Aus dem Institut für Technologie und Biosystemtechnik

Wolfgang Paul

Permittivitätsmessungen im Boden zur Bestimmung von Düngezuständen

Manuskript, zu finden in www.fal.de

Published in: Landbauforschung Völkenrode 52(2002)2, pp. 97-106

Braunschweig
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
2002

Permittivitätsmessungen im Boden zur Bestimmung von Düngezuständen

Wolfgang Paul[1]

Zusammenfassung

Zahlreiche Sensoren zur Messung der volumetrischen Bodenfeuchte basieren auf der Erfassung des Realteils der Dielektrizitätszahl (Permittivität). Neuere Entwicklungen haben gezeigt, dass sich aus der Messung der komplexen Permittivität in Real- und Imaginärteil die ionische Leitfähigkeit des pflanzenverfügbaren Porenwassers im Boden bestimmen lässt. Diese ‚Salinität' wird in Mitteleuropa weitgehend von den Düngersalzen bestimmt und könnte somit ein Maß für den Düngungszustand des Bodens sein.

Im Beitrag wird gezeigt, dass im Boden die Salinität weitgehend von der Nitratkonzentration abhängt. Andere Hauptnährstoffe der Düngung, wie z. B. Kalium, haben einen deutlich geringeren Einfluss. Es wird ferner gezeigt, dass sich der Einfluss der Düngermenge nahezu linear in der Salinität abbildet, jedoch ist der auch nach mehreren Spülungen verbleibende Grundwert (offset) bei verschiedenen Bodenarten unterschiedlich. Wesentlich für die Beurteilung des Bodenzustands anhand der Salinität ist jedoch deren Korrektur auf einheitliche Temperaturen und Bodenfeuchten. Alle Salinitätswerte wurden hier auf Referenzwerte bei 20 °C und 100 % nFK (nutzbare Feldkapazität) bezogen.

Mit den so korrigierten Werten lassen sich die praktischen Fragen nach Höhe und Zeitpunkt der Düngung beantworten. Eine einfache 2-Punkt-Regelung für die Düngung von Raps zeigt die Anwendbarkeit dieser Strategie. Die tatsächlichen Messwerte aus einem praktischen Betrieb belegen die grundsätzliche Praxistauglichkeit, aber auch die in der Bodenvariabilität begründeten Grenzen dieser schnellen und wartungsfreien Messtechnik.

Insgesamt können mit Permittivitätsmessungen und deren Umsetzung in eine robuste Einstichsensorik schnelle und einfach zu deutende Maßzahlen für die beiden wichtigsten Einträge in die Pflanzenproduktion, Wasser und Dünger, gewonnen werden. Ebenso wie die Bewässerung (basierend auf Messwerten der reellen Permittivität als Maß für die Bodenfeuchte) kann auch die Düngung mit den Messwerten der komplexen Permittivität als Maß für die Salinität gesteuert werden.

Schlüsselworte: Sensorik, Permittivität, Bodenzustand, Salinität, pflanzenverfügbares Nitrat im Porenwasser

Abstract

Permittivity Measurements in Soil for Assessment of Fertilization State

Numerous sensors for measuring the volumetric water content in soil are based on recording the real part of the dielectric number (permittivity). New developments have shown, that by measuring the complex permittivity in its real and imaginary part the ionic conductivity of the plant available pore water in soil can be assessed. This 'salinity' is in moderate climates mostly influenced by the amount of fertilizer salts in soil and so might be a measure for the fertilization state.

In this paper it is shown, that in soil the salinity is widely influenced by the nitrate concentration. Other main inputs into plant production, i.e. potassium, have only minor significance. It is further shown, that the influence of the amount of fertilizer is mapped nearly linearly to salinity. But the offset value after several times rinsing the soil is different for various soil types. Really essential for the judgment of the soil state by salinity values is the correction of the measured salinity to standard temperatures and soil moistures. All values here were corrected to values at 20 °C and 100 % aFC (apparent field capacity).

When salinities are corrected in such a manner the practical questions on time and amount of fertilization can be answered. A simple two-point control strategy for the fertilization of rape shows the applicability of such a control. The actual salinity values from a practical farm management clearly show the usefulness of this fast and maintenance free measuring technique.

Altogether it can be stated, that with such a technique integrated in a robust measuring stick, fast and simple indicator values can be achieved for the two most essential inputs into plant production: water and fertilizer. What is done successfully on a week's scale in irrigation taking the real part of permittivity as a measure for soil moisture, can also be applied on a month's scale on fertilization taking the complex permittivity as a measure for soil salinity.

Keywords: sensorics, permittivity, state of soil, salinity, plant available nitrate in pore water

[1] Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38166 Braunschweig

1 Einleitung, Messprinzip

Die Messung der dielektrischen Eigenschaften wird häufig zur Charakterisierung von Materialeigenschaften angewendet. Am verbreitetsten ist die Messung der Materialfeuchte (des Wassergehaltes). Diese Messung beruht auf der Tatsache, dass die relative Dielektrizitätszahl von Wasser mit ca. 80 sehr viel höher liegt als die von Luft (= 1) oder vieler anderer organischer oder mineralischer Substanzen.

Die dielektrischen Eigenschaften eines Stoffes werden durch die komplexe Permittivität

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\,\varepsilon''$$

charakterisiert, wobei $j^2 = -1$,
ε' den Realteil als Maß der Polarisierbarkeit in einem elektrischen Feld angibt (≈ Wasseranteil) und
ε'' den Imaginärteil als Maß für den Energieverlust.

Der Energieverlust wird aufgeteilt gemäß

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_d + \frac{\sigma}{2\pi f\,\varepsilon_0}$$

in einen dielektrischen Verlust (≈ 0 bei den nachfolgend betrachteten Frequenzen) und einem Anteil, der den Verlust durch die ionische Leitfähigkeit beschreibt. σ ist dabei im Boden die Leitfähigkeit des freien Wassers in den Bodenporen, häufig auch als EC-Wert des Wassers bezeichnet.

Das freie Porenwasser ist (anders als das hier nicht weiter interessierende gebundene Wasser) pflanzenverfügbar. Die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers im Boden ist als Funktion des Realteils der Permittivität des Bodens (Gemisch aus Luft, Wasser und Teilchen) direkt messbar. Zahlreiche elektronische Messgeräte basieren auf diesem Zusammenhang.

Eine neuere Entwicklung stellt den Zusammenhang zwischen dem pflanzenphysiologisch interessanten ionischen Leitwert des Porenwassers s_W und dem messbaren Leitwert des Boden σ_B dar (Hilhorst, 1998). Die allgemeine Formel

$$\sigma_W = \frac{\varepsilon'_W \cdot \sigma_B}{(\varepsilon'_B - \varepsilon'_K)}$$

beinhaltet als nahezu konstante Werte die Dielektrizitätszahl des Wassers (temperatur- und frequenzabhängig, hier mit ausreichender Genauigkeit zu = 80 gewählt) und eine Bodenkonstante für den Wert der Dielektrizitätskonstanten bei absolut trockenem Boden, der zwischen 3 (bei leichten Böden) und 7 (bei bindigen Böden) liegt. In dieser Arbeit ist unabhängig vom Boden $\varepsilon'_K = 5$ gewählt.

Die Leitfähigkeit des pflanzenverfügbaren Porenwassers lässt sich so aus den Messwerten der Leitfähigkeit des Bodens und des Wassergehalts des Bodens durch

$$\sigma_W \approx \frac{80 \cdot \sigma_B}{\varepsilon'_B - 5} \qquad (1)$$

annähern. Die Näherung (1) wurde durchgehend in diesem Beitrag verwendet.

Die Leitfähigkeit von Wasser lässt sich auch als Summe von Konzentrationen einzelner Ionen angeben:

$$\sigma = \sum n\, c_i |z_i| \lambda_i$$

Dabei ist z_i die Ladungszahl, c_i die Konzentration und λ_i die Äquivalenzleitfähigkeit der i-ten Ionenart (i=1...n). Die Leitfähigkeit von Wasser ist also ein Maß für den Salzgehalt. Bei Meerwasser liegt der Wert von σ je nach Herkunft und Temperatur bei Werten um 50 mS/cm. Da im Meer allein 80 % der Leitfähigkeit durch die Kochsalzionen Na^+ und Cl^- bestimmt werden, gibt es feste Umrechnungstabellen zwischen Leitfähigkeit und Salzgehalt.

Der Salzgehalt von Wasser (Gewichtsanteil der Salze bezogen auf das Gesamtgewicht der Lösung) ist als Salinität definiert. Salinitäten werden auch für Böden angegeben. In der Bodenkunde wird üblicherweise die Salinität im Extrakt aus dem wassergesättigten Boden gemessen. Die elektrische Leitfähigkeit des Extraktes ECe wird abweichend von obiger Definition im internationalen Schrifttum kurz auch als Salinität bezeichnet. Diese Definition wird im folgenden übernommen.

Je nach Herkunft der Böden setzt sich der Salzgehalt höchst unterschiedlich aus Ionen wie Natrium, Kalium, Magnesium, Kalzium und Chlorid, Sulfat oder Nitrat zusammen. Die Grundsalinität der Böden ist auch wegen der Austauschprozesse sehr unterschiedlich. Bei einer Düngung sind jedoch das negative Nitration und das positive Kalziumion die beiden beweglichsten Ionen bewusster Düngereinträge. Die Hypothese dieser Arbeit ist, dass diese Ionen auch weitgehend die Änderung in der Leitfähigkeit des Porenwassers bestimmen und so ein Maß für den pflanzenverfügbaren Dünger im Porenwasser sind.

In diesem Beitrag ist deshalb die Frage zu klären, ob durch Messung mit handelsüblichen Geräten und Berechnung der Leitfähigkeit des Porenwassers nach Formel (1) eine Aussage über den Düngezustand des Bodens gewonnen werden kann. Insbesondere interessiert, ob ähnlich wie bei der Beregnung durch Messungen die optimale Menge und der optimale Zeitpunkt einer Düngergabe bestimmt werden kann.

2 Material und Methoden

Die Messungen wurden, soweit in Kapitel 4 bei den praktischen Anwendungen nicht anders beschrieben, mit Kleinlysimetern nach Abbildung 1 durchgeführt. Eine entsprechende Bodenprobe wurde mit zwei oder drei Wiederholungen sorgfältig gepackt und verdichtet, so dass eine Bodensäule von ca. 15 cm entstand. Durch einige vorbereitende Spülungen wurden die Säulen in der Regel so konditioniert, dass freie Düngerreste ausgewaschen wurden (gleiche Startbedingungen). Die Bodensäulen wurden in der Versuchshalle bei ca. 18 °C gehalten. Zu Versuchsbeginn wurde eine Startdüngung äquivalent 30, 60 oder 90 kg N/ha soweit möglich in Wasser gelöst und gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt. Anschließend wurde alle 2 bis 3 Tage eine erneute Wassergabe von ca. 1/3 der nutzbaren Feldkapazität (ca. 200 ml) gegeben. Durch die wiederholten Spülvorgänge wurde die Düngerfront durch die Bodensäule gewaschen. Das jeweilige Sickerwasser nach jeder Spülung wurde aufgefangen und vermessen.

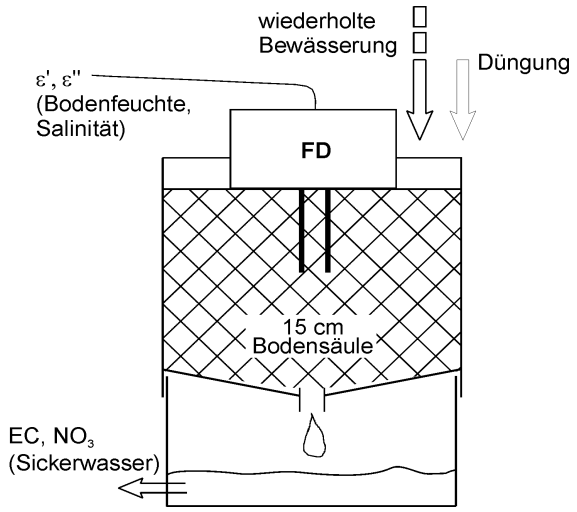

Abb. 1
Versuchsaufbau zur Messung der Bodensalinität in Kleinlysimetern

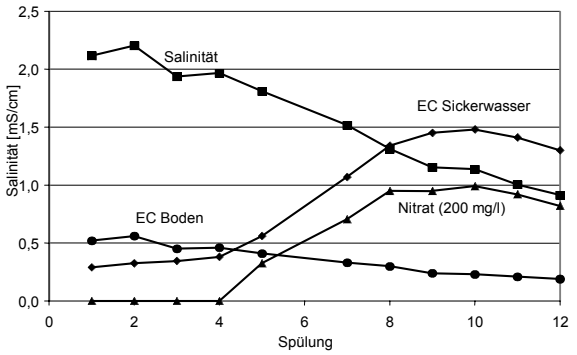

Abb. 2
Entwicklung der Leitfähigkeiten und der Nitratkonzentration in lehmigem Sand (Sl) nach 90 kg N/ha

Zur Messung der Permittivität wurde ein von IMAG-DLO erworbener FD-Sensor nach (Balendonck, 1997) verwendet. Die Messung geschieht in der obersten Bodenschicht (0-5 cm Tiefe), zur Berechnung der Leitfähigkeit des pflanzenverfügbaren Porenwassers (Salinität) wird Formel (1) benutzt. Die Messung der Leitfähigkeit des Bodens und des Wassers geschieht mit handelsüblichen Konduktometern. Im Sickerwasser nach Durchdringung von ca. 15 cm Bodensäule wird neben der Leitfähigkeit (EC-Wert) auch der Nitratgehalt mittels IR-Messtechnik bestimmt.

Einen guten Einblick in die Methodik und die ablaufenden Prozesse gibt Abbildung 2. Nach einer Düngung auf die Bodenoberfläche ist die erhöhte Salinität und die erhöhte Leitfähigkeit des Gesamtbodens, hier lehmiger Sand (Sl3), in der obersten Bodenschicht sofort zu messen. Mit fortschreitenden Wassergaben wird die Düngerfront langsam durch die Bodensäule gewaschen. Die Leitfähigkeit der Bodenoberfläche und die Salinität der obersten Schicht sinken, nach mehr als zwölf Waschvorgängen wird der Anfangswert wieder angestrebt. Im Vergleich zur Salinität erscheint die Leitfähigkeit des Bodens weniger aussagekräftig. Trotz ähnlicher Tendenzen sind die Ausschläge in der Leitfähigkeit des Gesamtbodens geringer und unterliegen daher auch leichter Störungen. Die Leitfähigkeiten des Gesamtbodens werden deshalb im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Interessant ist, dass die Front an Düngersalzen (sowohl Nitrat als auch der EC-Wert) nach einigen Spülungen langsam im Sickerwasser erscheint. Bei idealer Pfropfenströmung wäre nach 3 Spülungen mit jeweils einem Drittel Austausch des Porenwassers (1/3 Feldkapazität) der komplette Austausch des freien Wassers in der Bodensäule vollzogen. Die zeitlichen Verzögerungen hängen mit den vielfältigen Sorptions- und Ausgleichsprozessen im Boden zusammen. Nach 4 Spülungen beginnen sowohl der EC-Wert im Sickerwasser als auch die Nitratkonzentration zu steigen. Bemerkenswert ist die Parallelität der Entwicklungen von Nitratkonzentration und EC-Wert.

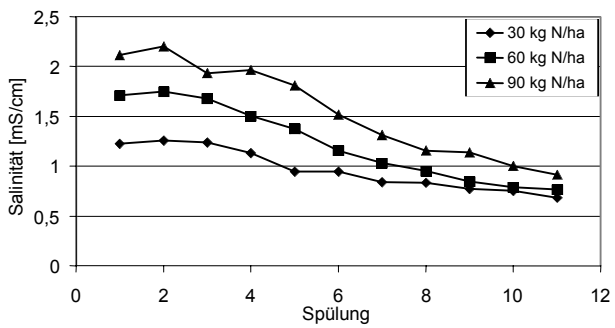

Abb. 3
Entwicklung der Salinitäten in der obersten Bodenschicht (Sl) nach 30, 60, 90 kg N/ha

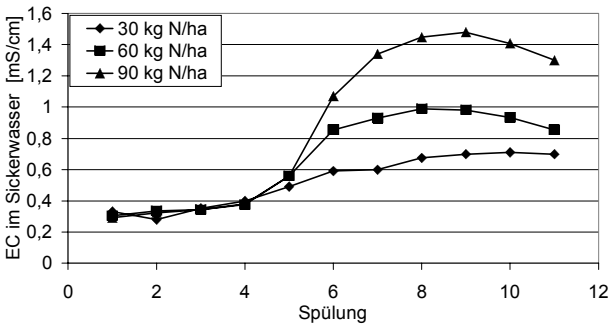

Abb. 4
Entwicklung des EC-Wertes im Sickerwasser nach 30, 60, 90 kg N/ha (Sl)

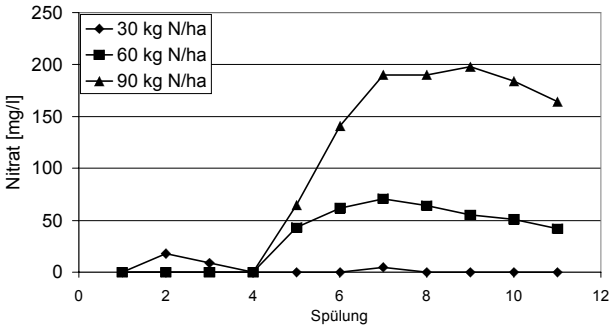

Abb. 5
Entwicklung der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser nach 30, 60, 90 kg N/ha (Sl)

Eine weitere bemerkenswerte Entwicklung ist die Linearität der Messwerte je nach Düngermenge (Abbildungen 3,4,5). Die eingesetzten Äquivalente von 30, 60 und 90 kg N/ha bilden sich klar in der Salinität ab. Das bedeutet, dass mit der Salinität der aktuelle Düngerzustand an pflanzenverfügbaren Düngersalzen gemessen werden kann. Sofern der Grundwert des betrachteten Bodens definiert ist, kann so auch umgekehrt der Düngerbedarf abgeschätzt werden.

Dasselbe gilt auch für die Entwicklung der Nitratkonzentration (Abbildung 5) und des EC-Wertes im Sickerwasser (Abbildung 4). Beide Entwicklungen verlaufen parallel und sind je nach Applikationsmenge linear gefächert. Der EC-Wert erscheint weitgehend durch die im Boden sehr beweglichen Nitrationen bestimmt zu sein. Für die Praxis ergibt sich daraus die Vermutung, dass durch die einfache und schnelle Messung der Salinität auf elektronischem Weg Maßzahlen für die Stickstoffgaben abgeleitet werden können.

Da bekannt ist, dass die Vorgänge im Boden von der Bodenart sowie vielfältigen weiteren Einflüssen abhängen, wird im Folgenden untersucht, ob obige Arbeitshypothese auch bei den üblichen, in der Praxis vorkommenden Zuständen ihre Gültigkeit behält.

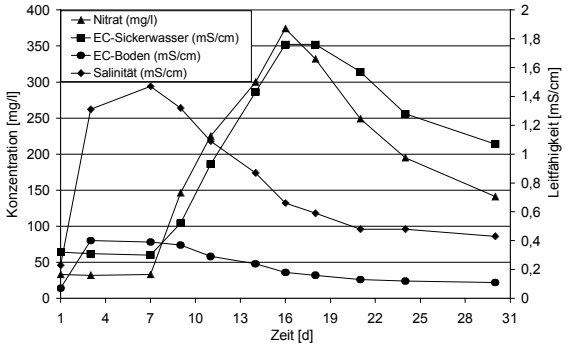

Abb. 6
Entwicklung der Leitfähigkeiten und der Nitratkonzentration in humosem Sand nach 90 kg N/ha

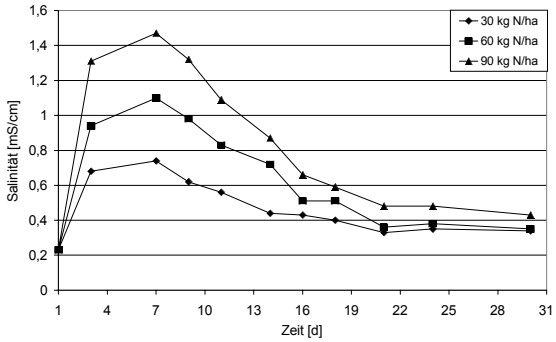

Abb. 7
Entwicklung der Salinitäten in der obersten Bodenschicht (hS) nach 30, 60, 90 kg N/ha

3 Ergebnisse

3.1 Einfluss verschiedener Bodenarten

Äquivalent zum Versuchsschema Abbildungen 2 – 5 mit lehmigem Sand (Parabraunerde) ist die Entwicklung der Salinität im Boden und des EC-Wertes und der Nitratkonzentration im Sickerwasser für die Bodentypen humoser Sand (hS) und Löß (toniger Schluff, Ut3) untersucht.

Abbildung 6 zeigt die Entwicklung für einen sauren Boden (ehemals Wald) mit erhöhtem Humusgehalt. Die Aussagen sind vergleichbar zu denen der Abbildung 2. Die Vergleichbarkeit der Böden gilt auch für die Entwicklung der Salinitäten (Abbildung 7), der Leitfähigkeiten (Abbildung 8) und der Nitratkonzentrationen (Abbildung 9). In allen Abbildungen ist der Einfluss unterschiedlicher Düngermengen nahezu linear abgebildet, der EC-Wert und die Nitratkonzentration verlaufen weitgehend parallel.

Die Verläufe bei Löß sind grundsätzlich ähnlich, erscheinen aber empfindlicher gegen Störungen. Die Verhältnisse sind im nachfolgendem Kapitel bei der Diskussion des Einflusses weiterer Ionen dargestellt.

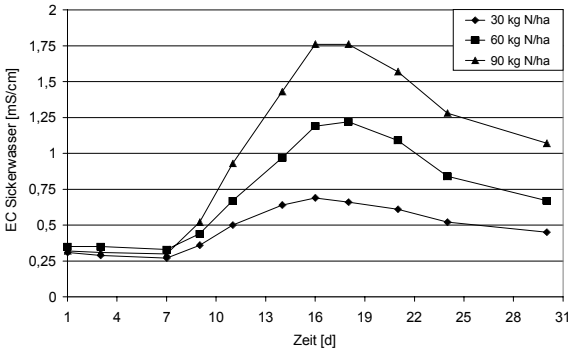

Abb. 8
Entwicklung des EC-Wertes in Sickerwasser (hS) nach 30, 60, 90 kg N/ha

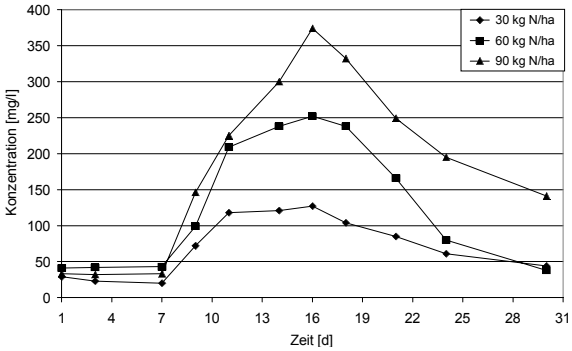

Abb. 9
Entwicklung der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser (hS) nach 30, 60, 90 kg N/ha

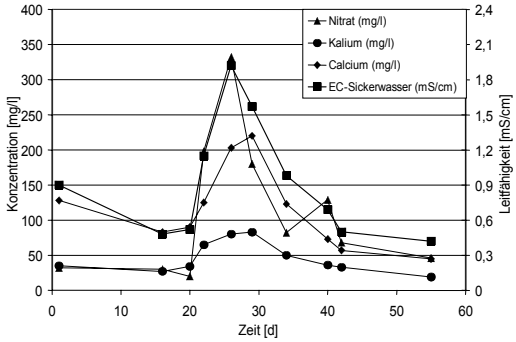

Abb. 10
Entwicklung der Leitfähigkeit und wichtiger Ionenarten im Sickerwasser nach 90 kg N/ha (Sl)

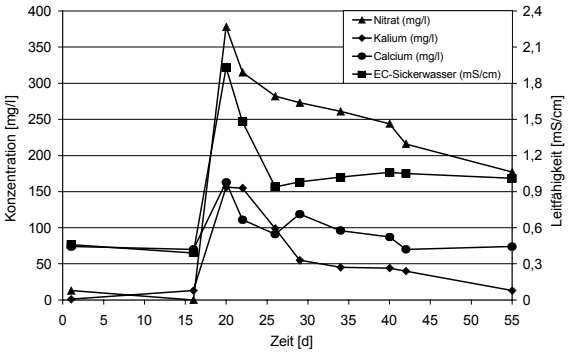

Abb. 11
Entwicklung der Leitfähigkeit und wichtiger Ionenarten im Sickerwasser nach 90 kg N/ha (Ut)

Insgesamt (und auch in Vorgriff auf die späteren Ergebnisse) ergibt sich nach einer Düngung ein ähnliches Bild für alle drei hier untersuchten Bodenarten. Grundsätzlich erscheint die Änderung der Salinität als Maß für die eingetragene Düngermenge, vorzugsweise Nitrat, geeignet. Aber die stark unterschiedlichen Grundwerte eines jeden Bodens sind zu beachten.

3.2 Einfluss wichtiger Ionenarten

Nach einer Düngung mit einem Äquivalent von 90 kgN/ha eines handelsüblichen Mehrnährstoffdüngers (12+12+17+2) wurde neben Nitrat auch die Entwicklung von Kalium und Kalzium im Sickerwasser verfolgt. Abbildungen 10 und 11 zeigen die Entwicklung der Leitfähigkeit im Vergleich zu den Hauptionen Nitrat, Kalzium und Kalium für sandigen Lehm und Löß. Da die Summe der positiven und negativen Ladungen (Ionen nach ihrer Wertigkeit) gleich Null sein muss, ist die Entwicklung der beiden Hauptgegenspieler Nitrat und Calcium als den beiden beweglichsten und somit auch am leichtesten auswaschbaren Ionen gleichartig. Kalium hat dagegen ein deutlich geringeres Auswaschpotential und trägt in sandigem Lehm (Abb. 10) nur zu einem Bruchteil zur Salinität bei. Verstärkt gilt dies auch für Lößboden, Abbildung 11.

Auch die Überhöhungen fallen bei gestaffelter Düngergabe beim Kalium im Vergleich zu Nitrat stets gering aus. Der Zusammenhang zwischen Salinität und Nitrat ist bei allen Bodentypen vorherrschend. Einen Vergleich der Auswaschungen in sandigem Lehm und Löß bei Düngungen von 30, 60, 90 kg N/ha geben die Abbildungen 12 - 17. Bei Nitrat und sandigem Lehm ergeben sich die erwarteten Verläufe. In Löß (Abbildung 13) verwundern die hohen Werte bei 60 kg N/ha, die möglicherweise auf einen hydraulischen Kurzschluss im Lysimeter zurückzuführen sind.

Ähnliche Verläufe wie beim Nitrat gelten auch für das Kalium-Ion. In sandigem Lehm (Abbildung 14) ist der erwartete Verlauf (ca. 1/10 der Werte von Nitrat!) zu beobachten, in Löß nur Werte nahe Null. Zumindest für Düngermengen von 30 oder 60 kgN/ha ist kein Nachweis von Kalium im Sickerwasser möglich (Abbildung 15).

Bei Kalzium (Abbildungen 16 und 17) verhält es sich ähnlich wie beim Nitrat: bis auf die mittlere Düngergabe (siehe obige Fehlervermutung) ergeben sich die erwarteten Werte. Grundsätzlich erscheinen in Löß die Werte “abgepufferter”, d. h. die Spitzen sind gebrochen, zugunsten entsprechender Zeitverzögerungen bei der Abgabe.

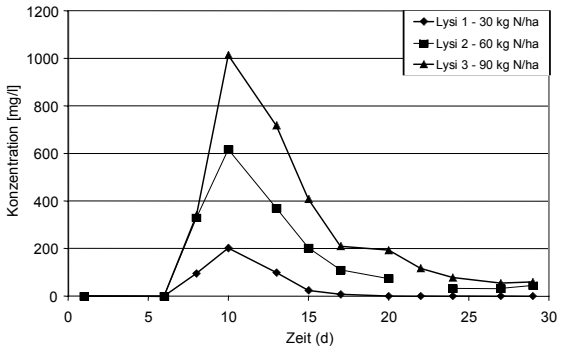

Abb. 12
Entwicklung der Nitratauswaschung in Sl nach 30, 60, 90 kg N/ha

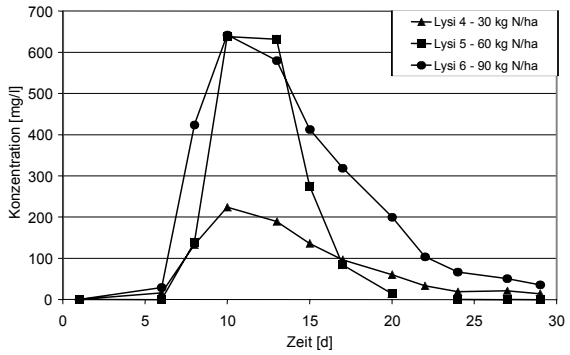

Abb. 13
Entwicklung der Nitratauswaschung in Ut nach 30, 60, 90 kg N/ha

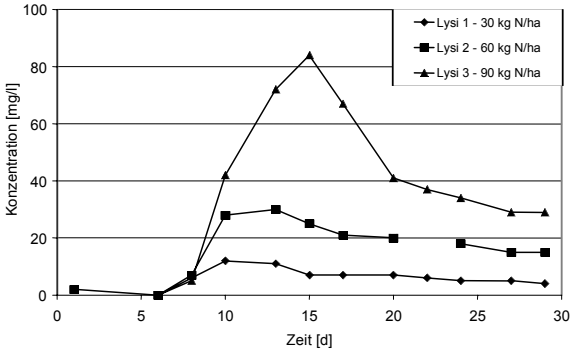

Abb. 14
Entwicklung der Kaliumauswaschung in Sl nach 30, 60, 90 kg N/ha

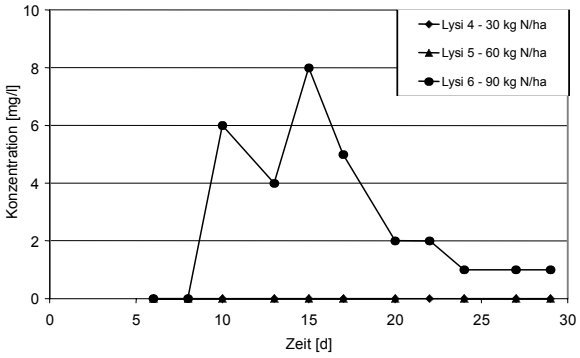

Abb. 15
Entwicklung der Kaliumauswaschung in Ut nach 30, 60, 90 kg N/ha

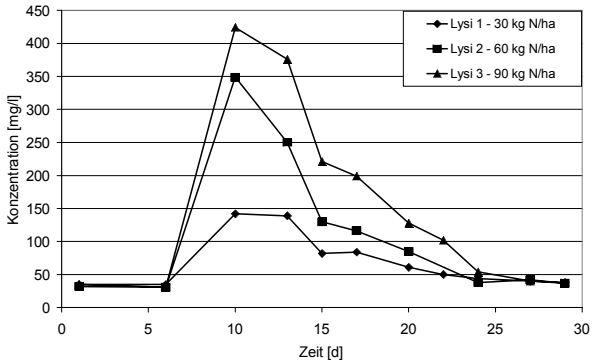

Abb. 16
Entwicklung der Kalziumauswaschung in Sl nach 30, 60, 90 kgN/ha

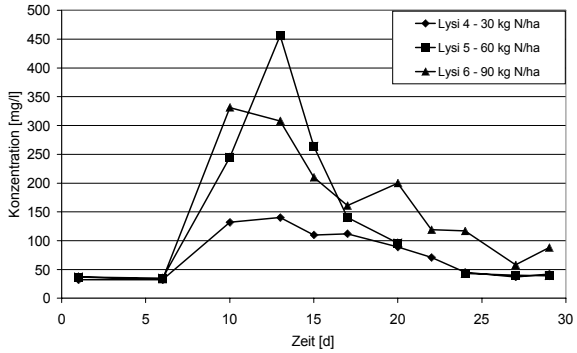

Abb. 17
Entwicklung der Kalziumauswaschung in Ut nach 30, 60, 90 kgN/ha

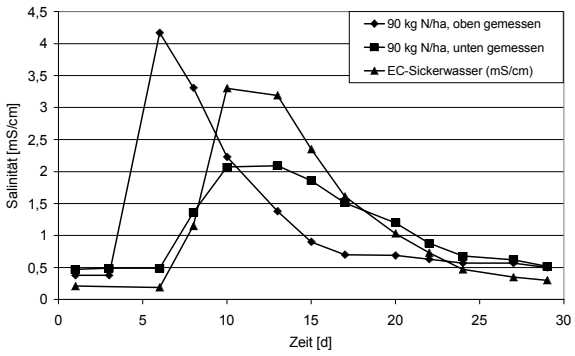

Abb. 18
Entwicklung der Salinitäten in verschiedenen Bodenschichten (Sl) nach 90 kg N/ha

3.3 Verlauf über der Durchgangstiefe

Um den Verlauf über der Bodentiefe zu testen, wurden die elektronischen Salinitätsmessungen nicht nur an der Bodenoberfläche mit senkrechtem Einstich (0 – 5 cm), sondern auch in ca. 10-12 cm Tiefe bei waagerechtem Einstich der Permittivitätssonde vorgenommen. Der Ablauf ist wie erwartet. In sandigem Lehm (Abbildung 18) erhöht sich nach der Düngung der Salinitätswert der obersten Bodenschicht sofort, um dann mit fortschreitender Ausspülung wieder dem Ausgangswert (≈ 0,5 mS/cm) zuzustreben. Zeitlich verzögert und verteilter (geringeres

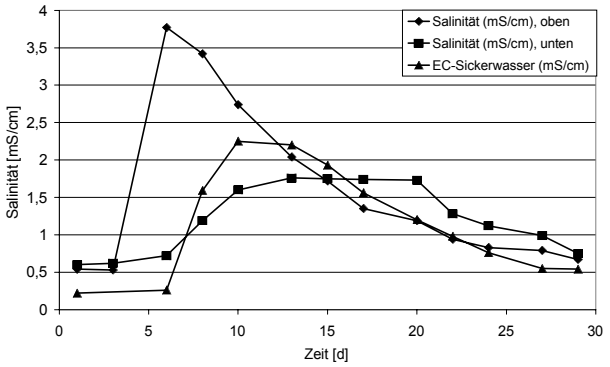

Abb. 19
Entwicklung der Salinitäten in verschiedenen Bodenschichten (Ut) nach 90 kg N/ha

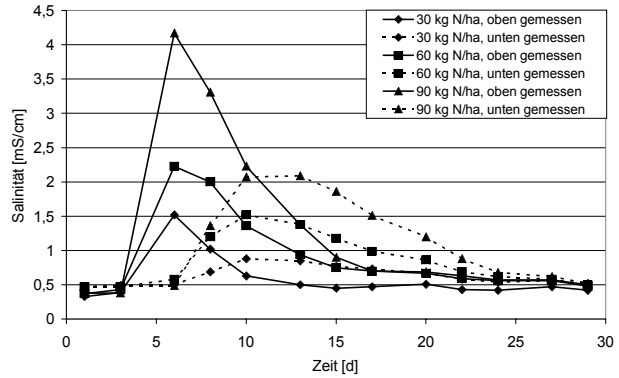

Abb. 20
Entwicklung der Salinitäten in verschiedenen Bodenschichten (Sl) nach 30, 60, 90 kg N/ha

Maximum, aber verlängerte Auswaschzeit; die Flächen unter den beiden Salinitätskurven erscheinen vergleichbar) folgt die Salinität in 10 cm Bodentiefe. Der EC-Wert des Sickerwassers, der im Idealfall gleich der Salinität in der letzten Bodenschicht sein sollte, liegt zwischen den beiden errechneten Werten für die Salinität (=EC-Wert des Porenwassers).

In Abbildung 19 sind die Verhältnisse nach einer Düngergabe von 90 kgN/ha (Mehrnährstoffdünger) in Löß dargestellt. Die Verhältnisse erscheinen vergleichbar. Insgesamt ergibt sich in Löß im Vergleich zu sandigem Lehm aber eine abgepufferte, verzögerte Weitergabe der Düngerfront.

Das Fortschreiten der Düngerfront über der Tiefe ist auch bei gestaffelter Düngergabe gut zu erkennen (Abbildung 20). Auch geringe Einträge sind noch gut zu verfolgen. Die Salinitäten in der letzten Bodenschicht vor dem Auslauf laufen zeitlich gesehen schon erstaunlich parallel mit den Nitratwerten im Sickerwasser (Abbildung 21). Der Messwert 'Salinität' wird klar vom Nitrat-Ion beeinflusst.

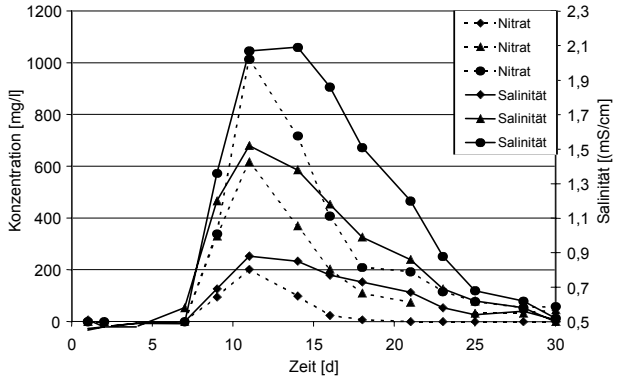

Abb. 21
Vergleich der Salinitäten in der untersten Bodenschicht (sL) mit der Nitratkonzentration im Sickerwasser nach 30, 60, 90 kgN/ha

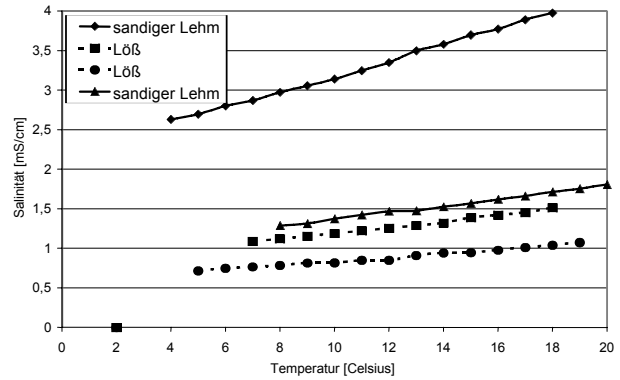

Abb. 22
Temperatureinfluss auf die Salinität in sandigem Lehm und Löß

3.4 Einfluss der Temperatur

Der Einfluss der physikalischen Zustandsgrößen Temperatur auf die ionische Leitfähigkeit von Wasser ist gut belegt. Bei obigen Auswaschversuchen konnte dieser Einfluss wegen der Konstanz der Versuchsbedingungen (gleichbleibende Raumtemperatur) missachtet werden. In den nachfolgenden Messungen wird der Einfluss dieser physikalischen Störgröße untersucht.

Der Einfluss der Temperatur ist für feuchte Böden (sandigen Lehm und Löß, beide nahe 1 00 % Feldkapazität) in Abbildung 22 dargestellt. Die Steigung der Ausgleichsgeraden scheint von der Salinität abzuhängen. Bezogen auf 20 °C als Standardtemperatur ergibt sich mit der Korrekturformel

$$S^{20\,°C} = S^{Temp}\,(1 + (20 - Temp)*0{,}035) \qquad (2)$$

eine hinreichend genaue Umrechnung für die hier getesteten Böden.

3.5 Einfluss der Bodenfeuchte

Der Einfluss der Bodenfeuchte ist bei Raumtemperatur in der Abbildung 23 (sandiger Lehm und Löß) dargestellt.

Pro % volumetrischem Wassergehalt vW, hier dargestellt als Permittivität P (mit der Umrechnung vW=P*100/80) ergibt sich eine geringe Korrektur von durchschnittlich ca. 0,03 mS/cm. Als Näherung kann Formel (3) verwendet werden:

$$S^{feucht} = S\,(1 - (25 - vW)*0{,}03) \qquad (3)$$

Deutlicher verhält sich die Korrektur bei Bezug auf tensiometrische Werte, Abbildungen 24 und 25. Hier sind die Salinitäten nach obiger Formel (1) über den gleichzeitig gemessenen tensiometrischen Saugspannungen aufgetragen. Die Versuche fanden in Lysimetern von 1m Höhe und 0,5 m Durchmesser statt und spiegeln die Verläufe über fast zwei Monate in Zeitspannen zwischen wiederholten Wassergaben wieder. Die durch die Messwerte angedeuteten Geraden sind die Verschiebung der Salinität bei Austrocknung.

Als Korrekturformeln für die Salinität bezogen auf feuchten Boden an der Grenze zur Feldkapazität (h = 0 hPa) ergeben sich für schwankende Saugspannungen h, gemessen in hPa

$$S^{feucht} = S\,(1\text{-}h/1300) \text{ für Sl} \qquad (4)$$

und

$$S^{feucht} = S\,(1\text{-}h/1600) \text{ für Ut} \qquad (5)$$

Die Formeln (2), (3) oder (4,5) wurden im Folgenden zur Berechnung der auf 20 °C und 0 hPa korrigierten Salinität verwendet.

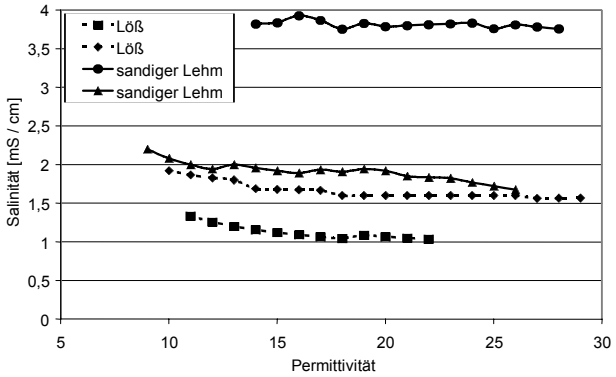

Abb. 23
Einfluss der Bodenfeuchte auf die Salinität in Sl und Ut

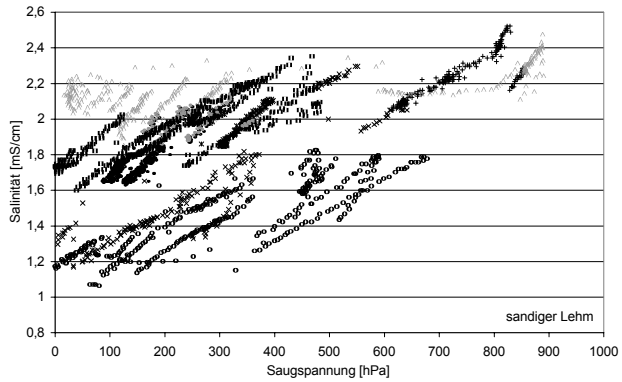

Abb. 24
Einfluss der Saugspannung auf die Salinität in Sl

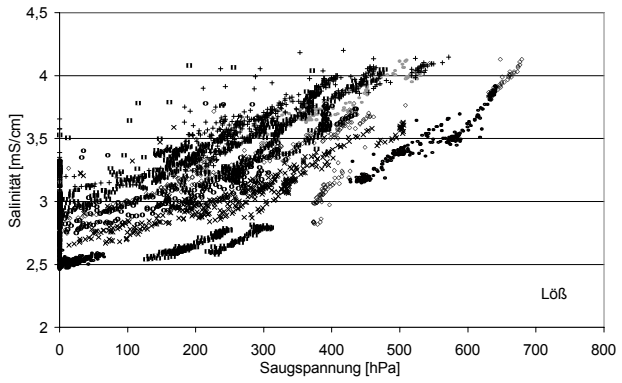

Abb. 25
Einfluss der Saugspannung auf die Salinität in Ut

4 Diskussion, praktischer Einsatz

4.1 Düngen nach 2-Punkt-Strategie (refill-Werten)

Eine klassische Strategie bei der künstlichen Beregnung ist, den Wassergehalt im Boden zu beobachten und jedes Mal, wenn der Wasservorrat einen unteren Grenzwert ("Wiederbefüllungspunkt", "refill-point") erreicht hat

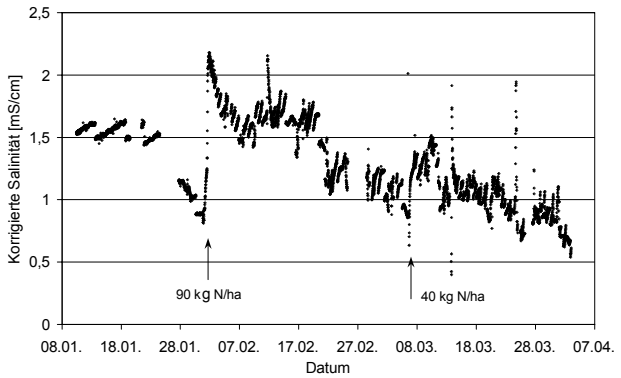

Abb. 26
Düngung von Raps auf sandigem Lehm

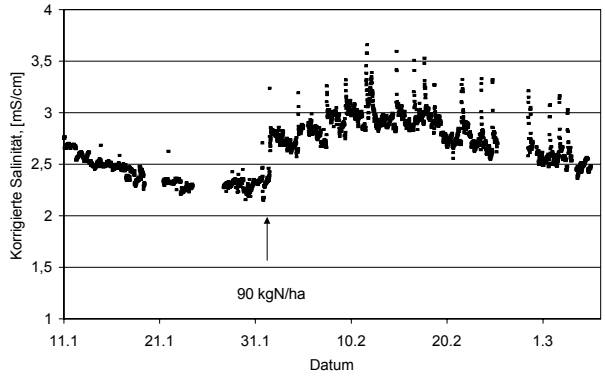

Abb. 27
Düngung von Raps auf Löß

(Empfehlung z.B. 50 % nFK), auf einen oberen Grenzwert (z. B. 80 % oder 100 % der nutzbaren Feldkapazität) aufzufüllen. Unabhängig von Regen und Verdunstung in den vergangenen Tagen kann so eine Austrocknung des Bodens und damit eine Wachstumsminderung durch Wasserstress vermieden werden. Bei hoher Transpiration und fehlenden Niederschlägen wird der Wiederbefüllungspunkt meist schon nach wenigen Tagen erreicht (Zhao et al., 2001).

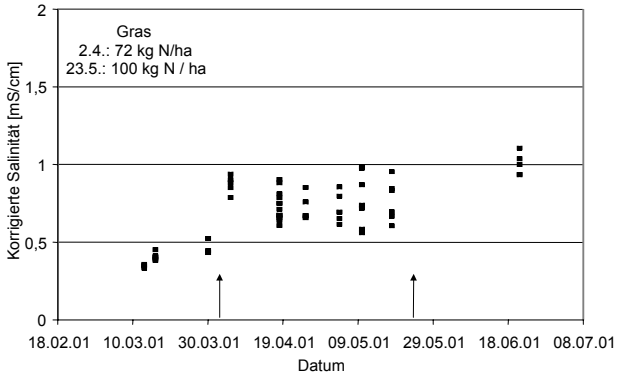

Abb. 28
Entwicklung der Salinität unter Gras

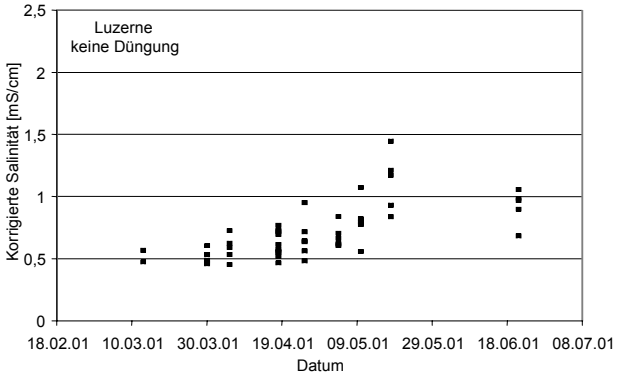

Abb. 29
Entwicklung der Salinität unter Luzerne

Eine ähnliche Strategie lässt sich auch auf den pflanzenverfügbaren Düngervorrat im Boden anwenden. Man definiert (je nach Bodenart) eine Untergrenze für die Salinität, bei der zur Vermeidung von Ernährungsmängeln nachgedüngt werden muss, und eine anzustrebende Obergrenze (je nach Jahreszeit und Entwicklungsstadium der Pflanzen) als Pegel, bis zu dem aufgedüngt werden soll.

In Abbildung 26 ist eine solche Strategie für Raps in Lysimetern mit sandigem Lehm von 1 m Tiefe und 50 cm Durchmesser durchgeführt. Die Lysimeter wurden künstlich bewässert, eine Auswaschung fand nicht statt. Nach dem Auflaufen der Saat sieht man klar die Aufnahme durch die Pflanzen (Erschöpfung des Bodenvorrats). Eine Düngung mit 90 kg N/ha führt zu einem sofortigen Anstieg der nach obiger Formel (4) feuchtekorrigierten Salinität und damit der pflanzenverfügbaren Düngersalze. Der Bodenvorrat dieser Düngung ist durch weitere Pflanzenaufnahme nach ca. 4 bis 5 Wochen ausgeschöpft, so dass die Messwerte eine erneute Düngung verlangen, die mit 40 kgN/ha wegen des bevorstehenden Versuchsendes sehr verhalten ausfiel.

In Abbildung 27 ist der entsprechende Verlauf in einem Lößboden dargestellt. Der Wiederbefüllungspunkt liegt deutlich höher, die Abpufferung im Löß verhindert scharfe Sprünge. Die Strategie ist aber dieselbe: bei Erreichen eines bodenspezifischen unteren Grenzwertes wird je nach Wachstumsstadium der Düngervorrat aufgefüllt. Zeitpunkt und Menge der zu verabreichenden Düngung ergeben sich aus den Salinitätsmesswerten.

4.2 Düngen im Feldeinsatz

Die praktische Düngung der FAL-Versuchsstation in Rüben und Gras wird nachfolgend anhand der auf dem Feld gewonnenen Messwerte für die Salinität nachvollzogen. Alle Werte sind dabei sowohl temperatur- als auch feuchtekorrigiert.

In Bild 28 ist der Anstieg der Salinitäten unter Gras nach den Düngungen klar zu erkennen. Erstaunlich ist die auch in den nachfolgenden Bildern immer wieder zu beobachtende Bandbreite der Messwerte. Ähnlich wie bei Bodenproben ist die Bildung eines Mittelwertes aus einer geeigneten Anzahl von Einzelmessungen zwingend erforderlich, soll ein Schlag beurteilt werden.

In Bild 29 steigt die Salinität unter Luzerne im Mai auch ohne Düngereinsatz klar an. Ob dies auf Nitratakkumulation oder verstärkte Nitrifikation zurückzuführen ist, bleibt offen. Möglich ist auch, dass die Korrektur der Temperatur- und Feuchtevariationen noch zu gering veranschlagt wurde.

Die Bilder 30 und 31 zeigen denselben Rübenschlag, wobei in Bild 30 die Messwerte den Zustand des Vorgewendes am tiefer gelegenen Teil des Schlages wiedergeben. Eine Verschleppung von Dünger durch Oberflächenwasser infolge starker Regenfälle ist hier

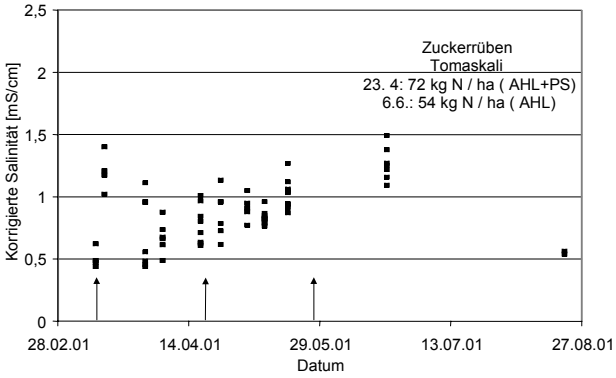

Abb. 30
Entwicklung der Salinität unter Zuckerrüben (Vorgewende)

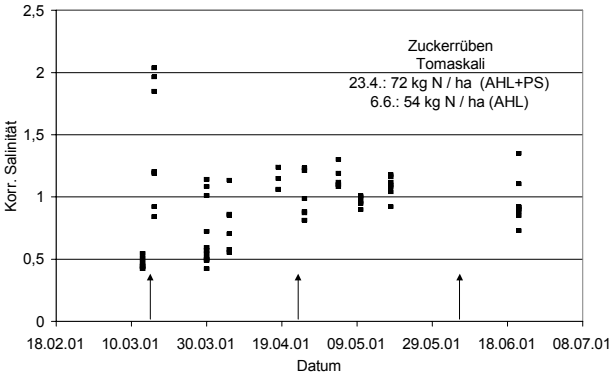

Abb. 31
Entwicklung der Salinität unter Zuckerrüben

möglich. In beiden Darstellungen ist die Düngung mit Thomaskali (anteilig 244 kg K_2O/ha) gut zu erkennen. Die nachfolgenden Spritzungen mit AHL bleiben ohne großen Einfluss, die Aufnahme erfolgt direkt über die Blätter. Die vollständige Aufzehrung des Bodenvorrats durch die Zuckerrüben wird durch die sehr geringen Salinitäten Ende August zuverlässig angezeigt. Eine Auswaschungsgefahr von unverbrauchten restlichen Düngemitteln ins Grundwasser während der Wintermonate besteht nicht.

5 Schlussfolgerungen

Mit der Messung der komplexen Permittivität lässt sich nicht nur der Wassergehalt, sondern auch der Salzgehalt im pflanzenverfügbaren Bodenwasser sicher erfassen. Die Messung ist schnell, einfach und wartungsfrei. Sie hat aber den Nachteil einer unspezifischen Punktmessung. Zwar scheint Nitrat das Ion mit der stärksten Beeinflussung zu sein, weitere Ionen bestimmen aber ebenfalls die Salinität der Bodenlösung. Und die große Variabilität des Bodens bei Punktmessungen ist von den Feuchtebestimmungen her gut bekannt: selbst auf engstem Raum bei scheinbar homogenen Böden sind immer wieder erstaunliche Streubreiten zu beobachten. Abhilfe ist hier nur durch Erfassung und Mittelung über größere Bodenvolumina möglich, was umgekehrt wieder eine einfache und schnelle Messtechnik verlangt.

Trotz dieser systembedingten Einschränkungen ist die vorgestellte neue Methode von hohem Wert. Es erscheint auch praktisch erstmalig möglich, den Versorgungszustand des Bodens, hier insbesondere des pflanzenverfügbaren Nitrats, über den Ablauf eines Jahres zu verfolgen. Damit ergeben sich höchst unmittelbare Schlussfolgerungen: Abschätzungen über Menge und Zeitpunkt der nächsten Düngergabe je nach Vegetationsverlauf. Neben angepassten und optimierten Gaben für die Feldfrüchte wird so auch eine Minimierung unerwünschter Reste im Boden erreicht. Eine Abschätzung der Auswaschungsgefährdung in den Wintermonaten wird ebenfalls möglich.

Literatur

Balendonck J (1997) Smart sensor chip for dielectric measurements. In: Sensor 97; 8. International Fair and Congress for Sensors, Transducers and Systems, Nürnberg; Vol 1. pp 253-258

Hilhorst M A (1998) Dielectric characterization of soil. Wageningen : IMAG-DLO, PhD thesis, No 98-01

Paul W, Hilhorst MA, Münstermann C, Schmitz M (1998) Neue Messtechniken zur gleichzeitigen Bestimmung von Wassergehalt, Wasserspannung und verfügbaren Düngersalzen im Boden. In: Internationale Tagung Landtechnik, Garching 1998. Düsseldorf : VDI Verlag, pp 223-228

Zhao Yandong, Paul W, Wang Yiming (2002) Vergleich zwischen Messungen des Wassergehalts im Boden mit SWR-, FD- und TDR-Sensoren. Z Bewässerungswirtsch 37(1): 17-31