

Wandlungen in einigen Problemen der Bodenmikrobiologie

Die Folgen von mikrobiologischen Prozessen *) sind der Menschheit seit Jahrtausenden bekannt. So wußten die Römer, daß eine Erhöhung der Fruchtbarkeit des Bodens eintrat, wenn Leguminosen angebaut wurden. Demgegenüber ist die Mikrobiologie als Wissenschaft sehr jungen Datums. Sie konnte sich erst entwickeln, als die technischen Voraussetzungen gegeben waren, vor allem ermöglichte die Erfindung des Mikroskops grundlegende Arbeiten auf mikrobiologischem Gebiet. Trotzdem ging die Entwicklung zunächst sehr langsam vor sich. Verschiedene Widerstände mußten überwunden werden, neue Vorstellungen mußten dem Menschen nahegebracht werden.

Die meisten Mikroorganismen des Bodens können nur leben, wenn ihnen Nährstoffe und Energie in Gestalt von organischen Stoffen zur Verfügung stehen. Ihre Leistung besteht darin, durch Beseitigung der organischen Reste das Leben auf der Erde zu ermöglichen. Bereits ein LOUIS PASTEUR wies darauf hin, daß die Erde ein Leichenfeld wäre, wenn die unverwertbaren organischen Stoffe nicht beseitigt würden. Dem Bestreben der Natur, ständig neue Organismen zu schaffen, steht der Abbau der Lebensreste gegenüber, und damit wird der Kreislauf der organischen Substanz geschlossen. Sowohl ästhetische als auch hygienische Gründe zwingen den Menschen, diesen Kreislauf zu lenken. Um das zu können, muß er ihn kennen.

Im Jahre 1839 betont JUSTUS VON LIEBIG in den *Annalen der Pharmazie* die Bedeutung des Sauerstoffs für den Ablauf der Zersetzungsprozesse. Er war der Meinung, daß Blut und Pflanzensäfte nicht mit Luft zusammengebracht werden können, ohne daß ihre Beschaffenheit sich ändert. Der Sauerstoff der Luft werde absorbiert, es beginne eine Zersetzung der organischen Substanz. Nach seiner Auffassung bewirkt ein Ferment die Umwandlung des Sauerstoffs der umgebenden Luft in Kohlensäure. Aus den Versuchen von APERT wußte er jedoch, daß Speisen und andere Stoffe, in einem hermetisch geschlossenen Gefäß zur Siedehitze des Wassers erwärmt, sich unverändert aufbewahren lassen. Bei dieser Temperatur, die einen Abbau nicht zuläßt, gehe der Sauerstoff der eingeschlossenen Luft eine Verbindung ein. Wird das Gefäß aber nach der Abkühlung geöffnet, so bewirke die eintretende Luft einen mehr oder weniger raschen Abbau.

Zeitgenössische Forscher wiesen bei mikroskopischen Studien Gebilde nach, deren Zugehörigkeit zum Reich der Mikroorganismen heute außer Zweifel steht. Auch von ihnen wurden sie als solche angesprochen und ihre Aktivität als Ursache des Abbaus betrachtet. JUSTUS VON LIEBIG aber bekämpfte diese Auffassung mit der ganzen

*) Vortrag anlässlich der Rektoratsübernahme am 22. November 1963.

Wucht seiner Autorität und behauptete, daß diese Ansicht in sich selbst zerfalle, wenn man erwäge, daß mit dem Verschwinden der in Zersetzung begriffenen Substanz diese Tiere sterben, daß nach ihrem Tode eine Ursache vorhanden sein muß, welche die Bestandteile der Organismen zu festen und gasförmigen neuen Produkten umsetzt. Diese letzte Ursache sei dann doch ein chemischer Prozeß. Wenn wir uns denken, sagt er an anderer Stelle, daß die Zwischenprodukte, die bei dem Übergang in anorganische Verbindungen gebildet werden, die Fähigkeit besitzen, das Leben gewisser niederer Tier- und Pflanzenklassen zu unterhalten, so bleibt nur die Art und Weise dunkel, wie die Keime der Pilze an die Orte gelangen, welche sich zu ihrer Entwicklung eignen. Diese Organismen betrachtet er also nicht als Ursache des Abbaus, da sie nach ihrem Tode die nämlichen Veränderungen erleiden, die zuletzt ihr völliges Verschwinden bewirken. Die Erklärung, daß die mikroskopisch nachweisbaren Organismen hiermit überhaupt in ursächlichem Zusammenhang stehen, lehnte er als unwissenschaftlich ab. In seiner Abhandlung *Bemerkungen über das Verhältnis der Tier-Chemie zur Tier-Physiologie* vom Jahre 1848 vergleicht er die biologische Erklärung des Abbaus der organischen Substanz mit dem Glauben eines Kindes, daß der Rheinstrom von Basel zur Nordsee durch die Räder der vielen Rheinmühlen bei Mainz bedingt sei. Man solle doch endlich zu der Einsicht kommen, daß man „Ursachen“ auch mit den Mikroskopen nicht sehen könne, so schreibt er 1870.

Es muß zugegeben werden, daß JUSTUS VON LIEBIG damit die Entwicklung der Mikrobiologie entscheidend gehemmt hat. Bedeutung und Größe dieses Mannes werden dadurch keineswegs geschmälert. Seine Forschungen auf chemischem Gebiet haben den Grund gelegt zu den biochemischen Arbeiten des vergangenen Jahrhunderts, und mehrmals hat er im Laufe seiner Tätigkeit auf dem Gebiet der Düngung erkennen müssen: „Errare humanum est.“

Die ersten Arbeiten über Zahl und Art der Bodenbakterien veröffentlichte 1881 der Arzt ROBERT KOCH. Die Einführung fester Nährböden ermöglichte die grundlegenden bodenbiologischen Forschungen, die damals in allen Kulturstaaten einsetzen. In dieser ersten Epoche ging es Männern wie BERTHELOT, SCHLÖSING, MÜNTZ, BELJERINCK und anderen zunächst darum, einzelne Organismen und deren Leistung in biochemischer Hinsicht zu studieren. Wir erkennen heute, daß damit Einzelvorgänge aus dem Gesamtgeschehen herausgelöst wurden, und versuchen nun, das Zusammenwirken der Kräfte zu erfassen.

Besondere Beachtung wurde naturgemäß der Bindung des atmosphärischen Stickstoffs geschenkt. Sowohl die in Symbiose lebenden Rhizobien als auch ohne höhere Pflanzen frei im Boden wirkende Organismen können den Böden nicht unwesentliche Mengen dieses Nährstoffes zuführen.

LIEBIG hatte auch bei diesem Vorgang die Mitwirkung von Mikroorganismen bestritten. Doch die Zahl der Versuche, die beim Vergleich von Leguminosenkulturen in sterilen und natürlichen Böden

nach der Impfung Knöllchenbildung und eindeutige Stickstoffgewinne in letzteren erkennen ließen, mehrte sich, und im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts führte die Forschung über die Symbiose von *Rhizobium radicicola* mit Leguminosen zu ersten Versuchen einer gezielten Impfung der höheren Pflanze.

Man hat erkannt, daß die Rhizobien artspezifisch wirken und daß nur wenige Arten sich untereinander vertreten können. Sobald eine Pflanze, wie etwa *Soja hispida*, erstmalig angepflanzt wird, ist eine Zuführung von Symbionten unerläßlich. Hat ein Boden jedoch schon eine Pflanzenart früher getragen, siedeln sich die Rhizobien spontan an den Pflanzenwurzeln an, da sie längere Zeitspannen im Boden auch ohne Wirtspflanze überleben. Es hat sich jedoch gezeigt, daß eine optimale Infektion häufig nicht erreicht wird, weil

1. die Rhizobien im Boden durch Rhizophagen vernichtet werden oder
2. seitens der Pflanze die erforderliche Infektionsbereitschaft fehlt, wofür z. B. Mangel an Spurenelementen verantwortlich sein kann, oder
3. unter den Rhizobien im Boden Degenerationserscheinungen auftreten und unwirksame Stämme entstehen.

Das Vorkommen unwirksamer Stämme wird weithin unterschätzt. Doch erwiesen sich nach Untersuchungen in England von 463 Stämmen, die aus Böden verschiedener Bezirke des Landes isoliert worden waren, etwa ein Drittel als unwirksam. Die Wirksamkeit kann weder durch morphologische noch durch serologische Prüfungen nachgewiesen werden, sie zeigt sich nur im Pflanzenversuch.

VIRTANEN, der Ehrendoktor unserer landwirtschaftlichen Fakultät, konnte nachweisen, daß sich die Knöllchen bei Infektion mit wirksamen Stämmen durch einen hohen Gehalt an einem hämoglobinähnlichen Ferment, dem Leghaemoglobin, auszeichnen. Inzwischen wurde die Berechtigung dieser Bezeichnung dadurch bewiesen, daß ein Zusatz von Menschenblut-Haemoglobin zum Nährboden zu einer Bildung der aktiven Y-Formen und zu Stickstoffbindung führt.

Bei der starken Verbreitung unwirksamer Stämme liegt es nahe, dem Boden wirksame Stämme zuzuführen. Tatsächlich bewirkten Impfungen in Schweden bei 99% der 318 Versuche mit Luzerne und bei 98% der 873 Versuche mit Klee Ertragssteigerungen um etwa 50%. In Ontario und in Staaten des Mittelwestens der USA stiegen die Erträge um 100% an, ähnlich in Belgien. Dabei belief sich die durch Leguminosen gebundene Menge an atmosphärischem Stickstoff auf 400 kg/ha. Leider wird in der Bundesrepublik von der Saatgutimpfung z. Z. kaum Gebrauch gemacht.

Neben den Rhizobien sind auch frei im Boden lebende Mikroorganismen befähigt, den atmosphärischen Stickstoff zu verwerten. Im Jahre 1901 isolierte der Holländer BELJERINCK das *Azotobacter chroococcum*. Lange Jahre hindurch schien es, als ob nur einer kleinen Gruppe von aeroben und anaeroben Bakterien bzw. einigen Algen die Fähigkeit der Stickstoffbindung zuzuschreiben sei, indessen meh-

ren sich die Anzeichen dafür, daß sie einer größeren Anzahl von Arten eigen ist. Gesicherte Nachweise liegen vor für die heterotrophen Organismen *Clostridium*, *Azotobacter* und *Azotomonas*, bei den autotrophen Bakterien für *Rhodospirillum* und *Chromatium* und für die autotrophen blaugrünen Algen *Nostoc*, *Anabaena* und *Cylindrospermum*. Durch Verwendung von Isotopen wurde der Nachweis der Stickstoffbindung vereinfacht und gesichert. Um ein Urteil über die ökonomische Bedeutung der Stickstoffbindung zu erarbeiten, beschritt man zunächst den Weg rein theoretischer Berechnungen. Ausgedehnte ökologische Untersuchungen zeigten jedoch, daß von einer gleichmäßigen Verbreitung der Organismen in den einzelnen Bodenarten keine Rede sein kann. Unter den für die Organismen optimalen Bedingungen kann ein Stickstoffgewinn bis zu 50 kg/ha erzielt werden; das ist jedoch nur möglich, wenn Makro-Nährstoffe, besonders P_2O_5 , und Mikronährstoffe — unter den letzteren vor allem Molybdän — sowie die erforderlichen Kohlenstoffmengen vorhanden sind. Frühzeitig tauchte daher der Gedanke auf, die Stickstoffbindung durch Impfen von Saatgut oder Boden zu verstärken.

Vor allem wird in der sowjetischen Literatur von guten Erfolgen berichtet. Die angegebenen relativen Mehrerträge verlieren jedoch an Bedeutung, wenn die niedrigen Realerträge berücksichtigt werden. Leider konnten die Erfolge weder in Westeuropa noch in Nordamerika bestätigt werden. Mit Sicherheit ist zu sagen, daß Erfolge nur dann erzielt werden, wenn die Umweltbedingungen, besonders die Wasserstoffkonzentration, den Organismen vor oder bei der Einimpfung angepaßt werden. Leider wird die Verstärkung der biologischen Stickstoffbindung durch mineralische Stickstoffdüngemittel, ohne die das bisherige hohe Niveau der Erträge der westlichen Hemisphäre nicht gehalten werden kann, eingeschränkt bzw. unmöglich gemacht. Die gleiche Wirkung hat auch ein primär hoher Stickstoffgehalt des Bodens.

Die Fähigkeit der Mikroorganismen, elementaren Stickstoff zu verwerten, wurde von dem Inder DHAR zwar nicht bestritten, er zog aber aus seinen Versuchen die Schlußfolgerung, daß auch in sterilen Böden eine Stickstoffbindung auf photochemischem Wege möglich sei. Die bisherigen, allerdings unter den Bedingungen des schwedischen Klimas von BJÄLFVE erfolgten Nachprüfungen konnten diese Theorie nicht bestätigen.

Dem Vorgang der biologischen Stickstoffbindung steht die Stickstoffentbindung durch Denitrifikation gegenüber; dabei entweicht der Stickstoff in Gasform. Bakterien, die diesen Prozeß auslösen, sind außerordentlich weit verbreitet, und um die Jahrhundertwende glaubte man, daß der Landwirtschaft durch diesen Prozeß hohe Verluste an dem für die Ertragsbildung so wichtigen Stickstoff zugefügt würden. Auf verschiedenen Wegen, vor allem aber mit Hilfe von markiertem Stickstoff, gelang es, den Vorgang zu klären. Man stellte fest, daß zunächst Stickoxyd (NO), dann Distickstoffoxyd (N_2O) und schließlich elementarer Stickstoff entweicht, vor allem aber, daß Denitrifikation nur unter streng anaeroben Verhältnissen, also erst bei

Überflutungen, zustande kommt, bei Verhältnissen, die mit Ausnahme von Einzelfällen nur bei der Düngung von Reiskulturen praktische Bedeutung erhalten.

Neben dem Stickstoffkreislauf gilt das Interesse der Mikrobiologie des Bodens den Umsetzungen der organischen Substanz, vor allem dem Kreislauf des Kohlenstoffs. Ein Endprodukt der Mineralisation aller organischen Stoffe ist das Kohlendioxyd. Umfang und Intensität der CO₂-Bildung im Boden ist schon in den Anfängen bodenbiologischer Forschungen als Maßstab für die Aktivität der Kleinlebewesen benützt worden und wird es auch heute noch. Dagegen mußte die Auffassung, daß das Kohlendioxyd, seiner Wirkung im gärenden Brotteig vergleichbar, zu einem aufgelockerten, garen Boden führt, aufgegeben werden. Demgegenüber wurde gezeigt, daß an der Bildung der Bodenkrümel, die einen Bestandteil der Gare darstellen, die Kleinlebewelt in hohem Maße mitwirkt. Einmal geschieht das durch lebende Brücken oder auch Hüllen, die besonders von Schimmelpilzen gebildet werden, und zum anderen durch Schleimstoffe, die vor allem Bakterien ausscheiden und organische und mineralische Bodenbestandteile zu Krümeln verkitten. Die Produktion solcher strukturbildenden Elemente und die Festigkeit der Bindung sind Funktionen des Wassergehalts des Bodens, und zwar steigt mit zunehmender Feuchtigkeit die Menge dieser Elemente, aber gleichzeitig sinkt ihre Bindekraft.

Die biologische Krümelbildung ist ferner abhängig von der organischen Substanz, die als Energielieferant zur Verfügung steht. Da deren vollständiger Abbau lediglich eine Frage der Zeit ist, muß für ständigen Ersatz gesorgt werden. Es ist durchaus verständlich, daß bei der Kultivierung amerikanischer und russischer Steppenböden der Humusgehalt stark zurückging und daß sich erst nach einigen Jahrzehnten ein neues Gleichgewicht einstellte. Nur durch regelmäßige Zufuhr organischer Substanz kann die Bodengare erhalten werden, denn die strukturbildenden Elemente sind ihrerseits wieder dem Angriff von Mikroben ausgesetzt. Man hat versucht, den Garezustand des Bodens durch synthetische Stabilisierungsmittel, die biologisch weit schwerer angreifbar sind, zu erhalten. Da sie aber gleichzeitig eine bessere Belüftung des Bodens bewirken, fördern sie sekundär auch die biologische Krümelbildung und damit den Abbau der organischen Substanz.

Stalldünger und Kompost sorgen seit Jahrtausenden für ihren Ersatz. Doch mit dem Rückgang der Viehhaltung ging die Menge des Stalldüngers zurück. Von Stroh war bekannt, daß es durch Stickstoffassimilation die Erträge mindert. Heute ist man sich klar darüber, daß bei rechtzeitigem Einbringen und ausreichender Stickstoffdüngung die schädliche Wirkung vermieden werden kann.

Außerdem werden mit zunehmender Verstädterung immer mehr Nährstoffe dem natürlichen Kreislauf entzogen. Die Städte andererseits ersticken in Müll und Klärschlamm. Die Verwertung der städtischen Abfälle könnte die im Landbau entstehende Lücke schließen, allerdings nur nach sorgfältiger Kompostierung.

Die ständig intensiviertere Verpackung aller Gegenstände des Handels ließ die in der Bundesrepublik anfallende Menge an Müll innerhalb kurzer Zeit auf etwa 20 000 000 t pro Jahr ansteigen. Dazu kommen wachsende Mengen an Klär- und Faulschlamm. Geeignete Lagerflächen fehlen. Ästhetische und hygienische Gesichtspunkte fordern gebieterisch eine rasche Lösung des Problems der Umwandlung dieser Stoffe in eine für die Landwirtschaft verwertbare Form.

Ähnlich wie bei der Behandlung städtischer Abwässer müssen die technischen Fragen mit den biologischen koordiniert und erforscht werden. Da die in den städtischen Kläranlagen anfallenden Schlammengen pathogene Mikroorganismen in konzentrierter Form enthalten, können die auftauchenden Probleme nicht allein von der landwirtschaftlichen Mikrobiologie gelöst werden, sondern setzen zunächst die Mitarbeit des Human- und Veterinärhygienikers, des Parasitologen und des Phytopathologen voraus. An der Justus Liebig-Universität hat sich im Laufe der letzten Jahre eine Arbeitsgemeinschaft von 7 Instituten aus 3 Fakultäten gebildet, deren Ergebnisse beweisen, daß, wenn durch eine gezielte Selbsterhitzung eine Temperatur von 55° C erreicht wird und diese 14 Tage einwirkt, selbst pathogene Sporenbildner durch diese Pasteurisierung vernichtet werden können, so daß der Landwirtschaft und dem Gartenbau ein hygienisch einwandfreies Produkt zur Verfügung gestellt werden kann.

Diese Arbeiten sind aber noch keineswegs abgeschlossen, da wir hinsichtlich der Sanierung unserer Gewässer noch am Anfang stehen, und außerdem ist der Anfall von Abwasser und Klärschlamm in ständigem Anstieg begriffen, und die in ihm enthaltenen organischen Stoffe sollten landwirtschaftlich genutzt werden, ohne die Gesundheit von Pflanze, Tier und Mensch zu gefährden.

Man hat bisweilen von gesunden und kranken Böden gesprochen, den Boden also als ein Lebewesen angesehen. Das würde voraussetzen, daß die Mikroorganismengruppen und -arten im Boden in einer Symbiose leben, daß sie gleichsam als Organe dieses Lebewesens wirken. Tatsächlich aber handelt es sich um ein belebtes System, in dem das Zusammenwirken der einzelnen Gruppen wohl zum Teil den Gesetzen der Symbiose unterliegen kann, ebenso wohl aber auch denen der Antibiose oder Metabiose.

Vor 40 Jahren berechnete mein Lehrer, Prof. LÖHNIS, die belebte Masse des Bodens mit etwa 500 kg je ha, ausgehend von einer Zahl von 5 000 000 bis 50 000 000 Keimen je 1 g Boden. Die obere Grenze entspräche etwa der Bevölkerungszahl der Bundesrepublik. Heute wissen wir, daß in einem Gramm Boden einige Milliarden Mikroorganismen und Kleintiere leben, mit einer Masse von 25 000 kg je ha. Unter dem Einfluß der klimatischen Faktoren Wasser, Sauerstoff und Temperatur bildet sich in einem bestimmten Boden ein mikrobielles Gleichgewicht, das von dem Verhältnis abhängt, in dem diese Faktoren zueinander stehen.

Temperaturschwankungen beeinflussen zudem die Aktivität der Organismen. Dabei gilt auch für diese Beziehungen das VAN'T HOFF-

sche Gesetz. Eine Temperatursteigerung um 10°C kann die Reaktionsgeschwindigkeit verdoppeln oder gar verdreifachen. Freilich liegen Minima und Maxima bei verschiedenen Vorgängen in verschiedenen Temperaturbereichen. Leider sind unsere Kenntnisse auf diesem Gebiet noch sehr unbefriedigend. Andererseits müssen wir uns dringend mit diesen Problemen befassen, um bei den Arbeiten auf dem Gebiet der tropischen und subtropischen Landwirtschaft Fragen z. B. des Ersatzes der organischen Substanz oder des Stickstoffkreislaufs in rechter Weise beantworten zu können.

Zufuhr von organischen Düngemitteln und das Einarbeiten von Ernterückständen führen zu einer Störung des Gleichgewichts im Boden, ausgehend von den Reaktionszentren, die durch die heterogene Beschaffenheit des Materials gegeben sind. Sehr viel kleinere Mikrostandorte werden durch die Mineraldüngung ausgelöst. Hier kommt es zu vorübergehenden Hemmungen, entweder durch die Erhöhung der Salzkonzentration oder durch Mikrobengifte, etwa Cyan-Verbindungen. Nach kurzer Zeit jedoch wird die Hemmung durch Förderung abgelöst. Gelegentlich wird die Befürchtung geäußert, daß die Mineraldüngung das Bodenleben schädige. Es hat sich jedoch gezeigt, daß das erst bei Konzentrationen der Fall ist, die weit über den in der Landwirtschaft üblichen Gaben liegen.

Sehr wesentlich wird das Leben im Boden von seinem Wassergehalt beeinflußt. Intensive Befeuchtung, besonders nach längerer Trockenheit, aktiviert die Organismen. So bewirkt z. B. der Eintritt der Regenzeit in tropischen Böden eine Intensivierung besonders der Nitratbildung. Bei sinkendem Wassergehalt werden die besonders hydrophilen Bakterien durch die anspruchsloseren Actinomyceten und Schimmelpilze verdrängt. Es kommt zu einer Anreicherung von Stoffwechselprodukten dieser Gruppen, zu denen Arten der Gattung *Streptomyces* und *Penicillium* gehören, die antibiotische Substanzen zu bilden vermögen. Diese Stoffe wirken bekanntlich gegen bestimmte Arten hemmend oder abtötend, und sobald ihre Menge einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, können solche Arten ausgeschaltet werden. Es hat sich jedoch gezeigt, daß dieser Veränderung keine wesentliche Bedeutung beizumessen ist, da diese Stoffwechselprodukte im Boden nur eine geringe Haltbarkeit besitzen und durch andere Mikrobenarten abgebaut werden. Großes Interesse ist ihnen vor allem von seiten der Medizin entgegengebracht worden, und die moderne Therapie verdankt den Arbeiten über Antibiotica große Erfolge.

Über die gegenseitige Förderung dagegen liegen noch relativ wenig gesicherte Ergebnisse vor, und es ist notwendig, daß ihr in Zukunft die gleiche Beachtung geschenkt wird. Es handelt sich z. B. um Vitamine, die im Boden in großer Zahl vorkommen. Ihre Existenz ist auf vitaminhaltige pflanzliche und tierische Rückstände, die Ausscheidungen lebender Pflanzen und die Synthese durch Mikroorganismen zurückzuführen. Grundlegende Erkenntnisse auf diesem Gebiet sind in den letzten Jahren vor allem den Arbeiten von LOCHHEAD, dem Ehrendoktor unserer Landwirtschaftlichen Fakultät, zu verdanken.

In kanadischen Böden waren z. B. 70% der in Kulturböden und 84% der in Naturböden vorkommenden Bakterien in der Lage, Vitamin B₁₂ zu synthetisieren. Demgegenüber benötigten 27% aller isolierten Bakterien ein oder mehrere Vitamine zu ihrer Entwicklung. Bei Thiamin, Biotin und Vitamin B₁₂ herrschten Organismen vor, die nur ein Vitamin benötigen, bei allen anderen waren mehrere Vitamine erforderlich. Bisher war das nur bei Milchsäurebakterien bekannt. Die Vitaminverarbeitung der Organismen ist *in vitro* nachweisbar, sie kann aber auch daraus geschlossen werden, daß diese Stoffe in sterilen Böden erhalten bleiben, während sie verschwinden, sobald vitaminbedürftige Arten eingepflanzt werden. Es hat sich weiterhin gezeigt, daß neben den bereits bekannten Vitaminen im Boden noch andere Förderstoffe vorkommen, wie z. B. der von LOCHHEAD nachgewiesene Terregens-Faktor.

Sehr wesentlich wird das Gleichgewicht der Mikroflora des Bodens von der höheren Pflanze beeinflußt, deren Wachstum belebend auf die Mikroflora wirkt. Der Ausgangspunkt der mikrobiellen Belebung ist die Wurzel. Anfang dieses Jahrhunderts beobachtete HILTNER als erster die Ausbildung einer Rhizosphäre. Im mikroskopischen Bild kann man Mikrobennäntel beobachten, die eine Stärke bis zu 5 mm erreichen. Den stärksten Einfluß üben die Wurzelhaare aus. Mit zunehmendem Alter der Wurzel nimmt die Intensität ab, entsprechend dem Rückgang der Menge der ausgeschiedenen Aminosäuren und anderer Stoffe. Maximale Dichten treten während der Bestockungs- und Blühphase auf. Zwischen der Intensität des Pflanzenwachstums und der Besiedlungsdichte der Rhizosphäre besteht eine direkte Beziehung.

Monokulturen führen zu der Entwicklung einer artspezifischen Mikroflora. Es bildet sich ein Gleichgewicht in einer an Arten relativ armen Flora. Dabei ist es durchaus möglich, daß eben diese artspezifische Flora sich allmählich so entwickelt, daß die höhere Pflanze geschädigt wird. So wird vermutet, daß Müdigkeitserscheinungen bei Gerste auf ungünstige Beeinflussung durch die zunächst von der Gerste geförderte Actinomycetenflora zurückzuführen sind. Werden nun nach der Ernte jährlich oder in gewissen Zeitabständen andere höhere Pflanzen angebaut, wie das bei dem in der Landwirtschaft üblichen Fruchtwechsel der Fall ist, dann wird das Gleichgewicht der Mikroflora ständig verschoben, und die Entfaltung einer an Arten reichen Organismenwelt tritt an die Stelle der an Arten armen Flora bei Monokultur. Dadurch wird die Fruchtbarkeit des Bodens erhöht.

Ähnlich günstig wirkt sich der gleichzeitige Anbau verschiedener Pflanzenarten aus. Gramineen zeigen beispielsweise eine hohe Strahlenpilzaktivität, dagegen herrschen in der Trabantenflora der Leguminosen die echten Bakterien vor. Werden beide gemeinsam angebaut, so treten für beide Arten spezifische Organismen auf, die sich gegenseitig beeinflussen.

Derartige Wechselwirkungen können zur biologischen Bekämpfung bodenbürtiger Krankheitserreger ausgenutzt werden. So gelang

es LOCHHEAD und seinen Mitarbeitern, die Wurzelfäule der Stachelbeere durch Untersetzung von *Soja hispida* zu bekämpfen; *Trifolium pratense* mit seiner Trabantenflora erwies sich als unwirksam. Allerdings war der Anbau der Wirtspflanze als Träger der Flora notwendig, alle Versuche, durch Beimpfung des Bodens mit Antagonisten bodenbürtige Krankheitserreger auszuschalten, scheiterten nämlich daran, daß die eingepflanzten Arten als Fremdorganismen von der herrschenden Standortgesellschaft rasch verdrängt wurden. Ausreichend ist es, phytopathogene Mikroorganismen im Boden dadurch in Schach zu halten, daß die bodenständige Flora, z. B. durch Düngung mit organischer Substanz, aktiviert wird.

Ich habe zu zeigen versucht, daß ein Jahrhundert bodenbiologischer Forschung unter Ausnutzung methodischer Anregungen vor allem von seiten der Optik, der Hygiene, der Biochemie und der Biophysik zu einem neuen Gesamtbild geführt hat. Wir wissen, daß es in der Mikroflora des Bodens zu Gleichgewichten kommt, die durch die chemische und physikalische Beschaffenheit des Bodens bestimmt werden und nicht zuletzt durch die klimatischen Faktoren. Eine Steuerung ihrer Aktivität erfolgt durch den Eingriff des Menschen auf dem Wege der Bodenbearbeitung und Düngung sowie durch den Anbau verschiedener Kulturpflanzen. Dringend erforderlich sind Studien über die Beziehung der Mikroorganismen zum Pflanzenertrag, ökologische Studien über den Einfluß von Bodenart und Bodentyp, von Pflanzen und Pflanzengesellschaften, ferner Arbeiten an dem Problem der biologischen Bekämpfung bodenbürtiger Pflanzenkrankheiten. So wie Bodenfruchtbarkeit nur dann gewährleistet ist, wenn das Bodenleben mit all seinen Harmonien und Dissonanzen im gegebenen Boden sein Optimum erreicht, so wird auch die Arbeit an diesen Problemen nur fruchtbar sein können, wenn die beteiligten Disziplinen sich zu gemeinsamer Arbeit zusammenfinden.