
Bodenpflanzen als Standortzeiger

HAGEN S. FISCHER und ANTON FISCHER

Schon lange ist bekannt, dass Pflanzen Standortbedingungen anzeigen können. HUMBOLDT (1807) beschreibt die Abhängigkeit der Pflanzen in den Tropenländern von der Höhenlage, also letztlich von der Temperatur im Höhengradienten. Zum 100. Mal jährte sich im Jahr 2013 das Erscheinen der Arbeit von Josias Braun (später Braun-Blanquet) über „*Die Vegetationsverhältnisse der Schneestufe in den Rhätisch-Leponischen Alpen*“ (BRAUN 1913, S. 141) in der er feststellt: „*In vielen Fällen ist sicherlich bestimmend die chemische Beschaffenheit des Nährbodens, wobei namentlich dessen Gehalt an kohlensaurem Kalk, ferner auch der Gehalt an mineralischen Nährstoffen überhaupt in Betracht fällt.*“ Dieses Wissen der Abhängigkeit der Pflanzen von bestimmten Standortbedingungen hat zur Entwicklung von Indikatorensystemen geführt, mithilfe derer diese Standortbedingungen vor Ort ohne aufwändige Laboranalysen eingeschätzt werden können. Zur Schnellansprache der Standortbedingungen im Gelände benutzen wir heute Zeigerartengruppen (EWALD 2007; WALENTOWSKI et al. 2006), die eine qualitative Einordnung in Kategorien wie „schwach sauer“ und „mäßig frisch“ erlauben. Ellenberg's Zeigerwerte (ELLENBERG et al. 2003) ordnen die Arten aufgrund der jeweils vorkommenden Pflanzenarten bezüglich der wichtigsten ökologischen Faktoren Licht, Temperatur, Kontinentalität, Feuchte, Bodenreaktion und Nährstoffe auf einer relativen Skala von 1 (= wenig) bis 9 (= viel) für Mitteleuropa ein. In ähnlicher Weise verfahren LANDOLT (1977, 2010) für die Schweiz, HILL et al. (1999) für Großbritannien und ZOLYOMI et al. (1967), SOO (1980) und BORHIDI (1993) für Ungarn.

Alle diese bis jetzt existierenden Systeme sind in der Regel nicht von systematischen Messergebnissen abgeleitet, sondern beruhen im Wesentlichen auf den langjährigen Erfahrungen der jeweiligen Autoren. Die BZE II bot die einzigartige Möglichkeit, ein Zeigersystem zu entwickeln, das von der systematischen Stichprobe der BZE II und den dort durchgeführten Bodenmessungen abgeleitet ist und messbare Bodeneigenschaften direkt quantifiziert anzeigen kann. Mit dem Weihestephaner Waldindikatorensystem (WeiWIS) werden nun erstmals neue Wege zur Nutzung der Pflanzen als Bioindikatoren gegangen.

Welche Bodeneigenschaften beeinflussen das Pflanzenwachstum?

Sicherlich beeinflussen nicht alle Bodeneigenschaften die Pflanzen, zumindest nicht in gleichem Umfang. Daher stellt sich die Frage, welche der im Rahmen der BZE II gemessenen Bodeneigenschaften überhaupt für ein Indikatorensystem in Frage kommen.

Indikator

Ein Indikator (von lateinisch: *indicare* = anzeigen) ist ein einfach zu bestimmendes Merkmal, das ein anderes, schwieriger zu bestimmendes Merkmal anzeigt.

Multivariate statistische Analysen können aufzeigen, welche der gemessenen Bodeneigenschaften die vorgefundene Artenkombination besonders stark beeinflussen. Bei der Analyse der Daten der BZE II zeigte sich, dass in den bayerischen Wäldern die folgenden Bodeneigenschaften in der angegebenen Reihenfolge die Artenzusammensetzung der Vegetation besonders stark beeinflussen:

- pH (CaCl₂)
- Kalium-Vorrat
- Basensättigung
- Eisen-Vorrat
- Calcium-Vorrat (~ KAK, Mg)
- Gesamt-Stickstoff (~ C_{org})
- Organischer Kohlenstoff (Humus)
- Gesamt-Phosphor
- Kationen-Austausch-Kapazität (KAK)

Dies bestätigt die Beobachtung von BRAUN (1913), der beschreibt, dass besonders die Säureverhältnisse des Bodens und die Nährstoffvorräte die Artenzusammensetzung maßgeblich beeinflussen. Den stärksten Einfluss hat der pH-Wert, den zweitstärksten der Kaliumvorrat. Der pH-Wert des Bodens entscheidet über die Aktivität vieler Ionen (Nährionen ebenso wie auch toxischer Ionen) im Boden sowie über die Aktivität der Bodenbakterien; Kalium ist eines der Hauptnährelemente für Pflanzen und Bestandteil des NPK-Standarddüngers. Stickstoff (N) und Phosphor (P), die beiden anderen Bestandteile des NPK-Düngers, tauchen auch in obiger Liste auf. Die anderen Eigenschaften, besonders die Basensättigung, kennzeichnen den Gehalt des Bodens an weiteren lebenswichtigen Mineralstoffen und Spurenelementen.

Für diese Bodeneigenschaften kann in umgekehrter Schlussfolge die Bodenvegetation als Indikator herangezogen werden.

Wie verhalten sich die Arten entlang von Gradienten?

Entlang eines ökologischen Gradienten zeigen Pflanzenarten in der Regel ein ökologisches Optimum, d.h. einen Bereich, in dem sie mit höherer Wahrscheinlichkeit und in größerer Menge vorkommen. Abbildung 1 zeigt dies anhand der BZE II-Daten am Beispiel des Wald-Frauenfarns (*Athyrium filix-femina*) entlang des pH-Gradienten. Die kleinen Striche am oberen Rand des Diagramms stellen Probepunkte dar, an denen die Art vorkommt, die Striche am unteren Rand die Probepunkte, an denen sie fehlt. Sowohl für die oberen als auch für die unteren Punkte ist im mittleren Bereich eine geringere Dichte zu erkennen als an den extremeren Rändern. Das liegt daran, dass auf Böden mittlerer Eigenschaften mehr Flächen in Ackerland umgewandelt wurden und Wälder heute dort seltener vorkommen als unter extremeren Bodeneigenschaften. Die Kurve beschreibt die berechnete Wahrscheinlichkeit, mit der die Art bei dem jeweiligen pH-Wert gefunden werden kann. Es ist deutlich zu erkennen, dass diese Kurve der Auftretenswahrscheinlichkeit für den Wald-Frauenfarn bei einem pH-Wert von knapp 6 ein Maximum zeigt. Das bedeutet, dass auf Böden mit diesem pH-Wert die Wahrscheinlichkeit am größten ist, diese Farn-Art im Wald zu finden. Je stärker die Bedingungen in einem bestimmten Bestand von diesem Bereich abweichen, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit diese Art zu finden.

Für alle Pflanzenarten, die in der Stichprobe der BZE II mit ausreichender Häufigkeit vorkommen, können diese ökologischen Glockenkurven für eine Vielzahl wachstumsrelevanter Standortfaktoren bestimmt werden. Sie beschreiben das charakteristische Verhalten der Arten entlang des jeweiligen ökologischen Gradienten.

Wahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines bestimmten Ereignisses ist die erwartete Häufigkeit, mit der das Ereignis eintritt. Bei einem Waldspaziergang beispielsweise eine seltene Orchidee zu finden hat eine geringe Wahrscheinlichkeit; das Ereignis tritt vergleichsweise selten auf. In Bayern im Wald eine Fichte zu finden ist dagegen sehr viel wahrscheinlicher.

Bedingte Wahrscheinlichkeit

Eine bedingte Wahrscheinlichkeit $p(V|x)$ ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Ereignisses (z. B. das Auftreten einer bestimmten Pflanzenart V) unter der Bedingung, dass bestimmte Umweltbedingungen, z. B. die Bodeneigenschaften x einen bestimmten Wert haben (z. B. $\text{pH} = 6,2$). Die Preiselbeere beispielsweise – ein typischer Säurezeiger – auf einem Boden mit niedrigen pH-Wert zu finden hat eine viel höhere Wahrscheinlichkeit als auf einem Boden mit hohem pH-Wert.

A-priori-Wahrscheinlichkeit

Die A-priori-Wahrscheinlichkeit $p(V)$ ist die Wahrscheinlichkeit, mit der man eine bestimmte Pflanzenart vorfindet, wenn nichts über sonstige Bedingungen (wie z. B. pH-Wert) bekannt ist. Sie kann mit der Häufigkeit der Art gleich gesetzt werden.

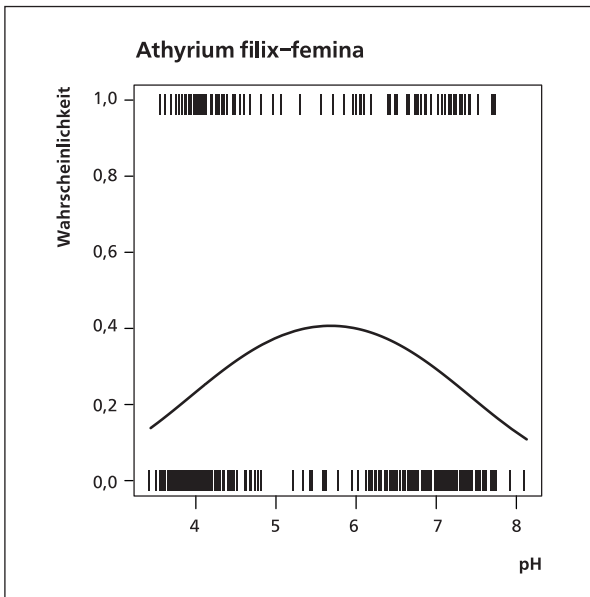


Abbildung 1: Die „Ökologische Glockenkurve“ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, z. B. den Wald-Frauenfarn (*Athyrium filix-femina*) bei einem bestimmten pH-Wert im Wald anzutreffen.

Die ökologischen Glockenkurven (Abbildung 1) lassen sich mit einer quadratischen logit-Regression beschreiben:

$$\text{Formel 1} \quad \log \left[\frac{p(V|x)}{1-p(V|x)} \right] = b_0 + b_1 + b_2 x^2$$

Auf der Basis der fast 400 Probepunkte der BZE II können für jede Pflanzenart die Koeffizienten b_0 , b_1 und b_2 der Gleichung bestimmt werden. Sind diese Koeffizienten bekannt, kann umgekehrt für jeden pH-Wert x (und entsprechend für andere Standortfaktoren) die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten jeder Art berechnet werden.

Artenkombination und Bodeneigenschaften

Bisher wurde die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Pflanzenart in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen (zum Beispiel Boden-pH) betrachtet und berechnet. Um die Pflanzenarten in einem Waldbestand als Indikator nutzen zu können, brauchen wir aber genau den umgekehrten Ansatz: Wir müssen die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen pH-Werte bestimmen unter der Bedingung, dass eine bestimmte Liste von Pflanzenarten in einem Waldbestand vorgefunden wird. Den wahrscheinlichsten pH-Wert nehmen wir dann als Ergebnis des Indikatorsystems. Dieses „Auf-den-Kopf-Stellen“ der Wahrscheinlichkeiten erlaubt die Bayes-Formel (siehe Kasten). Mit diesem Konzept ist es jetzt möglich, die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von pH-Werten bei gegebener Artenkombination auszurechnen. Der wahrscheinlichste pH-Wert ist dann das Ergebnis des Indikatorsystems.

Bayes-Formel

Die Bayes-Formel bestimmt die bedingte Wahrscheinlichkeit $p(x|\vec{V})$ für das Auftreten eines bestimmten pH-Wertes x (oder eines anderen Standortfaktors) bei einer gegebenen Artenkombination \vec{V} aus der bedingten Wahrscheinlichkeit $p(\vec{V}|x)$ für das Auftreten der Artenkombination \vec{V} bei dem pH-Wert x und den A-priori-Wahrscheinlichkeiten des Auftretens der Artenkombination $p(\vec{V})$ und den A-priori-Wahrscheinlichkeiten des pH-Werts $p(x)$:

$$\text{Formel 2} \quad p(x|\vec{V}) = \frac{p(\vec{V}|x) \cdot p(x)}{p(\vec{V})}$$

Die multivariate bedingte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Artenkombination $p(\vec{V}|x)$ kann aus den univariaten bedingten Wahrscheinlichkeiten (Formel 1) geschätzt werden:

$$\text{Formel 3} \quad p(\vec{V}|x) = p(V_1|x) \cdot p(V_2|x) \cdot \dots \cdot p(V_n|x)$$

Die A-priori-Wahrscheinlichkeiten des pH-Werts $p(x)$ ergibt sich aus der Häufigkeitsverteilung aller pH-Werte in bayerischen Wäldern. Die A-priori-Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Artenkombination $p(\vec{V})$ ist eine Konstante für einen bestimmten Bestand und kann daher bei der Anwendung der Formel als Indikator unberücksichtigt bleiben.

Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt beispielhaft die Artenliste der Krautschicht im Waldbestand am BZE-Probepprofil 15531 mit den Koeffizienten der Glockenkurven (Formel 1) der Arten. Aus den Koeffizienten berechnet das Indikatorsystem die Wahrscheinlichkeiten der pH-Werte auf der Basis dieser Artenliste. Das Ergebnis ist das in Abbildung 2 dargestellte Wahrscheinlichkeitsprofil für den pH-Wert bei dieser Artenkombination. Die Kurve zeigt, dass pH-Werte unter 6 sowie über 8 bei dieser Artenkombination extrem unwahrscheinlich sind und ein deutliches Wahrscheinlichkeitsmaximum bei einem pH-Wert von 7,4 liegt. Für 72 % der Probepunkte der BZE ist die Abweichung zwischen indiziertem und gemessenem pH-Wert kleiner als eine pH-Einheit.

Artname	b_0	b_1	b_2
Bergahorn (<i>Acer pseudoplatanus</i>)	-7,95	1,89	-0,12
Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)	-3,14	0,91	-0,07
Feldahorn (<i>Acer campestre</i>)	-10,29	1,48	-0,06
Flattergras (<i>Milium effusum</i>)	-6,79	1,27	-0,08
Gewöhnliche Goldnessel (<i>Lamium galeobdolon</i>)	-4,70	0,49	0,00
Gewöhnliche Nelkenwurz (<i>Geum urbanum</i>)	-5,74	0,69	-0,01
Große Sternmiere (<i>Stellaria holostea</i>)	-17,23	4,21	-0,29
Haselnuss (<i>Corylus avellana</i>)	-9,42	2,09	-0,14
Himbeere (<i>Rubus idaeus</i>)	-4,33	1,52	-0,14
Kriechender Günsel (<i>Ajuga reptans</i>)	-8,12	2,02	-0,14
Spitzahorn (<i>Acer platanoides</i>)	-6,00	0,28	0,02
Traubeneiche (<i>Quercus petraea</i>)	-6,98	1,94	-0,16
Walderdbeere (<i>Fragaria vesca</i>)	-7,99	1,77	-0,10
Waldfiederzwenke (<i>Brachypodium sylvaticum</i>)	-4,55	0,51	0,02
Waldfrauenfarn (<i>Athyrium filix-femina</i>)	-9,22	3,11	-0,28
Waldknäuelgras (<i>Dactylis polygama</i>)	-13,66	2,76	-0,16
Waldlabkraut (<i>Galium sylvaticum</i>)	-22,52	6,24	-0,49
Waldmeister (<i>Galium odoratum</i>)	-14,22	3,72	-0,28
Waldsegge (<i>Carex sylvatica</i>)	-9,24	2,51	-0,18
Waldveilchen (<i>Viola reichenbachiana</i>)	-9,19	2,32	-0,14

Tabelle 1:
Liste der Pflanzenarten bei
Profil 15531 (Krautschicht),
mit den Parametern der
Glockenkurve (Formel 1).

Mit dem vorgestellten Werkzeug kann nun auf statistisch abgesicherter Basis von der Vegetation auf wichtige Kenngrößen des Bodens geschlossen werden, ohne diese messen zu müssen. Diese Weiterentwicklung der bisherigen Ansätze von Braun-Blanquet und Ellenberg ist mit den Erhebungen der BZE II möglich geworden.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für sechs Probeflächen aus verschiedenen Naturräumen Bayerns.

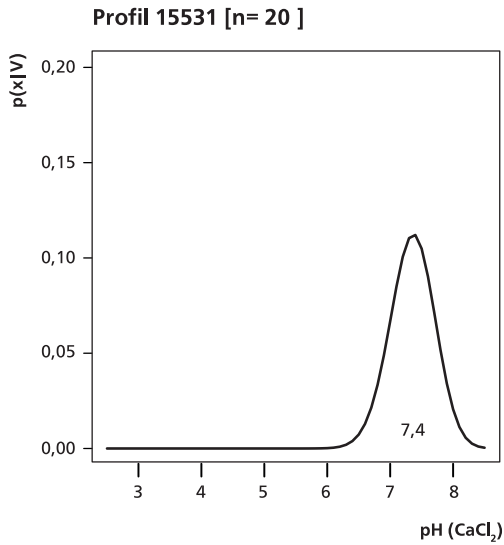


Abbildung 2:
Wahrscheinlichkeitsprofil des pH-Wertes
am BZE II-Punkt 15531 auf der Basis der
20 vorkommenden Pflanzenarten.

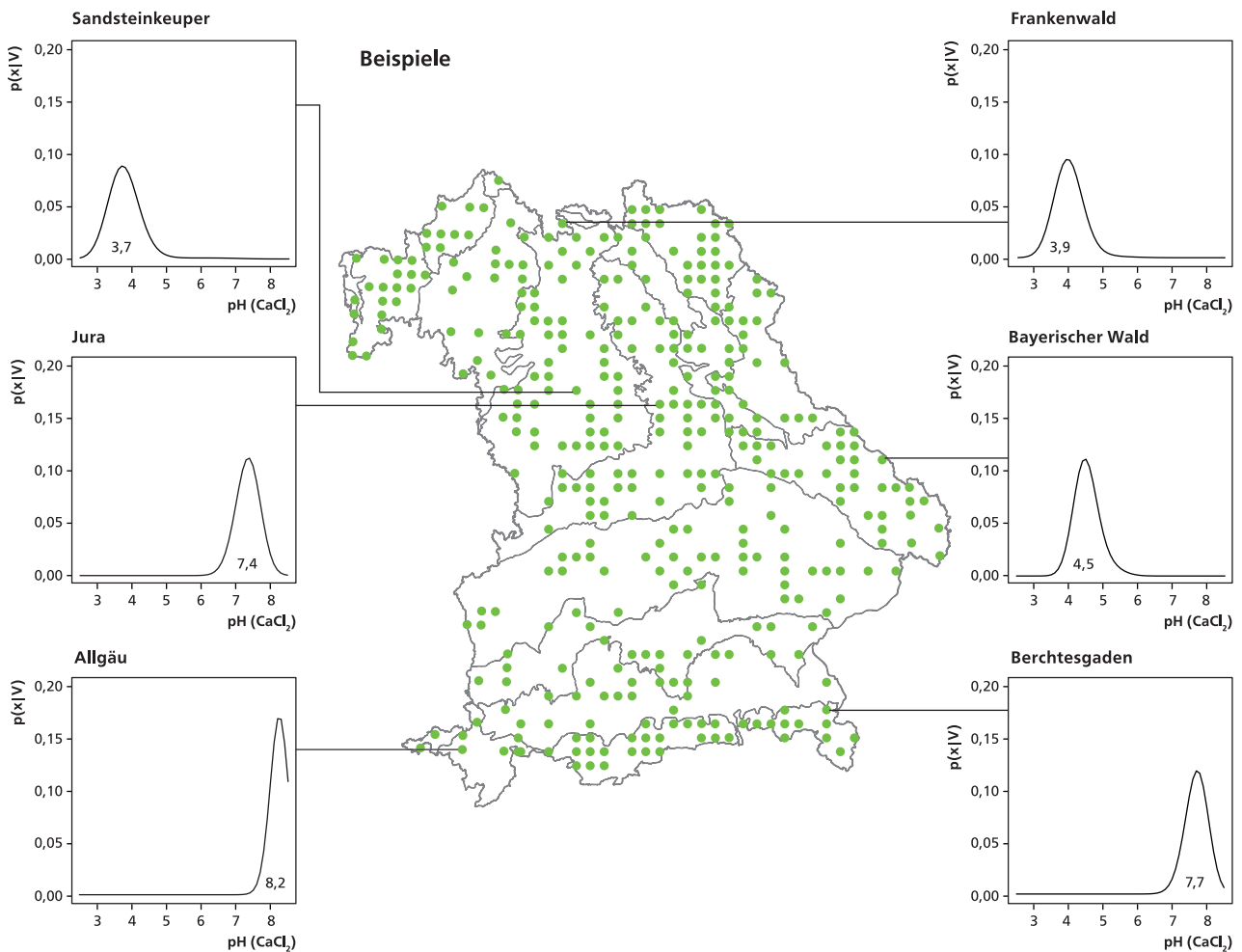


Abbildung 3: Beispiele von Wahrscheinlichkeitsprofilen für den pH-Wert aus sechs verschiedenen Naturräumen Bayerns. Die Kreise stellen die Lage der BZE II-Punkte dar. Im Bereich des Sandsteinkeupers und der ostbayerischen Grenzgebirge zeigen die Kurven deutlich saure Verhältnisse an, während im Jura und den Kalkalpen basische Boden-pH-Werte indiziert – und quantifiziert – werden.

Das Weihenstephaner Waldindikatorsystem WeiWIS

Für die Anwendung des neuen Indikatorsystems stehen im Weihenstephaner Waldindikatorsystem WeiWIS zwei Softwareprodukte, eine ACCESS-Datenbank sowie eine EXCEL-Arbeitsmappe zur Verfügung:

- I) Für die Indikation kontinuierlicher Bodenmerkmale wie pH-Wert oder Nährstoffvorräte gibt es eine MS-ACCESS Datenbank. Sie enthält ein Datenerfassungsmodul, mit dem der Anwender die in einem Waldbestand vorgefunden Pflanzenarten erfassen kann. Die gespeicherten Daten (= Pflanzenarten) werden automatisch analysiert und die Ergebnisse graphisch dargestellt. Die Daten können in das universelle „csv-Format“ exportiert werden und stehen somit auch für Auswertung in anderen Softwareprodukten zur Verfügung.
- II) Das oben vorgestellte Konzept lässt sich nicht nur auf kontinuierliche Bodeneigenschaften wie die Säure- und Nährstoffverhältnisse des Bodens anwenden, sondern auch auf Eigenschaften, die als diskrete Typen auftreten. Eine solche diskrete Bodeneigenschaft, die auch pflanzenrelevant ist, ist im Datensatz der BZE II der Tiefenverlaufstyp der Basensättigung. Für die Indikation des Tiefenverlaufstyps der Basensättigung steht eine EXCEL-Anwendung zur Verfügung, in der alle Indikatorarten aufgelistet sind. Der Anwender kreuzt die Arten an, die er im Bestand vorfindet und bekommt sofort grafisch und numerisch angezeigt, welche Wahrscheinlichkeit die verschiedenen Typen haben (Abbildung 4).

Prinzipiell kann mit dem System bei entsprechender Kenntnis der Pflanzenarten ergänzend zur Standortkarte und zum Standortinformationssystem BaSIS im konkreten Waldbestand auf bodenchemische Größen geschlossen werden. Technisch kann WeiWIS auf verschiedenen Systemen implementiert werden, beispielsweise im Internet oder im Bayerischen Waldinformationssystem.

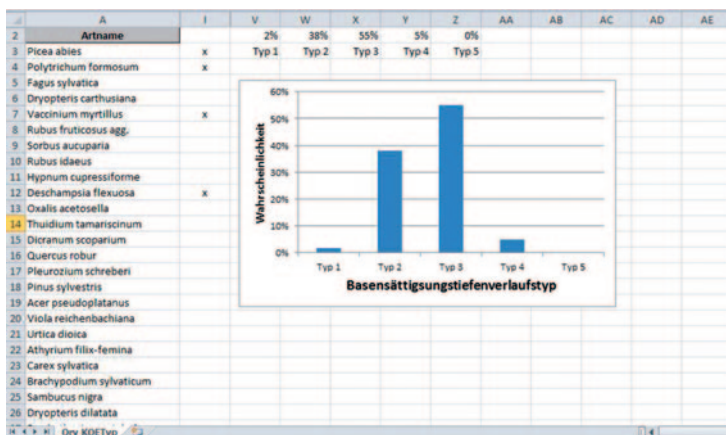


Abbildung 4:
EXCEL-Arbeitsmappe für den
Basensättigungstiefenverlaufstyp

Fazit und Ausblick

Vor hundert Jahren erkannte Braun-Blanquet, dass die Verbreitung der Pflanzenarten von Bodeneigenschaften abhängig ist. Ellenberg und andere entwickelten daraufhin empirische Indikatorsysteme, mit denen Bodeneigenschaften aufgrund der im Bestand wachsenden Pflanzenarten qualitativ vorhergesagt werden konnten.

Das damals begründete System kann heute dank der BZE II auf eine *messdatenbasierte Grundlage* gestellt werden. Das Weihenstephaner Waldindikatorsystem WeiWIS ist eine Erweiterung dieses bewährten Indikatorarten-Konzeptes, das nun aber mit einem wahrscheinlichkeits-theoretisch fundierten Ansatz die Indikation quantitativer Bodeneigenschaften ermöglicht. Zwei einfach zu handhabende Softwaretools stehen für den Einsatz in der Praxis zur Verfügung. In einem nächsten Schritt soll die Datenbasis um die BZE II Daten von ganz Deutschland erweitert und das System dadurch auf eine noch breitere Grundlage gestellt werden.