

Bodenversauerung und Schwermetallfreisetzung

Zusammenfassender Abschlussbericht zu den
Projekten „Säureinduziertes Puffervermögen von
Böden“ und „Auswirkungen der Versauerung auf
Böden und Gewässer“



böden



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Bodenversauerung und Schwermetallfreisetzung

**Zusammenfassender Abschlussbericht zu den
Projekten „Säureinduziertes Puffervermögen von
Böden“ und „Auswirkungen der Versauerung auf
Böden und Gewässer“**

57 Seiten, 12 Abbildungen, 10 Tabellen, Augsburg 2014

UmweltSpezial

Impressum

Bodenversauerung und Schwermetallfreisetzung

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax.: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept/Redaktion:

LfU, Referat 108: Dr. Thorsten Scheel, Dr. Bernd Schilling, Dr. Edzard Hangen, Dr. Raimund Prinz,
Referat 106: Dr. Michael Wittenbecher

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Stand:

Februar 2014

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Broschüre auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.



Europäische Union
„Investition in Ihre Zukunft“
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Ziele	6
3	Material und Methoden	7
3.1	Untersuchungsgebiet	7
3.1.1	Geologie und Böden	8
3.1.2	Standorte der Probenahme	8
3.2	Ermittlung von Critical Loads für das bayerische Interreg-Gebiet	8
3.2.1	Depositionsparameter: BC_{dep} , S_{dep} , N_{dep} und Cl_{dep}	9
3.2.2	Freisetzungsrates basischer Kationen aus der Silikatverwitterung, BC_w	10
3.2.3	Aufnahme von basischen Kationen und Stickstoff durch den Waldbestand: BC_u , N_u	11
3.2.4	Stickstoffimmobilisierungsrate: N_i	12
3.2.5	Denitrifikationsrate: N_{de}	12
3.2.6	Kritischer Austrag an Säureneutralisationskapazität: $ANC_{le(crit)}$	12
	3.2.6.1 <i>Schutz vor Toxizität</i>	13
	3.2.6.2 <i>Bodenstabilität</i>	13
	3.2.6.3 <i>Typischer Boden pH-Wert</i>	14
3.3	Analyse von Bodenproben zur Ableitung versauerungsrelevanter Parameter	14
3.3.1	Bestimmung der Säureneutralisationskapazität (pHstat-Extraktion)	14
3.3.2	Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})	15
3.3.3	Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S_4)	16
3.3.4	Bestimmung von Sulfatpools	16
3.3.5	Bestimmung von oxalat- und dithionitlöslichen Eisengehalten	16
3.3.6	Bestimmung der Element-Mobilität über sequenzielle Extraktion zur Beurteilung der säureinduzierten Freisetzung	16
3.4	Auswertung der Analysenergebnisse	17
3.4.1	Aggregation nach LABO	17
3.4.2	Statistische Auswertung der Gesamtdatensätze der Laboranalysen	17
3.4.3	Substratspezifische Auswertung	17
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	19
4.1	Maximale saure Einträge ohne nachhaltigen Einfluss auf den Boden (Critical Load)	19
4.2	Säureneutralisationskapazität der Böden	23
4.3	Bestimmung der säureinduzierten Schwermetall- und Nährstofffreisetzung aus dem Boden mittels sequenzieller Extraktion sowie deren Einfluss auf Grund- und Oberflächengewässer	25
4.4	Abgrenzung versauerungsempfindlicher Regionen und von Gebieten mit hohem Potenzial an Schwermetall- und Stoffausträgen	28
4.5	Schlussfolgerungen	30
5	Literatur	31

Abbildungsverzeichnis	33
Tabellenverzeichnis	34
6 Anhang	35
6.1 pH-stat Analyse	36
6.2 Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})	37
6.3 Wasserextrakt (S4)	38
6.4 Ammoniumfluorid-Extrakt	39
6.5 Sequenzielle Extraktion	40
6.6 Oxalat- und dithionitlösliche Metalle	53
6.7 Elementar-Analytik	54
6.8 Königswasser-Extrakt	55
6.9 Ammoniumnitrat-Extrakt	56
6.10 pH CaCl_2	57

1 Einleitung

Im Zuge der Industrialisierung stiegen die Emissionen von Stickstoff und Schwefel bis in die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts in Mitteleuropa stark an. Durch den Einsatz von Rauchgasentschwefelungsanlagen konnten die Emissionen an Schwefel seitdem sehr stark reduziert werden. Im Gegensatz dazu befinden sich die Stickstoffemissionen weiterhin auf hohem Niveau und tragen durch den Eintrag im Niederschlagswasser zur Versauerung der Wälder bei. Die Menge des Eintrags in ein Ökosystem über die Luft ist grundsätzlich abhängig von der Nähe zu Emittenten, der vorherrschenden Windrichtung und den Rezeptoreigenschaften der Ökosysteme.

Die Grundgebirgskette im Grenzgebiet zwischen der Tschechischen Republik und Bayern stellt in diesem Zusammenhang eine topographische Barriere für ferntransportierte Schadstoffe dar. Die mit Fichten bestockten Hochlagen des Franken-, Böhmer- und Bayerwaldes sowie des Fichtelgebirges kammten über mehrere Jahrzehnte hinweg die Schadstoffe ganzjährig aus der Luft aus. Von den Nadeln wurden die Schadstoffe mit dem Regen abgewaschen und gelangten in die Böden. Das tschechisch-bayerische Grenzgebiet wird dominiert von sauren Gesteinen des kristallinen Grundgebirges. Die Böden selbst entwickelten sich fast ausschließlich aus basenarmen Ausgangssubstraten wie Granit, Grauwacke, Gneis oder Sanden und besitzen ein nur geringes Puffervermögen gegenüber den eingetragenen Säuren. Der Versauerungsprozeß in der Region wurde durch die saure Deposition weiter beschleunigt, welche einen starken Einfluß auf die Pufferkapazität des Bodens besitzt. Trotz der stark zurückgehenden Immissionen von Säurebildnern seit Beginn der 1990er Jahre zeigen die Sickerwässer und Oberflächenwässer der Region immer noch Versauerungserscheinungen und erhöhte Schadstoffkonzentrationen. Im bayernweiten Vergleich weisen die Humusaufgaben der Böden Ostbayerns außerdem die niedrigsten pH-Werte bis flächendeckend unter pH 4 auf, was die Intensität der Versauerung verdeutlicht.

Die Folgen der Bodenversauerung werden als Schäden am Baumbestand sowie als Beeinträchtigung der Grundwasser- und Fließgewässerqualität deutlich. Durch Aluminium, das bei pH-Werten von unter 4 als dominierendes Kation in der Bodenlösung auftritt, kann es zu Schäden an Wurzeln kommen, wodurch die Nährstoffversorgung der Bäume beeinträchtigt wird. Daneben sind viele Schwermetalle bei niedrigen pH-Werten mobil, was eine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität infolge fortschreitender Versauerung bedeuten kann.

Das Projekt wurde im bayerisch-tschechischen Gebiet (Interreg III und Interreg IV) grenzüberschreitend mit Mitteln des EU-Fonds (Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) „Investition in Ihre Zukunft“) durchgeführt und kofinanziert.

2 Ziele

Im Zuge der Projekte „Säureinduziertes Puffervermögen von Böden“ und „Auswirkungen der Versauerung auf Böden und Gewässer“ wurden im bayerischen Grenzgebiet zur Tschechischen Republik das Ausmaß der Versauerung der Böden quantifiziert und das Puffervermögen der Böden abgeschätzt. Die Datengrundlage zur Bewertung der Pufferkapazitäten und des Stofftransports in andere Umweltkompartimente, welche äußerst sensitiv auf weitere Einträge reagieren, war zu Projektbeginn nicht ausreichend. Die Projekte zielten daher darauf ab, diese Datengrundlage zu verbessern und eine Abschätzung des Stofftransports zu ermöglichen. Im Einzelnen sollten Daten zu pH-Werten, Bodenkenndaten und Critical Loads erhoben und in vollzugsunterstützenden Karten dargestellt werden. Durch die punktbezogenen Laboruntersuchungen und die flächenhafte Charakterisierung der Critical Loads können für die durch Säureinträge besonders in der Vergangenheit stark belastete nordbayerisch-tschechische Grundgebirgsregion kleinräumige Abstufungen der Belastung, des Schadzustandes der Ökosysteme und der Ökosystemstabilität ermittelt werden. Die Ermittlung der Critical Loads, der Boden-pH-Werte, der Säureneutralisationskapazität der unterschiedlichen Bodenformen sowie deren säureinduziertes Schwermetall- und Nährstofffreisetzungspotential war ein wichtiges Ziel dieser Arbeit. Es läßt sich feststellen, dass der anhaltend hohe atmosphärische Stickstoffeintrag nicht nur das Waldökosystem sättigt, sondern auch eine Gefahr für das Grund- und Oberflächenwasser durch Austrag im Sickerwasser darstellt. Ähnliches gilt in umgekehrter Weise für die Versauerung der Böden. Die Verdrängung basischer Nährelemente vom Austauscherkomplex des Bodens durch Nachlieferung säurewirksamer Elemente, wie z. B. Aluminium bzw. Säuren wie Salpeter- und Schwefelsäure, führt nicht nur zum Verlust wichtiger Nährelemente, sondern bei basenarmen Substraten bei den meisten Waldbaumarten zu Mangelscheinungen und schließlich zu den sogenannten „neuartigen Waldschäden“. Die Basensättigung und der –vorrat ist in den „Silikatgebieten“ wie dem ostbayerischen Grenzgebirge am geringsten. Deshalb ist es besonders hier von Bedeutung, Hinweiskarten zum Zustand der Böden zu erstellen, um insbesondere potentielle Gefahren für das Grundwasser zu erkennen und ggf. frühzeitig gegensteuern zu können.

Von den Fachstellen der Forstverwaltung kann darüber hinaus gezielt die Notwendigkeit geeigneter Meliorations- und Anpassungsmaßnahmen (z. B. Baumartenwahl, Waldkalkung) beurteilt werden. Die Ergebnisse des Projektes erhöhen darüber hinaus die Sensibilität der Bevölkerung auf tschechischer und bayerischer Seite für den Zustand unserer Umwelt, im Besonderen für den Bodenschutz, aber auch für Belange des Schutzes von Grund- und Oberflächenwasser. Diese neu erhobenen Daten über den Zustand des Bodens werden Fachanwendern, Eigentümern und den Behörden zur Verfügung gestellt und dienen als Grundlage für politische oder fachliche Entscheidungen auf staatlicher und regionaler Ebene.

Gemäß der INTERREG-Publizitätsvorschriften, informiert das LfU auch im Internet über die beiden Projekte (Säureinduziertes Puffervermögen von Böden; Auswirkung der Versauerung auf Böden und Gewässer). Die gemeinsame Darstellung von Untersuchungsergebnissen in tabellarischer Form und als grenzüberschreitende Karten wurde in dem tschechischen Bericht „The consequences of acidification on soil and water resources – Critical loads and cross border maps“ umgesetzt.

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst den bayerischen Teil des INTERREG-Gebietes (Abb. 1) von den jeweils grenznah gelegenen Landkreisen Kronach und Hof im Norden bis Passau im Süden.



Abb. 1: Interreg III- und Interreg IV-Gebiet

3.1.1 Geologie und Böden

Das Untersuchungsgebiet in Ostbayern lässt sich im Wesentlichen durch drei geologische Einheiten charakterisieren. Im Osten und Norden erhebt sich das Grundgebirge als Frankenwald, Fichtelgebirge, Oberpfälzer Wald und Bayerischer Wald bis in Höhen von über 1.000 m ü. NN. Dieses Grundgebirge wird vorwiegend aus sauren Gesteinen wie Granit und Gneis im Fichtelgebirge, Oberpfälzer und Bayerischen Wald und Grauwacken und Tonschiefern im Frankenwald aufgebaut. Im Westen schließt sich die Bruchschollenzzone an, deren Grenze zum Grundgebirge die nordwest-südost gerichtete Störung der Fränkischen Linie darstellt. Das geologische Ausgangssubstrat der Bruchschollen reicht von nährstoffarmen Triassanden bis zu nährstoffreichem Muschelkalk. Weite Bereiche werden von Kreidesanden aufgebaut. Im Westen wird das Untersuchungsgebiet durch die kalkreichen Erhebungen der Fränkischen Alb begrenzt.

Die Entwicklung der Böden des Untersuchungsgebietes ist sehr stark vom Ausgangssubstrat abhängig. Darüber hinaus begünstigten die langjährigen Säureeinträge in die Wälder entlang des Grundgebirgskammes im Osten die Ausprägung typischer Bodeneigenschaften. Charakteristisch für diese Standorte ist der Prozess der Podsolierung, welcher in unterschiedlicher Stärke vorangeschritten ist. Wo das Ausgangssubstrat basenreicher war, hinterließen die Prozesse der Bodenversauerung noch keine sichtbaren Spuren und es entwickelten sich Braunerden. Auf den armen Standorten aus Kreide- oder tertiären Sanden entwickelten sich farbenprächtige Podsole. Auf den basenreichen Hängen der Fränkischen Alb hingegen sind Rendzinen, Terrae fuscae und Braunerden als die dominierenden und charakteristischen Bodentypen ausgeprägt.

3.1.2 Standorte der Probenahme

Die im Zuge des vorausgegangenen Projektes „Wissenschaftliche Grundlagen für den Vollzug der bayerischen Bodenschutzgesetze (GRABEN)“ horizontweise im 8 km x 8 km Raster entnommenen Bodenproben wurden hinsichtlich versauerungsrelevanter Parameter analysiert. Hierfür standen für 156 Waldstandorte innerhalb des Untersuchungsgebietes insgesamt 921 Bodenproben zur Verfügung.

3.2 Ermittlung von Critical Loads für das bayerische Interreg-Gebiet

In diesem F+E-Projekt soll die Säureempfindlichkeit der betrachteten Pedo-Ökosysteme ermittelt werden.

Um die Auswirkungen aktueller Schadstoffdepositionen auf die Ökosysteme abschätzen und Handlungsempfehlungen zur Verbesserung ihrer Stabilität geben zu können, wurden für das Untersuchungsgebiet flächenhaft die Critical Loads bestimmt. Unter Critical Loads versteht man flächenbezogene Schwellenwerte für den Eintrag von Schadstoffen, bei deren Einhaltung nach heutigem Kenntnisstand nicht mit langfristig schädlichen Veränderungen der betrachteten Ökosysteme zu rechnen ist. Bei der Berechnung der Critical Loads werden durch einen Massenbilanzansatz Säurebildnern puffernd wirkenden Kationen, insbesondere Ca, Mg und K, gegenübergestellt. Die kartographische Darstellung der ermittelten Critical Loads zeigt die räumliche Verteilung der maximal tragbaren Säuredeposition (Schwefel und Stickstoff) im bayerisch-tschechischen Betrachtungsraum. Die Methodik wurde mit der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft abgestimmt.

Die Berechnung der Critical Loads (CL) für das Interreg-Gebiet erfolgte nach UBA (1996):

$$CL(S + N) = BC_{dep} - Cl_{dep} + BC_w - Bc_u + N_i + N_u + N_{de} - ANC_{le(crit)} \quad (1)$$

mit

BC_{dep}	Deposition basischer Kationen [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
Cl_{dep}	Chloriddeposition [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
BC_w	Freisetzungsrates basischer Kationen durch Verwitterung [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
Bc_u	Basenaufnahme durch den Waldbestand [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
N_i	Stickstoffimmobilisierungsrate [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
N_u	Stickstoffaufnahme durch den Waldbestand [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
N_{de}	Denitrifikationsrate [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
$ANC_{le(crit)}$	kritischer Austrag an Säureneutralisationskapazität [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]

Die separate Berechnung der Critical Loads für Schwefel und für Stickstoff basiert auf:

$$CL_{max}(S) = BC_{dep} - Cl_{dep} + BC_w - Bc_u - ANC_{le(crit)} \quad (2)$$

$$CL_{max}(N) = N_i + N_u + \frac{CL_{max}(S)}{1 - f_{de}} \quad (3)$$

mit

f_{de}	Denitrifikationsfaktor
----------	------------------------

Zu beachten ist, dass zwischen BC und Bc der Unterschied darin besteht, dass BC neben Ca, Mg und K auch Na einbezieht, während Bc nur Ca, Mg und K berücksichtigt.

Mittels GIS wurden für das Untersuchungsgebiet Karten der Einzelparameter der Gleichung 1 erstellt (bspw. Silikatverwitterungsrate). Eine Verrechnung der Einzelparameter durch Überlagern der Karten führte schließlich zur Berechnung der Critical Loads für das Untersuchungsgebiet.

Die einzelnen Parameter der Gleichung wurden dabei auf den nachfolgend beschriebenen Wegen generiert:

3.2.1 Depositionsparameter: BC_{dep} , S_{dep} , N_{dep} und Cl_{dep}

Zur Ermittlung der Stoffdepositionen im Untersuchungsraum wurden für den bayerischen Raum die Ergebnisse des MAPESI Projektes des Umweltbundesamtes (UBA, 2011) verwendet. Für die grenzübergreifende Berechnung der Critical Loads für das gesamte Interreg-Fördergebiet wurde aus Gründen der Einheitlichkeit des Datensatzes auf die Daten des EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme, www.emep.int) zurückgegriffen.

3.2.2 Freisetzungsrates basischer Kationen aus der Silikatverwitterung, BC_w

Die Freisetzungsrates basischer Kationen aus der Silikatverwitterung wurde über die Einheiten der Übersichtsbodenkarten 1 : 25 000 erschlossen. Auf diese Weise entstand eine Karte der Nachlieferung basischer Kationen aus der Silikatverwitterung im Maßstab 1 : 25 000.

Die Einheiten der Übersichtsbodenkarten wurden in ArcGIS digital verschnitten mit den geologischen Hintergrunddaten der Bodenübersichtskarte (BÜK) 1000. Aus diesen flächenhaft vorliegenden Informationen wurde nun die Silikatverwitterungsrates abgeschätzt.

Die klassierte Verwitterungsrates kann bestimmt werden in Abhängigkeit von der Textur- und der Muttergesteinsklasse (Tab. 1).

Tab. 1: Klassierte Verwitterungsrates [$eq\ ha^{-1}\ a^{-1}$] nach UBA (1996)

Klasse der Verwitterungsrates	Texturklasse					
	Muttergesteinsklasse	1	2	3	4	5
0 – Torfe	0	0	0	0	0	0
1 – saure Gesteine	1	3	5	6	6	6
2 – neutrale Gesteine	2	4	6	6	6	6
3 – basische Gesteine	2	5	6	6	6	6
4 – kalkhaltige Gesteine	20	20	20	20	20	20

Die Texturklasse kann bestimmt werden in Abhängigkeit vom Sandgehalt und dem Tongehalt (Tab. 2).

Tab. 2: Ableitung der Texturklasse aus den Sand- und Tongehalten (UBA, 1996)

Texturklasse	Name	Definition
1	grob	Ton < 18% und Sand > 65%
2	mittelgrob	Ton < 35% und Sand > 15%, aber Ton > 18% wenn Sand > 65%
3	mittelfein	Ton < 35% und Sand < 15%
4	fein	35% < Ton < 60%
5	sehr fein	Ton > 60%

$$BC_w(T) = z \cdot 500 \cdot (WR_c - 0,5) \cdot e^{\left(\left[\frac{A}{281} \right] - \left[\frac{A}{273+T} \right] \right)} \quad (4)$$

mit:

- $BC_w(T)$ temperaturkorrigierte Freisetzungsrates basischer Kationen durch Verwitterung [$eq\ ha^{-1}\ a^{-1}$]
- z durchwurzelte Tiefe [m]
- WR_c klassierte Verwitterungsrates (siehe Tab. 1) [$eq\ ha^{-1}\ a^{-1}$]
- A Quotient aus Aktivierungsenergies und idealer Gaskonstante - 3600 [K]
- T Jahresmitteltemperatur (siehe Tab. 6) [$^{\circ}C$]

Für die durchwurzelte Tiefe wurden 0,8 m gewählt, es sei denn die Profiltiefe war geringer, oder reduzierende oder sehr stark tonhaltige Horizonte behinderten eine tiefere Durchwurzelung.

3.2.3 Aufnahme von basischen Kationen und Stickstoff durch den Waldbestand: B_{cu} , N_u

Die Aufnahme basischer Kationen in den Baumbestand und der anschließende Ernteentzug stellen eine wichtige Reduktion des Vorrats an basischen Kationen in den Waldökosystemen dar. Zur Berechnung des Ernteentzugs wurde die Waldverteilung gemäß des CORINE-Landnutzungsdatensatzes und dessen Unterscheidung in Laub-, Misch- und Nadelwald als Grundlage verwendet. Zur Abschätzung der Aufnahme basischer Kationen durch die unterschiedlichen Bestandeszusammensetzungen wurde in Anlehnung an die von NAGEL et al. (2004) vorgegebenen schlechtesten und günstigsten Bedingungen für Fichte und Buche mittlere Aufnahmen basischer Kationen bzw. Stickstoff angenommen (Tab. 3).

Waldtyp	B_{cu} [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]	N_u [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
Nadelwald	480	400
Mischwald	620	485
Laubwald	760	570

Tab. 3: Basen- (B_{cu}) und Stickstoffaufnahme (N_u) in Abhängigkeit vom Waldtyp

Die maximale Aufnahme basischer Kationen durch den Bestand wird dabei jedoch limitiert durch die Höhe der Deposition (BC_{dep}), die Höhe der Nachlieferung basischer Kationen aus der Silikatverwitterung (BC_w) und die Höhe des Basenaustrags über das Sickerwasser (NAGEL et al., 2004).

Für die Berechnung wurde die vereinfachende Annahme getroffen, dass Nadelwälder ausschließlich aus Fichte, sowie Laubwälder ausschließlich aus Buche bestehen. Die aus den Ertragstafeln entnommenen Werte für die durchschnittlichen jährlichen Zuwachsraten nach 100 Jahren sind in Tab. 4 zu finden. Die Aufnahme an Stickstoff und basischen Kationen wurde ermittelt, indem die durchschnittlichen jährlichen Zuwachsraten mit den Gehalten an basischen Kationen und Stickstoff des Derbholzes samt Rinde (Tab. 5) verrechnet wurden.

	Beste Ertragsklasse [t TS ha ⁻¹ a ⁻¹]	Schlechteste Ertragsklasse [t TS ha ⁻¹ a ⁻¹]	
Fichte	6	3,1	WENK, RÖMISCH, GEROLD 1984
Buche	6,8	3,6	DITTMAR, KNAPP, LEMBCKE 1983

Tab. 4: Durchschnittliche jährliche Zuwachsraten (t) nach 100 Jahren

	Ca	Mg [eq t ⁻¹ TS]	K	N
Fichte	70,4	14,8	19,7	87,1
Buche	89,8	21,4	35,8	110,0

Tab. 5: Gehalte an basischen Kationen und Stickstoff im Derbholz mit Rinde (JACOBSEN et al. 2002, DE VRIES et al. 1990)

3.2.4 Stickstoffimmobilisierungsrate: N_i

Bei der Berechnung der Höhe der Stickstoffimmobilisierungsrate (N_i) wurde nach UNECE/CCE (1993) die Verteilung der Jahresmitteltemperatur in Bayern herangezogen. Die Höhe von N_i ist dabei direkt von der Jahresmitteltemperatur abhängig (Tab. 6). Die Verteilung der Jahresmitteltemperatur wurde dem Klimaatlas Bayern (BAYER. KLIMAFORSCHUNGSVERBUND, 1996) entnommen, wobei der langjährige Mittelwert der Jahre 1951 bis 1980 Verwendung fand.

Jahresmitteltemperatur [°C]	N_i [eq ha ⁻¹ a ⁻¹]
< 5	357
5	286
6	214
7	143
8	107
> 8	71

Tab. 6: Stickstoffimmobilisierungsrate (N_i) in Abhängigkeit von der Jahresmitteltemperatur nach UNECE/CCE (1993)

3.2.5 Denitrifikationsrate: N_{de}

Die Berechnung der Denitrifikation erfolgte auf Grundlage der vorherrschenden Tongehalte der jeweiligen Legendeneinheiten der Übersichtsbodenkarten. Je höher der Tonanteil eines Bodens ist, desto wahrscheinlicher ist eine höhere Denitrifikationsrate. Nach DE VRIES et al. (1990) wird dabei der Denitrifikationsfaktor f_{de} eingeführt, wobei gilt

$$N_{de} = f_{de} \cdot (N_{dep} - N_u - N_i) \text{ wenn } N_{dep} > N_u + N_i \quad (5)$$

sonst $N_{de} = 0$

f_{de} wird nach DE VRIES et al. (1990) in Abhängigkeit vom Tongehalt der jeweiligen Horizonte parametrisiert. Zur Ermittlung von f_{de} wurden die Modellprofile der jeweiligen Legendeneinheiten der Übersichtsbodenkarten 1:25 000 herangezogen. Dem dort für jeden Horizont ausgewiesenen Tonanteil wurde nach DE VRIES et al. (1990) ein f_{de} -Faktor zwischen 0,1 (<20 % Tonanteil) und 0,5 (>50 % Tonanteil) zugeordnet (Tab. 7). Dieser Faktor wurde über die verschiedenen Horizonte bis zu einer maximalen Bodentiefe von 0,8 m tiefenstufengewichtet gemittelt.

N_{dep} atmosphärische Gesamt-Stickstoff Deposition [eq ha⁻¹ a⁻¹]
 f_{de} Denitrifikationsfaktor

Tongehalt [%]	f_{de}
< 20	0,1
20-30	0,2
30-40	0,3
40-50	0,4
> 50	0,5

Tab. 7: Ableitung des Denitrifikationsfaktors f_{de} vom Tongehalt

3.2.6 Kritischer Austrag an Säureneutralisationskapazität: $ANC_{le(crit)}$

Zur Ermittlung des kritischen Austrags an Säureneutralisationskapazität (ANC) bedarf es der Bereitstellung mehrerer Parameter.

Zur Ermittlung von $-ANC_{le(crit)}$ wurden drei verschiedene Verfahren verwendet. Zur Berechnung der Critical Loads wurde der niedrigste Wert der drei folgenden Berechnungsmethoden (Kap. 3.2.6.1 bis 3.2.6.3) verwendet.

3.2.6.1 Schutz vor Toxizität

$$-ANC_{le(crit)} = Q^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1,5 \cdot \frac{BC_{dep} + BC_w - BC_u}{K_{gibb} \cdot (Bc / Al)_{crit}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(1,5 \cdot \frac{BC_{dep} + BC_w - BC_u}{(Bc / Al)_{crit}} \right) \quad (6)$$

Q	Sickerwasserrate [$m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
BC_{dep}	Deposition basischer Kationen (nur Ca, K, Mg) [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
BC_w	Verwitterung basischer Kationen (nur Ca, K, Mg) [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
BC_u	Aufnahme basischer Kationen (nur Ca, K, Mg) [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
K_{gibb}	Gibbsit Gleichgewichtskonstante - 300 [$m^6 \text{ eq}^{-2}$]
$(Bc/Al)_{crit}$	kritisches Verhältnis von basischen Kationen zu Aluminium (verwendeter Wert = 1,2)

Nach UBA (1996) wird für K_{gibb} ein Wert von $-300 \text{ m}^6 \text{ eq}^{-2}$ angenommen. Die Sickerwasserrate wurde nach dem Verfahren von RÖTZER (1996) berechnet und liegt für die Fläche Bayerns vor. Das kritische Kationen-Aluminium-Verhältnis $(Bc/Al)_{crit}$ wurde zu 1,2 angenommen (UBA, 1996).

Die BC_w wurde nach UBA (1996) für die verschiedenen Bodentexturen als Anteil zwischen 0,7 und 0,85 von BC_w berechnet.

$$BC_w = BC_w \cdot x_{CaMgK} \quad (7)$$

x_{CaMgK} zwischen 0,70 und 0,85 (in Abhängigkeit von der Bodentextur)

Aufgrund der - kontinentalen Lage des Untersuchungsgebietes wurde keine Seesalzkorrektur durchgeführt.

Texturklasse	x_{CaMgK}
1	0,7
2	0,74
3	0,78
4	0,82
5	0,85

Tab. 8: Mittlere Aufnahme basischer Kationen (BC_u) und Stickstoff (N_u) in Abhängigkeit vom Waldtyp nach UBA (1996)

3.2.6.2 Bodenstabilität

$$-ANC_{le(crit)} = Q^{\frac{2}{3}} \cdot \left(p \cdot \frac{BC_w}{K_{gibb}} \right)^{\frac{1}{3}} + p \cdot BC_w \quad (8)$$

Q	Sickerwasserrate [$m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
p	Verhältnis von BC_w zu AL_w (kann für Mitteleuropa als 2 angenommen werden)
K_{gibb}	Gibbsit Gleichgewichtskonstante - 300 [$m^6 \text{ eq}^{-2}$]
BC_w	Verwitterung basischer Kationen (Ca, K, Mg ohne Na) [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]

3.2.6.3 Typischer Boden pH-Wert

$$-ANC_{le(crit)} = Q \cdot (K_{gibb} \cdot [H]_{crit}^3 + [H]_{crit}) \quad (9)$$

Q	Sickerwasserrate [$m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
K_{gibb}	Gibbsit Gleichgewichtskonstante - 300 [$m^6 \text{ eq}^{-2}$]
$[H]_{crit}$	kritische Protonenkonzentration [eq m^{-3}]

Die kritische Protonenkonzentration wurde von den unteren tolerierbaren Grenzen des pH-Wertes (Tab. 9) der verschiedenen Bodentypen abgeleitet.

Puffer	Niedrigster pH-Wert
Karbonat	6,2
Silikat	5
Austauscher (Tonminerale)	4,5
Mn-oxide; Tonminerale	4,2
Aluminium	4
Aluminium-Eisen	< 3,8

Tab. 9: Untere tolerierbare Grenzen des pH-Wertes nach NAGEL et al. (2004)

3.3 Analyse von Bodenproben zur Ableitung versauerungsrelevanter Parameter

Um die aktuelle ökologische Stabilität des durch Säureimmissionen stark belasteten bayerisch-tschechischen Grenzgebietes zu bewerten, wird in diesem Projekt eine flächenhafte Erfassung der versauerungsrelevanten Parameter der Böden durchgeführt. An Proben von 156 Forststandorten des Interreg-Gebiets in Bayern wurden horizontspezifisch versauerungsrelevante Parameter, wie die Säureneutralisationskapazität (SNK) mittels pHstat-Analyse, die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}), wasserlösliche Stoffe und mobilisierbare Sulfatpools bestimmt sowie eine sequenzielle Extraktion durchgeführt.

3.3.1 Bestimmung der Säureneutralisationskapazität (pHstat-Extraktion)

Die von OBERMANN und CREMER (1993) entwickelte Methode sieht eine Absenkung des pH-Wertes über ein bestimmte Zeit auf einen festen pH-Wert vor. OBERMANN und CREMER (1993) geben einen pH-Wert von 4 vor. Dieser ist auch üblich bei Bestimmungen in der Altlastenbearbeitung (GÄBLER, 1997; HAASE und FÖRSTNER, 1995). In unserer Untersuchung war dies jedoch nicht möglich, da bereits über 50 % der Untersuchungsstandorte pH Werte aufwiesen, die zum Teil deutlich unter pH 4 lagen. Daher wurde in dieser Studie die Methodik abgeändert und die pHstat-Extraktion bei einem ungewöhnlich tiefen pH-Wert von 3 durchgeführt. Die wässrige Bodenprobe wurde über 24 Stunden konstant auf den Ziel-pH 3,0 eingestellt, um eine starke Versauerung zu simulieren. Um diesen pH-Wert konstant zu halten, wird immer wieder Säure (HNO_3) zutitriert. Die innerhalb von 24 h während der Titration durch Pufferreaktionen verbrauchte Säure entspricht der Säureneutralisationskapazität (SNK), die auf diese Weise für die 921 Proben des Untersuchungsraumes bestimmt wurde. Im Extrakt werden die Kationen Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn sowie die Schwermetalle Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Cu, Mo, Co und As bestimmt. Daneben erfolgt die Bestimmung von TOC, Sulfat und Ortho-Phosphat. Die Mobilität von Schwermetallen steigt in der Regel mit abnehmendem pH-Wert, so dass mit diesem Verfahren der potentielle Austrag von Schwermetallen unter sehr sauren Verhältnissen (pH 3) simuliert wird. So treten unter diesen Bedingungen verstärkt schon Aluminium und zu einem Teil bereits Eisen in der Bodenlösung auf. Ob und in welchem Maße räumliche Abhängigkeiten innerhalb des Untersuchungsgebietes auftreten, soll durch diese Untersuchung ermittelt werden.

Idealerweise erreichen die Titrationskurven meist nach 24 Stunden ein konstantes Maximum. Allerdings sind nicht alle auftretenden Reaktionen gleich schnell, so dass es viele Proben gab, bei denen der Kurvenverlauf daraufhin deutete, dass der maximale Werte der SNK noch nicht erreicht wurde. Daher wurde für alle Proben eine Kurvenanpassung mit einer Gleichung durchgeführt, welche ein exponentielles Wachstum bis zu einem Maximalwert widerspiegelt.

$$f(x) = a * (1 - e^{-bx}) + c * (1 - e^{-dx}) + g * (1 - e^{-hx}) \quad (10)$$

mit

f(x)	Titrationmenge [M]
x	Zeit [T]
a, b, c, d, g, h	Formparameter der Kurvenanpassung [-]

Da die Geschwindigkeit der auftretenden Reaktionen sehr unterschiedlich sein kann, wurde ein 3-Komponentenmodell gewählt, welches langsame, mittlere und schnelle Reaktionsgeschwindigkeit abbildete. Über eine Kurvenanpassung wurden die Parameter aus den gemessenen Werten ermittelt. Da der Zeitraum der Messung 24 h betrug, wurde die Extrapolation der SNK mittels der angepassten Gleichung (11) auf einen Zeitraum von 7 Tagen beschränkt, da ansonsten die Unsicherheiten zu groß wären.

3.3.2 Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})

Die effektive Kationenaustauschkapazität der Bodenproben (KAK_{eff}) ist die Summe aller austauschbar gebundenen Kationen in der Probe bei aktuellem Boden-pH-Wert. Um sie zu erhalten, wird der Boden mit einem Überschuss an Ammoniumchlorid-Lösung (1M NH_4Cl) perkoliert. Dadurch werden alle an der Bodenmatrix austauschbar gebundenen Kationen durch NH_4^+ ersetzt. Die austauschbar gebundenen Kationen gehen in Lösung und können im Eluat gemessen werden. Die Bestimmung der Kationen (Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn) im Extrakt erfolgt mittels ICP. Die Summe der Ladungsäquivalente der Kationen plus der austauschbar gebundenen H^+ -Ionen ergibt die KAK_{eff} . Die austauschbar gebundenen H^+ -Ionen werden durch Differenzbildung der pH-Werte der Perkulationslösung vor und nach der Perkolation berechnet. Sulfat und Ortho-Phosphat werden im Extrakt photometrisch bestimmt.

Der Anteil der Kationen Ca, Mg, K und Na an der KAK_{eff} stellt die Basensättigung dar, die zusätzlich zum pH-Wert für die Beurteilung des Säurezustandes eines Bodens herangezogen werden kann. Zunehmende Bodenversauerung führt dazu, dass basisch wirkende Kationen (Ca, Mg, K, Na) durch sauer wirkende Kationen (H, Al, Fe, Mn) an den Austauscherplätzen ersetzt werden, wodurch die Basensättigung abnimmt. Je höher die Basensättigung ist, desto mehr Nährstoffkationen stehen dem Baumbestand in der Regel zur Verfügung. Nach BML (1996) kann die Basensättigung in sieben Klassen eingeteilt werden (Tab. 10).

Elastizität	Basensättigung [%]
sehr gering	< 5
gering	6-15
mäßig	16-30
mittel	31-50
mäßig hoch	51-70
hoch	71-85
sehr hoch	> 85

Tab. 10: Klassifizierung der Basensättigung nach BML (1996)

Wird für jeden Horizont eines Standortes der Anteil der basischen und sauren Kationen berechnet, kann ein Tiefengradient der Austauscherbelegung erzeugt werden. Auf diese Weise lässt sich auch die Tiefe der Versauerungsfront im Boden beschreiben.

3.3.3 Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)

Die Extraktion mit Wasser erfolgte in Anlehnung an DIN 38414 Teil 4. Allerdings wurde das Verfahren im Verhältnis 1 : 8 durchgeführt, d. h. es wurde nur ein Achtel der vorgeschriebenen Substratmenge mit einem Achtel der vorgeschriebenen Wassermenge eluiert. Im Extrakt wurden die folgenden Parameter gemessen: Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cl, TOC, elektrische Leitfähigkeit, pH, Sulfat und Ortho-Phosphat.

3.3.4 Bestimmung von Sulfatpools

Zur Abschätzung der Menge des im Boden gespeicherten Sulfats wurden weitere Analysen an den 921 Proben des Untersuchungsgebietes durchgeführt. Mittels NH_4F -Extrakt wurde der total mobilisierbare Sulfatvorrat in den verschiedenen Horizonten abgeschätzt. In Anlehnung an den 1 : 5 Extrakt nach PRIETZEL und KÖLLING (1999) wurde hier in einem 1 : 10 S4-Extrakt der annähernd real mobilisierbare Sulfatpool bestimmt. Bei beiden Extrakten wurde die Bodenprobe über 18 h mit dem Extraktionsmittel geschüttelt.

3.3.5 Bestimmung von oxalat- und dithionitlöslichen Eisengehalten

Die Ermittlung von oxalat- und dithionitlöslichen Eisengehalten erfolgte an allen Proben des Mineralbodens. Dies dient als zusätzliche Information zur Beurteilung möglicher Freisetzung von Schwermetallen aus den Böden, da sie Aussagen zur Pedogenese zulässt. Durch Verwitterung freigesetztes Eisen bildet zunächst schlecht kristallisierte Oxihydroxide, die sich im Verlauf der Bodenentwicklung in stärker kristallisierte Formen umwandeln. Die schlecht kristallisierten, amorphen Formen werden durch die oxalat-extrahierbaren Fe-Gehalte (Fe_{ox}) charakterisiert, während mit zunehmendem Alter der Kristallisationsgrad der Eisenoxide in den Böden steigt und damit auch die dithionit-extrahierbaren Fe-Gehalte (Fe_{dit}).

3.3.6 Bestimmung der Element-Mobilität über sequenzielle Extraktion zur Beurteilung der säureinduzierten Freisetzung

Eine Beurteilung der säureinduzierten Freisetzung über einen direkten Vergleich zu den Werten des Eluats der pH-stat Analyse gestaltet sich schwierig, da die Absenkung des pH Wertes über die Zugabe an Säure sich zwischen den Proben extrem stark unterscheidet. Bis zur Erreichung eines Äquilibriums nach 24 h fand in manchen Fällen nur eine Absenkung um 0,1 pH Einheiten statt, bei anderen Proben wurde der pH um 3 Einheiten abgesenkt, wozu eine ungleich höhere Menge an Säure zugeführt werden musste.

Daher wurde nach einer Methodik gesucht, welche eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Proben und Standorten ermöglicht. Die sequenzielle Extraktion lässt sich in 5 Mobilitätsklassen einteilen, was eine Beurteilung der ggf. säurebedingten Mobilisierung von Schwermetallen und Nährstoffen ermöglicht.

Mittels dieser Daten werden die aktuelle Versauerung, die fortdauernde Sulfatfreisetzung aus den Bodenpools und das Puffervermögen der Böden gegenüber potentiellen Säureinträgen sowie die damit verbundene mögliche Mobilisierung von Schadstoffen flächendeckend abgeschätzt.

Die sequenzielle Extraktion der Bodenproben wurde nach folgendem Schema in Anlehnung an ZEILEN und BRÜMMER (1989) in fünf Schritten durchgeführt:

1. Austauschbare Kationen (1 M Ammoniumazetat, pH = 7); 20 h schütteln
2. Leicht reduzierbare amorphe Fe/Mn-Oxide
(0,1 M Hydroxylaminhydrochlorid + 0,01 M HNO₃, pH = 2); 30 Minuten schütteln
3. Leicht reduzierbare kristalline Fe/Mn-Oxide (0,2 M Ammoniumoxalat + 0,2 M Oxalsäure, pH = 3);
4 h im Dunkeln schütteln
4. Organische Fraktion, Sulfide (30 % H₂O₂ + 0,02 M HNO₃, pH = 2); 90 Minuten schütteln
5. Residualfraktion (Konzentrierte HNO₃, 120°C); 90 Minuten kochen

In den Eluaten der sequenziellen Extraktion wurden folgende Elemente analytisch erfasst:

Al, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn sowie P und S.

3.4 Auswertung der Analysenergebnisse

3.4.1 Aggregation nach LABO

Die Bodenprofile wurden horizontweise beprobt und analysiert. Die Ergebnisse der Analysen wurden nach LABO (2003) zu den Bodentiefenstufen Auflage, Oberboden, Unterboden und Untergrund aggregiert, wobei für jeden Messparameter ein gewichteter Wert unter Berücksichtigung der Horizontmächtigkeit, des Skelettgehalts und der Lagerungsdichte für jede Bodentiefenstufe berechnet wurde.

3.4.2 Statistische Auswertung der Gesamtdatensätze der Laboranalysen

Die nach LABO (2003) aggregierten Datensätze je Analyseverfahren und Parameter wurden mittels SPSS, Vers. 19.0, statistisch ausgewertet. Dabei wurden die folgenden statistischen Parameter ermittelt:

- Stichprobenanzahl
- Mittelwert
- Median
- Minimum
- Maximum
- 90. Perzentil

3.4.3 Substratspezifische Auswertung

Über die im Rahmen der Berechnung der Critical Loads erstellte Karte der Silikatverwitterungsrate konnte jedem Probenahmepunkt über seine Koordinaten ein Ausgangssubstrat zugeordnet werden. Die innerhalb einer Substratgruppe gelegenen Standorte wurden statistisch ausgewertet, in dem Minimum, Maximum, Median und 90. Perzentil eines jeden Parameters für jede LABO-Bodentiefenstufe und jedes Substrat bestimmt wurden.

Die Ergebnisse der pH-stat Analyse, insbesondere der Säureneutralisationskapazität, wurden über eine multiple lineare Regression in die Fläche gebracht. Dazu wurden gebietsbezogene Daten der BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (LWF) verwendet. Folgende statistisch signifikante Regression konnte berechnet werden:

$$\text{SNK} = 6,154 + 7,52 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Mg}_{\text{max}} + 0,003286 \cdot \text{C}_{\text{max}} + 1,3104 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Ca}_{\text{min}} + 0,0097 \cdot \text{fk}_{\text{min}} - 0,03315 \cdot \text{tot} + 0,0297 \cdot \text{U}_{\text{max}} - 0,02214 \cdot \text{Sk} + 0,02657 \cdot \text{T}_{\text{max}} \quad (11)$$

mit

$$r = 0,706$$

Mg_{max}	max. Magnesiumvorrat [kg/ha]
C_{max}	max. org. Kohlenstoffvorrat [t/ha]
Ca_{min}	min. Calciumvorrat [kg/ha]
fk_{min}	min. Feldkapazität [mm]
tot	durchschnittlicher Totwassergehalt [mm]
U_{max}	max. Schluffgehalt [%]
Sk	durchschnittlicher Skelettgehalt [Vol.-%]
T_{max}	max. Tongehalt [%]

Mittels GIS Software wurden die flächenhaft vorliegenden Daten der LWF mit der obigen Gleichung verrechnet und eine flächenhafte Karte der Säureneutralisationskapazitäten erstellt.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Maximale saure Einträge ohne nachhaltigen Einfluss auf den Boden (Critical Load)

Über den Ansatz der Critical Loads wurden grenzübergreifend die maximalen sauren Einträge für den Boden bestimmt. Die Höhe der Critical Loads entspricht der Menge an Säureäquivalenten, welche in den Boden eingetragen werden kann, ohne dass dadurch nachhaltige Veränderungen auftreten.

Es wurden zum einen Critical Loads für saure Schwefel ($CL_{\max}(S)$) - und Stickstoffeinträge ($CL_{\max}(N)$), (Abb. 2 und Abb. 3) separat und zum anderen Critical Loads für saure Einträge insgesamt ($CL_{\max}(S+N)$) berechnet (s. a. Kapitel 3.2). Dadurch lassen sich Aussagen für die einzelnen Schadstoffe sowie für die Gesamtbelastung treffen.

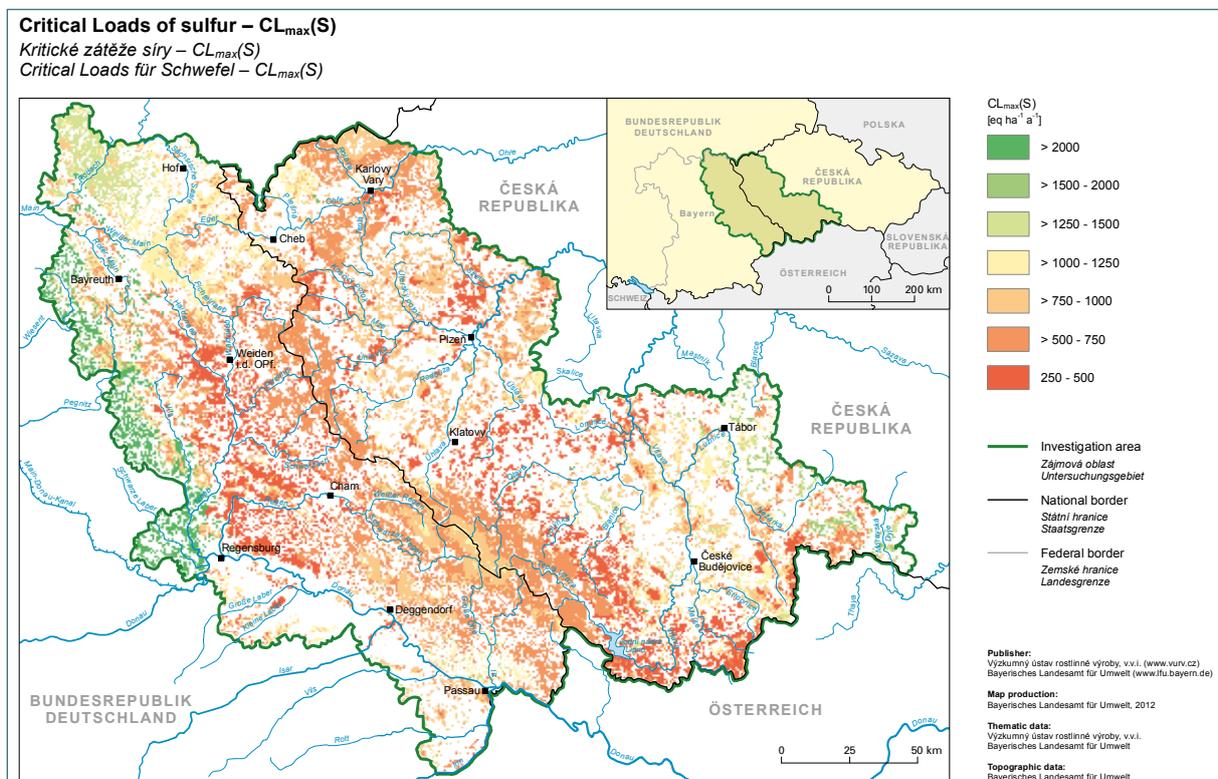


Abb. 2: Critical Loads für Deposition an Schwefel

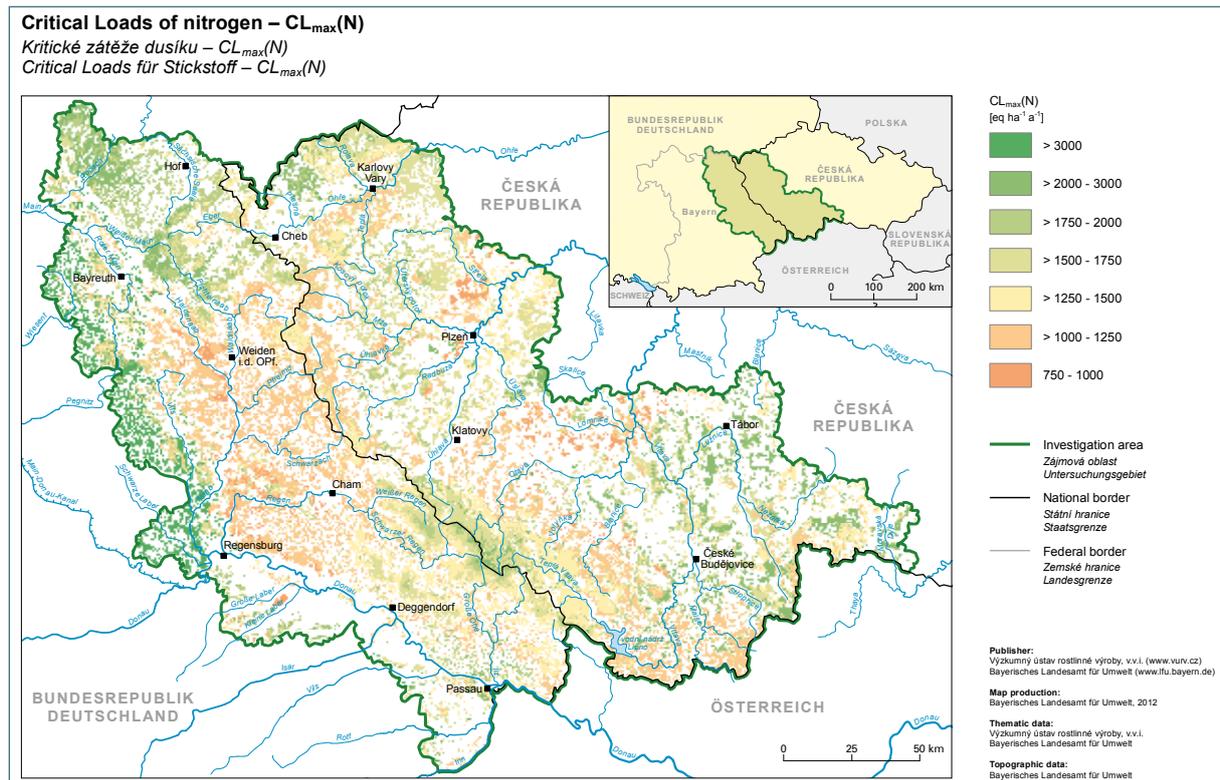


Abb. 3: Critical Loads für Deposition an Stickstoff

Die hohen Schwellenwerte für saure Schwefeleinträge bewegen sich größtenteils zwischen 500 bis 1.000 eq ha⁻¹ a⁻¹ und liegen damit deutlich niedriger als die Werte für Stickstoffeinträge (1.000 bis 2.000 eq ha⁻¹ a⁻¹). Die Böden reagieren demnach gegenüber Schwefeleinträge empfindlicher als gegenüber Einträge von Stickstoff. In den Beckenbereichen treten niedrige Schwellenwerte auf, wobei das Oberpfälzer Becken besonders auffällig ist. Dies ist auf die sehr geringe Nachlieferung basischer Kationen aus der Verwitterung und eine im Vergleich zu den Gebirgskämmen geringeren atmosphärischen Deposition basischer Kationen zurückzuführen.

Entscheidend ist somit die Eintragsmenge an S und N. Die Schwefeldepotion (Abb. 4) mit Werten zwischen 400 bis 700 eq ha⁻¹ a⁻¹ verursacht nur eine geringe lokale Überschreitung des Schwellenwertes. Die Stickstoffdeposition (Abb. 5) ist dagegen mit Werten von 1400 – 2.000 eq ha⁻¹ a⁻¹ deutlich höher als die einer Versauerung entgegen gerichteten Einflussfaktoren (basische Kationen im Boden). Die großen Unterschiede zwischen den Werten der Stickstoffdeposition im bayerischen und tschechischen Projektgebiet sind auf das stark unterschiedliche Niederschlagsregime zurückzuführen. Aufgrund der vorherrschenden westlichen Windrichtungen und der topographischen Barriere der Mittelgebirge ist der Einfluss von Frontalniederschlägen auf tschechischer Seite deutlich geringer (Regenschatten) und in der Folge auch die damit verbundene Stickstoffdeposition. Gerade die Böden des Oberpfälzer Beckens reagieren daher sehr empfindlich auf S- und N-Einträge; bei Überschreitung der jeweiligen Schwellenwerte ist hier am ehesten mit Schäden am Baumbestand bzw. Beeinträchtigung der Grundwasserqualität zu rechnen.

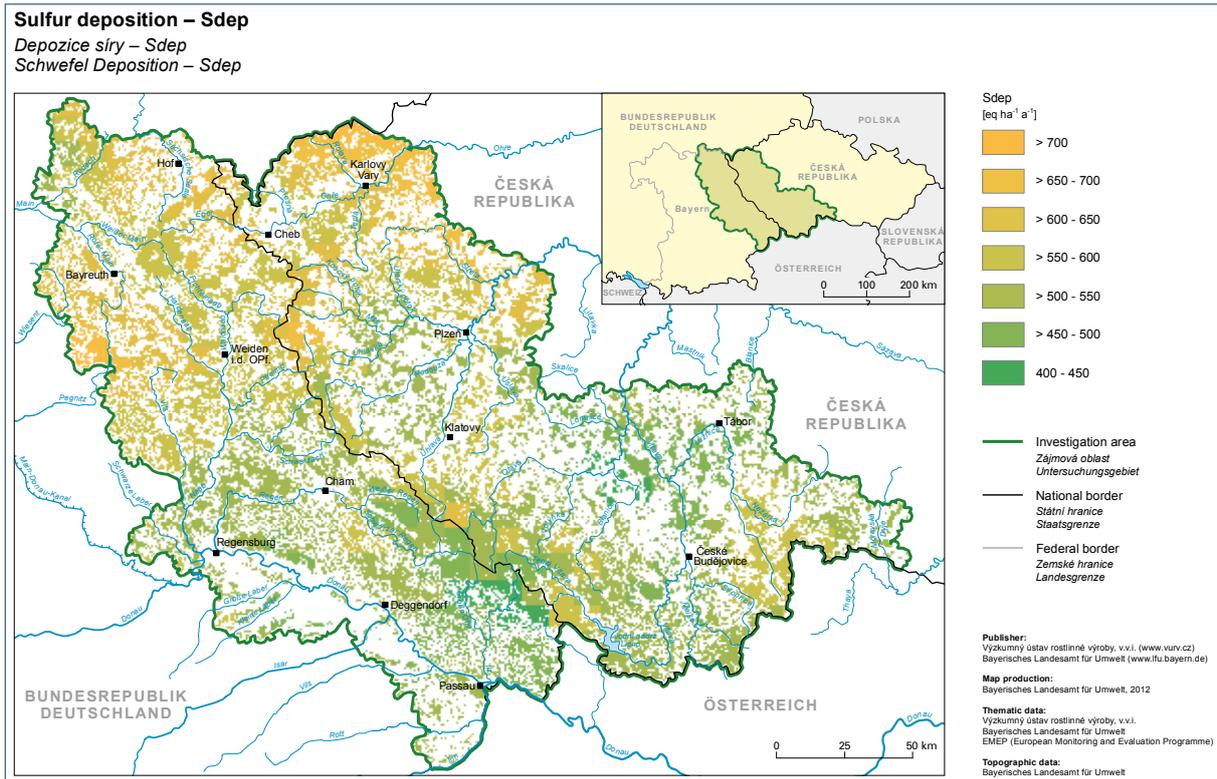


Abb. 4: Schwefeldeposition

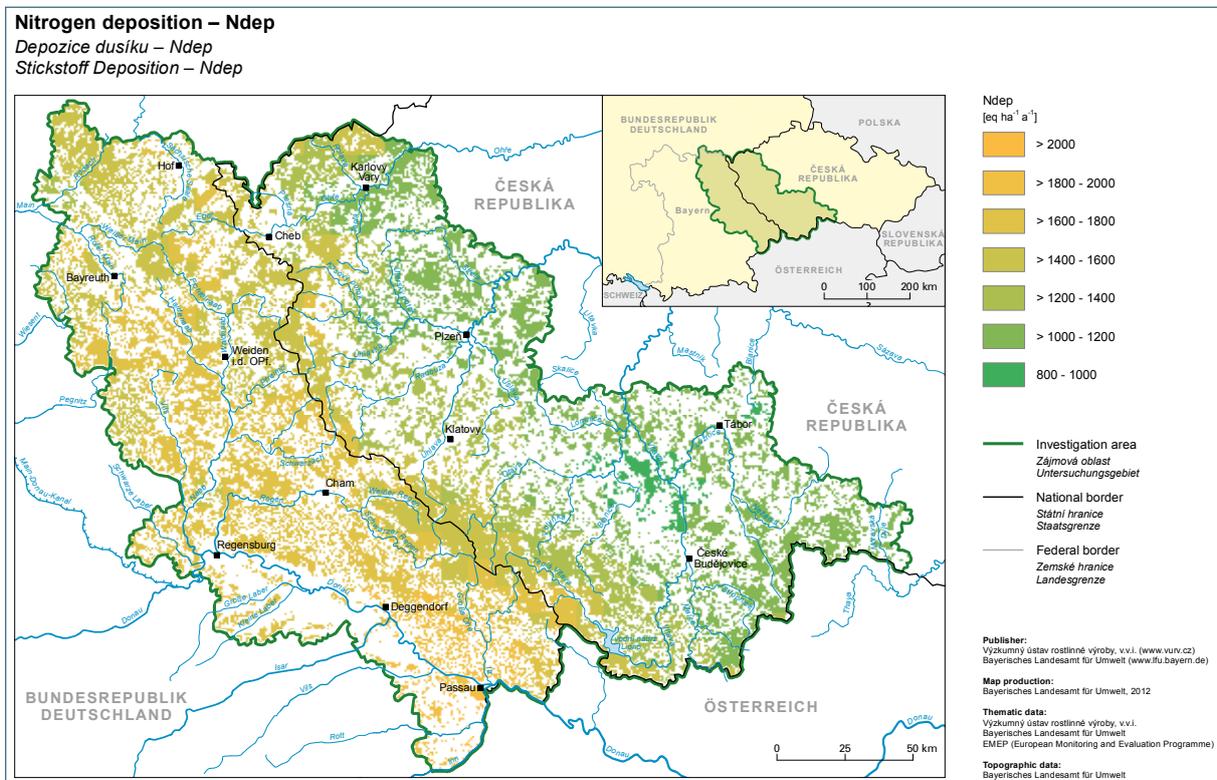


Abb. 5: Stickstoffdeposition

Der für den Boden wichtigste Parameter ist jedoch die Critical Load für saure atmosphärische Einträge insgesamt ($CL_{max}(S+N)$). Hierbei zeigt die grenzüberschreitende Karte, dass die räumlichen Verteilungsmuster der Kombination aus Schwefel und Stickstoff im Wesentlichen denen der Einzelkomponenten entsprechen (Abb. 6).

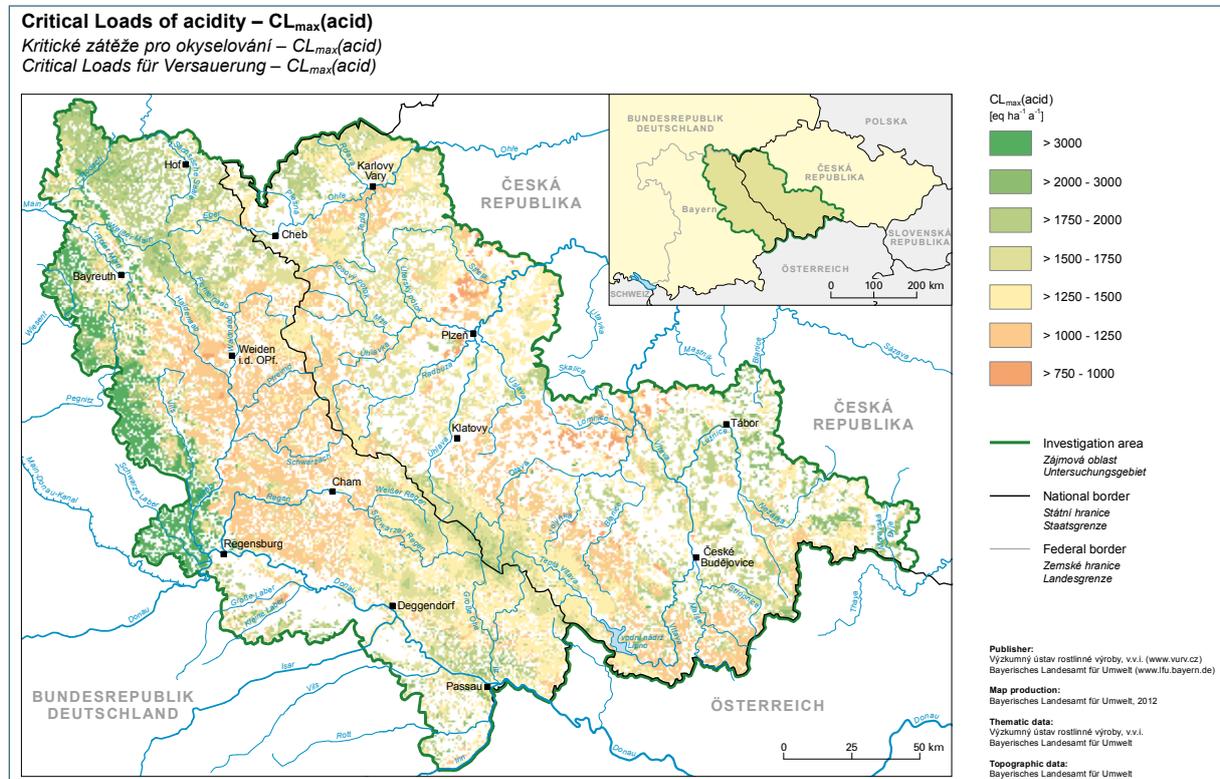


Abb. 6: Critical Loads für Versauerung durch saure Deposition

Wie für die Einzelkomponenten bereits ausgeführt, zeigen sich die jeweiligen Beckenbereiche auf bayerischer und tschechischer Seite äußerst empfindlich gegenüber sauren Einträgen (Abb. 6). Diese besitzen mit 750 bis 1.500 eq ha⁻¹ a⁻¹ sehr niedrige Critical Loads, da dort die Nachlieferung basischer Kationen aus der Verwitterung besonders niedrig ist. Hingegen sind die Böden der Hochlagen des Frankenwaldes und des Bayerischen Waldes weniger empfindlich gegenüber sauren Einträgen. Dies beruht auf dem hohen atmosphärischen Eintrag an basischen Kationen und der dort stärkeren Freisetzung basischer Kationen aus der Verwitterung des Bodenausgangsgesteins. Werte und Verteilungsmuster unserer Untersuchung im Oberpfälzer Becken werden größtenteils durch die deutschlandweiten Berechnungen des Umweltbundesamts (UBA 2011) bestätigt.

Im bayerischen Projektgebiet werden auf ca. 60 % der Forstflächen die Critical Loads durch die saure Deposition überschritten und dies zum Teil um bis zu 1.000 eq ha⁻¹ a⁻¹ (Abb. 7). Dies ist fast ausschließlich durch die Deposition von Stickstoff bedingt. Auf der tschechischen Seite ist der Anteil der Forstflächen, auf denen Überschreitungen auftreten, deutlich geringer. Dies beruht hauptsächlich auf der im Vergleich zum bayerischen Grenzgebiet deutlich geringeren Stickstoffdeposition, denn die Critical Loads zeigen ähnliche Verteilungsmuster beiderseits der Grenzen.

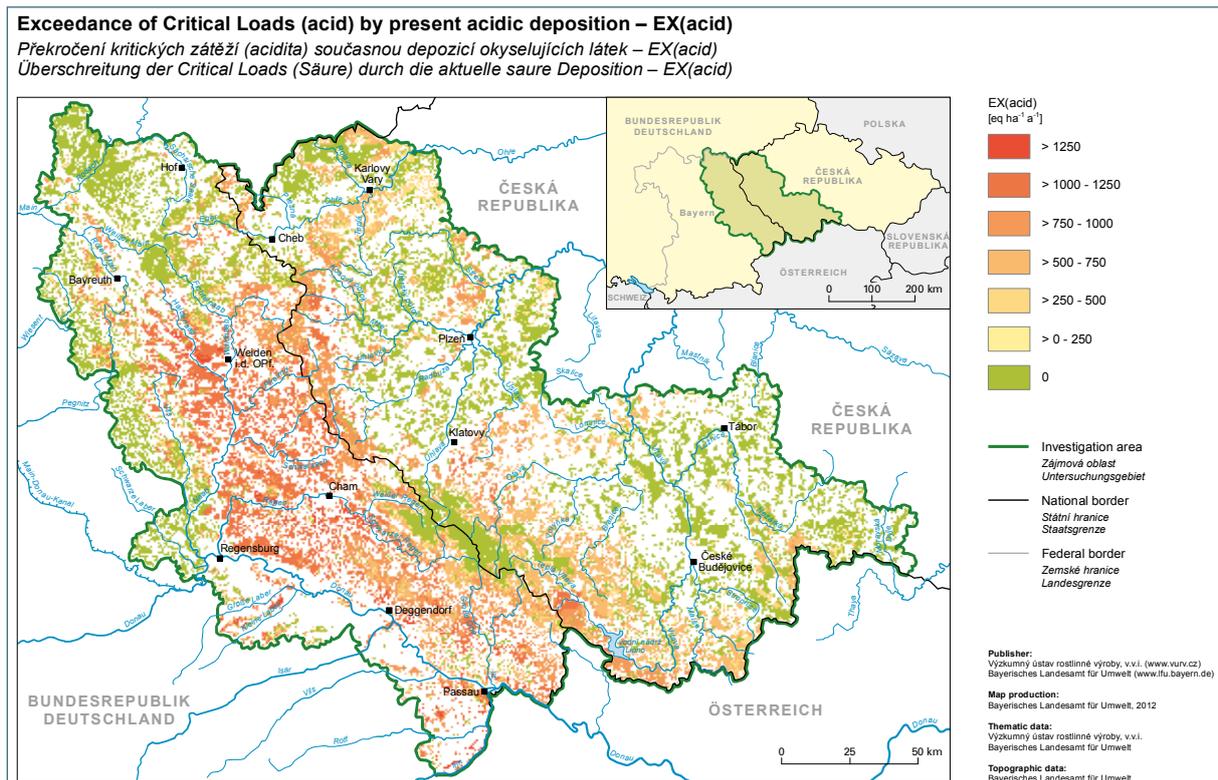


Abb. 7: Überschreitung der Critical Loads (Säure) durch die aktuelle saure Deposition

4.2 Säureneutralisationskapazität der Böden

Die ermittelten Säureneutralisationskapazitäten geben Auskunft darüber, wie stark die verbleibende Pufferkraft des Bodens gegenüber sauren Einträgen ist. Aufgrund des gewählten niedrigen Ziel-pH-Wertes von 3 sind die in Abb. 8 dargestellten Werte ein guter Anhaltspunkt für die verbleibende Neutralisationskapazität der Böden. Da ein Großteil (über 50 %) der Untersuchungsstandorte bereits pH Werte < 4 aufwies, wurde die Pufferkapazität bei pH 3 gemessen. Sie ist daher eher als theoretische Größe anzusehen und aufgrund des niedrigen pH-Wertes als „worst case“ Szenario zu interpretieren.

Die Pufferkapazitäten der einzelnen Horizonte wurden für jedes Profil bis zur maximalen Tiefe aggregiert und standortweise dargestellt. Eine Übertragung der Punktdaten in die Fläche erfolgte wie im Methodenteil beschrieben, mittels einer multiplen linearen Regression unter Verwendung von flächenhaft vorliegenden Daten der LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (LWF).

So sind mit Werten zwischen 2.000 bis zu über 5.000 keq ha⁻¹ im Bereich der Fränkischen Alb die höchsten Säureneutralisationskapazitäten für die Gesamtprofile zu finden, da dort die Nachlieferung basischer Kationen aus der Verwitterung des basenreichen Carbonatgesteins sehr hoch ist. Regionen, in welchen besonders häufig niedrige Säureneutralisationskapazitäten von unter 500 keq ha⁻¹ auftreten, sind der Frankenwald, das Oberpfälzer Becken, das Maintal sowie Teile des Fichtelgebirges und des Bayerischen Waldes. Hier ist die Gefahr des Säureeintrags in das Grundwasser mit am höchsten.

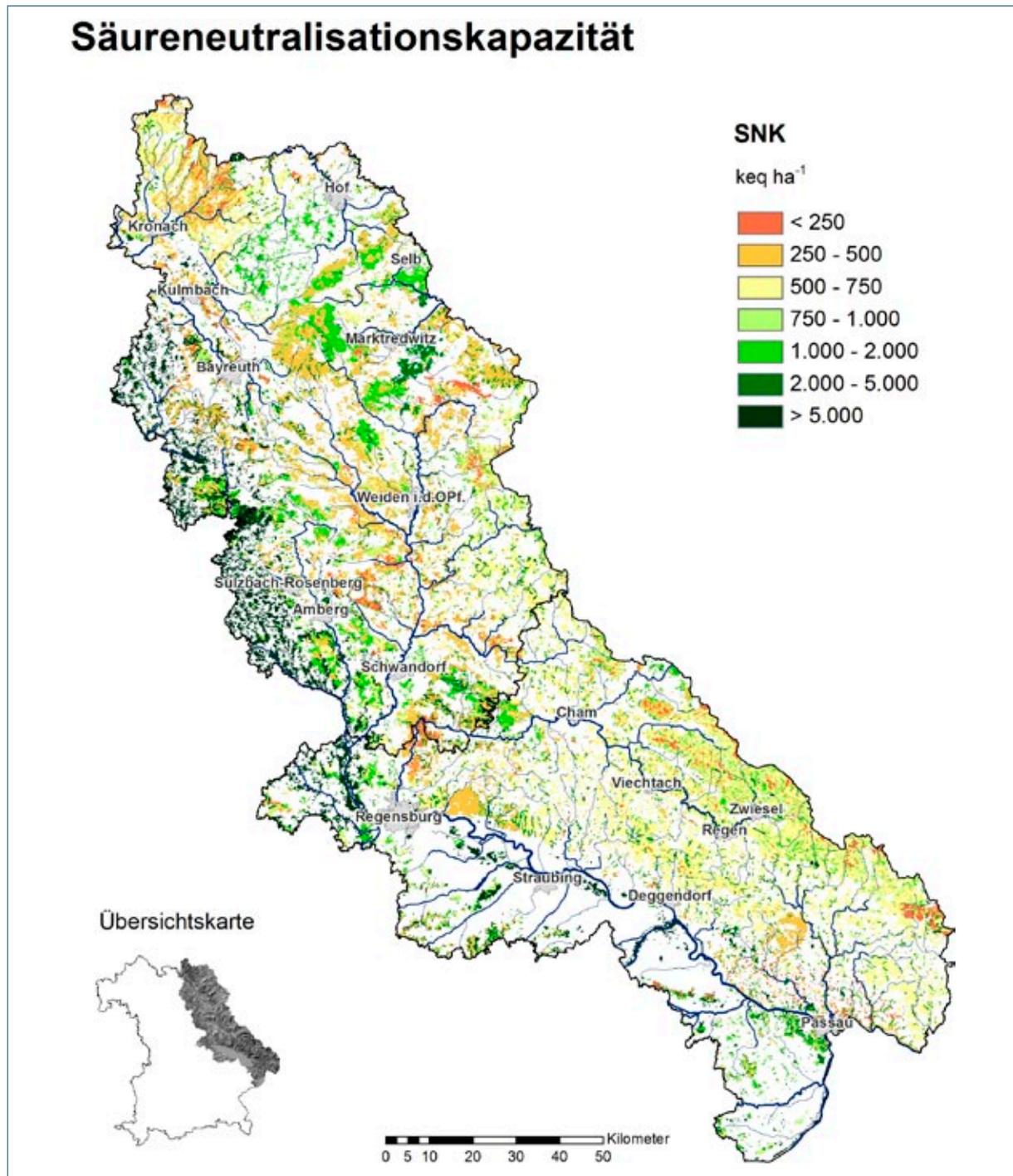


Abb. 8: Säureneutralisationskapazität der Böden im bayerischen Untersuchungsgebiet bis zur maximalen Profiltiefe.

Die gemessenen Säureneutralisationskapazitäten der Gesamtprofile belaufen sich für carbonathaltige Standorte auf über 200.000 keq ha⁻¹ bis hin zu lediglich 100 keq ha⁻¹ auf sehr sauren Standorten. Das Ausmaß der Versauerung der meisten Böden spiegelt sich im Median der Säureneutralisationskapazitäten der Auflage und des Oberbodens wider, welche nur Werte von um die 10 keq ha⁻¹ aufweisen. Die darunter liegenden Bodenhorizonte weisen im Mittel Pufferkapazitäten von ca. 250 keq ha⁻¹ auf. Dies ist ein deutliches Indiz dafür, dass die Versauerungsfront bereits bis unterhalb des Oberbodens fortgeschritten ist.

4.3 Bestimmung der säureinduzierten Schwermetall- und Nährstofffreisetzung aus dem Boden mittels sequenzieller Extraktion sowie deren Einfluss auf Grund- und Oberflächengewässer

Eine Beurteilung der säureinduzierten Freisetzung von Schwermetallen und Nährelementen über einen direkten Vergleich mittels der Eluategehalte der pH-stat Analyse war wie im Methodenteil beschrieben nicht zielführend, weshalb eine sequenzielle Extraktion durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse der sequenziellen Extraktion lagen in sehr guter Übereinstimmung mit bereits zuvor bestimmten Werten aus dem Königswasserextrakt, bzw. der NH_4F -Extraktion zur Bestimmung der Gehalte an $\text{SO}_4\text{-S}$ (Abb. 9). Die Summe aller fünf Fraktionen der sequenziellen Extraktion sollte im Idealfall summarisch den zuvor bestimmten Gesamtgehalt im Königswasserextrakt ergeben.

An drei beispielhaft herausgegriffenen Standorten sind die Ergebnisse grafisch dargestellt (Abb. 9). Deutlich zu erkennen ist u. a., dass Cadmium in tiefer liegenden Horizonten trotz höherer Gesamtgehalte niedrigere Anteile in der austauschbaren Fraktion aufweist. Bei As, Co und Pb sind ebenfalls starke Schwankungen in den mäßig reduzierbaren Anteilen zu beobachten. Diese zusätzlichen Hinweise liefern die Grundlage für die Beurteilung einer möglichen Freisetzung dieser Substanzen.

Bei vielen Schwermetallen (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) und As sind tendenziell im Oberboden bzw. oberen Profilbereichen höhere austauschbare Anteile als im Unterboden festzustellen. Ob dieser Effekt auf die höheren organischen Gehalte im Oberboden zurückzuführen ist oder durch die starke Versauerung verursacht wurde, ist nicht zweifelsfrei ableitbar. Die austauschbaren Anteile sind im Vergleich zu den vier anderen Fraktionen insgesamt jedoch als eher gering einzuordnen, lediglich Cadmium weist deutlich höhere Anteile in der austauschbaren Fraktion auf. Aufgrund der niedrigen KW-Gesamtgehalte an Cadmium im Substrat sind die höheren austauschbaren Anteile aber als unkritisch einzuordnen. Ein erhöhter Cd-Eintrag in das Grundwasser ist daher nicht zu besorgen. Den größten Anteil bei der sequenziellen Extraktion macht insgesamt i. d. R. die jeweilige Residualfraktion aus. Für Blei und Arsen konnten zudem mit 40-60 % sehr hohe Anteile in der mäßig reduzierbaren Fraktion gemessen werden (vgl. Abb. 10). Unter extremen Änderungen der Redoxbedingungen ist eine Freisetzung dieser Anteile nicht auszuschließen (LEWANDOWSKI et al., 1997).

Vereinfacht kann man sagen, dass je geringer die jeweiligen Elementgehalte in der austauschbaren und leicht reduzierbaren Fraktionen vorliegen, desto besser für die Grundwasserqualität im Hinblick auf Schwermetall- und Nährstoffeinträge durch säureinduzierte Freisetzung. Elementgehalt in den anderen Fraktionen deuten auf eine gewisse „Robustheit“ gegenüber Säureangriffen und somit Immobilität der Elemente im Bodenprofil hin.

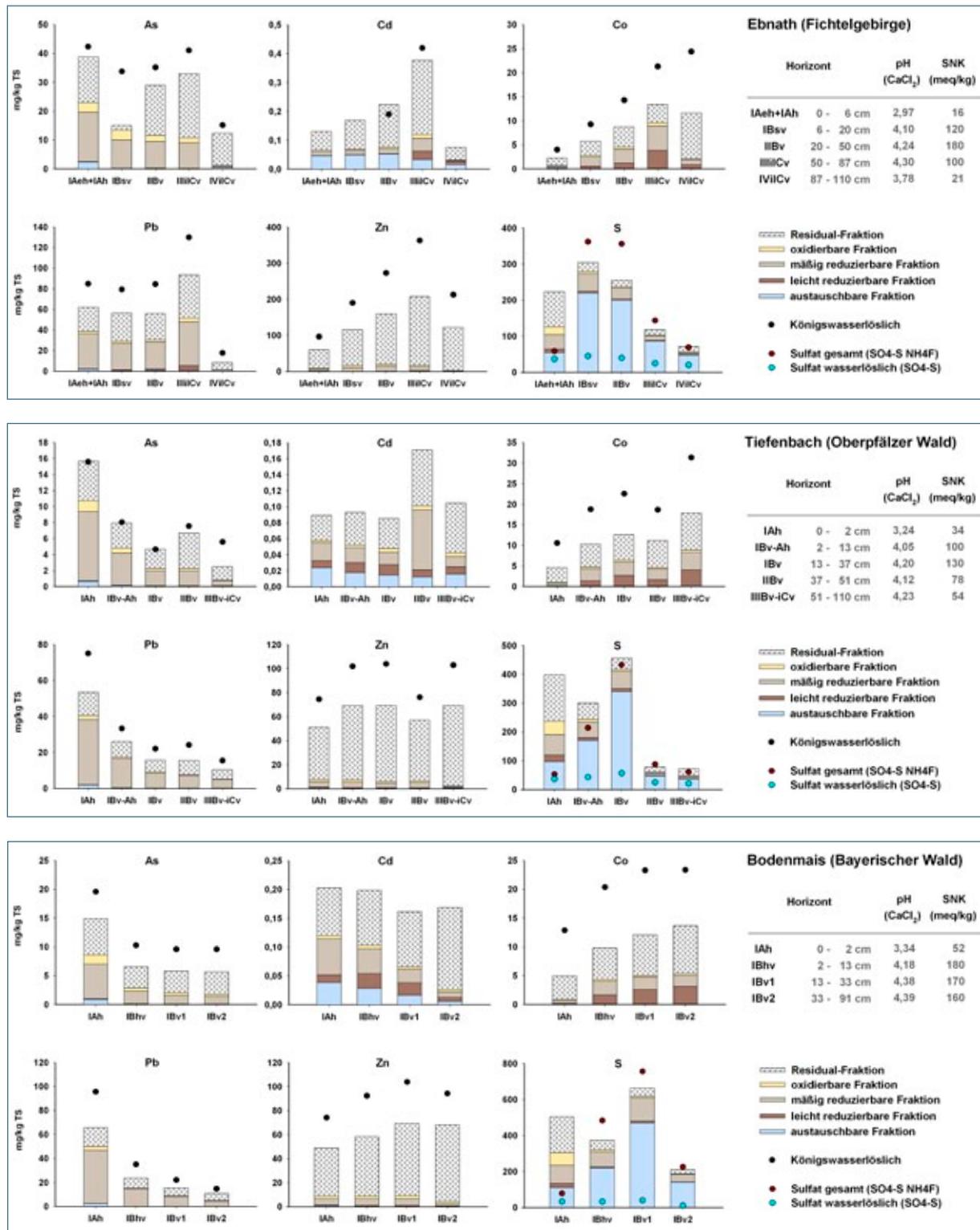


Abb. 9: Ergebnisse der sequenziellen Extraktion für die Standorte Ebnath (Fichtelgebirge), Tiefenbach (Oberpfälzer Wald) und Bodenmais (Bayerischer Wald) für alle fünf Fraktionen. Die Ergebnisse der Königswasseranalyse (schwarze Punkte) sind zum Vergleich aufgetragen. Als Vergleichsanalysen für die S –Werte wurden die wasserlöslichen (blaue Punkte) und Gesamtgehalte (braune Punkte) an SO₄-S angegeben.

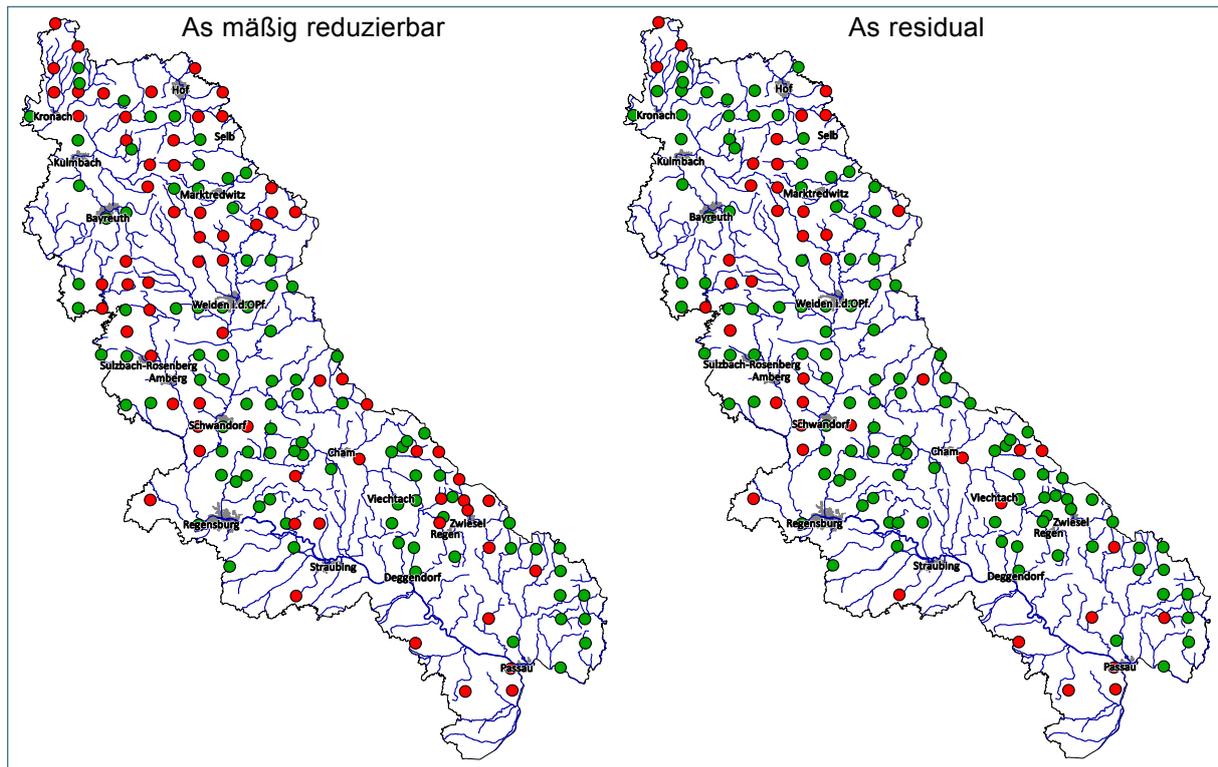


Abb. 10: Arsenkonzentrationen im gesamten Bodenprofil. Links: Mäßig reduzierbare As-Fraktion, rechts: As-Residualfraktion. Grüne Punkte zeigen As-Konzentrationen ≤ 20 mg/kg (Z0-Wert nach LAGA 1997), rote Punkte zeigen As-Konzentrationen > 20 mg/kg.

Die räumliche Verteilung der über das gesamte Bodenprofil integrierten As-Konzentrationen im Interreg-Förderraum wurde für die 5 Fraktionen der sequenziellen Extraktion (austauschbar, leicht reduzierbar, mäßig reduzierbar, oxidierbar, residual) betrachtet. Als Konzentrationskriterium wurde der Z0-Wert nach LAGA (1997) von 20 mg/kg herangezogen. As-Konzentrationen unterhalb dieses Wertes erlauben z. B. einen uneingeschränkten Einbau bei der Verwertung von Bodenmaterial, bei As-Konzentrationen oberhalb dieses Wertes sind Einschränkungen beim Einbau von Bodenmaterial zu beachten. Die As-Konzentrationen der „austauschbaren“ und „leicht reduzierbaren“ Fraktionen lagen durchweg bei < 20 mg/kg, die oxidierbare Fraktion zeigte an 3% der 156 Standorte Überschreitungen des Richtwerts. Diese Standorte liegen vor allem im Dogger und in der Oberkreide.

Wie in Abb. 9 angedeutet weisen die residuale und die mäßig reduzierbare As-Fraktion die höchsten Konzentrationen auf. Die Überschreitungen des 20 mg/kg-Richtwerts bei der Residualfraktion treten an Standorten im Fichtelgebirge, im nördlichen Frankenwald, aber auch im Bruchschollenland zwischen Weiden und Schwandorf, im Gebiet südlich der Donau sowie vereinzelt im Bayerischen Wald (Abb. 9) auf. In diesen Regionen liegen mit geringerer Anzahl auch die Standorte der mäßig reduzierbaren As-Fraktion, die den 20 mg/kg-Richtwert übertreffen. Die Mobilisierung der As-Residualfraktion erfordert allerdings extreme Randbedingungen (siehe Kapitel 3.3.6) die unter natürlichen Verhältnissen relativ unwahrscheinlich sind. Die mäßig reduzierbare As-Fraktion dagegen kennzeichnet den As-Anteil, der an Fe- und Mn-Oxiden gebunden ist. Die pH-stat Analyse (siehe Kapitel 3.3.1) zeigt, dass diese As-Fraktion bei $\text{pH}=3$ mobilisiert wird. Dies ist auch unter natürlichen Verhältnissen nicht auszuschließen, zumal mehr als 50% der untersuchten Waldstandorte bereits einen pH-Wert < 4 aufweisen.

Die Anteile der Nährstoffe (Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium) in der austauschbaren Fraktion variieren im Mittel zwischen 3 und 35%. Standorte, mit einer Basensättigung < 10% sind im Hinblick auf die Baumernährung als kritisch einzustufen (KÖLLING 2012, mündliche Mitteilung). Bei dieser Untersuchung sind insgesamt 46% der Standorte als kritisch zu beurteilen. Sie befinden sich vor allem am östlichen Rand des betrachteten Untersuchungsgebiets (Abb. 11). Sowohl im Frankenwald, als auch im Fichtelgebirge, Oberpfälzer und Bayerischen Wald sowie im Bruchschollenland ist daher mit einer kritischen Basenversorgung zu rechnen.

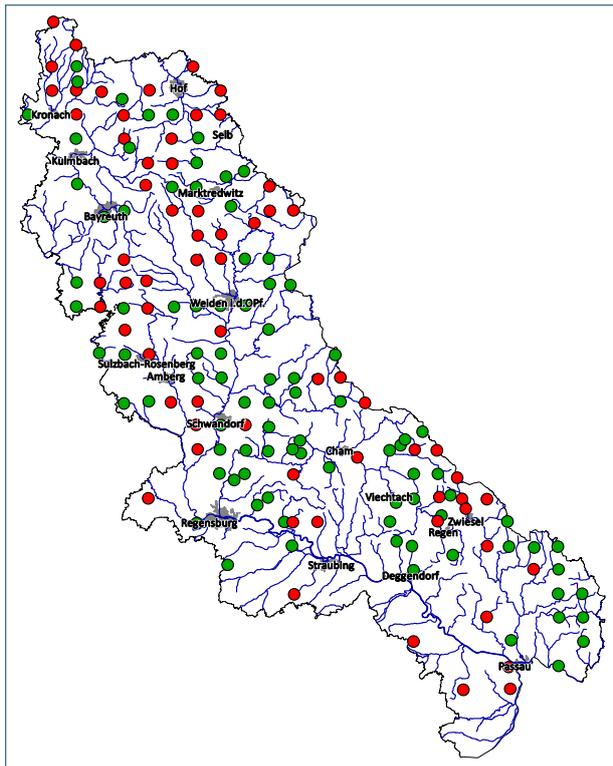


Abb. 11: Basensättigung der untersuchten Standorte im bayerischen Förderraum. Grüne Punkte zeigen Basensättigung $\geq 10\%$, rote Punkte zeigen Basensättigung < 10%.

Die Untersuchungsergebnisse machen zudem deutlich, dass im Boden noch größere Mengen an Sulfat gespeichert sind. Die Resultate der Ammoniumfluorid-Extraktion zeigen im Vergleich zur Wasserextraktion, dass besonders im Unterboden und im Ausgangssubstrat noch große Anteile des Sulfats in nicht wasserlöslicher Form gespeichert sind. Die Ergebnisse der sequenziellen Extraktion legen nahe, dass im Unterboden und Ausgangssubstrat mehr als die Hälfte des Schwefels in austauschbarer Form vorliegen muss. Daher ist nicht davon auszugehen, dass das Sulfat irreversibel im Boden gebunden ist, sondern bei sich ändernden Umweltbedingungen freigesetzt werden kann (MANDERSCHIED et al., 2000). Die Versauerung geht demnach auch nach dem Aussetzen der Deposition solange weiter, bis die Bodenlösung kein Sulfat und Nitrat mehr enthält.

4.4 Abgrenzung versauerungsempfindlicher Regionen und von Gebieten mit hohem Potenzial an Schwermetall- und Stoffausträgen

Aufgrund der vorgestellten Befunde sind der Bayerische Wald und das Oberpfälzer Becken als besonders versauerungsempfindliche Regionen einzuschätzen (Abb. 12). Dagegen reagieren nur kleinere Teilbereiche des Fichtelgebirges, des Frankenwaldes sowie des Schichtstufen- und Bruchschollenlandes sensibel auf die aktuellen sauren Einträge, da dort auch basische Kationen (EMEP) einen wesentlichen Anteil der Stoffdeposition ausmachen. Aber auch die Nachlieferung an basischen Kationen aus der Verwitterung bewirkt zum Teil sehr kleinräumige regionale Unterschiede,

wie z. B. im Fichtelgebirge mit unterschiedlichen Verwitterungsraten von Graniten, Gneisen und anderen Gesteinen des Kambrium-Ordovizium.

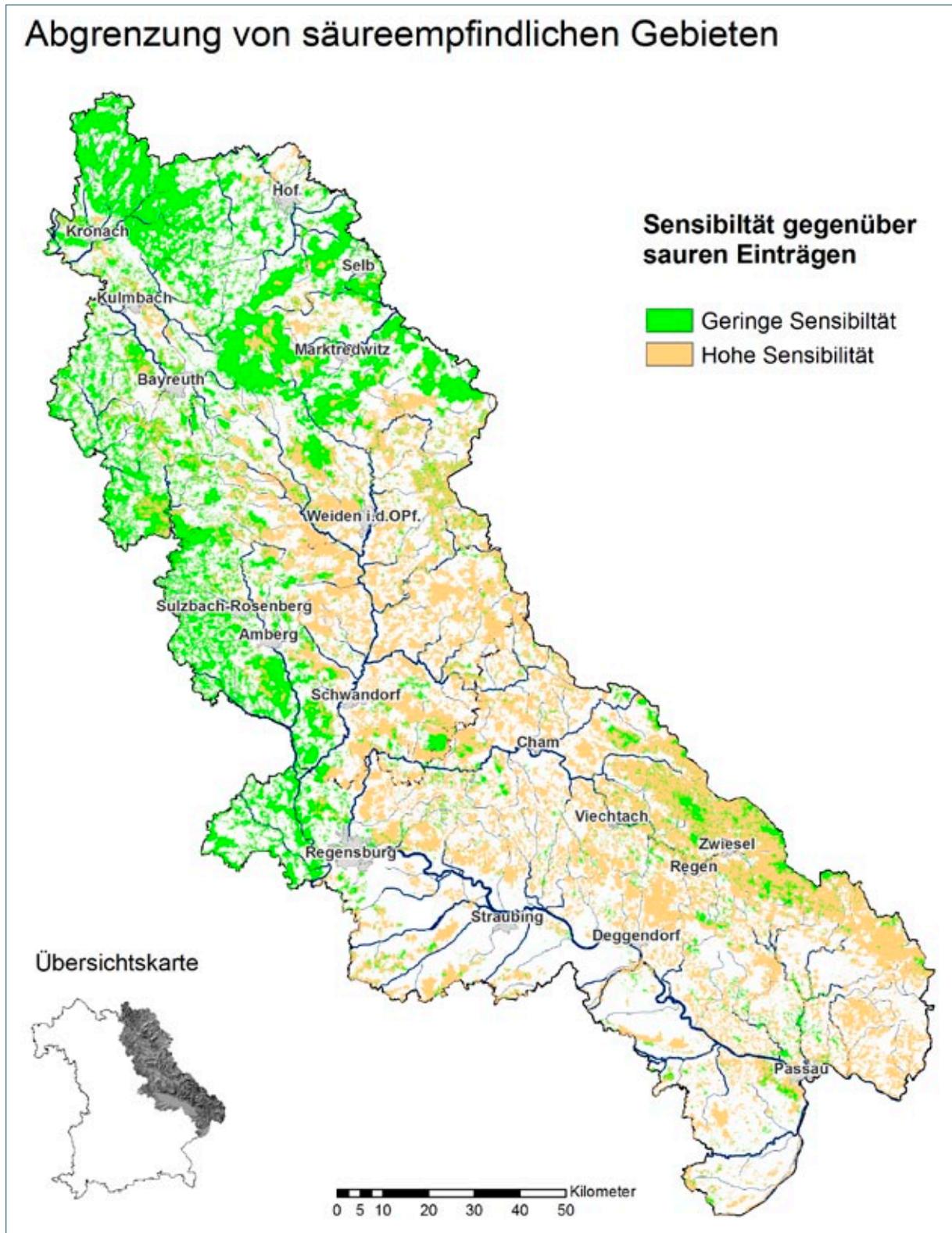


Abb. 12: Gebiete unterschiedlicher Säureempfindlichkeit im bayerischen Förderraum.

4.5 Schlussfolgerungen

In versauerungsempfindlichen Gebieten sind die Böden vor allem unter Wald von weiterer Versauerung bedroht. Der schädliche Einfluss hoher Stickstoffdepositionen ist hier besonders hoch. Der weiteren Versauerung dieser Flächen sollte vor allem durch umweltpolitische Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen entgegen gewirkt werden. Mit zunehmender Versauerung der Böden nimmt deren Basensättigung und damit der Gehalt an wichtigen Nährelementen ab. Der Abtransport der basisch wirksamen Kationen mit dem Sickerwasser bewirkt zugleich aber auch eine Zunahme von Säurekationen wie z. B. Aluminium. Diese Versauerungsfront wirkt sich zunächst in den oberen Profilmereichen des Bodens aus, kann aber v. a. bei Jungbäumen, die in den ersten Jahren mit ihren Wurzeln in den oberen Bodenhorizonten den Mangel an Nährstoffen überwinden müssen, zu Wachstumsbeeinträchtigungen führen. Eine zusätzliche Versauerungsgefahr der Böden ergibt sich auf diesen Standorten durch die Übernutzung von Kronenbiomasse im Rahmen einer intensiven forstlichen Bewirtschaftung. Die hier spärliche natürliche Nährstoffausstattung und die besonders hohe Versauerungsempfindlichkeit erfordern angepasste, extensivere Nutzungsstrategien. Mit einem Waldumbau hin zu aus tiefwurzelnden Baumarten aufgebauten Mischbeständen kann der Stoffhaushalt dieser Standorte zusätzlich stabilisiert werden. Bei besonders ungünstigen Ausgangssituationen kann mit einer gezielten Zufuhr von Basizität (Walddüngung), wie sie im Rahmen der Bodenschutzkalkung auf bestimmten Flächen gängige Praxis ist, Erleichterung geschaffen und die Nährstoffversorgung der Waldbäume sicher gestellt werden. Die Kalkungskulisse für Bayern weist explizit die tiefgründig sauren Böden des kristallinen Grundgebirges als kalkungswürdige Flächen aus. Hier kann durch gezielte Düngungsmaßnahmen neben einer dauerhaften Vitalisierung der geschädigten Bestände auch „...die weitere anthropogene chemische Degradation der Waldböden gestoppt, der Trinkwasserversauerung entgegengewirkt und der Magnesium-Mangel der Waldbestände behoben werden“ (LWF, 2010). Die Bodenschutzkalkung im Wald wird mit staatlichen Fördermitteln bezuschusst.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden von den Forstbehörden aufgegriffen und bei den Bewirtschaftungsempfehlungen berücksichtigt.

Die Gefahr der Tiefenverlagerung von Stoffen ist in versauerungsempfindlichen Gebieten allgemein erhöht. Die Freisetzung von Schwermetallen und deren Tiefenverlagerung hingegen zeigt nur geringe Abhängigkeit vom Säurestatus der Böden. Offenbar liegen auch unter den ungünstigsten Bedingungen die Schwermetalle vorwiegend in immobilen Fraktionen vor, so dass keine Gefahr für Grundwasser und oberirdische Gewässer zu besorgen ist.

Die regionalisierten Ergebnisse des Vorhabens stellen für die Forstverwaltung eine wichtige Grundlage für die Planung und Beurteilung von Kalkungsprojekten dar. Auch in der Beratung der Waldbesitzer für eine nachhaltige, standortangepasste Nutzung von Kronenbiomasse sind die Ergebnisse von Nutzen und sollten in das Standortinformationssystem „Karten für die Zukunft“ der Forstverwaltung einfließen.

5 Literatur

- BAYER. KLIMAFORSCHUNGSVERBUND (1996): Klimaatlas von Bayern. München.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (BML) (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996, Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987 - 1993 (BZE), Band 1.
- DE VRIES, W., HOL, A., TJALMA, S., VOOGD, J.C. (1990): Amounts and turnover rates of elements in forest ecosystems: A literature study. Winand Staring Center Report, Wageningen, Niederlande.
- DITTMAR, O., KNAPP, E., LEMBCKE, G. (1983): Die DDR-Buchenertragstafel 1983 als Grundlage für zweckmäßige Durchforstungskonzeptionen der Buche. Sozial. Forstw. Berlin 35: 82-86.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (LABO) (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. In: Handbuch Bodenschutz; hrsg. von Rosenkranz, D., Einsele, G., Harreß, H.-M. und Bachmann, G.; Kennziffer 9006; Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- GÄBLER, E. (1997): Mobility of heavy metals as a function of pH of samples from an over-bank sediment profile contaminated by mining activities, Journal of Geochemical Exploration 58, 185.
- HAASE, I., FÖRSTNER, U. (1995): Untersuchung zum Schadstoffpotential von Wasserwerksschlämmen. Acta hydrochim. hydrobiol. 23, 53.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) (1997): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen. Technische Regeln Boden, 52 S.
- LEWANDOWSKI, J., LEITSCHUH, S., KOß, V. (1997): Schadstoffe im Boden – Eine Einführung in Analytik und Bewertung. Springer, ISBN 3-540-62643-3 Gb, 357 S.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (LWF) (2010): LWF aktuell 78 - Bodenzustandserhebung 2006 – 2009. 17. Jahrgang; Ausgabe 5-2010, ISBN 1435-4098, 59 S.
- MANDERSCHIED, B., SCHWEISSER, T., LISCHIED, G., ALEWELL, C., MATZNER, E. (2000): Sulfate Pools in the Weathered Substrata of a Forested Catchment. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1078–1082.
- NAGEL, H.-D., BECKER, R., EITNER, H., HÜBENER, P., KUNZE, F., SCHLUTOW, A., SCHÜTZE, G., WEIGELT-KIRCHNER, R. (2004): Critical loads für Säure und eutrophierenden Stickstoff. Abschlussbericht zum F/E-Vorhaben 200 85 212, UBA, 172 S.
- OBERMANN, P., CREMER, S. (1993): Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden: Entwicklung eines aussagekräftigen Elutionsverfahrens.- In: Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten, Band 6, Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

- PRIETZEL J, KÖLLING C (1999): Ein einfaches Routineverfahren zur Beurteilung des Remobilisierungspotentials von Waldböden für Sulfat-Schwefel aus atmosphärischen Einträgen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 118, 329-344.
- RÖTZER, T. (1996): Neuartige Karten der Phänologie und des Wasserhaushalts von Bayern unter Berücksichtigung möglicher künftiger Klimaverhältnisse. Dissertation TU München.
- UMWELTBUNDESAMT (UBA) (1996): Manual on methodologies and criteria for mapping Critical Levels/Loads. Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland. Texte 71/96, UBA, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland - Zusammenfassender Abschlussbericht. TEXTE 38/2011 (www.uba.de/uba-info-medien/4137.html).
- ULRICH, B., PIROUZPANAH, D., MURACH, D. (1984): Beziehungen zwischen Bodenversauerung und Wurzelentwicklung von Fichten mit unterschiedlich starken Schadsymptomen. Forstarchiv 55, 127-134.
- UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UNECE) / COORDINATION CENTRE FOR EFFECTS (CCE) (1993): Calculation and Mapping of Critical Loads for Europe. Coordination Center for Effects, Status Report 1993. National Institut of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, Niederlande.
- WENK, G., RÖMISCH, K., GEROLD, D. (1985): DDR-Fichtenertragstafel 1984. Technische Universität Dresden, Sektion Forstwirtschaft, Tharandt: 64 S.
- ZEIEN, H. & BRÜMMER, G.W. (1989): Chemische Extraktionen zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden. – Mitt. Dt. Bodenkundl. Gesellschaft 59/1, 505-510, Hohenheim.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Interreg III- und Interreg IV-Gebiet	7
Abb. 2: Critical Loads für Deposition an Schwefel	19
Abb. 3: Critical Loads für Deposition an Stickstoff	20
Abb. 4: Schwefeldeposition	21
Abb. 5: Stickstoffdeposition	21
Abb. 6: Critical Loads für Versauerung durch saure Deposition	22
Abb. 7: Überschreitung der Critical Loads (Säure) durch die aktuelle saure Deposition	23
Abb. 8: Säureneutralisationskapazität der Böden im bayerischen Untersuchungsgebiet bis zur maximalen Profiltiefe.	24
Abb. 9: Ergebnisse der sequenziellen Extraktion für die Standorte Ebnath (Fichtelgebirge), Tiefenbach (Oberpfälzer Wald) und Bodenmais (Bayerischer Wald) für alle fünf Fraktionen. Die Ergebnisse der Königswasseranalyse (schwarze Punkte) sind zum Vergleich aufgetragen. Als Vergleichsanalysen für die S –Werte wurden die wasserlöslichen (blaue Punkte) und Gesamtgehalte (braune Punkte) an SO ₄ -S angegeben.	26
Abb. 10: Arsenkonzentrationen im gesamten Bodenprofil. Links: Mäßig reduzierbare As-Fraktion, rechts: As-Residualfraktion. Grüne Punkte zeigen As-Konzentrationen ≤20 mg/kg (ZO-Wert nach LAGA 1997), rote Punkte zeigen As-Konzentrationen >20 mg/kg.	27
Abb. 11: Basensättigung der untersuchten Standorte im bayerischen Förderraum. Grüne Punkte zeigen Basensättigung ≥10 %, rote Punkte zeigen Basensättigung <10 %.	28
Abb. 12: Gebiete unterschiedlicher Säureempfindlichkeit im bayerischen Förderraum.	29

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klassierte Verwitterungsrate [$\text{eq ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] nach UBA (1996)	10
Tab. 2: Ableitung der Texturklasse aus den Sand- und Tongehalten (UBA, 1996)	10
Tab. 3: Basen- (Bc_u) und Stickstoffaufnahme (N_u) in Abhängigkeit vom Waldtyp	11
Tab. 4: Durchschnittliche jährliche Zuwachsraten (t) nach 100 Jahren	11
Tab. 5: Gehalte an basischen Kationen und Stickstoff im Derbholz mit Rinde (JACOBSEN et al. 2002, DE VRIES et al. 1990)	11
Tab. 6: Stickstoffimmobilisierungsrate (N_i) in Abhängigkeit von der Jahresmitteltemperatur nach UNECE/CCE (1993)	12
Tab. 7: Ableitung des Denitrifikationsfaktors f_{de} vom Tongehalt	12
Tab. 8: Mittlere Aufnahme basischer Kationen (Bc_u) und Stickstoff (N_u) in Abhängigkeit vom Waldtyp nach UBA (1996)	13
Tab. 9: Untere tolerierbare Grenzen des pH-Wertes nach NAGEL et al. (2004)	14
Tab. 10: Klassifizierung der Basensättigung nach BML (1996)	15

6 Anhang

Für alle im Anhang verwendete Werte gilt: $0 < \text{NWG}$, 0,0 und 0,00 mit Werten kleiner 10^{-2} bzw. 10^{-3} .

6.1 pH-stat Analyse	36
6.2 Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})	37
6.3 Wasserextrakt (S4)	38
6.4 Ammoniumflourid-Extrakt	39
6.5 Sequenzielle Extraktion	40
6.6 Oxalat- und dithionitlösliche Metalle	53
6.7 Elementar-Analytik	54
6.8 Königswasser-Extrakt	55
6.9 Ammoniumnitrat-Extrakt	56
6.10 pH CaCl_2	57

6.1 pH-stat Analyse

pH-stat-Analyse	kg/ha											Zn						
	SNK (7d)	SNK (24h)	Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg		Mn	Na	Ni	Pb		
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139		
	Mittelwert	4115	3468	3472	0,15	39535	0,12	5,7	0,4	1,7	156	20235	403	164	4,4	3,5	10,6	
	Median	587	494	2538	0,03	1156	0	3,4	0,04	0	113	198	230	89	0,8	0,5	7,3	
	Minimum	94	53	216	0	75	0	0	0	0	2	8	12	13	0	0	0	0
	Maximum	207652	206977	14891	2,41	2100555	6,93	54,8	4,12	46,4	1348	1220736	2626	1382	93,4	178,2	163,3	
	90.Perzentil	1609	1448	7071	0,4	11941	0,18	11,3	1,25	3,7	283	4152	997	370	10	6,8	21,6	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154		
	Mittelwert	3788	3189	3719	0,12	35562	0,1	5,7	0,44	1,7	145	18265	376	129	4	3,5	8,8	
	Median	595	481	2762	0	834	0	3,6	0,09	0	104	142	226	75	0,6	0,5	5,9	
	Minimum	90	49	197	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
	Maximum	207635	206958	15340	2,38	2100305	6,93	54,6	4,12	46,4	1347	1220639	2615	1381	93,1	178,2	161,2	
	90.Perzentil	1539	1393	8141	0,41	11379	0,13	11,5	1,37	4,1	244	3654	915	270	9,3	7,4	19,2	
Auflage	Anzahl	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140		
	Mittelwert	10	11	25	0,04	181	0	0	0	0,01	7	35	26	29	0,1	0	2	
	Median	7	8	15	0	147	0	0	0	0	4	21	17	3	0,1	0	1,4	
	Minimum	0	1	0	0	15	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
	Maximum	92	91	437	0,33	941	0,16	0,3	0,1	0,43	61	386	151	300	0,7	1,2	8,4	
	90.Perzentil	18	20	33	0,13	360	0,01	0,1	0	0,02	15	64	60	116	0,2	0	4,2	
Oberboden	Anzahl	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149		
	Mittelwert	164	168	244	0,02	1711	0,02	0,4	0,06	0,05	51	827	48	12	0,3	0,3	2,1	
	Median	11	9	101	0	22	0	0,1	0	0	34	12	4	4	0,1	0,1	1,1	
	Minimum	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Maximum	7461	7759	2443	0,28	86588	0,98	5,4	0,73	2,95	218	47561	1245	193	11,9	3,9	30,4	
	90.Perzentil	118	106	601	0,09	212	0,03	1,1	0,2	0,09	123	50	111	27	0,5	1	4,3	
Unterboden	Anzahl	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150		
	Mittelwert	610	570	2271	0,06	4306	0,07	3,7	0,28	1,2	69	1372	241	61	2,7	1,5	5,6	
	Median	295	243	1609	0	152	0	2,1	0	0	35	28	135	29	0,2	0	3,1	
	Minimum	17	16	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
	Maximum	17004	16924	15220	2,3	247882	6,87	54,1	3,73	46,3	1212	68057	2155	577	92,3	37,1	159,4	
	90.Perzentil	979	900	5056	0,2	4963	0	8,2	0,98	2,6	150	1918	591	152	5,1	3,7	12,4	
Ausgangssubstrat	Anzahl	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118		
	Mittelwert	3963	3226	1664	0,05	38781	0,02	2,2	0,14	0,67	40	21051	123	76	1,4	2,2	1,7	
	Median	228	174	1136	0	332	0	1,2	0	0	9	57	56	31	0	0	0	
	Minimum	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Maximum	200174	199199	9224	1,53	2013717	1,01	32,2	2,35	11,44	978	1173079	1647	1325	27,2	138	39,7	
	90.Perzentil	1004	702	3734	0,15	7106	0	4,3	0,4	2,05	76	1212	257	154	3,1	2,7	4,7	

6.2 Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})

Kationenaustausch- kapazität	Kmol/ha											Basen- sättigung %									
	Al	Ca	Fe	H	K	Mg	Mn	Na	Ca	Mg	K		Na	Fe	Mn	Al	H	KAK _{eff}	S-Wert		
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156		
	Mittelwert	3510	4239	137	16	597	1280	258	83	211,5	105,7	15,3	3,6	4,9	9,4	390,3	14,1	754,8	336,1	23,6	
	Median	3331	703	94	13	380	152	153	46	35,1	12,6	9,7	2	3,4	5,6	370,3	11,6	508,2	69,2	12,2	
	Minimum	0	40	0	0	51	8	3	0	2	0,7	1,3	0	0	0,1	0	0	0	44,2	12,3	1,4
	Maximum	13011	50225	1170	152	3587	14629	1915	832	2506,2	1208,8	91,7	36,2	41,9	69,7	1446,7	151,7	4050,2	3798,9	100	
90.Perzentil	5886	15172	292	30	1339	3910	547	208	757,1	323,1	34,3	9	10,5	19,9	654,5	29	1717,6	1159	68,1		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156		
	Mittelwert	3436	3994	118	11	552	1246	228	81	199,3	102,9	14,1	3,5	4,2	8,3	382,1	9,4	723,8	319,9	23,2	
	Median	3248	383	72	7	329	123	113	42	19,1	10,2	8,4	1,8	2,6	4,1	361,2	6	476	47,1	12	
	Minimum	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0,8	0	0	0	0	0	0	38,7	2,6	1,2
	Maximum	12996	49899	1169	152	3484	14583	1819	821	2490	1205	89,1	35,7	41,9	66,2	1445	151,7	4009,9	3776,8	100	
90.Perzentil	5809	14694	260	23	1324	3865	523	205	733,2	319,4	33,9	8,9	9,3	19	646	22,2	1695,8	1142,7	68,1		
Auflage	Anzahl	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156		
	Mittelwert	78	252	21	6	45	35	30	2	12,6	2,9	1,2	0,1	0,7	1,1	8,7	5,6	32,9	16,8	54,9	
	Median	49	194	14	4	39	22	22	2	9,7	1,9	1	0,1	0,5	0,8	5,4	3,6	28,7	13	53,4	
	Minimum	0	20	0	0	7	5	1	0	1	0,4	0,2	0	0	0	0	0	0	5,5	1,7	10,7
	Maximum	739	1294	165	148	192	437	197	13	64,6	36,1	4,9	0,6	5,9	7,2	82,2	147,9	312,6	94,1	99,5	
90.Perzentil	145	468	46	11	72	50	64	6	23,3	4,1	1,8	0,2	1,6	2,3	16,1	10,9	50,5	28,8	85,5		
Oberboden	Anzahl	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153		
	Mittelwert	469	385	66	5	46	111	20	5	19,2	9,2	1,2	0,2	2,4	0,7	52,2	4,1	89,2	29,8	15,9	
	Median	309	29	40	3	28	13	4	1	1,4	1,1	0,7	0	1,4	0,2	34,4	2,7	52,6	3,5	7,4	
	Minimum	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5	0,1	1,8
	Maximum	2225	16299	360	31	342	4001	271	83	813,3	330,6	8,7	3,6	12,9	9,9	247,4	31,1	1153	1152	99,9	
90.Perzentil	1168	255	156	10	100	42	63	12	12,7	3,4	2,5	0,5	5,6	2,3	129,9	9,5	177,2	21	35,2		
Unterboden	Anzahl	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150		
	Mittelwert	1985	2304	38	4	326	731	175	48	115	60,4	8,3	2,1	1,4	6,4	220,7	3,3	417,6	185,8	17,2	
	Median	1598	71	16	1	127	24	75	18	3,6	2	3,2	0,8	0,6	2,7	177,7	0,5	217,1	10,5	5,7	
	Minimum	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	33,7	0,5	0,9
	Maximum	8964	48272	943	36	3355	14104	1666	421	2408,8	1165,4	85,8	18,3	33,8	60,7	996,8	36,3	3736,9	3648	100	
90.Perzentil	3866	5739	85	10	862	2945	441	144	286,4	243,4	22	6,3	3	16,1	429,9	9,1	1146,1	632,7	63,4		
Ausgangs- substrat	Anzahl	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119		
	Mittelwert	1393	1827	20	2	252	566	52	40	91,2	46,8	6,4	1,7	0,7	1,9	154,9	1,6	305,1	146,1	25,4	
	Median	900	110	0	0	142	41	23	16	5,5	3,4	3,6	0,7	0	0,8	100	0	172,6	16,1	10,2	
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,8	0,1	0,8
	Maximum	12414	28530	842	27	1973	9364	723	468	1423,7	773,7	50,5	20,4	30,2	26,3	1380,4	27,3	2520,7	1946,7	100	
90.Perzentil	2470	5261	23	5	545	1576	147	106	262,5	130,3	13,9	4,6	0,8	5,3	274,7	4,3	638,1	388,8	79,2		

6.3 Wasserextrakt (S4)

Wasserextrakt (S4)		Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	Cl	PO4	SO4	LF	pH		
		kg/ha																			µS/cm		
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	156	148	156	148	148	148	148	156	156	156	156	156	148	148	148	156	156	156	156	155	156	
	Mittelwert	201	0,09	135	0,01	0,34	0,05	0,27	97	115	75	61	56	0,1	0,21	1,25	44	26	436	44	4,68	4,68	
	Median	125	0,05	62	0	0,16	0	0,07	51	91	38	39	33	0	0,13	0,67	33	21	379	40	4,58	4,58	
	Minimum	20	0	3	0	0	0	0	0	6	23	3	0	4	0	0	2	0	0	8	14	3,84	3,84
	Maximum	1786	1,73	1886	0,27	3,7	1,69	2,35	914	485	859	385	577	2,95	4,57	6,45	268	124	1712	144	8,23	8,23	
	90.Perzentil	348	0,16	298	0,02	1	0,09	0,85	209	219	147	140	112	0,24	0,35	3,39	89	45	849	72	5,02	5,02	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	156	148	156	148	148	148	148	156	156	156	156	156	148	148	148	156	156	156	156	156	156	
	Mittelwert	194	0,06	121	0,01	0,34	0,04	0,25	95	96	70	57	53	0,09	0,17	1,14	34	3	417	40	4,74	4,74	
	Median	116	0,02	54	0	0,16	0	0,05	50	73	32	35	31	0	0,09	0,58	22	0	357	35	4,62	4,62	
	Minimum	19	0	0	0	0	0	0	4	13	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	13	3,9	3,9
	Maximum	1780	1,73	1865	0,27	3,7	1,68	2,35	913	445	850	373	570	2,93	4,55	6,17	267	120	1688	142	8,23	8,23	
	90.Perzentil	346	0,12	272	0,01	1	0,07	0,82	209	179	139	135	108	0,18	0,32	3,24	75	4	830	63	5,07	5,07	
Auflage	Anzahl	156	148	156	148	148	148	148	156	156	156	156	156	148	148	148	156	156	156	155	155	156	
	Mittelwert	8	0,04	15	0	0	0,01	0,02	2	20	5	3	3	0,01	0,04	0,12	10	24	21	382	3,84	3,84	
	Median	5	0,02	12	0	0	0	0	1	17	3	2	2	0	0,03	0,09	9	21	17	346	3,7	3,7	
	Minimum	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	68	2,6	2,6
	Maximum	104	1,62	65	0	0,02	0,05	0,1	19	64	52	29	19	0,09	0,12	0,64	55	120	266	831	7,1	7,1	
	90.Perzentil	16	0,07	30	0	0	0,02	0,04	4	34	9	7	5	0,03	0,08	0,27	18	43	33	584	4,35	4,35	
Oberboden	Anzahl	153	145	153	145	145	145	153	153	153	153	153	153	145	145	145	153	153	153	153	153	153	
	Mittelwert	38	0,03	24	0	0,03	0,02	0,06	23	12	15	4	5	0,01	0,06	0,26	14	1	29	102	4,18	4,18	
	Median	27	0,01	4	0	0	0	0,02	15	9	4	1	3	0	0,04	0,13	6	0	16	89	4	4	
	Minimum	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	3,4	3,4
	Maximum	250	0,33	770	0,03	0,42	0,3	0,96	147	77	370	56	34	0,51	0,39	2,79	217	69	282	396	7,9	7,9	
	90.Perzentil	86	0,06	29	0	0,08	0,06	0,12	52	24	16	13	10	0,01	0,15	0,6	30	1	70	172	4,51	4,51	
Unterboden	Anzahl	150	142	150	142	142	142	142	150	150	150	150	150	142	142	142	150	150	150	150	150	150	
	Mittelwert	121	0,02	55	0	0,25	0,02	0,14	54	50	35	46	31	0,06	0,07	0,58	13	0	272	40	4,67	4,67	
	Median	60	0	21	0	0,12	0	0	14	30	15	24	13	0	0,03	0	10	0	187	37	4,59	4,59	
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	3,96	3,96
	Maximum	1772	0,47	569	0,27	2,13	1,23	2,35	907	355	307	333	294	2,89	1,22	5,46	121	12	1340	121	7,9	7,9	
	90.Perzentil	217	0,06	115	0,01	0,67	0	0,34	117	137	87	121	93	0,11	0,18	1,69	26	0	699	64	5,2	5,2	
Ausgangs- substrat	Anzahl	119	111	119	111	111	111	111	119	119	119	119	119	111	111	111	119	119	119	119	119	119	
	Mittelwert	51	0,01	57	0	0,09	0,01	0,08	26	46	28	11	25	0,02	0,05	0,43	10	1	163	28	5,09	5,09	
	Median	20	0	20	0	0	0	0	2	25	9	4	13	0	0	0	0	0	128	23	4,9	4,9	
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4,3	4,3
	Maximum	731	0,13	1094	0,03	2,56	1,22	1,35	580	404	479	133	293	0,91	3,16	5	209	23	891	100	8,36	8,36	
	90.Perzentil	118	0	127	0	0,2	0	0,3	59	99	58	30	63	0	0,07	1,64	21	1	369	49	5,63	5,63	

6.4 Ammoniumflourid-Extrakt

Ammoniumflourid-Extrakt		SO ₄ kg/ha
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	156
	Mittelwert	1847
	Median	1333
	Minimum	8
	Maximum	10841
	90.Perzentil	3842
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	156
	Mittelwert	1827
	Median	1289
	Minimum	0
	Maximum	10821
	90.Perzentil	3813
Auflage	Anzahl	156
	Mittelwert	22
	Median	18
	Minimum	1
	Maximum	242
	90.Perzentil	36
Oberboden	Anzahl	153
	Mittelwert	73
	Median	33
	Minimum	0
	Maximum	1641
	90.Perzentil	140
Unterboden	Anzahl	150
	Mittelwert	1314
	Median	753
	Minimum	0
	Maximum	10785
	90.Perzentil	3109
Ausgangs- substrat	Anzahl	119
	Mittelwert	643
	Median	435
	Minimum	0
	Maximum	4697
	90.Perzentil	1322

6.5 Sequenzielle Extraktion

Sequenzielle Extraktion (austauschbare Fraktion)		Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	S	P	
		kg/ha																	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
	Mittelwert	166	0,9	5971	0,15	2	1,9	3,6	57	701	1222	281	248	3,4	2,1	3,5	463	95	
	Median	115	0,8	1275	0,07	1	1,9	2,9	48	430	234	92	141	1	1,3	2,8	345	92	
	Minimum	9	0,2	102	0,01	0,2	0,4	0,7	5	98	26	2	19	0,2	0,2	0,6	38	20	
	Maximum	1275	4,8	89313	4,67	24,8	6,5	20,5	269	4594	16576	2572	2096	47,7	73,3	30	1842	325	
90.Perzentil	327	1,4	13508	0,17	3,9	2,9	5,9	116	1568	3031	741	577	8,1	2,2	5,1	888	146		
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122
	Mittelwert	35	0,2	159	0,01	0,1	0,2	0,4	26	47	37	15	15	0,1	0,4	0,3	31	10	
	Median	20	0,2	58	0,01	0,1	0,1	0,3	18	31	21	3	8	0,1	0,3	0,2	17	7	
	Minimum	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Maximum	255	0,9	2227	0,12	1,5	0,9	2,9	154	264	497	201	156	1,8	2,8	2,3	366	47	
90.Perzentil	77	0,5	330	0,03	0,2	0,4	1	53	106	66	34	34	0,2	0,9	0,7	71	20		
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122
	Mittelwert	97	0,5	3399	0,11	1,4	1,1	2,1	26	367	750	213	134	2,4	0,8	2,2	328	52	
	Median	63	0,3	409	0,03	0,4	0,8	1,6	19	179	77	46	74	0,4	0,6	1,3	213	42	
	Minimum	2	0	7	0	0,1	0,1	0,3	1	25	7	0	1	0	0	0,2	17	5	
	Maximum	584	4,6	78555	4,66	19,8	3,5	20	194	3477	16079	2529	2038	45,9	18,6	29,7	1827	146	
90.Perzentil	207	0,8	5771	0,11	3,2	2,3	4	44	827	1948	628	224	5,8	1,3	3,7	773	113		
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
	Mittelwert	49	0,3	3365	0,04	0,8	0,9	1,5	9	400	610	77	140	1,4	1,1	1,4	150	47	
	Median	28	0,2	605	0,02	0,4	0,8	1,1	6	201	95	31	57	0,5	0,4	1,2	107	39	
	Minimum	1	0	7	0	0	0	0	0	5	1	0	1	0	0	0	2	2	
	Maximum	478	1,5	49204	0,42	11,5	5,8	9,3	65	3868	10749	863	1283	28	52	8,7	1166	290	
90.Perzentil	80	0,5	8173	0,08	1,2	1,8	3,5	21	983	1313	192	365	2,8	1,1	2,6	273	88		

Sequenzielle Extraktion (leicht reduzierbare Fraktion)		Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	S	P	
		kg/ha																	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	
	Mittelwert	301	0,5	526	0,21	16,3	1,8	2,1	435	34	83	1032	36	5,6	1,5	8,4	29	92	
	Median	260	0,5	250	0,04	6,3	1,8	1,6	337	22	44	408	27	1	1	3,3	27	90	
	Minimum	56	0,1	44	0	0,2	0,4	0,2	97	3	10	6	4	0,2	0,2	0,6	4	19	
	Maximum	1306	1,6	10222	19,46	381	6,5	11,8	2334	220	1271	38439	216	499,2	25,6	511,2	84	325	
	90. Perzentil	481	0,7	1097	0,11	36	2,9	4	815	74	175	1985	65	3,4	2,3	6,7	51	144	
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	29	0	31	0,01	0,2	0,1	0,1	86	3	5	22	3	0,1	0,1	0,4	5	7	
	Median	19	0	14	0	0,1	0,1	0,1	73	2	3	1	1	0	0,1	0,3	3	4	
	Minimum	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Maximum	233	0,2	377	0,06	4,7	0,9	0,9	370	22	49	342	19	1,3	0,6	2	32	47	
	90. Perzentil	59	0,1	67	0,02	0,3	0,3	0,3	182	7	11	56	6	0,2	0,2	0,9	11	14	
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	178	0,3	354	0,19	11,7	1	1,1	275	19	52	823	19	5,1	0,8	6,4	16	51	
	Median	136	0,2	112	0,02	2,8	0,8	0,7	189	9	19	232	12	0,4	0,4	1,6	13	42	
	Minimum	19	0	15	0	0,1	0,1	0,1	13	0	3	0	1	0	0	0,2	2	5	
	Maximum	732	0,9	9845	19,46	380,9	2,9	7,2	2285	218	1226	38423	91	499,2	8,8	510,8	70	146	
	90. Perzentil	406	0,6	675	0,07	22,5	2,3	2,5	527	49	120	1453	42	2	1,5	4,5	34	113	
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	
	Mittelwert	133	0,2	201	0,02	6,1	0,9	1,1	109	16	36	273	21	0,7	0,9	2,3	11	47	
	Median	110	0,2	96	0,01	2,3	0,8	0,7	60	10	17	125	9	0,5	0,4	1,4	9	39	
	Minimum	2	0	3	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	2	
	Maximum	793	1,5	1419	0,28	100,2	5,8	11	1028	189	333	3319	190	3,9	16,4	59,4	58	290	
	90. Perzentil	234	0,4	473	0,05	13,3	1,8	2,4	201	35	72	550	57	1,4	1,2	3,4	19	88	

Sequenzielle Extraktion (mäßig reduzierbare Fraktion)		Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	S	P	
		kg/ha																	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	
	Mittelwert	14324	23,2	224	0,17	22,8	22,2	15,1	28163	50	132	1444	45	10,9	59,9	17,7	140	1720	
	Median	12825	14,1	173	0,08	12,6	13,7	11,2	24145	39	99	922	34	4,1	49,5	9,1	116	1095	
	Minimum	2134	3,5	40	0,01	0,4	1,3	1,6	4355	2	13	1	3	0,2	13,9	1	24	190	
	Maximum	52099	186	906	8,47	346	496,6	93,4	83097	303	1377	21460	271	461,8	232	573,3	450	12702	
	90.Perzentil	25633	54,7	419	0,22	39,9	40,5	26,1	50430	104	244	3258	100	13,2	106,6	30,7	270	3817	
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	1161	3	17	0,02	0,7	2,3	1,5	3165	4	17	67	3	0,7	11,4	1,5	24	148	
	Median	594	1,9	12	0,01	0,2	0,9	0,8	1782	2	7	23	1	0,2	8,2	0,9	13	68	
	Minimum	13	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
	Maximum	9567	19	94	0,18	10,3	27,5	16,4	17673	50	192	1029	24	17,9	41,6	9,8	214	1460	
	90.Perzentil	2640	7,3	43	0,04	1,4	6,1	2,9	8281	8	42	178	7	0,9	27,4	4	59	386	
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	9433	16,4	124	0,13	15,6	16,7	9,5	20999	29	80	1054	24	8,4	36,5	13,1	96	1030	
	Median	7370	7,4	84	0,04	6,6	8,3	5	16039	17	44	555	12	1,8	25,1	4,8	74	629	
	Minimum	779	0,3	10	0	0,1	0,7	1	1290	0	3	0	1	0	1,7	0,4	8	28	
	Maximum	44419	184	679	8,46	345,2	469,1	87,3	81868	161	1189	21386	220	461,1	192,4	572	439	7179	
	90.Perzentil	16695	43,8	261	0,14	30,9	34	17,9	41980	71	176	2200	56	9,4	78	22,1	209	2041	
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	
	Mittelwert	5314	5,7	115	0,04	9,1	4,8	6	7185	24	50	464	24	2,6	17,5	4,4	30	764	
	Median	3703	3,5	80	0,02	4,5	2,8	4,3	4701	16	26	280	12	1,4	10,6	2,8	23	291	
	Minimum	29	0	1	0	0,1	0	0,1	20	1	1	1	0	0	0,1	0,1	1	3	
	Maximum	33152	38,5	806	0,31	136	46,5	51,2	45198	272	370	4448	175	20,9	163,8	42,7	249	5984	
	90.Perzentil	9499	12,5	215	0,07	20,1	9,5	11,5	16993	48	109	1086	71	6,2	31,3	7,7	50	2040	

Sequenzielle Extraktion (oxidierbare Fraktion)		Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	S	P	
		kg/ha																	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	
	Mittelwert	6199	4,6	141	0,05	3,6	11,3	9,3	8827	826	586	155	75	6,4	4,1	20,8	40	201	
	Median	3544	2,3	119	0,01	1,8	4,8	6,9	5118	342	276	76	40	2,6	2,3	11	37	150	
	Minimum	541	0,3	3	0	0,2	0,5	1,3	405	28	34	2	2	0,2	0,4	1,1	7	23	
	Maximum	67091	52,1	682	1,91	47,2	148	63,3	64064	19787	10944	2356	1388	196,6	47,2	628,8	136	1316	
	90. Perzentil	12245	11,2	257	0,05	7,1	24,6	17	20761	1928	1091	370	117	9,8	7,8	36,1	67	348	
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	265	0,4	8	0	0,1	0,8	0,5	483	20	21	8	3	0,2	0,4	0,8	11	17	
	Median	145	0,2	5	0	0,1	0,3	0,4	231	9	12	3	1	0,1	0,2	0,5	7	10	
	Minimum	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Maximum	1869	2,8	38	0,01	1,4	15,2	4,7	4042	132	109	149	29	1,9	2,9	3,6	89	111	
	90. Perzentil	640	1	16	0,01	0,2	1,8	1,1	1263	49	57	19	7	0,4	1,1	1,7	24	45	
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	3918	3,4	83	0,04	2,3	7,8	5,5	6250	546	383	117	41	4,7	2,4	14,4	21	127	
	Median	1920	1,1	52	0,01	0,8	3	3	2814	159	144	52	18	1,2	1,1	5,5	18	85	
	Minimum	290	0,1	2	0	0,1	0,3	0,5	62	4	8	0	1	0,1	0,1	0,6	3	5	
	Maximum	56206	51,8	679	1,91	47,1	137,9	56,2	63886	19780	10938	2349	726	196,5	31,8	628,2	78	1311	
	90. Perzentil	8867	9,1	187	0,03	5,6	17	12,9	15647	1119	651	271	94	6,6	5,8	17,6	37	280	
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	
	Mittelwert	2839	1,2	70	0,02	1,6	3,8	4,6	2998	368	255	43	42	2,2	1,7	8	11	80	
	Median	1028	0,5	48	0,01	0,7	1,4	2,6	1144	98	80	20	15	1	0,7	3,9	9	50	
	Minimum	7	0	1	0	0	0	0,1	5	1	1	0	0	0	0	0	0	2	
	Maximum	51168	12,1	445	0,37	22,9	51,8	48	39348	5925	3953	526	1202	27,2	44,9	58,7	58	569	
	90. Perzentil	5733	3,2	150	0,02	3,4	8,4	8,2	6588	1148	586	108	70	3,9	2,9	17,7	21	143	

Sequenzielle Extraktion (Residualfraktion)		Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	S	P	
		kg/ha																	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	
	Mittelwert	139958	38	5445	0,4	43,2	226,9	94,8	166766	21817	31480	1136	748	162,3	115,6	446,8	213	1626	
	Median	115742	21,5	1949	0,22	32,4	132,2	59	132861	14386	24112	946	650	100,4	53	364	177	1171	
	Minimum	16201	2,1	250	0,01	1,6	9,6	4,1	9858	1053	850	75	54	6	7,7	36,5	31	149	
	Maximum	725115	272,8	118946	6,02	267,9	2041,3	457,4	1079477	169850	183858	5767	5135	1722,7	6381,5	2386,1	1345	14024	
	90.Perzentil	267685	83,4	12690	0,63	85	450,3	205,3	293801	42413	68519	2075	1253	308,9	108,4	763,5	381	3292	
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	7687	2,5	256	0,02	2	14,1	6,4	8546	936	1568	59	47	8,2	6,2	23,5	48	93	
	Median	3991	1,5	79	0,01	0,8	4,5	2,2	3878	423	588	23	30	2,6	3,7	12,7	27	51	
	Minimum	75	0,1	6	0	0	0,2	0,1	83	13	8	1	0	0	0,2	0,3	0	2	
	Maximum	111321	17,2	10279	0,28	18,9	251,1	231,2	170827	9934	20311	616	628	111,4	68,6	230,7	478	1064	
	90.Perzentil	20178	6,2	494	0,05	5	24,2	13,1	21066	2266	3971	143	96	21,2	12,2	62,7	114	185	
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	
	Mittelwert	80397	25,1	3083	0,27	25,4	136,1	54	93404	10750	17679	662	386	103,5	40,2	262,8	121	906	
	Median	54970	9,8	1020	0,11	14,8	66,3	32,5	59320	6398	9933	451	270	46,8	23,8	180,7	92	524	
	Minimum	3479	0,7	74	0	0,5	2,1	1,7	920	349	199	7	30	1,4	3	11	8	42	
	Maximum	368063	271,6	108667	5,99	189	1904,3	424,1	496674	52316	171009	3631	1648	1611,3	475,1	2054,4	867	9427	
	90.Perzentil	188487	57,7	5370	0,37	58,5	314,7	123,8	216833	30197	45604	1492	790	210	71,1	522,8	235	1519	
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	
	Mittelwert	72556	14,6	2944	0,16	22,1	107,8	48,2	90369	14058	17086	580	438	71,3	95,2	224,6	63	875	
	Median	43040	8,2	661	0,11	13,7	55,5	32,4	61800	6694	9742	366	324	43,8	22,6	160,7	38	530	
	Minimum	464	0,4	4	0	0,3	1,4	0,3	870	162	64	1	1	0,7	0,6	1,9	1	8	
	Maximum	651064	79,5	28707	1,38	235,9	1111,6	319,5	966996	153081	109584	4642	4674	905,6	5841,6	2133,9	578	6150	
	90.Perzentil	171171	39,2	9024	0,29	43,2	231,7	111,1	203280	34084	45131	1217	821	123,4	52,5	487	106	1911	

Aluminium		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	0,2	0,3	11,1	4,1	84,4
	Median	0,1	0,2	9,9	2,7	85,7
	Minimum	0	0	3,4	0,9	53,5
	Maximum	1,2	2,1	41,2	31,3	95
	90.Perzentil	0,4	0,5	19,5	8,4	93,3
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	0,7	0,5	13,8	3,4	81,6
	Median	0,4	0,4	12,3	3,1	83,3
	Minimum	0	0	3,9	0,9	48,7
	Maximum	20	4	44,9	12,4	94,9
	90.Perzentil	1,2	0,8	19,3	5	88,6
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	0,2	0,3	13,6	4,2	81,7
	Median	0,1	0,2	11,2	3,1	84,4
	Minimum	0	0	2,9	1,1	39,9
	Maximum	1,6	3,1	54	31,6	95,7
	90.Perzentil	0,5	0,6	24,2	8,1	92,1
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	0,1	0,3	9,3	3,4	87
	Median	0,1	0,2	7	2,2	88,5
	Minimum	0	0	2,4	0,3	41,7
	Maximum	1,6	1,4	53,6	20,2	97
	90.Perzentil	0,3	0,5	18,7	8	94,8

Arsen		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	2	1,2	37,2	6,3	53,2
	Median	1,7	1	37,2	5,8	52,3
	Minimum	0,2	0,1	8,1	1,9	24,4
	Maximum	5,5	5,1	69,8	22,9	88,1
	90.Perzentil	3,7	2,3	50,9	9,4	71
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	5,4	1,1	46,8	6,8	39,9
	Median	4,5	0,8	47,7	6,7	38,7
	Minimum	0,7	0,1	3,6	0,7	16,8
	Maximum	35,9	7,4	72,8	12,2	86
	90.Perzentil	9,3	2,4	62,1	9,6	55,1
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	1,7	1,1	39,5	6,5	51,2
	Median	1,5	1,1	40,2	5,9	51,5
	Minimum	0,1	0,1	6,1	2	17,6
	Maximum	5,2	3,3	70,4	43,9	90,5
	90.Perzentil	3,1	2,3	53,6	9,8	68,9
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	1,8	1,7	26,7	4,9	64,9
	Median	1,5	1,4	25,4	3,8	65,8
	Minimum	0,1	0,1	8,2	1,1	26,6
	Maximum	7,8	7,8	68,8	26,7	89,1
	90.Perzentil	3,4	3	41,4	7,7	81,4

Calcium		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	36,2	6,7	4,4	2,9	49,8
	Median	31	6,3	3,7	2,2	52,2
	Minimum	3,4	0,6	0,3	0,1	3,2
	Maximum	92,3	22,8	24,1	12,8	93,1
	90.Perzentil	73,2	12,5	8	6,6	79,3
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	35,6	8,6	6	2,8	46,9
	Median	33,2	8,1	5,9	2,7	49,2
	Minimum	4,9	1	0,7	0	3,5
	Maximum	89,5	23,3	22,2	8,2	91,2
	90.Perzentil	61	14,4	9,2	5,3	75,7
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	30,9	7,2	4,8	3,4	53,7
	Median	25,7	6,4	4,1	2,6	55,7
	Minimum	3,1	0,4	0,3	0,2	3,7
	Maximum	91	22,7	24,9	31,1	93,4
	90.Perzentil	61,8	14,3	8,2	6,8	81
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	34,7	6,1	4,2	2,9	52
	Median	29,8	5,1	3,9	2,1	55,1
	Minimum	2,3	0,5	0,2	0	1,8
	Maximum	95,7	25	24,1	11,1	93,4
	90.Perzentil	77,6	12,1	8	7,1	86,8

Cadmium		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	17,4	9,5	19	5,2	48,9
	Median	15,5	8,5	16,5	3,2	52,7
	Minimum	4,7	1,7	4,3	1,1	4,7
	Maximum	49,5	48,2	54	63,6	85
	90.Perzentil	30,6	14,3	31,1	7	66,6
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	26,6	11,6	26,4	3,6	31,8
	Median	25,3	11,3	25,2	2,6	32
	Minimum	5,4	0,8	7,1	0,8	2
	Maximum	60,9	23	56,7	67,3	68,5
	90.Perzentil	41,5	17	39,1	5	51,7
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	17,6	10	19,8	5	47,5
	Median	14,7	9,1	17,4	3,4	50
	Minimum	3,2	0,5	3,1	0,8	4
	Maximum	54,6	48,2	61,6	64,7	85,1
	90.Perzentil	30,7	16,8	32,2	7	68
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	13,8	8,3	15,1	5,8	57
	Median	10,9	7	14,3	3,3	61,5
	Minimum	2,5	1,9	3,1	0,8	6,1
	Maximum	47,1	25	60,3	61,8	84,8
	90.Perzentil	27,3	14,5	23,5	10	74,8

Kobalt		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	3	13,6	22,2	4,2	57,1
	Median	1,7	12,3	21,8	3,8	55,8
	Minimum	0,4	1,7	4,2	1,1	14,4
	Maximum	16,3	41,9	42,4	16	89,9
	90.Perzentil	6,8	24,3	35,7	7,1	78,9
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	5,8	6,2	18,9	6,3	62,8
	Median	4	4,1	18	5	66,5
	Minimum	0,9	1,1	2,6	0,9	20
	Maximum	20	22,3	41,5	20	89,7
	90.Perzentil	14,3	14,9	31,9	14,3	80,1
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	3	13	22,8	4,3	56,9
	Median	1,7	11,9	22,1	3,6	55,1
	Minimum	0,4	1,7	3,8	1,2	14,3
	Maximum	16,3	42	43,2	26,7	90
	90.Perzentil	6,7	24,3	35,4	7,1	78,2
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	2,9	13,6	21,5	4,1	57,9
	Median	1,5	10,8	21,5	3,4	57,8
	Minimum	0,4	0,8	2	0,7	16,8
	Maximum	20	40,5	42,9	17,6	91,7
	90.Perzentil	6,7	26,7	36,5	7,2	79,9

Chrom		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	1,4	1,3	8,9	4,4	84
	Median	0,9	0,8	8,4	3,6	85,1
	Minimum	0,1	0,1	1,3	0,9	58,1
	Maximum	7,4	7,4	24,1	26,3	96,1
	90.Perzentil	3,1	3,1	14,9	7,4	91,9
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	2,7	2,4	13,8	5,8	75,2
	Median	1,7	1,3	13,1	5,5	76,6
	Minimum	0,3	0,2	3,4	1,6	46,7
	Maximum	13,3	13,3	28,9	13,3	93,7
	90.Perzentil	5,7	5,7	20,4	9,1	85,3
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	1,3	1,3	11,4	4,6	81,3
	Median	0,9	0,8	9,7	3,8	83,6
	Minimum	0,1	0,1	1,4	0,7	46,6
	Maximum	6,7	6,7	35,5	32,8	97,5
	90.Perzentil	3,2	3,2	20,4	7,8	90,9
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	1,6	1,6	5,8	3,4	87,7
	Median	1,1	1,1	4,4	2,4	89,3
	Minimum	0,1	0,1	0,6	0,3	58,1
	Maximum	10,5	10,5	20,7	19,3	98
	90.Perzentil	3,6	3,6	10,5	7,1	95,3

Kupfer		austauschbare Fraktion	leicht reduzier- bare Fraktion	mäßig reduzier- bare Fraktion %	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)						
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	4,2	2,3	13,5	9	70,9
	Median	3,1	1,6	11,6	6,9	74,3
	Minimum	0,5	0,3	4,5	1,3	22,4
	Maximum	17,8	9,5	45,3	53	92,9
	90.Perzentil	8,9	4,9	22,7	16,9	87,6
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	8,3	2,9	22,3	9,3	57,3
	Median	7,1	2,4	21,2	8,1	58,2
	Minimum	0,9	0,3	5,6	1,8	7,1
	Maximum	29,6	11,7	53,8	29	90,6
	90.Perzentil	14,9	5,2	34,8	17,9	78,6
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	4,8	2,4	13,7	9,4	69,6
	Median	3,6	1,5	11,9	7,4	73,8
	Minimum	0,4	0,2	2	1,2	4,1
	Maximum	19,9	10,8	45,8	91,5	92
	90.Perzentil	10,3	5,2	22,9	17,5	87,1
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	3,6	2,5	11,5	8,8	73,6
	Median	2,5	1,9	10,3	7,4	76,3
	Minimum	0,4	0,2	1,7	0,6	18
	Maximum	15,6	9,4	28,9	31	95,4
	90.Perzentil	7,5	5,2	20,8	17,3	90,3

Eisen		austauschbare Fraktion	leicht reduzier- bare Fraktion	mäßig reduzier- bare Fraktion %	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)						
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	0,1	0,3	16,7	4,2	78,8
	Median	0	0,2	15,4	3,2	80,3
	Minimum	0	0,1	2,9	0,9	51,9
	Maximum	0,3	1,7	40,7	15,4	95,5
	90.Perzentil	0,1	0,6	28,4	7,5	89,5
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	0,4	1,3	29	3,9	65,3
	Median	0,3	1,1	27,7	3,7	66,8
	Minimum	0	0,1	4,8	0,6	35,1
	Maximum	5,2	4,5	55,5	8,4	93,3
	90.Perzentil	0,8	2,3	42,4	6,2	78,2
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	0,1	0,4	20,9	4,7	74
	Median	0	0,2	18,9	3,8	75,9
	Minimum	0	0	3,8	0,1	34
	Maximum	1,2	3,2	58,2	27,6	95,1
	90.Perzentil	0,2	0,8	35,5	8,8	86,5
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	0	0,1	9,2	2,9	87,7
	Median	0	0,1	7,3	2,2	89,5
	Minimum	0	0	0,9	0,2	55
	Maximum	0,5	0,8	42,5	16,7	98,9
	90.Perzentil	0,1	0,3	16,5	6,3	96,1

Kalium		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	3,9	0,2	0,4	4	91,5
	Median	3,3	0,2	0,2	2,2	93,3
	Minimum	0,5	0	0	0,2	57,5
	Maximum	16,5	2,3	4,6	37,9	98,9
	90.Perzentil	7,3	0,4	0,6	9,9	97,8
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	9,4	0,6	0,6	2,7	86,7
	Median	6,4	0,4	0,4	1,9	89,9
	Minimum	0,6	0	0	0	45
	Maximum	47,2	5	5,5	13,7	98,6
	90.Perzentil	20,2	1,2	1	6,1	95,7
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	3,9	0,2	0,4	4,2	91,2
	Median	3,5	0,1	0,2	2,8	92,6
	Minimum	0,8	0	0	0,1	57,4
	Maximum	16,5	2,4	3,9	38,1	98,7
	90.Perzentil	7,7	0,4	0,9	10,1	97,7
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	3,8	0,2	0,3	3,4	92,3
	Median	2,7	0,1	0,2	1,6	94,4
	Minimum	0,3	0	0	0	70,1
	Maximum	20,5	0,6	6,1	23,7	99,2
	90.Perzentil	7,3	0,4	0,7	9,6	98,5

Magnesium		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	3,6	0,4	0,6	2,6	92,9
	Median	1,5	0,2	0,4	1,2	96,6
	Minimum	0,1	0	0,1	0,2	47,4
	Maximum	26,9	6,5	8,1	29,4	99,4
	90.Perzentil	8,8	0,8	0,9	6,7	98,5
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	6,5	1	1,7	2,3	88,5
	Median	3,1	0,5	1,1	1,6	93,4
	Minimum	0,4	0,1	0,3	0,4	16,6
	Maximum	56,4	8,1	10,5	9,8	98,7
	90.Perzentil	16,1	2,7	3,4	5	96,2
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	2,7	0,4	0,6	2,7	93,6
	Median	1	0,2	0,4	1,5	96,7
	Minimum	0,1	0	0,1	0,1	63,9
	Maximum	22,2	4,6	4,7	29,6	99,4
	90.Perzentil	7,1	0,9	1,1	6,4	98,5
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	3,6	0,4	0,5	2,1	93,3
	Median	1,1	0,1	0,2	0,8	97,5
	Minimum	0,1	0	0,1	0,1	31,3
	Maximum	38,5	8,3	11,5	18,1	99,6
	90.Perzentil	9,7	0,8	0,9	6,5	99,1

Mangan		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	6,2	16,7	34,2	3,7	39,1
	Median	4,4	16,8	36	3,4	34,9
	Minimum	0,3	1,2	0,1	0,7	4,9
	Maximum	24,6	57,4	59,3	14,7	88,9
	90.Perzentil	14,2	26,7	46,7	6,5	64,7
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	9,8	6,3	35	4,8	44,2
	Median	6,8	3,8	37,3	3,9	41,5
	Minimum	0,5	0,2	0,1	0,2	7,8
	Maximum	60,1	33,6	76,2	17,1	98,1
	90.Perzentil	18,6	18,1	54,7	8,4	70,5
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	6,2	16,3	35,9	4,1	37,5
	Median	4,3	15,6	37,8	3,5	33
	Minimum	0,3	1	0	0,6	4,8
	Maximum	24,8	57,5	62,9	16,1	89,4
	90.Perzentil	14,3	28,8	49,6	7,3	70,1
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	5,6	16,3	30,1	3	45
	Median	3,5	15,8	30,4	2,4	44,1
	Minimum	0,2	0,3	1	0,2	9,8
	Maximum	32,3	49,7	59,3	15,8	92,7
	90.Perzentil	13,4	28,6	44,2	5,5	71,5

Natrium		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	19,1	3,5	4,1	6,4	66,9
	Median	16,6	3,1	3,2	4,8	68,9
	Minimum	5,2	0,6	0,6	0,5	25,1
	Maximum	51,7	13,7	28,5	41,3	84,9
	90.Perzentil	31,1	6,2	7	13	80,5
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	22,4	4,3	4,5	5	63,8
	Median	21,9	4	3,7	4,1	65,5
	Minimum	1,1	0,5	0,7	0,6	3,2
	Maximum	55,7	19,5	22,5	20	95,6
	90.Perzentil	38	7,6	9	9,8	81,2
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	18,6	3,3	4,2	6,7	67,2
	Median	15,3	2,9	3	5	69,1
	Minimum	1	0,4	0,4	0,4	25,5
	Maximum	52,3	13,7	41,1	47,1	96,2
	90.Perzentil	32,8	5,7	7,7	13,1	82,6
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	17,8	3,5	3,9	6,3	68,5
	Median	15,4	2,6	2,9	4,5	69,2
	Minimum	0,5	0,4	0,9	0,4	15,4
	Maximum	50,3	15,4	14,7	44,3	95,2
	90.Perzentil	30,9	6,8	7,3	14,4	85,5

Nickel		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	2,2	1,5	4,7	3,3	88,2
	Median	1,2	1	3,8	2,4	90,3
	Minimum	0,2	0,2	0,7	0,8	37,2
	Maximum	17,7	26,5	24,5	17,3	97,3
	90.Perzentil	5,3	2,9	7,8	6,1	95,1
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	3,3	2,5	9,9	3,6	80,7
	Median	1,6	1,3	7,1	2,6	86,1
	Minimum	0,3	0,3	0,8	0,7	16,7
	Maximum	38,5	16,7	44,6	16,7	96,9
	90.Perzentil	7,7	6,7	19,9	7,1	92,8
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	2,3	1,5	4,5	3,6	88,2
	Median	1,2	0,9	3,5	2,6	90,8
	Minimum	0,2	0,2	0,2	0,3	37,1
	Maximum	28,2	26,6	24,5	54,5	99
	90.Perzentil	3,9	2,8	7,9	6	95,4
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	2,2	1,5	4,4	3,2	88,7
	Median	1,1	1,1	3,6	2,3	91,3
	Minimum	0,2	0,2	0,6	0,4	50
	Maximum	12,5	12,5	27	17,6	97,6
	90.Perzentil	6,9	3,3	8,1	6,7	95,7

Blei		austauschbare Fraktion	leicht reduzierbare Fraktion	mäßig reduzierbare Fraktion	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)				%		
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	1,4	1,1	46,4	2,6	48,5
	Median	1,1	0,8	46,7	2,2	46,8
	Minimum	0,2	0	1,4	0,7	25,7
	Maximum	8,9	3,7	70,6	9,6	97,6
	90.Perzentil	2,6	2,1	61,4	4,1	64,5
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	3	0,6	63,2	2,3	30,9
	Median	2,7	0,4	65,8	1,9	29,1
	Minimum	0,2	0,1	2,7	0,3	10,6
	Maximum	19	3,8	82,3	9,6	90
	90.Perzentil	5,2	1	73	3,9	42
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	1,2	1	48	2,6	47,2
	Median	0,9	0,8	48,7	2,3	46,4
	Minimum	0,2	0,2	7,9	0,4	18,2
	Maximum	7,4	4,3	79,4	14,2	90,4
	90.Perzentil	2,2	1,8	62,5	4,1	63,2
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	1,4	1,5	33	2,4	61,6
	Median	1	1,1	33	2	60,9
	Minimum	0,2	0	0,7	0,5	34,9
	Maximum	10,3	5,3	61,5	8,7	98,4
	90.Perzentil	2,8	3	48,4	4,4	79,3

Zink		austauschbare Fraktion	leicht reduzier- bare Fraktion	mäßig reduzier- bare Fraktion %	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)						
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	1	1,3	3,5	4,2	90
	Median	0,6	0,8	2,6	2,6	92
	Minimum	0,2	0,3	0,3	0,7	54,3
	Maximum	6,7	13,4	17,9	25,5	97,7
	90.Perzentil	2,2	2,3	6,8	8	96,1
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	2,4	2,3	8,1	4,5	82,7
	Median	1,5	1,6	7	3,4	85,6
	Minimum	0,2	0,3	0,5	0,3	42,3
	Maximum	16,1	12	30,9	15,9	98,6
	90.Perzentil	4,8	4,9	14,1	10,1	92,7
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	1,2	1,2	3,8	4,4	89,4
	Median	0,6	0,7	2,9	3	91,6
	Minimum	0,2	0,3	0,3	0,8	38,6
	Maximum	27,2	13,5	18,1	55,6	97,7
	90.Perzentil	2	2,6	8	8,5	96,4
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	1	1,4	2,8	4,1	90,8
	Median	0,5	0,6	1,8	2,3	93,4
	Minimum	0,2	0,2	0,3	0,4	55,4
	Maximum	7,7	22,6	24,3	28,1	98,4
	90.Perzentil	2,2	2,7	6,1	8	97,6

Schwefel		austauschbare Fraktion	leicht reduzier- bare Fraktion	mäßig reduzier- bare Fraktion %	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
(Sequenzielle Extraktion)						
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	49,4	4	16,5	5,5	24,6
	Median	51	3,4	15	5,3	23,2
	Minimum	9,2	1	6,1	1,6	6,1
	Maximum	79,3	10,4	42,7	11,4	60,8
	90.Perzentil	68,3	6,6	24,4	9	36,8
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	25,1	5,3	18,4	11,1	40,1
	Median	23,1	4,8	18,9	11	39,4
	Minimum	1	2	5,5	3,5	20
	Maximum	54,2	20	38,9	22,7	64,1
	90.Perzentil	36,5	7,4	25,2	15,3	52,8
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	50,7	3,4	18,2	4,7	22,9
	Median	51,2	3	16,4	4,2	22,5
	Minimum	7,9	0,7	6,7	0,8	4,3
	Maximum	83,3	10,7	60,8	10,7	60,2
	90.Perzentil	72,2	6,1	27,4	8,4	35,6
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	53,6	4,9	13,6	5,2	22,6
	Median	54,2	4	10	4,5	18,9
	Minimum	18,3	0,9	2,7	0,8	6,3
	Maximum	82,5	14,3	57,6	14,3	75,6
	90.Perzentil	72	9,5	23,1	9,6	38,9

Phosphor (Sequenzielle Extraktion)		austauschbare Fraktion	leicht reduzier- bare Fraktion	mäßig reduzier- bare Fraktion %	oxidierbare Fraktion	Residualfraktion
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	124	124	124	124	124
	Mittelwert	3,7	3,6	44,6	6,1	42
	Median	3	2,9	46	5,5	38,8
	Minimum	0,5	0,5	5,4	2,1	10,6
	Maximum	15,6	15,6	74,9	15,6	88
	90.Perzentil	7,6	7,6	67,4	9,4	64,7
Oberboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	5,3	4,3	47,1	7,3	35,9
	Median	4,3	2,8	46,9	6,8	34,1
	Minimum	0,9	0,6	13,9	2,9	9,3
	Maximum	19,9	19,9	83,2	19,9	76
	90.Perzentil	8,8	8,4	66,3	9,4	52,5
Unterboden	Anzahl	122	122	122	122	122
	Mittelwert	3,5	3,4	48	6,2	38,9
	Median	2,9	2,9	48,9	5,8	36,6
	Minimum	0,5	0,5	5	2,4	12,5
	Maximum	14,1	14,1	78,9	14,5	88,1
	90.Perzentil	6,1	6,1	71,6	9,5	59,2
Ausgangs- substrat	Anzahl	91	91	91	91	91
	Mittelwert	4,4	4,4	36,6	5,5	49
	Median	2,7	2,7	32,8	4,1	47,1
	Minimum	0,3	0,3	4,8	1,2	9,7
	Maximum	18	18	83,2	18	87,7
	90.Perzentil	11,3	11,3	67,4	11,7	74,9

6.6 Oxalat- und dithionitlösliche Metalle

Oxalat- und dithionit- lösliche Metalle		Aldit	Fedit	Mndit	Alox	Feox	Mnox
		kg/ha					
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	154	154	154	154	154	154
	Mittelwert	18257	93678	2480	15479	18709	1485
	Median	15111	72406	1534	13190	14331	743
	Minimum	949	6615	0	1426	858	0
	Maximum	66526	634029	44346	62248	57702	37505
	90.Perzentil	33501	181763	6069	26601	36960	3441
Oberboden	Anzahl	152	152	151	152	152	152
	Mittelwert	1509	6841	134	1232	2133	69,8
	Median	744	3621	35,9	607	1392	13,9
	Minimum	0	112	0	17	26	0
	Maximum	18789	113932	2153,3	7767	14909	1228,6
	90.Perzentil	3789	16010	362,3	3073	4991	236,7
Unterboden	Anzahl	149	149	148	149	149	149
	Mittelwert	11449	56534	1732	9598	13019	1095,3
	Median	8436	36712	874	7576	8953	382,4
	Minimum	495	2239	0	618	290	0
	Maximum	62023	438311	44191	32100	52265	37443,9
	90.Perzentil	24771	139724	4750	18993	29174	1908,3
Ausgangs- substrat	Anzahl	117	118	118	118	118	118
	Mittelwert	7519	42082	893	6522	5242	465
	Median	4296	26038	406	3959	3406	221
	Minimum	0	522	0	49	32	0
	Maximum	53677	560004	14157	36169	35304	4456
	90.Perzentil	16919	95291	1892	14855	11467	1041

6.7 Elementar-Analytik

Elementar-Analytik		C	C _{org}	N	S
		[%]			
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	156	129	156	150
	Mittelwert	2,1	2	0,07	0,004
	Median	1,2	1,2	0,03	0,002
	Minimum	0,2	0,3	0	0
	Maximum	24,8	24,8	0,74	0,092
	90.Perzentil	4,2	4	0,19	0,008
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	156	129	156	150
	Mittelwert	1,5	1,4	0,05	0,002
	Median	0,8	0,8	0,01	0
	Minimum	0,1	0,1	0	0
	Maximum	24,8	24,8	0,74	0,092
	90.Perzentil	3,3	3	0,15	0
Auflage	Anzahl	156	129	156	150
	Mittelwert	41,9	42,8	1,68	0,186
	Median	43	44,5	1,69	0,2
	Minimum	18,3	18,3	0,69	0
	Maximum	60,2	60,2	2,4	0,43
	90.Perzentil	49,2	49,7	2	0,26
Oberboden	Anzahl	153	126	153	146
	Mittelwert	5,2	5,2	0,23	0,002
	Median	4,3	4,4	0,21	0
	Minimum	0,5	0,5	0	0
	Maximum	18,3	18,3	0,98	0,12
	90.Perzentil	10,6	10,3	0,54	0
Unterboden	Anzahl	150	124	147	144
	Mittelwert	1,3	1,2	0,04	0,001
	Median	0,9	0,9	0	0
	Minimum	0	0	0	0
	Maximum	5,8	5,3	0,34	0,105
	90.Perzentil	3	2,6	0,14	0
Ausgangs- substrat	Anzahl	118	92	119	113
	Mittelwert	0,8	0,5	0,02	0,001
	Median	0,2	0,2	0	0
	Minimum	0	0	0	0
	Maximum	11,6	5,9	0,31	0,104
	90.Perzentil	1,3	1,2	0,05	0

6.8 Königswasser-Extrakt

Königswasser-Extrakt		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	Tl	V	Zn	
		kg/ha															
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	
	Mittelwert	80	0,8	135	351	129	0,5	2	253	263	3,2	1,2	9,3	2,6	462	694	
	Median	52	0	101	228	95	0,4	0,2	165	161	1,4	0,5	1,7	1,5	363	570	
	Minimum	3	0	2	14	0	0	0	7	12	0	0	0	0	32	3	
	Maximum	679	50,3	1099	3050	884	9,3	28,1	2833	9800	62,6	6,7	104,6	78,1	1943	6640	
	90.Perzentil	171	1,1	240	683	308	0,9	5,9	469	337	7,8	3,2	30,7	5,6	892	1225	
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	133	
	Mittelwert	79	0,7	135	350	127	0,5	1,9	252	249	3	1	8,8	2,6	460	687	
	Median	52	0	101	227	94	0,3	0	163	148	1,2	0,4	1,1	1,5	357	564	
	Minimum	2	0	1	12	0	0	0	5	6	0	0	0	0	31	0	
	Maximum	678	50,2	1098	3043	879	9,2	28	2830	9783	62,3	6,5	102,9	77,9	1940	6628	
	90.Perzentil	168	1	240	682	306	0,8	5,8	468	327	7,5	3	29,7	5,5	891	1219	
Auflage	Anzahl	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	133	
	Mittelwert	1	0	0	2	2	0,1	0,1	1	14	0,2	0,2	0,5	0	2	7	
	Median	1	0	0	1	2	0	0,1	1	12	0,1	0,1	0,4	0	2	6	
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Maximum	12	0,4	5	12	28	0,3	1,1	11	66	3,7	3,7	2,4	0,2	15	39	
	90.Perzentil	2	0,1	1	3	3	0,1	0,2	2	27	0,3	0,3	1,1	0	5	12	
Oberboden	Anzahl	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	130	
	Mittelwert	7	0,1	6	24	8	0,1	0,3	13	27	0,4	0,2	1,2	0,1	32	39	
	Median	4	0	3	9	0	0	0	5	18	0,2	0,1	0,4	0,1	16	22	
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	Maximum	39	1,8	54	312	282	0,3	14,9	145	194	3,5	2,6	13,4	1	442	301	
	90.Perzentil	17	0,1	15	46	18	0,2	0,5	38	61	1,1	0,6	3,8	0,4	71	111	
Unterboden	Anzahl	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	128	
	Mittelwert	55	0,6	88	221	79	0,3	1,2	170	112	1,7	0,6	4,9	1,7	281	429	
	Median	26	0	55	127	41	0,2	0	75	70	0,6	0	0	0,6	187	277	
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	9	0	
	Maximum	673	50,2	1093	2847	878	2,5	23,9	2819	944	19,4	4,1	89,5	77,2	1517	6596	
	90.Perzentil	134	0,6	198	527	197	0,6	3,9	337	227	4,7	1,5	15,6	2,6	670	832	
Ausgangs- substrat	Anzahl	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	96	97	97	97	96	
	Mittelwert	27	0,2	60	157	60	0,2	0,7	103	158	1,3	0,3	4	1,2	218	325	
	Median	19	0	39	88	37	0	0	63	45	0	0	0	0,7	116	255	
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0	
	Maximum	144	3,5	511	1084	340	8,6	11,9	888	8645	49,2	5,2	30,4	14,1	1625	2720	
	90.Perzentil	58	0,4	131	368	164	0,3	2,1	215	140	3	1,1	15,2	2,8	501	700	

6.9 Ammoniumnitrat-Extrakt

Ammoniumnitrat-Extrakt		As	Cd	Co	Cr	Cu g/ha	Mo	Ni	Pb	Zn
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	129	129	129	129	129	129	129	129	129
	Mittelwert	58	142	1673	69	1092	4	3186	7329	6761
	Median	27	85	718	0	0	0	317	3861	4602
	Minimum	0	5	0	0	0	0	0	0	0
	Maximum	791	3031	16483	2146	55670	428	72372	244451	58139
	90.Perzentil	117	192	4827	173	1809	0	8586	11611	12349
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	129	129	129	129	129	129	129	129	129
	Mittelwert	39	128	1646	69	1085	4	3111	7024	5416
	Median	13	68	671	0	0	0	245	3604	3259
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Maximum	791	2998	16395	2146	55670	428	72322	244354	55589
	90.Perzentil	76	175	4795	173	1809	0	8531	11238	11550
Auflage	Anzahl	129	129	129	129	129	129	129	129	129
	Mittelwert	25	16	33	0	7	0	78	319	1464
	Median	12	12	16	0	0	0	64	194	1250
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Maximum	731	240	754	13	597	0	702	1824	15470
	90.Perzentil	55	25	45	0	0	0	169	777	2526
Oberboden	Anzahl	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	Mittelwert	18	18	146	15	13	0	217	1312	1202
	Median	10	10	43	0	0	0	83	872	734
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Maximum	117	144	2570	360	444	0	8957	6094	10477
	90.Perzentil	53	40	338	38	25	0	267	3402	2373
Unterboden	Anzahl	124	124	124	124	124	124	124	124	124
	Mittelwert	11	93	1286	47	954	4	2494	3222	3757
	Median	0	38	436	0	0	0	0	1474	1707
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Maximum	340	2985	16123	1867	55670	428	63366	40515	54489
	90.Perzentil	29	127	3435	108	1477	0	5667	8148	9489
Ausgangs- substrat	Anzahl	92	92	92	92	92	92	92	92	92
	Mittelwert	7	27	368	13	218	1	699	3690	717
	Median	0	15	77	0	0	0	0	648	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Maximum	290	280	5521	1074	4786	75	25734	200751	11458
	90.Perzentil	0	67	760	0	487	0	1086	3959	2081

6.10 pH CaCl₂

pH CaCl ₂		pH
Bodenprofil (Gesamt)	Anzahl	156
	Mittelwert	4,01
	Median	3,92
	Minimum	3,16
	Maximum	7,45
	90.Perzentil	4,24
Bodenprofil (ohne Auflage)	Anzahl	156
	Mittelwert	4,05
	Median	3,97
	Minimum	3,19
	Maximum	7,49
	90.Perzentil	4,29
Auflage	Anzahl	156
	Mittelwert	3,3
	Median	3,15
	Minimum	2,61
	Maximum	6,24
	90.Perzentil	3,9
Oberboden	Anzahl	153
	Mittelwert	3,49
	Median	3,34
	Minimum	2,86
	Maximum	7,23
	90.Perzentil	3,92
Unterboden	Anzahl	150
	Mittelwert	4,05
	Median	4,04
	Minimum	3,17
	Maximum	7,3
	90.Perzentil	4,37
Ausgangs- substrat	Anzahl	119
	Mittelwert	4,34
	Median	4,15
	Minimum	3,51
	Maximum	7,57
	90.Perzentil	4,64

