

Maßnahmen, die sich negativ auf die biologischen Wechselbeziehungen auswirken.

Die folgenden Ausführungen sollen den Charakter, die potentielle Bedeutung und die Möglichkeiten der Beeinflussung natürlicher Symbiosen etwas näher beleuchten.

4.6.2. Die vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza (VA-Mykorrhiza)

4.6.2.1. Eigenschaften und Bedeutung

Mykorrhiza ist die Symbiose zwischen Wurzeln höherer Pflanzen und Bodenpilzen. Am häufigsten tritt die vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza auf (VAM). Die entsprechenden Pilzarten gehören zur Familie der Endogonaceae (Endogonales).

Die Mykorrhizapilze sind weltweit verbreitet und kommen überall vor. So sind z.B. die Arten *Glomus fasciculatum* und *Glomus mosseae* auf der ganzen Welt identifiziert worden (RHODES 1980).

Sie sind obligate Symbionten, das heißt, sie sind für ihre Vermehrung auf die Pflanzen angewiesen (SIEVERDING und JOHN 1982); in Form von Dauersporen können sie mehrere Jahre im Boden überleben.

Im natürlichen Milieu sind Pflanzen meist von mehreren Mykorrhizapilzarten gleichzeitig infiziert, das heißt, es gibt keine Pilzspezifität etwa in der Art, wie bestimmte Rhizobien (Knöllchenbakterien) nur mit bestimmten Leguminosen Symbiosen eingehen können. Ein Mykorrhizapilz braucht keine spezielle Pflanze. - Das gleiche gilt für die Pflanzen. Auch sie benötigen keine spezielle Mykorrhizaart, sondern sie können jeweils irgendeiner Pilzart eine Symbiose eingehen (keine Wirtsspezifität).¹⁾

1) Gewisse Präferenzen konnten in Versuchen beobachtet werden (GRAW, REHM und MOWAD 1979, GTZ 1984).

Zur Wirkungsweise der Symbiose ist zu sagen, daß die Mykorrhizapilze zunächst die Rindenschicht der Wurzeln infizieren. Danach wachsen aus den Feinwurzeln der Wirtspflanze Pilzhyphen (Gewebsfäden) heraus und durchdringen den Boden, wodurch das Nährstoffaufnahmevermögen der Wirtspflanze - insbesondere für schwerbewegliche Nährstoffe wie P - erheblich verbessert wird (Abb. 4.6.a.). Der Pilz vergrößert also die aktive Absorptionsfläche der Wurzeln und versorgt die Pflanze mit mineralischen Nährstoffen, während diese den Pilz mit Photosyntheseprodukten (Energie) versorgt.

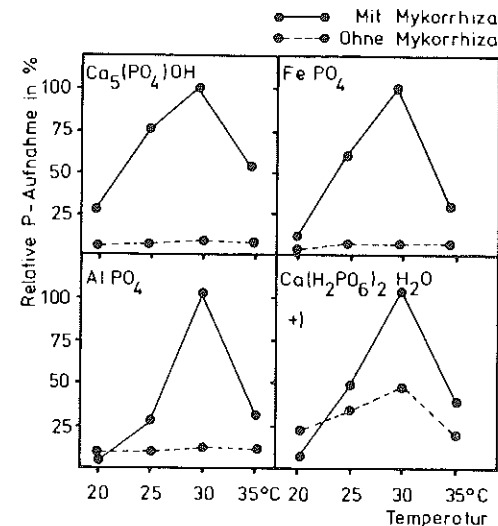


Abb. 4.6.a.: P-Aufnahme von *Eupatorium odoratum* mit (—) und ohne (---) Mykorrhiza bei verschiedenen Bodentemperaturen und bei Düngung mit verschiedenen P-Formen im Gewächshaus. Relativwerte bezogen auf P-Aufnahme der Mykorrhizapflanzen bei 30° C = 100; +) lösliche P-Form (nach MOWAD 1979)

Die Abhängigkeit verschiedener Pflanzenarten von Mykorrhiza ist unterschiedlich ausgeprägt. Zunächst gibt es Pflanzengruppen, die so gut wie keine Mykorrhiza haben. Zu ihnen zählen nach SIEVERDING und JOHN die weitaus meisten Artenvertreter (- nicht alle -) aus den Familien der Chenopodiaceae, Cruziferae und Cyperaceae. Nach JANOS (1980) gilt das auch für Commelinaceae, Juncaceae, Amaranthaceae, Caryophyllaceae, Fumariaceae, Phytolaccaceae, Nyctaginaceae, Polygonaceae und Ur-

ticaceae.¹⁾ Logischerweise sind diese Spezies für ihr Wachstum nicht auf die Symbiose mit Mykorrhizapilzen angewiesen.

Die überwiegende Mehrheit der Pflanzen geht leicht Symbiosen mit den Pilzen ein.

Das Ausmaß der Infektion der Wurzeln hängt, außer von der Menge an infektiösem Pilzmaterial im Boden, stark von den Bodenverhältnissen ab, wobei insbesondere der P-Gehalt eine wichtige Rolle spielt.

Hohe Bodenphosphatgehalte können (brauchen aber nicht notwendigerweise) die Wurzelinfektion vermindern und die Abhängigkeit der Pflanzenarten von der Symbiose beeinflussen. So fanden JOST und FOX (1979), daß Soja ohne Mykorrhiza schon bei 0,1 µg P/ml Bodenlösung gleich gut gedeihen konnte wie Soja, die mit Mykorrhiza infiziert war. Bei Kuhbohnen (*Vigna*) war das ab 0,2 µg P/ml der Fall, bei Zwiebeln ab 0,8 µg P/ml, bei *Leucaena*, bei *Stylosanthes hamata* und Maniok aber erst bei 1,6 µg P/ml.

Die Abhängigkeit einer Pflanze von Mykorrhiza wird, neben Bodenphosphatgehalt und Phosphatbedarf der Pflanze, insbesondere vom Ausmaß des Wurzelsystems der Pflanzenart bestimmt. Pflanzen mit ausgeprägtem, dichtem und feinem Wurzelsystem, wie z.B. viele Gräser, sind nur unter Bedingungen niedriger Bodennährstoffgehalte von Mykorrhiza abhängig (sogenannte fakultativ mykotrophe Pflanzen).

Pflanzen mit schwach entwickeltem, grobem Wurzelsystem und mit wenig Wurzelhaaren sind unter allen Bedingungen immer auf Mykorrhiza angewiesen (sogenannte obligat mykotrophe Pflanzen). Nach SIEVERDING und JOHN (1982) gilt dies mit Sicherheit für Maniok, Zwiebeln und junge Zitruspflänzchen.

Die Bedeutung der Mykorrhizasymbiose für die Phosphataufnahme verschiedener Pflanzenarten ist in Versuchen immer wieder gezeigt worden. SIEVERDING und JOHN (1982) zitieren Ergebnisse, in denen die Inokulation

1) Auffallend ist, daß viele Zeigerpflanzen, die eine hohe Nährstoffversorgung anzeigen (z.B. Brennessel, Gänsefuß, Erdrauch), gerade zu diesen Familien zu gruppieren sind.

Tab. 4.6.1.: Liste einiger wichtiger tropischer und subtropischer Kulturpflanzen, bei denen Mykorrhizainfektion mit positiver Wirkung nachgewiesen wurde (nach SIEVERDING und JOHN 1982, St. JOHN 1980*)

a) Einjährige Kulturpflanze

Baumwolle	<i>Gossipium hirsutum</i>	Malvaceae
Bohne	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Leguminosae
Erdnuß	<i>Arachis hypogaea</i>	Leguminosae
Flügelbohne*	<i>Phosphocarpus tetragonolobus</i>	Leguminosae
Gerste	<i>Hordeum vulgare</i>	Gramineae
Gartenkürbis	<i>Cucurbita pepo</i>	Cucurbitaceae
Hirse	<i>Sorghum bicolor</i>	Gramineae
Kartoffel	<i>Solanum tuberosum</i>	Solanaceae
Kuhbohne	<i>Vigna unguiculata</i>	Leguminosae
Mais	<i>Zea mays</i>	Gramineae
Moschuskürbis	<i>Cucurbita moschata</i>	Cucurbitaceae
Maniok	<i>Manihot esuleutum</i>	Euphorbiaceae
Paprika	<i>Capsicum anuum</i>	Solanaceae
Reis	<i>Oryza sativa</i>	Gramineae
Salat*	<i>Lactuca sativa</i>	Compositae
Soja	<i>Glycine max</i>	Leguminosae
Tabak	<i>Nicotiana tabacum</i>	Solanaceae
Tomate	<i>Lycopersicum esculentum</i>	Solanaceae
Yambohne	<i>Pachyrhizus tuberosus</i>	Leguminosae
Zwiebel	<i>Allium cepa</i>	Alliaceae

b) Gräser

Brachiaria*	<i>Brachiaria sp.</i>
Bahiagrass	<i>Paspalum notatum</i>
Weidelgras	<i>Lolium perenne</i>
Zebragrass	<i>Hyparrhenia rufa</i>
Zitronengras	<i>Cymbopogon citratus</i>

c) Futterleguminosen

Centro	<i>Centrosema pubescens</i>
Centro	<i>Centrosema macrocarpa</i>
Erdklee	<i>Trifolium subterraneum</i>
Kudzu	<i>Pueraria phaseoloides</i>
Luzerne	<i>Medicago sativa</i>
Rotklee	<i>Trifolium pratense</i>
Stylo	<i>Stylosanthes viscosa</i>
Stylo	<i>Stylosanthes capitata</i>
Stylo	<i>Stylosanthes guianensis</i>

d) Dauerkulturen

Bitterorange	<i>Citrus aurantium</i>	Rutaceae
Cashew-Baum*	<i>Anacardium occidentale</i>	Anacardiaceae
Erythrina*	<i>Erythrina glauca</i>	Leguminosae
Gmelina	<i>Gmelina arborea</i>	Verbenaceae
Guave*	<i>Psidium guajava</i>	Myrtaceae
Gummibaum	<i>Hevea brasiliensis</i>	Euphorbiaceae
Inga*	<i>Inga edulis</i>	Leguminosae

Fortsetzung Tab. 4.6.1.:

Kaffee	<i>Coffea</i> ssp.	Rubiaceae
Kakao	<i>Theobroma cacao</i>	Sterculiaceae
Kochbanane	<i>Musa x paradisiaca</i>	Musaceae
Mango*	<i>Mangifera indica</i>	Anacardiaceae
Orange	<i>Citrus sinensis</i>	Rutaceae
Ölpalme	<i>Elaeis guinensis</i>	Palmae
Pfeffer*	<i>Piper nigrum</i>	Piperaceae
Ricinus*	<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae
Zitrone	<i>Citrus limon</i>	Rutaceae

der Wirtspflanzen mit gut angepaßten Mykorrhizastämmen, auch unter natürlichen Bedingungen, Mehrerträge brachte, die bei Weidelgras einer Düngung von 30 kg P/ha, bei Mais von 56 kg P/ha, bei Maniok von 160 kg P/ha, bei Soja von 176 kg P/ha und bei Bitterorangen von 556 kg P/ha gleichkamen.

Über die Mykorrhizasymbiose nimmt die Pflanze allem Anschein nach nur gelöstes und oberflächlich leicht gebundenes P auf (MOSSE 1981). Durch die intensive Durchdringung des Bodens mittels der Pilzhyphen, die auch in die Streu hineinwachsen, wird jedoch die Gefahr, daß lösliches oder löslich gewordenes P, z.B. von Fe-Al-Oxiden, wieder fixiert wird, erheblich gemindert, denn der Weg zur Aufnahme des Nährstoffs durch die Pflanze ist deutlich verkürzt und der Kreislauf eng geschlossen. In ökologischer Hinsicht stellt Mykorrhiza damit ein wichtiges Glied im Nährstoffkreislauf (vor allem feucht-humider Ökosysteme) dar. Über die Mykorrhiza kann die Pflanze auch eine stärkere P-Verarmung der Bodenlösung bewirken, wodurch langsam aber stetig P aus unlöslichen Formen mobilisiert wird, was zumindest bei mehrjährigen Pflanzen quantitativ ins Gewicht fällt (MOSSE 1981).

Neben einer Verbesserung der P-Aufnahme wird das Aneignungsvermögen für Kalium, Schwefel, Zink und Kupfer verbessert, während z.B. die Calcium-Aufnahme nicht beeinflusst wird (VAN DER ZAAG et al. 1979).

Bei Leguminosen fördert Mykorrhiza über eine bessere P-Versorgung deutlich die N-Fixierung. SHAMSUDDIN und MANAP (in GAILLARD 1980) zum Beispiel konnten in Malaysia, vor allem auf armen Standorten, eine enge synergistische Wirkung von Mykorrhiza und Rhizobium bei *Leucaena leucocephala* beobachten.

Wie Versuche von SIEVERDING (1979) zeigen konnten, hatten mykorrhiza-infizierte Pflanzen - wohl aufgrund der besseren Nährstoffversorgung - auch wesentlich bessere Transpirationskoeffizienten als nicht infizierte Pflanzen (sie produzierten mehr Trockenmasse pro Wassereinheit als nicht infizierte Pflanzen).

Die Wasserversorgung von Pflanzen wird durch Mykorrhizainfektion generell verbessert. Den Mykorrhizapflanzen steht die nutzbare Wasserkapazität eines größeren Bodenvolumens zur Verfügung, wodurch sie gegen (periodischen) Wasserstreß weniger anfällig sind (Stabilisierung des Wasserhaushalts). Das wurde auch deutlich durch Versuche von MENGE et al. (1978), wo Avocado-pflänzlinge, die mit Mykorrhiza assoziiert waren, das Umpflanzen ins Feld besser überstanden als mykorrhizafreie Sämlinge (Tab. 4.6.2.).

Tab. 4.6.2.: Wirkung des Mykorrhizapilzes *Glomus fasciculatum* auf die Minderung von Umpflanzverlusten bei Avocadosämlingen (MENGE et al. 1978)

	% geschädigter Pflanzen	Welkeindex ¹⁾
ohne Mykorrhiza	80	2,6
mit Mykorrhiza beimpft	20	0,4

1) Welkeindex:
0 keine Symptome; 1-2 nekrotische und gewelkte Blätter;
2-3 schwere Nekrosen, Welke; 4 Meristemzerstörung

Gelegentlich kann eine Infektion mit VA-Mykorrhiza den Pflanzen auch eine höhere Schädlingsresistenz verleihen. SIEVERDING und JOHN (1982) berichten z.B. von geringerem Nematodenparasitismus bei Baumwolle und Soja, während RHODES (1980) eine direkte Wirkung von Endomykorrhiza für unwahrscheinlich hält und glaubt, daß die z.T. beobachteten Verbesserungen der Resistenzeigenschaften indirekt über einen verbesserten Ernährungszustand der Pflanzen zustande kamen.

Als eine weitere wichtige Eigenschaft von Mykorrhiza führt MOSSE (1981) die Bedeutung der Pilze für die Aggregatbildung der Böden an. Struktur

und Erosionsresistenz der Böden werden nach MOSSE durch Mykorrhiza verbessert.

Was die praktischen Folgerungen aus dem Auftreten von Mykorrhiza anbelangt, so ist zunächst festzustellen, daß Mykorrhiza seit jeher und fast überall vorkommt und sich deshalb eine "künstliche" Beimpfung auf vielen Standorten erübrigt.

Dennoch kann die Wirksamkeit und Effektivität der Symbiose durch den Menschen beeinflusst werden, was vor allem durch zwei Tatsachen bedingt ist:

- a) Landwirtschaftliche (und forstwirtschaftliche) Aktivitäten nehmen starken Einfluß auf das Ausmaß (Menge) und die Wirksamkeit (Qualität) der Mykorrhizapilze. Auch das Verhältnis verschiedener Arten zueinander wird beeinflusst (GTZ 1984, JANOS 1980).
- b) Die in der Natur vorkommenden Arten und Stämme von Mykorrhizapilzen sind nicht gleich in ihren Eigenschaften, sondern es gibt Arten und Stämme (Herkünfte), die besonders effektiv, z.B. bezüglich des P-Aufnahmevermögens, sind, und solche, die relativ ineffektiv sind. Daraus ergibt sich die Möglichkeit der praktischen Anwendung durch Inokulation der Pflanzen (Böden) mit effektiven, standörtlich angepaßten Selektionen.

Das Fehlen einer ausgesprochenen Spezifität der Symbionten begünstigt in beiderlei Hinsicht die Nutzung.

4.6.2.2. Beeinflussung der Pilzpopulation im Boden durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen

Es kann davon ausgegangen werden, daß nahezu alle ackerbaulichen Maßnahmen das Auftreten und die Aktivität der vesikulär-arbuskulären Mykorrhiza beeinflussen. Viele Effekte auf das pflanzliche Wachstum, die durch die Bodenbearbeitung, durch Fruchtfolgen usw. erzielt werden, sind wohl zum Teil auch Effekte, die auf die veränderte Aktivität der Symbiose zurückzuführen sind.

Theoretisch ergibt sich daraus die Möglichkeit, durch gezielte Anwendung und Kombination ackerbaulicher Maßnahmen die Mykorrhizapilze zu fördern (wobei nicht verschwiegen werden soll, daß SIEVERDING und SAIF (1984) davon ausgehen, daß einer gezielten Förderung effizienter Stämme durch ackerbauliche Maßnahmen in der Praxis relativ enge Grenzen gesetzt sind). Grundsätzlich muß ein Management natürlicher vorhandener Mykorrhizapopulationen darauf ausgerichtet sein, die Bedingungen für Mykorrhiza allgemein günstig zu gestalten und hemmende Eingriffe zu vermeiden (das ist natürlich auch für den Erhalt und die Pflege der Populationen nach künstlicher Inokulation von Bedeutung). Ziel eines solchen Managements ist es, die Produktivität der weitverbreiteten P-Mangelböden zu verbessern und die vielerorts knappen oder in Zukunft knapper werdenden P-Dünger besser auszunutzen.

Wie bereits erwähnt, können hohe Bodenphosphatgehalte die Mykorrhizaaktivität negativ beeinflussen. Im allgemeinen werden Pflanzen durch hohe Phosphatdüngung (auch durch hohe N-Düngung) gegen die Infektion mit Mykorrhiza immun gemacht (ROSS 1971, MOSSE 1981), was dazu führt, daß P-Düngergaben von mehr als 50 kg P/ha bei mykotrophen Pflanzen oftmals nur zu einem Ertragszuwachs führen, wenn Pilzarten im Boden vorhanden sind, die an solch hohe P-Niveaus angepaßt sind (SIEVERDING und JOHN 1982).

Eine verringerte P-Aufnahme der Kulturpflanzen tritt in der Regel aber nicht auf, wenn durch hohe Gaben leichtlöslicher P-Dünger die Mykorrhizaaktivität reduziert wird, denn das verringerte P-Aneignungsvermögen wird durch das höhere P-Niveau in der Bodenlösung ausgeglichen (solange dieses vorhanden ist). Andere, wenig mobile Nährstoffe wie Zink oder Kupfer hingegen können zu Mangelnährstoffen werden, da sie von den nur noch schwach infizierten Wurzeln in geringerem Umfang aufgenommen werden können (indirekter P-induzierter Mikronährstoffmangel) (RHODES 1980). Kleine P-Düngergaben haben meist einen fördernden Einfluß auf die Mykorrhiza. Insbesondere eine verhaltene P-Düngung mit Rohphosphaten wirkte förderlich auf die Symbiose (ROSS 1971, GTZ 1984).

Roden und Brennen von Anbauflächen führen in der Regel zu einem starken Rückgang der natürlichen Mykorrhizapopulation, und die natürlich auftretenden "Pionierpflanzen" sind - bei relativ hohem Nährstoffniveau - meist

nicht-mykotrophe Pflanzen. Werden auf einem solchen Feld noch Kulturen angebaut, die gut ohne Mykorrhiza auskommen, so kann der natürliche Besatz mit Mykorrhizapilzen in kurzer Zeit sehr stark zurückgehen, wie REEVES et al. (zit. in RHODES 1980) dies bei Chenopodiaceae und Cruciferae zeigen konnten.

Auch die Fruchtfolgen nehmen also starken Einfluß auf die Mykorrhiza. Bei Feldversuchen, die am CIAT in Kolumbien durchgeführt wurden, konnte die Mykorrhizaaktivität an Maniok in Fruchtfolgen mit Leguminosen (*Vigna unguiculata*; *Vigna radiata* und Erdnuß) gegenüber der Reinkultur mit Maniok deutlich gesteigert werden. Der fördernde Einfluß, der auch bei Mischkulturen auftrat, war auf dem Standort mit ursprünglich relativ niedriger Pilzpopulation besonders ausgeprägt (SIEVERDING und LEIHNER 1984).

KRUCKELMANN (zit. in RHODES 1980) stellte fest, daß nach 16 Jahren in einer Rotation von Hafer mit einer Nicht-Wirtspflanze von Mykorrhiza (Rübe) die natürlich auftretende Mykorrhizapopulation im Ackerboden viel niedriger war als beim Daueranbau von Mykorrhizawirten.

Pflanzenbaulich dürfte es nicht schwierig sein, eine hohe Mykorrhizapopulation und -aktivität auch in solchen Feldern zu bewahren, wo aus sozio-ökonomischen Gründen öfter nicht-mykotrophe Pflanzen als Verkaufsfrüchte angebaut werden müssen. Durch Integration mykotropher Dauerkulturen in das Feld, durch Mischkulturen, Staffelmischkulturen oder durch Alley-cropping, z.B. mit *Leucaena*, kann das erreicht werden.

Auch Unkräuter wirken in dieser Hinsicht als Wirtspflanzen förderlich auf den Erhalt bzw. die Förderung der Mykorrhiza, das heißt, durch gezielte Toleranz einiger "nobler" Unkräuter, aber auch durch nur mechanische bzw. kulturtechnische Unkrautkontrolle wird die Symbiose begünstigt.

Herbizide können einen negativen Einfluß auf die Mykorrhiza haben. Zum einen wird das Angebot an Wirtspflanzen durch Herbizide deutlich dezimiert (auch durch "clean-weeding"), wodurch langfristig die Mykorrhiza zurückgedrängt wird, zum anderen beeinträchtigen die Herbizide häufig direkt den Pilz (siehe Abb. 4.6.b.), wodurch die Wurzelinfektion und die Sporenproduktion unterdrückt werden.

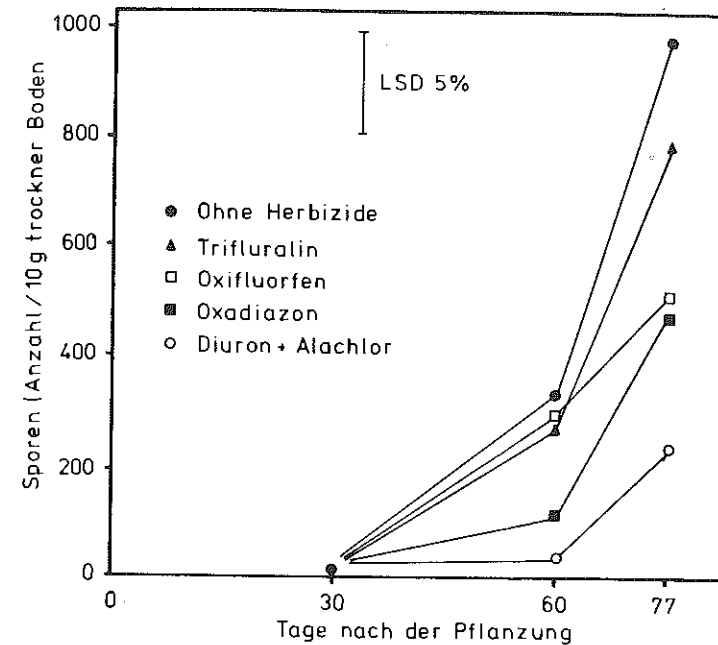


Abb. 4.6.b.: Wirkung von Herbiziden auf die Sporenproduktion von *Glomus manihotis* bei Maniok (nach SIEVERDING und LEIHNER 1984a)

Auch andere Pestizide¹⁾ und vor allem Fungizide haben oft eine dezimierende Wirkung auf die Mykorrhiza. RHODES (1980) erwähnt in diesem Zusammenhang vor allem Methylbromid, Benomyl, Pentachlornitrobenzol (PCNB) und Chlorthalonyl. GRAHAM et al. (1980) konnten die abträgliche Wirkung von PCNB bestätigen.

Bodenbearbeitung bzw. die Schaffung oder Erhaltung einer lockeren, gut luft- und wasserführenden Bodenstruktur wirkt förderlich auf Mykorrhiza.

1) In Ausnahmefällen können durch Ausschaltung von Antagonisten und selektive Beeinträchtigung weniger effizienter Stämme u.U. auch "positive" Effekte bezüglich der Mykorrhizawirksamkeit auftreten (SIEVERDING und LEIHNER 1984a, MOSSE 1981).

Nach JANOS (1980) sollte der Boden dabei aber nicht tiefgründig gewendet werden, da dadurch die aktive Schicht an der Oberfläche vergraben und unter Umständen inaktiviert wird.

Auch die Stabilisierung der Bodentemperatur bei 25 - 30° C, etwa durch Mulch oder durch Maßnahmen der Vegetationsgestaltung (s.o.) fördert allgemein die Mykorrhizaaktivität. So führt CHALKER (1966) die Erfolge der Mulchanwendung in Avocado-Anpflanzungen auch auf die Begünstigung der Mykorrhiza zurück. Temperaturen unter 20 - 25° C und über 30° C (Abb. 4.6.a.) hemmen die Mykorrhiza (SIEVERDING 1979, MOWAD 1979).

Da die an einem Standort natürlich auftretende Mykorrhiza in enger Beziehung zu den Klima- und Bodeneigenschaften steht, wirken sich kurzfristig herbeigeführte, drastische Veränderungen des Bodenmilieus, wie z.B. starke Kalkung, zumindest vorübergehend negativ auf die Mykorrhizaaktivität aus, und der Anpassungsprozeß der Pilzarten an die geänderten Bedingungen kann ohne künstliche Beimpfung mit angepaßten Arten sehr langsam verlaufen (MOSSE 1981).

Aufgrund der Tatsache, daß eine genetische Variabilität der Kulturpflanzen bezüglich der Infektionsfähigkeit mit Mykorrhiza besteht, und viele fakultativ mykotrophe Pflanzen nur bei relativ geringen P-Niveaus eine Symbiose eingehen, ist stark zu vermuten, daß bei hohem Nährstoffniveau selektierte Zuchtsorten schlechter Symbiosen eingehen als Landsorten und Kreuzungen mit Landsorten, denn diese sind den niedrigen P-Niveaus und der Ausnutzung von Mykorrhiza meist besser angepaßt bzw. haben eine höhere Affinität zu Mykorrhiza (JANOS 1980, SIEVERDING und JOHN 1982).

Zum Management natürlicher Mykorrhiza gehört schließlich auch das Beimpfen von Kulturpflanzen mit mykorrhizareicher Erde. Nach YANTHASATH (1975) kann eine Beimpfung von Pflanzen mit Erde aus dem Wurzelbereich von bekanntermaßen mykotrophen Pflanzen (wie z.B. Tagetes) durchaus sinnvoll sein. Gibt man solche Erde (mit Sporen und infizierten Wurzelstücken) in das Pflanzloch, die Anzuchtgefäße oder -beete von ebenfalls mykotrophen Pflanzen, so entwickeln sich diese oft besser und gesünder (vor allem bei Zugabe von zuvor sterilisierter Anzuchterde). Das Impfmateriale dazu sollte jedoch stets von einer anderen Pflanzenfamilie stammen, damit nicht gleichzeitig Schaderreger übertragen werden.

4.6.2.3. Inokulation mit selektierten, effizienten Mykorrhizastämmen

Wie oben bereits ausgeführt, erübrigt sich auf vielen Standorten eine "künstliche" Beimpfung. Versuche der letzten Jahre haben jedoch auch gezeigt, daß auf vielen Böden durch eine Beimpfung mit standörtlich angepaßten Stämmen bessere Erträge erzielt werden konnten als unter natürlichen Bedingungen (GTZ 1984). Ursache hierfür ist die bereits erwähnte Tatsache, daß es im natürlichen Milieu unterschiedlich effektive VA-Mykorrhiza gibt. Es gibt Arten und Stämme von VA-Mykorrhiza, die anderen Arten und Artengemischen auf einem bestimmten Standort überlegen und zu einer besseren Nährstoffaufnahme und Infektion fähig sind als die natürlich im Boden vorhandenen Mykorrhizapilze.

Durch Selektion und Vermehrung solcher Arten in Topfkulturen und durch Beimpfung mit so geschaffenem Bodensubstrat aus infizierten Wurzeln und/oder Sporen konnten Ertragssteigerungen in Gewächshaus- und Feldversuchen erzielt werden (siehe Abb. 4.6.c.).

In Versuchen von JACKSON et al. (1972) brachte Mais, der mit effizienten Mykorrhizastämmen beimpft war, 50 % mehr Ertrag als die mit nativer Mykorrhiza infizierten Pflanzen.

In beim CIAT auf Inceptisolen und Oxisolen durchgeführten Feldversuchen, zu denen jeweils 50 kg Rohphosphat gedüngt wurden, konnten durchschnittlich 29 % höhere Maniokerträge durch Inokulation erzielt werden (Anstieg von 15,6 t/ha auf 21,1 t/ha).

Bei Düngung mit Superphosphat betrug der Zuwachs 26 %. Futterleguminosen, die mit 20 kg Rohphosphat gedüngt wurden, hatten nach Inokulation mit effizienten Stämmen unter natürlichen Feldbedingungen bis zu 65 % Mehrertrag (SIEVERDING und SAIF 1984).

Die bisher am CIAT durchgeführten Versuche zur Beimpfung mit effektiven Stämmen ergaben auch, daß kleine Gaben von Phosphat die Effizienz von Feldbeimpfungen verbessern und daß der Phosphatdüngungsanspruch von Kulturpflanzen mit Mykorrhizainokulation wesentlich geringer war als ohne.

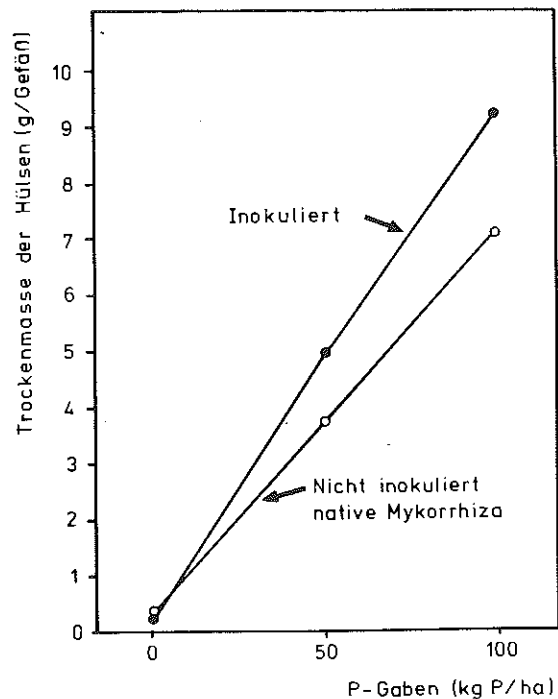


Abb. 4.6.c.: Wirkung der Beimpfung von Bohnen mit *Glomus manihotis* und verschiedener P-Versorgung auf den Ertrag von Bohnen in einem Gewächshausversuch in nicht sterilisiertem Boden (MOSQUERA, zit. in SIEVERDING und SAIF 1984)

Industriell erzeugter, löslicher P-Dünger konnte auf den sauren, tropischen Standorten in bisher fast allen Fällen voll durch die Kombination von Rohphosphat mit Mykorrhiza ersetzt werden (siehe Tabelle 4.6.3.).

Voraussetzung für die Beimpfung ist die Selektion effizienter Stämme, die den standörtlichen Gegebenheiten angepaßt sind und sich gegenüber den natürlich vorhandenen Arten behaupten und durchsetzen können. Auch nach RHODES (1980) ist der Erfolg einer Inokulation mit effizienten Stämmen dabei mehr vom Boden und den Klimafaktoren abhängig (Standortanpassung) als von dem jeweiligen Wirt.

Tab. 4.6.3.: Wirkungen der Feldinokulation (Inok.) und der Düngung mit löslichem Triple-Superphosphat (TSP) bzw. Huila-Rohphosphat (HRP) auf die Knollenerträge von Maniok auf drei verschiedenen Ackerböden Kolumbiens (SIEVERDING und SAIF 1984)

Behandlung	Knollenerträge in t/ha			
	Standort a	Standort b	Standort c	Mittel
50 kg/ha TSP	13,1	18,5	7,0	12,9
50 kg/ha TSP und Inok.	18,1	22,9	8,2	16,9
50 kg/ha HRP	12,7	11,3	6,2	10,1
50 kg/ha HRP und Inok.	15,5	20,4	9,5	15,1

Die Verfahren zur Selektion und Anwendung der VA-Mykorrhiza sind mittlerweile soweit entwickelt, daß sie auch in der Praxis, insbesondere auf kleinbäuerlichen Betrieben, Anwendung finden könnten. Neben dem erforderlichen "know-how" ist die Technologie der Mykorrhiza-inokulation relativ einfach und billig und erfordert nach MOSSE (1981) nicht viel mehr als ein gutes Mikroskop und Siebe.

Die Anwendung der Technologie würde in vielen Regionen dazu beitragen, daß vorhandenes Rohphosphat wirtschaftlicher eingesetzt werden kann, wodurch sich die Chance eröffnet, von teuren löslichen Phosphaten unabhängiger zu werden und die oftmals ertragslimitierende P-Versorgung der Böden zu verbessern.

Leider fehlt es in der Praxis noch an Institutionen, die das Basisimpfmateri- al herstellen und bereitstellen (Verfahren der Vermehrung der VA-Mykorrhiza in künstlichem Medium gibt es noch nicht).

Würde solches Basisimpfmateri- al zur Verfügung gestellt, so könnte nach SIEVERDING und SAIF (1984) alles weitere auf den Betrieben selbst ge- schehen: Auf 25 m² Grundfläche (20 cm tief) mit sterilisiertem Boden könnte mit 2,5 kg Basisimpfmateri- al (infizierter Boden), das auf der Ober- fläche ausgebreitet und eingearbeitet wird, und welche dann mit einer mykorrhizaverme- hrenden Pflanze (z.B. *Pueraria phaseoloides*) besät wird, genügend Impfmateri- al für 1 ha (ca. 5 t) erzeugt werden. Dieses stünde nach 4-6 Monaten (am besten bei Abreife der Pflanzen) zur Verfügung.

Vorläufige Berechnungen am CIAT ergaben, daß der Einsatz auf kleinbäuerlichen Betrieben in Kolumbien durchaus wirtschaftlich wäre (SIEVERDING und SAIF 1984).

Es ist denkbar, daß sich solche Möglichkeiten schon in naher Zukunft ergeben, wobei besonders auf nährstoffarmen Standorten mit geringer natürlicher oder uneffektiver Mykorrhizapopulation mit deutlich positiven Wirkungen zu rechnen ist (Tabelle 4.6.4.). Zu solchen Standorten zählen viele Savannenstandorte, sogenannte degradierte Böden, und zum Teil auch Böden, die durch ackerbauliche Maßnahmen stark verändert wurden.

Tab. 4.6.4.: Korrelation zwischen bodenchemischen und -biologischen Eigenschaften und dem Ertragszuwachs durch Feldinokulation bei Maniok (GTZ 1984)

Nutzung des Ackers vor dem Versuch	Org. Masse des Bodens in %	Native infektionsfähige Mykorrhiza Brutkörper im Boden	P ppm	Knollenerträge t/ha		Ertragszuwachs durch Inokul. in t/ha
				Bray II	nicht inokul. 1)	
3 Jahre Maniok	18,9	1717	1,4	17,7	15,7	-2,0
1 Jahr Maniok	8,5	823	2,9	24,7	27,8	+3,1
Weide	3,2	103	1,2	21,2	27,1	+5,9

1) Inokulation mit 400 g Impfmateriel unter die Stecklinge zum Pflanzen; das Inokulum bestand aus infiziertem Bodensubstrat; Mischung von *Glomus manihotis* und *Entrophosphora columbiana*

Schließlich eröffnet sich auch in der An- und Aufzucht von Forst- und Dauerkulturen ein wichtiges Einsatzfeld für die künstliche Inokulation mit Mykorrhiza. Die in Tabelle 4.6.5. dargestellten Ergebnisse von MENGE et al. (1978) demonstrieren dies auf eindrucksvolle Weise.

Abb. 4.6.d. zeigt noch einmal die Schritte von der Isolation effizienter Stämme bis zur praktischen Anwendung.

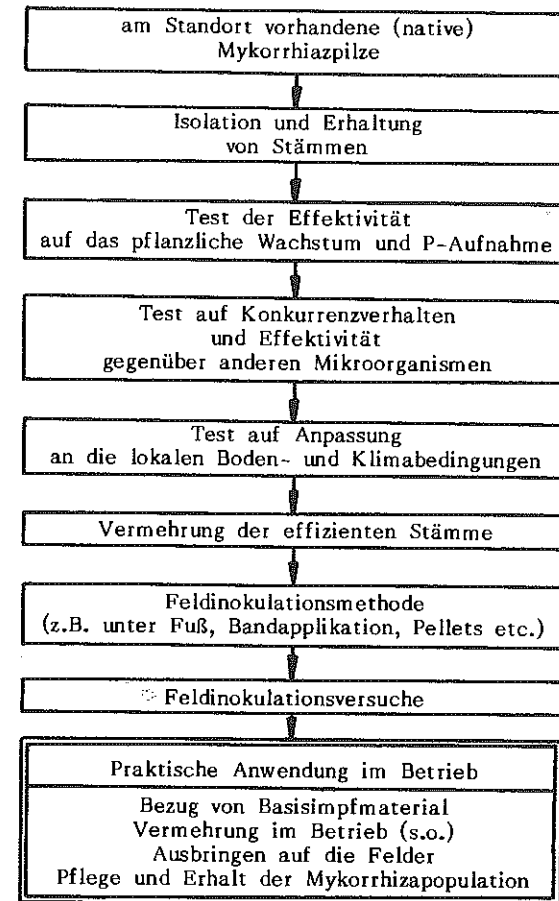


Abb. 4.6.d.: Flußdiagramm der Selektion effizienter Mykorrhizastämme für die Feldinokulation (nach SIEVERDING und SAIF 1984)

Tab. 4.6.5.: Effekt der Beimpfung mit *Glomus fasciculatum* auf das Wachstum von Topa Topa - Avocadosämlingen 1)
(nach MENGE et al. 1978)

	Wuchshöhe in cm	Trockengewicht der Sprosse (g)	Trockengewicht der Wurzeln (g)
Nicht mit Mykorrhiza beimpft	5,7 a	17,2 a	15,6 a
beimpft	20,4 b	31 b	34,8 b

1) Messung nach 6 Monaten

4.6.3. Biologische Stickstoffbindung

4.6.3.1. Allgemeine Gesichtspunkte

Obwohl in der Erdatmosphäre unterschöpfliche Mengen an Stickstoff (ca. 4×10^5 t) vorhanden sind (OKON 1982), ist Stickstoff für die meisten Pflanzen der ertragsbegrenzende Nährstoff, denn die Pflanze kann den elementaren Stickstoff (N_2) nicht verwerten, sondern ist auf gebundenen Stickstoff (NH_4^+ , NO_3^-) als Nährstoff angewiesen.

Durch die Tätigkeit der stickstoffbindenden Bakterien und Algen wird diese Umwandlung seit Urzeiten vorgenommen und bildete bis zur Erfindung der technischen Ammoniakgewinnung durch das Haber-Bosch-Verfahren neben der organischen Düngung die wesentliche Grundlage für die N-Ernährung der Pflanzen. Mit der breiten Herstellung und Anwendung mineralischer Stickstoffdünger erlahmte das Interesse an den Leguminosen und an der biologischen Stickstoffbindung.

Forschung und Technik beschäftigten sich weltweit vornehmlich mit der Verbreitung und Anwendung der mineralischen Stickstoffdüngung. Wo Stickstoffdünger verfügbar war, stiegen die Erträge der Nutzpflanzen, vor allem der Nichtleguminosen wie z.B. Getreide, stark an, und die Anbauflächen für diese Kulturen konnten deutlich ausgedehnt werden, während der Ackerflächenanteil der Leguminosen deutlich zurückgedrängt wurde.

Kleinbäuerliche, subsistenzorientierte Betriebe, die sich den Dünger entweder nicht leisten konnten, oder denen er nicht zur Verfügung stand, konnten jedoch an dieser "positiven" Entwicklung kaum teilnehmen.

Erst die Energiekrise der 70er Jahre und das Scheitern der Grünen Revolution in weniger begünstigten Agrarregionen führte zu einer Rückbesinnung auf die Leguminosen und auf die biologische Stickstoffbindung allgemein, einer (Bio-)Technologie also, die nicht, wie die chemisch-technische N-Gewinnung, in großem Umfang nichterneuerbare Energie- und Rohstoffreserven verbraucht, sondern mit Hilfe der Sonnenenergie am Ort des Bedarfs den Stickstoff für das pflanzliche Wachstum bereitstellt.

N-Bindung: Von den vielen Mikroorganismen ist nur eine verhältnismäßig kleine Anzahl in der Lage, biologisch Luftstickstoff zu binden. Sie tun dies mittels eines besonderen Enzyms, der Nitrogenase, die bei allen N-Fixie-

ren etwa gleich funktioniert (RICHTER 1982). Elementarer Stickstoff wird dabei zu NH_3 (NH_4^+) umgewandelt und dann in der Wirtspflanze oder dem Organismus selbst schnell zu Aminosäuren und Eiweißverbindungen verstoffwechselt.

Dieser Vorgang erfordert auch bei den Mikroorganismen (wie bei der technischen Gewinnung) viel Energie (12-15 mol ATP und mehr für 1 mol N_2), die die Bakterien entweder durch Aufnahme von Kohlenstoffverbindungen (Photosyntheseprodukte) oder, wie die blau-grünen Algen, durch eigene Photosynthese gewinnen (DAY und WITTY 1977, NEVES 1982).

Aufgrund ihrer Lebensweise lassen sich bei den stickstoffbindenden Bakterien grob drei physiologische Typen unterscheiden:

a) symbiotische Gruppe:

Die Bakterien sind in den Zellverband von Wurzeln höherer Pflanzen integriert. Sie sind mehr oder weniger streng an einen Wirt gebunden, sind von mikrobiellen Antagonisten (Konkurrenz) abgeschirmt und haben eine hohe Effizienz (z.B. Rhizobium und Frankia).

b) assoziative Gruppe:

Die Bakterien (z.B. Spirillum) leben frei oder in engster Umgebung von Gräserwurzeln (Rhizosphäre) bzw. in (?) den Wurzeln. Die Beziehung Pflanzen/Mikroorganismen ist nur indirekter Natur, und die Bakterien stehen noch in einer gewissen Konkurrenz mit anderen Bodenorganismen.

c) frei lebende Gruppe:

Ihre Aktivität steht nicht unbedingt in Wechselwirkung mit der höheren Pflanze. Für ihr Vorhandensein und ihre Aktivität benötigen sie energetisch relativ leicht verfügbare, organische Substanz im Boden. Sie (z.B. Azotobacter) sind starker Konkurrenz durch andere Mikroorganismen ausgesetzt.

Eine Sonderstellung nehmen die chlorophyllhaltigen, stickstoffbindenden Algen ein, die unabhängig von einer Versorgung mit energiereichen, organischen Verbindungen vor allem in aquatischen Agroökosystemen wie Wasserreis eine Rolle spielen.

Wegen des hohen Energiebedarfs sind nur solche N-Fixierer für den Ackerbau von quantitativer Bedeutung, denen in ausreichender Menge leicht verfügbare Kohlenhydrate (Zucker oder ähnliches) zur Verfügung stehen. (Das konnte unter anderem durch Versuche in Ägypten anschaulich gezeigt werden (ODU 1977), wo die Stickstoffbindung des frei im Boden lebenden Bakteriums Azotobacter durch die Zugabe zuckerreicher Melasse zum Boden deutlich verbessert wurde.)

Für die frei lebenden N-Fixierer ist eine ähnliche Situation unter natürlichen Bedingungen nur in der Rhizosphäre der Pflanzen annähernd gegeben, wo ihnen (allerdings in teilweiser Konkurrenz zu anderen Mikroorganismen) energiereiche Wurzelausscheidungen zur Verfügung stehen. Bakterien, die eine Symbiose mit den Wirtspflanzen eingehen (Rhizobien, Aktinomyzeten), werden direkt durch den Saftstrom der Pflanze mit energiereichen Photosyntheseverbindungen versorgt, und blau-grüne Algen können die Energie über die Photosynthese selbst erzeugen. Tatsächlich kommt diesen 3 Gruppen bei der biologischen Stickstoff-Fixierung auch die größte Bedeutung zu.

Da das **Nitrogenase-Enzym** (zur Stickstoffbindung) sehr empfindlich gegen hohe Sauerstoffkonzentrationen ist, müssen die Bakterien (aerobe) spezielle Mechanismen entwickeln, um es gegen hohe Sauerstoffkonzentrationen zu schützen und ein gutes Funktionieren der Stickstoffbindung sicherzustellen. Auch hier sind die frei im Boden lebenden N-Fixierer wiederum im Nachteil, denn sie müssen einen großen Anteil der Kohlenstoffverbindungen veratmen, um das Nitrogenasesystem durch CO_2 -Bildung vor zu hohen Sauerstoffkonzentrationen zu schützen. Nach NEVES (1982) kann dieser Anteil 80-90 % der Energie beanspruchen. Bakterien, die wie Azospirillum in den inneren Teil der Rhizosphäre oder gar der Wurzeln gelangen können (DÖBEREINER 1982), oder Rhizobien, die in speziellen Knöllchen der Pflanzenwurzeln leben, können dagegen fast stets bei geringer (optimaler) Sauerstoffkonzentration arbeiten, während das für die frei lebenden Organismen nur selten (teils anaerobe Bodenverhältnisse) möglich ist.

Ein dritter Faktor, der die Stickstoffbindung bzw. Nitrogenaseaktivität maßgeblich beeinflusst, ist die Konzentration von Ammoniak und Nitrat im Boden. Steigt die Konzentration an Stickstoffionen (z.B. durch mineralische

N-Düngung) im Boden an, so wird die Stickstoffbindung verhindert und die Nitrogenasebildung unterdrückt (RICHTER 1982).

Leguminosen und andere N-fixierende Pflanzen werden dann in ihrer Wettbewerbskraft geschwächt und z.B. auf den Feldern leicht von Unkraut überwachsen; auf Weiden können sie völlig verdrängt werden (zur Problematik von Leguminosen auf Weiden siehe auch SKERMAN 1977 und WHITNEY 1982).

Von allen natürlichen N-Bindungsprozessen ist die Symbiose von Leguminosen und Rhizobien quantitativ bei weitem die bedeutendste und (mit den Aktinomyzeten) auch die energetisch (qualitativ) effektivste Form der biologischen Stickstoffbindung.

Im folgenden sollen deshalb die Bedingungen für eine möglichst optimale N-Bindung etwas genauer dargestellt und Möglichkeiten der ackerbaulichen Einflußnahme aufgezeigt werden.¹⁾

4.6.3.2. Nutzung der Leguminosen/Rhizobien-Symbiose und ihre Beeinflussung durch ackerbauliche Maßnahmen

Die in der Natur vorkommenden Rhizobienarten sind stark auf bestimmte Wirtspflanzen oder Wirtspflanzengruppen spezialisiert, d.h. eine Rhizobienart, die z.B. mit Soja eine Symbiose eingeht, kann mit Klee keine Symbiose eingehen (wichtiger Unterschied zu Mykorrhiza!).

Bedeutende Rhizobiengruppen sind:

- a) Cowpea-Rhizobium (*Vigna*, *Cajanus*, *Pueraria*, *Arachis*)
- b) *Rhizobium japonicum* (Sojagruppe)
- c) *Rhizobium lupinii* (Lupinengruppe)
- d) *Rhizobium meliloti* (Medicagogruppe)
- e) *Rhizobium phaseoli* (Bohnengruppe)
- f) *Rhizobium trifolii* (Kleegruppe)

1) Trotz der neuerdings großen Fülle von Forschungstätigkeiten und Veröffentlichungen auf dem Gebiet der tropischen Leguminosen finden sich neben sehr speziellen Untersuchungen (z.B. Verhalten der Rhizobien in den Knöllchen, Infektionsvorgang) relativ wenig Hinweise auf mehr generelle Möglichkeiten und Grenzen der ackerbaulichen Förderung der Symbiose.

Von diesen Gruppen wiederum existieren Rassen und Stämme, die mehr oder weniger spezifisch sind für einzelne Pflanzengruppen oder sogar Arten und Sorten.

Aufgrund der hohen Spezifität von Wirt und Rhizobien (sie müssen kompatibel sein) ist es von großer Bedeutung, daß bei der Einführung einer neuen Kulturpflanze in eine Region geprüft wird, ob es zur N-Bindung kommt bzw. daß die dazugehörige Rhizobiumart mit ausgesät wird (Inokulation).

In Gebieten, wo bestimmte Leguminosen schon lange angebaut werden, sind die geeigneten Rhizobien dagegen fast stets in ausreichender Menge vorhanden. So ist auf den Böden Ägyptens *Rhizobium leguminosarum* für die Ackerbohnen überall vorhanden, während die neu eingeführte Soja erst gedeihen konnte, nachdem Stämme von *R. japonicum* in die Felder geimpft wurden, die für die Böden und das Klima Ägyptens geeignet waren.

Außer in Fällen wie diesem, wo es sich um die Einführung neuer Kulturpflanzen handelt, sind aufwendige Anstrengungen auf dem Gebiet künstlicher Beimpfung aus praktischer Sicht nur noch bei solchen Leguminosenarten vertretbar, die sehr spezifische Symbiosen eingehen (z.B. *Stylosanthes guyanensis*, Soja, *Centrosema pubescens* oder auch *Leucaena*) (DÖBEREINER 1977). Bei diesen Leguminosenarten können natürlich im Boden vorhandene, den Verhältnissen gut angepasste, aber bezüglich der Stickstoffbindung wenig effektive Rhizobienarten selbst um ein Vielfaches effektivere Rhizobien völlig verdrängen. Nicht vertretbar ist der Aufwand bei mehr unspezifischen Leguminosenarten wie z.B. *Vigna*, Siratro (*Macorptilium atropurpureum*), Kudzu (*Pueraria phaseoloides*) oder ausdauernder Soja (*Glycine wightii*), da künstliche Inokulation bei diesen meist nicht zu ausreichenden Mehrerträgen führt. Das gilt besonders für den Bereich der Tropen, wo sehr bunt gemischte (viele verschiedene) Rhizobien und Leguminosenarten auftreten (mehr als in gemäßigten Klimaregionen). Nach DÖBEREINER (1977) wäre in der Mehrzahl dieser Fälle durch die ackerbauliche, kulturtechnische Beeinflussung des gesamten Boden-, Pflanzen und Bakteriensystems ein bedeutend besserer Ertragsgewinn zu erwarten.

Leider muß man feststellen, daß gerade in diesem Punkt, also der Förderung der Symbiose und der Rhizobien durch ackerbauliche Maßnahmen, auf dem Gebiet der tropischen Leguminosen noch sehr vieles ungeklärt ist (BERGERSEN 1977, JOHN 1982) und aufgrund der zum Teil unterschiedli-

chen Einzelergebnisse allgemeine Aussagen oft noch kaum möglich sind (ALEXANDER 1977).

Einige der gewonnenen Erkenntnisse werden im folgenden dargestellt, wobei allerdings nicht vergessen werden darf, daß die allgemeingehaltenen Ausführungen die mehr oder weniger variablen Eigenschaften von Leguminosen und Rhizobien nicht im einzelnen berücksichtigen können.

Die erste und entscheidende Voraussetzung für eine gute N-Bindung der Leguminosen/Rhizobien-Symbiose ist ein gutes Wachstum der Kultur- bzw. der Wirtspflanze, denn alle Faktoren, die das pflanzliche Wachstum behindern, behindern natürlich auch die Fähigkeit zur und die Leistung der Symbiose (z.B. Flachgründigkeit, Wassermangel, Salinität, Toxizität etc.). Je besser die Nährstoff-, Klima-, Boden-, Temperatur- und Lichtansprüche der Kulturpflanzen erfüllt werden, desto eher sind sie in der Lage, die Rhizobien mit Energie und sich selbst mit Stickstoff für das Wachstum zu versorgen (siehe auch Tab. 4.4.16 im Kapitel Gründüngung).

Licht: Lichtmangel oder starke Beschattung führen beispielsweise zu einem Rückgang der Stickstoffbindung, wenn der Pflanze nicht mehr genügend Photosyntheseprodukte für das eigene Wachstum und die Versorgung der Knöllchen zur Verfügung stehen (DART 1977).

Untersuchungen von MINCHIN und PATE (in BERGERSEN 1977) ergaben z.B., daß Erbsen bis zu 15 % (wenn man die Kohlenstoffgerüste für die Aminosäurebildung hinzurechnet, sogar 32 %) der Photosyntheseprodukte in die Knöllchen verlagerten. Für praktische Belange heißt das: wenn das primäre Ziel eines Leguminosenanbaus die Stickstoffgewinnung bzw. ein hoher Leguminosenertrag ist, so sollte den arteigenen Lichtansprüchen Rechnung getragen werden.

In der Praxis finden sich Beispiele für eine Lichtunterversorgung von Leguminosen und deren Verdrängung z.B. auf Wiesen, in denen das Gras häufig hoch steht oder unter dem Schatten von Bäumen. Auch bei Mischkulturen, z.B. von Mais mit Bohnen, wirkt sich die späte Aussaat von Bohnen (vor allem bei hohem N-Düngungsniveau) sehr negativ aus, denn wenn die Bohnen zu früh (vor der Blüte) stark beschattet werden, leidet die N-Fixierung darunter.

Bei der **Düngung** kommt es darauf an, sowohl die Nährstoffansprüche der Wirtspflanze als auch die speziellen Ansprüche der Rhizobien sicherzustellen. Hierbei gilt es zu beachten, daß Leguminosen im Vergleich zu anderen Kulturpflanzen einen relativ hohen **P-Bedarf** haben. MUNNS und FRANCO (1982) und andere halten P-Mangel für den bedeutendsten Mangelfaktor für das Wachstum und die N-Fixierung tropischer Leguminosen. GRAHAM (1981) stellte bei Phaseolus-Bohnen fest, daß eine verbesserte P-Versorgung die Knöllchenbildung nicht nur deutlich förderte, sondern sie setzte außerdem früher ein, wodurch die Dauer der N-Bindung (bis zur Blüte) verlängert wurde. Die Stickstoffbindungsaktivität der Knöllchen war dadurch deutlich höher. Untersuchungen von EDWARDS (1977) bestätigten die besondere Bedeutung der P-Versorgung.

Neben diesen Untersuchungen untermauern praktische Erfahrungen diese These, denn mit einer P-betonen Düngung ist es z.B. auf Wiesen und Weiden fast immer möglich, gezielt den Leguminosen-Anteil zu fördern. Je nach Situation und Praktikabilität bieten sich für eine Verbesserung der P-Versorgung mehrere Möglichkeiten:

- a) über die Düngung (hier haben sich auch Gaben von Rohphosphat oder die Kombination von Rohphosphat mit Zugabe von elementarem Schwefel und Kulturen von *Thiobacillus* bewährt (DOMMERGUES 1982, SWABY 1975).
- b) über alle ackerbaulichen Maßnahmen, die eine bessere Durchwurzelung bzw. Wurzelbildung fördern und so zu einer höheren P-Aneignung führen (org. Substanz, Anbau von Tiefwurzlern etc.).
- c) über die Förderung (oder Impfung) von Mykorrhiza (siehe oben).
- d) über P-Mangel-tolerante Rhizobienstämme (obwohl z.T. schon gefunden, sind sie noch nicht von praktischer Bedeutung).
- e) über die Wahl standortgeeigneter Leguminosen. Nach ANDREW und ROBINS (zit. in MUNNS und FRANCO 1982) tolerieren z.B. *Stylosanthes humilis* und *Centrosema pubescens* geringe P-Verfügbarkeit wesentlich besser als *Macroptilium atropurpureum* (Siratro), *Desmodium* und *Glycine*.

Stickstoffdüngung (NH_4^+ und NO_3^-) wirkt sich auf die Stickstoffbindung meist negativ aus. Wie oben bereits erwähnt, wird dadurch die Nitrogenasebildung gehemmt (Repression), und die Aktivität geht deutlich zurück

(RICHTER 1982). In der Folge kommt es zu einem Zerfall der Wurzelknöllchen, und die biologische Stickstoffbindung kommt zum Erliegen (BERGERSEN 1977). Die Pflanzen und die jeweils vorkommenden Rhizobienstämme reagieren dabei unterschiedlich empfindlich auf die N-Düngung (DART 1977). So konnte GRAHAM (1981) bei Phaseolusbohnen schon bei einer Düngung von nur 15 kg/ha einen Rückgang der N-Fixierung um 39 % messen.

HAMDI und ALAA EL-DIN (1982) stellten ebenfalls schon bei 15 kg N/ha einen deutlichen Rückgang der Stickstoffbindung bei Soja fest.

Kleine N-Gaben (je nach Pflanzenart und N-Status des Bodens (5-15 kg/ha) können sich aber auch positiv auswirken, da Leguminosen in der Jugendphase (vor der Knöllchenbildung) häufig unter vorübergehendem N-Mangel leiden. Durch eine kleine N-Gabe ("Startergabe") kann diese Mangelphase überbrückt werden, wodurch die Jugendentwicklung der Leguminosen und damit ihre Entwicklung insgesamt gefördert wird.

Nach GRAHAM (1981) kann ein solcher vorübergehender Mangel vor allem in kühlen Jahreszeiten oder in tropischen Höhenlagen auftreten. In den wechselfeuchten Tropen ist das unwahrscheinlicher, denn hier tritt, bei ausreichendem Gehalt der Böden an organischer Substanz, zu Beginn der Regenzeit (der Anbauzyklen) ein natürlicher Mineralisationsschub ein, der eine zusätzliche N-Startergabe überflüssig machen kann.

Nach Untersuchungen von YOSHIDA (zit. in GRAHAM 1981) wirkt sich in diesem Zusammenhang der oft von Kleinbauern zur Düngung angewandte Hühnermist weniger negativ auf die N-Bindung aus als äquivalente Mengen an Harnstoff, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auch von anderen organischen Düngern angenommen werden kann (kein so plötzlicher Nährstoffschub).

DOMMERGUES (1982) verweist darauf, daß Baumleguminosen mit zunehmendem Alter häufig in ihrer N-Bindungsaktivität nachlassen und vermutet, daß es an der steigenden N-Konzentration im Baumbereich liegt. Hiernach ist es also nicht angezeigt, die Laubstreu einer Leguminose stets in Baumnähe zu belassen, denn ihre Bedeutung als N-Lieferant in einem integrierten Anbausystem wird besser genutzt, wenn die N-reichen Blätter an die Feldkulturen gegeben werden (N-armes Material an den Baum).

Eine gute Kaliumversorgung stärkt meist die Konkurrenzkraft der Leguminosen und begünstigt damit indirekt die Symbiose.

Calcium begünstigt den Infektionsvorgang an den Leguminosenwurzeln (EDWARDS 1977). Die Ca-Gehalte für eine optimale Rhizobieninfektion liegen dabei meist deutlich höher als die Ansprüche der Leguminosen selbst und erst recht der Rhizobien bzw. der Knöllchen, die nach erfolgter Infektion einen relativ geringen Ca-Bedarf haben (Tab. 4.6.6.):

Tab. 4.6.6.: Wirkung der Calcium-Konzentration in Nährlösung auf die Knöllchenbildung von bodenbürtigem Klee (*Trifolium subterraneum*) (LOWTHER und LONERAGAN 1968, zit. in EDWARDS 1977)

	Calciumkonzentration der Nährlösung in μM					
	4	9	30	81	246	720
Pflanzen mit Knöllchen (%)	0	5	12	27	98	100
Mittlere Knöllchengröße	-	2,5	2,3	2,3	2,2	2,4

In der Tat wurden durch Kalkung häufig beachtliche Ertragssteigerungen erzielt (so konnten z.B. MUNNS und FOX (1977) auf einem Oxisol in Hawaii (pH 4,7) den Ertrag von *Laucaena* durch Kalkung auf das Sechsfache steigern), wofür allerdings weniger die Nährstoffwirkung von Calcium verantwortlich war, als vielmehr seine Wirkung gegen die Probleme der Azidität allgemein (siehe Kapitel 2.3.2.). Mit oder ohne Kalkung kommt es darauf an, das Calcium-Niveau der Böden durch einen hohen Biomasseumsatz aufrechtzuerhalten und zu schonen, um der Versauerung entgegenzuwirken - etwa durch periodischen Einsatz von Stallmist, durch Mulchen oder durch Gründüngung mit tiefwurzelnden Pflanzen, die ausgewaschenes Calcium (wie Buschbrachen) wieder in den oberen Ackerhorizont zurückführen (siehe entsprechende Kapitel).

Von den Spurennährstoffen kommt in der Praxis dem Molybdän (Mo) und dem Schwefel (S) die größte Bedeutung zu. Nach BERGERSEN (1977) sind es die Mikronährstoffe, die die N-Fixierung in den Tropen am meisten behindern. Molybdän ist wichtiger Bestandteil (Elektronentransfer) des Nitrogenase-Enzyms, weshalb in den Wurzelknöllchen die Konzentration (der Be-

darf) gegenüber der Pflanze erhöht ist. Molybdän-Mangel führt zu einer geringeren Stickstoffbindung. Da die Verfügbarkeit des Molybdäns mit niederem pH zurückgeht, tritt der Mangel vor allem auf sauren Böden, z.B. auf Oxisols, häufig auf (DÖBEREINER 1977) und kann durch ein Aufkalken der Böden mehr oder weniger behoben werden.

Häufig wird das Leguminosensaatgut auch als pelletiertes Saatgut ausgebracht oder beimpft, wobei Molybdän hinzugefügt ist. Wo dies nicht möglich ist und wo nur wenig oder kein Molybdändünger zur Verfügung steht, kann die Versorgung mit Molybdän auch häufig schon dadurch verbessert werden, daß man das Saatgut aus Parzellen gewinnt, die mit Molybdän gedüngt wurden bzw. in denen die Molybdän-Verfügbarkeit verbessert wurde (SANCHEZ und SALINAS 1981).

Schwefel ist zum einen ein wichtiger Nährstoff für die Leguminosen (fördert Eiweißmenge und -qualität), er ist aber auch ein wichtiger Bestandteil des N-bindenden Nitrogenaseenzym der Knöllchenbakterien (RICHTER 1982).

Eine wichtige Maßnahme für den Schwefelerhalt ist der Verzicht auf das Verbrennen von Pflanzenrückständen, denn Schwefelmangel wird durch das Brennen von Pflanzenresten gefördert, da der darin enthaltene Schwefel dabei als Gas verloren geht. Außerdem führt das Brennen zu einem Rückgang der organischen Substanz, die in den tropischen Böden den wichtigsten Schwefelspeicher darstellt.

Über sulfathaltige Dünger können beachtliche Mengen an Schwefel in die Böden gelangen, so daß bei solcher Düngung kaum mit Mangelerscheinungen zu rechnen ist. Das gilt auch in industrialisierten Regionen, wo beachtliche Mengen von Schwefel mit den Niederschlägen auf die Felder gelangen können. Bei Düngung mit Rohphosphaten wird kaum Schwefel geliefert.

Als eine weitere sehr wirkungsvolle Maßnahme zur Förderung der N-Fixierung und des Wachstums der Leguminosen erwies sich häufig die Behebung von **Aziditätsproblemen** (niederer pH, Aluminium-Toxizität, Mangan-Toxizität, Calcium-Mangel, Phosphat-Mangel, Molybdän-Mangel).

CHARREAU (1975) z.B. konnte durch Kalkung eines sauren, sandigen Lehmbodens im Senegal die Probleme der Aluminium-Toxizität für das Wachstum von Erdnuß beseitigen und die Erträge deutlich verbessern.

Azidität ist aber nicht nur für das Pflanzenwachstum an sich ein Problem,

sondern stark saure Bodenverhältnisse wirken sich auch negativ auf das Überleben und die Aktivität der Rhizobien aus. So war die Überlebensrate von **Rhizobium meliloti** in einem gekalkten Boden nach DANSO (1977) deutlich besser als ohne Kalkung (Tabelle 4.6.7.).

Tab. 4.6.7.: Wirkung von Kalkung auf das Überleben von **Rhizobium meliloti** in einem sauren, lehmigen Sandboden (nach DANSO 1977)

Wochen Beobachtungszeit	R.meliloti pro g trockener Boden	
	ohne CaCO ₃	mit CaCO ₃
0	30 Millionen	30 Millionen
1	14 Millionen	30 Millionen
4	6,8 Millionen	34 Millionen
8	1,0 Millionen	14 Millionen

Nach EDWARDS (1977) ist die Stickstoffbindung auf sauren Böden auch dann herabgesetzt, wenn (noch) ein hoher Rhizobienbesatz vorhanden ist. Er führt das darauf zurück, daß die Infektion der Wurzeln mit Rhizobien häufig schon in pH-Bereichen gestört ist, bei denen die Kulturpflanzen an sich noch gut wachsen würden. Für **Rhizobium meliloti** lag der kritische pH-Wert bei pH 5. Phaseolus-Bohnen zeigten in Versuchen von GRAHAM (1981) ab pH 5,5 fast ausnahmslos gute Knöllchenbildung, und auch VIDOR et al. (1982) konnten feststellen, daß Kalkung zu Phaseolus nur dann förderlich auf die Symbiose wirkte, wenn die pH-Werte im Ausgangsboden unter 5,5 lagen; in höheren pH-Bereichen konnte durch Kalkung keine Verbesserung mehr erzielt werden.

Neben der Wirkung niedriger pH-Werte an sich scheinen es vor allem die damit verbundenen Probleme wie etwa die Al-Toxizität zu sein, die bei Phaseolus-Bohnen je nach Sorte schon bei Gehalten von 3-5 (8) ppm zu Problemen führen (GRAHAM 1981), wobei sich freies Al sowohl negativ auf die Pflanzen als auch auf die Rhizobien auswirkt (EDWARDS 1977). Mn-Toxizität kann die Rhizobien und die N-Fixierung schon beeinträchtigen, lange bevor das Pflanzenwachstum darunter leidet (DANSO 1977, DÖBEREINER 1982).

Molybdän-Düngung zeigte bei Düngungsversuchen zu Phaseolus nur dann eine Wirkung, wenn die pH-Werte des Bodens über 5,2 lagen (GRAHAM 1981).

Das Ausmaß, in dem die Knöllchenbildung und Symbioseaktivität von den niederen pH-Werten (Azidität) beeinflusst werden, hängt in starkem Maße von der Leguminosenart, den jeweiligen Rhizobien und vom Boden ab. NORRIS (1969) konnte im Regenwald Brasiliens z.B. beobachten, daß Pflanzen, die bei pH 4,5 auf einem sandigen, grauen Boden noch sehr gut nodulierten, auf einem benachbarten, gelben Lehmboden keinerlei Symbiose erkennen ließen (siehe auch SYLVESTER-BRADLEY et al. 1980).

Von Cowpea-Rhizobien und Cowpea-Sorten ist bekannt, daß sie eine relativ hohe Resistenz gegen Al-Toxizität besitzen, und auch bei anderen Leguminosen (z.B. Phaseolus) ist die Selektion aziditätsverträglicher Sorten und Rhizobien schon geglückt. Bis solche Grundlagenforschungen (etwa auf dem Gebiet spezieller Resistenzen bei Rhizobiumstämmen) Eingang in die Praxis - vor allem kleinbäuerlicher Betriebe - finden werden, wird aber mit Sicherheit noch viel Zeit vergehen.

Erfolgversprechender ist auf absehbare Zeit die Suche, Auswahl und Zucht toleranter Wirtspflanzen (MUNNS und FRANCO 1982), wobei man davon ausgehen kann, daß alte Landsorten ungünstigen lokalen Bodenverhältnissen in der Regel besser angepaßt sind als neue Kultivare aus Zuchtgärten (SANCHEZ und SALINAS 1981).

Prinzipiell sollte beim Anbau von Leguminosen auf sauren Standorten überprüft werden, ob die Symbiose auch effektiv verläuft. Ist das nicht der Fall, so sind je nach den standörtlichen Möglichkeiten Maßnahmen zur Beseitigung der Probleme vorzunehmen (Arten-, Sortenwahl, leichte Kalkung, Bodenbearbeitung etc.).

Bodenfeuchte und Bodentemperatur beeinflussen die Symbiose ebenfalls. **Stauanässe** behindert den Gasaustausch (Wurzel- und Knöllchenbereich), und wenn die Sauerstoffkonzentration im Boden auf unter 0,2 atm abfällt, was in Ackerböden nicht selten ist, so führt das zu einem Rückgang der Knöllchenbildung und der Stickstoffbindung (MINCHIN und PATE zit. in EDWARDS 1977). Bei Messungen an Phaseolus-Bohnen konnte festgestellt werden, daß die Knöllchenaktivität bei Stauanässe rasch um 40-50 % zurückging (SPRENT zit. in GRAHAM 1981).

Alle Maßnahmen, die Staunässe verhindern helfen (Biologische Aktivität, organische Masse, lockerer Boden, Vermeiden von Verdichtungen, Drainage, Bodenbearbeitung etc.), tragen auf staunässegefährdeten Standorten zu einer besseren Stickstofferte bei.

Nicht weniger abträglich wirkt sich **Wasserstress** aus (ALEXANDER 1977). Bei Klee, Phaseolus und Soja wurde beobachtet, daß Wasserstress zu einem deutlichen Rückgang der N-Bindung führte. GRAHAM zitiert in diesem Zusammenhang Untersuchungen von SPRENT, die feststellte, daß bei gestressten Phaseolusbohnen sowohl die Knöllchenzahl als auch deren Größe zurückging, wodurch die N-Bindung um bis zu 90 % reduziert wurde. Auch der für die meisten annualen Leguminosen typische Abfall der N-Fixierungsaktivität zum Ende der Blüte vollzog sich bei Wasserstress deutlich früher und schneller, wodurch die zeitliche Dauer der Stickstoffbindung verkürzt wurde (DUQUE et al. 1982).

Besonders bei annualen Leguminosen sollte zwecks hoher Stickstoffsammlung darauf geachtet werden, daß zum Zeitpunkt der maximalen N-Bindung (Blüte) die Wasserversorgung gesichert ist.

Strauchleguminosen (und Bäume) reagieren auf Trockenheit im Oberboden weniger empfindlich. Bei ihnen können die Knöllchen im trockenen Oberboden ihre Aktivität beibehalten, wenn die tiefreichenden Wurzeln der Pflanze noch an verfügbares Wasser heranreichen (DART 1977). Besonders abträglich wirkt Trockenheit, wenn sie zusätzlich von Hitze begleitet ist. Dadurch wird nicht nur die Wirtspflanze einem Stress ausgesetzt, sondern auch die Überlebensrate von Rhizobien im Boden wird vermindert.

Insbesondere auf sandigen Böden wirken sich hohe Temperaturen negativ auf das Überleben von Rhizobien aus, während auf tonhaltigen Böden der Einfluß von Hitze und Trockenheit nicht so extrem ist. Es scheint so zu sein, daß die Tonkolloide eine schützende Wirkung auf die Rhizobien ausüben (DANSO 1977).

Rhizobium trifolii war bei den Untersuchungen deutlich empfindlicher als *R. japonicum* und *R. lupinii*, d.h. es treten in gewissem Umfang arten- und auch rassespezifische Unterschiede auf.

BOONKERD und WEAVER (1982) fanden, daß hohe Temperaturen sowohl bei Trockenheit als auch bei Wassersättigung dezimierend auf Cowpea-Rhizobien wirkten.

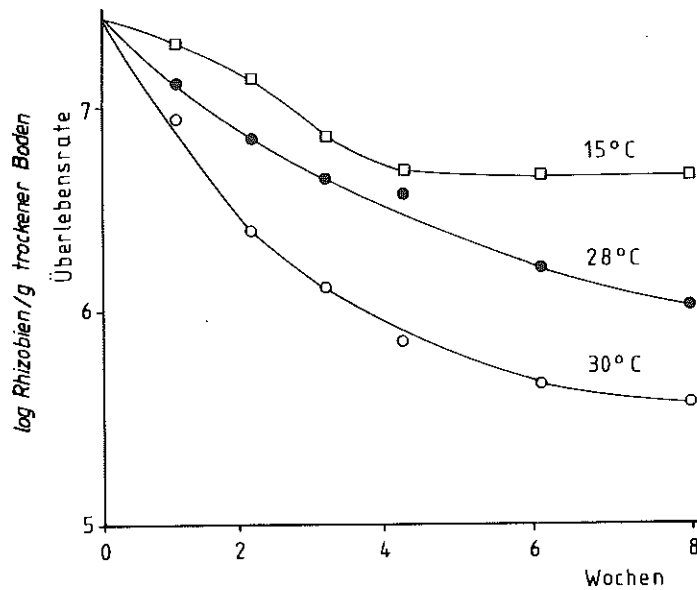


Abb. 4.6.e.: Wirkungen der Lagertemperatur auf das Überleben von *Rhizobium meliloti* M₃V₂-S in einem sandigen Boden (DANSO und ALEXANDER 1974, zit. in DANSO 1977)

Für die Funktion der Rhizobien können sowohl sehr hohe als auch sehr niedrige Temperaturen abträglich sein, wobei in den Tropen meist zu hohe Temperaturen die N-Bindung behindern. Hohe Temperaturen in der Rhizosphäre beeinträchtigen die Wurzelhaarbildung der Wirtspflanzen, die Infektion und die Ausbildung der Knöllchen. Auch eine Hemmung der Nitrogenaseaktivität ist bei vielen Pflanzen nachgewiesen worden (MUNEVAR und WOLLUM 1982).

Phaseolus zeigt z.B. im Temperaturbereich von 20-25°C die optimale Stickstoffbindung, während bei Temperaturen über 33° und unter 15°C die Fixierung sehr rasch zurückgeht. Bei einem Tag-Nacht-Wechsel von 25/15°C war die N-Fixierung der Bohnen mehr als doppelt so hoch wie bei einem Temperaturgang von 25/35° C (GRAHAM 1979, 1981). Bei Soja reagierten viele Sorten und Rhizobienstämme ab Temperaturen von 28°C mit Leistungs-

abfall (MUNEVAR und WOLLUM 1982). Nach DOMMERGUES (1982) stellen die meisten Leguminosen bei Temperaturen von 30° C im Wurzelbereich die Knöllchenbildung ein, und nur wenige Spezialisten machen dabei eine Ausnahme (z.B. *Acacia mellifica* erst bei 30-35° C).

Der Einfluß nur kurzfristig hoher Temperaturen ist noch wenig untersucht. Bei *Vigna unguiculata* konnten sich die Rhizobien innerhalb von 5-10 Tagen von einem Temperaturzyklus erholen, bei dem die maximale Temperatur täglich auf 40° C anstieg; d.h. nur vorübergehend hohe Temperaturen müssen sich noch nicht negativ auf den Endertrag auswirken (DART 1977).

Mulchversuche bei Phaseolus deuten darauf hin, daß ein mehr ausgeglichener Temperaturgang die Symbiose deutlich fördert. Wurden Bohnen mit 4 cm Reisspelzen gemulcht, so war die Durchschnittstemperatur in 10 cm Bodentiefe zwar nur um durchschnittlich 1,3° C erniedrigt, die Verhinderung eines Temperaturanstiegs über die kritische Temperatur (um 28° C) bewirkte jedoch einen um 38 % höheren Frischmasseertrag der Bohnen, und die Stickstoffbindung durch die vermehrt gebildeten Knöllchen betrug zur Blüte das Dreifache, bei der Ernte noch das Doppelte (WATERS et al. 1980).

Eine weitere positive Wirkung des Mulchs kann von der Tatsache ausgehen, daß durch ihn ein starker Wechsel von Trocknung und Wiederbefeuchtung im Oberboden unterbleibt, denn solch ein Wechsel kann zu einem Platzen vorher ausgetrockneter Rhizobienbakterien führen, wodurch ihre potentiell infektiöse Population dezimiert wird (SALEMA et al. 1982).

Da sich freie Bodenoberflächen besonders stark erhitzen, ist - auch zur Förderung der Rhizobienaktivität - ein nackter Boden zu vermeiden.

Sortenwahl: Durch geeignete Sortenwahl ist es möglich, die Stickstoffbindung zu fördern.

Bei einer ganzen Reihe von Leguminosen konnte gezeigt werden, daß außer zwischen den Arten auch zwischen Sorten große Unterschiede in ihrem Vermögen, Stickstoff zu binden, auftreten (z.B. bei Klee, Soja, Desmodium, Luzerne, Wicken, Erbsen und Phaseolusbohnen). Mehrerer Ursachen sind hierfür verantwortlich: Neben den bereits erwähnten Resistenz- und Toleranzeigenschaften sind verschiedene Sorten auch verschieden gut in der Lage, mit den jeweils natürlich vorkommenden Rhizobien eine Symbiose einzugehen (Kompatibilität).

Der Hauptgrund für das unterschiedliche Vermögen zur N₂-Fixierung scheint nach dem heutigen Stand der Forschung aber darin zu bestehen, daß verschiedene Arten und Sorten mehr oder weniger gut dazu befähigt sind, die Wurzelknöllchen mit ausreichend Kohlenhydraten (Energie) zu versorgen (GRAHAM 1982).

Durch viele Untersuchungen konnte in den letzten Jahren gezeigt werden, daß bei sonst guter Versorgung der Pflanzen die Versorgung der Knöllchenbakterien mit Photosyntheseprodukten der limitierende Faktor für die Stickstoffbindung ist. So gibt es Sorten, die zwar viele Kohlenhydrate in die Wurzeln verlagern (mehr von unteren als von oberen Blättern), die aber dennoch wenig an die Knöllchen abgeben. Solche Sorten erwiesen sich als relativ schlechte Stickstoffsammler.

Auch gibt es Sorten und Wuchstypen von Leguminosen, die schon in der Jugendphase viel Bodenstickstoff aufnehmen und diesen mit den energiereichen Photosyntheseprodukten unmittelbar in Phytomasse (Sproßbiomasse) umsetzen. Auch bei solchen Wuchstypen bleiben wenig Photosyntheseprodukte für die Versorgung und den Aufbau von Knöllchen übrig, so daß die Pflanzen weniger Knöllchen bilden bzw. die vorhandenen Knöllchen weniger Stickstoff binden können. Das ist z.B. bei vielen Phaseolus-Buschbohnen-typen der Fall, die eine frühe Blüte, frühe Reife und einen determinierten Wuchstyp aufweisen.¹⁾²⁾

Annuelle Leguminosen, bei denen die Wachstumsphase bis zum Ende der Blüte länger ist, zeigen tendenziell eine höhere Stickstoffbindung, denn mit dem Beginn der Hülsenausbildung setzt eine physiologische Umstimmung der Pflanzen ein. Kohlenhydrate werden dann vermehrt an das neu entstandene Attraktionszentrum (physiologischer "sink") geliefert, so daß dieses in Konkurrenz zur Versorgung der Knöllchenbakterien tritt.

Nach DART (1977) ist das Verhältnis von Hülsen und Wurzeln als konkurrierende Attraktionszentren für die Kohlenhydrate bei Soja sortenabhängig,

- 1) Determinierter Wuchstyp heißt, daß es an allen Trieben fast gleichzeitig zur Blüte und zum Abreifen kommt (kurze Blühphase).
- 2) Das beschriebene Verhalten der Bohnen und der rasche Abfall der N-Bindung nach der Blüte werden als Hauptgründe dafür angesehen, daß Phaseolus-Bohnen im Vergleich zu anderen Körnerleguminosen relativ wenig Stickstoff fixieren; nach GRAHAM (1981) je nach Sorte 25-70 kg/ha.

das heißt auch bei Sorten mit zeitgleicher Blüte kann die Fähigkeit zur Stickstoffbindung noch unterschiedlich sein.

In der Regel sind eine späte Blüte und eine längere Blühdauer für die Stickstoffbindung vorteilhaft, denn sie verlängern den Zeitraum, in dem die Wurzelknöllchen mit Kohlenhydraten versorgt werden, wodurch ihr Wachstum und die Stickstoffbindung gesteigert werden. So konnten HARDY et al. (zit. GRAHAM 1982) durch eine photoperiodisch induzierte Verlängerung der Phase bis zur Blüte (um 9 Tage) bei Soja eine doppelt so hohe Stickstoffbindung erzielen.

Anbauversuche von GRAHAM und Mitarbeitern mit verschiedenen Sorten und Wuchstypen von Phaseolus-Bohnen ergaben, daß niederwüchsige Buschtypen mit determiniertem Wuchs (I) wesentlich geringere N-Mengen fixierten als kletternde Bohnen (Stangenbohnen-typ) (IV); Buschtypen mit halb determiniertem Wuchstyp (II) und rankend-kriechende Buschformen (III) nahmen eine Mittelstellung ein (Abbildung 4.6.f., Tabelle 4.6.8.).

Tab. 4.6.8.: Stickstoff-Fixierung (Acetylenreduktion) von 8 Sorten von *P. vulgaris* mit verschiedenem Wuchshabitus (GRAHAM 1981, verändert)

Sorte	Wuchshabitus ^{a)}	Zeit bis zur Blüte in Tagen ^{b)}	Saisonale Stickstoffbindung (Acetylenreduktion in mmol C ₂ H ₂ pro Pflanze) ^{c)}
Versuch in der 1. Saison 1976			
P 635	I	42	0,40
P 417	II	55	2,72
P 589	III	60	2,52
P 717	IV	48	9,47
Versuch in der 2. Saison 1976			
P 536	I	41	6,85
P 561	II	43	7,66
P 498	III	50	13,10
P 590	IV	66	28,01

a) Wuchshabitusklassifikation: I determiniert, Buschtyp; II undeterminiert, Buschtyp; III undeterminiert, kriechend-rankende Buschform; IV Klettertyp, Stangenbohne.

b) Tage, bis 50 % der Pflanzen mindestens eine Blüte zeigten.

c) Die Acetylenreduktion ist ein Maß für die Stickstoffbindung.

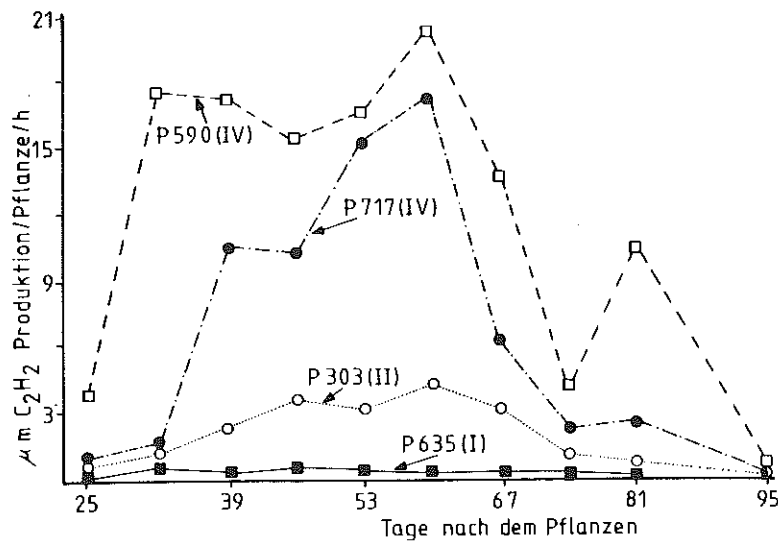


Abb. 4.6.f.: Saisonaler Verlauf der $N_2-(C_2H_2)$ -Reduktion von vier Sorten von *Phaseolus vulgaris* in Popayán, Kolumbien (GRAHAM und HALLIDAY 1977, zit. in GRAHAM 1981). Angaben in () bezeichnen den Wuchstyp (siehe oben bzw. Tab. 4.6.8.).

Bei diesen Versuchen zeigten (nur) kletternde "Stangen"-Bohnen, wie sie oftmals in traditionellen Anbausystemen mit Mais zu finden sind, N-Fixierungsraten, die denen anderer Körnerleguminosen in etwa entsprechen. (Ansonsten liegt die N-Bindung bei Phaseolus-Bohnen darunter.)

Die hier am Beispiel der Phaseolus-Bohnen dargestellten Sortenunterschiede bezüglich der Fähigkeit, Stickstoff zu binden, sind prinzipiell auch bei anderen Leguminosen zu vermuten (wenn auch vielleicht nicht immer in diesem Ausmaß).

Nach diesen Untersuchungen ließe bzw. läßt sich durch die Zucht und Selektion auf bessere Stickstoffbindung die Wettbewerbskraft von Körnerleguminosen erheblich verbessern.

Pflanzenschutzmittel: Bezüglich der Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf das Überleben und die Effektivität von Rhizobien liegen nur wenige Untersuchungen vor.

Nach GRAHAM et al. (1980) zeigen Phytohormone, Insektizide und Herbizide bei Anwendung in empfohlener Dosierung in der Regel nur leichte Schädigungen auf Rhizobien. In Versuchen von HAMDY und ALAA EL-DIN (1982) konnten negative Wirkungen z.B. bei Aretit, Linuron, Treflan und Cobex beobachtet werden. HUGUE (1981) konnte beobachten, daß die mehrjährige Anwendung des Herbizids Tribunil (im Getreidebau) die Anzahl anaerober Stickstoffbinder im Boden deutlich verminderte. Fungizide zeigen meist eine stärker toxische Wirkung auf die Rhizobien. In Versuchen von GRAHAM et al. (1980) z.B. führten PCNB, Thiram und Captan (in dieser Reihenfolge zunehmend) zu erhöhter Rhizobienmortalität. HAMDY und ALAA EL-DIN (1982) stellten nach Anwendung von Captan, Benlate und Vitavax geringere Nodulation und verminderte Stickstoffbindung fest.

Falls Fungizidbeizungen notwendig sind, sollten schwach toxische Produkte angewandt werden, und falls beimpft wird, sollte das Inokulum als Granulat getrennt ausgebracht werden (nicht kombiniert mit dem gebeizten Saatgut), wodurch sich die Schädigungen weitgehend vermeiden lassen.

Fruchtfolgen: Auf Standorten, wo öfters eine Leguminose in der Fruchtfolge steht, ist die Rhizobienpopulation höher als auf anderen Feldern. Je nach Ausdauer (Persistenz) der Rhizobien kann dieser Effekt mehr oder weniger lang wirken (ALEXANDER 1977). Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, daß sich die fördernde Wirkung eines Leguminosen-Fruchtfolgeglieds nicht nur auf die jeweils zum Wirt gehörige Rhizobienart, sondern auch auf andere Rhizobien erstreckt, die den jeweiligen Wirt gar nicht infizieren können (Tab. 4.6.9.).

Für den Ackerbau leitet sich daraus die Möglichkeit ab, das infektiöse Inokulum für eine bestimmte Leguminose durch den Anbau einer beliebigen, anderen Leguminose zu verbessern (z.B. für Soja durch vorherigen Anbau von Futterleguminosen). Auch Nicht-Leguminosen können das Inokulum fördern oder hemmen; zum letzten Punkt fehlen aber noch genaue Untersuchungen, um Empfehlungen für die Praxis aussprechen zu können (ROVIRA zit. in ALEXANDER 1977).

Tab. 4.6.9.: Vorkommen von *Rhizobium trifolii*¹⁾ in der Rhizosphäre verschiedener Leguminosen (TUZIMURA und WATANABE 1962, zit. in ALEXANDER 1977)

Pflanze	Rhizobien-Anzahl pro g Boden	
	in der Rhizosphäre	im freien Boden
Klee	1 900	900
Luzerne	700 000	4 200
Soja	5 500	3 200
Reis	190	32

1) *R. trifolii* kann nur Kleearten infizieren

Inokulation: Auf die künstliche Beimpfung von Leguminosen mit selektierten, effektiven, standort- und sortenangepaßten Rhizobiumstämmen wird hier bewußt nur am Rande eingegangen.

Zweifelsohne stellt diese Technologie eine Möglichkeit dar, die Effektivität der Symbiose beachtlich zu steigern; bei der Einführung neuer Leguminosen (Exoten) in eine Region ist die Beimpfung sogar meist eine unabdingbare Voraussetzung für deren erfolgreichen Anbau. Trotz jahrelanger Erfahrungen ist die Technologie aber nicht leicht zu handhaben, und Versuche mit künstlicher Inokulation zeigen bis heute noch sehr uneinheitliche Ergebnisse, wobei auch völlige Unwirksamkeit nicht selten ist.

Das liegt daran, daß sehr viele Faktoren und Interaktionen beachtet werden müssen, um eine Inokulation erfolgreich durchführen und empfehlen zu können (siehe hierzu z.B. AYANABA und DART 1977 und GRAHAM und HARRIS 1982).

Spezielle Bodeneigenschaften führen häufig dazu, daß eine erfolgreiche Kombination auf einem Standort A auf einem Standort B völlig versagt. Daneben gilt es, die Anpassung an bestimmte Klimaverhältnisse, an Mangelerscheinungen, jahreszeitliche Einflüsse, Fragen der Formulierung usw. zu beachten.

Tabelle 4.6.10. zeigt Ergebnisse künstlicher Inokulation zu Phaseolus-Bohnen, aus denen die Interaktionen von Standort, Rhizobiumstamm und Kulturpflanzensorte deutlich werden, um nur einige der wichtigsten Faktoren herauszugreifen.

Tab. 4.6.10.: Der Einfluß von Sorte, Standort und Rhizobiumstamm auf den Erfolg einer Inokulation bzw. den Ertrag von Phaseolus-Bohnen in kg/ha (CIAT-Jahresbericht Bohnen 1979, zit. in JOHN 1982) 1)

Rhizobium-Stamm Nr. (Inokulation bzw. Düngung)	Standort "Quilichao" 1000 m ü.M.	Standort "La Selva" 2200 m ü.M.
	Ertrag der Bohnensorte P 566 (kg/ha)	Ertrag der Bohnensorte P 590 (kg/ha)
45	932	2636
57	958	3073
140	901	2130
147	1075	3610
255	1095	2750
625	1060	3346
640	990	3590
676	1015	3060
839	922	3356
Kontrolle:	918	2300
100 kg Harnstoff/ha	1066	3886

1) Zunächst kann festgestellt werden, daß der Standort "La Selva" grundsätzlich ein höheres Ertragspotential für Phaseolus-Bohnen aufweist als der Standort "Quilichao", auf dem weder Düngung noch Inokulation mit unterschiedlichen Rhizobiumstämmen zu einer Ertragsverbesserung führte. Ganz anders sind die Verhältnisse auf dem Standort "La Selva", wo die Bohnensorte P 590 fast durchweg vor der Impfung mit Rhizobien profitierte, die den vorhandenen Rhizobiumarten (Kontrolle) fast immer deutlich überlegen waren. Gegenüber der Kontrolle konnten durch künstliche Beimpfung je nach Eignung der angewandten Rhizobiumstämmen stets deutliche Mehrerträge erzielt werden. Die erzielten Mehrerträge reichen bei den für die Sorte und den Standort geeignetsten Stämmen bis nahe an die Ertragswirkung einer Düngung mit 50 kg Stickstoff heran.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß eine genaue Kenntnis des Standorts, die Identifizierung und die Auswahl geeigneter Sorten und Rhizobienstämmen (und deren Verfügbarkeit) wichtige Voraussetzungen dafür darstellen, auf dem Weg über die künstliche Inokulation eine optimale Stickstoffbindung herbeizuführen.

Diese Voraussetzungen sind zumindest in kleinbäuerlichen Regionen der Tropen nicht gegeben und könnten (können) nur auf der Basis eines regio-

nal funktierenden (Feld-)Versuchswesens geschaffen werden, und ein solches ist nur in sehr wenigen Ländern und Regionen zu finden.¹⁾

Im kleinbäuerlichen Bereich kommt deshalb der Artenwahl, der Sortenwahl und den die Symbiose begünstigenden ackerbaulichen Maßnahmen (s.o.) die größere Bedeutung zur besseren Nutzung der Symbiose zu (siehe auch die Ausführungen von DÖBEREINER (1977) am Anfang des Kapitels.)

4.6.3.3. Weitere Formen der biologischen Stickstoffbindung

Tab. 4.6.11.: Ordnungen, Familien und Gattungen frei lebender, stickstoffbindender Bakterien (ODU 1977)

1. Eubacteriales	
Azotobacteriaceae:	Azotobacter, Beijerinckia, Derxia
Bacillaceae:	Bacillus, Clostridium
Enterobacteriaceae:	Klebsiella
Micrococcaceae:	Micrococcus
Rhizobiaceae:	Chromobacterium
2. Hyphomicrobiales	
Hyphomicrobiaceae:	Rhodomicrobium
3. Pseudomonadales	
Athiorhodaceae:	Rhodopseudomonas, Rhodospirillum
Chlorobacteriaceae:	Chlorobium
Pseudomonadaceae:	Azotomonas, Pseudomonas, Xanthomonas
Spirillaceae:	Desulphovibrio, Methanobacterium, Spirillum
Thiorhodaceae:	Chromatium

Die meisten frei lebenden N₂-fixierenden Bakterien sind heterotroph und entweder aerob, fakultativ aerob oder anaerob. Die anaeroben Bakterien verbrauchen mehr Energie zur Stickstoffbindung als die aeroben (luftliebenden), weil sie einen weniger effektiven Energie (ATP-)Stoffwechsel besitzen. Ihr Beitrag zur Stickstoffbindung in natürlichen Ökosystemen ist deshalb auch meist nur gering (NEVES 1982).

1) In Indien z.B. bemüht man sich seit Mitte der 70er Jahre, diese Voraussetzungen zu schaffen und hat schon 29 Zentren eingerichtet, die eine Anbaufläche von 600 000 ha betreuen (RANGASWAMI 1982).

Die aeroben Bakterien sind in ihrer Effektivität von der Sauerstoffkonzentration im Boden und der Verfügbarkeit leicht aufnehmbarer Kohlenstoffverbindungen abhängig. Ein Mangel an Energie (z.B. wenig Nährhumus oder Wurzelauausscheidungen im Boden) hemmt ihre Effektivität ebenso wie eine hohe Sauerstoffkonzentration im Boden. Die Versorgung mit leicht verfügbaren C-Körpern (leicht zersetzbarer Humus, Zucker, organische Säuren, Stärke etc.) und eine geringe Sauerstoffkonzentration (mäßige Bodendurchlüftung) fördern die Effektivität.

Azotobacter z.B. bindet deshalb auf überschwemmten Reisböden mehr Stickstoff als sonst, weil hier die Sauerstoffkonzentration geringer ist und vermehrt zelluloseabbauende, anaerobe Bakterien auftreten, deren Stoffwechselprodukte (organische Säuren) den frei lebenden Stickstoffbindern als leicht zugängliche Nahrung dienen.

Für Azospirillum-Arten, die in die inneren Wurzelabschnitte von Gräsern eindringen können, sind solche Bedingungen immer gegeben, weshalb diese beachtliche N-Mengen binden können.

In der Rhizosphäre (engste Schicht um die Wurzeln) der Pflanzen tritt durch die N-Aufnahme der Pflanzen zudem eine sehr geringe N-Konzentration auf, so daß die stickstoffbindenden Bakterien in diesem Medium gegenüber anderen Organismen besser um die energiereichen Wurzelauausscheidungen konkurrieren können.

Die N-Mengen, die von frei lebenden Bakterien gebunden werden, bewegen sich nach ODU (1977) in den humiden Tropen im Größenbereich von 20-50 kg/ha und Jahr. Das ist mehr als in gemäßigten Klimaten und kann auf die insgesamt günstigen ökologischen Bedingungen wie z.B. Wärme und die öfters relativ hohe Bodenfeuchte zurückgeführt werden.

Azotobacter beispielsweise ist bei einer relativ geringen Sauerstoffkonzentration von 0,04 atm O₂ ein dreimal effektiverer Energieverwerter wie bei 0,2 atm O₂, d.h. er wird durch eine relativ hohe Bodenfeuchte und durch geringe Bodendurchlüftung eher gefördert. Als weiterer, klimatisch begünstigter Faktor kann auch die hohe, mögliche Photosyntheseleistung der Pflanzen angesehen werden. Durch energiereiche Wurzelauausscheidungen oder durch den schnell verlaufenden Abbau energiereicher Pflanzenteile im Boden wird die Ernährung der N₂-fixierenden Bodenbakterien verbessert und damit ihre Aktivität gefördert.

Azotobacter ist ein frei lebender, weltweit vorkommender Stickstoffbinder, der sich optimal in schwach saurem bis alkalischem Boden entwickelt und durch leicht zersetzbare und energiereiche, organische Verbindungen im Boden stark gefördert wird, wie das z.B. durch die Einarbeitung von Zuckerrohrmelasse in Ackerböden gezeigt werden konnte. *Azotobacter* bildet keine Sporen; Temperaturen ab etwa 50° C führen zu seinem Absterben. Nach AHRENS (1961) kann das Auftreten von *Azotobacter chroococcum* durch Düngung mit verrotteten Misten und (Erd-)Komposten langfristig deutlich gefördert werden (+ 34 %); auch PK-Düngung wirkte förderlich (+ 94 %), während N-Düngung (40 kg/ha) und frische, organische Masse indifferent bzw. hemmend wirkten. Das Zusammentreffen von Stallmist bzw. organischer Masse und Staunässe (Methanbildung) wirkte sich negativ aus (ISHAC et al. 1982).

Durch die Beimpfung von Saatgut und/oder Boden mit *Azotobacter* lassen sich teilweise erhebliche Mehrerträge erzielen. HUSSAIN und MUHAMAD (1973) verbesserten die Maiserträge dadurch um 5 bis 15 %. PILLAYAR-SAMY et al. (1980) konnten durch Inokulation von Maniokstecklingen und Boden zwischen 5 und 30 % Mehrertrag erzielen. Der Ertragszuwachs bei Maniok entsprach einer N-Düngung von 37 kg/ha.

Die Bedeutung von *Azotobacter* liegt aber nicht nur in der N-Bindung, sondern die Bakterien produzieren auch wachstumsfördernde Substanzen (z.B. Gibberellinsäuren, Indolelessigsäure usw.), wodurch die Biomasseproduktion von Pflanzenbeständen verbessert werden kann. DEWAN und SUBBA-RAO (1979) z.B. konnten durch die Inokulation von Pflanzgut mit *A.chroococcum* und *Azospirillum brasilense* die Wurzelmassebildung von Reis deutlich verbessern.

Eine besonders effektive Assoziation von *A.paspali* und *Paspalum notatum* (ein wertvolles Weidegras) wurde von DÖBEREINER et al. (zit. in DÖBEREINER 1977) gefunden. Durch die spezifische Assoziation in der Rhizosphäre des Grases können bis zu maximal 90 kg/ha und Jahr Stickstoff gebunden werden (spätere Untersuchungen lagen nicht so hoch).

Auch bei vielen anderen Gräsern wurde in der Folgezeit Stickstoffbindung in der Wurzelzone festgestellt. So ist z.B. *Azospirillum* mit vielen Gräsern vergesellschaftet (Reis, Weizen, Gerste, Mais, Sorghum, *Pennisetum*, *Setaria* sp. usw.), wobei bei Mais, Sorghum, Reis und *Brachiaria* auch Stengelinfektionen, also ein tiefes Eindringen der Bakterien in die Pflanzen, beobachtet wurde. Diese Assoziationen können, besonders in den warmen

Tropen, durchaus einen bedeutenden Beitrag zur N-Ernährung der Gramineae liefern.

KAPULNIK et al. (1981) und OKON (1982) konnten bei zweijährigen Feldversuchen mit inokulierten Beständen von Mais, Sorghum, *Pennisetum miliaceum* und *Setaria italica* signifikante Mehrerträge (Korn- und Trockenmasse) erzielen. Der N-Ertrag von Mais und Sorghum konnte auf den Löß- und Rendzinaböden Israels (pH-Werte um 7,5) um 70 bis 80 kg/ha verbessert werden. Bestände, die mit 40 kg N gedüngt und inokuliert wurden, hatten gleich hohe Erträge wie die Bestände mit voller N-Düngung (80 bzw. 120 kg N/ha). Ähnliche Ergebnisse konnten SMITH et al. (1977) mit Perlhirse und *Panicum maximum* nach Inokulation mit *Spirillum lipoferum* erzielen.

Nach DÖBEREINER (1977) sind es vor allem die C₄-Gräser mit ihrer effektiven Wasser- und Lichtnutzung, die bezüglich der assoziativen N₂-Fixierung im Rhizosphärenbereich ein relativ hohes Potential besitzen, denn sie benötigen nur etwa 10 % der assimilierten Energie für die Stickstoffbindung.

BEUNARD und PICHOT (1980) verweisen in diesem Zusammenhang auf die Tatsache, daß Sorten auch bei dieser Form der N-Bindung ein unterschiedliches Verhalten zeigen. Sie ermittelten dies für die Assoziation von *Azospirillum brasilense* mit verschiedenen Reissorten und nehmen an, daß die Fähigkeit zur assoziativen Stickstoffbindung in alten Landsorten unbewußt selektiert wurde.

Versuche von OBLISAMI und UDHAYASURIAN (1982) konnten zeigen, daß *Azospirillum* auch ein beachtliches Potential bei Nicht-Gräsern besitzen kann. Sie beimpften 4 Arten von *Amaranthus* mit einer *Azospirillum*-Art, die sie bei Wurzeln von *Amaranthus dubius* isoliert hatten.

Durch die Saatgutbeimpfung konnten sie im Gefäßversuch stets höhere Grünmasseerträge (bis + 82 %) und höhere Kornerträge (+ 34 bis 48 %) erzielen. Die Ergebnisse der Feldversuche sind in Tabelle 4.6.12. dargestellt. N-Düngung zeigte in diesem Versuch durchweg gute Wirkung. Die Inokulation mit *Azospirillum* steigerte die Erträge bis zu einem Düngungsniveau von 50 kg N/ha deutlich. Die Erträge mit 50 kg N und Inokulation entsprachen den Erträgen mit 75 kg N/ha; insgesamt eine beachtliche N-Ersparnis von 25 kg/ha.

Tab. 4.6.12.: Wirkungen der Beimpfung mit *Azospirillum* sp. auf den Korn-
ertrag (g/m^2) von Amaranthusarten bei verschiedener N-
Düngung (OBLISAMI und UDHAYASURIAN 1982)

Behandlung	Amaranthusart				Mittel
	A.dubius	A.gangeticus	A.leucocarpus	A.edulis	
N_0I_0	18,2	104,0	180,0	130,0	108,05
N_0I_1	23,2	122,0	204,0	144,0	123,30
N_{25}I_0	30,4	144,0	218,0	180,0	143,10
N_{25}I_1	51,8	176,0	260,0	196,0	170,95
N_{50}I_0	44,6	208,0	264,0	236,0	188,15
N_{50}I_1	57,2	252,0	340,0	396,0	236,30
N_{75}I_0	55,0	256,0	334,0	288,0	237,25
N_{75}I_1	56,8	264,0	322,0	300,0	235,25
Mittel	42,15	190,75	265,25	221,26 ¹⁾	

1) Unterschiede, die auf Arten, Inokulation und N-Düngung und auf der Interaktion der Sorten mit den Behandlungen beruhen, waren alle signifikant bei $P = 0,001$

Aktinomyzeten (Frankia) dringen ähnlich den Rhizobien in die äußeren Wurzelschichten ein und bewirken ebenfalls spezielle Gewebewucherungen, die zu knöllchenähnlichen Gebilden führen. Aktinomyzeten finden sich bei den Pflanzenfamilien der Rosaceae (z.B. Dryas), Betulaceae (z.B. Alnus), Ramnaceae und Ericaceae (z.B. Acrostaphylos), also ausschließlich bei verholzenden Pflanzen, als Wurzelsymbionten.

Die N-Mengen, die durch die Symbiose mit *Frankia* sp. gebunden werden, erreichen durchaus die Werte von Leguminosenbäumen. So berichtet DOMMERCUES (1982), daß *Casuarina equisetifolia*, die in ariden Gebieten als Wind-, Erosionsschutz-, Futter-, Brennholz- und Landverbesserungspflanze angebaut wird, 58 kg N/ha und Jahr binden kann und *Clitoralis* (Feuchttropen) in Beständen bis 218 kg N/ha und Jahr fixiert. (Aus Australien werden von TORREY (1982) sogar Werte von 290 kg/ha und Jahr berichtet.) In Neu-Guinea werden *Casuarina*-Arten deshalb traditionell genutzt, um Brachflächen zu bepflanzen. Die Regeneration der Flächen wird durch die N-Bindung beschleunigt, und nach etwa 10 bis 15 Jahren fällt zudem wertvolles Holz an (TORREY 1982).

In Süd- und Mittelamerika ist die Symbiose bei Erlen (z.B. *Alnus acuminata*) bedeutend, die ein gutes Nutholz liefern (COMBE 1981).

Die Symbiose ist bei vielen Pflanzen noch nicht oder nur wenig untersucht, dürfte aber vor allem für agroforstliche Systeme zunehmend an Bedeutung gewinnen. (*Casuarina*-Arten z.B. finden sich in allen Klimazonen der Tropen.) Dabei muß die Inokulation oder Beimpfung neuer Pflanzungen mit den Aktinomyzeten nicht kompliziert sein. Nach DOMMERCUES (1982) hat sich bei Aufforstungsprogrammen im Senegal eine simple Methode als erfolgreich erwiesen, wobei einfach eine gemahlene Suspension der Knöllchen in die Anzuchtbeete gegeben wurde.

Blau-grüne Algen (Blualgen) sind autotrophe Organismen, die ebenfalls Stickstoff binden können. Die blau-grünen Algen (mehrere Arten wie z.B. *Anabaena* und *Nostoc*) haben eine grünlich-braune Färbung, sind schleimig und finden sich häufig auf stehenden Gewässern. Zum Teil sind sie auch mit höheren Pflanzen (z.B. mit Bäumen tropischer Feuchtwälder) vergesellschaftet und können dann für den Nährstoffhaushalt solcher Ökosysteme sehr bedeutend sein (RUINEN 1959, BERGERSEN, zit. in DAY und WITTY 1977).

Wenn sich die Algen im Boden zersetzen, kommt der Stickstoff anderen Pflanzen zugute. In Reisfeldern können damit durch das Wachstum von blau-grünen Algen etwa 20-50 kg N/ha und Anbauzyklus fixiert bzw. an Dünger eingespart werden (FAO o.J.).

Da die Algen in vielen Reisfeldern noch nicht oder nicht mehr vorhanden sind (in Indien z.B. nach DAY und WITTY (1977) nur in etwa 2/3 der Felder), stellt die Beimpfung mit blau-grünen Algen ein weithin ungenutztes Potential zur Stickstoffersparnis bzw. zur Ertragssteigerung dar.

Dazu sollte man sich zunächst von einer Forschungseinrichtung oder im Handel effektive Algenkulturen besorgen (auch bei N-fixierenden Algen gibt es große Unterschiede). Sie lassen sich getrocknet leicht transportieren und lagern.

Streut man 15 kg/ha davon aus und wiederholt diese Maßnahme (jeweils etwa eine Woche nach dem Umpflanzen des Reises) auch in den folgenden Reiskulturen noch zweimal, dann haben sich die Algen meist etabliert und sind dann, auch ohne weitere Beimpfung, von dauerhaftem Nutzen für die Felder.

Blau-grüne Algen können aber auch zur Herstellung von Biodüngern verwendet werden. Dazu nimmt man z.B. Schalen, flache Wannen oder mit Polyäthylen abgedichtete Rahmen von 1 x 2 x 0,2 m. In diese werden sodann 8 bis 10 kg Boden und 200 g Superphosphat gegeben, und das Ganze wird mit 5 bis 10 cm Wasser überstaut (wenn der Boden sehr sauer ist, noch 100 g Kalk).

Nun streut man 150 bis 200 g getrocknete Algen hinein und läßt die Schale in der Sonne stehen (evtl. muß das Wasser von Zeit zu Zeit ergänzt werden). Nach 1 bis 2 Wochen hat sich auf dem Wasser eine dicke Schwimmatte von Algen gebildet, die man nach dem Austrocknenlassen der Schalen entfernt und in Säcken bis zum Gebrauch lagern kann.

Ebenso kann mit größeren Einheiten und entsprechend höheren Aufwendungen verfahren werden, z.B. indem man flache Gruben aushebt, sie mit Folie auslegt und beimpft (FAO o.J.). (Weitere Angaben siehe Kapitel Gründüngung.)

LITERATURNACHWEIS

- ACHTNICH, W. (1981): Bewässerungslandbau (Schwerpunkt: Trockengebietslandwirtschaft). Entwicklung und ländlicher Raum 15 (1): 10-14
- ACLAND, J.D. (1971): East African Crops: An introduction to the production of field and plantation crops in Kenya, Tanzania and Uganda. London, Longmans, Green & Co., 252 p.
- AGBOOLA, A.A. and FAYEMI, A.A.A. (1972): Fixation and excretion of nitrogen by tropical legumes. *Agronomy Journal* 64 (4): 409-412
- AGBOOLA, A.A. and FAYEMI, A.A.A. (1972a): Effect of soil management on corn yield and soil nutrients in the rain forest zone of Western Nigeria. *Agronomy Journal* 64 (5): 641-644
- AGBOOLA, A.A. and COREY, R.B. (1973): The relationship between soil pH, organic matter, available phosphorus, exchangeable potassium, calcium, magnesium, and nine elements in the maize tissue. *Soil Science* 115 (5): 367-375
- AGBOOLA, A.A. (1975): Problems of improving soil fertility by the use of green manuring in the tropical farming system. *FAO Soils Bulletin No. 27*: 147-164
- AGBOOLA, A.A., OBIGBESAN, G.O. and FAYEMI, A.A.A. (1975): Interrelations between organic and mineral fertilizers in the tropical rainforest of Western Nigeria. *FAO Soils Bulletin No. 27*: 337-351
- AGBOOLA, A.A. (1981): The effects of different soil tillage and management practices on the physical and chemical properties of soil and maize yield in a rainforest zone of Western Nigeria. *Agronomy Journal* 73 (2): 247-251
- AHRENS, E. (1961): Der Einfluss organischer und mineralischer Dünger auf das Verhalten von Azotobakter und die Möglichkeiten seines quantitativen Nachweises. Dissertation, Universität Giessen
- AKOBUNDU, I.O. (1980): Live mulch: a new approach to weed control and crop production in the tropics. *Proceedings of the 1980 British Crop Protection Conference. Weeds* 2: 377-382
- ALEXANDER, M. (1977): Ecology of nitrogen-fixing organisms in: AYANABA and DART (1977): 99-114
- ALFEREZ, A. et ESPINOSA, F.M. (1966): Influencia de la aplicación de mantillo derivado de varias fuentes en el cultivo del cafeto. *Agric. en El Salvador* 7: 75-87