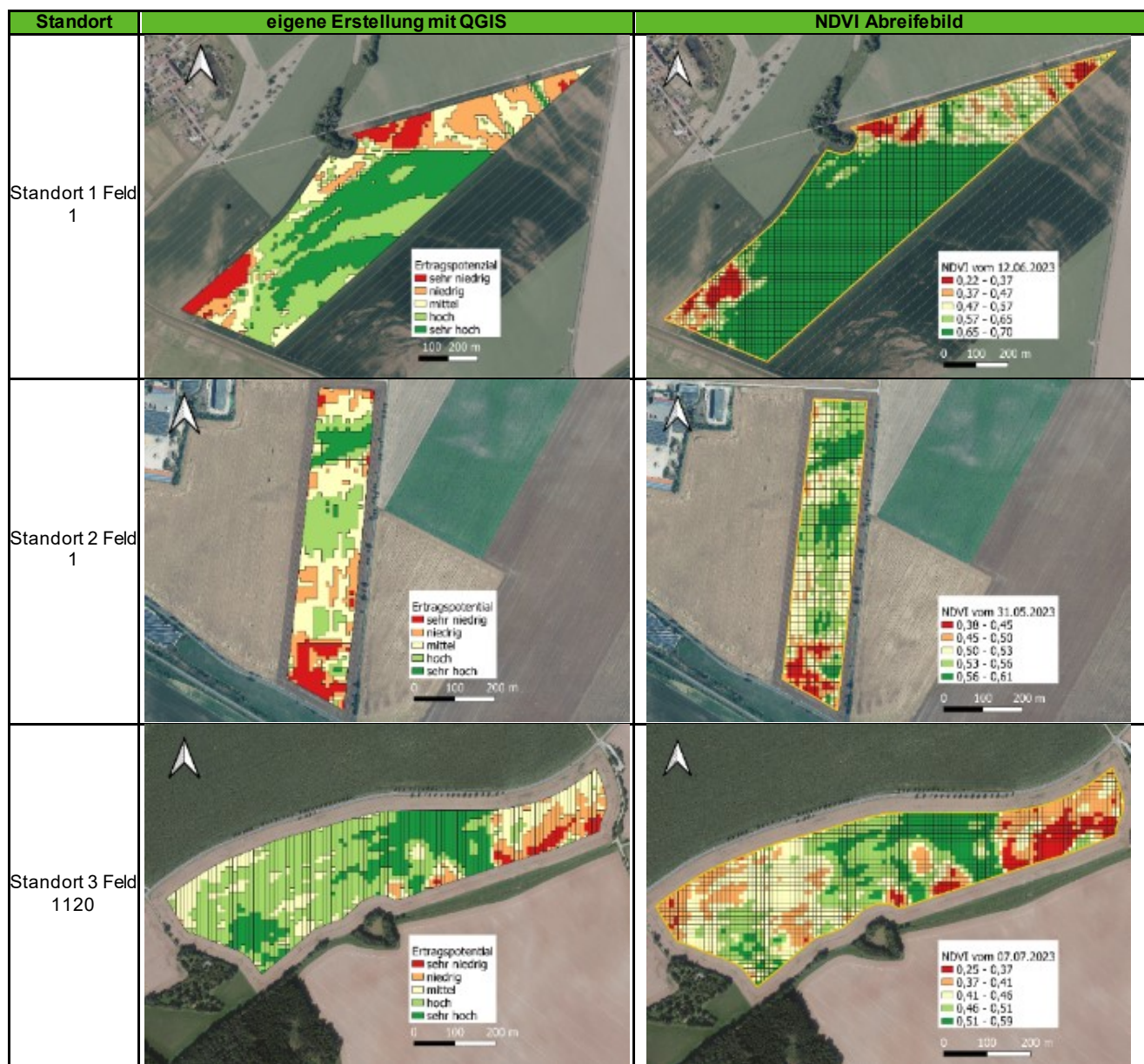
**Tabelle 5: Ertragspotentialkarten der Intensivfelder aller Anbieter aller Standorte**



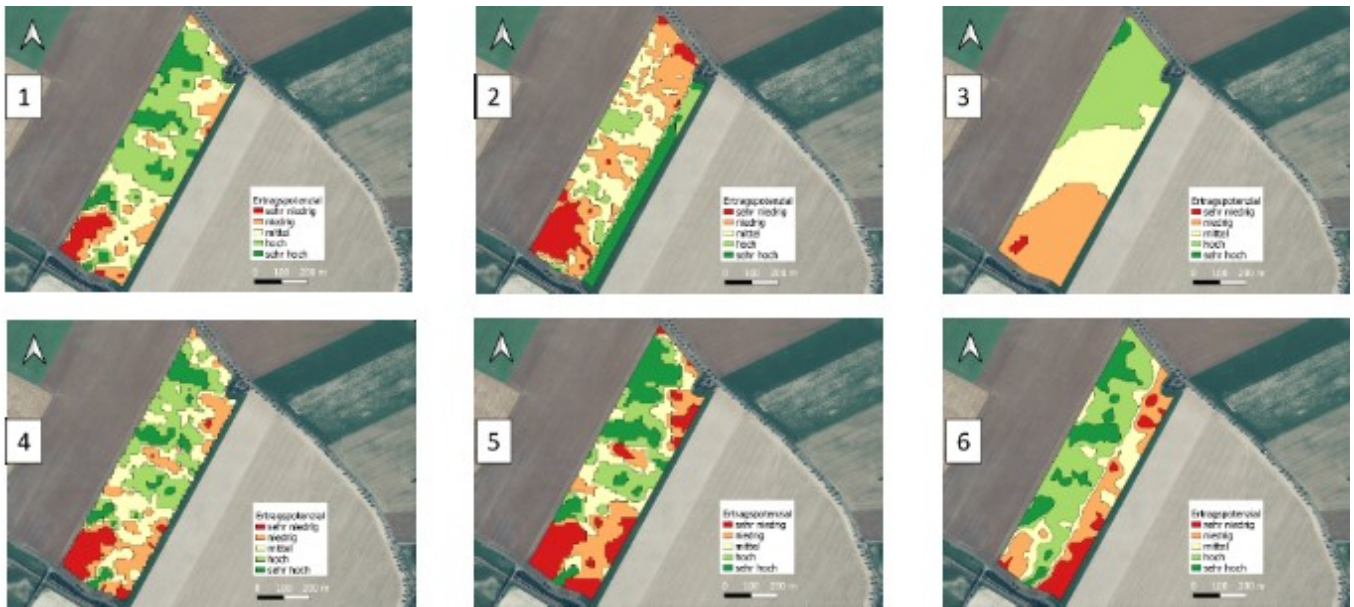
Legende: Die Zuordnung der Nummerierung der einzelnen Ertragspotentialkarten zum jeweiligen Anbieter ist in Tabelle 2 erläutert.



**Tabelle 6: Eigens erstellte Ertragspotentialkarten und Abreifebilder der Intensivfelder aller Standorte**

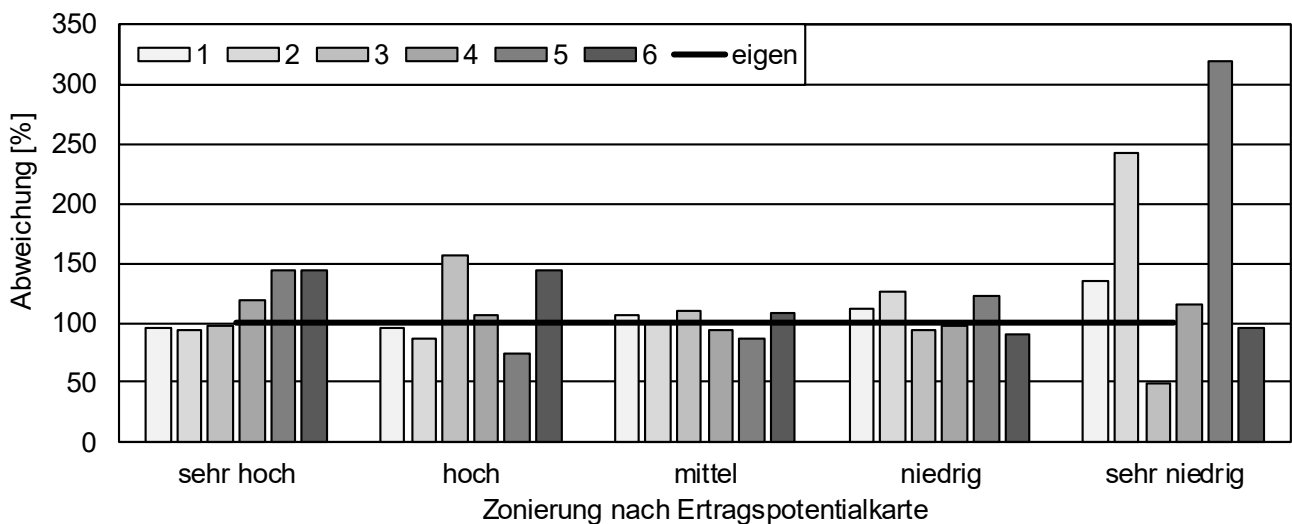


Die Ertragspotentialkarten der Felder, welche nach Standardmethoden untersucht wurden, sind in Tabelle A 2, Tabelle A 3 und Tabelle A 4 im Anhang dargestellt. Hervorzuheben ist vor allem Feld 2 des Standortes 2 (Abbildung 7). Auf diesem Feld wuchsen in der Vergangenheit zwei verschiedene Feldfrüchte. Zu sehen ist, dass manche Anbieter diese Satellitenbilder nicht aus ihren Betrachtungen ausschließen, wodurch unzulässige Karten erstellt werden. Besonders Anbieter 2 und Anbieter 6 fallen negativ auf (siehe Tabelle 2).



**Abbildung 7: Ertragspotentialkarten der Anbieter für Standort 1, Feld 2 (Luftbilder: GeoSN, di-de/by-2-0)**

Vergleicht man die Ertragspotentialkarten aller Anbieter miteinander und setzt sie mit den eigens erstellten Potentialkarten ins Verhältnis, erhält man einen Vergleich der Zonen (Abbildung 8). Damit kann nachvollzogen werden, wie stark die einzelnen Potentialzonen von der Referenzpotentialkarte abweichen. In Abbildung 8 sind die Potentialkarten aller Anbieter aggregiert, insgesamt 54 Ertragspotentialkarten (9 Felder; 6 Anbieter). Während bei Anbieter 1 und Anbieter 4 kaum Abweichungen von der Referenzpotentialkarte festzustellen sind, weichen im Mittel der 54 Potentialkarten Anbieter 2 und Anbieter 5 besonders stark ab. Sie überhöhen vor allem die sehr niedrigen Bereiche um 250, bzw. 300 %, womit die Potentialkarten dieser Anbieter die Felder besonders pessimistisch beurteilen. Hingegen ist der »sehr niedrige« Flächenanteil von Anbieter 3 um 50 % geringer als der der Referenzkarte, womit die Potentialkarte dieses Anbieters die Flächen zu optimistisch ausweist. Im Anhang (Abbildung A 1 bis Abbildung A 9) sind die einzelnen prozentualen Abweichungen der Ertragspotentialkarten für alle Felder dargestellt.



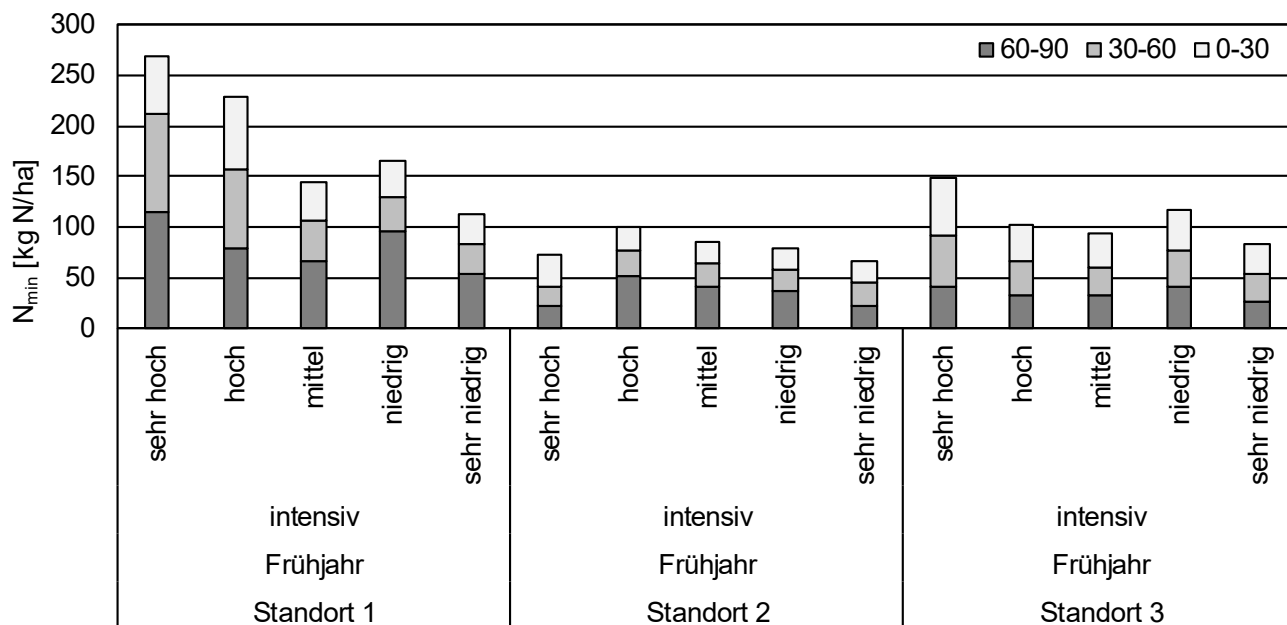
Legende: Die Anbieter sind als Nummern nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung 8: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Potentialkarte**

## 4.1.2 Ergebnisse der Bodenbeprobung

### 4.1.2.1 Mineralisierter Stickstoff im Frühjahr und nach der Ernte

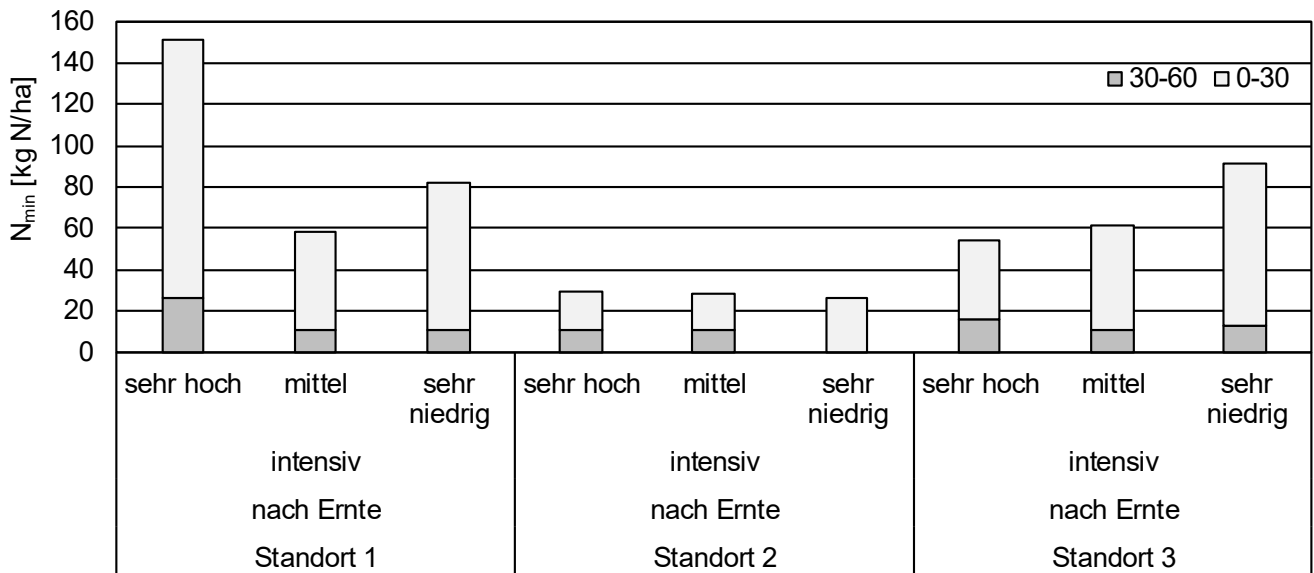
Die  $N_{\min}$ -Gehalte im Frühjahr für alle drei intensiv beprobten Felder werden in Abbildung 9 dargestellt. Auffällig ist, dass in allen Proben mit durchschnittlich 50 kg  $N_{\min}$ /ha verhältnismäßig viel Stickstoff in der tiefsten Bodenschicht (60–90 cm) gefunden wurde. Hingegen belaufen sich die mittleren  $N_{\min}$ -Gehalte auf 38, bzw. 37 kg  $N_{\min}$ /ha in den Schichten 30–60 cm sowie 0–30 cm. Der Verlauf des  $N_{\min}$ -Gehaltes je Zone variiert vor allem bei Standort 1. Auf diesem Standort konnten in der Zone »sehr hoch« ca. 260 kg  $N_{\min}$ /ha im gesamten Bodenprofil gefunden werden, wohingegen dieser Wert über alle Zonen kontinuierlich bis zur niedrigsten Zone »sehr niedrig« auf ca. 110 kg  $N_{\min}$ /ha abnahm. Diese Abnahme des  $N_{\min}$ -Gehaltes konnte auf den beiden anderen Standorten nicht gefunden werden.



Legende: Bodentiefen in cm

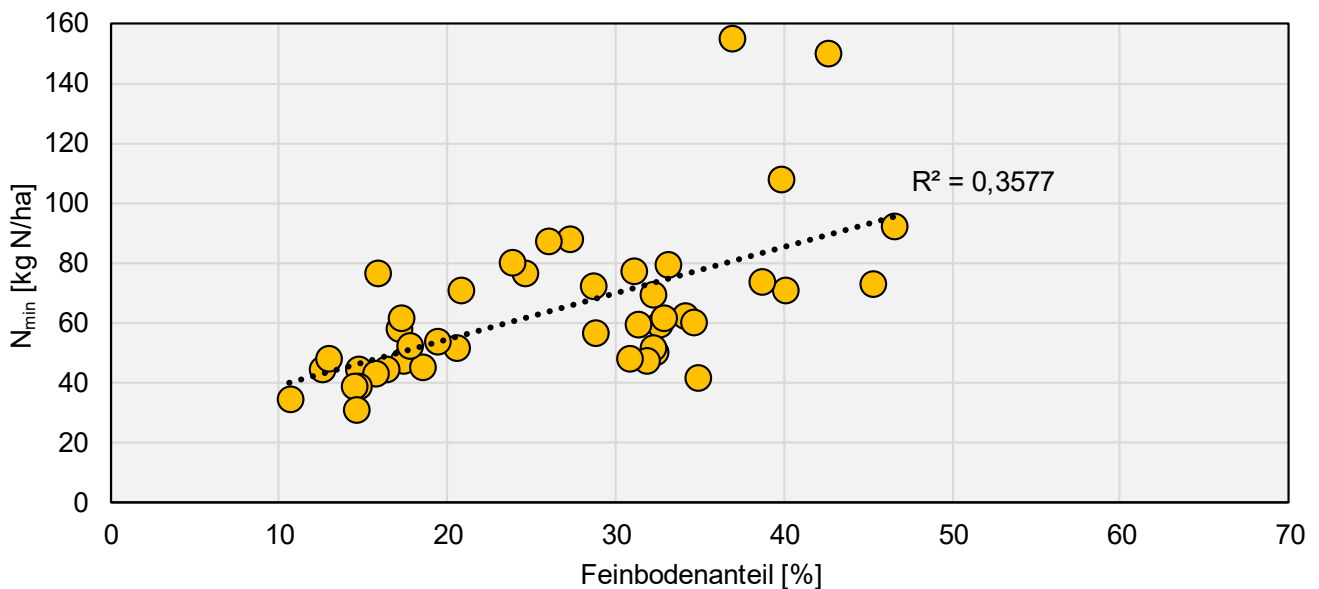
**Abbildung 9:**  $N_{\min}$ -Gehalt je Zone im Frühjahr für die intensiv beprobten Felder

Ein ähnliches Bild zeigte sich bei den  $N_{\min}$ -Gehalten nach der Getreideernte (Abbildung 10). Auf Standort 1 fand sich eine ähnliche Abstufung wie im Frühjahr. In Zone »sehr hoch« konnten in 0–60 cm Bodentiefe ca. 150 kg  $N_{\min}$ /ha gefunden werden, was darauf schließen lässt, dass das Potential, die Düngung in dieser Zone zu reduzieren, erheblich ist. Auf allen Feldern der intensiven Beprobung konnte außerdem ein erhöhter Gehalt des  $N_{\min}$  in der niedrigsten Zone festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass in dieser Zone der gedüngte Stickstoff nicht durch Ertrag der Hauptkultur entzogen werden konnte und sich somit weiterhin im Bodenprofil findet und somit anfällig für Auswaschungsverluste ist. Eine Übersicht über die  $N_{\min}$ -Gehalte der nach Standarduntersuchungen beprobten Felder (aggregiert nach Standorten) bietet Abbildung A 10 im Anhang.



Legende: Bodentiefen in cm. die Bodenprobe in 30-60 cm Bodentiefe in der Zone »sehr niedrig« des Standortes 2 konnte aufgrund von Trockenheit und Steinigkeit nicht entnommen werden .

**Abbildung 10: N<sub>min</sub>-Gehalt je Zone nach der Ernte für die intensiv bebauten Felder** Insgesamt konnte ein mit  $R^2 = 0,36$  ( $r = 0,6$ ) Zusammenhang zwischen dem Feinbodenanteil (Feinschluff + Ton) und dem N<sub>min</sub>-Gehalt gefunden werden (Abbildung 11). Das Ergebnis zeigt, dass die Zonen der Ertragspotentialekarte unterschiedliche Bodenarten repräsentieren. Tauchnitz et al. (2022) finden bei höherem Feinanteil höhere Gehalte heißwasserlöslichen Stickstoffs und beschreiben einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem genannten Parameter und N<sub>min</sub>-Gehalt ( $r = 0,675$ ,  $p < 0,001$ ).



**Abbildung 11: N<sub>min</sub>-Gehalt in Abhängigkeit des Feinbodenteils**

#### 4.1.2.2 Grundnährstoffuntersuchung und weitere Bodenproben

Die Ergebnisse der Grundnährstoffuntersuchungen werden in Tabelle 7 dargestellt. Sie geben die aggregierten Werte je Standort wieder, jeweils als Mittel für alle drei Felder. Auffällig ist, dass mit den Ertragszonen nach der Referenzpotentialkarte die Bodenwassergehalte gut vorhergesagt werden konnten. Unter anderem dürfte dies durch die Erstellungsmethodik der Ertragspotentialkarte begründet sein, da Satellitenbilder zum Zeitpunkt der Abreife der Hauptkultur verwendet werden, vornehmlich in Trockenjahren. Damit einher geht, dass die »niedrigeren« Ertragszonen vor allem durch einen Mangel an Bodenwasser eher abreifen als die »höheren« Ertragszonen.

Eine Abstufung der Ergebnisse, ausgehend von der Zone »sehr hoch« bis zur Zone »sehr niedrig« ist auch bei Betrachtung der drei Grundnährstoffe sowie beim Feinbodenanteil sowie  $C_{org}$  und  $N_t$ , erkennbar. Vor allem die Magnesiumkonzentration nimmt mit abnehmendem Feinbodenanteil ab. Hingegen nehmen die Konzentrationen von Phosphor sowie Kalium in gleichem Maße zu, verlaufen also konträr. Dies spricht dafür, dass sich die Erträge mit abnehmenden Ertragspotential verringern und sich diese beiden Nährstoffe anreichern, zumindest solange sie gleichmäßig dem Feld als Düngung zugeführt werden. Der Magnesiumgehalt zeigt zwar prinzipiell den bereits beschriebenen Zusammenhang zum Feinanteil des Bodens, dieser ist jedoch konträr zu dem des Kalium, obwohl beide Ionen der Nährstoffe positiv geladen sind und sich damit an die Austauscher des Bodens binden. Die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen, aufgeführt für die Bodentiefen 0–30 cm und 30–60 cm, finden sich in Tabelle A 5 im Anhang.

Die enge Korrelation zwischen der Ertragszone und dem Bodenwasser zieht sich dabei bis zur Ernte fort (nicht dargestellt). Nach der Ernte konnte auf allen drei intensiv untersuchten Feldern eine Abstufung nach Ertragszone ermittelt werden, in gleichem Maße wie zum Vegetationsbeginn (Tabelle 7). Dennoch ist aufgrund der Witterung des Sommers 2023 eine Überlagerung der Ergebnisse durch eintretende Niederschläge nicht auszuschließen.

Kein Zusammenhang zwischen den Probepunkten konnte indes mit der Phosphor-Freisetzungsrates gefunden werden. Zwar kann eine Abstufung nach Ertragszone beobachtet werden, diese ist jedoch in erster Linie durch die Phosphorkonzentration bedingt ( $R^2 = 0,52$ ).

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die einzelnen Bodenarten mit der erstellten Ertragspotentialkarte korrekt vorhergesagt wurden und damit einhergehend ebenso die unterschiedlichen relativen Ertragszonen.

#### 4.1.2.3 Beziehungen zwischen den Ergebnissen und den Ertragszonen

Die bereits im Kapitel 4.1.2.2 angesprochenen Beziehungen einzelner Parameter zueinander lassen sich statistisch absichern. Die Abbildung A 11 im Anhang stellt eine Korrelationsmatrix dar, in der die Korrelationen nach Pearson über alle Ergebnisse der Bodenproben geprüft wurden. Die Zonierung der Ertragspotentialkarte, die über den Faktor »Probepunkte« wiedergegeben wird, korreliert signifikant mit dem Wassergehalt, dem  $N_{min}$ -Gehalt,  $N_t$ ,  $S_{min}$ , dem Feinbodenanteil, der Magnesiumkonzentration und dem organischen Kohlenstoff in genannter Reihenfolge. Die Vorhersagegüte des Wassergehaltes ist damit am größten und sehr sicher. Zwar ist die Beziehung zwischen den Ertragszonen mit dem  $N_{min}$ -Gehalt und dem Feinbodenanteil gesichert, mit  $r = -0,3$  jedoch in beiden Fällen eher gering. Auf der anderen Seite korrelieren Wassergehalt und Feinbodenanteil mit  $r = 0,55$  ( $p < 0,001$ ) und auch der  $N_{min}$ -Gehalt steigt mit zunehmendem Wassergehalt ( $r = 0,41$ ,  $p < 0,001$ ). Wichtige ertragsbeeinflussende Faktoren können daher mit einer Ertragspotentialkarte vorhergesagt werden.



Damit eignen sich Ertragspotentialkarten, die nach der beschriebenen Methodik erstellt werden, vornehmlich für Standorte auf denen die Pflanzen aufgrund von Wassermangel vorzeitig abreifen. Auf Standorten mit gesicherterer Wasserversorgung hingegen reduziert sich unweigerlich die Güte der Potentialkarten, bzw. steigt die notwendige Gewissenhaftigkeit bei der Auswahl entsprechender Satellitenbilder.

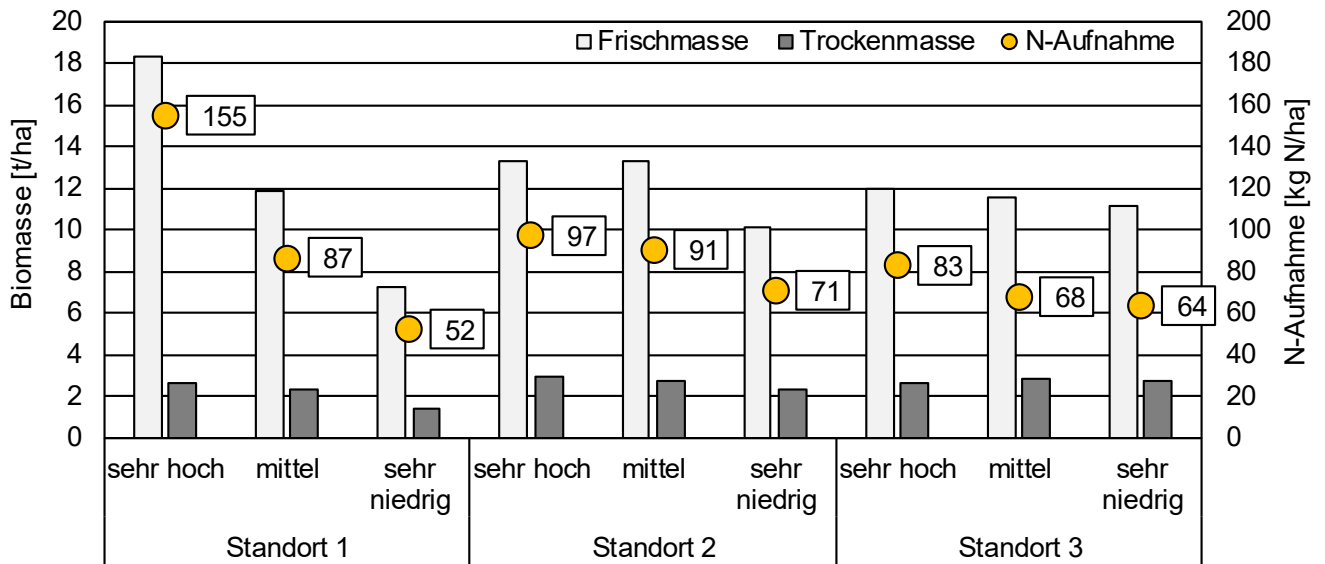
**Tabelle 7: Ergebnisse der Grundnährstoffuntersuchungen in 0-30 cm Bodentiefe**

Ort	Zone	H <sub>2</sub> O [Vol.-%]	P-Freisetzungsrate [ $\mu\text{g P}/(\text{kg} \times \text{min})$ ]	pH	P (CAL) [mg/100g Boden]	K (CAL) [mg/100g Boden]	Mg (CaCl <sub>2</sub> ) [mg/100g Boden]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>t</sub> [%]	C:N	FAT [%]
1	sehr hoch	21,2	743	6,4	5,6	11,2	18,2	2,27	0,15	15,2	36
	hoch	19,8	765	6,5	5,4	10,5	16,3	2,10	0,14	15,0	37
	mittel	15,8	932	6,6	5,8	11,2	14,3	1,72	0,11	15,4	32
	niedrig	16,7	1.059	6,6	7,2	11,2	12,9	1,50	0,10	15,3	26
	sehr niedrig	12,2	1.181	6,4	7,2	13,7	9,8	1,15	0,08	15,3	19
2	sehr hoch	16,5	653	6,4	4,9	14,3	9,2	1,20	0,08	15,7	18
	hoch	16,3	631	6,1	2,5	11,4	10,2	1,33	0,08	16,4	18
	mittel	14,1	460	6,1	2,6	11,3	8,9	1,10	0,07	17,1	16
	niedrig	15,0	620	6,5	4,7	16,2	10,3	1,38	0,08	17,3	15
	sehr niedrig	11,9	326	6,3	2,5	8,1	7,7	1,08	0,07	16,7	13
3	sehr hoch	19,5	648	6,6	5,1	7,4	20,9	2,13	0,14	15,0	35
	hoch	18,2	693	6,6	4,1	8,7	19,6	2,73	0,15	18,0	31
	mittel	16,7	538	6,4	3,3	8,1	15,4	1,90	0,13	14,8	34
	niedrig	16,7	838	6,3	5,9	12,8	16,8	2,33	0,15	16,0	32
	sehr niedrig	16,5	1.065	6,1	3,3	7,6	17,9	1,78	0,12	14,3	34

Legende: Die Daten sind aggregiert über alle Felder und wiedergegeben auf Ebene des Standortes. Je Faktor wird der Mittelwert aus n = 3 Feldern ausgegeben. P = Phosphor; K = Kalium; Mg = Magnesium; CAL = Calcium-Acetat-Lactat-Methode; CaCl<sub>2</sub> = Methode mit Calciumchlorid; C<sub>org</sub> = organischer Kohlenstoff; N<sub>t</sub> = Gesamtstickstoff; FAT = Feinbodenanteil aus Feinschluff plus Ton

#### 4.1.3 Pflanzenschnitte während der Vegetationsperiode

Die Ergebnisse der nach Abschnitt 3.6.1 durchgeführten Pflanzenanalysen sind in Abbildung 12 aufgeführt. Entnommen wurden Pflanzenproben in drei Zonen je intensiv untersuchtem Feld eines jeden Standortes auf einem Quadratmeter. Während die Trockenmasse kaum Variation erkennen ließen, unterschied sich die gebildete Frischmasse erheblich, stets in Abhängigkeit von der Potentialzone. So bildete der Weizen von Standort 1 in der Zone »sehr hoch« beachtliche 18 t/ha Frischmasse bei einer N-Aufnahme von 155 kg N/ha. Hingegen bildete der Weizen in der Zone »sehr niedrig« ca. 7 t/ha Frischmasse bei 52 kg N/ha. Diese Abstufung zieht sich über alle Standorte hinweg, wenn auch weniger stark ausgeprägt.



**Abbildung 12: Biomassen und N-Aufnahme der Hauptkulturen der intensiv untersuchten Felder zu Beginn des Schossens**

Die Ergebnisse der komplexen Pflanzenanalyse sind in Abbildung A 12, Abbildung A 13 und Abbildung A 14 im Anhang dargestellt. Die Abstufungen nach Ertragszone, die in Abbildung 12 gefunden wurden, konnten bei der Betrachtung der Makro- und Mikroelemente nicht festgestellt werden.

Bei den Kornerträgen zeigte sich der Einfluss des Feinbodenteils und damit der Bodenart erneut (Tabelle 8). Je größer die Körnung der Bodenart wurde, desto geringer wurde nicht nur der Kornertrag, sondern auch die Proteinkonzentration des Korns. Begründet werden kann dieser Zusammenhang mit dem Verdünnungseffekt der Proteinkonzentration bei hohen Erträgen. In der Zone »sehr niedrig« konnte nur ein vergleichsweise geringer Kornertrag erzielt werden, weswegen die Proteinkonzentrationen höher sind. Mit Ausnahme des dritten Standortes führt der niedrigere Kornertrag in der niedrigsten Zone auch zu geringen Korn-N-Entzügen. So lag der Korn-N-Entzug in der »schlechtesten« Zone um ca. 50 kg N/ha bei Standort 1, bzw. ca. 30 kg N/ha bei Standort 2, unter dem der »besten« Zone.

Bei einzelner Betrachtung der Felder konnten stets hohe Korrelationen zwischen den Ertragszonen und den Kornerträgen gefunden werden (Mittel:  $r = 0,9$ ). Werden die Felder jedoch aggregiert, verringert sich die Beziehung zwischen Ertragszone und Kornertrag auf  $r = 0,35$ . Die Beziehung zwischen dem Feinanteil des Bodens und dem Ertrag bleibt jedoch stabil über beide Aggregationsebenen bei ca.  $r = 0,8$  bis  $r = 0,9$  (Anhang, Abbildung A 15). Diese Stabilität deutet darauf hin, dass der Feinbodenanteil der robustere Parameter zur Ertragsprognose ist, vor allem überregional über verschiedene Naturräume. Hingegen können Potentialkarten auf Feldebene die relativen Ertragsunterschiede präzise vorhersagen.

Auch hier ist dieser Unterschied vor allem in der Erstellungsmethodik der Potentialkarten begründet. Wie in Abbildung A 11 im Anhang dargestellt, gibt es eine enge Beziehung zwischen den Ertragszonen und dem Wassergehalt, da mit den aufgenommenen Abreifebildern der Versorgungszustand der Pflanzen mit Wasser wiedergegeben wird. Auf mit ausreichend Wasser versorgten Standorten nimmt daher die Präzision von Potentialkarten unweigerlich ab.

**Tabelle 8:Kornertrag, Proteingehalt im Korn und -N-Entzug je Ertragszone und Standort**

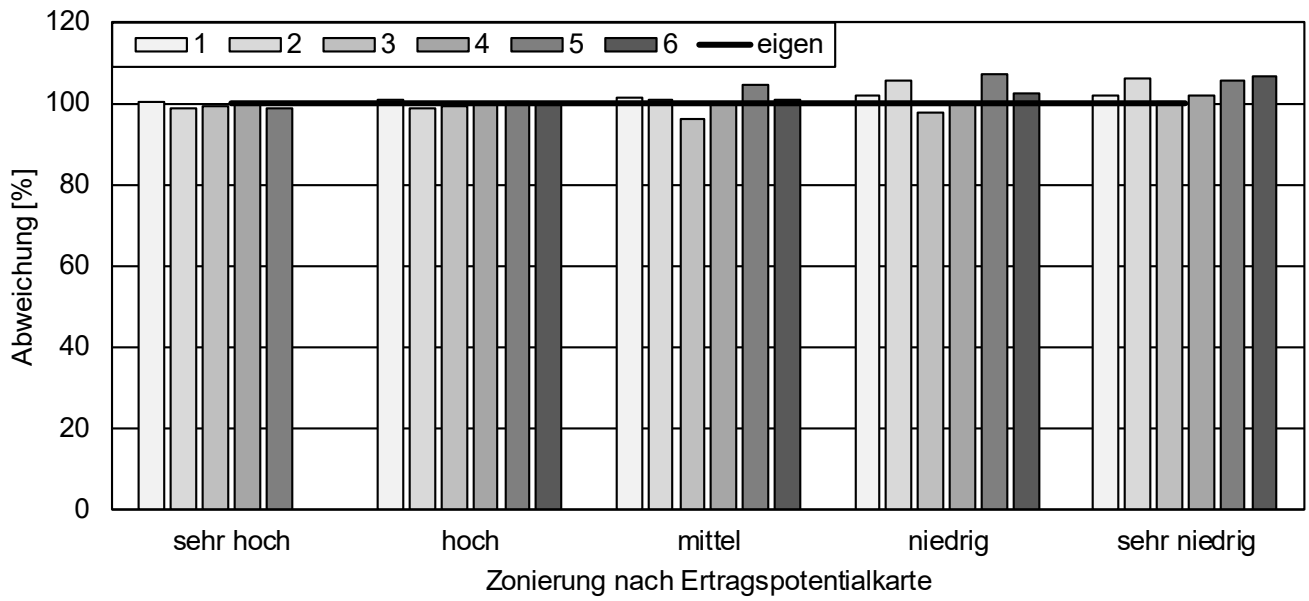
Ort	Ertragszone	FAT [%]	Kornertrag [dt/ha]	Kornprotein [%]	Korn-N-Entzug [kg N/ha]
Standort 1	sehr hoch	37	77	14,4	167
	mittel	33	54	13,0	106
	sehr niedrig	17	44	17,0	112
Standort 2	sehr hoch	20	55	10,0	83
	mittel	16	33	10,1	50
	sehr niedrig	13	33	10,3	51
Standort 3	sehr hoch	40	114	13,2	228
	mittel	34	97	13,1	191
	sehr niedrig	29	97	15,1	221

Legende: FAT = Feinbodenanteil aus Feinschluff plus Ton

#### 4.1.4 Kornertrag und Vorhersagegenauigkeit der Anbieter von Ertragspotentialkarten

Während die Zonen der Ertragspotentialkarte je nach Anbieter unterschiedlich stark von der Referenzpotentialkarte abweichen (Kapitel 4.1.1; Abbildung 8), kann eine solche Abweichung bei der Bewertung der Vorhersagegenauigkeit des Ertrages nicht wiedergefunden werden (Abbildung 13 und Abbildung A 16, Abbildung A 17, Abbildung A 18 im Anhang). Dazu wurden die Potentialkarten der Anbieter auf die Ertragskartierungen der jeweils drei intensiv untersuchten Felder projiziert (Kapitel 3.6.2). Im Anschluss wurde der mittlere Ertrag je Potentialzone gebildet und dieser in Bezug zu dem der Referenzpotentialkarte gesetzt. Zu sehen ist die mittlere Abweichung der Erträge von der Referenzpotentialkarte, nachdem sie in die Zonen, die sich durch die unterschiedlichen Anbieter ergeben (Abbildung 13) eingeteilt wurden. Die Abweichung der reinen Zonen findet sich also bei den Erträgen nicht wieder. Dies deutet darauf hin, dass die Zoneneinteilung, trotz Abweichungen, bei allen getesteten Anbietern von solider Qualität ist. Das zeigt sich auch an den visuellen Unterschieden der Ertragspotentialkarten, dargestellt in Tabelle 5, Tabelle 6 sowie in Tabelle A 2, Tabelle A 3 und Tabelle A 4 im Anhang. Zwar unterscheiden sich die Potentialkarten der Anbieter vor allem in der detaillierteren Einteilung in fünf Potentialzonen von der Referenzpotentialkarte. Jedoch stimmt die grundlegende Zonierung der Potentialkarten aller Anbieter, eingeteilt in überdurchschnittlich, durchschnittlich und unterdurchschnittlich, mit der Referenzpotentialkarte überein.

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass eine Einteilung in fünf Potentialzonen das jeweilige Feld in zu kleine Teilstücke unterteilen könnte und die Varianz zwischen ihnen zu klein wird. Dies ist umso eher der Fall, je gesicherter die Wasserversorgung eines Standortes (z. B. Standort 3) oder je homogener der Standort ist.



**Abbildung 13: Relative Abweichung der Vorhersagegenauigkeit des Ertrages aller Ertragspotentialkarten von der Referenzpotentialkarte (n = 3)**

## 5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die erhobenen Daten zeigen, dass die Referenzpotentialkarte vor allem die kleinräumige Wasserhaltefähigkeit eines Standortes sicher anzeigen kann. Dies ist durch die Erstellungsmethodik begründet, mit welcher ein Vegetationsindex das Pflanzenwachstum zum Zeitpunkt der Abreife beschreibt. Indirekt können dadurch auch Korrelationen mit dem Feinbodenanteil, dem Nmin-Gehalt und weiteren relevanten Parametern gefunden werden.

Nachdem die Ertragspotentialkarten von sechs Anbietern mit der Referenzpotentialkarte verglichen wurden, konnte festgestellt werden, dass die Abweichung der definierten Potentialzonen von denen der Referenzpotentialzone teilweise erheblich ist (Abbildung 8) (Anbieter 2, 3, 5). Damit können die wahren Grenzen der (Boden-)Unterschiede eines Feldes nur fehlerhaft dargestellt werden, wodurch sich die Präzision der gesamten Karte verringert. In diesen Fällen muss eine geringe Zoneneinteilung, z. B. Definition von drei Potentialzonen, gewählt werden, damit Ungenauigkeiten an den Durchschnitt des Gesamtfeldes angeglichen werden können. Wird z. B. die Entnahme von Grundbodenproben nach solchen fehlerhaften Karten geplant, kommt es zu erheblichen Abweichungen der Ergebnisse. In diesen Fällen muss dringend eine Ertragspotentialkarte mit hoher Präzision verwendet werden.

Konträr zu den Abweichungen der Potentialzonen zeigt sich die Auswertung der Erträge nach Potentialkarten (Abbildung 13). Während die Zonen teilweise erheblich abweichen, schwanken die Erträge nur ca. 5–10 %. Damit konnten die Potentialkarten aller Anbieter die jeweiligen relativen Ertragsunterschiede präzise vorher-sagen. Ein Grund dafür dürfte vor allem in der Größe der Felder liegen: Mit der in diesem Projekt durchschnittlichen Feldgröße von 38 ha werden die einzelnen Potentialzonen, welche aus der teilweise unpräzisen Einteilung der Felder entstanden sind, gewissermaßen auf den Durchschnitt geglättet, da kleinräumig fehlerhafte Zoneneinteilungen das Gesamtergebnis relativ weniger stark beeinflussen können. Je kleiner also das entsprechende Feld ist, desto präziser muss die Potentialkarte die realen Heterogenitäten eines Feldes wieder-spiegeln.

Die Attraktivität dieser Potentialkarten für den Nutzer liegt zum einem in ihrer Beständigkeit: Werden sie einmal valide erhoben und repräsentieren stabile Bodenunterschiede, können sie über einen langen Zeitraum (10 Jahre und mehr) von der Landwirtin, bzw. dem Landwirt, für die teilflächenspezifische Feldbewirtschaftung verwendet werden. Zum andern in der Vielseitigkeit der Nutzung, zum Beispiel für die Steuerung der Aussaatmenge, für die Planung der Grundbodenbeprobung oder als Basiskarte für eine »Map-Overlay« bei der Düngung mit Stickstoffsensoren.

Weiterer Forschungsbedarf besteht unter anderem in der Definition der Klassifizierung der Zonen, indem die Varianz zwischen den einzelnen Zonen festgelegt wird, um eine objektive und im besten Fall automatische Klassifikation der Potentialzonen vornehmen zu können. Darauf aufbauend könnte man auch objektive Aussagen darüber treffen, ob Flächen so heterogen sind, dass sich eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung lohnt oder nicht. Es sollte zudem weiter nach standortangepassten, kleinräumigen und umsetzbaren Empfehlungen z. B. zu Düngung, Wachstumsreglereinsatz oder Aussaatmenge auf Basis von Ertragspotentialkarten geforscht werden. Dazu gehört auch die Anlage von Steigerungsversuchen, um z. B. das Düngungsoptimum zu definieren. Weiterhin braucht es aber auch Anstrengungen, die z. B. die Hürden der letzten Meile oder 'wie bekomme ich die Karte auf meine Technik', abzubauen. Im Zuge dessen sollten sowohl die Umweltauswirkungen als auch die Ökonomie der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung in den Fokus rücken, vornehmlich durch Beschreibung kleinräumiger N-Salden, Treibhausgasbilanzen und betriebswirtschaftlichen Auswertungen.

## 6 Zusammenfassung

Schon mit der Reichsbodenschätzung, welche in der Dekade von 1930–1940 erhoben wurde, versuchte man Bodenunterschiede zu beschreiben. Während damals der Boden direkt angesprochen wurde, indem aufwändige Profilgruben ausgehoben und von Experten beurteilt wurden, stehen heute indirekte Möglichkeiten zur Verfügung diese Standortheterogenitäten zu beschreiben. Im Rahmen eines einjährigen Projekts wurden mehrjährige Ertragspotentialkarten erstellt. Diese sollen kleinräumige Bodenunterschiede widerspiegeln, indem, auf Basis von Bildaufnahmen des Satelliten Sentinel-2, ein Vegetationsindex zum Zeitpunkt der Abreife der Hauptkultur berechnet wird. Damit können Bereiche eines Feldes identifiziert werden, in denen Pflanzen z. B. früher oder später abreifen als andere. Momentan bieten zahlreiche kommerzielle Anbieter solche digitalen Karten an, nach denen Landwirte und Landwirtinnen ihre Felder bewirtschaften können. Auf Basis der mehrjährigen Ertragspotentialkarten werden die Felder in verschiedene Ertragszonen eingeteilt, welche den zu erwartenden relativen Ertrag wiedergeben. Diese orientieren sich nicht am jeweils aktuellen Pflanzenaufwuchs, sondern an mehrjährig stabilen Ertragszonen, welche z. B. durch Bodenunterschiede begründet sind.

Auf drei Standorten in Nord-, Mittel- und Südsachsen wurden auf jeweils drei Feldern diese Karten validiert. Dazu wurden in jeder Potentialzone einer Referenzpotentialkarte, welche eigenständig mit öffentlich verfügbaren Daten erstellt wurde, Bodenproben und Pflanzen während der Vegetationsperiode entnommen. Die Bodenproben wurden auf den  $N_{\min}$ - und  $S_{\min}$ -Gehalt, Grundnährstoffe, Feinbodenanteil, P-Freisetzungsrates, organischen Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_{\text{tot}}$ ) untersucht. Festgestellt wurde, dass vor allem der  $N_{\min}$ -Gehalt, je nach Potentialzone, erheblich schwankt. Gleichzeitig konnte die größte Korrelation zwischen den Potentialzonen der Referenzpotentialkarte und dem Wassergehalt in der jeweiligen Zone gefunden werden ( $r = -0,51$ ,  $p < 0,001$ ). Damit kann mit der Zoneneinteilung der Referenzpotentialkarte die jeweilige Wasserverfügbarkeit eines Felder präzise dargestellt werden, welche wiederum indirekt vor allem mit dem Feinbodenanteil korreliert ( $r = 0,55$ ,  $p < 0,001$ ). Es konnte gezeigt werden, dass vor allem die Zoneneinteilung der Anbieter 2, 3 und 5 stark von der Referenzpotentialkarte abweichen. Damit eignen sich die Karten dieser drei Anbieter zur Definition von Bodenartenunterschieden eher weniger. Festgestellt werden konnte allerdings auch, dass letztlich die Erträge der angebauten Hauptkulturen von allen Anbietern gut vorhergesagt werden konnten. Es waren unter anderem die grundsätzlichen Bodenunterschiede, die von jedem Anbieter vorhergesagt werden konnten, wenngleich die kleinräumig detaillierte Unterscheidung abwich. Geschlussfolgert werden kann, dass die Ertragspotentialkarten der genannten Anbieter kritisch betrachtet werden müssen und die Anzahl der definierten Potentialzonen reduziert werden sollte (z. B. von fünf definierten Zonen auf drei definierte Zonen). Den Landwirten und Landwirtinnen wird empfohlen, die Ertragspotentialkarten eigenständig zu überprüfen, indem z. B. Bodenproben nach der entsprechenden Potentialzoneneinteilung genommen und untersucht werden oder die Ertragskartierung des Mähreschers, insofern vorhanden, mit der jeweiligen Zoneneinteilung verglichen wird. Natürlich eignen sich auch die in diesem Projekt erstellten Handrechen. Besonders die Checkliste ermöglicht eine schnelle Einschätzung der gelieferten Karten und des gesamten Angebotes des Anbieters.

## 7 Literaturverzeichnis

- CONGEDO (2016): Internetpublikation - Semi-Automatic Classification Plugin Documentation;  
<https://semiautomaticclassificationmanual.readthedocs.io/en/latest>, 19.03.2024
- EUROPEAN SPACE AGENCY: Internetpublikation - Overview of S2 Applications;  
<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-applications>, 19.03.2024
- HUANG, et al. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, Jahrgang 32, S. 1–6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1
- NASA (2000): Internetpublikation - Measuring Vegetation (NDVI & EVI): Normalized Difference Vegetation Index (NDVI);  
[https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring\\_vegetation\\_2.php](https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php), 19.03.2024
- QGIS.org (2024). Internetpublikation - QGIS Desktop User Guide/Manual (QGIS 3.34);  
[https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user\\_manual/index.html](https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/index.html), 19.03.2024
- TAUCHNITZ et al. (2022): Stickstoff- und Kohlenstoff-Monitoring im Grundwasserkörper SAL GW 014: Konzept zum Umgang mit Nährstoffeinträgen in die Gewässer Sachsen-Anhalts (Nährstoffkonzept 2015-2021). Schriftenreihe der LLG, Heft 1/2022, Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt, <https://llg.sachsen-anhalt.de/llg/service/publikationen/schriftenreihe-der-llg>, 19.03.2024
- TUCKER, C. J.; SELLERS, P. J. (1986): Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, Jahrgang 7, Heft 11, S. 1395-1416, DOI:10.1080/01431168608948944

## A 1 Anhang

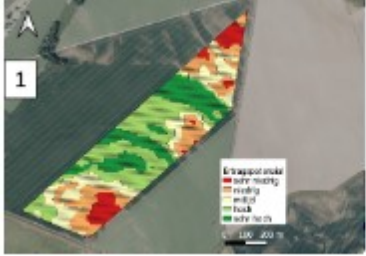

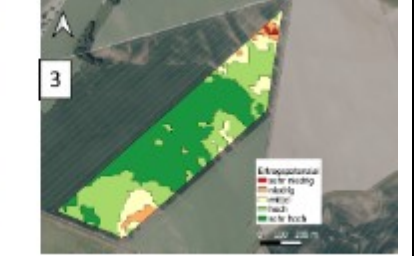
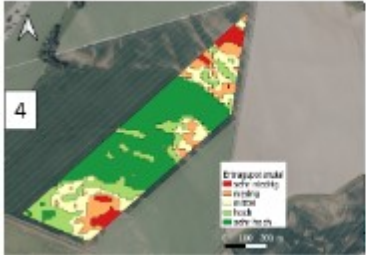
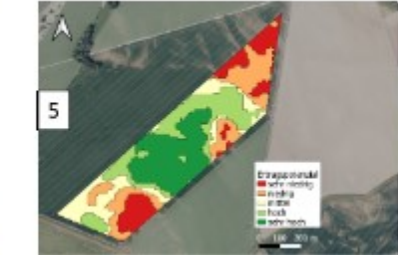
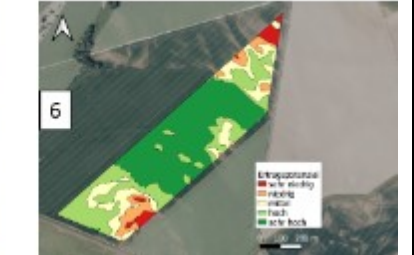
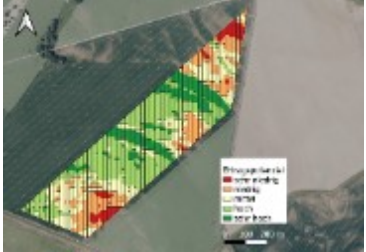



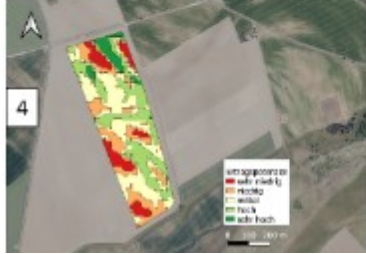



### A 1.1 Zusätzliches Daten- und Kartenmaterial

**Tabelle A 1: Verwendete Daten zur Erstellung der Ertragspotentialkarten**

Betrieb	Feld	365 FarmNet	Hauptkultur
1: Torgau	1 (intensiv)	24.08.2022 21.09.2019	Mais Zuckerrüben
	2	17.06.2022 25.08.2019 08.06.2018	Weizen Mais Weizen
	3	17.06.2022 25.08.2019 06.06.2018	Weizen Mais Weizen
2: Riesa	1 (intensiv)	15.06.2022 12.06.2020 26.06.2019 08.06.2018	Luzernegras Hafer Dinkel Hafer
	2	15.06.2022 26.06.2019 06.06.2018	Dinkel Hafer Dinkel
	3	17.06.2022 12.06.2020 26.06.2019 08.06.2018	Winterraps Luzerne Luzerne Hafer
3: Zwickau	1 (intensiv)	11.08.2022 13.06.2019 03.07.2018	Silomais Wintergerste Silomais
	2	27.06.2022 26.06.2019	Winterweizen Hafer
	3	30.06.2022 01.07.2018 08.07.2016	Winterraps Winterroggen







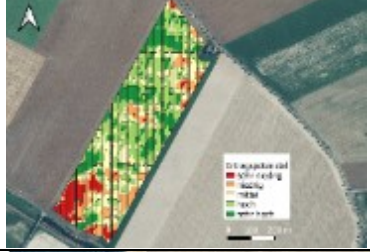









**Tabelle A2: Ertragspotentialkarten der »Standardfelder« v von Standort 1, Torgau**

Standort	Ertragspotentialkarte					
Feld 2						
Feld 2, eigene Erstellung						
Feld 3						
Feld 3, eigene Erstellung						

Die Zuordnung der Nummerierung der einzelnen Ertragspotentialkarten ist in Tabelle 2 erläutert.


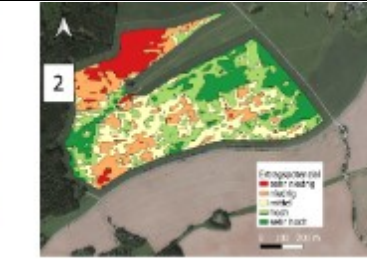
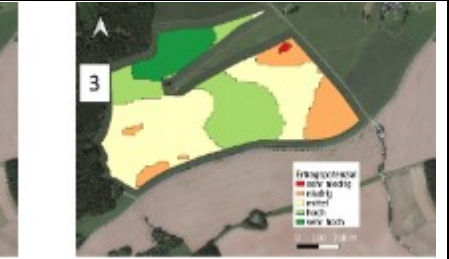
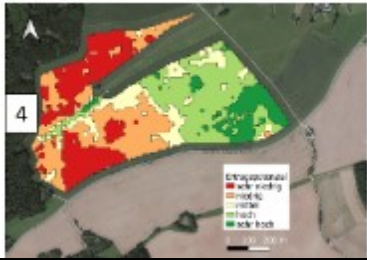
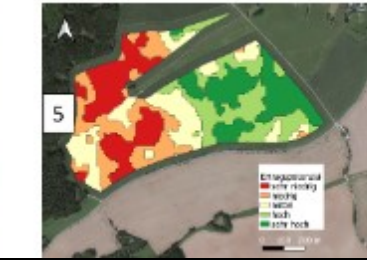



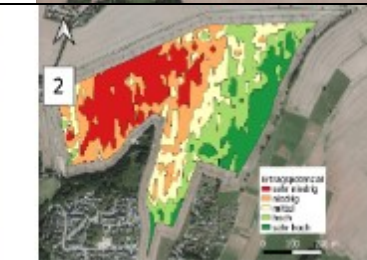





**Tabelle A 3: Ertragspotentialkarten der »Standardfelder« v von Standort 2, Riesa**

Standort	Ertragspotentialkarte					
Feld 2						
Feld 2, eigene Erstellung						
Feld 3						
Feld 3, eigene Erstellung						

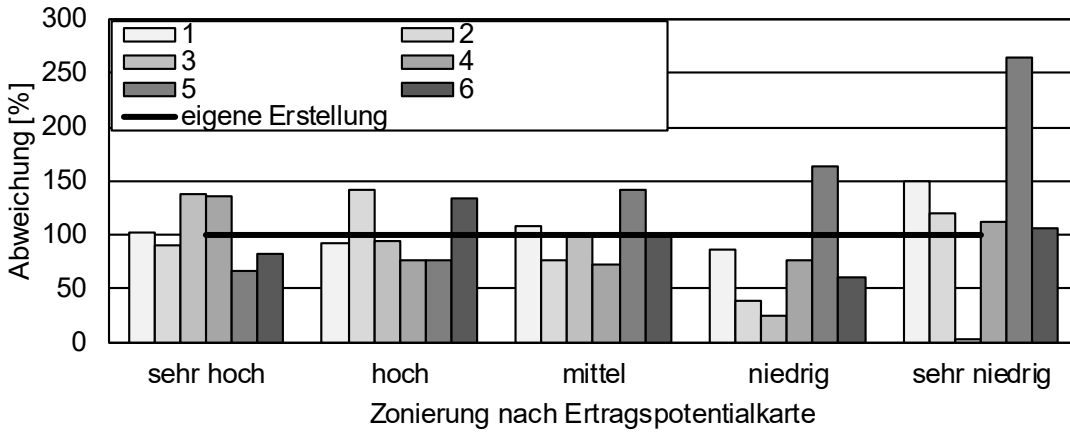
Die Zuordnung der Nummerierung der einzelnen Ertragspotentialkarten ist in Tabelle 2 erläutert.



Tabelle A4: Ertragspotentialkarten der »Standardfelder« v von Standort 3, Zwickau

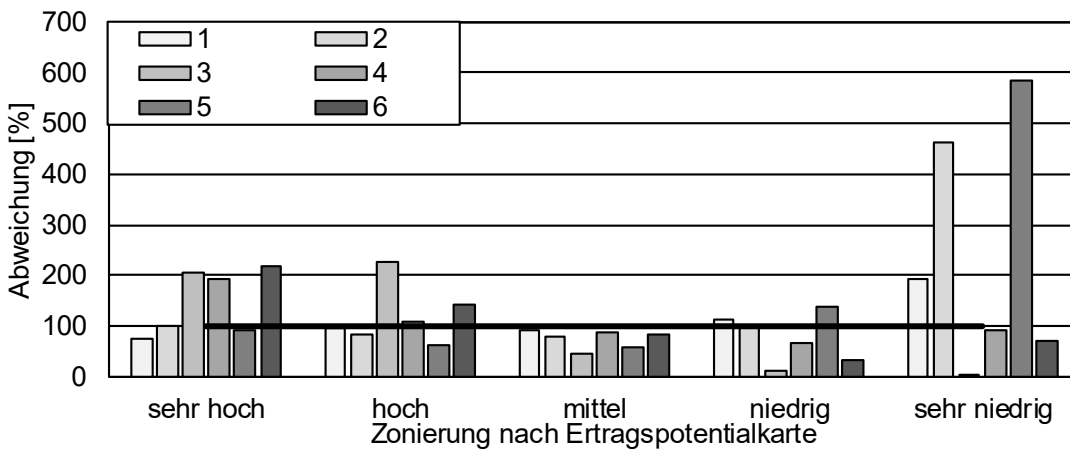
Standort	Ertragspotentialkarte					
Feld 1111						
Feld 1111, eigene Erstellung						
Feld 400						
Feld 400, eigene Erstellung						

Die Zuordnung der Nummerierung der einzelnen Ertragspotentialkarten ist in Tabelle 2 erläutert.



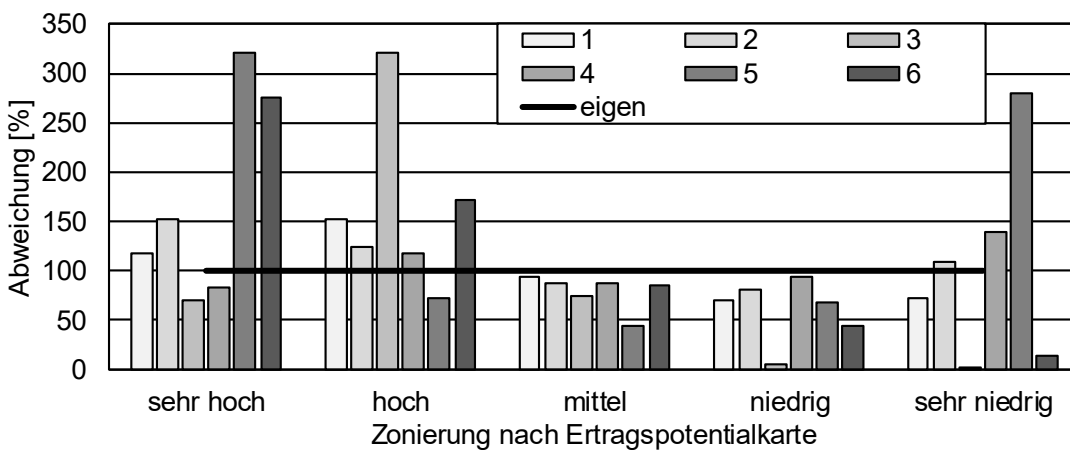
In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 1: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 1, Feld 1, intensiv**



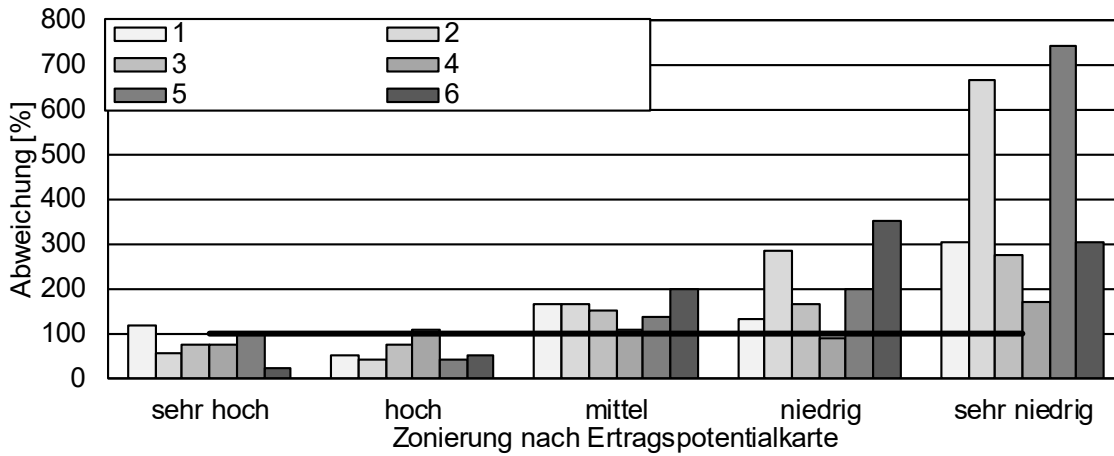
In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 2: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 1, Feld 2**



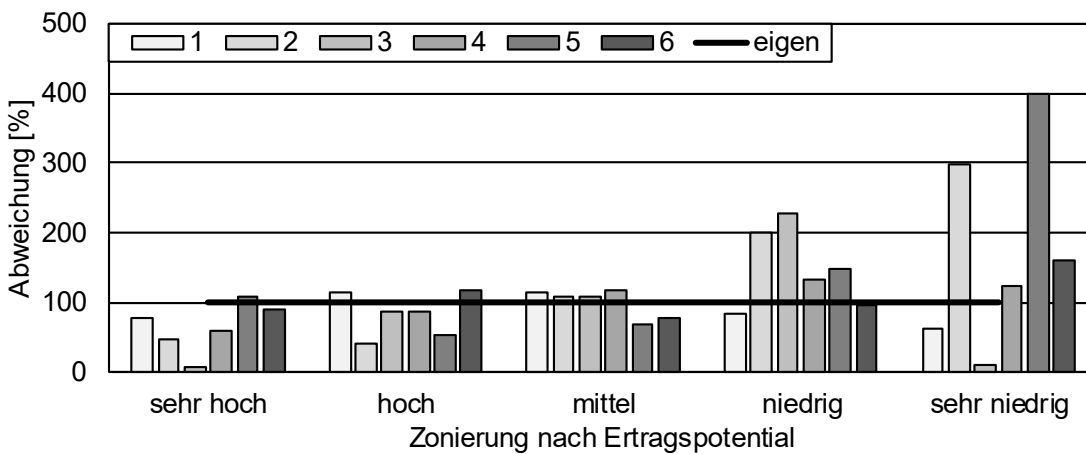
In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 3: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 1, Feld 3**



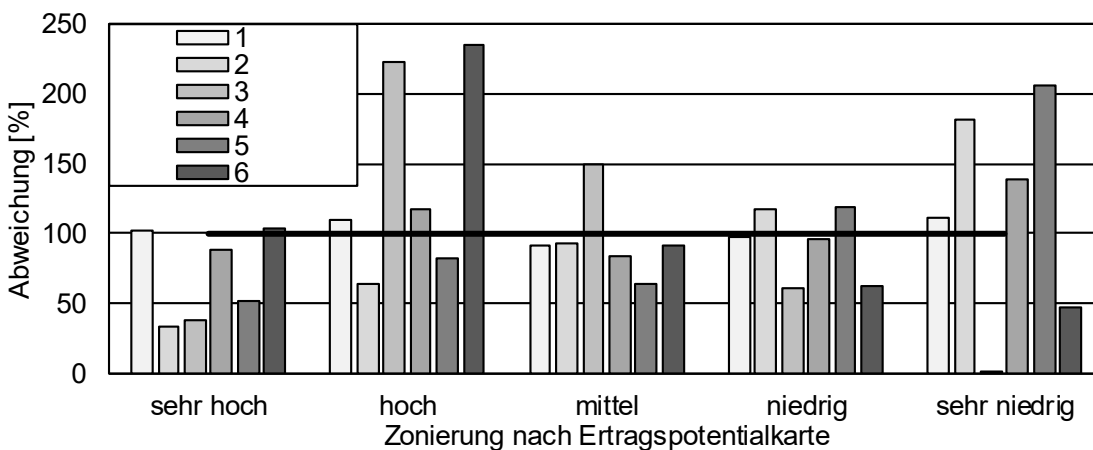
In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 4: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 2, Feld 1, intensiv**



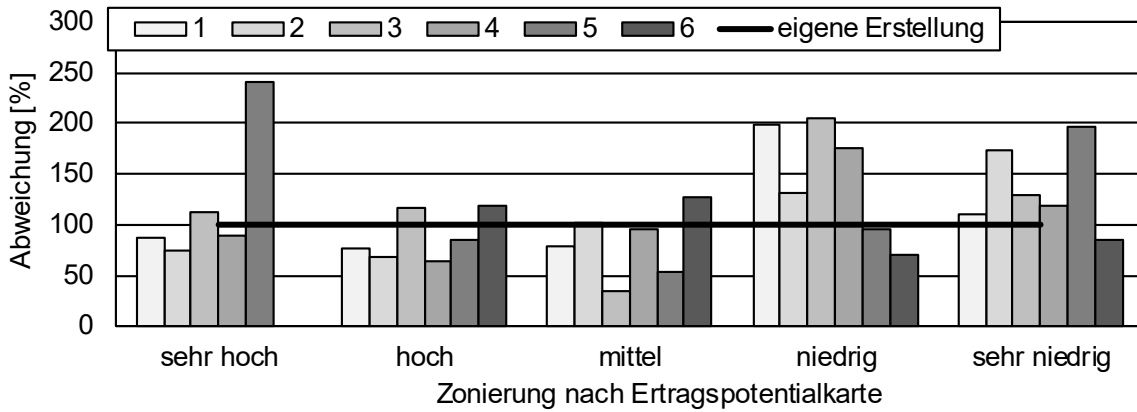
In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 5: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 2, Feld 2**



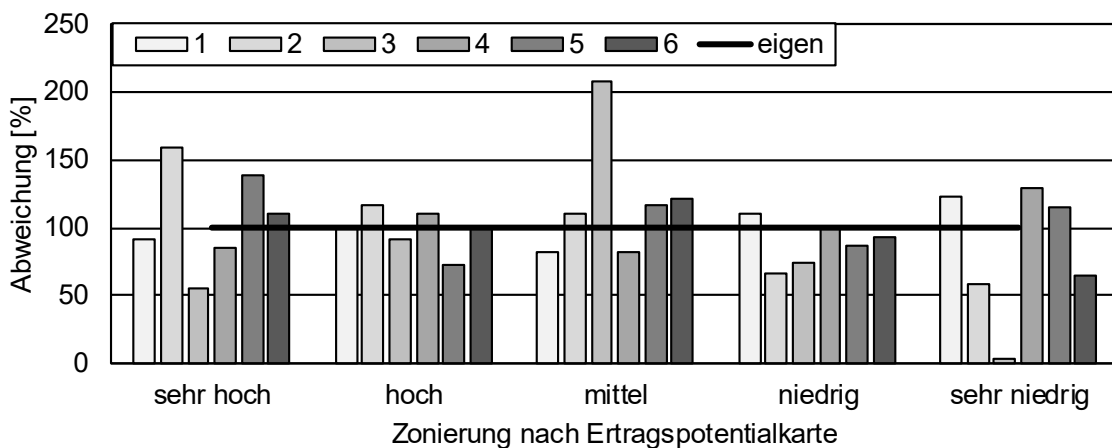
In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 6: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 2, Feld 3**



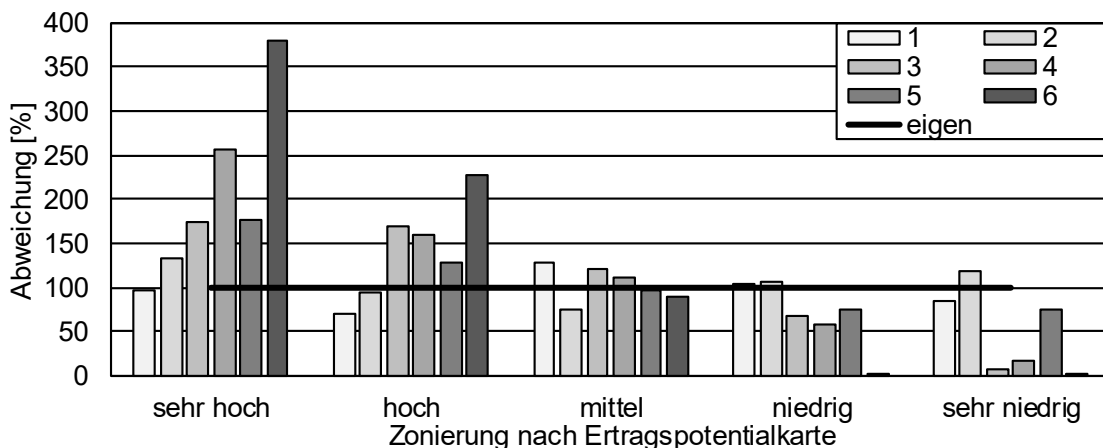
In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 7: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 3, Feld 1120, intensiv**



In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 8: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarte nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 3, Feld 1111**



In der Legende sind die Anbieter nach Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung A 9: Prozentuale Abweichung der Zonierung der Ertragspotentialkarten nach Anbieter von der eigens erstellten Karte; Standort 3, Feld 400**

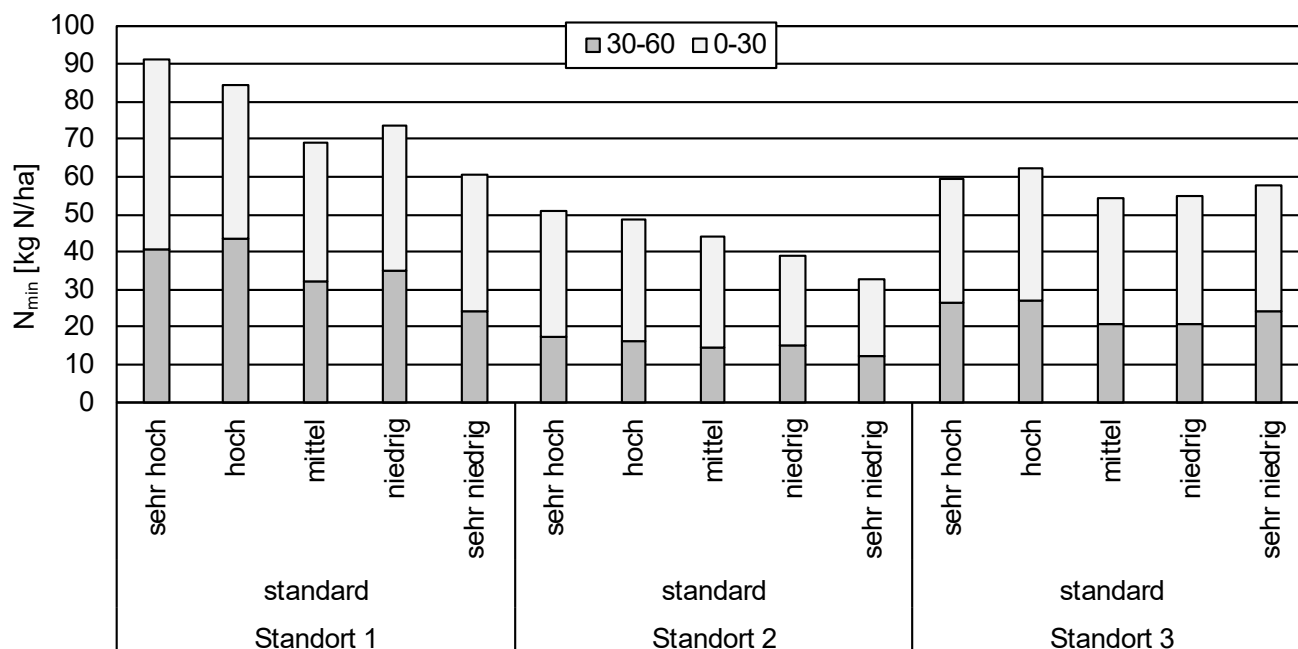
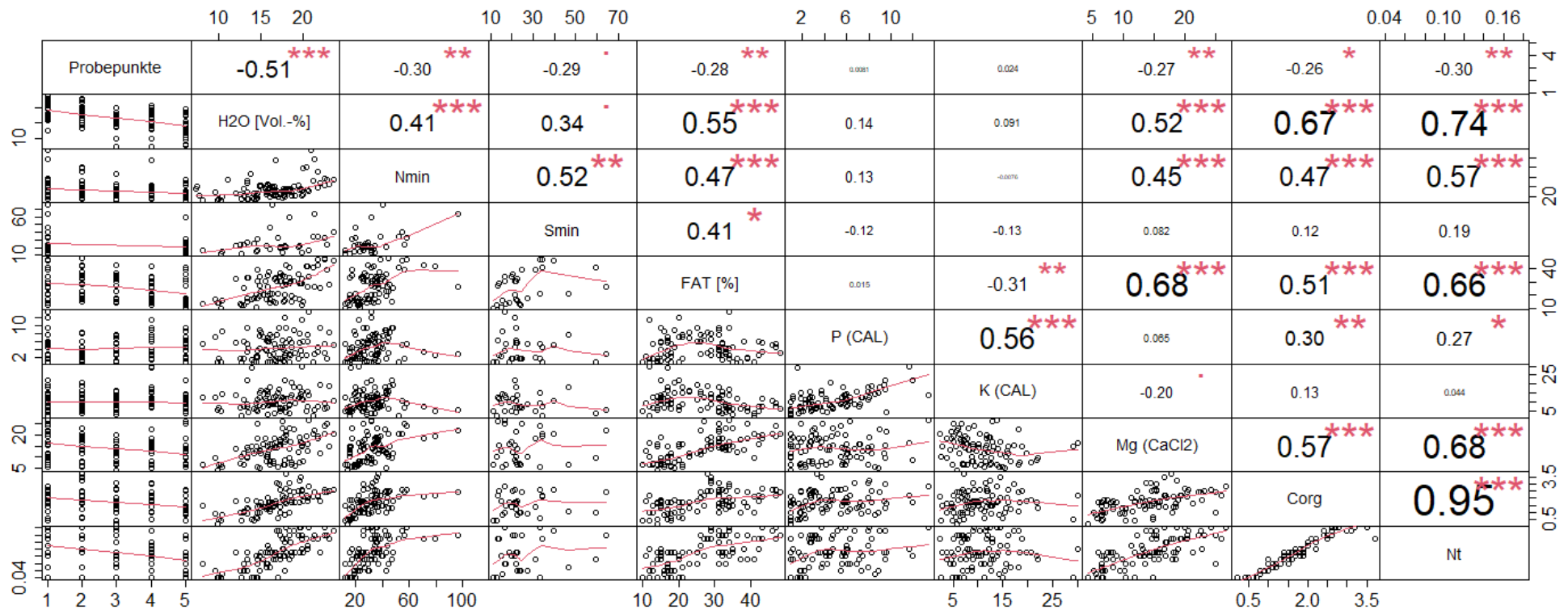


Abbildung A 10: N<sub>min</sub>-Gehalte der nach Standarduntersuchungen beprobten Felder (n = 105)

Tabelle A 5: Ergebnisse der Grundnährstoffuntersuchungen nach Bodentiefen

Tiefe [cm]	Zone	FAT [%]	pH	P (CAL) [mg/100g Boden]	K (CAL) [mg/100g Boden]	Mg (CaCl <sub>2</sub> ) [mg/100g Boden]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>t</sub> [%]	C:N	P-Freisetzungsrate [µgP/(kg x min)]
0-30	sehr hoch	30	6,5	6,3	13,6	17,3	2,20	0,14	15,7	681,2
	hoch	28	6,4	4,7	12,5	15,2	2,33	0,14	16,2	696,4
	mittel	27	6,4	4,6	12,4	13,3	2,00	0,12	16,3	643,4
	niedrig	22	6,5	7,1	14,7	13,2	2,03	0,12	16,6	839,3
	sehr niedrig	22	6,3	4,5	11,4	12,6	1,69	0,11	15,6	857,3
	<b>Mittelwert</b>	<b>26</b>	<b>6,4</b>	<b>5,5</b>	<b>12,9</b>	<b>14,3</b>	<b>2,05</b>	<b>0,13</b>	<b>16,1</b>	<b>743,6</b>
30-60	sehr hoch	29	6,4	4,1	8,3	14,9	1,53	0,11	14,8	
	hoch	29	6,4	3,3	7,8	15,5	1,78	0,11	16,6	
	mittel	28	6,3	3,2	8,0	12,4	1,14	0,08	14,8	
	niedrig	26	6,4	4,7	12,1	13,4	1,44	0,09	15,4	
	sehr niedrig	22	6,2	4,1	8,2	11,0	0,99	0,07	15,1	
	<b>Mittelwert</b>	<b>27</b>	<b>6,3</b>	<b>3,9</b>	<b>8,9</b>	<b>13,4</b>	<b>1,38</b>	<b>0,09</b>	<b>15,4</b>	

Legende: P = Phosphor (n = 90); K = Kalium (n = 90); Mg = Magnesium (n = 90); CAL = Calcium-Acetat-Lactat-Methode; CaCl<sub>2</sub> = Methode mit Calciumchlorid; C<sub>org</sub> = organischer Kohlenstoff (n = 90); N<sub>t</sub> = Gesamtstickstoff (n = 90); FAT = Feinbodenanteil aus Feinschluff plus Ton (n = 90); P-Freisetzungsrate (n = 45)



Asterisken kennzeichnen signifikante Unterschiede mit \*\*\* =  $p < 0,001$ ; \*\* =  $p < 0,01$ ; \* =  $p < 0,05$ ; Probestpunkte: 1 = sehr hoch, 2 = hoch; 3 = mittel, 4 = niedrig, 5 = sehr niedrig; n (H<sub>2</sub>O) = 105; N<sub>min</sub> = mineralisierter Stickstoff [kg/ha], n = 105; S<sub>min</sub> = mineralisierter Schwefel, n = 34; P = Phosphor [mg/100g Boden], n = 90; K = Kalium [mg/100g Boden], n = 90; Mg = Magnesium [mg/100g Boden], n = 90; CAL = Calcium-Acetat-Lactat-Methode; CaCl<sub>2</sub> = Methode mit Calciumchlorid; C<sub>org</sub> = organischer Kohlenstoff [%], n = 90; N<sub>t</sub> = Gesamtstickstoff [%], n = 90; FAT = Feinbodenanteil aus Feinschluff plus Ton, n = 90

**Abbildung A 11: Korrelationsmatrix der untersuchten Bodenprobenparameter**



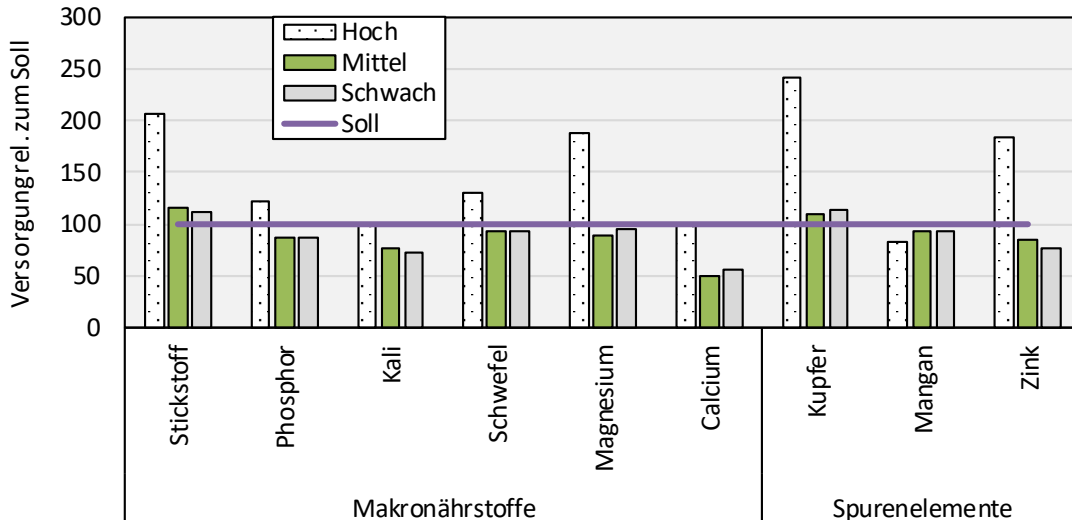


Abbildung A 12: Ergebnisse der komplexen Pflanzenanalyse, Standort 1, intensiv, Feld 1

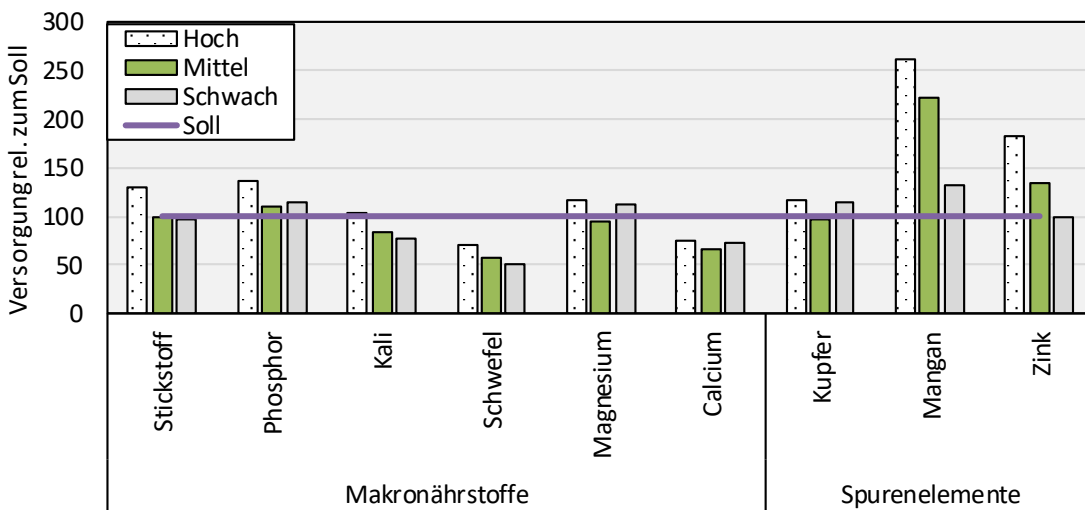


Abbildung A 13: Ergebnisse der komplexen Pflanzenanalyse, Standort 2, intensiv, Feld 1

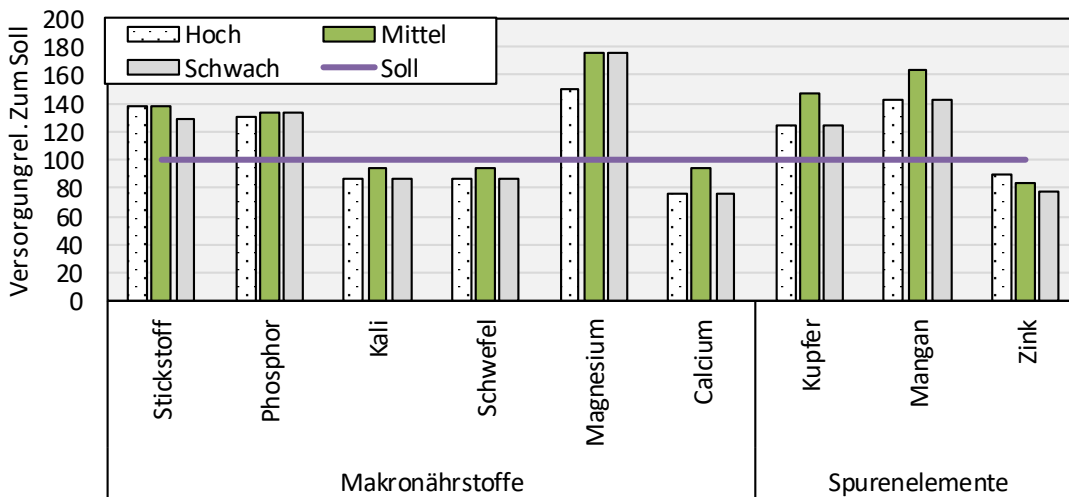
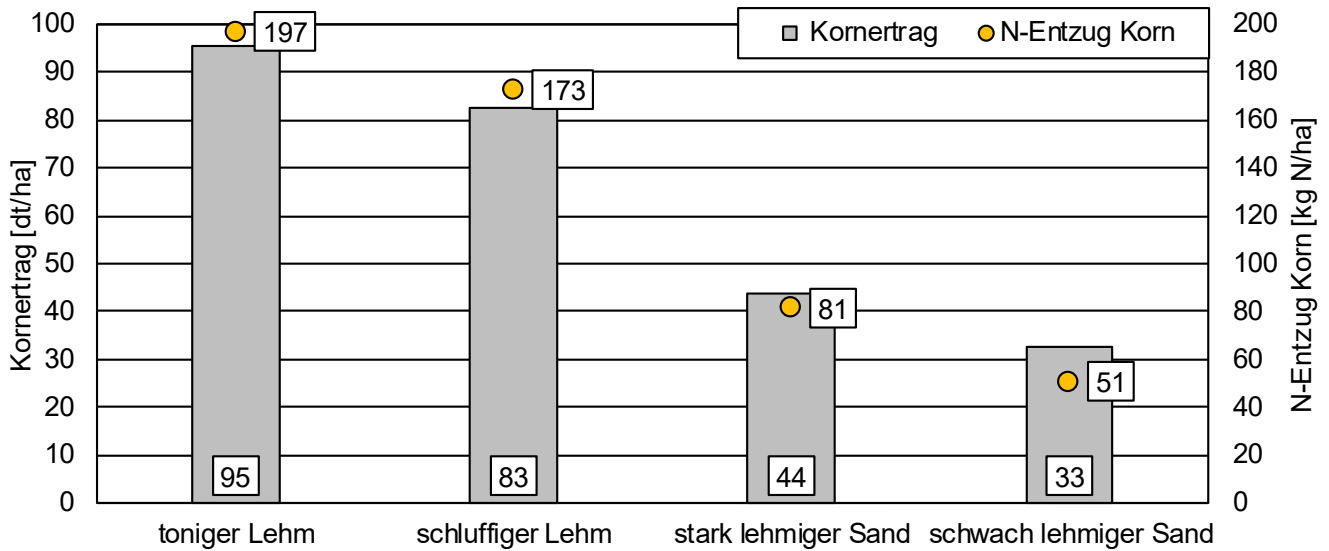
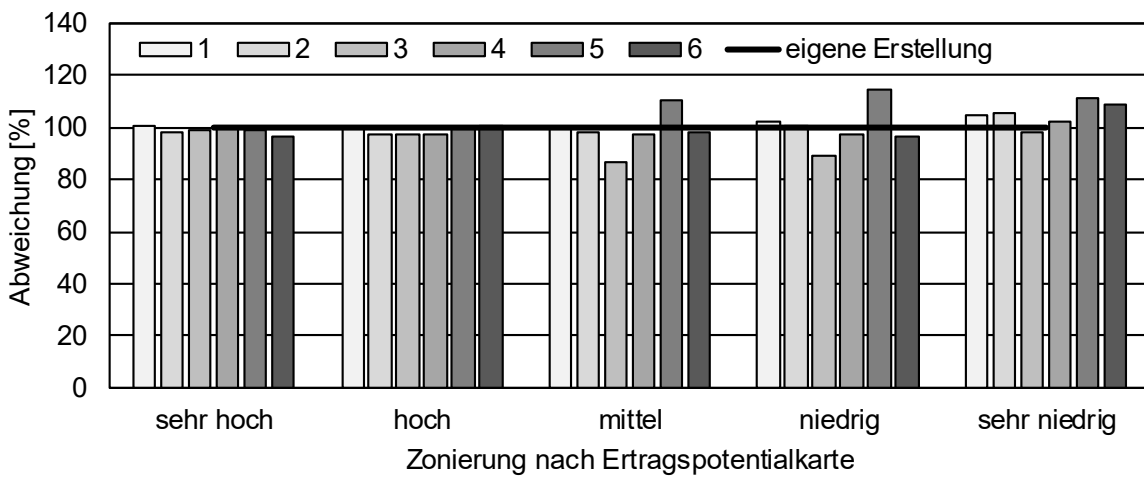


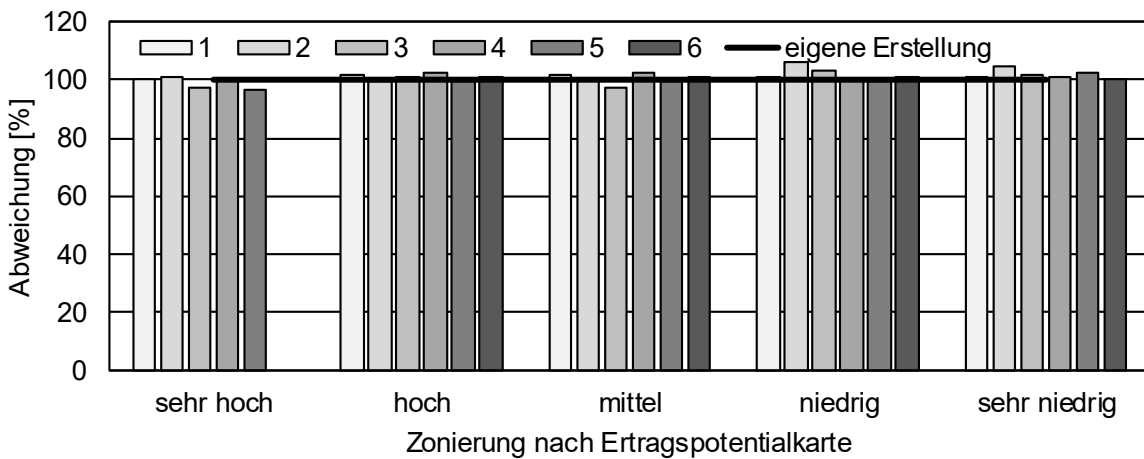
Abbildung A 14: Ergebnisse der komplexen Pflanzenanalyse, Standort 3, intensiv, Feld 1120



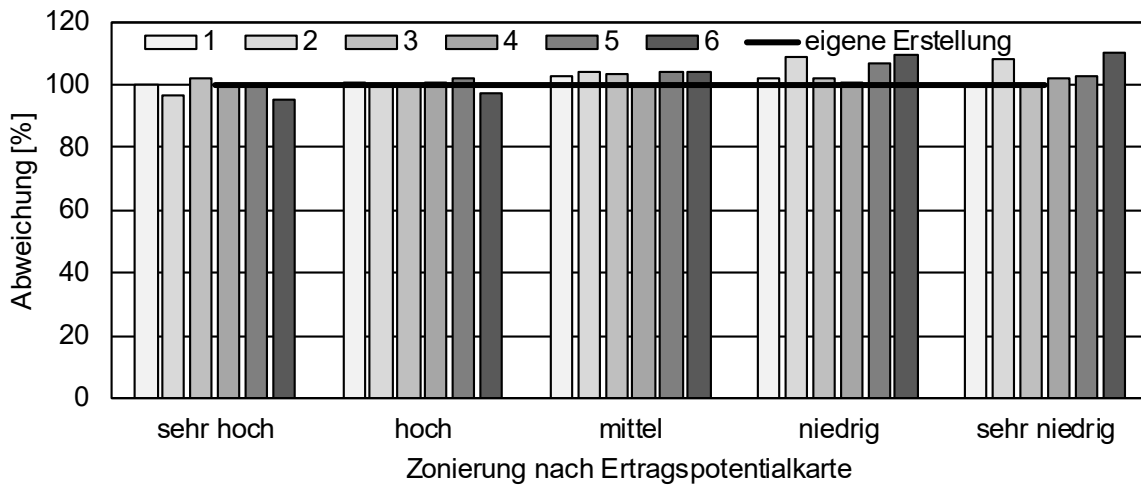
**Abbildung A 15: Kornertrag und N-Entzug durch Korn nach Bodenart**



**Abbildung A 16: Relative Abweichung der Vorhersagegenauigkeit des Ertrages aller Ertragspotentialkarten am Standort 1, intensiv, Feld 1; absolute Erträge der Referenzkarte in dt/ha**



**Abbildung A 17: Relative Abweichung der Vorhersagegenauigkeit des Ertrages aller Ertragspotentialkarten am Standort 2, intensiv, Feld 1; absolute Erträge der Referenzkarte in dt/ha**



**Abbildung A 18: Relative Abweichung der Vorhersagegenauigkeit des Ertrages aller Ertragspotentialkarten am Standort 3, intensiv, Feld 1120; absolute Erträge der Referenzkarte in dt/ha**

### A 1.2 Handlungsanleitung zur Bewertung von Potentialkarten - Checkliste

Es gibt verschiedene Wege, um Ertragspotentialkarten zu erhalten. Sie können sich die Karten von regionalen oder überregionalen Dienstleistern erstellen lassen oder Sie nutzen das reichhaltige Angebot cloudbasierter Lösungen und erstellen die Karten selbst.

Doch je mehr Anbieter es gibt, desto undurchsichtiger wird auch der Markt. Deshalb ist es wichtig, die erstellten Karten zügig und unvoreingenommen bewerten zu können, um zu einer individuell passenden Lösung zu kommen. In Tabelle A 6 haben wir für Sie als Hilfestellung zahlreiche Fragen aufgeführt, die helfen sollen, die Karten neutral bewerten zu können. Die Wichtung der einzelnen Fragen kann dabei betriebsindividuell unterschiedlich sein.

Wichtig ist, dass die fertige Ertragspotentialkarte – ob selbst erstellt oder im Auftrag – von Ihnen bzw. den Mitarbeitern nachvollzogen werden kann. Hier sollten Sie kritisch sein, da es sich bei diesen Karten um mehrjährige Arbeitsgrundlagen handelt. Im Zweifel hilft ein geeigneter Ansprechpartner, welcher transparent Auskunft zur angewandten Methodik geben oder bei Schwierigkeiten mit der Handhabung Hilfe anbieten kann.

Die Plausibilitätsprüfung geschieht in der Regel, wie gerade beschrieben, auf Basis von Erfahrungswerten, kann jedoch auch objektiviert werden und z. B. auf historischen Karten, Ertragskartierungen des Mähdeschers oder Bodenkarten beruhen. Auch Ergebnisse von Bodenbeprobungen bieten sich zur Validierung an. Dazu werden in den von der Karte ausgewiesenen Teilbereichen Bodenproben gezogen und diese auf z. B. Grundnährstoffe oder Humusgehalt (Corg) untersucht. In vielen Fällen werden schon bei der Betrachtung des Bodens im Bohrstock systematische Unterschiede (Feinanteil, Steine, Tiefgründigkeit) ersichtlich.

Als hilfreich bei der Erstellung von Ertragspotentialkarten hat es sich erwiesen, wenn Einfluss auf die verwendeten Einzelbilder genommen werden kann. Dazu muss der Zugang zu diesen Bildern prinzipiell möglich sein, um diese dann optisch auf Störgrößen überprüfen zu können, so dass bei Bedarf, einzelne, fachlich ungeeignete Bilder bei der Erstellung der Potentialkarte ausgeschlossen werden können.

Bei der Betrachtung einer Ertragspotentialkarte stellt sich also folgende Ausschlussfrage:

Ist die Potentialkarte valide und stimmt sie mit eigenen Erfahrungswerten, Bodenprobenergebnissen, etc. überein?

ja;  teilweise;  nein

Bestehen Zweifel an der Plausibilität der Karte, so muss sie verworfen werden, eine Nutzung ist dann unzulässig. Die Ergebnisse des Fragebogens lassen sich in drei Kategorien einteilen:

■ 0 – 12 Punkte:

Die Plausibilität ist stark herabgesetzt. Es wird empfohlen, auf die Verwendung dieser Karte zu verzichten.

■ 13 – 24 Punkte:

Die Plausibilität ist gemindert. Es wird empfohlen denentsprechenden Anbieter mit anderen zu vergleichen.

■ 25 – 36 Punkte:

Die Plausibilität der Karte ist gegeben. Die Nutzung kann empfohlen werden.

**Tabelle A6: Bewertungsbogen zur Einschätzung unterschiedlicher Anbieter**

Kriterium	Fragestellung	Punktebewertung
Qualität der Ertragspotentialkarte	Wird der Wertebereich des Index genannt? (Maß für Unterscheidbarkeit der Zonen)	/ 3 Punkte
Handhabung bei Erstellung	Lassen sich Feldgrenzen einfach importieren oder einzeichnen?	/ 3 Punkte
	Besteht die Möglichkeit das Vorgewende von der Betrachtung auszuschließen, um somit wesentliche Störgrößen zu minimieren?	/ 3 Punkte
	Können einzelne Aufnahmen von der Berechnung ausgeschlossen werden?	/ 3 Punkte
Transparenz	Ist die Methodik ersichtlich, mit der die Karte erstellt wird?	/ 3 Punkte
	Werden die Satellitenbilder angezeigt, welche zur Erstellung der Ertragspotentialkarte verwendet wurden?	/ 3 Punkte
	Werden diese Satellitenbilder oder benötigte Informationen zur Validierung (z. B. Datum des Bildes) auf Nachfrage herausgegeben?	/ 3 Punkte
Support	Kann schnell und einfach mit dem Support kommuniziert werden bei Problemen hinsichtlich der Anwendung?	/ 3 Punkte
Nutzung (Anwendung)	Kann die fertig erstellte Ertragspotentialkarte unbearbeitet heruntergeladen werden?	/ 3 Punkte
	Ist die Karte direkt für die teilflächenspezifische Anwendung nutzbar, bspw. als Saat- oder Düngekarte?	/ 3 Punkte
	Kann die Karte im für den Betrieb passenden Dateiformat heruntergeladen werden?	/ 3 Punkte
	Kann die Zonierung angepasst werden, auf z. B. 3 statt 5 Zonen?	/ 3 Punkte
<b>Gesamtpunktzahl</b>		<b>/ 36 Punkte</b>

## A 1.3 Handlungsanleitung zur Erstellung von Potentialkarten

### **Grundsätzliches**

Besonders in Jahren mit wenig Niederschlag sind innerhalb großer Felder stabile Ertragsbereiche zu erkennen. Maßgebend für das Ertragspotential der Teilfläche sind die nutzbare Feldkapazität, die durchwurzelbare Tiefe sowie Bodenart und -typ. Diese bodenphysikalischen Parameter sind über viele Jahre stabil und nicht vom Landwirt zu beeinflussen.

Zwar können auch unterschiedliche Nährstoffgehalte innerhalb eines Feldes für Ertragsheterogenität verantwortlich sein, jedoch lassen sich diese Unterschiede durch gezieltes Eingreifen des Bewirtschafters beheben.

Mit Ertragspotentialkarten können daher vor allem Bodenunterschiede dargestellt werden, sie eignen sich besonders auf heterogenen Flächen. Andere den Ertrag beeinflussende Faktoren wie Nährstoffunterschiede, Unkrautbefall, etc. müssen erst ausgeschlossen werden, bevor solche Karten erstellt und genutzt werden können.

Um das Ertragspotential abzubilden, eignen sich vor allem Vegetationsbilder zum Zeitpunkt der Abreife der angebauten Hauptkultur, da sie am ehesten die erreichbare Ertragshöhe darstellen können. Das Ziel ist, das Feld in kleinere Teilbereiche einzuteilen und die Kulturpflanzen kleinräumig und entsprechend ihrem jeweiligen Bedarfe zu führen.

### **Vegetationsindizes**

Vegetationsindizes bilden die Grünfärbung von Pflanzen ab. Dadurch können Rückschlüsse auf die Vitalität und die gebildete Biomasse des Pflanzenbestandes gezogen werden. Generell gilt: je höher der Index, desto mehr Biomasse wurde gebildet bzw., desto vitaler sind die Pflanzen zum Zeitpunkt der Aufnahme.

Außerdem bilden Vegetationsindizes eine gute Grundlage zur Planung von Feldbonituren und weiterführender Untersuchungen, wie die Entnahme von Bodenproben. Heterogenität innerhalb eines Feldes kann so besser verstanden und nachvollzogen sowie bei der Bewirtschaftung berücksichtigt werden.

### **Tipps für die Erstellung der Potentialkarten**

Grundsätzlich sind bei der Erstellung der Karten die Vorgewende auszuschließen, da sie z. B. durch Beschattung, Befahrungsschäden und doppelte Behandlungen keine Aussage über den Rest des Feldes zulassen.

Termin der Satellitenaufnahme:

- bei Wintergetreide ab BBCH 60 (nach dem Ährenschieben); bei Winterraps ab BBCH 70 (nach Blühphase)
- bei spät erntenden Sommerungen (Mais, Zuckerrüben) prinzipiell kurz vor der Ernte, wenn der Bestand nicht wiederergrünt ist

Auswahl der Vegetationsjahre:

- Trockenjahre zeigen unterschiedlich nutzbare Wasservorräte (Bodenunterschiede) am sichersten

Bilder auf Störgrößen prüfen und diese ausschließen:

- Wolken und Wolkenschatten
- uneinheitliche Schlagbewirtschaftung (z.B. Streufehler oder Spritzschäden); Schlagteilung
- Bestandeslücken (z.B. Frostschäden, Vernässungen)
- Bereiche mit hohem Unkraut- oder Ungrasdruck

Zu beachten ist dennoch: Je mehr einzelne Bilder verwendet werden, desto geringer ist der Einfluss von Störgrößen. Werden also nur wenige Bilder für die Erstellung der Potentialkarten verwendet, sind diese mit größter Sorgfalt auszuwählen.

### **Eignung der Kulturarten**

Eine Übersicht über die potentielle Eignung verschiedener Kulturpflanzen gibt Tabelle A 7. Am besten eignen sich Wintergetreide (Körnernutzung) sowie gut etablierter Winterraps. Damit Bodenunterschiede ersichtlich werden, ist darauf zu achten, dass nur solche Kulturen gewählt werden, die spät genug abreifen. Ausgeschlossen ist demnach beispielsweise Wintergetreide, welches als Ganzpflanze geerntet wird. Hier erfolgt die Ernte so früh im Jahr, dass Bodenunterschiede noch von pflanzenbaulichen Maßnahmen überlagert werden können. Flachgründige und ertragsschwächere Teilbereiche eines Feldes werden erst später deutlich sichtbar.

Satellitenbilder von spätererntenden Sommerungen wie Zuckerrüben und Mais sind prinzipiell nutzbar, der Bestand sollte jedoch im Spätherbst nicht erneut durchgegrünt sein. Vor allem nach nennenswerten Niederschlägen in der zweiten Jahreshälfte sollten die Satellitenbilder dieser Kulturen verworfen werden. Ähnliches trifft auf mehrschnittiges Feldfutter zu. Satellitenaufnahmen aus Jahren, in denen die Hauptkultur durch Beregnung mit Zusatzwasser versorgt wird (z. B. bei Gemüse oder Kartoffeln), dürfen nicht verwendet werden.

**Tabelle A7: Eignung von verschiedenen Kulturpflanzen/-arten zur Erstellung einer Ertragspotentialkarte**

Pflanze	Eignung zur Erstellung einer Ertragspotentialkarte	Besonderheit
Wintergetreide, Körnernutzung	+++	auf einen gleichmäßigen Bestand ohne Lücken achten
Winterraps	++	auf einen gleichmäßigen Bestand ohne Lücken achten und der Bestand muss einheitlich verblüht sein
Körnerleguminosen	+	
Silo- und Körnermais	+	der Bestand darf nicht wiederergrünt sein
Zuckerrüben	+	
mehrschnittiges Feldfutter	-	
Wintergetreide, Nutzung als Silage/Grünfutter	---	Bodenunterschiede können nicht sicher dargestellt werden

Legende: (+++) hervorragende Eignung; (---) keine bzw. sehr begrenzte Eignung

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)  
[www.lfulg.sachsen.de](http://www.lfulg.sachsen.de)

**Autor:**

AgUmenda GmbH  
Naumburger Straße 48  
04229 Leipzig  
[info@agumenda.de](mailto:info@agumenda.de)

**Redaktion:**

Silke Peschke  
Abteilung Landwirtschaft/ Stabsstelle  
Waldheimer Str. 219  
01683 Nossen  
Telefon: +49 35242 6317014  
Telefax: +49 35242 6317099  
E-Mail: [Silke.Peschke@smekul.sachsen.de](mailto:Silke.Peschke@smekul.sachsen.de)

**Fotos:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

**Redaktionsschluss:**

01.08.2024

**ISSN:**

1867-2868)

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.  
Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für  
ein gutes Leben.*

[www.lfulg.sachsen.de](http://www.lfulg.sachsen.de)