

Optimale Rahmenbedingungen für die Aufnahme von Nährstoffen durch Oberflächen von Blättern und Früchten

Seminar zu aktuellen ernte- und lagertechnischen Themen
Wädenswil, 23.08.11 / Bavendorf 24.08.11

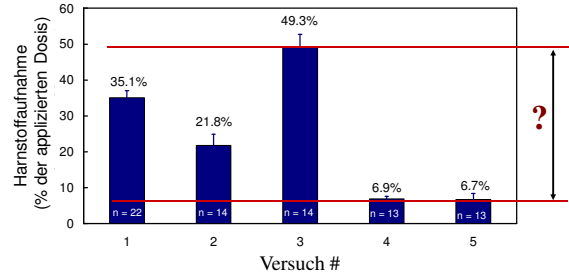
Dr. Thomas Eichert, INRES-Pflanzenernährung, Universität Bonn



1

Variabilität der Blattdüngung

Beispiel: Harnstoffaufnahme in Ackerbohnenblätter (*Vicia faba*)
5 Experimente unter identischen kontrollierten Bedingungen



Daten aus: Eichert und Goldbach (2008), *Physiol Plant.*

2

Optimale Aufnahme von Blattdüngern: Nicht zu wenig, aber auch nicht zu viel!

■ Fe-EDTA



■ Fe-EDDHA



3

Gliederung

1. Einleitung

Überblick: Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

2. Der Deliqueszenzpunkt

Die grundlegende Stoffeigenschaft, die bestimmt, wann und wie schnell ein Stoff aufgenommen werden kann

3. Aufnahmepfade und ihre Bedeutung

Cuticula und Spaltöffnungen (Stomata)

4. Fallbeispiel: Ca-Spritzung von Äpfeln

Cuticula und Spaltöffnungen (Stomata)

5. Schlussfolgerungen

Was folgt für die Praxis?

4

Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

1. Eigenschaften der Lösung...

- Tropfengröße

- Konzentration

- Formulierung

Zusatzstoffe zur Verringerung der Oberflächenspannung, Haftmittel, Befeuchtungsmittel, ...

...bestimmen im wesentlichen die Stoffmenge auf dem Blatt

5

Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

2. Eigenschaften des Stoffes...

- Wahl der Verbindung, in der der Nährstoff enthalten ist

z.B. Calcium: was soll man nehmen?

CaCl_2 ? $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$? CaSO_4 ? Ca-Formiat?

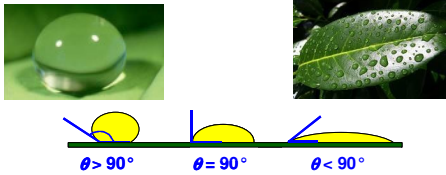
... bestimmen, wie lange und wie schnell der Stoff aufgenommen werden kann

6

Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

3. Pflanzeigenschaften

Benetzbarkeit der Blattoberfläche



Die Benetzbarkeit bestimmt zusammen mit der Oberflächenspannung der Lösung die Stoffmenge auf dem Blatt

7

Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

3. Pflanzeigenschaften

Unterschiedliche Pflanzenarten besitzen auch **unterschiedlich durchlässige (permeable) Blattoberflächen!**

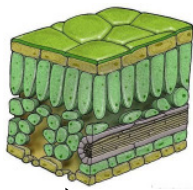
- ist die unterschiedliche Benetzbarkeit die direkte Ursache?
- Sind schlechte Benetzbarkeit und geringe Durchlässigkeit gemeinsame Anpassungen an den natürlichen Standort?

8

Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

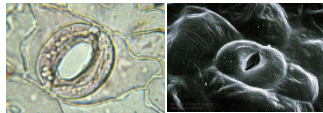
3. Pflanzeigenschaften

Blattseite



Oberseite:
Oft ohne Spaltöffnungen
(Obstbäume!)

Unterseite:
Immer mit Spaltöffnungen



9

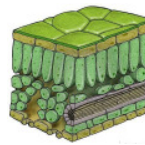
Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

3. Pflanzeigenschaften

Blattseite

Die Blattunterseite

- ist oft durchlässiger als die Oberseite
- dort sind Stomata vorhanden, die als zusätzliche Aufnahmeorte dienen



10

Steuernde Parameter bei der Blattdüngung

Fazit:

1. Eigenschaften der Lösung...

(Tropfenvolumen, Konzentration, Formulierung)

...bestimmen die **Stoffmenge** auf dem Blatt

2. Eigenschaften des applizierten Stoffes (Art der Verbindung)

...bestimmen **wie schnell der Stoff aufgenommen werden kann**

3. Eigenschaften der Blattoberfläche

...die Benetzbarkeit (Stoffmenge) und die **Durchlässigkeit** der Blattoberfläche hängen von der Pflanzenart ab

...die **Durchlässigkeit** hängt auch davon ab, welche Blattseite behandelt wird (Stomata)

11

Im folgenden betrachtete Fragestellungen

1. Eigenschaften des applizierten Stoffes (Aufnahmegeschwindigkeit)

Welche Verbindung soll man nehmen? Immer eine, die möglichst schnell aufgenommen wird?

2. Durchlässigkeit der Blattoberfläche

Spielen die Spaltöffnungen tatsächlich eine (wichtige) Rolle bei der Aufnahme von gelösten Stoffen?

12

1. Eigenschaften der verwendeten Verbindung (Salze)

- Für die Blattdüngung stehen in der Regel verschiedene Salze zur Verfügung (z.B. Ca als Chlorid, Nitrat, Formiat, etc.)
- Diese Salze unterscheiden sich in ihrem **Eintrocknungsverhalten** auf der Blattoberfläche
- Dies beeinflusst, ob sich die Salze im Gleichgewichtszustand mit der Atmosphäre in **flüssiger = mobiler = aufnehmbarer** Form auf dem Blatt befinden oder nicht

13

Salze im Gleichgewicht mit der Luftfeuchtigkeit

- Einmal getrocknete Salze können auch **Wasser aus der Luft anziehen** (=absorbieren) und sich darin auflösen
- Salze unterscheiden sich in ihrem Vermögen, Wasser aus der Luft anzuziehen - sie unterscheiden sich in ihrer **Hygroskopizität**
- Manche Salze trocknen bereits bei recht hohen Luftfeuchtigkeit vollständig aus (z.B. K-Sulfat bei 98% r.F.),
- Andere bleiben auch bei trockener Luft noch feucht (z.B. Ca-Chlorid bis 32% r.F.)

14

Salze im Gleichgewicht mit der Luftfeuchtigkeit

Diese Grenzluftfeuchte, bei der ein Übergang zwischen dem gelösten dem trockenen Zustand erfolgt, wird

Deliqueszenzpunkt (DQ) genannt

Der DQ eines bestimmten Salzes bestimmt zusammen mit der aktuellen relativen Luftfeuchtigkeit,

ob ein Salz **im Gleichgewicht** flüssig ist oder fest

...**mobil** ist oder **nicht**

...**aufnehmbar** ist oder **nicht!**

15

Salze im Gleichgewicht mit der Luftfeuchtigkeit

Für den Gleichgewichtszustand gilt:

RH > DQ:
Stoff ist **flüssig mobil aufnehmbar**

RH < DQ:
fest immobil nicht aufnehmbar

16

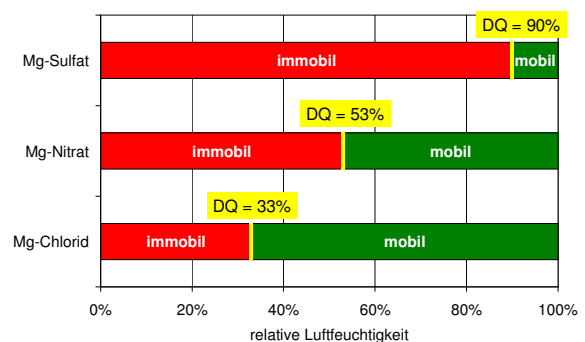
Deliqueszenzpunkte einiger Salze (20°C)

■ CaCl_2 31%	■ KCl 85%
■ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 54%	■ KNO_3 93%
■ $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ 96%	■ K_2SO_4 98%
■ MgCl_2 33%	■ ZnBr_2 9%
■ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 54%	■ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 42%
■ MgSO_4 90%	■ ZnSO_4 90%

Faustregel: Chlorid < Nitrat < Sulfat

17

Beispiel: DQ und Mobilität von verschiedenen Mg-Salzen



18

Der Deliqueszenzpunkt - Zusammenfassung

- Der DQ eines Salzes legt zusammen mit der relativen Luftfeuchte r.F. fest, **ob** eine Substanz (im Gleichgewicht mit den Umgebungsbedingungen!) aufgenommen werden kann oder nicht
- Durch Wahl des richtigen Salzes mit passendem DQ kann beeinflusst werden, wie sich die Substanz bei der zu erwartenden r.F. verhält

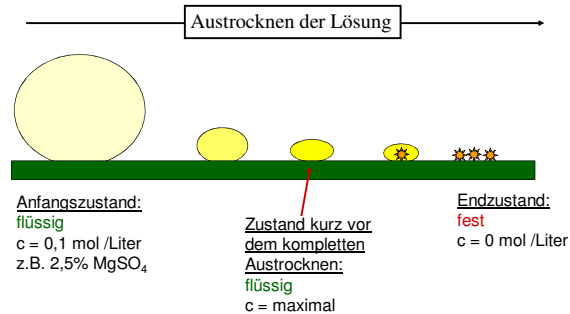
offene Fragen:

Welches Verhältnis von DQ zu rF ist optimal?

Wie beeinflussen die Trocknungsvorgänge auf der Blattoberfläche die Konzentrationen der Lösungen?

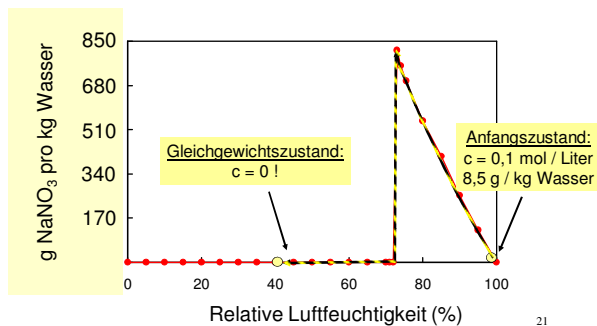
19

Konzentrationsverlauf beim Eintrocknen von Lösungen auf dem Blatt



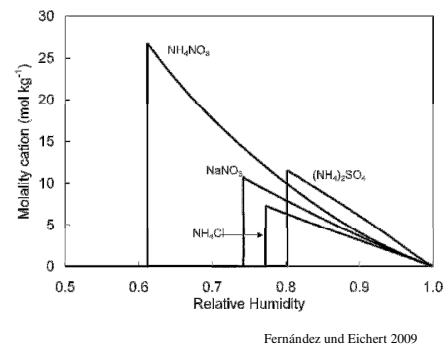
20

Konzentrationsverlauf beim Eintrocknen von Lösungen auf dem Blatt – Beispiel: NaNO_3 bei 40% rF



21

Konzentrationsverlauf beim Eintrocknen von Lösungen auf dem Blatt - Weitere N-Verbindungen



DQ und Luftfeuchte rF: Schlussfolgerungen

- DQ und rF bestimmen die Gleichgewichtskonzentration blattapplizierter Lösungen
- Maximale Konzentrationen, wenn rF knapp über dem DQ liegt
- Da die Aufnahmearten proportional zur Konzentration sind, sind unter diesen Bedingungen auch maximale Aufnahmearten zu erwarten
- ABER: unter realen Bedingungen ist die rF niemals konstant!!!**

23

Was ist nun die richtige Wahl? Ist eine Verbindung mit niedrigem DQ automatisch immer die beste?

Fallstudie:

Eignung verschiedener Mg-Salze als Blattdünger

Mg-Chlorid - Mg-Nitrat - Mg-Sulfat

Niediger.. Mittlerer.. Hoher.. DQ

24

Hypothese

Mg-Sulfat ist im Vergleich zu anderen Mg-Salzen der am wenigsten geeignete Mg-Blattdünger!

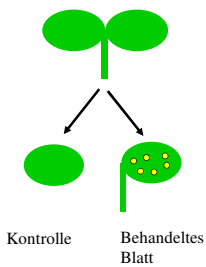
25

Material und Methoden: Versuchspflanzen

- Ackerbohne, *Vicia faba* minor, cv. Condor
- Anzucht in Wasserkultur mit reduziertem Mg-Angebot (10% der Normalkonzentration)
- Alter bei Versuchsbeginn: 3 Wochen

26

Material und Methoden: Versuchsdurchführung



Verwendete Mg-Salze

- MgCl_2 : DQ = 33% r.h.
- $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$: DQ = 53% r.h.
- MgSO_4 : DQ = 90% r.h.

Konzentrationen

- 100 mM oder 200 mM
- entspricht 2,5% bzw. 5% $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$

Tropfvolumen und -anzahl

- $4 \mu\text{l} \times 10$ Tropfen

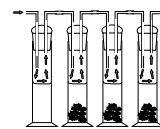
Versuchsdauer

- 24 h

27

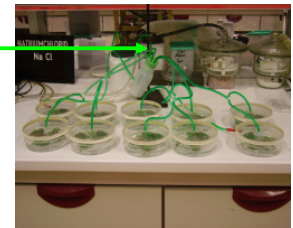
Material und Methoden: Versuchsdurchführung

Herstellung von Luft mit bestimmter r.H.



Gesättigte Salzlösung mit Bodenkörper

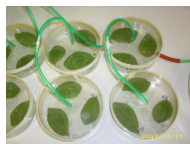
Blattkammern



28

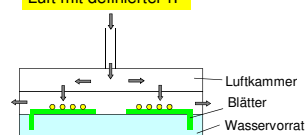
Material und Methoden: Versuchsdurchführung

Blattkammern



Jeweils 3 Blattfedern pro Kammer

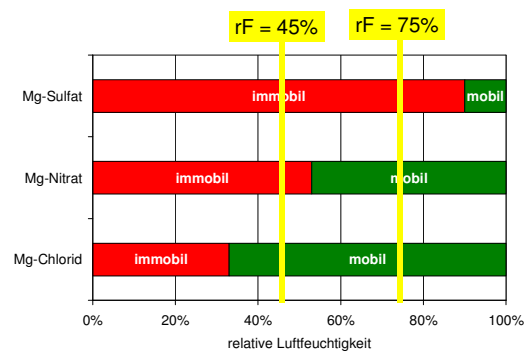
Luft mit definierter rF



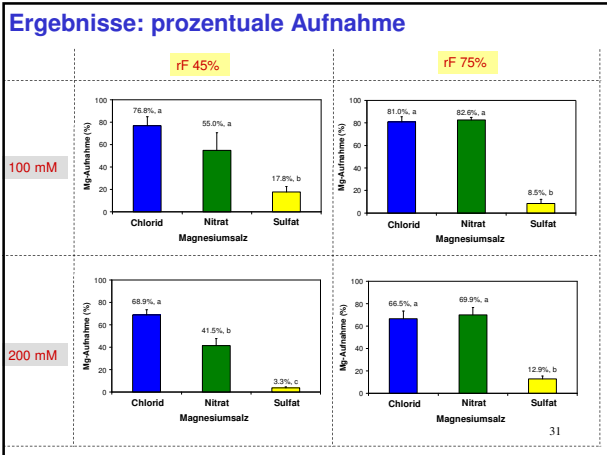
Blattkammer im Querschnitt

29

Zwei Experimente bei unterschiedlicher RH



30

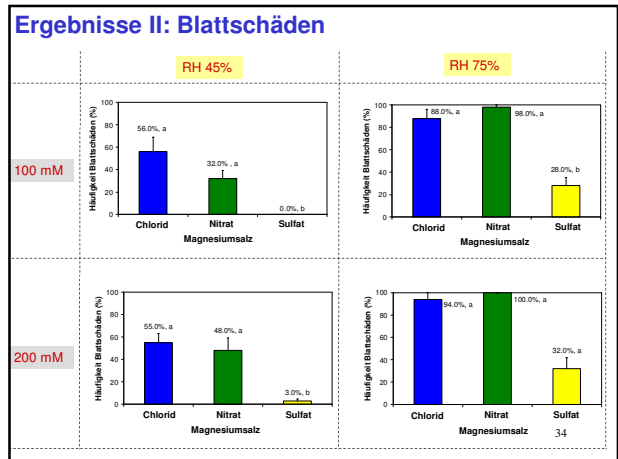


Hypothese bestätigt!

Mg-Sulfat ist im Vergleich zu anderen Mg-Salzen der am wenigsten geeignete Mg-Blattdünger!

Weil die Aufnahmeleistungen durch den niedrigen DQ am geringsten sind!

32



Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Aufnahmeraten **und** Zahl der Blattschäden steigen mit sinkendem DQ:

Sulfat < Nitrat ≤ Chlorid

- Zur Vermeidung von Blattschäden müssten die Konzentrationen von Mg-Chlorid und Mg-Nitrat wahrscheinlich deutlich verringert werden...
- ...wodurch sich auch der Vorteil der besseren Aufnahme gegenüber Mg-Sulfat entsprechend reduzieren würde

35

Ein generelles Problem (?!): Blattdüngung von Makronährstoffen

Mg wird als Makronährstoff in vergleichsweise **großen Mengen** benötigt und muss daher in **hohen Dosen** appliziert werden.

Tabelle: Durchschnittliche Element-Verhältnisse in der Sprossstrockenmasse von Pflanzen (aus Marschner, 1995)

Element	Relative Atomzahl
N	1.000.000
K	250.000
Ca	125.000
Mg	80.000
P	60.000
S	30.000
...	...
Fe	2.000
Mn	1.000
Zn	300
...	...
Mo	1

36

Ein generelles Problem (?!): Blattdüngung von Makronährstoffen

Die bei Mg-Mangel (N-, P-, K-, Ca-Mangel?) benötigten **hohen Dosen** können wahrscheinlich überhaupt **nicht rasch aufgenommen** werden, ohne **toxisch** zu wirken!

Es kann daher problematisch sein, die erforderliche Dosis in Form eines rasch wirkenden Blattdüngers zu applizieren

Ein **langsam wirkender** Dünger, wie z.B. Mg-Sulfat, kann dagegen **in der erforderlichen** Dosis appliziert werden und gleichzeitig **pflanzenverträglich** sein.

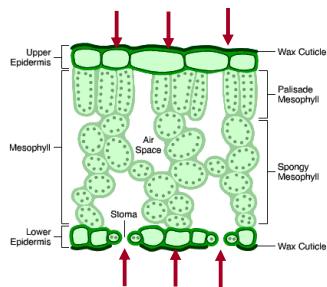
Dies ist vielleicht auch eine der positiven Eigenschaften von Blattdünger-Suspensionen

37

2. Aufnahmepfade und ihre Bedeutung

38

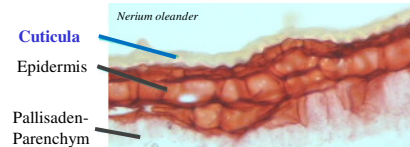
Wo werden die Substanzen aufgenommen?



39

Aufnahmepfade

1. Cuticula



- nicht-zelluläre, lipophile Haut
- Barriere an der Grenzfläche zur Atmosphäre
- Aufbau:
Matrix aus polymerisierten Lipiden (Cutin)
darin eingebettet: lösliche Lipide
oft aufgelagert: Epicuticularwachse

40

Modell der Cuticula



— Kristalline Wachse — Amorphe Wachse

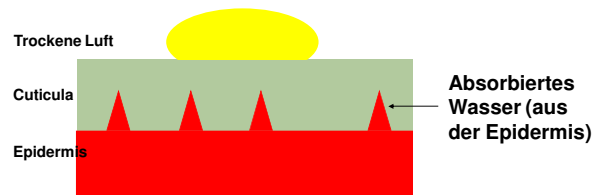
Die Wachse machen die Cuticula **wasserabweisend** (hydrophob)
Wasserlösliche Stoffe können die Cuticula ebenfalls kaum durchdringen

41

Modell der wässrigen polaren Poren:

Aufnahme von wasserlöslichen Stoffen durch Wasseranlagerungen in der Cuticula

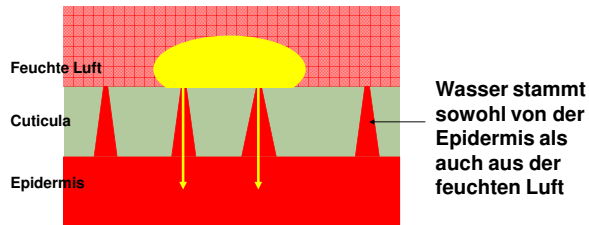
Trockene Luft: keine Poren



42

Modell der wässrigen polaren Poren

Feuchte Luft: „Poren“ entstehen (gequollene Cuticula)



43

Welchen Durchmesser besitzen wässrige Poren in der Cuticula?

Gibt es ein Größenlimit für die Aufnahme von Ionen durch die Cuticula?

44

Porendurchmesser

- Poren in isolierten entwachsten Cuticeln von *Citrus aurantium*: Ø ca. 1 nm (Schönherr 1976)
- Größenvergleich
Ammonium: 0,22 nm, Nitrat: 0,22 nm
Saccharose: 1,11 nm
EDTA: > 1 nm
- Eigene Untersuchungen mit intakten Blättern (Eichert und Goldbach 2008): Ø ca. 4,5 nm

45

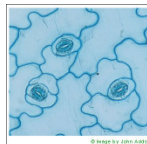
Fazit: Poren in der Cuticula

- aus der geringen, aber messbaren Ionenaufnahme ist zu schließen, dass es sie tatsächlich gibt
- ein direkter Nachweis der Existenz ist noch nicht gelungen
- alle Erklärungsansätze sind bis jetzt lediglich Modellvorstellungen, viele Fragen sind offen
 - Anzahl
 - Durchmesser
 - Abhängigkeit von Spezies, Umweltfaktoren
 - ...

46

2. Stomata - Spaltöffnungen

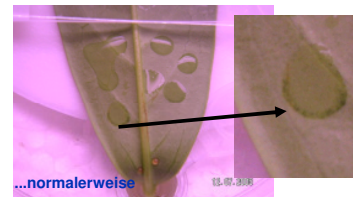
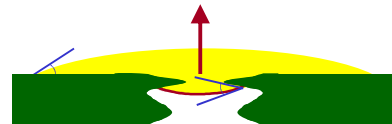
- „Löcher“ in der Blattoberfläche
- speziell geformt, mit einer Cuticula ausgekleidet
→ gegen Infiltration geschützt



47

Infiltration der Stomata ist nicht möglich

(Schönherr und Bukovac, 1972)



48

2. Stomata

Aufnahmeraten in Blätter sind häufig korreliert mit

- dem Vorhandensein
- der Dichte
- dem Öffnungszustand

der Stomata

49

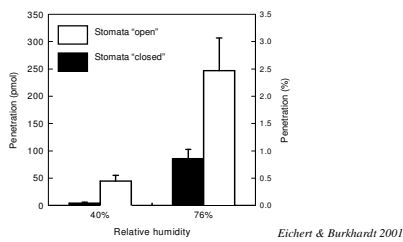
Einfluss des Vorhandensein, der Häufigkeit oder des Öffnungszustands von Stomata

Eine Auswahl von Veröffentlichungen:

Sargent and Blackman (1962), Franke (1964),
 Jyung et al. (1965), Middleton and Sanderson (1965),
 Eddings and Brown (1967), Kannan (1969),
 Norris and Bukovac (1969), Greene and Bukovac (1971),
 Sands and Bachelard (1973), Schönherr and Bukovac (1978),
 King and Radosevic (1979), Eichert et al. (1998),
 Eichert and Burkhardt (2001), Eichert and Goldbach (2008)

50

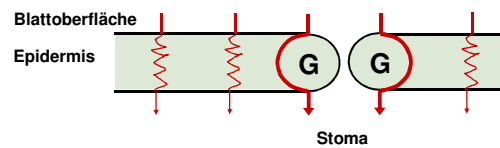
Einfluss des Öffnungszustands



51

Erklärung: ???

Marschner 1995, 2nd Edition:
 (die "Bibel" der Pflanzenernährer)



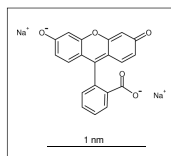
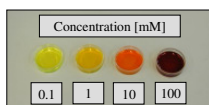
52

Untersuchungen zur Aufnahme von Na₂-Fluorescein (Uranin)

Eichert et al. 1998, Eichert und Burkhardt 2001

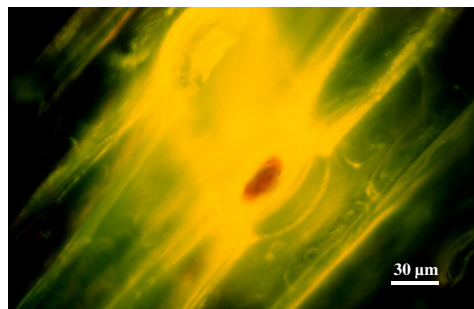
Eigenschaften

- di-anionisch
- Ø ca. 1.2 nm



53

Allium porrum, Epidermis, Innenseite, abgezogen von intaktem Blatt

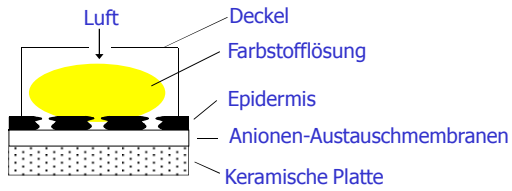


Eichert (2001)

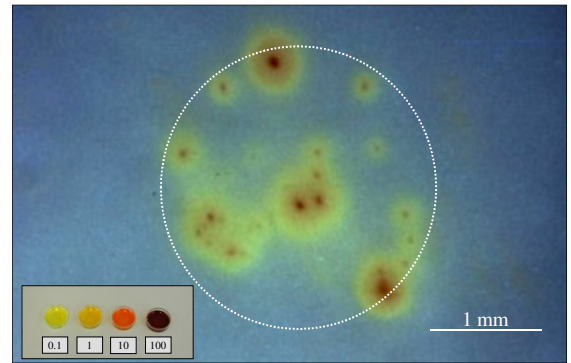
54

Ein neues Modellsystem

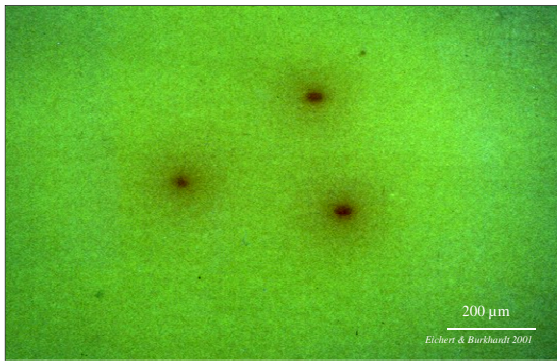
Eichert und Burkhardt 2001



55

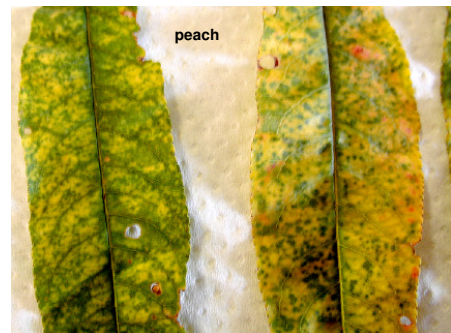


56



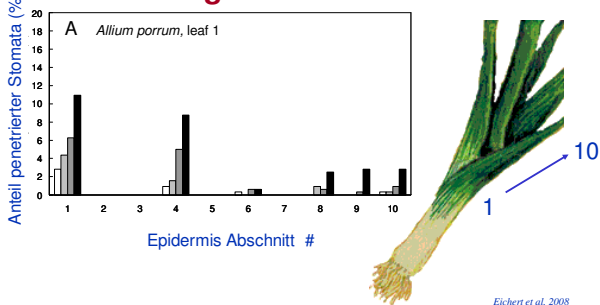
57

Fleckiges Wiederergrünen von chlorotischen Blättern nach Blattdüngung mit Fe



58

Räumliche Variabilität der Aufnahme entlang eines Lauchblattes

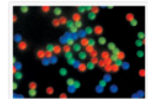


59

Aufnahme fluoreszierender hydrophiler Partikel (Nanospheres®) in Vicia faba Blätter

Eigenschaften

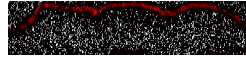
- > Durchmesser: 43 nm
- > gut wasserlöslich (hydrophil)
- > beladen mit Fluoreszenzfarbstoff
- > Konzentration: 1.1×10^{15} Partikel ml⁻¹



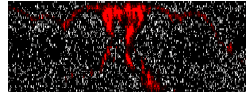
Eichert et al. (2008) Physiol Plant. 60

Optische Querschnitte

Blattoberfläche ohne Stomata



Querschnitt durch die Mitte eines Stomas



61

Fazit

- Aufnahme durch Stomata ist möglich
- sehr heterogen: weniger als 20% der Stomata beteiligt, entlang eines Blattes sehr "durchlässige" Bereiche neben absolut impermeablen Stellen
- Es gibt offenbar einige aktive Stomata, die sich von den nicht aktiven durch eine unbekannte Eigenschaft unterscheiden müssen
- Aufnahme durch Diffusion in "Wasserfilm" (?)

62

Quantifizierung

Wie bedeutsam ist der stomatare Pfad?

Im Vergleich zum cuticulären Pfad?

Nur für Wissenschaftler interessant?

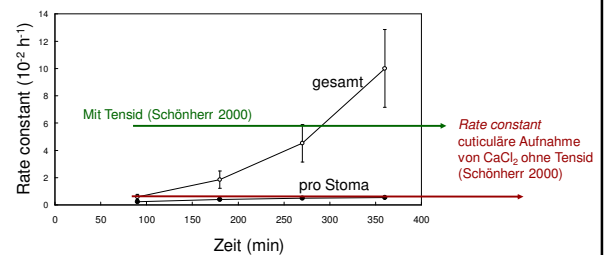
Oder auch in der Praxis relevant?

63

Quantifizierung

„Rate constants“ = Maß für die Aufnahmegeschwindigkeit

Allium porrum, stomatare Uranin-Aufnahme ohne Tensid



64

Zusammenfassung

Eichert und Fernández (2012) in Marschner's, 3rd Edition

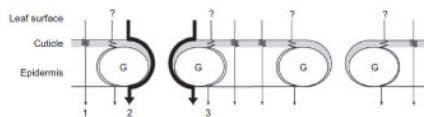


FIGURE 4.5 Schematic diagram of solute penetration across the leaf surface. 1, penetration of the cuticle; 2, stomata penetration; 3, preferential penetration of the pericellular cuticle as suggested by some authors (see text). Thickness indicates the relative permeabilities of the pathways. Note that not all stomata are penetrable. Not to scale. G, guard cell.

65

Zusammenfassung

- Der stomatare Aufnahmepfad existiert.
- Er besitzt eine hohe Variabilität.
- Bislang ist nicht sicher, wie dieser Aufnahmepfad zustande kommt.
- Die Transportkapazität dieses Pfades ist offenbar größer als die des cuticulären Pfades – wenn er denn vorhanden ist!
- Der stomatare Pfad ermöglicht die Aufnahme von großen Molekülen und Partikeln

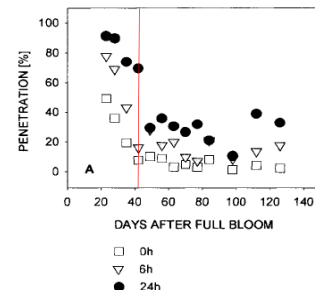
66

4. Fallbeispiel: Ca-Spritzung von Äpfeln

- Studie von Schlegel und Schönherr (2002):
"Stage of development affects penetration of calcium chloride into apple fruits"
J. Plant Nutr. Soil Sci. 165: 738-745.
- 3 Apfel-Sorten:
Golden Delicious, Cox Orange Pippin, Bokoop
- Messung der Ca-Aufnahme zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien

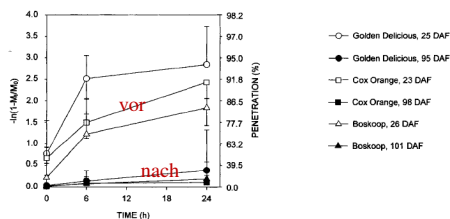
67

Ca-Aufnahme in Cox Orange Pippin



68

Vergleich vor/nach Junifruchtfall bei den 3 Sorten



- Wahrscheinliche Ursachen:
Verlust der Trichome
Umwandlung von Stomata zu Lentizellen.

69

Positiver Effekt der Lentizellen auch nach dem Junifruchtfall

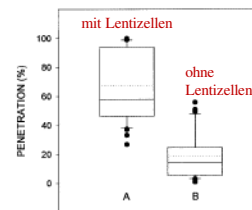


Figure 7: Effect of droplet application on surface sites (A) with or (B) without visible lenticels on the penetration of CaCl_2 into fruits of 'Golden Delicious' 53 DAFB.
Abbildung 7: Einfluss der Tropfenapplikation auf Orte der Fruchtoberfläche (A) mit und (B) ohne sichtbare Lentizellen auf die Penetration von CaCl_2 in Früchte von 'Golden Delicious' 53 DAFB.

70

5. Schlussfolgerungen Was folgt für die Praxis?

- Durch die Wahl der richtigen Verbindung kann beeinflusst werden, ob ein Stoff eher schnell oder eher langsam aufgenommen wird.
- Für Makronährstoffe, die in hohen Dosen ausgebracht werden müssen, können Verbindungen mit einem hohen DQ (eher langsame Aufnahme) geeigneter sein als solche mit einem niedrigen.
- Bei der Ausbringung auf Blätter sollte darauf geachtet werden, dass die Spritzlösung die Blattunterseiten, die die Stomata enthalten, gut benetzt.
- Bei der Ca-Spritzung von Apfel Früchten nehmen die Aufnahmeraten nach dem Junifruchtfall stark ab.

71

"ich" = wir!

- Ali Salihou
- Andreas Kurtz
- Eva Hain
- Heiner Goldbach
- Jürgen Burkhardt
- Stefan Neumann
- Sven Berkau
- Ulrike Steiner

72