©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Phyton (Horn, Austria)	**Vol. 30**	Fasc. 1	37–45	29. 6. 1990

Sauerstoffzufuhr zu den Wurzeln von Pflanzen aus Feuchtgebieten

Von

Veronika MEISCHNER und Peter SCHRÖDER*)

Mit 2 Abbildungen

Eingelangt am 5. Mai 1989

Key words: *Acorus, Iris, Phragmites,* oxygen supply, gas transport.

Summary

MEISCHNER V. & SCHRÖDER P. 1990. Oxygen supply to the roots of plants living in wet soils. – Phyton (Horn, Austria) 30 (1): 37–45, with 2 figures. – German with English summary.

Aquatic macrophytes or plants living in wet soils have to cope with oxygen shortage around their roots and rhizomes. These organs are not able to take up oxygen from the surrounding medium and have to rely on internal oxygen supply through aerenchymatous spaces in the plant. The present study tries to elucidate the mechanism of oxygen supply to the roots of *Acorus calamus, Iris pseudacorus* and *Phragmites communis*. Release of oxygen out of the roots could be of special importance because the species could contribute in the aeration of sewage sludges. Gas escape from the plant roots was found to be species specific: in *Acorus* and *Phragmites* rates of 1–2 ml of air h^{-1} were calculated, whereas *Iris* was found to emit not more than 0.2 ml air h^{-1} per plant. The reasons for the differences in diffusion are discussed.

Zusammenfassung

MEISCHNER V. & SCHRÖDER P. 1990, Sauerstoffzufuhr zu den Wurzeln von Pflanzen aus Feuchtgebieten. – Phyton (Horn, Austria) 30 (1): 37–45, mit 2 Abbildungen. – Deutsch mit englischer Zusammenfassung.

Für Sumpf- und Wasserpflanzen ist die ausreichende O_2-Versorgung submers lebender Organe problematisch. Sprosse, Rhizome und Wurzeln, die in anaeroben

*) Dr. Peter SCHRÖDER (to whom all correspondence should be addressed), Veronika MEISCHNER, Fraunhofer-Institut für atmosphärische Umweltforschung (IFU), Kreuzeckbahnstraße 19, D-8100 Garmisch-Partenkirchen (BRD).

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Bodenschlämmen wachsen, können keinen Sauerstoff aus der Umgebung aufnehmen, sondern sind auf interne Sauerstoffversorgung angewiesen. In der vorliegenden Arbeit wurde überprüft, inwieweit die ausgewählten Spezies *Acorus calamus, Iris pseudacorus* und *Phragmites communis* die Sauerstoffversorgung des Wurzel- und Rhizombereiches aktiv regeln und ob sie O_2 in die Rhizosphäre abzugeben in der Lage sind. Dies ist besonders interessant im Hinblick auf einen Einsatz dieser Spezies in biologischen Kläranlagen, wo sie unter anderem an der Durchlüftung des Klärschlammes beteiligt sein könnten. Speziesspezifische Gasabgaberaten aus dem Wurzel- und Rhizombereich betragen die bei *Acorus* und *Phragmites* 1–2 ml Luft h^{-1}, bei *Iris* nur 0,2 ml Luft h^{-1} pro Pflanze. Die Gründe für die unterschiedlich hohen Diffusionsraten werden diskutiert.

1. Einleitung

Das Leben an Standorten mit nassem oder überschwemmtem Boden erfordert Anpassungsleistungen, die nur von einigen Pflanzenspezies erfüllt werden. Diese Anpassungen können physiologischer Natur sein und die Anhäufung von Äthanol als Endprodukt von Gärungsvorgängen in den Wurzeln verhindern (CRAWFORD 1982), sie können aber auch morphologischer Art sein. Meist bestehen sie dann in der Anlage eines Systems von großen Hohlräumen im Inneren der Pflanzen, durch die eine rasche Sauerstoffdiffusion möglich ist. Einige Spezies, z. B. *Alnus glutinosa, Nuphar lutea* und *Nymphoides peltata,* besitzen aber auch aktive Sauerstofftransportmechanismen, wie die Arbeiten von GROSSE & SCHRÖDER 1984, 1985, 1986, SCHRÖDER & al. 1986 und GROSSE & MEVI-SCHÜTZ 1987 zeigen. Die dort beschriebenen Transportmechanismen beruhen auf dem physikochemischen Prinzip der Thermoosmose von Gasen (DENBIGH & RAUMANN 1953, TAKAISHI & SENSUI 1963) und sind wirksam, wenn zwischen der Atmosphäre und den gasgefüllten Hohlräumen im Inneren von Pflanzen ein für Gase permeables, feinporöses Trenngewebe ausgebildet ist. Eine Erwärmung der Blätter oder Stämme durch Sonnenlicht bewirkt dann sofort eine Steigerung der Gasströmung zu den Wurzeln (GROSSE & SCHRÖDER 1986).

Diese Anpassung erleichtert es Pflanzen, mit ihren Wurzeln und Rhizomen in ganz oder teilweise überfluteten Böden zu wachsen. Die bislang untersuchten Spezies transportieren so viel O_2 in die Wurzeln, daß auch die Rhizosphäre oxidiert wird, so daß anaerobe Bakterien dort nicht leben und ihre oft phytotoxischen Stoffwechselprodukte erzeugen können.

Deshalb sollte in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, ob es andere einheimische Pflanzen gibt, die ein thermoosmotisches O_2-Transportsystem benutzen, um in Feuchtgebieten zu überleben und ob diese Fähigkeit genutzt werden kann, um in biologischen Kläranlagen zur Klärschlammdurchlüftung eingesetzt zu werden. Als besonders geeignete Spezies für unsere Experimente und für den Einsatz in Klärwiesen (GELLER, pers. Mitt.) wurden *Acorus calamus, Iris pseudacorus* und *Phragmites communis* ausgewählt.

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

2. Material und Methoden

2.1 Pflanzenmaterial

Die Experimente wurden mit 8 Wochen alten Pflanzen der Spezies *Iris pseudacorus* L., *Acorus calamus* L. und *Phragmites communis* L. (TRIN.) durchgeführt. Die Anzucht erfolgte in Hydrokultur im Gewächshaus bei 18°C und einer Lichtintensität von 150 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ (8-Stunden-Photoperiode).

2.2 Gasströmungsexperimente

Zur Messung der Gasströmung durch die oberirdischen Pflanzenteile in die Wurzel wurde eine gläserne Versuchsapparatur verwendet, wie sie von GROSSE und SCHRÖDER 1984 konzipiert worden war. Diese Apparatur besteht aus zwei voneinander gasdicht getrennten Kompartimenten, deren oberes (Volumen 1 l) den Sproß, das untere (Vol. 1 l, halb gefüllt mit Wasser) Rhizome und Wurzeln der Versuchspflanzen enthielt. Die Teile der Apparatur wurden mit Hilfe einer inerten Dichtungsmasse (Carlofon, Köln, FRG) gegeneinander abgedichtet und zusätzlich mit einer Wasserfalle versehen. Gasströmung vom oberen in das untere Gefäß ist nur durch die Pflanze hindurch möglich.

Zu Beginn der Experimente wurde die gesamte Apparatur abgedunkelt, nach 60 Minuten wurde das obere Kompartiment mit einer speziellen Lampe für die Pflanzenanzucht belichtet (75 Watt, Lindner Linodyn, FRG). Als Testgas zur Durchführung der Experimente wurde der Luft 10% Ethan (Ethan 2.0, Linde, Unterschleißheim, FRG) zugegeben, das bereits von DACEY 1980 als physiologisch inert bezeichnet worden war. In Intervallen von 5 Minuten wurden jeweils 50 µl Gas mit Hilfe einer gasdichten Spritze (Hamilton, Bonaduz, Schweiz) aus dem unteren Kompartiment der Apparatur entnommen. Der Ethangehalt der Proben wurde sofort gaschromatographisch bestimmt.

2.3 Gaschromatographie

Ethan wurde in einem Gaschromatographen mit FID (Dani 3600, Mainz, FRG; Injektor/Detektor 150°c) und einer Porapak Q/R-Säule (3ft, 1/8''SS, 80–100 mesh, Supelco, Sulzbach, FRG) bei einer Säulentemperatur von 65°C getrennt und mittels FID nachgewiesen (Flußraten: N_2 60 ml min^{-1}, synt. Luft 300 ml min^{-1}, H_2 30 ml min^{-1}, alle Gase Linde, Unterschleißheim, FRG). Die Auswertung der Chromatogramme erfolgte über einen PE SIGMA 15 Integrator (Perkin Elmer, Norwalk, CO, USA). Eine Eichung im Bereich von 1 bis 1000 ppm mit Ethan-Standards ging den Messungen voraus.

2.4 Messung der Lichtintensität

Die Intensität der photosynthetisch aktiven Strahlung der künstlichen Lichtquelle wurde in unregelmäßigen Abständen mit Hilfe eines Quantameters Li 185A (Lambda Instr. Lincoln, Nebr., USA) und einer geeigneten Meßsonde für den Bereich von 400–900 nm bestimmt.

2.5 Sauerstoffabgabe in die Rhizosphäre

Zum qualitativen Nachweis der O_2-Abgabe in die Rhizosphäre wurde erwärmter Agar (Difco, USA) mit Methylenblau (Merck, Darmstadt, FRG) versetzt und mit Natriumdithionit (Merck, Darmstadt, FRG) zur Leuko-Form reduziert. Die Versuchspflanzen wurden mit ihren Wurzeln in eine schmale Küvette eingesetzt, in die

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

nach kurzem Aufkochen und anschließendem Abkühlen der Agar eingefüllt wurde. Der über die Wurzeln austretende Sauerstoff oxidierte das Methylenblau, so daß die Sauerstoffabgabe in die Rhizosphäre durch die Verfärbung des Agars sichtbar wurde.

2.6 Mikroskopische Untersuchungen

Für mikroskopische Untersuchungen der Blätter, Rhizome und Wurzeln wurde ein Zeiss-Mikroskop (PM 11, Zeiss, Oberkochen, FRG) verwendet. Die Schnitte wurden freihand angefertigt und zur Auswertung photographiert (Agfa-ortho 25, Agfa, Bonn, FRG).

3. Ergebnisse

In Gasströmungsexperimenten mit abgedunkelter Apparatur wurde die Ethanabgabe der Versuchspflanzen aus den Wurzeln überprüft (Abb. 1 A–C). Die Diffusionsgeschwindigkeit des Ethans war bei *Iris pseudacorus* sehr niedrig; sie betrug nur 20 µl h^{-1}. Das entspricht einer Gasmenge von 200 µl Luft, die pro Stunde durch die Pflanze hindurch aus den Wurzeln entweichen kann. Für *Acorus calamus* wurden dagegen Strömungsraten von 130 µl h^{-1} Ethan gemessen (Abb. 1 B), woraus sich eine Diffusionsrate von 1,3 ml Luft pro Stunde errechnen läßt. Die höchste Ethanabgabe wurde allerdings mit 160 µl h^{-1} in *Phragmites communis* gemessen, was einer Diffusionsrate von 1,6 ml Luft pro Stunde gleichkommt (Abb. 1 C).

Beleuchtete man die Pflanzen nach einer Dunkelphase mit Kunstlicht (150 µmol m^2 sec^{-1}), so konnte in keinem Fall eine signifikante Zunahme der Gasströmung beobachtet werden. Offenbar besitzt keine der Spezies die Fähigkeit zu thermoosmotischem Gastransport.

Die unterschiedlich hohen Diffusionsraten in Pflanzen gleichen Alters und annähernd gleicher Biomasse haben anscheinend ihre Ursache in unterschiedlicher Porosität von Blatt, Rhizom- und Wurzelgeweben. Um diese Hypothese zu prüfen, wurden Handschnitte von Blättern, Sproßabschnitten und Wurzeln der untersuchten Pflanzen zur Messung ihrer Porosität mikroskopiert und photographiert. Tabelle 1 zeigt, daß die untersuchten Pflanzen der Spezies *Acorus* und *Iris* mit 35% und 37% die höchste Blattporosität aufwiesen, während *Phragmites*-Blätter nur geringe Anteile (11%) an Aerenchymen besaßen. Die gemessenen Gasflüsse waren offenbar nicht mit den Meßwerten der Blattporosität zu korrelieren.

Es besteht jedoch ein Zusammenhang zwischen den Gasflüssen durch die Pflanzen und den Porositäten ihrer Rhizom- und Wurzelgewebe. Mikroskopische Untersuchungen zeigten, daß *Iris*-Wurzeln deutlich weniger Luftkanäle (10%) aufwiesen als Wurzeln von *Phragmites* oder gar von *Acorus*, die bis zu 20% Aerenchyme enthielten.

Diese Befunde belegen, daß ein Gasfluß durch die untersuchten Pflanzen möglich ist, sie sagen aber nichts darüber aus, ob auch tatsächlich Sauerstoff zu den Wurzeln und von dort in die Rhizosphäre gelangen kann.

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

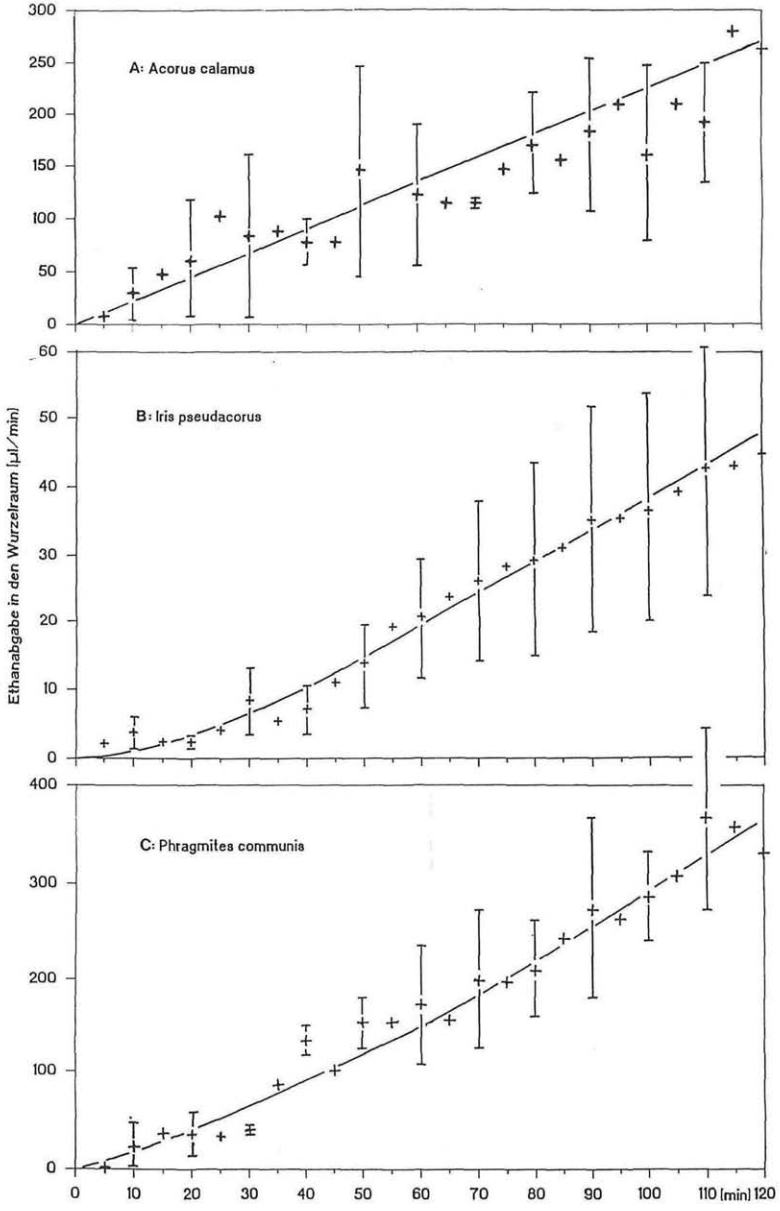

Abb. 1. Gasströmungsexperimente zur Bestimung der Diffusionsgeschwindigkeit von Luftgemischen im Inneren der untersuchten Pflanzen. Prüfgas: Luft + 10% Ethan. Die Datenpunkte (+) repräsentieren Mittelwerte aus jeweils 3 Messungen, die senkrechten Striche die zugehörigen Standardabweichungen. Weitere Erläuterungen im Text. A = *Acorus calamus*, B = *Iris pseudacorus*, C = *Phragmites communis*.

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Tabelle 1

Porosität von Blättern und Wurzeln in den untersuchten Spezies, aufgrund planimetrischer Auswertung von Photographien. Angegeben sind die Anteile der luftgefüllten Hohlräume am Gesamtquerschnitt der Organe in Prozent. (Mittelwerte ± Standardfehler)

Spezies	Lufträume in %	
	Blatt	Wurzel
Acorus	34,44 ± 2,18	19,91 ± 2,95
Iris	36,84 ± 3,47	10,31 ± 4,17
Phragmites	10,73 ± 1,10	14,46 ± 2,85

Um diese Frage zu beantworten, wurden Experimente durchgeführt, in deren Verlauf die Wurzeln der Versuchspflanzen in einen flachen Agarblock eingegossen wurden, der mit reduziertem Methylenblau versetzt war. Sehr gut konnte man beobachten, wie sich nach einigen Minuten um die Wurzeln der Pflanzen eine leichte Blaufärbung einstellte, die von den älteren Wurzelteilen bis zu den jungen Feinwurzeln reichte. Nach einigen Stunden war die Bläuung aller Wurzelzonen weit fortgeschritten und lieferte den Beweis, daß Sauerstoff aus den Wurzeln entwichen war und den reduzierten Farbstoff oxidiert hatte.

4. Diskussion

Aus den Ergebnissen der Gasströmungsversuche geht deutlich hervor, daß keine der untersuchten Spezies über ein thermoosmotisches Gastransportsystem verfügt, das eine Steigerung der Gasströmung bei Belichtung bewirkt.

Dennoch unterscheiden sich die Gasdiffusionsraten in den drei Spezies sehr stark. Während *Acorus* und *Phragmites* ca. 1–2 ml Ethan pro Stunde in den Wurzelraum abgeben, findet man bei *Iris* Werte, die um den Faktor 10 niedriger liegen. Es muß angenommen werden, daß dies durch unterschiedliche Wege, die die Gase durch die Pflanzen nehmen, bedingt ist.

Da alle drei untersuchten Pflanzen nach ELLENBERG 1976 zur Vegetationsklasse der Röhrichte und Großseggenrieder gehören, die im oder am Wasser wachsen, sollte man erwarten, daß sie durch die Anlage von Aerenchymen (DREW & al. 1979) an ihren Lebensraum angepaßt sind und sich deshalb morphologisch ähneln. Solche Aerenchyme garantieren auch dann eine rasche Diffusion von Luft durch die Pflanze, wenn die Bodenporosität wegen Überflutung stark vermindert ist und Sauerstoff nur mit äußerst geringer Geschwindigkeit von außen durch den nassen Boden an die Wurzeln herangeführt werden kann (ARMSTRONG 1970, JUSTIN & ARMSTRONG 1987).

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Bei *Acorus* und *Iris* gelangen die Gase durch die großlumigen Aerenchyme in den Blättern (ca. 30%, s. Tab. 1) in die Rhizome und von dort zu den Wurzeln. Besonders das Rhizom von *Acorus* weist viele luftführende Kanäle auf; es ist zwar nicht so stark mit Hohlräumen durchsetzt wie die Rhizome von *Nuphar lutea* (SCHRÖDER & al. 1986) oder *Nymphoides peltata* (MEVI-SCHÜTZ 1987), dennoch aber offenbar dem von *Iris* überlegen. Diese hat ein sehr kompaktes Rhizom, dem im Gegensatz zu den Wurzeln größere zusammenhängende Hohlräume zu fehlen scheinen. Somit muß die Luft im Inneren des Rhizomes viele Barrieren überwinden und ist schon aufgrund der längeren zurückzulegenden Wege in ihrem Fluß gehindert.

Da bei *Phragmites* die Blätter nicht – wie das bei *Iris* und *Acorus* der Fall ist – direkt in den Rhizombereich einmünden, müssen Gase erst durch den Halm mit seinen Nodi diffundieren, um Rhizom und Wurzeln zu erreichen. Die Porosität des Gewebes in den Knoten bestimmt somit die Geschwindigkeit der Gasdiffusion bei *Phragmites*. Wie mikroskopische Beobachtungen zeigen, sind die Nodi von großen Hohlräumen durchzogen und dadurch sehr gasdurchlässig. *Phragmites* scheint deshalb eine besonders gute Sauerstoffversorgung des Wurzelraums zu erreichen.

Die Porositäten der Wurzeln aller drei Spezies liegen in einem für Sumpf- und Wasserpflanzen mittleren Bereich von 10 bis 20% (Abb. 2 A–C und Tab. 1). CRAWFORD 1982 beschreibt Porositäten zwischen 2% und 45%, CONWAY 1937 findet für *Cladium mariscus* sogar 60%. Dabei fällt auf, daß *Acorus* besonders gut angepaßte Wurzeln mit verhältnismäßig großem Querschnitt bei geringer Anzahl von Zellen hat (Abb. 2 A), wie man sie auch von *Eriophorum angustifolium* kennt, die zu den überflutungstoleranten Spezies gehört (JUSTIN & ARMSTRONG 1987). Das strickleiterförmige Zellmuster, das dabei im Querschnitt entsteht, scheint eine typische genetisch festgelegte Anpassung der Anatomie an das Leben in anaerober Umgebung zu sein. Dieses Muster ist bei *Iris* nicht so stark ausgeprägt, wie Bild 2 zeigt, und es fehlt bei *Phragmites*. Anstelle dessen findet man dort große Lakunen offenbar schizogenen Ursprungs, durch die die Luft ebenfalls recht schnell diffundieren kann (Abb. 2 C).

Alle drei Spezies geben, wie die Experimente mit Methylenblau zeigen, Sauerstoff aus den Wurzeln in die Rhizosphäre ab, so daß sich in der direkten Umgebung der Wurzeln keine toxischen, reduzierten Substanzen ablagern können (MARSCHNER 1985). Die Ergebnisse dieses Experiments stimmen gut mit den gefundenen Ethan-Flußraten überein, denn *Acorus* und *Phragmites* zeigen eine erheblich stärkere Färbung als *Iris*. Trotz der großen Unterschiede in den Gasströmungsraten gelangt offenbar in allen untersuchten Pflanzen ausreichend Sauerstoff zu den Wurzeln, so daß sowohl die Atmung aufrecht erhalten wird als auch die Rhizosphäre oxidiert werden kann.

Interessant ist die Sauerstoffabgabe in den Wurzelraum auch unter dem Aspekt der Nutzung dieser Spezies in Klärwiesen (G. GELLER, pers.

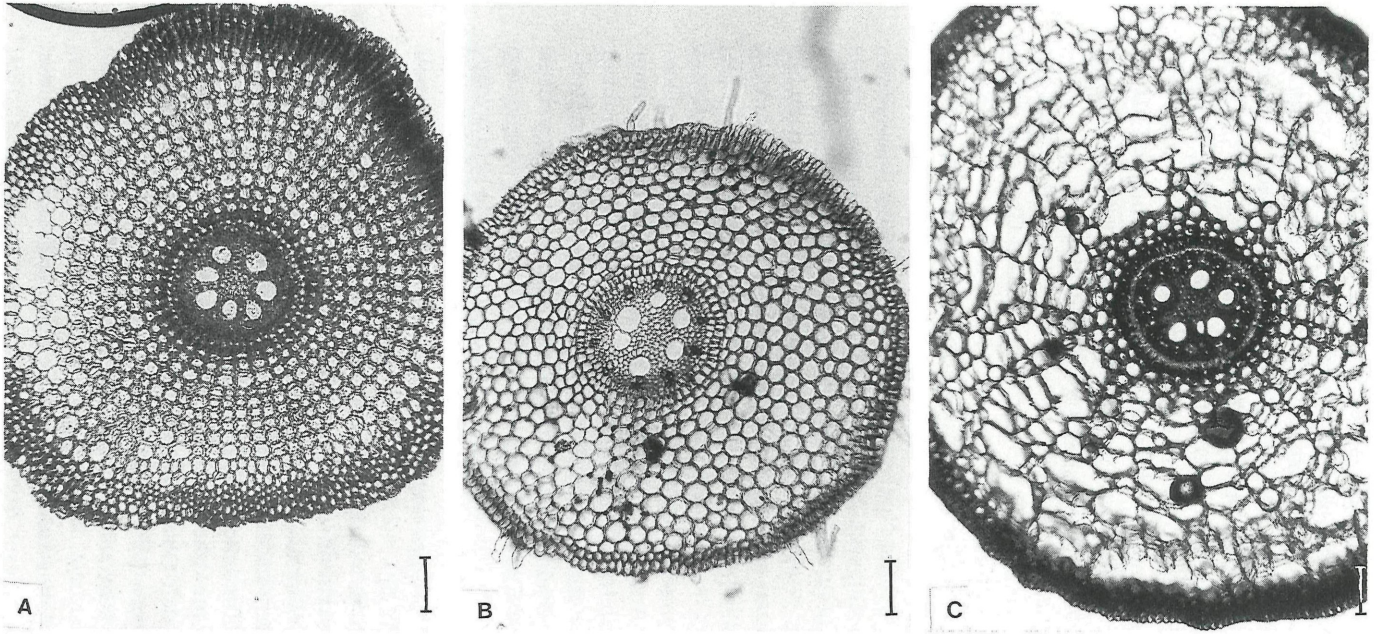

Abb. 2. Querschnitte durch Wurzeln der untersuchten Spezies (Freihandschnitte, 4–5 cm hinter der Wurzelspitze). Alle Photos im gleichen Maßstab, Index = 100 μm.

2 A: *Acorus calamus*. Nimmt hinsichtlich der Wurzelporosität eine intermediäre Stellung ein; im Randbereich einige großlumige Lacunen offenbar schizogenen Ursprungs. Das Wurzelsystem scheint keine speziell ausgebildete Aerenchymstruktur zu besitzen.

2 B: *Iris pseudacorus*. Geordneter, teilweise strickleiterartiger Aufbau des Gewebes, jedoch deutlich geringere Porosität als bei A. calamus.

2 C: *Phragmites communis*. Man erkennt deutlich die hohe Porosität als Anpassung an das Leben im überfluteten Boden; typisch ist die strickleiterförmige Anordnung der Zellen um den Zentralzylinder.

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

©Verlag Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Horn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Mitt.), denn gerade bei biologischer Klärung ist eine gute Durchlüftung des Klärschlammes wichtig, um eine weitgehende Reinigung zu erzielen und das Wachstum aerober Bakterien zu fördern. Die Menge des abgegebenen Sauerstoffs könnte somit als ein Kriterium für den Einsatz bestimmter Pflanzen in diesem Bereich gelten. Hier sind Messungen mit einer Sauerstoffelektrode notwendig, um die O_2-Konzentrationen in der Rhizosphäre exakt bestimmen zu können. Die Untersuchung der Bedingungen der Sauerstoffaufnahme im Sproßbereich und der Abgabe in die Rhizosphäre ist ebenfalls geplant.

5. Danksagung

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. SEILER für die Möglichkeit, die Experimente in seinem Institut durchführen zu dürfen und Herrn Prof. Dr. RENNENBERG für kritische Diskussionen und Korrekturen am Manuskript.

6. Schrifttum

CONWAY V. M. 1937. Studies in the autecology of *Cladium mariscus* R. Br. – New Phytol. 36: 64–96.

CRAWFORD R. M. M. 1982. Physiological responses to flooding. – In: Encyclopedia of plant physiology, Vol. 12 B, S. 453–477. Ed.: O. L. Lange, P. P. Nobel, C. B. Osmond and H. Ziegler. – Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

DENBIGH K. G. & RAUMANN G. 1953. The thermo-osmosis of gases through a membrane. – Proc. Roy. Soc. London, 210 A; 377–387.

DREW M. C., JACKSON M. B. & GIFFARD S. 1979. Ethylen-promoted adventitious rooting and development of cortical air spaces (aerenchyma) in roots may be adaptive responses to flooding in *Zea mays* L. – Planta 147: 83–88.

ELLENBERG H. 1982. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 3. Auflage. – Stuttgart.

GROSSE W. & MEVI-SCHÜTZ J. 1987. A beneficial gas transport system in *Nymphoides peltata*. – Amer. J. Bot. 74, 1: 947–952.

— & SCHRÖDER P. 1984. Oxygen supply of roots by gas transport in alder-trees. – Z. Naturforsch. 39 c: 1186–1188.

— & — 1985. Aeration of the roots and chloroplast-free tissues of trees. – Ber. deutsch. bot. Ges. 98: 311–318.

— & — 1986. Plant life under anaerobic conditions – A review. – Ber. deutsch. Bot. Ges. 99: 367–381.

JACKSON M. B. 1985. Ethylene and responses of plants to soil waterlogging and submergence. – Annual Rev. Plant Physiol. 36: 145–174.

JUSTIN S. H. F. W. & ARMSTRONG W. 1987. The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. – New Phytol. 106: 465–495.

MARSCHNER H. 1985. Die Nährstoffversorgung der Rhizosphäre. – Ber. deutsch. bot. Ges. 98: 291–309.

SCHRÖDER P., GROSSE W. & WOERMANN, D. 1986. Localization of thermo-osmotically active partitions in *Nuphar lutea*. – J. exp. Bot. 37 (183): 1450–1461.

TAKAISHI T. & SENSUI Y. 1963. Thermal transpiration effect of hydrogen, rare gases, and methane. – Trans. Farad. Soc. 59: 2503–2514.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Phyton, Annales Rei Botanicae, Horn

Jahr/Year: 1990

Band/Volume: 30_1

Autor(en)/Author(s): Meischner Veronika, Schröder Peter

Artikel/Article: Sauerstoffzufuhr zu den Wurzeln von Pflanzen aus Feuchtgebieten. 37-45