

Bild 1: Traditionelle Methode vs. Ökologische Bodenbewertung: Die Erfahrungen mit der neuen Methode sind vielversprechend (Für die Umsetzung der Maßnahmen verantwortlich: Firma Karner, AKRA).

Foto: Reinhard Höfel

*Nährstoffvorräte im Boden anders bewertet*

## Ein ganzheitliches Konzept stellt sich vor

Hansjörg Unterfrauner, Technisches Büro für Landschaftsökologie, Wien

**P**flanzen benötigen für ihr Wachstum die Komponenten Energie (Sonne) sowie Wasser und Nährstoffe (aus Boden und Luft). Nach den gegenwärtigen Lehrmeinungen werden in der Pflanzenernährung 16–22 Elemente als lebensnotwendig angesehen. Der Hauptanteil der Pflanzenmasse wird aus Kohlenstoff C (~45 %), Sauerstoff O (~42 %) und Wasserstoff H (~6 %) gebildet. Der Anteil an mineralischen Elementen – in der Hauptsache N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Mn, Cu, Fe, B, Na, Mo – beträgt insgesamt nur etwa 7 % (Bergmann 1993, Schilling 2000).

Der Großteil der mineralischen Nährstoffe wird von den Wurzeln aus dem Boden, korrekter aus der Bodenlösung, aufgenommen. In **Abb. 1** wird deutlich, dass sich die gelösten Stoffe dabei gegenseitig behindern (Antagonismus), fördern (Synergismus) oder indifferent verhalten können. Bereits vor vielen Jahren wurde erkannt, dass ab einem bestimmten Nährstoffniveau die Verhältnisse der Stoffe zueinander für die Ertragsbildung eine weit bedeutendere Rolle einnehmen als deren Absolutgehalte. Man kann davon

ausgehen, dass mehr als 90 % der Böden Westeuropas dieses Niveau bereits weit überschritten haben.

Besonders die äußeren Verhältnisse im Verlauf der Bodenbildung (Ausgangsgestein, Klima, Bodenleben) sind dafür verantwortlich, ob im Boden die essentiellen Nährstoffe verfügbar sind. Ob

*Die „Ursache“ für das Auftreten von Schadsymptomen („Wirkung“) an Pflanzen ist meist im Boden zu finden.*

sie in ausreichender Menge vorhanden sind, hängt von folgenden Faktoren ab:

- ➔ den „verfügbaren Gesamtnährstoffen“ (**Kapazität**),
- ➔ den Nährstoffgehalten in der Bodenlösung (**Intensität**),
- ➔ der Nährstoffnachlieferungsrate und der Diffusionsrate einschließlich des von Boden zu Boden unterschiedlichen Massenflusses der Ionen zu den Pflanzenwurzeln (**Kinetik**),

den bodeneigenen Faktoren (Bodenart, Humusgehalt, biologische Aktivität, Sorptionseigenschaften).

Die **Abb. 2** zeigt die Stoffflüsse und Nährstoffpools im offenen System „Boden“. Auf die dort ablaufenden dynamischen Prozesse nehmen Bodenleben, Bodenbearbeitungsmaßnahmen, Fruchtfolgeentscheidungen, die Art der Bewirtschaftung und der Düngung direkt Einfluss. Stoffe, welche stark gebunden sind, können mobilisiert werden. Genauso können Stoffe, die in hohen Konzentrationen gelöst sind, in festere Bindungsformen überführt werden.

### Traditionelle Bodenuntersuchung im CAL-Extrakt

Die Bodenuntersuchung soll nun mit hinreichend genauen Methoden die „Natur ins Labor“ holen und dabei die spezifischen Verhältnisse eines Standortes so gut wie möglich simulieren. Der CAL-Extrakt (Calcium-Acetat-Laktat) ist das traditionelle Mittel der Wahl, um die „pflanzenverfügbare Fraktion“ von P und K zu ermitteln. Das Verfahren wurde von Schüller (1969) entwickelt und ist in seinen Grundzügen bis heute unverändert.

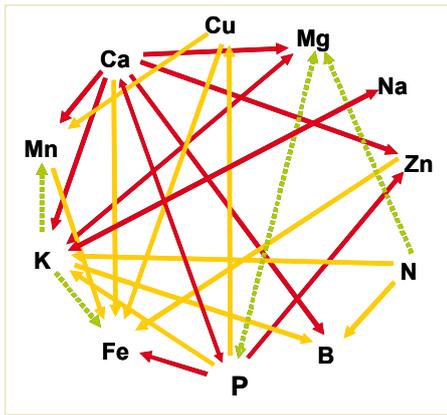


Abb. 1: Beziehungsgefuge einiger Nährstoffe in der Bodenlösung (Antagonismus = rot; Synergismus = grün; indifferentes Verhalten = gelb).

Aus der Analyse resultiert ein „dogmatischer“ Absolutwert (in mg/kg Boden), der weder einen bestimmten definierten „Pool“ beschreibt, noch eine dynamische Information zulässt. Zur Veranschaulichung könnte der Body-Mass-Index dienen. Der Wert der Körpergröße von z.B. 163 cm ist für sich genommen nicht aussagekräftig. Eine Bewertung wird erst unter Einbeziehung einer 2. Kennzahl, dem Körpergewicht, möglich. In der österreichischen ÖNORM L 1087 zum CAL-Extrakt steht folgende Anmerkung: „Die Ergebnisse bedürfen zu ihrer Interpretation der Kalibration am Feldversuch unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Standort und Pflanze. Auf Grund dieser Einschränkungen [...] wird die Bezeichnung „pflanzenverfügbar“ unter Anführungszeichen gesetzt“.

Damit ist bereits viel gesagt. Dennoch werden diese Werte zur Einstufung nach Gehaltsklassen und zur Ableitung von Düngungsmaßnahmen herangezogen. Somit erscheint es nachvollziehbar, dass je nachdem in welchem Land die Steigerungsversuche durchgeführt werden, andere Gehaltsklassen erstellt werden. Dieses System ist so ökologisch nicht zu rechtfertigen. Die Klassenober- und Untergrenzen liegen oft mehr als 100 % auseinander, die Düngeempfehlung bleibt bei einem niedrigen und hohen Wert derselben Klasse dieselbe.

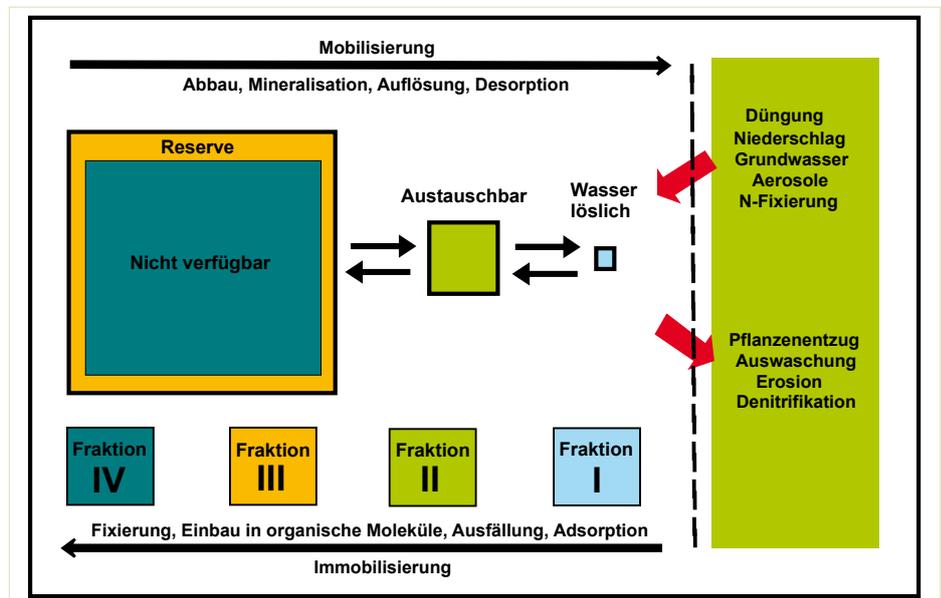


Abb. 2: Stoffflüsse und -pools des offenen Systems „Boden“.

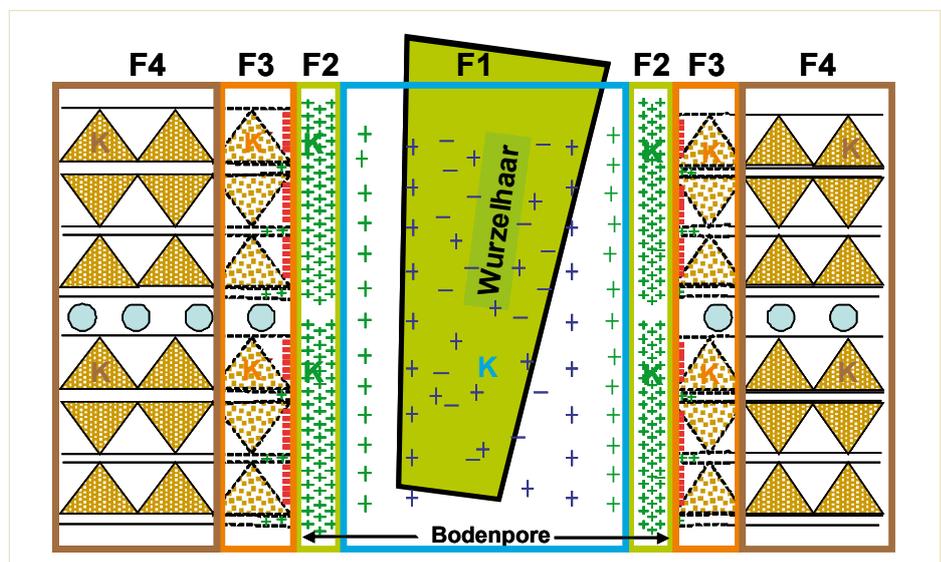


Abb. 3: Modellhafte Darstellung der Bindungsintensitäten von K<sup>+</sup> im Boden.

Nach Bergmann (1993) hat diese Methode zu einseitigen NPK-Düngungsmaßnahmen geführt. Bei vielen Böden verschoben sich dadurch die Stoffverhältnisse und eine Abnahme der Bodenfruchtbarkeit war die Folge. Die ökonomischen Auswirkungen der teils unnötig hohen Düngemengen wurden von Köster und Nieder (2007) publiziert.

### Die ökologische Alternative

Die fraktionierte Analyse erlaubt es im Gegensatz zum CAL-Extrakt, Stoffe in verschiedenen Bindungszuständen (Fraktionen, Pools) zu erfassen. Sie wurde in den 1960er Jahren von Professor Georg Stefan Husz konzipiert und wird bis heute laufend durch neue Erkennt-

nisse aktualisiert. Im Jahr 2004 wurde die Methode vom österreichischen Normungsinstitut in der ÖNORM-Reihe S 2122-1 bis S 2122-3 festgehalten und ist damit für jedermann zugänglich. Inzwischen ist sie in der Praxis fest verankert. Tab. 1 und 2 fassen die analysierten und errechneten Parameter der fraktionierten Analyse zusammen.

### Der Boden im Modell

Der Boden besteht aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen. Die Festphase kann organischer bzw. mineralischer Natur oder auch eine Kombination aus beidem sein. Sie besteht aus unterschiedlichsten chemischen Elementen, unter ihnen auch einige Nährstoffe, wie z.B. Ca, Mg, K, P, Cu,

Parameter	Beschreibung	Messwerte
<b>Wasserlösliche Elemente</b>	Brei aus 400 g Boden (<5mm gesiebt)	Ca, Mg, K, Na, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, Al, Ba, PO <sub>4</sub> , SiO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Cl, Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Mo, B, As, Ni, Cr, Pb, Cd, Ti, V, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit.
<b>Austauschbare Elemente</b>	LiCl-Extrakt	Ca, Mg, K, Na, NH <sub>4</sub> -N, Al, Ba, PO <sub>4</sub> , SiO <sub>3</sub> , Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Mo, B, As, Ni, Cr, Pb, Cd, Ti, V.
<b>Nachlieferbare Elemente</b>	HCl-Extrakt	Ca, Mg, K, Na, Al, Ba, PO <sub>4</sub> , SiO <sub>3</sub> , Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Mo, B, As, Ni, Cr, Pb, Cd, Ti, V.
<b>Gesamtgehalte</b>	Königswasser-Extrakt	nur für spezielle Fragestellungen ermittelt
<b>C<sub>t</sub>, N<sub>t</sub>, S<sub>t</sub></b>	Trockene Verbrennung	C, N, S
<b>Kalkgehalt</b>	Methode Scheibler	CO <sub>2</sub> ; Berechnung als CaCO <sub>3</sub>
<b>pH (KCl)</b>	1m KCl	pH-Wert
<b>potentielle Säure</b>	Titration	Säureanteil, welcher Sorptionsplätze „blockiert“

Tab. 1: Parameter und Messwerte der fraktionierten Analyse.

Parameter	Beschreibung
<b>C<sub>org</sub> = C<sub>t</sub> - C<sub>min</sub></b>	Gesamtkohlenstoff minus C aus Carbonaten
<b>Humusgehalt</b>	C <sub>org</sub> multipliziert mit dem Faktor 1,74
<b>N<sub>org</sub> = N<sub>t</sub> - N<sub>min</sub></b>	Gesamtstickstoff minus mineralischen Stickstoff (NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N)
<b>C/N-Verhältnis</b>	C <sub>org</sub> : N <sub>org</sub> , Qualitätsmerkmal des Humus
<b>KAK<sub>pot</sub></b>	Kationen aus dem LiCl-Extrakt plus potentielle Säure
<b>KAK<sub>eff</sub></b>	Kationen aus dem LiCl-Extrakt beim jeweiligen pH-Wert
<b>BS</b>	Basensättigung, Anteil „Basen“ bezogen auf KAK <sub>pot</sub>
<b>Stoffe [% KAK<sub>akt</sub>]</b>	Verhältnisse der Stoffe bezogen auf aktuelle Kationenaustauschkapazität
<b>Stoffe [% KAK<sub>pot</sub>]</b>	Verhältnisse der Stoffe bezogen auf potentielle Kationenaustauschkapazität

Tab. 2: Weitere aus den Messwerten errechnete Parameter.

Zn, Mn oder Fe. Die Bindungsform eines Elements bestimmt darüber, ob es für die Pflanze besser oder gar nicht verfügbar ist.

Die verschiedenen Verfügbarkeitsstufen sind in **Abb. 3** am Beispiel des Kalium (K<sup>+</sup>) dargestellt und zur Vereinfachung auf die mineralischen Bindungsformen beschränkt. Kalium kann im Inneren von Tonmineralen fest in die Struktur eingebaut sein und spielt in diesem Fall für die Pflanzenernährung langfristig keine Rolle (F4). Mit zunehmender Entfernung aus den Innenbereichen nimmt die Verwitterung zu. Von den angewitterten Rändern können einzelne Bruchstücke bzw. Moleküle oder Ionen bereits in den nächsten 10–15 Jahren für die Pflanzenernährung wichtig werden (F3). Die Oberflächen der Tonminerale sind negativ geladen, sie wirken für positiv geladene Nährstoff-Ionen (Kationen) wie ein „Magnet“. Letztere lagern sich also an den Oberflächen der Minerale an. Man spricht hier nicht von einer fixen (Ionen)-Bindung, die angelagerten Stoffe können durch andere Stoffe (z.B. Wurzelauausscheidungen) „ausgetauscht“ werden (F2). Diese Fraktion

der „austauschbaren Kationen“ bildet einen der wichtigsten Nährstoffpools für die Pflanzen, Mikroorganismen und sind auch von großer Bedeutung für die Aggregatstabilität.

Mit zunehmender Entfernung vom „Magnet“, nimmt dessen anziehende Wirkung ab. In diesem Bereich befinden sich negativ und positiv geladene Teilchen im Gleichgewicht, sie sind „in Lösung“ (F1). Die Zusammensetzung dieser Gleichgewichtslösung bzw. die Relationen der gelösten Stoffe sind für die Ernährung der Pflanze von größter Bedeutung, da Pflanzenwurzeln Stoffe nur in gelöster Form aufnehmen können. Ausnahmen hiervon bilden nur kleine Bruchstücke von Aminosäuren.

### Das richtige Verhältnis ist wichtig

Soll die Pflanze optimal ernährt werden, müssten alle Nährstoffe in der Bodenlösung in idealisierten Konzentrationen, Verhältnissen und Spezies vorkommen. Denn es gibt in der Realität keinen Überschuss ohne gleichzeitigen Mangel an anderen Stoffen! Zum Beispiel bedeutet ein „Überschuss“ an

K gleichzeitig einen „Mangel“ an Ca, Mg und eventuell N.

Viele Ionenpaare hemmen sich bei der Wurzel Aufnahme aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeit gegenseitig. Dazu gehören z.B. NO<sub>3</sub>/Cl, SO<sub>4</sub>/MoO<sub>4</sub> oder Mg/Mn. So bedeutet etwa eine hohe Konzentration an SO<sub>4</sub> eine verminderte MoO<sub>4</sub>-Aufnahme mit der Folge eines stark gestörten Eiweißstoffwechsels.

Die Ausscheidungen der Pflanzenwurzeln können nur sehr beschränkt selektiv wirken. Der ausgeschiedene Säureschwarm (H<sup>+</sup>-Ionen) verdrängt die Nährstoff-Kationen von den Austauscherflächen, diese gehen daraufhin in die Bodenlösung über und umspülen die Pflanzenwurzel. Letztere findet „ideale“ Verhältnisse vor, wenn die Elemente am Sorptionskomplex (F2) folgende Verhältnisse aufweisen:

$$\text{Ca} : \text{Mg} : \text{K} : \text{Na} =$$

$$60-80 : 10-20 : 1,5-4 : < 5$$

Auch die Spezies der gelösten Stoffe – z.B. Monohydrogenphosphat HPO<sub>4</sub> oder Dihydrogenphosphat H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> – hat einen wesentlichen Einfluss auf den Energiehaushalt der Pflanze. Diese muss wesentlich weniger Energie aufwenden, um Phosphor in Form von H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> als in Form des höher geladenen HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> aufzunehmen. Welche Spezies eines Stoffes vorliegt, hängt vorwiegend vom pH-Wert des Bodens und dessen Redoxpotential ab. Beide Parameter können durch die Bearbeitung des Landwirts aktiv beeinflusst werden.

### Ein integraler Bewertungsansatz

Zur Auswertung und ökologischen Beurteilung eines Bodens werden die Analysedaten gemeinsam mit Standortdetails (z.B. Höhenlage, Exposition, Niederschlag, Gründigkeit des Bodens) und Bewirtschaftungsdaten der letzten 10 Jahre (z.B. Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Düngung) mit Hilfe eines computergestützten Rechenmodells verarbeitet. Ein Schlüsselfaktor ist dabei die

Bodeneigenschaften, Tiefe 0 - 30 cm								
Parameter	Wert	sehr niedrig	niedrig	günstig	hoch	sehr hoch	Bemerkung	
<b>Basisparameter</b>								
Bodenschwere (KH)	34						leichter Boden	
pH Wert KCl (log H <sup>+</sup> )	6,5						schwach sauer	
pH Wert H <sub>2</sub> O (log H <sup>+</sup> )	7,6						schwach alkalisch	
Kalkgehalt CaCO <sub>3</sub> (%)	0,2						nicht nachweisbar	
gelöste Stoffe (el, mg/cm)	0,9						Auswaschung	
Humusgehalt (%)	1,6						Grünlösung	
Humusqualität [C/N]	11,8						N Fixierung	
T-Wert = CEC pot (mmol/kg)	53						pot sorptionschwach	
CEkalt (mmol/kg)	47						akt sorptionschwach	
Basensättigung [% CEC]	78						ausgeglichene Dynamik	
Ca am Magnet (Ca%CECp)	53,6						niedrig	
Mg am Magnet (Mg%CECp)	15,9						günstig	
K am Magnet (K%CECp)	5,9						sehr hoch	
Na am Magnet (Na%CECp)	2,2						sehr hoch	
Al am Magnet (Al%CECp)	5,3						sehr hoch	
NH <sub>4</sub> N am Magnet (NH <sub>4</sub> N%CECp)	0,2						günstig	
Fe am Magnet (Fe%CECp)	2,1						günstig	
Mn am Magnet (Mn%CECp)	0,1						günstig	
H am Magnet (H%CECp)	0,0						aktuelle Säure gering	
Säure am Magnet (pH%CECp)	10,8						niedrig	
<b>Stoff pflanzenverfügbar</b> <sup>1)</sup>	<b>Wert</b>	<b>sehr niedrig</b>	<b>niedrig</b>	<b>günstig</b>	<b>hoch</b>	<b>sehr hoch</b>	<b>Zufuhr <sup>2)</sup> kg/ha</b> <b>Reserve kg/ha</b> <b>Bemerkung</b>	
C org in kg/ha	38850							Humusabbau
N total in kg/ha	3300							N Reserven niedrig
Ca pflanzenverfüg (kg/ha)	2640						3100	Überschuss
Mg pflanzenverfüg (kg/ha)	476						600	ausreichend
K pflanzenverfüg (kg/ha)	600						300	extremen Überschuss
PO <sub>4</sub> pflanzenverfüg (kg/ha)	306						2700	extremen Überschuss
NH <sub>4</sub> -N (kg/ha)	7,7						( 20 )	starker Mangel
NO <sub>3</sub> -N (kg/ha)	83,0						( 100 )	Mangel
Nmin (kg/ha)	90,7						120	Mangel
SiO <sub>4</sub> pflanzenverfüg (kg/ha)	46,9						30	Mangel
Fe pflanzenverfüg (kg/ha)	136,1						5900	extremen Überschuss
Mn pflanzenverfüg (kg/ha)	5,64						1266	extremen Überschuss
Cu pflanzenverfüg (kg/ha)	0,48						10	ausreichend
Zn pflanzenverfüg (kg/ha)	0,90						36	Überschuss
Mo pflanzenverfüg (kg/ha)	0,90						0,18	starker Mangel
B pflanzenverfüg (kg/ha)	0,78						0	Überschuss
Ni pflanzenverfüg (kg/ha)								keine Aufhängigkeiten
Cr, Pb, Cd, Ni								keine Aufhängigkeiten
<b>Melioration</b>								
Kalk (CaCO <sub>3</sub> ) kg/ha	1100							
Magnesium (Mg) kg/ha					90			
Gips (CaSO <sub>4</sub> * 2 H <sub>2</sub> O) kg/ha								
Kalium (K) kg/ha								
Corg kg/ha								26500

- 1) Pflanzenverfügbare Stoffe des Bodens zum Zeitpunkt der Probenahme.
- 2) Zufuhr ergibt sich als Differenz des Pflanzenbedarfs (angeb. Kultur: WEIZEN, Ertrag: 6,5 t/ha) während der gesamten Vegetationsperiode und der pflanzenverfügbaren Stoffe (siehe 1). Die Zufuhr ist unbedingt den Entwicklungsstadien anzupassen!

Abb. 4: So wird die Auswertung zusammenfassend dargestellt.

Berechnung der Nährstoffverfügbarkeit. Diese wird wiederum, je nachdem um welche Stoffe es sich handelt, vom Säurezustand, dem Humus- und Tongehalt und weiteren Bodenparametern beeinflusst. Das Rechenmodell liefert hierzu die Intensitäten (Konzentration der Bodenlösung), die Kapazitäten (Vorräte) und die Kinetik (Nachlieferung) der analysierten Nährelemente.

### Ursache und Wirkung

Durch die umfassende Darstellung der dynamischen Prozesse kann eine Ursache-Wirkungs-Beziehung dezidiert abgeleitet werden. Die optimalen Bedingungen einer hohen Bodenfruchtbarkeit sind hinlänglich bekannt. Es handelt sich um Naturgesetzmäßigkeiten, die den Grundzügen der Thermodynamik folgen und für jeden Standort angewendet werden können. Die Pflanzen sind demnach die „Wirkung“, welche als „Ursache“ bestimmte Zustände des Bodens widerspiegelt. Aber Achtung: Pflanzen besitzen verschiedenste Strategien, um suboptimale Verhältnisse im Boden zu überbrücken. Deshalb sollte die Betrachtung und Untersuchung des Bodens („= Ursache“) beim Auftreten

von Schadsymptomen („Wirkung“) immer im Vordergrund stehen.

### Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden dem Landwirt wie in Abb. 4 ersichtlich zur Verfügung gestellt. Eine detailliertere Beschreibung der Auswertungen erfolgt im Anhang. Die Nährstoffgehalte werden nicht in mg/kg ausgewiesen, sondern in kg/ha (unter Berücksichtigung des Skelettgehaltes!). Damit ist keine Einteilung in Gehaltsklassen nötig. Es ist bekannt, welche Stoffmengen der Boden in pflanzenverfügbarer Form bereitstellen kann und welche Mengen von einer bestimmten Kultur benötigt werden, um ein bestimmtes Ertragsniveau zu erzielen. Müssen Nährstoffe bei zu geringer Verfügbarkeit, ungünstigen Verhältnissen oder zu langsamer Nachlieferung zugeführt werden, wird dies zusätzlich aufgelistet.

### Erfahrungen und Ausblick

In der Vergangenheit zeigte sich deutlich, dass die Bodenvorräte an P und K größtenteils sehr hoch sind und eine weitere Zufuhr von außen ökologisch und ökonomisch keinen Sinn

### Basisparameter

### Nährstoff-Verhältnisse

### Pflanzen-ernährung

### Melioration

macht. Zunächst sollten andere ackerbauliche Maßnahmen ausgenutzt werden, um diese Vorräte zu mobilisieren. Bild 1 zeigt, welche Potenziale in der Umstellung des Düngeregimes stecken. Die ökologische Bodenbewertung stellt für Landwirte prinzipiell eine Alternative zur etablierten Methodik des VDLUFA dar. Nähere Informationen sind zu finden unter: [www.landschaftsoekologie.at](http://www.landschaftsoekologie.at)

### Literatur

- Bergmann W. (1993): *Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen*. 3. Auflage, Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart.
- Schilling G. (2000): *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Schüller, H. (1969): *Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden*. Z. Pflanzenernährung Bodenkunde 123, 48–63.
- Köster W., Nieder R. (2007): *Wann ist eine Grunddüngung mit Phosphor, Kalium und Magnesium wirtschaftlich vertretbar?* 2. Auflage. Publiziert auf: [www.beratung-mal-anders.de](http://www.beratung-mal-anders.de).
- ÖNORM L 1087 (2006): *Chemische Bodenuntersuchungen- Bestimmung von „pflanzenverfügbarem“ Phosphor und Kalium nach der Calcium-Acetat-Lactat (CAL) - Methode*. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM S 2122-1 (2004): *Fraktionierte Analyse - Untersuchungsmethoden*. Österreichisches Normungsinstitut.