

40 Jahre Daueraufbringungsversuch DA/58 – ein Beitrag zur Boden- und Ertragsentwicklung landwirtschaftlich genutzter schwefel- und kohlehaltiger Kippenböden

JOACHIM KATZUR UND LUTZ BÖCKER

Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Brauhausweg 2, D-03238 Finsterwalde, Germany

(Received 9 August 2004; accepted 9 September 2004)

1. Mitteilung: Versuchsbeschreibung, Entwicklung der Aciditäts- und Basensättigungsverhältnisse

Zusammenfassung

In dem vor 40 Jahren zur landwirtschaftlichen Rekultivierung extrem saurer, kohlehaltiger Kipp-Lehmsande angelegten „Daueraufbringungsversuch“ werden die Auswirkungen einer mehrjährigen Abwasserlandbehandlung in Kombination mit unterschiedlich hohen Kalk- und Aschegaben auf die Boden- und Ertragsentwicklung untersucht. In diesem Beitrag wird über die Entwicklung der Aciditäts- und Basensättigungsverhältnisse sowie über den Säure-Basen-Status der meliorierten Kippenböden berichtet. Die bodenkundlichen Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass eine nachhaltige Verbesserung der Aciditätsverhältnisse schwefelhaltiger Kippenböden nur möglich ist, wenn die dafür erforderliche Kalkgabe aus deren Säure-Basen-Bilanz (SBB) für $\text{pH} \geq 5,0$ bis 5,5 und eine ≥ 60 cm mächtige Bodenschicht abgeleitet wird. Die grundmeliorierten Kippenböden entwickeln sich zu sehr tiefgründige, gut gegen Versauerungsprozesse abgepufferte Bodensysteme.

Schlüsselwörter: *Landwirtschaftliche, Rekultivierung, Basensättigung, Austauscherbelegung, Gleichgewichtsbodenlösung.*

(40 years continuous application trial DA/58 – a contribution to the soil- and yield development of agricultural used sulphur- and lignite containing post coal mining soils)

Abstract

40 years ago a continuous application trial to agricultural recultivation on extremely acid, lignite-containing dump-loamy-sand was established. The main aim was to investigate the effects of perennial waste water treatments in combination with different high lime- and ash applications to the soil and yield development. This study reported about the ratios of acid- and base saturation as well as the acid-base-status of ameliorated post coal mining soils. The pedological investigations presented confirm a statement as follows: A sustainable improvement of the acidity circumstances of sulphur containing post-coal mining soils is only possible if the solicited input of lime is derived from their acid-base-account to $\text{pH} \geq 5.0-5.5$ and a soil layer more than 60 cm.

Keywords: *Agricultural recultivation, base saturation, exchange allocation, equilibrium soil solution*

1. Einleitung

Die Abschlusskippen der Braunkohletagebaue, die aus schwefelhaltigen Abraummassen tertiären Ursprungs bestehen, sind extrem kulturfeindlich. Sie können erst dann einer geregelten Bodennutzung zugeführt werden, wenn ihr außerordentlich ungünstiger Säurestatus durch eine Grundmelioration nachhaltig verbessert wird. Hierzu sind bereits in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts umfangreiche Versuche an der Karl-Marx-Universität Leipzig (Brüning 1959) und insbesondere an der Humboldt-Universität zu Berlin (Knabe 1959, Pniower 1956) durchgeführt worden. Sie zeigten, dass der Erfolg der Rekultivierung von der richtigen Bemessung der Kalkgabe abhängt und zur nachhaltigen Verbesserung der Aziditätsverhältnisse schwefelhaltiger Kippsubstrate meist sehr große Kalkmengen erforderlich sind, die mit den üblichen Methoden der Kalkbedarfsbestimmung nicht ermittelt werden können. Daraufhin wurden Versuche zur geogenen Säurenachlieferung durch mikrobielle Oxidation der Eisensulfide und durch Hydrolyse der wasserlöslichen Fe- und Al-Sulfate sowie zur Basenneutralisationskapazität (BNK) schwefelhaltiger Abraummassen durchgeführt (Illner 1967; Katzur 1965, 1970, 1971; Schwartz 1964). Sie erbrachten den Nachweis, dass aus den schwefelhaltigen Sedimenten eine ständige Säurenachlieferung erfolgt und dass auch nach der Melioration mit einer weiteren Säurebildung in der Aerationzone zu rechnen ist. Deshalb war bei der Bemessung der meliorativen Kalkgabe auch die Säurepotenz der schwefelhaltigen Kippenböden zu berücksichtigen, und es wurde die Säure-Basen-Bilanz (SBB) als Methode der Kalkbedarfsbestimmung schwefelhaltiger Kippenböden entwickelt (Illner und Katzur 1964a, b, c) und in die Praxis eingeführt. Sie gilt für alle schwefelhaltigen Kippenböden (Katzur 1971).

Die Ergebnisse zahlreicher landwirtschaftlicher und forstlicher Rekultivierungsversuche haben die Zweckmäßigkeit der SBB als Methode der Kalkbedarfsbestimmung bestätigt (Illner und Katzur 1968; Lorenz 1967; Katzur und Herbert 1980, Katzur et al. 1998, 1999, 2001). Somit war das Problem der Grundmelioration und Rekultivierung schwefelhaltiger Kippenböden grundsätzlich gelöst. Aufgrund der kurzen Versuchsdauer konnten verständlicherweise nicht alle Teilfragen geklärt werden. Vor allem jene nicht, die sich aus der Entwicklung der Agrar- und Forstökosysteme ergeben und das biologische Ertragspotential der grundmeliorierten Kippenstandorte betreffen.

Der zur Grundmelioration und Rekultivierung schwefelhaltiger Kippsubstrate dargelegte Kenntnisstand wird in einem Überblicksbeitrag von Hüttl und Bens (2003) nicht bzw. nur sehr unvollständig und ohne Nennung der Autorschaften wiedergegeben, was vor dem Hintergrund einer über 40 jährigen Kippenforschung in der Region doch einigermaßen überrascht.

Im Folgenden soll über die Ergebnisse des wohl am längsten wissenschaftlich betreuten und daher gut dokumentierten Freilandversuches zur landwirtschaftlichen Rekultivierung schwefel- und kohlehaltiger Kippenböden berichtet werden. Sie geben wichtige Hinweise zur Bodenentwicklung und lassen nach einer Rekultivierungszeitdauer von ca. 40 Jahren

Tabelle I. Meliorationsvarianten des Daueraufbringungsversuches (DA/58).
 Table I. Variants of amelioration of the continuous application trial DA/58.

Variante	Bodenwirksame Neutralisationsmittel in dt CaO/ha									Stalldünggabe in dt FM/ha		Kalkwerte der alkalischen Düngemittel von 1961–2001 (dt CaO/ha)
	Kalkdüngemittel					Industrieabwasser****			Summe	1988 (Nov.)	1991 (Aug.)	
	1958 (Okt.)	1965 (Jun.)	1988*** (Nov.)	1993*** (Apr.)	1998*** (Sept.)	1958–1961	1962–1965	1966–1968				
V 1	–	108***	50	91	33	51	10	4	347	300	200	63
V 2	–	493***	17	44	–	51	6	4	615	–	–	63
V 3	100*	76***	52	66	13	51	6	4	368	300	200	63
v 4	200*	–	56	91	22	51	6	4	430	–	–	63
V 5	873**	–	18	48	–	51	6	4	1000	300	200	63

* Branntkalk Kalkbedarf nach SCHACHTSCHABEL für pH 4,7 und 30 cm mächtige Bodenschicht. Ø 89 dt CaO/ha ** 500 m³/ha Braunkohlenasche

*** Kalkmergel: CaO-Gabe entspricht dem Kalkbedarf nach Schachtschabel für pH 5,5 (1965, 1988, 1998) bzw. pH 6,5 (1993) und eine 22,5 cm (1993, 1998), 30 cm (1988) bzw. 45 cm (1965) mächtige Bodenschicht

**** Abwassergaben

1958–1961: 3.798 mm Bioschlamm (V 1 - V 5)

1962–1965: 278 mm Bioschlamm (V 1)

1965: 430 mm Bioschlamm (V 1 - V 5)

1966–1968: 230 mm Bioschlamm und 210 mm Bioabwasser (V 1 - V 5)

eine abschließende Bewertung des agrobiologischen Ertragspotentials derartiger Kippenböden zu.

2. Material und Methoden

Der Daueraufbringungsversuch wurde 1958 (DA 58) auf einem stark kohlehaltigen Kipp-Lehmsand (oj-xls) als mehrfaktorieller Testversuch ohne Wiederholung angelegt. In ihm wurde geprüft, welche Mengen an nährstoffreichen Industrieabwässern (Bioschlamm = BS) maximal verrieselt werden können und welche Veränderungen dabei Abwasser (Katzur 1964) und Boden (Illner und Katzur 1964 a) erfahren. Zu diesem Zweck waren im Oktober 1958 je 4 Erdbecken (3 m x 6 m) unterschiedlich melioriert (V 1 bis V 5) und ab November 1958 bis Juli 1961 mit unterschiedlich hohen BS-Gaben (N1 bis N4) nachbehandelt worden (Tabelle I). Der Bioschlamm wie auch das Beregnungswasser waren der biologischen Abwasserreinigungsanlage der Kokerei Lauchhammer entnommen worden.

Der erste Rekultivierungsabschnitt (1962 - 1965) begann und endete mit Futterroggen, ohne dass eine NPK-Mineraldüngung erfolgte. Bei V 1 sind jedoch insgesamt 278 mm BS zu den Feldfrüchten (2 x Grünroggen, Grünmais, W-Rüben, Sonnenblume, Grünsenf) ausgebracht worden. Der Versuch wurde 1965 abgewandelt (vgl. Tabelle I). Die bei V 1 bis V 3 applizierten Kalk- bzw. Aschegaben wurden wie 1958 nur 20 bis 25 cm tief in den Boden eingearbeitet. Anschließend wurden alle Parzellen mit Futterroggen (1965), Gras (1966 - 1970), Kartoffel (1971) und Luzerne (1972 - 1975) bestellt. Später wurden auch Wintergetreide (1977, 1979, 1990, 1991, 1999, 2001), W-Raps (1992), Möhre (1981), Silomais (1978, 1998, 2000), Kolbenhirse (1984) und Süßlupine (1984) sowie erneut Kartoffeln (1976, 1980, 1983, 1989) und Luzerne (1985 - 1987, 1992 - 1997) angebaut. Der Anbau von Winterweizen (1977), Kolbenhirse und Winterraps erbrachte wegen starker Vogelfraßschäden keine auswertbaren Körnererträge. Die Hirse wurde deshalb als Ganzpflanze geerntet.

Die ersten Mineraldüngergaben wurden 1967 (PK) bzw. 1968 (NPK) zu Grasland ausgebracht. Die Höhe der Nährstoffgaben richtete sich nach dem Nährstoffbedarf der angebauten Kulturen und den in der Ackerkrume angestrebten Sollwerten von rund 8 mg P, 16 mg K_{DL} und 5 mg $Mg_{(CaCl_2)}$ je 100 g Boden, so dass in den ersten Jahren stets über den Nährstoffentzug gedüngt wurde. Danach bildeten die von Kundler (1981) für lehmige Sande angegebenen Sollwertspannen (6 - 7,6 mg P_{DL} , 8 - 11 mg K_{DL} und 5 - 7 mg $Mg_{(CaCl_2)}$ je 100 g Boden) die Bezugsbasis zur Ermittlung der pflanzenartabhängigen Nährstoffgaben. Verwendet wurden keine die Bodenversauerung begünstigende und überwiegend Mg-haltige Mineraldüngemittel. Im Durchschnitt wurden rund 146 kg N, 41 kg P, 113 kg K und 41 kg Mg pro Hektar und Jahr gedüngt (vgl. Tabelle II).

Tabelle II. Gesamt-Nährstoffgaben in dt RN/ha (1958 bis 2001).

Table II. Total fertilization in dt RN ha⁻¹ (1958 bis 2001).

Variante	N	P	K	Mg	Ca	davon: 1962–2001				
						N	P	K	Mg	Ca
V 1	168,1	24,9	58,0	24,6	212,2	64,7	16,6	45,4	23,9	177,1
V 2	155,8	23,8	61,2	16,0	456,2	52,4	15,5	48,6	15,3	421,1
V 3	160,6	24,3	57,1	19,3	235,6	57,2	16,0	44,5	18,6	129,0
V 4	155,8	23,2	50,5	15,3	284,8	52,4	14,9	37,9	14,6	106,7
V 5	160,6	24,8	71,1	171,4	503,8	57,2	16,5	44,5	7,9	46,7
\bar{x}	160,2	24,2	59,6	49,3	333,6	56,8	15,9	44,2	16,1	176,1
Reinnährstoffgabe in kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹						145,6	40,8	113,3	41,2	451,6

In den Jahren 1988, 1993 und 1998 waren zur Realisierung optimaler Reaktionsverhältnisse Gesundungs- (V 1, V 3, V 4) und Erhaltungskalkungen (V 2, V 5) notwendig. Außerdem erhielten die Parzellen der Varianten V 1, V 3 und V 5 eine Schafmistgabe von 300 dt FM/ha zu Kartoffel (1989) und von 200 dt FM/ha zu Winterraps (1992).

In der Tabelle I sind im Unterschied zu früheren Veröffentlichungen die mit Braunkohlenasche, Kalkdüngemittel und Industrieabwasser zugeführten bodenwirksamen Basen (Ca, Mg) als Kalkwerte in dt CaO/ha ausgewiesen. Diese ergeben sich bei den Aschen aus der basischen und acidischen Wirksamkeit der Elemente Ca, Mg und S.

Aus jeder Parzelle wurde in unregelmäßigen Zeitabständen Bodenmischproben mit dem Bohrstock (10 Bohrstockproben/Mischprobe) aus den Tiefenstufen 5 – 15 cm, 25 - 35 cm und 55 - 65 cm sowie 150 - 165 cm im Jahr 1998 entnommen und nach den standardisierten Verfahren auf folgende Kennwerte untersucht:

$\text{pH}_{\text{KCl, H}_2\text{O}}$ (DIN ISO 10390)
 KAK_{pot} nach MEHLICH (DIN 19684-8)
 KAK_{eff} nach ULRICH und MEIWES (DIN 38406 E 22)

Gleichgewichtslösung (Ca, Mg, K, Na, Fe, Al, Mn; pH-Wert)
 nach ULRICH und MEIWES (DIN 38406 E 22)
 Ca_t , Mg_t , K_t im 10 %igen HCl-Auszug (DIN 38406 E 22)
 flüchtiger Schwefel (S_{fl}) nach ILLNER et al. (1968)

Die bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Untersuchungsergebnisse sind mittels einfacher Varianzanalyse und teils durch Regressionsanalysen ausgewertet worden (Weber 1967).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Aciditäts- und Basensättigungsverhältnis

Die Entwicklung der pH_{KCl} -Werte in den verschiedenen Tiefenstufen zeigt, dass nur bei der Meliorationsvariante V 5 von Anfang an bis in 65 cm Bodentiefe vergleichsweise stabile Reaktionsverhältnisse initiiert wurden (vgl. Tabelle III).

Die hier mit der Braunkohlenasche und dem Bioschlamm von 1958 bis 1961 zugeführte bodenwirksame CaO-Gabe von rund 924 dt/ha entspricht annähernd dem aus der SBB für pH 5,5 ($\geq 60\%$ BS_{pot}) und eine 60 cm mächtige Bodenschicht berechneten Kalkbedarf von rund 1.068 dt CaO/ha (vgl. Tabelle VII). Nach Einstellung der Abwasserlandbehandlung nehmen die pH-Werte in 55 - 65 cm Bodentiefe kurzfristig ab. Ursache ist die starke geogene Säurenachlieferung. Im Verlaufe der weiteren Bodenentwicklung steigen die pH-Werte in 55 - 65 cm Tiefe wieder an und verbleiben bis 1982 auf einem statistisch gesichert höheren Niveau als bei der Vergleichsvariante V 1. Erst 1985, also 37 Jahre nach der Grundmelioration, wird eine deutliche Abnahme der pH-Werte in 25 - 35 und 55 - 65 cm Bodentiefe beobachtet. Vermutlich ist zu diesem Zeitpunkt die geogen bedingte Säurefreisetzung in den tieferen, aber zwischenzeitlich aufgebasten Bodenschichten höher als die Säureneutralisationskapazität (SNK). In der oberen Bodenschicht führt der Basenaustrag in Verbindung mit der pedogenen und anthropogenen Protonennachlieferung allmählich zur Versauerung des Bodens. Diese Versauerungstendenz ist bei V 5 relativ spät erkennbar und erfordert dann eine Erhaltungskalkung.

Die bei V 3 und V 4 mit Branntkalk und Bioschlamm bis 1961 ausgebrachten CaO-Gaben von insgesamt rund 150 bzw. 250 dt/ha reichten bei weitem nicht aus, um die für eine

Tabelle III. Entwicklung der pH_{KCl} -Werte ($n = 4$).
Table III. Development of the pH_{KCl} -values ($n = 4$).

Tiefenstufe (cm)	Variante	Datum der Probenentnahme														
		09.10. * 1958	23.07. 1962	19.05. 1965	11.05. 1966	25.10. 1968	23.03. 1970	05.01. 1972	09.10. 1975	15.08. 1977	01.10. 1980	10.08. 1982	11.04. 1985	09.10. 1989	06.04. 1990	12.05. 1998
5–15	V 1	2,47	4,05	3,33	3,39	3,53	3,99	3,97	3,72	3,82	4,32	3,62	4,05	4,28	4,45	5,05
	V 2	2,59	4,30	3,35	5,96	5,72	6,22	6,28	6,18	5,66	5,55	5,70	5,42	5,60	5,60	5,80
	V 3	2,61	4,25	3,56	3,55	4,28	4,08	4,17	3,98	3,95	3,58	4,12	4,35	4,12	4,25	5,35
	V 4	2,58	4,30	3,60	3,41	3,15	3,37	3,62	3,42	3,39	4,10	3,60	3,82	3,85	4,08	5,15
	V 5	2,61	5,30	5,69	6,22	5,49	5,20	5,12	5,55	5,52	5,48	5,52	5,25	5,42	5,52	5,92
	\bar{x}	2,57	4,44	3,91	4,50	4,43	4,57	4,63	4,57	4,43	4,60	4,52	4,58	4,66	4,78	5,46
	GD 5 %	0,13	0,46	0,29	0,71	0,81	0,41	0,39	0,52	0,47	0,68	0,65	0,46	0,56	0,55	0,34
25–35	V 1	2,60	4,18	3,15	3,11	3,09	3,15	3,24	3,05	2,92	4,32	3,32	3,72	3,12	3,20	4,85
	V 2	2,52	3,98	3,27	3,38	5,02	4,32	4,37	4,88	4,52	4,95	4,10	3,85	3,80	4,00	5,68
	V 3	2,54	4,08	3,51	3,24	3,20	3,28	3,61	3,28	3,49	4,45	3,40	3,90	3,12	3,25	5,28
	V 4	2,55	4,73	6,63	3,41	3,17	3,22	3,41	3,23	3,26	3,68	3,00	3,48	3,12	3,30	5,02
	V 5	2,55	5,45	6,09	5,43	5,65	5,72	5,73	5,65	5,40	5,12	5,38	4,38	5,32	5,35	5,95
	\bar{x}	2,55	4,48	3,93	3,73	4,04	3,94	4,07	4,02	3,92	4,50	3,84	3,86	3,70	3,82	5,36
	GD 5 %	0,16	0,78	0,35	0,63	0,78	0,44	0,60	0,80	0,83	0,68	1,19	1,00	0,48	0,60	0,35
55–65	V 1	-	3,40	2,83	3,04	2,95	2,85	2,91	2,83	2,81	4,30	3,05	3,25	2,95	2,72	4,35
	V 2	-	3,80	2,87	3,38	3,27	3,08	3,22	3,90	2,85	4,70	3,75	3,35	3,40	3,40	5,05
	V 3	-	3,95	3,13	2,94	3,23	2,83	3,04	2,95	3,01	4,15	3,12	3,52	3,05	3,00	4,48
	V 4	-	3,73	3,04	3,11	3,03	2,94	3,14	2,85	2,95	3,65	2,88	3,48	2,92	2,95	4,35
	V 5	-	4,33	3,40	3,51	4,21	3,74	4,09	4,63	5,29	5,00	4,62	3,10	5,30	4,62	5,62
	\bar{x}	(2,22)**	3,84	3,05	3,19	3,34	3,09	3,28	3,43	3,58	4,36	3,46	3,34	3,52	3,34	4,77
	GD 5 %		0,74	0,53	0,62	0,98	0,48	0,37	1,09	0,64	0,56	1,27	0,61	0,65	0,82	0,37

* Vor Versuchsbeginn

** Durchschnittswert von 30 - 100 cm Profiltiefe (Weisbrod und Heger 1961)

ackerbauliche Nutzung erforderlichen pH-Werte von 5,5 - 6,0 zu gewährleisten. Das gilt auch noch für den Zeitraum bis 1998, obwohl zwischenzeitlich größere Säuremengen mit dem Sickerwasser in die Tiefe verlagert wurden und mehrere Nachkalkungen erfolgten. Wesentlich wirksamer war die 1965 mit 500 m³ Braunkohlenasche ausgeführte Bodenmelioration (V 2). Hier sind die pH-Werte in 5 - 15 cm Tiefe ab 1966 bis 1998 und in 25 - 35 cm Tiefe zeitversetzt ab 1968 bis 1977 sowie nach den Erhaltungskalkungen ab 1989 bis 1998 signifikant höher als bei V 1, V 3 und V 4.

Die bei V 2 bis 1993 applizierte CaO-Gabe von insgesamt 615 dt CaO/ha ist niedriger als der aus der SBB berechnete Kalkbedarf. Dennoch werden 1998 bis in 65 cm Bodentiefe pH-Werte von > 5,0 ermittelt. Deshalb ist zu vermuten, dass die aus den unbehandelten Bodenschichten tieferverlagerten Säureäquivalente höher sind als die Baseneinträge. Außerdem enthalten die Aschen neben dem freien CaO auch schwer hydrolysierbare und in Gläsern inkludierte Ca-Verbindungen, die erst nach längerer Einwirkungsdauer der Umweltmedien bodenwirksam werden. Unter diesen Bedingungen werden größere Anteile der durch Pyritverwitterung und Hydrolyse freigesetzten Protonen nicht neutralisiert sondern ausgewaschen.

Die Entwicklung der pH-Werte korrespondiert mit der der Basensättigung (BS) in % von $KAK_{pot.}$ (Tabelle IV). Das wird durch die für 1998 berechnete Regressionsfunktion mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,9534$ ($r_{max} = 0,444$) bestätigt (Abb. 1).

Zu Versuchsbeginn setzte sich der austauschbare Kationenbelag nahezu ausschließlich aus H^+ -, Al^{3+} - und $Fe^{2+/3+}$ -Ionen zusammen und war die Basensättigung praktisch gleich Null (Weisbrod und Heger 1961). Die Bodengehalte an freier Säure schwankten zwischen 3,05 und 6,58 $cmol_c \cdot kg^{-1}$ und nahmen mit der Bodentiefe zu. Demnach kann von einer fast 100 %igen Protonierung der Puffersubstanzen, die zu ≥ 85 % aus fossiler organischer Substanz (Kohlehuminstoffe) bestanden, ausgegangen werden. Aufgrund dieser, für alle Versuchsvarianten zutreffenden Ausgangsbedingungen, lassen sich die bei der BS erzielten Verbesserungen ausschließlich auf die bodenmeliorativen und später auch auf die ackerbaulichen Maßnahmen zurückführen. Beachtenswert ist, dass nur bei der Meliorationsvariante V 5 von Anfang an und bei V 2 erst nach einer Melioration mit 500 m³/ha Braunkohlenasche signifikant höhere Basensättigungen bis in 35 cm Bodentiefe ermittelt werden. Dieser Einfluss ist auch noch in der nächst tieferen Bodenschicht erkennbar. Demgegenüber haben die Abwasserlandbehandlung (V 1) und diese in Kombination mit einer CaO-Gabe von 200 dt/ha (V 4) nicht ausgereicht, um die bis 1965 nachgelieferten Säuren zu neutralisieren. Auch die Kalkung von 1965 und der bevorzugte Einsatz alkalischer Düngemittel haben den geogen bedingten Trend zur starken Versauerung des Bodens bis in 65 cm Tiefe nicht abwenden können. Erst die Nachkalkungen von 1988 und 1993 bewirkten einen deutlichen Anstieg der BS bis in 65 cm Bodentiefe. Inwieweit auch noch nach 1998 mit stabilen Reaktionsverhältnissen gerechnet werden kann, soll nachfolgend anhand der bodenkundlichen Untersuchungsergebnisse vom 12.05.1998 diskutiert werden. Diese Untersuchungen wurden an repräsentativen Mischproben durchgeführt, so dass eine statistische Auswertung der Ergebnisse nicht möglich war.

3.2. $KAK_{eff.}$ und Austauschbelegung

Im Hinblick auf die Pufferung interessieren vor allem die effektiv wirksame Kationenaustauschkapazität ($KAK_{eff.}$), die Vorräte an austauschbaren Kationen und die Zusammensetzung des Kationenbelages (vgl. Tabelle V). Die $KAK_{eff.}$ schwanken in Abhängigkeit von den pH-Werten und Gehalten an organischer Substanz (rezenter und fossiler Humus) in weiten Grenzen. Da der stärkste Beitrag zur pH-abhängigen Ladung von

Tabelle IV. Entwicklung der Basensättigung in % von KAK_{pot} (n = 4).
 Table IV. Development of the base saturation in % of the CEC_{pot} (n = 4).

Tiefenstufen (cm)	Variante	Datum der Probenentnahme								
		31.08.1963	19.05.1965	30.01.1968	05.01.1972	09.10.1975	15.08.1977	01.10.1980	10.04.1985	12.05.1998*
5–15	V 1	2,6	0	14,6	2,8	31,7	24,4	7,7	18,0	51,0
	V 2	-	0	78,2	63,7	67,3	88,6	-	40,8	90,5
	V 3	-	-	24,6	2,2	31,7	33,6	-	16,5	54,3
	V 4	-	0	20,3	0	15,8	19,6	9,2	12,4	44,1
	V 5	64,4	43,6	59,7	39,1	71,7	86,5	40,2	48,0	71,3
	\bar{x}	-	-	39,5	21,5	43,6	50,6	-	27,1	62,2
	GD 5 %	-	-	14,05	11,52	31,22	15,0	-	12,86	-
23–35	V 1	3,0	0	25,0	0,6	22,3	14,9	11,6	8,3	44,7
	V 2	-	0	53,6	13,4	51,8	57,8	-	32,6	77,2
	V 3	-	-	30,9	2,2	15,7	24,8	-	11,7	55,3
	V 4	-	6,2	37,2	1,7	15,5	19,2	12,1	6,9	37,2
	V 5	67,3	57,2	84,5	31,5	70,0	82,0	44,3	56,6	68,8
	\bar{x}	-	-	46,2	9,9	35,1	39,7	-	23,2	56,6
	GD 5 %	-	-	33,44	24,26	15,78	24,83	-	22,4	-
55–65	V 1	1,4	0	-	6,4	17,5	13,4	17,2	13,4	40,5
	V 2	-	0	-	2,4	32,2	40,4	-	21,3	50,7
	V 3	-	-	-	6,4	17,1	17,3	-	6,3	42,6
	V 4	-	0	-	1,0	16,5	14,6	10,8	16,9	28,4
	V 5	10,5	8,0	-	17,3	47,9	60,8	44,9	17,4	62,0
	\bar{x}	-	-	-	6,7	26,2	29,3	-	15,1	44,8
	GD 5 %	-	-	-	14,11	16,31	28,64	-	22,41	-

* eine repräsentative Bodenmischprobe pro Variante und Tiefenstufe

den Huminstoffen kommt, liegen die KAK_{eff} bei pH-Werten $\leq 4,3$ im Perkolat weit unterhalb der KAK_{pot} . Steigen die pH-Werte an, so nehmen in der Regel auch die KAK_{eff} und damit die Menge an austauschbaren Kationen zu. Die höheren KAK_{eff} und Anteilssummen von Ca an der KAK_{eff} werden bis in 160 cm Tiefe bei der Meliorationsvariante V 5 bestimmt.

Die ausgeprägte Selektivität der Huminstoffe für Ca^{2+} bedingt, dass die Mg^{2+} -Sättigung generell niedriger ist als die Ca^{2+} -Sättigung. Die Anteile von Mg^{2+} an der KAK_{eff} sind bei V 2 und V 5 am niedrigsten und liegen in den oberen Bodenschichten bei 9,2 bis 27,5 %, was auf eine ausreichende Mg-Versorgung hinweist. Dagegen sind die K^+ -Anteile mit 0,5 bis 1,6 % sehr gering.

Im Allgemeinen nimmt mit der Bodentiefe die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Sättigung ab, während die austauschbaren Al^{3+} - und Fe^{2+} -Ionen ansteigen, was mit dem Tiefengradienten der pH-Werte korrespondiert. Die Anteilssummen von Al, Fe, Mn und H am KAK_{eff} liegen bei pH-Werten $\geq 5,0$ zwischen 0 und 0,8 %. Sie steigen mit der Abnahme der pH-Werte bei pH $< 5,0$ - 4,3 von 1,0 auf 7,7 % und bei pH $< 4,3$ - 3,0 von 8,6 % bis auf 78,6 % an.

Unterhalb von pH 5,0 findet mit steigender H^+ -Konzentration eine zunehmende Auflösung von Al-Oxiden und eine Zerstörung der Silikate statt. Hierdurch werden Al^{3+} - aber auch Fe^{2+} - und Mn^{2+} -Ionen freigesetzt. Sinkt der pH-Wert auf $< 3,5$, so steigen mit abnehmendem pH-Wert nicht nur die Al^{3+} -Anteile, sondern auch die Anteile an Fe^{2+} und dissoziierbarem Wasserstoff am Kationenbelag an. Solche tiefen pH-Werte verursachen freie starke Säuren wie z.B. H_2SO_4 , die unmittelbar bei der Oxidation der Eisensulfide und durch Hydrolyse der Fe(III)- und Al(III)-Sulfate entsteht. Außerdem treten bei pH-Werten $< 3,5$ zunehmend anorganische Fe^{3+} -Ionen in der Bodenlösung auf, die unter anaeroben Verhältnissen zu Fe^{2+} -Ionen reduziert werden. Solche Verhältnisse können in den stark kohlehaltigen Kippenböden ($> 5,0$ % C_c) erwartet werden, so dass am Kationenbelag dieser Böden vermutlich ausschließlich Fe^{2+} -Ionen beteiligt sind. Im sehr stark sauren pH-Bereich (pH $< 4,0$ - 3,0) sind die Austauschpositionen an den variablen Ladungen von Huminstoffen und anorganischen Austauschern nahezu vollständig protoniert; KAK_{eff} erreicht ihr Minimum und besteht dann praktisch nur noch aus permanenter Ladung. Diese ist mit ca. 10 bis 13 $cmol_c \cdot kg^{-1}$ FB bei einem Tongehalt von \emptyset 10,2 Masse-% vergleichsweise hoch. Ursache sind einige Besonderheiten der organischen Substanz bei der Kationenadsorption. So werden zum einen Protonen an funktionellen Gruppen geringer Säurestärke deutlich stärker als Ca^{2+} -Ionen gebunden und zum anderen Al^{3+} - sowie $Fe^{2+/3+}$ -Ionen in noch stärkerem Maße als Ca^{2+} -Ionen adsorbiert, weil diese noch durch kovalente Kräfte spezifisch in Form von organischen Komplexen gebunden werden (Scheffer/Schachtschabel 1989).

Die $KAK_{\text{eff}}/KAK_{\text{pot}}$ -Verhältnisse von 0,55 bis 0,72 sind nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen typisch für die grundmeliorierten C_t-reichen Kippenböden (pH_{KCL} $> 5,0$ bis 6,0). $KAK_{\text{eff}}/KAK_{\text{pot}}$ -Verhältnisse von $< 0,5$ bis 0,38 deuten auf geringe bis mittlere und solche von $\leq 0,37$ bis 0,30 auf starke in jüngerer Zeit im Boden abgelassene Versauerungsschübe hin.

Die nach Ulrich (1990) für eine Basensättigung von 60 % KAK_{pot} berechneten Versauerungsäquivalente sind ein Maß für die im Boden verbliebene Säuremenge aus den seit der Grundmelioration abgelassenen Versauerungsvorgängen. Diese belegen, dass nur bei den Meliorationsvarianten V 2 und V 5 die im Verlauf von 40 Jahren in den beiden oberen Bodenschichten freigesetzten Protonen bis zu einem pH-Wert von ca. 5,5 bis 6,0 vollständig abgepuffert wurden (vgl. Tabelle III und V). In der nächst tieferen Bodenschicht gilt das auch noch für V 2 und V 5, wenn ein Ziel-pH-Wert von nur 5,0 ($\underline{\Delta} 50$ % BS_{pot}) unterstellt wird. Beachtenswert sind die hohen Bodenvorräte an mobilisierbaren Basen insbesondere bei V 2 und V 5 bis in 65 cm Bodentiefe, was auf

Tabelle V. Sorptionsverhältnisse, Versauerungsäquivalente und mobilisierbare Basenvorräte (Mb) vom 12.05.1998.
 Table V. Sorption ratios, equivalents of acidify and mobilisable stocks of bases (Mb) from 12.05.1998.

Tiefenstufe (cm)	Variante	KAKpot (cmol _c *kg ⁻¹ FB)	KAKeff	KAKeff KAKpot	pH im Perko- lat	Austauschbare Kationen in % von KAKeff										Versauerungs- äquivalent* (cmol _c *kg ⁻¹ FB)	Mb-Vorrat (cmol _c *k- g ⁻¹ FB)	Mol-Verhältnisse			
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Σ Basen	Al ³⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	H ⁺	Σ Säuren			C	H	Al	
5-15	V 1	35,3	19,6	0,55	4,8	74,0	23,6	0,9	0,5	99,0	0,6	0,2	0,2	n.b.b.**	1,0	+ 1,82	19,4	80,6	●	25,6	
	V 2	30,0	21,5	0,72	5,8	88,2	10,7	0,6	0,5	100,0	0,0	0,0	0,0	n.b.b.	0,0	3,49	21,5	●	●	●	
	V 3	30,6	18,7	0,61	5,2	72,1	26,0	1,0	0,5	99,6	0,2	0,0	0,2	n.b.b.	0,4	-0,25	18,6	225,0	●	●	80,8
	V 4	33,5	14,7	0,44	5,0	71,1	26,3	1,1	0,7	99,2	0,5	0,1	0,2	n.b.b.	0,8	+ 5,49	14,6	87,5	●	●	32,2
	V 5	38,0	26,4	0,69	6,1	88,7	10,3	0,5	0,4	99,9	0,1	0,0	0,0	n.b.b.	0,1	3,59	26,4	783,3	●	●	90,3
	\bar{x}	34,5	20,2	0,60	5,4	78,8	19,4	0,8	0,5	99,5	0,3	0,1	0,1	●	0,5	-4,0 ⁻⁰³	20,1	207,7 ^{***}	●	●	47,0 ^{***}
25-35	V 1	34,4	16,4	0,48	4,6	73,3	23,1	1,2	0,6	98,2	1,3	0,3	0,2	n.b.b.	1,8	+ 4,57	16,1	36,4	●	●	11,4
	V 2	29,7	19,6	0,66	5,6	86,6	12,2	0,5	0,6	99,9	0,0	0,0	0,1	n.b.b.	0,1	- 1,75	19,6	1133,3	●	●	159,3
	V 3	26,2	15,4	0,59	5,2	71,0	26,1	1,4	0,8	99,3	0,4	0,1	0,2	n.b.b.	0,7	+ 0,38	15,3	104,8	●	●	38,4
	V 4	29,4	11,7	0,40	4,9	68,4	27,5	1,5	0,9	98,3	1,1	0,3	0,3	n.b.b.	1,7	+ 6,17	11,5	41,0	●	●	16,5
	V 5	35,3	24,1	0,68	6,0	89,2	9,6	0,6	0,4	99,8	0,1	0,0	0,1	n.b.b.	0,2	2,83	24,0	477,8	●	●	51,1
	\bar{x}	31,0	17,4	0,56	5,3	77,7	19,7	1,0	0,7	99,1	0,6	0,1	0,2	●	0,9	+ 1,31	17,3	100,7 ^{***}	●	●	22,7 ^{***}
55-65	V 1	36,1	13,6	0,38	4,1	69,5	19,9	1,3	0,7	91,4	5,4	1,0	0,3	1,9	8,6	+ 9,19	12,5	8,6	73,1	●	2,4
	V 2	31,6	15,4	0,49	4,8	87,8	10,2	0,6	0,6	99,2	0,5	0,1	0,2	n.b.b.	0,8	+ 3,73	15,2	128,6	●	●	14,9
	V 3	26,5	9,1	0,34	4,3	66,0	23,6	1,6	1,1	92,3	4,7	1,4	0,2	1,4	7,7	+ 7,53	8,4	9,3	92,3	●	3,3
	V 4	32,7	10,8	0,33	4,1	64,6	22,1	1,4	0,8	88,9	6,7	1,6	0,2	2,6	11,1	+ 10,00	9,6	6,4	50,0	●	2,2
	V 5	39,6	22,3	0,56	5,5	89,5	9,2	0,5	0,5	99,7	0,1	0,1	0,1	n.b.b.	0,3	+ 1,54	22,2	444,4	●	●	45,8 ^{***}
	\bar{x}	33,3	14,2	0,42	4,6	75,5	17,0	1,1	0,7	94,3	3,5	0,8	0,2	1,2	5,7	+ 6,40	13,6	18,7 ^{***}	●	●	15,7 ^{***}
150-160	V 1	43,1	13,0	0,30	3,0	21,6	3,2	0,9	0,8	26,5	28,3	7,5	0,1	37,6	73,5	+ 22,43	3,4	0,51	1,15	●	0,08
	V 2	30,3	10,2	0,34	3,1	24,8	2,7	0,7	0,9	29,1	26,0	7,3	0,1	37,5	70,9	+ 15,20	3,0	0,62	1,30	●	0,07
	V 3	34,8	11,6	0,33	3,0	20,1	2,7	1,2	0,9	24,9	25,7	7,4	0,1	41,9	75,1	+ 17,98	2,9	0,51	0,94	●	0,07
	V 4	37,2	11,4	0,31	3,0	17,5	2,5	0,7	0,7	21,4	29,2	6,6	0,1	42,7	78,6	+ 19,87	2,4	0,40	0,82	●	0,06
	V 5	33,7	12,6	0,37	3,2	43,6	3,5	0,7	0,7	48,5	21,2	6,0	0,1	24,2	51,5	+ 14,11	6,1	1,37	3,61	●	0,11
	\bar{x}	35,8	11,8	0,33	3,1	25,5	2,9	0,9	0,8	30,1	26,1	7,0	0,1	36,7	69,9	+ 17,92	3,6	0,66 ^{***}	1,40 ^{***}	●	0,08 ^{***}

*Versauerungsäquivalent = (60 % KAKpot - KAKeff) + (Al + Fe + Mn + H) austauschbar; verändert nach ULRICH (1990), positive Bilanz = Säureüberschuß; negative Bilanz = Basenüberschuß

** n.b.b. = nicht bestimmbar

*** berechnet aus den Mittelwerten

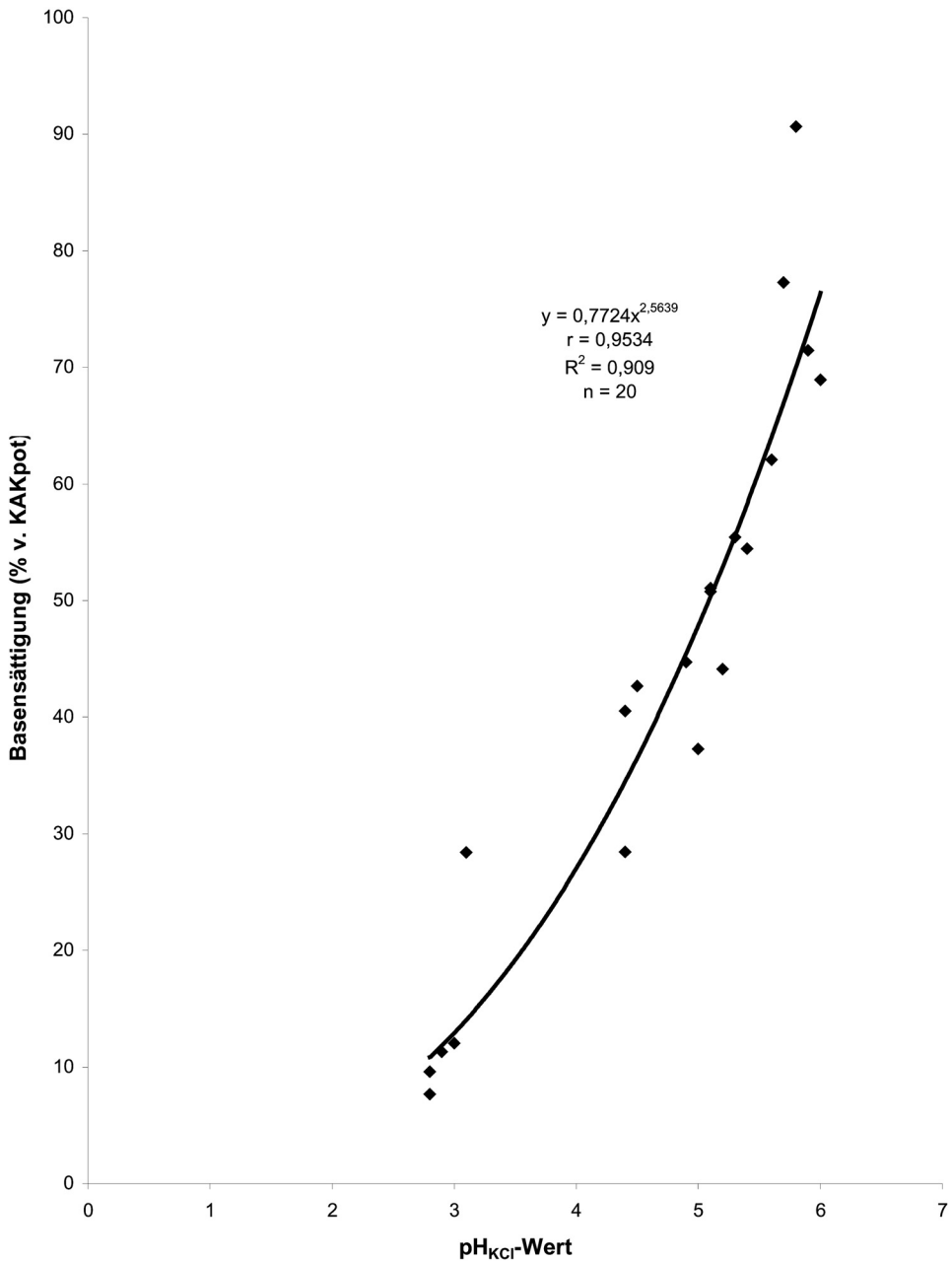


Abbildung 1. Korrelation zwischen pH-Wert und Basensättigung.
 Figure 1. Correlation between pH-value and base saturation.

eine vergleichsweise hohe Elastizität dieser Bodensysteme gegenüber Versauerungstendenzen hinweist. In 150–160 cm Bodentiefe liegen generell sehr hohe Versauerungsäquivalente vor, die auf eine ständige Säurenachlieferung infolge Pyritverwitterung und sickerwassergebundener Säureinträge schließen lassen.

Tabelle VI. Zusammensetzung der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) vom 19.05.1998.
Table VI. Composition of the equilibrium soil solution from 12.05.1998.

Tiefenstufe (cm)	Variante	pH _{GBL}	Kationen- summe (mmol/l)	Kationen in % der Mol-Summe							Mol-Verhältnis			SO ₄ ²⁻ - Gehalte der GBL (mmol/l)
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	H ⁺	Ca/Al	Ca/H	Mg/Al	
5–15	V 1	7,1	3,90	49,3	45,4	4,6	0,3	0,3	0,1	•	174,5	•	160,9	1,98
	V 2	6,7	1,67	71,7	22,7	4,8	0,3	0,4	0,1	•	200,0	•	63,3	0,79
	V 3	6,5	2,26	46,5	45,7	6,2	0,8	0,7	0,1	•	58,3	•	57,2	0,77
	V 4	5,9	2,66	45,1	49,6	4,5	0,3	0,4	0,1	•	171,4	•	188,6	1,25
	V 5	6,7	1,97	73,8	20,9	4,6	0,3	0,3	0,1	•	207,1	•	58,6	0,87
	\bar{x}	6,6	2,49	57,3	36,9	4,9	0,4	0,4	0,1	•	138,8*	•	100,0*	1,13
25–35	V 1	6,4	3,51	49,0	44,6	5,7	0,3	0,3	0,1	•	143,3	•	130,0	1,66
	V 2	7,0	2,03	69,0	24,2	5,9	0,4	0,4	0,1	•	155,6	•	54,4	0,66
	V 3	6,6	2,78	45,7	45,7	7,5	0,5	0,5	0,1	•	84,7	•	84,7	0,81
	V 4	6,2	2,92	44,5	49,3	5,5	0,3	0,3	0,1	•	144,4	•	160,0	1,46
	V 5	6,4	2,39	74,0	20,5	5,0	0,2	0,2	0,1	•	442,5	•	122,5	0,88
	\bar{x}	6,5	2,73	56,4	36,9	5,9	0,4	0,3	0,1	•	152,0*	•	107,1*	1,09
55–65	V 1	5,1	4,33	52,5	40,9	5,1	0,7	0,4	0,2	0,2	75,7	285,9	59,0	2,08
	V 2	6,4	2,46	73,1	21,5	4,5	0,4	0,4	0,1	•	163,6	•	48,2	0,94
	V 3	5,0	2,80	48,9	41,0	8,2	0,8	0,6	0,1	0,4	62,3	137,0	52,3	1,02
	V 4	5,1	2,80	47,1	45,3	5,7	0,8	0,6	0,2	0,3	60,0	166,2	57,7	1,35
	V 5	5,8	2,74	77,5	17,9	4,0	0,2	0,2	0,1	0,1	353,3	1341,8	81,7	1,09
	\bar{x}	5,5	3,03	59,8	33,3	5,5	0,6	0,5	0,1	0,2	97,8*	319,5*	57,1*	1,30
150–160	V 1	3,0	5,52	49,6	15,6	5,1	6,7	4,5	0,4	18,1	7,4	2,74	2,32	4,16
	V 2	3,3	3,89	61,7	13,6	3,6	4,6	3,3	0,3	12,9	13,3	4,80	2,94	2,50
	V 3	3,1	4,41	50,7	15,9	7,0	4,8	3,6	0,1	17,9	10,7	2,84	3,33	2,81
	V 4	3,0	4,44	46,6	14,9	4,7	6,8	4,1	0,4	22,5	6,9	2,07	2,20	2,81
	V 5	3,2	8,73	74,3	11,3	2,8	2,6	1,5	0,3	7,2	28,2	10,30	4,30	7,39
	\bar{x}	3,1	5,40	56,6	14,3	4,6	5,1	3,4	0,3	15,7	12,3*	4,09*	2,88*	3,93

* aus den Mittelwerten berechnet

Tabelle VII. Säure-Basen-Bilanzen (SBB) vom 12.05.1998.
Table VII. Acid-Base Account from 12.05.1998.

Tiefenstufe (cm)	Variante	60 % KAK _{pot} (mval/100 g FB)	S _{fl} (%)	10 %iger HCl-Auszug			Säure - Basen - Bilanz			SBB für 20 cm mächtige Boden- schicht*** in dt CaO/ha
				Ca	Mg (mg/100 g FB)	K	Σ Säure*	Σ Basen (cmol _c *kg ⁻¹ FB)	Bilanz**	
5-15	V 1	21,18	0,142	430	120	59	30,04	32,84	-2,80	-18,8
	V 2	18,00	0,188	1000	170	34	29,73	64,75	-35,02	-235,6
	V 3	18,36	0,200	380	110	48	30,84	29,24	+ 1,60	+ 10,8
	V 4	20,10	0,195	360	100	63	32,26	27,80	+ 4,46	+ 30,0
	V 5	22,80	0,182	1900	230	47	34,15	114,93	-80,78	-543,6
25-35	V 1	20,64	0,142	350	100	54	29,50	27,07	+ 2,43	+ 16,4
	V 2	17,82	0,188	920	150	36	29,55	59,17	-29,62	-199,3
	V 3	15,72	0,198	320	95	53	28,07	25,15	+ 2,92	+ 19,6
	V 4	17,64	0,192	260	100	48	29,62	22,43	+ 7,19	+ 48,4
	V 5	21,18	0,182	1200	150	46	32,53	73,40	-40,87	-275,0
55-65	V 1	21,66	0,152	280	76	52	31,14	21,55	+ 9,59	+ 64,5
	V 2	18,96	0,168	510	84	47	29,44	33,56	-4,12	-27,7
	V 3	15,90	0,185	220	83	38	27,44	18,78	+ 8,66	+ 58,3
	V 4	19,62	0,188	160	61	49	31,35	14,25	+ 17,10	+ 115,1
	V 5	23,76	0,182	1100	120	40	35,11	65,78	-30,67	-206,4
150-160	V 1	25,86	0,190	68	26	53	37,71	6,89	+ 30,82	+ 207,4
	V 2	18,18	0,220	90	33	58	31,90	8,68	+ 23,22	+ 156,3
	V 3	20,88	0,212	60	26	46	34,10	6,31	+ 27,79	+ 187,0
	V 4	22,32	0,252	47	28	43	38,04	5,74	+ 32,30	+ 217,4
	V 5	20,22	0,250	180	35	45	35,81	13,01	+ 22,80	+ 153,4
0-30	vor der	20,40	0,593	146	5	12	57,39	8,0	+ 49,39	+ 498,6****
30-100	Melioration	24,48	0,685	188	5	12	67,21	10,1	+ 57,11	+ 569,6****

*Σ Säure (cmol_c*kg⁻¹ FB) = 60 % KAK_{pot} + S_{fl}

**positive Bilanz = Säureüberschuss negative Bilanz = Basenüberschuss

***Gewicht der Bodenschicht: Ø 2.400 t/ha (d_B = 1,20 g·ccm⁻¹), 1 cmol_c*kg⁻¹ FB ≥ 672,96 kg CaO/2.400 t Boden

****SBB für 30 cm mächtige Bodenschicht berechnet

Die molaren Ca/Al und Ca/H-Verhältnisse an den Austauschern werden im Versuchsmittel mit der Profiltiefe enger und stehen in Beziehung zur Höhe der meliorativen CaO-Gabe sowie den seit Versuchsbeginn tiefenverlagerten Ca-Mengen (vgl. Tabelle V und VII). Bemerkenswert ist, dass die möglicherweise nichttoxischen Ca/Al-Verhältnisse von $\geq 1,0$ (Ulrich 1988) in den kohlehaltigen Kippenböden erst bei einer BS von $\geq 48,5$ % KAK_{eff.} ($\triangleq 18,1$ % KAK_{pot.}) erreicht werden. Die Ca/H-Verhältnisse sind in ähnlicher Weise wie die Ca/Al-Verhältnisse durch die Grundmelioration beeinflusst worden. Die Meliorationsvarianten mit den niedrigsten Gesamt-Kalkgaben (V 1, V 3, V 4) weisen mit Einschränkung bis in 160 cm Bodentiefe die höchsten Al- und ab einer Bodentiefe von 55 cm auch die höchsten H⁺-Anteile am Kationenbelag auf. Die bei V 1, V 3 und V 4 in 150 - 160 cm Bodentiefe ermittelten Ca/H-Verhältnisse von $< 0,6$ sowie Austauscherbelegungen von ≥ 9 mmol Al³⁺ und > 4 mmol H⁺ pro 100 g Feinboden könnten bei tieferwurzelnden Pflanzen Protonenstress verursachen.

3.3. Chemische Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung

In der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) nehmen die Mol-Summen der Kationen im Versuchsmittel mit der Bodentiefe zu und sind bei den Aschemeliorationsvarianten V 2 und V 5 bis in 65 cm Tiefe niedriger als bei den Kalkmeliorationsvarianten (Tabelle VI). Die geringeren Lösungskonzentrationen deuten zum einen auf eine bereits erfolgte starke Verlagerung wasserlöslicher Salze aus dem Meliorationshorizont in den Untergrund und zum anderen auf eine pH-abhängige Löslichkeit von Feststoffen einschließlich der Mineralneubildungen in den verschiedenen Tiefenstufen hin. Auffällig sind die hohen SO₄²⁻-Gehalte der Bodenlösung im Untergrund, verursacht durch den sickerwassergebundenen Sulfateintrag und die Pyritverwitterung infolge zunehmender Tiefenverlagerung der Aerationzone.

Die relativen Anteile von Ca²⁺ in der Bodenlösung sind bei pH-Werten von $\geq 5,0$ generell niedriger und bei pH-Werten von 3,0 bis 3,3 stets höher als im Kationenbelag (vgl. Tabelle V und VI). Auffällig sind die grundsätzlich höheren K⁺- und Mg²⁺-Anteile in der GBL. Offensichtlich werden in schwach bis mäßig sauren Böden K⁺- und Mg²⁺-Ionen bevorzugt von Ca²⁺ bei gleichzeitiger Protonierung der variablen Ladungen und in sehr stark sauren Böden Ca²⁺ und Mg²⁺ stärker von Al³⁺ und Fe²⁺ bei gleichzeitiger Protonierung weiterer variabler Ladungen von den Austauscherplätzen verdrängt.

Die molaren Ca/Al- und Ca/H-Verhältnisse liegen weit oberhalb der für die bestandesbildenden Baumarten ausgewiesenen Toxizitätsgrenzwerte von ≥ 1 (Ulrich 1990). Allerdings reagieren landwirtschaftliche Kulturen wesentlich empfindlicher auf Al-Toxizität, so dass schon ab 0,1 - 0,5 mg Al/l Bodenlösung Wachstumsminderungen eintreten können (Scheffer/Schachtschabel 1989). Die Al-Konzentrationen in der GBL liegen bei der ertragsstärksten Meliorationsvariante (V 5) bis in 160 cm Bodentiefe zwischen 0,13 und 6,1 mg/l, so dass bei einem Ca/Al-Verhältnis von $\geq 28,2$ eine Al- bzw. Säuretoxizität ausgeschlossen werden kann. Vermutlich sind in der Bodenlösung auch Al-organische Komplexe enthalten, die nichttoxisch oder nur von geringer Toxizität sind.

In der Zusammensetzung der GBL bestehen variantenabhängige Differenzierungen. So werden bei den mit Braunkohlenasche meliorierten Böden (V 2 und V 5) in allen Tiefenstufen die vergleichsweise höchsten Ca²⁺- und geringsten Mg²⁺-Anteile an der Kationensumme der Bodenlösung bestimmt. Die höheren Ca²⁺-Anteile sind zum einen auf die insgesamt höheren Ca-Bodenvorräte (vgl. Tabelle VII) und zum anderen auf die sickerwassergebundene Tiefenverlagerung größerer Ca²⁺-Mengen in Verbindung mit der Desorption von Ca²⁺ im sehr stark sauren Untergrund zurückzuführen. Die geringeren Mg²⁺-Anteile werden durch die im Verlauf der Bodenentwicklung eingetretenen starken

Mg^{2+} -Auswaschungsverluste verursacht. Zudem limitieren die mit der Versuchsdauer in den aschemelierten Böden abnehmenden Vorräte an leicht hydrolyisierbaren Mg-Verbindungen die Mg^{2+} -Lösungskonzentrationen. Dadurch sind die Mg^{2+} -Gehalte in der GBL von V 2 und V 5 mit 9,3 bis 13 mg/l bis in 65 cm Tiefe deutlich niedriger als bei den wiederholt mit Kalkmergel gedüngten Böden von V 1, V 3 und V 4 mit 28 bis 43 mg Mg^{2+} /l.

3.4. Säure-Basen-Bilanzen

Die für die jeweiligen Tiefenstufen errechneten Säure-Basen-Bilanzen (SBB) belegen, dass bei den Aschemeliorationsvarianten V 2 und V 5 ein deutlicher Basenüberschuss und bei allen anderen Meliorationsvarianten mit Ausnahme von V 1 in der oberen Bodenschicht ein Säureüberschuss bis in 65 cm Bodentiefe besteht, wenn ein pH-Wert von 5,5 angestrebt werden soll (vgl. Tabelle VII). Demnach sind bei V 1, V 3 und V 4 weitere Nachkalkungen erforderlich, wenn stabile Reaktionsverhältnisse bis in ≥ 65 cm Bodentiefe gewährleistet werden sollen.

Aus einem Vergleich der vor und nach der Melioration erstellten SBB lassen sich wichtige Schlussfolgerungen in bezug auf die mit der landwirtschaftlichen Rekultivierung eingetretenen Veränderungen im Säure-Basen-Status der schwefelsauren Kippenböden ableiten. Beispielsweise wies der Kippenboden vor Versuchsbeginn einen Säureüberschuss von rund 49 (0 - 30 cm) und 57 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ FB (30 - 100 cm) auf. Der daraus für eine 60 cm mächtige Bodenschicht berechnete Kalkbedarf beträgt rund 1.068 dt CaO/ha (vgl. Tabelle VII). Die bei V 1, V 3 und V 4 bis 1998 applizierten bodenwirksamen CaO-Gaben liegen deutlich darunter (vgl. Tabelle I), so dass weitere Kompensationskalkungen wahrscheinlich sind. Allerdings sind diese beispielsweise bei V 4 mit 193,5 dt CaO/ha für 60 cm erheblich niedriger als die Differenz aus Kalkbedarf nach der SBB (1.068 dt CaO/ha) und der bereits applizierten CaO-Gabe (493 dt CaO/ha).

Die durch die Kalkung in den schwefelsauren Kippenböden ausgelösten Pufferreaktionen bewirken, dass die adsorbierten Kationen (Al^{3+} , Fe^{2+} und dissoziierbarer H^+) gegen Ca^{2+} und Mg^{2+} ausgetauscht, die Protonen der Bodenlösung neutralisiert und die wasserlöslichen Salze sowie freien Mineralsäuren ausgewaschen werden. Die zum Zeitpunkt der Kalkung vorhandenen Puffersysteme bestimmen in Verbindung mit der Intensität der Pyritoxidation den Chemismus der Sickerwässer. Die Sickerwässer aus der meliorierten Bodenschicht beeinflussen wiederum in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung die Austausch-, Sorptions-, Lösungs- und Fällungsreaktionen in den darunter liegenden Infiltrationsschichten und verändern sich dadurch stetig in ihrer chemischen Zusammensetzung. Im Ergebnis der tiefendifferenziert ablaufenden Puffer- und Lösungsreaktionen formieren sich Sickerwässer, deren Salzfrachten beispielsweise aus einer 100 cm tief meliorierten, 300 cm mächtigen Bodenschicht zu > 99 % aus Sulfaten bestehen (Katzur et al. 2002). Davon sind nur rund 5 % CaSO_4 und 12 % MgSO_4 , während die Anteile von $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ bei 35 bis 40 % und die von Fe(II)/(III)-Sulfaten bei 22 bis 23 % liegen. Die schwefelsauren Salze werden also stärker ausgewaschen als die Neutralsalze, was die nach 40 Jahren zugunsten der Basenanteile veränderten SBB erklärt. Das gilt im besonderen Maße für die mit basischer Braunkohlenasche meliorierten Kippenböden (V 2, V 5). Bei diesen wird in der Summe für eine 60 cm mächtige Bodenschicht ein Basenüberschuss von rund 463 (V 2) bzw. 1.025 dt CaO/ha (V 5) errechnet. Offensichtlich enthalten die Aschen Ca-Verbindungen, die bei der Berechnung der bodenwirksamen basischen Bestandteile aus „HCl-Auszug (Ca, Mg, K) minus Gesamtschwefel“ nicht erfasst aber nach längerer Einwirkungszeitdauer der Umweltmedien freigesetzt werden. Dadurch kommt es zu einem weiteren Anstieg des bilanzierten Basenüberschusses.

Beachtenswert sind die Veränderungen des Säure-Basen-Status in 150 - 160 cm Bodentiefe. Hier werden 1998 geringere Säurepotentiale aus der SBB ermittelt als vor Versuchsbeginn. In dieser Tiefenstufe werden wie zuvor in der darüber liegenden Bodenschicht aufgrund der extrem sauren pH-Werte ($\text{pH} < 3,0$) die Al-Hydroxysulfate aufgelöst, die Fe(III)-Oxide und -Hydroxide protoniert und die dabei freigesetzten Al^{3+} - und Fe^{3+} -Ionen zusammen mit den bei der Pyritoxidation und Silikatverwitterung nachgelieferten Protonen sowie hydrolysierbaren Al(III)- und Fe(II)/(III)-Sulfaten ausgewaschen. Auf diesem Wege kommt es zu einer allmählichen Entsäuerung des Untergrundes, belegt durch den starken Abbau der Bodenvorräte an „flüchtigem“ Schwefel (S_{fl}), der sich aus der freien Schwefelsäure sowie den aktuellen (Al-/Fe-Sulfaten) und potentiellen Säurebildnern (Sulfide) zusammensetzt (Illner et al. 1968). Gleichzeitig nehmen die Ca-Bodenvorräte ab (vgl. Tabelle VII). Nur bei der Variante mit der höchsten CaO-Gabe (V 5) ist ein leichter Anstieg der Basenvorräte zu verzeichnen. Das ist von grundsätzlicher Bedeutung für die weitere Bodenentwicklung und zeigt, dass die Intensität der sickerwassergebundenen Basentiefenverlagerung in Beziehung zu den Basenvorräten in der meliorierten Bodenschicht steht und dadurch Einfluss auf die Durchwurzelbarkeit der tieferen nicht bearbeiteten Bodenschichten nimmt.

4. Schlussfolgerungen

- Die nachhaltige Verbesserung der Aciditäts- und Basensättigungsverhältnisse schwefelhaltiger Kippenböden durch Grundmelioration erfordert sehr hohe Kalkgaben, die aus der Säure-Basen-Bilanz (SBB) der Kippenböden für $\text{pH}_{\text{KCL}} 5,5$ und eine mindestens 60 cm, besser 100 cm mächtige Bodenschicht bestimmt werden.
- Die Höhe der bodenmeliorativen CaO-Gabe beeinflusst nachhaltig die Bodenentwicklung, insbesondere im Hinblick auf die
 - effektiv wirksame Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}),
 - Zusammensetzung des Kationenbelages und der Gleichgewichtsbodenlösung,
 - Austausch-, Sorptions-, Fällungs- und Lösungsreaktionen sowie Stoffverlagerungsprozesse und den Säure-Basen-Status sowohl in der meliorierten Bodenschicht als auch in den darunter liegenden Infiltrationsschichten.
- Die Meliorationstiefe und nicht die Höhe der bodenmeliorativen CaO-Gaben kann verringert werden, wenn die sickerwassergebundene Tiefenverlagerung der Basen durch eine mehrjährige Abwasserlandbehandlung beschleunigt wird.
- Die nach der SBB mit Braunkohlenasche meliorierten kohle- und schwefelhaltigen Kippenböden zeichnen sich dadurch aus, dass sie
 - nicht nur zu Rekultivierungsbeginn sondern auch noch mehrere Jahrzehnte danach über die acker- und pflanzenbaulich annähernd optimalen pH- und BS-Werte verfügen,
 - jahrzehntelang gegen die geogenen, ökosystemaren und anthropogenen Versauerungsprozesse abgepuffert sind und
 - sich zu sehr tiefgründigen Pflanzenstandorten entwickeln, bei denen bis in ≥ 160 cm Bodentiefe eine Al-Toxizität ausgeschlossen werden kann.

Literatur

- Brüning E. 1959. Untersuchungen zur Frage der Begrünung tertiärer Rohbodenkippen des Braunkohlentagebaues, dargestellt am Beispiel der Hochabsetzerkippe 18 Böhlen. Diss. Leipzig.
- Hüttl RF, Bens O. 2003. Bodenverbrauch durch Braunkohlentagebau – Entwicklungspotentiale von Bergbaufolgestandorten. Petermanns Geographische Mitteilungen, 147(3):58 – 67.
- Illner K. 1967. Untersuchungen über die Schwefelverwitterung in Kippenböden. Wiss. Ztschr. d. Humboldt-Univ. z. Bln., Math-Nat-R. XVI, 5, 689 – 692.
- Illner K, Kawelke Chr, Raasch H, Wünsche M. 1968. Über einheitliche Verfahren der Bodenuntersuchung für die Kartierung von Kippprohböden. Veröff. aus d. Inst. f. Landschaftspflege der Humboldt-Univ. Berlin, Heft 1968/ I, 3 – 24.
- Illner K, Katur J. 1964a. Betrachtungen zur Bemessung der Kalkgaben auf schwefelhaltigen Tertiärkippen. Ztschr. f. Landeskultur, 5(4):287 – 295.
- Illner K, Katur J. 1964b. Zur Nachhaltigkeit der Melioration schwefelhaltiger Kippgesteine bei Einsatz von phenolhaltigen Industrieabwässern. Wiss. Ztschr. d. Humboldt Univ. z. Bln., Math-Nat-R. XIII, 5, 823 – 826.
- Illner K, Katur J. 1964c. Zur Wiedernutzbarmachung kulturfeindlicher Kippen und Halden der Braunkohlentagebaue. Bergbautechnik, 14(10):522 – 524.
- Illner K, Katur J. 1968. Der Einfluß der Wiederurbarmachung auf den Erfolg der Rekultivierung. Bergbautechnik, 18(8):423 – 426.
- Katur J. 1964. Abwasserlandbehandlung auf sorptionskräftigen Tertiärkippen. Wasserwirtschaft – Wassertechnik, 14(9):276 – 280.
- Katur J. 1965. Untersuchungen über die Rekultivierung von schwefelhaltigen Tertiärkippen unter der Verwendung phenolhaltiger Kokereiabwässer. Diss. Berlin.
- Katur J. 1970. Zur Säurefreisetzung in schwefelhaltigen Rohböden: In: IV Symposium über die Wiedernutzbarmachung der durch die Industrie devastierten Territorien. Teil II, S. 238 – 250, Leipzig.
- Katur J. 1971. Die Bodenmelioration extrem saurer Kippprohböden. Diss. (B), Berlin.
- Katur J, Herbert P. 1980. Die Bedeutung der Meliorationstiefe für die Fruchtbarkeit der meliorierten schwefelhaltigen Kippprohböden, dargestellt am Beispiel praktischer Großversuche. Arch. Acker- Pfl. Boden., 24(6):235 – 442.
- Katur J, Böcker L, Stähr F, Mertzig Chr. 1998. Zu den Auswirkungen der Meliorationstiefe auf das Wachstum der Kippen-Erstaufforstungen. Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol., 32(4):170 – 178.
- Katur J, Böcker L, Knoche D, Mertzig Chr. 1999. Untersuchungen zur Optimierung der Meliorationstiefe für die forstliche Rekultivierung schwefelsaurer Kippenböden. Beitr. >Forstwirtsch. u. Landsch.ökol., 33(4):172 – 179.
- Katur J, Böcker L. 2001. Auswirkungen von Meliorationstiefe, Substrattyp und Baumart auf die Humus- und Bodenentwicklung sowie Blatt- und Nadelspiegelwerte von Jungbeständen schwefelsaurer Kippenböden. Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol. 35(2): 69 – 76.
- Katur J, Liebner F, Liebner K, Welzel HP, Hettrich K, Gast M, Tonder K. 2002. : Untersuchungen zum Stoffumsatz und zur Beschaffenheit der Kippengrundwässer in Braunkohlebergbaugebieten und Möglichkeiten zu deren Beeinflussung. F/E-Abschlussbericht, FKZ WB 9755/7, Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften, Finsterwalde.
- Knabe W. 1959. Zur Wiedernutzbarmachung im Braunkohlebergbau. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- Kundler P. 1981. Regeln und Richtwerte zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. Markkleeberg.
- Lorenz W-D. 1967. Untersuchungen über die Wiederurbarmachung von kulturfeindlichen Kippen nach dem Domsdorfer Verfahren. Diss. Berlin.
- Pniower G. 1956. Zur Kultivierung von Kippen und Halden der Braunkohlen-Tagebaue, landeskulturelle Probleme aus der Niederlausitz (DDR). Bericht an International Union of the Protection of Nature Oecologic Commission, Berlin.
- Scheffer/Schachtschbel. (1989). Lehrbuch der Bodenkunde. 12. neu bearb. Aufl. Stuttgart.
- Schwartz W. 1964. Gutachten über das Vorkommen von Thiobacillus-Arten im Kippengelände und über die Beziehungen zur Rekultivierung. Greifswald, den 18.12.1964.
- Ulrich B. 1988. Ökologische Kennwerte des Bodens. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 151:171 – 176.
- Ulrich B. 1990. Stoffhaushalt von Wald-Ökosystemen, Bioelement Haushalt. Vorlesungsmanuscript Wintersemester 1990/91, 9. Aufl. Göttingen.
- Weber E. 1967. Grundriss der biologischen Statistik. 6. Auflage, VEB Gustav Fischer Verlag Jena.
- Weisbrod W, Herger. 1961. Gutachten über die Bodenverhältnisse der Pflugkippe (Versuchsfläche) des ehemaligen Tagebaues Koyné – BKW Friedenswacht. Berlin, den 11.02.1961.