



Leitfaden zur Forstlichen Bodenschutzkalkung in Sachsen

Vollständig überarbeitete Auflage 2020



Leitfaden zur Forstlichen Bodenschutzkalkung in Sachsen

(Kalkungsleitfaden)

Vollständig überarbeitete Auflage 2020

Schriftenreihe, Heft 31

Autoren:

Dr. Henning Andreae, Rainer Gemballa, Frank Jacob
Sachsenforst, Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft
Referat Standortserkundung, Bodenmonitoring, Labor

Inhalt

Vorwort	5
I Ökologische Grundlagen, Geschichte und Perspektiven.....	6
1 Prozesse und Ursachen von Bodenversauerung.....	6
1.1 Natürliche Prozesse der Säureproduktion in Böden.....	6
1.1.1 Einfluss der Kohlensäure.....	6
1.1.2 Einfluss des Nährstoffkreislaufs.....	7
1.1.3 Podsolierung.....	8
1.2 Anthropogene Komponenten der Bodenversauerung.....	8
1.2.1 Waldnutzung.....	8
1.2.2 Deposition von Säurebildnern.....	11
2 Immissionsbedingte Schadsituation in Sachsen.....	13
2.1 Prädisponierende Standortbedingungen.....	13
2.2 Schädigungen durch Emissionen von 1850 bis 1950.....	13
2.3 Waldschadensgebiete zwischen 1950 und 1990.....	15
2.4 Forstliches Umweltmonitoring.....	17
2.5 Konsequenzen aus der Umweltüberwachung.....	19
3 Bemessung, Kontrolle und Bewertung der Kalkung.....	22
3.1 Dokumentation des Kalkungsvollzugs seit 1986.....	23
3.2 Flussbilanzen als Werkzeug der Kalkungsbewertung (Level II).....	25
3.3 Kalkung und Bodenchemie (BZE 1 und 2).....	30
3.3.1 Auswirkungen der Kalkungen auf die Basensättigung.....	31
3.3.2 Auswirkungen der Kalkungen auf den pH-Wert.....	32
3.3.3 Auswirkungen der Kalkungen auf die Austauschkapazitäten.....	32
3.4 Kalkung und Bodenbiologie (BZE 2).....	33
3.5 Kalkung und Waldernährung (BZE 2).....	35
3.5.1 Regelmäßiger Check Up der Waldbäume.....	35
3.5.2 Nadelspiegelwerte - Blutbild des Baumes.....	35
3.5.3 Die Wahl geeigneter Probanden.....	36
3.5.4 Kalkungserfolge nur bedingt erkennbar.....	37
3.6 Kalkung und Vegetation (BZE 2).....	39
3.6.1 Was passiert innerhalb der Krautschicht?.....	39
3.6.2 Was passiert innerhalb der Moosschicht?.....	40
3.7 Kalkung und Quellwasserchemie (Level II).....	41
3.7.1 Was sagt die Literatur zur Nitratproblematik?.....	42
II Technischer Teil: Planung - Leistungsvergabe - Kalkausbringung.....	44
4 Organisatorische Rahmenbedingungen.....	44
5 Planung der Bodenschutzkalkung.....	44
5.1 Grundsätze zur Auswahl der Kalkungsflächen.....	44
5.1.1 Ausweisung der Kalkungskulisse.....	44
5.1.2 Bewertungsgrundsätze zur Kalkungseignung.....	46
5.1.3 Abstimmung mit Wasser- und Naturschutzbehörden.....	49
5.1.4 Berücksichtigung der Waldbesitzerinteressen.....	49
5.2 Abgrenzung und Arrondierung der Kalkungsflächen.....	50

6	Leistungsbeschreibung und Vergabe.....	52
6.1	Einzusetzende Kalke.....	52
6.1.1	Mindestgehalte an basisch wirksamen Bestandteilen.....	52
6.1.2	Aufmahlung und Feuchte der Kalke.....	52
6.1.3	Reaktivität der Kalke.....	53
6.1.4	Schwermetallgehalte der Kalke.....	53
6.2	Anforderungen im Vergabeverfahren.....	53
6.2.1	Allgemeine fachliche Kriterien im Vergabeverfahren.....	53
6.2.2	Deklaration der Kalke/Analysenattest.....	53
6.2.3	Angebote mit mehreren Kalken für ein Los.....	54
6.2.4	Aufwandmengen.....	55
6.2.5	Umschlag und Ausbringung des Kalkes.....	55
6.2.5.1	Subunternehmer, Logistikkonzept, Umschlag.....	55
6.2.5.2	Ausbringungstechnik.....	55
6.2.5.3	Anforderungen für den Einsatz von GPS.....	55
6.2.6	Ausführungsfristen.....	56
6.2.7	Kriterien für die Auftragserteilung.....	56
7	Durchführung und Dokumentation der Kalkung.....	57
7.1	Grundsätzliches zur Durchführung.....	57
7.1.1	Aufgaben der Forstbezirke bei der Kalkungsdurchführung.....	57
7.1.2	Pflichten der Auftragnehmer bei der Kalkungsdurchführung.....	58
7.2	Dosierung und Wiederholungszeiträume.....	59
7.3	Ausbringverfahren und -geräte.....	59
7.4	Ausbringgenauigkeit.....	60
7.5	Arbeitsnachweise des Auftragnehmers.....	60
7.6	Dokumentation der Kalkung.....	61
8	Qualitätssicherung und Rückforderungen bei Abweichungen vom Vertrag.....	62
8.1	Kontrollen.....	62
8.1.1	Kontrolle der Kalkmengen.....	62
8.1.2	Kontrolle der Kalkqualität.....	62
8.1.3	Kontrolle der GPS-gestützten Kalkausbringung.....	63
8.2	Toleranzen und Rückforderungen bei Abweichungen vom Vertrag.....	63
8.2.1	Nichteinhaltung der Kalkmengen.....	63
8.2.2	Nichteinhaltung der Kalkeigenschaften.....	64
8.2.2.1	Gehalte an basenwirksamen Bestandteilen (bwB) auf Basis CaCO_3 und an Magnesiumkarbonat (MgCO_3).....	64
8.2.2.2	Reaktivität.....	66
8.2.2.3	Kornspektrum und Feuchtegehalt.....	66
8.2.2.4	Schwermetallgehalte.....	67
8.2.3	Nichteinhaltung der Kalkverteilung.....	68
8.2.4	Nichteinhaltung der Ausführungsfrist.....	68
8.2.5	Nichteinhaltung der zugesagten ausreichenden deutschen Sprachkenntnisse des eingesetzten Personals.....	68
III	Literatur.....	69
IV	Kalkungskonzepte und -anweisungen anderer Bundesländer.....	74

V	Abkürzungsverzeichnis.....	75
VI	(9) Anhang.....	77
9.1	Zeitplan für Planung und Durchführung einer Bodenschutzkalkung.....	78
9.2	Ablauf- und Entscheidungsschema zur Auswahl der Kalkungsflächen.....	79
9.3	Workflow des Kalkungsplanungsmoduls in FGIS_online.....	85
9.4	Feinplanung.....	87
9.5	Maximale Schwermetallgehalte.....	88
9.6	Angebot/Leistungsverzeichnis zur Bodenschutzkalkung (Beispiel).....	89
9.7	Interne Dokumentation von Kontrollen (Beispiel).....	90
9.8	GPS-Befliegungskarten (Ausschnitte).....	91
9.9	Tabellarischer Nachweis zu den gekalkten Flächen (Beispiel).....	92
9.10	Einschätzung der Bodenschutzkalkung durch den Forstbezirk (Beispiel).....	93
9.11	Anleitung zur Entnahme von Kalkproben für deren analytische Kontrolle.....	94
9.12	Etikett für die Kalkproben.....	97
9.13	Protokoll der Kalkprobennahme	98
9.14	Protokoll zur Kontrolle der GPS-Befliegungskarten (Beispiel).....	99

Vorwort

Wälder nehmen in Sachsen etwa 28 % der Landesfläche ein und prägen im besonderen Maße unsere Umwelt. Sie sind Ort der Holzproduktion, Lebensraum für Pflanzen und Tiere, beliebte Erholungsstätte des Menschen und wirken durch ihre Langlebigkeit, Struktur und vergleichsweise extensive Bewirtschaftung regulierend bzw. schützend auf das Klima, den Wasserhaushalt und die Böden einer Landschaft ein. Dem Boden kommt im Ökosystem Wald eine Schlüsselrolle zu. Er ist nicht allein Wurzelraum der Bestände und ihrer Begleitflora, sondern zugleich Reaktionsort der Stoffkreisläufe (Mineralisation, Nährstoffaufnahme), mit ineinander verwobenen Puffer-, Filter- und Speicherfunktionen für Nähr- und Schadstoffe sowie Wasser. Er ist Entstehungsort für waldbürtige Wässer, aber auch eine effektive Senke für Luftschadstoffe.

Der Schutz des Waldes einschließlich der Gütesicherung der Gewässer muss deshalb zwangsläufig beim Schutz der Waldböden beginnen. Nur gesunde Waldböden sind ein Garant für nachhaltig intakte Waldökosysteme und sauberes Wasser.

Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen und die kontinuierlichen Untersuchungen an acht forstlichen Dauerbeobachtungsflächen zeigen, dass die sächsischen Waldböden auf großer Fläche tief reichend versauert sind und - trotz der nicht mehr erfolgenden Schwefelbelastung - noch immer zu hohen Nährstoffausträgen unterliegen. Zudem stellen die nach wie vor zu hohen Stickstoffeinträge und die im System bereits gespeicherten Stickstoffvorräte ein weiteres Versauerungspotenzial dar.

Um einer weiteren Nährstoffverarmung entgegenzuwirken und für künftige Generationen die Multifunktionalität der Waldökosysteme nachhaltig zu sichern, kommt neben der naturnahen Bewirtschaftung der Wälder und dem langfristigen Umbau von Nadelholzforsten in standortgerechte, klimaplastische Mischwälder auch der Bodenschutzkalkung eine Schlüsselrolle zu.

Bodenschutzkalkungen erfordern eine fachlich fundierte forstliche Planung, klare vertragliche Regelungen für ihre sorgfältige Durchführung durch sachkundige Service-Unternehmen sowie eine kontinuierliche Kontrolle durch den Auftraggeber. Nur so ist gesichert, dass ihre Ziele optimal erreicht, Risiken vermieden und Fördergelder zweckentsprechend eingesetzt werden.

Der vorliegende, aktualisierte Leitfaden zur Forstlichen Bodenschutzkalkung in Sachsen basiert auf dem von Dr. Frieder Leube verfassten Leitfaden aus dem Jahr 2000. Die Neufassung beinhaltet ergänzende Literaturrecherchen zum Thema, Ergebnisse des Forstlichen Umweltmonitorings in Sachsen und berücksichtigt verfahrenstechnische Erfahrungen aus 18 Jahren Anwendung dieses Leitfadens und aus 28 Jahren Kalkung im Freistaat Sachsen.



Utz Hempfling
Landesforstpräsident

I Ökologische Grundlagen, Geschichte und Perspektiven

1 Prozesse und Ursachen von Bodenversauerung

Die Bodenschutzkalkung im Wald als Maßnahme gegen anthropogen, durch langjährige Deposition von Luftschadstoffen verursachte Bodenversauerung und damit Bodendegradierung ist im Kontext mit natürlicher, ökosysteminterner oder nutzungsbedingter Säurebelastung zu betrachten (z. B. KRUG & FINK 1983; KLIMO et al. 2006). Im Folgenden wird daher versucht, den insbesondere im Zuge der Waldschadensforschung seit 1979 erarbeiteten Stand des Wissens noch einmal darzustellen. Eine umfassende Übersicht über alle quantitativ bedeutsamen, säurebildenden Prozesse und Pufferreaktionen in (Wald-) Böden geben VAN BREEMEN et al. (1983), ULRICH (1985), REUSS & JOHNSON (1986), BREDEMEIER (1987), MATZNER (1988) und ULRICH & SUMNER (1991).

1.1 Natürliche Prozesse der Säureproduktion in Böden

In gemäßigt- bis kühlhumiden Klimaten mit entsprechender Sickerwasserbildung sind Versauerungsprozesse und damit verbundene Nährstoffverluste natürlicher Bestandteil der langfristigen Bodenentwicklung (VEERHOFF et al. 1996; GODBOLD, 2003; MATZNER & DAVIS 1996). Prinzipiell gilt, dass Bodenversauerung dort stattfindet, wo durch äußere Einflüsse oder ökosysteminterne Prozesse den Böden mehr Protonen (H^+) zugeführt werden als diese durch Kationenaustausch und Verwitterung von Mineralen neutralisieren (= Säureneutralisationskapazität [SNK]). In dem Maße, wie SNK verbraucht wird, erwirbt der Boden dann spiegelbildlich die Fähigkeit, Basen zu neutralisieren (Basenneutralisationskapazität [BNK]; BLUME et al. 2010).

Diese Neutralisations- beziehungsweise Transformationsreaktionen sind auch unter dem Begriff der Pufferung bekannt (ULRICH 1981). Voraussetzung für Versauerung ist, dass die basischen Produkte der Neutralisation aus dem Boden ausgewaschen werden. Ökosysteminterne Säuregenerierung ist überwiegend

Resultat zeitlich und räumlich entkoppelter Prozesse des Stoffumsatzes bzw. des Nährstoffkreislaufes. Diesen Kreislauf kann man vereinfacht mit den Begriffen Photosynthese und Ionenaufnahme (Primärproduktion) versus Atmung und Mineralisierung (Sekundärproduktion) umschreiben. Sind die Raten der Hinreaktion gleich denen der Rückreaktion, so kann nach ULRICH (1987) von einem Fließgleichgewicht oder dem stofflich stationären Zustand des Waldökosystems ausgegangen werden. Die Ionenaufnahme und die Mineralisierung sind dabei die gegenläufigen Prozesse im Säurehaushalt (s. u.).

1.1.1 Einfluss der Kohlensäure

Schon der pH-Wert des Regenwassers ist im Gleichgewicht mit dem Kohlendioxidgehalt der Luft durch die Dissoziation der gebildeten Kohlensäure (H_2CO_3) natürlicherweise leicht sauer (pH 5,6), während reines Wasser mit einem pH-Wert von 7 neutral wäre. MATZNER & DAVIS (1996) untersuchten in Neuseeland entlegene Waldböden auf Granit und Grauwacke unter Nothofagus-Beständen (Scheinbuche) und fanden in tieferen Bodenschichten eine ähnlich geringe Basensättigung (= Anteil der Nährstoffe Ca, Mg, K und Na an den für die Pflanzen leicht verfügbaren austauschbaren Kationen) wie in Deutschland, aber vergleichsweise höhere pH-Werte vor. Sie schrieben diese unabhängig von der Nutzung oder sauren Depositionen gefundenen Resultate den hohen Niederschlags- und damit Sickerwasserraten in Kombination mit einem starken Eintrag an Kohlensäure zu (Niederschlag 1.600 bis 2.500 Liter pro Jahr). Aufgrund des Elektroneutralitätsprinzips von Lösungen wird das Hydrogencarbonat (Anion) aus der Kohlensäure durch entsprechende Auswaschung von in diesem Falle Nährstoffkationen (Ca, Mg, K) begleitet, was langfristig (in der Nacheiszeit) zur Basenverarmung dieser Standorte führte.

Stärker als dieser sehr langfristig wirkende Effekt niederschlagsbürtiger Kohlensäure ist der beachtliche, bodenintern aus der Wurzel- und Zersetzeratmung im Boden generierte Versauerungsanteil zu berücksichtigen. Der Kohlendioxidgehalt der Bodenluft kann zwischen dem 6- bis 100-fachen (BLUME et

al. 2010, BREDEMEIER 1987) über dem der Atmosphäre liegen. Nach BLUME et al. (2010) „steigt [entsprechend] die Konzentration des gelösten CO_2 - bzw. oberhalb von pH 5 - der Kohlensäure“. Bei pH 5 liegen bereits 95 % der Kohlensäure in undissoziierter Form (H_2CO_3) vor. Das heißt, Kohlensäure kann durch die chemische Begrenzung der Dissoziation in Protonen und Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) keine pH-Werte unter 5 in der Bodenlösung des Wurzelraums und damit unter mitteleuropäischen Versickerungsbedingungen nur geringe Säurebelastungsraten erzeugen (BREDEMEIER 1987).

1.1.2 Einfluss des Nährstoffkreislaufs

Intensiver als der oben beschriebene Prozess wirkt in terrestrischen Ökosystemen die Nährstoffaufnahme durch die Vegetation im Zuge der Primärproduktion und damit in die Nahrungskette. Zur Erhaltung der elektrischen Neutralität in der Pflanze erfolgt die

Aufnahme der oberflächlich an den Bodenteilchen (z. B. Tonminerale) gebundenen Nährstoffkationen unter gleichzeitiger Abgabe gleichwertiger (äquivalenter) Wasserstoffmengen aus der Wurzel. Bei einer Aufnahme von Nährstoffen in anionischer Form (Nitrat, Sulfat) wird hingegen OH^- abgegeben, der Wurzelraum wird alkalischer. Werden mehr Kationen als Anionen aufgenommen, z. B. bei vorwiegender Ammonium (NH_4^+)-Ernährung, führt dies zu einer Versauerung des Wurzelraums (Rhizosphäre). Erst wenn die aufgebaute Biomasse abstirbt und wieder zersetzt und schließlich mineralisiert wird (aus Streu wird Humus), kehrt sich der Vorgang um und die Säure-Basen-Bilanz gleicht sich zeitlich entkoppelt aus. VAN BREEMEN (1995) sah daher aufwachsende Wälder selbst als Quelle von Versauerung. Bei einem Ökosystem, das sich im sogenannten stationären (stabilen) Zustand befindet, kompensieren sich langfristig säurebildende und -zehrende Prozesse (ULRICH 1987), der Stoff- und Ionenkreislauf ist geschlossen.

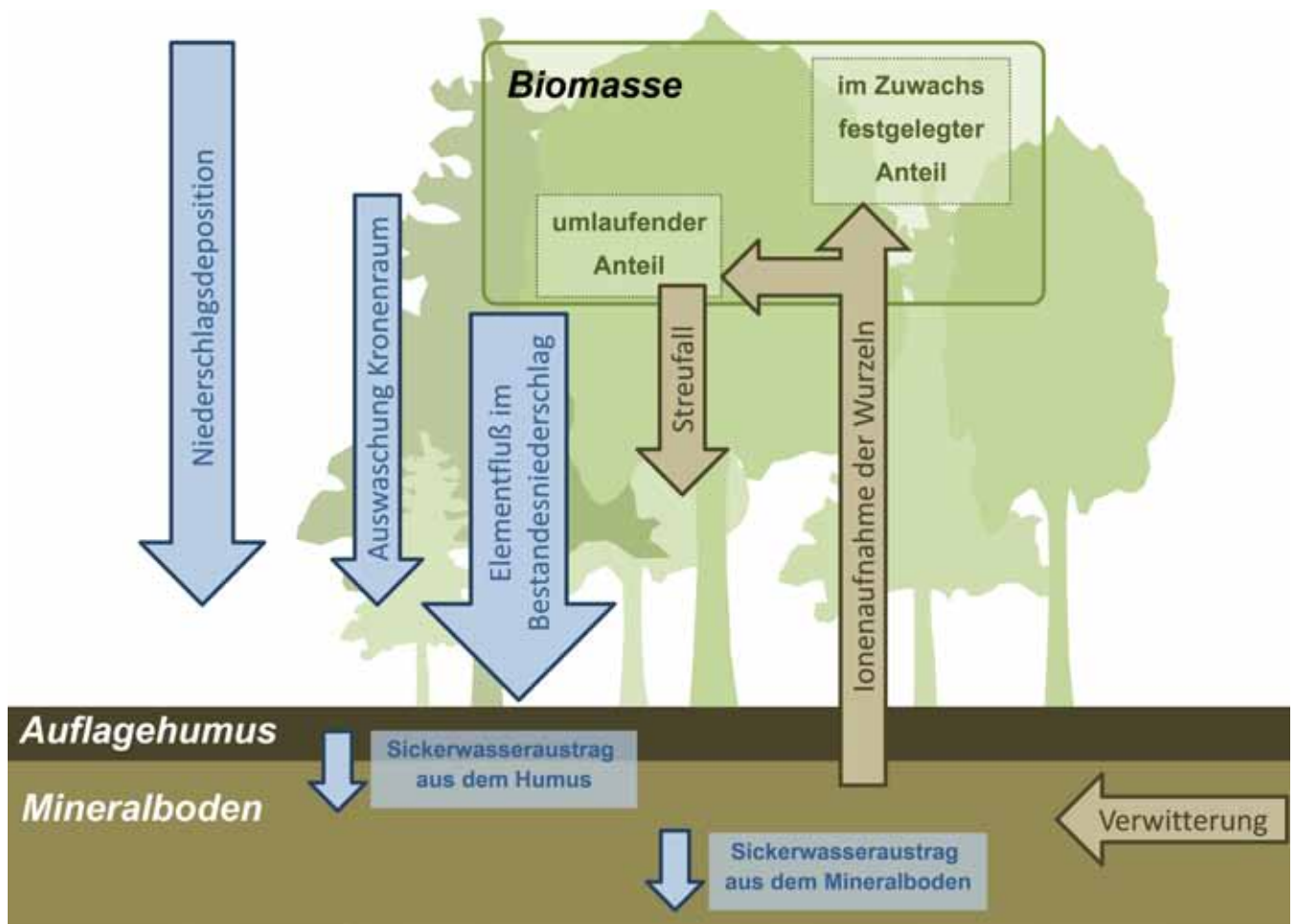


Abbildung I-1: Schematischer Nährstoffkreislauf eines Waldökosystems

Allerdings reichern sich abgestorbene organische Substanzen und damit auch die Nährstoffe zunächst nur an der Bodenoberfläche an („Basenpumpe“ nach HARTMANN & VON WILPERT 2016), während der Mineralboden an Nährstoffen verarmt. Es liegt somit auch eine räumliche Entkoppelung des Protonen- und Basenkreislaufs im Ökosystem vor. Die Nährstoffe können langfristig bei weiterer Umsetzung durch Bodenlebewesen (Bioturbation), durch Wurzelstreu und mit dem Sickerwasserstrom wieder im ganzen Wurzelraum verteilt werden.

Ein weiterer natürlicher Faktor für den Nährstoffexport kann in bestimmten Entwicklungsphasen der Ökosysteme die periodische Entkopplung des Stickstoffkreislaufs darstellen. Eine temporäre ökosystemare Störung in diesem Sinne ist zum Beispiel die erhöhte Mineralisation von Auflagehumus nach Freilage (PAAVOLAINEN & SMOLANDER 1998) z. B. nach dem Absterben von Beständen (Schädlingsbefall, Windwurf). Dabei werden die durch die Nitrifikation (mikrobielle Produktion von Salpetersäure, HNO_3) erzeugten Protonen nicht komplett gepuffert, sondern reagieren mit dem Boden und setzen dort Nährstoffkationen frei. Diese werden dann zusammen mit überschüssigem Nitrat ausgewaschen. Nitrat fungiert als „Kationenschlepper“ im Sickerwasserstrom, somit verliert der Boden tief reichend Säureneutralisationskapazität.

Die Bodenvegetation kann auf kleineren Bestandeslücken - unter günstigeren Licht-, Nährstoff- und Wasserbedingungen als im geschlossenen Bestand - Stoffausträgen aus dem System in gewissem Maße entgegenwirken (KLINCK 2010).

1.1.3 Podsolierung

Podsolierung ist die abwärts gerichtete Umlagerung gelöster organischer Säuren, oft zusammen mit Aluminium und Eisen (UGOLINI & DAHLGREN 1987). Podsole entwickeln sich im humiden Klimabereich bevorzugt unter Auflagehumus in allen basenarmen Oberböden ohne längerfristigen Wasserüberschuss (AK STANDORTSKARTIERUNG 2016). Im weiteren Sinne ist Podsolierung ein Sonderfall der räumlichen Entkopplung der Nährstoffverteilung ärmerer Bodensubstrate, die vor allem unter Koniferen (Fichten, Kiefern) und Heidevegetation stattfindet. Die starke Akkumulation der schwer zersetzbaren, nährstoffarmen Streu dieser Pflanzen in organischen Auflagen verstärkt - wie oben beschrieben - stark saure Verhältnisse im Mineralboden.

Nährstoffmangel hemmt den mikrobiellen Abbau organischer Komplexbildner ebenso wie ein kühl-feuchtes Klima, das auch die Organismenaktivität bremst und die Podsolierung fördert (BLUME et al. 2010). Podsole sind stets gekennzeichnet durch einen stark sauren, gebleichten Auswaschungs- und einen gut erkennbaren Anreicherungshorizont der verlagerten Huminstoffe. Wesentlicher Faktor für deren Anreicherung sind höhere pH-Werte und Ca-Sättigung im Unterboden, weil dies zu einem Zerfall der organischen Komplexe, deren Polymerisation und Ausflockung führt. Unterhalb dieses Horizonts ist eine Versauerung in natürlichen Systemen wiederum nur durch Kohlensäure möglich (UGOLINI & DAHLGREN 1987; ULRICH 1995). In Sachsen findet man deutlich ausgebildete Podsole auf den Waldstandorten über armen Grundgesteinen wie Kreidesandstein, Quarzporphyren, Erzgebirgsgraniten und altpleistozänen Reinsanden. Diese Podsole sind das Ergebnis zeitlich langer Bodenbildungsprozesse, die häufig im Periglazial begonnen haben und bis heute andauern.

1.2 Anthropogene Komponenten der Bodenversauerung

1.2.1 Waldnutzung

Ein entscheidender Einfluss auf die Degradation der Waldböden und die Vorschädigung hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber sauren Niederschlägen ist auch die teils Jahrtausende währende Nutzung der Wälder: Zum einen durch den Nährstoffexport über den Holzeinschlag für Bau- und vor allem den Energiebedarf (THOMASIUŠ 1995), durch Rodung und Streunutzung, durch die Waldweide, aber auch durch Änderung der Nutzungsart (Hochwald- in Niederwaldbewirtschaftung); zum anderen durch Verschiebung der Baumartenzusammensetzung, insbesondere in Richtung auf nicht standortgerechte Nadelwälder (ULRICH 1980). Alle Nutzungen greifen mehr oder weniger stark in den Nährstoffkreislauf der Waldökosysteme ein, weil nicht nur im Erntegut gespeicherte Nährstoffe entzogen, sondern auch ökosysteminterne Versauerungsprozesse verstärkt werden. Bereits vor und in der Bronzezeit geht ULRICH (1995) von anthropogenen Eingriffen in die Wälder aus, die Humusabbau förderten und über die Bildung starker Säuren (Salpetersäure) zu einer geringfügigen Abnahme der Basensättigung führten. Bis zur Zeitenwende seien Wachstum und Produktivität der Wälder hauptsächlich durch diese nutzungsbedingten

Entkoppelungen des N-Kreislaufs begrenzt gewesen. Das Erzgebirge prägten vor dessen Besiedlung herzynische Tannen-Buchen-Fichten-Wälder (MELZER 2010; WENDEL 2017). Insbesondere mit den Bergbauaktivitäten, die im Erzgebirge ab 1168 bei Freiberg begannen und in der zweiten Bergbauperiode ab dem 14. Jahrhundert durch den Stollenbau intensiviert wurden, griff der Mensch dann massiv in den Nährstoffkreislauf der Wälder ein. Bereits im ausgehenden Mittelalter waren größere Gebiete entwaldet und ein weitverzweigtes Transportsystem (Flößerei, Straßen) führte zur Erschöpfung selbst kammnaher Wälder (HEMPEL 2009). Für das Rösten (Entschwefeln) von einer Tonne sulfidischer Blei- und Kupfererze wurden zum Beispiel zwei Raummeter Holz und für das Ausschmelzen der gleichen Menge eine Tonne Holzkohle benötigt, die wiederum aus sieben Raummeter Holz gewonnen wurde. Nach WILSDORF et al. (1960) mussten 1556 aus dem mittleren Erzgebirge in einem Vierteljahr 5.377 Wagen Holzkohle nach Freiberg geliefert werden; auf das ganze Jahr umgerechnet war das ein Holzverbrauch von 160.000 Festmetern. Technische Entwick-

lungen führten zudem dazu, dass Holzkohle verlustfrei über weite Strecken angefahren werden konnte (vgl. MEYER 1989 zur Entwicklung im Harzer Bergbau). Der Brennholz- bzw. Holzkohlebedarf zur Raseneisenerzverhüttung und Glasfabrikation führte auch im Oberlausitzer Tiefland zur Übernutzung und Waldvernichtung. Nach HEMPEL [2009] ist „für die Eisenhütte in Bernsdorf [...] für das Ende des 18. Jahrhunderts der Verbrauch von 1.600 bis 2.500 Klafter (etwa 6.000 Festmeter) Holzkohle pro Jahr belegt“.

Außerdem erfolgte die selektive Nutzung einzelner Baumarten: Eibe für Bogenbau, Linde für Transportbehälter aus Bast bzw. Schnitzwaren, Weide für Korbwaren, Eiche für Lohgerberei, Buche für Pottaschegewinnung etc.

Somit erfolgte die sukzessive Umwandlung der Mischwälder in Reinbestände aus Fichte (KLIMO et al. 2006) und/oder Buche (MEYER 1989). KLIMO et al. (2006) geben für die Tschechische Republik folgende Istzustände und Veränderungen der Baumartenzusammensetzung allein für die letzten 200 Jahre an:

Tabelle I-1: Veränderung der Baumartenzusammensetzung in der Tschechischen Republik im 19./20. Jahrhundert

Baumartenanteil	Fichte	Tanne	Kiefer	Lärche	Buche	Eiche
Ist [%]	54,2	0,9	17,6	3,7	5,9	6,3
Veränderung [%]	+43	-17	+12	± 0	-32	-11

Durch Streurechen, d. h. Export von Nährstoffen auf die Äcker, durch direkte Verwendung des Laubs als Dünger oder über die Einstreu des Viehs, wurden den Wäldern überdies enorme Mengen Nährstoffe entzogen (STÖCKHARDT 1863/64 für die damaligen Forstreviere Reudnitz und Wermsdorf). STÖCKHARDT (1863) stellt zum Streurechen fest: „Bei diesem Verfahren wird der Waldboden endlich ruiniert und der Feldboden doch nicht nachhaltig gekräftigt.“

Bei den von TURNER ET LAMBERT (2011) über 16 Jahre untersuchten jungen Kiefernbeständen entzog Streuentfernung so viel Nährstoffe wie vier normale Sägeholz- oder eine Vollbaumernte. Eine mengenmäßige Abschätzung des Beitrags unterschiedlicher Nutzungen und Nährstoffentzüge auf die Versauerung von Waldböden gibt Abbildung I-2 (AK STANDORTSKARTIERUNG 2016).

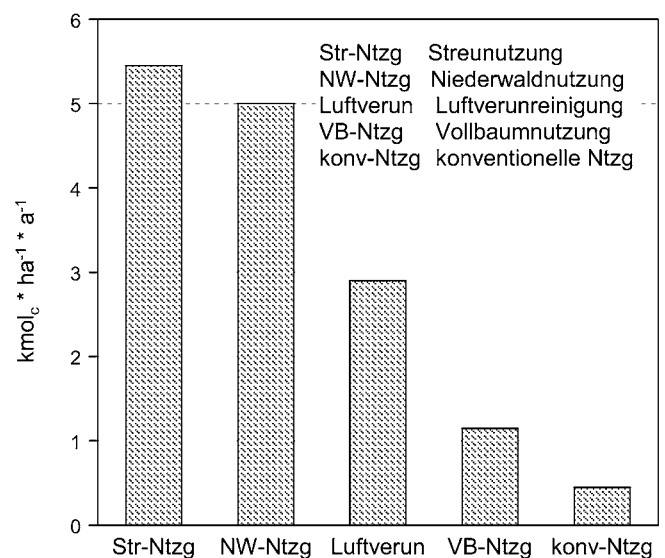


Abbildung I-2: Beitrag unterschiedlicher Nutzungsformen im Wald zur Bodenversauerung, hier als Verlust von Ca, Mg und K in Kilomol Ladungsäquivalent (kmol_c)¹ pro Hektar und Jahr (Quelle: AK STANDORTSKARTIERUNG 2016)

¹Ein Kilomol entsprechen nach Beese, F.; Meiwes, K.-J. (1995): 10 Jahre Waldkalkung - Stand und Perspektiven. AFZ (17), S. 946-949 etwa 50 Kilogramm kohlen-saurem Magnesiumkalk

Es gilt: Je höher der Anteil an Rinde, Reisig und Blättern/Nadeln an der Erntemasse, desto stärker ist der Nährstoffentzug. Aktuelle Analysen des Staatsbetriebs Sachsenforst zur kompartimentweisen Nährstoff-

speicherung eines 80- bzw. 90-jährigen Kiefern- und Fichtenbestands in Laußnitz und Altenberg belegen dies (Abbildung I-3).

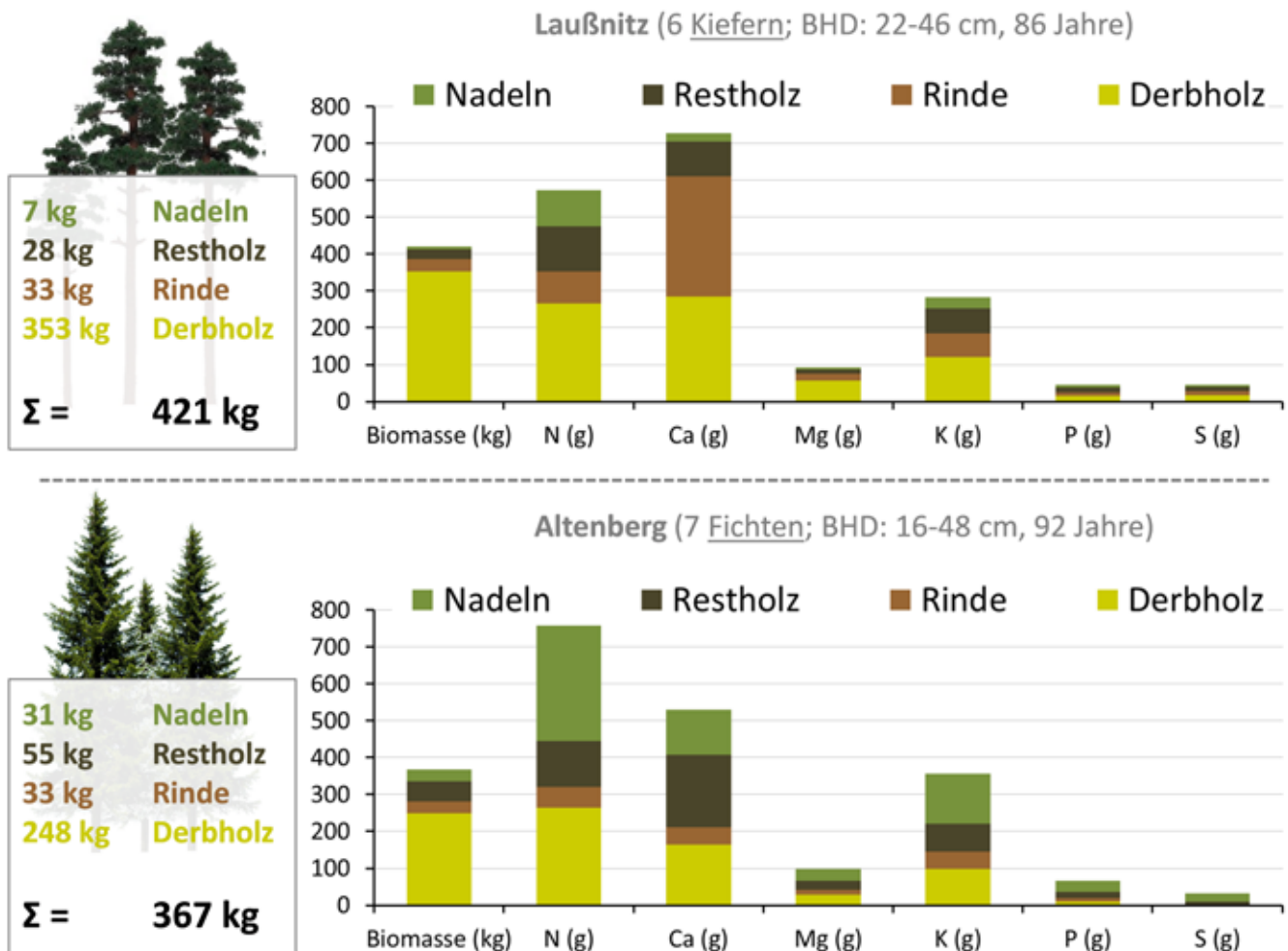


Abbildung I-3: Baumbezogene Nährstoff- und Biomassevorräte an zwei Level-II-Stationen in Sachsen (Erhebung 2015; Jacob, unveröffentlicht)

Es wird deutlich, dass das Derbyholz (Durchmesser > 7 cm) zwar den größten Anteil an der aufgebauten Biomasse hat (Kiefer 83 %; Fichte 68 %), die Nährstoffe aber zu einem Großteil in den anderen Baumkompartimenten festgelegt sind. Bei einer Vollbaumnutzung gegenüber der konventionellen Derbyholznutzung würde man dem Standort bei der Nutzung von Kiefern 119 % bzw. bei der Fichte 250 % mehr Calcium entziehen. Bei Phosphor lägen die Verluste bei 179 % beziehungsweise 340 %.

ULRICH (1995) kommt zu dem Schluss, dass in der nacheiszeitlichen Entwicklung der Waldböden in lehmigen und schluffigen Substraten etwa 8.000 Kilomol (kmol) basisch wirkende Kationen pro Hektar und einem Meter Tiefe verloren gegangen sind.

Die Pufferung der Säurebildung sei dabei

- durch Tonminerale des Ausgangsmaterials (Verwitterung; 1.500 kmol),
- durch neu gebildete, sekundäre Tonminerale (1.000 kmol),
- durch organische Substanz (500 kmol) und
- durch Auswaschung (5.000 kmol)

erfolgt. Zu Beginn der Industrialisierung ab Anfang des 19. Jahrhunderts geht ULRICH (1995) auf besagten Standorten von Nährstoffvorräten in Höhe von 100 bis 300 kmol pro Hektar bei einer Basensättigung von 30 % und mehr aus.

1.2.2 Deposition von Säurebildnern

Mit Rauch und Staub verursacht der Mensch Luftverunreinigungen, seit er den Gebrauch des Feuers gelernt hat und Ackerbau betreibt. Aber erst die Verhüttung von Erzen und besonders die Verbrennung fossiler Rohstoffe ab Anfang des 19. Jahrhunderts erzeugte Gase und Aerosole, die ein hohes Verdriftungs- und Schadpotenzial besitzen (ULRICH 1981b). Anthropogene Säurebildner entstehen aus den verbrannten Materialien selbst, als Begleiterscheinungen der Erzverhüttung (Sulfidoxidation; vgl. ZIEGER 1956/57) oder Verbrennungsprozessen in Kraftfahrzeugen (Oxidation elementaren Luftstickstoffs) sowie durch Umsetzung des vorwiegend aus der Tierhaltung (Stallanlagen, organische Düngung) freigesetzten Ammoniaks (BÖTTGER et al. 1978; JANSSEN-SCHMIDT et al. 1981). Abbildung I-4 zeigt exemplarisch die Entwicklung der europäischen Emissionen der Säurebildner seit 1880.

KLIMO et al. (2006) schätzen, dass in Tschechien seit 1880 die durchschnittliche Schwefeldeposition pro Hektar Landesfläche acht Tonnen betrug, was allein einer kumulativen Belastung mit 500 kmol Säure entspricht. VASAT et al. (2015) beschreiben für die Tschechische Republik eine Säurebelastung, die in

den 1970er- und 1980er-Jahren mit 14 kmol Ionenäquivalenten pro Hektar und Jahr Schwefeldioxid und 4 kmol reaktiven Stickverbindungen (NO_x/NH_3) kulminierte. Diese massive Emissionsperiode fiel mit weitflächigen Waldschäden in Berglagen Nordböhmens (Isergebirge) zusammen, weil dort aufgrund der Kraftwerksdichte und meteorologischen Bedingungen die Belastung 10 bis 15 mal höher war als im Durchschnitt des Landes. KULHAVY (2002) zitiert für die 1990er Jahre Ergebnisse von ZAPLETAL (1997) mit einer Deposition von noch 1 bis 7 kmol Säureäquivalenten pro Hektar und Jahr, wobei er eine besondere Gefährdung der Wälder in den Grenzgebirgen Tschechiens einschließlich der Mährisch-Schlesischen Beskiden konstatiert. MATERNA (1962) berichtet aus seinen Untersuchungen für das Erzgebirge, dass „im Durchschnitt des ganzen Gebietes etwa 30 bis 40 kg Schwefel pro Hektar in den Boden gelangen. Unter den Fichtenbeständen steigt dieser Wert aber beträchtlich und erreicht 130 kg pro Hektar.“ MARAN (1960) stellte ergänzend schon für Anfang der 1950er Jahre fest, dass sich vom südwestlichen Rand des Erzgebirges bis zur Elbe ein großes Waldrauchschadengebiet von beinahe 50.000 ha Größe erstreckte, in dem hauptsächlich die Fichte leide.

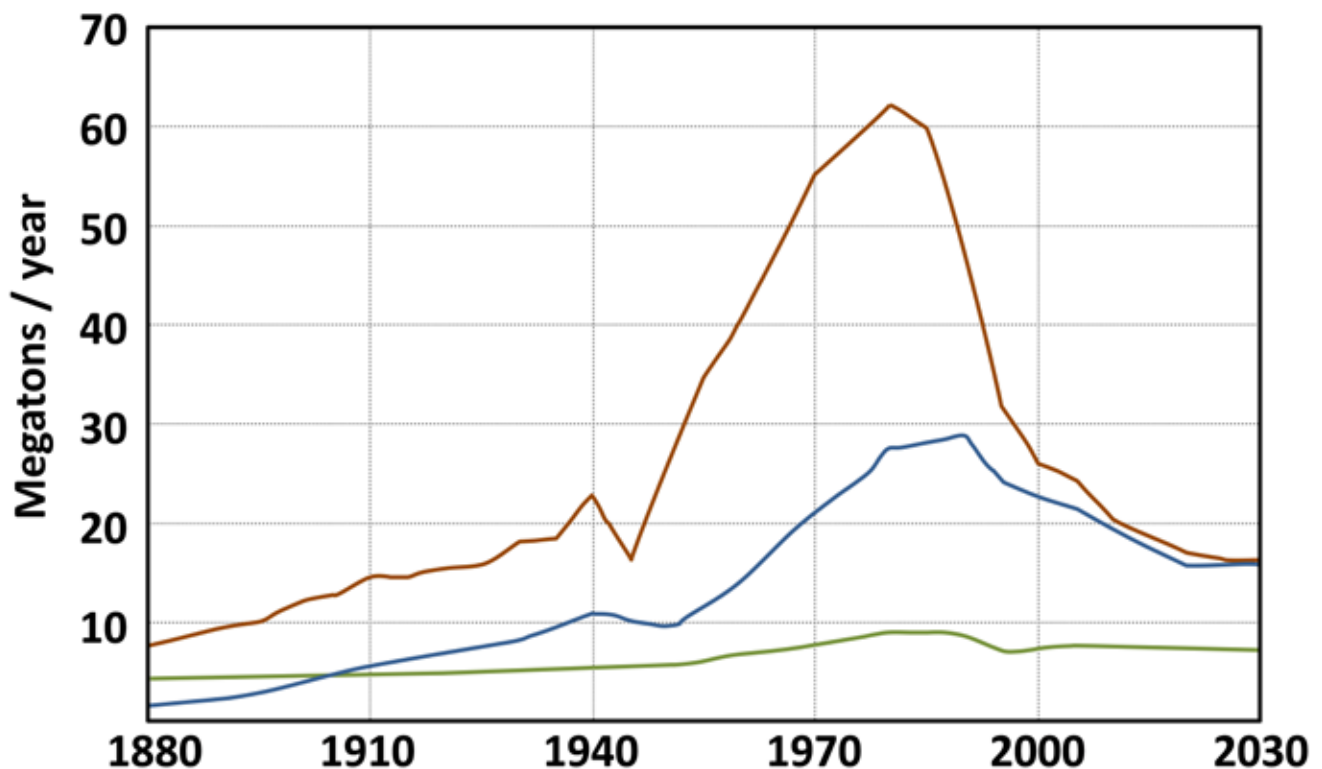


Abbildung I-4: Zeitliche Entwicklung der europäischen Emissionen von Schwefeldioxid (SO_2 , braun), Stickoxiden (NO_x , blau) und Ammoniak (NH_3 , grün) in Millionen Tonnen pro Jahr (Zeitraum 1880 bis 2030) nach SCHÖPP et al. (2003)

Bei der Schädigung auf Wälder ist die direkte Beeinträchtigung (Verätzung) der Blattorgane (letale, akute Rauchschäden) von solchen zu unterscheiden, die durch Speicherung von eingetragenen Luftverunreinigungen im Boden für lange Zeit subletal schwächend auf die Wälder wirken können.

So stellte bereits WIELER (1912) nach Untersuchungen im Oberharz fest: „Meine experimentellen Untersuchungen über die Einwirkung der schwefligen Säure auf die Pflanzen und die Erfahrungen, welche ich in Rauchschaedengebieten zu sammeln Gelegenheit hatte, machten es mir sehr wahrscheinlich, daß die Rauchschaeden nicht lediglich durch eine Beschädigung der Blattorgane mit ihren Folgewirkungen zustande kommen, sondern daß noch ein anderer gewichtiger Faktor dabei im Spiele ist, der Boden.“

Im Gegensatz zu den in den vorigen Kapiteln behandelten Versauerungsursachen führt der Eintrag starker mineralischer Säuren (Schwefel-/Salpetersäure) oder auch nur der Anionen derselben (Konzept mobiler Anionen: CHRIST et al. 1999) in Waldökosystemen zu tief reichender Bodendegradation mit einem entsprechenden Verlust von Nährstoffen im ganzen Bodenkörper bei gleichzeitig tiefen pH-Werten.

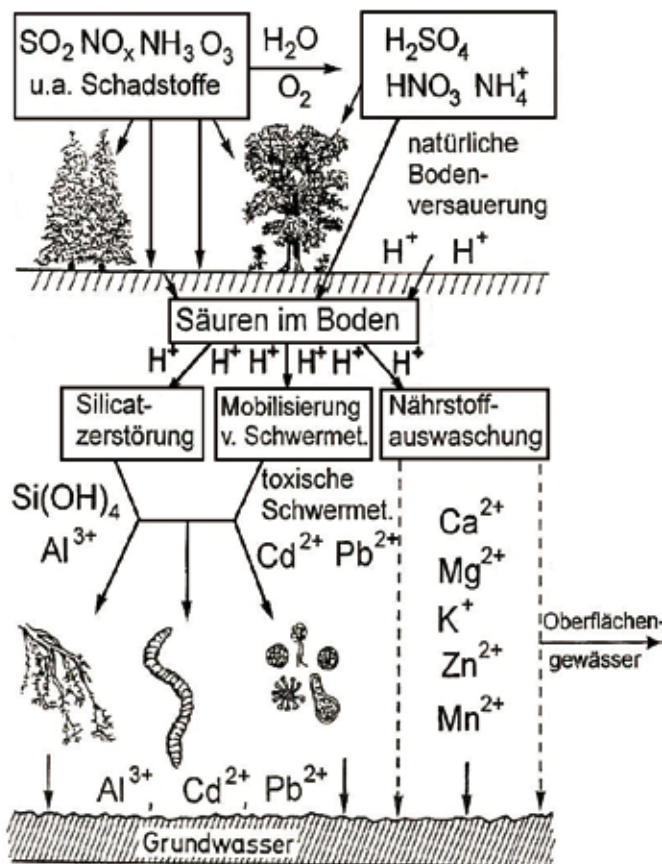


Abbildung I-5: Bodenversauerung durch Luftschadstoffe nach BRÜMMER (1987)

Werden Säuren oder Säurebildner (SO_2 , NO_2) über den Regen (nass), den Nebel (feucht) oder als Gas bzw. Staub (trocken) im Kronendach des Waldes abgelagert (deponiert), so unterliegen sie einem Kronenraumaustausch, sie werden gepuffert. Das heißt, hier versuchen die Pflanzen, den pH-Wert im Blattinneren konstant und damit die Zellen funktionstüchtig zu halten. Die Protonen werden dabei ausgetauscht gegen Nährstoffe wie Kalium (Quelle: Schließzellen der Spaltöffnungen), Kalzium (Quelle: Zellwände) und Magnesium (Quelle: Chlorophyll). Diese werden zusammen mit den im Niederschlag vorhandenen Anionen (z. B. SO_4 , NO_3) aus dem Blatt ausgewaschen. Der Verlust kann Störungen im Wasserhaushalt, der Zellwandstabilität und der Kohlenstoffaufnahme (Energiegewinnung) nach sich ziehen. Um die Blatt- und letztlich ihre Gesamtfunktion aufrechtzuerhalten, muss die Pflanze versuchen, die Nährstoffverluste durch die erneute Aufnahme der Nährelemente aus der Bodenlösung auszugleichen („Nachladen des Blattpuffers“ = Versauerung des Bodens).

Nach ULRICH (1995) lag als Folge des Säureeintrags die Basensättigung daher für zwei Drittel der deutschen Waldböden – selbst in 30 bis 60 cm Tiefe unter Flur – bei unter 15 %. Noch im Zuge der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung (2006–2009) wurde in dieser Tiefenstufe eine mittlere Basensättigung von nur 16 % ermittelt (WELLBROCK et al. 2016).

Aus der Auswaschung der Nährelemente und der pH-Absenkung ergibt sich eine steigende Dominanz von Aluminium in der Bodenlösung, denn Aluminium wird im Zuge der Säurepufferung mit sinkendem pH-Wert zunehmend aus den Silikatgittern der Minerale freigesetzt (Austauscher-/Aluminiumpufferbereich nach ULRICH 1981a). Dieser Prozess verändert über Ladungsänderungen zuerst die Speichereigenschaften der Minerale; die Silikate verwittern. Aus geogenen primären Mineralen bilden sich anfangs sekundäre Tonminerale im Boden. Weitere Aluminiumfreisetzung kann letztlich zu deren Zerstörung führen (VEERHOFF 1992). Aluminiumfreisetzung führt zu Wurzelschäden und das Zersetzungsmilieu für die Bodenlebewesen wird ebenfalls verändert. Die Einmischung des Humus in den Mineralboden wird unterbrochen. Die Verhältnisse der Nährelemente zueinander geraten ins Ungleichgewicht; sie werden disharmonisch.

2 Immissionsbedingte Schadsituation in Sachsen

2.1 Prädisponierende Standortbedingungen

Die Landnutzungsansprüche der Gesellschaft hatten bis zur frühen Neuzeit überall den Wald auf schwer zu bewirtschaftende, klimatisch ungünstige Standorte zurückgedrängt. In der Regel sind dies gleichzeitig nährstoffarme und steinreiche Böden. Das ist in Sachsen von besonderer Bedeutung, weil die Grundgesteine der forstlichen Bodenbildung im deutschlandweiten Vergleich als nährstoffärmer und damit anfälliger für Bodenversauerung eingestuft werden können (MATERNA 1962b).

Die unregelmäßige Waldnutzung führte im 18. Jahrhundert zu einer »Holznot«, auf die von CARLOWITZ (1713) mit seinem Buch „Sylvicultura oeconomica“ reagierte und seitdem als gedanklicher Vater „nachhaltiger Forstwirtschaft“ gilt (HAMBERGER et al. 2013). Zu Beginn des 19. Jahrhunderts erfolgte dann unter Leitung Heinrich Cottas die Einführung einer geregelten Forstwirtschaft; Altersklassenwälder wurden in weiten Teilen des Landes prägend. Die Anwendung rationaler Aufforstungsverfahren und die Orientierung an der Holzverwendung bewirkten zudem die verstärkte Hinwendung zum Nadelholz. Dies hatte eine deutliche Erhöhung des Fichtenanteils im Gebirge und im Lösshügelland zur Folge. Demgegenüber reduzierte sich zum Beispiel die Fläche von Buchen und Hartlaubholz im Marienberger Forstbezirk von 60 % (1500), 50 % (1600), 35 % (1700), 20 % (1800) auf <10 % (1900) (MÜLLER 1935 zitiert in GEMBALLA 2017). Fichtenbestände erwiesen sich im Gebirge als besonders produktiv, zumal nur sie die Kahlschlagwirtschaft dauerhaft vertrugen (WENDEL 2017). Im Tiefland entstanden gleichzeitig reine Kiefernforste. Diese Nadelbestände sind durch die potenziell ganzjährig aktiven Blattoberflächen aber besonders effiziente Filter für Schadstoffe und damit sehr exponiert gegenüber Luftbelastungen.

2.2 Schädigungen durch Emissionen 1850 bis 1950

Als weitere Reaktion auf den Holzmangel erließ der sächsische Herrscher 1743 das „Mandat wegen Entdeckung derer im Lande befindlicher Steinkohlenbrüche und wie sich bei deren Aufnahme und Fortbau zu verhalten“ mit dem Zweck, den Grundeigentümergebergbau von Steinkohlen zu forcieren und die Energieversorgung zu verbessern (s. Abbildung I-6). Stein-

kohlenvorkommen waren z. B. im späteren Zwickauer, im Lugau-Oelsnitzer und im Döhlener Revier lange bekannt (10. bis 16. Jahrhundert), wurden aber erst zwischen 1806 (Königliches Steinkohlenwerk Zaukerode), 1830 (Zwickau) bzw. 1844 (Lugau-Oelsnitz) auf Basis des oben genannten Mandats bergmännisch abgebaut.

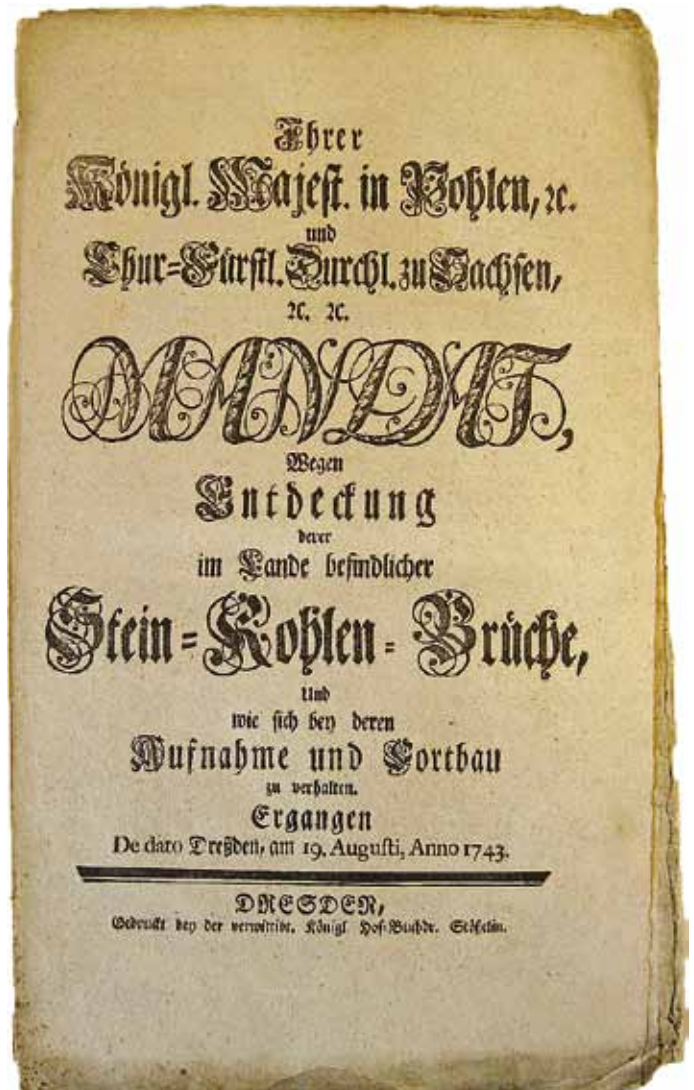


Abbildung I-6: Steinkohlenmandat

Die Forschung zu immissionsbedingten Waldschäden hat ihren Ursprung in Sachsen (FRANKE & MAIER 1962; WENTZEL 1997; vertiefend ANDERSEN 1996 zur „Hüttenrauchdebatte“, S. 51ff).

Im Jahre 1849 wurde Adolph Stöckhardt, Professor für Agrikulturchemie an der Akademie für Forst- und Landwirte zu Tharandt, „amtlich beauftragt, [...] nähere Untersuchungen über die Art und Größe der schädlichen Einwirkung, welche der Rauch der Freiburger Hüttenwerke auf die Vegetation der den letztern nahe liegenden Feld-, Wald- und Wiesenstücke ausübe, anzustellen.“

STÖCKHARDT beschrieb 1850 den Zustand der Gehölze in der Halsbrücker Flur: „die Bäume und Hecken haben nicht das lebhaftes Grün und erschienen namentlich auf der dem Hüttenwerk zugekehrten Seite wie verwelkt und vertrocknet“ (S. 33). Als Wirkungsweise der



Abbildung I-7: STÖCKHARDT (vor 1886, daher gemeinfrei, Autor: unbekannt)

in Halsbrücke freigesetzten Substanzen seien „zwei spezifisch verschiedene Fälle zu unterscheiden, nämlich die directe oder acute Vergiftung der Pflanzen durch die mit ihnen in Berührung kommenden gas- oder dampfförmigen Säuren, und eine indirecte oder chronische Vergiftung, welche den Erdboden, auf dem die Pflanzen wachsen, durch lang fortgesetzte Zuführung von metallischen

Dämpfen erfährt“ (STÖCKHARDT 1850, S. 34). Die Versauerung des Bodens durch die eingetragene schweflige Säure blieb von ihm unbeachtet. Durch Beräucherungsversuche an Pflanzen führte er 1871 als erster Deutscher die vorgefundenen Schäden auf eine direkte Einwirkung der in den Hütten freigesetzten schwefligen Säure zurück. Diese verursachte selbst in einer Verdünnung von 1:1 Million langfristig Schaden. Doch schon 20 Jahre zuvor wurden Ergebnisse von Begasungsversuchen zur Wirkungsabschätzung der Schwefelemission aus Sodafabriken publiziert (TURNER & CHRISTISON 1828; Ergebnisse zitiert in STÖCKHARDT 1850, S. 34; s. a. ANDERSEN 1996). STÖCKHARDT beschreibt auch erstmalig akute Schäden, die durch verfeuerte Stein-

kohle im Raum Leipzig (Eythra/Zwenkau) und im Plauenschen Grund bei Dresden entstanden. Denn: „Selbst der gewöhnliche Steinkohlenrauch, der meist etwas schweflige Säure, aber ungleich weniger enthält als der Hüttenrauch, kann durch diesen Gehalt nachtheilig auf das Pflanzenwachsthum einwirken“ (STÖCKHARDT 1850, S. 34/35). Weiter heißt es: „Nun enthalten aber die Zwickauer Steinkohlen [...] nur 1/8 bis höchstens 11/2 Proc. Schwefel, während [...] das Hauptmaterial für die Halsbrücker Hütten bildenden Schwefelmetalle der Bleiglanz über 13 Proc., der Schwefelkies aber über 50 Proc. Schwefel enthält“ (S. 35).

ZIEGER (1956/1957) gibt demgegenüber Schwefelgehalte für Zwickau/Oelsnitzer Steinkohle von 1,0 bis 1,5 %, für Lausitzer Braunkohle von 0,5 bis 0,8 % und für die mitteldeutschen Lagerstätten von 1,2 bis 2,0 % (Braunkohlenschwelkoks) an.

Sachsen entwickelte sich zur Mitte des 19. Jahrhunderts in eine Industrieregion par excellence mit Chemnitz als deutschlandweitem Zentrum der Industrialisierung und des Maschinenbaus. Die gleichzeitig aufgebauten Schienennetze beschleunigten die Entwicklung und damit den Energiebedarf sowie die Emissionen exponentiell.

Allein die Fördermengen des Zwickauer (230 Mio. Tonnen²) und Lugau-Oelsnitzer Reviers (140 Mio. Tonnen³) dürften – nach obigen Gehaltsangaben – bis zum Ende der Steinkohlennutzung in den 1970er-Jahren etwa 5,6 Mio. Tonnen Schwefel freigesetzt haben. Die im Mitteldeutschen und Lausitzer Revier ab etwa 1900 großtechnisch im Tagebau abgebaute Braunkohle hatte bis 1990 bei Einsatz der minimalen Zieger'schen Schwefelgehalte und den durch den Bundesverband Braunkohle⁴ veröffentlichten Fördermengen folgende Emissionen zur Folge:

Tabelle I-2: Kohlefördermenge im Lausitzer und Mitteldeutschen Revier (Quelle: DEBRIV) und daraus berechnete Schwefelemissionen nach ZIEGER (1956/57)

	Lausitzer Revier	Mitteldeutsches Revier
1900 – 1949		
Förderung (t)	908.931.000	1.560.864.000
Emission Schwefel (t)	4.545.000	18.730.000
1950 – 1990		
Förderung (t)	5.079.138.00	4.917.154.00
Emission Schwefel (t)	25.396.00	59.006.00

²https://de.wikipedia.org/wiki/Zwickauer_Steinkohlenrevier

³https://de.wikipedia.org/wiki/Lugau-Oelsnitzer_Steinkohlenrevier

⁴<https://kohlenstatistik.de/files/w/foerder.xlsx>

Bis 1950 wurden somit in beiden Revieren bei der – meist im Umfeld der Tagebaue durchgeführten – Verstromung der Kohle 23 Mio. Tonnen Schwefel emittiert. Bis 1990 kamen noch weitere 84 Mio. Tonnen hinzu. Wäre diese Emission allein auf der Landesfläche



Abbildung I-8: Titelblatt „Die Rauchquellen im Königreich Sachsen“ von E. SCHRÖTER (1908)

Sachsens niedergegangen, so wären 58 Tonnen Schwefel pro Hektar deponiert worden: Fast anderthalb LKW-Züge!

Auch wenn SCHRÖTER (1908), zitiert in ELLING et al. (2007), in den Kammlagen des Erzgebirges eine „beginnende lästige Einwirkung des Rauches aus dem südlich benachbarten Braunkohlengebiet mit seinen zahlreichen Schächten und reger Industrie bei

Teplitz, Dux, Brüx“ und ebenso durch die aus den Kohlengebieten des Egertales (Schlackenwerth-Karlsbad-Falkenauer Becken) ankommenden, schon durch den Geruch bemerkbaren Rauchschwaden, die „böhmischen Nebel“, als Verursacher von Waldschäden sieht, ist die aus deutschen bzw. sächsischen Quellen stammende Belastung nicht vernachlässigbar. Dies belegen auch Schröters Kartierungen zu Rauchschaadensflächen in Sachsen (SCHRÖTER 1907). Nach LIEBOLD & DRECHSLER (1991) bestimmten im Erzgebirgsvorland „bis heute zahlreiche Emittenten die Luftbelastung, die schon im 19. Jahrhundert Schadverursacher waren.“

ELLING et al. (2007) sehen daher besonders im mittleren und östlichen Erzgebirge ein Lehrbeispiel der emissionsbedingten Waldschäden, weil „es wesentlich früher und weit stärker großflächig durch Luftschadstoffe – vor allem Schwefeldioxid – getroffen [wurde] aus irgend ein anderes Gebirge Mitteleuropas“.

2.3 Waldschadensgebiete zwischen 1950 und 1990

1954 wurde die Rauchschaadensforschung durch Prof. Dr. Zieger in Tharandt nach 20 Jahren wieder zum Gegenstand von Lehre und Forschung (LAMPADIUS 1962b). Zieger gelang ein statistischer Nachweis, dass die Schwefeldioxidbelastung der Luft und der

sanitäre Zustand des Waldes miteinander korrelierten und die Schadwirkungen der Abgase wesentlich weiter reichten als bisher vermutet worden war.

Während der Sitzung „Die Landschaft und der Industrierauch“ am 20. September 1955 traf Zieger mit Reinhold Lingner, dem Initiator der „Landschaftsdiagnose der Deutschen Demokratischen Republik“ zusammen. In dem Projekt ging es um die Abgrenzung von Luftverunreinigungsgebieten und -zonen z. B. im Raum Wolfen/Bitterfeld (HUFF 2014). Hieraus entwickelte Zieger das Konzept der forstlichen Großraum-Schaddiagnose. Nach LUX (1962) wurden in dem Kombinationsverfahren Daten zur Höhe der Emissionen (Umfrage), der Immissionen (Luftanalyse) und auf Weiserflächen Daten zum Gesundheitszustand, in diesem Falle der Kiefer (okulare Taxation der Kronenverlichtung, Anzahl Nadeljahrgänge, Nadellänge sowie Nadel- und Stammanalysen), erhoben. Die erste derartige Erhebung erfolgte 1960 in Nordwestsachsen. Seit 1977 erfassten kontinuierliche Befliegungen mit speziellen Infrarotfilmen (Spektrozonalfilm SNG-M) die Entwicklung der Schäden (LIEBOLD & DRECHSLER 1991). In der bestandesweisen Ansprache wurden drei Schadstufen ausgewiesen (Abbildung I-9):

SCHADSTUFE I

- überwiegend starke bis katastrophale Schäden

SCHADSTUFE II

- überwiegend mäßige Schäden

SCHADSTUFE III

- überwiegend leichte Schäden

Insgesamt umfasste die Schadflächenentwicklung zum 01.01.1991 mehr als 280.000 Hektar d .h. knapp zwei Drittel der Waldfläche Sachsens lagen in Immissionschadgebieten. Davon entfielen 38.000 Hektar auf die Schadzone I (siehe Tabelle in Abbildung I-9) und von dieser wiederum zirka 6.000 Hektar auf Standorte mit überwiegend katastrophalen Schäden.

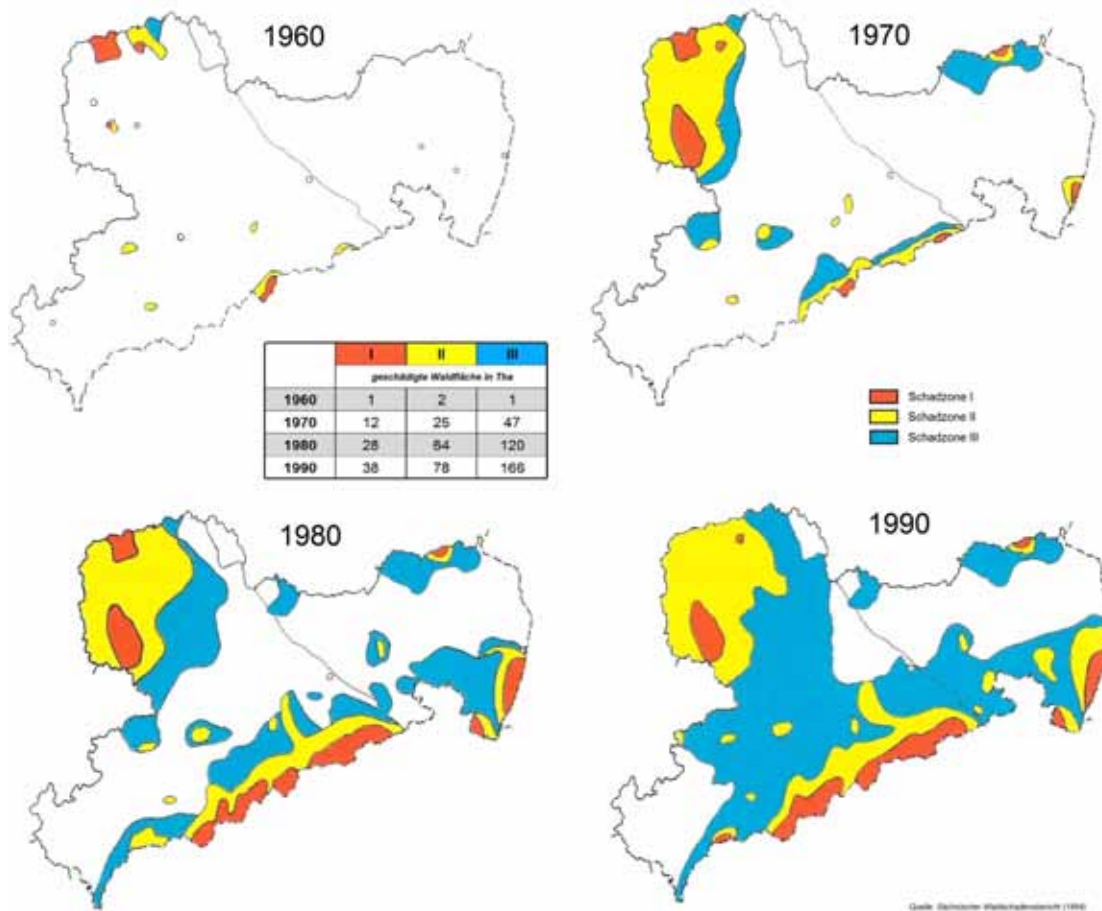


Abbildung I-9: Verteilung der Immissionsschadenzonen im Freistaat Sachsen 1960 bis 1990 (aus: Sächsischer Waldschadensbericht, SMLEF 1994; verändert nach LIEBOLD ET DRECHSLER 1991)

Extrem geschädigte Waldgebiete lagen vor allem in den Hoch- und Kammlagen des Erzgebirges wie dem Kahleberggebiet (Osterzgebirge), Deutscheinsiedel und Seiffen (mittleres Erzgebirge), Abbildung 1-10. Waldgebiete mit starken Schäden zogen sich vom Aschberg im Westerzgebirge fast den gesamten Erz-

gebirgskamm entlang bis in das westelbische Elbsandsteingebiet. In Ostsachsen sind Teile des Zittauer Gebirges und Ostritz an der Grenze zu Polen zu erkennen. Starke Schäden traten auch im Umfeld der Kraftwerke südlich von Leipzig, mäßige Schäden in weiten Teilen des Erzgebirges, des Elbsandsteingebietes und



Abbildung I-10: Blick auf den Kahleberg (Osterzgebirge) in den 1980er- Jahren (Fotos: A. Geschu)

des Lausitzer Berglandes sowie im Lee der Industrie-region Halle-Leipzig auf.

Obwohl die kartierten Schäden mit teils großflächig abgestorbenen Beständen (KLUGE 1993) auf die akute Einwirkung schadstoffbefrachteter Luftmassen auf die Blattorgane zurückzuführen waren (Nadelverluste, Nadelvergilbungen, Frostschäden), ist unleugbar, dass über die Filterleistung der Bestände auch eine immense Belastung der Böden mit schwefelsauren Verbindungen verursacht wurde. LIEBOLD & DRECHSLER (1991) fassten die Situation - stellvertretend für das Osterzgebirge und dessen Vorland - wie folgt zusammen: „Diese seit Jahrzehnten anhaltende Deposition von Säuren führte in den Fichtenökosystemen zur nicht mehr kompensierbaren Freisetzung toxischer Metalle und zu Nährstoffungleichgewichten.“

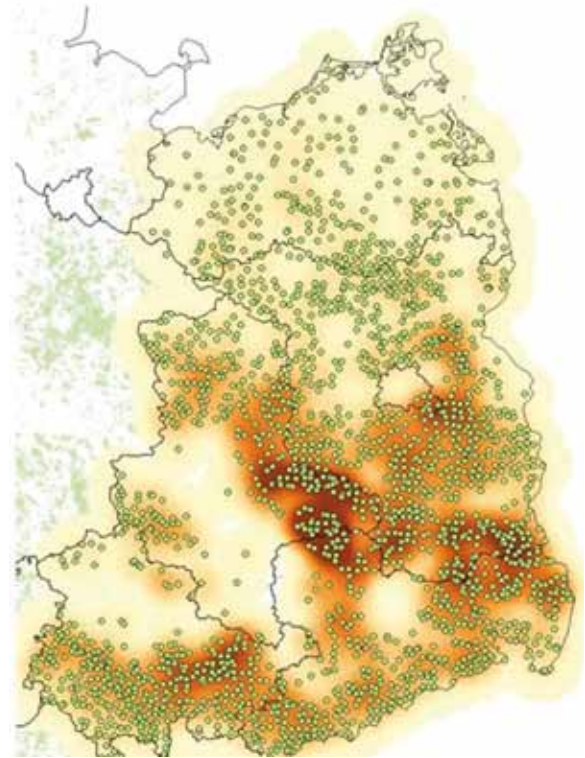
Die Säure- und Schwefelbelastung wirkt je nach Speicherpotenzial der Bodensubstrate bis heute auf die Nährstoffversorgung und destabilisiert die Waldökosysteme dauerhaft.

2.4 Forstliches Umweltmonitoring

Die großflächigen Schadansprachen der forstlichen Großraum-Schadendiagnose wurden 1969 an die AG „Schadenserhebung Immissionsschäden in den Wäldern der DDR“ des VEB Forstprojektierung Potsdam abgegeben (VEB FORSTPROJEKTIERUNG 1989). Anfang der 1980er-Jahre entstand das Bedürfnis der Praxis und der Wirtschaftszweigleitung nach flächendeckenden Informationen zum Gesundheitszustand der Wälder der DDR zu einem einheitlichen Termin. Deshalb entwickelte man beim VEB Forstprojektierung das mehrstufige Inventursystem der ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) mit 2.500 permanenten Probestflächen im Raster 5x5 km. In Abbildung I-11 ist eine regionalisierte Auswertung zur Schwefelbelastung der Wälder in der DDR mittels Borkenanalysen und Kronenzustand dargestellt (aus KALLWEIT 2016). Die extreme Belastungssituation im Süden der DDR und insbesondere im heutigen Sachsen wird deutlich.

Als zweite Säule der Technikfolgenabschätzung wurde Ende 1961 in Tharandt unter Leitung von Prof. Däßler die Arbeitsgruppe "Rauchschadenforschung" gebildet und das Immissionsprüffeld im Tharandter Wald eingerichtet. Die AG untersetzte das in Zusammenarbeit mit den Bezirks-Hygieneinstituten und dem Meteorologischen Dienst eingerichtete Messnetz zur Überwachung der SO_2 -Belastung (LIEBOLD & DRECHSLER 1991).

SO₄- Konzentration in Borke ÖWK-Netz (GUSKE 1988 IFE)



Anteil starker Schäden im Kronenzustand im ÖWK-Netz 1986-1990

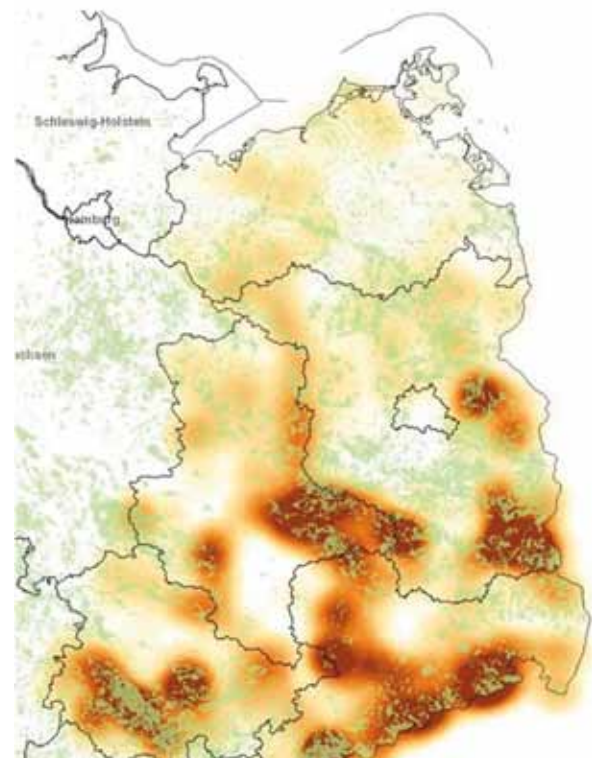


Abbildung I-11: SO₄- Konzentration in wässrigen Borkenextrakten und Anteile starker Schäden im Kronenzustand (aus KALLWEIT 2016)

1983/84 wurde dann die Waldmessstation Oberbärenburg aufgebaut, um in der Nähe des Erzgebirgskamms die Stoffeinträge zu messen (WIENHAUS & DÄSSLER 1991).

Abbildung I-12 zeigt, beispielhaft für die von ZIMMERMANN & ABIY (2005) publizierten Ergebnisse, die Entwicklung der Schwefeleinträge in Tharandt und Oberbärenburg von 1985 bis 2003. Im Mittel der ersten fünf Jahre (1985-1989) wurden über die Kronentraufe unter den Fichten in Tharandt 121 und in Oberbärenburg 104 kg Schwefel eingetragen. Im Freiland, ohne die auskämmende Wirkung der Fichtenkronen, wurden rund 30 kg deponiert. Dies entspricht noch den Angaben von MATERNA (1962a) und belegt die sehr intensiv und lang andauernde Immissionsbelastung der Region.

Nach der politischen Wende wurde in Sachsen die großräumige Schadensermittlung der ÖWK von der rasterbasierten Wald- und Bodenzustandserhebung (WZE/BZE, in Europa Intensitätsstufe I = Level I) und die intensiven Untersuchungen wie in Tharandt und Oberbärenburg durch Flächen der intensiven Forstli-

chen Dauerbeobachtung (europäisch: Level II) abgelöst (Abbildung I-13). Diese Erhebungen werden seit 1991 - in Nachfolge zweier Vorläuferinstitutionen - durch das Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft bei Sachsenforst koordiniert und durchgeführt. Sie sind Teil bundes- und europaweiter Überwachungssysteme im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen (CLRTAP UN-ECE; BOLTE et al. 2008; SMUL 2009).

Insgesamt werden derzeit zur Überwachung des chemisch-ökologischen Umweltzustands 285 Flächen der BZE/WZE und acht Stationen des intensiven forstlichen Umweltmonitorings beobachtet, beprobt und betrieben. Zusätzlich sind in repräsentativen sächsischen Waldgebieten Waldklimastationen im Bestand und auf der Freifläche eingerichtet, auch um über Wasserhaushaltsmodelle eine Berechnung der Bodenwasserflüsse und damit Flussbilanzen zu ermöglichen.

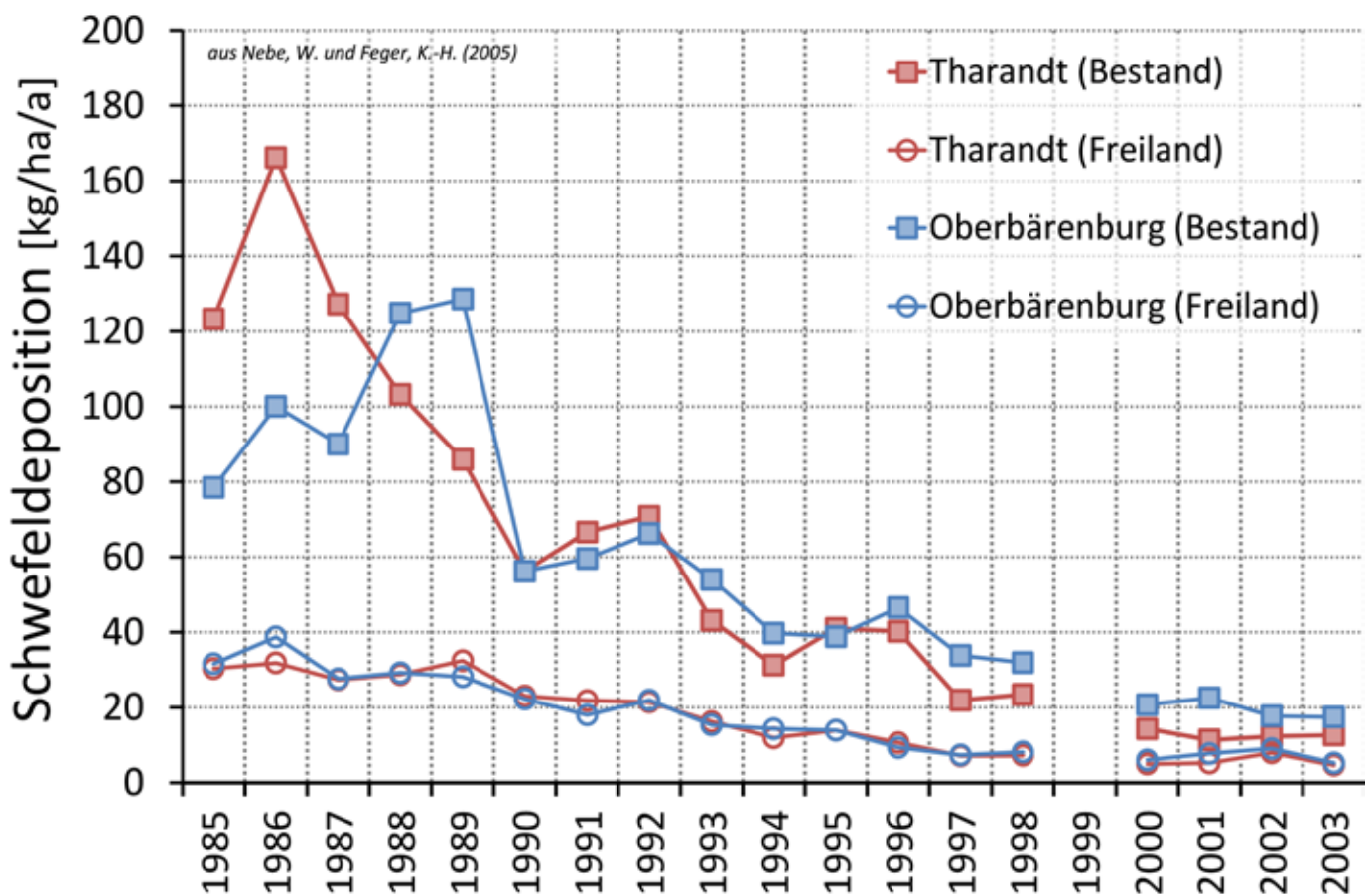


Abbildung I-12: Schwefeleinträge im Osterzgebirge (Oberbärenburg) und Tharandter Wald, Messergebnisse der Technischen Universität Dresden

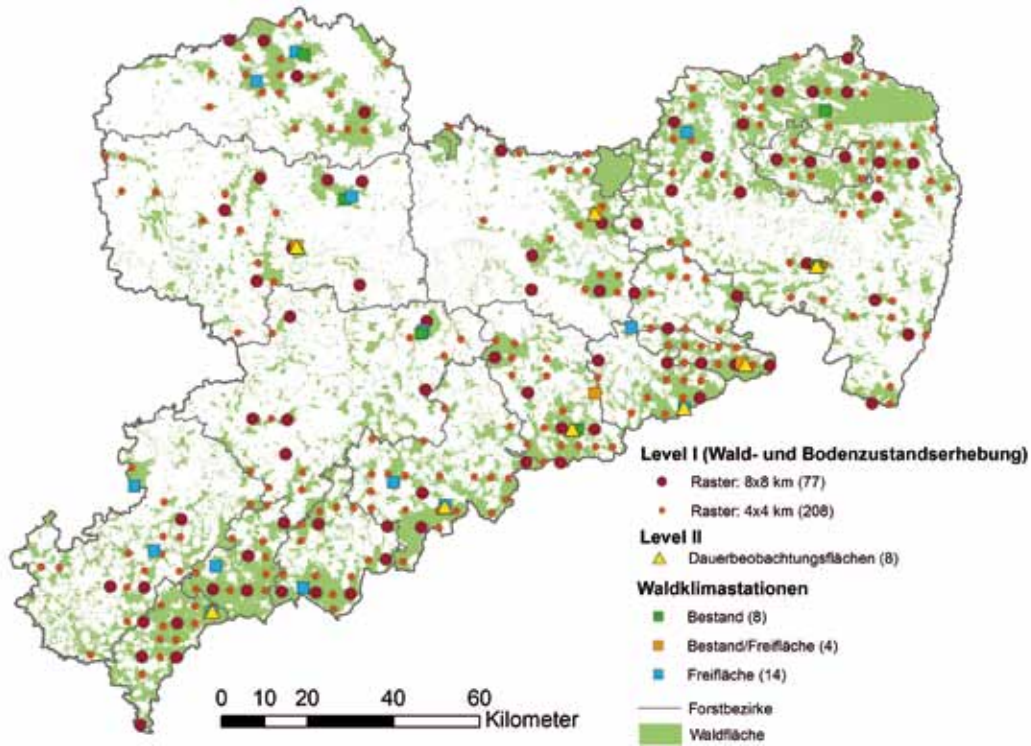


Abbildung I-13: Messnetze zum Forstlichen Umweltmonitoring in Sachsen (Level I, Level II, Waldklimastationen WKS)

2.5 Konsequenzen aus der Umweltüberwachung

Bereits Mitte der 1980er- Jahre wurde neben dem Anbau spezieller rauchharter Gehölze und züchterischer Bemühungen in den Immissionsschadzonen der DDR – vor allem der Mittelgebirge und Gebirgsvorländer – mit dem Schutz des Waldbodens und einer Verbesserung der

in der Nadelvergilbung sichtbaren, schlechten Magnesiumversorgung der Nadelwaldbestände begonnen. Über die vorhandenen Agrarflieger und zum Teil mit sowjetischer Unterstützung wurden in den betroffenen Bezirken kohlen-saure Magnesiumkalke („Kamsdorfer Mergel“) und Magnesiumchelate als Blattdünger über den Wäldern ausgebracht. Die Dosierung betrug pro Hektar 2,5 bis 3 Tonnen Kalk und etwa 300 kg Chelat (Abbildung I-14).

Forschungs- und Überleitungs-zentrum
"Thüringer Wald" des IFE, Sitz Suhl

Suhl, den 08.05.1989

Übersicht über die 1986, 1987 und 1988 in den Bezirken gedüngten Waldflächen gegliedert nach Düngerart, Düngermasse und Ausbringungstechnologie

Sollaufwandmasse je ha 1986: Mg-Kalkdünger 3000 kg; Mg-Flüssigblattdünger 318 kg
Istaufwandmasse je ha 1986: Mg-Kalkdünger 2500 kg; Mg-Flüssigblattdünger 299 kg

Sollaufwandmasse je ha 1987: Mg-Kalkdünger 2500 kg; Mg-Flüssigblattdünger 333 kg
Istaufwandmasse je ha 1987: Mg-Kalkdünger 2500 kg; Mg-Flüssigblattdünger 299 kg

Sollaufwandmasse je ha 1988: Mg-Kalkdünger 2500 kg; Mg-Flüssigblattdünger 254 kg
Istaufwandmasse je ha 1988: Mg-Kalkdünger 2500 kg; Mg-Flüssigblattdünger 232 kg

Bezirk	Mg-Kalkdünger		Bod. /ha	Summe /ha	Mg-Flüssigblattdüng. /ha	Masse Mg-Kalkdünger t/ha	Mg-Flüssigblattdüng. t/ha
	M 0 /ha	M 18 /ha					
009 Erfurt	506	61	628	1195	735	3584	233
010 Gera	-	209	-	209	202	627	64
011 Suhl	999	-	-	999	1380	2997	413
DDR 1986	1505	270	628	2423	2317	7208	710
	1775						
007 Magdeburg	1639	-	-	1639	206	4098	69
009 Erfurt	2214	2589	5457	10260	1587	25681	501
010 Gera	-	601	-	601	201	1503	67
011 Suhl	3574	-	-	3574	2047	8935	685
	8410	3687	5467	17534	3961	43917	1323
	12097						

Abbildung I-14: Übersicht über die in den Bezirken der DDR gedüngten Waldflächen 1986-1988; gegliedert nach Düngerart, Düngermasse und Ausbringungstechnologie (Auszug)

Nach einem Aussetzen zwischen 1989 und 1990 wurde in Sachsen im Jahre 1991 die Kalkung in Regie der Forstdirektionen wieder aufgenommen. Die Bodenschutzkalkung mit kohlensauren Magnesiumkalen hatte bis Ende der 1990er-Jahre vorrangig das Ziel, die Böden vor weiterer Versauerung durch die aktuell eingetragenen Säurebildner zu schützen und die Kronenraumpufferung zu verbessern. Großräumige Bodenanalysen lagen anfangs nicht vor, weil das ÖWK-Basisnetz mit 98 Standorten auf sächsischem Territorium zwar ab 1986 eingerichtet, aber nicht mehr ausgewertet wurde. Einen ersten Eindruck über die gravierende Versauerungssituation in Sachsen gewann man mit Durchführung der bundesweiten Bodenzustandserhebung 1992 (N = 77) und vor allem mit deren regionaler Verdichtung 1996/97 auf rund 280 Standorte des Waldzustandserhebungnetzes (4x4 km Netz) (RABEN et al. 2000a; RABEN et al. 2004). Nachfolgende Karte (Abbildung I-15) zu den Ergebnissen der BZE 1 in 10 bis 30 Zentimeter Bodentiefe belegt den besorgniserregenden Zustand der Basenversorgung.

Unterstützt wurden die Messergebnisse durch Untersuchungen zur natürlichen Pufferfähigkeit sächsischer

Waldböden aus der Mineralverwitterung, die zur Ermittlung der standortspezifischen Kritischen Belastungsraten (engl. Critical Load) für versauernde Stoffeinträge genutzt wurde (BECKER 2000; BMELF 2000). Nach THALHEIM & FIEDLER (1990) kann in kalkfreien Böden die Silikatverwitterung langfristig etwa 0,1 bis 1,1 kmol H⁺ ha⁻¹ a⁻¹ puffern. In Sachsen ergaben sich anhand von über 256 Standorten Verwitterungsraten (oder Pufferraten) von 0,2 bis 2,6 kmol ha⁻¹ a⁻¹ (Mittelwert: 0,5) (BECKER 2004).

Mit der Digitalisierung der forstlichen Standortkarte Sachsens 2006, in Kombination mit digitalen Geländemodellen (Geländeausprägung, Höhenlage - z. B. Kammlagen - und Exposition) sowie geologischen Informationen, eröffneten sich neue Möglichkeiten zur geostatistischen Auswertung und vor allem Regionalisierung der vorhandenen Waldzustandsdaten. Aufbauend auf Arbeiten für die Forstliche Versuchsanstalt in Freiburg konnte eine neuartige Zonierung des Waldzustands abgeleitet werden (Abbildung I-17). Diese bestätigte auf standörtlicher Grundlage und für die Jahre 1991 bis 2003 die in der DDR ausgewiesene Immissionsschadzone im Erzgebirge (SMUL 2006; ZIRLEWAGEN et al. 2007).

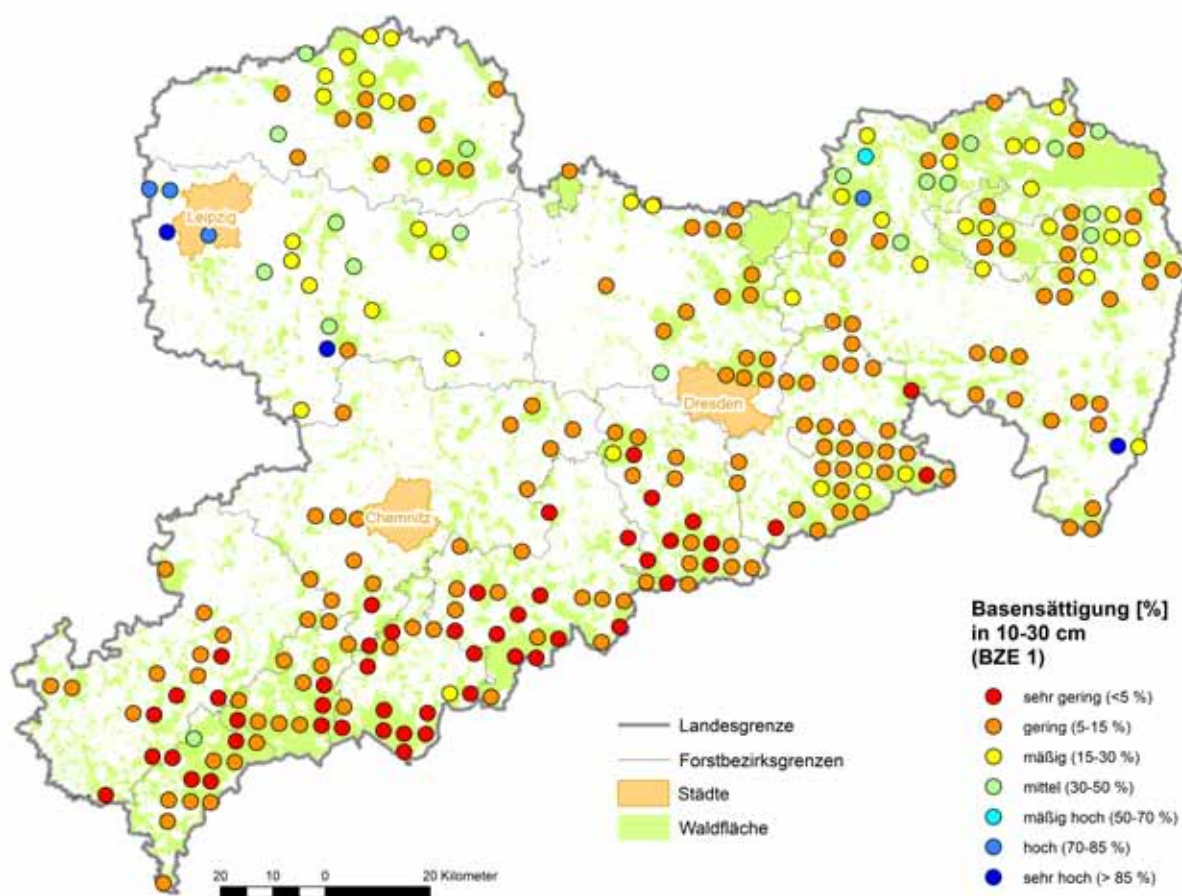


Abbildung I-15: Basensättigung sächsischer Waldböden, Tiefenstufe 10 – 30 Zentimeter; 1. Bodenzustandserhebung in Sachsen 1992-1997

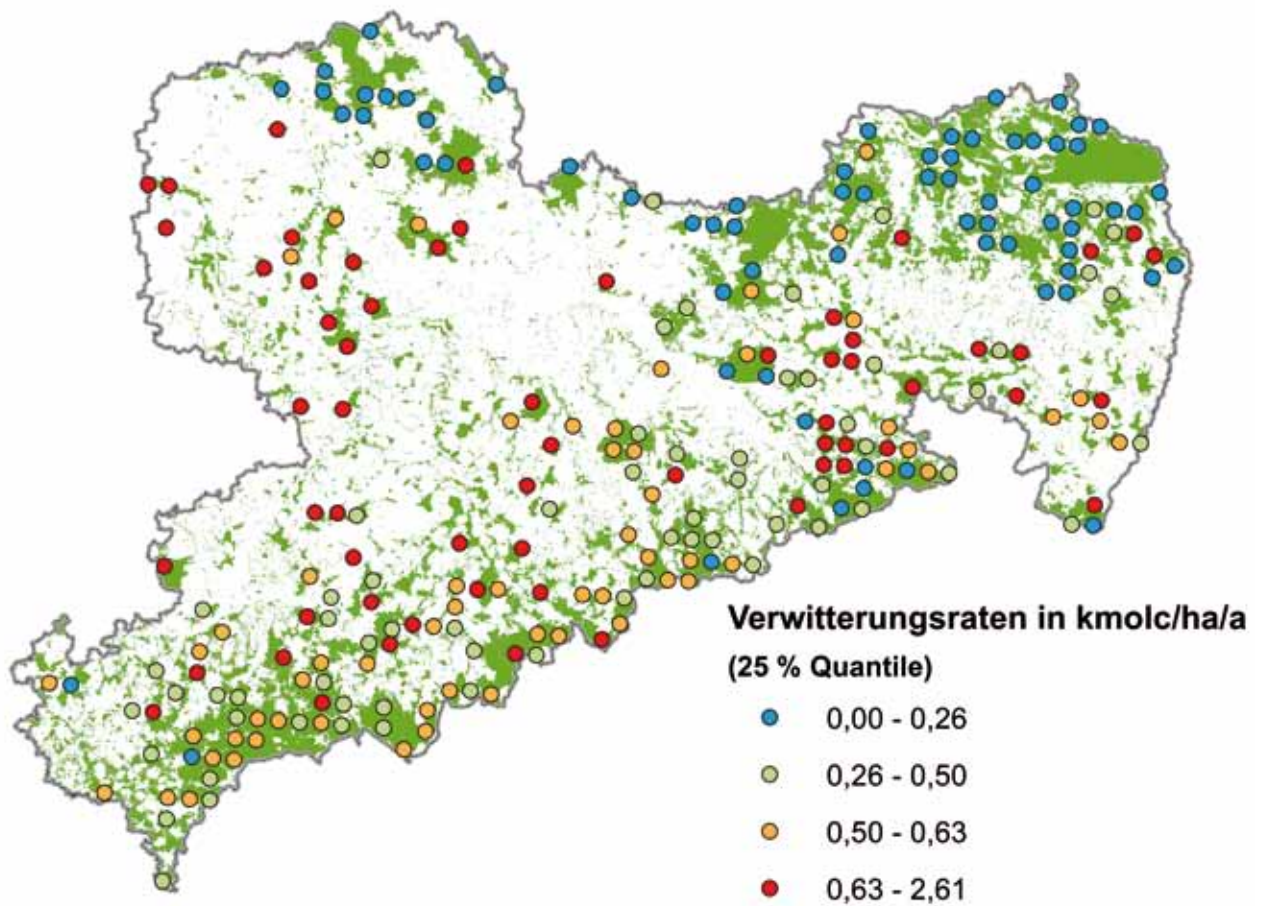


Abbildung I-16: Standorte der Bodenzustandsüberwachung in Sachsen (BZE, Level II) mit vorliegenden quantitativen Mineralanalysen zur Abschätzung der Basenverwitterung (= sog. nachschaffende Kraft), BECKER 2004

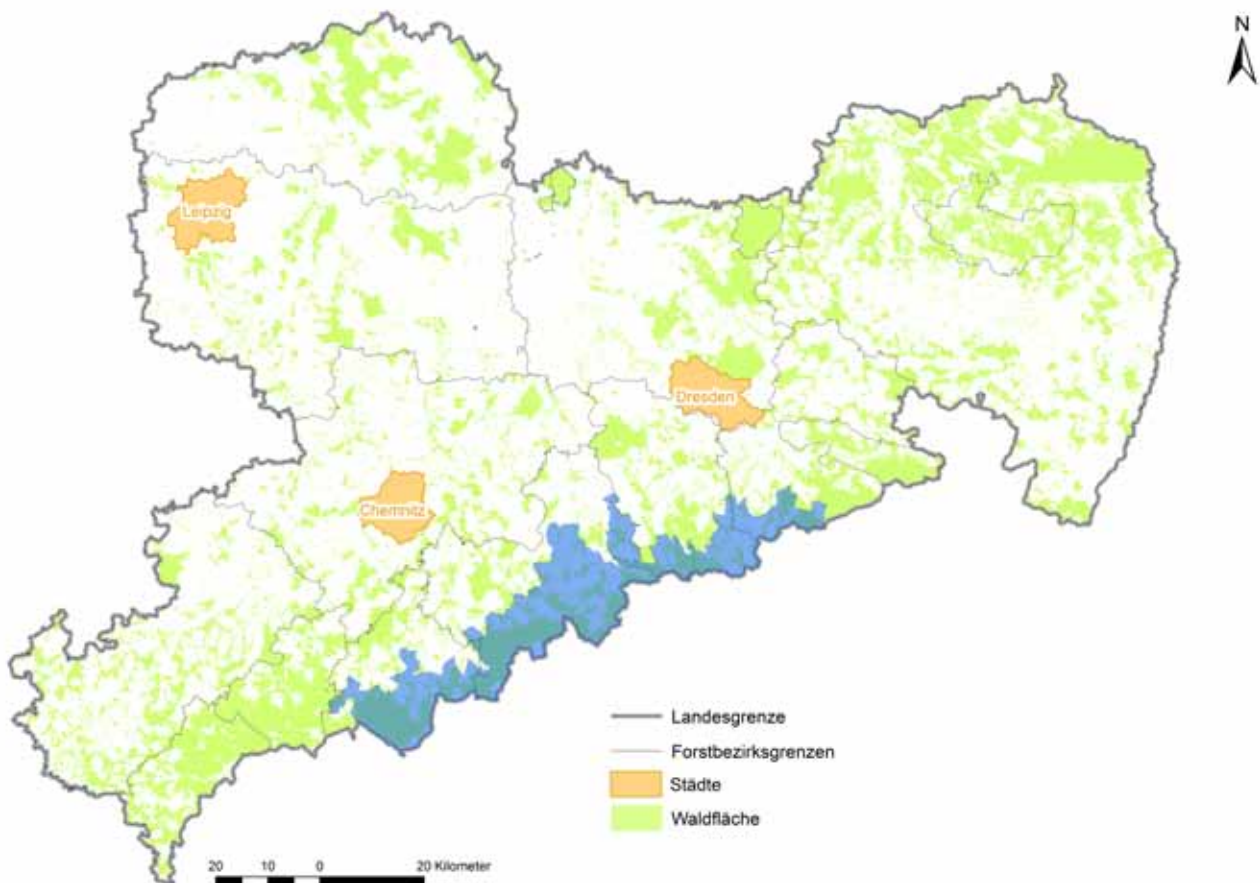


Abbildung I-17: Neuabgrenzung der Immissionsschadzone aus Ergebnissen der Wald- und Bodenzustandserhebungen 1991-2003 (aus: SMUL 2006)

Ziel der seit den 2000er-Jahren vermehrt auf die Regeneration der versauerten Böden setzenden Kalkung in Sachsen ist es, auf mittleren Standorten in einer Bodentiefe bis 30 cm eine Basensättigung von mindestens 15 % und hilfsweise einen pH-Wert gemessen in Wasser von 4,2 bzw. 3,8 gemessen in Kaliumchlorid zu erreichen. Dies entspricht – wie oben beschrieben – dem „potenziellen natürlichen Bodenzustand“ vor den Immissionen und rechnet nicht mit dem von ULRICH (1995) postulierten Bedarf der Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Tanne, Douglasie und Kiefer von 30 % Basensättigung.

Dieses Vorgehen folgt neben den waldökologischen Erfordernissen auch der Verpflichtung nach § 16 des Sächsischen Waldgesetzes (SächsWaldG), den Wald gesund, leistungsfähig und stabil zu erhalten, zu sanieren und vor Schäden zu bewahren. Außerdem dient es der Umsetzung der Forderungen von § 4 Abs. 3 Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG), schädliche Bodenveränderungen zu sanieren oder entsprechende Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen durchzuführen. Die Bodenschutzkalkung im Wald ist auch der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundlandt-Bericht, HAUFF 1987) in ihrer Definition der dauerhaften (nachhaltigen) Entwicklung verpflichtet, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.

Die Aufbringung natürlichen Kalk-/Gesteinsmehls zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist zudem eine auch im ökologischen Landbau gängige und akzeptierte Praxis.⁵ Dieser versucht ebenso wie nachhaltige Forstwirtschaft, weitgehend angenähert an natürliche Ökosysteme, mit langfristig geschlossenen Nährstoffkreisläufen zu arbeiten.

Die potenzielle Kalkungskulisse umfasst die Gebiete, in denen in der Vergangenheit die größten Säurefrachten zur Deposition kamen und die bereits von ihrer Geologie relativ basenarm sind – die Standortregion Bergland, Teile des Erzgebirgsvorlandes und der Ostlausitzer Vorberge. Diese Kulisse reicht von den Kammlagen bis zum Unteren Bergland bzw. dem Gebirgsvorland im Hügelland (Abbildung II-1). Die unteren Lagen und das Tiefland wurden bisher in die Kalkung nicht einbezogen. Grund hierfür ist ein teilweise vorangegangener Eintrag von Flugasche, die damit geringere atmosphärische Säurebelastung und das tonmineralarme Bodenausgangsmaterial, insbesondere pleistozäne Sande.

3 Bemessung, Kontrolle und Bewertung der Kalkung

Das Hauptaugenmerk bei der Erfolgskontrolle der Kalkung liegt auf den Wirkungen im Boden (Humus und Mineralboden). Hierbei spielen die Anhebung der Basensättigung und des pH-Werts die entscheidende Rolle. Aus dem Vergleich des Ist-Zustands mit den oben definierten bodenökologischen Zielgrößen, wird bei Zielerreichung mindestens ein zeitweises Aussetzen der Kalkung ableitbar.

Grundlegende Voraussetzung für die umfassende Bewertung und weitere Steuerung von Kalkungsmaßnahmen ist die eigentumsunabhängige Kenntnis darüber, auf welchen Waldflächen bereits gekalkt worden ist. Zusätzliche Angaben über die ausgebrachte Tonnage, die Qualität der ausgebrachten Kalke (Nähr- und Schadstoffgehalte) und die eingesetzte Ausbringtechnik sind für eine Bewertung ebenfalls unerlässlich (Kapitel 3.1). Gleichzeitig werden regelmäßige, flächenrepräsentative Erhebungen zum Boden- und Vegetationszustand (siehe BAUMANN et al. 2002; CONRAD et al. 2002) benötigt (Kapitel 3.3), die mit Ergebnissen aus Stoffbilanzstationen (Level II-Programm) zur Überwachung der Belastungssituation (RABEN et al. 1998; RABEN et al. 2000b) ergänzt werden (Kapitel 3.2). In Spezialstudien wurde zudem die Wirkung der Kalkung auf die Struktur und Stabilität von Tonmineralen bearbeitet.

Als biotische Indikatoren der Wirkungen wurden die Ernährungssituation der Waldbäume, die Reaktion der Bodenvegetation (Kraut- und Moossschicht) und die Wiederansiedlung größerer Bodenorganismen (Rundwürmer) zur Humuseinbearbeitung betrachtet.

Der Einfluss der Kalkung auf die Chemie des Bodensickerwassers ist zentrales Thema der Dauerbeobachtungsflächen (Stichwort Stoffbilanzen). In deren Umfeld wird auch die Zusammensetzung von Quellwässern und Oberflächengewässern untersucht. Auf Landschaftsebene werden dann die integrierenden Oberflächenwasser-Messnetze der Landestalsperrenverwaltung bzw. des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie mit einbezogen.

Die Zusammenführung der Ergebnisse aus allen Monitoringnetzen erlaubt eine gesamtökosystemare Betrachtung der Versauerungssituation (Abbildung I-18).

⁵<https://www.oekolandbau.de/bio-im-alltag/bio-fuer-die-umwelt/pflanzenbau/duengung-im-oekologischen-landbau/>



Abbildung I-18: Untersuchungspuzzle für die ökosystemare Gesamtbewertung der Bodenschutzkalkung in Sachsen

3.1 Dokumentation des Kalkungsvollzugs seit 1986

Der Kalkungsvollzug wurde seit 1986 von den zuständigen Stellen der Forstbehörden in analoger Form archiviert. Zum Archivmaterial gehören neben überregionalen Statistiken (Abbildung I-14), Vertragsunterlagen, kolorierte Karten, Durchführungsnachweise, Kalk-Lieferscheine und Labor-Prüfberichte zu Kalkproben.

Aufbauend auf einer Arbeit zu den Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf Humus und Mineralboden, Fichtenbestockung sowie Bodenvegetation wurde von FRANZ (2004) eine digitale Dokumentation der bisherigen Kalkungskampagnen im damaligen Forstamt Klingenthal erarbeitet. Dazu wurde in Kooperation mit den Fachbereichen IT und Kartografie eine zentrale relationale Datenbank für die Sachinformationen und eine Geodatenverwaltung in ArcGIS® entwickelt. Zu den jahresweise abgelegten Kalkungsflächen-Polygonen wurden die Waldeigentumsarten, die Kalksorte und Dosis, die Applikationstechnologie und der Zeitraum der Kalkung im Jahr erfasst (Abbildung I-19). Über den Polygon-Identifikator (KVZ_ADR) werden GIS und Datenbank miteinander verknüpft.

Zum 1. Januar 2003 verschmolzen die Forstdirektionen Bautzen und Chemnitz mit der Landesanstalt für Forsten zum Landesforstpräsidium (LFP). Damit wurde die landesweite Planung und Kontrolle der Bo-

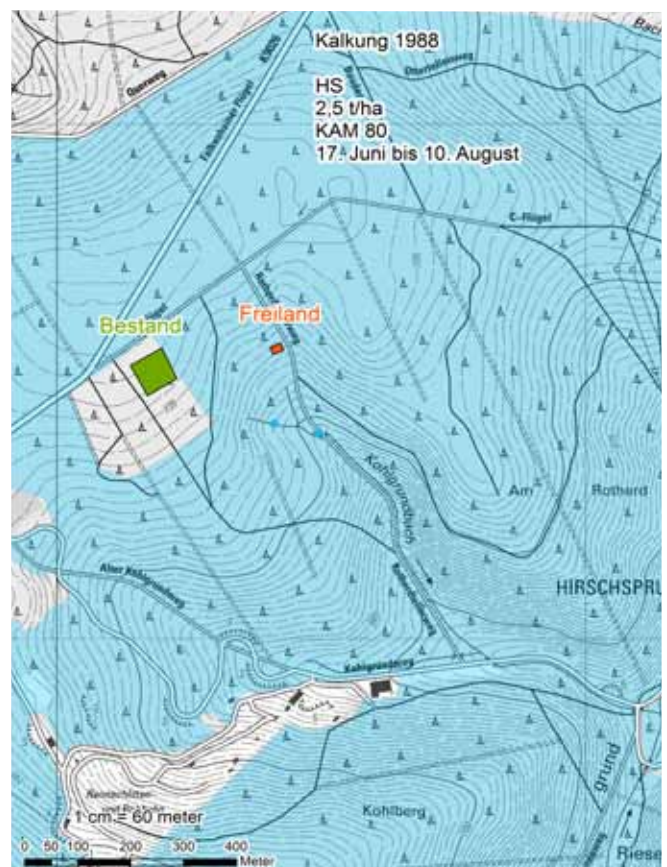


Abbildung I-19: Dokumentation des Kalkungsvollzugs an der Dauerbeobachtungsfläche Altenberg 1988 - Kalkungspolygon 19881500 mit Auszug aus der Attributtabelle zu: Ausbringtechnik (HS = Hubschrauber), Dosis, Kurzbezeichnung des Kalks (KAM 80 = Kamsdorfer 80 % Karbonat) und Ausbringungszeitraum

denschutzkalkung im Referat Standortserkundung/ Bodenmonitoring des LFP gebündelt.

Ab dem Jahr 2004 erfolgte die digitale Dokumenta-

tion der laufenden Kalkungskampagnen. Seit 2005 sind die ausführenden Firmen zudem verpflichtet, in ihren Luftfahrzeugen Navigationssysteme zur Aufzeichnung der Streuvorgänge einzusetzen (vgl. Kapitel 6.2.5). Dazu werden für die Kalkungsflächen die relevanten digitalen topografischen Informationen zum Einladen in das Navigationssystem zur Verfügung gestellt.

Im Zeitraum von 2004 bis 2009 wurde die digitale Kalkungserfassung und -dokumentation für die Gesamtheit der Forstämter in der Kalkungskulisse vorangetrieben. Hierzu wurden die Kalkungsvollzugsdaten in den Archiven der damaligen Forstämter, der Forstdirektionen und des Sächsischen Staatsarchivs recherchiert. Seit 2010 ist eine lückenlose digitale Dokumentation aller flächenmäßig bedeutsamen Kalkungen verfügbar, die jedes Jahr fortgeschrieben wird. Abbildung I-20 stellt die Ergebnisse des dokumentierten Kalkungsvollzugs in einer Karte zur regionalen Intensität der Kalkung dar. Demnach wurden innerhalb der Kalkungskulisse (Definition s. Kapitel 5.2.1) zwischen 1986 und 2018 etwa 392.000 ha Waldfläche gekalkt. Davon sind mehr als 50.000 ha einfach, 60.000 ha zweifach, 40.000 ha dreifach und knapp 20.000 ha

vierfach behandelt worden. Im Durchschnitt kann in der Kalkungskulisse von einer zweimaligen Befliegung mit zirka sieben Tonnen Kalk pro Hektar ausgegangen werden. Im Bereich des Kahleberges (Osterzgebirge, Forstbezirk Bärenfels) existieren kleinere Flächen, die auf Grund versehentlicher Überschneidungen auf den handgezeichneten Planungskarten zwischen 1990 und 2000 sogar sechs- bis neunmal gekalkt wurden.

Zusätzlich zu den derzeit etwa 7.700 Kalkungspolygonen werden in der Datenbank die Ergebnisse von mehr als 1.300 Kalkkontrollanalysen verwaltet. Diese werden zum Beleg der einzuhaltenden und von den Unternehmen deklarierten chemisch-physikalischen Eigenschaften während der Kampagne von den Kalkungsverantwortlichen gezogen (Kapitel 8.1.2). Die Analysen werden aktuell in Amtshilfe durch die Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) in Nossen durchgeführt. Bis zu deren Gründung war die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Leipzig-Möckern zuständig.

Im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft „Operative Bodenschutzkalkung“ der Bundesländer wurde durch

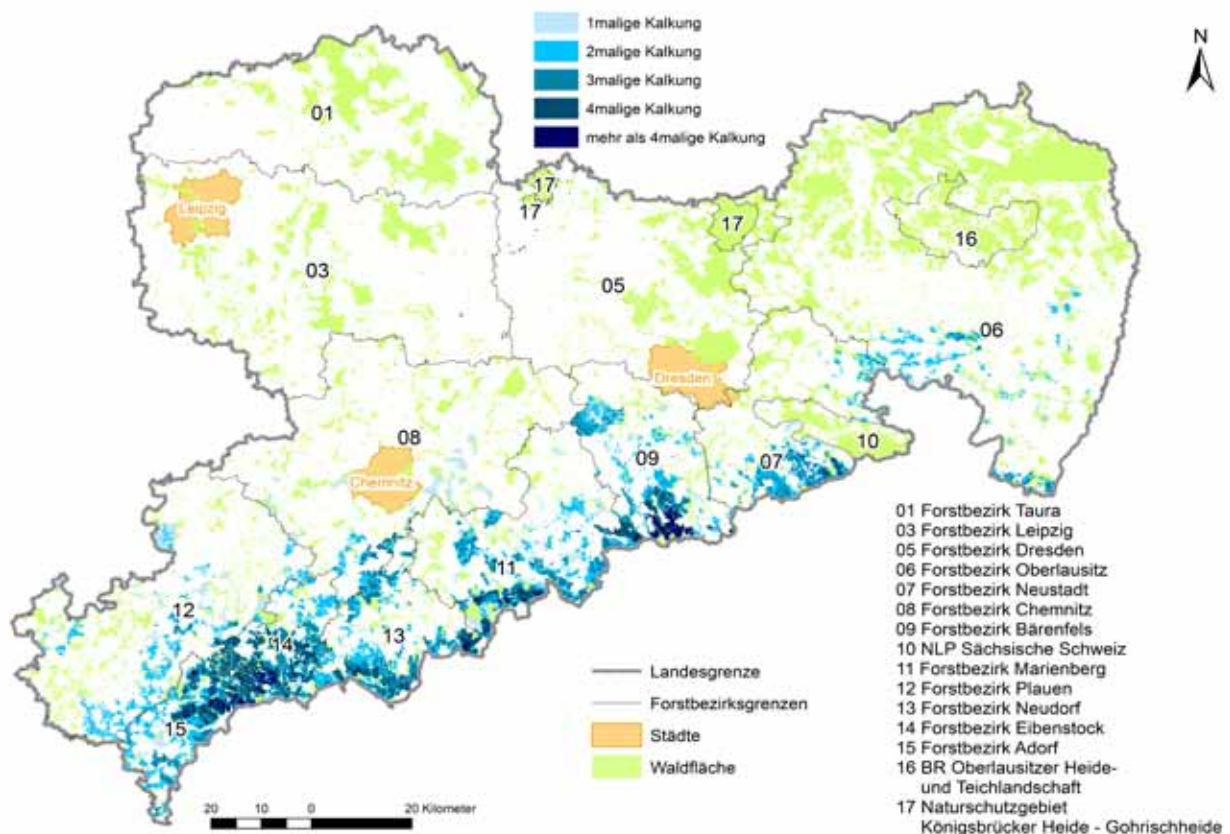


Abbildung I-20: Anzahl der Kalkungen zwischen 1986 und 2018 innerhalb der Kalkungskulisse (JACOB & ANDREAE 2018)

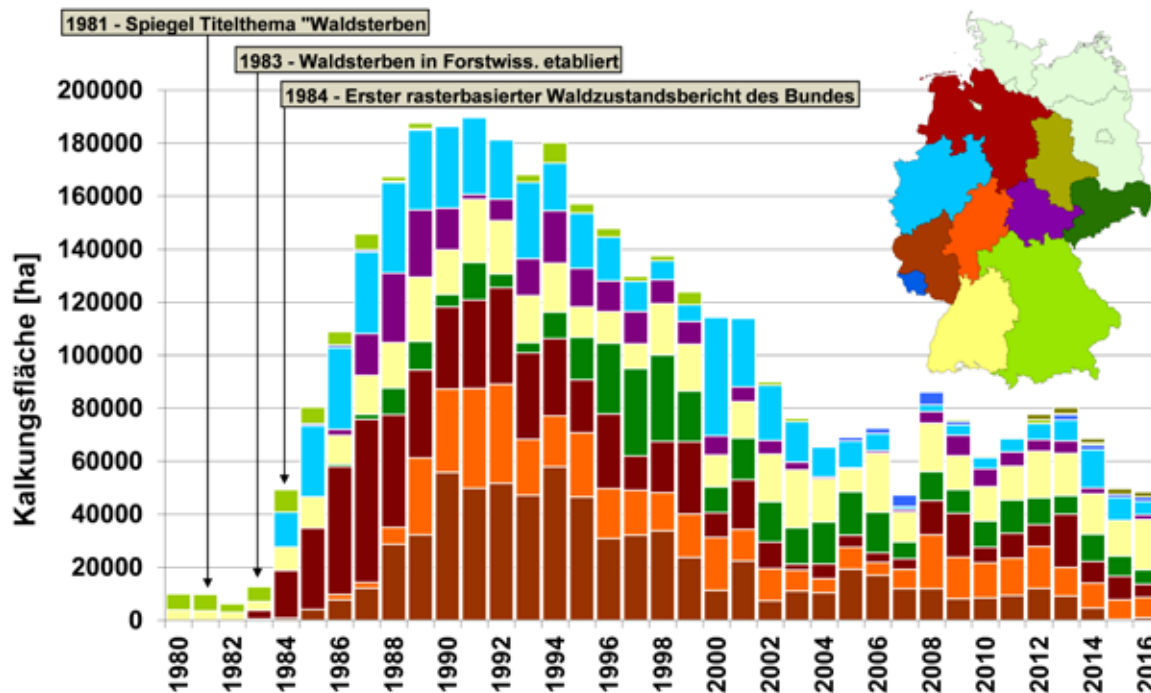


Abbildung I-21: Kalkungsfläche der Bundesländer zwischen 1980 und 2016 (ANDREAE, H.; JACOB, F. (2018): Die Bundesländer Brandenburg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, Hamburg, Bremen und Schleswig-Holstein kalken nicht. Die Farben im Diagramm entsprechen den Farben in der Deutschlandkarte rechts oben.

Sachsenforst die bundesweite Entwicklung der Kalkungsflächen von 1980 bis 2016 zusammengestellt (Abbildung I-21). Insgesamt wurden in der Zeitspanne 3,6 Millionen Hektar Wald gekalkt. Dabei sind Wiederholungskalkungen eingeschlossen. Das Maximum der Flächenleistung wurde 1991 mit rund 190.000 Hektar bundesweit erreicht.

3.2 Flussbilanzen als Werkzeug der Kalkungsbewertung (Level II)

Jede Tonne des aus der Verbrennung freigesetzten oxidierten Schwefels (SO_2) erzeugt nach Reaktion mit Wasserdampf in der Atmosphäre ein Äquivalent Schwefelsäure (H_2SO_4) oder zwei Äquivalente säurewirksame Protonen (H^+). Diese wurden entweder durch emittierte basische Ascheanteile (Flugasche) oder erst im Ökosystem neutralisiert und gepuffert (Kapitel 1.2). LEUBE (2000) schätzte dazu den Kalkbedarf in Beispielrechnungen mit kohlen-saurem Dolomitskalk als Puffersubstanz. Zur Neutralisation von 1 kg (oder chemisch exakter kmol) Protonen sind je nach Zusammensetzung etwa 50 kg (46–55 kg) Dolomit nötig. Für die Ermittlung des Neutralisationsbedarfs im Ökosystem muss der externe, atmosphärische Gesamteintrag von den internen Nährstoffkreisläufen über eine Kronenraumbilanz unterschieden werden (ULRICH 1991,1994; SMUL 2006; s. Kap. 1.2.2). Durch eine Bund-

Länder-Arbeitsgruppe wurde die Vorgehensweise geprüft, harmonisiert und als Auswertungsstandard festgelegt (GEHRMANN 2000; BMVEL 2001).

In einem zweiten Schritt sind die Stoffumsätze im und Elementausträge aus dem Boden unterhalb des Hauptwurzelraumes (Grenze des terrestrischen Ökosystems zur Hydrosphäre, konventionell bei 1 m Tiefe verortet) in eine Boden- und Ökosystembilanz von Säuren und Basen zu überführen (BREDEMEIER 1987). Die effektive Gesamtsäurebelastung setzt sich demnach aus folgenden Teilprozessen zusammen:

- Akkumulation eingetragener Säure im Ökosystem = Summe der positiven Ökosystembilanzen (Gesamtdeposition minus Sickerwasseraustrag an der Ökosystembasis in 1 m Tiefe) von H^+ , NH_4^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} und Al^{3+}
- Akkumulation von eingetragenen basischen (Mb) Kationen im Ökosystem. Das entspricht der Summe der positiven Ökosystembilanzen von Na^+ , K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} , abzüglich der Mb-Mengen, die auf Neutralsalzzakkumulationen (MbCl) zurückzuführen sind (positive Chlorid-Ökobilanz). Die Gleichsetzung der akkumulierten Mb-Kationen mit äquivalenten Säureinträgen beruht auf dem Postulat, dass die eingetragenen Mb-Kationen an saure Gruppen unter Verdrängung und damit Freisetzung von Protonen und Kationsäuren gebunden werden.

- Ökosysteminterne Freisetzung von Protonsäuren (Ma). Sie kann aus der Summe der negativen Ökosystembilanzen der Anionen SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- und R- COO- (organische Anionen) geschätzt werden.

In Sachsen wurden derartige Bilanzen erstmals durch LANGUSCH (1995) und LAUTERBACH (2000) für Waldökosysteme im Osterzgebirge (Rotherdbach, Wernersbach, Pöbelbach) durchgeführt.

Im Folgenden soll anhand der ehemals am höchsten säurebelasteten Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau gezeigt werden, welche Rückschlüsse sich aus Stoffbilanzen und -austrägen auf die Kalkung ziehen lassen (vgl. MENZER & ANDREAE 2013). Abbildung I-22 zeigt eingangs die Schwefelein- und -austräge in Kilogramm pro Hektar und Jahr ($\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$) beginnend 1995 bis zum Jahr 2017. Die Jahre, in denen eine Kalkung der Fläche erfolgte (1996, 2001, 2011), sind in den Grafiken markiert.

Es ist ein deutlicher Rückgang der Einträge seit Beginn der Messungen von 76 auf aktuell 10 $\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ festzustellen. Ursache für den Rückgang der Einträge ist die Stilllegung zahlreicher Industriebetriebe in Sachsen nach 1990 und bilaterale umweltpolitische Verhandlungen mit der Tschechischen Republik zur Minderung der Schwefeldioxidemissionen nach der letzten Extrembelastung im mittleren Erzgebirge im Winter 1995/96 (SMLEF 1996; DER SPIEGEL 1997; ŠRÁMEK 2014).

Bezüglich des Schwefelaustrages ist in Olbernhau seit Beginn der Bilanzierung 1997, wie auch auf den anderen Flächen, ein leichter Rückgang festzustellen. In der ersten Dekade wurden 48, in der zweiten bis 2016 im Mittel etwa 32 $\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ ausgetragen. Die Schwefelbilanz ist aber mit 25 bzw. 17 kg weiter negativ. Dies weist auf einen noch immer großen gespeicherten Sulfatvorrat im Boden hin (WUNDERLICH & RABEN 2006). Eine enge statistische Beziehung des Austrags besteht zur Sickerwassermenge, während sich ein Effekt der Kalkung auf die Sulfatmobilisierung nicht nachweisen lässt.

Es wird bei der Kalkung diskutiert, dass es durch die Anregung der Stoffumsätze im Humus und oberen Mineralboden zu einem Anstieg der Nitratfreisetzung kommen könne, was gleichbedeutend wäre mit einer weiteren Versauerung des Bodens durch Überschussnitrifikation und damit einhergehenden Gewässerbelastung. Abbildung I-23 zeigt die Stickstoffbilanzen der Fläche Olbernhau. Dies ist im betrachteten Zeitraum nicht der Fall und zeigt sich auch nicht in den Nitratgehalten der Oberflächengewässer in der Kalkungskulisse (s. Kap. 3.7; FRANZ 2004; KEITEL 2014). Vielmehr wird der deponierte Stickstoff (641 kg insgesamt oder 32 kg pro Jahr) zu fast 90 % im Ökosystem gehalten. Dies ist an allen Level II-Stationen bisher der Fall. Eine Gesamtanalyse des Stickstoffstatus sächsischer Wälder ist ANDREAE & JACOB (2017) zu entnehmen.

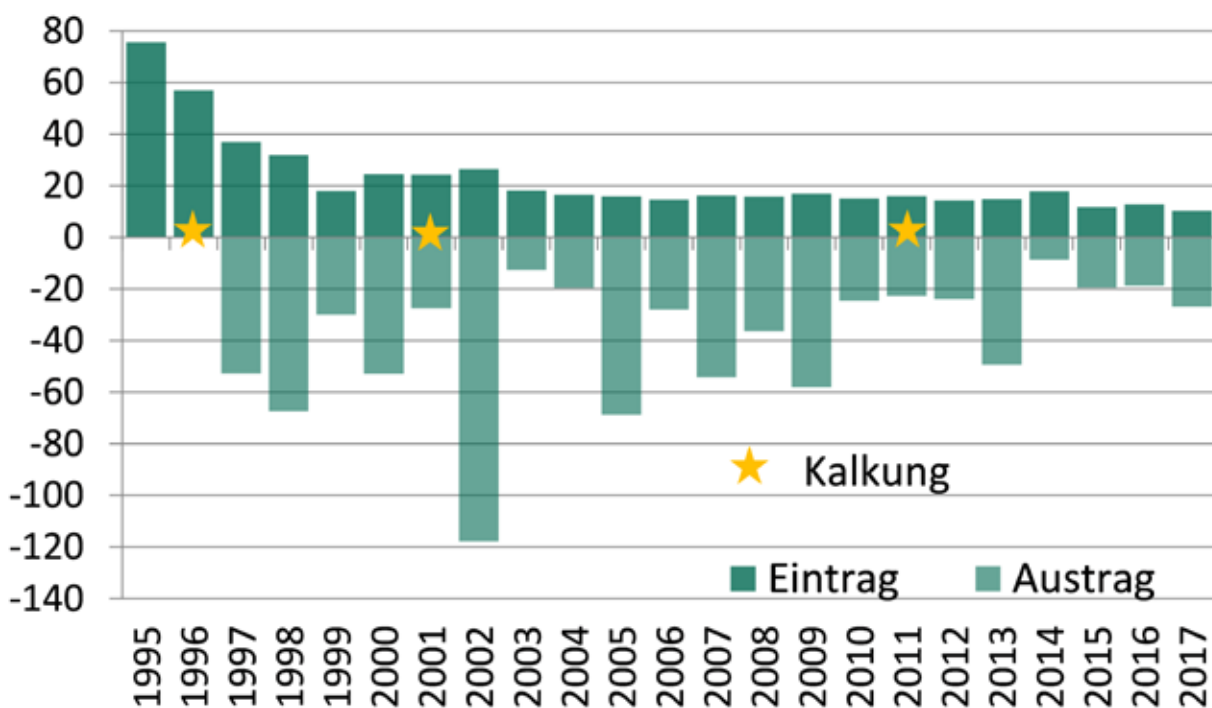


Abbildung I-22: Entwicklung der jährlichen Schwefelbilanzen auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau 1995-2017 in kg/ha

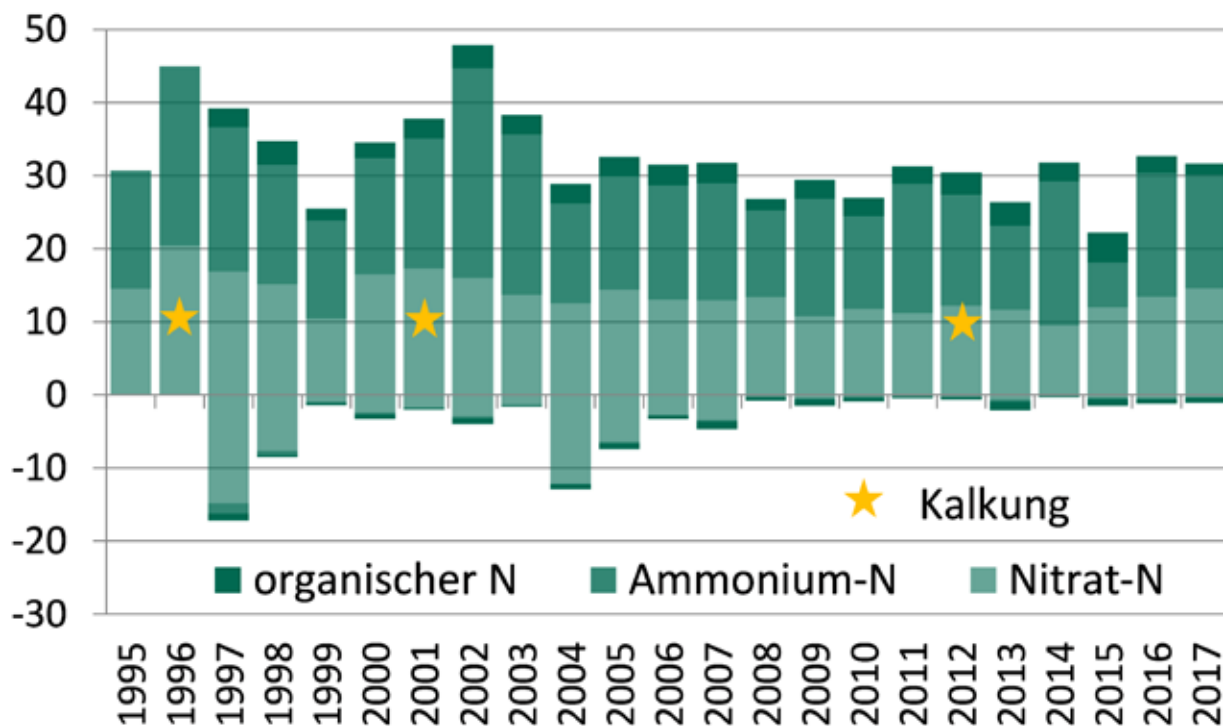


Abbildung I-23: Entwicklung der jährlichen Stickstoffbilanzen auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau 1995-2017 in kg/ha

Die Abschätzung der tatsächlich über die Filterwirkung der Baumkronen eingetragenen Säuremenge ist ein zentrales Anliegen der Kronenraumbilanz. Misst man den pH-Wert in dem Wasser, das das Kronendach verlässt (Bestandsniederschlag oder Kronentraufe) oder am Stamm abläuft (wichtig nur bei Buchen), so bestimmt man die aktuelle Säurestärke, die sich nach den Austauschprozessen mit den Vegetationsoberflä-

chen eingestellt hat. Sie wird als sog. „freie Säure“ bezeichnet. Ist man aber an der Menge der insgesamt im Kronenraum wirkenden Säure (Gesamtsäure) interessiert, so kann man diese nur rechnerisch aus der gemessenen freien Säure im Bestandsniederschlag und der Menge der im Zuge der Kronenraumpufferung aus dem Blätterdach freigesetzten Nährstoffe abschätzen. In Abbildung I-24 wird deutlich, wie stark

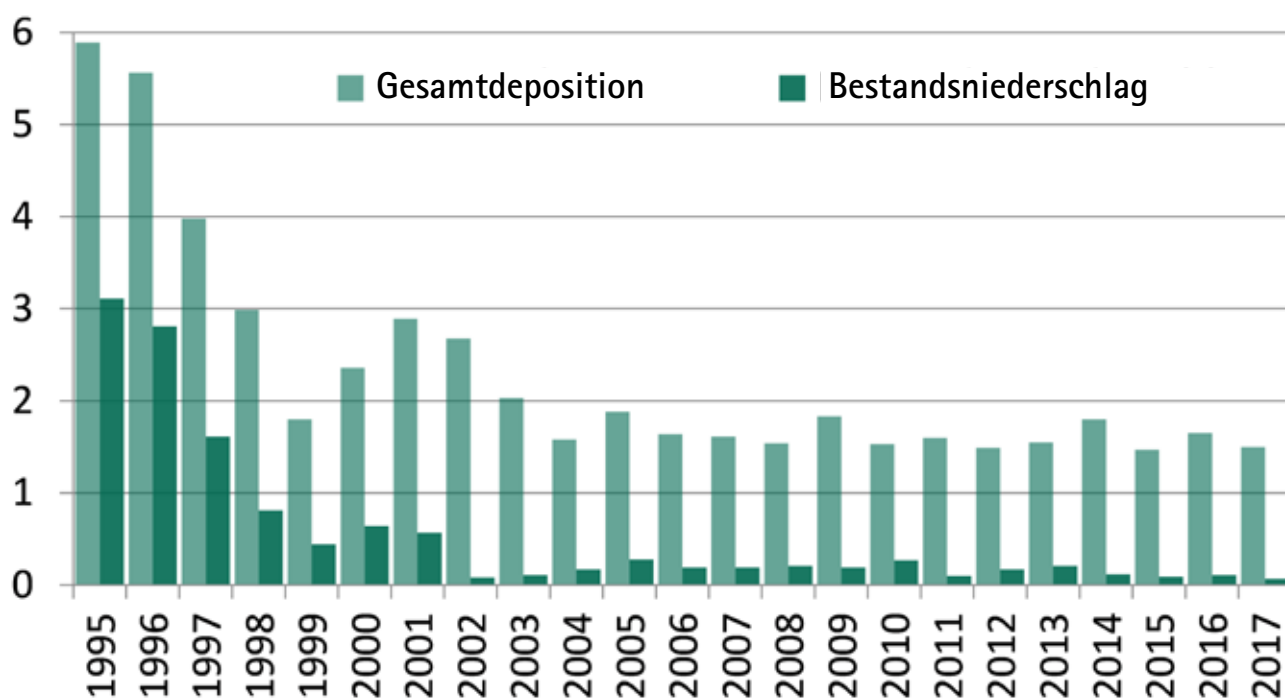


Abbildung I-24: Entwicklung der jährlichen Säureinträge über Gesamtdosition (GD) und Bestandsniederschlag (BN) in kmol/ha auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau 1995-2017

sich die Säureinträge über die Flüsse Gesamtdeposition (GD) und Bestandsniederschlag (BN) in Olbernhau voneinander unterscheiden.

Die Einträge an Säure über die Gesamtdeposition nahmen in den zwei Bilanzintervallen von 24 auf 16 kg ab. Die Belastung entsprach von 1997 bis 2006 einem Äquivalent von 1.200 kg Dolomit, in der zweiten Dekade von 2007 bis 2016 ergibt sich für die Kronenraumpufferung noch ein Bedarf von 800 kg in 10 Jahren pro Hektar. Überführt man entsprechend die zur Abbildung I-12 gehörenden Daten aus ZIMMERMANN ET ABIY (2005) für Tharandt bzw. Oberbärenburg in eine Kronenraumbilanz, so ergibt sich allein für den Fünf-Jahreszeitraum vor der politischen Wende eine zur Pufferung erforderliche Kalkdosis von 1,3 bzw. 1,4 Tonnen pro Hektar. Die in Sachsen seit 2012 flächendeckend geltende Dosis ist auf 3 Tonnen pro Hektar, der Wiederholungsturnus ist auf minimal 10 Jahre festgesetzt.

Als natürliche Pufferungsgröße muss der Eintrag an basischen Kationen über die Deposition ermittelt und dann den Nährstoffausträgen mit dem Sickerwasser gegenübergestellt werden (Abbildung I-25).

Die Kalkungsmaßnahmen 2001 und 2011 sind im Eintrag deutlich zu erkennen. Die Austräge sind unabhängig von den Einträgen und sehr unregelmäßig. Es besteht aber ein positiver korrelativer Zusammenhang ($r = 0,797$) zwischen Schwefel- und Basenaustrag. Normiert man die Flüsse auf molare Größen, die den Protonen entsprechen, so ergeben sich Baseneinträge von 1,0 bzw. 0,8 kmol pro Hektar und Jahr in den Bilanzdekaden, denen Austräge von jeweils 1,1 kmol gegenüber stehen. Einträge und Austräge heben sich auf, so dass der Basenhaushalt des Bodens sich nicht regenerieren kann. Besonders prekär ist die Situation bei Magnesium, wo in der ersten Dekade Einträge von 24,9 kg/ha und Austräge in Höhe von 39,2 kg/ha zu verzeichnen waren. In der zweiten Dekade standen 15,3 kg/ha im Eintrag 63,6 kg/ha Austrag gegenüber: Der Boden verarmt weiter an diesem essenziellen Nährstoff.

Die Umwandlung von Protonen in bodenbürtige Kationsäuren bei der Passage sauren Sickerwassers im Boden erfolgt in der Bilanztiefe von 100 Zentimetern ausschließlich durch Aluminiumfreisetzung (92 %) und Protonen (7 %). Mangan und Eisenfreisetzung sind nicht sichtbar darzustellen (Abbildung I-26).

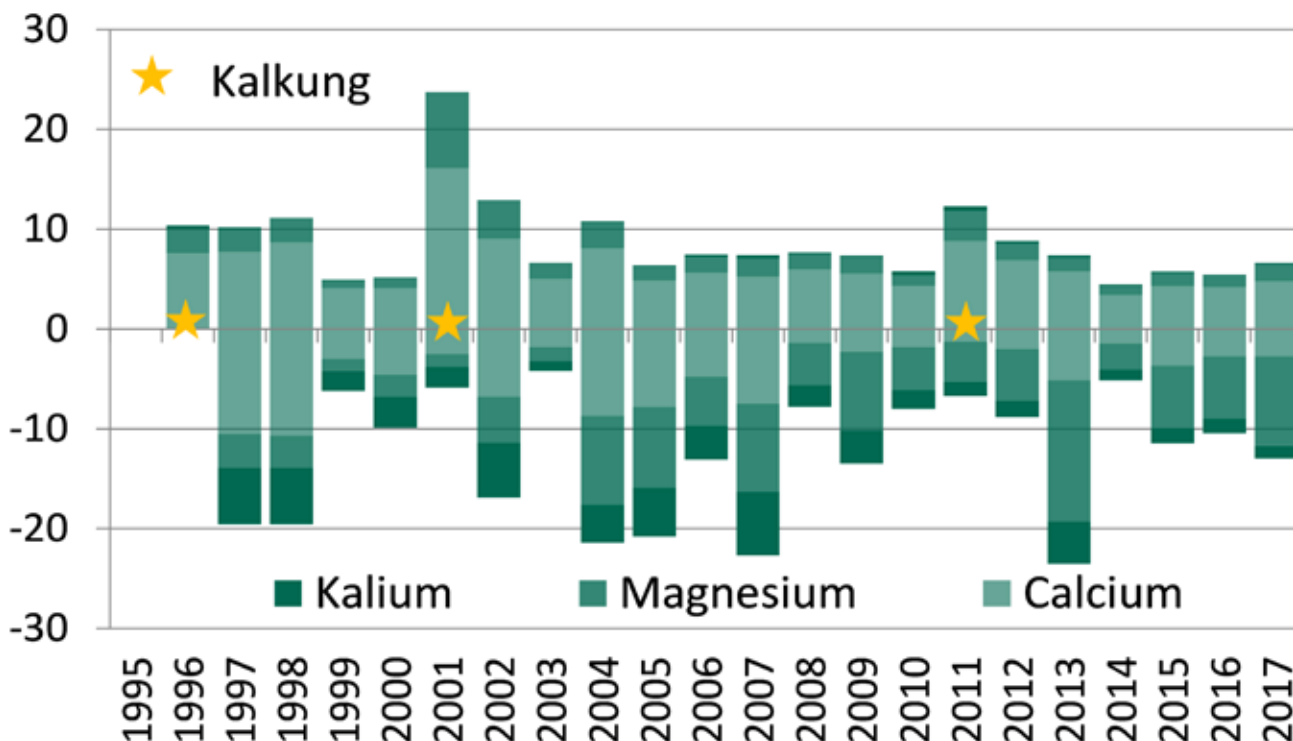


Abbildung I-25: Entwicklung der jährlichen Basenbilanzen (Ca, Mg, K) in kg/ha auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau 1995-2017

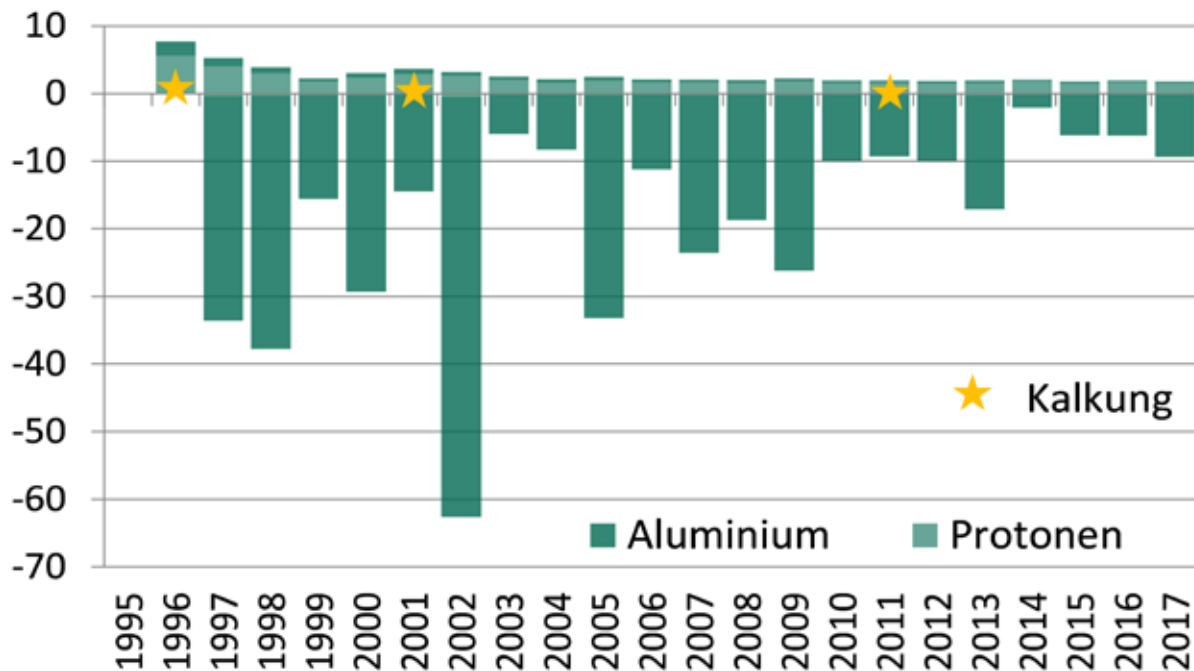


Abbildung I-26: Entwicklung der jährlichen Säurebilanzen (ohne Fe, Mn) in kg/ha auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau 1995-2017

Eine einfache statistische Bewertung über die Pearson-Korrelation zwischen Schwefel- und Aluminium-Austrägen ergibt - wie auch an den Grafiken erkennbar - erwartungsgemäß einen engeren Zusammenhang als bei den Basen ($r = 0,979$). Das Anion Schwefel steuert massiv den Stoffhaushalt und insbesondere den Elementausttrag. Der sehr hohe Aluminiumausttrag belegt zudem, dass die Bodensilikate (primäre Minerale und Tonminerale) einem Angriff ihrer Gitterstrukturen unterliegen, die nachhaltig die Nährstoffspeicherung und die nachschaffende Kraft vermindern dürfte.

MENZER & ANDREAE (2013) führten für die Jahre 1997 bis 2011 die dargestellten Teilbilanzen in einer Ökosystembilanz zusammen. Die nach ULRICH (1991) berechnete Gesamtprotonenbelastung des Ökosystems ist in Abbildung I-27 dargestellt. Es handelt sich dabei sowohl um die aktuell über die Gesamtdosition eingetragene Protonenmenge als auch um gespeicherte Säure bzw. Protonen im Boden und Protonen, die sich aus Umwandlungsprozessen, z. B. an der Wurzeloberfläche, generieren. Der Eintrag stellt dabei im Mittel weniger als die Hälfte der Gesamtbelastung dar.

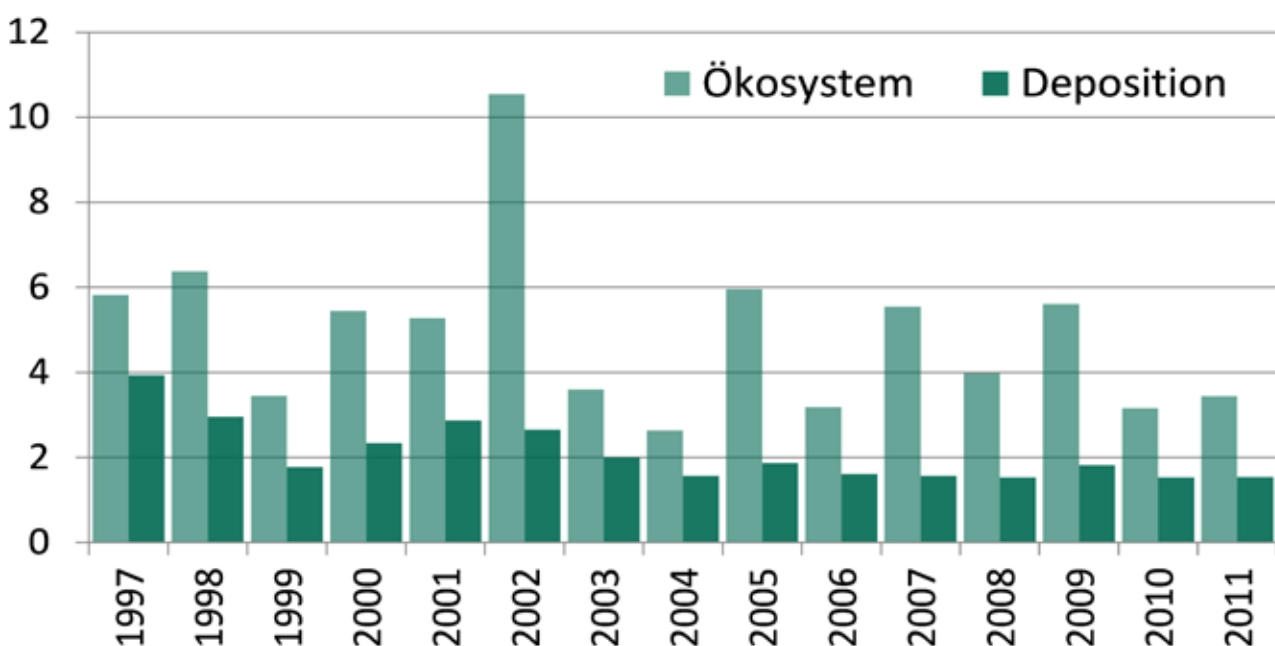


Abbildung I-27: Entwicklung der ökosystemaren Säurebelastung bezogen auf Protonen in kmol/ha auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau 1997-2011 (MENZER & ANDREAE 2013)

Geht man davon aus, dass 50 kg Kalk 1 kmol Säure puffert (LEUBE 2000), kann man die zur Pufferung nötige Kalkdosis pro Hektar und Jahr bzw. im Kalkungsturnus z. B. von 10 Jahren berechnen. Wollte man in Olbernhau nur den aktuellen Eintrag puffern, wurde von 1997 bis 2016 lediglich eine Kalkmenge von etwa 1,0 t/ha in zehn Jahren benötigt. Zur Pufferung der Ökosystemgesamtbelastung für den Zeitraum 1997-2011 waren allerdings 2,7 t/ha in zehn Jahren erforderlich. Die entsprechenden Werte für alle fünf sächsischen Level II-Flächen innerhalb der Kalkungskulisse variierten dabei zwischen 1,7 und 2,9 t/ha in zehn Jahren (MENZER & ANDREAE 2013).

3.3 Kalkung und Bodenchemie (BZE 1 und 2)

Aufgrund der geologischen Ausstattung sächsischer Waldstandorte (zumeist pleistozäne Sande und magmatische bzw. metamorphe Gesteine) liegen die pH-Werte der daraus entstandenen Böden - meist podsolige Braunerden und Podsole - von Natur aus im leicht sauren Milieu. Vor allem die Hauptnährelemente wie Magnesium und Calcium stehen dem aufstockenden

Bestand nur in eingeschränktem Maße zur Verfügung. Davon betroffen sind z. B. die Wuchsgebiete im sächsischen Mittelgebirge wie das Erzgebirge oder das Vogtland bzw. das Lausitzer Lösshügelland. RABEN et al. (2000a/2004) konnten aufgrund der ersten flächendeckenden Bodenzustandserhebung im sächsischen Wald in den 1990er-Jahren die tief reichende Versauerung der Böden und damit den Kalkungsbedarf belegen.

Im Jahre 2012 wurde in der Kalkungskulisse in Ergänzung der 2006 erfolgten Bundeserhebung (HEINTZE & ANDREAE 2012) erneut der Bodenzustand ermittelt. Beispielhaft zeigt Abbildung I-28 die Lage der BZE-Punkte innerhalb der sächsischen Kalkungskulisse und deren Kalkungshäufigkeit bis zur zweiten BZE-Probenahme (JACOB & ANDREAE 2018). Von den 279 BZE 2-Punkten liegen 162 Punkte innerhalb der Kalkungskulisse. Davon wiederum wurden rund 63 % (n=102) seit Beginn der Kalkungsmaßnahmen (1986) bis zur Entnahme von Bodenproben (2006, 2012 und 2014) für die BZE 2 zwischen ein- bis viermal gekalkt (1x: 32 %; 2x: 43 %; 3x: 15 %; 4x: 10 %). Auch im Vergleich mit den Kalkungshäufigkeiten für alle Flächen liegt der Schwerpunkt auf den zweimal

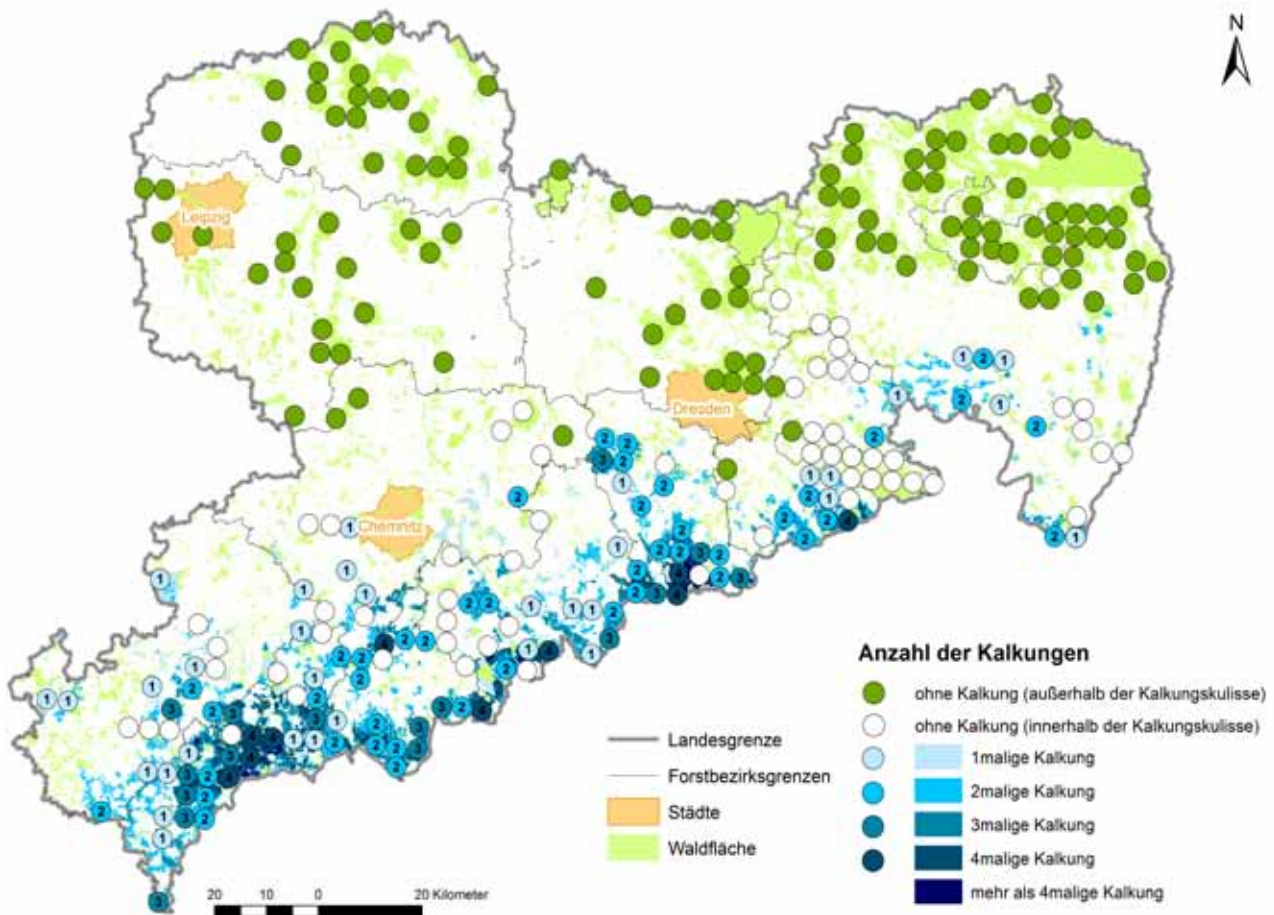


Abbildung I-28: Anzahl der Kalkungen an BZE-Punkten bis zum Zeitpunkt der BZE 2-Beprobung. Weiße Punkte - ohne Kalkung innerhalb der Kalkungskulisse. Grüne Punkte (ohne Kalkung) liegen außerhalb der Kalkungskulisse (Tiefenland, teilweise Hügelland).

gekalkten Flächen, gefolgt von den einmal gekalkten. Je nach Lage der Standorte innerhalb der Kalkungskulisse und dem Zeitpunkt der Kalkung wurden durch einmalige Kalkungen 3,0 bis 4,5 t/ha ausgebracht. Für die Bewertung der Kalkungswirkung wurde das gesamte Stichprobenkollektiv in Punkte innerhalb (Bergland/Vorbergland) und außerhalb (Tief-/Hügelland) der Kalkungskulisse unterteilt (Abbildung I-28). Aus dieser wiederum wurden nur Standorte einbezogen, die nach LEUBE (2000) effektiv gekalkt werden dürfen (z. B. ohne Nass-Standorte, Moore, reiche und kräftige Standorte). Punkte innerhalb der Kulisse wurden wiederum in ungekalkte (ohne Kalkung) und ein- bis viermal gekalkte Punkte eingeteilt. Zusätzlich wurden im Jahr 2012 fünf Punkte außerhalb des BZE-Rasters in der Nähe des Kahleberges (Osterzgebirge) beprobt, die laut digitalem Kalkungsvollzug, eine sechs- bis achtmalige Kalkung aufwiesen. Zur Darstellung der Auswirkung von Kalkungen auf bodenchemische Parameter wurden neben der Humusauflage auch die Mineralbodentiefenstufen 0-5, 5-10, 10-30 und 30-60 cm untersucht.

3.3.1 Auswirkungen der Kalkungen auf die Basensättigung

Grundsätzlich zeigen, wie in Abbildung I-29 zu sehen ist, die Standorte im sächsischen Tief- und Hügelland (grün) eine höhere Basensättigung als alle ungekalkten Standorte innerhalb der Kalkungskulisse (weiß). Bereits durch ein- und zweimalige Kalkung steigt die Basensättigung (BS) in der Humusauflage im Vergleich zu den ungekalkten Standorten signifikant an. Kalkungen darüber hinaus führen zu einer maximalen BS in allen Humushorizonten.

Eine Tiefenwirkung durch die Zugabe von Magnesium und Calcium in den mineralischen Oberboden ist lediglich bis 10 cm Tiefe nachweisbar. In der sich anschließenden Tiefenstufe (10-30 cm) sind die Reaktionen nur marginal ausgeprägt und nur nach sechs- bis achtmaligen Kalkungen sichtbar (höhere Spannweite). In 30-60 cm Tiefe verringern sich die Unterschiede zwischen Standorten des Tief- und Hügellandes gegenüber ungekalkten und gekalkten Punkten deutlich.

Ungekalkte Standorte innerhalb der Kalkungskulisse haben zwischen beiden Inventuren in den Tiefenstufen 0 bis 60 cm etwa 3 % BS verloren. Die stärksten Rückgänge zeigen sich in der Tiefe 30-60 cm, gefolgt von der Tiefenstufe 5-10 cm und 0-5 cm.

Ähnliche Tendenzen, aber auf einem doppelt so hohen Niveau, lassen sich für die ungekalkten Tieflandsstandorte beobachten: Rückgänge um mehr als 7 % BS in den Tiefenstufen 0-5 und 30-60 cm. Vor allem rückläufige Einträge von Flugasche (basische Staubeinträge) nach der politischen Wende können hierfür verantwortlich gemacht werden (vgl. RIEK & RUSS, 2015). Nach dem Kalkungsleitfaden von LEUBE (2000) wird im mineralischen Oberboden bis 30 cm eine BS von 15 % angestrebt. Dies wird in 0-5 cm nach zweimaliger Kalkung, in 5-10 cm nach viermaliger Kalkung und in 10-30 cm nach sechs- bis achtmaliger Kalkung erreicht (siehe Schwellenwert in Abbildung I-29).

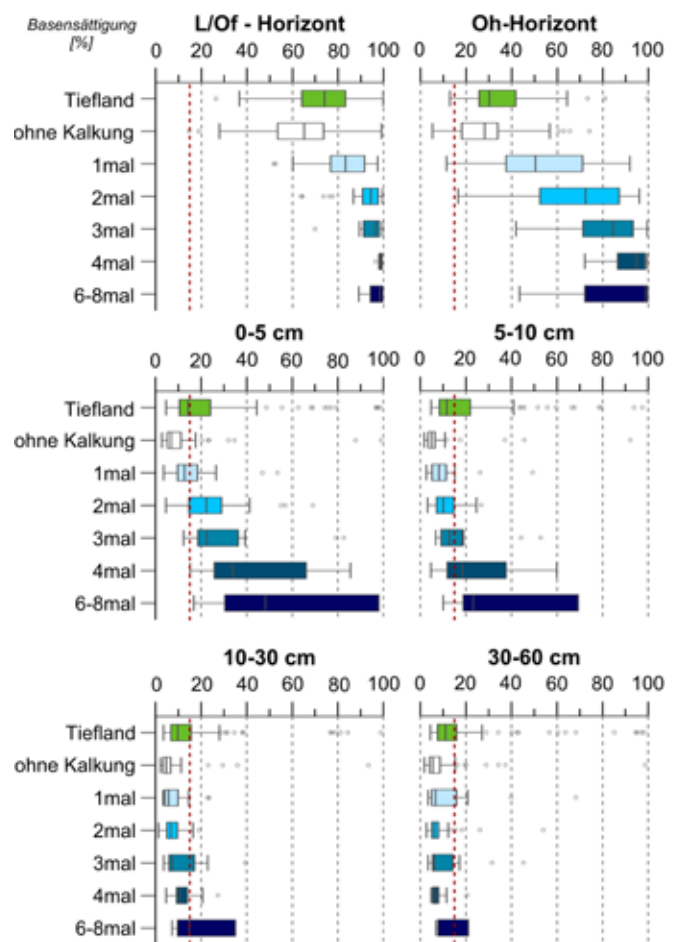


Abbildung I-29: Tiefenverläufe der Basensättigung [%] im Humus und Mineralboden bis 60 cm für BZE-Punkte mit unterschiedlicher Kalkzugabe und außerhalb der Kalkungskulisse (Tief- und Hügelland, grün). Ziel der Bodenschutzkalkung in Sachsen sind 15 % Basensättigung (rote gestrichelte Linie).

Auf den gekalkten BZE-Punkten (ein- bis viermal) zeigt sich zwischen beiden Inventuren die stärkste Zunahme in 0-5 cm Tiefe (plus 9 % BS) gefolgt von der Tiefenstufe 5-10 cm (plus 3 % BS). Geringe bis keine Veränderungen der BS sind zwischen BZE 1 und BZE 2 in 10-30 cm bzw. 30-60 cm zu beobachten.

3.3.2 Auswirkungen der Kalkungen auf den pH-Wert

Ungekalkte Standorte innerhalb der Kalkungskulisse weisen sowohl in der Humusauflage als auch im Mineralboden einen niedrigeren pH-Wert auf als ungekalkte Standorte des Tieflandes (Abbildung I-30). Bereits durch eine einmalige Kalkung steigt der pH-Wert auf das Niveau der BZE-Punkte im Tiefland.

In beiden untersuchten Humushorizonten (L/Of und Oh) innerhalb der Kalkungskulisse nimmt der pH-Wert linear mit der Anzahl der Kalkung zu. Der Median steigt nach sechs- bis achtmaliger Kalkung auf über pH 5,5. Im Vergleich dazu zeigen ungekalkte Standorte innerhalb der Kalkungskulisse einen pH-Wert in der Humusauflage zwischen 3,5 und 4,0.

Im Mineralboden sind die Auswirkungen der Kalkung auf den pH-Wert besonders deutlich in 0-5 cm Tiefe zu sehen. Darunter sind die Veränderungen nur marginal und werden vor allem durch das geologische Ausgangssubstrat überprägt und dominiert.

Überschreitungen des pH-Schwellenwertes von 4,2 nach LEUBE (2000) (Übergang vom Aluminiumpuffer-

bereich zum Austauscherpufferbereich) erfolgen in der ersten Mineralbodentiefe ab viermaliger Kalkung und in 5-10 cm erst durch sechs- bis achtmalige Kalkungen. In den darauffolgenden Tiefenstufen (10-30 und 30-60 cm) überwiegt größtenteils der Einfluss des Ausgangssubstrates und Kalkungswirkungen sind nur bedingt sichtbar: auch ohne Kalkung liegen die pH-Werte über dem Schwellenwert.

3.3.3 Auswirkungen der Kalkungen auf die Austauschkapazität

Tieflandsstandorte weisen in allen Mineralbodentiefeinstufen eine deutlich geringere effektive Austauschkapazität (AKE) auf als ungekalkte und gekalkte Standorte der Kalkungskulisse. Im Humus liegen sie in etwa gleichauf mit ungekalkten Standorten der Festgesteinsböden (Abbildung I-31).

Die deutlichsten Anstiege der AKe zeigen sich infolge der Kalkung in den Humusauflagen. Während die AKe der ungekalkten Punkte bei 200 bis 230 $\mu\text{mol}_c/\text{g}$

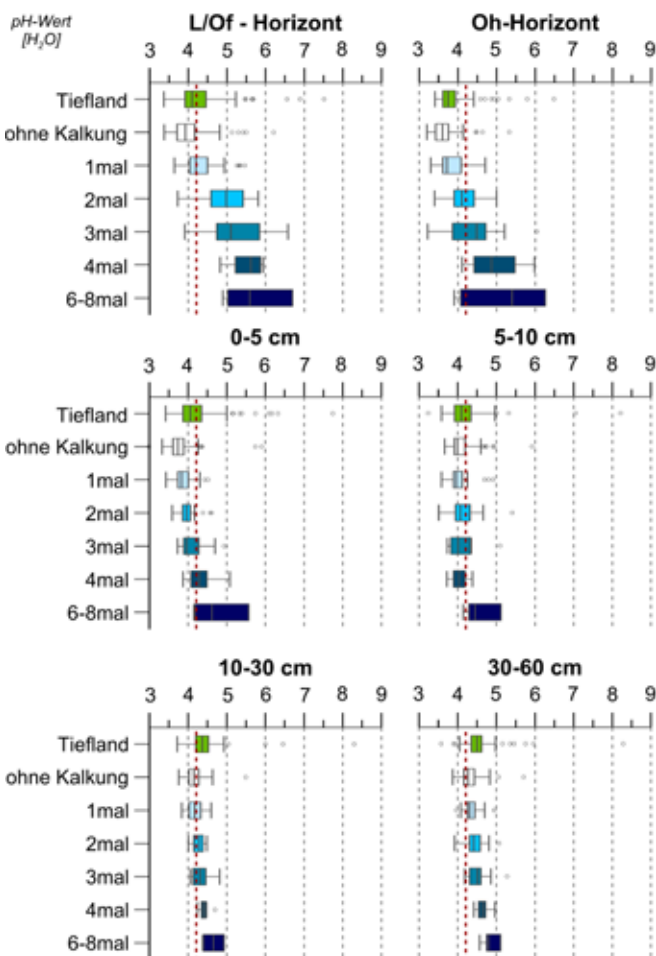


Abbildung I-30: Tiefenverläufe der pH-Werte im Humus und Mineralboden bis 60 cm für BZE-Punkte mit unterschiedlicher Kalkgabe und außerhalb der Kalkungskulisse (Tief- und Hügelland, grün). Ziel-pH-Wert in Sachsen liegt bei 4,2 (rote gestrichelte Linie).

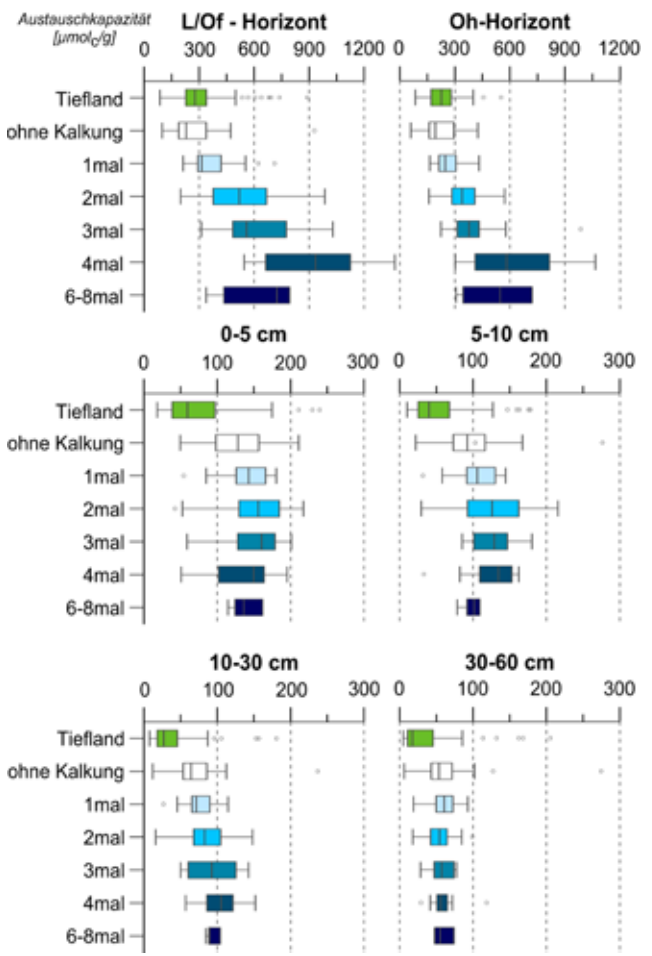


Abbildung I-31: Tiefenverläufe der Austauschkapazität $[\mu\text{mol}_c/\text{g}]$ im Humus und Mineralboden bis 60 cm für BZE-Punkte mit unterschiedlicher Kalkgabe und außerhalb der Kalkungskulisse (Tief- und Hügelland, grün).

liegt, steigt diese bereits durch einmalige Kalkgabe auf über 300 $\mu\text{molc/g}$ an. Maximalwerte von über 900 $\mu\text{molc/g}$ finden sich auf viermal gekalkten Standorten.

Innerhalb des oberen Mineralbodens (0–10 cm) sind die Anstiege durch die Kalkung nicht so deutlich wie im Humus. Die Anstiege mit zunehmender Kalkung sind nicht linear und eher ungerichtet. Lediglich ein- und zweimalige Kalkungen zeigen eine Veränderung an, während durch höhere Kalkgaben keine AKe-Anstiege eintreten. Es ist davon auszugehen, dass eine Verringerung der AKe infolge der historischen und aktuellen Bodenversauerung durch Kalkungen verhindert werden kann (VEERHOFF et al. 1996). Im Unterboden sind, vor allem in 30–60 cm, keine Unterschiede in der AKe zwischen ungekalkten und gekalkten Standorten der Kalkungskulisse zu beobachten.

3.4 Kalkung und Bodenbiologie (BZE 2)

Böden sind für eine Vielzahl unterschiedlicher Lebewesen wichtiger Lebensraum. Angefangen von der Klasse der Bakterien und Pilze, über kleinere und mittlere Tiere wie Asseln, Milben, Springschwänze, Tausendfüßer und Spinnen bis hin zu den größeren Tieren wie Regenwürmern ist die Bodenlebewelt sehr vielfältig und wird noch ergänzt durch zahlreiche Wirbeltiere wie Mäuse und Maulwürfe.

Weil Regenwürmer eine herausragende Rolle im Nährstoffkreislauf von Böden erfüllen, ist deren Reaktion bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit nach langjährigen Kalkungsmaßnahmen ein weiteres Puzzleteil bei der Bewertung von Bodenschutzkalkungen (JACOB et al. 2017).

Im April 2018 wurden acht BZE-Punkte im sächsischen Vogtland und Westerzgebirge unter Federführung und Anleitung von Dr. Otto Ehrmann beprobt und ausgewertet (Abbildung I-32). Ausgangspunkt sind vier Punktepärchen mit jeweils gleicher Standortausstattung (Lokalbodenform), aber unterschiedlicher Kalkgabe:

- **Eibenstocker Granit-Braunpodsol** (ohne Kalkung (205)/mit viermaliger Kalkung (212))
- **Rothenthaler Gneis-Braunerde** (ohne Kalkung (168)/mit viermaliger Kalkung (166))
- **Oelsengrunder Gneis-Braunerde** (ohne Kalkung (177)/mit dreimaliger Kalkung (187))

- **Sohler Phyllit-Braunerde** (ohne Kalkung (192)/mit dreimaliger Kalkung (232))

Es konnten insgesamt vier Arten nachgewiesen werden (*Dendrobaena rubida*, *Dendrobaena octaedra*, *Lumbricus rubellus* und *Octolasion lacteum*), von denen die ersten drei vor allem die Humusaufgabe besiedeln. Es handelte sich vorwiegend um juvenile Tiere. Lediglich die letzte Art ist auch im Mineralboden anzutreffen (endogäisch). Tiefgrabende Arten (anezisch) fehlten auf allen acht Standorten.

Die Abundanz auf den vier ungekalkten BZE-Punkten schwankte zwischen null bis acht Individuen pro m^2 (siehe Abbildung I-33), auf den gekalkten Standorten hingegen zwischen 48 bis 202 pro m^2 (Median: 117). Während die Humus-pH-Werte auf den ungekalkten Punkten im Mittel bei 3,5 lagen, stiegen diese durch die langjährige Kalkung auf pH 4,7 an. Ein direkter Zusammenhang zur Regenwurmdichte ist ableitbar.

Parallel zur Abundanz stieg die Biomasse der Bodenwühler von 9 kg pro ha (ungekalkt) auf im Mittel rund 135 kg pro ha (gekalkt) an (siehe Abbildung I-34).

Dies hat ebenso Auswirkungen auf die Morphologie der Humusaufgabe (biologischer Streuabbau) sowie die im Klimawandel besonders bedeutsame Wasserhaltekapazität von Waldböden. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse findet sich in PATZELT (2019).

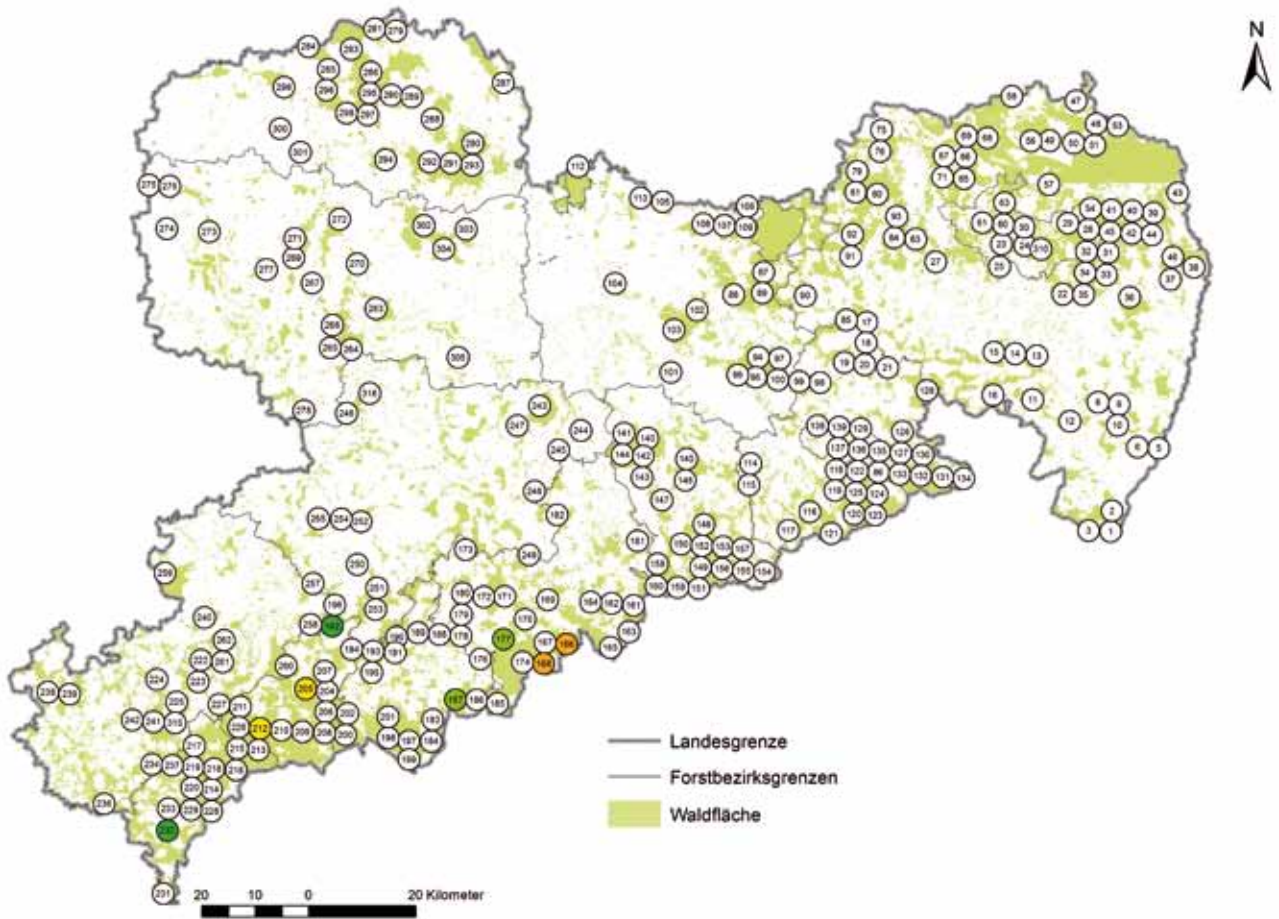


Abbildung I-32: Lage der BZE-Punkte in Südwestsachsen zur Beprobung der Regenwurmfauna

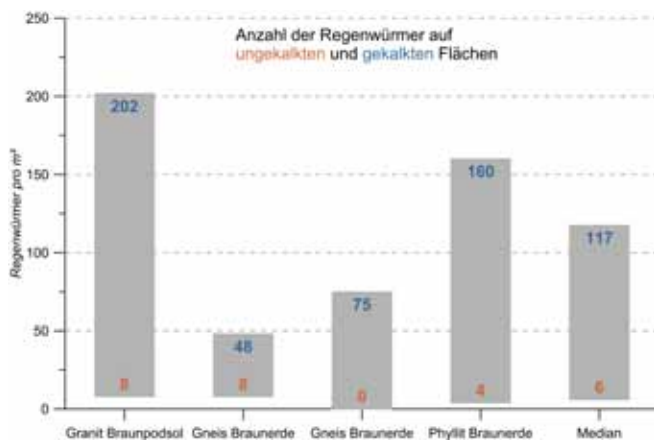


Abbildung I-33: Veränderung der Regenwurmanzahl im Zuge der Kalkung auf acht sächsischen Waldstandorten

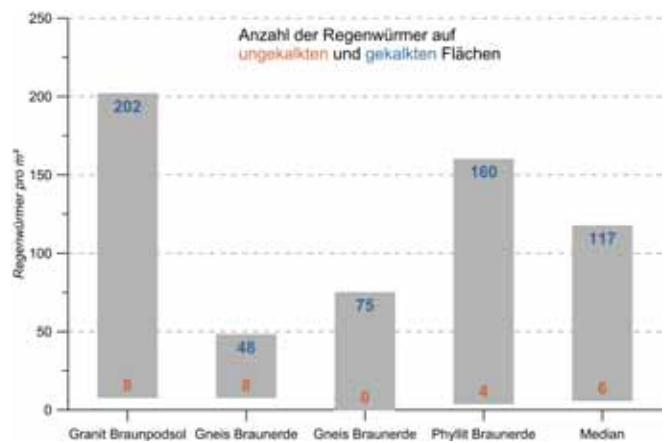


Abbildung I-34: Veränderung der Regenwurmbiomasse im Zuge der Kalkung auf acht sächsischen Waldstandorten

3.5 Kalkung und Waldernährung (BZE 2)

3.5.1 Regelmäßiger Check Up der Waldbäume

Während die Waldzustandserhebung (WZE) flächendeckend in jedem Jahr durch die Ansprache der Kronenverlichtung gewissermaßen den Puls der Waldbäume fühlt, wird im forstlichen Umweltmonitoring seit 1995 durch die Analyse von Nadel- und Blattspiegelwerten ein „Check Up mit großem Blutbild“ zur Gesundheitsbeurteilung der Bäume durchgeführt.

Auf acht intensiven Dauerbeobachtungsflächen (DBF; EU: Level II) werden alle zwei Jahre an jeweils neun Bäumen einer Baumart Blatt- und Nadelproben aus der besonnten Oberkrone gewonnen. Als Reihenuntersuchung können die entsprechenden Untersuchungen auf den Punkten der Bodenzustandserhebung (BZE) - welche weitgehend mit denen der WZE identisch sind - angesehen werden. Aufgrund des Aufwands erfolgen sie in größeren zeitlichen Abständen (ca. alle 15 Jahre), aber dafür an einer großen Zahl von „Patienten“.

Am jeweiligen Aufnahmepunkt werden dabei mindestens drei Bäume je Hauptbaumart beprobt, die führend am Kronendach beteiligt sind. Entsprechend der

Abbildung I-35 wird natürlich darauf geachtet, den Bäumen der WZE keine künstlichen Blatt- bzw. Nadelverluste zuzufügen.

3.5.2 Nadelspiegelwerte - Blutbild des Baumes

Die Bewertung des Ernährungszustandes von Bäumen anhand von Nadel- bzw. Blattspiegelwerten ist eine seit Jahrzehnten gängige und auch diagnostisch notwendige Praxis in Forstwirtschaft und Forstwissenschaft. Der Ernährungszustand stellt eine integrierende Größe bei der Beurteilung von Standortbedingungen und Umwelteinflüssen (z. B. Bodenversauerung, Schwefel- und Stickstoffbelastung, Klimawandel) sowie von Bodenschutzmaßnahmen wie der Bodenschutzkalkung dar.

Die Gewinnung von geeignetem Material aus der oberen Lichtkrone der Bäume erfolgt mit Hilfe von Zapfenpflückern von Sachsenforst (Abbildung I-36). Dabei werden die Gehalte einzelner Nähr- und Schadstoffe bzw. deren Verhältnis zueinander untersucht. Ziel der Kalkung ist zum Beispiel, die ausreichende Versorgung der Bäume mit Magnesium sicherzustellen. Besonders in jungen, effizienten Blättern wird es

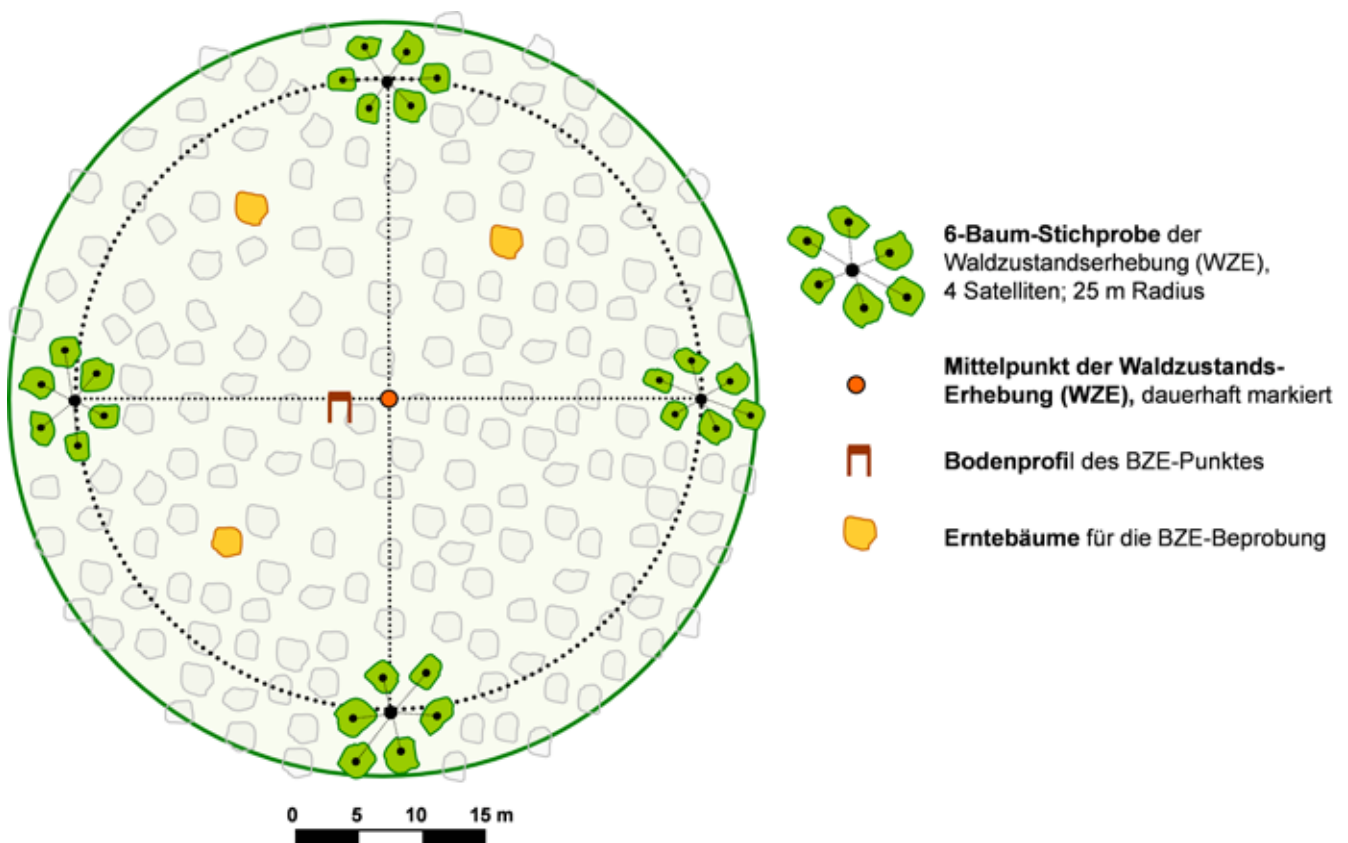


Abbildung I-35: Schematische Darstellung eines Probekreises (Radius: 30 m) um das Bodenprofil des BZE-Punktes mit Angabe der vier Baumkollektive für die 6-Baum-Stichprobe der WZE und der drei Erntebäume für die BZE (JACOB ET ANDREAE 2018)

als entscheidender Baustein für die Umwandlung von Licht in chemische Energie (Fotosynthese) benötigt. Kalium sorgt andererseits für die Regulation der Blattatmung an den Spaltöffnungen der Blätter. Mangelt es an Kalium, können diese nicht geschlossen werden und die Pflanzen vertrocknen (Tabelle I-3). Dieser Effekt kann auch, als negative Begleiterscheinung von Kalkungsmaßnahmen, durch eine erhöhte Calciumzufuhr ausgelöst werden (Calcium-Kalium-Antagonismus). Bei Fehlen bzw. geringerer Versorgung wichtiger Makronährelemente sind nachfolgende Symptome an Nadeln bzw. Blättern zu beobachten:



Abbildung I-36: Im Sommer und Herbst 2012 wurden Zweig- bzw. Nadelproben von 540 Bäumen gewonnen. Neben Fichte, Kiefer, Buche und Eiche wurde auch Lärche, Ahorn, Esche, Hainbuche, Birke und Douglasie beprobt. (Foto: F. Jacob).

Tabelle I-3: Schadsymptome an Waldbäumen durch Nährstoffmangel (DANNEBERG et al. 2001)

Ursache	Symptome
Magnesiummangel	Gelbspitzigkeit älterer Nadeln, Gelbverfärbung der Blätter zwischen den Blattnerven - vorwiegend an der Oberseite der Nadeln oder Blätter; besonders ausgeprägt im zeitigen Frühjahr
Kaliummangel	Gelbgrüne, schmutzig grüne Verfärbung an Nadelspitzen und Blatträndern beginnend, Absterben der Nadeln von der Spitze her
Stickstoffmangel	Gelbgrüne, fahle Verfärbung der Blätter oder Nadeln, Blattorgane und Triebe kurz
Phosphormangel	Rotviolette, graugrüne Verfärbung der Nadeln oder Blätter, Wuchshemmung
Manganmangel	Blassgrüne, ockergelbe Verfärbung jüngerer und neu ausgetriebener Nadeln

3.5.3 Die Wahl geeigneter Probanden

Im Jahr 2006 wurde die bundesweite Bodenzustandserhebung zum zweiten Mal auf sächsischen Waldflächen durchgeführt (8x8 km-Raster). In den Jahren 2012 und 2014 wurde das Raster auf 4x4 km verdichtet. Der Vergleich mit der Erstaufnahme aus den Jahren 1992-1995 erfolgte mit bundesweit einheitli-

chem Versuchsdesign und war darüber hinaus auch in das europäische Waldmonitoring (EU-Projekt BioSoil im Level I-Netz) eingebettet.

Dabei steht nicht allein die Charakterisierung des chemischen Bodenzustandes (z. B. pH-Wert, Kohlenstoffvorrat, Basensättigung) im Fokus. Erst die Verknüpfung mit den Daten zu Bestockung und Vegetation ermöglicht die integrative Beurteilung des Waldzu-

standes. Ein wichtiger Pfeiler ist dabei auch die Erfassung des Ernährungszustandes der aufstockenden Waldbäume.

Entsprechend dem „Leitfaden für forstliche Bodenschutzkalkung“ (LEUBE 2000) wurde in den immissionsbelasteten Waldgebieten Sachsens auf einer Fläche von etwa 120.000 Hektar magnesiumreicher Kalk ausgebracht. Die Bodenzustandserhebung ermöglicht es nunmehr, die Effekte der Kalkung, auch hinsichtlich des Ernährungszustandes, zu beurteilen.

Aus der Karte der 147 BZE-Punkte mit Fichtenbestockung ist ersichtlich, dass ein Großteil der Punkte innerhalb der sogenannten Kalkungskulisse liegt (Abbildung I-37).

Auf insgesamt 90 dieser Bestände wurde bis zum jeweiligen Beprobungsjahr mindestens einmal, aber maximal viermal Kalk ausgebracht. Die mittlere Gesamtgabe liegt bei 7,2 t/ha. Datenquelle hierfür ist die flächendeckend vorliegende digitale Kalkungsvollzugskarte (vgl. Kapitel 2.3.1) in Auswertung von 1986 bis 2014.

3.5.4 Kalkungserfolge nur bedingt erkennbar

Ziel der Kalkungsmaßnahmen war und ist eine Verbesserung der Basensättigung im Oberboden. Diese sollte die vielfältigen negativen Effekte der anhaltenden Überforderung der Pufferkapazität abmildern. In Bezug auf eine harmonische Ernährung der Waldbäume stehen vor allem Magnesium und Calcium im Vordergrund der Betrachtungen.

Weil die Elementgehalte allein wenig Aussagekraft haben, wird ein Bewertungsrahmen (Referenz) herangezogen, der Aussagen über den allgemeinen Zustand der beprobten Fichtenbestände ermöglicht. Verwendet werden die in Abbildung I-38 dargestellten Ernährungsstufen nach GÖTTLEIN et al. (2011). Zur Aufstellung des Bewertungsrahmens wurden europaweit ernährungskundliche Daten mit wachstumskundlichen Erhebungen verknüpft.

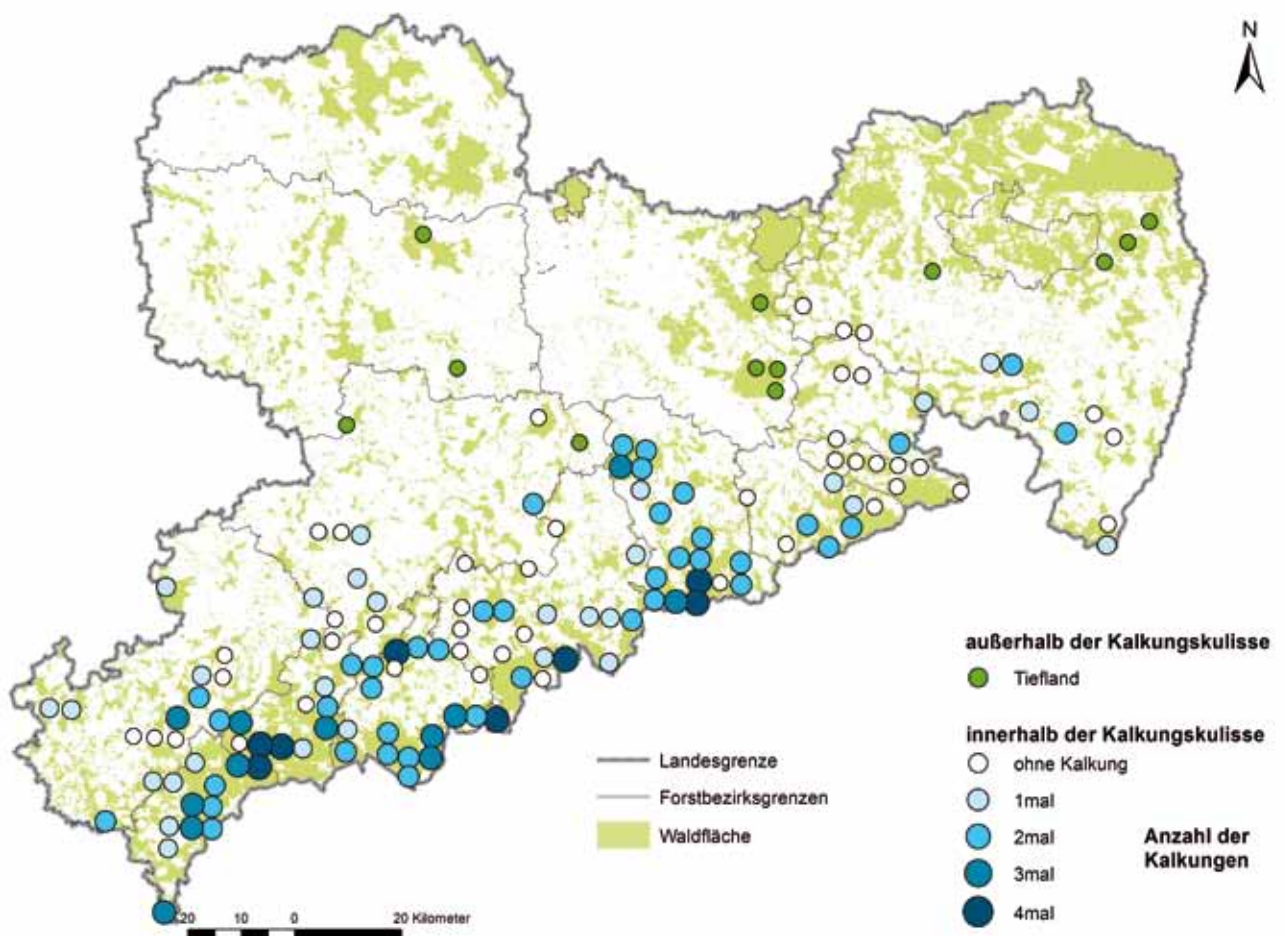


Abbildung I-37: Auswahl der BZE-Punkte mit Fichtenbestockung außerhalb und innerhalb der Kalkungskulisse mit unterschiedlichen Kalkungsintensitäten.

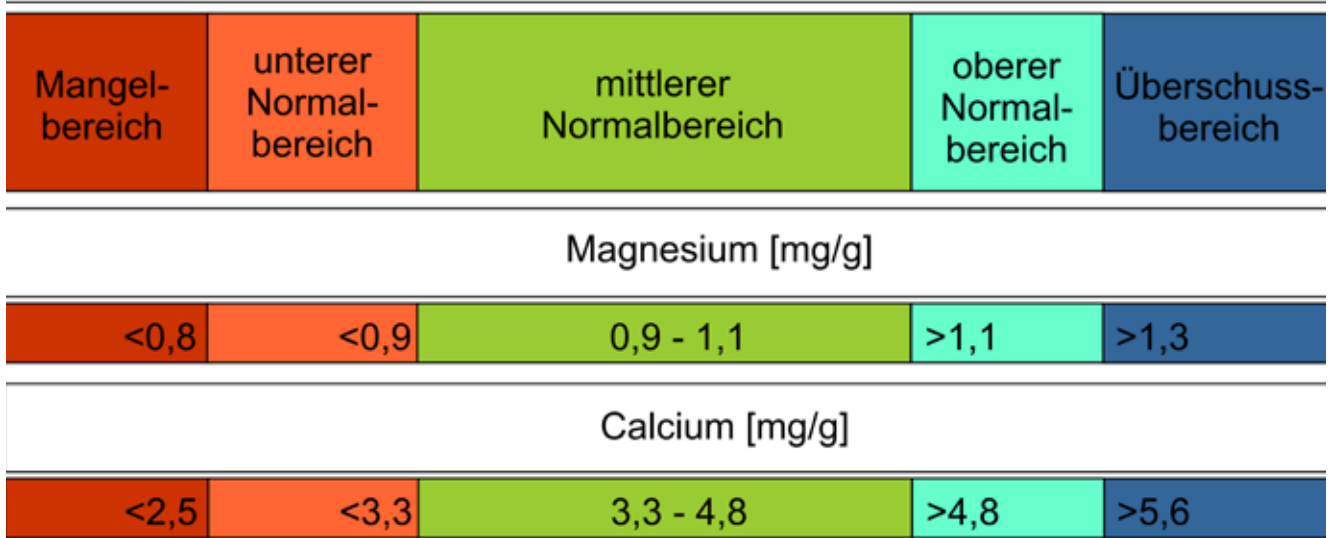


Abbildung I-38: Im Rahmen einer europäischen Datensammlung wurden die Nadelspiegelwerte entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens in der Natur in Bereiche gegliedert. Hier ist der Bewertungsrahmen nach GÖTTLEIN et al. (2011) für Magnesium und Calcium für die Fichte dargestellt.

Die mittlere Magnesiumversorgung der Fichten auf den Tieflands- und Hügellandsstandorten entspricht in etwa dem Niveau der ungekalkten Fichten innerhalb der Kalkungskulisse (Abbildung I-39). Infolge der ansteigenden Kalkausbringung (ein bis viermal) nimmt die Magnesiumversorgung der Fichtennadeln kontinuierlich zu. Im Vergleich mit dem Bewertungsrahmen nach GÖTTLEIN et al. (2011) liegen alle Standorte im mittleren Normal- bis Überschussbereich. Eine Mangelerkrankung (<0,9 mg·g⁻¹) liegt nur für wenige BZE-Punkte (n=11) vor.

Die Calciumversorgung der Fichtenbestände außerhalb der Kalkungskulisse (Tiefland) zeigt eine große Spannweite (2 bis 8 mg·g⁻¹). Die Bestände sind mangelhaft über normal bis luxuriös mit Calcium versorgt. Infolge der Kalkausbringung steigen auch hier, vergleichbar wie beim Magnesium, die Ca-Gehalte im aktuellen Nadeljahrgang kontinuierlich an (Abbildung I-40).

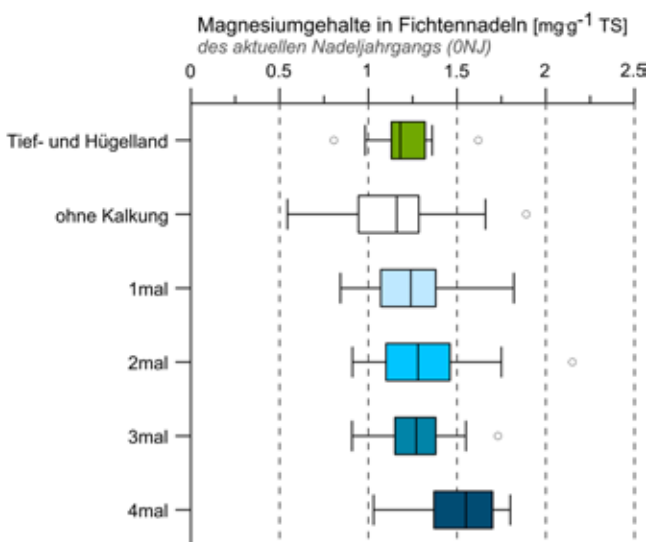


Abbildung I-39: Magnesiumversorgung des aktuellen Nadeljahrganges der Fichte im Tiefl- und Hügelland sowie auf ungekalkten und ein bis viermal gekalkten Standorten innerhalb der Kalkungskulisse zum Zeitpunkt der BZE 2.

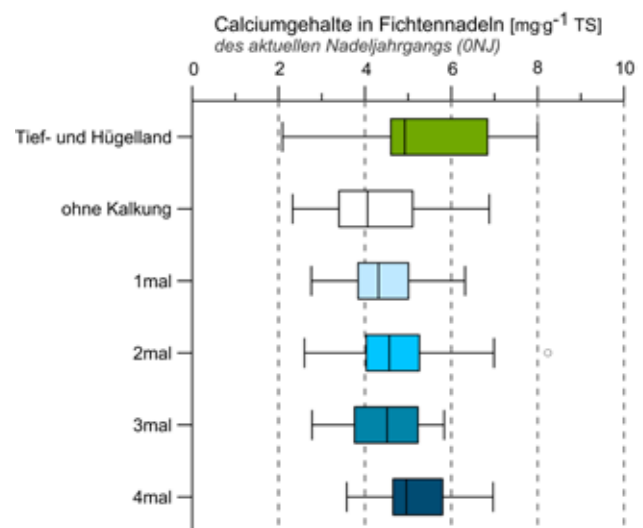


Abbildung I-40: Calciumversorgung des aktuellen Nadeljahrganges der Fichte im Tiefl- und Hügelland sowie auf ungekalkten und ein bis viermal gekalkten Standorten innerhalb der Kalkungskulisse zum Zeitpunkt der BZE 2.

3.6 Kalkung und Vegetation (BZE 2)

Im Rahmen einer Studie wurde auf 116 BZE-Punkten innerhalb der Kalkungskulisse die Wirkung der Bodenschutzkalkung auf die Bodenvegetation mittels multivariater Statistik geprüft (WECKESSER & KOMPA 2013). Im Mittelpunkt stand der Vergleich von gekalkten und ungekalkten Flächen unter verschiedenen Standortbedingungen (Abbildung I-41). Neben den Deckungsgraden der Vegetationsaufnahmen wurden bodenchemische Kennwerte der BZE (pH-Wert, Basensättigung, C/N-Verhältnis) und Standortparameter (Trophie, Wasserrangfolgeziffer, Kalkungsanzahl, Stickstoffdeposition) als Umweltvariablen in die Auswertung einbezogen.

Zur Wirkung von Kalkungen auf die Bodenvegetation liegen einige Untersuchungen vor (SCHLÜTER 1966, RODENKIRCHEN 1986, IMMER 1993, MACKESCHIN & RODENKIRCHEN 1994), die jedoch aufgrund des geringen Stichprobenumfangs keine flächigen Aussagen zulassen.

3.6.1 Was passiert innerhalb der Krautschicht?

Die mittlere Artenzahl steigt durch Kalkung an. Auf gekalkten Flächen liegen die Werte knapp doppelt so hoch wie auf ungekalkten Flächen.

Die Störzeigergruppe (*Calamagrostis epigejos*, *Digitalis purpurea*, *Epilobium angustifolium*, *Galium aparine*, *Juncus effusus*, *Urtica dioica*) zeigt generell keinen gleichgerichteten Deckungsgradanstieg mit zunehmender Kalkungsanzahl, jedoch sind in manchen Straten die Störzeiger auf gekalkten Flächen deckungsstärker vertreten als auf ungekalkten.

Innerhalb der typischen Waldartengruppe gehören *Calamagrostis villosa*, *Oxalis acetosella* und die Buchenverjüngung (*Fagus sylvatica*) zu den Profiteuren der Kalkung, während *Deschampsia flexuosa* und Fichtenverjüngung (*Picea abies*) mit zunehmender Kalkungsintensität deckungsschwächer werden (siehe Tabelle I-4). Diesen Sachverhalt bestätigen auch SCHMIDT (2002) und KRAFT (2003).

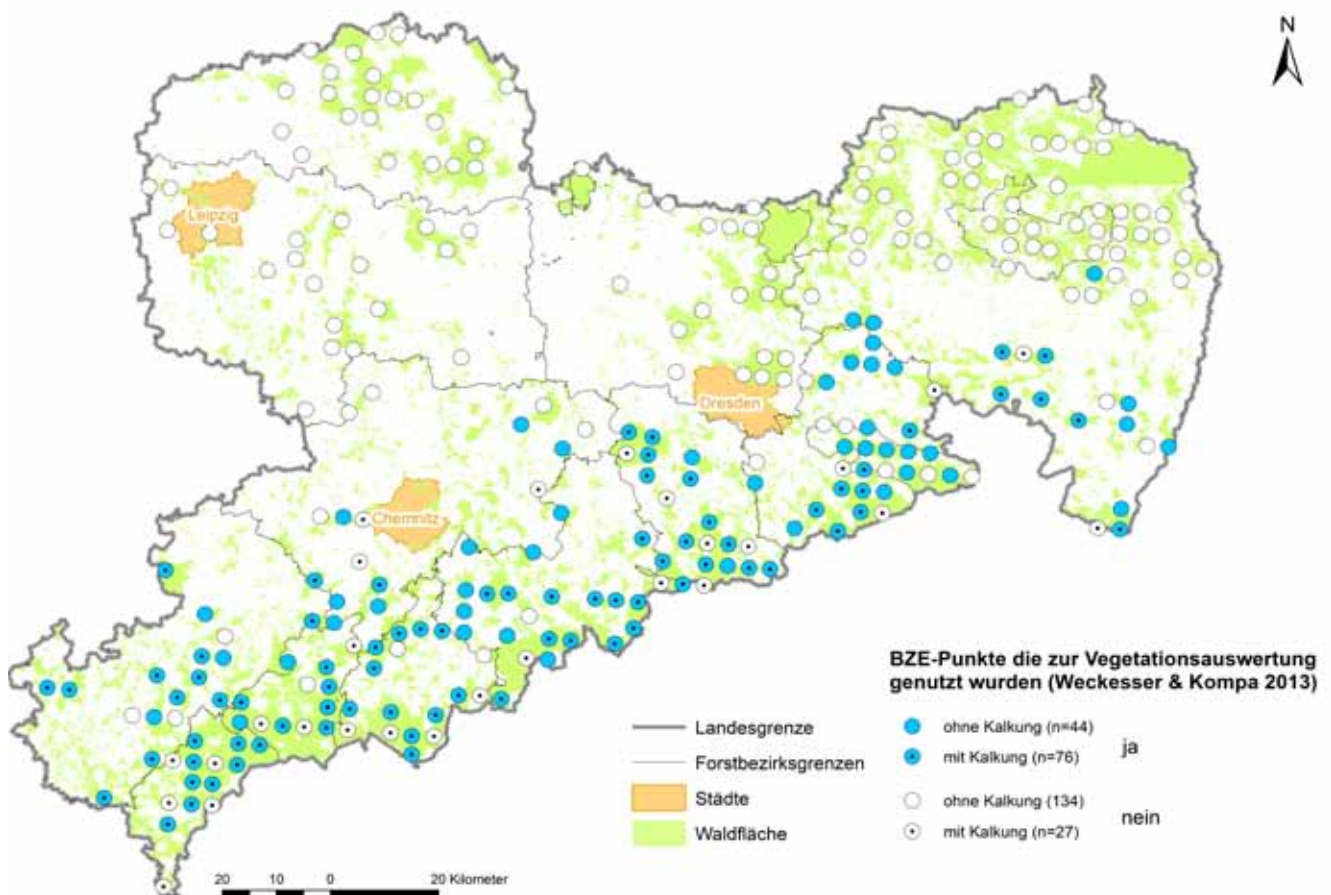


Abbildung I-41: Lage der verwendeten 116 BZE-Punkte (mit und ohne Kalkung) innerhalb der Kalkungskulisse für die Vegetationsauswertung von WECKESSER & KOMPA (2013)

Tabelle I-4: Deckungsgrade (\pm Standardabweichung) von Arten und Artengruppen der Krautschicht in Abhängigkeit zur Kalkungsanzahl, Deckungsgradsumme der Baumschichten (Weiser für Belichtung) 0-60 % (n=23); aus: WECKESSER & KOMPA (2013)

Arten / Artengruppe	0 x gekalkt (n=7)	1-2 x gekalkt (n=14)	3 x und mehr gekalkt (n=2)
Störzeiger	11,0 (\pm 19,1)	14,4 (\pm 17,6)	6,4 (\pm 2,7)
<i>Calamagrostis villosa</i>	0 (\pm 0)	7,2 (\pm 13,2)	1,1 (\pm 0,9)
<i>Deschampsia flexuosa</i>	16,2 (\pm 22,6)	4,0 (\pm 18,6)	4,4 (\pm 4,4)
Buchen-Verjüngung	0,1 (\pm 0,1)	0,1 (\pm 0,1)	4,4 (\pm 4,4)
<i>Oxalis acetosella</i>	0,1 (\pm 0,1)	4,5 (\pm 10,3)	0 (\pm 0)
Fichten-Verjüngung	17,3 (\pm 22,6)	7,7 (\pm 13,2)	1,0 (\pm 1,0)
<i>Vaccinium myrtillus</i>	0,4 (\pm 0,7)	4,6 (\pm 10,3)	9,5 (\pm 9,3)

Eine fördernde bzw. schädigende Wirkung der Kalkung lässt sich entlang ökologischer Faktoren wie Waldbindung oder Säure- und Basenzeigereigenschaften generell nicht festmachen. Vertreter unterschiedlicher Standortsansprüche profitieren von Kalkung bzw. von Nichtkalkung. Maßgeblich verantwortlich sind verbesserte Mineralisierungsbedingungen nach Kalkung (WECKESSER & KOMPA 2013).

SCHMIDT (2002) konnte bei einem Kalkungsvergleich in Niedersachsen feststellen, dass Wiederholungskalkungen nicht zu einer Verstärkung von Veränderungen in der Bodenvegetation führen, sondern vielmehr die bereits nach der Erstkalkung herbeigeführten Veränderungen vom Niveau her bestehen bleiben. Eine ähnliche Entwicklung wurde auch anhand der 116 BZE-Punkte in Sachsen bestätigt (WECKESSER & KOMPA 2013).

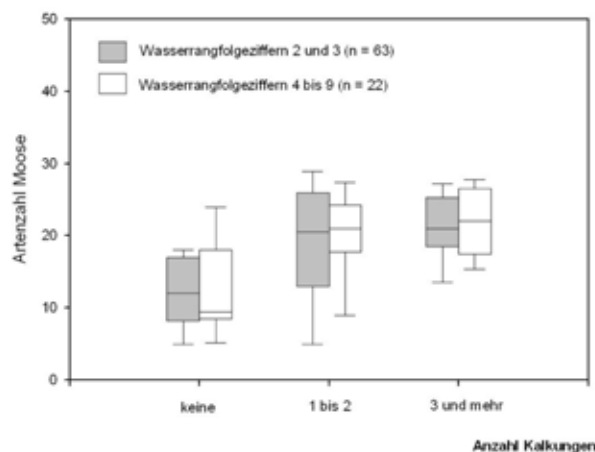
Die nicht gekalkten Flächen werden durch keine einzige Art positiv gegenüber den gekalkten Flächen charakterisiert, während auf den gekalkten Flächen einige Arten einen deutlichen Schwerpunkt aufweisen. Auffällige Unterschiede zwischen den ein- bis zweimal und den drei- und mehrfach gekalkten Flächen können nicht belegt werden (WECKESSER & KOMPA 2013).

Abbildung I-42: Absolute Artenzahlen in der Moosschicht der von der Fichte geprägten BZE-Punkte in Beziehung zur Anzahl der Kalkungen und zum Wasserhaushalt; aus: WECKESSER & KOMPA (2013)

3.6.2 Was passiert innerhalb der Moosschicht?

Hinsichtlich der Artenzusammensetzung weist ein großer Teil der ein- bis zweimal gekalkten Fläche keine Unterschiede zu den ungekalkten Flächen auf. Die Unterschiede im Aufbau der Moosschicht bestehen überwiegend in Häufigkeits- bzw. Deckungsgradunterschieden und weniger in einem tatsächlichen Artenwechsel (Abbildung I-42).

Arten wie *Brachythecium rutabulum* (Gemeines Kurzbüchsenmoos), *B. velutinum* (Samt-Kurzbüchsenmoos) und *Eurhynchium striatum* (Spitzblättriges Schönschnabelmoos) reagieren positiv auf eine Kalkung und profitieren von der erhöhten Nährstofffreisetzung. Keine dieser Arten fehlt jedoch auf den nicht gekalkten Flächen völlig, weil es sich um Ubiquisten handelt, die sich in den letzten Jahrzehnten vor allem auch aufgrund der erhöhten Stickstoffeinträge ausgebreitet haben (WECKESSER & KOMPA 2013).



3.7 Kalkung und Quellwasserchemie (Level II)

Seit 1993 werden Dauerbeobachtungsflächen (Level II-Flächen) in repräsentativen Waldökosystemen durch Sachsenforst betrieben. An vier der acht Monitoringflächen werden, neben dem Freiland- und Bestandsniederschlag sowie der Bodenlösung, insgesamt sieben Quellbäche in bewaldeten Einzugsgebieten beprobt und analysiert. Diese Erhebungen ergänzen den sächsischen Teil des internationalen Kooperativprogramms "Bewertung und Überwachung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Flüsse und Seen" (ICP Waters) im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (s. a. Kap. 2.4, vgl. Keitel 2013). Gerade Quellwässer eignen sich gut als sensitives Indikationssystem zur Beschreibung des ökochemischen Zustandes von Waldeinzugsgebieten und des

Stoffhaushaltes von Waldökosystemen (BEIER-KUHNLEIN et al. 1999), weil die Veränderungen des terrestrischen Ökosystems über das Bodensickerwasser zeitversetzt einen direkten Einfluss auf die Grund- und Quellwasserchemie haben (BACHE 1980; MATSCHULLAT et al. 1992). Zur Bewertung von Kalkungsmaßnahmen auf die Gewässerchemie ist eine Betrachtung des pH-Wertes und der Nitratkonzentration notwendig. Ein gewünschter positiver Effekt der Kalkung ist ein allmählicher Anstieg des pH-Wertes in der Bodenlösung und zeitversetzt auch in den Quellen der unmittelbaren Umgebung. Gleichzeitig wird nach Kalkungen durch die Anregung der biologischen Prozesse in Humus und Mineralboden als negativer Effekt eine Erhöhung der Nitratkonzentration befürchtet.

Nachfolgende Tabelle gibt Auskunft über die Kalkungsmaßnahmen im Umfeld der jeweiligen Level II-Flächen.

Tabelle I-5: Zeitpunkt der Kalkung im unmittelbaren Einzugsgebiet der Level II-Flächen

Level II-Fläche	1. Kalkung	2. Kalkung	3. Kalkung	4. Kalkung
Klingenthal	1991	1996	2002	-
Olbernhau	1989	1996	2001	-
Cunnersdorf	-	-	-	-
Altenberg	1988	1994	2001	2011

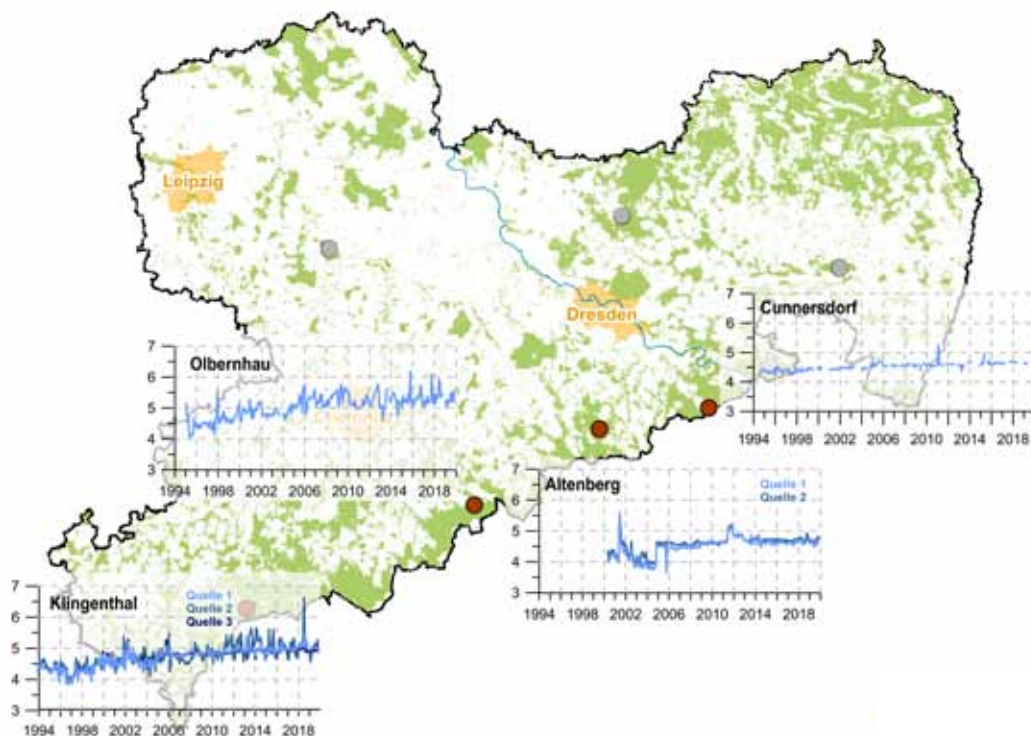


Abbildung I-43: Zeitlicher Verlauf der pH-Werte in den sieben Quellen von vier sächsischen Level II-Flächen

Die pH-Werte der Quellwässer steigen bei allen vier Stationen kontinuierlich an, zeigen aber eine ungerichtete Reaktion auf die durchgeführten Kalkungen im Einzugsgebiet. Zeitverzögert steigt der pH-Wert in Olbernhau als Folge der Kalkung 1996 zwischen 1997 und 1998 deutlich an. Eine ähnliche Reaktion ist 2012 in Altenberg als Folge der Kalkung 2011 sichtbar. Im Gegensatz dazu hatte die Kalkung 1996 in Klingenthal keine Auswirkung auf den pH-Wert.

Im zeitlichen Verlauf ist auf allen vier Stationen ein Rückgang der Nitratkonzentrationen (NO_3) in den Quellwässern erkennbar. Der stärkste Rückgang zwischen den beiden Perioden 1995–1999 (hohe Immissionsbelastung) und 2011–2015 (moderate Immissionsbelastung) zeigt sich in Cunnersdorf und Klingenthal. Während die aktuellen NO_3 -Konzentrationen in Klingenthal, Cunnersdorf und Altenberg unter 3 mg/l liegen, ist der Gehalt in Olbernhau mit 7,7 mg/l höher.

Anstiege der Nitratkonzentrationen infolge von Kalkungen sind bei allen drei gekalkten Stationen nicht belegbar. Die Anstiege in den Jahren 2000 und 2004 in Klingenthal könnten ggf. als versetzte Reaktion des Ökosystems auf die Kalkungen 1996 und 2002 interpretiert werden (Peaks bis 8 mg/l). Jedoch fallen die NO_3 -Konzentrationen hier wieder schnell auf das Ausgangsniveau zurück bzw. liegen darunter. Für die Stationen Olbernhau und Altenberg konnten derartige Reaktionen nicht beobachtet werden (Abbildung I-44).

3.7.1 Was sagt die Literatur zur Nitratproblematik?

ARMBRUSTER et al. (2000) konnten nach einmaliger Ausbringung von 4 t Kalk pro ha im Einzugsgebiet des Schluchsees nur geringe Auswirkungen auf die chemische Zusammensetzung der Gewässer finden. Insbesondere eine Erhöhung der Nitratkonzentration konnte nicht festgestellt werden. Es wurde lediglich ein Nitratanstieg im Sickerwasser des oberen Mineralbodens in den ersten drei Jahren nach Kalkausbringung beobachtet (BRAHMER 1994; ARMBRUSTER & FEGER 1998). Eine Reaktion des gesamten Einzugsgebietes ist nicht erfolgt.

Weitere Untersuchungen von ARMBRUSTER et al. (2004) im Einzugsgebiet des Rotherdbachs (Osterzgebirge) zeigten keine Effekte der Kalkung auf den Nitratgehalt. Kurzzeitige Effekte auf pH-Wert, Al-, Ca- und Mg-Konzentration waren nach 2,5 Jahren wieder an die Ausgangswerte angeglichen. Langfristige Effekte wie eine Abnahme der Protonen-, Sulfat- und Aluminiumkonzentrationen konnten vor allem den Eintragsrückgängen mit der Deposition zugeordnet werden, weil dieser Trend bereits vor der Kalkgabe erkennbar war. Überwachungsdaten der Landesperrverwaltungen zeigen für bewaldete Trinkwassereinzugsgebiete spätestens seit 1985 abnehmende Nitrat-Konzentrationen (Abbildung I-45 auf nachfolgender Seite).

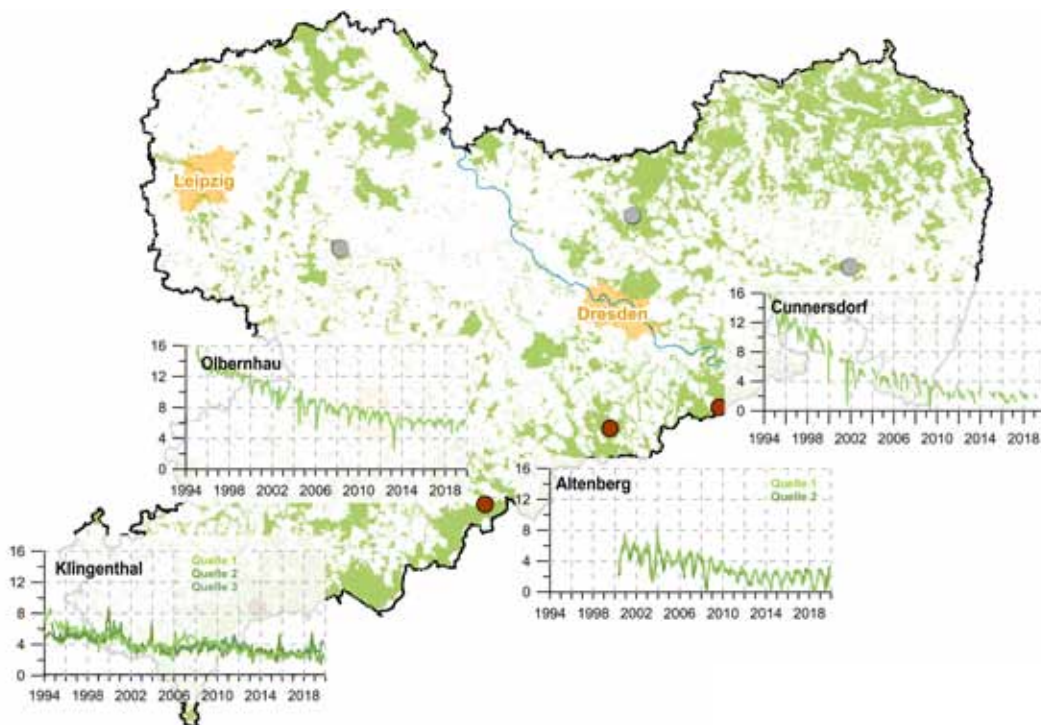


Abbildung I-44: Zeitlicher Verlauf der Nitratkonzentrationen in den sieben Quellen von vier sächsischen Level II-Flächen

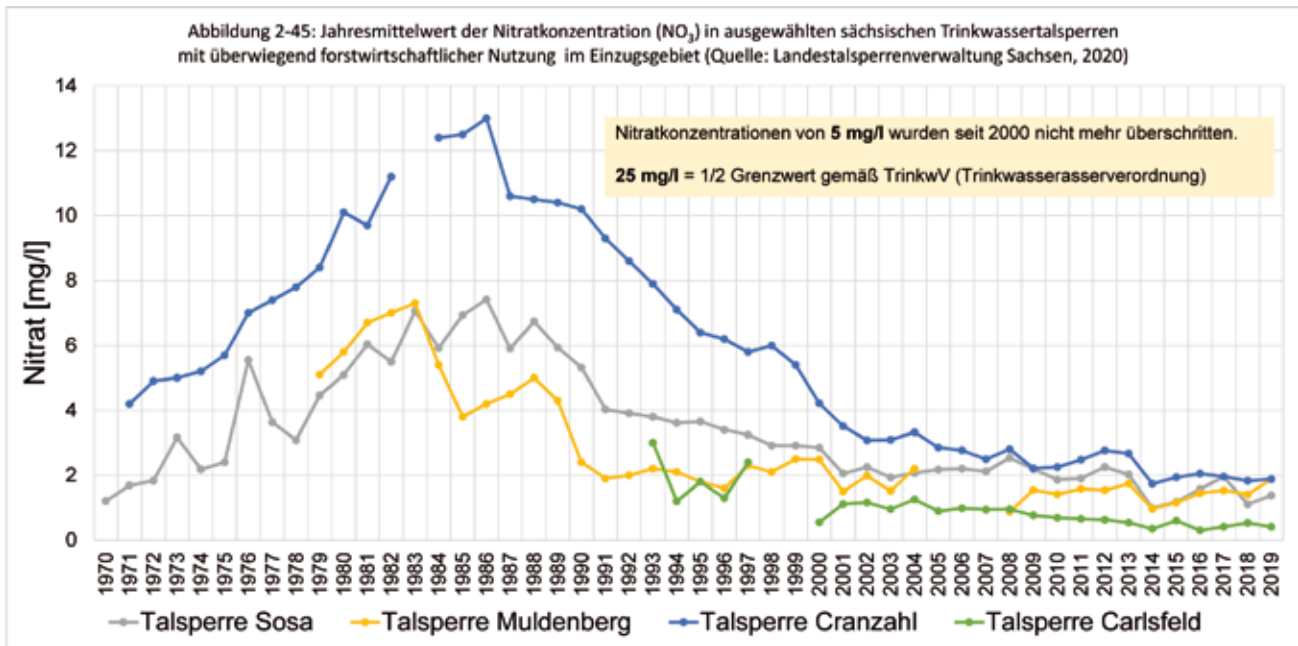


Abbildung I-45: Jahresmittelwert der Nitratkonzentration (NO₃) in ausgewählten sächsischen Trinkwassertalsperre mit überwiegend forstwirtschaftlicher Nutzung im Einzugsgebiet (Quelle: Landestalsperrenverwaltung Sachsen, 2020)

4 Organisatorische Rahmenbedingungen

Die forstliche Bodenschutzkalkung im Wald wird durch den Staatsbetrieb Sachsenforst durchgeführt. Strategische und haushaltsrechtliche Grundlagen für die Durchführung der Bodenschutzkalkung sind:

- Fachpolitische Programme, Förderprogramme und Förderrichtlinien
- Verfahrensvorschriften des Fachministeriums zu Maßnahmen der Waldkalkung im Freistaat Sachsen
- Bewilligungsbescheide zur Förderung der Bodenschutzkalkung bzw. planmäßige Haushaltsmittel zur Durchführung der Bodenschutzkalkung

Die **Forstbezirke** sind verantwortlich für die primäre Flächenplanung, die administrative Vorbereitung und Begleitung der Bodenschutzkalkung, die Kontrollen zur Qualitätssicherung und die Prüfung der Rechnungen zu den Kalkungsmaßnahmen. Dazu zählen insbesondere die Kontrolle der ausgebrachten Mengen sowie der Ausbringungs- und Kalkqualität über definierte Arbeitsnachweise und Probenahmen.

Das **Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft** (KWuF) erstellt Flächenverzeichnisse für die Kalkungsmaßnahmen auf Basis der Flächenplanungen der Forstbezirke. Gemeinsam mit der **Vergabestelle** führt es die Ausschreibung und die Vergabe der Leistungen durch. Dem KWuF obliegt die Koordination der Qualitätssicherung bei der Durchführung der Bodenschutzkalkung. Bei vollständigem und beanstandungsfreiem Vorliegen der zahlungsbegründenden Unterlagen erfolgt durch das KWuF die Anordnung der Rechnungsbeträge für die erbrachten Leistungen.

Der **Zeitplan** für Planung und Durchführung sowie die grundsätzlichen Verantwortlichkeiten sind aus Anhang 9.1 ersichtlich. Weil die Bodenschutzkalkungen in Sachsen wegen der vorangehenden Brut- und Setzzeiten und der im Herbst zunehmend ungünstiger werdenden Witterungsverhältnisse in der Zeit von Anfang Juli bis Ende Oktober durchgeführt werden, muss spätestens im September des Jahres vor der Kalkungsmaßnahme mit den Planungen begonnen werden.

5 Planung der Bodenschutzkalkung

5.1 Grundsätze zur Auswahl der Kalkungsflächen

Voraussetzung für den Erfolg von Bodenschutzkalkungen und die Minimierung unerwünschter Nebenwirkungen ist eine sorgfältige Auswahl der Behandlungsflächen. Diese hat durch fachkompetente Forstbedienstete mit sicheren Kenntnissen über die Standorts- und Bestockungsverhältnisse sowie die Naturausstattung des Planungsgebietes anhand der nachfolgenden **Bewertungsgrundsätze zur Kalkungseignung** zu erfolgen.

Als Entscheidungsgrundlagen werden verwendet:

- die Forstgrundkarte mit Informationen über vorangegangene Kalkungsmaßnahmen
- die forstliche Standortkartierung
- Ergebnisse des forstlichen Monitorings zum Oberbodenzustand
- die Waldfunktionenkartierung
- die Biotopkartierung
- Bestandesinformationen aus dem Waldinformationssystem
- naturschutzfachliche Planungen

Zur langfristigen Beweissicherung und für wissenschaftliche Untersuchungen sollten „Nullflächen“ in der Größe von etwa ein bis drei Abteilungen mit gebietstypischer Standortsausstattung dauerhaft von Kalkungen ausgeschlossen werden.

Die ausgewählten Kalkungsflächen sind zu praktikablen Behandlungseinheiten zu arrondieren.

Die nachfolgenden textlichen Ausführungen werden ergänzt durch das **Ablauf- und Entscheidungsschema zur Auswahl der Kalkungsflächen** in Anhang 9.2 mit der fluss schematischen Darstellung der wesentlichen Planungsschritte.

5.1.1 Ausweisung der Kalkungskulisse

Anfang der 1990er Jahre lagen ca. zwei Drittel der Waldfläche Sachsens in damals aufgrund großflächig aufgetretener Waldschäden ausgeschiedenen Im-

missionsschadzonen (vgl. Kapitel 2.3). Die potenzielle Kalkungskulisse umfasst die Gebiete, in denen in der Vergangenheit die größten Säurefrachten zur Deposition kamen und die bereits von ihrer Geologie relativ basenarm sind – die Standortsregion Bergland sowie

Teile des Erzgebirgsvorlandes und der Ostlausitzer Vorberge. Diese Kulisse reicht von den Kammlagen bis zu dem Unteren Bergland bzw. dem Gebirgsvorland im Hügelland (Abbildung II-1).

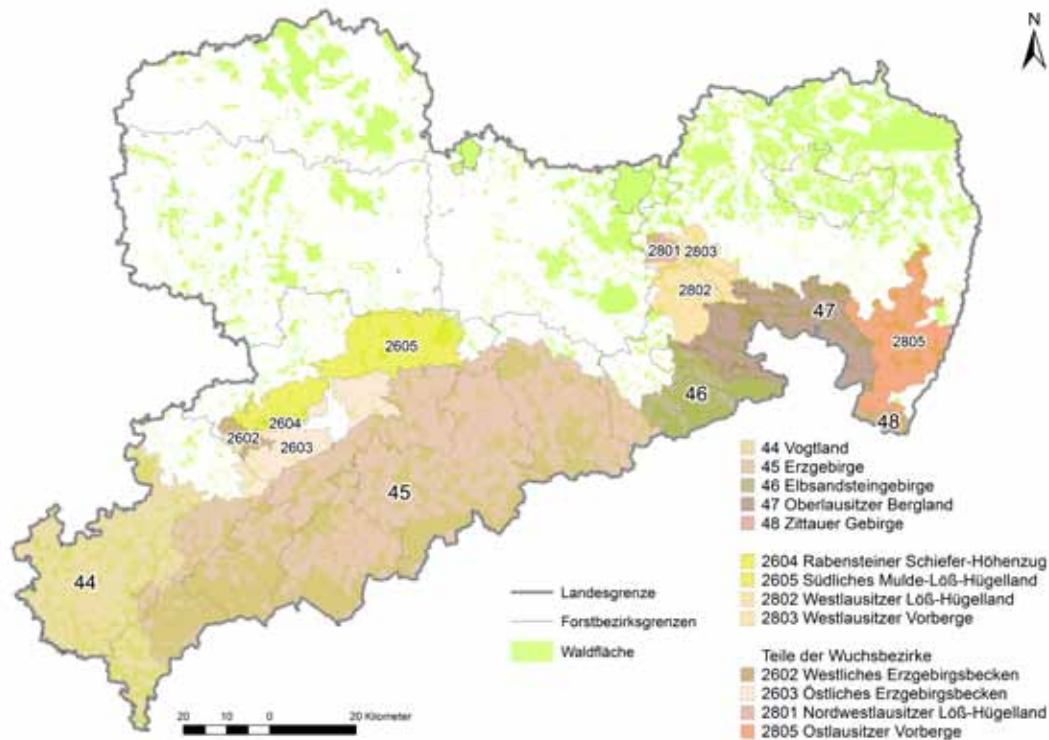


Abbildung II-1: Potenzielle Kalkungskulisse zur Kompensation von Basenverlusten durch Versauerung infolge extremer Sulfateinträge, abgeleitet aus den Wuchsgebieten und (Teil-)Wuchsbezirken

Im Kalkungsleitfaden (LEUBE 2000) wurde diese Kulisse durch die damals gültigen forstlichen Klimastufen Kf, Hf, Mf, Mm, Uff, Uf und Uk umrissen. Aufgrund des bereits messbaren Klimawandels wurde diese (statische) Klimagliederung durch die aktuell gültige Dynamische Forstliche Klimagliederung abgelöst. Wegen ihres klimadynamischen Ansatzes ist die Bindung der Kalkungskulisse an Einheiten der aktuellen Klimagliederung nicht sinnvoll. Deshalb wird die potenzielle Kalkungskulisse jetzt mit Hilfe der relativ unveränderlichen Abgrenzungen der forstlichen Naturräume beschrieben.

Die potenzielle Kalkungskulisse beinhaltet folgende forstliche Naturräume:

- Wuchsgebiet 44 Vogtland
- Wuchsgebiet 45 Erzgebirge
- Wuchsgebiet 46 Elbsandsteingebirge
- Wuchsgebiet 47 Oberlausitzer Bergland
- Wuchsgebiet 48 Zittauer Gebirge

- Wuchsbezirk 2602 Westlausitzer Erzgebirgsbecken, (nur der Teil des Lungwitzer Rotliegend-Mosaikbereiches)
- Wuchsbezirk 2603 Östliches Erzgebirgsbecken, (ohne Mosaikbereich Chemnitzer Rotliegend-Becken)
- Wuchsbezirk 2604 Rabensteiner Schiefer-Höhenzug
- Wuchsbezirk 2605 Südliches Mulde-Löss-Hügelland
- Wuchsbezirk 2801 Nordwestlausitzer Löss-Hügelland (nur der Teil der Luchsenburger Makroklimaform)
- Wuchsbezirk 2802 Westlausitzer Löss-Hügelland
- Wuchsbezirk 2803 Westlausitzer Vorberge
- Wuchsbezirk 2805 Ostlausitzer Vorberge (ohne die Exklaven im Tiefland [Dubrauer Gesteins-Mosaikbereich, Kollmer Gesteins-Mosaikbereich], ohne Görlitzer Makroklimaform)

5.1.2 Bewertungsgrundsätze zur Kalkungseignung

A) Entscheidungskriterium Kalkungsdokumentation

- Datenquelle:** Dokumentationen der vorangegangenen Kalkungen
- Grundsatz:** Ausschluss aller Flächen mit kürzer als zehn Jahre zurückliegenden Kalkungen

Nachdem die meisten Waldflächen mit stark versauerten Böden in der Kalkungskulisse bis 2006 in höhenstufenabhängigen Intervallen von fünf bis neun Jahren bereits zwei- bis dreimal gekalkt worden sind, war die Umkehr des Trends einer fortschreitenden Versauerung der Waldböden erfolgreich eingeleitet. Gleichzeitig waren insbesondere die Schwefelsäureeinträge mit den Maßnahmen zur Luftreinhaltung deutlich zurückgegangen. Zur Pufferung der verringerten atmosphärischen Säureeinträge genügte ein längeres Wiederholungsintervall. Deshalb sollten ab 2007 auf bereits gekalkten Flächen erneute Bodenschutzkalkungen frühestens zehn Jahre nach der letzten Kalkung erfolgen.

B) Standortkundliche Entscheidungskriterien

- Datenquelle:** Forstliche Standortskarte

B.1. Merkmal Standortinformation

- Grundsatz:** Ausschluss von Waldflächen ohne Standortinformationen

Um die Bodenschutzkalkung sachgerecht durchführen zu können und um nachteilige Beeinflussungen sensibler Standorte zu vermeiden, sind Standortinformationen notwendig. Ohne Kenntnis der Standortverhältnisse einer Waldfläche muss eine Kalkung unterbleiben.

B.2. Merkmal Bodenfeuchtegruppe

Hydromorphe Standorte

- Grundsatz:** Ausschluss von hydromorphen Standorten

Organische und mineralische Nass-Standorte haben bedeutsame wasserwirtschaftliche, ökologische und naturschutzfachliche Funktionen in der Landschaft. Eine Kalkung kann diese Funktionen nachteilig beeinflussen.

Bachtälchen und aueartige Überflutungsstandorte sind nicht kalkungsbedürftig.

Die wechselfeuchten Standorte (mit stärker ausgeprägtem Wechsel von Nass- und Trockenphasen) sind durch die Ungunst der bodenphysikalischen Faktoren dominiert. Eine Bodenschutzkalkung bewirkt keine Abhilfe.

Auf den vorstehend aufgeführten Standorten sind durch lateralen Wasserzug bzw. mögliche Abschwemmungen keine flächenscharfen Kalkwirkungen zu erwarten, jedoch können angrenzende Flächen nachteilig beeinflusst werden.

- O** Organische Nass-Standorte → ausschließen
N Mineralische Nass-Standorte → ausschließen
B Bachtälchen-Standorte → ausschließen
Ü Auenartige Überflutungsstandorte → ausschließen
W1 Wechselfeuchte Standorte → ausschließen
W2/W3 Wechselfrische bzw. wechselrockene Standorte
... mit Fichtenbeständen (Wurfgefahr!) → ausschließen
... mit Laubholz-, Lärchen- und Kiefernbestockungen können einbezogen werden, wenn Bestand und Mikrorelief für eine Kalkung sprechen.

Anhydromorphe Standorte

- Grundsatz:** Ausschluss von stark exponierten oder stark geneigten Standorten

Auf schluchtwaldähnlichen Standorten (Schluchten, schluchtähnliche Gräben, Rinnen) und auf Steilhängen sind durch lateralen Wasserzug und Abschwemmungen bei stärkeren Niederschlägen keine flächenscharfen Kalkwirkungen zu erwarten, jedoch können angrenzende Flächen nachteilig beeinflusst werden.

Für die spezifischen Standortverhältnisse von exponierten Trockenstandorten bewirken Bodenschutzkalkungen keine positiven Effekte. Auch hier würden Abschwemmungen ggf. angrenzende Flächen nachteilig beeinträchtigen.

- F** Schluchtwaldähnliche Standorte → ausschließen
S Steilhang-Komplexstandorte → ausschließen
X Schutzwaldartige, trockene Standorte → ausschließen

B.3. Merkmal Hangneigung

Grundsatz: Ausschluss von Steilhanglagen

Auf Steilhang-Standorten (Neigung >25°) sind durch Abschwemmungen bei stärkeren Niederschlägen keine flächenscharfen Kalkwirkungen zu erwarten, jedoch können angrenzende Flächen nachteilig beeinflusst werden.

H Steilhang-Standorte* → ausschließen
*) Standorte mit normaler Bodenbildung, sonst als Steilhangkomplex kartiert

Die auszuschließenden Bereiche mit Steilhang-Standorten können auch mittels eines Digitalen Geländemodells (DGM) identifiziert und abgegrenzt werden.

B.4. Merkmal Nährkraftstufe

Kräftige bzw. reiche Standorte

Grundsatz: Ausschluss von Standorten mit kräftiger oder reicher Stammnährkraft

K Standorte mit Nährkraftstufe kräftig → ausschließen
R Standorte mit Nährkraftstufe reich → ausschließen

Ausnahmsweise können kräftige oder reiche Standorte in die Kalkung einbezogen werden, wenn für die oberen 30 cm des Mineralbodens Basensättigungen <15 % festgestellt wurden.

Arme Standorte

Grundsatz: Ausschluss von Standorten mit armer Stammnährkraft, die mit trophisch anspruchslosen Zielbaumarten bestockt sind.

A Standorte mit Nährkraftstufe arm
... mit Kiefernbeständen → ausschließen

C) Entscheidungskriterium Standortzustand

Datenquelle: Analysen/Erhebungen und deren Regionalisierungen von Standortzustandseigenschaften (soweit vorhanden)

C.1. Mineralboden (0-30 cm Tiefe)

Grundsatz: Wenn Analysedaten bzw. repräsentative Regionalisierungen der pH-Werte und Basensättigung (BS) vorliegen, ist die Kalkungswürdigkeit anhand der

Zielwerte zu prüfen. Sind die Zielwerte erreicht, soll keine Kalkung erfolgen, um eine Aufbesserung der Standorte über das natürliche Potenzial hinaus zu vermeiden.

pH (H₂O) ≥ 4,2 → ausschließen
pH (KCl) ≥ 3,8 → ausschließen
BS ≥ 15 % → ausschließen

Arme Standorte (Podsole):

pH (H₂O) ≥ 3,8 → ausschließen
pH (KCl) ≥ 3,3 → ausschließen
BS ≥ 10 % → ausschließen

C.2. Auflagehumus

Grundsatz: Wenn Analysedaten bzw. repräsentative Regionalisierungen der C/N- und C/P-Verhältnisse im Auflagehumus vorliegen, ist die Kalkungswürdigkeit anhand der Zielwerte zu prüfen. Sind die Zielwerte erreicht, soll keine Kalkung erfolgen, um eine Aufbesserung der Standorte über das natürliche Potenzial hinaus zu vermeiden.

Beide Quotienten geben Aufschluss über den Humuszustand. Enge Verhältnisse weisen auf eine gute Bodenfruchtbarkeit und intensive mikrobielle Umsetzungsprozesse hin.

C/N-Verhältnis ≤ 20 → ausschließen
C/P-Verhältnis ≤ 250 → ausschließen

C.3. Morphologische Humusform

Grundsatz: Bei Vorliegen von Kartierungen bzw. repräsentativen Regionalisierungen der morphologischen Humusform sind Waldflächen mit Mull oder mullartigen Humusformen von der Kalkung auszuschließen, um eine Aufbesserung der Standorte über das natürliche Potenzial hinaus zu vermeiden.

Es gilt: Je biologisch inaktiver die Humusform, desto größer die Kalkungswürdigkeit (Rohhumus > rohhumusartiger Moder > Moder).

Standorte mit der Humusform Moderhumus und gleichzeitigem Vorkommen von Stickstoffzeigern (Springkraut, Brennessel, Holunder etc.) sind von der Bodenschutzkalkung auszuschließen.

Mull → ausschließen
Mullartiger Moder → ausschließen

D) Entscheidungskriterium Nullflächen

Datenquelle: Layer „Nullflächen“ im FGIS

Grundsatz: Ausschluss aller als Nullflächen gekennzeichneten Areale

Zur langfristigen Beweissicherung und für wissenschaftliche Untersuchungen werden „Nullflächen“ in der Größe von etwa ein bis drei Abteilungen mit gebietstypischer Standortsausstattung dauerhaft von Kalkungen ausgeschlossen. Ihre Auswahl erfolgt durch das Referat Standortserkundung, Bodenmonitoring, Labor am Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft.

E) Entscheidungskriterium Bestockung

Datenquelle: Waldinformationssystem (WIS), Fernerkundungsauswertungen, örtliche Sachkenntnis

E.1. Merkmal Baumart

Grundsatz: Ausschluss von Edellaubholzbeständen

Kalkungseignung:

Nadelholz (Fichte, Lärche, Kiefer, Sonstige)
vor

Laubholz (Rotbuche, Eiche, Birke, Aspe, Salweide, Eberesche)

Nadelhölzer rangieren wegen des höheren Auskämmeffektes ihres Kronendaches, ihrer schwer abbaubaren Streu (und insbesondere bei Fichten des zersetzungs-hemmenden Bestandesinnenklimas) in der Kalkungsbedürftigkeit vor Laubhölzern.

Laubhölzer profitieren wegen ihres höheren Nährstoffbedarfs (die Weichlaubholzarten Salweide, Aspe, Birke aufgrund des außerordentlichen Calcium- und Magnesium-Aufnahmevermögens) in besonderem Maße von Kalkungen. Mit ihrer erd-alkali- und eiweißreichen, leicht zersetzlichen Streu (Stickstoff, Phosphor) fördern sie die Bildung günstiger Humusformen und geschlossener Stoffkreisläufe. Deshalb sollte durch eine gezielte waldbauliche Förderung der Pionierbaumarten die Kalkung biologisch stabilisiert werden! In die Kalkungen einzubeziehen sind Rein- und Mischbestände der o. g. Baumarten ohne und mit Unter-/Voranbauten bzw. Naturverjüngungen.

Unter Edellaubholzbeständen sind zumeist günstige, biologisch aktive Humusformen vorherrschend, weshalb sie keiner Kalkung bedürfen. In Ausnahmefällen

können Bestände, die von Hainbuche, Linde, Ahorn oder Ulme dominiert werden, in die Kalkung mit einbezogen werden, wenn dort Moder oder schlechtere Humusformen ausgebildet sind.

E.2. Merkmal Kronenschlussgrad

Grundsatz: Ausschluss von einschichtigen Beständen mit Kronenschlussgrad $\leq 0,6$

Auf Freiflächen können Kalkungen durch sehr rasche Umsetzung verstärkten Humusabbau mit Freisetzung und Auswaschung von Nitrat bewirken. Freiflächen und Bestände, die innerhalb der kommenden zwei Jahre zum flächigen Abtrieb vorgesehen sind sowie auch einschichtige Bestände mit einem derzeitigen oder zu erwartenden Kronenschlussgrad (KSG) $\leq 0,6$ sind nicht zu kalken.

Andererseits sind Bestände mit einem KSG $\leq 0,6$ und gleichzeitigen Unter-/Voranbauten bzw. Naturverjüngungen, die die zugeführten und mineralisierten Nährstoffe zu nutzen vermögen, mit in die Kalkung einzubeziehen.

E.3. Merkmal Wuchsklasse

Grundsatz: Ausschluss von Kulturen auf Freiflächen

Kulturen auf Freiflächen sind wegen verstärkter Mineralisation und der Gefahr von Nitratauswaschungen von Bodenschutzkalkungen auszuschließen.

Jungwüchse und Stangenhölzer sind dagegen wegen ihres hohen internen Versauerungsdruckes bevorzugt einzubeziehen.

F) Entscheidungskriterium Waldfunktionen

Datenquelle: Waldfunktionenkarte, wasserwirtschaftliche bzw. naturschutzfachliche Karten bzw. GIS-Daten

F.1. Waldfunktionen, die generellen Kalkungsausschluss erfordern

Grundsatz: Ausschluss von Flächen, die aufgrund ihres rechtlichen Status, ihrer Schutzfunktion, ihrer funktionellen Bestimmung oder wegen ihrer ökologischen Sensibilität nicht gekalkt werden dürfen.

So sind generell auszuschließen:

- Flächen im **Nationalpark**
- Flächen in der **Biosphärenreservats-Kernzone** (Zone I)
- Flächen der **Schutzzone I in Wasserschutzgebieten**
- Flächen der **Schutzzone I in Heilquellenschutzgebieten**
- Flächen in **Überschwemmungsgebieten**
- **Naturwaldzellen**
- **Kalkungsempfindliche FFH-Lebensraumtypen** (FFH-LRT) [laut Referenzliste kalkungsempfindlicher FFH-LRT des Referates Naturschutz im Wald]
- **Kalkungsempfindliche Biotoptypen** [laut Referenzliste kalkungsempfindlicher Biotope des Referates Naturschutz im Wald]

F.2. Zulässigkeitsprüfung

Grundsatz: Ausschluss von Flächen, wenn die objektive Besorgnis besteht, dass Kalkungen nicht mit den Waldfunktionen bzw. Schutzziele vereinbar sind

Waldflächen mit den unten aufgezählten Funktionen unterliegen einem konkreten Rechtsschutz oder Forschungsziel. Ihre Einbeziehung in Kalkungen ist anhand vorhandener Rechtsnormen, Pflege- und Entwicklungspläne, Satzungen und Forschungskonzeptionen sowie auf Basis der Orts- und Fachkenntnisse der Kalkungsverantwortlichen und Revierleiter zu prüfen. Es ist so zu entscheiden, dass eine Gefährdung der Schutzziele/Waldfunktionen durch die Durchführung der Kalkung einerseits, aber auch durch deren Unterlassung andererseits, sicher ausgeschlossen wird.

Zu beachtende Waldfunktionen/Schutzkategorien:

- Wasserschutzgebiet
- Heilquellenschutzgebiet
- Wasserschutzwald
- Wald mit besonderer Wasserschutzfunktion
- FFH-Gebiet
- Vogelschutzgebiet (SPA)
- Naturschutzgebiet
- Naturdenkmal
- Schutzwald im Schutzgebiet
- Wildschutzgebiet
- geschütztes Biotop
- Wald mit besonderer Biotopschutzfunktion

- Wald für Forschung und Lehre
- Landschaftsschutzgebiet
- Biosphärenreservat

5.1.3 Abstimmung mit Wasser- und Naturschutzbehörden

Die zur Kalkung ausgewählten Flächen sind mit den örtlich zuständigen Wasser- und Naturschutzbehörden abzustimmen.

Sich aus der Abstimmung ergebende notwendige Änderungen sind in die Kalkungsplanung einzuarbeiten.

5.1.4 Berücksichtigung der Waldbesitzerinteressen

Die langfristige Minderung der Bodenversauerung in den Wäldern durch Bodenschutzkalkungen zur Stabilisierung der Waldökosysteme dient der Erhaltung des Waldes aus Gründen der Daseinsvorsorge und des Allgemeinwohls. Deshalb sind Bodenschutzkalkungen als förderfähige Maßnahme in Förderprogrammen der EU, des Bundes oder auf Landesebene ausgewiesen worden.

Werden durch die Förderung 100 % der Kosten der Kalkung für Waldflächen, die nicht im Eigentum des Freistaates Sachsen stehen, abgedeckt, so ist Sachsenforst gehalten, die Kalkungsplanung von Beginn an für alle durch das Förderprogramm begünstigten Waldeigentumsarten durchzuführen. Bei den zur Kalkung ausgewählten Waldflächen, die sich nicht im Eigentum des Freistaates Sachsen befinden, ist deren Eigentümern die Möglichkeit einzuräumen, innerhalb einer angemessenen Frist zu erklären, dass ihre Flächen nicht gekalkt werden sollen. Die Information der betroffenen Waldbesitzer kann durch ortsübliche, öffentliche Bekanntmachungen oder in anderer geeigneter Weise erfolgen. Erklärt ein Waldbesitzer, dass seine Waldflächen nicht gekalkt werden sollen, sind diese aus der Planung herauszunehmen.

In Fällen, in denen die geplanten Kalkungsmaßnahmen mit Kosten für die Waldbesitzer verbunden sein werden, ist der Eigentümerwille bereits zu Beginn der Planungen zu berücksichtigen.

5.2 Abgrenzung und Arrondierung der Kalkungsflächen

Die Auswahl der zu kalkenden Waldflächen erfolgt durch die Forstbezirke ab September des Jahres, das der Kalkungsmaßnahme vorausgeht. Sie geschieht in enger Abstimmung mit dem zuständigen Referat am KWuF entsprechend der Vorgaben des Leitfadens Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen.

Im Fokus stehen die für das entsprechende Jahr vorgesehenen Planungsgebiete, die sogenannten Kalkungsdistrikte. Kalkungsdistrikte sind verbindliche jahresweise Kulissen der Planungen und Maßnahmendurchführung. Diese konkreten Gebiete wurden 2013/14 unter Beachtung bisheriger Kalkungen zwischen den Forstbezirken und dem KWuF abgestimmt und festgelegt. Sie sind die Grundlage für mittelfristige sachsenweite Grobplanungen. Gleichzeitig haben die Forstbezirke, Forstbetriebe, Waldbesitzer sowie die Verantwortlichen für den Tourismus und andere evtl. indirekt Betroffene langfristige Kenntnis zu Jahr und Gebiet von Bodenschutzkalkungen und können sich so frühzeitig darauf einstellen.

Die Kalkungsplanung erfolgt digital mit dem Kalkungsplanungsmodul in FGIS online. Hier stehen alle für die Flächenauswahl notwendigen Informationen aus dem Forstlichen Geografischen Informationssystem (FGIS), dem Waldinformationssystem einschließlich der aktuellen forstlichen Standortskarte und aufbereitete Daten des forstlichen Umweltmonitorings zur Verfügung. Das web-basierte Planungsmodul ermöglicht es allen Beteiligten, in Echtzeit entsprechend ihrer Nutzerrechte auf die aktuellen Planungsstände zuzugreifen und miteinander zu kommunizieren.

Die Abarbeitung der Planungsschritte im Kalkungsplanungsmodul ist mit Statuswechseln im Workflow verbunden (Anhang 9.3). Das koordinierende KWuF prüft die Planungsstände und Arbeitsergebnisse stichprobenartig und kann über die Freigabe bestimmter Status auf die Einhaltung der Bewertungsgrundsätze zur Kalkungseignung hinwirken.

Flächen, die nach dem „Leitfaden Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen“ generell von der Kalkung auszuschließen sind, werden durch das Planungsmodul entsprechend der Vorgaben aus Kapitel 5.1.2 bereits als „automatische Ausschlussflächen“ vorprozessiert.

Dies betrifft alle Flächen,

- deren letzte Kalkung kürzer als 10 Jahre zurückliegt,
- die kein Holzboden bzw. nicht Wald sind,
- zu denen keine Standortinformationen vorliegen,
- mit den Bodenfeuchtegruppen bzw. -stufen O, N, B, Ü, W1, F, S, X,
- mit dem Merkmal „Steilhanglage“ (H) in der forstlichen Standortskarte bzw. durch digitale Geländemodelle ausgegrenzte Steilhänge,
- mit kräftiger oder reicher Nährkraftstufe,
- mit durch Regionalisierungen des forstlichen Monitorings ausgewiesenen günstigen Oberbodenzuständen (siehe 5.1.2 C),
- die als Nullflächen festgelegt wurden,
- in Wasserschutz- bzw. Heilquellenschutzgebieten der Zone I und in Überschwemmungsgebieten,
- in Naturwaldzellen,
- mit kalkungsempfindlichen FFH-Lebensraum bzw. Biototypen (laut Referenzliste des Referates Naturschutz im Wald)

sowie Kleinstflächen (Waldflächen mit technologisch oder wirtschaftlich ungeeigneten Zuschnitten) und Flächen, die aus sonstigen wichtigen Gründen dauerhaft von einer Kalkung ausgeschlossen werden sollen.

Die hochsensiblen Standorte (Bodenfeuchtegruppe O, N, B, Ü, F, S, X), die Nullflächen, Wasserschutzgebiete und Naturwaldzellen erhalten während der Berechnung der automatischen Ausschlussflächen einen Puffer von 40 m. Die W1-Standorte, Steilhanglagen (H), kräftige und reiche Standorte, Biotope und Lebensraumtypen sind mit 25 m sowie Überschwemmungsgebiete mit 20 m gepuffert.

Im Fortgang der Planung steht die Prüfung der Kalkungseignung der nicht automatisch ausgeschlossenen Waldflächen im Mittelpunkt. Dazu werden die entsprechenden Waldflächen durch die Bearbeiter in den Forstbezirken anhand der Kriterien der Bewertungsgrundsätze zur Kalkungseignung (siehe Kapitel 5.1.2), die nicht bereits zu einem automatischen Ausschluss geführt haben, bewertet. Diese Kriterien stehen dem Bearbeiter als visualisierbare Themen im Planungsmodul zur Verfügung. Im Zuge der Prüfung werden weitere Ausschlussflächen durch die Kalkungsverantwortlichen editiert. Hier fließen die vor Ort vorhandenen, vertieften Kenntnisse zu Bestockungsverhältnissen, Naturschutzobjekten, Wasserschutzgebieten u. a.

ein. Außerdem sind Ausschlussflächen als Puffer um Straßen, Eisenbahnlinien, Stromtrassen, Wohngebiete und andere Objekte zu editieren.

Im Ergebnis der Editierung sind alle nicht ausgeschlossenen Waldflächen des Kalkungsdistrikts die Kalkungsflächen der aktuellen Planung.

Am Ende steht die Arrondierung der vorliegenden Kalkungskulisse. Hier sind vor allem ungünstig zu befliegende, schmale oder spitz zulaufende Flächenformen von der Kalkung auszunehmen. Die Kalkung isoliert liegender, kleinerer Flächen ist wegen der deutlich weiteren Flugstrecken unwirtschaftlich. Deshalb sollte aus wirtschaftlichen Gründen die Flächensumme relativ zusammenhängender, benachbarter Kalkungsflächen nicht kleiner als 15 Hektar sein, sodass die Kalkmenge von wenigstens zwei Lastzügen von einem nahe gelegenen Kalkumschlagplatz rationell ausgebracht werden kann.

Nachdem der Kalkungsverantwortliche die Prüfung der Kalkungseignung für den Kalkungsdistrikt abgeschlossen hat, erfolgt eine Zuleitung des Arbeitsstandes an die zuständigen unteren Naturschutz- und Wasserbehörden, um die Planung mit diesen abzustimmen. Außerdem werden die nichtstaatlichen Waldbesitzer zu den geplanten Kalkungen ihrer Waldflächen über ortsübliche öffentliche Bekanntmachun-

gen beteiligt und können der Kalkung ihres Waldes widersprechen. Den Naturschutz- und Wasserbehörden und den Waldbesitzern ist eine ausreichende Frist zur Rückäußerung einzuräumen. Die sich aus den Abstimmungen mit den beteiligten Fachbehörden und Waldbesitzern ergebenden Änderungen werden in die Planungsdaten eingearbeitet.

Die Ausschlussflächen enthalten somit vier Kategorien: **a)** Flächen, die aufgrund der Bewertungsgrundsätze zur Kalkungseignung oder weiterer wichtiger Aspekte nicht zu kalken sind; **b)** Pufferbereiche, die bewirken sollen, dass über eventuelle Verdriftungen kein Kalk auf vorgenannte Flächen gelangt; **c)** Flächen, deren Eigentümer eine Kalkung ablehnen und **d)** Bereiche, die im Zuge der Arrondierungen ausgeschlossen wurden.

Am Beginn des Kalkungsjahres soll für die jeweils zu bearbeitenden Kalkungsdistrikte eine fachlich einwandfreie und aus wirtschaftlich-technologischer Sicht sinnvolle Kalkungsplanung vorliegen. Im KWuF werden diese im Zuge der Feinplanung mit den Abteilungen und Waldeigentumsformen verschnitten und Flächengrößen sowie Kalkaufwandsmengen berechnet und Lose für das Vergabeverfahren gebildet (Anhang 9.4). Diese digitalen Kalkungsprojekte sind die Grundlage für das folgende Vergabeverfahren und die eigentliche Kalkausbringung.

6 Leistungsbeschreibung und Vergabe

6.1 Einzusetzende Kalke

Zum Einsatz kommen kohlen-saure Magnesiumkalke (aufgemahlene Lagerstättenkalke) mit nachstehenden speziellen Anforderungen. Kohlen-saure Kalke mit Zusätzen von Magnesit und/oder Holzasche, **Brannt- und Löschkalke** sowie andere Materialien mit Anteilen von oxidisch und hydroxidisch gebundenem Calcium und Magnesium **dürfen nicht eingesetzt werden**.

6.1.1 Mindestgehalte an basisch wirksamen Bestandteilen

Die eingesetzten Kalke müssen folgende Mindestgehalte an basisch wirksamen Bestandteilen aufweisen:

Mindest-Nährstoffgehalte [Masse-%]	CaCO ₃ & MgCO ₃	MgCO ₃
	80	25

Angebote mit Kalken, die diese Mindestgehalte unterschreiten, werden bei der Zuschlagserteilung nicht berücksichtigt.

6.1.2 Aufmahlung und Feuchte der Kalke

Die Aufmahlung des Kalkes hat Einfluss auf die Tiefenwirkung und die zeitliche Umsetzung. Je feiner die Kalke aufgemahlen sind, umso rascher und tiefreichender wirken sie. Sie sind dann allerdings wegen ihres hohen Staubanteiles oft schwierig flächengenau zu applizieren, können Insekten schädigen und sind

nur kurzfristig, aber intensiver wirksam. Eine abgestufte Mischung aus Feinstkorn und größeren Korngrößen vermeidet diese technologischen sowie ökologischen Nachteile und ist zugleich ein Kompromiss hinsichtlich der erwünschten Kombination aus sofort einsetzender und gleichzeitig möglichst lang anhaltender, moderater Wirkung.

Granulatkalke sind trotz sehr feiner Primärkorn-Aufmahlung genau und staubarm auszubringen. Sie müssen transportstabil sein, aber bei Feuchtigkeitseinfluss zerfallen. Sie sind wie gemahlene Kalke einsetzbar, wegen des deutlich höheren Preises und dem erforderlichen Witterungsschutz bis zum Ausbringgerät bei der forstlichen Bodenschutzkalkung aber in Sachsen bisher nicht zur Anwendung gekommen.

Der Feuchtegehalt des Kalkes beeinflusst die Staubeentwicklung und das Ausfließen aus den Ausstreubehältern.

Die eingesetzten Lagerstätten-Kalke müssen in ihrer Aufmahlung und in ihrem Feuchtegehalt nachstehende Mindestforderungen erfüllen:

Übersteigt der Siebdurchgang in der Korngrößenstufe 0,09 mm den Anteil von 40 Masse-%, muss der Feuchtegehalt mindestens 6 % betragen.

Der Anteil des Siebdurchganges in der Korngrößenstufe 0,09 mm darf 50 Masse-% nicht übersteigen.

Tabelle: II-1: Mindestaufmahlung und Feuchtegehalte der eingesetzten Kalke

3,15 mm	2,0 mm	1,0 mm	0,09 mm	Feuchte
Mindest-Siebdurchgang [Masse-%]				[Masse-%]
97	90	70	33	3 - 8

6.1.3 Reaktivität der Kalke

Die Reaktivität von kohlensauen Kalken ist ein konventionelles Maß für ihre Umsetzungsgeschwindigkeit. In Verbindung mit der abgestuften Aufmahlung beeinflusst sie die Kombination aus sofort einsetzender und gleichzeitig möglichst lang anhaltender, moderater Kalkwirkung. Die Magnesiumverfügbarkeit im Wurzelraum ist für die Stabilität der Waldökosysteme von hoher Bedeutung. Grundsätzlich müsste bei geringerem $MgCO_3$ -Anteil die Reaktivität höher sein (beispielsweise wäre bei Kalk mit $< 25\%$ $MgCO_3$ eine Reaktivität von 30% zu verlangen).

Für die in Sachsen ausgeschriebenen Kalke mit $\geq 25\%$ $MgCO_3$ wird eine Mindestreaktivität von 10% gefordert.

Angebote mit Kalken, die diese Mindestreaktivität unterschreiten, werden bei der Zuschlagserteilung nicht berücksichtigt.

6.1.4 Schwermetallgehalte der Kalke

Bodenschutzkalkungen mindern die Azidität in Humus und Boden und damit die Gefahr, dass die in den Humusaufgaben akkumulierten Schwermetalle mobilisiert und über das Sickerwasser in die Hydrosphäre eingetragen werden. Andererseits enthalten auch Kalke Schwermetalle in unterschiedlichen Konzentrationen. Die eingesetzten Kalke sollen möglichst arm an Schwermetallen sein und dürfen die nachgenannten Richtwerte [mg Element pro kg Trockenmasse] maximal um 20% (analytischer Toleranzbereich) überschreiten. (Tab. II-2).

Angebote mit Kalken, die diese Richtwerte bereits in der Deklaration (Analysezertifikat) überschreiten, werden bei der Zuschlagserteilung nicht berücksichtigt. Damit wird im Sinne eines vorbeugenden Bodenschutzes sichergestellt, dass die durchschnittlichen jährlichen Elementeinträge aus gezielter Kalkung und forstlich nicht beeinflussbarer Deposition (Nieder-

schlag und Streu) nicht zur „Besorgnis“ einer schädlichen Bodenveränderung führen (Anhang 9.5).

6.2 Anforderungen im Vergabeverfahren

6.2.1 Allgemeine fachliche Kriterien im Vergabeverfahren

Der Anbieter muss die einzusetzenden Kalke im Angebot deklarieren. Er hat die von ihm angewandten Verfahren zum Kalkumschlag und zur Kalkausbringung inklusive der eingesetzten Geräte zu beschreiben. Setzt er für diese Arbeiten einen Unterauftragnehmer ein, ist dieser zu benennen. Die Angaben in Anhang 9.6 sind zwingend. Sie werden durch weitere Angaben in der Eigenerklärung (z. B. Referenzen, Versicherungsnachweise, luftverkehrsrechtliche Genehmigungen) ergänzt.

6.2.2 Deklaration der Kalke/Analysenattest

Der Anbieter muss die einzusetzenden Kalke im Angebot deklarieren nach ihrer Herkunft (Kalkwerk), ihren $CaCO_3$ - und $MgCO_3$ -Gehalten (gestaffelt mindestens nach 5% -Stufen, höchstens nach 1% -Stufen), ihrem Kornspektrum sowie ihrer Reaktivität. Zudem muss der Anbieter die Einhaltung der maximalen Schwermetall-Grenzwerte (siehe Kapitel 6.1.4) garantieren. Angebote mit Kalken, die nicht den geforderten Eigenschaften entsprechen, werden bei der Zuschlagserteilung nicht berücksichtigt.

Die Qualität der angebotenen Kalke ist im Angebot durch ein Analysenattest (nicht älter als 12 Monate) von einem anerkannten, unabhängigen Labor nachzuweisen (s. Tab. II-3). Die fachliche Kompetenz des Prüflabors ist durch Beifügen der Akkreditierungsurkunde nach DIN EN ISO/ISC 17025 zu belegen.

Tabelle II-2: Richtwerte maximal zulässiger Schwermetallgehalte für eingesetzte Kalke

Element	As	Cd	Cr-total	Hg	Ni	Pb	Tl	Cu	Zn
Richtwert	20	1	150	0,5	10	125	1	35	200
[mg/kg Trockenmasse]									

Das Analysenattest muss folgende Angaben enthalten:

- **Laboranschrift** mit Geschäftsführer oder Laborleiter
- **Methoden**, die dem Analysenergebnis zu Grunde liegen

Angebote ohne ein solches, vollständiges und aktuelles Analysenzertifikat werden bei der Zuschlagserteilung nicht berücksichtigt.

6.2.3 Angebote mit mehreren Kalken für ein Los

Der Bewerber kann bei begrenzter Lieferkapazität eines Kalkwerkes mehrere, qualitativ vergleichbare Kalken wahlweise zum Einsatz anbieten. Die Entscheidung

darüber bleibt dem Auftraggeber vorbehalten und wird vertraglich vereinbart.

Die wahlweise angebotenen Kalken sollen sich in ihrem $MgCO_3$ -Gehalt nicht um mehr als 1 Masse-% (absolut) unterscheiden. Ihre preisliche Bewertung erfolgt dann einheitlich anhand des Kalkes mit dem niedrigsten Gehalt (Masse-%) an basenwirksamen Bestandteilen (bwB) auf der Basis von $CaCO_3$ (Berechnung: Kapitel 6.2.7).

Werden wahlweise Kalken angeboten, die sich in ihrem $MgCO_3$ -Gehalt um mehr als 1 Masse-% (absolut) unterscheiden, hat der Bewerber seinem Angebot (Sonderblatt) eine vergleichende Preis-Bilanzrechnung beizulegen, aus der für die angebotenen Kalken zweifelsfrei die Preise in €/t % bwB auf der Basis von $CaCO_3$ hervorgehen.

Tabelle II-3: Deklaration der eingesetzten Kalken durch Analyseattest

Parameter	Hinweise	Aktuelle Methode nach*
Wassergehalt	gravimetrisch bestimmt nach Trocknung bei 115° C	VDLUFA Methodenbuch DIN ISO
Siebdurchgang nach dem Nassverfahren	Siebweiten: 3,15 mm; 2,0 mm; 1,0 mm; 0,09 mm	VDLUFA Methodenbuch
Reaktivität	Methode nach SAUERBECK & TIETZ	VDLUFA Methodenbuch
basisch wirksame Bestandteile	Neutralisation des Säureüberschusses	VDLUFA Methodenbuch
Gesamtgehalt an Ca und Mg	Berechnet als $CaCO_3$ und $MgCO_3$, Aufschluss: VDLUFA Methodenbuch II.1 2004 6.1.1*	VDLUFA Methodenbuch
Gesamtgehalt an As	Aufschluss: DIN EN 13346 2001-4*	DIN EN DIN ISO
Gesamtgehalt an Cd, Cr-total, Ni, Pb, Cu, Zn	Aufschluss: DIN EN 13346 2001-4*	DIN EN
Gesamtgehalt an Hg	Aufschluss: DIN EN 13346 2001-4*	DIN EN ISO
Gesamtgehalt an TI	Aufschluss: DIN EN 13346 2001-4*	DIN VDLUFA Methodenbuch

*) Die jeweils gültige aktuelle Methodenvorschrift wird fortlaufend mit dem zuständigen Labor bei der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) abgestimmt und in die Vergabeunterlagen übernommen.

Wird nur ein Kalk angeboten, so ist er zwingend einzusetzen. Ein Wechsel des Kalkes bedarf dann der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Auftraggebers, dem eine vergleichende Preis-Bilanzrechnung rechtzeitig zur Entscheidungsfindung vorzulegen ist.

6.2.4 Aufwandmengen

Die kohlen-sauren Magnesiumkalke (aufgemahlene Lagerstättenkalke) sind in einer **Aufwandmenge** von **3,0 t/ha** auszubringen. Die Gesamtaufwandmenge ergibt sich aus der Multiplikation mit der Kalkungsfläche.

6.2.5 Umschlag und Ausbringung des Kalkes

6.2.5.1 Subunternehmer, Logistikkonzept, Umschlag

In seinem Angebot hat der Bieter die von ihm angewandten Verfahren zum Kalkumschlag und zur Kalkausbringung sowie etwaige damit betraute Subunternehmer zu benennen.

Mit dem Angebot hat der Bieter ein zwischen ihm und dem jeweiligen Forstbezirk abgestimmtes Projekt zur Kalkausbringung (Logistikkonzept) vorzulegen. Hierfür vereinbart der Forstbezirk während des Vergabeverfahrens mit dem Bieter auf dessen Nachfrage einen Besichtigungstermin. Der Forstbezirk wirkt im Rahmen seiner Möglichkeiten unterstützend bei der Auswahl potenzieller Kalkumschlags- und Arbeitsflugplätze sowie bei der Festlegung der An- und Abfahrtswege als Basis für das durch die Bieter zu erstellende Logistikkonzept mit. Soweit ihm bekannt, benennt der Forstbezirk Ansprechpartner für die Einholung von Genehmigungen zur Befahrung privater oder kommunaler Wege und zur Nutzung privater oder kommunaler Wege oder Grundstücke als Lager-, Umschlag- und Arbeitsflugplätze durch den Bieter.

Bei der Besichtigung erhalten die Bieter vom Forstbezirk eine Übersichtskarte des Kalkungsobjekts mit allen Kalkungs- und Ausschlussflächen im Maßstab 1 : 25.000 (Kalkungskarte; Beispiel siehe Anhang 9.4). Die Besichtigung wird durch den Forstbezirk protokolliert. Das Protokoll ist dem Bewerber auszuhändigen. Eine Kopie verbleibt im Forstbezirk.

Auf Grundlage der Ortsbesichtigung erarbeiten die Bewerber das Projekt (Logistikkonzept) zur Kalkausbringung mit Angaben zu eingesetzten Fluggeräten, ausgewählten Flugplätzen und Logistik des Kalktrans-

portes sowie des Kalkumschlages. Bei der Auswahl der Flug- und Umschlagplätze und bei der Kalkausbringung sind ausreichende Abstandsflächen zu Siedlungs- und Gewerbegebieten einzuhalten. Die Beschreibungen und Eintragungen erfolgen auf der Kalkungskarte.

Der Kalkumschlag und die Lastaufnahme der Fluggeräte haben zwingend innerhalb des Territoriums der Bundesrepublik Deutschland zu erfolgen.

Beim Umschlag des Kalkes sind Technologien anzuwenden, die eine Abdrift in das Umfeld des Umschlagplatzes weitestgehend ausschließen.

Bei der Nutzung der Lager-, Umschlag- und Arbeitsflugplätze sind die naturschutzrechtlichen Belange zu beachten. Vor der Nutzung privater und kommunaler Grundstücke hat der Bieter/Auftragnehmer hierzu die erforderlichen Genehmigungen einzuholen und ggf. die zuständigen unteren Naturschutzbehörden einzubeziehen.

6.2.5.2 Ausbringungstechnik

Die Ausbringung der Kalke erfolgt mit dafür geeigneten Helikoptern und/oder Starrflüglern. Bei Helikoptern muss die Außenlasttragfähigkeit mindestens 650 kg betragen und ihr Rotordurchmesser darf 15 m nicht überschreiten. Flugzeuge müssen ein Mindestzuladungsvolumen von 1.500 kg vorweisen.

6.2.5.3 Anforderungen für den Einsatz von GPS

Das Luftfahrzeug muss mit einem satellitengestützten Navigationssystem ausgerüstet sein, das Positions- und Zeitinformationen erfassen kann. Es wird verlangt, dass die dynamischen Messungen des Navigationssystems mindestens im Sekundentakt erfolgen.

Die jeweiligen **Positionen des Luftfahrzeuges** müssen mit einer Lagegenauigkeit von < 5 m erfasst und aufgezeichnet werden. Die eingesetzte Technik muss gewährleisten, dass die Positionsdaten **während der einzelnen Kalkapplikationen von deren jeweiligem Start (Anfang Streuen) bis zu deren Ende (Ende Streuen)** eindeutig und nachvollziehbar aufgezeichnet werden.

Die Flugbewegungen sind permanent über Messpunkte mit Position (X-, Y-, Z-Koordinaten) und GPS-Zeit signalgesteuert und positionsbezogen in einem Bordrechner aufzuzeichnen. **Dabei müssen Flugbewegungen mit Kalkausbringung und sonstige Flugbewegungen eindeutig unterscheidbar aufgezeichnet werden.**

Die Vertragsbedingungen bestimmen, dass bei Ausfällen des Datenaufzeichnungssystems von mehr als drei Arbeitstagen der Auftraggeber berechtigt ist, das entsprechende Luftfahrzeug bis zur Wiederherstellung der Funktionstüchtigkeit des Systems (Reparatur, Austausch) von der Kalkung auszuschließen.

Mit seinem Angebot muss der Bewerber Nachweise über die Ausrüstung seiner Fluggeräte mit GPS zum Zwecke der Orientierung und zur Aufzeichnung der Flugbahnen während der Kalkapplikation einreichen. Außerdem ist ein reales Dokumentationsbeispiel von den zum Einsatz kommenden Flug- und Aufzeichnungsgeräten beizubringen. Angebote ohne diese Nachweise werden bei der Zuschlagserteilung nicht berücksichtigt.

6.2.6 Ausführungsfristen

Die Bodenschutzkalkung ist in den Monaten **Juli bis Oktober** durchzuführen.

Maßgeblich ist der in der Leistungsbeschreibung angegebene Zeitraum.

Der Bieter ist verpflichtet, die Lage und typischen Witterungsverhältnisse der zu kalkenden Waldgebiete - insbesondere frühe Wintereinbrüche in den Kamm- und Hochlagen der sächsischen Mittelgebirge - und entsprechende Hinweise des Forstbezirkes bei der Ab-

gabe seines Angebotes und bei der Durchführung der Kalkung zu beachten.

Generell ist die Kalkung im Arbeitsgebiet einzustellen bei:

- einer geschlossenen Schneedecke ab 10 cm in hängigem Gelände (Neigung > 5°) bzw.
- einer geschlossenen Schneedecke ab 20 cm in ebenem Gelände.

6.2.7 Kriterien für die Auftragserteilung

Maßgebend für den Zuschlag ist der auf den Gehalt an basisch wirksamen Bestandteilen (bwB) [auf der Basis % CaCO₃] bezogene Preis (€/t bwB CaCO₃) für die Gesamtmaßnahme.

Der Gehalt an basisch wirksamen Bestandteilen errechnet sich als Summe aus den Gehalten an bwB von Calciumkarbonat und dem stöchiometrisch umgerechneten Magnesiumcarbonatanteil:

$$bwB(CaCO_3) [\%] = CaCO_3 [\%] + (MgCO_3 [\%] * 1,19)$$

Bewertungspreis:

$$bwB \text{ [€/t]} = \frac{Kalk \text{ [€/t]} * 100}{bwB(CaCO_3) [\%]}$$

7 Durchführung und Dokumentation der Kalkung

7.1 Grundsätzliches zur Durchführung

Die Bodenschutzkalkung wird wegen der vorangehenden Brut- und Setzzeit nicht vor Juli begonnen. Sie ist bis Ende Oktober abzuschließen, weil die im Herbst einsetzenden ungünstigen Witterungsverhältnisse (häufige Nebel, Stürme, längere Niederschlagsereignisse) die aviotechnische Ausbringung behindern bzw. zum Teil unmöglich machen. Zudem würden Wintereinbrüche mit geschlossenen Schneedecken in der Regel wegen der Abschwemmung des Kalkes in der Tauperiode zum Abbruch der Kalkung führen (Kapitel 6.2.6).

Die Koordinierung und Kontrolle der Kalkungsdurchführung vor Ort obliegt den Forstbezirken. Die konkreten Einsatztermine werden nach Auftragserteilung zwischen den Auftragnehmern und den Forstbezirken abgestimmt, ebenso nicht witterungsbedingte Unterbrechungen der Arbeit.

Die Forstbezirke weisen die Piloten und Beauftragten des Auftragnehmers vor Beginn der Kalkausbringung in die Behandlungseinheiten ein und machen sie auf Ausschlussflächen sowie Mindestabstände aufmerksam. Für Kalkungsflächen in Nachbarschaft von besonders sensiblen Objekten (z. B. stark befahrene Straßen, touristische Einrichtungen, Siedlungen, besondere Biotope und Habitate sowie Naturschutzgebiete) sind Einzelheiten nach den konkreten örtlichen und zeitlichen Bedingungen durch den Forstbezirk und Auftragnehmer gemeinsam so festzulegen, dass das entsprechende Objekt durch die Kalkausbringung (Transport, Umschlag, Abdrift, Lärm, Überfliegen etc.) nicht beeinträchtigt wird. Die Einweisung ist unterschrieben durch den Auftragnehmer zu bestätigen.

Die Kalkungsverantwortlichen der Forstbezirke als Vertreter des Auftraggebers sind beauftragt, durch regelmäßige Waldfahrten/-gänge über die Kalkausbringung zu wachen und auf die Durchführung der Maßnahme in hoher Qualität hinzuwirken. Außerdem prüfen sie die Arbeitsnachweise der Auftragnehmer. Durch die Entnahme von Kalkproben und ihre anschließende Analyse in der BfUL ist die Kontrolle der Kalkqualität sichergestellt.

Die vertraglich fixierten Eigenschaften der Kalke hat der Auftragnehmer für die komplette Ware zum Ausbringungstermin im Wald, also bei praxisüblichen Feuch-

tegehalten, zu garantieren. Mischungen verschiedener Kalkqualitäten gleicher oder unterschiedlicher Herkunft auf den Umschlagplätzen sind nicht zulässig, weil sie die erforderliche Homogenität der Ware nicht gewährleisten.

Transport und Umschlag haben durch den Auftragnehmer verlustarm so zu erfolgen, dass der Kalk in der erforderlichen Qualität ausgebracht werden kann und keine Schäden an Wegen, Brücken und Beständen entstehen.

7.1.1 Aufgaben der Forstbezirke bei der Kalkungsdurchführung

Der örtlich zuständige Forstbezirk ist verantwortlich für

- die Information der Bevölkerung (Öffentlichkeitsarbeit), der Erholungseinrichtungen und Akteure im Tourismus,
- die Sperrung der Landeswaldgebiete während der Ausbringung des Kalkes,
- die Bereitstellung der erforderlichen Unterlagen im Bereich des Privat- und Körperschaftswaldes als Grundlage von Waldsperrungen durch untere Forstbehörden und Waldbesitzer während der Ausbringung des Kalkes bzw. die Sperrung im Auftrag der Waldbesitzer,
- die Einweisung des Auftragnehmers in das Arbeitsgebiet zu Beginn der Kalkung mit Hinweisen zu Gefahrenpunkten, nicht zu überfliegenden Gebieten, Mindestabständen zu Kalkungs-Ausschlussflächen und der Tragfähigkeit von Anfuhrwegen und Brücken,
- die Benennung eines Ansprechpartners,
- regelmäßige Kontrollfahrten/-gänge während der Kalkausbringung.

Der Forstbezirk ist verpflichtet, Erkenntnisse aus Kontrollen und Beobachtungen über Qualitätsmängel bzw. Gefahren bei der Durchführung der Kalkung dem Auftragnehmer unverzüglich schriftlich per E-Mail oder Fax mitzuteilen und so an einer Begrenzung möglicher Schäden - insbesondere an Wegen und Beständen - mitzuwirken.

Der örtlich zuständige Forstbezirk ist während der Kalkungsdurchführung mit folgenden Tätigkeiten beauftragt:

- Kontrolle der ausgebrachten Kalkmengen (tabellarische Nachweise/Zusammenstellung der gekalkten Flächen in Verbindung mit den Lieferscheinen, Umschlagplätzen; siehe Kapitel 8.1.1),
- Kontrolle der Kalkqualität (Probenahmen zur Kalkanalyse; siehe Kapitel 8.1.2),
- Kontrolle der Kalkausbringung (Sichtkontrollen vor Ort, Kontrolle der Ausdrücke der GPS-Befliegungskarten; siehe Kapitel 8.1.3),
- Kontrolle etwaiger im Vollzug der Kalkung durch den Auftragnehmer verursachter Schäden.

Die Kalkungsverantwortlichen dokumentieren ihre Aktivitäten zur Sicherung einer ordnungsgemäßen Kalkungsdurchführung in einem von ihnen geführten Nachweis (Beispiel siehe Anhang 9.7).

Im Zuge der Rechnungstellung durch den Auftragnehmer prüft der Forstbezirk die Arbeitsnachweise (siehe Kapitel 7.5) anhand der Rechnung. Sind diese sachlich und rechnerisch richtig, bestätigt er dies und leitet die zugehörigen Unterlagen im Original (Rechnung, tabellarische Zusammenstellung der gekalkten Flächen, Lieferscheine, GPS-Befliegungskarten) an das Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft (KWuF) weiter. Dort werden die Unterlagen auf ihre Vollständigkeit geprüft. Wenn keine Beanstandungen vorliegen, veranlasst das KWuF die Bezahlung der Rechnung.

7.1.2 Pflichten der Auftragnehmer bei der Kalkungsdurchführung

Der Auftragnehmer ist verantwortlich für die

- rechtzeitige Einholung aller für den Flugbetrieb erforderlichen luftfahrt- und arbeitsrechtlichen Genehmigungen und Nachweise,
- gesamte Durchführung der Kalkung einschließlich Vorbereitungen und Einholung aller seine Technik betreffenden erforderlichen Genehmigungen,
- termin- und qualitätsgerechte Kalkbereitstellung an den Lastaufnahmeplätzen,
- die Einholung der Genehmigungen zur Befahrung privater oder kommunaler Wege und zur Nutzung privater oder kommunaler Lager-, Umschlag- und Arbeitsflugplätze,
- die Festlegung der Lastaufnahmeplätze im Einvernehmen mit dem Forstbezirk,

- Einhaltung der rechtlichen Bestimmungen und Forderung der Wasserbehörden beim Umgang mit Wasserschadstoffen, insbesondere für
 - die Betankung der Fluggeräte außerhalb von Trinkwasserschutzzonen,
 - das Überfliegungsverbot für Trinkwassertalsperren,
 - die Bereithaltung von Gegenmitteln bei Havarien,
 - die Information der Wasserbehörde und des Forstbezirktes bei eingetretenen Havarien,
 - Einhaltung naturschutzrechtlicher Belange bei der Nutzung der Lager-, Umschlag- und Arbeitsflugplätze,
 - Überwachung der Fluggeräte, der Belade- und Bodentechnik sowie des zwischengelagerten Kalkes, schriftliche Benennung eines vor Ort verantwortlichen Beauftragten des Auftragnehmers.
- Die Durchführung der Kalkungsmaßnahmen kann erst beginnen, wenn dem Forstbezirk die Mitteilung über den Beauftragten vorliegt.

Der Auftragnehmer, seine Beauftragten und Subunternehmer sind darüber hinaus verpflichtet,

- Anordnungen des Auftraggebers bzw. seiner Beauftragten zu befolgen, die im Interesse der Schonung des Waldes, des Forst- und Jagdschutzes, aus forstbetrieblichen Gründen oder in besonderen Fällen mit Rücksicht auf die Erholungsfunktion und Tourismus erteilt werden;
- abzusichern, dass die Gesamtmasse eines Kalktransportfahrzeuges 40 t bzw. dessen Achslast 10 t nicht überschreitet und den besonderen Bedingungen der Waldwege (in der Regel keine öffentlichen Wege und Tragschichtdimensionierung für eine gelegentliche Nutzung ausgelegt) Rechnung getragen wird, insbesondere aber, dass Wege mit beschränkter Tragfähigkeit, auf die der Forstbezirk bei der Einweisung in das Arbeitsgebiet hingewiesen hat, nur mit der zulässigen Last befahren werden;
- einen aussagekräftigen und kontrollfähigen Arbeitsnachweis zu führen;
- mindestens einen Landeplatz zum Zwecke der Kontrolle im Freistaat Sachsen nachzuweisen;
- dem Beauftragten des Forstbezirktes Einsicht in die Daten zur GPS-gestützten Kalkausbringung im Bordcomputer zu gewähren;
- den Ausfall des Datenaufzeichnungssystems in einem Luftfahrzeug sofort dem Auftraggeber zu melden;

- zu gewährleisten, dass der Beauftragte des Forstbezirkes seine Kontrolltätigkeit (siehe Kapitel 8.1) ordnungsgemäß durchführen kann. Der dem Forstbezirk schriftlich benannte Beauftragte des Auftragnehmers vor Ort hat die ordnungsgemäße Durchführung von Kalkprobenahmen und die Kontrollprotokolle der GPS-Befliegungskarten unterschriftlich zu bestätigen;
- die arbeitsschutz- und luftverkehrsrechtlichen Vorschriften zu beachten und in alleiniger Verantwortung einzuhalten sowie sich über die maßgeblichen Vorschriften rechtzeitig zu vergewissern; den Flugbetrieb und die Kalkausbringung zu unterbrechen, wenn Gefährdungen nicht ausgeschlossen werden können oder aufgrund von Wind bzw. Thermik eine Abdrift des Kalkes auf nicht zu kalkende Flächen hervorgerufen wird;
- nach Durchführung der Kalkung die Arbeitsorte unaufgefordert sauber und in beanstandungsfreiem Zustand zu verlassen. (Hierzu zählt die Abfall- und Betriebsmittelbeseitigung, ggf. der Abtransport von nicht ausgebrachtem, zwischengelagertem Kalk sowie die Wiederherrichtung der Anfahrwege, Brücken und Zwischenlagerplätze, soweit diese nachweislich durch die Abwicklung der Kalkung beschädigt worden sind.)

Die im Bordrechner gesammelten Daten der Flugbewegungen sind unmittelbar nach Beendigung der Kalkungsmaßnahme eines Loses an das KWuF als digitale Vektordaten in dem vertraglich vereinbarten Format sowie zusätzlich als unveränderter ASCII-Datensatz des GPS-Systems, getrennt nach vollständigen Flugbewegungen und Flugbewegungen mit Kalkapplikation zu übergeben. Die vollständige digitale GPS-Dokumentation ist Bestandteil der Kalkungsmaßnahme.

7.2 Dosierung und Wiederholungszeiträume

Bei der forstlichen Bodenschutzkalkung werden kohlen-saure Magnesiumkalke (aufgemahlene Lagerstättenkalke) mit einer Applikationsdosis von 3,0 t/ha ausgebracht. Die erneute Kalkung von bereits gekalkten Waldflächen ist unter Beachtung der Bewertungsgrundsätze zur Kalkungseignung (siehe Kapitel 5.2.1) frühestens nach Ablauf von 10 Jahren möglich.

7.3 Ausbringverfahren und -geräte

Eine Kalkausbringung durch bodengebundene Technik kommt im Auftrag von Sachsenforst nicht (mehr) zur Anwendung. Der Einsatz von Verblase- und Streugeräten ist grundsätzlich nur von Straßen, Wegen oder ebenen Rückegassen möglich. Aufgrund der kaum zu beeinflussenden, mangelhaften Ausbringgenauigkeit im Bestandesinneren sind Streugeräte technologisch ungeeignet. Sie wurden in Sachsen bei der Kalkung von Beständen bisher nicht eingesetzt und auch zukünftig sollte auf sie verzichtet werden. Kalkverblasegeräte stellen hinsichtlich einer gleichmäßigen und genauen Ausbringung keine Alternative zur avio-technischen Applikation dar. Mit ihnen können nur trockene, fein gemahlene Kalke ausgebracht werden. Zu den mit erheblicher Staubentwicklung verbundenen Nachteilen käme das Ausbleiben einer möglichst lang anhaltenden moderaten Wirkung aufgrund der schnellen Kalkumsetzung.

Der Einsatz von Helikoptern oder Starrflüglern ermöglicht eine gleichmäßige, genaue Kalkapplikation und ist den Geländebedingungen im Mittelgebirge optimal angepasst. Starrflügler setzen im stärkeren Maße als Helikopter arrondierte Arbeitsflächen und möglichst lange Durchfluglängen voraus. Insbesondere bei kleinteiligen Behandlungseinheiten mit vielen Ausschlussflächen erweisen sich Helikopter als eine sehr genau arbeitende, geeignete Technologie.

Die Lande-/Umschlagplätze müssen auch bei feuchtem Wetter tragfähig, befahrbar, ausreichend groß und frei von Flughindernissen (Lichtleitungen usw.) sein. Beim Helikopter-Einsatz liegen die Umschlag-/Landeplätze (ca. 25 x 30 m) inmitten der Kalkungsflächen im Wald bzw. in deren unmittelbarer Nähe. Sie werden vom Piloten gemeinsam mit dem Forstbezirk unter Berücksichtigung des vorhandenen Wegenetzes für den Kalktransport und der Flugsicherheit festgelegt (siehe Kapitel 4.2.5.1). Starrflügler erfordern einen größeren Feldflugplatz (z. B. Wiese, ca. 30 m x 600 m), der nicht weiter als 5 bis 10 km vom Zentrum der Kalkungsflächen entfernt sein darf.

Die Kalktransport-Fahrzeuge (ca. 16 m lang, 3 m breit, 4 m hoch, bis 40 t schwer) erfordern entsprechend ausgebaute Straßen inklusive Brücken (Tragfähigkeit, lichte Höhe).

7.4 Ausbringengenauigkeit

Der Kalk ist in der geforderten Dosis gleichmäßig auf den zu bearbeitenden Flächen auszubringen. Um unvertretbar hohe partielle Über- und Unterdosierungen einzugrenzen, dürfen die ausgebrachten Kalkmengen auf den behandelten Flächen maximal $\pm 30\%$ um die Sollmenge schwanken. Unterdosierungen dürfen nicht planmäßig ausgenutzt werden.

Der Auftragnehmer verwendet bei der Befliegung die vom Auftraggeber gelieferten Geodaten (digitale Kalkungsprojekte), um über das bordeigene GPS die vorgegebenen Kalkungs- und Ausschlussflächen möglichst genau orten zu können. Dafür werden ihm durch das Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft bei Zuschlagserteilung die notwendigen digitalen Daten (Gesamtplanungslayer mit Kalkungsflächen, Ausschlussflächen, Waldeinteilung der Forstgrundkarte etc.) zur Verfügung gestellt.

Der Auftragnehmer muss gewährleisten, dass nicht zu kalkende Flächen von der Kalkung ausgespart bleiben. Dazu hat er einen witterungsabhängigen Mindestabstand (Beachtung von Wind und Thermik) von ca. 25 bis 50 m zu allen Ausschlussflächen einzuhalten. Für den Fall einer unsachgemäßen Kalkausbringung ist vertraglich zu vereinbaren, dass der Auftragnehmer für die Kosten privat- oder öffentlich-rechtlicher Inanspruchnahmen eintreten muss.

Die Überprüfung der gleichmäßigen Ausbringung erfolgt durch die Kalkungsverantwortlichen der Forstbezirke mittels Sichtkontrollen während der Kalkung und anhand von Karten mit Ausdrucken der GPS-Aufzeichnungen der Flugbewegungen mit Kalkapplikation (siehe Abschnitt 8.1.3 und Beispiel in Anhang 9.8). Fällt das Datenaufzeichnungssystem in einem Luftfahrzeug aus, ist der Auftragnehmer verpflichtet, dies sofort dem Auftraggeber zu melden. Für Ausfälle von mehr als drei Arbeitstagen ist vertraglich zu vereinbaren, dass der Auftraggeber dieses Luftfahrzeug bis zur Wiederherstellung der Funktionstüchtigkeit des Systems (Reparatur, Austausch) von der Kalkung ausschließen kann.

Die Ausdrücke der GPS-Befliegungskarten müssen mindestens die Waldeinteilung bis zur Abteilungsebene mit den zu kalkenden Flächen und die punkt- oder linienhafte Darstellung der Flugbahnen mit Kalkausbringung enthalten. Sie werden durch den Auftragnehmer im Vorfeld jeder Rechnungslegung an den Forstbezirk übergeben. Die Beauftragten des Forstbezirkes bewerten die GPS-Befliegungskarten gutach-

terlich. Auf jeder vorgelegten GPS-Befliegungskarte muss die gekalkte Fläche in den Abteilungen eine mindestens 90 %ige gleichmäßige Abdeckung aufweisen. Bei Unterschreitung der Toleranz um mehr als 30 % zur Sollmenge gilt die Fläche als mangelhaft bearbeitet. Sollten sich aus den Sichtkontrollen im Gelände und der Begutachtung der GPS-Befliegungskarte Anhaltspunkte ergeben, dass die ausgebrachten Kalkmengen um mehr als $\pm 30\%$ von der Sollmenge abweichen, kann sich eine intensivere Auswertung der vom Auftraggeber zu übergebenden GPS-Daten im Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft anschließen.

7.5 Arbeitsnachweise des Auftragnehmers

Der Auftragnehmer hat die ordnungsgemäße, flächenbezogene Kalkausbringung in der vertraglich vereinbarten Form durch Arbeitsnachweise zu dokumentieren. Die Arbeitsnachweise sind von ihm oder durch seinen vor Ort verantwortlichen und von ihm benannten Ansprechpartner zu unterzeichnen. Sie sind Voraussetzung und Grundlage seiner Rechnungslegung.

Der Arbeitsnachweis besteht mindestens aus:

- tabellarischen Nachweisen zu den gekalkten Flächen (siehe Beispiel Anhang 9.9),
- den zugehörigen Kalklieferscheinen im Original,
- sowie entsprechenden Ausdrucken der GPS-Befliegungskarten im Maßstab 1 : 10.000 (siehe Beispiel Anhang 9.8).

Der Arbeitsnachweis hat zu gewährleisten, dass

- die bearbeitete Fläche (Forstbezirk, Revier, Waldteil, Abteilung, Waldeigentumsform),
- der ausgebrachte Kalk nach Herkunft und Menge (Lieferscheine mit Nummer, Datum, Kalkwerk, flächenbezogene Gesamt-Kalkmenge),
- der Zeitpunkt der Kalkausbringung (Datum),
- die je Abteilung und Waldeigentumsform vorgesehene Sollmenge [t]

zweifelsfrei kontrollfähig ausgewiesen werden und dass eventuelle aus Qualitätsmängeln resultierende Forderungen des Auftraggebers örtlich und zeitlich eingrenzbar sind.

7.6 Dokumentation der Kalkung

Alle im Rahmen der Vorbereitung, Durchführung und Kontrolle der Kalkung erstellten Unterlagen tragen den Charakter von Dokumenten. Sie sind entsprechend der förderrechtlichen bzw. verwaltungsinternen Vorschriften aufzubewahren. Dazu zählen Unterlagen zur Planung, zur Finanzmittelbeantragung, aus dem Vergabeverfahren (Ausschreibung, Angebote, Zuschlag), die abgeschlossenen Verträge, die Protokolle der Kalkprobenahmen, die Ergebnisse der Kalkanalysen sowie alle Abrechnungsunterlagen und internen Notizen zur Vertragsabwicklung.

Auch die Aufzeichnungen der Kalkungsverantwortlichen über ihre Aktivitäten zur Sicherung einer ordnungsgemäßen Kalkungsdurchführung (Beispiel siehe Anhang 9.7) und deren Gesamteinschätzung (Beispiel siehe Anhang 9.10) werden am Ende der Kalkungsmaßnahmen im KWuF zusammengefasst und ausgewertet. Aus der Rückschau notwendige Anpassungen

bei der Umsetzung der Maßnahme, der Vertragsgestaltung bzw. bei der Zusammenarbeit mit den ausführenden Unternehmen werden in den folgenden Kampagnen berücksichtigt.

Alle forstlichen Bodenschutzkalkungen werden beim KWuF im Forstlichen Geographischen Informationssystem (FGIS) und einer dazu gehörigen Sachdatenbank dokumentiert. Hierfür werden die von den Auftragnehmern übergebenen digitalen Vektordaten der Flugbewegungen mit Kalkapplikation entsprechend aufbereitet.

Die so aufbereiteten Kalkungsvollzüge liegen im KWuF für den Zeitraum ab 1986 für alle Bodenschutzkalkungen in Sachsen vor. Sie umfassen die Lageparameter aller Kalkungsflächen sowie Informationen zu Ausbringungstechnologie, Kalkungsjahr, Kalksorte, Kalk-eigenschaften (Ergebnisse der Kontrollanalysen zur Zusammensetzung, Aufmahlung, Reaktivität, Feuchte, Schwermetallgehalten), Kalkdosis, Flächengrößen und Besitzformen.

8 Qualitätssicherung und Rückforderungen bei Abweichungen vom Vertrag

8.1 Kontrollen

Abweichungen von der vertraglich vereinbarten Kalk- und Ausbringqualität können den Erfolg der Bodenschutzkalkung mindern und zu Umweltrisiken führen. Deshalb muss die ordnungs- und vertragsgemäße Durchführung durch den Forstbezirk überwacht werden, damit

- notwendige Korrekturen eingeleitet,
- eine ordnungsgemäße Verwendung der Haushaltsmittel garantiert und
- nötigenfalls Schadenersatzforderungen gegenüber dem Auftragnehmer durchgesetzt werden können.

Dazu führen die Kalkungsverantwortlichen bzw. sie unterstützende Kollegen neben okularen Prüfungen während der Kalkausbringung vor Ort die nachfolgend beschriebenen Kontrollen durch.

Art und Umfang der Kontrollen sind in den Ausschreibungen anzukündigen und vertraglich zu fixieren. Sie sind gewissenhaft und mit größter Sorgfalt durchzuführen. Nur so können Vertragsverletzungen nötigenfalls „gerichtsfest“ bewiesen werden.

8.1.1 Kontrolle der Kalkmengen

Die Kontrolle der angelieferten bzw. ausgebrachten Kalkmengen durch den Forstbezirk erfolgt permanent durch

- (1) Gegenzeichnung der Lieferscheine bzw. Wiegekarten des gelieferten Kalkes durch den Auftragnehmer **und** den Beauftragten des Forstbezirkes sowie die Aufbewahrung einer Kopie im Forstbezirk,
- (2) Kontrolle der Kalkumschlagplätze auf nicht ausgebrachte Kalkmengen,
- (3) Prüfung der vom Auftragnehmer mit dem Arbeitsnachweis (Kapitel 7.5) vorgelegten tabellarischen Nachweise zu den gekalkten Flächen in Verbindung mit den dazugehörigen Lieferscheinen.

8.1.2 Kontrolle der Kalkqualität

(siehe auch Anhang 9.11)

- (1) Die Kontrolle des angelieferten Kalkes erfolgt stichprobenartig durch den Forstbezirk. In der Regel erfolgen **eine Probenahme** (= Erstellung von drei Endproben: A, B, C) **je 1.000 t auszubringenden Kalkes**, mindestens **aber zwei Beprobungen je Los**. Bei bisher noch nicht in Sachsen eingesetzten Kalken kann die Probenahme verdichtet werden. Die erste Beprobung erfolgt innerhalb von fünf Arbeitstagen nach Beginn der Kalkung.
- (2) Die Probenahme des gelieferten Kalkes erfolgt im Anhalt an die Bestimmungen der „Düngemittel-, Probenahme- und Analysenverordnung“ vom 27. Juli 2006 (BGBl I S.1822) in der zuletzt gültigen Fassung.
- (3) Die Probenahme erfolgt auf den Kalkumschlag- bzw. Lastaufnahmeplätzen aus dem ruhenden Gut (Haufwerk) mittels geeigneter Probenahmewerkzeuge in der Art, dass die Partie repräsentativ erfasst wird.
- (4) Dabei soll auch die Art des Kalkumschlags dokumentiert werden. Ein geschlossener Umschlag liegt vor, wenn der Kalk von der Werksauslieferung bis zur Ausbringung abgedeckt transportiert und gelagert wird. Bei offenem Umschlag hingegen liegt der Kalk am Umschlagplatz zwischenzeitlich frei, ist also der Witterung ausgesetzt (Anfeuchtung, Austrocknung, Verwehung).
- (5) Bei jeder Probenahme werden die **Einzelproben** von je ca. 200 g nach dem Zufallsprinzip entnommen, auf einer Gewebeplane gesammelt und **zu einer Mischprobe** vereinigt.
- (6) Aus der gut durchmischten **Probe** werden mit einer Kunststoffmessschaufel zufällig Teilmengen entnommen, aus denen **drei Endproben** (A, B, C) von **jeweils mindestens 500 g** gebildet werden, die in Probenbeutel überführt werden.
- (7) Zu jeder Endprobe gehört ein „Etikett für Kalkprobenahme“ (2-fach) mit folgenden Angaben: Forstbezirk, Revier, Datum, Probenehmer, Plomben-Nr., Kalktyp und Lieferwerk (siehe Anhang 9.12).
- (8) Ein Etikett wird direkt in den Probebeutel, das andere in den darüber gezogenen Beutel eingelegt (doppelte Verpackung).

- (9) **Jede** der drei Endproben wird mit einer **nummerierten Plombe** verschlossen und gesichert.
- (10) Jede Probenahme wird auf dem Formular „Protokoll zur Probenahme“ protokolliert (siehe Anhang 9.13) und vom Auftraggeber sowie einem Beauftragten des Auftragnehmers unterschrieben. Kommt dieser der Aufforderung des Auftraggebers zur gemeinsamen Probenahme nicht nach, wird diese seitens des Auftraggebers allein durchgeführt und die Weigerung im Protokoll vermerkt.
- (11) **Zwei Endproben** werden vom Forstbezirk **unverzüglich nach der Probenahme** zusammen mit den Kopien der Probenahmeprotokolle an das landwirtschaftliche Labor der BfUL zur Analyse übersandt.
- (12) **Eine Endprobe** jeder Probenahme verbleibt zusammen mit dem Original des Protokolls zur Kalkprobenahme beim Kalkungsverantwortlichen im Forstbezirk.

8.1.3 Kontrolle der GPS-gestützten Kalkausbringung

- (1) Der Einsatz von GPS in Luftfahrzeugen zu elektronischer Aufzeichnung und Kontrolle der Kalkausbringung ist zwingend.
- (2) Mit dem Auftragnehmer ist vertraglich zu vereinbaren, dass der Beauftragte des Forstbezirkes dazu berechtigt ist, jederzeit Einsicht in die Daten zur GPS-gestützten Kalkausbringung im Bordcomputer zu nehmen.
- (3) **Der Auftragnehmer liefert mit jeder Rechnungslegung eine GPS-Befliegungskarte im Maßstab 1 : 10.000 an den Forstbezirk.** Die GPS-Befliegungskarte muss mindestens die Waldeinteilung bis zur Abteilungssebene mit den zu kalkenden Flächen sowie die punkt- oder linienhafte Darstellung der Flugbahnen mit Kalkausbringung auf Basis der GPS-Aufzeichnungen enthalten (Beispiel siehe Anhang 9.8).
- (4) Der Kalkungsverantwortliche des Forstbezirkes bewertet gutachterlich die Aufzeichnung der Flugbahnen, wobei auf **jeder** vorgelegten GPS-Befliegungskarte eine mindestens 90 %ige gleichmäßige Abdeckung der gekalkten Fläche gewährleistet sein muss. Bezugseinheiten sind die zur Kalkung vorgesehenen und tatsächlich bearbeiteten Flächen der jeweiligen Abteilungen.
- (5) Das Ergebnis wird protokolliert und von dem

Kalkungsverantwortlichen des Forstbezirkes sowie dem vor Ort verantwortlichen Beauftragten des Auftragnehmers unterschriftlich bestätigt (Beispiel siehe Anhang 9.14). Der Auftragnehmer erhält eine Kopie des Protokolls mit den sich ggf. daraus ableitenden Folgerungen/Forderungen des Auftraggebers.

- (6) Bei Ausfall des Datenaufzeichnungssystems in einem Luftfahrzeug ist der Auftragnehmer verpflichtet, dies sofort dem Auftraggeber zu melden. Für Ausfälle von mehr als drei Arbeitstagen ist vertraglich zu vereinbaren, dass der Auftraggeber dieses Luftfahrzeug bis zur Wiederherstellung der Funktionstüchtigkeit des Systems (Reparatur, Austausch) von der Kalkung ausschließen kann.

8.2 Toleranzen und Rückforderungen bei Abweichungen vom Vertrag

Die Verträge mit den die Bodenschutzkalkung ausführenden Unternehmen sind so zu gestalten, dass bei Abweichungen von der vereinbarten Kalk- und Ausbringqualität, die den Erfolg der Bodenschutzkalkung mindern oder Umweltrisiken in sich bergen, Rückforderungen gegenüber dem Auftragnehmer geltend gemacht werden können. Damit wird das Interesse der beauftragten Unternehmen an einer ordnungsgemäßen Kalkungsdurchführung in hoher Qualität gefördert. Die nachfolgenden Toleranzen und Rückforderungsmöglichkeiten geben die in Sachsen von 1991 bis 2019 gewachsene Praxis wieder.

8.2.1 Nichteinhaltung der Kalkmengen

- (1) Wird vom Auftragnehmer die aus Kalkungsfläche [ha] und Kalkdosis [t/ha] resultierende, im Leistungsverzeichnis bezifferte Gesamtkalkmenge [t] nicht vollständig angeliefert (Lieferscheinkontrolle) bzw. ausgebracht (Restmengen auf Umschlagplätzen), so ist der Auftraggeber berechtigt, nach erfolglosem Ablauf einer von ihm zur Nacherfüllung bestimmten Frist auf Rechnung des Auftragnehmers nachzubessern. Eine Unterschreitung von maximal 3 % wird toleriert.
- (2) Bei einer Überlieferung bezogen auf die Gesamtkalkmenge [t] pro Los über 3 % hinaus erfolgt keine Vergütung für den Anteil oberhalb der Toleranzgrenze.

8.2.2 Nichteinhaltung der Kalkeigenschaften

- (1) Abweichungen von den vertraglich vereinbarten Kalkeigenschaften berechtigen den Auftraggeber zum Nachbesserungsverlangen und in nachfolgenden Fällen auch zur Preisminderung bzw. zur Nachbesserung auf Rechnung des Auftragnehmers.
- (2) Grundlage der Forderungen sind die Analyseergebnisse der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) von den während der Kalkung auf den Umschlagplätzen entnommenen Kalkproben (Kapitel 8.1.2).
- (3) Der Umfang der Forderung bezieht sich auf die durch die Probenahme repräsentierte Liefermenge (Lieferscheinkontrolle und Kontrolle des Protokolls der Kalkprobenahme).
- (4) Preisminderungen für mehrere Qualitätsmerkmale werden addiert.
- (5) Hält der angelieferte Kalk die zugesagten Qualitätseigenschaften
 - in mehreren Merkmalen oder mehrfach bei einem bestimmten Merkmal nicht ein, so kann dieser Kalk von künftigen Ausschreibungen ausgeschlossen werden;
 - in einem oder mehreren Merkmal(en) bei allen Probenahmen in dem betreffenden Los nicht ein, so ist der Auftraggeber berechtigt, die geltend gemachte Forderung auf die gelieferte Gesamtkalkmenge des Loses zu beziehen.

8.2.2.1 Gehalte an basenwirksamen Bestandteilen (bwB) auf Basis CaCO₃ und an Magnesiumkarbonat (MgCO₃)

- (1) Die vertraglich vereinbarten Gehalte an bwB (auf Basis CaCO₃) und an MgCO₃ dürfen im Vollzug der Kalkung einzelfallweise
 - **bei bwB**
(errechnet auf Basis CaCO₃) um maximal 3,0 Gewichts-% absolut
 - **bei MgCO₃**
um maximal 1,0 Gewichts-% absolut unterschritten werden.

- (2) Die planmäßige Ausnutzung dieser Toleranzen ist nicht gestattet.
Der Gehalt an basisch wirksamen Bestandteilen auf der Basis CaCO₃ errechnet sich stöchiometrisch aus den Gehalten [%] an CaCO₃ und an MgCO₃ wie folgt:

% bwB auf Basis CaCO ₃	=	% CaCO ₃	+	(% MgCO ₃ * 1,19)
Beispiel: bwB = 94,65 %		53,0		(35,0% * 1,19)

- (3) Eine Überschreitung der unter (1) genannten Toleranzgrenzen berechtigt den Auftraggeber zur Preisminderung.
- (3.1) Die Preisminderung für nicht tolerierbare **Überschreitungen des Gehaltes an bwB** [% errechnet auf Basis CaCO₃] berechnet sich als Produkt aus der Abweichung des Kontrollproben-Preises [€/t % bwB als CaCO₃] zum Angebotspreis [€/t % bwB als CaCO₃] und der betroffenen Liefermenge [t]:

$$PM_{bwB} = (PK_{bwB} + PA_{bwB}) * LM_{bet}$$

PM_{bwB} = Preisminderung [€]

PK_{bwB} = Kontrollprobenpreis [€/t % bwB auf Basis CaCO₃]

PA_{bwB} = Angebotspreis [€/t % bwB auf Basis CaCO₃]

LM_{bet} = betroffene Liefermenge [t]

Beispiel:

$$181,20 \text{ €} = (67,92 \text{ €/t} - 64,18 \text{ €/t}) * 48,5 \text{ t}$$

$$PM_{bwB} = 181,20 \text{ €}$$

$$PK_{bwB} = 67,92 \text{ €/t}$$

$$PA_{bwB} = 64,18 \text{ €/t}$$

$$LM_{bet} = 48,5 \text{ t}$$

- (3.2) Die Preisminderung für nicht tolerierbare **Überschreitungen des Gehaltes an MgCO₃** [%] berechnet sich aus
 - der Abweichung zwischen dem Mg-bürtigen Anteil am vereinbarten Preis [a] „€/t % bwB auf Basis CaCO₃“
 - verrechnet mit einer eventuellen positiven Abweichung [b] zwischen dem vereinbarten Preis „€/t % bwB auf Basis CaCO₃“ insgesamt
 - multipliziert mit der betroffenen Liefermenge [c]

[a]
$$\Delta P_{MgCO_3} = PK_{MgCO_3} - PA_{MgCO_3}$$

ΔP_{MgCO_3} = Preisabweichung Mg-Anteil
[€/t % bwB auf Basis CaCO₃]
 PK_{MgCO_3} = Mg-bürtiger Kontrollprobenpreis
[€/t % bwB auf Basis CaCO₃]
 PA_{MgCO_3} = Mg-bürtiger Angebotspreis
[€/t % bwB auf Basis CaCO₃]

Beispiel:

Sollgehalte: Kalk mit 53 % CaCO₃ und 35 % MgCO₃;
(Preis 65,65 €/t Ware)

Kontroll-

ergebnis: Kalk mit 67 % CaCO₃ und 25 % MgCO₃;
Preis 65,65 €/t Ware
→ nicht tolerierbare Unterschreitung des
MgCO₃-Gehaltes

betroffene Liefermenge: 48,45 t

[b]
$$\Delta P_{bwB} = PA_{bwB} - PK_{bwB}$$

nur berücksichtigen, wenn Ergebnis positiv

ΔP_{bwB} = Preisabweichung für alle bwB
[€/t % bwB auf Basis CaCO₃]
 PA_{bwB} = Angebotspreis für alle bwB
[€/t % bwB auf Basis CaCO₃]
 PK_{bwB} = Kontrollprobenpreis für alle bwB
[€/t % bwB auf Basis CaCO₃]

$$\Delta P_{MgCO_3} = PK_{MgCO_3} - PA_{MgCO_3}$$

$\Delta P_{MgCO_3} = 21,8 \text{ €/t} - 30,52 \text{ €/t}$
 $\Delta P_{MgCO_3} = -8,72 \text{ €/t}$

$$\Delta P_{bwB} = PA_{bwB} - PK_{bwB}$$

$\Delta P_{bwB} = 69,36 \text{ €/t} - 67,86 \text{ €/t}$
 $\Delta P_{bwB} = +1,5 \text{ €/t}$ [-> positives Ergebnis]

[c]
$$PM_{MgCO_3} = (\Delta P_{MgCO_3} + \Delta P_{bwB}) * LM_{bet}$$

PM_{MgCO_3} = Preisminderung [€]
 LM_{bet} = betroffene Liefermenge [t]

$$PM_{MgCO_3} = (\Delta P_{MgCO_3} + \Delta P_{bwB}) * LM_{bet}$$

$PM_{MgCO_3} = (-8,72 \text{ €/t} + 1,50 \text{ €/t}) * 48,45 \text{ t}$
 $PM_{MgCO_3} = -349,81 \text{ €}$

Für das Beispiel ergibt sich eine Preisminderung von 349,81 € für die angegebene Liefermenge.

Angebot/ vertragl. vereinbart	Preis Ware [€/t]	CaCO ₃ [%]	MgCO ₃ [%]	bwB CaCO ₃ [%]	bwB MgCO ₃ [%]	∑ bwB [%]	Preis ∑ bwB [€/t]	Anteil MgCO ₃ an ∑ bwB [%]	Mg-bür. Preis [€/t]
Spalte	(1)	(2)	(3)	(4)=(2)	(5)= (3)*1, 19	(6)= (4)+(5)	(7)= (1):(6)*100	(8)= (5):(6)*100	(9)= (7)*(8):100
Variable	65,65	53	35	53,00	41,65	94,65	PA_{bwB} 69,36	44,00	PA_{MgCO_3} 30,52
Kontrollprobe	Preis Ware [€/t]	CaCO ₃ [%]	MgCO ₃ [%]	bwB CaCO ₃ [%]	bwB MgCO ₃ [%]	∑ bwB [%]	Preis ∑ bwB [€/t]	Anteil MgCO ₃ an ∑ bwB [%]	Mg-bür. Preis im Bezug zu Ange- botspreis [€/t]
Spalte	(10)	(11)	(12)	(13)=(11)	(14)= (12)*1, 19	(15)= (13)+(14)	(16)= (10):(15)* 100	(17)= (14):(15)* 100	(18)= (7)*(17): 100
Variable	65,65	67	25	67,00	29,75	96,75	PK_{bwB} 67,86	31,43	PK_{MgCO_3} 21,80

- (4) Bei Überschreitung der Toleranzgrenzen für den Gehalt an bwB (auf Basis CaCO₃) und an MgCO₃ werden die berechneten Preisminderungen addiert

8.2.2.2 Reaktivität

- (1) Der Auftragnehmer hat auf den betroffenen Flächen, denen die Liefermenge mit unterschrittener Mindestreaktivität zuzuordnen ist, auf eigene Rechnung Nachbesserung mit einem anderen Kalk in einer Dosierung von 1,5 t je ha innerhalb einer angemessenen, vom Auftraggeber bestimmten Frist zu leisten.
- (2) Kommt der Auftragnehmer der Nachbesserungspflicht innerhalb der hierfür gesetzten Frist nicht nach, so entfällt die Vergütung für die betroffene Liefermenge.

8.2.2.3 Kornspektrum und Feuchtegehalte

- (1) Werden die im Leistungsverzeichnis genannten Mindestaufmahlungen um mehr als 1 % absolut unterschritten, so kann der Auftraggeber den Angebotspreis mindern.
- (2) Die Preisminderung errechnet sich als Produkt aus dem Angebotspreis [€/t Ware] der betroffenen Liefermenge [t] und Reduktionsfaktoren.

$$PM_{\text{Sieb}} = P_{\text{Ware}} * LM_{\text{bet}} * Red$$

[€]
[€/t der Ware]
[t]

PM_Sieb = Preisminderung Siebanteil
P_Ware = Angebotspreis der Ware [€/t]
LM_bet = betroffene Liefermenge [t]
Red = Reduktionsfaktor

- (3) Die Reduktionsfaktoren sind nach den Korngrößenstufen wie folgt gestaffelt; gleichzeitige Abweichungen in mehreren Korngrößenstufen werden addiert.

Tabelle II-4: Reduktionsfaktoren bei Unterschreitung der Mindestforderungen zum Siebdurchgang

Kalk	Mindest-Siebdurchgang [Masse-%]			
	3,15 mm	2,0 mm	1,0 mm	0,09 mm
gemahlen	97	90	70	33
bei Abweichung vom Soll um	Verminderung des Angebotspreises [€/t Ware] mit folgenden Reduktionsfaktoren			
≤1 % absolut	0	0	0	0
1,1 – 3,0 %	0,005	0,01	0,02	0,04
3,1 – 6,0 %	0,01	0,02	0,04	0,08
6,1 – 9,0 %	0,02	0,04	0,08	0,16
>9,0 %	0,04	0,08	0,16	0,32

- (4) Werden die geforderten Mindest-Feuchtegehalte (vgl. Abschnitt 6.1.2) um mehr als 0,5 % absolut unterschritten, so mindert sich bei der betroffenen Liefermenge der Angebotspreis für den Anteil der Korngrößenstufe 0,09 mm entsprechend der nachfolgenden Reduktionsfaktoren (s. Tab. II-5).
- (5) Wird der festgelegte Maximalanteil der Korngrößenstufe 0,09 mm (vgl. Abschnitt 6.1.2) überschritten, so mindert sich bei der betroffenen Liefermenge der Angebotspreis für den über der Begrenzung liegenden Anteil der Korngröße 0,09 mm um 50 %. Für den über der Begrenzung liegenden Anteil der Korngrößenstufe 0,09 mm findet (4) keine Anwendung.

Tabelle II-5: Reduktionsfaktoren bei Unterschreitung der Mindestfeuchte in Abhängigkeit vom Aufmahlungsgrad

Feuchtegehalt unterhalb der geforderten Mindestfeuchte von 6 % [bei einem Anteil der Korngrößenstufe 0,09 mm >40 %]	Reduktionsfaktoren für den 40 % übersteigenden Teil der Korngrößenstufe 0,09 mm
5,0 - 5,4 %	0,3
4,5 - 4,9 %	0,4
4,0 - 4,4 %	0,5
3,5 - 3,9 %	0,6
3,0 - 3,4 %	0,7
2,5 - 2,9 %	0,8
Feuchtegehalt	Reduktionsfaktor für den gesamten Anteil der Korngrößen- stufe 0,09 mm
< 2,5 %	0,8

8.2.2.4 Schwermetallgehalte

(1) Die im Leistungsverzeichnis geforderten maximalen Schwermetallgehalte dürfen um höchstens 20 % überschritten werden (Toleranzgrenze).

(2) Werden die geforderten maximalen Schwermetallgehalte um mehr als 20 % überschritten, ist der Auftraggeber zur Preisminderung berechtigt. Die Preisminderung errechnet sich als Produkt aus dem Angebotspreis [€/t Ware] der betroffenen Liefermenge [t] und Reduktionsfaktoren.

Tabelle II-6: Richt- und Toleranzwerte maximal zulässiger Schwermetallgehalte für eingesetzte Kalke

Element	As	Cd	Cr-total	Hg	Ni	Pb	Tl	Cu	Zn
Richtwert	20	1	150	0,5	10	125	1	35	200
[mg/kg Trockenmasse]									
Toleranz absolut	4	0,2	30	0,1	2	25	0,2	7	40

$$\text{Preisminderung} = \text{Angebotspreis} * \text{betroffene Liefermenge} * \text{Reduktionsfaktor}$$

[€]

[€/t der Ware]

[t]

- (3) Die Reduktionsfaktoren sind nach dem Grad der Überschreitung der maximal zulässigen Schwermetallgehalte gestaffelt; gleichzeitige Überschreitungen bei mehreren Elementen werden addiert:

Überschreitung der maximal zulässigen Schwermetallgehalte um			
21–25 %	26–30 %	31–35 %	≥ 36 %
Verminderung Angebotspreis [€/t Ware] mit folgenden Reduktionsfaktoren			
0,1	0,2	0,3	0,5

8.2.3 Nichteinhaltung der Kalkverteilung

- (1) Bei Unterschreitung der vertraglich vereinbarten flächenbezogenen Ausbringungsmenge (Solldosis) um mehr als -30 % (vgl. Toleranzgrenze Kapitel 7.4) ist der Auftraggeber berechtigt, nach erfolglosem Ablauf einer von ihm gegenüber dem Auftragnehmer zur Nacherfüllung bestimmten Frist, auf dessen Rechnung nachzubessern. Die Nachbesserungen beziehen sich auf Flächen bzw. ausgebrachte Kalkmengen, bei denen die über die Toleranzgrenze reichenden Unterschreitungen anhand der Arbeitsnachweise (vgl. Kapitel 7.5) oder GPS-Daten der Kalkapplikation bzw. bei Vor-Ort-Kontrollen festgestellt wurden.
- (2) Bei Überschreitung der vertraglich vereinbarten flächenbezogenen Ausbringungsmenge (Solldosis) um mehr als +30 % (vgl. Toleranzgrenze Kapitel 7.4) erfolgt für die entsprechenden Kalkmengen, die über der Toleranzgrenze liegen, keine Vergütung. Für auf nicht zu kalkenden Flächen ausgebrachten Kalk hat der Auftragnehmer keinen Anspruch auf Vergütung.

8.2.4 Nichteinhaltung der Ausführungsfrist

Sofern der Auftragnehmer aus von ihm zu vertretenden Gründen mit der Ausführung und dem Abschluss der Kalkung in Verzug gerät, kann der Auftraggeber

- (1) vom Vertrag zurücktreten und die Restarbeiten einem Dritten übertragen; die Kostendifferenz hat der schuldhaft in Verzug geratene Erstanbieter zu tragen,
- (2) vom schuldhaft in Verzug geratenen Erstanbieter eine Konventionalstrafe in Höhe von 10 % des Geldwertes der nicht termingerecht erbrachten Leistung verlangen.

8.2.5 Nichteinhaltung der zugesagten ausreichenden deutschen Sprachkenntnisse des eingesetzten Personals

Sofern der Auftragnehmer Personal ohne ausreichende deutsche Sprachkenntnisse einsetzt, dadurch keine zweifelsfreien Absprachen zwischen diesem und den Beauftragten der Forstbezirke möglich sind und die ordnungsgemäße Durchführung der Kalkung nicht gewährleistet ist, kann der Auftraggeber nach einer Abmahnung

- (1) die Kalkung abrechnen,
- (2) vom Vertrag zurücktreten und die Kalkung insgesamt bzw. Restarbeiten einem Dritten übertragen; die Kostendifferenz hat der Erstanbieter zu tragen,
- (3) vom Erstanbieter eine Konventionalstrafe in Höhe von 10 % des Geldwertes der nicht erbrachten Leistung verlangen.

- ANDERSEN, A. (1996): Historische Technikfolgenabschätzung am Beispiel des Metallhüttenwesens und der Chemieindustrie 1850 - 1933. Habilitationsschrift, Stuttgart. Steiner Verlag.
- ANDREA, H.; JACOB, F. (2017): Monitoring auf forstlichen Dauerbeobachtungsflächen. In: N. Barth, R. Tannert, H. J. Kurzer, H. Kolbe, H. Andreae, F. Jacob, Haferkorn, U.; Rust, M.; Grunert, M. (Hg.): Stickstoffmonitoring sächsischer Böden. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, S. 51-73.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 7. Auflage. Eching: IHW-Verlag.
- ARMBRUSTER, M.; FEGER, K.-H. (1998): Zusammensetzung der Bodenlösung und Veränderung durch Düngung. In: Raspe, S.; Feger, K.-H. und Zöttl, H. W. (Hg.): Ökosystemforschung im Schwarzwald. Auswirkungen von atmosphärischen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Fichtenwäldern; Verbundprojekt ARINUS. Landsberg Lech: ecomed (Umweltforschung in Baden-Württemberg), S. 179-203.
- ARMBRUSTER, M.; KÖHLER, H.; FEGER, K.-H. (2000): Chemische Zusammensetzung zweier quellnaher Waldbäche im Hochschwarzwald-Abflussabhängige Variabilität und Einfluss einer Bodenkalkung. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 119 (1-6), S. 249-262.
- ARMBRUSTER, M.; MENGISTU, A.; FEGER, K.-H. (2004): Wasserqualität in zwei bewaldeten Einzugsgebieten mit unterschiedlicher Depositionsbelastung - Langfristige Veränderungen und Reaktion auf Kalkung. In: *Forstliche Schriftenreihe der Universität Bodenkultur in Wien* (18), S. 118-142.
- ASCHE, N. (2003): Bodenschutzkalkung in Nordrhein-Westfalen. Hg. v. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Düsseldorf.
- BAUMANN, M.; ANDREA, H.; RABEN, G. (2002): Vegetationsvergleich sächsischer Fichtenwaldflächen der Bodenzustandserhebung (BZE=Level I der EU) oberhalb 700 m ü. NN. In: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hg.): Waldvegetation. Vegetationsuntersuchungen in sächsischen Wäldern (Level I und II). Graupa (Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 25), S. 18-21.
- BECKER, R. (2000): Kritische Belastungsgrenzen und deren Überschreitungen für die BZE-Standorte Sachsens. Unter Mitarbeit von H. Andreae und G. Raben. Hg. v. Öko-DATA.
- Becker, R. (2004): Erfassung und Kartierung von ökologischen Belastungsgrenzen - Critical Loads - für Sachsen. S. 53
- BREDEMEIER, M. (1987): Stoffbilanzen, interne Protonenproduktion und Gesamtsäurebelastung des Bodens in verschiedenen Waldökosystemen Norddeutschlands. Göttingen: Selbstverl. (Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme / Waldsterben. Universität Göttingen. Reihe A, 33).
- BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- BOLTE, A.; WELLBROCK, N.; LUX, W.; STRICH, S.; STEINHAUSER, D. (2008): Waldmonitoring und Umweltpolitik. In: *AFZ-DerWald* (17), S. 921-923.
- BÖTTGER, A.; EHHALT, D. H.; GRAVENHORST, G. (1978): Atmosphärische Kreisläufe von Stickoxiden und Ammoniak. Hg. v. Kernforschungszentrum Jülich. (Bericht der KfA Jülich, 1558).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2000): Critical Loads für Waldökosysteme-Methoden und Ergebnisse für Standorte des Level II-Programms. Hg. v. Bund-Länder-Arbeitsgruppe Level II / Arbeitskreis A. Berlin.
- CARLOWITZ, H. C. VON (1713): Sylvicultura Oeconomica oder haußwirthliche Nachricht und Naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. 2 Bände. Leipzig: Johann Friedrich Braun.
- CHRIST, M. J.; DRISCOLL, CHARLES T.; LIKENS, G. E. (1999): Watershed- and plot-scale tests of the mobile anion concept. In: *Biogeochemistry* 47 (3), S. 333-351.
- CONRAD, S.; ANDREA, H.; RABEN, G. (2002): Vegetationsvergleich sächsischer Laubwaldflächen der Bodenzustandserhebung (BZE = Level I der EU). In: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hg.): Waldvegetation. Vegetationsuntersuchungen in sächsischen Wäldern (Level I und II), Bd. 25. Graupa (Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 25), S. 2-18.
- DANNEBERG, O.; JASSER, C.; KATZENSTEINER, K.; LUCKEL, W.; MUTSCH, F.; REH, M.; SCHUSTER, K.; STARLINGER, F. (2001): Wald(boden)sanierung. Hg. Forstliche Bundesforschungsanstalt, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft und Institut für Bodenwirtschaft. Wien.
- DER SPIEGEL (1997): Gegen den Baum gefahren. Nr. 28/1997, S.42-46.
- FRANKE, J.; MAYER, R. (1962): Über 100 Jahre Rauchschaadenforschung im Tharandter Institut für Pflanzenchemie und Holzforschung. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 11 (3), S. 543-544.
- FRANZ, B. (2004): Bodenschutzkalkung im Forstamt Klingenthal. Entwicklung einer GIS-gestützten Dokumentation sowie Untersuchungen zu Wirkungen und Risiken. Technische Universität Dresden, Dresden. Geographie. 59 S.

- GEHRMANN, J. (2000): Zur Deposition von Luftverunreinigungen in den Waldbeständen des Level II-Programms. In: *Forstarchiv* 71 (2), S. 36–39.
- GEHRMANN, J.; ANDREAE, H.; FISCHER, U.; LUX, W.; SPRANGER, T. (2001): Luftqualität und atmosphärische Stoffeinträge an Level II-Dauerbeobachtungsflächen in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Bonn.
- GEMBALLA, R. (2014): Planung und Durchführung der Bodenschutzkalkung in Sachsen. In: *Forstarchiv* 85 (2), S. 70–71.
- GEMBALLA, R. (2017): Waldschäden im Erzgebirge - von den Anfängen bis Ende der 1990er Jahre. In: Petzold, R. und Gemballa, R. (Hg.): *Exkursionsführer zur AFSV-Jahrestagung 2017. Standortswandel und Waldumbau im Oberen Erzgebirge. AFSV-Jahrestagung 2017. Markersbach, 13.-16.09. Staatsbetrieb Sachsenforst. Graupa: Eigenverlag*, S. 15–21.
- GODBOLD, D. L. (2003): Managing acidification and acidity in forest soils. In: Z. Rengel (Hg.): *Handbook of soil acidity*. New York, NY: Dekker (Books in soils, plants, and the environment, 94), S. 431–448.
- GÖTTLEIN, A.; BAIER, R.; MELLERT, K. H. (2011): Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa—Eine statistische Herleitung aus van den Burg's Literaturzusammenstellung. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182 (9/10), S. 173–186.
- GREVE, M. (2015): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt. Hg. v. Zentralstelle der Forstverwaltung-Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland-Pfalz. Landesforsten Rheinland-Pfalz. Trippstadt (Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 73).
- GRÜNEBERG, E.; WILPERT, K. VON; MEESENBERG, H.; EVERS, J.; ZICHE, D.; ANDREAE, H.; WELLBROCK, N. (2017): Was nützt die Waldkalkung? In: *AFZ-DerWald* (2), S. 15–17.
- HAMBERGER, J.; CARLOWITZ, H. C. VON; MEHLER, R. (Hg.) (2013): *Sylvicultura oeconomica. Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. [Nachdr. der Ausg.] Leipzig 1713. München: oekom-verl. Ges. für ökologische Kommunikation*.
- HANNEMANN, J.; RIEK, W.; SCHWOY, M. (2017): Kalkungsversuche auf brandenburgischen BZE-Inventurpunkten. Ziele, Stand und Perspektiven eines bundesweiten Projektes. In: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL) (Hg.): *Tagungsband zum Eberswalder Winterkolloquium 2017. "Im Auftrag": Drittmittelforschung am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde*, Bd. 64. Eberswalde (Eberswalder forstliche Schriftenreihe, 64), S. 25–36.
- HARTMANN, P.; WILPERT, K. VON (2016): Statistisch definierte Vertikalgradienten der Basensättigung sind geeignete Indikatoren für den Status und die Veränderungen der Bodenversauerung in Waldböden. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 187 (3/4), S. 61–69.
- HEMPEL, W. (2009): Die Pflanzenwelt Sachsens von der Späteiszeit bis zur Gegenwart. 1. Aufl. Jena: Weißdorn-Verlag.
- HUFF, T. (2014): Über die Umweltpolitik der DDR. Konzepte, Strukturen, Versagen. In: *Geschichte und Gesellschaft* 40, S. 523–554.
- IMMER, A.; SCHMIDT, W.; MEIWES, K. J.; BEESE, F. (1993): Langzeitwirkungen von Kalkung und Düngung auf den chemischen Zustand im Oberboden, die Humusformen und die Bodenvegetation in einem Fichtenforst. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 112 (1), S. 334–346. DOI: 10.1007/BF02742163.
- JACOB, F.; ANDREAE, H.; EISENHAUER, D.-R. (2013): Bundesweites Fachkolloquium zur Bodenschutzkalkung in Dresden. In: *AFZ-DerWald*.
- JACOB, F.; PATZELT, J.; EHRMANN, O.; ANDREAE, H. (2017): Wiederbelebung von Waldböden. Auswirkungen von Kalkungen auf die Regenwurmfauna im Erzgebirge. Forstwissenschaftliche Tagung. Göttingen, Georg-August-Universität. Göttingen, 2017.
- JACOB, F.; ANDREAE, H. (2018): Sächsischer Waldbodenbericht. Aktueller Waldbodenzustand und dessen Veränderung. 1. Auflage, Graupa: Eigenverlag (Schriftenreihe, 30).
- JACOB, F.; ANDREAE, H. (2019): Im Fokus: Boden braucht Schutz. Kalk gegen saure Verhältnisse. In: *LandInForm* (1), S. 28–29.
- JANSSEN-SCHMIDT, E.; RÖTH, P.; VARHELYI, G.; GRAVENHORST, G. (1981): Anthropogene Anteile am atmosphärischen Schwefel- und Stickstoffkreislauf und mögliche globale Auswirkungen auf chemische Umsetzungen in der Atmosphäre. Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Hg. v. Kernforschungszentrum Jülich. (Berichte der KfA Jülich, 1722).
- KALLWEIT, R. (1990): Klassifizierung und Kartierung von Typen der Fremdstoffbelastung der Wälder der DDR als Teilaufgabe der ökologischen Waldzustandskontrolle. In: *Sozialistische Forstwirtschaft* 40 (2), S. 35–39.
- KALLWEIT, R. (2016): Messnetzte der forstlichen Umweltkontrolle in Brandenburg. In: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL) (Hg.): *30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Eberswalde: Eigenverlag (Eberswalder forstliche Schriftenreihe, 63)*, S. 16–26.
- KEITEL, M. (2014): Biologische und chemische Veränderungen nach Langzeitversauerung in der Großen Pyra (Erzgebirge). In: *Forstarchiv* 85 (2), S. 47–54.
- KLINCK, U. (2008): Kohlenstoffvorrat, Nährstoffvorräte und Wasserdynamik nach forstlichen Eingriffen in Fichtenreinbestände. Dissertation. Universität Göttingen, Göttingen.
- KLIMO, E.; MATERNA, J.; LOCHMAN, V.; KULHAVÝ, J. (2006): Forest soil acidification in the Czech Republic. In: *Journal of Forest Science* 52 (Special Issue), S. 14–22.
- KLUGE, H. (1993): Nur die Buchen überlebten - Vom Schicksal des Forstreviers Deutscheinsiedel im Erzgebirge. In: *Forst und Holz* 48, S. 462–466.

- KOLBE, H. (2001): Anleitung zur P-, K-, Mg- und Kalkdüngung im ökologischen Landbau. In: *SÖL-Berater-Rundbrief* (03), S. 1-10.
- KRAFT, M.; REIF, A.; SCHREINER, M.; ALDINGER, E. (2003): Veränderungen der Bodenvegetation und der Humusaufgabe im Nordschwarzwald in den letzten 40 Jahren. In: *Forstarchiv* 74, S. 3-15.
- KRUG, E. C.; FRINK, C. R. (1983): Acid rain on Acid soil: A new perspective. In: *Science* 221 (4610), S. 520-525.
- KULHAVÝ, J. (2002): Acidification of forest soils in the Czech Republic. In: J. Kulhavý, T. Naydenova, I. Raev, A. Alexandrov, B. Rossnev, I. Marinov, V. D. Vassilev, H. Tsakov, R. Petrova, M. Grozeva, G. Grigorov (Hg.): Study, conservation and utilisation of forest resources. Proceedings of the Third Balkan Scientific Conference, Sofia, Bulgaria, 2-6 October 2001. Brno, Czech Republic: Eigenverlag (Balkan Scientific Conference Proceedings), S. 194-201.
- LAMPADIUS, F. (1962): Problematik und Methodik großräumiger Luftuntersuchungen. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 11 (3), S. 609-616.
- LANGUSCH, J. (1995): Untersuchungen zum Ionenhaushalt zweier Wassereinzugsgebiete in verschiedenen Höhenlagen des Osterzgebirges. Dissertation. Technische Hochschule Dresden, Dresden.
- LAUTERBACH, G. (2000): Wasser- und Stoffhaushalt dreier Waldökosysteme des Osterzgebirges. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.
- LEUBE, F. (2000): Leitfaden - Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen. Graupa: Eigenverlag (Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 21).
- LIEBOLD, E.; DRECHSLER, M. (1991): Schadenzustand und -entwicklung in den SO₂-geschädigten Fichtengebieten Sachsens. In: *Allgemeine Forstzeitung (AFZ)* (10), S. 492-494.
- LUX, H. (1962): Problematik und Methodik der Rauchschaden-Großraumdiagnose. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 11 (3), S. 617-622.
- MAKESCHIN, F.; RODENKIRCHEN, H. (1994): Saure Beregnung und Kalkung. Auswirkungen auf Bodenbiologie und Bodenvegetation. In: *Allgemeine Forstzeitung (AFZ)* 49 (14), S. 759-764.
- MARAN, B. (1960): Die durch Rauchhexalate in der Land- und Forstwirtschaft der Tschechoslowakei verursachten Schäden. In: K.F. Wentzel (Hg.): Waldrauchschäden im rheinisch-westfälischen Industriegebiet: Bericht über die internationale Arbeitstagung forstlicher Rauchschadensachverständiger vom 6. - 8. Oktober 1959. Bochum, S. 30-31.
- MATERNA, J. (1962): Auswertung von Düngungsversuchen in rauchgeschädigten Fichtenbeständen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 11(3), 589-593.
- MATZNER, E. (1988): Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling. Göttingen: Selbstverl. (Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Waldsterben: Reihe A, 40).
- MATZNER, E.; DAVIS, M. (1996): Chemical soil conditions in pristine Nothofagus forests of New Zealand as compared to German forests. In: *Plant and Soil* 186 (2), S. 285-291.
- MENZER, A.; ANDREAE, H. (2013): Stoffbilanzen sächsischer Level II-Flächen. -Anwendung zur Qualifizierung der Bodenschutzkalkung. In: K. von Wilpert und B. Vögtle (Hg.): Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf. Freiburg im Breisgau: Eigenverlag (Freiburger Forstliche Forschung, 96), S. 199-211.
- MEYER, U. (1989): Bewaldung des Westharzes unter dem Einfluß von Bergbau und Hüttenwesen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 44 (18-20), S. 458-461.
- PAAVOLAINEN, L.; SMOLANDER, A. (1998): Nitrification and denitrification in soil from a clear-cut Norway spruce (*Picea abies*) stand. In: *Soil Biology & Biochemistry* 30 (6), S. 775-781.
- PATZELT, J. (2019): Der Einfluss von Bodenschutzkalkungen auf die Lumbricidenfauna in sächsischen Fichtenforsten. Bachelorarbeit. HTW Dresden, Dresden. Studiengang Umweltmonitoring. 113 S.
- RABEN, G.; ANDREAE, H.; SYMOSSEK, F. (1998): Consequences of reduced immissions on the ecochemical conditions of forest ecosystems in Saxony (Germany). In: *Chemosphere* 36 (4-5), S. 1007-1012.
- RABEN, G.; ANDREAE, H.; KARST, H.; SYMOSSEK, F.; LEUBE, F. (2000a): Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern (1992-1997). Graupa: Sächsische Landesanstalt für Forsten (Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 20).
- RABEN, G.; ANDREAE, H.; MEYER-HEISIG, M. (2000b): Long-Term Acid Load and its Consequences in Forest Ecosystems of Saxony (Germany). In: *Water, Air and Soil Pollution* 122 (1/2), S. 93-103.
- RABEN, G.; ANDREAE, H.; KARST, H.; SYMOSSEK, F.; LEUBE, F. (2004): Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern. 2. Aufl. Pirna: Landesforstpräsidium (Schriftenreihe / Freistaat Sachsen, Landesforstpräsidium, 28).
- REUSS, J. O.; JOHNSON, D. W. (1986): Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters. New York, NY: Springer New York (Ecological Studies, 59).
- RIEK, W.; RUSS, A. (2015): Schließen von Stoffkreisläufen zur Verhinderung von Bodendegradation. In: *Forum Boden- Gewässer-Altlasten*(15), S. 75-94
- RODENKIRCHEN, H. (1986): Auswirkungen von saurer Beregnung und Kalkung auf die Vitalität, Artenmächtigkeit und Nährstoffversorgung der Bodenvegetation eines Fichtenbestandes. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105, S. 338-350.
- RUSS, A.; RIEK, W.; MARTIN, J. (2014): Vergleich verschiedener Kalkungskonzeptionen hinsichtlich der Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit mecklenburgischer Waldböden anhand von Bodendaten der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-2). In: *Forstarchiv* 85 (2), S. 55-58.

- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG UND FORSTEN (SMLEF) (1994): Waldschadensbericht 1994. Hg. v. Sächsische Landesanstalt für Forsten.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG UND FORSTEN (SMLEF) (1996): Waldschadensbericht 1996. Hg. v. Sächsische Landesanstalt für Forsten.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (SMUL) (2006): Waldzustandsbericht 2006. Staatsbetrieb Sachsenforst. Dresden.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (SMUL) (2009): Waldzustandsbericht 2009. Staatsbetrieb Sachsenforst. Dresden.
- SCHLÜTER, H. (1966): Untersuchungen über die Auswertung von Bestandeskalkungen auf die Bodenvegetation in Fichtenforsten. In: *Die Kulturpflanze* 14, S. 47-60.
- SCHMIDT, W. (2002): Einfluss der Bodenschutzkalkungen auf die Waldvegetation. In: *Forstarchiv* 73, S. 43-54.
- SCHRÖTER, E. (1908): Die Rauchquellen im Königreiche Sachsen und ihr Einfluß auf die Forstwirtschaft. In: *Tharandter forstliches Jahrbuch* 57 (57), S. 211-430.
- SCHRÖTER, E. (1907): Rauchschaadenflächen in den Waldungen der Amtshauptmannschaft Schwarzenberg und die mit feststehender Dampfkesselanlage versehenen Fabriken nach dem Stande vom 1. Januar 1907. Tafel 2 aus Dissertation Schröter, Ekkehard 1908. Leipzig: Paul Parey. Online verfügbar unter http://www.deutschefotothek.de/documents/obj/90064589/df_dk_0009655.
- ŠRÁMEK, V.; NOVOTNÝ, R.; FIALA, P.; NEUDERTOVÁ-HELLEBRANDOVÁ, K.; REININGER, D.; SAMEK, T.; ČIHÁK, T.; FADRHOŇOSOVÁ, V. (2014): Vápnení lesů v České republice. Waldkalkung in der Tschechischen Republik. Praha: Ministerstvo zemědělství ve spolupráci s Vyzkumným ústavem lesního hospodářství.
- STETTER, U. (2010): Bodenschutzkalkung? Fraget die Bäume ... Umfangreiche Daten zur Waldernährung eröffnen einen anderen Blickwinkel auf das Thema Kalkung. LWF Bayern. Freising (LWF aktuell, 78).
- STÖCKHARDT, A. (1850): Über einige durch den Bergbau und Hüttenbetrieb für die Landescultur entstehenden Benachtheiligungen. 1. Über die Einwirkung des Hüttenrauchs in Halsbrücke auf die dortige Vegetation, auf die Bedachungen und den Abputz der Häuser u.a.m. In: *Zeitschrift für deutsche Landwirthe* 6 (1), S. 33-38.
- STÖCKHARDT, A. (1863): Über die Bodenverarmung durch Streurechen, nachgewiesen durch Bodenuntersuchungen. In: *Tharandter forstliches Jahrbuch* 8, S. 309-332.
- STÖCKHARDT, A. (1864): Untersuchungen von geschontem und nicht geschontem, lehmigen Waldboden. In: *Tharandter forstliches Jahrbuch* 9, S. 280-295.
- THALHEIM, K.; FIEDLER, H. J. (1990): Zur Mineralverwitterung in der pleistozänen Schichtenfolge des Osterzgebirges und ihrer Böden. In: *Mitteilungen des Vereins für forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung* (35), S. 45-51.
- THOMASIU, H. (1995): Der Einfluß des Bergbaus auf Wald- und Forstwirtschaft im sächsischen Erzgebirge bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts. Tharandt: Sächsischer Forstverein.
- TURNER, J.; LAMBERT, M. J. (2011): Analysis of nutrient depletion in a radiata pine plantation. In: *Forest Ecology and Management* 262 (8), S. 1327-1336.
- UGOLINI, F. C.; DAHLGREN, R. A. (1987): The mechanism of podzolization as revealed through soil solution studies. In: D. Righi und A. Chauvel (Hg.): *Podzols et podzolisation* (Comptes Rendus de la Table Ronde Internationale), S. 195-203.
- ULRICH, B. (1980): Die Bedeutung von Rodung und Feuer für die Boden- und Vegetationsentwicklung in Mitteleuropa. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 99, S. 376-384.
- ULRICH, B. (1981a): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 144 (3), S. 289-305.
- ULRICH, B. (1981b): Destabilisierung von Waldökosystemen durch Akkumulation von Luftverunreinigungen. In: *Der Forst- und Holzwirt* 36, S. 525-532.
- ULRICH, B. (1985): Natürliche und anthropogene Bodenversauerung. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 43 (I), S. 159-187.
- ULRICH, B. (1987): Stabilität, Elastizität und Resilienz von Waldökosystemen unter dem Einfluß saurer Deposition. In: *Forstarchiv* 58, S. 232-239.
- ULRICH, B.; SUMNER, M. E. (1991): *Soil Acidity*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- ULRICH, B. (1994): Nutrient and acid-base budget of central european forest ecosystems. In: D. L. Godbold und A. Hüttermann (Hg.): *Effects of Acid Rain on Forest Processes*. New York: Wiley-Liss (Wiley Series in Ecological and Applied Microbiology), S. 1-50.
- ULRICH, B. (1995): Der ökologische Bodenzustand - seine Veränderung in der Nacheiszeit, Ansprüche der Baumarten. In: *Forst und Holz* 66, S. 117-127.
- VAN BREEMEN, N.; MULDER, J.; DRISCOLL, C. T. (1983): Acidification and alkalization of soils. In: *Plant and Soil* 75 (3), S. 283-308. DOI: 10.1007/BF02369968.
- VAN BREEMEN, N. (1995): Nutrient cycling strategies. In: L. O. Nilsson, R. F. Hüttl und U. T. Johansson (Hg.): *Nutrient Uptake and Cycling in Forest Ecosystems*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 321-326.

- VÁŠÁT, R.; PAVLŮ, L.; BORŮVKA, L.; TEJNECKÝ, V.; NIKODEM, A. (2016): Modelling the impact of acid deposition on forest soils in North Bohemian Mountains with two dynamic models. The Very Simple Dynamic Model (VSD) and the Model of Acidification of Groundwater in Catchments (MAGIC). In: *Soil and Water Research* 10 (No. 1), S. 10-18.
- VEB FORSTPROJEKTIERUNG (1989): Ökologische Waldzustandskontrolle. Vitalitätsaufnahmen 1986-1989. Hg. v. VEB Forstprojektierung. Potsdam.
- VEERHOFF, M. (1992): Silicatverwitterung und Veränderung des Tonmineralbestandes in Waldboden als Folge von Versauerungsvorgängen. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität (Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, 8).
- VEERHOFF, M.; ROSCHER, S.; BRÜMMER, G. W. (1996): Ausmaß und ökologische Gefahren der Versauerung von Böden unter Wald. Berlin: Erich Schmidt Verlag (Berichte / Umweltbundesamt, 1996, 1).
- WECKESSER, M.; KOMPA, T. (2013): Untersuchungen zur Auswirkung von Kalkungsmaßnahmen auf die Bodenvegetation an 120 BZE-Punkten mittels multivariater Statistik. Abschlussbericht. unveröffentlicht. Staatsbetrieb Sachsenforst. Graupa.
- WENTZEL, K. F. (Hg.) (1960): Waldrauchschäden im rheinisch-westfälischen Industriegebiet: Bericht über die internationale Arbeitstagung forstlicher Rauchschadensachverständiger vom 6. - 8. Oktober 1959. Landesanstalt für Bodennutzungsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Bochum.
- WENTZEL, K. F. (1997): Die Geschichte der Waldschäden durch Luftschadstoffe. In: *AFZ-DerWald* (16), S. 895-898.
- WIELER, A. (1912): Pflanzenwachstum und Kalkmangel im Boden. Untersuchungen über den Einfluss der Entkalkung des Bodens durch Hüttenrauch und über die giftige Wirkung von Metallverbindungen auf das Pflanzenwachstum. Berlin: Gebrüder Borntraeger.
- WIENHAUS, O.; DÄSSLER, H.-G. (1991): 140 Jahre Immissionsforschung am Institut für Pflanzenchemie und Holzchemie in Tharandt. In: *Staub-Reinhalung der Luft* 51 (12), S. 461-466.
- WILPERT, K. VON; HARTMANN, P.; SCHÄFFER, J. (2013): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. Hg. v. ForstBW. FVA Freiburg. Freiburg i. Br (Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 54).
- WILSDORF, H.; HERRMANN, W.; LÖFFLER, K. (Hg.) (1960): Bergbau, Wald, FlöBe: Untersuchungen zur Geschichte der FlöBerei im Dienste des Montanwesens und zum montanen Transportproblem. Berlin: Akademie Verlag (Freiberger Forschungshefte D, 28).
- WUNDERLICH, S.; RABEN, G.; ANDREAE, H.; FEGER, K.-H. (2006): Schwefel-Vorräte und Sulfat-Remobilisierungspotenzial von Böden der Level-II-Standorte Sachsens. In: *AFZ-DerWald* (14), S. 762-765.
- ZAPLETAL, M. (1997): Atmospheric depositions of acidification factors in the region of the Czech Republic. *Ochrana ovzduši*. 1997. No. 2. pp. 12-20.
- ZIEGER, E. (1956/57): Die Wirkung der Industrie-Rauchschäden auf den Wald, ihre Berücksichtigung bei der Raumplanung und die Notwendigkeit ihrer gesetzlichen Regelung. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* (6), S. 777-787.
- ZIMMERMANN, F.; ABIY, M. (2005): Die atmosphärische Deposition in Fichtenbeständen [*Picea abies* (L.) Karst] des Osterzgebirges (1984-2003). In: Nebe, W. und Feger, K.H. (Hg.): *Atmosphärische Deposition, ökosystemare Stoffbilanzen und Ernährung der Fichte bei differenzierter Immissionsbelastung. Langjährige Zeitreihen für das Osterzgebirge und den Südschwarzwald*, Bd. 22. Stuttgart: Ulmer (Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, 22), S. 1-32.

IV Kalkungskonzepte und -anweisungen anderer Bundesländer

Baden-Württemberg

WILPERT, K. VON; HARTMANN, P.; SCHÄFFER, J. (2013): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. Hg. v. ForstBW. FVA Freiburg. Freiburg i. Br (Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 54).

Niedersachsen & Sachsen-Anhalt

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (2010): Merkblatt Bodenschutzkalkungen in Niedersachsen in Sachsen-Anhalt. Beschlossen vom Steuerungsausschuss der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt am 03.11.2010. Unter Mitarbeit von DR. KARL-JOSEF MEIWES, DR. MICHAEL MINDRUP. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Göttingen (Merkblatt).

Nordrhein-Westfalen

ASCHE, N. (2003): Bodenschutzkalkung in Nordrhein-Westfalen. Hg. v. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Düsseldorf. 35 S.

Saarland

Saarland (2013): Konzept zur Bodenschutzkalkung des Staatsforstes im Saarland. SaarForst. Saarbrücken. 13 S.

Thüringen

Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (04.12.2015): Anweisung zur Bodenschutzkalkung in den Wäldern des Freistaats Thüringen, vom 396. In: ThürStAnz (52), S. 2404–2415.

V Abkürzungsverzeichnis

A

a.....Jahr
AG.....Auftraggeber
AK.....Arbeitskreis
Al.....Aluminium
AN.....Auftragnehmer
As.....Arsen

B

BBodSchG...Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV...Bundesbodenschutzverordnung
BfUL.....(Staatliche) Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (Sachsen)
BNK.....Basenneutralisationskapazität
BS.....Basensättigung
bwB.....basenwirksame Bestandteile
BZE.....Bodenzustandserhebung (=Level I)

C

Ca.....Calcium
CaCO₃.....Calciumcarbonat
Cd.....Cadmium
Cr.....Chrom
Cu.....Kupfer

D

DBF.....Dauerbeobachtungsflächen, Intensivmessflächen (=Level II)
DIN.....Deutsches Institut für Normung

E

EN.....Europäische Norm
EU.....Europäische Union

F

FFH-LRT.....Lebensraumtyp nach Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie

G

g.....Gramm
GPS.....Global Position System (Globales Positionsbestimmungssystem)

H

ha.....Hektar
HNO₃.....Salpetersäure
H₂SO₄.....Schwefelsäure
Hg.....Quecksilber

I

ISO.....International Organization for Standardization
(Internationale Organisation für Normung)

K

K.....Kalium
kg.....Kilogramm
kmol.....Kilomol = Molare Masse
KWuF.....Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft des Staatsbetriebes Sachsenforst

L

LFP.....Landesforstpräsidium (Vorläuferorganisation des SBS)
LUFÄ.....Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt

M

m.....Meter
mg.....Milligramm
Mg.....Magnesium
MgCO₃.....Magnesiumcarbonat
mm.....Millimeter

N

NH_y.....reduzierte Stickstoffverbindungen

NH₃.....Ammoniak

NH₄.....Ammonium

Ni.....Nickel

NO_x.....Stickstoffoxid

NSG.....Naturschutzgebiet

O

O₃.....Ozon

P

Pb.....Blei

S

SBS.....Staatsbetrieb Sachsenforst

SNK.....Säureneutralisationskapazität

SO₂.....Schwefeldioxid

T

t.....Tonne

Tl.....Thallium

U

UNB.....Untere Naturschutzbehörde

UWB.....Untere Wasserbehörde

V

VDLUFA.....Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V.

W

WZE.....Waldzustandserhebung (=Level I)

Z

Zn.....Zink

VI (9) Anhang

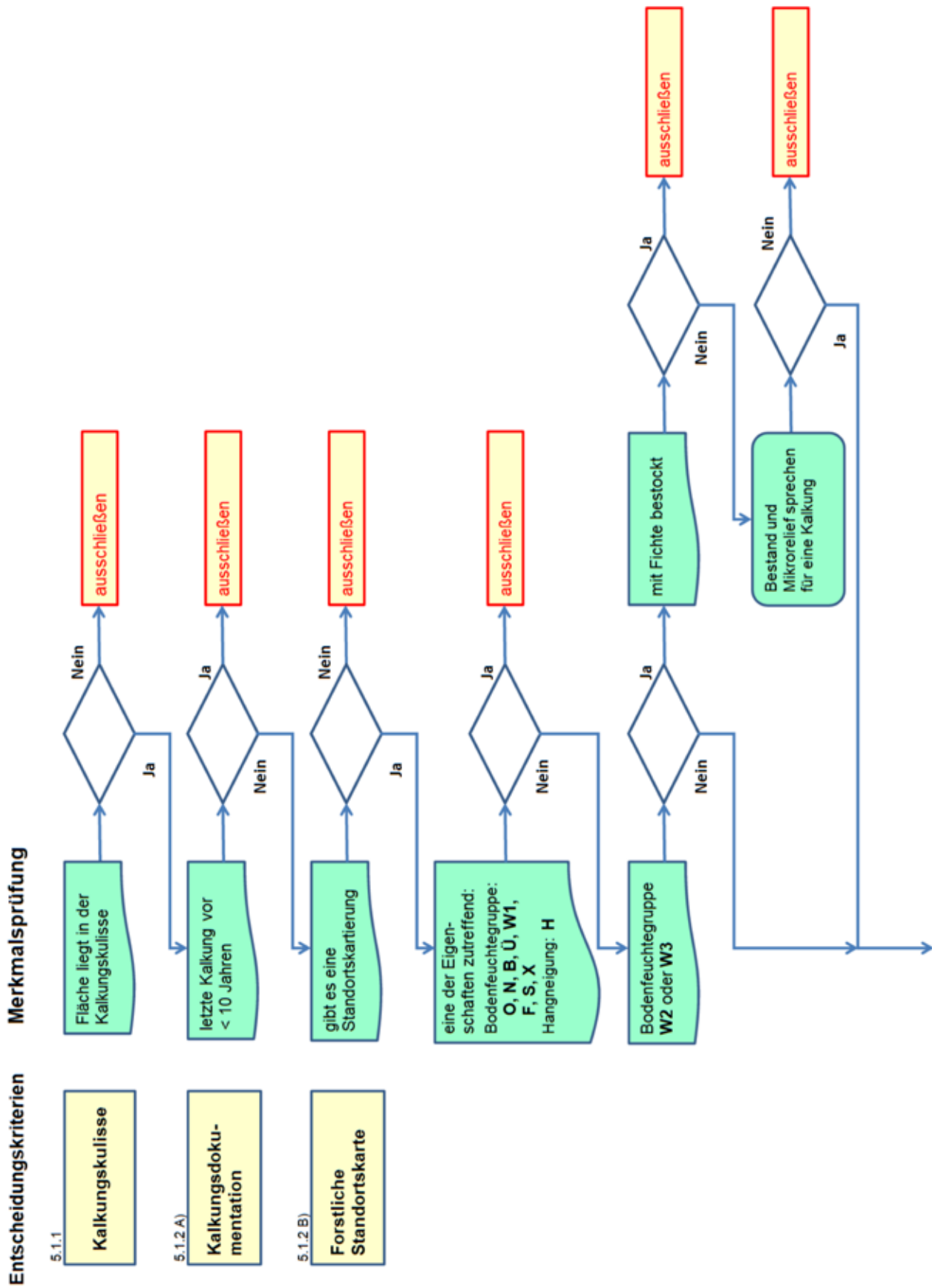
- Anhang 9.1: Zeitplan für Planung und Durchführung einer Bodenschutzkalkung
- Anhang 9.2: Ablauf- und Entscheidungsschema zur Auswahl der Kalkungsflächen
- Anhang 9.3: Workflow des Kalkungsplanungsmoduls in FGIS_online
- Anhang 9.4: Feinplanung (Übersichtskarte 1 : 25.000; Datentabellenauszug)
- Anhang 9.5: Maximale Schwermetallgehalte bei zur Bodenschutzkalkung eingesetzten Kalken und Abschätzung hektarbezogener Schwermetallfrachten durch Kalkung und sonstige Einträge unter Wald im Vergleich mit der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
- Anhang 9.6: Angebot/Leistungsverzeichnis zur Bodenschutzkalkung (Beispiel)
- Anhang 9.7: Interne Dokumentation von Kontrollen (Beispiel)
- Anhang 9.8: GPS-Befliegungskarte (Ausschnitt)
- Anhang 9.9: Tabellarischer Nachweis zu den gekalkten Flächen (Beispiel)
- Anhang 9.10: Einschätzung der Bodenschutzkalkung durch den Forstbezirk (Beispiel)
- Anhang 9.11: Anleitung zur Entnahme von Kalkproben für deren analytische Kontrolle
- Anhang 9.12: Etikett für die Kalkproben
- Anhang 9.13: Protokoll der Kalkprobenahme
- Anhang 9.14: Protokoll zur Kontrolle der GPS-Befliegungskarten (Beispiel)

9.1 Zeitplan für Planung und Durchführung einer Bodenschutzkalkung

Arbeitsschritt	Termin	Beteiligte		
		Forst- bezirk	KWuF	Vergabe- stelle
1. Flächenauswahl	September/Oktober (Jahr vor der Kalkung)	X	x	
2. Beteiligungen (UNB, UWB, Waldbesitzer)	November (Jahr vor der Kalkung)	X	x	
3. Einarbeitung der Beteiligungsergebnisse	Dezember (Jahr vor der Kalkung)	X		
4. Endabstimmung der Kalkungskulisse	Dezember (Jahr vor der Kalkung)	X	X	
5. Erstellung digitaler Kalkungsobjekte	Januar	x	X	
6. Feinplanung	Februar	x	X	
7. Mittelbeantragung ⁵	Februar/März		X	
10. Vorbereitung Vergabeverfahren	März		X	X
9. Ausschreibung	April		x	X
10. Besichtigungstermin vor Ort für Bieter	April bis Mitte Mai	X		
11. Angebotsöffnung, -prüfung, -bewertung,	Ende Mai bis Mitte Juni		X	X
12. Vorabinformation der Bieter	bis Mitte Juni		x	X
13. Zuschlag	Ende Juni		x	X
14. Durchführung der Kalkung durch Auftragnehmer	Juli bis Oktober	X	x	
15. Kontrollen (Sichtkontrollen, Probenahmen, Prüfung der Arbeitsnachweise)	Juli bis Oktober	X		
16. Auswertung Analysen (ggf. Regressforderungen)	Juli bis Oktober		X	
17. Prüfung der Rechnungsunterlagen	Juli bis Oktober	X	x	
18. Zusammenführung der Unterlagen/ Dokumentationen; Berichterstellung	ab November		X	
		X	Hauptverantwortliche	
		x	maßgeblich Beteiligte	

⁵ Beantragung der finanziellen Mittel für die konkreten Objekte auf Grundlage der Feinplanung; ein generelles Kalkungsbudget sollte bereits zum Zeitpunkt der Flächenauswahl im September vorhanden sein.

9.2 Ablauf- und Entscheidungsschema zur Auswahl der Kalkungsflächen

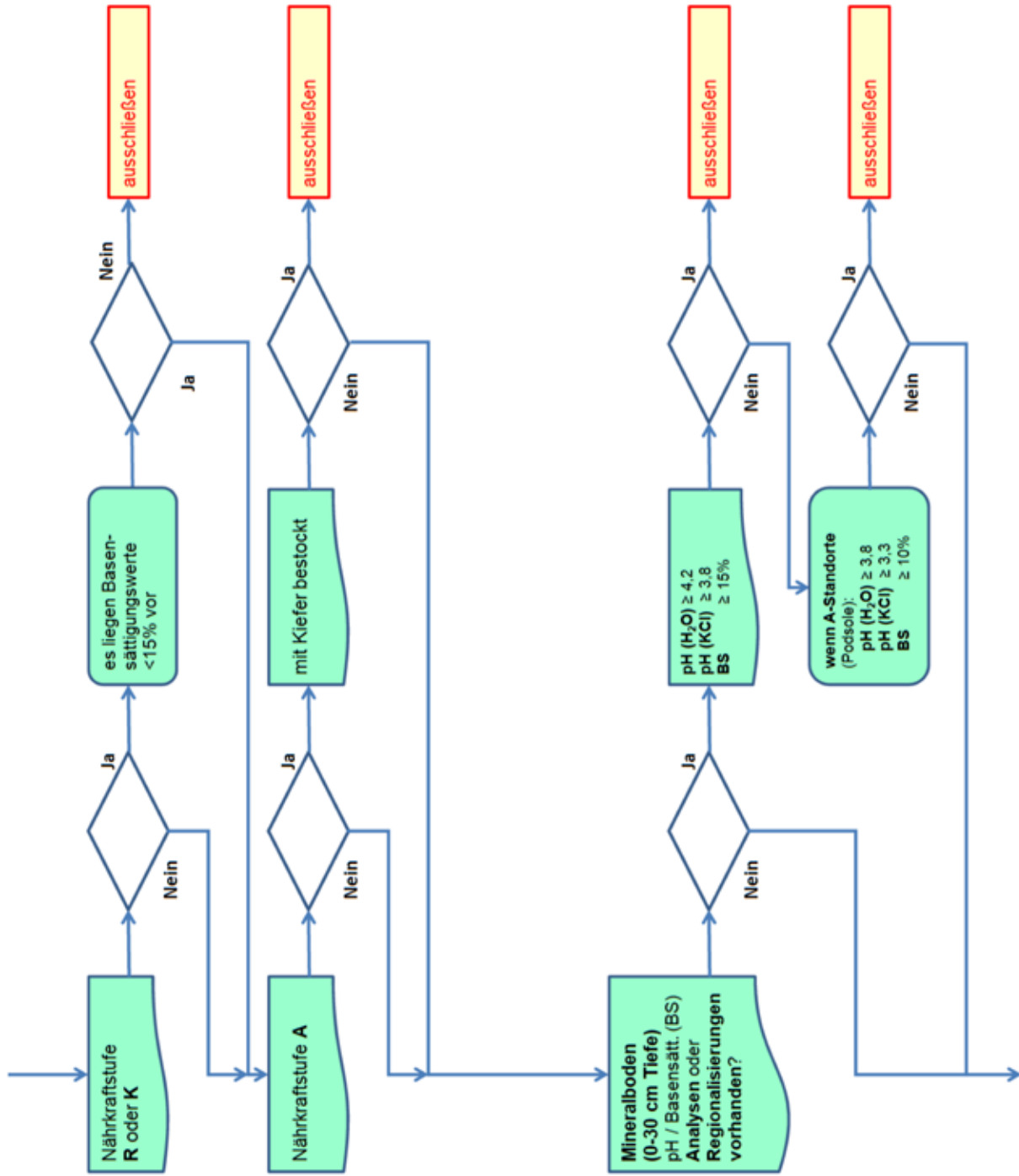


Entscheidungskriterien

5.1.2.B) Fortsetzung

Forstliche Standortskarte

Merkmalsprüfung



5.1.2.C)

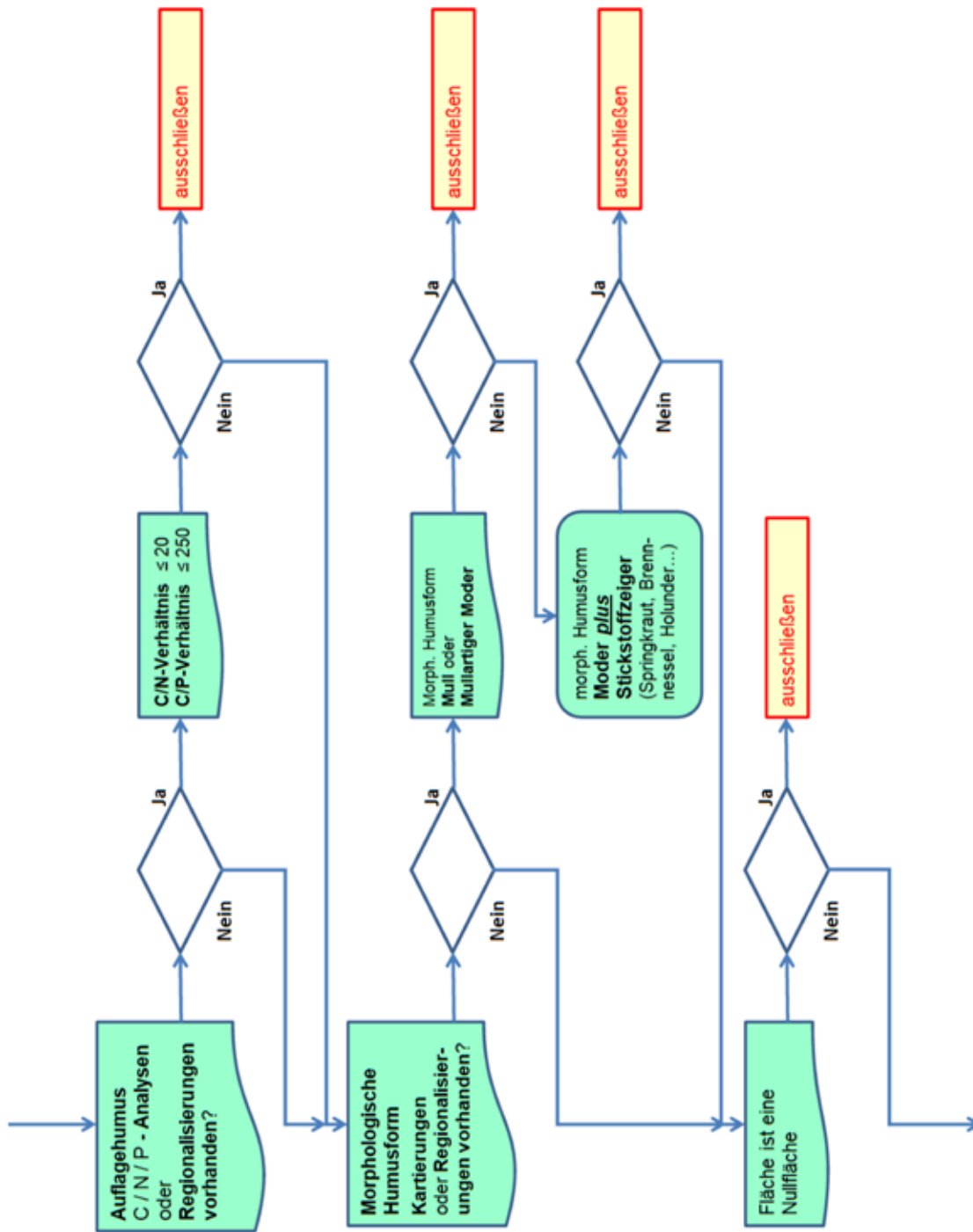
Standortzustand

Entscheidungskriterien

5.1.2.C) Fortsetzung

Standortzustand

Merkmalsprüfung



5.1.2.D)

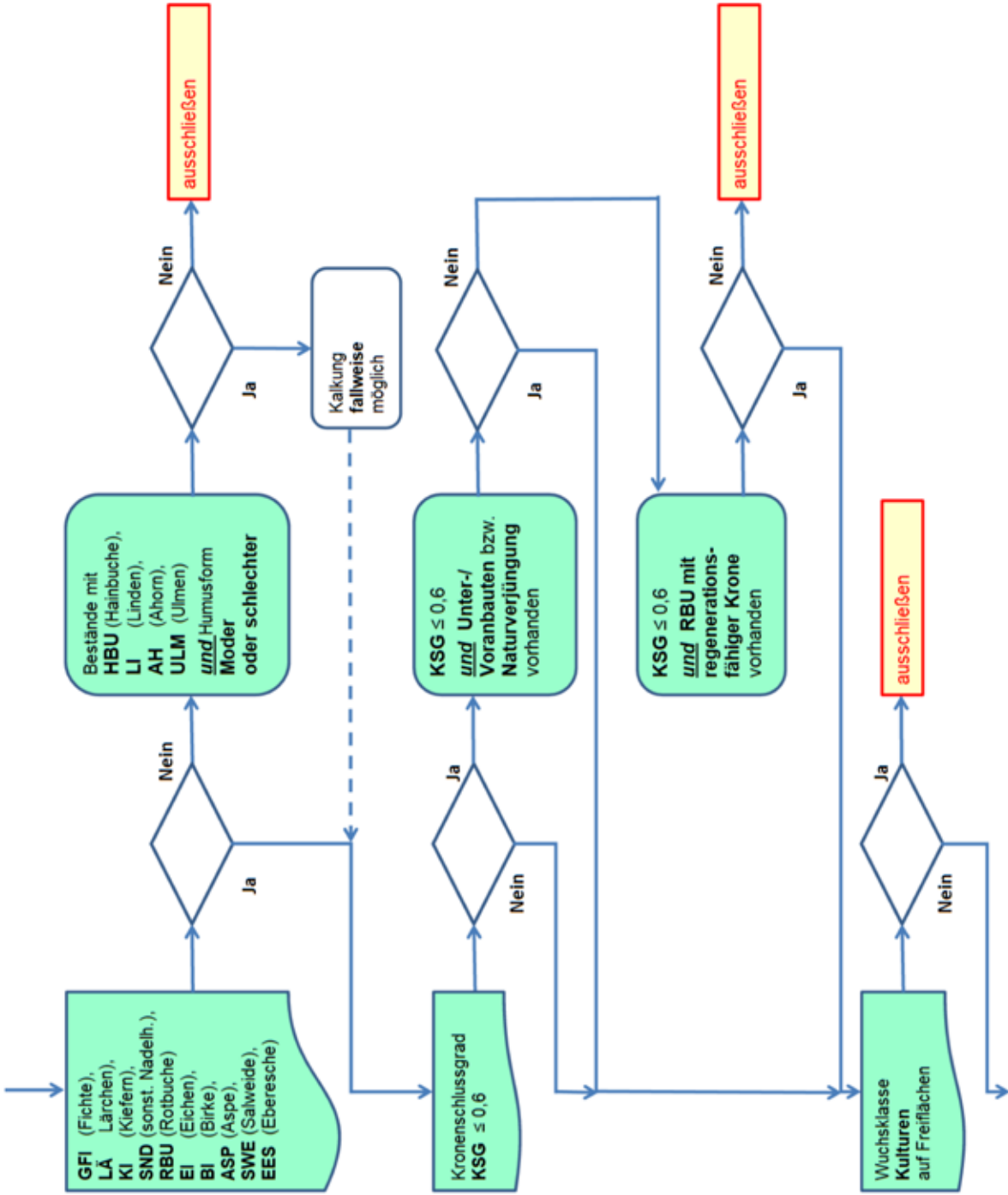
Nullflächen
(als Referenz zur Dokumentation der Kalkungswirkung)

Entscheidungskriterien

5.1.2.E)

Bestockung

Merkmalsprüfung

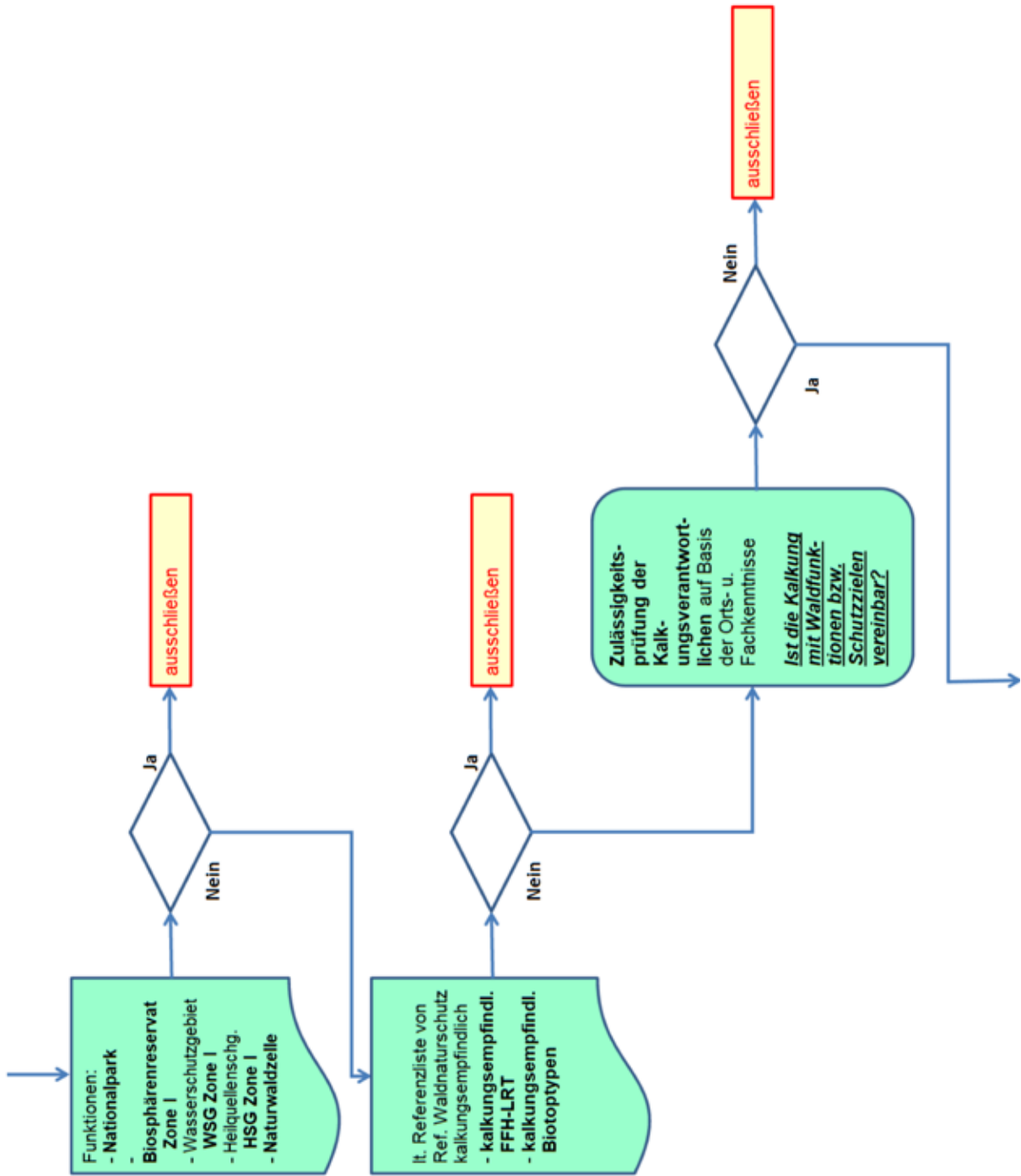


Entscheidungskriterien

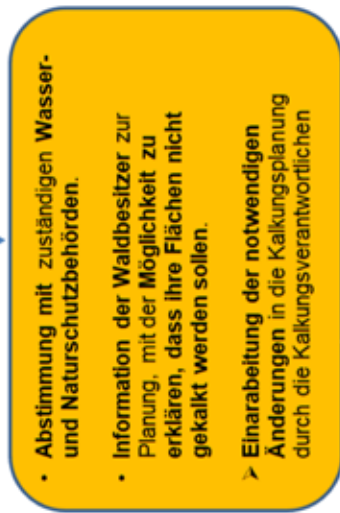
5.1.2.F)

Waldfunktionen

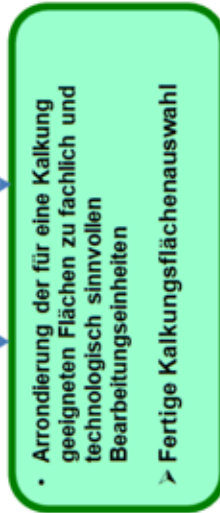
Merkmalsprüfung



5.1.3



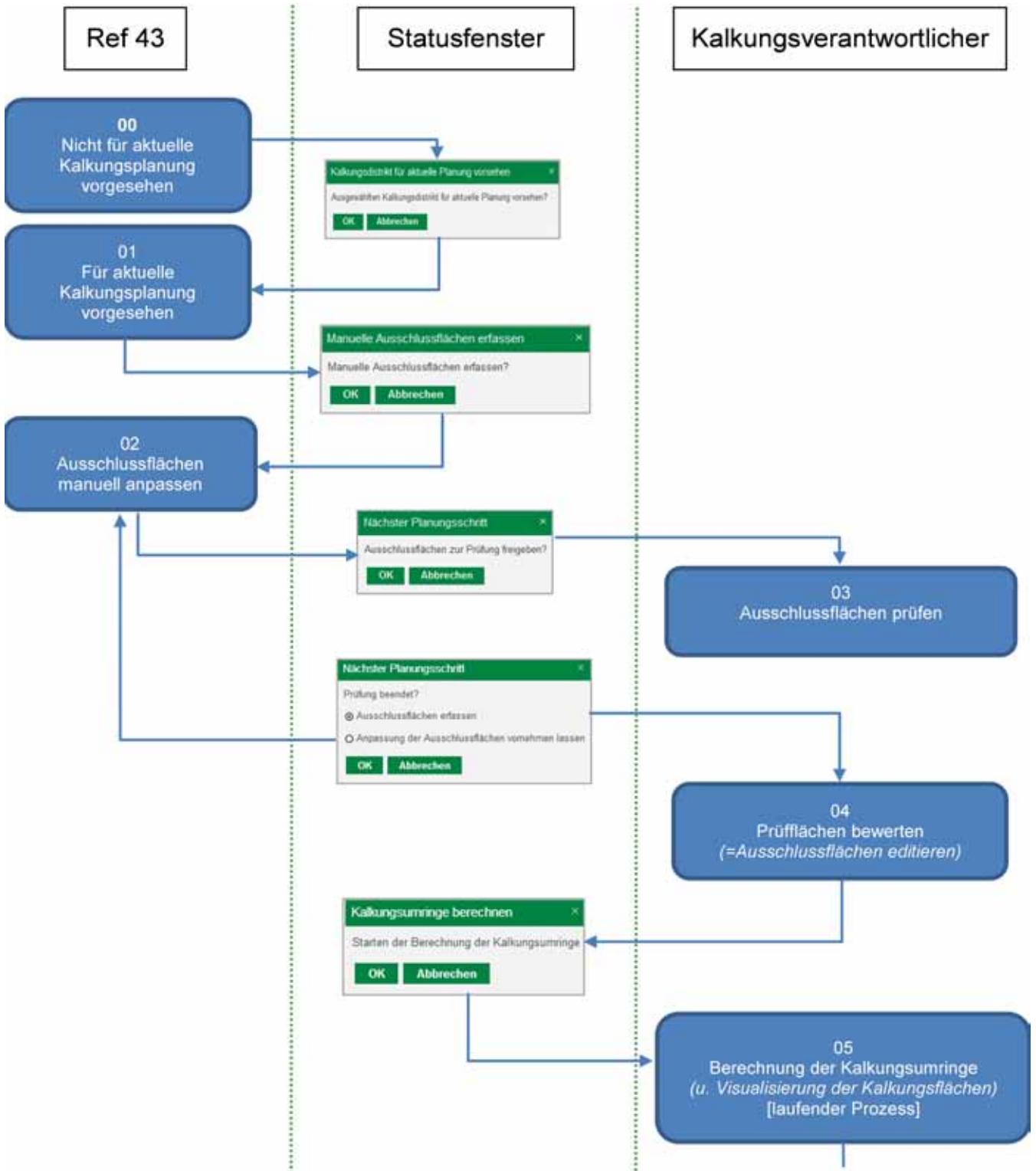
5.1.4

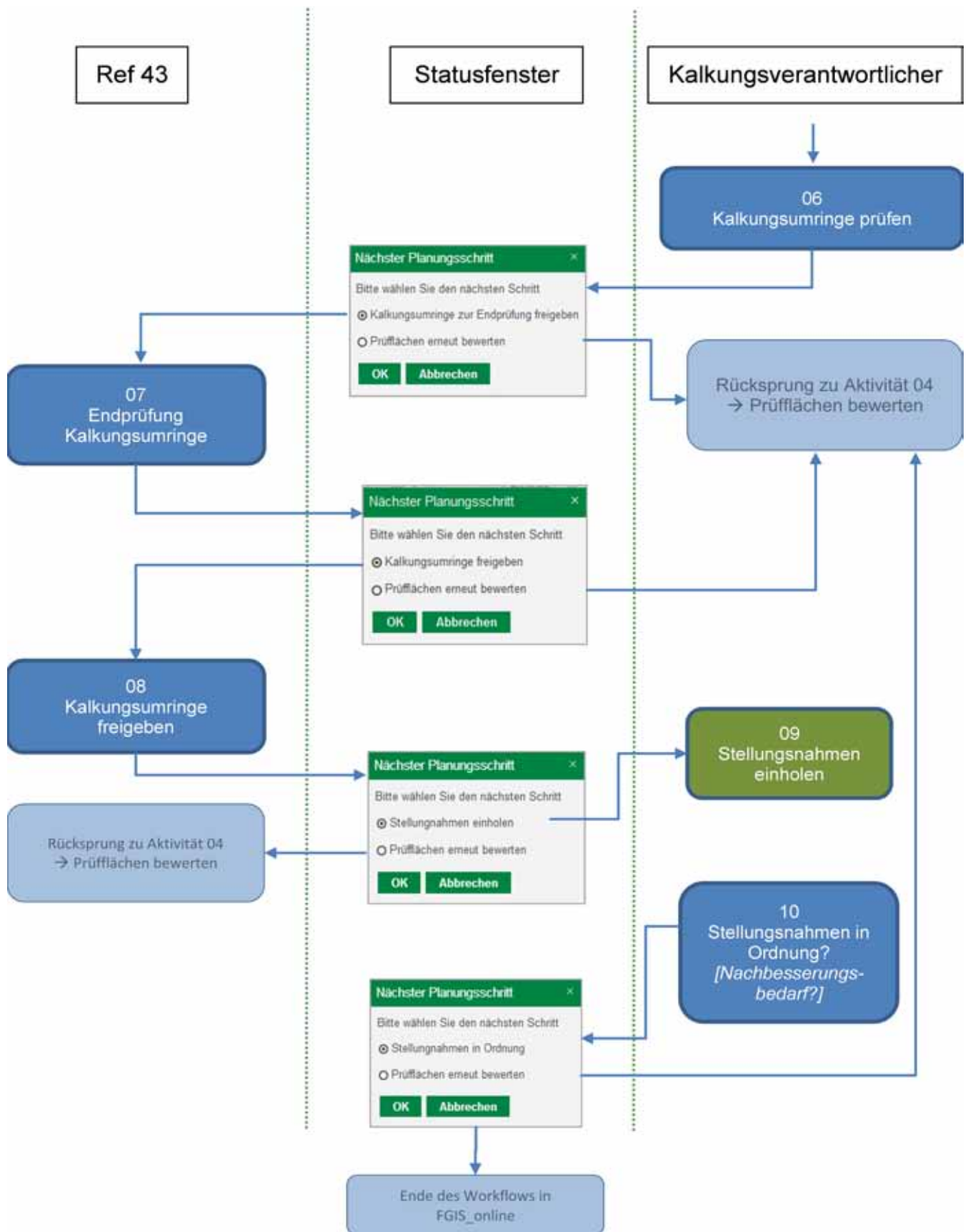


9.3 Workflow des Kalkungsplanungsmoduls in FGIS_online

Die Abbildung zeigt den Workflow des Kalkungsplanungsmoduls in FGIS_online einschließlich der auswählbaren Statuswechsel bezogen auf die Nutzer-

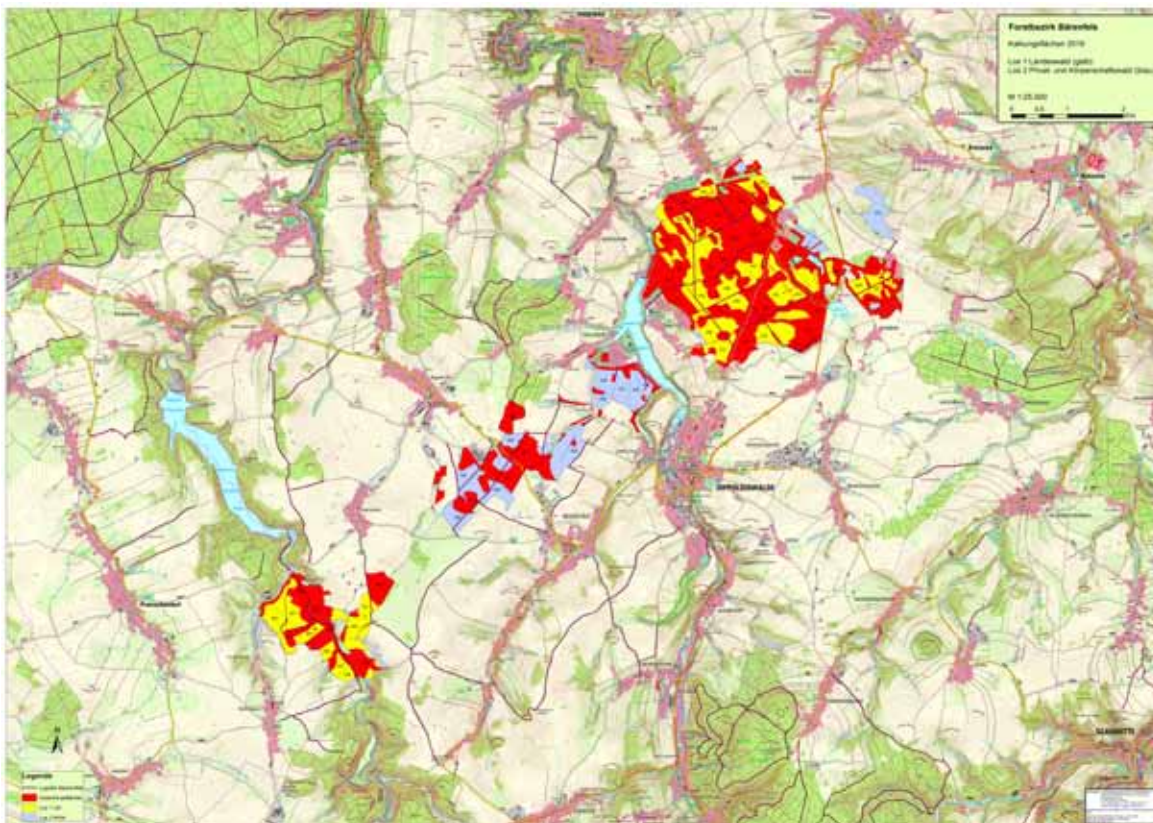
gruppen des koordinierenden Kompetenzzentrums für Wald und Forstwirtschaft (Nutzergruppe Ref. 43) und den Kalkungsverantwortlichen des Forstbezirkes.





9.4 Feinplanung

Übersichtskarte (1 : 25.000) für Logistikkonzept



gelb (Landeswald) und blau (Privat- und Körperschaftswald) = zu kalkende Flächen; rot = Auslassungsflächen

Auszug aus der Datentabelle eines digitalen Kalkungsprojekts

KPL_ADR	FB	WT	ABT	KPL_OA	KPL_WEA	FLAECHE_HA	KALK_FLAE	LW_FLAE	KOW_FLAE	PW_FLAE	KIW_FLAE	AUS_FLAE	KPL_DOSIS	KPL_MENGE	KPL_PLANJAH	KPL_LOS
150727 A5019411	1507	27 A	501	9411	LW	6,42	6,42	6,42	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	19,26	2019	12
150727 A5029421	1507	27 A	502	9421		0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	3,00	0,00	2019	0
150727 A5039421	1507	27 A	503	9421		0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	3,00	0,00	2019	0
150727 A5039411	1507	27 A	503	9411	LW	5,92	5,92	5,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	17,76	2019	12
150727 A5049411	1507	27 A	504	9411	LW	3,66	3,66	3,66	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	10,98	2019	12
150727 A5069421	1507	27 A	506	9421		1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,65	3,00	0,00	2019	0
150727 A5069411	1507	27 A	506	9411	LW	18,73	18,73	18,73	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	56,19	2019	12
150727 A5079421	1507	27 A	507	9421		8,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,76	3,00	0,00	2019	0
150727 A5079411	1507	27 A	507	9411	LW	16,22	16,22	16,22	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	48,66	2019	12
150727 A5089421	1507	27 A	508	9421		18,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,17	3,00	0,00	2019	0
150727 A5089411	1507	27 A	508	9411	LW	3,90	3,90	3,90	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	11,70	2019	12
492727 A5389421	4927	27 A	538	9421		4,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,23	3,00	0,00	2019	0
492727 A5389411	4927	27 A	538	9411	PKW	16,31	16,31	0,00	0,00	16,31	0,00	0,00	3,00	48,93	2019	13
492727 A5399421	4927	27 A	539	9421		19,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,66	3,00	0,00	2019	0
492727 A5419421	4927	27 A	541	9421		0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	3,00	0,00	2019	0
492727 A5429421	4927	27 A	542	9421		7,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,96	3,00	0,00	2019	0
492727 A5449411	4927	27 A	544	9421		0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	2019	0
492727 A5449421	4927	27 A	544	9421		34,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,49	3,00	0,00	2019	0
492727 A5459421	4927	27 A	545	9421		19,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,55	3,00	0,00	2019	0
492727 A5459411	4927	27 A	545	9411	PKW	2,75	2,75	0,00	0,00	2,75	0,00	0,00	3,00	8,25	2019	13
492727 A5469421	4927	27 A	546	9421		2,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,30	3,00	0,00	2019	0
492727 A5659421	4927	27 A	565	9421		6,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,09	3,00	0,00	2019	0
492727 A5659411	4927	27 A	565	9411	PKW	11,71	11,71	0,00	0,00	11,71	0,00	0,00	3,00	35,13	2019	13
492727 A5669421	4927	27 A	566	9421		17,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,19	3,00	0,00	2019	0
492727 A5669411	4927	27 A	566	9411	PKW	1,08	1,08	0,00	0,00	1,08	0,00	0,00	3,00	3,24	2019	13
492727 A5699421	4927	27 A	569	9421		31,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,58	3,00	0,00	2019	0
492727 A5699411	4927	27 A	569	9411	PKW	30,57	30,57	0,00	0,00	30,57	0,00	0,00	3,00	91,71	2019	13
492727 A6019421	4927	27 A	601	9421		11,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,34	3,00	0,00	2019	0
Adresse	Forst-bezirk	Wald-teil	Abtei-lung	Kalkungs-planung_Objektart	Waldei-gentümer	Fläche	Kalkfläche	Landes-waldfläche	Kommunal-waldfläche	Privatwald-fläche	Kirchen-waldfläche	Ausschlu-ßfläche	Kalkdosis	Kalkmenge je Fläche	Kalkplanungs-jahr	Kalkplanungslos

*) KPL_OA (Objektart Kalkungsplanung): 9411 = Kalkungsfläche; 9421 = Ausschlussfläche

9.5 Maximale Schwermetallgehalte

Maximale Schwermetallgehalte bei zur Bodenschutzkalkung eingesetzten Kalken und Abschätzung hektarbezogener Schwermetallfrachten durch Kalkung und sonstige Einträge unter Wald **im Vergleich mit der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung**

Zitat:

Bundesregierung (31.08.2015): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 102 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Online verfügbar unter → <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt>.

Merkmal	Element-Konzentration [mg/kg]								
	As	Cd	Cr-total	Hg	Ni	Pb	Tl	Cu	Zn
zulässige Konzentration ⁶	20	1	150	0,5	10	125	1	35	200
durch Kalkung	mittlere jährliche Element-Fracht [g/ha-a]								
real ⁷	2,4	0,14	1,1	0,02	0,84	4,3	0,07	1,2	13,4
maximal zulässig ⁸	7,2	0,36	54	0,18	3,60	45,0	0,36	12,6	72,0
in DBF ⁹ durch	mittlere jährliche Element-Fracht [g/ha-a]								
Niederschlag	n.b.	3,02	6,15	n.b.	35,4	99,3	n.b.	43,6	342,3
Streufall	n.b.	0,32	3,92	n.b.	8,02	19,9	n.b.	13,2	35,0
Σ	n.b.	3,34	10,1	n.b.	43,4	119,2	n.b.	56,8	377,3
Σ Kalk ¹⁰ + sonst.	n.b.	3,48	11,2	n.b.	44,2	123,5	n.b.	58,0	390,7
zulässige Fracht ¹¹	k.A.	6,0	300	1,5	100	400	k.A.	360	1.200

⁶ Richtwerte, die bei Kalkung maximal um 20 % überschritten werden dürfen

⁷ Mittelwert der Elementfrachten auf Basis der Kalkbeprobungen der Jahre 2007-2017 (je 1.000 t eine Probe) bei 3 t/ha Kalk alle 10 Jahre

⁸ mögliche Einträge durch Kalkung bei Ausschöpfung des Richtwertes der zulässigen Konzentrationen¹ (inkl. Toleranz) mit 3 t/ha Kalk alle 10 Jahre

⁹ mittlere jährliche Fracht im Bestandesniederschlag (2001-2010) bzw. Streufall (2000-2015) der Forstlichen Dauerbeobachtungsflächen (DBF) Altenberg, Bautzen, Cunnersdorf, Klingenthal, Olbernhau

¹⁰ Mittelwert der Elementfrachten auf Basis der Kalkbeprobungen der Jahre 2007-2017 (je 1.000 t eine Probe) bei 3 t/ha Kalk alle 10 Jahre

¹¹ zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade nach § 8 Abs. 2 Nr. 2 BBodSchG und BBodSchV Anh. 2 Nr. 5

9.6 Angebot/Leistungsverzeichnis zur Bodenschutzkalkung (Beispiel)

Name bzw. Firmenbezeichnung des Bieters	
	Ort, Datum
	Anschrift
	Zuständiger Bearbeiter des Bieters
	Telefon
	Fax
	Geschäftszeichen des Bieters

Los	Z. 1	1 (LW)	2 (NLW)
Forstbezirk	Z. 2	xxx	xxx
Fläche (ha)	Z. 3	379,15	223,25
Dosis (t/ha)	Z. 4	3,0	3,0
Kalkmenge (t)		1.137,45	669,75
Magnesiumkalktyp	Z. 5		
Lieferwerk	Z. 6		
Siebdurchgang (mm)			
Masse-%	< 3,15	Z. 7	
Masse-%	< 2,0	Z. 8	
Masse-%	< 1,0	Z. 9	
Masse-%	< 0,09	Z. 10	
Gehalt (%) CaCO₃	Z. 11		
MgCO₃	Z. 12		
bwB CaCO₃	Z. 13	[interne Berechnung]	[interne Berechnung]
bwB (CaO)	Z. 14	[interne Berechnung]	[interne Berechnung]
Reaktivität (%)			
Umschlagsystem	Z. 15		
Ausbringfirma	Z. 16		
Fluggerät [Typ]	Z. 17		
bei Helikopter Außenlasttragfähigkeit	Z. 18		
bei Helikopter Rotordurchmesser	Z.18a		
bei Flugzeug Mindestzuladungsvolumen	Z. 19		
Preis (€/t Ware) frei Waldboden ¹⁾	Z. 20		
Preis (€/t bwB CaCO₃)	Z. 21		
Hektar-Preis-Ware (EUR)	Z. 22		
Los-Preis-Ware (EUR)	Z. 23		

¹⁾ alle Preise sind incl. gültiger MwSt. anzugeben

einzutragende Felder

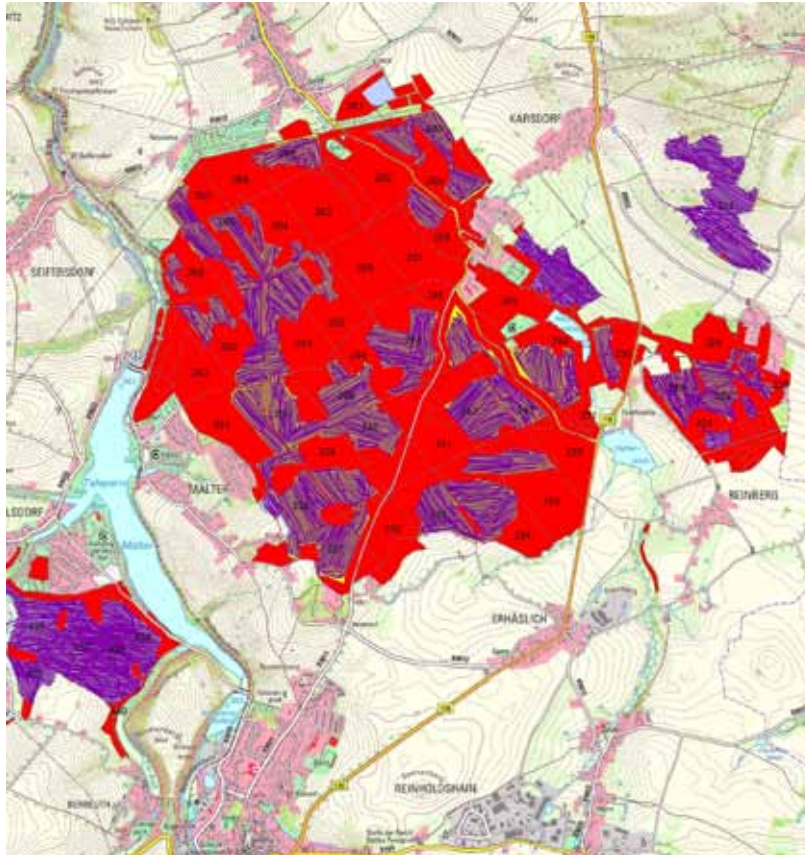
Zeile 13: % bwB CaCO ₃	= Z.11 + (Z.12 * 1,19)
Zeile 14: % bwB CaO	= Z.13 * 0,56
Zeile 15:	= offener oder geschlossener Umschlag
Zeile 16:	= die Firma, welche die Arbeiten ausführt
Zeile 17:	= z.B. Starrflügler M-18 oder Helikopter Hughes
Zeile 18 u. 18a:	= Außenlasttragfähigkeit, Rotordurchmesser
Zeile 19:	= Mindestzuladungsvolumen
Zeile 20:	= Summe aller Kosten für Kalk + Umschlag + Ausbringung
Zeile 21:	= (Z.20 * 100) / Z.13
Zeile 22:	= Z.20 * Z. 4
Zeile 23:	= Z.22 * Z.3

Die Schwermetall-Grenzwerte lt. Ausschreibung werden eingehalten.

Firmenstempel

Unterschrift

9.8 GPS-Befliegungskarten (Ausschnitte)



rote Flächen = Ausschlussflächen / violette Linien = Flugbahnen mit Kalkapplikation



graue Flächen = Ausschlussflächen / schwarze Linien = Flugbahnen mit Kalkapplikation

9.9 Tabellarischer Nachweis zu den gekalkten Flächen (Beispiel)

Tabellarischer Nachweis der gekalkten Flächen																				
Firma: XXXXX			Los Nr.: 02																	
			Forstbezirk: XXX																	
Revier	Waldteil	Abteilung	Kalkfläche nach Eigentümer [ha]				Ausführung													
			Landeswald	Kommunalwald	Privatwald	Kirchenwald	Menge (t) Soll	gekalkt (ja/nein ¹)	Datum											
07	01AH	632			25,70		77,10	ja	16.9.2019											
07	01AH	633			9,70		29,10	ja	16.9.2019											
07	01AH	634			2,40		7,20	ja	16.9.2019											
07	01AH	635			1,80		5,40	ja	16.9.2019											
.											
.											
<i>hier weitere Eintragungen entsprechend Kalkungsdaten</i>																				
.											
.											
07	01AH	636			0,14		0,42	ja	16.9.2019											
07	01AH	637		1,30			3,90	ja	16.9.2019											
07	01AH	638		11,20			33,60	ja	16.9.2019											
07	01AH	639		6,94			20,82	ja	16.9.2019											
07	01AH	640		0,07			0,21	ja	16.9.2019											
07	01AH	641		1,01			3,03	ja	16.9.2019											
07	01AH	642			0,22		0,66	ja	16.9.2019											
07	01AH	643				0,30	0,90	ja	16.9.2019											
Summe Sollmenge (t):							983,4													
ausgebrachte Kalkmenge (t)*: 1.000,6																				
*) Die zugehörigen Lieferscheine liegen bei.																				
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 20%;">ausgebrachte Kalkmenge</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="text-align: center; width: 20%;">Summe Sollmenge</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="text-align: center; width: 20%;">Abweichung vom Soll</td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1000,6</td> <td style="text-align: center;">:</td> <td style="text-align: center;">983,4</td> <td style="text-align: center;">x 100 =</td> <td style="text-align: center;">101,7</td> <td style="text-align: center;">%</td> </tr> </table>									ausgebrachte Kalkmenge		Summe Sollmenge		Abweichung vom Soll		1000,6	:	983,4	x 100 =	101,7	%
ausgebrachte Kalkmenge		Summe Sollmenge		Abweichung vom Soll																
1000,6	:	983,4	x 100 =	101,7	%															
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Unterschrift des Auftragnehmers</div>																				
¹⁾ bei nein Erläuterung ggf auf Beiblatt																				

9.10 Einschätzung der Bodenschutzkalkung durch den Forstbezirk (Beispiel)

Forstbezirk	Los LW/PKW	Fläche (ha)	Kalksorte/ -werk	Dosis (t/ha)	Ausführungszeitraum				
					von	bis			
Arbeitnehmer / Ansprechpartner									
Nachunternehmer / Ansprechpartner									
Zutreffendes ankreuzen bei ja/ nein oder Benotung von 1 (sehr gut) - 5 (sehr schlecht)									
1	hat der AN rechtzeitig den FOB über den Beginn der Kalkung informiert?				ja		nein		
2	Hat der AN Ihre Argumente bei Auswahl der Landeplätze, Straßen, Fahrwege, Rückeschneisen kooperativ berücksichtigt?				1	2	3	4	5
3	Hat der AN Hinweise auf Schäden an Wegen, Beständen berücksichtigt?				1	2	3	4	5
4	Hat sich der AN während der Kalkung um die Ausführung gekümmert und Kontakt mit Ihnen gesucht?				1	2	3	4	5
5	War der AN für Sie problemlos erreichbar?				1	2	3	4	5
6	Verliefen die Arbeiten witterungsabhängig zügig?				1	2	3	4	5
7	War der AN bei Kalkprobenahmen kooperativ?				1	2	3	4	5
8	War der AN bei Abschätzung/ Beräumung von Kalkrestmengen kooperativ?				1	2	3	4	5
9	Können Sie eine ordnungsgemäße Kalkausbringung bestätigen?				1	2	3	4	5
10	Gab es Probleme mit der Abdrift des Kalkes?				1	2	3	4	5
11	Hat der AN auf Ihr begründetes Verlangen die Kalkung eingestellt bzw. verändert?				1	2	3	4	5
12	Hat der AN Sie rechtzeitig auf Hemmnisse/Verzögerungen hingewiesen?				1	2	3	4	5
Raum für ergänzende Bemerkungen									

9.11 Anleitung zur Entnahme von Kalkproben für deren analytische Kontrolle

Prinzip des Verfahrens

Die Kalkbeprobung erfolgt als Stichprobe von einer zufällig ausgewählten Partie möglichst unmittelbar bei deren Anlieferung auf den Umschlag- bzw. Lastaufnahmeplatz aus dem dort lagernden Haufwerk.

Die Anleitung zur Probenahme ist genauestens einzuhalten, damit im Streitfall anhand „gerichtsfester“ Proben und Analysen die toleranzüberschreitenden Abweichungen bei der gelieferten Ware bewiesen werden können, um die (teilweise nicht unerheblichen) Preisminderungen durchzusetzen.

Begriffsbestimmungen

Partie	Menge eines Kalkes, die sich nach ihrer Beschaffenheit, Kennzeichnung und räumlichen Zuordnung als eine Einheit darstellt, d. h., die als Einheit transportierte oder gelagerte Warenmenge (z. B. eine LKW-Ladung, ein Haufwerk am Umschlagplatz)
Einzelprobe	kleine Menge, die an einer Stelle der Partie derart entnommen wird, dass sie die unmittelbare Umgebung dieser Stelle so vollständig wie möglich widerspiegelt
Sammelprobe	Gesamtheit der aus der Partie entnommenen Einzelproben
reduzierte Sammelprobe/ = Mischprobe	Teilmenge der Sammelprobe mit gleicher Zusammensetzung wie diese; sie wird durch mengenmäßige Verringerung der Sammelprobe nach der Viertelungsmethode hergestellt
Endprobe	für die laboranalytische Untersuchung aus der reduzierten Sammelprobe (Mischprobe) gebildete Teilmenge von mindestens 500 g

Durchführung der Kalkprobenahme

- (1) Der Beauftragte des Auftragnehmers legt dem Probenehmer am Umschlagplatz die Lieferscheine der zu beprobenden Partie vor (Übernahme der Daten in das Beprobungsprotokoll). Der Partie müssen die Lieferscheine (Nummer, Kalkwerk, -sorte, -menge, Lieferdatum, Kennzeichen des Lieferfahrzeuges) eindeutig zuordenbar sein. Jede Probenahme wird auf dem Formular „Protokoll zur Probenahme“ (siehe Anhang 9.12) protokolliert, das vom Probenehmer und einem Beauftragten des Auftragnehmers zu unterzeichnen ist.
- (2) Der Probenehmer hat das zu beprobende Gut und seine Umgebung genau in Augenschein zu nehmen, Auffälligkeiten und etwaige Uneinheitlichkeit des Kalkes sind im Protokoll unter „Sonstige Beobachtungen“ festzuhalten.
- (3) Als Partie gilt
 - der an Umschlagplätzen als loses Haufwerk oder in Containern abgelegte Kalk oder
 - die Ladung (ca. 25–30 t) eines Transportfahrzeuges.
- (4) Die Mindestzahl der Einzelproben ($N_{\min EP}$) je Probenahme richtet sich nach der Masse der beprobten Partie. Sie errechnet sich aus der Quadratwurzel des 20-fachen der Masse [t] der Partie:
$$N_{\min EP} = \sqrt{20 \cdot \text{Tonnage}}$$
Die Zahl der Einzelproben sollte nicht unter 25 liegen.
- (5) Die Einzelproben von je mindestens 200 g sind nach dem Zufallsprinzip über die gesamte Liefermenge hinweg so zu entnehmen, dass dadurch die gesamte Partie repräsentativ erfasst wird. Es

ist darauf zu achten, dass aus allen Teilen der Partie (des Haufwerks), auch am oberen und unteren Rand, vor allem aber aus dem Schüttkegelzentrum, Einzelproben entnommen werden.

- (6) Die Einzelproben werden auf einer trockenen und sauberen Gewebeplane gesammelt, etwaige Klumpen zerdrückt, aber nicht zermahlen und gut durchmischt. Möglich ist auch eine Durchmischung in einer Plastewanne mit nachfolgender Ausbreitung auf der Gewebeplane.
- (7) Die so entstandene Sammelprobe (bei 25 Einzelproben á 200-400 g = 5-10 kg) ist anschließend von der Menge her auf maximal 3 kg zu reduzieren. Sie wird dazu durch zwei diagonale Linien in vier gleiche Teile aufgeteilt. Man verwirft dann zwei einander gegenüberliegende Viertel (siehe Schema unten), mischt die verbleibenden zwei Viertel erneut sorgfältig durch und wiederholt den Viertelungsvorgang so lange, bis eine reduzierte Sammelprobe/Mischprobe von etwa 3 kg erreicht ist.
- (8) Aus der so gewonnenen reduzierten Sammelprobe/Mischprobe sind drei Endproben (A, B, C) von etwa 800 g (mindestens jedoch 500 g) durch zufällige Teilmengenentnahme mit Kunststoff-Messschaufel zu bilden. Die Endproben werden in Probenbeutel (reißfeste Kunststofftüten) eingefüllt.
- (9) Jede Endprobe wird doppelt etikettiert (Angaben zu: Forstbezirk, Revier, Datum, Probenehmer, Plomben-Nr., Kalktyp und Lieferwerk). Ein Etikett wird direkt in den Probebeutel, das andere in den darüber gezogenen Beutel eingelegt (doppelte Verpackung). Jede der drei Endproben wird mit einer nummerierten Plombe verschlossen und gesichert.
- (10) Zwei Endproben (A, B) werden vom Forstbezirk unverzüglich mit den Kopien der Probenahme-Protokolle an die BfUL zur Analyse übersandt. Die dritte Endprobe (C) verbleibt zusammen mit dem Original des Protokolls zur Kalkprobenahme beim Kalkungsverantwortlichen im Forstbezirk.



Schema zur Bildung der reduzierten Sammelprobe/ Mischprobe und der drei Endproben durch zufällige Teilmengenentnahme (Fotos: BfUL)

9.12 Etikett für die Kalkproben

Forstbezirk	
Revier	
Datum	
Probenehmer	
Plomben-Nr. (muss mit der Nr. auf dem Protokoll übereinstimmen)	
Kalktyp	
Lieferwerk	

9.13 Protokoll der Kalkprobenahme

Protokoll Kalkprobenahme (für 3 Endproben (A/B/C) einer Sammelprobe)

Forstbezirk (AG)	Revier	Los	Datum	Plombennummer	
				A	
				B	
				C	
Auftragnehmer (AN):					
Nachunternehmer:					
Im Anhalt an die Bestimmungen der "Düngemittel- Probenahme- und Analysenverordnung" v. 27. Juli 2006 (BGBl I S. 1822)					
wurde beprobt					
Typ/ Handelsname:	Lieferwerk:	Umschlagsystem (ankreuzen):			
		offen	geschlossen		
Witterung zur Probenahme:					
die Probenahme umfasst die					
Lieferschein- Nr.:	Lieferung am:	Menge der Lieferung (t):			
Für die Sammelprobe wurden	Einzelproben entnommen	(eintragen)		
aus:	ruhendem Gut				
mit:	geeigneten Probenahmewerkzeugen				
aus der gemischten Sammelprobe wurden 3 Endproben A, B, C (a ≥ 500 g) gebildet und mit dem vollständig ausgefüllten Etikett für die Kalkprobe					
überführt in:			verschlossen u. gesichert durch:		
Probenbeutel/Probe (doppelt verpackt)			Nummerierte Plombe (muss mit o. g. Plomben- Nr. übereinstimmen)		
Die Richtigkeit der o.g. Angaben sowie Übergabe/Erhalt einer Kopie dieses Protokolls bestätigen:					
Datum:		für den	Probenehmer (AG)	Beauftragter des AN	

sonstige Beobachtungen/ Bemerkungen:

.....
Datum/ Unterschrift

9.14 Protokoll zur Kontrolle der GPS-Befliegungskarten (Beispiel)

Bodenschutzkalkung im Freistaat Sachsen	
<u>Protokoll der Kontrolle der GPS-Befliegungskarten*</u>	
Forstbezirk:	_____
Rechnungs-Nr.:	_____ Auftragnehmer: _____
Los-Nr.:	_____
<p>Bei der gutachterlichen Bewertung der GPS-Befliegungskarten wurde die Einhaltung der mindestens 90 %igen gleichmäßigen Abdeckung der zu kalkenden Flächen, auf die obige Rechnungs-Nr. bezieht, festgestellt. Bezugseinheiten sind die zur Kalkung vorgesehenen und tatsächlich bearbeiteten Flächen der jeweiligen Abteilungen.</p>	
<p><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein [zutreffendes ankreuzen]</p>	
Bemerkungen:	

<p>*) Die Kontrolle basiert auf einer Inaugenscheinnahme der GPS-Befliegungskarten und schließt eine spätere Prüfung der aufgezeichneten GPS-Daten der Flugbewegungen mit und ohne Kalkapplikation nicht aus.</p>	
Folgerungen/Forderungen des Auftraggebers bei Unterschreitung einer 90%igen gleichmäßigen Abdeckung	

_____	_____
Unterschrift Forstbezirk	Unterschrift Auftragnehmer

In der Schriftenreihe sind bisher die folgenden Titel erschienen:

Erstausgabe	Waldfunktionenkartierung
Heft 1/1994	Forstpflanzenzüchtung – Quo vadis?
Heft 2/1995	Wald und Klima
Heft 3/1995	Erhaltung und Förderung forstlicher Genressourcen
Heft 4/1995	Übersicht der natürlichen Waldgesellschaften
Heft 5/1995	Genetik und Waldbau der Weißtanne, Bd. I und II
Heft 6/1996	Waldumbau – Beiträge zum Kolloquium
Heft 7/1996	Wald und Boden
Heft 8/1996	Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke im Freistaat Sachsen
Heft 9/1996	Waldbiotopkartierung in Sachsen
Heft 10/1996	ersetzt durch Heft 29
Heft 11/1997	Waldklimastationen
Heft 12/1997	Möglichkeiten einer integrierten Bekämpfung des Blauen Kiefernprachtkäfers
Heft 13/1998	Forstpflanzenzüchtung für Immissionsschadgebiete
Heft 14/1998	Der Waldzustand im Nationalpark Sächsische Schweiz nach den Ergebnissen der Permanenten Stichprobeninventur 1995/96
Heft 15/1998	Zuordnung der natürlichen Waldgesellschaften zu den Standorts- formengruppen (Ökogramme)
Heft 16/1998	Sanierung von Waldschadensflächen im extremen Immissionsschad- gebiet unter besonderer Berücksichtigung des Nichtstaatswaldes
Heft 17/1998	Wald- und Forstökosysteme auf Kippen des Braunkohlenbergbaus in Sachsen – ihre Entstehung, Dynamik und Bewirtschaftung
Heft 18/1999	Biogeochemisches Potenzial ausgewählter Baumarten auf meliorierten, immissionsbeeinflussten Standorten des Erzgebirges
Heft 19/1999	Waldumbau auf Tieflands- und Mittelgebirgsstandorten
Heft 20/2000	Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern (1992-97)
Heft 21/2000	Leitfaden forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen
Heft 22/2000	Empfehlungen zur Wiedereinbringung der Weißtanne
Heft 23/2000	Der sächsische Wald im Dienst der Allgemeinheit
Heft 24/2002	Die Baum- und Straucharten Sachsens – Charakterisierung und Verbreitung als Grundlagen der Generhaltung
Heft 25/2002	Waldvegetation – Vegetationsuntersuchungen in sächsischen Wäldern (Level I und II)
Heft 26/2003	Luftbildinterpretation – Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturreichen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild
Heft 27/2004	Ökogramme der Natürlichen Waldgesellschaften und Stamm- Vegetationsformen in Sachsen
Heft 28/2004	Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern (erweiterte, aktualisierte Auflage)
Heft 29/2012	Herkunftsgebiete und Herkunftsempfehlungen für forstliches Vermehrungsgut
Heft 30/2018	Sächsischer Waldbodenbericht

**Herausgeber:**

Staatsbetrieb Sachsenforst
Bonnewitzer Straße 34
01796 Pirna OT Graupa
Telefon: +49 3501 542-0
Telefax: +49 3501 542-213
E-Mail: poststelle.sbs@smul.sachsen.de
Internet: www.sachsenforst.de

Der Staatsbetrieb Sachsenforst ist eine nachgeordnete Behörde des Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft.

Redaktion:

Staatsbetrieb Sachsenforst
Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft
Referat Standortserkundung, Bodenmonitoring, Labor

Titelfoto:

Klaus Kühling

Gestaltung, Satz und Druck:

optimalprints

Redaktionsschluss:

31. Mai 2020

Auflage:

500 Exemplare (2., aktualisierte Auflage)

Bezug:

www.publikationen.sachsen.de

Diese Veröffentlichung wird finanziert aus Steuermitteln auf der Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushalts.

Verteilerhinweis:

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.



www.facebook.com/Sachsenforst