

# Langfristige Wirkung von organischen Düngern auf die Bodeneigenschaften

Alexandra Maltas<sup>1</sup>, Hansrudolf Oberholzer<sup>2</sup>, Raphaël Charles<sup>1</sup>, Vincent Bovet<sup>1</sup> und Sokrat Sinaj<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW, 1260 Nyon

<sup>2</sup>Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zürich

Auskünfte: Sokrat Sinaj, E-Mail: sokrat.sinaj@acw.admin.ch, Tel. + 41 22 363 46 58



Ausbringen von Stickstoffdünger. (Foto: ACW)

## Einleitung

Der erleichterte Zugang zu Mineraldüngern und die Spezialisierung der landwirtschaftlichen Betriebe haben einen spektakulären Rückgang der Hofdüngernutzung in den Betrieben ohne Nutztierhaltung zur Folge. Dabei verursacht der Wegfall dieser organischen Dünger grosse Verluste an organischer Substanz (OS) in den Böden, falls keine Massnahmen ergriffen werden, um diese zu ersetzen (Maltas *et al.* 2011; Vullioud *et al.* 2006). Die gewöhnlich vorgeschlagenen Massnahmen sind das Belassen der Ernterückstände von Getreide auf dem Feld, Einschub einer Gründüngung als Zwischenfrucht sowie die Reduktion der Bodenbearbeitung. Diese Verfahren wirken sich bekanntlich positiv auf die Entwicklung der OS in den landwirtschaftlich genutzten Böden aus (Lal 2009; Maltas *et al.* 2011). Ihre Wirkung unter Schweizer Bedingungen soll langfristig geprüft werden. Zu diesem Zweck werden seit 1976 in Changins (VD) verschiedene organische Dünger (Gründüngung, Getreidestroh und Hofdünger) und mineralische Dünger verglichen. Vullioud *et al.* (2006) haben die Auswirkungen dieser Düngemittel auf die Einlagerung der OS, auf die Erträge und die Nähr-

stoffbilanzen nach 29 Versuchsjahren untersucht. Die vorliegende Studie ergänzt diese Arbeiten, indem sie insbesondere die Auswirkungen dieser Düngemittel auf (i) die Eigenschaften des Bodens bezüglich der organischer Substanz nach 34 Versuchsjahren untersucht und neue Daten zu (ii) den chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens liefert.

## Material und Methoden

### Versuchsbeschreibung

Der Versuch wird in Changins (VD, 430 m. ü. M., mit einer Niederschlagsmenge von 970 mm und einem Temperaturjahresmittel von 9,5 °C) auf Parabraunerde mit einer Gründigkeit von 70–100 cm, mit 14 % Ton und 39 % Schluff durchgeführt. Er begann im Jahr 1976. Damals betrug der Humusgehalt des Bodens 2,0 % und der pH-H<sub>2</sub>O 7,2. Die Gehalte an mittels CO<sub>2</sub> gesättigtem Wasser extrahierbarem Phosphor (P) und Kalium (K) betragen 4,35 respektive 23,24 mg kg<sup>-1</sup>. Der Gehalt an CaCl<sub>2</sub> extrahierbarem Magnesium (Mg-CaCl<sub>2</sub>)- betrug 20,00 mg kg<sup>-1</sup>.

Die Versuchsanordnung besteht aus einer Split-plot-Anlage mit sechs Verfahren und vier Unterverfahren, die vier Mal wiederholt werden.

Die Verfahren unterscheiden sich durch die Art der zugeführten organischen Dünger und die Unterverfahren durch die ausgebrachte Menge Mineralstickstoff (Tab. 1 und 2). Jede der 96 Parzellen weist eine Fläche von 90 m<sup>2</sup> auf.

Durch den Fruchtwechsel wechseln sich Sommer- und Winterkulturen ab, und es kann alle zwei Jahre eine Gründüngung eingeschoben werden. Bei den fünf bis sechs Jahre dauernden Rotationen werden 60 bis 70 % Getreide sowie Raps und Mais angebaut.

Mais- und Rapsstroh werden gehäckselt und danach in den Boden eingearbeitet. Getreidestroh wird abgeführt, ausser im «Getreidestroh»-Verfahren, wo dieses dem Boden zurückgeführt wird. Hofdünger (Mist und Gülle) werden alle drei Jahre nach Mais und Raps ausgebracht, ausser zwischen 1976 und 1993; in dieser Periode wurde die Gülle alljährlich zugeführt. Der Boden wird mit dem Pflug kurz vor der Aussaat bearbeitet (20–25 cm).

Die in allen Behandlungen optimalen P- und K-Zufuhren basieren auf den gültigen Empfehlungen, mit Berücksichtigung des Düngewertes der Strohdüngungen und der Nachwirkungen der Mist- und Güllegaben, jedoch ohne Bodenfruchtbarkeitskorrekturen (Ryser *et al.* 1987).

### Messungen und statistische Analysen

Eine quantitative Bestimmung der oberirdischen Biomasse der Gründüngungen wurde 1988, 1990, 1992 und 1996 durchgeführt (Tab. 3). Die Biomasse des Getreidestrohs sowie die N-, P-, K-, Kalzium (Ca)- und Magnesium (Mg)-Gehalte wurden in den Jahren 1993, 1998, 2004, 2006, 2007 und 2009 erhoben (Tab. 3). Die Gehalte an Gesamt-Trockenmasse (TM), an N, P, K, Ca und Mg des Mists und der Gülle wurden jedes Jahr vor deren Ausbringung bestimmt (Tab. 3).

Die biologischen Eigenschaften des Bodens wurden im Jahr 1999 gemäss den Methoden der Forschungsanstalten ART& ACW (2011) untersucht. Die Bodenproben wurden im frühen Frühjahr entnommen. Im Jahr vor der Probenahme wurde kein Hofdünger zugeführt. Einzig im Verfahren «Stroh» wurde das Stroh aus der vorangehenden Frucht (Hafer) eingearbeitet.

Im C-Unterverfahren (optimale N-Düngung) wurde der Humusgehalt in den ersten zwanzig Zentimetern in den Jahren 1987, 1993, 1999 und 2007 erhoben. Die Bodenproben wurden immer nach einer Getreideernte entnommen. Im Jahr 2009 wurden die chemischen Bodeneigenschaften in der Tiefe 0–20 cm bei allen Verfahren und Unterverfahren bestimmt (Tab. 4).

### Zusammenfassung

Die Auswirkungen unterschiedlicher Düngungsverfahren werden von der Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW am Standort Changins seit 1976 getestet. Einerseits wurden organische (Gründüngung, Getreidestroh, 35 bzw. 70 t ha<sup>-1</sup> Mist alle drei Jahre und 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> Gülle alle drei Jahre) andererseits mineralische Dünger (vier abgestufte Stickstoffmengen) eingesetzt. Diese Studie untersucht die Langzeiteffekte dieser Düngungsverfahren auf die chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens. Nach 34 Versuchsjahren nimmt bei optimaler Stickstoffdüngung der Humusgehalt im Boden beim Verfahren «mineralische Dünger» um 0,50 g/100 g Boden ab, bei «Gründüngung» und «Getreidestroh» um 0,20 g/100 g sowie bei «Mist 35 t ha<sup>-1</sup> alle drei Jahre» und «Gülle 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> alle drei Jahre» um 0,18 g/100 g. Einzig das Verfahren «Mist 70 t ha<sup>-1</sup> alle drei Jahre» zeigt eine Zunahme des Humusgehaltes im Boden um 0,15 g/100 g. Die organischen Dünger beeinflussen ausser den Gehalten an Spurenelementen die Haupteigenschaften des Bodens nicht signifikant. Die Verfahren mit Mist und Gülle führen zu höheren Gehalten an Ammonium-Acetat EDTA extrahierbarem Kupfer, Eisen, Zink und Mangan als bei der Kontrolle «mineralische Dünger». Auch wirken sich die organischen Dünger signifikant positiv auf die mikrobielle Biomasse und Aktivität aus, wobei sie deren Populationszusammensetzung zu verändern scheint.

Tab. 1 | Beschreibung der Verfahren und Unterverfahren

Verfahren	Organische Düngung			Unterverfahren	Mineralische N-Düngung
	Stroh	Hofdünger	Gründüngung		
MinD	Getreide: Abfuhr	Nein	Nein	A	Kontrolle ohne N
				B	reduzierte Düngung
GD	Getreide: Abfuhr	Nein	Senf alle 2 Jahre vor der Frühjahrskultur	C	optimale Düngung
Stroh	Keine Stroh-Abfuhr	Nein	Nein	D	erhöhte Düngung
Mi35	Getreide: Abfuhr	35 t ha <sup>-1</sup> Mist <sup>†</sup> alle drei Jahre	Nein		
Mi70	Getreide: Abfuhr	70 t ha <sup>-1</sup> Mist <sup>†</sup> alle drei Jahre	Nein		
Gü60	Getreide: Abfuhr	60 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> Gülle <sup>‡</sup> jedes Jahr von 1976 bis 1993, danach alle drei Jahre	Nein		

<sup>†</sup>: Stalmist (Milchvieh) auf unbewachsenen Boden ausgebracht und durch Pflügen eingearbeitet.

<sup>‡</sup>: verdünnte Gülle (Milchvieh, Verdünnung 1/1) auf bewachsenen Boden ausgebracht.

Tab. 2 | Mineralische Stickstoffdüngung † (kg/ha)

Verfahren	1976–1993												1994–2002 und 2005								2003–2004		2006–2010					
	Gerste, Hafer				Weizen				Mais, Raps				Gerste, Hafer				Weizen, Mais, Raps				Raps		Weizen		alle Kulturen			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B	C	D				
MinD																												
GD					0	70	110	150	0	100	150	200																
Stroh	0	35	70	105									0	35	70	105	0	40	0	30	0							
Mi35					0	30	70	110	0	50	100	150											Norm-40	Norm <sup>**</sup>				
Mi70																												
Gü60																												

†: Ammoniumnitrat in zwei oder drei Gaben ausgebracht. \*\*: Gemäss Methode der korrigierten Normen (Ryser et al., 1987).

Es wurden vier Humusbilanzierungsmodelle getestet: das Schweizer Modell SALCA (Neyroud et al. 1997; Oberholzer et al. 2006), die deutschen Modelle VDLUFA (Vdlufa 2004) und HUMOD (Brock et al. 2009) sowie das französische Modell SIMEOS-AMG, das von Agro-Transfert Ressources et Territoires und dem INRA von Laon (Saffih-Hdadi et al. 2008) entwickelt wurde. Die Kohlenstoff(C)-Vorräte in 0–25 cm Tiefe wurden im Jahr 2009 mittels vier Modellen simuliert und mit den beobachteten Kohlenstoff-Vorräten verglichen. Angesichts der Pflugtiefe wurde angenommen, dass der gemessene Humusgehalt bei 0–20 cm demjenigen bei 0–25 cm entspricht.

Für die statistische Auswertung wurde das Programm XLSTAT 2010, Copyright Addinsoft 1995–2009, sowie der Fisher-Test zum Vergleich der Mittelwerte der Verfahren und Unterverfahren verwendet.

## Resultate und Diskussion

### Humusgehalt und Humusbilanzierung

Die Beprobung zur Humus-Bestimmung erfolgte immer während der gleichen Periode. Trotz dieser vorsorglichen Massnahme waren die Zwischenjahresschwankungen bei dieser Messung gross (Abb. 1). Es empfiehlt sich deshalb, den Humusgehalt an verschiedenen Zeitpunkten zu erheben, bevor Schlüsse bezüglich der langfristigen Entwicklung der organischen Substanz im Boden gezogen werden.

Wenn die Kulturen eine optimale N-Düngung bekommen (C-Unterverfahren) nimmt der Humusgehalt gegenüber dem im Jahr 1975 festgestellten Gehalt bei allen Verfahren ab, ausser bei Mi70 (Abb. 1). Im Gü60-Verfahren beginnt der Humusgehalt nach 1993 abzu-

Tab. 3 | Zufuhr von Trockenmasse und Makroelementen durch die verschiedenen organischen Substanzen: Gründüngung, Getreidestroh, Mist und Gülle. Die Zahlen stellen den Mittelwert der während der Periode 1975–2009 verfügbaren Werte dar. Die Werte in Klammern entsprechen den Standardabweichungen bezüglich der Jahresmittel.

Organische Substanz	Trockenmasse	N total	N-NH4	P total	K total	Ca total	Mg total
	dt ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>					
Gründüngung <sup>1</sup>	27 (6)	-	-	-	-	-	-
Weizenstroh <sup>2</sup>	44 (3)	14 (4)	-	3 (1)	45 (9)	11 (2)	2 (0,4)
Haferstroh <sup>2</sup>	36 (6)	13 (4)	-	4 (2)	113 (33)	12 (1)	2 (1)
Mist- 35 t Frischmasse ha <sup>-1</sup>	71 (12)	192 (47)	20 (15)	52 (19)	227 (133)	169 (43)	34 (7)
Mist- 70 t Frischmasse ha <sup>-1</sup>	142 (24)	384 (94)	40 (30)	105 (39)	454 (39)	337 (86)	67 (13)
Gülle <sup>3</sup> - 60m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	20 (10)	101 (28)	54 (22)	19 (9)	171 (58)	52 (22)	12 (5)

<sup>1</sup>: oberirdische Gesamtbiomasse, die im C-Unterverfahren des GD-Verfahrens geerntet wurde.

<sup>2</sup>: im C-Unterverfahren des «Stroh»-Verfahrens geerntete Proben.

<sup>3</sup>: verdünnte Gülle (1/1-Verdünnung). Gemäss den Referenzmethoden von Agroscope durchgeführte Analysen (Forschungsanstalten ART& ACW. 2011).

Tab. 4 | Wirkung der Verfahren und der Unterverfahren auf die Bodenfruchtbarkeit im Jahr 2009

Analysen <sup>†</sup>	A						B	C	D	
	minD	GD	Stroh	Mi35	Mi70	Gü60	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	
<b>Chemische Eigenschaften</b>										
OS (g/100g)	1,35 c	1,70 ab	1,65 bc	1,73 ab	2,00 a	1,75 ab	1,70 B	1,78 AB	1,82 A	1,83 A
N total (g/100g)	0,115 b	0,135 ab	0,125 ab	0,128 ab	0,143 a	0,135 ab	0,130 A	0,135 A	0,138 A	0,138 A
Verhältnis C/N	6,85 c	7,30 bc	7,61 abc	7,85 ab	8,14 a	7,51 abc	7,54 A	7,66 A	7,70 A	7,68 A
KAK (meq)	8,75 a	9,88 a	9,55 a	9,78 a	9,83 a	9,53 a	9,55 A	9,78 A	9,53 A	9,68 A
pH-H <sub>2</sub> O	7,05 a	7,10 a	7,25 a	7,05 a	7,23 a	7,10 a	7,13 A	7,06 A	7,05 A	7,03 A
<b>Boden-Phosphor (mg kg<sup>-1</sup>)</b>										
P total <sup>†</sup>	764,8 a	817,0 a	760,1 a	740,7 a	765,7 a	745,4 a	765,6 A	747,6 A	737,6 A	732,2 A
Organischer P <sup>†</sup>	249,3 a	255,5 a	257,6 a	239,6 a	270,7 a	266,4 a	256,5 A	265,1 A	268,0 A	264,3 A
P-AAE	98,15 a	103,93 a	115,35 a	92,73 a	104,48 a	97,20 a	101,97 A	91,27 AB	81,69 B	81,50 B
<b>Boden-Kationen (mg kg<sup>-1</sup>)</b>										
K-AAE	150,4 a	162,5 a	141,2 a	145,2 a	159,9 a	159,3 a	153,1 A	137,1 B	135,2 B	131,1 B
Mg-AAE	79,28 a	86,83 a	76,78 a	86,05 a	108,08 a	85,15 a	87,03 A	81,68 A	84,17 A	84,99 A
Ca-AAE	3202 a	4756 a	2265 a	3402 a	5810 a	2124 a	3593 A	2641 A	3099 A	3390 A
<b>Spuremetalle (mg kg<sup>-1</sup>)</b>										
Cu -AAE <sup>2</sup>	6,1 a	6,4 a	6,4 a	6,5 a	6,7 a	7,0 a	6,5 A	6,9 A	6,8 A	6,5 A
Fe -AAE <sup>2</sup>	286,5 b	298,0 ab	327,0 ab	315,5 ab	347,8 ab	374,5 a	324,9 A	314,5 AB	269,3 B	301,9 AB
Zn -AAE <sup>2</sup>	1,7 c	1,8 c	2,0 c	2,3 bc	3,2 a	2,7 ab	2,3 A	2,2 A	2,3 A	2,3 A
Mn-AAE <sup>2</sup>	296,0 a	318,3 a	310,3 a	305,0 a	325,3 a	329,8 a	314,1 A	313,5 A	304,9 A	308,6 A

<sup>†</sup>: Die Analysen des Gesamt-P und des organischen P werden gemäss der Methode von Saunders und Williams (1955) durchgeführt; alle anderen Analysen werden gemäss der Referenzmethoden von Agroscope (Forschungsanstalten ART& ACW. 2011) durchgeführt. Verschiedene Grossbuchstaben auf derselben Zeile weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der verschiedenen Unterverfahren bei der 5 %-Schwelle gemäss Fisher-Test hin. Verschiedene Kleinbuchstaben auf derselben Zeile weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der verschiedenen Verfahren bei der 5 %-Schwelle gemäss Fisher-Test hin.

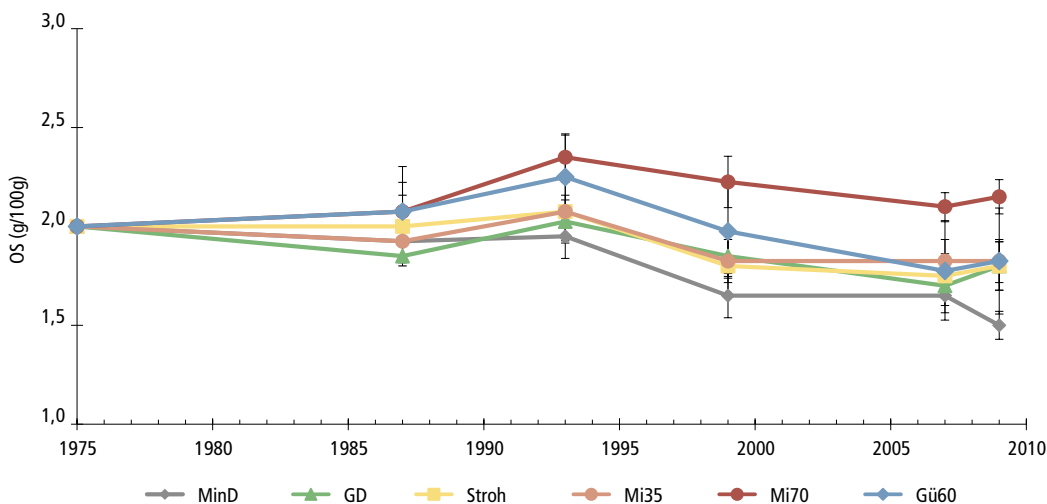
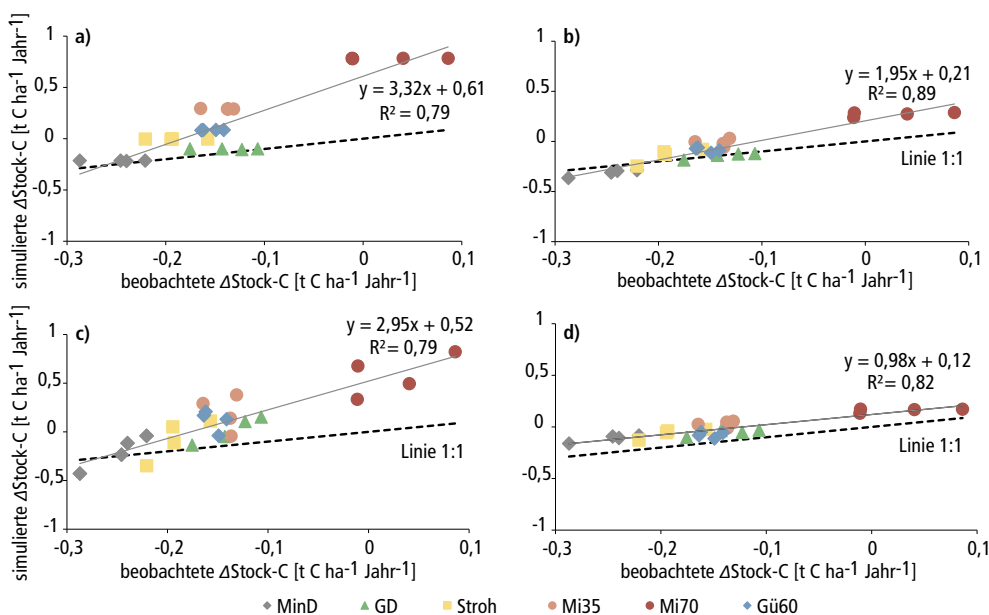


Abb. 1 | Auswirkung der Verfahren auf die Entwicklung des Humusgehaltes auf den ersten 20 Zentimetern (C-Unterverfahren). Die senkrechten Balken entsprechen der Standardabweichung.



**Abb. 2 |** Beobachtete (X-Achse) und durch die Modelle a) SALCA, b) VDLUFA, c) HUMOD et d) SIMEOS-AMG-simulierte (Y-Achse) mittlere Veränderung des C-Vorrates pro Jahr in 0–25 cm zwischen 1975 und 2009. Die vier Punkte für ein gleiches Verfahren entsprechen den Unterverfahren der Stickstoffdüngung.

nehmen. Es ist auch der Zeitpunkt, ab dem die Gülle nicht mehr jährlich, sondern alle drei Jahre ausgebracht wurde. Die bei den Verfahren GD, Stroh und Mi35 zwischen 1975 und 2009 beobachteten Abnahmen betragen -0,20, -0,20 respektive -0,18 g/100 g Boden (Abb. 1). Der Einschub von Senf alle zwei Jahre (GD-Verfahren) und die Rückführung vom Getreidestroh (Stroh-Verfahren) haben also die gleiche Wirkung auf die Entwicklung des Humusgehaltes wie die Zufuhr von 35 t ha<sup>-1</sup> Mist alle drei Jahre (Mi35-Verfahren). In diesem Versuch vermögen diese drei Dünger nicht, die Humusgehalte im Boden zu halten. Die starke Abnahme des Humusgehaltes lässt sich vermutlich durch die grossen, durch die Mineralisation und/oder Erosion verursachten Verluste in diesen Pflug-Systemen erklären. Auf einer benachbarten Versuchsanlage konnten Maltas *et al.* (2011) auch zeigen, dass bei Getreidestrohabfuhr die Zufuhr von 12 t Mist ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> den Humusgehalt eines gepflügten Bodens nicht zu erhalten vermag. Die Autoren konnten dabei jedoch beobachten, dass die gleiche Menge auf einem oberflächlich bearbeiteten Boden eine Erhöhung der Menge organischer Substanz im Boden ermöglichte. Die mittels SALCA, VDLUFA, HUMOD und SIMEOS-AMG ermittelten Veränderungen der Kohlenstoffmengen ( $\Delta$ StockC) korrelieren gut mit den beobachteten Daten ( $r^2 = 0,79, 0,89, 0,79$  beziehungsweise 0,82, Abb. 2). Mit den vier Humusbilanzierungsmodellen können somit unsere verschiedenen Verfahren gut miteinander verglichen werden. SIMEOS-AMG ist dabei das Modell, das die absolute Wirkung der organischen Dünger am besten

wiedergibt (Regressionsgerade nahe der gestrichelten Linie 1:1, Abb. 2d). Die in diesem Versuch eingesetzten Hofdünger (insbesondere der Mist) sind ärmer an Kohlenstoff als diejenigen, die in den vier Modellen angenommenen Dünger. Bei SALCA, VDLUFA und HUMOD wird die Wirkung der Hofdünger überbewertet. Zur Umgehung dieses Problems wurde die in SIMEOS-AMG angegebene Hofdüngermenge angepasst, um die mit den Hofdüngern effektiv zugeführte Kohlenstoffmenge zu erreichen. Das ergibt eine gute Simulation der Bodenankreicherung mit Kohlenstoff aus organischen Düngern (Abb. 2d). Im SIMEOS-AMG-Modell werden die Änderungen der Kohlenstoff-Vorräte ebenfalls etwas überschätzt, aber der Fehler ist für die sechs Verfahren vergleichbar (Regressionsgerade parallel zur Linie 1:1). Der Fehler des Modells ergibt sich offenbar aus einer Unterschätzung der Mineralisierung der organischen Bodensubstanz oder einer Überschätzung der Kohlenstoff-Zufuhr über die Wurzeln der Kulturen. Im Jahr 2009 ist die Wirkung einer N-Düngung (Auswirkung der Unterverfahren) auf das Kohlenstoff-Mengen im Boden positiv, wenn auch schwach (Tab. 4). VDLUFA (ausser im Mi70-Verfahren) und SIMEOS-AMG bilden diesen Effekt am besten ab (Abb. 2). SALCA simuliert keinen Effekt der mineralischen N-Düngung, und HUMOD überschätzt ihn (Holenstein 2009).

### Chemische Eigenschaften des Bodens

Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen die Auswirkungen der organischen Düngung und der abgestuften minera-

Tab. 5 | Auswirkung der Verfahren und der Unterverfahren auf die biologischen Eigenschaften des Bodens im Jahr 1999

Analysen <sup>†</sup>	Mittel						A	B	C	D
	minD	GD	Stroh	Mi35	Mi70	Gü60	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
<b>Mikrobielle Biomasse</b>										
mikrobieller C (ppm)	316 d	331 cd	346 bcd	353 abc	368 ab	379 a	341 A	349 A	342 A	363 A
mikrobieller N (ppm)	47,6 d	50,8 cd	54,8 bc	57,1 ab	59,7 ab	62,3 a	53,4 A	55,0 A	54,9 A	58,2 A
Verhältnis C/N	6,6 a	6,5 a	6,3 a	6,2 a	6,2 a	6,1 a	6,4 A	6,4 A	6,3 A	6,3 A
<b>Mikrobielle Aktivität</b>										
mineralisierter C (mg C-CO <sub>2</sub> kg Boden <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0,26 d	0,27 cd	0,30 bcd	0,33 bc	0,35 b	0,43 a	0,31 A	0,32 A	0,35 A	0,32 A
mineralisierter N (mg N-NO <sub>3</sub> kg Boden <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	0,55 c	0,54 c	0,59 bc	0,60 bc	0,61 b	0,68 a	0,57 A	0,60 A	0,62 A	0,60 A
qCO <sub>2</sub> (mg C-CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> C-mic h <sup>-1</sup> )	0,85 b	0,83 b	0,87 b	0,95 ab	0,96 ab	1,14 a	0,91 A	0,92 A	1,02 A	0,88 A

Verschiedene Grossbuchstaben auf derselben Zeile weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der verschiedenen Unterverfahren bei der 5%-Schwelle gemäss Fisher-Test hin. Für ein bestimmtes Verfahren entsprechen die Wiederholungen den Werten des betreffenden Verfahrens in den 4 Unterverfahren. Verschiedene Kleinbuchstaben auf derselben Zeile weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der verschiedenen Verfahren bei der 5%-Schwelle gemäss Fisher-Test hin. Für ein bestimmtes Unterverfahren entsprechen die Wiederholungen den Werten des betreffenden Unterverfahrens in den 6 Verfahren.

lichen Stickstoffdüngung auf die im Jahr 2009, d. h. 34 Jahre nach dem Versuchsstart, beobachteten chemischen Eigenschaften des Bodens. Ausser auf das C/N-Verhältnis wurde keine bedeutende Wechselwirkung zwischen Verfahren und Unterverfahren festgestellt.

### Auswirkungen der organischen Dünger

Die 2009 im Unterverfahren A (ohne mineralischen Stickstoff) gemessenen Humusgehalte zeigen signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren. Wie vorgängig im C-Unterverfahren beobachtet (Abb. 1), ist in den Verfahren mit Zufuhr von organischen Düngern der Humusgehalt höher als in der Kontrolle (MinD). Die organischen Dünger wirken auf den Gesamtstickstoffgehalt ähnlich wie auf den Humusgehalt. Zudem scheint die Zusammensetzung der organischen Substanz des Bodens von den organischen Düngern beeinflusst zu sein: Das C/N-Verhältnis der Verfahren mit organischen Düngern ist grösser als der Kontrolle MinD (Tab. 4). Yang *et al.* (2007) machten ähnliche Beobachtungen. Eine Erhöhung des C/N-Verhältnisses der organischen Bodensubstanz weist auf einen höheren Anteil an frischer, teilweise abgebauter organischer Substanz hin.

Obschon die Kationen-Austauschkapazität (KAK) mit dem Humusgehalt positiv korreliert ( $R = 0,61$ ), beeinflussen die Verfahren nach 34-jährigem Einsatz die KAK nicht signifikant ( $P > 0,05$ ; Tab. 4). Es ist davon auszugehen, dass dazu die Humusgehalte noch nicht genügend differenzieren. Der pH-H<sub>2</sub>O wird ebenfalls nicht signifikant von den Verfahren beeinflusst. Die Nitrifizierung des in den Hofdüngern (Tab. 3) in grossen Mengen vorhandenen Ammoniak-Stickstoffs (N-NH<sub>4</sub>) setzt Protonen

frei, aber die austauschbaren, durch die Hofdünger zugeführten Basen (K, Ca, Mg) (Tab. 3) gleichen diese Säure vermutlich aus. Über ein Ausbleiben der Bodenversauerung bei Anwendung von Hofdüngern wurde ebenfalls von Maltas *et al.* berichtet (2011).

Die gemessenen Gehalte an organischem P im Jahr 2009 weisen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verfahren auf (Tab. 4), obschon die in diesem Versuch eingesetzten organischen Dünger (GD, Stroh, Mi35, Mi70 und Gü60) den Boden gegenüber der Kontrolle mit organischer Substanz anreichern. Der in den Ernterückständen und den Hofdüngern enthaltene P wird nämlich schnell mineralisiert und kann als anorganischer P angerechnet werden (Fardeau 2000).

Der P- und K-Düngewert der organischen Dünger wurde in der Düngungsberechnung berücksichtigt. Es ist deshalb logisch, in den sechs Verfahren im Jahr 2009 vergleichbare Gehalte an Ammonium-Azetat EDTA (AAE)-extrahierbarem P und K zu beobachten ( $P > 0,05$ ; Tab. 4). Für die Mg-Düngung ist es jedoch nicht der Fall, obwohl die mineralische Mg-Zufuhr bei allen Verfahren gleich ist (35 kg ha<sup>-1</sup> in 1997 und 2008) trotz nicht unterschätzbarer Mg-Einträge durch den Mist und die Gülle (35, 70 und 12 kg ha<sup>-1</sup> im Mittel per Eintrag bei Mi35, Mi70 resp. Gü60; Tab. 3). Diese zusätzlichen Mg-Einträge durch Hofdünger könnten den höheren, im Verfahren Mi70 beobachteten Mg-AAE-Gehalt erklären, trotz nicht signifikantem Unterschied (Tab. 4).

Die Hofdünger führen generell zu einer Zufuhr von Spurenelementen wegen deren Zusatz als Probiotika in das Viehfutter (Li *et al.* 2010). So zeigen Li *et al.* (2010), dass die Applikation von Mist die Mengen der im Boden

enthaltenen DTPA (Diethylentriaminpentaessigsäure) extrahierbaren Spurenelemente signifikant erhöht. In diesem Versuch wurden die Gehalte der Spurenelemente in den Hofdüngern nicht gemessen, aber als bedeutend angenommen, da ja ähnliche Ergebnisse wie bei Li *et al.* (2010) beobachtet wurden: der Mist und die Gülle reichern den Boden signifikant mit AAE-extrahierbaren Zink (Zn) und Eisen (Fe) und tendenziell mit Kupfer (Cu) und Mangan (Mn; Tab. 4) an. Als schwach konzentrierte Mikronährstoffe begünstigen die Spurenelemente das Pflanzenwachstum. Bei hohen Konzentrationen können sie für Pflanzen und die Bodenlebewesen toxisch werden (Marschner 1995). Während dieser Studie scheinen die Spurenelemente weder die Kulturen (Ergebnisse nicht vorgestellt) noch die mikrobielle Biomasse (Tab. 5) beeinträchtigt zu haben. Die längerfristigen Auswirkungen der Hofdünger müssen jedoch noch beurteilt werden.

#### Wirkung der mineralischen Stickstoffgaben

In den Proben von 2009 nimmt der Humusgehalt mit der steigender N-Düngung signifikant zu (Tab. 4). Diese Zunahme kann mit der erhöhten Biomassen der dem Boden zugeführten Ernterückstände in Zusammenhang gebracht werden. Diese Wirkung bleibt jedoch bescheiden, und es zeigen sich nur bei den am stärksten abweichenden Unterverfahren signifikante Unterschiede (A und D; Tab. 4). Khan *et al.* (2007) schreiben diese schwache Wirkung der N-Düngung auf die C-Einlagerung einer höheren Mineralisierung der organischen Bodensubstanz und der Ernterückstände mit zunehmender N-Düngung zu.

Wegen der schwachen Wirkung der Unterverfahren auf den Humusgehalt unterscheiden sich der Gesamtstickstoff, das C/N Verhältnis und die KAK nicht signifikant. Auch der pH-H<sub>2</sub>O wird nicht signifikant von den Unterverfahren beeinflusst, obschon er tendenziell mit zunehmender N-Düngung abnimmt. Die Nitrifizierung des in den ammoniakhaltigen Düngern vorhandenen NH<sub>4</sub>-N führt generell zu einer Versauerung des Bodens (Pernes-Debuysere und Tessier 2004). Die N-Düngung führt auch zu einer signifikanten Abnahme der Gehalte an DTPA-extrahierbaren P, K und Fe sowie generell zu einer Abnahme der anderen mit AAE-extrahierbaren Elemente (Mg, Ca, Cu, Zn und Mn). Durch ihre günstige Wirkung auf den Ertrag der Kulturen erhöht die N-Düngung die Abfuhr der Nährstoffe durch die Ernten (Ergebnisse nicht vorgestellt), falls die mineralische Düngung nicht dem Ertrag angepasst ist. In diesem Versuch ist die mineralische P- und K-Düngung dem Verfahrensniveau angepasst, sie ist aber in den vier Unterverfahren identisch.

#### Biologische Bodeneigenschaften

Die 1999 gemessenen mikrobiellen Biomassen und Aktivitäten sind höher in den Verfahren, in denen regelmässig organische Dünger zugeführt werden (GD, Stroh, Mi35 und Mi70, Gü60, Tab. 5). Die Mikroorganismen scheinen in humusreicheren Böden bessere Wachstumsbedingungen vorzufinden (Abb. 1). Dabei wirken sich Hofdünger auf die Mikroorganismen am günstigsten aus (Tab. 5). Die Gülle fördert die mikrobielle Aktivität stärker als der Mist, die Menge Hofdünger (Vergleich Mi35 und Mi70) scheint hingegen eine geringe Wirkung zu haben. Das mikrobielle C/N-Verhältnis steigt ebenfalls tendenziell bei regelmässiger Zufuhr von organischen Düngern (Tab. 5). Yang *et al.* 2007 haben ähnliche Beobachtungen gemacht. Eine Veränderung des mikrobiellen C/N-Verhältnisses könnte auf eine Veränderung der Zusammensetzung der Mikroflora hindeuten (Fließbach *et al.* 2007). Diese Veränderung könnte die bei Verfahren mit organischen Düngern höheren beobachteten metabolischen Quotienten (qCO<sub>2</sub>) erklären. Es könnte sein, dass in diesen Verfahren die Mikroorganismen den Bodenkohlenstoff schneller abbauen. Höhere qCO<sub>2</sub> können aber auch auf eine leichter abbaubare organische Bodensubstanz hindeuten. So wurde bereits erwähnt, dass die organische Substanz von Böden, die mit organischen Düngern versorgt werden, einen höheren Anteil an frischer, teilweise abgebauter organischer Substanz aufzuweisen scheinen (Tab. 4). Die Menge des mineralischen N-Düngers hat hingegen keine signifikante Wirkung auf die mikrobielle Biomasse und die Aktivität (Tab. 5).

#### Schlussfolgerungen

Der Anbau einer Gründüngung alle zwei Jahre, die systematische Rückführung des Getreidestrohs oder die Zufuhr von 35 t ha<sup>-1</sup> Mist alle drei Jahre wirken sich auf die Kohlenstoffmengen in den Böden gleich aus. Die Anwendung der einzelnen Massnahmen konnte den Humusgehalt in den gepflügten Böden dieses Versuchs nicht erhalten. Sie müssen deshalb kombiniert eingesetzt werden.

SIMEOS-AMG ist das Humusbilanzierungsmodell, das am besten die quantitative Wirkung der organischen Dünger und der Stickstoffdüngung auf die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte wiedergibt. Es wird an die lokalen Bedingungen angepasst werden müssen, bevor es als Entscheidungshilfe in der Beratung eingesetzt werden kann.

Nach 34 Versuchsjahren erhöhten organische Dünger (Gründüngung, Getreidestroh, Mist oder Gülle) den Humusgehalt im Boden im Vergleich zur Kontrolle, wo nur mineralische Dünger zugeführt wurden. Die organi-

schen Dünger haben hingegen wenig Einfluss auf die chemischen Eigenschaften des Bodens. Die KAK, der pH und der Gehalt an AAE-extrahierbaren Makroelementen werden von diesen nicht beeinflusst. Einzig der Gehalt an AAE-extrahierbaren Spurenelementen nimmt mit dem regelmässigen Ausbringen von Mist oder Gülle zu. Während dieser Studie scheinen diese Spurenelemente weder die Kulturen noch die mikrobielle Biomasse beeinflusst zu haben. Ihre längerfristigen Wirkungen müssen jedoch noch beurteilt werden.

Die Stickstoffdüngung verbessert den Humusgehalt des Bodens, aber ihre Wirkung ist schwach. Sie führt zudem tendenziell zu einer Versauerung des Bodens und zu einer Abnahme seines Gehaltes an AAE-extrahierbaren P, K und Mg.

Die regelmässig mit organischen Düngern versorgten Böden weisen höhere mikrobielle Biomasse und Aktivitäten auf als diejenigen, die nur mit mineralischen Düngern versorgt werden. Die Zusammensetzung dieser Biomasse scheint ebenfalls durch diese Einträge beeinflusst zu werden. ■

### Riassunto

#### Effetto a lungo termine dei fertilizzanti organici sulle proprietà del suolo

Dal 1976 a Changins sono testate le conseguenze dell'uso di diversi fertilizzanti organici (sovescio, paglia di cereali, 35 e 70 t ha<sup>-1</sup> ogni 3 anni e 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> di liquame ogni tre anni) e chimici (quattro dosi di azoto). Questo studio analizza i loro effetti a lungo termine sulle proprietà organiche, chimiche e biologiche del suolo. Dopo 34 anni di prove, quando alle colture è apportata una fertilizzazione azotata ottimale, il tenore in materia organica diminuisce di 0,50 g/100 g di terra per il procedimento «fertilizzanti minerali», di 0,20 g/100 g per «sovescio» e «paglia» e di 0,18 g/100 g per «letame 35 t ha<sup>-1</sup> ogni 3 anni» e «liquame 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ogni 3 anni». Unicamente il procedimento letame 70 t ha<sup>-1</sup> ogni 3 anni mostra un aumento del tenore del suolo di 0,15 g/100 g. I fertilizzanti organici non influenzano significativamente le principali proprietà chimiche del suolo, fatta eccezione per i tenori di elementi presenti in tracce. I procedimenti che ricevono letame e liquami presentano dei tenori in rame, ferro, zinco e manganese estraibili attraverso ammonio acetato EDTA più importanti rispetto al testimone «concimi minerali». Anche i concimi organici ottengono un effetto significativamente positivo sull'attività e la biomassa microbica e sembrano modificare la composizione di quest'ultima.

### Summary

#### Long-term effect of organic fertilizers on soil properties

Consequences of the use of different organic fertilizers (green manure, cereal straw, manure at 35 and 70 t ha<sup>-1</sup> every 3 years and cattle slurry at 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> every 3 years) and mineral fertilizer (four doses nitrogen) are tested in Changins since 1976. This study analyses their long-term effect on organic, chemical and biological soil properties. After 34 years of trial, when crops receive optimal nitrogen fertilizer, the soil organic matter (SOM) content decreases 0,50 g/100 g of soil for the treatment «mineral fertilizer», 0,20 g/100 g for the treatments «green-manure» and «straws» and 0,18 g/100 g for the treatments «manure 35 t ha<sup>-1</sup> every 3 years» and «slurry 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> every 3 years». Only the treatment «manure 70 t ha<sup>-1</sup> every 3 years» shows an increase in the SOM content of 0,15 g/100 g. Organic fertilizers do not significantly affect the main soil chemical properties, except for trace element contents. The treatments receiving manure and cattle slurry present higher amounts of copper, iron, zinc and manganese extractable in ammonium acetate EDTA than the control «mineral fertilizer». Organic fertilizers have also a positive significant effect on the activity and microbial biomass and seems to change the composition of this last.

**Key words:** organic fertilizers, mineral fertilizer, soil organic matter, soil properties, long-term field experiment.

### Literatur

Die Literaturliste kann bei der Autorin bezogen werden.