

## Veränderungen der Vegetation durch experimentelle Erdgasbehandlung

PETR PYŠEK UND ANTONÍN PYŠEK  
Na Dlážděnce 2096, 182 00 Praha 8 und  
Popelníková 52, 312 06 Plzeň, Tschechoslowakei

Received 5 March 1988

Revised version accepted 27 September 1988

### Zusammenfassung: Summary: Résumé

Die Veränderungen der Vegetation, die durch experimentelle Erdgasbehandlung hervorgerufen wurden, sind in den Jahren 1978-84 in Mittelböhmen untersucht worden. Das verwendete Erdgas enthielt 93,8% Methan, 3,6% Äthan, 0,8% Propan, 0,25% Butan, 0,3% Kohlendioxid. Die getesteten Kulturpflanzen wurden auf Parzellen von 60 × 5 m angebaut, bei denen das Erdgas durch unterirdische Sonden in den Boden eingebracht wurde. Darüber hinaus wurden die Reaktionen der Unkrautarten untersucht.

Die Wirkungen auf der Populationsebene bestanden in Wachstumshemmung und Verminderung der Individuenzahl bei den meisten Arten. Bei *Medicago sativa*, *Brassica oleracea* var. *acephala*, *Secale cereale*, *Lolium multiflorum*, *Beta vulgaris* und *Zea mays* wurden Farbveränderungen beobachtet. Auffällige phänologische Veränderungen wurden bei *Solanum tuberosum*, *Helianthus annuus* und *Zea mays* festgestellt (Verzögerung des Austreibens und des Blühbeginns). Für einen typischen Effekt des Erdgases kann eingeschränkte oder sogar fehlende Reproduktionsfähigkeit angesehen werden, was besonders für *Allium cepa*, *Triticum aestivum*, *Hordeum distichon*, *Trifolium* sp. div., *Medicago sativa* und die meisten Unkrautarten gilt. Oft

entstanden verschiedene Organdeformationen (*Solanum tuberosum*, *Beta vulgaris*).

Einzelpflanzen von *Chenopodium album* und *Medicago sativa*, die in der Umgebung der Erdgasauströmung wuchsen, hatten eine erhöhte Stomatazahl. Es wurden auch Veränderungen im Verlauf der Reflektionskurven bei *Trifolium pratense* subsp. *sativum* beobachtet. Am Ort der stärksten Erdgaswirkung kam es im Vergleich mit der Kontrolle zu auffälligem Abfall der Reflektion im infraroten Bereich des Spektrums. Der Unterschied entstand und verstärkte sich allmählich im Verlauf der Vegetationsperiode mit steigendem Einfluss des Gases.

Die Deckungsgrad- und Dichtereduktion und Veränderungen in der Artenzusammensetzung (Rückgang der empfindlichen Arten) können für eine allgemeine Folge der Erdgaswirkung auf Gesellschaftsebene gehalten werden. Die ersten Wirkungen wurden etwa 15-30 Tage nach Versuchsbeginn beobachtet, was etwa einer Menge von 80-150 m<sup>3</sup> Gas pro Parzelle entspricht.

### *Changes in vegetation caused by experimental leakage of natural gas*

The response of vegetation to natural gas leakage was studied in Central Bohemia, Czechoslovakia, in 1978-84. The gas used was of the following chemical composition: 93.8% methane, 3.6% ethane, 0.8% propane, 0.25% butane, 0.3% carbon dioxide. The test crops were planted in 60 × 5 m plots containing underground bores from which gas was released into the soil through distribution pipes. In addition, the response of some weed species was recorded.

The important effects of contamination observed were restricted growth and decrease in the number of individuals present. A change in the green colour of leaves was recorded in

*Medicago sativa*, *Brassica oleracea* var. *acephala*, *Secale cereale*, *Lolium multiflorum*, *Beta vulgaris* and *Zea mays*. An obvious shift of developmental stages was found in *Solanum tuberosum*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* (delay of recruitment and blooming). Restricted or even failure of reproduction can be considered the typical effect of exposure to natural gas; this holds true especially for *Allium cepa*, *Triticum aestivum*, *Hordeum distichon*, *Trifolium* sp. div., *Medicago sativa*, and most of the weedy species. Various growth deformations, mostly found in the underground parts of the plants (tubers and roots in *Solanum tuberosum*, *Beta vulgaris*), can be ascribed to the unfavourable conditions of soil aeration.

Plants of *Chenopodium album* and *Medicago sativa* growing in the vicinity of the gas release point had an increased number of stomata. There were changes in the course of the reflectance curves estimated in the population of *Trifolium pratense* subsp. *sativum*. There was a conspicuous decrease of the near infrared reflectance in the stand exposed to gas in comparison with the control.

Decrease of coverage and density of the stands reduced species diversity and changes in the species' composition (reduction of sensitive species) are the general consequences of natural gas leakage. The first symptoms on the vegetation were observed after 15–30 days which corresponds to about 80–150 m<sup>3</sup> of discharged gas.

#### *Changements de végétation entraînés par un dégagement expérimental de gaz naturel*

L'incidence sur la végétation d'un dégagement de gaz naturel a été étudié en Bohême centrale, Tchécoslovaquie de 1978 à 1984. Le gaz utilisé avait la composition chimique suivante: 93,8% de méthane, 3,6% d'éthane; 0,8% de propane; 0,25% de butane et 0,3% de dioxyde de carbone. Les cultures expérimentales étaient plantées dans des parcelles de 60 × 5m contenant des trous en sous-sol à partir desquels le gaz était lâché dans le sol par des tuyaux de distribution. Par ailleurs, l'effet sur certaines mauvaises herbes était noté. Les effets les plus importants observés étaient une baisse de la croissance et une diminution du nombre d'individus présents. Un changement dans la couleur verte des feuilles a été noté chez *Medicago sativa*, *Brassica oleracea* var. *acephala*, *Secale céréale*, *Lolium multiflorum*, *Beta vulgaris*

et *Zea mays*. Une modification manifeste des stades de développement a été trouvée chez *Solanum tuberosum*, *Helianthus annuus* et *Zea mays* (retard au démarrage et à la floraison). Des baisses ou même des échecs de la reproduction peuvent être considérés comme des effets typiques de l'exposition au gaz naturel: ceci vaut en particulier pour *Allium, cepa, Triticum aestivum, Hordeum distichon, Trifolium sp. div., Medicago sativa* et la plupart des espèces adventices. Différentes perturbations de la croissance principalement observées chez les parties souterraines des plantes (tubercules et racines chez *Solanum nigrum, Beta vulgaris*) peuvent être attribuées aux conditions d'aération défavorable du sol. Des plants de *Chenopodium album* et *Medicago sativa* poussant près du point de lachage du gaz avaient un nombre accru de stomates. Il y a eu des changements dans la forme de la courbe de réflexion estimée pour la population de *Trifolium pratense* subsp. *sativum*. Il y avait une forte baisse de la réflexion des proches infrarouges dans les parcelles exposées au gaz en comparaison des témoins. La baisse du pourcentage de couverture et de la densité une réduction de la diversité des espèces et un changement dans la composition des espèces (réduction des espèces sensibles) sont les conséquences générales d'une fuite naturelle de gaz. Les premiers symptômes sur la végétation ont été observés après 15–30 jours ce qui correspond à environ une quantité de 80–150 m<sup>3</sup> de gaz lâché.

#### **Einleitung**

Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss von Erdgas auf die Vegetation. Dieser Problematik war in den Jahren 1978–84 in der ČSSR ein Forschungsauftrag gewidmet, den die Verfasser im VEB Stavební geologie Praha in Kooperation mit dem VEB Tranzitní plynovod Praha bearbeitet haben.

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf einer Versuchsfläche 1 km NNO von der Gemeinde Nový Brázdím und 5 km westlich von Brandýs n. Labem (Bezirk Mittelböhmen). Sie befindet sich im südlichen Teil der Böhmisches Kreidetafel, die hier durch Sedimente des zönanischen (Sandsteine) und des turonischen Alters (Mergel, Schiefer) und deren Eluvien gebildet wird. Durch Versuchsbohrungen wurde unter dem humosen Horizont (Humusgehalt 2,0–2,5%) gelb-brauner,

toniger, stellenweise sandiger Boden mit vereinzelten scharfkantigen Quarzkörnern festgestellt.

Die Versuchsfläche liegt 200 m über NN. Die jährliche Niederschlagsmenge von 542 mm verteilt sich folgendermassen: I—28, II—26, III—28, IV—42, V—54, VI—70, VII—73, VIII—68, IX—46, X—41, XI—34, XII—32 (50jähriges Mittel). Nach der geobotanischen Kartierung der potentiellen natürlichen Vegetation gehört die Lokalität in das Gebiet mit vorherrschenden Carpinion-betuli-Gesellschaften.

### Methodik

An dem Standort wurde eine Versuchsanordnung errichtet, die aus einer landwirtschaftlichen Fläche von 60 × 25 m sowie der Verteilungs- und Messapparatur bestand. Das Gas wurde mittels eines Rohrverteilungssystems mit einem Druck von ca. 30 kPa in unterirdische Sonden gepresst. Jede Sonde bestand aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 15 mm und einer Länge von 0,9 m, das an einem Ende mit einem Kopt für den Anschluss an den Gasverteiler versehen war, am anderen Ende mit einer Düse mit einem Durchmesser von 6 mm. Die Sonden wurden in eine Bodenröhre mit einem Durchmesser von 50 mm in eine Tiefe von 1,8 m eingeführt. Der Sondenkopf wurde mittels eines Ton-Zementbelages so im Boden angebracht, daß das Erdgas entlang der Sonde nicht frei entweichen konnte, sondern daß es sich durch den Boden gleichmäßig nach allen Seiten verteilen mußte.

Die Versuchsfläche wurde in 5 Parzellen eingeteilt. Auf jeder wurden im Abstand von ca. 10 m zwei Sonden installiert. Als optimale Dosierung erwies sich eine Menge von ca. 250–300 l Erdgas pro Stunde. Eine konstante Stundenmenge des zugeführten Gases konnte während der gesamten Saison nicht genau eingehalten werden. Die wechselnde Bodenfeuchtigkeit bewirkte Unterschiede im Gasfluss durch den Boden. In trockenen Perioden wurde ein größerer Bodenwiderstand festgestellt als in Perioden mit feuchtem Boden.

Das verwendete Erdgas enthielt 93,8% Methan, 3,6% Äthan, 0,8% Propan, 0,25% Butan und 0,3% Kohlendioxid. Die technische Durchführung des Experiments lag in den Händen von Mitarbeitern des VEB Tranzitní plynovod Praha.

Auf der Versuchsfläche wurden in den Jahren 1980–84 die in Tabelle 1 angeführten Kulturpflanzen angebaut. Außerdem blieb ein Teil des Geländes brach liegen, um die Einwirkung des Erdgases auf die Brachlandvegetation festzustellen. Der Schwerpunkt der Arbeit lag im detaillierten Studium der Pflanzenbestände, die auf den mit einer definierten Erdgasmenge behandelten Parzellen wuchsen. Genügend große, nicht kontaminierte Flächen dienten als Vergleichsflächen. Die Vegetation der Versuchsflächen wurde während der gesamten Vegetationsperiode verfolgt. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Veränderungen folgender Eigenschaften gewidmet: Artenzusammensetzung der Bestände, Deckungsgrad, Wachstum der einzelnen Arten, Phänologie, Reproduktion, Färbung, Ausbildung der unterirdischen Pflanzenteile.

In einigen Fällen wurde die Reaktion der Art auf das Erdgas in unterschiedlichen Entwicklungsstadien studiert. Die Empfindlichkeit der Bestände wurde nicht nur an Einzelpflanzen beurteilt, sondern auch nach der Größe der Flächen, auf denen sich die Wirkung des Erdgases an botanischen Merkmalen äußerte. Das Studium der Empfindlichkeit der Arten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien wurde durch die Anordnung der Versuche ermöglicht: Auf jeder Parzelle waren zwei Sonden angebracht, die zu unterschiedlichen Zeiten der Vegetationsperiode in Tätigkeit gesetzt wurden, so daß die Kontamination der gleichen Nutzpflanzenart in zwei unterschiedlichen Entwicklungsperioden einsetzte.

Die Feldmethoden wurden durch quantitativ-anatomische Messungen der Stomataanzahl bei zwei Arten aus dem kontaminierten und dem nicht kontaminierten Teil der Parzelle ergänzt (vgl. Pazourek, 1982). Diese Messungen wurden von Doz. J. Pazourek (Lehrstuhl Pflanzenphysiologie der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Karls-Universität Prag) durchgeführt, dem wir auf diesem Wege unseren Dank aussprechen möchten. Der Versuchsfläche wurden 5 Pflanzen von *Medicago sativa* (direkt an der Erdgassonde, 2 m und 5 m davon entfernt) sowie 4 Pflanzen von *Chenopodium album* (direkt an der Erdgassonde, 4,5 m und 10 m davon entfernt) entnommen. Bei jeder Pflanze wurden drei zufällig ausgewählte Blätter ausgewertet. Es wurden Mikroreliefpräparate von der adaxialen und abaxialen Epidermis der einzelnen Blätter hergestellt. Bei jedem Präparat wurden die Stomata auf jeder Blattseite



**Tabelle 2** Reaktionen einiger Unkrautarten auf Erdgasbehandlung (Erläuterungen s. Text). Die Tabelle enthält nur die Arten die im Text nicht speziell aufgeführt sind

Art	Reaktion			
	Wachstum W	Blühen B	Fruchten Fr	Empfindlichkeit
<i>Amaranthus chlorostachys</i> Willd.	--	-	-	I.
<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	-	+	+	III.
<i>Anagallis arvensis</i> L.	--	-	-	I.
<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) J. et C.Presl	-	-	-	I.
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.)Med.	--,-	+,-	+,-	III.
<i>Chenopodium strictum</i> Roth	--,-	-	-	I.
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	--,-	-	-	I.
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	--,-	-	-	I.
<i>Crepis biennis</i> L.	--	-	-	I.
<i>Elymus repens</i> (L.) P.B.	-	+	+,-	II.
<i>Festuca pratensis</i> Huds.	--	-	-	I.
<i>Fumaria officinalis</i> L.	-	-	-	I.
<i>Galinsoga ciliata</i> (Rafin.) Blake	-	-	-	I.
<i>Galium aparine</i> L.	--	-	-	I.
<i>Geranium pusillum</i> Burm.fil.	--	-	-	I.
<i>Lactuca serriola</i> L.	--	-	-	I.
<i>Lathyrus tuberosus</i> L.	--	-	-	I.
<i>Lolium perenne</i> L.	-	-	-	I.
<i>Medicago lupulina</i> L. var. <i>willdenowiana</i>	--,-	+	+	III.
<i>Plantago major</i> L. subsp. <i>intermedia</i> (Godr.) Lange	-	-	-	I.
<i>Plantago major</i> L. subsp. <i>major</i>	0,-	-	-	I.
<i>Polygonum arenastrum</i> Bor.	--,-	-	-	I.
<i>Polygonum lapathifolium</i> L. subsp. <i>pallidum</i> (With.) Fr.	--,-	-	-	I.
<i>Polygonum persicaria</i> L.	0,(-)	+	+	III.
<i>Rumex obtusifolius</i> L.	-	+	-	II.
<i>Setaria viridis</i> (L.) P.B.	(0),-	+	-	II.
<i>Sinapis arvensis</i> L.	-	+	-	II.
<i>Sonchus arvensis</i> L.	--	-	-	I.
<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill	--	-	-	I.
<i>Stachys palustris</i> L.	--,-	-	-	I.
<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	-	+	+,-	II.
<i>Trifolium hybridum</i> L.	-	-	-	I.
<i>Trifolium repens</i> L.	--	-	-	I.
<i>Tussilago farfara</i> L.	--	-	-	I.
<i>Viola arvensis</i> Murray	--	-	-	I.

an 40 Stellen im intervall von 0,1 mm gezählt. Die Stomata wurden in einem Quadrat mit einer Fläche von 0,324 mm<sup>2</sup> ermittelt. Diese Grundwerte wurden dann auf die Stomatazahl pro 1 mm<sup>2</sup> übertragen (Pazourek in Pyšek, 1982).

Im Verlauf des Experiments wurde auf der Versuchsfläche die Ausbreitung des ausströmenden Erdgases im Boden mit dem Portafid Gerät verfolgt. Dieses wertet den Gehalt von CH<sub>4</sub> in der Bodenluft direkt im Gelände aus. Im Gerät wird der gasförmige Kohlenwasserstoff verbrannt, und die entstandene Ionisierung wird elektronisch gemessen.

Weiterhin wurde die Reflektion einiger Arten gemessen. Die radiometrischen Messungen wurden mit einem Breitbandfeldradiometer der Anstalt SDPZ Praha von E. Muřický und D. Tafat vorgenommen. Es wurde die Vergleichs-

methode mit Reflektionsstandard BaSO<sub>4</sub> im Bereich von 390–1000 nm verwendet. Durch die Wahl der Schmalbandinterferenzfilter kann die Reflektionskurve detailliert studiert werden (Pyšek *et al.*, 1984).

## Ergebnisse

Die Reaktionen der einzelnen Arten auf Erdgasbehandlung sind in Tabelle 1 (Kulturpflanzen) bzw. Tabelle 2 (Segetalarten) dokumentiert. Tabelle 1 enthält Angaben über die Anzahl der Vegetationsperioden, in denen die Art studiert wurde, die Anzahl der zwischen dem Beginn der Erdgasbehandlung und dem Erscheinen der ersten Symptome vergangenen Tage, die Menge des bis zum Erscheinen der ersten Symptome in

den Boden geströmten Erdgases sowie die Größe der Fläche, auf der die Wirkung des Kontaminants beobachtet wurde.

Die Reaktionen der Pflanzen werden in den Tabellen durch folgende Symbole bewertet:

W°	Wachstum unbeeinflusst
W-	Wachstum mäßig reduziert (Individuen erreichen 50–100% der Höhe der Pflanzen auf nicht kontaminierten Stellen)
W--	Wachstum stark reduziert (Individuen erreichen höchstens 50% der Höhe der Kontrollpflanzen)
B+	die Pflanzen blühen
B-	die Pflanzen blühen nicht, in der Regel bilden sie keine blütentragende Triebe und wachsen nur vegetativ
B+-	einige Exemplare blühen normal, andere gar nicht
B-+	die meisten Individuen blühen nicht; die übrigen blühen mit schwächeren, veränderten Blütenständen
Fr+	die Pflanzen fruchten, manchmal nur an einem Teil des Blütenstandes
Fr-	die Pflanzen fruchten nicht
Fa°	die Pflanzen verändern ihre Farbe nicht
Fa+	die Farbe der Pflanzen verändert sich schwach
Fa++	die Farbe der Pflanzen verändert sich stark
●	Merkmal nicht verfolgt
	Relativer Deckungsgrad (unbehandelte Pflanzen = 100%)

Wenn bei einigen Arten mehrere Symbole erscheinen, bedeutet das, daß mehrere Reaktionen mit ungefähr gleicher Häufigkeit beobachtet wurden. Selten auftretende Fälle werden in Klammern angeführt.

Die letzte Spalte stellt den Versuch einer Bestimmung der Empfindlichkeit der jeweiligen Art gegenüber dem Kontaminant dar. Angaben in Klammern im nachfolgenden Text gelten nur für Segetalarten (Tab. 2).

- I. eine sehr empfindliche Art (mit reduziertem Wachstum, bildet of Zwergformen, blüht nicht, steril)
- II. eine empfindliche Art (mit reduziertem Wachstum, blüht wenigstens manchmal, immer nichtfruchtend)

- III. eine relativ widerstandsfähige Art (selten Wachstumsreduktion, blüht und fruchtet meistens)

Nachfolgend bringen wir einige Befunde zu denjenigen Unkrautarten, die entweder gute Indikatoren sind oder eine interessante Reaktion auf Erdgas zeigen. Die Reaktionen wurden insgesamt durch wiederholte Beobachtungen verifiziert.

#### *Chenopodium album* L.

Auf den am stärksten kontaminierten Stellen konnte fast immer ausgeprägter Zwergwuchs festgestellt werden, in extremen Fällen nur 2–5 cm Höhe. Die Exemplare verzweigten sich nicht und hatten nur 1–2 kleine, untypisch geformte Blätter. Bei allmählichem Abklingen des Erdgaseinflusses begann die Blüte, in der Regel jedoch nur an den unteren Nebenachsen des Blütenstandes. Reife Früchte wurden jedoch nicht beobachtet.

#### *Cirsium arvense* (L.) Scop.

Die am stärksten betroffenen Exemplare hatten lediglich winzige Blattrosetten mit ausgeprägt reduzierten Blättern. Es bildeten sich bei ihnen nicht einmal die Ansätze von Stengeln aus. Sofern sich die Stengel ausbildeten, erschienen im Gipfelteil statt der Blüten winzige, wirt angeordnete Blätter. Bei den vom Zentrum der Kontamination weiter entfernten Pflanzen wurde dagegen ein üppiges Wachstum und häufiges Blühen beobachtet. Aber auch hier war die Reproduktionsfähigkeit eingeschränkt. Die Achänen bildeten sich nicht oder nur teilweise aus.

#### *Echinochloa crus-galli* (L.) P.B.

Diese Art reagierte auf Erdgas sehr empfindlich. In den meisten Fällen erschienen lediglich Blätter; die Pflanze zeigte keine Tendenz zur Halmbildung, und das Wachstum war beträchtlich reduziert. Weniger beeinflusste Individuen bildeten blütentragende Halme aus, aber die Karyopsen reiften nicht.

#### *Galinsoga parviflora* Cav.

Die Pflanzen erreichten auf den behandelten Parzellen etwa die Hälfte der normalen Größe; oft wurden deformierte Triebe mit kleinen, harten Blättern beobachtet. In den meisten Fällen blühte die Art nicht, wenn doch, dann sehr schwach, und sie bildete keine Früchte aus.

*Matricaria maritima* L. subsp. *inodora* (L.) Dos-  
tál.

Auf den am stärksten kontaminierten Stellen entwickelten sich harte Miniaturpflanzen. Ihre Höhe erreichte in der Regel nur 2–20 cm. Es wurden nicht blühende, nur im unteren Teil des Blütenstandes blühende und auch normal fruchtende Individuen beobachtet. Interessant war dabei, daß der Abschluß des Entwicklungszyklus nicht immer an den Grad der Wachstumsstörungen gebunden war: Es wurden fruchttragende Zwergformen sowie fast normal gewachsene sterile Individuen festgestellt.

*Setaria pumila* (Poiret) R. et Sch.

Diese Art bildete in der Regel 5–10 cm lange Blätter aus. In einigen Fällen formte sie lediglich Büschel, meist jedoch blühte und fruchtete sie. In einem Fall wurden Individuen beobachtet, die Halme ausbildeten, die aber nicht fruchteten. Es handelte sich um eine relativ widerstandsfähige Art, die ausgeprägte negative Veränderungen (Bildung von nur kleinen Büscheln) fast nur im Zentrum der Verunreinigung zeigte.

*Taraxacum officinale* Wiggers.

Diese Art bildete an kontaminierten Bereichen immer nur sehr kleine, harte Blattrosetten aus (ca. 20–30% der durchschnittlichen Länge und Breite im Vergleich mit unbehandelten Pflanzen).

*Veronica persica* Poiret.

Die Art reagierte mit Zwergwuchs (die Länge der Sprosse betrug im Zentrum der Kontamination 3–10 cm, in 4–5 m Entfernung erhöhte sie sich bis auf 50 cm). In den meisten Fällen blühte sie nicht, wenn doch, vertrockneten die Blüten bald nach dem Aufblühen. Lediglich einmal wurde die Bildung von Samen in zwei unteren Kapseln beobachtet.

Bei den meisten übrigen untersuchten Arten kam es an den behandelten Stellen zu Wachstumsstörungen. Es verminderte sich die Höhe der Pflanzen ebenso wie die Größe der einzelnen Organe (Blätter, Reserveorgane). Die Wachstumsreduktionen waren verschieden ausgeprägt, z.B. *Zea mays* weniger als 10%, *Triticum aestivum* 10–15% (Winterweizen), 70% (Sommerweizen), *Medicago sativa* 15%, *Brassica oleracea* var. *acephala* 20%, *Beta vulgaris* 30%, *Avena sativa*

80%. Diese Werte beziehen sich auf Pflanzen im Zentrum der Kontamination, bei denen die Schädigung am deutlichsten war. Verschiedene Unkrautarten wiesen sehr unterschiedliche Grade der Wachstumsreduktion auf (Tab. 2).

Auf behandelten Flächen kam es in den Anfangsstadien der Pflanzenentwicklung zum Absterben einiger Individuen (*Triticum aestivum* (Winterweizen), *Vicia faba*, *Beta vulgaris*, *Helianthus annuus*, *Hordeum distichon*, *Zea mays*), was zur Senkung des Deckungsgrades führte.

Eine interessante Reaktion war die Veränderung der Farbe bei einigen Arten. Es handelte sich vor allem um *Brassica oleracea* var. *acephala* und *Medicago sativa* (Pyšek, 1984), wo diese Erscheinung sehr auffällig war, weiter dann um *Secale cereale*, *Lolium multiflorum*, *Beta vulgaris*, *Zea mays* und einige Unkrautarten. Konkrete Veränderungen bei den Kulturpflanzenarten werden in Tabelle 1 angegeben.

Bei einer Anzahl von Arten kam es während ihrer Entwicklung zu Phänologieverschiebungen. So trieben z.B. die auf behandelten Flächen wachsenden Kartoffeln durchschnittlich 10 Tage später als die Kontrollpflanzen aus. Diese Verschiebung blieb bis zu Beginn der Blüte erhalten. Eine analoge Situation wurde auch bei *Helianthus annuus* und *Zea mays* beobachtet.

Eingeschränkte Reproduktionsfähigkeit kann als eine typische Wirkung der Kontamination angesehen werden. Zahlreiche Unkrautarten entwickelten lediglich Blattrosetten, bei Gräsern kam es nicht zur Halmbildung. Wenn die Pflanzen blühten, konnte eine Begrenzung auf einen bestimmten Teil des Blütenstandes eintreten oder die Zahl der Blüten reduziert sein, wie es bei mehreren Unkrautarten der Fall war. Von den Kulturpflanzen ist in diesem Zusammenhang *Medicago sativa* zu nennen. Wenn es zur Bildung von Früchten und Samen kam, reiften die Samen oft nicht.

Generell konnten bei vielen Pflanzenarten verschiedene Wachstumsstörungen, terratologische Formen und dergleichen beobachtet werden: deformierte Kartoffelknollen und Rüben, verdrehte Stengel und deformierte Blätter einiger Unkrautarten. Für Getreidearten war häufiges Lagern infolge schlecht ausgebildeten Stützgewebes typisch.

Es kam auch zu Veränderungen der quantitativen anatomischen Merkmale (Tab. 3 & 4). In den beiden untersuchten Fällen (*Medicago sativa* und *Chenopodium album*) sank die Dichte der Stomata

**Tabelle 3** Stomataanzahl bei *Medicago sativa* (nach Pazourek in Pyšek, 1982). Die Werte stellen die Stomatazahl pro 1 mm<sup>2</sup> dar. AD = adaxiale Blattseite; AB = abaxiale Blattseite;  $\bar{x}$  = Mittelwert

Pflanze Nr.	Entfernung von der Gasquelle								
	0 m			2 m			5 m		
	AD	AB	$\bar{x}$	AD	AB	$\bar{x}$	AD	AB	$\bar{x}$
1	279,1	175,8	227,5	215,3	164,6	190,0	188,2	129,3	158,8
2	317,3	239,7	268,5	237,3	179,0	208,2	241,0	166,6	203,9
3	251,0	190,0	219,4	294,2	200,2	247,2	255,5	149,9	202,7
4	371,6	225,6	298,7	237,0	171,1	204,0	196,6	135,8	166,2
5	227,3	151,6	189,5	182,4	137,8	160,1	228,4	153,6	191,0
$\bar{x}$	289,3	196,5	242,7	233,2	170,5	201,9	222,0	147,1	184,5

**Tabelle 4** Stomatazahl bei *Chenopodium album*: Erläuterungen s. Tab. 3. (nach Pazourek in Pyšek, 1982)

Pflanze Nr.	Entfernung von der Gasquelle								
	0 m			4,5 m			10 m		
	AD	AB	$\bar{x}$	AD	AB	$\bar{x}$	AD	AB	$\bar{x}$
1	146,3	255,8	201,1	84,0	183,0	135,0	133,8	208,8	171,3
2	73,1	188,6	130,9	149,6	254,1	201,9	75,9	197,7	136,8
3	91,6	186,2	138,9	107,1	198,9	153,0	62,7	163,7	113,2
4	91,1	216,0	153,6	58,2	160,2	109,2	83,8	191,1	137,5
$\bar{x}$	100,5	211,7	156,1	99,7	199,1	149,4	89,1	190,3	139,7

mit der Entfernung von der Gaseinleitungsstelle. Dieser Trend war bei *Medicago sativa* noch ausgeprägter: Wird der Durchschnittswert der Stomata an der Gasquelle gleich 100 gesetzt, dann war er in einer Entfernung von 2 m 83,19% und in einer Entfernung von 5 m 76,02%; analog bei *Chenopodium album*: in einer Entfernung von 4,5 m 95,71%, in einer Entfernung von 10 m 89,49% (Pazourek in Pyšek *et al.*, 1982).

Durch das Messen der Reflektionscharakteristika können negative Veränderungen im Gesundheitszustand der Pflanzen früher erfaßt werden, als es mit bloßem Auge möglich ist (Tucker, 1978). Die meisten Angaben in der Fachliteratur stimmen darin überein, daß für die Untersuchung des Pflanzenbestandes (z. B. Schätzung der Biomasse, Menge des Chlorophylls, Vitalität der Pflanze) der rote und infrarote Bereich des Spektrums am besten geeignet ist; das entspricht den Wellenlängen 600–700 nm bzw. 750–1000 nm (Jordan, 1969; Colwell, 1974; Tucker, 1978, 1979). In diesen Bereichen wurde eine enge Abhängigkeit zwischen der Reflektion und dem Gehalt von Pflanzenpigmenten festgestellt. Im allgemeinen gilt, daß bei Stress ausgesetzten Pflanzen eine Erhöhung der Reflektion in sichtbaren Teil des Spektrums und ein steiler

Abfall im infraroten Teil zu beobachten ist.

Als Beispiel für die Beeinflussung der optischen Eigenschaften der Pflanzen durch Erdgas führen wir *Trifolium pratense* an. In Abb. 1 sind die Reflektionskurven angeführt, die durch Messungen am gleichen Ort des Bestandes dreimal während der Vegetationsperiode gewonnen wurden. Vor Beginn der Behandlung war zwischen den kontaminierten und den Kontrollpflanzen kein deutlicher Unterschied festzustellen. Der Unterschied entstand und verstärkte sich allmählich im Verlauf der Vegetationsperiode bei steigendem Einfluß des Kontaminants. Es kam zu einer typischen Abflachung der Kurve.

Zum Vergleich kann der einfache, von Jordan (1969) vorgeschlagene Quotient aus IR/R herangezogen werden. Der Autor hat festgestellt, daß das Verhältnis der Wellenlängen 800/675 nm streng mit dem Index der Blattfläche (LAI) korreliert ist. Es wird zur nichtdestruktiven Bestimmung der Biomasse von Pflanzen verwendet (Pearson & Miller, 1972; Colwell 1974; Rouse *et al.*, 1974; Maxwell 1976). Tucker *et al.* (1979) haben damit das Ausmaß von Stress bei Luzerne und Winterweizen festgestellt. Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, daß der Quotient aus IR/R bei den Kontrollpflanzen im Zeitablauf auf dem gleichen

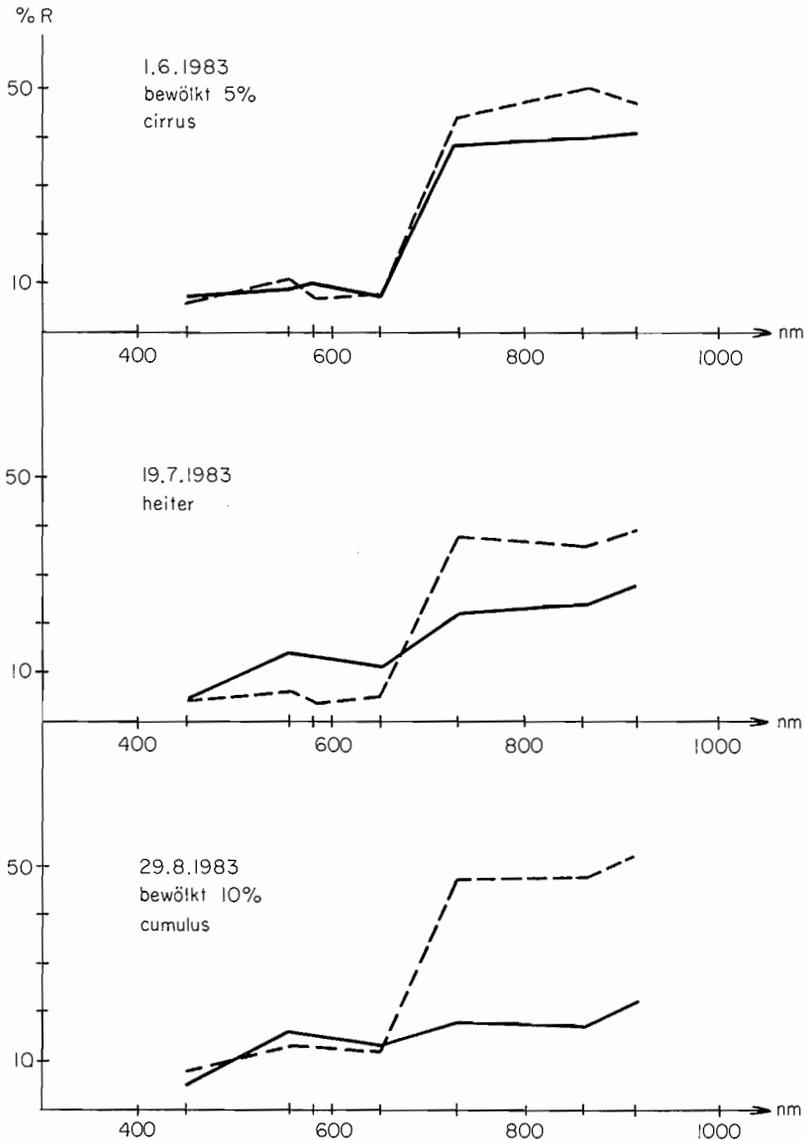


Abb. 1 Reflektionskurven von *Trifolium pratense* subsp. *sativum* auf der Stelle der Sonde vor dem Kontaminationsbeginn (1.6.1983) und nach verschieden langem Einfluss der Erdgases (19.7., 29.8.1983). Kontrollpflanzen durch unterbrochene Linie bezeichnet. Der Messumfangist des Radiometers bei Benutzung der Filter Wratten 47 B (blau)—430 nm, 58 (grün)—580 nm, 29 (rot)—650 nm, 87 (IR)—870 nm und der engdurchlässigen Filter ist auf der x-Achse bezeichnet.

Tabelle 5 Wert des Quotienten aus IR/R bei *Trifolium pratense* zu verschiedenen Terminen

	1.6.1983	19.7.1983	29.8.1983
Behandlung	2,29	1,53	1,20
Kontrolle	2,47	2,46	2,04

Niveau blieb. Ein gewisser Rückgang bei der letzten Messung kann auf beginnende Alterungsprozesse zurückgehen, die auf dieses Merkmal einen analogen Einfluß wie Stress haben. Bei den kontaminierten Pflanzen sank der Quotient im Verlauf der Vegetationsperiode deutlich ab, was als ein Nachweis dafür dienen kann, daß die Pflanzen einem Stress ausgesetzt waren. Diese Reaktion hat allgemein Gültigkeit, und sie wurde

an einigen weiteren Arten bestätigt (vgl. Pyšek *et al.*, 1984).

Neben den bisher behandelten Reaktionen auf der Ebene von Arten bzw. Populationen können zur Beschreibung des Erdgasinflusses die Veränderungen der Eigenschaften von ganzen Pflanzengesellschaften herangezogen werden. Ein typisches Merkmal ist in der Regel das Sinken des Deckungsgrades, sei es durch Verminderung der Dichte oder durch verminderten Wuchs der Individuen. Kennzeichnend sind weiterhin das Absinken der Artenzahl und die Substitution von empfindlichen durch resistente Arten. Als Beispiel hierfür können die Veränderungen in der Vegetation auf der Bracheparzelle dienen. Die Wirkung des Erdgases zeigte sich an den Unkrautbeständen bereits nach einem Monat (70 m<sup>3</sup> Erdgas). Auf der behandelten Fläche wuchsen lediglich 7 der insgesamt festgestellten 33 Arten. Der Deckungsgrad sank infolge der Kontamination von 100% auf 45% ab. Keine der auf dem behandelten Teil der Parzelle wachsenden Arten blühte und fruchtete (mit Ausnahme von *Amaranthus retroflexus*). Auffällig war ein 2,5–5 m breiter Saum mit dichten Beständen von *Cirsium arvense* um die betroffene Fläche herum. Die Wirkung des Erdgases wurde auf 6 m<sup>2</sup> registriert.

Die Zeitspanne zwischen dem Beginn der Einwirkung des Erdgases und den ersten Anzeichen von Veränderungen des Gesundheitszustandes der Pflanzen hängt ab von der Gesamtmenge des Kontaminants, die in den Boden gelangt, von den Eigenschaften des Bodens sowie von der Empfindlichkeit der Arten. Diese ist im allgemeinen artspezifisch, doch kann sie bei verschiedenen Individuen der gleichen Art unterschiedlich ausgeprägt sein. Die ersten Folgen der Kontamination wurden etwa 15–30 Tage nach Versuchsbeginn beobachtet (entspricht etwa 80–150 m<sup>3</sup> Gas im Boden). Die Größe der Fläche, auf der der Einfluß sichtbar war, bewegte sich zwischen 4–20 m<sup>2</sup>. Dabei kam es häufig zu einer Ausdehnung der Fläche in Richtung der vorherrschenden Winde.

Über das Ausmaß der Kontamination des Versuchsgeländes informiert Tabelle 6. Angesichts der Tatsache, daß die Dynamik der Ausbreitung des Erdgases im Boden durch die Bodeneigenschaften und das Wetter beträchtlich beeinflußt wird, können aus den Daten keine allgemeinen Schlußfolgerungen gezogen werden. Die erzielten Meßwerte halten wir für einen Beleg dafür, daß die Umgebung der Sonden mehr oder weniger kontinuierlich durch Erdgas belastet

**Tabelle 6** Ergebnisse der Gasmessungen mit dem Portafid-Gerät. Es wurde an den Stellen der Sonden und einer Kontrollstelle gemessen. Die Lage der beiden Sonden (A, B) auf der Messstrecke ist mit + gekennzeichnet

Kontrollmessung vom 1 Juni 1983			
Lufttemperatur 23°C, teilweise bewölkt, windstill			
Bodentemperatur 13–22°C			
A Sonden—ganzes Profil 0–24 m: 0 ppm CH <sub>4</sub>			
B Sonden—ganzes Profil 0–24 m: 0 ppm CH <sub>4</sub>			
Kontrolle—ganzes Profil 0–24 m: 0 ppm CH <sub>4</sub>			
Messung vom 10 August 1983			
Lufttemperatur 26°C, heiter, windstill			
Bodentemperatur 15–22°C			
Messstrecke (m)	A Sonden (ppm CH <sub>4</sub> )	B Sonden (ppm CH <sub>4</sub> )	Kontrolle (ppm CH <sub>4</sub> )
0	0	1,8	0
2	270	6	0
4 +	1200	60	0
6	54	57	0
8 +	9	60	0
10	60	1200	0
12	3600	92	0
14 +	9	21	0
16	6	300	0
18 +	12	600	0
20	90	150	0
22	0	600	0
24 +	0	900	0
26	0	0	0

wurde, während das Kontrollprofil kein Methan aufwies.

Wichtig ist auch, in welcher Entwicklungsphase sich die Pflanze zum Zeitpunkt des Beginns der Einwirkung des Gases befindet (Hoeks, 1972). Das läßt sich gut an den beträchtlichen Reaktionsunterschieden zwischen Winter- und Sommerweizen aufzeigen. Der Winterweizen wurde im Oktober kurz nach Beendigung der Gasbehandlung ausgesät. Das Saatgut und die Keimpflanzen waren somit noch der Einwirkung des Gases ausgesetzt.

Dagegen gelangte der im März ausgesäte Sommerweizen in einen Boden, aus dem über Winter das Erdgas entwichen war. Dementsprechend wurde der Winterweizen stärker geschädigt.

## Diskussion

Braverman, Ettinger & Jacobs, (1962), Grable & Siemer (1968), Hoeks (1972) u.a. unterscheiden einen direkten und einen indirekten Einfluß von Erdgas auf die Vegetation. Der indirekte Einfluß, dem die entscheidende Rolle beigemessen wird,

besteht in der Veränderung der Konzentration von Gasen in der Rhizosphäre. Es kommt zu einem Rückgang des Gehaltes an O<sub>2</sub> und zu einer Erhöhung des Gehaltes von CO<sub>2</sub> in der Bodenluft. Im Extremfall kann es zur Ausbildung eines anaeroben Milieus kommen.

Das ist namentlich in zeitigen Stadien der Pflanzenentwicklung unmittelbar nach dem Auflaufen schädlich. Diese Feststellungen stehen mit unseren Ergebnissen im Einklang. Die ausgeprägte Reduzierung der Populationsdichte der meisten untersuchten Arten im Kontaminationszentrum ist auf geringere Keimung und erhöhte Mortalität der Keimpflanzen zurückzuführen. Es ist wahrscheinlich, daß in den Unkrautgemeinschaften die Elimination der empfindlichen Arten schon in diesen Entwicklungsstadien beginnt. Fraglich aber bleibt, ob es zu einer dauernden Schädigung der Samen, die im Boden dormant vorliegen, durch toxische Erdgaskomponenten kommt oder ob eine Dormanz durch CO<sub>2</sub> induziert wird. Im zweiten Fall hätte das Erdgas keine nachhaltigen Wirkungen auf den Samenvorrat des Bodens. Nach dem Auflaufen und der Wurzelbildung bewirkt der hohe CO<sub>2</sub>-Partialdruck eine Senkung der Wurzelrespiration (Chang & Loomis, 1945). Ein Absterben der Wurzeln im anaeroben Milieu im Verlauf von einigen Tagen bis einer Woche nach Einsetzen der anaeroben Bedingungen ist beschrieben worden (Visser *et al.*, 1971 nach Hoeks, 1972). Bei mangelnder Durchlüftung des Bodens verschlechtert sich auch die Wasseraufnahme der Pflanzen. Die von Hoeks (1972) beobachteten Symptome an Pflanzen nach Erdgaswirkung entsprachen der Schädigung, die nicht adaptierte Arten auf ständig nassem Boden aufweisen.

Einen direkten Einfluß üben offensichtlich die im Erdgas enthaltenen toxischen Substanzen aus, besonders Äthylen (Adamse *et al.*, 1972, nach Hoeks, 1972), das unter aeroben Bedingungen auch durch bestimmte Mikroorganismen produziert werden kann (Smith, 1971, nach Hoeks, 1972).

Auf die Möglichkeit, Pflanzen als Indikatoren für Gasleckagen zu verwenden, weist bereits Eynon (1967) hin. Konkrete Angaben über die Reaktion einzelner Pflanzenarten wurden jedoch bisher nicht publiziert.

In der Tschechoslowakei wurde eine Methode zum Nachweis von Erdgasausströmungen erarbeitet, die von Ergebnissen dieser Arbeit ausgeht (Pyšek & Pyšek, 1985). Sie basiert auf der Erfas-

sung einiger auffälliger Symptome, insbesondere der Veränderung des Grüntons und der Verminderung des Deckungsgrades der Kulturpflanze. Im Falle des gezielten Anbaus empfindlicher Arten an exponierten Stellen eröffnet sich überdies die Möglichkeit, Gasleitungen mittels Luftbildphotographie zu überwachen (Pyšek *et al.*, 1984). Dieses Vorgehen würde zwar die Anwendung der Methode auf den Nachweis großräumiger und länger andauernder Leckagen beschränken, aber dennoch eine wertvolle Ergänzung zur detaillierten botanischen Untersuchung darstellen können. In jedem Fall sind für die praktische Nutzung der Indikatorpflanzenmethode Kulturpflanzen besonders geeignet, da sie den unmittelbaren Vergleich mit einem unbeeinflussten Kontrollbestand ermöglichen. In floristisch reicheren Beständen wird die Situation wegen der differenzierten Reaktion der Arten komplizierter. Ein Problem kann auch dadurch entstehen, daß das Erdgas nicht in allen Fällen die Ursache von Pflanzenschäden sein muß (Pirone, 1960; Grable, 1966; Hoeks, 1972). Schließlich hängt das Ausmaß der Schädigung von der artspezifischen Empfindlichkeit, der Bodeneigenschaften und der chemischen Zusammensetzung des Gases ab.

## Literatur

- BRAVERMANN M.M., ETTINGER I. & JACOBS M.B. (1962) Determining the cause of death of vegetation by analysis of soil gases. *Gas Age*, **129**, 23–26.
- CHANG H.T. & LOOMIS W.E. (1945) Effect of carbon dioxide on absorption of water and nutrients by roots. *Plant Physiology*, **20**, 221–232.
- COLWELL J.E. (1974) Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **3**, 175–183.
- EYNON B. (1967) Current vegetation leakage survey techniques. *Gas Age*, **134**, 38–41.
- GRABLE A.R. (1966) Soil aeration and plant growth. *Advances in Agronomy*, **18**, 57–106.
- GRABLE A.R. & SIEMER E.G. (1968) Effects of bulk density, aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, **32**, 180–186.
- HOEKS J. (1972) Effect of leaking natural gas on soil and vegetation in urban areas. *Agricultural Research Reports* 778, Wageningen.
- JORDAN C.F. (1969) Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, **50**, 663–666.
- MAXWELL E.L. (1976) Multivariate system analysis of multispectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **42**, 1173–1186.
- PAZOUREK J. (1982) Der Einfluss des Flugzeugtreibstoffes auf die Anatomie des Weizenblattes. *Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz, Berlin*, **18**, 59–62.
- PEARSON R.L. & MILLER L.D. (1972) *Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of Productivity of the Shortgrass Prairie*. University of Michigan, Ann Arbor, 1357–1381.
- PIRONE P.P. (1960) Natural gas and odorants do not harm shade

- trees. *Gas Age*, **125**, 33–43.
- PYŠEK A. (1982) *Brázdim—botanická indikace*. Bericht über Forschungsauftrag, Stavební geologie Praha.
- PYŠEK A. (1984) Možnost využití *Medicago sativa* L. k rychlé a levné indikaci úniků zemního plynu. *Zprávy Československé botanické společnosti, Praha*, **19**, 58–60.
- PYŠEK A. & PYŠEK P. (1985) *Zjišťování úniků zemního plynu pomocí rostlin*. Transgas, Praha.
- PYŠEK P., PYŠEK A., TAFAT D. & CERHOVÁ I. (1984) *Aerokosmický průzkum území státu. Bericht über Forschungsauftrag Nr. 5*. Stavební geologie Praha.
- ROUSE J.W. et al. (1974) *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*. NASA Final Report, Goddard Space Flight Center, Maryland.
- TUCKER C.J. (1978) A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **44**, 1369–1380.
- TUCKER C.J. (1979) *A critical comparison of remote sensing and standing crop biomass*. NASA Technical Memorandum 80607, Goddard Space Flight Center, Maryland.
- TUCKER C.J., HOLBEN B.N., ELGIN J.H., Jr. & McMURTREY III J.E. (1979) *The relationship of red and photographic infrared spectral data to grain yield variation within a winter wheat field*. NASA Technical Memorandum 80318, Goddard Space Flight Center, Maryland.