

Nährstoffumsatz und Nährstoffbilanzen bei ackerbaulicher Nutzung pleistozäner Sandböden in Abhängigkeit von Nährstoffzufuhr und Fruchtfolge - Ergebnisse aus Müncheberger Dauerfeldversuchen

MARTIN SMUKALSKI†, JUTTA ROGASIK und SUSANNE OBENAUF

Institut für agrarrelevante Klimaforschung

1. Einleitung

Die Diskussion über administrative und steuerliche Maßnahmen zur Beschränkung des Düngereinsatzes bedarf, soweit gemessene oder vermutete Grundwasserkontamination durch Nährstoffverluste, bei Stickstoff in Verbindung mit Denitrifikation und N₂O-Emission aus Böden, und nicht die Überproduktion von Agrarerzeugnissen Ausgangsaspekt sind, weiterer objektiver Grundlagen.

Nachfolgend sollen spezifische Teilfragen des Nährstoffumsatzes in Abhängigkeit vom Nährstoffeinsatz dargestellt werden. Das betrifft insbesondere Auswirkungen des "Humusspiegels"

- auf An- bzw. Abreicherung organischer Bodensubstanz (OBS) in Relation zur Zufuhr organischer Primärschubstanz (OPS) in Form organischer Dünger aus der Tierhaltung und fruchtfolgeabhängigem Anfall von Koppel- und Nebenprodukten aus dem Pflanzenbau, daraus resultierende Wechselwirkungen,

- auf die horizontale oder einfache (Zufuhr-Entzug) und die vertikale oder ökologische Stickstoffbilanz (unter Berücksichtigung von An- bzw. Abreicherung im Boden) und
- auf die Entwicklung des Gehaltes des Bodens an pflanzenverfügbarem P und K in Abhängigkeit von ausgeglichener, über- oder überschüssiger horizontaler Bilanz dieser Nährstoffe.

Die Problematik ist gleichermaßen für die agrarklimatische Vorsorgeforschung relevant, da Einflüsse von Klimaänderungen auf die Bodenfruchtbarkeit über eine veränderte Humusdynamik wirksam werden, deren Resultante (vermehrter Humusabbau oder aber vermehrte OPS-Zufuhr und dadurch Humusanreicherung) noch nicht sicher abzusehen ist (Sauerbeck 1992 a).

2. Material und Methoden

Ausgewertet werden langjährige Feldversuche, durchgeführt von 1976 bis 1989/90 auf dem Versuchsfeld des For-

Tabelle 1: **Allgemeine Standortbedingungen Versuchsfeld Müncheberg**

Physisch-geographische Lage	14° 7,4' E, 52° 31,0' N, Ostbrandenburger Platte; Untereinheit Barnim-Lebus-Platte 62 m über NN
Geologische Entstehung	Grundmoräne aus fennoskandinavischem Ausgangsmaterial
Geologische Formation	Jungpleistozän
Geologisches Ausgangssubstrat der Bodenbildung	Geschiebesand über Unterem Diluvialsand und Geschiebemergel des Frankfurter Stadials der Weichselvereisung
Oberflächengestaltung	flachwellig
Native nacheiszeitliche Vegetation	Kiefern-Traubeneichen-Wald (Pino-Quercetus)
Bodenart	lehmgiger Sand
Bodenformen-Gesellschaft	Rosterde, Braunerde, Parabraunerde, Sandtieflehm-Fahlerde
FAO-Bodenklassifikation	Leptic Podzol, Luvic und Cambic Arenosol, Eutric Podzoluvisol
Klassenzeichen der Bodenschätzung	Sl 4 D

Tabelle 2: **Klimatisch-meteorologische Standortbedingungen**

Klimagebiet nach BOER	3 - stark kontinental beeinflusstes Binnenlandklima (ostdeutsches Binnenlandklima), Grenzbereich zum mecklenburgisch-brandenburgischen Übergangsklima								
Kontinentalitätsgrad nach JOHANSON	50								
Mittlere Windrichtungsverteilung in %	W	SW	NW	SO	S	O	N	NO	Still
	20	19	11	12	11	9	7	6	5
Mittlere relative Luftfeuchte	80	[%]							
Mittlere Sonnenscheindauer	1648	[h•a ⁻¹]							
Mittlerer Wasserdampfdruck	9,3	[kPa]							
Vegetationszeit (> 5 °C)	215	Tage							
Vegetationszeit (> 10 °C)	154	Tage							
Meteorologische Daten - langjähriges Mittel 1951...1980 und Streuung									
Monat	Niederschlagshöhe mm			Lufttemperatur °C					
	\bar{X}	max.	min.	\bar{X}	max.	min.			
01	33,9	99,3	9,8	-1,2	4,6	-8,9			
02	26,0	63,0	2,6	-0,8	4,3	-10,5			
03	28,2	58,0	7,0	2,6	6,4	-1,1			
04	35,1	81,9	8,7	7,4	10,7	4,6			
05	50,0	120,1	12,1	12,5	14,6	10,3			
06	63,3	244,1	18,2	16,6	18,7	14,7			
07	61,4	150,0	2,8	17,7	19,9	15,2			
08	57,8	212,5	2,6	17,0	19,6	15,5			
09	46,5	100,1	3,3	13,3	16,0	10,8			
10	40,7	113,1	0,1	8,7	11,4	6,4			
11	40,5	83,1	9,6	4,1	7,6	0,3			
12	43,6	115,8	5,4	0,6	4,7	-7,1			
Ges.	527,0			8,2					

schungszentrums für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg. Angaben zur Standortcharakteristik enthalten Tabellen 1 bis 4.

Diese Versuche waren korrespondierend zum 1963 angelegten statischen Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuch (Smukalski et al. 1990) komplementäre Bestandteile eines komplexen Experimentalsystems. Sie wurden als zweifaktorielle Spaltanlagen des Typs A/B-R in 4-facher Wiederholung als je 2 Parallelversuche mit Marktf Frucht- bzw. Futterfruchtfolge und einem Ackerflächenverhältnis gemäß Tabelle 5 auf Feldteilen mit unterschiedlichem Humusversorgungszustand durchgeführt. Die Teilstückgröße betrug 35 m² bei 140/01...02 bzw. 40 m² bei 140/04...05. Die Versuche liefen ohne Landwechsel. Die geprüften Düngerstufenkombinationen sind den Tabellen 5 bis 8 zu entnehmen. In den Versuchen 140/01...02 wurde Mineraldüngereinsatz bei N, P, K und Mg gestaffelt, in 140/04...05 nur N. Bezugsgröße für die Bemessung der Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung war Düngertrockenmasse: 2,0 t • ha⁻¹ • a⁻¹ in den Stufen Stallmist bzw. Güllefeststoff von 1,1 Großvieheinheiten (GV), sowie 4,0 t • ha⁻¹ • a⁻¹ in 2,2 GV, verabfolgt in doppelter Menge zu Hackfrucht oder Feldfutter. Die mittlere N-Zufuhr durch Wirtschaftsdünger betrug in Stufe 1,1 GV bei Stallmist 33 kg • ha⁻¹ • a⁻¹, bei Güllefeststoff 70 kg • ha⁻¹ • a⁻¹.

Zugeführte und durch Ernteprodukte (Haupt- und Koppelprodukte einschließlich Getreidestroh und Zuckerrübenblatt) abgeführte Nährstoffmengen (alle Angaben als Reinnährstoffe) wurden jährlich analytisch erfasst (N: Kjeldahl, K:

flammenphotometrisch, P: kolorimetrisch nach Gerick u. Kurmies, Mg: am AAS), Veränderungen betreffender Gehalte im Boden (Probenahme mit Bohrstock im Herbst nach Getreide, 20 Einstiche je Versuchsteilstück) periodisch bestimmt (C: trockene Verbrennung, N: Kjeldahl, P und K: Doppellactatauszug nach Egner und Riehm kolorimetrisch, Mg: CaCl₂-Auszug nach Schachtschabel am AAS, pH: KCl-Auszug).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Stickstoffbilanzen

Vollständige N-Bilanzen erfordern Meßwerte aller Quellen (Zufuhr durch organische und mineralische Dünger, Niederschläge, symbiontische und nicht-symbiontische N₂-Fixierung, N-Freisetzung aus OBS-Mineralisierung) und aller Senken (N-Entzüge durch Ernten, Auswaschung, Denitrifikation, temporäre N-Festlegung durch Immobilisierung und Humifizierung, ggf. auch Verluste durch Wasser- und Winderosion und durch NH₃-Verflüchtigung) sowie Erfassung der Änderungen aller Pool-Größen. Das Erfassen sämtlicher relevanter Kennwerte mit vertretbarem Aufwand ist unter Feldbedingungen kaum möglich. Das gilt auch für die ausgewerteten Versuche.

Nachfolgend werden N-Bilanzen auf der Basis ausgewählter Parameter diskutiert. Dabei werden im System Boden-

Tabelle 3: Physikalische Bodeneigenschaften (Versuchsfeld des Instituts für agrarrelevante Klimaforschung, Durchschnittswerte für Braunerde)

Bodenmerkmal				Maß- zahl	Bodentiefe cm 0...25, 25...50, 50...75, 75...100				
Körnung									
Ton ¹⁾	< 2,0			µm	%	5,0	4,6	5,2	6,3
Feinschluff	6,3	...	2,0	µm	%	2,6	2,8	2,0	3,1
Mittelschluff	20	...	6,3	µm	%	5,0	5,2	2,8	5,2
Grobschluff	63	...	20,0	µm	%	13,4	11,1	10,2	9,4
Feinsand	200	...	63,0	µm	%	44,5	46,5	43,5	41,5
Mittelsand	630	...	200,0	µm	%	23,5	24,8	30,6	29,7
Grobsand	2000	...	630,0	µm	%	6,0	5,0	5,7	4,8
Trockenrohdichte					g•cm ⁻³	1,52	1,60	1,75	1,75
Porenvolumen					Vol. %	42,0	39,0	33,0	33,0
Feldkapazität					mm	35,0	35,0	30,0	40,0
Äquivalentwelkepunkt					mm	11,0	10,0	13,0	15,0
Kationenaustauschkapazität					mval•100g ⁻¹	3,8	2,8	2,6	3,8
Gesamtgehalt									
Phosphor					%	0,047	0,021	0,028	0,039
Kalium					%	1,21	1,23	1,25	1,37
Calcium					%	0,30	0,25	0,28	0,63

¹⁾ Vorherrschend Dreischichtminerale, bestimmend Illit, beteiligt als Wechsellagerungsmineral Illit/Smectit, untergeordnet Smectit und Vermiculit

Pflanze nicht verwertete N-Mengen, also überhöhte Zuführen, nicht wie üblich als Bilanzplus, sondern unter ökologischem Aspekt als negativer Bilanzsaldo, als potentielle Verlustquelle ausgewiesen, weil dadurch die Gefahr des Aufbaus eines Ausdragspotentials als NO₃ (Maidl und Fischbeck 1987, Sauerbeck et al. 1989, Sturm et al. 1989, Fahnert 1989, Hege und Brandhuber 1990, Isermann et al. 1991) und auch eines zusätzlichen Verlustpotentials für N₂ und N₂O (Nieder et al. 1989, Haider und Heinemeyer 1990, Rheinbaben 1990, Isermann 1993) entsteht.

Einfache, nur die zwei Kennwertgruppen N-Zufuhr durch Dünger/ Saatgut und N-Entzug durch Ernten, also ausschließlich das Kompartiment Pflanze berücksichtigende Bilanzen (Tabellen 6 bis 7, Spalte 3), weisen für N-Einsatz bis 120...150 kg•ha⁻¹ (je nach Fruchtfolge und Düngungsregime) einen positiven Saldo aus. Dies ist in erster Näherung zu interpretieren mit geringer Verlustwahrscheinlichkeit infolge Überwiegens von Luft-N-Bindung und N-Zufuhr durch Niederschläge gegenüber Verlusten durch Auswaschung und Verflüchtigung. Damit wird vordergründig eine Aussage gestützt, die im Schrifttum mehrfach zu finden ist.

Ein modifiziertes Resultat ergibt sich in den Bilanzen nach Einbeziehen des Kompartiments Boden, der Berücksichtigung der einander entgegengesetzten Wirkungen von Humifizierung und Mineralisierung, also des Resultats der Tätigkeit heterotropher Mikroben (vertikale oder ökologische Bilanz, Tabellen 6 bis 9, Spalte 5). Danach sind bei vergleichbaren Größen für Zufuhr und Entzug differenziertere Beurteilungen der Verlustwahrscheinlichkeit erforderlich.

Der Gesamt-Stickstoffgehalt (N_t) der Versuchsböden, wie der eng damit korrelierte Gesamt-Kohlenstoffgehalt (C) Kennwert für die organische Bodensubstanz (OBS), wurde im Ver-

suchszeitraum bewirtschaftungsabhängig verändert (Tabellen 6 bis 7, Spalte 4). Analog zum Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuch (Smukalski et al. 1990), nachfolgend als Hauptversuch des Experimentalsystems bezeichnet, bestanden zu Versuchsende zwischen den Stufen der organischen Düngung signifikante Unterschiede, die im Oberboden ausgeprägter als im Unterboden waren. Zwischen den Stufen der Mineraldüngung konnten keine signifikanten Differenzen nachgewiesen werden. Eine gegenüber dem N-Entzug erhöhte Zufuhr von Mineraldünger-N reichte ohne einen dem Reproduktionsbedarf der OBS (Kundler et al. 1989) entsprechenden Einsatz organischer Primärsubstanz (OPS) nicht aus, den Boden-N-Gehalt zu stabilisieren, also den N-Vorrat aufrechtzuerhalten. Morel et al. (1984), Kübler et al. (1985), Wicke et al. (1990), Asmus (1992 a), Hülsbergen (1992) und Leithold (1992) kommen in ihren Untersuchungen zu gleichen Ergebnissen. Dagegen weisen Glendinning und Powlson (1991) für die wesentlich älteren Dauerdüngungsversuche des IACR Rothamsted, ausgenommen den Versuch Hoosfield, bei ausschließlicher N-Zufuhr durch Mineraldüngung gleichbleibende bzw. bei hohen Mineraldünger-N-Gaben auch steigende N_t-Gehalte aus. Das verweist auf die Bedeutung des Zeitfaktors bei der Interpretation von Dauerfeldversuchsergebnissen.

Statistisch gesicherte Wechselwirkungen zwischen organischer und mineralischer Düngung waren nicht nachzuweisen. Das entspricht Ergebnissen der ersten zwei Versuchsdokaden des Hauptversuches (Kundler und Smukalski 1983), in welchem sich ebenfalls erst nach längerer Durchführungsdauer als in den hier ausgewerteten Experimenten positive Interaktionen abzeichnen begannen (Smukalski und Rogasik 1992; analoge Ergebnisse: Ansorge und Pössneck 1992, Asmus 1992 b).

In den Böden unter Marktfruchtfolgen (140/01...02) sanken die N_t-Gehalte bei ausschließlicher OPS-Zufuhr als Wurzel-

Tabelle 4: **Stickstoffeinträge aus sedimentierenden Niederschlägen im Regenwasser (n = 10 a)**

Jahreszeit	Monate	mittlerer N-Eintrag kg•ha ⁻¹
Frühjahr	03...05	10,4
Sommer	06...08	17,3
Herbst	09...11	4,8
Winter	12...02	2,6
Summe		35,1

und Ernterückstände und Unterlassen jeglicher organischer Düngung unter den Anfangswert ab, ebenso, wenn auch weniger stark, bei Stoppelfruchtgründung in jedem zweiten Jahr (Abbildung 1). Die durchschnittlichen jährlichen Mineralisierungsraten betrugen in V 140/01 bei NPK 0,80 %, bei NPK+Gdg 0,41 %, in V 140/02 1,53 % bzw. 0,74 %. Wirtschaftsdünger von 1,1 GV je Hektar sicherte überwiegend die OBS-Reproduktion, Stallmist von 2,2 GV erhöhte den N-Gehalt.

In den Futterfruchtfolgen (140/04...05) stieg, bedingt durch beträchtlichen Anfall von Wurzelrückständen in Verbindung mit verminderter Bodenbearbeitungsintensität, der N-Gehalt in allen Düngungsvarianten an (ebenso: Smukalski 1968, Rauhe 1969, Johnston et al. 1981, Kundler 1982, Sauerbeck 1982, Steinbrenner und Smukalski 1984, Wicke et al. 1990). In den Varianten mit Wirtschaftsdünger verläuft der Anstieg allerdings nicht proportional zur eingesetzten organischen Düngertrockenmasse (Abbildung 1).

Tabelle 5: **Ackerflächenverhältnis ausgewerteter Feldversuche**

	Versuch 140/01	140/02	140/04	140/05
Getreide	53	53	28	28
Kartoffeln	20	33	36	36
Zuckerrüben	27	14	-	-
Ackerfuttergras	-	-	36	36

Unterschiedliche Mineralisierungsraten von OBS und Humifizierungsraten zugeführter OPS sind durch den "relativen Humusspiegel" zu Versuchsbeginn, ausgedrückt als Quotient N_i/Ton, zu erklären. N_i-Abreicherung bei nicht bedarfsdeckender Zufuhr von OPS war bei hohem N_i/Ton-Quotienten größer als bei niedrigem, die N_i-Anreicherung bei positiver Humusbilanz war bei niedrigem N_i/T-Quotienten zu Versuchsbeginn größer als bei hohem (Abbildung 1). Wie aus Abbildung 1 außerdem zu ersehen, kann in Abhängigkeit vom Humus-Ausgangszustand das gleiche Düngungssystem humusan- oder -abreichernd wirken (vergl. auch: Körschens 1990, Schnieder 1990). Dieser Aussage kommt im Hinblick auf Interpretation und Bewertung horizontaler N-Bilanzen besondere Bedeutung zu, berücksichtigt man die für Ackerschläge landwirtschaftlicher Betriebe nachgewiesene (Rogasik 1990) sehr große Variabilität im Verhältnis von OBS zu sorptionsaktiven Korngrößenfraktionen (Abbildung 2), resultierend aus der Bewirtschaftung in der Vergangenheit.

Tabelle 6: **Ökologische N-Bilanzen [kg • ha⁻¹ • a⁻¹] in Marktfruchtfolgen, Versuch 140/01 1976...1990**

Prüfglied	Zufuhr ¹⁾	Entzug	Entzug -Zufuhr 2 - 1	Differenz ²⁾ Boden 0...50 cm	Bilanz ³⁾ 3 + 4
	1	2	3	4	5
1.1 NPK	69	100	31	-22	9
1.2 NPK	114	126	12	-13	-1
1.3 NPK	161	153	-8	-11	-19
1.4 NPK	207	158	-49	-17	-66
2.1 NPK+Gdg ³⁾	93	113	20	-9	11
2.2 NPK+Gdg	138	140	2	-2	0
2.3 NPK+Gdg	185	162	-23	-8	-31
2.4 NPK+Gdg	231	175	-56	-3	-59
3.1 NPK+Stm 1,1 ⁴⁾	90	109	19	15	34
3.2 NPK+Stm 1,1	136	132	-4	24	20
3.3 NPK+Stm 1,1	182	157	-30	24	-6
3.4 NPK+Stm 1,1	229	173	-56	32	-24
4.1 NPK+Stm 2,2 ⁵⁾	116	101	-15	23	8
4.2 NPK+Stm 2,2	162	137	-25	34	9
4.3 NPK+Stm 2,2	208	153	-55	28	-27
4.4 NPK+Stm 2,2	255	159	-96	46	-50

¹⁾ N aus Mineraldünger, Stallmist, Saat- und Pflanzgut

²⁾ Endwert minus Anfangswert

³⁾ Gründüngung vor Hackfrucht

⁴⁾ Stallmist von 1,1 GV•ha⁻¹

⁵⁾ Stallmist von 2,2 GV•ha⁻¹

⁶⁾ negative Werte bedeuten N-Verlustrisiko

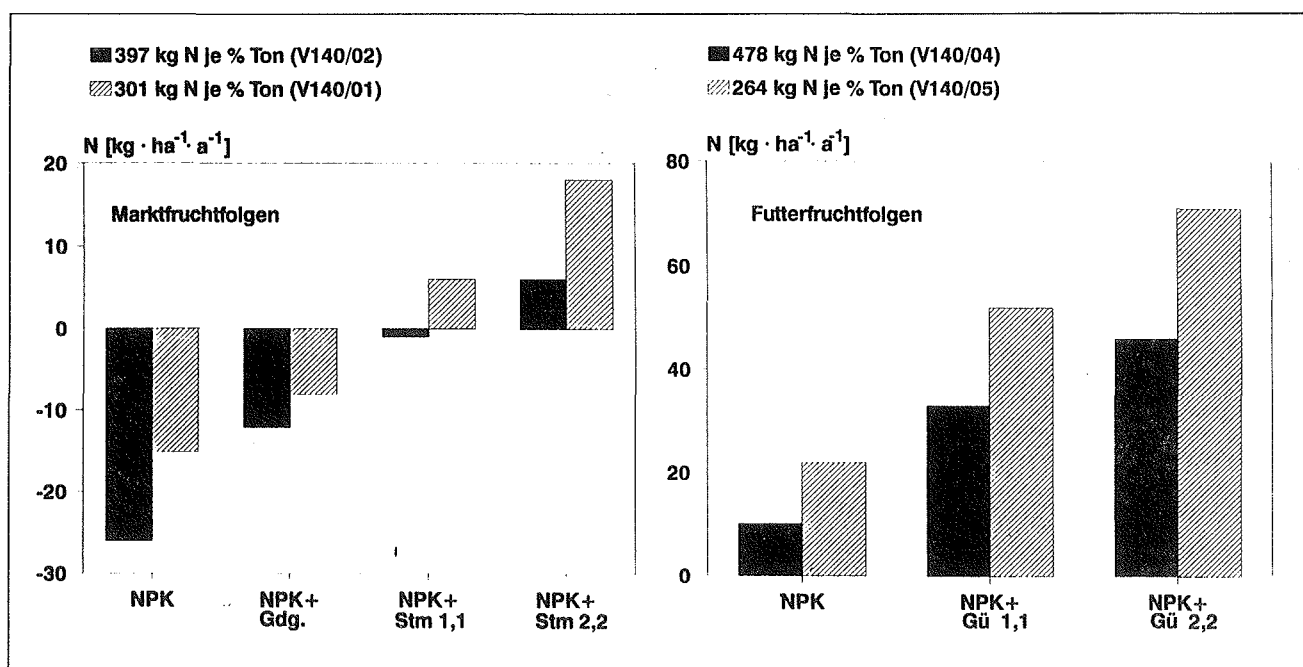
Tabelle 7: Ökologische N-Bilanzen [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] in Marktfruchtfolgen, Versuch 140/02 1976...1990

Prüfglied	Zufuhr ¹⁾	Entzug	Entzug -Zufuhr 2 - 1	Differenz ²⁾ Boden 0...50 cm	Bilanz ³⁾ 3 + 4
	1	2	3	4	5
1.1 NPK	61	101	40	-33	7
1.2 NPK	104	110	6	-35	-29
1.3 NPK	147	128	-19	-38	-54
1.4 NPK	189	131	-58	-35	-93
2.1 NPK+Gdg ³⁾	72	91	19	-19	0
2.2 NPK+Gdg	115	121	6	-13	-7
2.3 NPK+Gdg	157	133	-24	-4	-28
2.4 NPK+Gdg	200	142	-58	-12	-70
3.1 NPK+Stm 1,1 ⁴⁾	106	99	-7	1	-6
3.2 NPK+Stm 1,1	148	123	-25	4	-21
3.3 NPK+Stm 1,1	191	131	-60	4	-54
3.4 NPK+Stm 1,1	234	140	-94	7	-87
4.1 NPK+Stm 2,2 ⁵⁾	150	107	-43	14	-29
4.2 NPK+Stm 2,2	192	125	-67	8	-59
4.3 NPK+Stm 2,2	235	140	-95	8	-87
4.4 NPK+Stm 2,2	278	149	-129	8	-121

Erläuterungen siehe Tabelle 6

Einblicke in mögliche Konsequenzen vermittelt der Vergleich Tabellen 6 bis 9, Spalte 3 zu 5. Aus den zusammengefaßten Ergebnissen ist zu ersehen, daß in den geprüften Marktfruchtfolgen auf Böden mit gutem Humusversorgungszustand die unproblematische N-Zufuhr gemäß ökologischer N-Bilanz um 20...40 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ unter der Zufuhr-Entzug-Differenz liegt, bei Einsatz von Wirtschafts- und Mineraldüngern wiederum deutlich niedriger als bei alleiniger Mineraldüngung. Letzteres kann, ohne Beachtung der Ursache - N-Immobilisierung infolge erweiterter OBS-Reproduktion - zu Fehlinterpretationen

hinsichtlich der N-Verluste aus organischen Düngern führen. Für Böden mit niedriger Humusversorgung gilt entsprechend wie oben bezüglich der Differenzen zwischen den Bilanzierungsergebnissen für Mineraldünger, es ist aber ein höherer Einsatz von N in Form organischer Dünger aufgrund der zu erwartenden N-Immobilisierung durch Humusanreicherung problemlos möglich. Bei Umstellung von Markt- auf Futterfruchtfolgen liegt der wahrscheinlich tolerierbare N-Einsatz nach ökologischen Bilanzen höher als gemäß Zufuhr-Entzugs-Bilanzen errechnet.

Abbildung 1: N-An- bzw. Abreicherung [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] in 0...25 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von Düngeregime und N_t : Ton-Quotient des Bodens zu Versuchsbeginn; Markt- und Futterfruchtfolgen

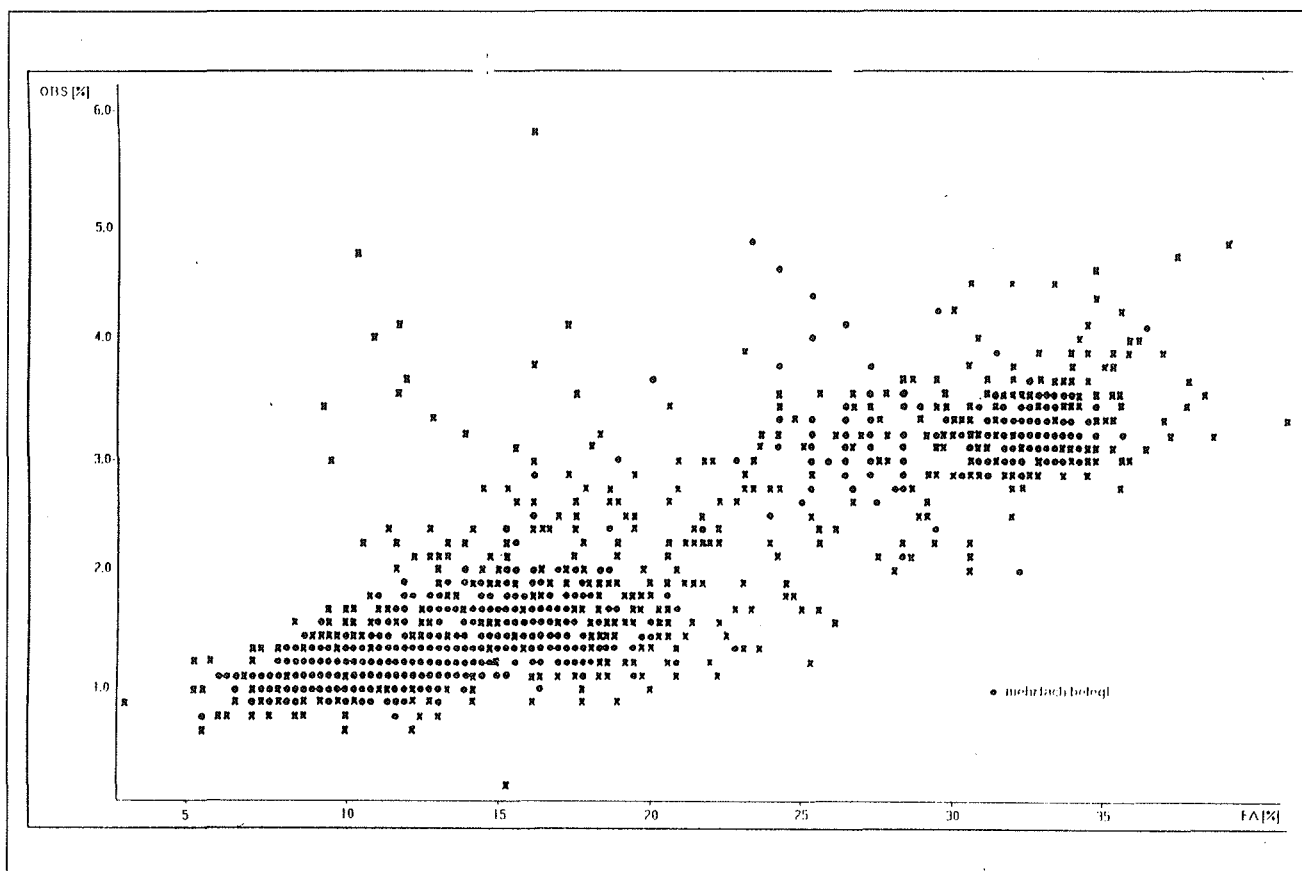


Abbildung 2: Höhe des OBS-Gehaltes von Ackerböden in Abhängigkeit vom Gehalt an Ton und Feinschluff (FA): Untersuchungsergebnisse aus 2737 Erhebungen auf Ackerschlägen landwirtschaftlicher Betriebe in Ostdeutschland

Als N-Eintrag durch Immissionen (Tabelle 4) wurden für den östlich des Industrieballungszentrums Berlin gelegenen Versuchsstandort Müncheberg höhere Werte ermittelt, als für landwirtschaftlich genutzte Flächen Südostniedersachsens (D ä m m g e n et al. 1992) nachgewiesen, aber deutlich niedrigere als für das mitteldeutsche Industriegebiet Halle-Merseburg angegeben (K ö r s c h e n s 1991). Die gemessene N-Zufuhr durch Niederschläge (Tabelle 4) entspricht näherungsweise den für Ackerböden angegebenen N-Verlusten durch Denitrifikation (B e n k i s e r et al. 1987, N i e d e r et al. 1989, v. R h e i n b a b e n 1990). Unterstellt man Parität der geringeren Bilanzgrößen Zufuhr durch nicht symbiontische N_2 -Fixierung sowie Verluste durch Erosion und NH_3 -Verflüchtigung, so müssen die als Negativsaldo ausgewiesenen N-Überschüsse der ökologischen N-Bilanz als akut auswaschungsgefährdet eingeschätzt werden. Bei einer mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsrate von 180 mm ist danach ab $20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ N-Überschuß mit Nitratgehalten im Sickerwasser $> 50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ zu rechnen.

Ein anderes Problem, das hier nicht explizit behandelt werden soll, sind die Auswirkungen differenzierten N-Einsatzes auf den N-Gehalt und damit die Qualität der Ernteprodukte. Zusammenfassend ist dazu festzustellen, daß die bis zur jeweils höchsten geprüften N-Einsatzstufe ansteigenden N-Entzüge bei Erträgen, deren Maximum in den meisten Prüfgliedkombinationen in der dritten N-Stufe erreicht wurde, bei stagnierendem Zuwachs oder Ertragsdepression in der vierten, das Ergebnis nahezu linear ansteigender N-Gehalte in der Erntetrocknenmasse waren (S m u k a l s k i et al. 1990). Daraus resultierende Veränderungen der Handelsqualität der Ernteprodukte sind differenziert zu bewerten - positiv (stei-

gender Rohprotein- und damit Klebergehalt im Winterweizenkorn), problematisch (steigender Rohprotein- aber sinkender Zuckergehalt im Ackerfuttergras) als auch negativ (überhöhter Rohproteingehalt im Sommergerstenkorn; sinkender Saccharosegehalt, Zunahme schädlichen Stickstoffs in Zuckerrüben; Geschmacksbeeinträchtigung und sinkender Stärkegehalt der Kartoffel). Die relativ große Differenzierung der N-Gehalte der Ernteprodukte in Abhängigkeit von der Düngerrhöhe und damit der N-Entzüge je Einheit Ernteprodukte (Tabelle 10) verweist auf einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor bei der Aufstellung von N-Zufuhr-Entzug-Bilanzen für den Fall, daß, wie mangels Untersuchungsdaten üblich, zum Schätzen der Entzugsseite mittlere N-Tabellenwerte der Fruchtarten genutzt werden.

3.2 Horizontale Phosphorbilanz und DL-lösliches P im Boden

Die P-Entzüge durch Ernteprodukte waren bei Futterfruchtfolgen größer als bei Marktfruchtfolgen. Sie variierten prüfgliedbezogen in Abhängigkeit von der durch den N-Einsatz bestimmten Ertragshöhe im Mittel der Fruchtfolge von 27 bis $36 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ in V 140/01, 20 bis $28 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ in V 140/02, 25 bis $38 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ in V 140/04 und 26 bis $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ in V 140/05. Die Salden der einfachen P-Bilanz wiesen in allen Prüfgliedern der vier Versuche Düngerüberschüsse aus, Variationsbreite 1 bis $140 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ P (Tabelle 11). Daraus resultierten P_{DL} -Gehaltserhöhungen im Boden (Abbildung 3). Mit der linearen Regression wird bei zusammenfassender Auswertung der vier Versuche eine Beziehung zwischen kumulati-

Tabelle 8: Ökologische N-Bilanzen [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] in Futterfruchtfolgen, Versuch 140/04; 1976...1989

Prüfglied	Zufuhr ¹⁾	Entzug	Entzug -Zufuhr 2 - 1	Differenz ²⁾ Boden 0...50 cm	Bilanz ⁵⁾ 3 + 4
	1	2	3	4	5
1.1 NPK	141	148	7	9	16
1.2 NPK	201	173	-28	12	-16
1.3 NPK	261	199	-62	10	-52
1.4 NPK	321	210	-111	10	-101
2.1 NPK+Gü 1,1 ³⁾	157	127	-30	26	-4
2.2 NPK+Gü 1,1	218	160	-58	29	-29
2.3 NPK+Gü 1,1	278	198	-80	28	-52
2.4 NPK+Gü 1,1	338	206	-132	28	-104
3.1 NPK+Gü 2,2 ⁴⁾	177	108	-69	39	-30
3.2 NPK+Gü 2,2	237	139	-98	38	-60
3.3 NPK+Gü 2,2	291	173	-118	48	-70
3.4 NPK+Gü 2,2	351	192	-159	45	-114

¹⁾ N aus Mineraldünger, Güllefeststoff, Saat- und Pflanzgut
²⁾ Endwert minus Anfangswert
³⁾ Güllefeststoff von 1,1 GV·ha⁻¹; ⁴⁾ Güllefeststoff von 2,2 GV·ha⁻¹
⁵⁾ negative Werte bedeuten N-Verlustrisiko

vom P-Überschuß und P_{DL} ausgewiesen, die 92 % der Varianz erfaßt. Daraus errechnet sich als Langzeiteffekt, daß 100 kg·ha⁻¹ P mehr zugeführt als mit den Ernten entzogen, den P_{DL} in 0 bis 25 cm Bodentiefe um 6 mg·kg⁻¹ erhöhen bzw. 16 kg·ha⁻¹ zusätzlicher Dünger-P erforderlich sind zur Anhebung des P_{DL} -Gehaltes um 1 mg·kg⁻¹ Boden. Damit war unter den beschriebenen Versuchsbedingungen der erforderliche P-Einsatz zur meliorativen Düngung, einer Maßnahme, die allerdings nur für Böden mit starkem P-Mangel (Gehaltsklasse A) relevant ist, höher als von Kerschberger und Richter (1987) auf der Grundlage zusammenfassender Auswertungen von P-Steigerungsversuchsreihen für sandige Böden mitgeteilt.

P-Überschuß verursachte als Folge vertikaler Verlagerung aus dem Oberboden durch Lösungstransport und biologische Tätigkeit eine P-Anreicherung des Unterbodens ($r^2 = 0,82$ der

linearen Regression für mg·kg⁻¹ P in 25 bis 50 cm Bodentiefe [y] in Beziehung zu 0 bis 25 cm [x]: $y = -13,2 + 0,77 x$). P-Anreicherung des Unterbodens ist aus ackerbaulicher Sicht als nicht vorteilhaft zu bewerten, da bei ausreichendem P-Gehalt der Ackerkrume die Bedeutung des Unterbodens für die P-Versorgung der Pflanzen unbedeutend ist (Richter et al. 1977).

Im Schrifttum wird, aus Modellversuchen abgeleitet, auf Sonderwirkungen organischer Düngestoffe verwiesen (Amberger und Amann 1984, Sibanda und Young 1986):

- verbesserte physikalische Bodeneigenschaften infolge erhöhter biologischer Aktivität,
- Bildung organischer Chelatoren und damit erhöhte P-Mobilität,

Tabelle 9: Ökologische N-Bilanzen [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] in Futterfruchtfolgen, Versuch 140/05; 1976...1989

Prüfglied	Zufuhr ¹⁾	Entzug	Entzug -Zufuhr 3 - 2	Differenz ²⁾ Boden 0...25 cm	Bilanz ⁵⁾ 3 + 4
	1	2	3	4	5
1.1 NPK	155	150	-5	18	13
1.2 NPK	219	182	-37	20	-17
1.3 NPK	283	205	-78	24	-5
1.4 NPK	347	212	-135	29	-106
2.1 NPK+Gü 1,1 ³⁾	161	143	-18	48	30
2.2 NPK+Gü 1,1	225	174	-51	53	2
2.3 NPK+Gü 1,1	289	198	-91	54	-37
2.4 NPK+Gü 1,1	352	220	-132	55	-77
3.1 NPK+Gü 2,2 ⁴⁾	168	112	-56	69	13
3.2 NPK+Gü 2,2	232	142	-90	65	-25
3.3 NPK+Gü 2,2	296	179	-117	71	-46
3.4 NPK+Gü 2,2	360	199	-161	71	-90

Erläuterungen siehe Tabelle 8

Tabelle 10: N-Entzüge je Einheit Ernteprodukt
[kg N • GE⁻¹] im Mittel der Versuchsdauer

Prüfglied ¹⁾	V 140/01	V 140/02	V 140/04	V 140/05
1.1	1,25	1,61	2,36	2,65
1.2	1,43	1,60	2,58	2,78
1.3	1,54	1,67	2,76	3,03
1.4	1,71	1,84	2,97	3,19
2.1	1,34	1,48	2,38	2,61
2.2	1,48	1,16	2,41	2,68
2.3	1,62	1,77	2,90	2,91
2.4	1,79	1,88	2,92	3,04
3.1	1,26	1,44	2,15	2,30
3.2	1,39	1,60	2,25	2,44
3.3	1,63	1,73	2,46	2,65
3.4	1,66	1,85	2,68	2,83
4.1	1,23	1,47		
4.2	1,40	1,63		
4.3	1,51	1,79		
4.4	1,55	1,87		

¹⁾ Erläuterungen siehe Tabellen 6 bis 9

- Desorption von P-Ionen durch anorganische Anionen wie die der Huminsäuren und Fulvosäuren oder Blockierung von deren Adsorption.

Das konnte mit den Ergebnissen ausgewerteter Feldversuche, wie die Regressionskoeffizienten der Beziehung zwischen kumulativem P-Bilanzüberschuß und DL-löslichem P

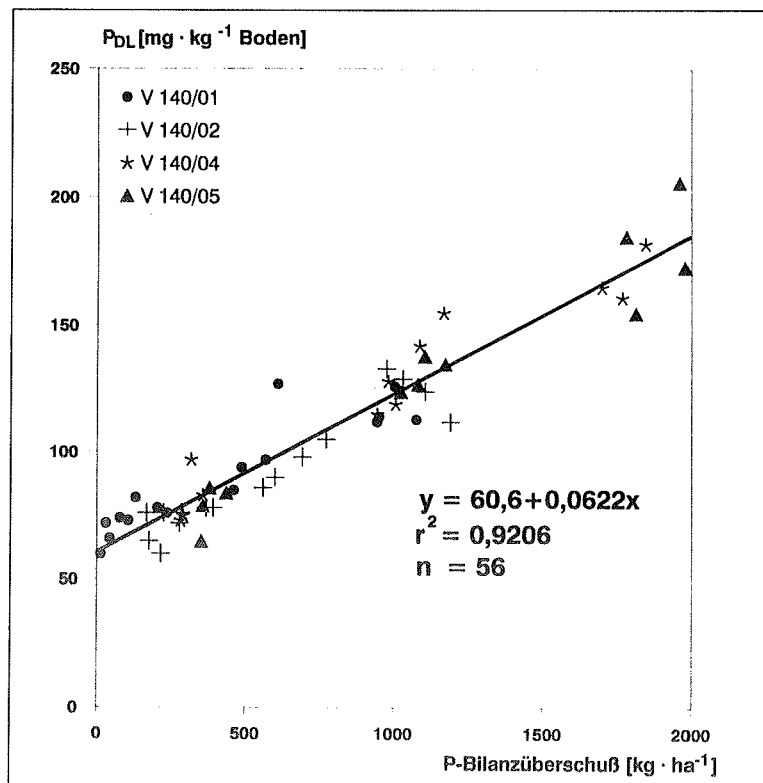


Abbildung 3: Beziehung zwischen kumulativem P-Bilanzüberschuß und Gehalt des Bodens an DL-löslichem P in 0...25 cm Bodentiefe nach 25 Versuchsjahren

im Boden, separat für Düngungskombinationen ausgewiesen, zeigen, tendenziell bestätigt werden.

NPK	$y = 72,9 + 0,020 x$	$r^2 = 0,11$
NPK+organ. Dgg. 1.1	$y = 57,3 + 0,068 x$	$r^2 = 0,77$
NPK+organ. Dgg. 2.2	$y = 55,6 + 0,065 x$	$r^2 = 0,80$

Es ist aber anzumerken, daß, abweichend von Modellunter-suchungsergebnissen, in natürlichen Agrarökosystemen gegenläufige Reaktionen bei Um-, Auf- und Abbau organischer Substanzen eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen. Direkter und indirekter Förderung der P-Mobilisierung durch veränderte mikrobielle und physikalische Verhältnisse steht P-Immobilisierung durch selektive P-Adsorption an neu gebildeten Humuskomplexen sowie infolge mikrobiellen Einbaus entgegen (Amberger und Mann 1984).

3.3 Horizontale Kaliumbilanz und DL-lösliches K im Boden

Interpretationsprobleme bereiten die K_{DL}-Befunde der dargestellten Versuche. Bedingt durch gestaffelte K-Zuführung und infolge N-düngerinduzierter Ertragshöhen und damit K-Entzugsmengen (160 bis 259 kg•ha⁻¹•a⁻¹ in V 140/01, 117 bis 166 kg•ha⁻¹•a⁻¹ in V 140/02, 153 bis 237 kg•ha⁻¹•a⁻¹ in V 140/04 und 156 bis 255 kg•ha⁻¹•a⁻¹ in V 140/05) variierten die K-Bilanzen (Tabelle 12) von Unterversorgung bis zu erheblichem Düngerüberschuß. Daraus waren gemäß Ergebnissen anderer Autoren aus K-Düngungsversuchen ceteris paribus (Knauer 1968, Seeboldt 1983, Vogl und Niederbudde 1984, Görlitz 1986, Kerschberger und Richter 1992) im Sandboden des Versuchsstandortes deutliche, gerichtete K-Konzentrationsänderungen zu erwarten.

Beziehungen zwischen kumulativem K-Bilanzüberschuß und Gehalt des Bodens an lactat-löslichem K analog zu den Ergebnissen des Hauptversuchs (Smukalski und Rogasik 1992) bestanden im V 140/02, dem Experiment mit Marktruchtfolge sowie geringer OBS-Anreicherung in den Varianten mit erhöhtem OPS-Einsatz, also näherungsweise entsprechenden Bedingungen zum Hauptversuch (Abbildung 4). Gleichzeitige K-Anreicherung des Unterbodens in Beziehung zum Oberboden ($r^2 = 0,48$, $y = 19,3 + 0,51 x$) durch vertikale Verlagerung (Richter et al. 1977, Seeboldt 1983, Garz et al. 1992) ist weniger kritisch als bei P zu bewerten, da bis zu 50 % des Gesamt-K-Bedarfs der Pflanzen aus dem Unterboden aufgenommen werden (Nobili et al. 1990). Allerdings muß, wie Ergebnisse aus Lysimeterversuchen zeigen (Herrman et al. 1983, Ruszkowska et al. 1984, Asmus und Mutscher 1992), nach Absättigung des Bindungsvermögens der Bodenkolloide im Unterboden mit höheren K-Verlusten durch Auswaschung gerechnet werden.

Im V 140/01, dem zweiten Versuch mit Marktruchtfolge aber infolge niedriger OBS-Anfangswerte bei erhöhter OPS-Zufuhr ansteigenden OBS-Werten, bestand kein Zusammenhang zwischen überwiegend negativer K-Bilanz und abnehmenden Boden-K_{DL}-Werten, wie r²-Werte der linearen Regression von 0,09 für den Ober- und von 0,12 für den Unterboden sowie quasilinearer Regressionen ($y = a \cdot b x$ bzw. $y = a \cdot x^b$) von 0,20

bzw. 0,12 für OB und von 0,18 bzw. 0,26 für UB ausweisen.

Unter den beiden Futterfruchtfolgen sanken ungeachtet erheblicher kumulativer Bilanzüberschüsse (11 bis 81 kg·ha⁻¹·a⁻¹ in V 140/04 bzw. 11 bis 109 kg·ha⁻¹·a⁻¹ in V 140/05) die K-Mengen des Bodens in allen Varianten gegenüber den Anfangswerten kontinuierlich ab (-23,3 bis -63,5 kg·ha⁻¹·a⁻¹ bei r² von 0,79 bis 0,99 in V 140/04 sowie -14,3 bis -29,3 kg·ha⁻¹·a⁻¹ bei r² von 0,59 bis 0,95 in V 140/05). Zwischen K-Bilanzüberschuß und K_{DL}-Werten am Ende der Versuchszeit konnten keine Beziehungen nachgewiesen werden (in V 140/04 r² = 0,15, in V 140/05 r² = 0,31).

Zu den Ursachen können vorerst keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Da K hauptsächlich anorganisch gebunden in den Kristallgittern und Zwischenschichten der Tonminerale vorkommt (Scheffert/Schachtschabel 1992), die humifizierte organische Bodensubstanz als K-Sorbent wenig bedeutsam und der Anteil der K-Festlegung in Mikrobenbiomasse gering ist, sind Erklärungen im Wechselwirkungsgefüge OBS und Tonminerale zu suchen. Befunde von Leinweber et al. (1991) aus Dauerdüngungsversuchen deuten darauf hin, daß die K-Nachlieferung aus Zwischenschicht-K der Tonminerale durch oberflächlich und möglicherweise auch interlaminar gebundene organische Komponenten herabgesetzt wird. Mineralisch adsorbierte organische Substanzen wirken als Diffusionsbarrieren und haben damit einen "konservierenden" Effekt auf die K nachliefernden Minerale.

Größere Bedeutung dürfte der mit zunehmender OBS ansteigenden Kationenaustauschkapazität und dabei der Selektivität von Ton und OBS für K⁺ und Ca⁺⁺ zukommen, wie von Johnston (1986) in Rothamstedter Dauerversu-

chen nachgewiesen. Danach macht offensichtlich das selektiv an die OBS sorbierte Ca⁺⁺ an den Tonmineralen planare Sorptionsstellen für K⁺ frei.

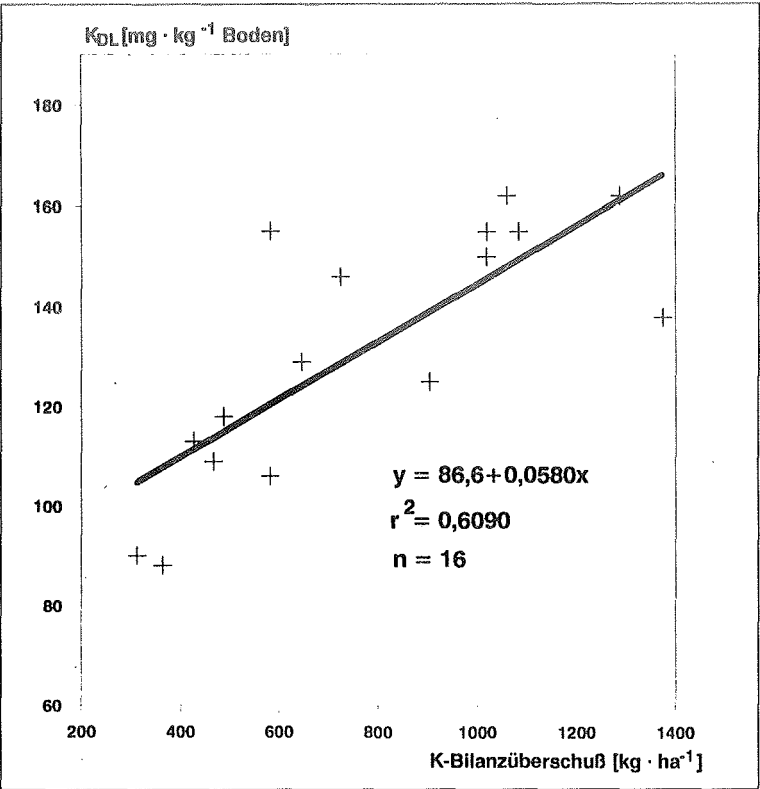


Abbildung 4: Beziehung zwischen kumulativem K-Bilanzüberschuß und Gehalt des Bodens an DL-löslichem K in 0...25 cm Bodentiefe nach 25 Versuchsjahren, V 140/02

Tabelle 11: P-Zufuhr durch Dünger, P-Entzug durch Ernteprodukte und P-Saldo [kg · ha⁻¹ · a⁻¹]

Prüf- glied ¹⁾	V 140/01			V 140/02			V 140/04			V 140/05		
	Zufuhr	Entzug	Saldo	Zufuhr	Entzug	Saldo	Zufuhr	Entzug	Saldo	Zufuhr	Entzug	Saldo
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.1	29	27	2	31	20	11	55	30	25	60	29	31
1.2	35	30	5	37	22	15	55	33	22	60	33	27
1.3	41	32	9	43	24	19	55	35	20	60	35	25
1.4	47	31	16	49	23	26	55	35	20	60	35	25
2.1	29	28	1	31	20	11	105	27	78	114	30	84
2.2	35	32	3	37	23	14	105	30	75	114	35	79
2.3	41	34	7	43	24	19	105	35	70	114	36	78
2.4	47	33	14	49	24	25	105	38	67	114	40	74
3.1	59	28	31	60	22	38	155	25	130	168	26	142
3.2	65	32	33	66	26	40	155	31	124	168	31	137
3.3	71	33	38	72	26	46	155	36	119	168	36	132
3.4	77	36	41	78	26	52	155	38	117	168	39	129
4.1	91	28	63	90	24	66						
4.2	97	34	63	95	27	68						
4.3	103	36	67	101	28	73						
4.4	109	37	72	107	28	79						

¹⁾ Erläuterungen siehe Tabellen 6 bis 9

Tabelle 12: **K-Zufuhr durch Dünger, Saat- und Pflanzgut, K-Entzug durch Ernteprodukte und K-Saldo**
[kg • ha⁻¹ • a⁻¹]

Prüf- glied ¹⁾	V 140/01			V 140/02			V 140/04			V 140/05		
	Zufuhr	Entzug	Saldo	Zufuhr	Entzug	Saldo	Zufuhr	Entzug	Saldo	Zufuhr	Entzug	Saldo
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.1	150	182	-32	151	120	31	261	204	57	284	197	87
1.2	179	212	-33	180	134	46	261	215	46	284	220	64
1.3	208	233	-25	209	146	63	261	231	30	284	232	52
1.4	237	219	18	238	145	93	261	237	24	284	228	56
2.1	139	188	-49	141	117	24	248	183	65	266	198	68
2.2	165	227	-62	170	142	28	248	216	32	266	225	41
2.3	197	240	-43	198	156	42	248	224	24	266	229	37
2.4	226	254	-28	227	157	70	248	233	15	266	255	11
3.1	162	179	-17	163	129	34	236	153	83	265	156	109
3.2	191	214	-23	189	150	39	236	191	45	265	195	70
3.3	220	221	-1	221	150	71	236	218	18	265	220	45
3.4	242	256	-14	244	155	89	236	224	12	265	236	29
4.1	186	166	20	174	138	36						
4.2	215	220	-5	203	152	51						
4.3	244	245	-1	232	158	74						
4.4	273	259	14	261	166	95						

¹⁾ Erläuterungen siehe Tabellen 6 bis 9

4. Schlußbetrachtungen

Die Nährstoffkonversion im Boden, einschließlich der damit einhergehenden Prozesse der Immobilisierung und Mobilisierung pflanzenverfügbarer Nährstoffformen, ist eine unsichere Größe bei der Bewertung von Nährstoffkreisläufen, insbesondere hinsichtlich der Schätzung kontaminationsgefährdeter Nährstoffresiduen. Die Nichtberücksichtigung dieser Tatsache - das geschieht bei Gegenüberstellung von Nährstoff-In- und -Outputs in einfachen Zufuhr-Entzug-Bilanzen - kann zu Fehlinterpretationen führen. Die Nährstoffkonversion ist eng mit der Dynamik der Umsetzungsvorgänge der organischen Bodensubstanz verknüpft. Im Ergebnis mikrobieller Umsetzung der OBS, deren Intensität mit den klimatischen Bedingungen in Zusammenhang steht, werden Nährstoffe aus der organischen und auch der anorganischen Bodensubstanz freigesetzt, andererseits durch Sorption und Kationenaustausch gebunden. Die Gründe für diese Prozesse sind physikalischer, chemischer, biochemischer und physiologischer Art (Johnston 1991, Sauerbeck 1992 b).

Dominierende Richtung und Ausmaß sind mit dem bewirtschaftungsabhängigen Prozeßverlauf zur OBS-An- bzw. -Abreicherung zu erklären. Ausreichende Kenntnis dieser Vorgänge ist eine Voraussetzung für Modellansätze zur Schätzung der Beeinflussung von Faktoren der Bodenfruchtbarkeit durch Klimaveränderung.

Abschließend bleibt zustimmend zu Haider (1992) festzustellen, daß noch erheblicher Forschungsbedarf im Grundlagenbereich besteht, die Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen und hierbei besonders der Zufuhr organischer und anorganischer Dünger auf Bodenfruchtbarkeit und Nährstoffkreisläufe zu verstehen. Ein unentbehrliches Medium zum Erkenntnisgewinn auf diesem Gebiet und zur Verifizierung von Modelluntersuchungsergebnissen bleiben die Dauerfeldversuche.

Zusammenfassung

In vier 1976 bis 1989/90 auf lehmigem Sandboden durchgeführten Dauerfeldversuchen mit unterschiedlichem N_i-Versorgungszustand (N_i als Kenngröße für Bodenhumus), gestaffeltem Einsatz organischer und mineralischer Dünger in Markt- und Futterfruchtfolgen wurden NPK-Zufuhr durch Dünger, N-Eintrag durch Niederschlag (\bar{x} 35 kg•ha⁻¹•a⁻¹), NPK-Entzüge durch abgeführte Ernteprodukte sowie Veränderungen der Gehalte des Bodens an N_i und doppelactatlöslichem P (P_{DL}) und K (K_{DL}) analytisch bestimmt.

Fruchtfolge und organische Düngung hatten deutlichen, die Höhe des Mineraldüngereinsatzes keinen signifikanten Einfluß auf den N_i-Gehalt des Bodens. Das Ausmaß der N_i-Veränderung im Versuchszeitraum wurde in Relation zum N_i-Ausgangsniveau, quantifiziert durch den Quotienten N_i : Ton, modifiziert. In Abhängigkeit vom so charakterisierten Humusversorgungszustand war bei gleichem Düngungsregime N_i-Anreicherung oder -Abreicherung möglich. Daraus resultieren Folgerungen für die Aussagefähigkeit von N-Bilanzen. Bezogen auf die ökologische N-Bilanz, die den N-Umsatz im Boden berücksichtigt, differierte die einfache N-Zufuhr (Dünger/Saatgut)-Entzug(Ernten)-Bilanz je nach Düngereinsatz und Fruchtfolge um -33 bis +71 kg•ha⁻¹•a⁻¹N. Daraus folgt, besonders unter Berücksichtigung der nachgewiesenen, großen Variabilität im Humusversorgungszustand von Acker-schlägen landwirtschaftlicher Betriebe, daß die häufig für Kalkulationszwecke genutzte N-Zufuhr-Entzugs-Bilanz zur qualifizierten Schätzung von auswaschungsgefährdeten N-Überhängen nicht geeignet ist.

Zwischen kumulativem Überschuß der P-Zufuhr-Entzugs-Bilanz und Veränderung des Gehaltes an P_{DL} in Ober- und Unterboden bestand eine enge Korrelation. Interpretationsprobleme bereiteten die K_{DL}-Befunde. K_{DL}-Veränderungen in Relation zum K-Bilanzsaldo waren nur in Varianten ohne wesentliche Veränderungen von N_i nachzuweisen. Bei Humus-

anreicherung sanken auch bei deutlichem K-Bilanzüberschuß die K_{DL} -Gehalte des Bodens im Versuchszeitraum kontinuierlich ab. Mögliche Begründungen werden diskutiert.

Turnover and balance of nutrients of arable farming on sandy soils in dependence on supply of nutrients and crop rotation - Results of long term field experiments at Müncheberg

From 1976 to 1989/90 four long term experiments were implemented on loamy sand with different content of N_t (N_t as a mark for humus), application of rising amounts of organic manure and mineral fertilizer and crop rotations with different percentages of cereals and forages. In the experiments the input of NPK with fertilizing, deposition of nitrogen with precipitation ($35 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), NPK uptake in harvested yield and the contents of P and K (Ca lactate extraction) were analysed.

Effect of crop rotation and organic manure on content of N_t in soil was plainly recognizable. The effect of increasing amounts of mineral fertilizer was not significant. The changing of N_t in soil was modified by the degree of saturation with humus, described as quotient N_t : clay. Equal fertilizing treatments may cause an increase or decrease of the N_t -content in relation to humus saturation. There are significant differences between simple or horizontal N-balances (N-supply with fertilizer and seeds/N-uptake with yield) and ecological N-balance (consideration of the N-turnover in soil). In our experiments the differences between ecological and simple N-balance reach from -33 to $+77 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ N in dependence on fertilization and crop rotation. Therefore it has to be concluded that the simple N-balance is not useful to characterize the risk of nitrate-leaching.

The P-eutrophication in the soil is a function of P-supply and uptake. The cumulative surplus of P-balance and the change in soil-P-content of top- and subsoil are highly correlated. The interpretation of the results appears concerning the K content in soil problematically. Alterations in K content are correlated with K-balance only on plots without change of N content in soil. We observed a continuous decrease of K content in soil also in case of high surplus of K and increasing organic matter. Possible explanations were discussed.

Literatur

A m b e r g e r, A.; A m a n n, Ch.: Wirkungen organischer Substanzen auf Boden- und Düngerphosphat. Teil 2: Einfluß verschiedener organischer Stoffe auf die Mobilität von Dünger-P. - Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 147 (1984) 1, S. 60-70.

A n s o r g e, H.; P ö s s n e c k, J.: Untersuchungen über den Einfluß einer langjährig differenzierten organischen Düngung auf die Wirkung der mineralischen N-Düngung und den Boden auf drei Standorten. - In: Tag.-Ber. z. Symposium "Dauerefeldversuche und Nährstoffdynamik", 9. bis 12. Juni 1992 in Bad Lauchstädt. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (Hrsg.), S. 53-59.

A s m u s, F.: N-Bilanzen in Dauerversuchen mit organischer Düngung auf pleistozänem Boden. - In: Tag.-Ber. z. Symposium "Dauerefeldversuche und Nährstoffdynamik", 9. bis 12. Juni 1992 in Bad Lauchstädt. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig - Halle GmbH (Hrsg.), (1992 a), S. 102-107.

A s m u s, F.: Einfluß organischer Dünger auf Ertrag, Humusgehalt des Bodens und Humusreproduktion. - In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Bd. 4 Humushaushalt. Berichte über Landwirtschaft, SH 206 (1992 b), S. 127-139.

A s m u s, F.; M u t s c h e r, H.: Einfluß hoher Güllegaben in einer Futterbau-Fruchtfolge auf K-Gehalte und K-Entzüge der Pflanzen sowie den Anteil verschiedener K-Fractionen einer Sandlehm-Parabraunerde. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 36 (1992)1, S. 17-23.

B e n k i s e r, G.; G a u s, G.; S y r i n g, K.-M.; H a i d e r, K.; S a u e r b e c k, D.: Denitrification losses from an Inceptisol field treated with mineral fertilizer or sewage sludge. - Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 150 (1987), S. 241-248.

D e N o b i l i, M.; V i t t o r i A n t i s a r i, L.; S e q u i, P.: K-uptake from subsoil. - Proc. 22 nd Colloqu. Inst. Potash, Bern (1990), S. 133-144.

D ä m m g e n, U.; G r ü n h a g e, L.; K ü s t e r s, A.; Z i m m e r l i n g, R.; J ä g e r, H.-J.: Konzentration und Flüsse reaktiver Stickstoff-Spezies in der bodennahen Atmosphäre - Messungen über landwirtschaftlichen Nutzflächen im Raume Braunschweig. - Braunsch. naturkundl. Schr. 4 (1992)1, S. 181-197.

F a h n e r t, D.: Stickstoffausnutzung, -überhänge und deren Auswirkung auf die Auswaschungsverluste, gemessen und dokumentiert an einem Stickstoffsteigerungsversuch im Getreide. - VDLUFA-Schriftenreihe 28, Kongreßband 1988, Teil II (1989), S. 207-218.

G a r z, J.; S c h a r f, H.; S t u m p e, H.; S c h e r e r, H.W.; S c h l i e p h a k e, W.: Einfluß der Kaliumdüngung auf die chemischen Eigenschaften einer Sandlöß-Braunerde nach 40 Versuchsjahren. In: Tag.-Ber. zum Symposium "Dauerefeldversuche und Nährstoffdynamik", 9. bis 12. Juni 1992 in Bad Lauchstädt. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (Hrsg.), S. 108-119.

G l e n d i n i n g, M. J.; P o w l s o n, D. S.: The effect of long-term application of inorganic fertilizer on soil organic nitrogen. - In: W i l s o n, W.S. et al. (eds.) Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment. Cambridge U.K. (1991), S. 329-338.

G ö r l i t z, H.: Untersuchungen zum Einfluß der organischen und mineralischen Düngung auf den Gehalt des Bodens an laktatlöslichem Kalium. - Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 30 (1986)6, S. 355-359.

H a i d e r, K.; H e i n e m e y e r, O.: Möglichkeiten der Verminderung oder Begrenzung landwirtschaftlich verursachter N_2O -Einträge in die Atmosphäre. In: S a u e r b e c k, D.; B r u n n e r t, T. (Hrsg.): Klimaveränderungen und Landwirtschaft. - Teil I, Landbauforsch. Völknerode, SH 117, (1990), S. 69-73.

H a i d e r, K.: Biochemische Prozesse der Bildung und der Dynamik von Huminstoffen im Boden. - In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Bd. 4 Humushaushalt. Berichte über Landwirtschaft., SH 206 (1992), S. 45-61.

H e g e, U.; B r a n d h u b e r, R.: Nitratbelastung des Sickerwassers bei intensivem Ackerbau. - VDLUFA-Schriftenreihe 32, Kongreßband 1990, S. 211-216.

- Herrmann, V.; Görlitz, H.; Asmus, F.: Lysimeteruntersuchungen zur Nährstoffverlagerung nach Gülledüngung in einer Sand-Rosterde - Phosphor, Kalium, Magnesium. - Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 27 (1983)10, S. 687-692.
- Hülsbergen, K.-J.: Erträge, Stickstoff- und Kohlenstoffbilanzen im Kombinationsversuch Seehausen. - In: Tag.-Ber. z. Symposium "Dauerfeldversuche und Nährstoffdynamik", 9. bis 12. Juni 1992 in Bad Lauchstädt. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (Hrsg.), S. 108-119.
- Isermann, K.; Moritz, C.; Körschens, M.: Tiefenuntersuchungen von Böden der klassischen Dauerversuche "Seehausen" und "Bad Lauchstädt" vor dem Hintergrund langjähriger N-Bilanzen. - In: 103. VDLUFA-Kongreß in Ulm 16. bis 21. Sept. 1991, "Umweltaspekte der Tierproduktion", Kurzfassungen d. Vorträge, S. 47-48.
- Isermann, K.: Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share. - Proc. Global Climate Change Conference 1992 Bad Dürkheim (In print: Environmental Pollution (1993) Elsevier Science Publishers Ltd. England)
- Jenkinson, D.S.: Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. - In: Wilson, J. R. (ed.) Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems. C.A.B. International, Oxon, U.K. (1987), S. 368-386.
- Johnston, A. E.; Poulton, P. R.; McEwen, J.: The carbon and nitrogen content of the soils and the effect of change in crop rotation and manuring on soil pH, P, K and Mg. - Rothamsted Exper. Station Rep. 1980, Harpenden, U. K. (1981)2, S. 5-20.
- Johnston, A. E.: Potassium fertilization to maintain a K-balance under various farming systems. - In: Nutrient Balances and the Need for Potassium. Proc. 13 th Congr. Int. Potash Inst. Bern (1986), S. 177-204.
- Johnston, A. E.: Soil fertility and organic matter. - In: Wilson, W.S. et al. (eds.) Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment. Cambridge, U.K. (1991), S. 299-314.
- Kerschberger, M.; Richter, D.: Programm zur Berechnung von meliorativen Düngermengen für P, K, Mg zur Erreichung der BFK-Sollwerte. - Feldwirtschaft 28 (1987)10, S. 440-441.
- Kerschberger, M.; Richter, D.: Einfluß der K-Düngung nach Pflanzenentzug auf den DL-löslichen K-Gehalt des Bodens (Extraktionsmethode nach Egner und Riehm) in Dauerdüngungsversuchen auf Ackerland. - Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 36 (1992)3, S. 177-184.
- Knauer, N.: Die Abhängigkeit des lactatlöslichen Nährstoffgehaltes des Bodens von der Nährstoffanreicherung durch Düngung. - Z. Acker-Pflanzenbau 127 (1968)2, S. 89-102.
- Körschens, M.: C-N-Langzeitdynamik im Statischen Düngungsversuch Lauchstädt. - In: Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden sowie Programme zur Steuerung der organischen Düngung. - Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. Berlin (1990)295, S. 81-90.
- Körschens, M.: Erträge, N-Entzüge und N-Bilanzen im statischen Düngungsversuch Lauchstädt nach Erweiterung der Versuchsfrage im Jahre 1978. - KALI-BRIEFE (Büntehof) 20 (1991)7/8, S. 639-648.
- Kundler, P.: Die wichtigsten Aussagen der Dauerfeldversuche zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. - Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin (1982)205, S. 5-16.
- Kundler, P.; Steinbrenner, K.; Smukalski, M.; Kunze, A.; Quast, J.; Roth, D.: Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. - Dt. Landwirtschaftsverlag Berlin 1989, 452 S.
- Kundler, P.; Smukalski, M.: Einfluß mineralischer und kombinierter mineralisch-organischer Düngung auf ausgewählte Bodenfruchtbarkeitskennziffern (BFK) eines grundwasserfernen Sandbodens. - In: Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd., Berlin 27 (1983)5, S. 307-315.
- Kübler, E.; Foitzik, H.; Hobelsberger, A.: Auswirkungen von Versuchsdauer und gestaffelter N-Düngung auf Nährstoffbilanzen sowie einige bodenchemische und bodenphysikalische Kennwerte. - KALI-BRIEFE (Büntehof) 17 (1985)10, S. 725-747.
- Leinweber, P.; Reuter, G.; Vago, I.: Kalium-Bilanzen und Mineralveränderungen in einigen Dauerdüngungsversuchen. - KALI-BRIEFE (Büntehof) 20 (1991)7/8, S. 597-604.
- Leithold, G.: Zur Dynamik des Humus- und N-Haushaltes im Fruchtfolge-Düngungsversuch Seehausen. - In: Tag.-Ber. z. Symposium "Dauerfeldversuche und Nährstoffdynamik" 9. bis 12. Juni 1992 in Bad Lauchstädt. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (Hrsg.), S. 78-82.
- Maidl, F. X.; Fischbeck, G.: Nitratgehalte tieferer Bodenschichten bei unterschiedlichen Fruchtfolgen auf intensiv genutzten Ackerbaustandorten. - Z. Pflanzenemähr. Bodenkd. 150 (1987)4, S. 213-219.
- Morel, R.; Lasnier, T.; Bourgeois, S.: Les essais de fertilisation des longue duree de la station agronomique de Grignon. - INRA, Paris (1984).
- Nieder, R.; Schollmayer, G.; Zakosek, H.: Die Rolle der Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Böden (eine Literaturanalyse). - Z. Kulturtechn. u. Landentwickl. 30 (1989)6, S. 345-355.
- Rauhe, K.: Der Einfluß des Futterbaus auf den C- und N-Gehalt des Bodens im Fruchtfolgedüngungsversuch Seehausen. - Albrecht-Thaer-Archiv 13 (1969)5, S. 455-462.
- Rheinbaben, W. von: Nitrogen losses from agricultural soils through denitrification - a critical evaluation. - Z. Pflanzenemähr. Bodenkd. 153 (1990)3, S. 157-166.
- Richter, D.; Kerschberger, M.; Marks, G.: Einfluß der Nährstoffgehalte des Unterbodens (21...40 cm) auf die Versorgung der Pflanzen mit Phosphor und Kalium. - Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 21 (1977)3, S. 239-247.
- Rogasik, J.: Beziehungen zwischen Faktoren der Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenertrag auf Ackerland. - Akad. Landwirtsch.-Wiss., Berlin (1990), Diss. B.

- Ruszkowska, M.; Rebowska, Z.; Sykut, S.; Kusio, M.: Balance of mineral nutrients in a lysimetric experiment (1977-1981), I. Balance of nitrogen, phosphorus and potassium. - *Pamiętnik Pulaski - Prace JUNG*, Z. 82 (1984), S. 8-28.
- Sauerbeck, D.: Influence of crop rotation, manurial treatment and soil tillage on the organic matter content of German soils. - In: Boels, D. et al. (eds.) *Soil Degradation*. Balkema Rotterdam (1982), S. 163-179.
- Sauerbeck, D.; Söchting, H.; Westing, A.: Stickstoffbilanz eines ackerbaulich genutzten Wassereinzugsgebietes. - *VDLUFA-Schriftenreihe* 28, Kongreßband 1988, Teil II (1989), S. 1273-1279.
- Sauerbeck, D.: Landbewirtschaftung und Treibhauseffekt. - In: Produktionsfaktor Umwelt: Klima/Luft, hrsg. v. Verbindungsstelle Landwirtschaft-Industrie; Otzen, P.; Quade, J. (Bearb.), *etv Düsseldorf u. Landwirtsch.-Verl. Münster-Hiltrup* (1992 a), S. 73-94.
- Sauerbeck, D.: Funktionen und Bedeutung der organischen Substanzen für die Bodenfruchtbarkeit - ein Überblick. - In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit*, Bd. 4 Humushaushalt. *Berichte über Landwirtsch.*, SH 206 (1992 b), S. 15-29.
- Scheffer/Schachtschabel: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 13. durchgesehene Auflage von P. Schachtschabel, H. P. Blume, G. Brümmer, K.-H. Hartge u. U. Schwertmann. - Enke Verl. 1992.
- Schneider, U.; Haider, K.: Denitrifikationsmessungen im Feld und Bestimmung der Auswaschungsverluste von Dünger- und Boden-N. - *VDLUFA-Schriftenreihe* 32, Kongreßband 1990, S. 295-300.
- Schnieder, E.: Wirkung der organischen Düngung auf Ertrag und C-Dynamik eines Sandbodens mit einem unterschiedlichen Humusgehalt. - In: *Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden sowie Programme zur Steuerung der organischen Düngung*. Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. Berlin (1990) 295, S. 91-98.
- Seeboldt, M.: Beitrag zur Quantifizierung von Beziehungen ausgewählter Bodenfruchtbarkeitskennziffern (BFK) und Verfahren zur Reproduktion der Bodenfruchtbarkeit. - Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR (1983), Diss. A.
- Sibanda, H. M.; Young, S. D.: Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. - *J. Soil Science* 37 (1986), S. 197-204.
- Smukalski, M.: Der Einfluß von Futterpflanzen als Haupt- und Zwischenfrüchte auf die Erträge und die Fruchtbarkeit verschiedener Böden. Teil VIII: Auswirkungen auf die organische Substanz, die Sorptionsverhältnisse und den Nährstoffgehalt der Böden. - *Albrecht-Thaer-Archiv* 12 (1968)3, S. 271-282.
- Smukalski, M.; Kundler, P.; Rogasik, J.: Der Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuch. - In: Körschens, M. (Hrsg.): *Dauerfeldversuche*, 2. Aufl., Berlin, Akad. Landwirtsch.-Wiss. (1990), S. 251-259.
- Smukalski, M.; Kundler, P.; Rogasik, J.; Kühn, G.: Bodenfruchtbarkeit und Ertragsentwicklung in Abhängigkeit von mineralischer und organischer Düngung - düngungsbedingte Extensivierungseffekte auf sandigen Böden Nordostdeutschlands. - In: *FZB-Report 1990. Wiss. Jahresber. des Forschungszentrums für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg* (1991), S. 164-171.
- Smukalski, M.; Rogasik, J.: Nährstoffbilanzen und Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit bei extensivem bis intensivem Wirtschafts- und Mineraldüngereinsatz. - In: Tag.-Ber. zum Symposium "Dauerfeldversuche und Nährstoffdynamik" 9. bis 12. Juni 1992 in Bad Lauchstädt. *UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH* (Hrsg.), S. 36-41.
- Springob, G.; Beyme, B.; Richter, J.: Bestimmungsgrößen der K-Fixierung in Lössböden und ihr Einfluß auf die Beziehung zwischen der K-Bodenuntersuchung und den K-Gehalten von Winterweizen. - *KALI-BRIEFE* (Büntehof) 19 (1989)8, S. 573-588.
- Steinbrenner, K.; Smukalski, M.: Einfluß von Anbaustruktur und Fruchtfolge auf einige Bodeneigenschaften, dargestellt an Ergebnissen des Internationalen Fruchtfolgeversuches Dewitz. - *Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenk.* 28 (1984) 10, S. 611-616.
- Sturm, H.; Knittel, H.; Zerulla, W.: Einfluß der N-Düngung auf Ertrag und N-Mineralisationsverhalten im Boden in langjährigen Dauerversuchen. - *VDLUFA-Schriftenreihe* 28, Kongreßband 1988, Teil II (1989), S. 113-130.
- Wicke, H.-J.; Michel, D.; Leithold, G.; Mathies, H.: Der Fruchtfolgedüngungsversuch Seehausen. - In: Körschens, M. (Hrsg.): *Dauerfeldversuche*, 2. Aufl., Berlin, Akad. Landwirtsch.-Wiss. (1990), S. 139-154.

Verfasser: Smukalski, Martin, Prof. Dr.sc.agr.; Rogasik, Jutta, Dr.sc.agr.; Obenauf, Susanne, Dr.agr. Institut für agrarrelevante Klimaforschung Müncheberg, Leiter: Professor Dr. Ulrich Dämmgen.