

# Bodenschutzkalkungen im Westerzgebirge

Dr. Frieder Leube  
Sächsisches Landesforstpräsidium

## 1 Einleitung

Bodenschutzkalkungen zielen auf den Schutz des Bodens, seiner Bestockung sowie waldbür-tiger Gewässer ab, insbesondere auf die Stärkung des Puffervermögens des Bodens gegen-über eingetragener und gespeicherter Säure, auf die Verbesserung des chemischen Milieus im Wurzelraum, die Stabilisierung der Erdalkaliversorgung der Bestände, auf eine moderate Akti- vierung der Stoffkreisläufe sowie die Bildung von Mineralbodenhumusformen, auf die Förderung der Naturverjüngung und auf den Schutz von Gewässern vor Schwermetall-, Aluminium- und Säureeinträgen. Sie lösen im Ökosystem Wald eine Vielzahl miteinander vernetzter Reaktionen aus und erfolgen in Sachsen unter strenger Beachtung der flächenbezogenen Waldfunktion, Standortsausstattung, Bestandssituation und den Ergebnissen des forstlichen Umweltmoni- torings nach verbindlich festgelegten Regeln (LEUBE 2000), um unerwünschte Nebenwirkungen zu minimieren.

## 2 Untersuchungsgegenstand und -methodik

Im Forstamt (FA) Klingenthal nehmen erdalkaliarme, saure Granit-Braunerden, -Braunpodsole – und –Podsole nahezu die Hälfte der vorwiegend mit Fichte bestockten Waldfläche ein (Abb. 1).

Wuchsbezirk	Höhenlage		Klima	JMT: 4,5–7,0 °C	
Westl. Oberes Erzgebirge	580 – 974 m ü. NN			JNS: 700-1.100 mm	
Waldfläche	7.720 ha	84,2 %	Baumarten	94 % Fichte	3 % Lbh
<b>Standorts-Ausstattung</b>					
<i>Höhen- und Klimastufe</i>			<i>Bodenfeuchte-Stufe</i>		
Kammlagen, feucht:	9 %		Terrestrische Standorte:	89 %	
Höhere Berglagen, feucht:	44 %		Hydromorphe Standorte:	9 %	
Mittlere Berglagen, feucht:	47 %		Sonstige Standorte:	2 %	

Nährkraft-	<b>Arm</b>	<b>Ziemlich arm</b>	<b>Mittel</b>	<b>Kräftig</b>	<b>Reich</b>
	<b>&lt;1 %</b>	<b>52 %</b>	<b>46 %</b>	<b>&lt;1 %</b>	<b>&lt;1 %</b>
<b>Flächenbedeutsame Bodenformen</b>					
		<b>Granit-</b>	<b>Braunerden Braunpodsole Podsole</b>	<b>44 %</b>	
		<b>Phyllit-</b>	<b>Braunerden</b>	<b>31 %</b>	
		<b>Schiefer-</b>	<b>Braunerden Podsole</b>	<b>7 %</b>	
		<b>Quarzit-</b>	<b>Braunerden Podsole</b>	<b>6 %</b>	

Abb. 1: Allgemeine Angaben zum FA Klingenthal/Westerzgebirge (Untersuchungsgebiet)

Granitstandorte werden darüber hinaus im gesamten Westerzgebirge überwiegend forstlich genutzt und sind großteils mit Fichtenbeständen bestockt. Nachdem an ihnen um 1980/82 Nadelvergilbungen („neuartige Waldschäden“) auftraten, erfolgten dort 1986 erste Bodenschutzkalkungen mit Aufwandmengen von 2,5 t/ha. Inzwischen wurde zwischen 1991–2002 in Sachsen auf insgesamt 201 Tha Waldfläche aller Eigentumsarten – vor allem im Mittelgebirge und vorwiegend avioteknisch – kohlen-saure Magnesiumkalke in standortabhängigen Dosierungen (3,5–4,5 t/ha) und Zeitabständen (6–10 Jahre) ausgebracht. Das entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Kalkungsfläche von 16,8 Tha im betrachteten 12-Jahres-Zeitraum.

In den Jahren 2000/01 ist an je 3 ungekalkten und gekalkten Fichtenaltbeständen über flächenbedeutsamen Granitstandorten des FA’s Klingenthal überprüft worden (Tab. 1), ob durch mehrfache Kalkungen die o.g. Wirkungen auf Humus und Boden, Kronen- und Ernährungszustand der Bäume erreicht werden und welchen Einfluss sie auf die Bodenvegetation ausüben

Tabelle 1: Untersuchungs-Design und -Parameter zur Prüfung der Wirkung mehrfacher Bodenschutzkalkungen in Fichten-Reinbeständen über verbreiteten Granit-Standorten im FA Klingenthal/Westerzgebirge

Untersuchungs-Design						
<b>Standort</b>	<b>RiGt I</b>		<b>RiGt-5</b>		<b>EbGt-5</b>	
Stand.-form	Riesenberger Granit-Podsol		Riesenberger Granit-Podsol		Eibenstocker Granit-Braunpodsol	
Stand.-gruppe	<b>Kf – TZI</b>		<b>Hf – TZ2</b>		<b>Hf – TZ2</b>	
Klimastufe	Kammlagen, feucht		Hochlagen, feucht		Hochlagen, feucht	
Feuchtestufe	<b>T:</b>	terrestrisch	<b>T:</b>	terrestrisch	<b>T:</b>	terrestrisch
Nährkraft	<b>Z:</b>	ziemlich arm	<b>Z:</b>	ziemlich arm	<b>Z:</b>	ziemlich arm
Wasserhaushalt	<b>I:</b>	frisch, geschützt	<b>2:</b>	mäßig frisch	<b>2:</b>	mäßig frisch
<b>Kalkung</b>	ungekalkt	<b>gekalkt</b>	ungekalkt	<b>gekalkt</b>	ungekalkt	<b>gekalkt</b>

		[t/ha] 1989: 2,5 1995: 4,5 2000: 4,5		[t/ha] 1991: 2,5 1996: 4,5		[t/ha] 1991: 2,5 1996: 4,5
<b>Bestand</b>	Fichte		Fichte		Fichte	
<b>Alter (2000)</b>	108 Jahre	88–124 J.	131–146 J.	79 Jahre	91 Jahre	79 Jahre
<b>Probepunkte</b>	4	4	4	4	4	4
<b>Parameter (Jahr)</b>	<b>Methode / Ort der Erhebung</b>		<b>Erhebung am Probepunkt</b>		<b>Erhebung im Bestand</b>	
<b>Benadlung (2000/01)</b>	nach WZE-Methodik		12 Fichten		48 Fichten	
<b>Humus (2000)</b>	Ol+f- und Oh-Horizont		6 Einzelproben		je 4 Mischproben	
<b>Boden (2000)</b>	Tiefenstufe 0–5, 5–10, 10–30 cm		6 Einzelproben		je 4 Mischproben	
<b>Ernährung (2001)</b>	1. und 3. Nadeljahrgang aus dem 7. Kronenwirtel		4 Fichten		je 4 Mischproben	
<b>Vegetation (2001)</b>	nach BRAUN-BLANQUET		1 x 400 m <sup>2</sup>		4 x 400 m <sup>2</sup>	

### 3 Untersuchungsergebnisse

#### *Auflagehumus und Mineralboden*

Die **pH-Werte** (H<sub>2</sub>O) im Auflagehumus und Oberboden der 3 ungekalkten Granitstandorte unterscheiden sich nur marginal, zeigen die übliche Tiefenabstufung und liegen in 10–30 cm Tiefe im bzw. an der Grenze zum Aluminium-Pufferbereich. Ihre gleichfalls einheitlich extrem niedrige **Basensättigung** (relative Anteile von Ca, Mg, K, Na an der effektiven Austausch-Kapazität = AKe = 100 %) von 3–5 % verkörpert den „eisernen Bestand“, der sich selbst durch weitere Säureinträge nicht mehr verändert. Kalkungen mit 7–11 t/ha bewirken innerhalb von 5–10 Jahren eine nur moderate, lokal und zeitlich beschränkte Aziditätsminderung (max. pH = 5,5; vgl. Abb. 2). Die Basensättigung steigt dagegen bis in 30 cm Tiefe an (maximal auf 17 %) und unterscheidet sich deutlich von der ungekalkten Böden.

Die im Auflagehumus der ungekalkten Granitbodenformen eingebundenen **Calcium-** und **Magnesium-Mengen** (120–200 kg/ha Ca bzw. 45–90 kg Mg/ha) sind deutlich höher als die leicht pflanzenverfügbaren Vorräte beider Elemente im Mineralboden bis 30 cm Tiefe (55–75 kg/ha Ca bzw. 12–16 kg/ha Mg; vgl. Abb. 3). Als Folge der Kalkungen erhöhen sich die Calcium- und Magnesium-Mengen im Humus um das 6–15-fache (1.000–2.000 kg/ha Ca bzw. 500–900 kg/ha Mg), im Mineralboden um das 2–7-fache (80–160 kg/ha Ca bzw. 35–85 kg/ha Mg).

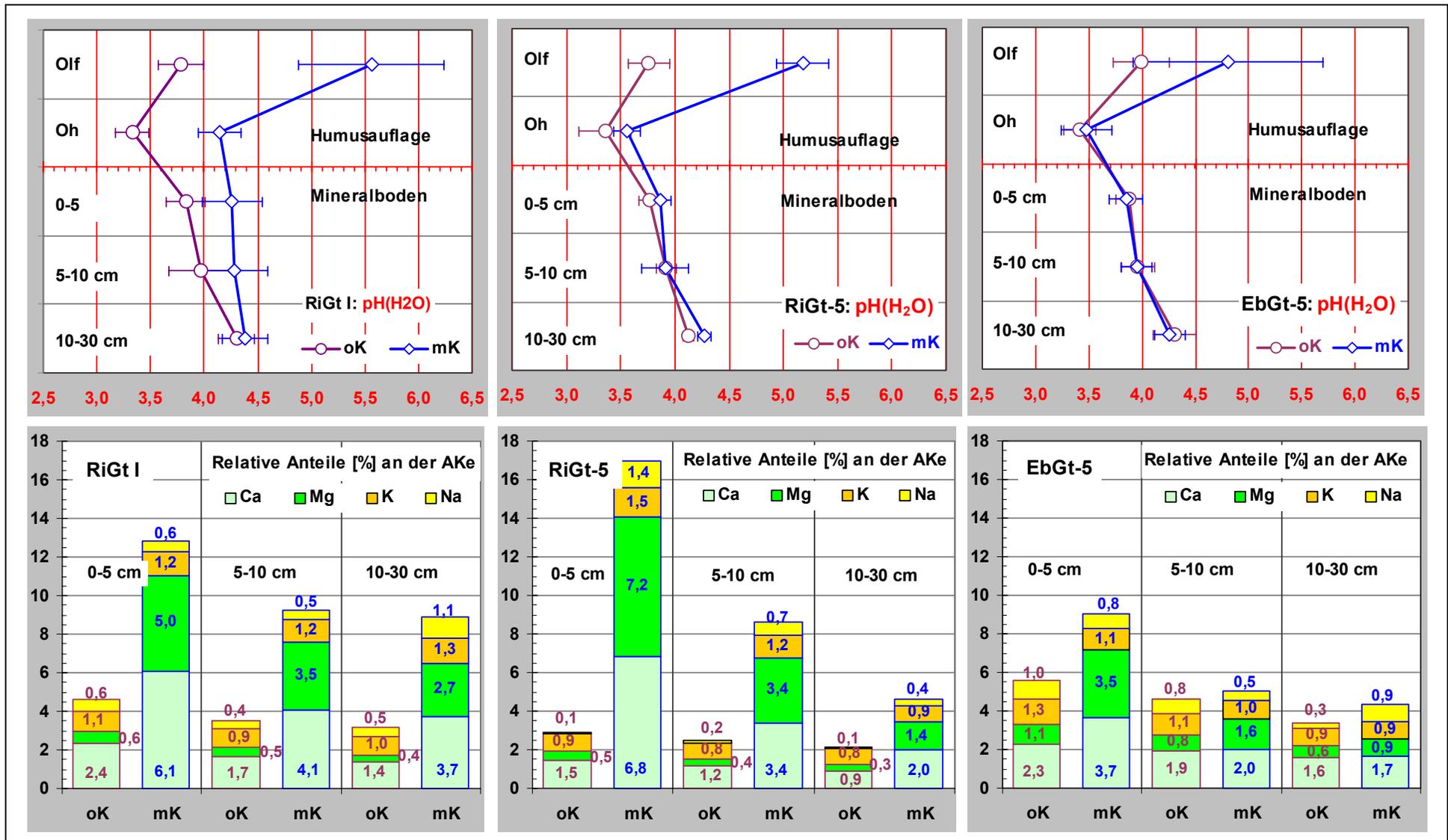


Abbildung 2: pH-Werte (Mittel  $\pm$  5 % Konfidenzintervall) und relative Anteile basischer Kationen an der Austauschkapazität (AKE = 100 %) im Auflagehumus bzw. Oberboden von ungekalkten (oK) und mehrfach gekalkten (mK) Fichtenbeständen des FA's Klingenthal (2000)

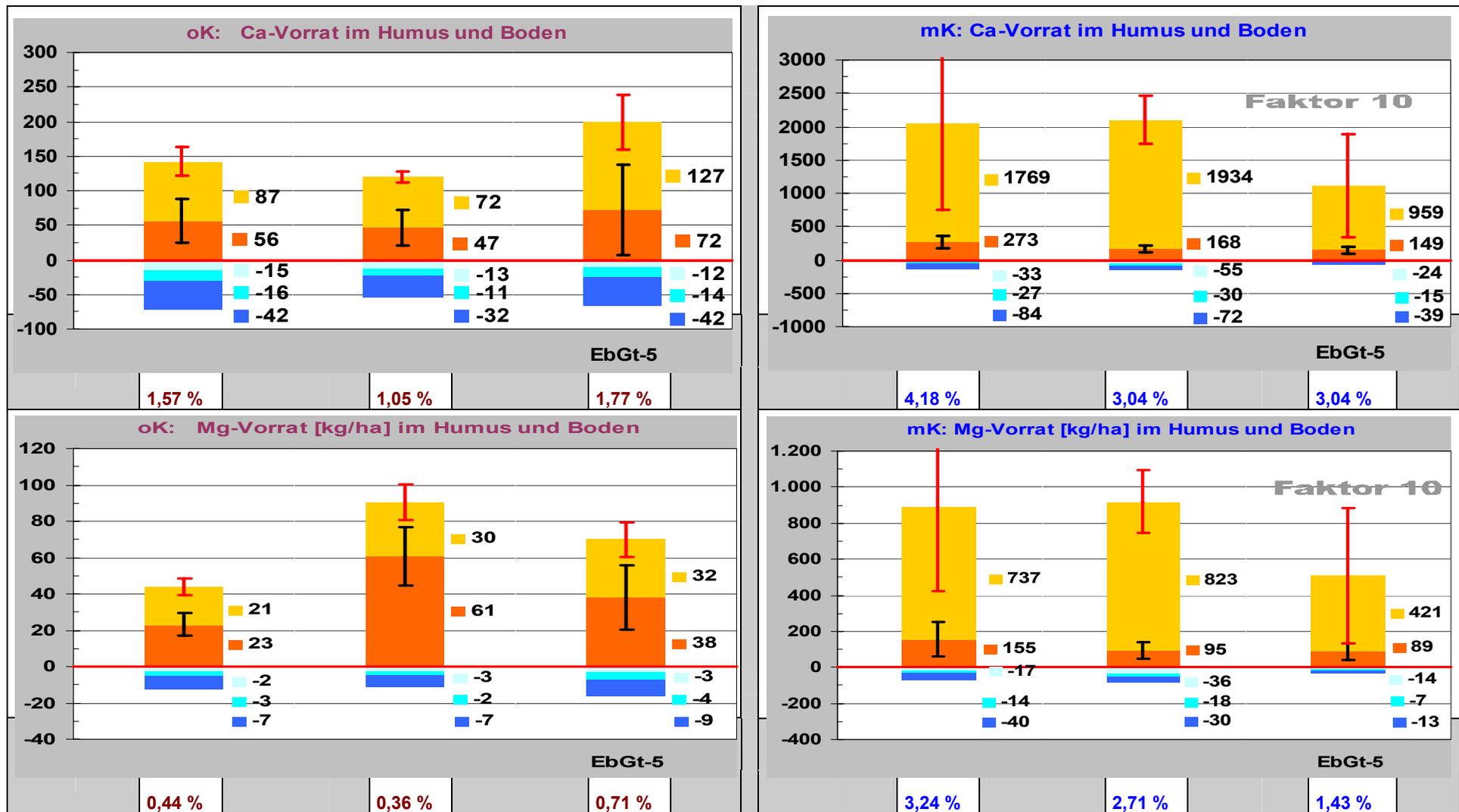


Abbildung 3: Vorräte [kg/ha; Mittel  $\pm$  5 %-Konfidenzintervall] an Calcium und Magnesium im Auflagehumus und Oberboden (0–30 cm) sowie Anteile [%] beider Elemente an der AKe in ungekalkten (oK) und mehrfach gekalkten (mK) Fichtenbeständen über Granitstandorten des FA's Klingenthal (2000)

Beide Elemente werden am Sorptionskomplex vorwiegend gegen Aluminium eingetauscht. Seine ursprünglich, d.h. bei „ungekalkt“ sehr niedrige Belegung mit Erdalkalien - 1,0–1,8 % Ca bzw. 0,4–0,8 % Mg - steigt auf 3,0–4,2 % Ca bzw. 1,4–3,2 % Mg an. Die Kaliumbelegung (etwa 1 %) und die Kaliumvorräte in Humus und Boden werden durch die ausgebrachten Kalke nicht berührt.

### *Ernährung*

Die optimale **Stickstoff**- und **Phosphor**-Ernährung werden von den Kalkungen nur marginal beeinflusst. Die **Kalium**-Gehalte beider Nadeljahrgänge (vgl. Abb. 4) sinken bei den gekalkten Fichten geringfügig insignifikant ab, ein ernährungsrelevanter Antagonismus zwischen den ausgebrachten Erdalkalien und Kalium bleibt also aus. Die Höhe und die nur geringe Abstufung der **Schwefel**-Nadelspiegel zwischen unterschiedlich alten Nadeln zeigen an, dass die Fichtenbestände kaum noch SO<sub>2</sub>-Immissionen ausgesetzt sind. Allerdings resultiert aus den Kalkungen eine erhöhte **Schwefel**-Aufnahme. Mit **Calcium** sind die ungekalkten Fichten mangelfrei versorgt; die Gehalte steigen als Folge der Kalkung vor allen in den älteren Nadeln bis zum Luxuskonsum weiter an. Extreme Defizite bestehen dagegen beim **Magnesium**. Während 1-jährige Nadeln ungekalkter Fichten meist schwach, gerade noch ausreichend ernährt sind, liegen die Gehalte für 3-jährige Nadeln im akuten bzw. latenten Mangelbereich. Daraus resultieren Ungleichgewichte zwischen der Stickstoff- und Magnesium-Ernährung (N/Mg-Quotient = 26–46), die den pflanzlichen Stoffwechsel stark beeinträchtigen. Diese Ernährungsstörungen sind so massiv, dass sie als Mg-Mangelchlorosen (Vergilbung) mit bloßem Auge sichtbar werden (vgl. Abb. 5). Das mit der Kalkung deutlich verbesserte Magnesiumangebot hat in beiden Nadeljahrgängen (NJ1 < NJ3) eine deutliche Mehraufnahme zur Folge und führt zu einer optimalen Ernährung mit ausgewogenen N/Mg-Relationen (NJ 1: 10–12, NJ3: 11-12).

### *Kronenzustand*

Im FA Klingenthal wurden einige Abteilungen konsequent von Kalkungen ausgespart. Sie und Grenzbereiche zu Mooren konnten deshalb als Kontrollflächen genutzt werden. Fichten auf diesen ungekalkten Flächen zeigen seit mehreren Jahren auffällige Nadelvergilbungen und Kronenauflichtungen (Abb. 5).



Abbildung 5: Kronenzustand ungekalkter und gekalkter Fichten über Granitstandorten des FA's Klingenthal (Herbst 2001)

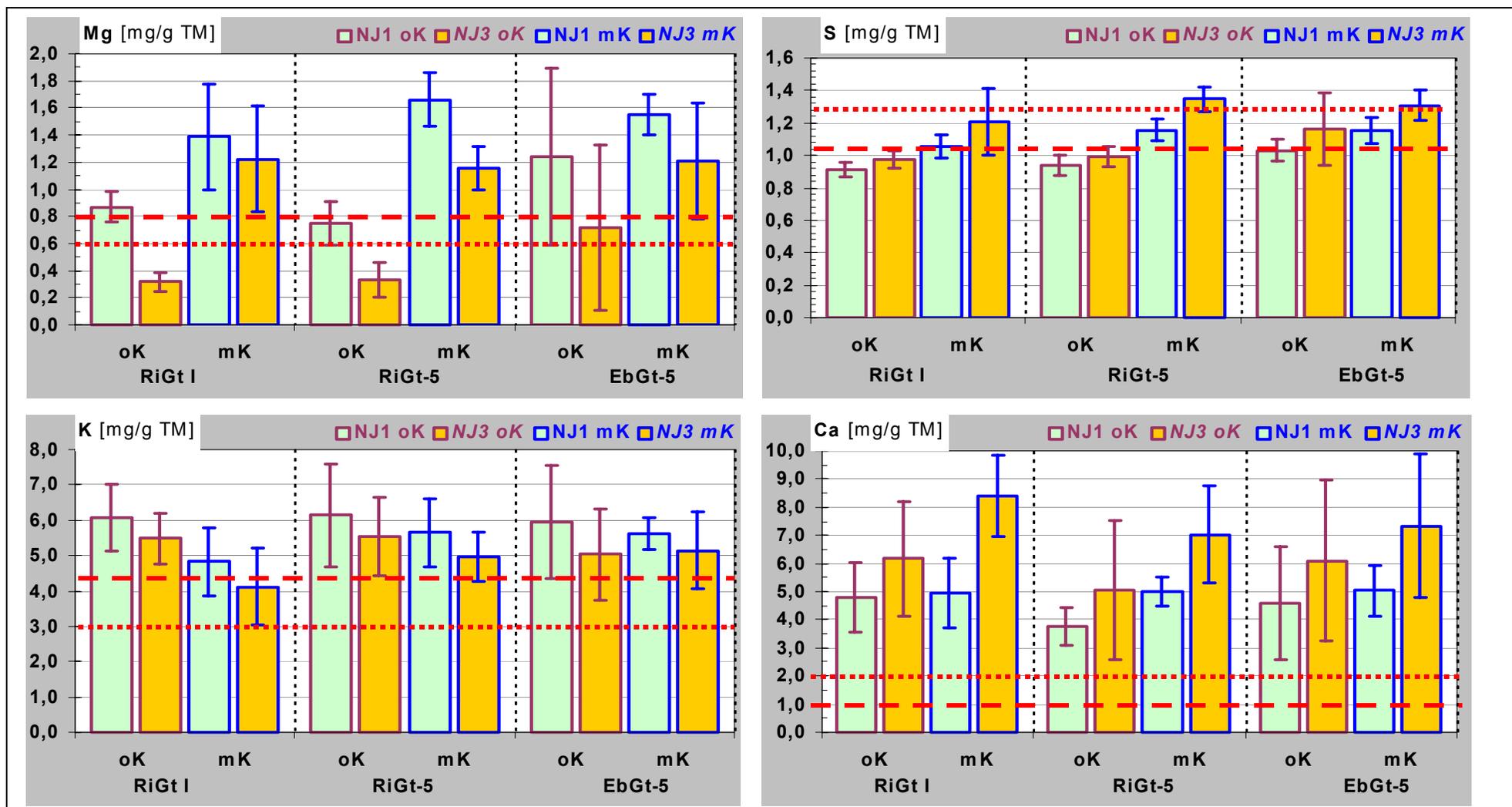


Abbildung 4: Magnesium-, Schwefel-, Kalium- und Calcium-Gehalte [mg/g TM; Mittel  $\pm$  5 %-Konfidenzintervall] in 1- und 3-jährigen Nadeln (NJ1, NJ3) von ungekalkten (oK) und mehrfach gekalkten (mK) Fichtenbeständen über Granitstandorten des FA's Klingenthal (2001)  
 Grenzbereich mangel- und belastungsfreier Ernährung nach NEBE (1997) für NJ 1 - - - bzw. NJ3 ·····

In den Jahren 2000/01 verfügen die ungekalkten Fichten auf den 3 untersuchten Standorten lediglich über 50–75 % der normalen Nadel-Menge; nur 6–15 (–30) % von ihr sind noch grün (Abb. 6). Quantität und fotosynthetische Funktionalität des Assimilationsapparates sind also erheblich eingeschränkt.

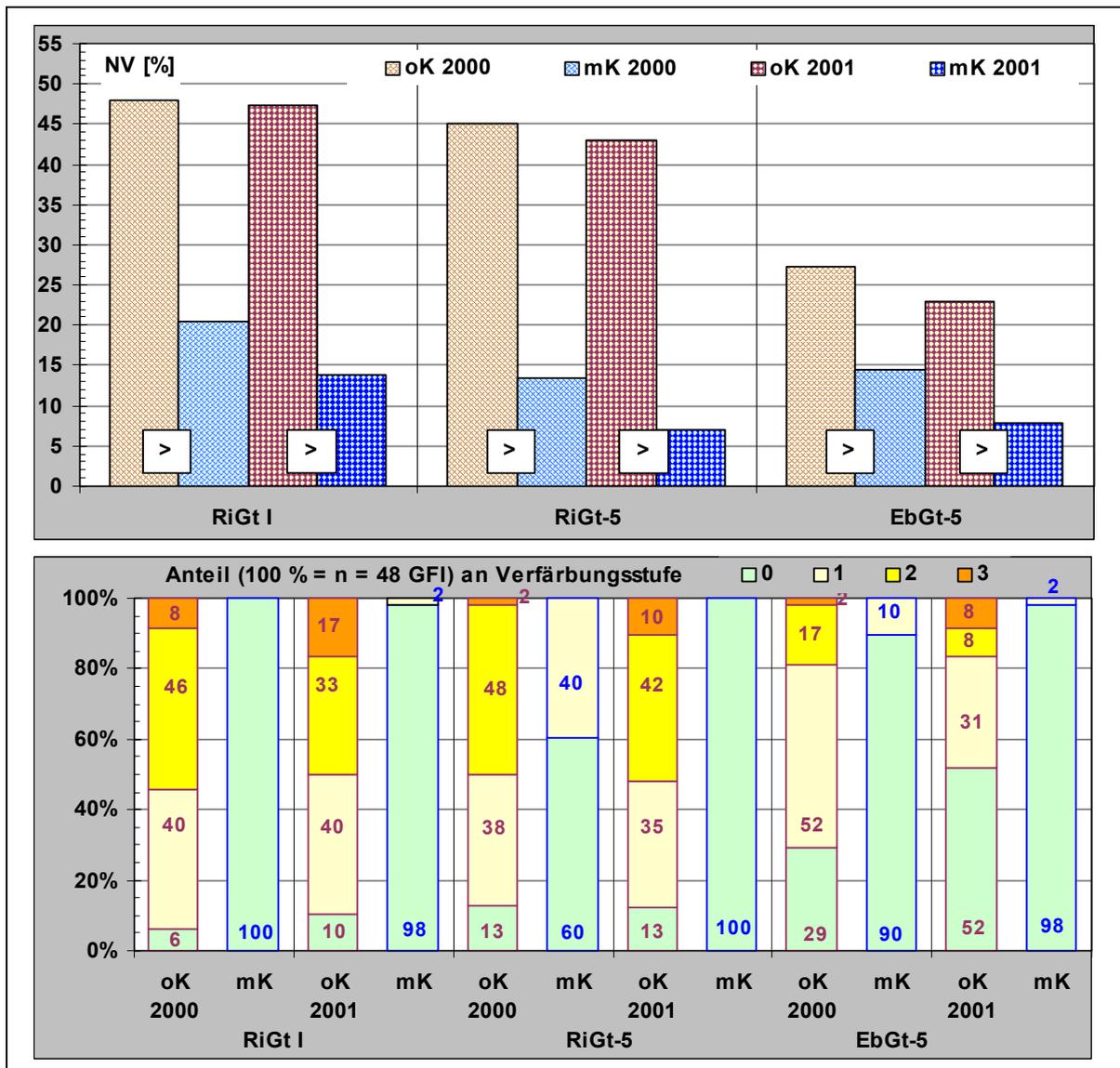


Abbildung 6: Nadelverlust und Nadelverfärbung von ungekalkten (oK) und mehrfach gekalkten (mK) Fichtenbeständen über Granitstandorten des FA's Klingenthal (2000/01)

Bei den gekalkten Beständen beschränken sich die Nadelverluste dagegen auf 10-20 %, und 60–100 % der Nadeln weisen keine Vergilbungen auf. Die Kalkung hat über eine Aufhebung des Magnesiummangels (Abb. 7) den Kronenzustand der Fichten eindrucksvoll verbessert und so insgesamt die Stabilität der Bestände erhöht.

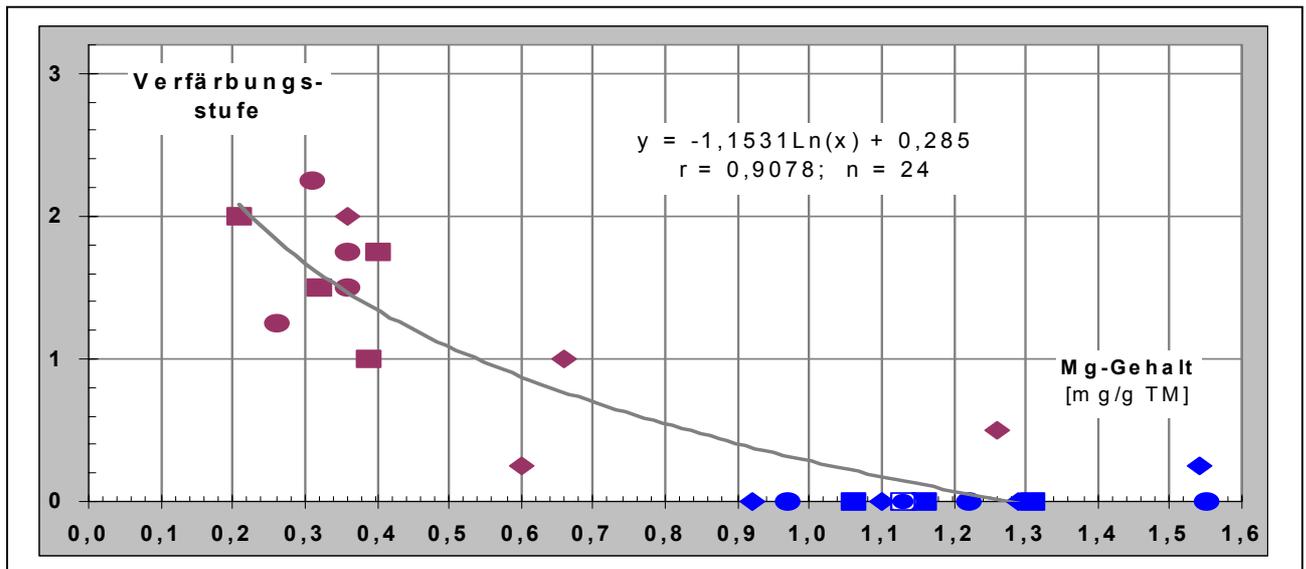


Abbildung 7: Magnesiumgehalte [mg/g TM] und Verfärbungsstufen 3-jähriger Nadeln [0 = 0–10 %, 1 = 11–25 %, 2 = 26–60 %, 3 = 61–100 % der Nadeln vergilbt] von ungekalkten (oK) und mehrfach gekalkten (mK) Fichtenbeständen über Granitstandorten des FA's Klingenthal (2000/01)

### Bodenvegetation

Mit 6–10 Arten in der Moos- und 11–14 Arten in der Krautschicht ist die Bodenvegetation auf den mit Fichte bestockten Granitstandorten in den Kamm- und Hochlagen erwartungsgemäß artenarm. Sie nimmt als Folge der Kalkung nur in der Krautschicht zu. Ein Vergleich des Sommeraspektes (Juli 2001) auf den 3 ungekalkten bzw. gekalkten Flächen macht unterschiedliche Reaktionen der einzelnen Pflanzen auf die Kalkung deutlich (vgl. Tab. 2):

- Ausfall: 8 Arten - hauptsächlich (Stark-)Säureanzeiger - treten auf gekalkten Flächen nicht auf
- Abnahme: 6 Arten sind auf gekalkten Flächen nur vermindert zu finden
- Indifferenz: 22 Arten lassen keine Reaktion erkennen
- Zunahme: 13 Arten sind auf gekalkten Standorten häufiger als auf ungekalkten vorhanden, dabei dominieren Kräuter und Störanzeiger, die ein höheres Nährstoffangebot anzeigen.
- Neubesiedlung: ausschließlich auf gekalkten Flächen kommen 32 Arten vor.

Die Veränderungen sind zwar nicht durch vorausgehende Erst-Aufnahmen belegt, wohl aber dann wahrscheinlich, wenn sie über wenigstens 2 der insgesamt 3 Standorte ausgewiesen werden. Generell betreffen alle floristischen Veränderungen nahezu ausschließlich Pflanzen

mit geringer Artmächtigkeit (+, r, selten 1, 2). Ihre Reaktion auf die Kalkung ist verständlicherweise auch nicht allein aus der Reaktionszahl (Säureweiser) erklärbar.

Von den 22 Arten, die keine kalkungsbedingten Veränderungen erkennen ließen, prägen Wollreitgras, Drahtschmiele, Heidelbeere, Europäischer Siebenstern, Harzlabkraut, Gabelzahn-, Platt- und Bürstenmoos u.a. mit hoher Artmächtigkeit Erhebungsflächen gleichermaßen das Florenbild der (außer Moose) auf 95–100 % aller ungekalkten wie der gekalkten Standorte. Diese dominierenden Arten sind standorttypische Pflanzen des „Wollreitgras-Fichtenwaldes der feuchten Kamm- und Hochlagen“. Die mehrmaligen Kalkungen haben demnach die Standorte floristisch nicht überprägt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Bodenvegetationsaufnahmen (Juli 2001) unter Fichtenbeständen von ungekalkten (oK) und mehrfach gekalkten (mK) Granitstandorten in den feuchten Hoch- und Kammlagen des FA's Klingenthal

Artname		Reaktion s- Zahl <sup>1)</sup>	Anzahl Standorte		Artmächtigkeit <sup>2)</sup>
lateinisch	deutsch		oK	mK	
<b>nach Kalkung ausgefallen</b>					
<i>Sphagnum girgensohnii</i>	Torfmoos	1	2	0	+
<i>Dicranella heteromalla</i>	Kleingabelzahnmoos	2	2	0	+
<i>Carex spec.</i>	Segge	x	1	0	+
<i>Betula pendula</i>	Gemeine Birke	x	1	0	r
<i>Barbilophozia attenuata</i>	Bartspitzmoos	2	1	0	+
<i>Polytrichum commune</i>	Gemeines Frauenhaarmoos	2	1	0	+
<i>Mnium hornum</i>	Schwanenhals-Sternmoos	3	1	0	+
<i>Isopterygium elegans</i>	Gleichflügelmoos	4	1	0	+
<b>nach Kalkung abgenommen</b>					
<i>Maianthemum bifolium</i>	Schattenblümchen	3	3	1	r
<i>Luzula silvatica</i>	Wald-Hainsimse	4	3	1	r
<i>Barbilophozia lycopodioides</i>	Bärlappähnliches Bartmoos	6	3	1	r
<i>Oxalis acetosella</i>	Sauerklee	4	3	2	r
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Zypressen-Schlafmoos	4	3	2	r
<i>Pohlia nutans</i>	Nickendes Pohlmoos	2	2	1	+
<b>nach Kalkung indifferent</b>					
<i>Sorbus aucuparia</i>	Eberesche	4	3	3	r (bis+)
<i>Dryopteris carthusiana</i>	Gewöhnlicher Dornfarn	4	3	3	(r bis) +
<i>Dryopteris dilatata</i>	Breitblättriger Dornfarn	x	3	3	(r bis) + (bis 1)
<i>Rhytidiadelphus loreus</i>	Riemstengliges Kranzmoos	3	3	3	+
<i>Juncus effusus</i>	Flutterbinse	3	2	2	r
<i>Carex canescens</i>	Grau-Segge	4	1	1	r bis +
<i>Luzula luzuloides</i>	Weißer Hainsimse	3	1	1	r
<i>Rumex acetosella</i>	Kleiner Sauerampfer	2	1	1	+
<i>Stellaria media</i>	Vogelmiere	7	1	1	+
<i>Thelypteris phegopteris</i>	Buchenfarn	4	1	1	+
<i>Dicranum polysetum</i>	Gabelzahnmoos	5	1	1	+
<i>Amblystegium serpens</i>	Kriech. Pfeifenkopfmoss	6	1	1	+
<i>Rhytidiadelphus squarrosus</i>	Sparriges Kranzmoos	5	1	1	+
<i>Calamagrostis villosa</i>	Wolliges Reitgras	2	3	3	(1 bis) 3 (bis 5)
<i>Deschampsia flexuosa</i>	Drahtschmiele	2	3	3	(1 bis) 2 (bis 4)
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Heidelbeere	2	3	3	(+ bis) 1 (bis 3)
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte (Anflug)	x	3	3	(+ bis) 1 (bis 3)
<i>Trientalis europaea</i>	Europäischer Siebenstern	3	3	3	(r bis) + (bis 1)

Galium hircynicum	Harzlabkraut	2	3	3	+ (bis 1)
Dicranum scoparium	Besen-Gabelzahnmoos	4	3	3	+ (bis 1)
Plagiothecium undulatum	Gewelltes Plattmoos	1	3	3	(+ bis) 1 (bis 3)
Poytrichum formosum	Wald-Bürstenmoos	2	3	3	+ (bis 1)

### nach Kalkung zugenommen

Urtica dioica	Große Brennessel	7	1	3	(+ bis) + (bis 1)
Epilobium montanum	Berg-Weidenröschen	6	1	3	(r bis) +
Stellaria longifolia	Langblättrige Sternmiere	2	1	2	(r bis) +
Athyrium filix-femina	Gemeiner Frauenfarn	x	1	2	r bis r
Carex pilulifera	Pillensegge	3	1	2	r (bis +)
Veronica officinalis	Waldehrenpreis	3	2	3	(r bis) +
Lophocolea bidentata	Zweizäh. Kammkelchmoos	5	2	3	+ (bis 3)
Lophocolea heterophylla	Versch.-bl. Kammkelchmoos	3	2	3	+ (bis 1)
Brachythecium rutabulum	Krückenf. Kurzbüchsenmoos	x	2	3	+ (bis 2)
Brachythecium salebrosum	Glattstlg. Kurzbüchsenmoos	6	2	3	+ (bis 3)
Eurhynchium praelongum	Schnabelmoos	5	2	3	+ (bis 1)
Digitalis purpurea	Roter Fingerhut	3	3	3	(r bis) +
Epilobium angustifolium	Wald-Weidenröschen	5	3	3	(r bis) +

### nach Kalkung neubesiedelt

Fagus sylvatica	Rotbuche (Anflug)	x	0	3	r
Taraxacum officinalis	Wiesen-Löwenzahn	x	0	3	(r bis) +
Cirsium palustre	Sumpf-Kratzdistel	4	0	3	r
Tussilago farfara	Huflattich	8	0	3	(r bis) +
Mycelis muralis	Mauerlattich	x	0	3	(r bis) +
Fortsetzung	nächste Seite				
Fortsetzung	Tabelle 2				

Artnamen		Reaktion s- zahl <sup>1)</sup>	Anzahl Standorte		Artmächtigkeit <sup>2)</sup>
lateinisch	deutsch		oK	mK	

### nach Kalkung neubesiedelt

Brachythecium starkei	Berg-Kurzbüchsenmoos	2	0	3	+ bis 1 (bis 2)
Senecio fuchsii	Fuchs-Kreuzkraut	x	0	2	+
Rubus idaeus	Himbeere	x	0	2	(r bis) +
Deschampsia caespitosa	Rasenschmiele	x	0	2	r
Carex leporina	Hasenpfoten-Segge	3	0	2	r bis +
Silene dioica	Leimkraut	7	0	2	r bis +
Brachythecium velutinum	Samt-Kurzbüchsenmoos	6	0	2	r bis +
sowie weitere	12 Gefäßpflanzen 8 Moose		0	1	r bis +

<sup>1)</sup> Reaktionszahl	R1 = Stark-Säure-Anzeiger
	bis R9 = Basen-/Kalk-Anzeiger

<sup>2)</sup> Artmächtigkeit	Sym-bol	Individuen-zahl	Deckungs-wert
	r	äußerst spärlich	sehr gering
	+	spärlich	sehr gering
	1	reichlich	<5 %
	2	sehr reichlich	5–24 %
	3	beliebig	25–50 %
	4	beliebig	51–75 %
	5	beliebig	>75 %

## 3 Diskussion

Angesichts der jahrzehntelang gespeicherten hohen Mengen an Säure (Altlast) und der bis 1996/97 andauernden massiven Einträge bleibt der Einfluss der Kalkungen auf die pH-Werte

im Auflagehumus und Oberboden sowohl in seiner Höhe als auch örtlich und zeitlich beschränkt. Die von Natur aus sauren Standorte in den Kamm- und Hochlagen werden also selbst durch mehrfache Kalkgaben von insgesamt 11 t/ha in ihrer Azidität nicht überprägt. Bodenchemisch und pflanzenphysiologisch von entscheidender Bedeutung ist die Erhöhung der Basensättigung sowie der Erdalkalivorräte. Sie bedeutet eine Stärkung des Puffervermögens der Böden und garantiert zumindest mittelfristig eine optimale Mg-Ernährung der Bestände. Das Überwiegen der Magnesium- und Calcium-Vorräte im Auflagehumus gegenüber dem Mineralboden ist sachsenweit vielfach zu registrieren (RABEN et al. 2000) und unterstreicht die Notwendigkeit, den Humus als Nährstoffspeicher und Sorptionsträger bei allen waldbaulichen Maßnahmen pfleglich zu behandeln. Die niedrigen austauschbaren Mg-Mengen im Boden decken den Bedarf der Fichten nicht ab. Der aus Ascheeinwehungen bis 1990 resultierende leicht verfügbare Mg-Pool ist offenbar zwischenzeitlich erschöpft. Die im Humus eingebauten Nährstoffe werden erst durch mikrobielle Umsetzungsprozesse pflanzenverfügbar. Diese sind vom Wärme- und Feuchtigkeitsangebot sowie von den Aziditätsverhältnissen abhängig. Auf letztere kann durch Kalkungen zwar in gewissem Maße Einfluss genommen werden, kühl-feuchtes Klima in den Kamm- und Hochlagen, warm-trockene Verhältnisse andernorts schränken die Mikrobentätigkeit aber ein. Die Witterung ist nicht vorhersag- und steuerbar, sie wird zunehmend durch Anomalien überprägt. Damit unterliegen auf basenarmen, sauren Standorten Magnesium-Ernährungsmangel-Situationen sowohl in ihrer Ausprägung – latenter, d.h. visuell nicht auffallender oder akuter Mangel mit Nadelchlorosen – als auch in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung dem Zufall. Solche Chlorosen sind in Sachsen angesichts der eingangs genannten Kalkungsaktivitäten zwar nicht flächig verbreitet; sie beschränken sich allerdings auch nicht auf ungekalkte Granitstandorte des FA Klingenthal bzw. des Westerzgebirges (FA Eibenstock, Horni Blatna in Böhmen), sondern wurden 2001 auch an Fichten über Sandstein- und Lößstandorten im Zittauer Gebirge (LAF-Jahresbericht 2001) augenscheinlich. Der von 1995 bis 1999/2001 unverändert latente Mangel für die Fichtenbestände der Level-II-Flächen Cunnersdorf (Lehmsandstein) und Bautzen (Granodiorit) unterstreichen die Labilität der Mg-Ernährung ohne Bodenschutzkalkung (SMUL 2002). Diese heben die mangelbedingten Stoffwechselstörungen und massiven Einschränkungen der Fotosynthesekapazität für die betroffenen Fichtenbestände nachhaltig auf. Die niedrigen Schwefel-Nadelspiegelwerte ordnen sich in den allgemeinen landesweiten Rückgang seit 1995 ein, der sich kongruent auch bei den Fluor-Gehalten vollzieht und die ökologische Wirksamkeit der Emissionsminderung im Egergraben unterstreicht (SMUL 2002). Deshalb resultiert der Anstieg der S-Konzentrationen nach Kalkung wohl auch nicht aus einer  $\text{SO}_2$ -Aufnahme über die Stomata, sondern vielmehr aus einer  $\text{SO}_4$ -Aufnahme über die Wurzel. Beide Pfade unterscheiden sich in ihrer phytotoxischen Wirkung erheblich

(HEINZE 1988). Der nach Kalkung vermehrte Einbau von  $Mg^{2+}$ -Kationen verlangt aus Gründen der Elektroneutralität eine äquivalente Aufnahme von Anionen; dafür steht zuvorderst das aus Mobilisierungsprozessen reichlich vorhanden  $SO_4^{2-}$ -Ion (SMUL 2001), nachgeordnet das  $NO_3^-$ -Anion zur Verfügung. N/S-Quotienten von 14–17 in 1-jährigen Nadeln und 11–15 zeigen auch weitgehend normale Relationen zwischen beiden Elementen an. Mit der Verbesserung der bodenchemischen Verhältnisse durch Bodenschutzkalkungen ändert sich auch die Bodenvegetation. Dieser Wandel wird bewusst in Kauf genommen. Einerseits entspricht die allgemeine Artenarmut und gleichzeitige Dominanz von Säurezeigern in Fichtenforsten keineswegs dem natürlichen Vegetationspotenzial der überwiegenden Standorte. Andererseits nehmen die meist krautigen, edaphisch anspruchsvolleren Pflanzen ausgebrachte und mineralisierte Nährstoffe auf, bewahren sie so vor der Auswaschung und schleusen sie über ihre eiweiß- sowie erdalkalireiche Streu dauerhaft in den Stoffkreislauf ein (BARTELT, NEBE, LEUBE 1999). Auch andere waldbauliche Maßnahmen – Durchforstungen, Voranbau und Unterbau – haben einen Florenwandel zur Folge. Er ist also kein Spezifikum der Kalkung. Solange dieser Wandel sich in Richtung bzw. im Rahmen der standorttypischen Vegetation bewegt, korrigiert er nur die durch langjährige Reinbestandes-Altersklassen-Wirtschaft und Säureeinträge erlittenen Verluste. Spezielle naturschutzfachliche Gesichtspunkte werden bereits bei der Auswahl der Kalkungsflächen durch Abfrage der Waldfunktion berücksichtigt. Im Übrigen ist im praktischen Vollzug eine völlig flächendeckende Kalkausbringung nicht erreichbar. Es verbleiben unberührte Nischen für eine Wiederbesiedlung, worauf beispielsweise die Zunahme von Sternmiere und Pillensegge mit Reaktionszahlen von 2–3 auf gekalkten Standorten in unseren Untersuchungen hinweisen (vgl. Tab. 2). Insgesamt zeigen deren Ergebnisse, dass der beabsichtigte Schutz des Bodens, der Bestände und waldbürtiger Gewässer durch wiederholte Bodenschutzkalkungen erreicht wurde, ohne die Granitstandorte bodenchemisch sowie floristisch zu überprägen bzw. zu nivellieren und Ernährungsungleichgewichte zu induzieren. Ein nach wie vor andauernder Kationen- und damit Nährstoff-Verlust der Böden durch Mobilisierung und Austrag vormals gespeicherter Schwefelvorräte und eine zwar abnehmende, die kritischen Belastungsraten (Critical Loads) dennoch überschreitende und Tonminerale zerstörende Säurebelastung (SMUL 2002) sind Gründe genug, die Kalkungen zum Schutz der Böden fortzusetzen. Angesichts einer deutlichen Abnahme der Basensättigung auf typischen sächsischen Waldstandorten allein zwischen 1960/70–1999 sind sie darüber hinaus ein Ausgleich für erlittene Verluste der standortsspezifischen Bodenfruchtbarkeit. Die waldbauliche Kunst im Zuge eines langfristigen Umbaus der gekalkten Bestände besteht darin, die im Auflagehumus und Boden gespeicherten beträchtlichen Erdalkalivorräte durch Laubhölzer und eine krautige Flora biologisch zu fixieren, über deren Blätter und Wurzeln in den Stoffkreislauf einzubinden, dabei auch im

tieferen Boden zu lokalisieren und so vor der Auswaschung zu bewahren. Besondere Bedeutung kommt dabei in den Kamm- und Hochlagen den Weichlaubhölzern, insbesondere den Mineralboden-Keimern Salweide und Aspe zu (BARTELT, NEBE, LEUBE 1999), deren Anflug durch kleinflächige Bodenverwundungen gefördert werden kann.

#### **4 Zusammenfassung**

Bodenschutzkalkungen zielen auf den Schutz des Bodens, seiner Bestockung sowie waldbürtiger Gewässer ab. Untersuchungen an mehrfach gekalkten (7–11 t/ha kohlenaurer Mg-Kalk innerhalb von 5–10 Jahren) ca. 80–150-jährigen Fichtenbeständen über flächenbedeutsamen Granitstandorten im Westerzgebirge zeigen, dass diese Ziele erreicht und die Fichten-Forst-Ökosysteme stabilisiert wurden, ohne die Standorte bodenchemisch oder floristisch zu überprägen oder zu nivellieren und Ernährungsungleichgewichte zu induzieren. Bodenschutzkalkungen sind kein widernatürlicher Eingriff, sondern vielmehr eine Ausgleich für erlittene Verluste der standortspezifischen Bodenfruchtbarkeit, sie müssen auch zukünftig fortgesetzt und langfristig durch waldbauliche Maßnahmen biologisch stabilisiert werden.

#### **Literatur**

BARTELT, D.; NEBE, W.; LEUBE, F. (1999): Biogeochemisches Potenzial ausgewählter Baumarten auf meliorierten, immissionsbeeinflussten Standorten des Erzgebirges. Schriftenreihe Sächs. Landesanstalt f. Forsten, H. 18, Graupa

HEINZE, M. (1988): Die Ernährung von Waldbäumen auf Gipsstandorten : Forstwiss. Cbl. 117, S. 267-276

LEUBE, F. (2000): Leitfaden Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen. Schriftenreihe Sächs. Landesanstalt f. Forsten, H. 21, Graupa

RABEN, G.; ANDREAE, H.; KARST, H.; SYMOSSEK, F.; LEUBE, F. (2000): Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern. Schriftenreihe Sächs. Landesanstalt f. Forsten, H. 20, Graupa

SMUL (2001): Waldzustandsbericht 2001 – Freistaat Sachsen. Sächs. Staatsministerium f. Umwelt u. Landwirtschaft, Dresden

SMUL (2002): Waldzustandsbericht 2002 – Freistaat Sachsen. Sächs. Staatsministerium f. Umwelt u. Landwirtschaft, Dresden