

Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg  
Institut für Forstökologie und Walderfassung  
Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde

FH Eberswalde  
Fachbereich Forstwirtschaft  
Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde

# Integrierende Auswertung bundesweiter Waldzustandsdaten

von  
N. Wellbrock\*, W. Riek\* und B. Wolff\*\*

gemeinsamer Arbeitsbericht 2002/1:

\* FHE, Fachbereich Forstwirtschaft  
\*\* Institut für Forstökologie und Walderfassung

**Abschlussbericht** zum Projekt:  
"Analyse des Beziehungsgefüges zwischen Waldzustandskenngößen und natürlichen sowie anthropogenen Stressfaktoren auf der Basis bundesweiter Inventurdaten zu Ableitung von Massnahmeempfehlungen"  
(Projektphase II)

Eberswalde, Januar 2002

# INHALTSVERZEICHNIS

## 1 ZIELE UND AUFGABENSTELLUNG DES PROJEKTES

..... FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

1.1	PROBLEMSTELLUNG.....	1
1.2	GESAMTKONZEPTION UND ZEITPLAN.....	1

## 2 MATERIAL UND METHODEN ..... 2

2.1	UNTERSUCHUNGSSTANDORTE.....	2
2.2	ATMOSPHERISCHE DEPOSITION.....	3
2.2.1	<i>Quellen der atmosphärischen Stoffeinträge.....</i>	3
2.2.2	<i>Erfassung der atmosphärischen Stoffeinträge.....</i>	3
2.2.3	<i>Seesalzkorrektur.....</i>	4
2.2.4	<i>Bestimmung der Gesamtsäuredeposition.....</i>	4
2.2.5	<i>Datenqualität.....</i>	4
2.2.6	<i>Aktuelle Datenlage Level I.....</i>	4
2.2.7	<i>Aktuelle Datenlage Level II.....</i>	5
2.3	KLIMADATEN.....	5
2.4	STATISTISCHE METHODEN.....	6
2.4.1	<i>Multivariate Verfahren.....</i>	6
2.4.2	<i>Erstellung von Kreuztabellen.....</i>	9

## 3 AUSWERTUNG DER DEPOSITIONSDATEN ..... 9

3.1	RÄUMLICHE UND ZEITLICHE MUSTER DES DEPOSITIONSGESCHEHENS.....	9
3.1.1	<i>Großräumige Depositionsmuster.....</i>	9
3.1.2	<i>Beziehungsgefüge der Depositionsdaten (Faktorenanalyse).....</i>	11
3.1.2.1	<i>Beziehungsgefüge der Gesamtdeposition (nicht seesalzkorrigiert) des Jahres 1989.....</i>	11
3.1.2.2	<i>Beziehungsgefüge der Gesamtdeposition (seesalzkorrigiert) des Jahres 1989.....</i>	13
3.1.2.3	<i>Beziehungsgefüge der Trocken Deposition (nicht seesalzkorrigiert) des Jahres 1989.....</i>	14
3.1.2.4	<i>Beziehungsgefüge der Nassen Deposition (nicht seesalzkorrigiert) des Jahres 1989.....</i>	15
3.1.2.5	<i>Beziehungsgefüge der Gesamtdeposition (nicht seesalzkorrigiert) des Jahres 1993.....</i>	16
3.1.2.6	<i>Beziehungsgefüge der Gesamtdeposition (nicht seesalzkorrigiert) des Jahres 1995.....</i>	18
3.1.3	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse der Faktorenanalyse.....</i>	20
3.2	ABLEITUNG VON DEPOSITIONSTYPEN DER GESAMTDEPOSITION DES JAHRES 1989 (CLUSTERANALYSE).....	20
3.2.1	<i>Zeitliche Dynamik des Depositionsgeschehens von 1989 bis 1995.....</i>	23
3.2.1.1	<i>Veränderung der mittleren Eintragsraten von 1989 bis 1995.....</i>	23
3.2.1.2	<i>Veränderungen des Depositionsgeschehens (Faktorenanalyse).....</i>	24
3.2.1.3	<i>Zuordnung zu Depositionstypen von 1989 bis 1995 mittels Diskriminanzanalyse.....</i>	25
3.3	BEZIEHUNG ZWISCHEN ERNÄHRUNGSZUSTAND UND ATMOSPHERISCHER DEPOSITION.....	26
3.4	BEZIEHUNG ZWISCHEN ERNÄHRUNGSTYP UND DEPOSITIONSTYP.....	34
3.5	BEZIEHUNG ZWISCHEN BODENZUSTAND UND ATMOSPHERISCHER DEPOSITION.....	39
3.6	BEZIEHUNG ZWISCHEN KRONENZUSTAND UND ATMOSPHERISCHER DEPOSITION.....	42
3.7	BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEPOSITIONSGESCHEHEN, BODEN-, ERNÄHRUNGSZUSTAND ZUM KRONENZUSTAND.....	45
3.7.1	<i>Schrittweise Regressionsanalyse aller Faktorenwerte.....</i>	45
3.7.2	<i>Nicht lineare Regressionsanalyse der Depositionsraten.....</i>	49
3.7.3	<i>Zusammenfassung der Regressionsergebnisse.....</i>	50
3.7.4	<i>Unterschiede zwischen beobachteten und berechneten Kronenzustandsdaten.....</i>	51

## 4 AUSWERTUNG DER KLIMADATEN ..... 57

4.1	BEZIEHUNG ZWISCHEN KRONENZUSTAND UND KLIMAPARAMETERN MITTELS NICHTLINEARER REGRESSIONSANALYSE.....	57
4.1.1	<i>Ableitung wichtiger Indikatoren für Trockenstress.....</i>	58

<b>5</b>	<b>ABLEITUNG VON WALDZUSTANDSTYPEN .....</b>	<b>58</b>
5.1	ANSATZ 1: VERSCHNEIDUNG VON ZUSTANDSTYPEN MITTELS DISKRIMINANZANALYSE.....	59
5.1.1	<i>Einleitung</i> .....	59
5.1.2	<i>Verfahren zur Ableitung</i> .....	61
5.1.2.1	Bewertung von Clustern bezüglich ihrer Gefährdungspotentiale .....	61
5.1.2.2	Ermittlung von Diskriminanzfunktionen zur Abschätzung des abiotischen Risikos .....	62
5.1.2.3	Ermittlung einer Trockenstressfunktion (Funktion 5) .....	63
5.1.2.4	Ermittlung einer Funktion für Standorte mit Trockenstress und depositionsbedingtem Stress (Funktion 4) .....	63
5.1.2.5	Ermittlung einer Funktion für Standorte mit Trockenstress und bodenzustandsbedingtem Stress (Funktion 3) .....	63
5.1.2.6	Ermittlung einer Funktion für Standorte ohne Trockenstress aber depositionsbedingtem Stress (Funktion 2) .....	64
5.1.2.7	Ermittlung einer Funktion für Standorte ohne Trockenstress aber bodenzustandsbedingtem Stress (Funktion 1).....	64
5.1.2.8	Räumliche Darstellung der Diskriminanzwerte.....	64
5.1.3	<i>Auswahlverfahren von Extremstandorten</i> .....	66
5.1.4	<i>Zuordnung zu Waldzustandstypen</i> .....	70
5.1.4.1	Berechnung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu abiotischen Waldzustandstypen anhand logistischer Modelle. ....	70
5.1.4.2	Verknüpfung von abiotischen Waldzustandstypen mit der biotischer Reaktion von Beständen.....	71
5.1.5	<i>Berechnung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten für die biotischen Waldzustandstypen</i> .....	72
5.1.6	<i>Charakteristika der Waldzustandstypen</i> .....	75
5.1.7	<i>Beziehungsgefüge auf Grundlage der Waldzustandstypen</i> .....	80
5.1.8	<i>Auswertungsmöglichkeiten anhand von Waldzustandstypen</i> .....	82
5.1.8.1	Klassifizierung von Waldökosystemen anhand von abiotischen Risikofaktoren.....	82
5.1.8.2	Risiko von Vitalitätsverlusten aufgrund von atmosphärischen Einträgen.....	82
5.1.9	<i>Schlüssel zur Ableitung von Waldzustandstypen</i> .....	84
5.1.10	<i>Berechnung von Waldzustandstypen anhand von Beispielen</i> .....	86
5.2	ANSATZ 2: VERSCHNEIDUNG VON BERECHNETEN SCHAD24-WERTEN ZU WALDZUSTANDSTYPEN.....	89
5.2.1	<i>Charakterisierung der Waldzustandstypen (2. Ansatz) der Baumart Fichte</i> .....	90
5.2.2	<i>Charakterisierung der Waldzustandstypen (2. Ansatz) der Baumart Kiefer</i> .....	93
5.3	BEWERTUNG DER ANSÄTZE ZUR ABLEITUNG VON WALDZUSTANDSTYPEN.....	95
<b>6</b>	<b>EINORDNUNG VON LEVEL II-STANDORTEN AM BEISPIEL DER ATMOSPHERISCHEN DEPOSITION.....</b>	<b>96</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>100</b>
<b>8</b>	<b>AUSBLICK.....</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>105</b>

## 1 Ziele und Aufgabenstellung des Projektes

### Problemstellung

Grundlage und Ausgangspunkt für das Projekt „Integrierende Auswertung“ bundesweiter Waldzustandsdaten bildet die Datenbasis der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE). Im Rahmen dieser Inventur wurden von den forstlichen Forschungseinrichtungen der Bundesländer umfangreiche Analysen zum Boden-, Ernährungs- und Kronenzustand an insgesamt 1800 Erhebungspunkten einer über die gesamte Waldfläche Deutschlands verteilten repräsentativen Rasterstichprobe durchgeführt. Eine erste bundesweite Auswertung dieser Daten findet sich im *Deutschen Waldbodenbericht 1996* (Wolff und Riek 1997). In diesem Inventurbericht erfolgt die vollständige, aber weitgehend isolierte Darstellung und Bewertung aller bundesweit erhobenen Parameter primär unter häufigkeitsstatistischen Aspekten und mit Hilfe visueller Interpretation räumlicher Muster. Darauf aufbauend strebt das Projekt „Integrierende Auswertung“ eine umfassende Beurteilung des Waldzustandes durch die Verknüpfung und simultane Analyse unterschiedlicher Indikatoren der standörtlichen Belastungssituation an (vgl. Riek & Wolff 1999).

Diesem Ansatz liegt zum einen der Gedanke zugrunde, dass sich das Auftreten und Ausmaß der „neuartigen Waldschäden“ nicht monokausal auf bestimmte Schadfaktoren zurückführen lässt; zum anderen, dass der Kronenzustand - wie er durch die visuellen Schadansprachen der WSE ermittelt wird - nur begrenzt Störungen ökosystemarer Prozesse wiedergeben kann. Vielmehr sind neben den unspezifischen Merkmalen der Kronenverlichtung und Nadel-/ Blattvergilbung zusätzlich Standorts-, Boden- und Baumernährungsdaten für eine ganzheitliche Charakterisierung der Waldökosysteme und differenzierte Einschätzung der Beeinträchtigungen durch natürliche und anthropogene Stressfaktoren heranzuziehen (vgl. BML 1997).

Methodisches Verfahren für diese Auswertung ist die multivariate Analyse aller verfügbaren Daten zum Boden-, Ernährungs- und Kronenzustand, Depositionsgeschehen und zum Klima mit dem Ziel, die Belastungssituation, Wechselwirkungen und Beziehungsstrukturen zu beschreiben sowie Waldzustandstypen ähnlicher Eigenschaften auszuweisen. Im Vordergrund stehen dabei weniger solche Eigenschaften, die sich aus standortkundlichen Ansprachekriterien, wie Substratgruppe, Bodentyp, klimabedingte Höhenstufe etc. ableiten lassen, da diese nur träge oder gar nicht auf die sich verändernden Umweltbedingungen reagieren, sondern vorwiegend Messwerte, die den augenblicklichen chemischen Zustand der Waldstandorte widerspiegeln. Hierunter fallen die vorliegenden laboranalytischen Boden- und Ernährungsdaten sowie die modellierten Depositionsdaten an den BZE-Erhebungspunkten.

### Gesamtkonzeption und Zeitplan

Die vorliegende Studie ist das Ergebnis der zweiten Projektphase eines umfassenderen Vorhabens, welches für eine Laufzeit von fünf Jahren konzipiert wurde (vgl. Kap. 8).

In der ersten Phase des Gesamtvorhabens wurden Bodenzustands-, Ernährungs- und Schadens(verlaufs)typen aus vorliegenden, bundesweiten Daten der BZE abgeleitet und ihre räumliche Verteilung geostatistisch ausgewertet (Riek & Wolff 1999). Hierzu war die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen den Daten der forstlichen Inventuren des Level I-Programms (BZE, WSE) notwendig. Diese Untersuchung hat Zusammenhänge zwischen Boden-, Ernährungs- und Kronenzustand aufzeigen können. Gleichzeitig wurde aber auch die Notwendigkeit deutlich, weitere Faktoren wie die atmosphärische Deposition, das Klima und die Witterung in die Analyse einzubeziehen. Daher war ein weiteres wichtiges Ziel der zweiten Projektphase die Beschaffung zusätzlicher

punktbezogener Daten zum Bodenwasserhaushalt sowie zur Klima-, Immissions- und Depositionssituation für alle BZE-Punkte. Die Beschaffung der Daten war Ende des Jahres 2000 abgeschlossen.

Die Einbeziehung dieser Daten zur Beschreibung der standörtlichen Schadensdisposition als Funktion von natürlichen und anthropogenen Stressfaktoren mit Hilfe statistischer Modelle war Gegenstand der zweiten Phase des Gesamtvorhabens. Als Ergebnis sollten sogenannte multivariate Waldzustandstypen entstehen, die die Kronenansprache als Indikator für den Waldzustand ergänzen können. Dabei wurden zwei mögliche Ansätze verfolgt (Abb. 58). Eine ausführliche Beschreibung ist in Kapitel 5 zu finden.

Die Prüfung der Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf weitere Standorte wie z.B. Level II-Punkte war ebenfalls Ziel des Projektes. Anhand der ermittelten Depositionstypen können darüberhinaus Aussagen zur Repräsentanz der Untersuchungsflächen des Level II-Programms (derzeit 89 Flächen in Deutschland) getroffen werden. Die Repräsentanz und Möglichkeiten zur Übertragung der Ergebnisse soll ab 2001 auch an einem erweiterten Datensatz im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Konzept und Machbarkeitsuntersuchungen für die integrierende Auswertung von Daten des Umweltmonitorings im Wald“ getestet werden.

#### Material und Methoden

##### Untersuchungsstandorte

**Es konnten maximal 1800 BZE (Level I)-Standorte in die Untersuchungen einbezogen werden, wobei 592 Fichten-, 254 Kiefern- und 69 Buchenflächen vorliegen (Abb. 1). Bei den sonstigen Standorten handelt sich um Mischbestände oder andre Baumarten.**

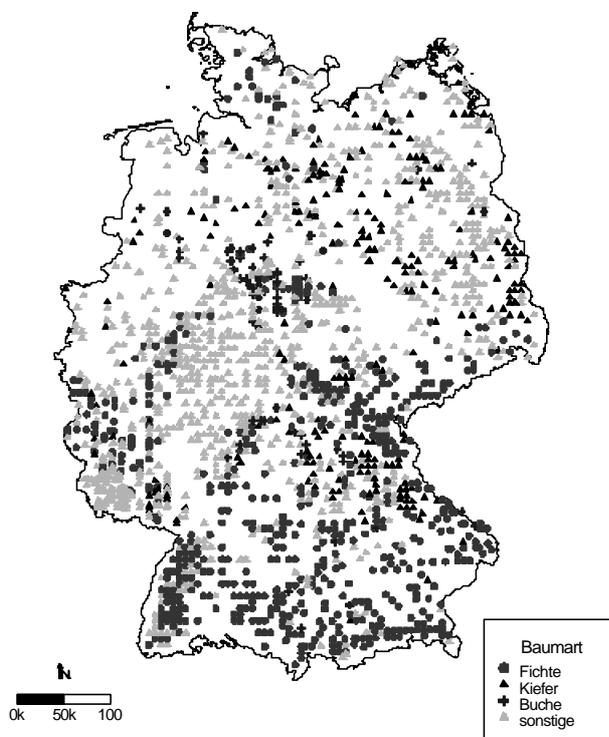


Abb. 1: Baumartenverteilung der BZE-Stichprobe

## Atmosphärische Deposition

### QUELLEN DER ATMOSPHERISCHEN STOFFEINTRÄGE

Schwefel- und Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre entstammen vor allem urbanindustriellen Quellen, wie Verkehr ( $\text{NO}_x$ ), Industrieanlagen, Energieumwandlung ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ) oder der intensiven Landwirtschaft ( $\text{NH}_y$ ). Quellen basischer Kationen - insbesondere von Kalium- sind aufgewehte Bodenpartikel oder atmosphärische Stäube, die in Ostdeutschland als basenreiche Flugaschen auftraten.

Meeresnahe Gebiete können ebenfalls durch hohe Einträge an basischen Kationen wie Magnesium aber auch Sulfat gekennzeichnet sein. Überdurchschnittlich wird aber vor allem Natrium marinen Ursprungs in diesen Gebieten deponiert.

Alle in der Atmosphäre befindlichen Stoffe unterliegen Transportprozessen sowie möglicherweise auch der Transformation. So können photochemische Reaktionen zur Bildung reaktiver Verbindungen führen oder Komponenten mit Wolken- oder Nebeltropfen reagieren.

### ERFASSUNG DER ATMOSPHERISCHEN STOFFEINTRÄGE

Der Eintrag in Ökosysteme erfolgt als Nasse (feuchte) sowie als Trockene Deposition, die zusammen die Gesamtdeposition (Branding 1997) darstellt. Als **Nasse Deposition** wird der Eintrag mit dem Regen, Hagel oder Schnee verstanden. In Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge und von der Entfernung zu einem Emittenten variieren Menge und Qualität der Nassen Deposition. Die Nasse Deposition lässt sich mittels wet-only- bzw. bulk-Sammler bemessen und flächendeckend mit Hilfe geostatistischer Methoden (Kriging) darstellen (Gauger et al. 1997).

Die **Feuchte Deposition** liegt gelöst in Nebel- und Wolkentropfen vor. Da ihr Verhalten dem der Trockenen Deposition ähnelt, wird sie der **Trockenen Deposition** zugeordnet (Ibrom 1993, Branding 1997). Diese erfolgt in Form von Gasen und Partikeln. Die Trockene Deposition beruht auf turbulenten Austauschprozessen in der bodennahen Luftschicht, die einen vertikalen Stofffluss von der Atmosphäre zur Rezeptoroberfläche zur Folge haben. Stärke und Richtung des vertikalen Flusses sind abhängig von den aktuellen Turbulenzbedingungen, von den chemischen und physikalischen Charakteristika des transportierten Stoffes und von dem sich in Abhängigkeit von den Akzeptoreigenschaften ausgebildeten Konzentrationsgradienten. "Damit ist die Trockene Deposition im Gegensatz zur Nassen ein standortspezifischer Prozess" (Ibrom 1993).

Die gegenüber dem Freiland deutlich erhöhten Einträge in Waldökosysteme sind auch auf die Trockene Deposition zurückzuführen. Diese ist messtechnisch jedoch nur schwer zu erfassen und muss daher grossräumig über Modelle abgeschätzt werden.

Auf europäischer Ebene werden zur Erstellung kleinmasstäbiger Karten der Trockenen Deposition mikrometeorologische Ansätze im Rahmen von EMEP (European Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants) verfolgt (EMEP/MSCW 1996). Eine ausführliche Beschreibung der Erfassungs- und Modellierungsmethoden ist bei Gauger et al. (1997), Van Pul et al. (1995), Van Leeuwen et al. (1995), Draaijers et al. (1997), Bleeker et al. (2000) zu finden. Alle im Rahmen des vorliegenden Projektes benötigten Depositionsdaten wurden vom Umweltbundesamt Berlin (UBA) zur Verfügung gestellt.

## SEESALZKORREKTUR

Die Seesalzkorrektur ermöglicht die Bereinigung der Deposition um nicht säure-wirksame Verbindungen. Dies geschieht mit Hilfe des Tracers Natrium von dem angenommen wird, dass er zu 100 Prozent marinen Ursprungs ist. Die Korrektur wird entsprechend dem UN/ECE- Manual (UBA 1996) durchgeführt. Alle Elemente, bei denen eine Seesalzkorrektur vorgenommen wurde, haben den Index ssc (seasalt corrected).

$$X = X_{\text{dep}} - Na_{\text{dep}}(X_{\text{sw}}/Na_{\text{sw}})$$

wobei:

X	SO <sub>x</sub> , basische Kationen [molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
X <sub>dep</sub>	Gesamtdeposition von X [molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
Na <sub>dep</sub>	Deposition von Natrium [molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
(X <sub>sw</sub> /Na <sub>sw</sub> )	Verhältnis von X zu Natrium im Seewasser

## BESTIMMUNG DER GESAMTSÄUREDEPOSITION

Die Summe aus oxidierten und reduzierten Stickstoffverbindungen und seesalzkorrigierten Schwefelverbindungen zusammen mit seesalzkorrigiertem Chlorid wird als potentielle Säure bezeichnet.

$$Ac \text{ (pot)} = SO_x\text{-S ssc} + NH_y\text{-N} + NO_x\text{-N} + Cl_{\text{ssc}}$$

wobei:

Ac (pot)	potentielle Säure
SO <sub>x</sub> -S ssc	seesalzkorrigierte Sulfatdeposition
NO <sub>x</sub> -N	oxidierte Stickstoffdeposition
NH <sub>y</sub> -N	reduzierte Stickstoffdeposition
Cl <sub>ssc</sub>	seesalzkorrigiertes Chlorid

## DATENQUALITÄT

Im Rahmen einer Auswertung mittels statistischer Verfahren auf der Grundlage aggregierter, komplexer Datenbestände spielt die Datenqualität für eine Interpretation der Ergebnisse eine wichtige Rolle. Die Vergleichbarkeit der Daten und die Eingrenzung von Fehlerbereichen ist hierbei besonders wichtig. Da die Basisdaten der Depositionsdaten zur Verrechnung von der Universität Stuttgart geliefert wurden, fand ihre Qualitätssicherung vorab statt. Bauartbedingte Differenzen zwischen den einzelnen Sammlertypen, die den verwendeten Basisdaten zugrunde liegen, konnten nicht detailliert berücksichtigt werden, da entsprechende Vergleichsmessungen bisher nicht ausreichend aufbereitet zur Verfügung stehen (Gauger et al. 2001). Durch die hohe Anzahl an Messpunkten und aufgrund der plausiblen Werte, können diese Daten aber als vergleichbar gelten. Zusätzlich fand eine Plausibilitätskontrolle mittels Ionenbilanz vor der Datenlieferung durch die Universität Stuttgart statt. Anschliessend wurden die punkthaften Daten [molc ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>] im Rahmen der vorliegenden Studie mit Daten aus der Literatur (BML 1998) auf ihre Plausibilität hin untersucht.

## AKTUELLE DATENLAGE LEVEL I

Die Datenlieferung umfasste alle Komponenten (Gesamtdeposition, Trockene und Nasse Deposition) der atmosphärischen Deposition der Jahre 1989, 1993 und 1995 an ca.1800 Standorten in der Bundesrepublik. Im vorliegenden Bericht wurden vor allem die Daten

des Jahres 1989 berücksichtigt, da dieses auch annähernd dem Zeitraum der Bodenzustandserhebungen und Untersuchungen zur Ernährungssituation entspricht. Die Daten des Jahres 1993 und 1995 bieten die Möglichkeit, Veränderungen des Depositionsgeschehens z.B. aufgrund von Luftreinhaltemaßnahmen zu erkennen und Gefährdungspotentiale durch die atmosphärische Deposition für die Waldökosysteme vorauszusagen.

#### AKTUELLE DATENLAGE LEVEL II

Für die Standorte des Level II-Programms konnte auf Daten zur Trockenem Deposition, die mit derselben Methode wie für BZE/Level I modelliert wurden, zurückgegriffen werden (Bleeker et al. 2000). Da nur an 18 Standorten des Level II -Programms Daten zur Nassen und Trockenem Deposition vorlagen, wurde mittels GIS eine räumliche Zuordnung zu benachbarten Level I-Standorten mit gleicher Bestockung vorgenommen und deren Daten auf Level II-Plots übertragen (Anhang 1). Ein Vergleich mit Daten aus Zeitreihen der Bundesländer (18 Standorte) ergab eine gute Übereinstimmung. Dennoch ist es für zukünftige Untersuchungen sinnvoll, Depositionsraten an Level I und II Standorten mit der gleichen Methode zu bestimmen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

#### Klimadaten

Bisher liegen Jahresmittelwerte zu Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, aktueller und potentieller Evapotranspiration der Jahre 1985 bis 1998 für 1817 BZE/Level I-Erhebungspunkte vor, die vom Potsdamer Institut für Klimaforschung (PIK) zur Verfügung gestellt wurden. Diese Daten wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes für die weitere Auswertung zu Mittelwerten über den gesamten Zeitraum zusammengefasst. Das PIK hat folgende Arbeitsschritte zur Ableitung und Interpolation durchgeführt. Eine ausführliche Methodenbeschreibung ist bei Prentice et al. 1992 und Sykes et al. 1996 zu finden.

#### A. ERGÄNZEN FEHLENDER MONATSWERTE AN DEN DWD - STATIONEN

- Interpolation der langjährigen monatlichen Mittelwerte 1931-60 aus der Cramer - Leemans - Datenbank (Prentice et al. 1992, Sykes et al. 1996) unter Berücksichtigung ihrer Höhenabhängigkeit auf die Stationspunkte (tin-plate interpolator, Hutchinson 1995)
- Zuweisen der monatlichen Werte zu den Zeitreihen 1985-1998
- Berechnen der Abweichung der Monatswerte vom Mittelwert 1931-60 (Anomalien)
- Pro fehlenden Monat:

Ermittlung der nächstgelegenen Station an der ein Wert für diesen Monat vorhanden ist  
Berechnung des Monatswertes durch Addition der Anomalie der nächstgelegenen Station auf den Mittelwert des Punktes an dem der Wert fehlt. Damit bleibt die räumliche Konsistenz der Daten soweit wie möglich erhalten. Es ändert sich nur der absolute Wert entsprechend dem Unterschied zwischen den langjährigen Mittelwerten des Punktes an dem der Wert fehlt und des Punktes an dem der Wert vorhanden ist. Die höhenabhängige Veränderung des jeweiligen Wertes ist durch die Interpolation der Mittelwerte berücksichtigt.

#### B. BERECHNUNG VON ZEITREIHEN FÜR DIE BZE-PUNKTE analog zu A.

- Interpolation der langjährigen monatlichen Mittelwerte auf diese Punkte
- Zuweisen der Zeitreihe der nächstgelegenen Station zu den entsprechenden BZE - Punkt unter Berücksichtigung der Unterschiede in den Mittelwerten zwischen BZE - Punkt und Meßstationspunkt. Aufgrund der unterschiedlichen Datendichte wurde das Verfahren für jeden Parameter getrennt durchgeführt

### C. BERECHNUNG DER EVAPOTRANSPIRATION

Verwendung der Priestley - Taylor Evapotranspirationsfunktion (Sykes et al. 1996) unter Berücksichtigung von monatlicher Mitteltemperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und nFK. Die nFK wurde in 3 Gruppen aus Bodenart, Bodentyp, Grundwasserangaben, Substrattypen und Humusgehalt unterteilt, wenn keine gemessenen nFK-Werte vorlagen.

## Statistische Methoden

### MULTIVARIATE VERFAHREN

Es wurden Faktoren-, Cluster-, Diskriminanz- und lineare wie nichtlineare Regressionsanalysen angewandt.

#### Faktorenanalyse

Die Erfassung von Interdependenzen bei den einzelnen Merkmalskomplexen kann mit Hilfe der Faktorenanalyse nach dem Hauptkomponentenverfahren erfolgen. Ausgegangen wird hierbei von einer standardisierten Datenmatrix aus  $n$  Objekten (BZE-Punkten) mit  $p$  Merkmalen (z.B. Nadelementgehalten, Bodenzustandskenngrößen, usw.). Die einzelnen Merkmale sind mehr oder weniger hoch korreliert. Das Hauptkomponentenverfahren extrahiert zunächst  $p$  stochastisch unabhängige (d.h. nicht korrelierte) Faktoren  $F_1, \dots, F_p$ , anhand derer sich die gesamte Varianz der Merkmale erklären lässt. Das Verfahren wird graphisch durch Abb.2 verdeutlicht. Durch Verschieben des Nullpunktes und Rotation der Koordinatenachsen wird ein Faktor  $F_1$  ermittelt, der einen maximalen Anteil an der Gesamtvarianz erklärt, anschliessend ein Faktor  $F_2$ , der die Restvarianz maximal erklärt, usw.. Die Faktoren  $F_1, \dots, F_p$  stehen orthogonal zueinander, sind somit stochastisch unabhängig. Ihr Schnittpunkt entspricht dem Schwerpunkt der dargestellten 3-dimensionalen Punktwolke in Abb.1. Um dem Ziel der Datenkomprimierung gerecht zu werden, muss sich die Faktorenextraktion auf  $k$  Faktoren mit  $k < p$  beschränken. Es werden deshalb nur die jeweiligen Faktoren als Hauptkomponenten ausgewählt, für die der Erklärungsanteil an der Gesamtvarianz  $> 1$  ist (Kaiser-Kriterium; vgl. Überla 1971). Diese Festlegung beruht auf der Tatsache, dass die Gesamtvarianz aufgrund der Standardisierung der Rohdatenmatrix (Mittelwert = 0; Standardabweichung = 1) exakt  $p$  beträgt (Anzahl der Merkmale) und jede einzelne Merkmalsvariable bereits mit einem Anteil von 1 zu deren Erklärung beiträgt. Die nach dem Kaiser-Kriterium ausgewählten Faktoren besitzen mithin einen jeweils höheren Erklärungswert an der Gesamtvarianz als jede einzelne Originalvariable.

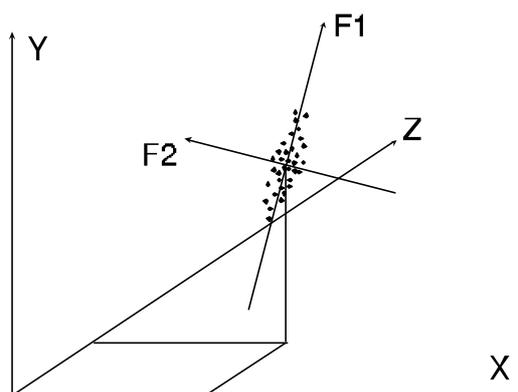


Abb. 2: Geometrische Deutung der Extraktion zweier Faktoren  $F_1$  und  $F_2$  aus den Merkmalsparametern  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  im 3-dimensionalen Merkmalsraum

Die Rohdatenmatrix  $X$  kann also dargestellt werden als Linearkombination der Faktormatrix  $F$  und einer Ladungsmatrix  $L$ :  $X = L * F + E$ , wobei der Rest  $E$  möglichst gering ausfallen sollte. Aus der Faktorladungsmatrix ist die Relation der gefundenen Faktoren zu den einzelnen Merkmalsvariablen zu ersehen. Die Faktorladungen liegen zwischen 0 und +/-1, wobei Werte nahe +/-1 auf eine enge Korrelation zum entsprechenden Merkmal hinweisen. Die Ladungsmatrix ermöglicht die Interpretation der einzelnen Faktoren. Die ermittelten Faktorwerte stellen aussagekräftige Summenparameter beispielsweise zur komprimierten Beschreibung forstökologischer Zustandsgrößen dar.

### Clusteranalyse

Die Clusteranalyse ist ein multivariates Verfahren, das eine Menge von Objekten, die durch spezifische Merkmale beschrieben sind, in Gruppen (Cluster) zerlegt. Das Ziel besteht darin, Cluster (z.B. Standortstypen) zu bilden, die in sich möglichst homogen und untereinander weitestgehend heterogen (separiert) sind. Die Clusteranalyse lässt sich in zwei Schritte unterteilen:

#### 1. Ermittlung der Distanzmatrix

In der vorliegenden Arbeit wurde die quadrierte euklidische Distanz benutzt. Sie lässt sich berechnen aus

$$D_{kl} = \sum_{j=1}^J (X_{kj} - X_{lj})^2 ,$$

mit

$D_{kl}$ = Distanz der Objekte (BZE-Punkte)  $k$  und  $l$

$X_{lj}$ = Ausprägung des Parameters  $j$  bei Objekt  $l$  ( $j=1,\dots,j$ )

$X_{kj}$ = Ausprägung des Parameters  $j$  bei Objekt  $k$  ( $j=1,\dots,j$ ).

#### 2. Gruppenfusionierung

Die Distanzmatrix bildet die Grundlage für die Zusammenfassung der Objekte zu Gruppen. Hierbei kann das Fusionierungsverfahren nach Ward (1963) eingesetzt werden, bei welchem mit jedem Fusionierungsschritt diejenigen Objekte bzw. Gruppen zusammengefasst werden, welche die Streuung der Parameter innerhalb der Gruppen am wenigsten erhöhen. Bei sehr hohem Stichprobenumfang muss aus Gründen der Rechenkapazität, das quick-cluster-Verfahren eingesetzt werden, bei dem die Anzahl der Cluster vom Anwender vorzugeben ist. Hierbei ist es empfehlenswert mehrere Rechengänge für unterschiedliche Clusteranzahlen durchzuführen, um zu einer adäquaten Lösung zu gelangen. Die Clusterzentren werden in einem iterativen Rechenprozess optimiert, wobei jedes Objekt demjenigen Cluster zugewiesen wird, zu dessen Zentrum die euklidische Distanz am geringsten ist.

### Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse kommt zum Einsatz, wenn die Gruppenzugehörigkeit von Objekten (z.B. Standorten) vorgegeben ist und diese Gruppen auf Unterschiede ihrer Merkmalsvariablen (z.B. bodenkundliche Kennwerte) hin untersucht werden sollen. In einem ersten Schritt wird hierzu eine Linearkombination dieser Merkmalsvariablen

ermittelt, durch die eine optimale Trennung zwischen den Gruppen erfolgt. Eine solche Diskriminanzfunktion wird durch die Darstellung in Abb. 3 für den einfachsten Fall (zwei Gruppen, zwei Merkmalsvariablen) geometrisch veranschaulicht. Für den mehrdimensionalen Fall (Anzahl der Merkmalsvariablen  $> 2$ ) lassen sich analog Trennebenen und "Hyperebenen" ermitteln, die entsprechend zwischen zwei oder mehreren Gruppen im multidimensionalen Diskriminanzraum zu trennen vermögen. Die Trennkraft einzelner Merkmalsvariablen ergibt sich analog zur multiplen Regressionsanalyse (s.u.) aus dem Betrag ihrer standardisierten Koeffizienten innerhalb der Diskriminanzfunktion.

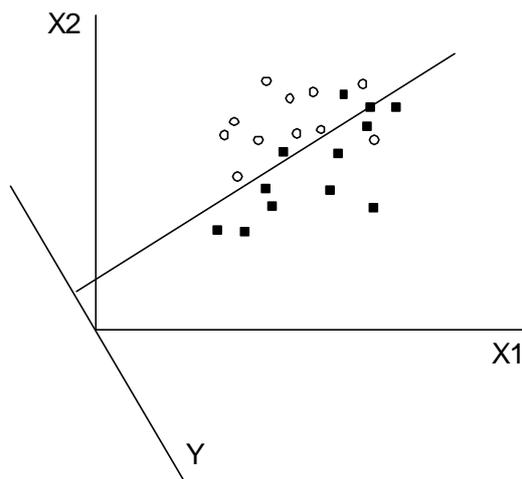


Abb. 3: Geometrische Darstellung einer Trennfunktion  $Y = f(X_1, X_2)$

Eine gute Diskriminanzfunktion zeichnet sich dadurch aus, daß sich die Mittelwerte der Funktion in den Gruppen deutlich unterscheiden. Als Gütekriterium für die Unterschiedlichkeit der Gruppen und damit für die Trennkraft der ermittelten Diskriminanzfunktion kann der statistische Wert Wilks' Lambda dienen, der sich als Quotient der Streuung innerhalb der Gruppen und der Gesamtstreuung errechnet. Dieses Maß variiert zwischen 0 und 1, wobei kleinere Werte eine höhere Trennkraft anzeigen. Die Bedeutung von Wilks' Lambda besteht darin, daß es sich in eine Variable transformieren läßt, die eine annähernde  $\chi^2$ -Verteilung besitzt, wodurch die Durchführung einer statistischen Signifikanzprüfung ermöglicht wird.

Unter Zugrundelegung der ermittelten Diskriminanzfunktion lassen sich dann auch Objekte mit unbekannter Gruppenzugehörigkeit aufgrund ihrer Merkmalsausprägungen in die bestehenden Gruppen einordnen. Die Zuordnung beruht auf dem Wahrscheinlichkeitstheorem von Bayes, das bei Backhaus et al. (1987) erläutert wird.

#### Nichtlineare Regressionsanalyse

Die Abhängigkeiten zwischen Ziel- und Einflussgrößen wurden mittels multipler Regressionsanalysen und mit Hilfe eines nichtlinearen iterativen Verfahrens untersucht. Für den Kurvenausgleich wurden hauptsächlich Potenzmodelle ( $Y = AX^B + C$ ) sowie logistische Modelle der Form  $Y = C / (1 + B \cdot \exp(-A \cdot X))$  verwendet. Das iterative Verfahren beruht auf dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus, der die Optimierung von Funktionsgleichungen ermöglicht, die sich durch Transformation der Ausgangsvariablen nicht linearisieren lassen (vgl. Gill et al. 1981, Draper und Smith 1981).

## ERSTELLUNG VON KREUZTABELLEN

Ziel der Analyse ist die Erfassung der Beziehungsstruktur der in der Kreuztabelle verknüpften kategorialen Merkmale (Ernährungs- bzw. Depositionsfaktoren).

Mit dieser Prozedur werden die Häufigkeiten der Beobachtungen analysiert, die in einer Kreuztabelle oder einer Kontingenztafel jeder Kategorie der Kreuzklassifikation zugeordnet sind. Jede Kreuzklassifikation in der Tabelle bildet eine Zelle, und jede kategoriale Variable wird als Faktor bezeichnet. Die abhängige Variable stellt die Anzahl der Fälle (Häufigkeit) in einer Zelle der Kreuztabelle dar, und die erklärenden Variablen sind die Faktoren und Kovariaten. Mit dieser Prozedur werden Maximum-Likelihood-Parameter von hierarchischen und nicht hierarchischen loglinearen Modellen unter Verwendung der Newton-Raphson-Methode geschätzt. Es können entweder eine Poisson-Verteilung oder eine multinomiale Verteilung analysiert werden. Es können verschiedene Faktoren ausgewählt werden, um die Zellen einer Tabelle zu definieren.

Auswertung der Depositionsdaten

Räumliche und zeitliche Muster des Depositionsgeschehens

## GROßRÄUMIGE DEPOSITIONSMUSTER

Verschiedene regional wirksame Faktoren beeinflussen das Depositionsgeschehen, so dass es zur Ausprägung grossräumiger Depositionsmuster kommt. So weisen z.B. die Entfernung vom Emittenten oder die Niederschlagsmenge eine enge Beziehung zu Menge und Qualität der Deposition auf. Zudem gibt es auch rezeptorabhängige Einflußfaktoren, die durch den jeweiligen Bestand geprägt sind, wie z.B. der stomatare Widerstand der Bäume. Die heterogene räumliche Verteilung der Baumarten sollte aber bei der Beurteilung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Aus den in Tabelle 1 dargestellten Perzentilen und der kartografischen Darstellung der Eintragsraten (Anhang 2-5) lässt sich der Baumarteneinfluss deutlich erkennen. Zum Beispiel ist ein überdurchschnittlich hoher Anteil an Buchen in Gebieten mit hohen Stickstoffimmissionen zu finden. Fichten hingegen stocken vorwiegend in montanen Regionen mit überdurchschnittlichen Schwefeleinträgen. Die Kiefer tritt überwiegend im Nordostdeutschen Tiefland auf, wo gleichzeitig hohe Basen- und Schwefelemissionen zu verzeichnen sind (Tab.1). Eine ausführliche Beschreibung der räumlichen Verteilung der verschiedenen Elemente der Deposition ist bei Gauger et al. (1997) zu finden. Im Vordergrund der vorliegenden Untersuchung steht v.a. der Einfluss des Depositionsgeschehens als Zusammenwirken verschiedener Elemente auf den Waldzustand.

Eine kartografische Darstellung der Depositionsraten für die wichtigsten Elemente der Jahre 1989 und 1993 ist in Anhang 1 bis 4 zu finden.

Tab. 1: Perzentile der Elementgehalte [ $\text{mol} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ] der atmosphärischen Gesamtdeposition (1989) für verschiedene Bestandestypen

		Perzentile				
		10	33	50	66	90
<b>Ca</b>	<b>Fichte</b>	355	481	567	680	1171
	<b>Buche</b>	438	542	585	737	992
	<b>Kiefer</b>	334	536	731	1009	1261
<b>Ca_ssc</b>	<b>Fichte</b>	337	458	543	650	1138
	<b>Buche</b>	390	458	541	704	975
	<b>Kiefer</b>	321	493	697	989	1245
<b>K</b>	<b>Fichte</b>	80	92	100	108	131
	<b>Buche</b>	91	100	105	110	139
	<b>Kiefer</b>	82	92	99	105	124
<b>K_ssc</b>	<b>Fichte</b>	72	83	91	98	115
	<b>Buche</b>	69	73	81	90	115
	<b>Kiefer</b>	70	81	85	91	106
<b>Mg</b>	<b>Fichte</b>	152	183	223	327	473
	<b>Buche</b>	185	368	388	400	477
	<b>Kiefer</b>	163	279	383	422	496
<b>Mg_ssc</b>	<b>Fichte</b>	31	46	60	102	252
	<b>Buche</b>	0	0	9	45	178
	<b>Kiefer</b>	0	70	118	177	306
<b>Na</b>	<b>Fichte</b>	374	437	488	556	1111
	<b>Buche</b>	425	944	1303	1510	1917
	<b>Kiefer</b>	343	469	604	849	1527
<b>N_ges</b>	<b>Fichte</b>	1851	2145	2315	2568	3064
	<b>Buche</b>	2086	2221	2345	2436	2896
	<b>Kiefer</b>	1856	2136	2274	2420	2967
<b>NH<sub>y</sub>-N</b>	<b>Fichte</b>	804	943	1067	1198	1500
	<b>Buche</b>	929	1108	1164	1211	1328
	<b>Kiefer</b>	789	924	1030	1112	1348
<b>NO<sub>x</sub>-N</b>	<b>Fichte</b>	884	1124	1275	1398	1703
	<b>Buche</b>	978	1091	1185	1279	1626
	<b>Kiefer</b>	908	1147	1255	1369	1698
<b>pot. Säure</b>	<b>Fichte</b>	3858	4700	5215	5881	14581
	<b>Buche</b>	4859	5476	5839	6703	10737
	<b>Kiefer</b>	4619	5291	6199	8205	15018
<b>SO<sub>x</sub>-S</b>	<b>Fichte</b>	1905	2408	2855	3205	12000
	<b>Buche</b>	2608	2977	3345	4424	8396
	<b>Kiefer</b>	2516	2987	3723	5699	12386
<b>Nges/ NH<sub>y</sub>-N</b>	<b>Fichte</b>	36	42	47	51	57
	<b>Buche</b>	41	46	49	51	56
	<b>Kiefer</b>	36	42	45	48	55
<b>S/ N_ges</b>	<b>Fichte</b>	0.88	1.07	1.24	1.35	4.82
	<b>Buche</b>	1.03	1.25	1.54	1.92	3.53
	<b>Kiefer</b>	1.09	1.40	1.58	2.55	5.11

ssc = seesalzkorrigierte Eintragsraten

Nges. = Gesamtdeposition (NO<sub>x</sub>-N + NH<sub>y</sub>-N)

S/N\_ges = Verhältnis von Schwefel zu Gesamtstickstoff

#### BEZIEHUNGSGEFÜGE DER DEPOSITIONSDATEN (FAKTORENANALYSE)

Ohne Datenkomprimierung mittels eines faktorenanalytischen Verfahrens lassen sich nur schwer Beziehungsstrukturen zwischen den verschiedenen eingetragenen Stoffen und damit auch den Depositionstypen erkennen. Die Faktorenanalyse nach dem Hauptkomponentenverfahren wurde für die Gesamtdeposition und deren Komponenten der Trocken- und Nassen Deposition der verschiedenen Elemente, seesalzkorrigiert und nicht seesalzkorrigiert, für alle Level I-Plots durchgeführt.

Die Betrachtung aller Komponenten der Deposition ist notwendig, da für das Ökosystem nicht nur die Menge eines eingetragenen Stoffes wichtig ist, sondern auch dessen Bindungsform. Die Einbeziehung seesalzkorrigierter Werte ist ebenfalls für das Erkennen der Beziehungen zwischen Kronenzustand und anthropogenen Einflußfaktoren von Bedeutung, da z.B. meeresbürtige Schwefeleinträge nicht versauernd wirken, sondern mit anderen Elementen als Neutralsalze eingetragen werden. Für den Ernährungszustand der Bäume ist jedoch die Menge der eingetragenen Stoffe entscheidend, so dass bei dieser Betrachtung die nicht seesalzkorrigierte Gesamtdeposition zu berücksichtigen ist. Die Faktorenladungsmatrix und Erklärungswerte sind in Anhang 6 bis 9 dargestellt.

Folgende Kennwerte zur komprimierten Charakterisierung aller Komponenten der atmosphärischen Deposition finden Verwendung:

Nges, NO<sub>x</sub>-N, NH<sub>y</sub>-N, SO<sub>x</sub>-S, Ca, Ca<sub>ssc</sub>, Mg, Mg<sub>ssc</sub>, K, K<sub>ssc</sub>, Na

ssc= seesalzkorrigiert

#### BEZIEHUNGSGEFÜGE DER GESAMTDEPOSITION (NICHT SEESALZKORRIGIERT) DES JAHRES 1989

Die Analyse der aufgeführten Kennwerte hat zu vier voneinander unabhängigen Faktoren geführt, die die Variabilität der Kennwerte wiedergeben (Anhang 6). Diese nach dem Kaiser-Kriterium extrahierten Faktoren erklären 92 Prozent der Gesamtvarianz. Die Interpretation der Faktoren ist mittels der in Tabelle 2 dargestellten Ladungsmatrix möglich. Sie gibt an, wie stark die Faktoren mit den einzelnen Kennwerten der Deposition korrelieren. Streudiagramme geben die Beziehungen grafisch wieder. Um auch räumliche Muster zu erkennen, wurden Karten der einzelnen gruppierten Faktoren, in Quartile unterteilt, erstellt (Abb.4).

**Faktor 1** erklärt 31 Prozent der Gesamtvarianz und wird überwiegend von Schwefelverbindungen (SO<sub>x</sub>-S) geladen, aber auch durch den Einfluss von der potentiellen Säure bestimmt. Quellen dieser Einträge sind Emissionen aus Energieumwandlung insbesondere schwefelhaltiger Kohle und aus der Industrie. Calcium korreliert ebenfalls stark mit Faktor 1. Da Calcium oftmals gemeinsam mit Sulfat in der Atmosphäre transportiert und in die Ökosysteme eingetragen wird, erstaunt dies nicht. Der Eintrag von potentieller Säure hängt stark mit dem Auftreten von Schwefel zusammen. Stickstoff als Säurebildner scheint bei diesem Faktor keine Rolle zu spielen. Die räumliche Verteilung der Faktorenwerte weist ein deutliches Ost-West-Gefälle mit Ausnahme eines kleineren Gebietes in Rheinland-Pfalz (Eifel) auf, wo die Eintragsraten überdurchschnittlich hoch sind. Ebenfalls hohe Werte kommen im Erzgebirge und den angrenzenden ost- und westdeutschen Mittelgebirgen vor.

**Faktor 2** erklärt zu 23 Prozent die Variabilität der Kennwerte. Er wird durch die meeresbürtigen Elemente Natrium und Magnesium bestimmt. Dies spiegelt auch die

räumliche Verteilung der Faktorenwerte wider. Es ist eine Abnahme der Werte von Nordwest nach Südost festzustellen. Eine Ausnahme bilden die nördlichen Kalkalpen, wo vermutlich magnesiumhaltige Einwehungen zu erhöhten Werten führen. Aber auch Kalium, das zumeist aus der Landwirtschaft stammt und nur zu geringen Anteilen marinen Ursprungs ist, korreliert noch mit dem Faktor 2.

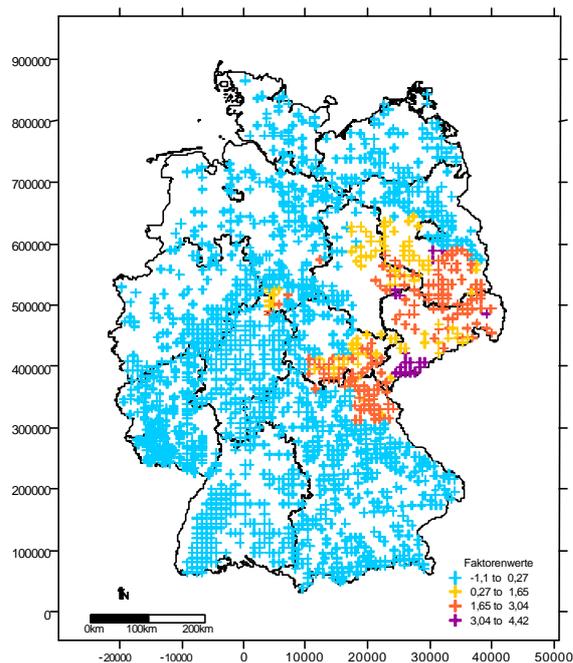
**Faktor 3** hat noch einen Erklärungswert von 21 Prozent. Er charakterisiert die Stickstoffeinträge, die durch oxidierten Stickstoff bedingt sind. Die wichtigste Quelle hierfür ist neben der Industrie der Verkehr. Dies spiegelt auch die räumliche Verteilung wider. Durch hohe Einträge betroffen sind Mittelgebirge, die in der Nähe industrie- und verkehrsreicher Gebiete liegen. Das Erzgebirge weist auch in bezug auf Faktor 3 sehr hohe Werte auf.

Charakterisiert wird der **Faktor 4** durch reduzierten Stickstoff und Kalium, die beide zu hohen Anteilen aus der landwirtschaftlichen Nutzung entstammen. 18 Prozent der Gesamtvariabilität werden durch diesen Faktor erklärt. Dieser Faktor hat bei der Betrachtung anthropogener Stressfaktoren eine große Bedeutung, da reduzierte Stickstoffverbindungen einerseits zur Eutrophierung und andererseits zur Versauerung des Systems beitragen können. Besonders hohe Faktorenwerte weist das Nordwestdeutsche Tiefland auf. Aber auch in den ländlichen Räumen Südostbayerns werden ähnliche Werte erreicht.

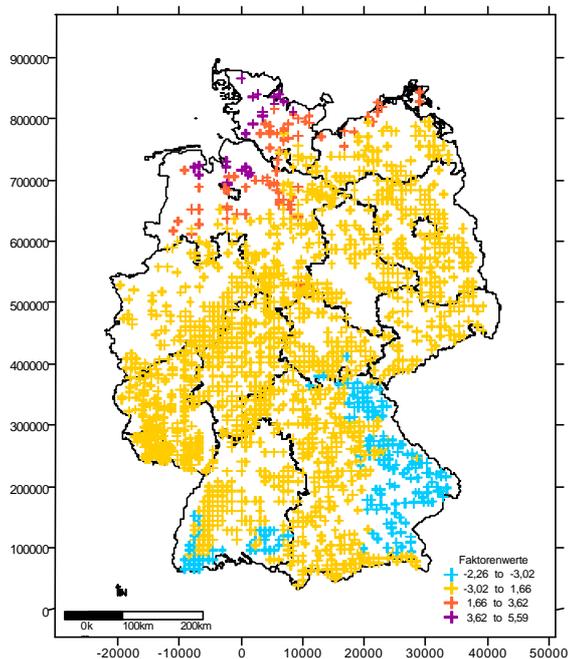
Tab. 2: Faktorenladungsmatrix nach Varimax-Rotation: Charakterisierung der nicht seesalzkorrigierten Gesamtdeposition des Jahres 1989

	Depositionsfaktoren			
	1	2	3	4
pot. Säure	0.93			
SOx-S	0.94			
Ca	0.81			
NHy-N				0.91
NOx-N			0.98	
Na		0.89		
N_ges			0.82	
Mg		0.83		
K		0.56		0.62

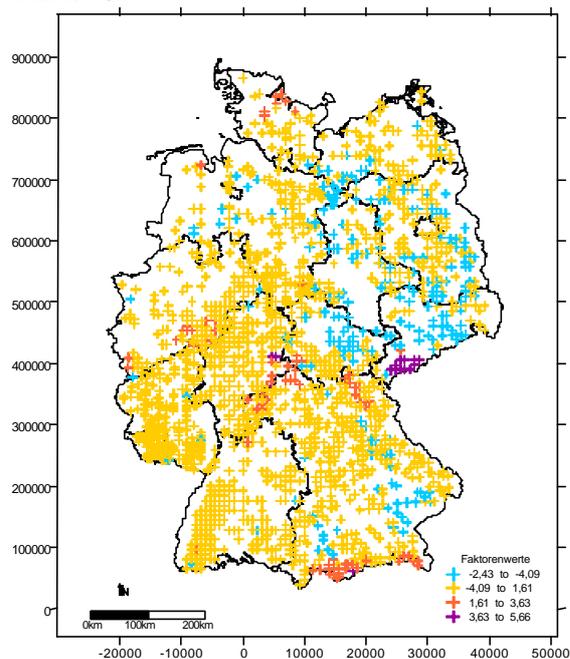
Faktor 1



Faktor 2



Faktor 3



Faktor 4

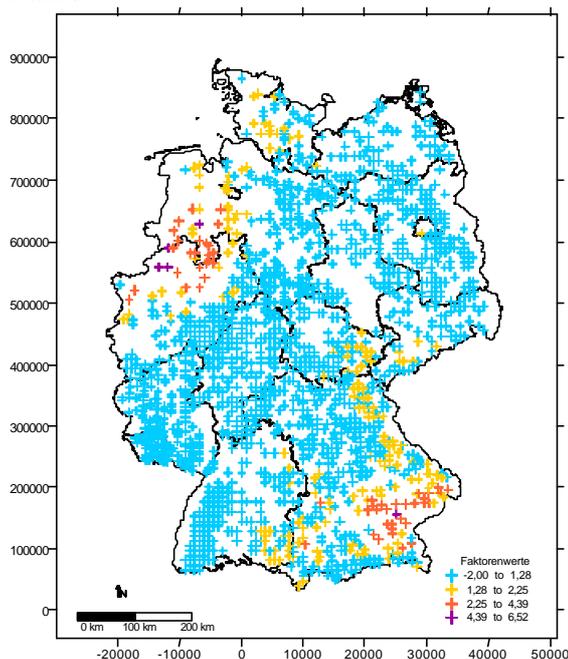


Abb. 4: Räumliche Verteilung der Faktorenwerte 1 bis 4 auf der Grundlage nicht seesalzkorrigierter Daten der Gesamtdeposition 1989, Darstellung von Quartilen

#### BEZIEHUNGSGEFÜGE DER GESAMTDEPOSITION (SEESALZKORRIGIERT) DES JAHRES 1989

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der seesalzkorrigierten Daten werden nicht im einzelnen diskutiert, da sie sich zum überwiegenden Teil mit jenen der nicht korrigierten überschneiden; vielmehr werden im folgenden wichtige Unterschiede für die spätere Interpretation aufgezeigt (Tab. 3, Anhang 6, Karte Anhang 10).

Die Analyse der aufgeführten Kennwerte hat zu drei, statt bisher vier, voneinander unabhängigen Faktoren geführt, die die Variabilität der Kennwerte wiedergeben. Diese nach dem Kaiser-Kriterium extrahierten Faktoren erklären immerhin noch 86 Prozent der

Gesamtvarianz. Anhand der Darstellung der Ladungsmatrix lässt sich erkennen, dass tatsächlich kein Faktor durch meeresbürtige Kennwerte bestimmt wird. Der **Faktor 1** wird weiterhin durch Schwefel, potentielle Säure und Calcium, sowie durch Magnesium geladen, der 40 Prozent der Gesamtvariabilität erklärt. Basische Einträge aus Stäuben treten also gemeinsam mit hohen Schwefel- und hohen potentiellen Säureeinträgen auf. **Faktor 2** (23 % der Gesamtvariabilität) ist vergleichbar mit dem bisherigen Faktor 3, **Faktor 3** (23 % der Gesamtvariabilität) mit dem bisherigen Faktor 4, der nicht seesalzkorrigierten Daten. Die räumliche Verteilung der Faktorenwerte ist ebenfalls vergleichbar.

Tab. 3: Faktorenladungsmatrix Varimax-Rotation: Charakterisierung der seesalzkorrigierten Gesamt-deposition des Jahres 1989

	Depositionsfaktoren		
	1	2	3
pot. Säure	0.89		
SOx-S	0.91		
Ca	0.83		
NHy-N			0.85
NOx-N		0.98	
Na			
Nges		0.84	0.50
Mg	0.88		
K			0.85

#### BEZIEHUNGSGEFÜGE DER TROCKENEN DEPOSITION (NICHT SEESALZKORRIGIERT) DES JAHRES 1989

86 Prozent der Gesamtvarianz aller Eingangsparameter werden durch die extrahierten Faktoren erklärt (Anhang 7, Tab. 4). Der **Faktor 1** mit dem Erklärungswert von 35 Prozent, wird von oxidierten Stickstoff- und Schwefelverbindungen, potentieller Säure und Calcium geladen. Diese Elemente haben ihren Ursprung in Emissionen aus Verkehr, Industrie und Energieumwandlung.

Stoffe, die zum grossen Teil marinen Ursprungs sind, charakterisieren den **Faktor 2**. Die räumliche Verteilung der Faktorenwerte spiegelt deren meeresbürtige Herkunft wider. Allgemein ist eine Abnahme von Nordwest nach Südost zu erkennen. Dieser Faktor hat einen ähnlich hohen Erklärungswert (31 Prozent) wie Faktor 1. Die Faktorenwerte weisen die typische Ost-West-Verteilung, die auch in der Gesamtdeposition zu erkennen war, auf.

**Faktor 3**, der 21 % der Gesamtvariabilität erklärt, weist enge Beziehungen zu reduzierten Stickstoffverbindungen gemeinsam mit trocken deponiertem Gesamtstickstoff auf. Dementsprechend sind überdurchschnittlich hohe Faktorenwerte im Nordwesten und dem ländlich geprägten Südosten zu finden (Anhang 11).

Tab. 4: Faktorenladungsmatrix nach Varimax-Rotation: Charakterisierung der nicht seesalzkorrigierten Trockenem Deposition des Jahres 1989

	Depositionsfaktoren		
	1	2	3
pot. Säure	0.96		
SOx-S	0.97		
Ca	0.67	0.5	
NHy-N		0.83	0.97
NOx-N	0.65		
Na		0.9	
Nges.			0.88
Mg		0.84	
K			

#### BEZIEHUNGSGEFÜGE DER NASSEN DEPOSITION (NICHT SEESALZKORRIGIERT) DES JAHRES 1989

Die Analyse ergab wieder vier voneinander unabhängige Faktoren, die 90 Prozent der Gesamtvariabilität erklären (Tab. 5). **Faktor 1** korreliert im Gegensatz zu den bisherigen Analysen mit den verschiedenen Stickstoffkomponenten und Kalium, aber auch mit den Protoneneinträgen. Die Gesamtvariabilität wird zu 37 % durch diesen Faktor erklärt (Anhang 8). Er kann als Faktor interpretiert werden, der einerseits für Säureinträge steht, andererseits auch durch Stoffeinträge geladen wird, die aus der Landwirtschaft stammen. Die räumliche Verteilung überschneidet sich stark mit der Niederschlagsverteilung, daher weisen Gebirgsregionen erhöhte Werte auf (Anhang 11).

**Faktor 2** (31% Erklärungswert) wird durch potentielle Säure, Schwefelverbindungen, Kalium und Calcium geladen.

**Faktor 3** (22 % Erklärungswert) spiegelt die meeresbürtigen Eingangsparameter (Na, Mg, Cl) wider. Dementsprechend zeigen die Faktorenwerte eine Abnahme von Nordwest nach Südost.

Tab. 5: Faktorenladungsmatrix nach Varimax-Rotation: Charakterisierung der Nassen, nicht seesalzkorrigierten Deposition des Jahres 1989

	Depositionsfaktoren		
	1	2	3
pot. Säure		0.91	
SOx-S		0.98	
Ca		0.93	
NHy-N	0.75		
NOx-N	0.97		
Na			0.94
N_ges	0.90		
H+	0.90		
Cl			0.94
Mg		0.54	0.70
K	0.90		

## BEZIEHUNGSGEFÜGE DER GESAMTDEPOSITION (NICHT SEESALZKORRIGIERT) DES JAHRES 1993

Der Erklärungswert der extrahierten 4 Komponenten beträgt insgesamt 91 Prozent und unterscheidet sich dadurch kaum von jenem des Jahres 1989 (Anhang 9). Die Eingangsparameter, die die Komponenten laden, sind jedoch verschieden **Faktor 1** (30 % Erklärungswert) wird weiterhin von Schwefelverbindungen und potentieller Säure geladen, zusätzlich tragen im Jahr 1993 auch oxidierte Stickstoffverbindungen zur Erklärung bei (Tab. 5). Stickstoff spielt also gegenüber 1989 eine größere Rolle bei der Ausprägung der Depositionsmuster. Besonders hohe Faktorenwerte werden weiterhin im Erz- und Fichtelgebirge erreicht. Die Belastung scheint im Nordostdeutschen Tiefland seit 1989 abgenommen zu haben. Dies lassen die Faktorenwerte vermuten, die sich nicht mehr von jenen benachbarter Gebiete unterscheiden (Abb. 3).

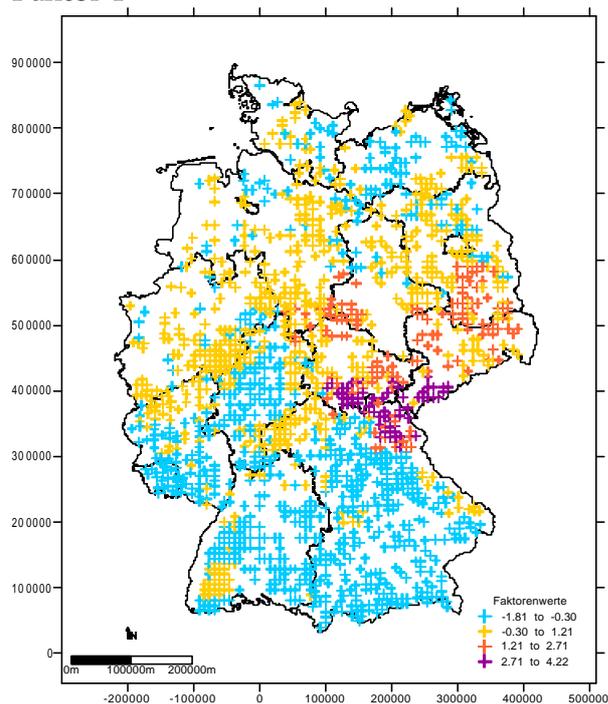
**Faktor 2** (25% Erklärungswert) unterscheidet sich in bezug auf die Ladungsmatrix und dem Erklärungswert von 22 Prozent nicht von jenem des Jahres 1989. Unterschiede weist die räumliche Verteilung auf. Im Vergleich zu 1989 höhere Faktorenwerte sind in Südostbayern zu finden. Vermutlich sind kaliumhaltige Stäube hierfür verantwortlich, die aufgrund einer insgesamt niedrigeren Grundbelastung weiter in den Vordergrund treten. Der **dritte Faktor** (22 % Erklärungswert) wird von reduzierten Stickstoffverbindungen und Gesamtstickstoff geladen. Damit wird auch hier die steigende Bedeutung von Stickstoff bestätigt. Die höchsten Faktorenwerte, die auch den höchsten Eintragsraten entsprechen, sind in Norddeutschland und in geringerem Ausmaß auch in den Kalkalpen und der Eifel zu finden.

Den **vierten Faktor** (14 % Erklärungswert) laden Calcium und Kalium, die vorwiegend aus basischen Stäuben stammen. Die Verbreitungsschwerpunkte der Einträge liegen in Südostbayern, Hessen und in Ostdeutschland.

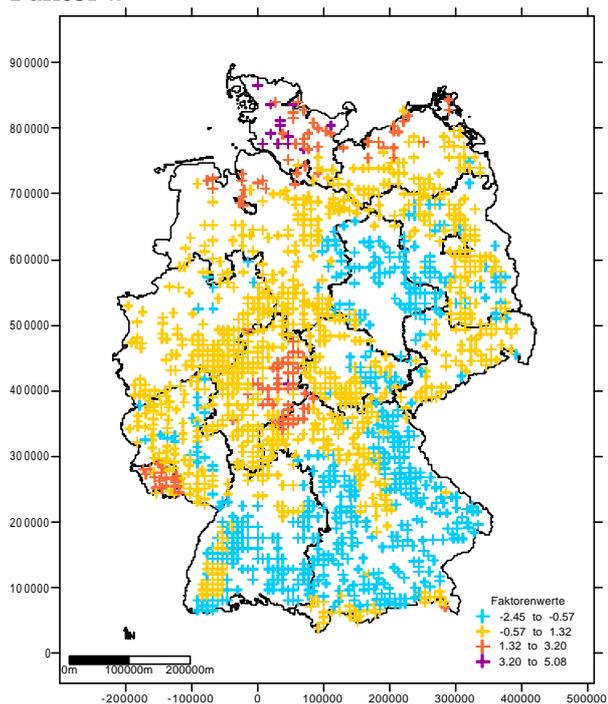
Tab. 6: Faktorenladungsmatrix nach Varimax-Rotation: Charakterisierung der nicht seesalzkorrigierten Gesamtdeposition des Jahres 1993

	Depositionsfaktoren			
	1	2	3	4
pot. Säure	0.96			
SOx-S	0.96			
Ca				0.94
NHy-N			0.99	
NOx-N	0.82			
Na		0.90		
Nges			0.92	
Mg		0.92		
K		0.66		0.55

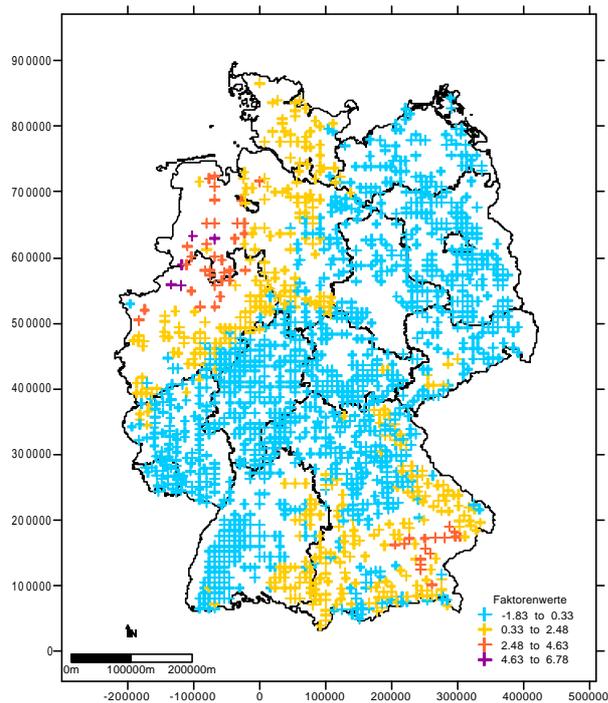
Faktor 1



Faktor 2



Faktor 3



Faktor 4

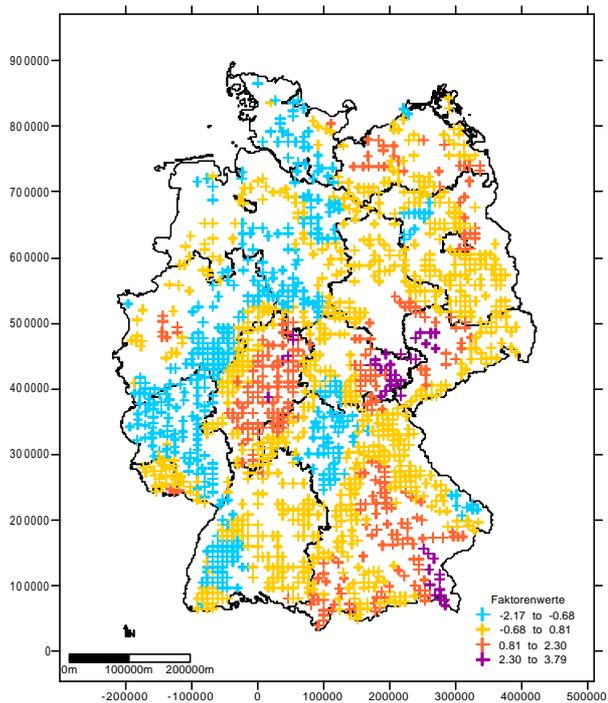


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Faktorenwerte 1 bis 4 auf der Grundlage nicht seesalzkorrigierter Daten der Gesamtdeposition 1993, Darstellung von Quartilen

BEZIEHUNGSGEFÜGE DER GESAMTDEPOSITION (NICHT SEESALZKORRIGIERT) DES JAHRES 1995

Der Erklärungswert der vier extrahierten Faktoren (Varimax-Rotation) beträgt insgesamt 98 Prozent (Tab. 7). Davon entfallen auf **Faktor 1** 27 Prozent. Dieser wird durch Kalium, Calcium sowie oxidierten Stickstoff und Gesamtstickstoff geladen. Besonders hohe Faktorenladungswerte sind im Saarland, südlichem Bayern sowie Niedersachsen und im Schwarzwald zu finden (Abb. 6).

Einen ähnlich hohen Erklärungswert weist **Faktor 2** auf, der von SO<sub>x</sub>-S, NO<sub>x</sub>-N und potentielle Säure aus Industrie und Verkehr geprägt ist. Ein Schwerpunkt liegt im südlichen Ostdeutschland und den Rändern des Bayrischen Waldes.

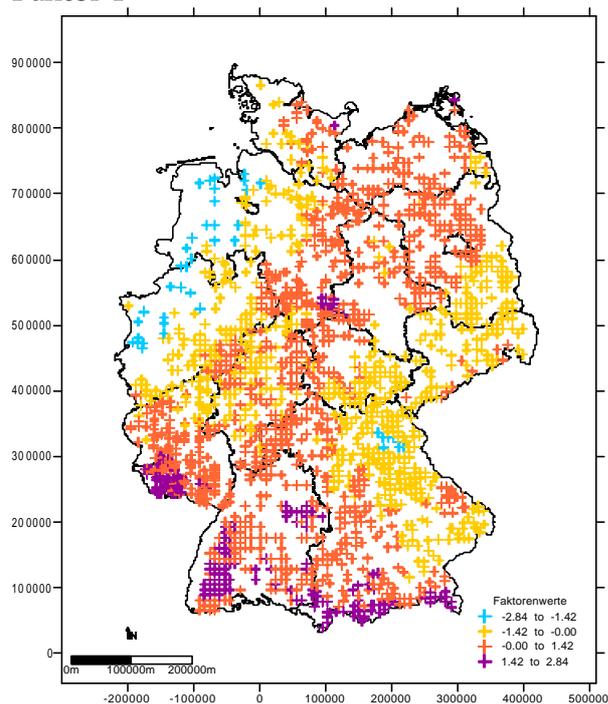
Die meeresbürtigen Elemente (Na, Mg) **charakterisieren Faktor 3**, dessen Erklärungswert 23 Prozent beträgt. Dementsprechend nehmen die Ladungswerte der Faktoren von Nordwesten nach Südosten ab.

Landwirtschaftliche Einträge an reduziertem Stickstoff und Gesamtstickstoff laden den **vierten Faktor**, der 21 Prozent des Depositionsgeschehens prägen. Ähnlich wie in den vorherigen Jahren liegen die Schwerpunkte in Nordwestdeutschland (Münsterland) und im südöstlichen Bayern.

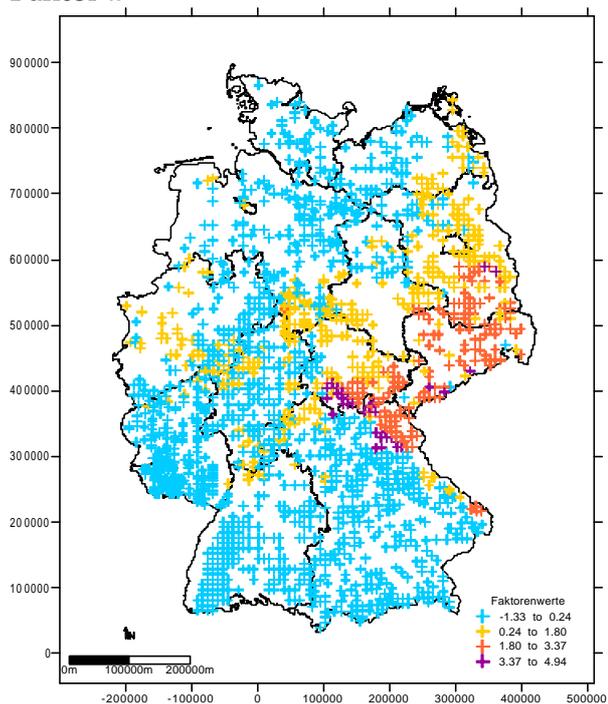
Tab. 7: Faktorenladungsmatrix nach Varimax-Rotation: Charakterisierung der nicht seesalzkorrigierten Gesamtdeposition des Jahres 1995

	Depositionsfaktoren			
	1	2	3	4
pot. Säure		0,86		
SO <sub>x</sub> -S		0,96		
Ca	0,78			
NHy-N				0,85
NO <sub>x</sub> -N	0,64	0,58		
Na			0,92	
Nges	0,51			0,69
Mg			0,86	
K	0,83			

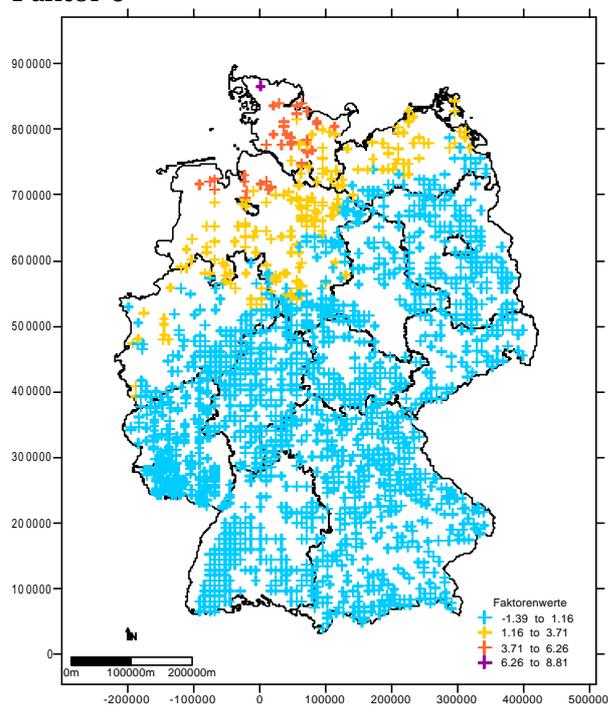
Faktor 1



Faktor 2



Faktor 3



Faktor 4

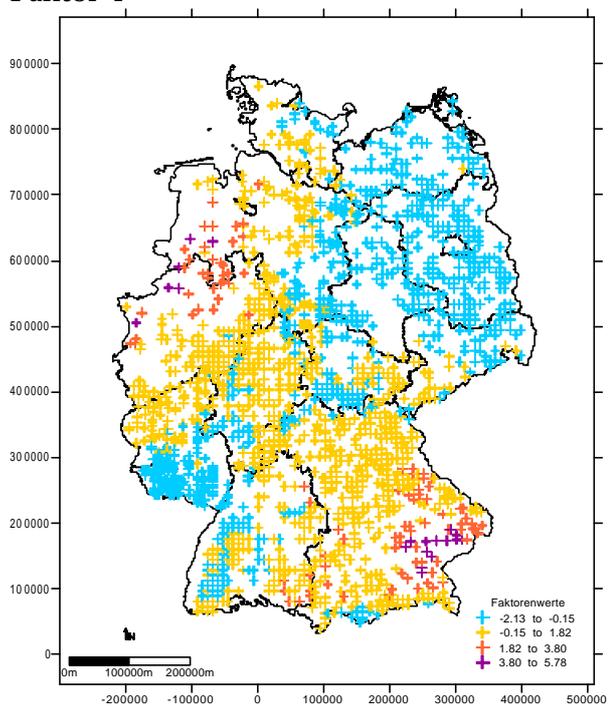


Abb. 6: Räumliche Verteilung der Faktorenwerte 1 bis 4 auf der Grundlage nicht seesalzkorrigierter Daten der Gesamtdeposition 1993, Darstellung von Quartilen

## ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER FAKTORENANALYSE

Die Faktorenanalyse ermöglichte eine gute Charakterisierung des Depositionsgeschehens an den untersuchten Standorten.

Anhand der dargestellten Ergebnisse der Gesamtdeposition konnte gezeigt werden, dass die Deposition von Schwefel stark mit Säureeinträgen korreliert und beide einen hohen Erklärungswert bezüglich der gesamten Beziehungsstruktur der atmosphärischen Deposition des Jahres 1989 aufweisen. Stickstoffverbindungen als Säurebildner kommen hingegen nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Sie tragen nichts zur Ladung des Faktor 1 der Gesamtdeposition bei, der stark mit den Säureeinträgen korreliert. Einen ebenfalls hohen Erklärungswert haben die Einträge marinen Ursprungs, die in weiten Teilen des Nordwestdeutschen Tieflandes dominieren.

Wie zu erwarten, unterscheiden sich Gesamt-, Trockene und Nasse Deposition bezüglich der Faktorenladungsmatrix. Bei der Nassen Deposition sind andere Eintragsprozesse entscheidend. Es korrelieren als Faktor 1 Stickstoffverbindungen mit Protoneneinträgen, d.h. bei der Nassen Deposition spielen sauer wirkende Stickstoffverbindungen eine grössere Rolle als bei der Trockenem und bei der Gesamtdeposition. Die Beziehung der Elemente untereinander verändert sich deutlich ab 1993. Oxidierte Schwefel- und Stickstoffverbindungen werden gemeinsam deponiert. Basen werden seit 1993 eher mit Stickstoff oder, falls Seaspray als Quelle in Frage kommt, als Partikel deponiert.

### Ableitung von Depositionstypen der Gesamtdeposition des Jahres 1989 (Clusteranalyse)

Während im vorangegangenen Kapitel die Beziehungsstruktur der Deposition im Vordergrund stand, wird nun mittels Clusteranalyse nach Gruppen mit ähnlicher Depositionssituation gesucht. Bei dieser Methode können gleichzeitig alle Eigenschaften, d.h. in diesem Fall alle Faktorenwerte zur Gruppenbildung herangezogen werden. Aufgrund des umfangreichen Datenmaterials fand die quick-Clusteranalyse Verwendung (vgl. Kap. 2.4.1). Zusätzlich zu den Eintragsraten des Jahres 1989 der einzelnen Elemente wurden Quotienten, deren Bedeutung in der Literatur belegt sind, verwandt (Gehrmann et al. 2001). Sie erleichtern die Interpretation der Cluster. Zum Beispiel kennzeichnet das Verhältnis von Gesamtstickstoff zu reduziertem Stickstoff die Höhe der landwirtschaftlichen Aktivität als Quelle der Stickstoffeinträge. Die abgeleiteten Depositionscluster finden später Eingang in die Diskriminanzanalyse mit Hilfe derer die eigentlichen Waldzustandstypen ermittelt werden.

Mittels Clusteranalyse lassen sich auf der Grundlage von Faktorenwerten 6 Gruppen abgrenzen. Diesen Gruppen können charakteristische Eintragsraten zugeordnet werden (Tab. 8). Die räumliche Verteilung der Gruppen ist kartografisch dargestellt (Abb. 7). Es ergeben sich folgende Depositionstypen:

**Depositionstyp 1** ist durch eine mittlere Belastung durch atmosphärische Einträge charakterisiert. Die Werte für die einzelnen Kennwerte liegen im Bereich des Medians aller Standorte. Zum überwiegenden Anteil verteilt sich diese Gruppe von Südwest nach Nordost in einem breiten Band in der Mitte der Bundesrepublik.

Räumlich gesehen schliesst **Depositionstyp 2** in südöstlicher Richtung (Ostdeutsches Tiefland) an dieses Gebiet an. Er weist aber doppelt so hohe Säureeinträge und fast dreimal so hohe Schwefeleinträge auf. Auch die Deposition von Calcium ist erhöht. Aufgrund der grösseren Entfernung vom Meer sind die Natriumeinträge geringer. Die

Stickstoffdeposition ist zu gleichen Teilen aus reduziertem und oxidiertem Stickstoff zusammengesetzt.

Deutlich verschieden davon ist **Depositionstyp 3**, der durch geringe Schwefel-, Natrium- und Säureeinträge gekennzeichnet ist. Charakteristisch sind im Vergleich zu anderen Standorten zudem hohe Einträge an reduziertem Stickstoff bei gleichzeitig niedrigen Baseneinträgen. Das Verhältnis von Schwefel- zu Stickstoffverbindungen ist ausgeglichen. Es handelt sich also um ein Cluster, das durch Emissionen aus der Landwirtschaft geprägt ist. Dementsprechend ist diese Gruppe im Nordwestdeutschen Tiefland und in den ländlichen Räumen Bayerns zu finden.

Ein breites Band im Bereich des Norddeutschen Tieflandes mit Verlauf von Nordosten nach Südwesten, bildet das Verbreitungsgebiet des **Depositionstyps 4**. Er ist durch hohe Natrium- und Magnesiumeinträge marinen Ursprungs gekennzeichnet. Auffällig ist auch die hohe  $\text{NH}_y$ -Stickstoffdeposition an diesen Standorten. Daher kann angenommen werden, dass neben dem Meer als Quelle der Deposition auch die Landwirtschaft eine wichtige Rolle spielt.

Die **Depositionstyp 5** umfasst zwar nur 12 Standorte, da die Eintragungssituation aber extrem ist, würde selbst bei einer Verringerung der Gesamtclusteranzahl auf 3, weiterhin eine Gruppe durch diese Standorte charakterisiert werden. Extrem hohe Einträge von Schwefel-, Stickstoffverbindungen, potentieller Säure und basisch wirkenden Stoffen werden im Gebiet von Erz- und Fichtelgebirge, welche die Gruppe 5 kennzeichnet, erreicht. Die Quotienten aus Gesamtstickstoff zu oxidiertem Stickstoff (65 Prozent) und potentieller Säure zu Schwefelverbindungen (87 Prozent) deuten auf eine extreme Belastung durch Immissionen aus Industrie und Energieumwandlung hin.

**Depositionstyp 6** ist durch insgesamt niedrige Einträge gekennzeichnet. Im Gegensatz zur Gruppe 3 ist der Anteil der oxidierten Stickstoffverbindungen am Gesamtstickstoff höher, ebenso wie die Einträge an Basen. Letztere verbleiben aber unter dem Median aller Standorte. Die räumliche Verteilung des Clusters ist auf den Süden (Kalkalpen) und den Südwesten, insbesondere die Mittelgebirge, beschränkt.

Tab. 8: Kennwerte der berechneten Cluster für die Gesamtdeposition [ $\text{mol} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ]

Typ	Statistik	Ca	Ca_ ssc	K	K_ ssc	Mg	Mg_ ssc	Na	Nges	NOx N	NH <sub>y</sub> .N	pot. acid	S/N	SOx_ S
1 n=637	Median	650	619	91	77	331	95	669	1999	966	1055	4559	1.3	2606
	Min.	239	227	58	51	109	0	295	1078	468	457	2395		1108
	Max.	1299	1269	126	114	502	278	1735	2709	1377	1563	7824		5497
2 n=285	Median	1159	1147	98	87	430	262	581	2421	1112	1297	9829	3.2	7494
	Min.	413	397	72	63	221	0	368	1479	634	845	6129		3835
	Max.	1572	1563	133	124	564	384	1582	3392	1708	2084	15358		12554
3 n=284	Median	477	455	97	90	168	45	409	2569	915	1599	4546	0.7	1915
	Min.	244	233	67	61	109	0	276	1975	691	1169	3122		1181
	Max.	1296	1273	144	128	471	181	1996	4973	1461	3803	8822		5015
4 n=193	Median	621	526	127	90	482	0	1864	2753	1189	1541	5733	1.1	3230
	Min.	394	294	100	65	339	0	1094	1956	612	1023	3745		2008
	Max.	1546	1504	223	170	868	210	4362	4394	1721	3171	8309		5357
5 n=12	Median	1972	1959	160	148	705	503	787	4009	2588	1378	19824	4.0	15827
	Min.	1724	1708	144	132	598	416	694	3559	2271	1258	17816		14337
	Max.	2259	2243	173	161	794	573	872	4470	2845	1687	21512		17127
6 n=391	Median	558	528	104	93	273	104	622	2280	1274	1020	4906	1.2	2693
	Min.	311	286	74	64	140	0	370	1684	998	572	3082		1231
	Max.	1399	1371	180	163	628	305	1556	3725	2224	1949	8648		5950
Mittel	Median	632	595	99	86	347	89	614	2288	1087	1205	5078	1.2	2795
	Min.	239	227	58	51	109	0	276	1078	468	457	2395		1108
	Max.	2259	2243	223	170	868	573	4362	4973	2845	3803	2151		1712
											2		7	

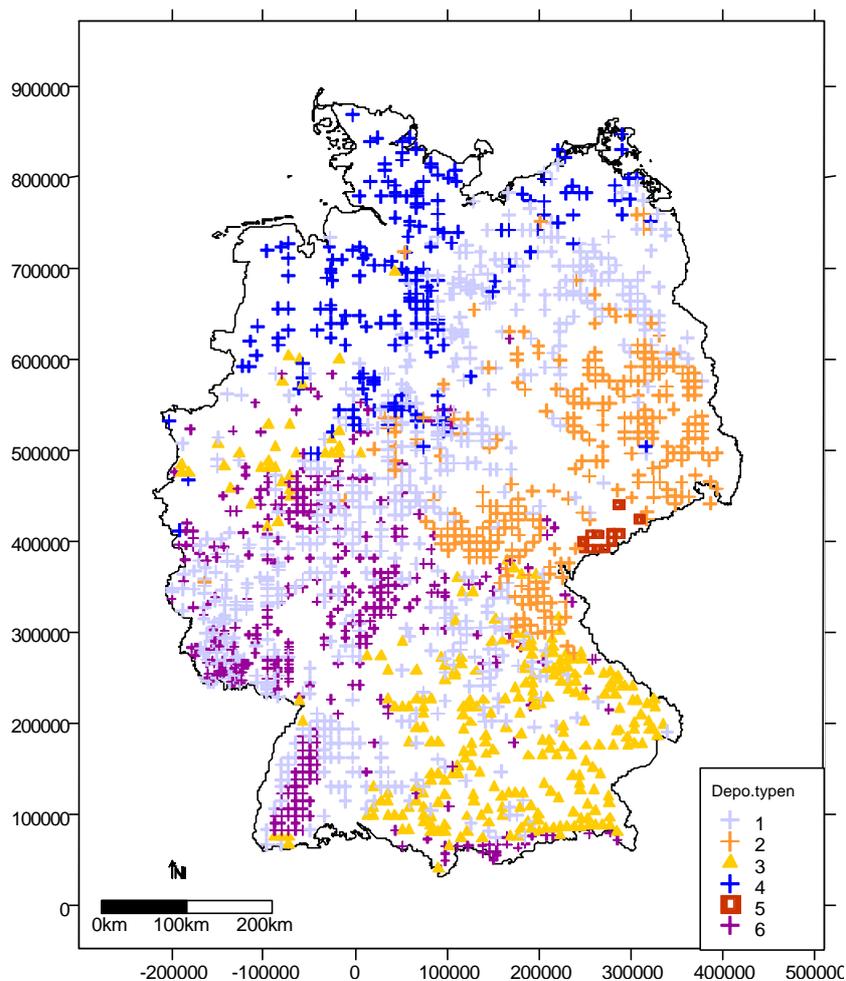


Abb. 7: Regionale Verteilung der Depositionstypen des Jahres 1989.

#### ZEITLICHE DYNAMIK DES DEPOSITIONSGESCHEHENS VON 1989 BIS 1995

Im folgenden Abschnitt werden die Veränderungen des Depositionsgeschehens von 1989 bis 1995 beschrieben.

#### VERÄNDERUNG DER MITTLEREN EINTRAGSRATEN VON 1989 BIS 1995

Die Mittelwerte der Depositionsraten zeigen für alle Komponenten eine Abnahme von 1989 bis 1995. Je nach Element unterscheidet sich diese jedoch deutlich. Während Schwefelverbindungen, Calcium und potentielle Säure starke Rückgänge verzeichnen, ist für Stickstoff eine geringe Abnahme, bzw. im Fall von Ammoniumstickstoff seit 1993 ein Stagnieren auf hohem Niveau zu erkennen. Regional kann es zu Verschiebungen kommen. Der Rückgang der Einträge hängt – wie die Entwicklung der Natriumeinträge vermuten lassen, zum einen von der Höhe der Niederschläge ab, zum anderem von den tatsächlichen Emissionen, die bei der Berechnung der Gesamtdeposition als Eingangsparameter verwendet wurden.

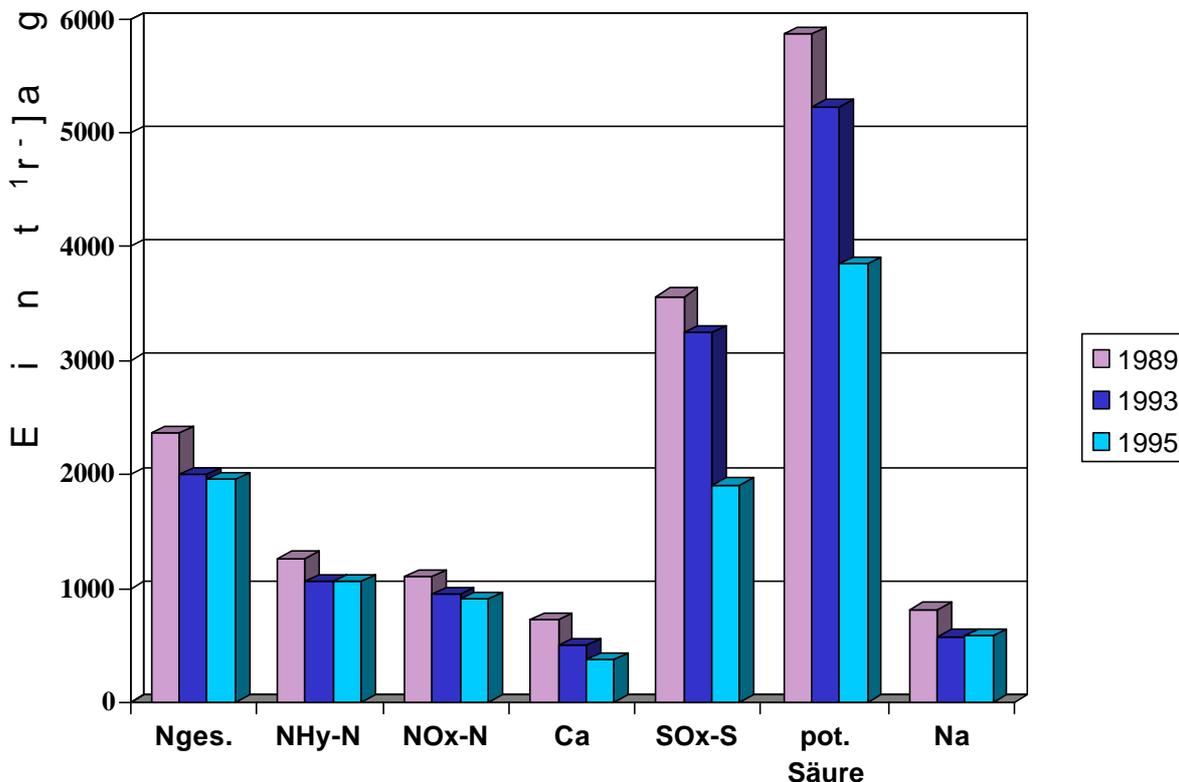


Abb. 8: Veränderung der mittleren Eintragsraten von 1989 bis 1995

#### VERÄNDERUNGEN DES DEPOSITIONSGESCHEHENS (FAKTORENANALYSE)

Die Emissionssituation von 1989 bis heute hat sich jedoch dramatisch verändert (Gauger et al. 1997), so sind z.B. die Schwefeleinträge deutlich zurückgegangen. Daher wird sich auch das Eintragsgeschehen und damit auch die Faktorenladungsmatrix insgesamt verändert haben. Die Ergebnisse der Daten aus dem Jahr 1993 bestätigen dies. Im Jahr 1993 laden neben Schwefelverbindungen mit Säureeinträgen zusätzlich oxidierte Stickstoffverbindungen den Faktor 1, der den höchsten Erklärungswert der Gesamtvariabilität der Depositionsdaten aufweist. Vermutlich wird die Bedeutung von Stickstoff- relativ zu Schwefeleinträgen als anthropogen bedingter Stressfaktor für Waldökosysteme noch weiter zunehmen. Gleichzeitig ist die Bedeutung basischer Stäube (K, Ca) zurückgegangen. Sie erklären als Faktor 4 nur noch einen geringen Teil der Gesamtvariabilität. Die Ergebnisse des Jahres 1995 bestätigen die abnehmende Bedeutung von Schwefelverbindungen für das Depositionsgeschehen. Der Faktor 1 wird von basischen Kationen und Stickstoffverbindungen, die vorwiegend aus Industrie und Verkehr stammen geladen. Erst als zweiter Faktor treten Schwefelverbindungen und potentielle Säure gemeinsam mit oxidiertem Stickstoff in Erscheinung. Stickstoffverbindungen, deren Quellen landwirtschaftliche Aktivität darstellen, laden den vierten Faktor. Sie besitzen aber immerhin noch einen Erklärungswert von 20 Prozent.

## ZUORDNUNG ZU DEPOSITIONSTYPEN VON 1989 BIS 1995 MITTELS DISKRIMINANZANALYSE

Mit Hilfe der folgenden Analyse von Depositionsraten sollten einerseits die Veränderung der Depositionstypen von 1989 bis 1995 beschrieben werden, andererseits dienten die Depositionstypen als Eingangsparameter zur Verknüpfung mit ausgewählten Level II-Standorten (siehe Kap.6). Aus diesem Grund wurden solche Eingangsparameter ausgewählt, die auch für Level II-Plots zur Verfügung standen. Es wurden die potentielle Säure, SO<sub>x</sub>-S, N<sub>ges.</sub> und das SO<sub>x</sub>-S/N<sub>ges.</sub>-Verhältnis der Gesamtdosition sowie NH<sub>4</sub>-N, Na und Mg der Nassen Deposition verwendet. Als Folge der modifizierten Eingangsparameter wurden Cluster 1 und 6 zusammengelegt, da sie sich anhand der modifizierten Daten aus den Jahren 1993 und 1995 kaum unterscheiden. Um zu testen wie gut die modifizierten Daten mit den Ursprungsdaten des Jahres 1989 übereinstimmen, wurden die Daten des Jahres 1989 mit in die Analyse einbezogen.

Bei der Diskriminanzanalyse konnten 78% der Standorte des Jahres 1989 mit modifizierten Einträgen richtig zugeordnet werden. Stickstoffbetonte Standorte sind unterrepräsentiert. In allen Jahren liegt ein Schwerpunkt bei den wenig belasteten Standorten. Cluster 5 mit extrem hohen Einträgen an Schwefelverbindungen und potentieller Säure ist ab 1993 nicht mehr vorhanden. Cluster 2 mit hohen Einträgen an Schwefelverbindungen und potentieller Säure nimmt ab 1993 deutlich ab. Cluster 3 mit hohen Stickstoffeinträgen weist keinen Trend auf. Cluster 4 (meeresbürtige Einträge) kann 1993 nur wenigen Standorten zugeordnet werden.

Tab. 9: Dynamik der Zuordnung zu den Depositionstypen auf der Grundlage der Zuordnung von 1989

Depositionstyp	Jahr			
	Ursprung 1989	1989	1993	1995
<b>1 und 6</b>	1028	1272	1703	1598
<b>2</b>	285	237	35	17
<b>3</b>	284	45	24	51
<b>4</b>	193	236	49	137
<b>5</b>	12	12	0	0

### Beziehung zwischen Ernährungszustand und atmosphärischer Deposition

Die Korrelationsanalyse der Ernährungs- und Depositionsfaktorenwerte, bietet die Möglichkeit, Beziehungen zwischen Eintragsgeschehen und Ernährungszustand der Bäume zu erkennen. Diese Analyse konnte für Fichten-, Kiefern- und Buchenbestände durchgeführt werden, an denen Nadel- bzw. Blattspiegelwerte als Indikator für den Ernährungszustand vorlagen. Zur besseren Übersicht ist die Faktorenladungsmatrix der Ernährungsdaten (Riek & Wolff 1999) in Anhang 14 bis 16 noch einmal dargestellt.

#### FICHTE

Die Ernährungsfaktorenwerte (im Anhang 14 bis 16 oder Riek & Wolff 1999) der Fichte weisen vielfältige Beziehungen zu den Depositionsfaktorenwerten der Gesamteinträge auf. Emissionen aus Industrie und Energieumwandlung, die zur Deposition von  $\text{SO}_x$ -S, Ca und potentieller Säure (**Depositionsfaktor 1**) führen, zeigen positive Auswirkungen auf die Calciumversorgung (Ernährungsfaktor 1), Magnesium- bzw. Manganversorgung (Ernährungsfaktor 2) und Schwefel- bzw. Stickstoffversorgung (Ernährungsfaktor 4) der Fichte (Tab. 10/Abb. 9 - 12). Dies deutet bezüglich der Calcium- und Schwefelversorgung auf einen direkten Zusammenhang zwischen hohen Einträgen und guter Versorgung hin. Bei der Magnesium- und Manganversorgung spielt wahrscheinlich die Wirkung der Deposition auf die Nährstoffverfügbarkeit im Boden eine wichtigere Rolle. Dies bestätigt die von Riek und Wolff (1999) ermittelte Abhängigkeit der Mg-Verfügbarkeit vom Bodenversauerungsstatus. Die vermutlich aufgrund der Einträge verstärkt versauerten Böden bedingen andererseits aber eine bessere Mn-Versorgung aufgrund der besseren Mn-Verfügbarkeit im Boden.

Kaliumeinträge und marine Einträge (Na, Mg), die den **Depositionsfaktor 2** laden, zeigen eine gute Korrelation mit der Stickstoff- und Schwefelernährung (Ernährungsfaktor 4) und in geringerem Masse mit der Magnesiumversorgung (Ernährungsfaktor 2). Eine Ursache für die Zusammenhänge zwischen Schwefel- bzw. Calciumernährung und Kaliumeinträgen könnten die hohen Einträge basenhaltiger Flugaschen und Schwefel in Ostdeutschland sein. An diesem Beispiel wird aber auch deutlich, dass nicht alle gefundenen Korrelationen kausal durch das Depositionsgeschehen erklärt werden können.

**Depositionsfaktor 3** der zum überwiegenden Anteil die Stickstoffeinträge aus Industrie und Verkehr aber auch zu geringen Anteilen aus der Landwirtschaft charakterisiert, steht in Beziehung zu den Ernährungsfaktoren 2, 3 und 4. Dies deutet daraufhin, dass die Stickstoffeinträge entweder in direkter Beziehung zur N-Versorgung (Ernährungsfaktor 4) stehen, oder aber indirekt über die Wechselwirkung von Stickstoffeinträgen auf den Boden. Damit wirken sich erhöhte N-Einträge negativ auf die Calcium- und positiv auf die Manganversorgung aus. Dies deutet auf die versauernde Wirkung von N-Einträgen im Boden hin, in deren Folge die Magnesiumverfügbarkeit sinkt und die Manganverfügbarkeit steigt.

Nur sehr schwache Beziehungen weisen reduzierte Stickstoff- und Kaliumeinträge (Depositionsfaktor 4) aus der landwirtschaftlichen Produktion zu allen Ernährungsfaktoren auf (Abb.8).

Tab. 10: Korrelationskoeffizienten zwischen Baumernährungs- und Depositionsfaktoren (Fichte)  
(P= Irrtumswahrscheinlichkeit)

Ernährungsfaktoren		Depositionsfaktoren			
		1 SOx-S, pot.Säure, Ca	2 Na, Mg, K	3 NOx-N, Nges.	4 NHy-N, K
<b>1</b>	Ca	<b>0.23</b>	<b>-0.16</b>	-0.08	-0.13
P=		0.00	0.00	0.13	0.01
<b>2</b>	Mg, Mn	0.02	0.12	<b>-0.20</b>	0.03
P=		0.77	0.03	0.00	0.60
<b>3</b>	K	-0.14	0.10	<b>0.18</b>	-0.04
P=		0.01	0.07	0.00	0.42
<b>4</b>	N, S	<b>0.33</b>	<b>0.43</b>	<b>0.21</b>	0.12
P=		0.00	0.00	0.00	0.02
<b>5</b>	P	-0.10	0.27	0.05	-0.02
P=		0.06	0.06	0.3	0.71

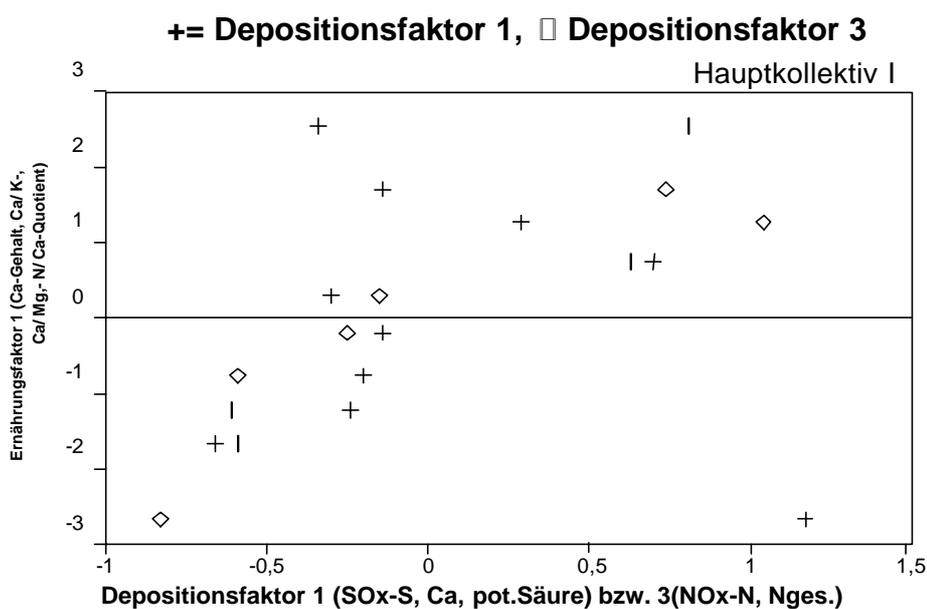


Abb. 9: Beziehung zwischen Depositionsfaktor 1 und gruppiertem Ernährungsfaktor 1 bei der Fichte auf carbonatfreien Böden (Hauptkollektiv I)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hauptkollektiv I = carbonatfreie Böden

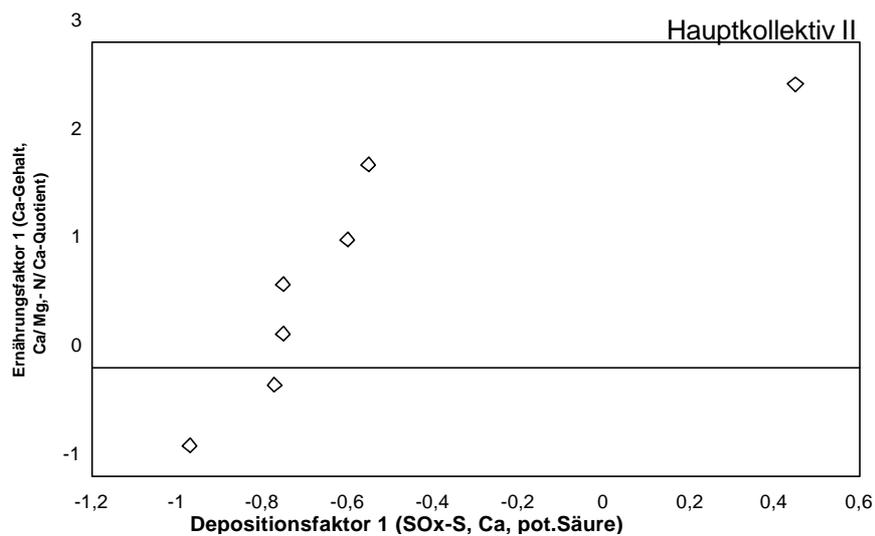


Abb. 10: Beziehung zwischen Depositionsfaktor 1 und gruppiertem Ernährungsfaktor 1 bei der Fichte auf carbonatreichen Böden (Hauptkollektiv II)<sup>2</sup>

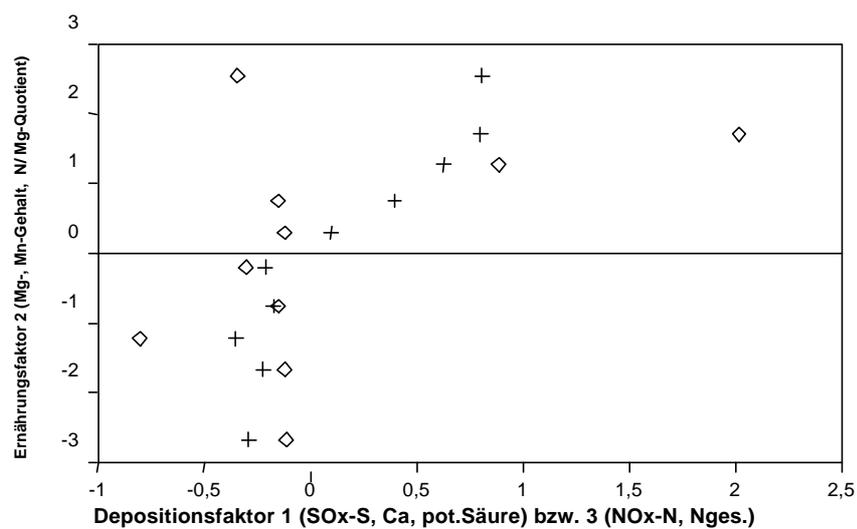


Abb. 11: Beziehung zwischen Depositionsfaktor 1 bzw. 3 und gruppiertem Ernährungsfaktor 2 bei der Fichte auf carbonatfreien Böden (Hauptkollektiv I)

<sup>2</sup> Hauptkollektiv II = carbonathaltige Böden

+ = Depositionsfaktor 1 , ⊠ = Depositionsfaktor 3

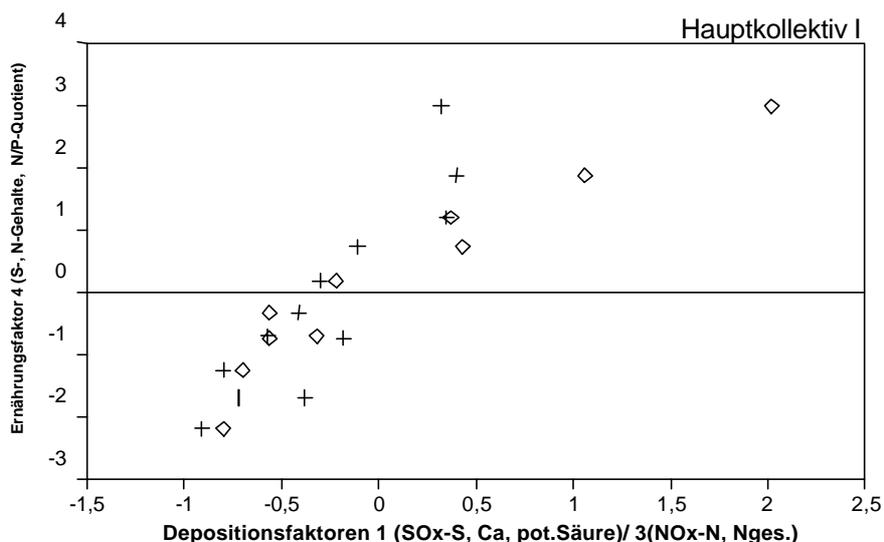


Abb. 12: Beziehung zwischen Depositionsfaktor 1 bzw. 3 und gruppiertem Ernährungsfaktor 4 bei der Fichte auf carbonatfreien Böden (Hauptkollektiv I)

+ = Depositionsfaktor 1 , ⊠ = Depositionsfaktor 3

#### KIEFER

Im Gegensatz zur Baumart Fichte kann für die Kiefer keine Beziehung zwischen den industriell bedingten Eintragsraten (**Depositionsfaktor 1**) und dem Ernährungsfaktor 1, der für die Calciumernährung steht, festgestellt werden. Alle weiteren Ernährungsfaktorenwerte korrelieren jedoch mit jenen des Depositionsfaktors 1. Insbesondere die K- und S- Ernährung (Ernährungsfaktor 4) weisen zum Depositionsfaktor 1 eine sehr gute Korrelation auf (Abb.13). Hauptursache werden vermutlich die hohen Schwefel- und Kaliumeinträge in Südostdeutschland sein.

Erhöhte Kaliumeinträge und Einträge marinen Ursprungs (Na, Mg), die den **Depositionsfaktor 2** laden, korrelieren stark mit der Mg- und N-Versorgung (Ernährungsfaktor 3).

Einträge oxidierter Stickstoffverbindungen und Gesamtstickstoffs (**Depositionsfaktor 3**) aus Industrie und Verkehr zeigen die zu erwartende positive Beziehung zur N-Ernährung der Kiefer (Ernährungsfaktor 3) (Abb. 14).

Anders als bei der Fichte haben Kalium- und  $\text{NH}_y$ -Einträge, die den **Depositionsfaktor 4** laden, einen Einfluss auf die N-Ernährung der Kiefer (Ernährungsfaktor 2).

Tab. 11: Korrelationskoeffizienten zwischen Baumernährungs- und Depositionsfaktoren (Kiefer)  
(P= Irrtumswahrscheinlichkeit)

Ernährungs- faktoren		Depositionsfaktoren			
		1	2	3	4
		SOx-S, pot.Säure, Ca	Na, Mg, K	NOx-N, Nges.	NHy-N, K
<b>1</b>	Ca	0.09	0.02	0.07	-0.04
P=		0.15	0.75	0.30	0.51
<b>2</b>	Mg	<b>-0.22</b>	-0.12	0.04	<b>0.29</b>
P=		0.00	0.05	0.48	0.00
<b>3</b>	N	<b>-0.20</b>	<b>0.46</b>	<b>0.20</b>	0.06
P=		0.00	0.00	0.00	0.36
<b>4</b>	K, S	<b>0.44</b>	0.17	-0.07	<b>-0.22</b>
P=		0.00	0.01	0.28	0.00
<b>5</b>	P, Mn	0.15	0.14	-0.16	0.00
P=		0.02	0.02	0.01	0.99

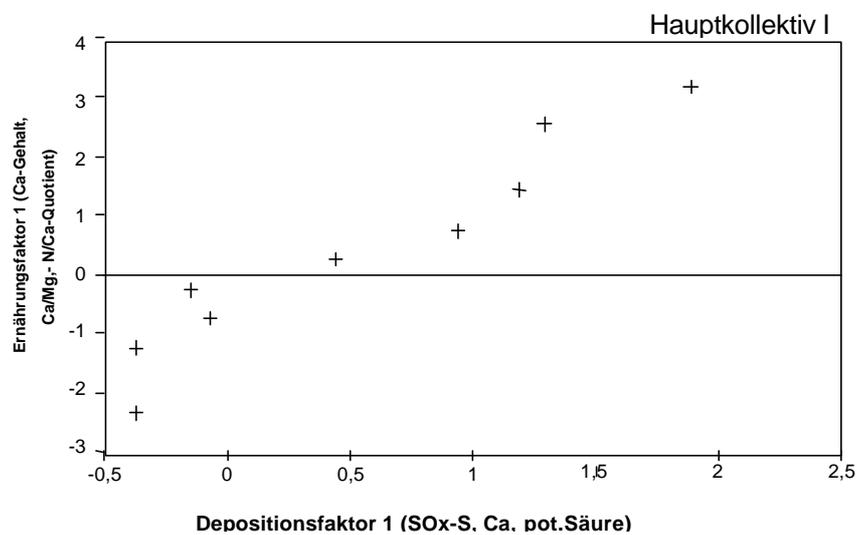


Abb. 13: Beziehung zwischen Depositionsfaktor 1 und gruppiertem Ernährungsfaktor 1

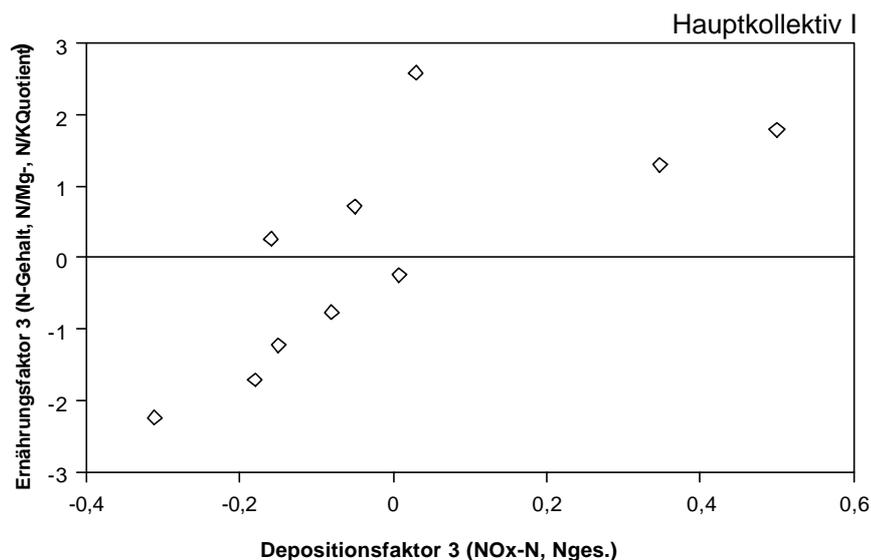


Abb. 14: Beziehung zwischen Depositionsfaktor 3 und gruppiertem Ernährungsfaktoren 3

#### BUCHE

Die Ernährungsfaktorenwerte der Buche (Riek & Wolff 1999) weisen zu einigen Depositionsfaktorenwerten signifikante Beziehungen auf. Industrie, Energieumwandlung und Verkehr, die zu erhöhter Deposition von  $\text{SO}_x\text{-S}$ , Ca, potentieller Säure bzw. Nges und  $\text{NO}_x\text{-N}$  (**Depositionsfaktoren 1 und 2**) führen, zeigen signifikante Auswirkungen auf zwei Ernährungsfaktoren (2, 4), welche die Mg- bzw. P- und Mn-Versorgung wiedergeben (Tab. 12). Die gefundenen Zusammenhänge deuten auf eine schlechtere Mg-Versorgung an Standorten mit hohen Einträgen von sauer wirkenden Verbindungen hin, was die von Riek und Wolff (1999) ermittelte Abhängigkeit der Mg-Verfügbarkeit vom Bodenversauerungsstatus bestätigt. Die vermutlich aufgrund der Einträge verstärkt versauerten Böden bedingen andererseits aber eine bessere Mn-Versorgung aufgrund der besseren Mn-Verfügbarkeit im Boden. Ein direkter Einfluss der atmosphärischen Deposition auf die N- oder S-Ernährung konnte bei der Buche nicht nachgewiesen werden. Dies liegt vermutlich an der geringen räumlichen Variation der Buchenstandorte in der BZE-Stichprobe.

Tab. 12: Korrelationskoeffizienten zwischen Baumernährungs- und Depositionsfaktoren (Buche)  
(P= Irrtumswahrscheinlichkeit)

Ernährungs- faktor		Depositionsfaktoren			
		1	2	3	4
		SOx-S, Ca pot.Säure,	Na, Mg, K	NOx-N, N_ges	NHy-N, K
1	Ca	0.02	-0.09	-0.05	-0.06
P=		0.89	0.48	0.67	0.62
2	Mg	<b>-0.40</b>	<b>0.33</b>	0.12	0.19
P=		0.00	0.01	0.37	0.15
3	K	0.04	-0.01	0.26	-0.06
P=		0.73	0.96	0.04	0.66
4	P, Mn	<b>0.36</b>	-0.35	-0.46	-0.09
P=		0.00	0.00	0.00	0.50
5	N, S	0.00	0.10	-0.11	0.10
P=		0.98	0.44	0.38	0.42

#### FAZIT

Auf der Grundlage der Faktorenwerte konnten zum Teil deutliche Beziehungen zwischen dem Ernährungszustand der untersuchten Baumarten und der Depositionssituation nachgewiesen werden. Insbesondere atmosphärische Einträge, die ihren Ursprung in der industriellen Produktion haben, wirken sich auf die Baumernährung aus.

Das Wirkungsgefüge in Ökosystemen spielt bei der Bewertung des Einflusses der atmosphärischen Deposition eine ebenso wichtige Rolle. So sind nicht nur die Eintragsraten eines Stoffes entscheidend, sondern auch dessen Wechselwirkungen im Boden mit anderen Elementen. In bezug auf Magnesium konnte z.B. die bereits im Abschlussbericht der 1. Projektphase anhand der Ernährungs- und Bodenzustandsdaten abgeleiteten Wechselwirkung zwischen den Ökosystemkompartimenten bestätigt werden. Riek und Wolff (1999) stellten fest, dass der alleinige Einfluss der Mg-Vorräte auf die Baumernährung indes nicht nachweisbar ist. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass die Bodenversauerung, bedingt durch anthropogene Säureinträge (Indikatoren: Basensättigung, Schwefelgehalte in Fichtennadeln), zu einer instabilen Mg-Versorgung führt, welche sich in sichtbaren Schadsymptomen wie Vergilbung und Nadelverlust äussert.

Die Ergebnisse können sich in bezug auf einzelne Baumarten deutlich voneinander unterscheiden. So liessen sich nur bei der Fichte Zusammenhänge zwischen der Calciumernährung und der atmosphärischen Ca-Deposition finden. Auffällig ist bei der Buche die fehlende Korrelation zwischen Stickstoff- bzw. Schwefelernährung und der atmosphärischen Deposition, die an Fallstudien wie Zierenberg und Bornhöved (Eichhorn 1995, Wellbrock in prep. 2001) belegt werden konnten.

Ursache für die baumartenabhängige Stärke der Beziehung zwischen Depositionsgeschehen und Ernährungszustand ist zum einen die ungleichmässige räumliche Verteilung der

Baumarten. So kommen z.B. Kiefernbestände gehäuft im Ostdeutschen Tiefland vor, wo basenhaltige Flugaschen (K, Ca) und Schwefelverbindungen das Eintragungsgeschehen prägen. Sie sind aber im Nordwestdeutschen Tiefland mit hohen Einträgen marinen Ursprungs (Na, Mg) kaum vertreten. Dies lässt sich auch anhand der unterschiedlichen Häufigkeitsverteilung von Na- und Ca- Eintragsraten (Abb. 15 und 16) der beiden Baumarten erkennen. Die Kiefer weist eine zweipfelige Verteilungskurve der Ca-Einträge auf, während jene der Buche ihr Maximum bei geringeren Raten hat, da die Buche in Gebieten mit sehr hohen Na, Ca-Einträgen nicht vorkommt.

Zum anderen spielen nicht erfasste physiologische Reaktionen der Bäume auf ein verändertes Nährstoffangebot eine wichtige Rolle. So finden Veränderungen der Blattmorphologie oder der Blattmasse statt, die Auswirkungen auf die Blatt- bzw. Nadelspiegelwerte haben könnten. Insgesamt ergeben sich jedoch anhand der vorgenommenen Korrelationsanalysen plausible Zusammenhänge zwischen Ernährungszustand und atmosphärischer Deposition.

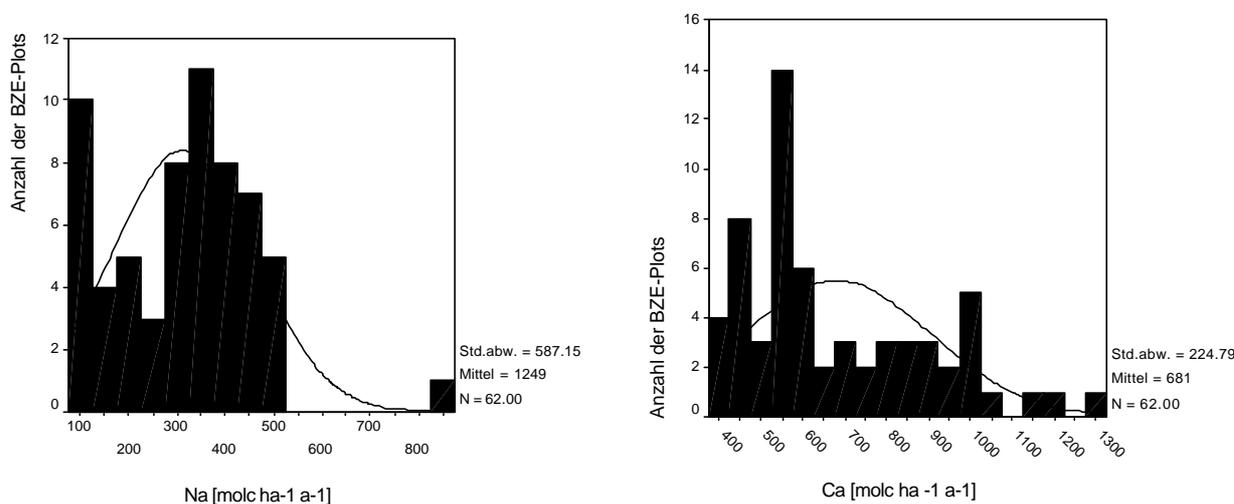


Abb. 15: Na- und Ca-Einträge bei Buchenbeständen an den untersuchten BZE- Punkten

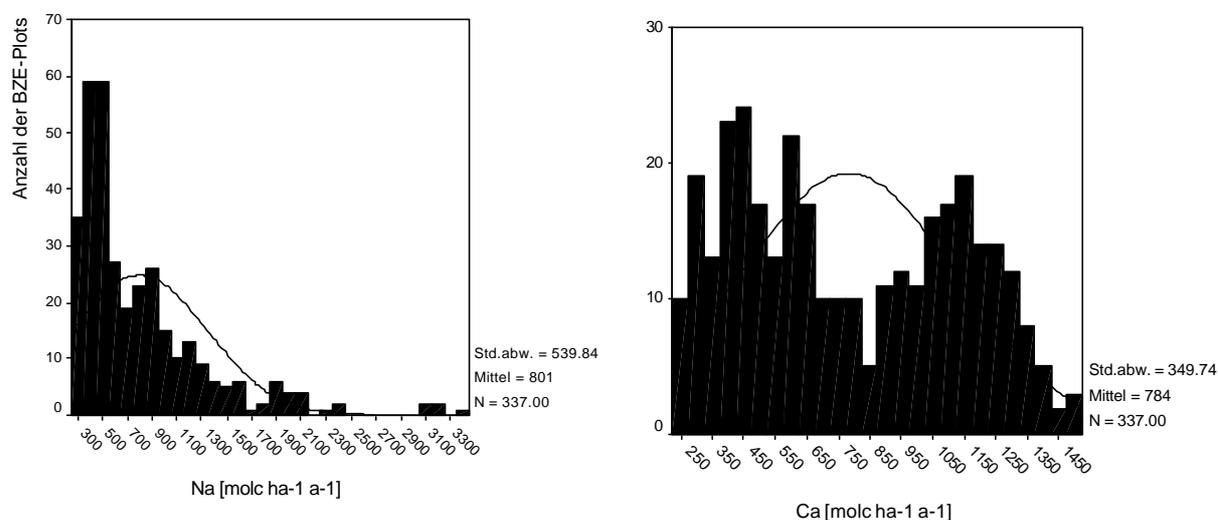


Abb. 16: Na- und Ca-Einträge bei Kiefernbeständen an den untersuchten BZE- Punkten

## Beziehung zwischen Ernährungstyp und Depositionstyp

Mit Hilfe von Kreuztabellen kann für die Baumarten Fichte und Kiefer festgestellt werden, an welchen Erhebungspunkten das Depositionsgeschehen einen besonderen Einfluß auf die Ernährung hat. Zu diesem Zweck werden Kombinationen von Ernährungs- und Depositionscluster gegenübergestellt und berechnet, welche Kombinationen mit - gegenüber dem statistischen Erwartungswert signifikant erhöhter Wahrscheinlichkeit auftreten, d.h. bei welcher Kombination hohe positive, standardisierte Residuen zu finden sind. Die Clusterkombinationen konnten anschliessend räumlich dargestellt werden (Abb. 18 und 19). Die Standorte mit Fichtenbestockung wurden zusätzlich nach carbonatfreien (Hauptkollektiv I) und carbonathaltigen (Hauptkollektiv II) Böden unterteilt. Aufgrund der geringeren Anzahl an Erhebungspunkten war dies bei der Kiefer nicht möglich. Eine Beschreibung der Ernährungscluster nach Riek und Wolff (1999) ist in Anhang 20 und 21 zu finden.

### FICHTE

Auf carbonatfreien Fichtenstandorten ergeben sich enge Beziehungen insbesondere zwischen der Ca-, S-Versorgung (Ernährungscluster 1, 5, 6) und dem Eintragsgeschehen (Depositionscluster 1, 2, 3, 4, 5, 6) (Tab. 13 und 14/ Abb.18). Erhöhte Einträge von Basen, Schwefel und potentieller Säure, durch die die Depositionscluster 2 und 5 gekennzeichnet sind, führen zu einer besseren Nährstoffversorgung der Fichte mit Calcium auf carbonatarmen Standorten (Tab. 11a/Hauptkollektiv I). Dies sind zum einen Standorte in Ostdeutschland mit hohen bis sehr hohen Einträgen aus Industrie und Energieumwandlung und zum anderen BZE-Punkte mit hohen marinen Einträgen in Niedersachsen.

Auf carbonatreichen Erhebungspunkten (Hauptkollektiv II/Tab. 11b) ergeben sich wenige Clusterkombinationen, bei denen atmosphärische Einträge einen Einfluss auf die Ernährung aufweisen. Depositionscluster 6, das gering erhöhte Baseneinträge charakterisiert, kommt häufiger als erwartet gemeinsam mit den Ernährungsclustern 5 und 7 vor, bei denen eine gute Versorgung mit Calcium bzw. Magnesium vorherrscht. Geologisch bedingt sind diese Clusterkombinationen vorwiegend in Süddeutschland (Fränkische und Schwäbische Alb, Kalkalpen) auf Standorten mit Carbonatgestein zu finden.

Tab. 13: Kreuztabelle: Erwartetes Auftreten von Clusterkombinationen und standardisierte Residuen aus tatsächlichem und wahrscheinlichem Auftreten von Kombinationen bei der Baumart **Fichte, Hauptkollektiv I**

Ernährungscluster		Depositionscluster					
		1	2	3	4	5	6
1	Anzahl	4.00	7.00	0.00	1.00	3.00	2.00
	Erwartete Anzahl	4.82	1.55	2.37	1.55	0.74	5.97
	Std. Residuen	-0.37	4.37	-1.54	-0.44	2.64	-1.62
2	Anzahl	3.00	3.00	0.00	2.00	2.00	5.00
	Erwartete Anzahl	4.25	1.37	2.09	1.37	0.65	5.26
	Std. Residuen	-0.61	1.39	-1.45	0.54	1.68	-0.12
3	Anzahl	16.00	0.00	6.00	1.00	1.00	22.00
	Erwartete Anzahl	13.05	4.20	6.41	4.20	1.99	16.14
	Std. Residuen	0.82	-2.05	-0.16	-1.56	-0.70	1.46
4	Anzahl	16.00	0.00	7.00	6.00	0.00	31.00
	Erwartete Anzahl	17.02	5.48	8.37	5.48	2.60	21.06
	Std. Residuen	-0.25	-2.34	-0.47	0.22	-1.61	2.17
5	Anzahl	6.00	9.00	0.00	7.00	3.00	3.00
	Erwartete Anzahl	7.94	2.56	3.90	2.56	1.21	9.83
	Std. Residuen	-0.69	4.03	-1.98	2.78	1.62	-2.18
6	Anzahl	13.00	0.00	15.00	1.00	0.00	8.00
	Erwartete Anzahl	10.50	3.38	5.16	3.38	1.60	12.99
	Std. Residuen	0.77	-1.84	4.33	-1.29	-1.27	-1.38
7	Anzahl	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	2.00
	Erwartete Anzahl	1.42	0.46	0.70	0.46	0.22	1.75
	Std. Residuen	-0.35	-0.68	0.36	0.80	-0.47	0.19

Tab. 14: Kreuztabelle: Erwartetes Auftreten von Clusterkombinationen und die standardisierten Residuen aus tatsächlichem und wahrscheinlichem Auftreten von Kombinationen bei der Baumart **Fichte, Hauptkollektiv II**

Ernährungscluster		Depositionscluster					
		1	2	3	4	5	6
1	Anzahl	3,00	1,00	3,00	1,00		1,00
	Erwartete Anzahl	3,55	0,27	2,55	0,18		2,45
	Std. Residuen	-0,29	1,39	0,28	1,92		-0,93
2	Anzahl	2,00	0,00	3,00	0,00		0,00
	Erwartete Anzahl	1,97	0,15	1,41	0,10		1,36
	Std. Residuen	0,02	-0,39	1,33	-0,32		-1,17
3	Anzahl	11,00	0,00	3,00	0,00		1,00
	Erwartete Anzahl	5,91	0,45	4,24	0,30		4,09
	Std. Residuen	2,09	-0,67	-0,60	-0,55		-1,53
4	Anzahl						
	Erwartete Anzahl						
	Std. Residuen						
5	Anzahl	6,00	2,00	5,00	1,00		3,00
	Erwartete Anzahl	6,70	0,52	4,81	0,34		4,64
	Std. Residuen	-0,27	2,07	0,09	1,12		-0,76
6	Anzahl	6,00	0,00	3,00	0,00		2,00
	Erwartete Anzahl	4,33	0,33	3,11	0,22		3,00
	Std. Residuen	0,80	-0,58	-0,06	-0,47		-0,58
7	Anzahl	11,00	0,00	11,00	0,00		20,00
	Erwartete Anzahl	16,55	1,27	11,88	0,85		11,45
	Std. Residuen	-1,36	-1,13	-0,25	-0,92		2,52

## Vorkommen von Clusterkombinationen

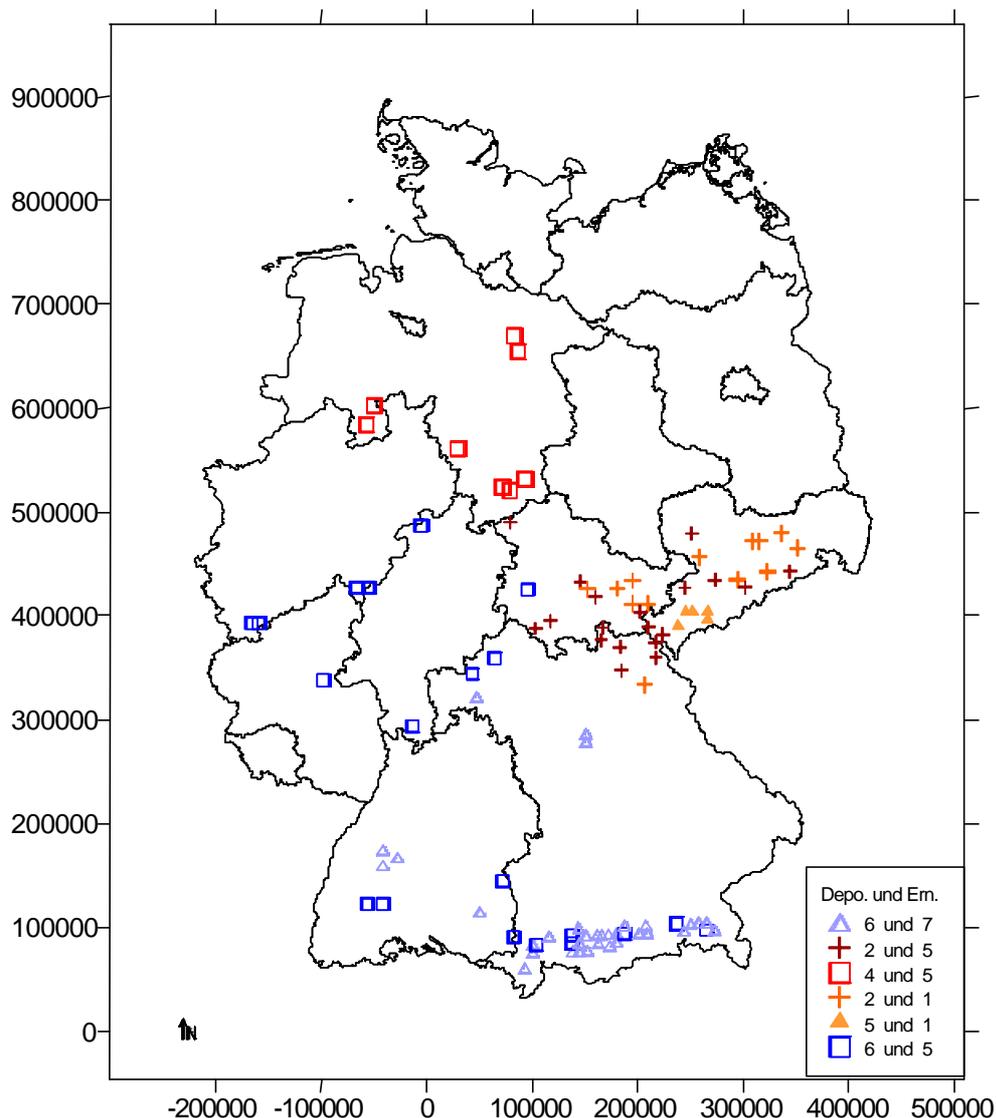


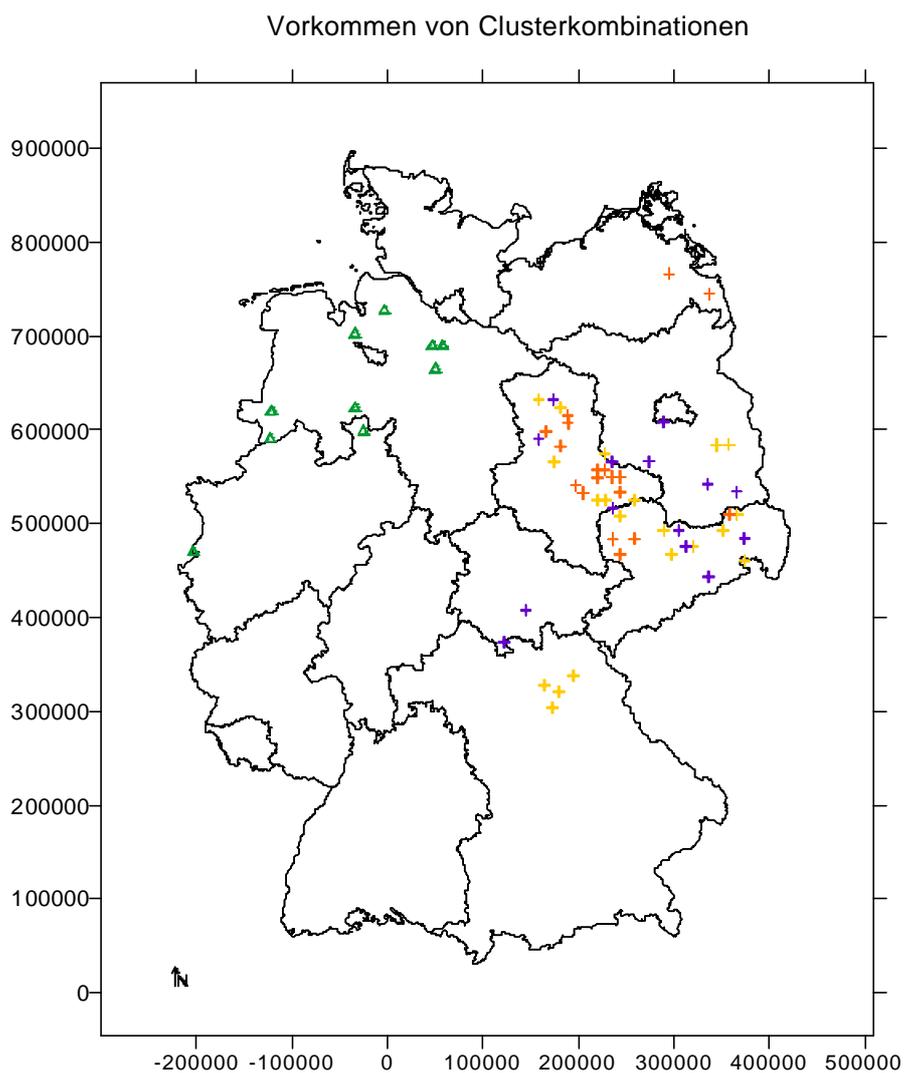
Abb. 17: Räumliche Verteilung von Clusterkombinationen (Deposition und Ernährung) bei der Baumart Fichte

## KIEFER

Die Depositionscluster 2 und 4 treten in Kombination mit bestimmten Ernährungsclustern (1, 3, 4, 5) häufiger auf, als das die Berechnungen erwarten liessen. An diesen Punkten hat das Eintragsgeschehen Auswirkungen auf den Versorgungszustand der Kiefer. Die räumliche Verteilung deutet darauf hin, dass an Erhebungspunkten in Nordwestdeutschland mit Stickstoff betonten Einträgen die N-Ernährung deutlich erhöht ist (Tab. 15/ Abb. 18). In Südostdeutschland (Fichtel-, Erzgebirge, südöstliches Bayern) führen erhöhte Schwefel-, Säure- und Calciumeinträge (Depositionscluster 2) zu erhöhten N- und S-Gehalten in den Kiefernadeln, die zum Teil auch erhöhte Basengehalte aufweisen (Ernährungscluster 1, 3, 5).

Tab. 15: Kreuztabelle: Erwartetes Auftreten von Clusterkombinationen und die standardisierten Residuen aus tatsächlichem und wahrscheinlichem Auftreten bei der **Kiefer**

Ernährungscluster		Depositionscluster					
		1	2	3	4	5	6
1	Anzahl	14.00	20.00	3.00	6.00		1.00
	Erwartete Anzahl	15.57	11.45	7.46	4.89		4.63
	Std. Residuen	-0.40	2.53	-1.63	0.50		-1.69
2	Anzahl	18.00	5.00	16.00	9.00		3.00
	Erwartete Anzahl	18.04	13.27	8.65	5.67		5.37
	Std. Residuen	-0.01	-2.27	2.50	1.40		-1.02
3	Anzahl	16.00	18.00	0.00	6.00		1.00
	Erwartete Anzahl	14.51	10.67	6.95	4.56		4.32
	Std. Residuen	0.39	2.24	-2.64	0.68		-1.60
4	Anzahl	22.00	5.00	7.00	15.00		9.00
	Erwartete Anzahl	20.52	15.09	9.84	6.44		6.11
	Std. Residuen	0.33	-2.60	-0.90	3.37		1.17
5	Anzahl	7.00	14.00	3.00	2.00		3.00
	Erwartete Anzahl	10.26	7.55	4.92	3.22		3.05
	Std. Residuen	-1.02	2.35	-0.86	-0.68		-0.03
6	Anzahl	44.00	27.00	29.00	0.00		19.00
	Erwartete Anzahl	42.10	30.97	20.18	13.22		12.53
	Std. Residuen	0.29	-0.71	1.96	-3.64		1.83



- + Dep.-cluster 4 (Nmax.) und Ern.cluster 4 (N max.)
- + Dep.-cluster 2 (S und Basen max.) und Ern.cluster 1 (N und S hoch)
- + Dep.-cluster 2 (S und Basen max.) und Ern.cluster 3 (S max., N, K, Mg hoch)
- + Dep.-cluster 2 (S und Basen max.) und Ern.cluster 5 (Ca max.)

Abb. 18: Räumliche Verteilung von Clusterkombinationen (Deposition und Ernährung) bei der Baumart Kiefer

FAZIT:

Neben den Faktorenwerten bieten auch Depositionscluster die Möglichkeit das Beziehungsgefüge zwischen Ernährung und Depositionsgeschehen zu erklären. Vor allem extreme Eintragungssituationen wirken sich auf den Ernährungsstatus aus. Daher sind Nadelspiegelwerte nur bedingt als Indikator für die Belastungssituation geeignet. Wie nachfolgende Untersuchungen ergeben, kommt dem Boden als Bindeglied zwischen Eintragungsgeschehen und Versorgung der Bäume eine wichtige Rolle zu.

## Beziehung zwischen Bodenzustand und atmosphärischer Deposition

Im vorherigen Kapitel wurden Zusammenhänge zwischen dem Ernährungszustand und der atmosphärischen Deposition dargestellt. Dabei wurde deutlich, dass dem Boden eine wichtige Rolle im Wirkungsgefüge von Wäldern zukommt. Im folgenden werden die deutlichsten Beziehungen, die mittels linearer Korrelation gewonnen wurden, erläutert. Um eine bessere Übersicht zu geben, befindet sich in Anhang 18 und 19 die Faktorenladungsmatrix der Bodenzustandsdaten (Riek & Wolff 1999). Die Korrelationsmatrizen sind tabellarisch (Tab. 16) dargestellt.

Der **Depositionsfaktor 1**, der durch Einträge von Schwefelverbindungen, potentieller Säure und Calcium geladen wird, korreliert im wesentlichen mit den Bodenzustandsfaktoren 1 und 2. Der Bodenzustandsfaktor 1 spiegelt vor allem die Al-Gehalte und die effektive Austauschkapazität im Mineralboden bis 90 cm wider. Zudem werden C- und N-Gehalte im Oberboden durch diesen Faktor gekennzeichnet. Diese signifikante Beziehung deutet darauf hin, dass Böden mit hohen Einträgen der genannten Komponenten eine geringe Austauschkapazität und geringe C- und N-Gehalte im Mineralboden aufweisen. Gleichzeitig nehmen die C- und N-Vorräte zusammen mit den Vorräten anderer Elemente (Bodenzustandsfaktor 2) in der Auflage zu. Dies legt die Vermutung nahe, dass sauer wirkende Einträge aus der Industrie und Energieumwandlung zu einem verminderten mikrobiellen Abbau der Streu führen, in dessen Folge es zu einer Humusakkumulation an den untersuchten Level I-Punkten und damit zu einer Zunahme der Vorräte in der Auflage kommt.

Marine Einträge (Na, Mg) und Einträge von Kalium (**Depositionsfaktor 2**) weisen eine negative Beziehung zum Bodenzustandsfaktor 4 auf, der allein für das Element Mangan steht. Diese Beziehung kann nicht erklärt werden. Ausserdem korrespondieren hohe Depositionsfaktorenwerte negativ mit Kaliumvorräten und -gehalten im Mineralboden (Bodenzustandsfaktor 8) und ebenfalls negativ mit den pH-Werten im Oberboden und in der Auflage gut gepufferter Böden (Hauptkollektiv II/ Bodenzustandsfaktor 10). Beides lässt sich mit der räumlichen Verteilung der Faktorenwerten erklären: Der festgestellte geogen bedingte Kaliummangel (Wolff & Riek 1997) der Böden im Norddeutschen Tiefland deckt sich räumlich mit hohen Einträgen marinen Ursprungs.

Stickstoffeinträge aus Industrie und Verkehr (**Depositionsfaktor 3**) weisen im Gegensatz zu jenen aus der Landwirtschaft (**Depositionsfaktor 4**), nur eine schwache Beziehung zum Bodenzustand auf. Hohe Einträge, vorwiegend aus der landwirtschaftlichen Produktion, korrelieren stark mit einer hohen effektiven Austauschkapazität im Mineralboden, verbunden mit hohen C-, Al- und N- Vorräten im Oberboden (Bodenzustandsfaktor 1). Gleichzeitig konnte bei den gut gepufferten Böden eine Beziehung zwischen den N-Vorräten in der Auflage (Bodenzustandsfaktor 9) und dem Depositionsgeschehen festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass erhöhte N-Einträge aus der Landwirtschaft mit erhöhten N-Vorräten im Boden bzw. der organischen Auflage korrespondieren.

Tab. 16: Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenzustand und Depositionsgeschehen,  
P= Irrtumswahrscheinlichkeit

Bodenzustands- faktoren		Depositionsfaktor				
		1	2	3	4	
		SO <sub>x</sub> -S, Ca, pot.Säure	Na, Mg, K	NO <sub>x</sub> -N, N <sub>ges</sub>	NH <sub>y</sub> -N, K	
<b>Hauptkollektiv I</b>	<b>1</b>	Al-,N-, C -Vorräte 0-30cm; AKe 0-30cm	<b>-0.35</b>	-0.19	0.13	<b>0.46</b>
	P=		0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>2</b>	Vorräte in der Auflage (P,Fe,N, C, Zn)	<b>0.26</b>	0.16	0.11	0.03
	P=		0.00	0.00	0.00	0.41
	<b>3</b>	Ca-, Mg-Gehalte im Oberboden	0.02	0.08	-0.01	-0.06
	P=		0.55	0.02	0.86	0.12
	<b>4</b>	Mn- Gehalte und Vorräte	-0.12	<b>-0.35</b>	-0.15	0.17
	P=		0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>5</b>	Ca-, Mg-Gehalte	0.12	0.01	0.08	-0.14
	P=		0.00	0.88	0.02	0.00
	<b>6</b>	pH-Werte bis 90cm	-0.06	-0.08	0.05	0.04
	P=		0.08	0.03	0.15	0.28
<b>7</b>	C/N-Verhältnis, pH-wert Auflage	0.15	-0.19	-0.15	-0.08	
P=		0.00	0.00	0.00	0.03	
<b>8</b>	K-Gehalte und Vorräte im Oberboden	-0.03	<b>-0.24</b>	-0.13	0.05	
P=		0.44	0.00	0.00	0.17	
<b>Hauptkollektiv II</b>	<b>9</b>	Vorräte in der Auflage [P, C ,N ,Al ,K, Mg, Ca, Mn)	-0.13	0.02	0.12	<b>0.18</b>
	P=		0.03	0.70	0.04	0.00
	<b>10</b>	pH-Wert Auflage und Oberboden	-0.05	<b>-0.31</b>	-0.02	0.09
	P=		0.36	0.00	0.79	0.14
	<b>11</b>	C/N-Verhältnis	0.02	0.00	0.10	0.10
	P=		0.69	1.00	0.08	0.07
<b>12</b>	pH-Wert im Unterboden	0.04	0.00	0.10	0.03	
P=		0.47	0.97	0.09	0.59	

HAUPTKOLLEKTIV I= CARBONATFREI HAUPTKOLLEKTIV II= CARBONATREICH

## FAZIT:

Die deutlichsten Beziehungen zwischen Bodenzustand und Depositionsgeschehen weisen Einträge auf, deren Quellen Emissionen aus Industrie und Energieumwandlung oder solche, die marinen Ursprungs sind.

Die bessere Pufferung der Böden des Hauptkollektives II lässt sich auch am geringeren Einfluss der atmosphärischen Deposition auf den Bodenzustand erkennen. Es liessen sich dort nur zwei signifikante Korrelationen feststellen.

#### Beziehung zwischen Kronenzustand und atmosphärischer Deposition

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Beziehungen zwischen zu den Variablen Bodenzustand, Ernährung und Deposition dargestellt, um deren Wechselwirkungen untereinander genauer bestimmen zu können. Nun sollen diese Parameter bezüglich ihrer Eignung als Indikatoren für den Kronenzustand mittels schrittweiser Regressionsanalyse untersucht werden. Es geht hierbei also nicht um die Quantifizierung von kausalen Einflüssen, sondern nur um die Identifizierung von Merkmalen des Depositionsgeschehens, die einen signifikanten Zusammenhang zum Kronenzustand aufweisen.

Zunächst wird die Beziehung zwischen Depositionsgeschehen und dem Kennwert SCHAD24 (= prozentualer Anteil der Bäume mit deutlichen Schäden, d.h. Schadstufe 2 bis 4) ermittelt. Diese Vorgehensweise entspricht jener aus der ersten Phase des Projektes, bei der Auswirkungen des Boden- und Ernährungszustandes in bezug zum Kronenzustand gesetzt wurden (Riek & Wolff 1999).

In einem nächsten Schritt werden dann die Faktorenwerte aller Parameter (Klima, Boden, Deposition, Ernährung) in die lineare schrittweise Regression einbezogen. Da sich der Anteil an Bäumen mit Nadel-/Blattverlusten über 25 % mit zunehmendem Alter erhöht (Riek & Wolff 1999), wird das Baumalter zusätzlich bei der Berechnung berücksichtigt. Bei der schrittweisen Analyse wurde als Kriterium für die „Aufnahme“ einer Variablen in das Modell eine auf dem F-Wert beruhende Irrtumswahrscheinlichkeit von  $P < 0,05$  festgelegt; das Aussondern einer Variablen erfolgte unter der Bedingung, dass  $P > 0,01$  ist.

## FICHTE

Das Bestandesalter der Fichte wirkt sich besonders auf die Höhe des Kennwertes SCHAD24 aus (Tab. 17). Ein Einfluss kann auch in bezug auf die nicht seesalzkorrigierten Einträge aus Industrie und Energieumwandlung (Depositionsfaktor 1) bzw. marine Einträge und solche von Kalium (Depositionsfaktor 2) festgestellt werden. Die Regressionsanalyse mit seesalzkorrigierten Komponenten der Deposition unterstreicht die Bedeutung des Depositionsfaktors 1 in bezug zur Schadensausprägung (Tab.18), da in diesem Fall nur der Depositionsfaktor 1 neben dem Bestandesalter einen Zusammenhang auf den Kronenzustand aufweist.

## KIEFER

Bei der Kiefer korrelieren nicht seesalzkorrigierte Einträge aus Industrie und Energieumwandlung (Depositionsfaktor 2) bzw. marine Einträge und solche von Kalium (Depositionsfaktor 2) mit einem erhöhten Anteil von Bäumen mit deutlichen Schäden. Erst als dritter Faktor korrespondiert das Bestandesalter mit der Schädigung der Kiefer. Zusätzlich weisen Stickstoffeinträge aus Verkehr und Industrie (Depositionsfaktor 3) Beziehungen zum Faktor SCHAD24 auf (Tab. 17). Das seesalzkorrigierte Depositionsgeschehen zeigt, ähnlich wie bei der Fichte, deutlich den Zusammenhang

zwischen basischen Staubeinträgen und sauer wirkenden Einträgen aus Industrie und Energieumwandlung (Depositionsfaktor 1) und dem Anteil an SCHAD24 (Tab. 18), da keine weiteren Depositionsfaktoren in die Gleichung eingehen.

#### BUCHE

Einen erhöhten Anteil an deutlich geschädigten Bäumen weisen Bestände mit erhöhten Kaliumeinträgen und solche mit erhöhten Einträgen marinen Ursprungs auf (Depositionsfaktor 2) (Tab. 17). Desweiteren spielt das Bestandesalter eine wichtige Rolle. Das Alter weist bei der Betrachtung seesalzkorrigierter Komponenten die deutlichste Beziehung auf; gefolgt von oxidiertem Stickstoff und Gesamtstickstoff (Depositionsfaktor 2; ssc), die beide zumeist aus Verkehr und Industrie stammen (Tab. 18). Nach der Seesalzkorrektur, d.h. ohne marine Einträge treten erhöhte Stickstoffdeposition gemeinsam mit hohen SCHAD24-Werten auf. Da beide Faktoren im Nordwestdeutschen Tiefland hohe Faktorenwerte aufweisen, lässt sich vermuten, dass nicht marine Einträge, sondern Stickstoffeinträge im Zusammenhang mit Vitalitätsverlusten stehen, die durch extrem hohe Einträge aus dem Meer den Einfluss von Stickstoffeinträgen aber überlagern.

#### FAZIT:

Die multiplen Korrelationskoeffizienten der drei Baumarten schwanken zwischen 0.54 und 0.7. Somit ist der Einfluss des Depositionsgeschehens auf den Kronenzustand (SCHAD24) bedeutend. Es zeigt aber auch, dass weitere Faktoren hierbei ebenfalls einen Einfluss auf die Nadel-/ Blattverluste aufweisen. Die Bedeutung des Bestandesalters nimmt baumartenspezifisch in der Reihenfolge Fichte, Kiefer und Buche ab.

Tab. 17: Parameter der schrittweisen Regression zwischen Depositionsfaktoren und SCHAD24 auf der Grundlage nicht seesalzkorrigierter Daten

Fichte: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,54				
	Regressions- Koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bestandesalter	0.47	0.40	0.54	0.48
Depositionsfaktor 1	5.58	3.97	7.20	0.24
Depositionsfaktor 2	6.83	4.53	9.12	0.21
Konstante	-3.17			

Kiefer: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,62				
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Depositionsfaktor 1	8.37	4.53	12.21	0.36
Depositionsfaktor 2	13.41	8.38	18.45	0.49
Bestandesalter	0.27	0.12	0.42	0.32
Depositionsfaktor 3	6.25	1.19	11.31	0.23
Konstante	7.02			

Buche: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,7				
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Depositionsfaktor 2	23.17	15.50	30.84	0.55
Bestandesalter	0.36	0.17	0.55	0.35
Konstante	14.58			

Tab. 18: Parameter der schrittweisen Regression zwischen Depositionsfaktoren und SCHAD24 auf der Grundlage seesalzkorrigierter Daten

Fichte: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,49				
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bestandesalter	0.45	0.38	0.51	0.46
Depositionsfaktor 1	5.41	3.70	7.12	0.23
Konstante	-4.80			

Kiefer: SCHAD24=f(Alter, Faktor1,....., Faktor4) r=0,46				
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Depositionsfaktor 1	10.24	5.99	14.48	0.44
Bestandesalter	0.24	0.08	0.39	0.28
Konstante	5.13			

Buche: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4)		r=0,52		
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bestandesalter	0.46	0.21	0.66	0.42
Depositionsfaktor 2	6.70	1.00	12.50	0.25
Konstante	17.20			

Beziehungen Zwischen Depositionsgeschehen, Boden-, Ernährungszustand zum Kronenzustand

#### SCHRITTWEISE REGRESSIONSANALYSE ALLER FAKTORENWERTE

In einem weiteren Schritt wurden sowohl die Boden- als auch die Ernährungszustandsdaten in die Regressionsanalyse mit einbezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 bis 22 dargestellt. Zusätzlich wurden die Standorte nach Hauptbaumarten sowie nach carbonatfreien (Hauptkollektiv I) und carbonatreichen (Hauptkollektiv II) Böden unterteilt.

#### FICHTE

Bei Fichtenbeständen ist weiterhin das Bestandesalter bestimmend für den Anteil an deutlich geschädigten Bäumen. Daneben spielen Kaliumeinträge und solche marinen Ursprungs (Depositionsfaktor 2) in beiden Hauptkollektiven eine wichtige Rolle. Von Bedeutung sind die Bodenfaktoren (1, 3, 6) auf carbonatarmeren Standorten. Als Ernährungsfaktor 5 hat die P-Versorgung einen Einfluss auf den Kronenzustand. Auf den besser gepufferten Böden haben Bodenfaktoren keine nachweisbare Bedeutung für die Ausprägung von SCHAD24.

Bei der Verwendung seesalzkorrigierter Depositionsdaten (Tab. 21) weisen atmosphärische Einträge keine Beziehung zur Ausprägung des Faktors SCHAD 24 auf. In diesem Fall ergeben sich anhand der Ernährungs- und Bodenfaktoren Erklärungen für den Kronenzustand. Auf den carbonatarmeren Standorten spielt die S- und N-Versorgung zusammen mit den oben genannten Bodenfaktoren (1, 3, 6) eine wichtige Rolle. Nach der Seesalzkorrektur ist die Ernährung von Bedeutung. Alle Faktoren sind im Anhang 18 noch einmal dargestellt.

#### KIEFER

Ein hoher Anteil geschädigter Kiefern tritt zusammen mit hohen Werten des Depositionsfaktors 2 (Na, Mg, K) auf (Tab. 19). Das Bestandesalter hat nur eine untergeordnete Rolle. Vor allem die Ernährungsfaktoren (2, 3) der Bäume spielen eine wichtige Rolle für die Ausprägung des SCHAD24-Faktor bei der Kiefer, die auf carbonatarmeren Standorten stocken. Auf den besser gepufferten Standorten ist der Bodenfaktor 11 entscheidend. Dieser charakterisiert C/P und C/N-Verhältnis (Tab. 20).

#### BUCHE

Bei der Buche scheint die Kaliumverfügbarkeit eine enge Beziehung zum Faktor SCHAD24 aufzuweisen, da sowohl der Depositionsfaktor 4 (NH<sub>4</sub>-N, K) als auch der

Bodenfaktor 8 dies charakterisieren und eine Beziehung zur Ausprägung des Faktors SCHAD 24 aufweisen (Tab. 19). Unter Verwendung der seesalzkorrigierten Daten verlieren atmosphärische Einträge zugunsten von Bodenfaktoren (Hauptkollektiv I: 1,4; Hauptkollektiv II: 10,11) an Bedeutung. Auf den besser gepufferten Böden besteht eher ein Zusammenhang zwischen der S- bzw. N-Versorgung (Depositionsfaktor 1, 2; Ernährungsfaktor 5) und dem Anteil deutlich geschädigter Bäume.

Tab. 19: Parameter der schrittweisen Regression zwischen Depositions-, Ernährung- und Bodenzustandsdaten auf der Grundlage nicht seesalzkorrigierter Depositionsdaten für carbonatfreie Böden (Hauptkollektiv I)

Fichte:  $SCHAD24=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,54$

	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bestandesalter	0.49	0.36	0.62	0.43
Depositionsfaktor 2	13.45	9.19	17.71	0.35
Bodenfaktor 1	12.20	6.62	17.78	0.27
Bodenfaktor 6	6.50	2.38	10.61	0.19
Ernährungsfaktor 5	- 5.15	-8.89	-1.14	-0.15
Bodenfaktor 3	4.84	1.44	8.24	0.16
Konstante	-10.60			

Kiefer:  $SCHAD24=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,62$

	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Depositionsfaktor 2	24.45	16.00	32.89	0.56
Bestandesalter	0.51	0.34	0.69	0.56
Ernährungsfaktor 3	-14.34	-20.23	-8.44	-0.48
Bodenfaktor 7	-8.15	-13.34	-2.95	-0.32
Bodenfaktor 1	8.33	2.15	14.50	0.28
Konstante	-14.90			

Buche:  $SCHAD24=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,7$

	Regressions- koeffizient	95-Konfidenzintervall		Beta-Wert
Depositionsfaktor 4	28.2	14.99	41.54	0.54
Bodenfaktor 8	-9.68	-16.7	-2.68	-0.33
Ernährungsfaktor 4	-5.8	-11.16	-0.45	-0.27
Konstante	76.16			

Tab. 20: Parameter der schrittweisen Regression zwischen Depositions-, Bodenzustands- und Ernährungsdaten und SCHAD24 auf der Grundlage nicht seesalzkorrigierter Depositionsdaten für carbonathaltige Böden (Hauptkollektiv II)

Fichte: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,54				
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bestandesalter	0.41	0.25	0.57	0.5
Depositionsfaktor 2	24.06	12.48	35.64	0.38
Depositionsfaktor 4	-6.00	-11.62	-0.38	-0.22
Konstante	11.93			

Kiefer: SCHAD2-4=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,62				
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bodenfaktor 11	13.41	8.28	32.95	0.78
Konstante	20.62			

Buche: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,7				
	Regressions- koeffizient	95-Konfidenzintervall		Beta-Wert
Depositionsfaktor 2	44.05	35.37	52.73	0.9
Depositionsfaktor 1	17.73	5.72	29.74	0.27
Ernährungsfaktor 4	-11.70	-20.47	-2.94	-0.24
Konstante	51.20			

Tab. 21: Ergebnisse der schrittweisen Regression auf der Grundlage seesalzkorrigierter Depositionsdaten und carbonatfreier Böden (Hauptkollektiv I)

Fichte: SCHAD24=f(Alter,Faktor1,.....,Faktor4) r=0,54				
	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bestandesalter	0.55	0.4	0.69	0.48
Ernährungsfaktor 4	5.73	2.45	9.01	0.21
Bodenfaktor 3	6.27	2.68	9.87	0.2
Bodenfaktor 1	10.57	4.69	16.45	0.24
Bodenfaktor 6	4.77	0.43	9.12	0.14
Konstante	-16.85			

Kiefer:  $SCHAD_{24}=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,62$

	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Ernährungsfaktor 2	16.43	6.91	25.94	0.44
Ernährungsfaktor 3	-13.51	-20.91	-6.11	-0.46
Bestandesalter	0.34	0.10	0.58	0.37
Konstante	14.82			

Buche:  $SCHAD_{24}=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,7$

	Regressions- koeffizient	95-Konfidenzintervall		Beta-Wert
Depositionsfaktor 4	28.2	14.99	41.54	0.54
Bodenfaktor 8	-9.68	-16.7	-2.68	-0.33
Ernährungsfaktor 4	-5.8	-11.16	-0.45	-0.27
Konstante	76.16			

Tab. 22: Ergebnisse der schrittweisen Regression auf der Grundlage seesalzkorrigierter Depositionsdaten und carbonathaltiger Böden (Hauptkollektiv II)

Fichte:  $SCHAD_{24}=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,54$

	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bestandesalter	0.40	0.26	0.55	0.49
Ernährungsfaktor 1	16.33	6.43	26.24	0.29
Konstante	5.00			

Kiefer:  $SCHAD_{24}=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,62$

	Regressions- koeffizient	95-%Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bodenfaktor 11	13.40	5.70	21.07	0.77
Konstante	14.82			

Buche:  $SCHAD_{24}=f(\text{Alter}, \text{Faktor1}, \dots, \text{Faktor4})$   $r=0,7$

	Regressions- koeffizient	95-Konfidenzintervall		Beta-Wert
Bodenfaktor 10	-19.93	38.96	61.39	-0.56
Bodenfaktor 12	34.73	-30.70	-9.17	0.5
Konstante	50.17			

## NICHT LINEARE REGRESSIONSANALYSE DER DEPOSITIONSRATEN

Im folgenden werden die Beziehungen zwischen allen Komponenten des Depositionsgeschehens und dem Kronenzustand (SCHAD24) mittels nicht linearer Regressionsmodelle betrachtet (Tab. 23). Prinzipiell stehen zwei verschiedene Modelle zur Auswahl. Zum einen die Potenzfunktion  $Y = a * X^b + c$  und zum anderen die Wachstumsfunktion  $Y = 100(1 + b * \exp(-a * X))$ .

Das Aussondern von Komponenten, die als Prädikatoren wirken, fand mit Hilfe der schrittweisen Regression statt.

Für die drei Hauptbaumarten ergeben sich folgende, in Tabelle 23 aufgelistete Regressionsmodelle :

Tab. 23: Parameter der multiplen linearen Regressionsbeziehungen zwischen SCHAD24 und dem Depositionsgeschehen

<b>Fichte (nicht seesalzkorrigiert): r=0.49</b>	
SCHAD24= (100/1 + 3.72 *exp(-0.018 Bestandesalter)) + 0.018 * Ca <sup>0.554</sup> – 48.84	Gl.3.1
<b>Fichte (seesalzkorrigiert): r=0.51</b>	
SCHAD24= (100/1 +5.08 *exp(-0.019 Bestandesalter)) + 0.2 * Ca <sub>ssc</sub> <sup>0.6</sup> + 0.02*SOx-S <sup>0.67</sup> - 34.58	Gl.3.2
<b>Kiefer (nicht seesalzkorrigiert): r=0.45</b>	
SCHAD24= 0.99 *Bestandesalter <sup>0.58</sup> + 0.055 * Ca <sup>0.88</sup> + 0.027 Nges – 32.94	Gl.3.3
<b>Kiefer (seesalzkorrigiert): r=0.66</b>	
SCHAD24=(100/1 +1.07 *exp(-0.0042* Bestandesalter)) + 0.11.* Ca <sub>ssc</sub> – 0.06*K <sub>ssc</sub> + 0.0028 * Nges. - 70.25	Gl.3.4
<b>Buche (nicht seesalzkorrigiert): r=0.92</b>	
SCHAD24=0.048*Na + 1.9*Bestandesalter <sup>0.59</sup> – 0.59* K + 0.0035*SOx-S + 17.8	Gl.3.5
<b>Buche (seesalzkorrigiert): r=0.81</b>	
SCHAD24=5.1*Bestandesalter <sup>0.48</sup> + 0.59*NOx-N <sup>0.78</sup> – 3.52*K <sub>ssc</sub> <sup>0.77</sup> – 27.95	Gl.3.6

#### FICHTE

Die Ausprägung des Indikators SCHAD24 bei der Fichte scheint im Zusammenhang mit dem Bestandesalter (Tab. 23) zu stehen. Zudem lassen erhöhte Calcium- und Schwefeleinträge erhöhte SCHAD24 –Werte erwarten. Diese Beobachtung deckt sich mit jener, die aus der schrittweisen Regression der Faktoren gewonnen werden konnte. Darüber hinaus belegen auch Betrachtungen des Ernährungs- und des Bodenzustandes (Riek & Wolff 1999) die Bedeutung von Calcium und Schwefel als Indikator für den Zustand von Fichtenbeständen.

#### KIEFER

Bei der Kiefer korrespondieren neben dem Bestandesalter auch Calcium- und Stickstoffeinträge mit erhöhten Anteilen an deutlich geschädigten Bäume (Tab. 23). Die Kombination beider Elemente spricht dafür, dass an Standorten mit erhöhten Einträgen aus Industrie und Energieumwandlung ein ungünstigerer Kronenzustand der Kiefer zu erwarten ist. Vermutlich stehen die Calciumeinträge auch für hohe Säure- und Schwefeleinträge. Zudem erweisen sich Kaliumeinträge bei der Betrachtung der seesalzkorrigierten Einträge als ein signifikanter Parameter, wobei erhöhte Einträge an Kalium sich positiv auf den Kronenzustand auswirken.

#### BUCHE

Geringe Kaliumeinträge und zunehmendes Bestandesalter deuten auf erhöhte SCHAD24-Werte hin (Tab. 23). Das Bestandesalter und im geringeren Ausmaß auch Schwefel- und Natriumeinträge korrespondieren positiv mit dem SCHAD24-Anteil. Wie die räumliche Überschneidung hoher Faktorenwerte im Nordwestdeutschen Tiefland zeigt, überlagern dort hohe Natriumeinträge das Beziehungsgefüge zwischen Kronenzustand und hohen Stickstoffeinträgen. Die seesalzkorrigierten Daten belegen dies, da bei Verwendung dieses Datensatzes oxidierte Stickstoffeinträge eine Beziehungen zum Faktor SCHAD24 aufweisen.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER REGRESSIONSERGEBNISSE

Die Ergebnisse der nicht linearen und der linearen Regression weisen deutliche Parallelen auf. Insbesondere bei Fichtenbeständen ergeben sich ähnliche Einschätzungen der Prädiktoren. Es wird anhand der Ergebnisse deutlich, dass vor allem das zunehmende Bestandesalter erhöhte SCHAD24-Werte erwarten läßt. Daneben erweisen sich Schwefel, Säure und Calcium als signifikante Parameter für Fichten- und Kiefernbestände. Die nicht lineare Regression zeigt zudem bei der Kiefer, dass erhöhte N-Einträge mit erhöhten SCHAD24-Werten gemeinsam auftreten. Bei der Buche gehen hohe SCHAD24-Werte ebenfalls mit hohen Stickstoffeinträgen einher.

## UNTERSCHIEDE ZWISCHEN BEOBACHTETEN UND BERECHNETEN KRONENZUSTANDSDATEN

Anhand der gefundenen Regressionsmodelle läßt sich der Kronenzustand für die drei Baumarten vorhersagen. Die kartografische Darstellung dieser Werte und ihrer Residuen lassen eine Interpretation zu, welchen Einfluss verbleibende, nicht berücksichtigte Einflussfaktoren besitzen. Ein Vergleich zwischen beobachteten und berechneten SCHAD24-Werten ermöglicht zudem Aussagen über die Güte der Kurvenanpassung (Abb. 23).

### FICHTE

Eine Häufung erhöhter berechneter SCHAD24-Werte (positive Residuen) ist im südlichen Niedersachsen, im Bereich Solling und Harz zu finden, wo die Fichtenschäden ohnehin hoch sind. Riek & Wolff (1999) vermuteten nicht berücksichtigte Einflussfaktoren oder den synergistischen Einfluss der im Regressionsmodell berücksichtigten Faktoren als Ursache hierfür. Da in der zweiten Projektphase zusätzlich zu den von Riek & Wolff verwendeten Faktoren die Deposition einbezogen wurde, ist wahrscheinlich von Synergieeffekten auszugehen, welche durch die Regressionsmodelle nicht berücksichtigt werden. Ein Vergleich zwischen berechneten und beobachteten Werte zeigt eine gute Übereinstimmung beider Ergebnisse (Abb. 19 /20)

### KIEFER

Bei der Kiefer ist eine Gleichverteilung der Über- und Unterschätzungen der SCHAD24 – Werte im Bundesgebiet festzustellen, d.h. es gibt keine regional begrenzten Faktoren, die einen Einfluss auf den Kronenzustand hätten. Die mittels seesalzkorrigierter Deposition geschätzten SCHAD24-Werte deuten auf eine Unterschätzung der Werte bei besseren, beobachtetem Kronenzustand hin (Abb. 19 /21).

### BUCHE

Dort, wo bei der Buche erhöhte SCHAD24 auftreten, wie im südlichen Niedersachsen, werden diese durch das Regressionsmodell unterschätzt. Wahrscheinlich spielen hierbei ähnlich wie bei der Fichte Synergieeffekte eine wichtige Rolle. Eine geringere, beobachtete Schadausprägung wird durch die geschätzten seesalzkorrigierten Depositionsraten im unteren Bereich überschätzt und im oberen Bereich unterschätzt (Abb. 19 /22).

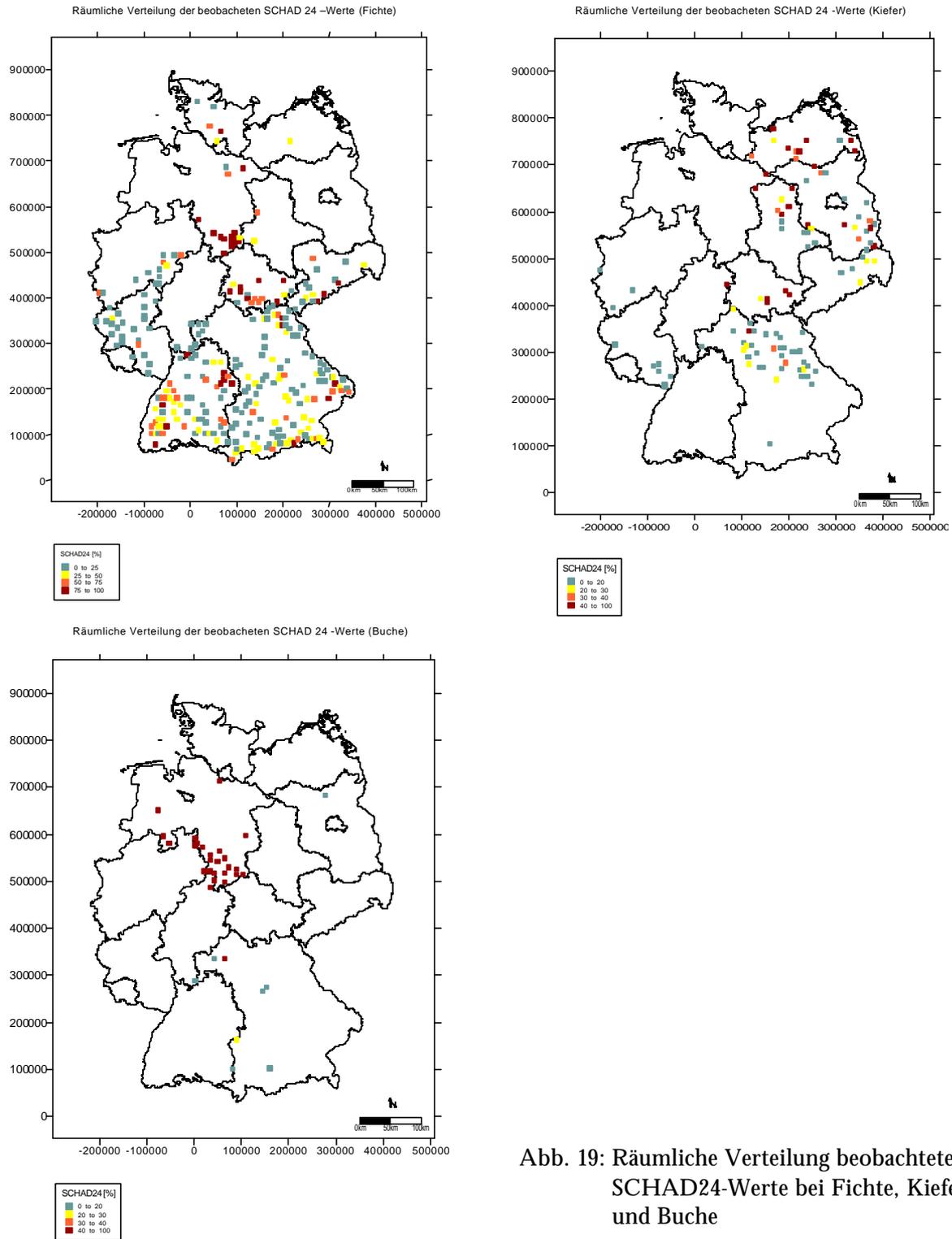


Abb. 19: Räumliche Verteilung beobachteter SCHAD24-Werte bei Fichte, Kiefer und Buche

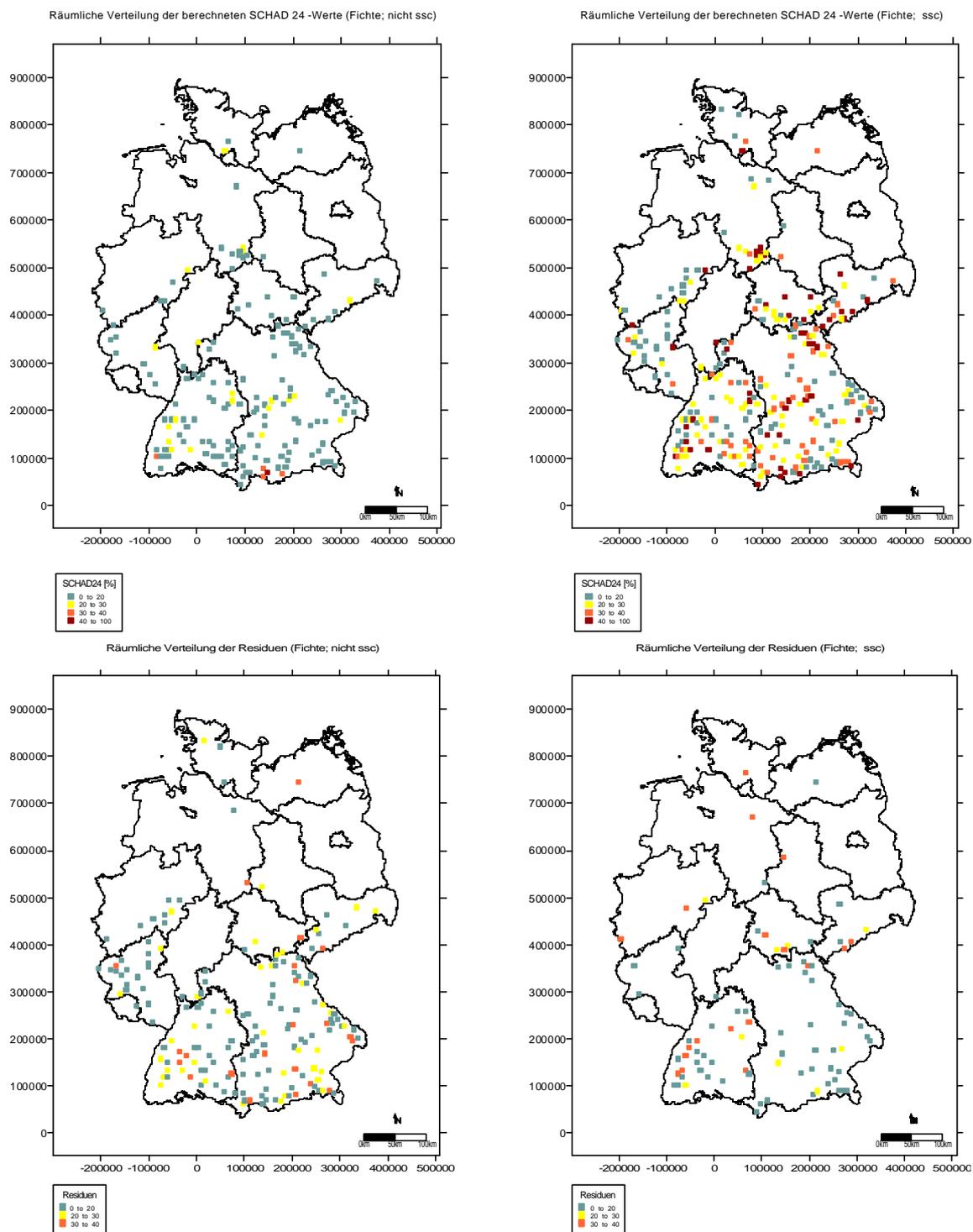


Abb. 20: Regionale Verteilung der aus Bodenzustands-, Depositions- und Ernährungsfaktoren vorhergesagten SCHAD24-Werte und der Residuen aus beobachtetem und erwartetem Wert bei der Fichte

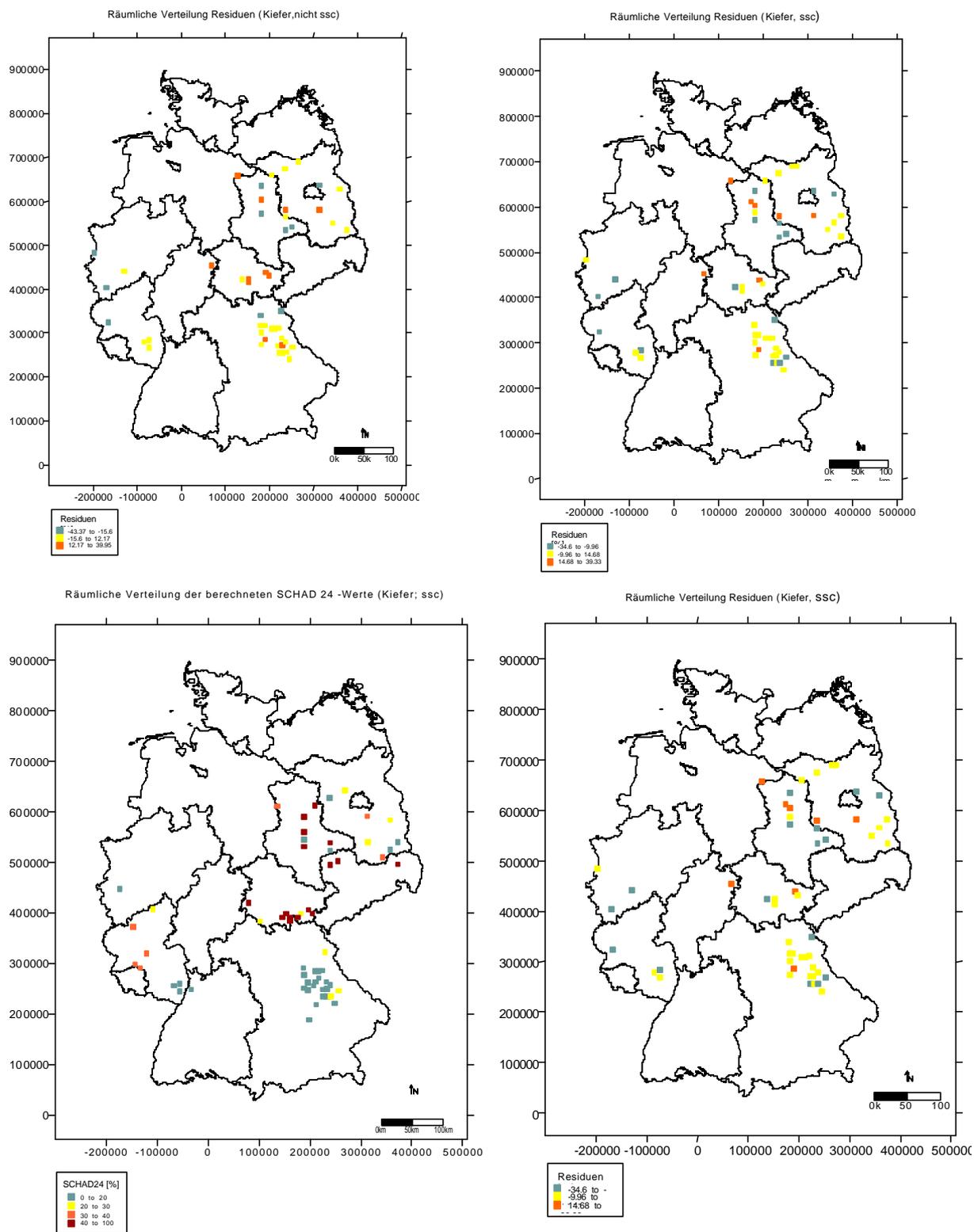


Abb. 21: Regionale Verteilung der aus Bodenzustands-, Depositions- und Ernährungsfaktoren vorhergesagten SCHAD24-Werte und der Residuen aus beobachtetem und erwartetem Wert bei der Baumart Kiefer

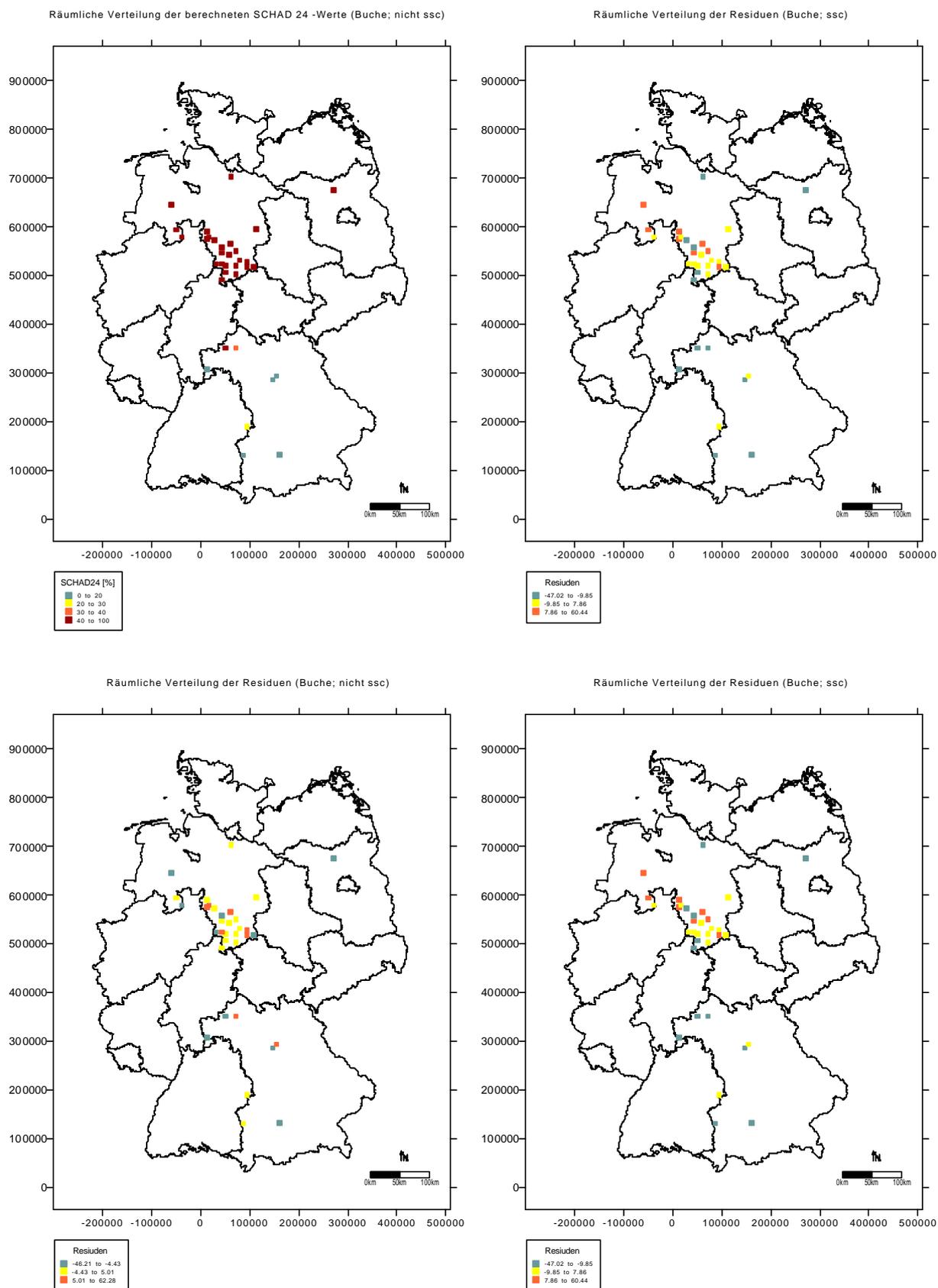


Abb. 22: Regionale Verteilung der aus Bodenzustand-, Depositions- und Ernährungsfaktoren vorhergesagten SCHAD24-Werte und der Residuen aus beobachtetem und erwartetem Wert bei der Baumart Buche

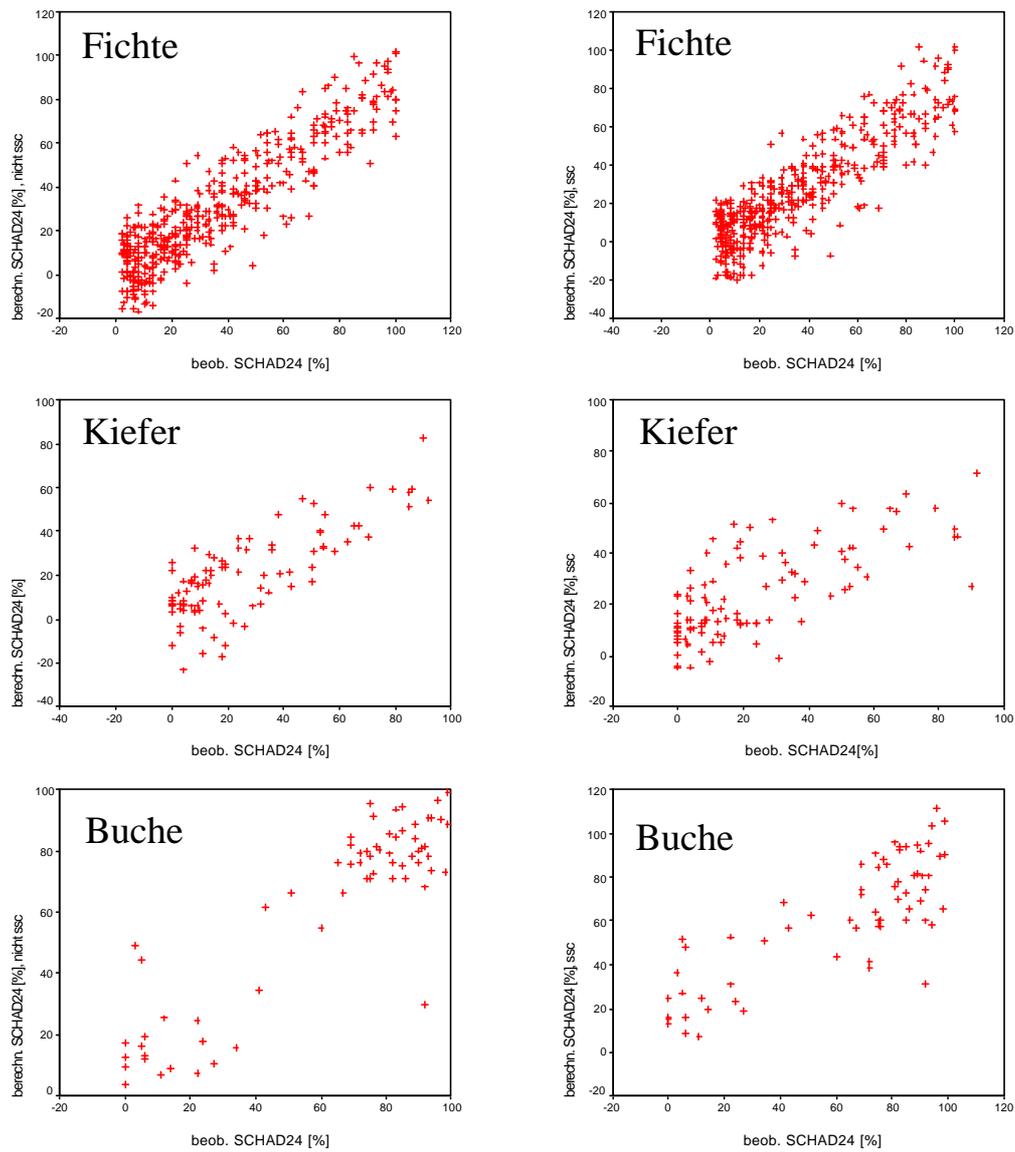


Abb. 23: Vergleich der berechneten zu beobachteten SCHAD24-Werten für die Baumarten Fichte, Kiefer, und Buche auf der Grundlage von nicht seesalzkorrigierten (linke Abb.) und korrigierten Depositionsraten (rechte Abb.)

## Auswertung der Klimadaten

### Beziehung zwischen Kronenzustand und Klimaparametern mittels nichtlinearer Regressionsanalyse

Die Frage, in welchem Zusammenhang Kronenzustand (SCHAD24) und Klimaeinflüsse an den untersuchten Standorten stehen, soll im folgenden mittels nichtlinearer Regression geklärt werden. Die gewonnenen Ergebnisse sollen später zur Ableitung der Waldzustandstypen mit Hilfe des 2 Ansatzes (Verschneidung regressionsanalytisch gewonnener Cluster) dienen (Kapitel 5.2). Der Klimadatensatz umfasste Angaben zur Temperatur, Niederschlag, Klimatischer Jahreswasserbilanz (KWB), potentiellen sowie aktuellen Evapotranspiration (pEt bzw. aEt) und Quotienten aus beiden letztgenannten für verschiedene Monat. Der Quotient gilt als Weiser für Trockenstress.

#### FICHTE

Wie bei den vorangegangenen Untersuchungen, hat auch in diesem Fall das Bestandesalter einen deutlichen Einfluß auf den Kronenzustand. Darüber hinaus spielt die Verdunstung eine bedeutende Rolle. Sowohl die potentielle (pEt) und die aktuelle Evapotranspiration sowie der Quotient aus pEt und aEt des Monats September (Q 9) werden als wichtige Faktoren in die Regressionsgleichung einbezogen. Dieser Quotient kann als Maß für den Verbrauch an Wasser im Sommer angesehen werden. Daher bietet er die Möglichkeit den Trockenstress im Sommer abzuschätzen.

Fichte r=0,42

Gl.4.1

$$\text{SCHAD24} = 1,1 * \text{Bestandesalter}^{0,85} - 12,6 * \text{pEt}^{0,86} + 0,33 * \text{aEt}^{1,3} - 351,98 * \text{Q9}^{0,57} + 734,6$$

#### KIEFER

Der Anteil der deutlich geschädigten Kiefern hängt – ähnlich wie bei der Fichte – vom Bestandesalter ab. Es wird aber auch durch die klimatische Jahreswasserbilanz (KWB<sub>Jahr</sub>), der aktuellen Evapotranspiration sowie dem Quotienten aus pEt und aEt des Monats September beeinflusst.

Kiefer r= 0,46

Gl.4.2

$$\text{SCHAD24} = 0,36 * \text{Bestandesalter}^{0,75} - 0,24 * \text{KWB}_{\text{Jahr}}^{0,86} + 0,36 * \text{aEt}^{0,75} - 130,08 * \text{Q9} + 77,85$$

#### BUCHE

Die Ausprägung des SCHAD24-Wertes wird bei den untersuchten Buchenbeständen nur durch das Bestandesalter und die potentielle Evapotranspiration beeinflusst.

Buche r=0,79

Gl.4.3

$$\text{SCHAD24} = 1,5 * \text{Bestandesalter}^{0,72} - 7,36 * \text{pEt} + 381,48$$

### ABLEITUNG WICHTIGER INDIKATOREN FÜR TROCKENSTRESS

Die Bewertung der Parameter KWB und des Quotienten aus pEt und aEt im Sommer in bezug auf das Risiko von langfristigen Trockenstress von Beständen ist anhand von Perzentilen vorgenommen worden:

Tab. 24: Trockenstressrisiko anhand klimatischer Wasserbilanz und Quotient aus aktueller und potentieller Evapotranspiration

Gruppe	KWB [mm] <small>April bis September</small> Perzentile (20, 40, 60, 80, 100)	aEt/pEt <small>Juli August</small> Perzentile (33, 66, 99)
1	< -107	< 0,845
2	-107 - -39	0,845 – 0,947
3	-39 - 19	> 0,947
4	19 - 122	
5	>122	

Es wurden aus der klimatischen Wasserbilanz und dem Quotienten aus aktueller und potentieller Evapotranspiration 5 Gruppen abgeleitet, die verschiedene Stufen des Wasserstress für die untersuchten Bäume wiedergeben (Tab. 25). Diese fünf Gruppen können räumlich dargestellt werden (Abb. 24).

Die Verbindung beider Gruppen (KWB und Quotient aEt/ pEt) zu einer Gruppe, die das Risiko für Trockenstress wiedergibt, sieht wie folgt aus :

Tab. 25: Bewertung des Trockenstress nach klimatischer Wasserbilanz und Quotient aus aktueller und potentieller Evapotranspiration

Cluster	Gruppe KWB April –September	Quotient aEt/pEt Juli-August	Trockenstress
1	1	1	1 sehr hoch
2	1 2 3	2 1 1	2 hoch
3	2 2 3 3	2 3 2 3	3 mäßig bis gering
4	4 4	1 2	
5	5 5 5 4	1 2 3	

Die Unterscheidung der Gruppen bezüglich des vermuteten Klimastress wird anhand der ausgewählten Klimaparameter gut wiedergegeben.

Tab. 26: Charakteristika der mit Hilfe von Tabelle 25 beschriebenen Cluster

Gruppe		Quotient Juli-August	Quotient aEt/pEt	KWB April –Sept.	ND April –Sept.	Temp. April –Sept.
<b>1</b>	<b>Mittel</b>	<b>0.71</b>	<b>0.83</b>	<b>-150</b>	<b>323</b>	<b>13.8</b>
	Std.	0.08	0.07	22	20	0.56
	N	310	310	310	310	310
<b>2</b>	<b>Mittel</b>	<b>0.79</b>	<b>0.90</b>	<b>-84</b>	<b>374</b>	<b>13.4</b>
	Std.	0.06	0.04	32	28	0.66
	N	248	248	248	248	248
<b>3</b>	<b>Mittel</b>	<b>0.90</b>	<b>0.94</b>	<b>-33</b>	<b>408</b>	<b>13.1</b>
	Std.	0.03	0.02	30	27	0.54
	N	391	391	391	391	391
<b>4</b>	<b>Mittel</b>	<b>0.92</b>	<b>0.95</b>	<b>39</b>	<b>462</b>	<b>12.6</b>
	Std.	0.03	0.02	34	33	0.71
	N	218	218	218	218	218
<b>5</b>	<b>Mittel</b>	<b>0.97</b>	<b>0.97</b>	<b>238</b>	<b>628</b>	<b>11.8</b>
	Std.	0.01	0.02	223	196.33	1.24
	N	556	556	556	556	556
<b>Insges.</b>	<b>Mittel</b>	<b>0.88</b>	<b>0.93</b>	<b>35</b>	<b>466</b>	<b>12.8</b>
	Std.	0.11	0.06	198	164	1.16
	N	1723	1723	1723	1723	1723

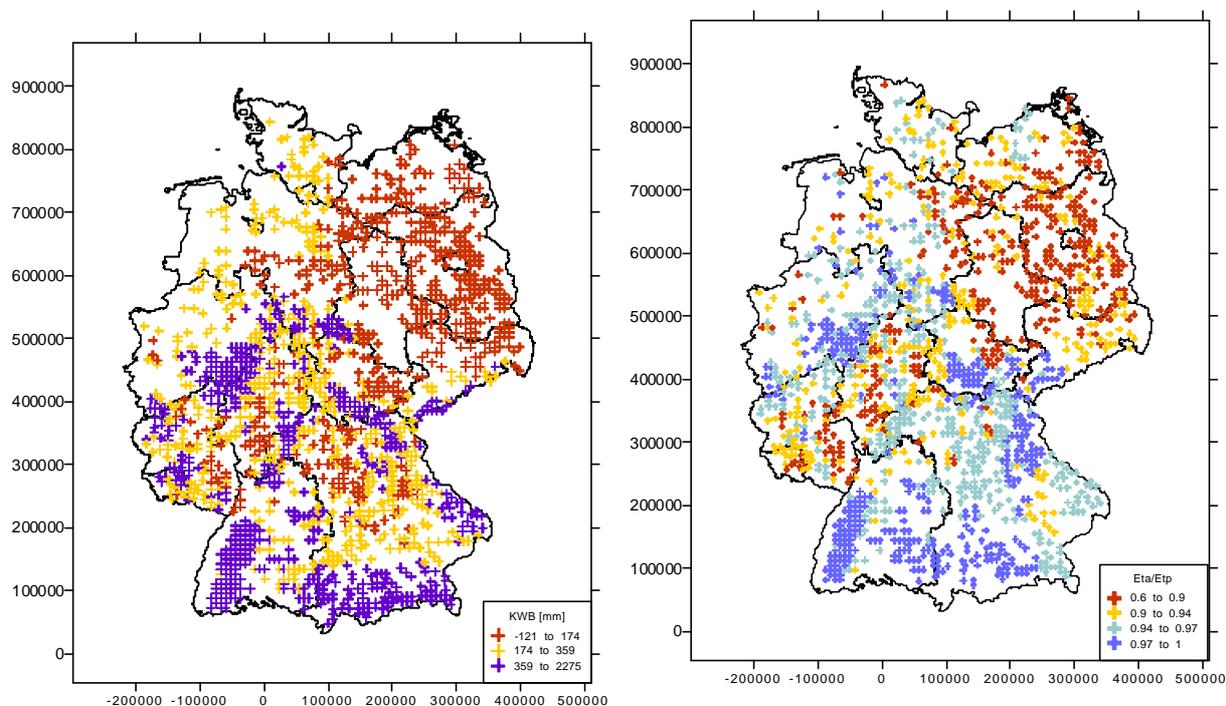


Abb. 24: Klimatische Jahreswasserbilanz der BZE-Erhebungspunkte (links) und Perzentile des Quotienten aus potentieller und aktueller Evapotranspiration an den Level I-Erhebungspunkten (rechts)

## Ableitung von Waldzustandstypen

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden grundsätzlich zwei Wege zur Ermittlung von Waldzustandstypen verfolgt (Abb. 25):

- Verschneidung von Gruppen (Bodenzustands-, Depositions-, Ernährungstypen) (Ansatz 1).
- Typisierung von geschätzten SCHAD24-Werten, die aus verschiedenen Eingangsparametern (Klima, Ernährung, Deposition, Bodenzustand) über Regressionsanalysen berechnet wurden (siehe Riek & Wolff 2000). Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist in den folgenden Kapiteln zu finden (Ansatz 2).

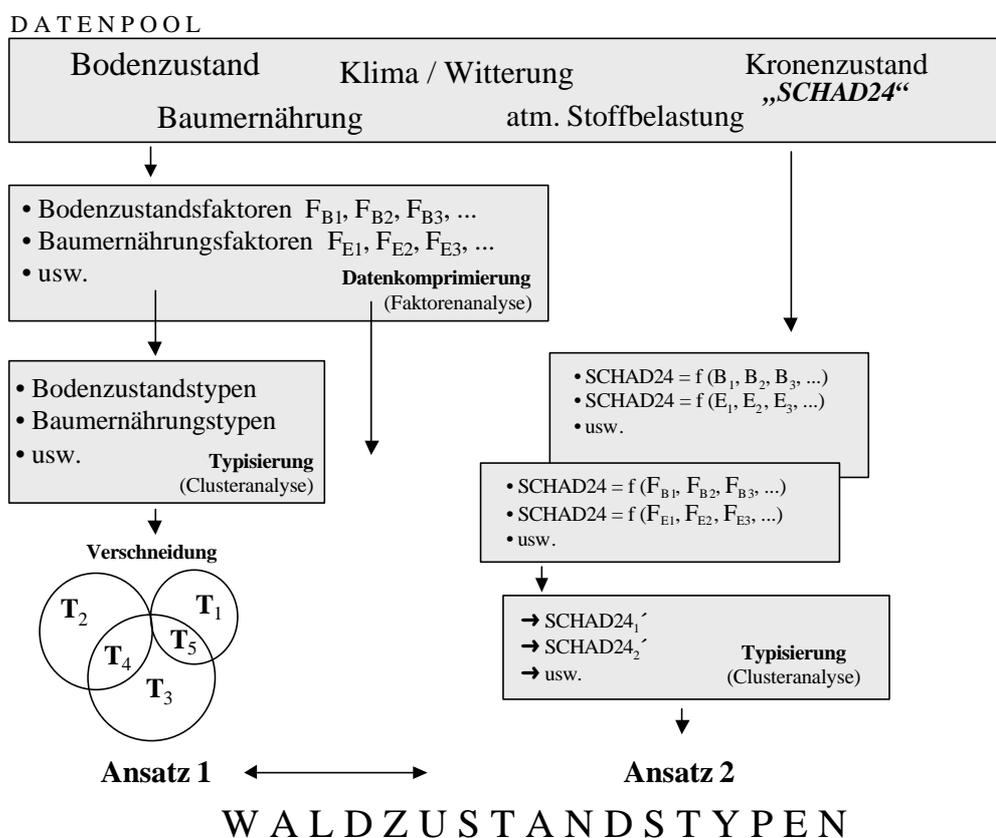


Abb. 25: Mögliche Ansätze zur Verschneidung der Primärdaten zu Waldzustandstypen (nach Riek & Wolff 2000)

## Ansatz 1: Verschneidung von Zustandstypen mittels Diskriminanzanalyse

### EINLEITUNG

Bei diesem Ansatz werden die faktorenanalytisch komprimierten Primärdaten getrennt für jeden Zustandstyp (z.B. Boden, Ernährung, etc.) als Eingangsgrößen für die Clusteranalyse verwendet. Es resultieren sich überlappende Cluster, die als Bodenzustandstypen, Baumernährungstypen usw. zu interpretieren sind. Um daraus Waldzustandstypen abzuleiten, die alle Ökosystemkomponenten berücksichtigen, erfolgt eine Verschneidung der Cluster, so dass sich aus den Schnittmengen neue Typen ergeben (vgl. Kap. 5.1.2.1). Unter Berücksichtigung der Stichprobenumfänge in dieser Schnittmenge wurde jeweils entschieden, ob die Ausweisung eines Waldzustandstyps für die entsprechenden Standorte sinnvoll ist.

Die Zuordnung zu diesen Typen erfolgte mittels Diskriminanzfunktionen, die das Risiko von Vitalitätsverlusten für den Standort aufgrund von Trockenstress (D5), atmosphärischen Einträgen (D2 /D4) und Bodenzustand (D1/D3) repräsentieren. Hieraus entstanden 8 „abiotische“ Waldzustandstypen (vgl. Abb. 26). In einem weiteren Schritt wurde die biotische Reaktion anhand des Ernährungszustandes und des Kronenzustandes für jeden der 8 abiotischen Gruppen mitbewertet (Abb. 26). Diese 16 „biotischen“ Gruppen wurden zu 12 Waldzustandstypen mit typischen Kennwerten zusammengefasst. Da ökosystemare Wechselwirkungen auch baumartenabhängig sind, wurden getrennte Betrachtungen für die Baumarten Fichte, Kiefer und Buche vorgenommen und als Konsequenz Waldzustandstypen zum Teil baumartenspezifisch definiert. Die detaillierte Vorgehensweise ist im folgenden beschrieben.

Da die Begriffe **Risikofaktoren** und **Gefährdungspotential** im weiteren häufig Verwendung finden, sollen diese zunächst definiert werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie können **Risikofaktoren** Boden- oder Ernährungszustände, atmosphärische Eintragssituationen oder aber klimatische Bedingungen sein, die zu Stress führen können. Welche Parameter im einzelnen als Weiser für diese Risikofaktoren stehen und wie diese abgeleitet wurden ist im folgenden erläutert. Indikator für den Kronenzustand ist der Index SCHAD24. Das **Gefährdungspotential** ergibt sich aus den mittels Diskriminanzanalyse ermittelten Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den Risikofaktoren und ist auf das Risiko bezogen, dass Vitalitätsverluste in Form höherer SCHAD24-Werte auftreten.

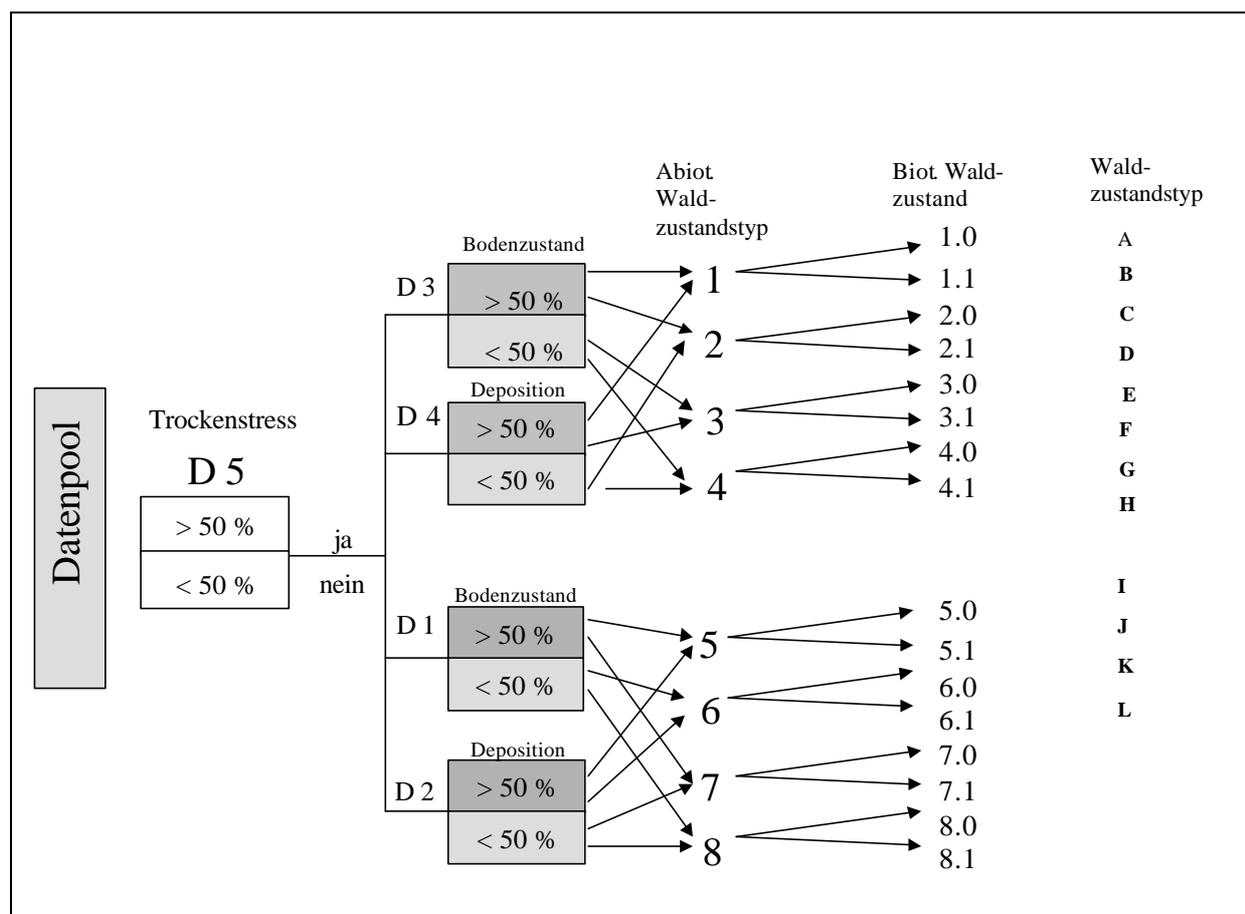


Abb. 26: Schema zur Ableitung von Waldzustandstypen nach Ansatz 1

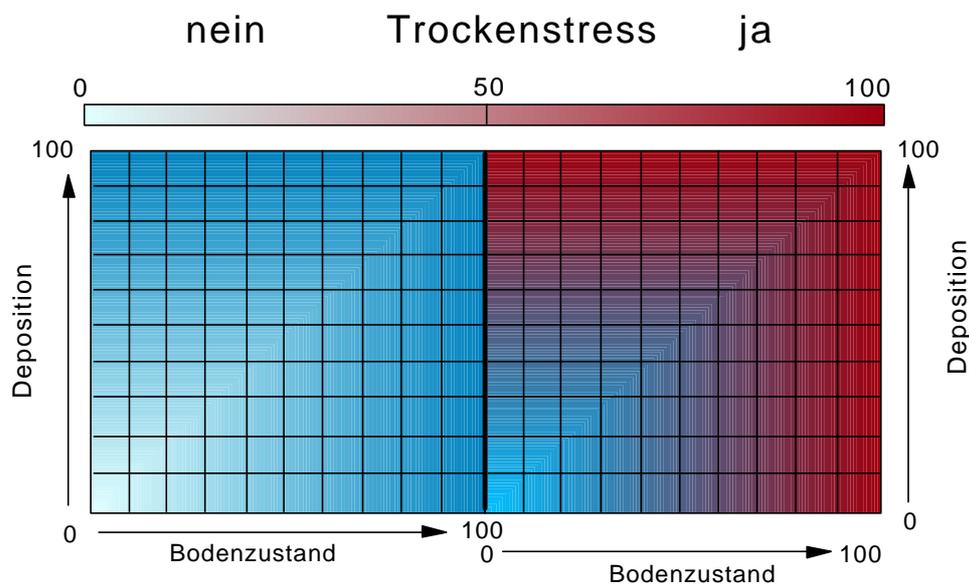


Abb. 27: Schematische Darstellung der Gefährdungspotentiale

## VERFAHREN ZUR ABLEITUNG

### BEWERTUNG VON CLUSTERN BEZÜGLICH IHRER GEFÄHRDUNGSPOTENTIALE

Jedem Cluster (Depositionstyp, Ernährungstyp, Bodenzustandstyp, Trockenstresstyp) werden 3 „Stresspotentiale“ von hoch bis niedrig bezüglich des Vitalitätszustandes zugeordnet (Tab. 27). Die Bewertung der Cluster des Ernährungs- und Bodenzustand wurde anhand der Ergebnisse der probit-analyse (Wolff & Riek 1999) vorgenommen.

Bei der Bewertung der Deposition wurde zum einen die Höhe der S- Einträge als Indikation für das Ausmaß der zu erwartenden Waldschäden verwendet. Zusätzlich werden marine Einträge in NW-Deutschland in die höchste Schad-Gruppe eingeordnet, da an diesen Standorten ebenfalls kritische N-Einträge zu finden sind.

Die Bewertungskategorien für „Boden“, „Deposition“ und „Ernährung“ wurden anschließend zusammengefasst (Tab. 28). Trockenstress wurde als weiterer, differenzierender Parameter dem aggregierten Stressparameter 3 bis 5 zugeordnet und eine neue, gemeinsame Bewertungskategorie (1-6) gebildet.

Tab. 27: Bewertung der Risikofaktoren bezüglich des Stresspotentials

Trockenstress		
Stress	Gruppe	Cluster (siehe Kapitel 4.1)
hoch	1	1
mittel	2	2
gering	3	3-5

Bodenzustand		
Stress	Gruppe	Cluster (nach Riek & Wolff 1999)
hoch	1	5, 9, 8, 2, 11
mittel	2	1, 3, 4, 6, 7, 10, 12
gering	3	14, 16, 17, 18, 13, 15

Depositionssituation		
Stress	Gruppe	Cluster (siehe Kapitel 3.2)
hoch	1	2, 5, 6
mittel	2	4
gering	3	1

Ernährungszustand		
Stress	Gruppe	Cluster (nach Riek & Wolff 1999)
hoch	1	Fichte: 1, 5; Kiefer: 3, 5; Buche: 1
mittel	2	Fichte: 2, 3, 4, 7; Kiefer: 1; Buche: 2,3
gering	3	Fichte: 6; Kiefer: 2, 4, 6; Buche: 4

Mit Hilfe der folgenden Bewertungskategorien konnte die für eine Diskriminanzanalyse notwendige Gruppenbildung vorgenommen werden.

Tab. 28: Gemeinsame Bewertung der Risikofaktoren bezüglich des Stresspotentials

Boden- bzw. Ernährungszustand, Depositionssituation / Gruppe	Trockenstress	Anzahl der Standorte	Zustandstypen	Bewertung bezüglich Stresspotentials
1 1 1	1,2	84	A 1	hoch
3 3 3	3	204	B 2	gering
1 1 1	3	63	B 3	mäßig
andere Kombinationen	1	209	A 4	hoch
3 3 3	1,2	96	A 5	gering
andere Kombinationen	3	898	B 6	mäßig

A = Trockenstress hoch

B = Trockenstress gering

#### ERMITTLUNG VON DISKRIMINANZFUNKTIONEN ZUR ABSCHÄTZUNG DES ABIOTISCHEN RISIKOS

Mit den Standorten, die nach Zustandstypen A1 bis B 6 (vgl. Tab. 28) unterteilt sind, werden nacheinander geschachtelte Diskriminanzanalysen durchgeführt. Zunächst wurde eine Trennung zwischen den Zustandstypen Trockenstress hoch (**A**) und Trockenstress mäßig bis gering (**B**) vorgenommen. Dann wurden innerhalb der beiden Gruppen A und B Diskriminanzanalysen anhand der Gruppen A1 und A5/A6 bzw. B2/B6 und B3 (vgl. Tab. 28) durchgeführt. Gesamtziel war es, diese Standorte für alle Risikofaktoren gleichzeitig zu bewerten.

Es ergeben sich folgende Diskriminanzfunktionen:

**Diskriminanzfunktion D5:** Trockenstress (hoher Diskriminanzwert bedeutet hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Trockenstress)

*entweder:*

**Diskriminanzfunktion D 1:** kein Trockenstress, Einfluß durch den Bodenzustand; kein Einfluß durch Deposition (hoher Diskriminanzwert bedeutet hohe Wahrscheinlichkeit für ungünstigen Bodenzustand)

**Diskriminanzfunktion D 2:** kein Trockenstress, Einfluß durch Deposition; kein Einfluß durch den Bodenzustand (hoher Diskriminanzwert bedeutet hohe Wahrscheinlichkeit für kritische atmosphärische Einträge)

*oder:*

**Diskriminanzfunktion D 3:** Trockenstress, Einfluß durch den Bodenzustand; kein Einfluß durch Deposition (hoher Diskriminanzwert bedeutet hohe Wahrscheinlichkeit für ungünstigen Bodenzustand)

**Diskriminanzfunktion D 4:** Trockenstress, Einfluß durch Deposition; kein Einfluß durch den Bodenzustand (hoher Diskriminanzwert bedeutet hohe Wahrscheinlichkeit für kritische atmosphärische Einträge)

**Folgende Parameter finden in die Gleichungen zur Berechnung der Diskriminanzwerte 5.1 bis 5.5 Eingang :**

Tab. 29: Erläuterung zu den Gleichungen 5.1 bis 5.5

Abkürzung	Parameter
X	Diskriminanzwert
nFK	nutzbare Feldkapazität [mm]
KWB4_9	Klimatische Wasserbilanz von April bis September [mm]
Temp4_9	langfristiger Temperaturmittel von April bis September [ °C]
NHy-N	atmosphärische Gesamtdeposition NHy-N nach Bleeker et al. 2000 des Jahres 1989 [molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
pot.Saeu	atmosphärische Gesamtdeposition potentielle Säure nach Bleeker et al. 2000 des Jahres 1989 [molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
Mg_Mg	Verhältnis Mg- in der Auflage zu Mg in den obersten 30 cm des Mineralbodens
Nv_Hu	N- Vorrat in der Auflage [kg *ha <sup>-1</sup> ]
C/Nmix	C/N- Verhältnis in der Auflage

#### ERMITTLUNG EINER TROCKENSTRESSFUNKTION (FUNKTION D 5)

Die Standorte wurden nach Trockenstress in 2 Untergruppen mittels Diskriminanzanalyse unterteilt.

Ergebnis:

Es konnten 93% aller Standorte richtig eingeordnet werden.

Gruppe 1 (A) Mittelwert = -1,64 (Trockenstress)

Gruppe 2 (B) Mittelwert = 0,60 (kein Trockenstress)

Trennung bei -0,96

$$\mathbf{X = 0,014 nFK + 9,525 * lg (KWB 4_9 + 500) - 0,019 * Temp 4_9 - 27,531 \quad Gl.5.1}$$

#### ERMITTLUNG EINER FUNKTION FÜR STANDORTE MIT TROCKENSTRESS UND DEPOSITIONSBEDINGTEM STRESS (FUNKTION D 4)

Alle Standorte mit hohem Potential gegenüber Trockenstress, d.h. Zuordnungswahrscheinlichkeiten **über 50 %** bei Funktion D 5, wurden auf ein mögliches Risiko aufgrund von hohen atmosphärischen Einträgen getestet.

Ergebnis:

Es konnten 92 % aller Standorte richtig eingeordnet werden.

Trennung bei 0,1075

Gruppe 1 Mittelwert 1,425

Gruppe 5 Mittelwert - 1,287

$$\mathbf{X = 0,001296 * NHy-N + 0,000543 * pot. Säure - 5,417 \quad Gl. 5.2}$$

#### ERMITTLUNG EINER FUNKTION FÜR STANDORTE MIT TROCKENSTRESS UND BODENZUSTANDBEDINGTEM STRESS (FUNKTION D 3)

Alle Standorte, mit hohem Potential gegenüber Trockenstress, d.h. Zuordnungswahrscheinlichkeiten **über 50 %** bei Funktion 5, wurden auf ein mögliches Risiko aufgrund des Bodenzustandes getestet.

Ergebnis:

Es konnten 68 % aller Standorte mit Trockenstress richtig eingeordnet werden  
 Trennung bei 1,017  
 Gruppe 3 Mittelwert 0,35  
 Gruppe 2 Mittelwert – 0,452

$$X = 4.005 * \lg (\text{Mg Auflage} / (\text{Mg Auflage} + \text{Mg Mineralboden 0-30 cm})) + 1.251 \quad \text{Gl.5.3}$$

ERMITTLUNG EINER FUNKTION FÜR STANDORTE OHNE TROCKENSTRESS ABER  
 DEPOSITIONSBEDINGTEM STRESS (FUNKTION D 2)

Alle Standorte, mit geringem Potential gegenüber Trockenstress, d.h. Zuordnungswahrscheinlichkeiten **unter 50 %** bei Funktion 5, wurden auf ein mögliches Risiko aufgrund von hohen atmosphärischen Einträgen getestet.

Ergebnisse:

Es konnten 93 % aller Standorte richtig eingeordnet werden.  
 Trennung bei 1,155  
 Gruppe 3 Mittelwert 2,015  
 Gruppe 2 Mittelwert – 0,61

$$X = 0,00216 * \text{NH}_y\text{-N} + 0,00028 * \text{pot. Säure} - 4,295 \quad \text{Gl. 5.4}$$

ERMITTLUNG EINER FUNKTION FÜR STANDORTE OHNE TROCKENSTRESS ABER  
 BODENZUSTANDBEDINGTEM STRESS (FUNKTION D 1)

Alle Standorte mit hohem Potential gegenüber Trockenstress, d.h. Zuordnungswahrscheinlichkeiten **unter 50 %** bei Funktion 5, wurden auf ein mögliches Risiko aufgrund des Bodenzustandes getestet.

Ergebnis:

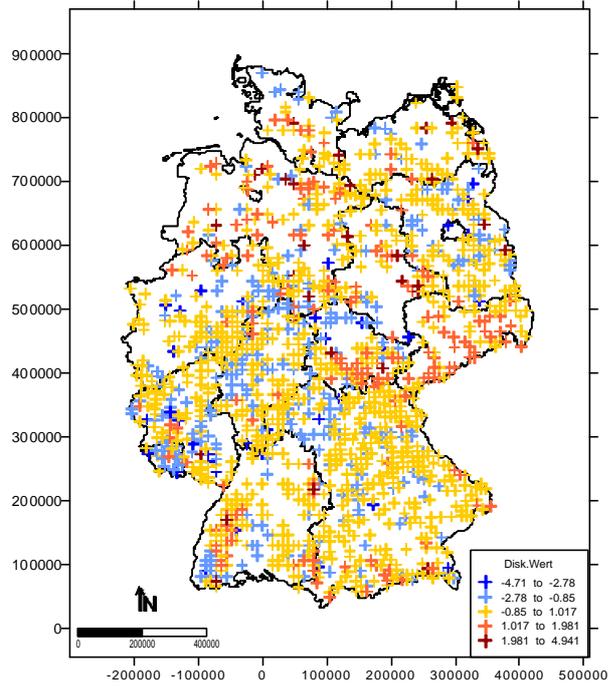
Es konnten 87 % aller Standorte richtig eingeordnet werden.  
 Trennung bei 1,017  
 Gruppe 3 Mittelwert 1,503  
 Gruppe 2 Mittelwert –0,389

$$X = 3,681 * \lg \text{Nvorrat Auflage} - 4,988 * \lg \text{C/Nmix} - 3,01 \quad \text{Gl.5.5}$$

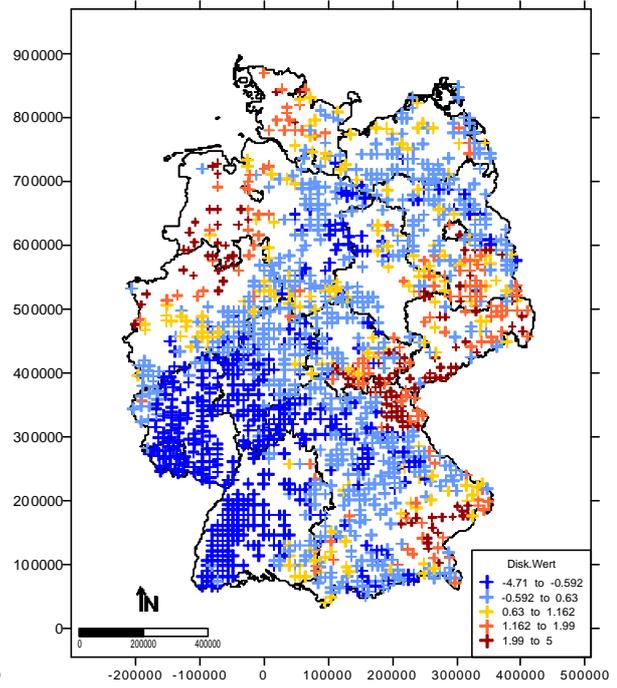
RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER DISKRIMINANZWERTE

Anhand der Gleichungen 5.1 bis 5.5 können Diskriminanzwerte berechnet und räumlich dargestellt werden (Abb.28). Die Werte sind um so höher, je höher das Risiko für das Auftreten von Vitalitätsverlusten ist. Die Diskriminanzwerte der Funktionen 1 und 3, die den Bodenzustand beschreiben weisen keinen räumlichen Schwerpunkt auf. Im Gegensatz dazu zeigt das depositionsbedingte Risiko für Vitalitätsverluste (Funktion 2 bzw. 4) höhere Werte im Bereich Nordwestdeutschland, südöstliches Bayern und im Gebiet Thüringer Wald- Erzgebirge. Trockenstress, der durch Funktion 5 repräsentiert wird, ist vor allem in Ostdeutschland und in Mitteldeutschland zu finden.

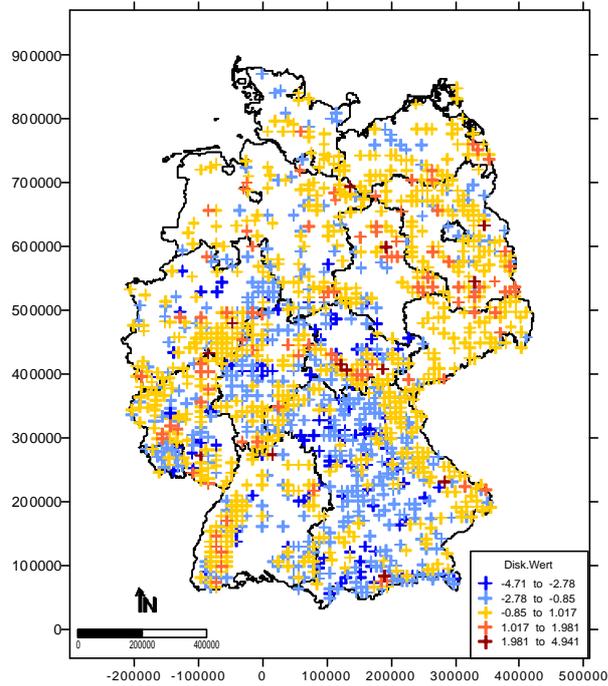
Funktion 1



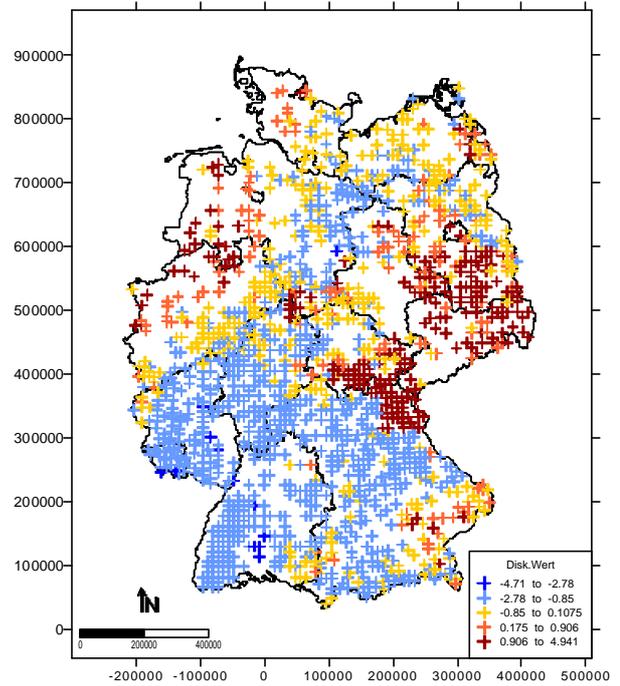
Funktion 2



Funktion 3



Funktion 4



## Funktion 5

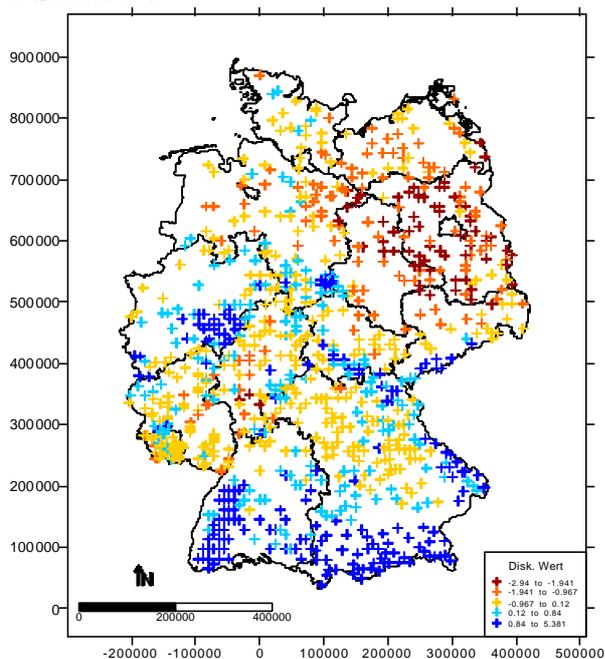


Abb. 28: Räumliche Verteilung der Diskriminanzwerte der ermittelten Funktionen für abiotischen Stress

#### AUSWAHLVERFAHREN VON EXTREMSTANDORTEN

Im Rahmen des Teilprojektes „Bundesweite Aufbereitung, Ergänzung und integrierende Auswertung von Daten des Umweltmonitorings im Wald“ des BMBF – Vorhabens „Konzepte und Machbarkeitsuntersuchungen für die Integrierende Auswertung von Daten des Umweltmonitorings im Wald“ sollten Standorte gefunden werden, die sowohl ein besonders hohes wie niedriges Risiko bezüglich der untersuchten Risikofaktoren aufweisen. Extreme sind Standorte mit Zuordnungswahrscheinlichkeiten (Kap. 5.1.2.3) zu Risikofaktoren anhand bestimmter Perzentile, d.h. unter 10 bzw. 20 % („günstige“ Standorte) sowie 60 bzw. 80 % („schlechte“ Standorte).

Für jeden Standort wurden somit Wahrscheinlichkeiten bezüglich des Eintretens von verschiedenen Stressbedingungen (Zuordnung zu den Funktionen D1 bis D5) mit Hilfe der Gleichungen 5.1 bis 5.5 berechnet und nach Baumarten getrennt dargestellt.

Anschließend wurden die Extreme in bezug auf die festgestellten Stressbedingungen herausgefiltert.

Aus der jeweiligen Kombination von Stressbedingungen und der Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Kombination zugeordnet zu werden, ergeben sich die in Tabelle 30 aufgelisteten baumartenspezifischen Risikogruppen (Tab. 30), die räumlich dargestellt werden können (Abb. 29). Die Anzahl der Standorte, die bestimmten Kombinationen von Gefährdungspotentialen zugeordnet werden kann, variiert z.T. erheblich (Tab. 31).

Tab. 30: Baumartenspezifische Zuordnung zu den Risikofaktoren anhand von Perzentilen der Diskriminanzfunktionswerten

<b>Fichte</b>	ökochemischer Stress [% Zuordn.wahrscheinlichkeit]		Risikogruppe
Trockenstress [% Zuordn.wahrscheinlichkeit]	Bodenzustand	Deposition	
≤10	≤10	≤10	1
≤10	≤10	≥80	2
≤10	≥80	≤10	3
≤10	≥60	≥80	4
≥60	≤10	≥80	5
≥60	≥60	≤10	6
≥80	≥80	≥80	7

<b>Kiefer</b>	ökochemischer Stress [% Zuordn.wahrscheinlichkeit]		Risikogruppe
Trockenstress [% Zuordn.wahrscheinlichkeit]	Boden	Deposition	
≤10	≤10	≤10	8
≤10	≤10	≥80	9
≤20	≥60	≤10	10
≤20	≥60	≥60	11
≥60	≤20	≥60	12
≥80	≥60	≤10	13
≥80	≥60	≥80	14

<b>Buche</b>	ökochemischer Stress [% Zuordn.wahrscheinlichkeit]		Risikogruppe
Trockenstress [% Zuordn.wahrscheinlichkeit]	Boden	Deposition	
≤10	≤10	≤10	15
≤10	≤20	≥60	16
≤20	≥60	≤20	17
≤20	≥60	≥60	18
≥60	≤20	≥60	19
≥80	≥60	≤10	20
≥60	≥60	≥60	21

Tab. 31: Anzahl der Standorte, bei denen die Kombination Trockenstress (Funktion 5) zusammen mit anderen Stressbedingungen (Funktion 1 bis 4) auftreten

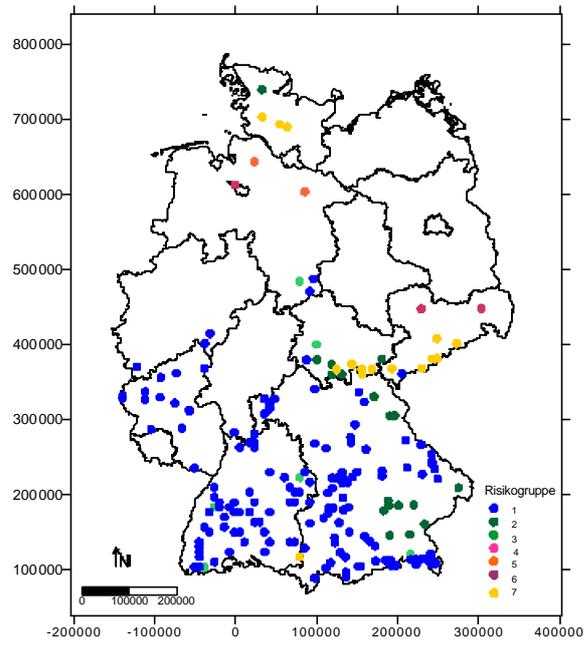
	Funktion 1					
Funktion 5	10 %	20%	40%	60%	80%	Gesamt-anzahl
10%	456	252	135	58	19	920
20%	141	68	26	6	6	247
40%	72	31	28	9	2	142
60%	63	28	16	6	4	117
80%	80	60	31	8	6	185
<b>Gesamt-anzahl</b>	812	439	236	87	37	1611

	Funktion 2					
Funktion 5	10 %	20%	40%	60%	80%	Gesamt-anzahl
10%	741	83	42	25	134	1025
20%	203	17	14	11	23	268
40%	112	18	6	10	13	159
60%	98	12	5	10	9	134
80%	135	24	12	8	28	207
<b>Gesamt-anzahl</b>	1289	154	79	64	207	1793

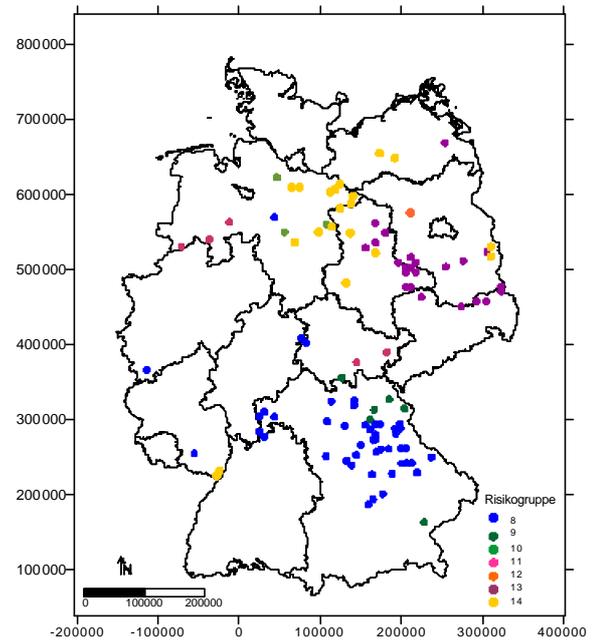
	Funktion 3					
Funktion 5	10 %	20%	40%	60%	80%	Gesamt-anzahl
10%	182	192	264	225	44	907
20%	54	56	58	68	7	243
40%	18	37	28	45	12	140
60%	14	19	43	37	4	117
80%	9	15	47	88	19	178
Gesamt	277	319	440	463	86	1585

	Funktion 4					
Funktion 5	10 %	20%	40%	60%	80%	Gesamt-anzahl
10%	736	72	33	46	138	1025
20%	186	17	11	13	41	268
40%	97	14	12	10	26	159
60%	73	16	9	15	21	134
80%	88	23	16	15	65	207
	1180	142	81	99	291	1793

## Fichte



## Kiefer



## Buche

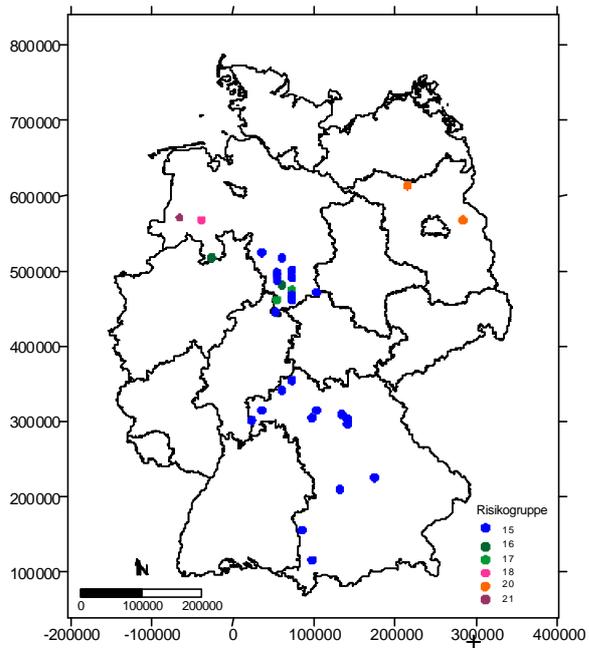


Abb. 29: Räumliche Darstellung der Risikogruppen nach Baumarten getrennt

## ZUORDNUNG ZU WALDZUSTANDSTYPEN

Basierend auf den in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Funktionen konnten für alle 1800 Standorte Zuordnungen zu neuen Gruppen getroffen werden (Tab. 32). Diese neuen Gruppen werden als abiotische Waldzustandstypen bezeichnet, da sie anhand der abiotischen Faktoren Klima, Boden, Deposition unterteilt wurden.

Zur Einordnung von Standorten in diese Waldzustandstypen, wurden für die 1800 Plots anhand der Funktionen D1 bis D5 (Gleichung 5.1 bis 5.27) Diskriminanzwerte für jeden Stressfaktor berechnet und den Diskriminanzwerten anschließend Zuordnungswahrscheinlichkeiten (0 bis 100%) durch logistische Modelle baumartenunabhängig zugeordnet. Anschließend können einzelne Standorte anhand dieser Wahrscheinlichkeiten zunächst in abiotische Waldzustandstypen eingeordnet werden (Tab.32).

Tab. 32: Beschreibung der abiotischen Waldzustandstypen

	Wahrscheinlichkeit für		abiotische Waldzustandstypen
	ökochemischen Stress		
Trockenstress	Bodenzustand	atm. Deposition	
hoch	hoch	hoch	1
hoch	hoch	niedrig	2
hoch	niedrig	hoch	3
hoch	niedrig	niedrig	4
niedrig	hoch	hoch	5
niedrig	hoch	niedrig	6
niedrig	niedrig	hoch	7
niedrig	niedrig	niedrig	8

BERECHNUNG VON ZUORDNUNGSWAHRSCHEINLICHKEITEN ZU ABIOTISCHEN  
WALDZUSTANDSTYPEN ANHAND LOGISTISCHER MODELLE

Zur Ermittlung der Zuordnungswahrscheinlichkeit mußte anhand eines Regressionsmodells eine Anpassung an die Diskriminanzfunktionen gefunden werden. Das folgende logistische Modell erwies sich als besonders gut in der Anpassung und bietet die Möglichkeit aus Diskriminanzwerten Zuordnungswahrscheinlichkeiten für das jeweilige Risiko abzuleiten (siehe Anhang 25).

$$Y = 1 / (1 / u + (b_0 * (b_1^x)))$$

wobei:

Y = Zuordnungswahrscheinlichkeit [%]

u = Obergrenze

x = berechneter Diskriminanzwert

b<sub>0</sub> = Schnittpunkt mit der Y-Achse

b<sub>1</sub> = Steigung

Tab. 33: Berechnete Parameter für das Regressionsmodell für Diskriminanzfunktionen D1-D5

Diskriminanzfunktion	b0	b1	u
Funktion 1 (D1)	14,6731	0,029	100
Funktion 2 (D2)	1,7101	0,07	100
Funktion 3 (D3)	0,0098	0,3234	100
Funktion 4 (D4)	0,0059	0,0763	100
Funktion 5 (D5)	0,8542	89,5762	100

Anhand der Gleichung und der dazugehörigen Parameter ergeben sich folgende Gleichungen:

Eine graphische Darstellung ist im Anhang 25 zu finden.

**Funktion 1**

$$Y = 1 / (1 / 100 + (14,6731 * (0,029^x)))$$

**Gl.5.6**

$$r = 0,997$$

**Funktion 2**

$$Y = 1 / (1 / 100 + (1,7101 * (0,07^x)))$$

**Gl.5.7**

$$r = 0,954$$

**Funktion 3**

$$Y = 1 / (1 / 100 + (0,0098 * (0,3234^x)))$$

**Gl.5.8**

$$r = 1,00$$

**Funktion 4**

$$Y = 1 / (1 / 100 + (0,0059 * (0,0763^x)))$$

**Gl.5.9**

$$r = 0,944$$

**Funktion 5**

$$Y = 1 / (1 / 100 + (0,8542 * (89,5762^x)))$$

**Gl.5.10**

$$r = 0,908$$

wobei

Y= Zuordnungswahrscheinlichkeit [%]

x = Diskriminanzwert aus den entsprechenden Gleichungen 5.1 bis 5.5

#### VERKNÜPFUNG VON ABIOTISCHEN WALDZUSTANDSTYPEN MIT DER BIOTISCHEN REAKTION VON BESTÄNDEN

Bisher wurden die verschiedenen abiotischen sowie biotischen Einflussparameter getrennt voneinander betrachtet. Zur Bewertung des umfassenden Gefährdungspotentials ist eine Verknüpfung durchgeführt worden. Die aus abiotischen Merkmalen hergeleiteten acht Waldzustandstypen (Tab. 32) wurden auf der Grundlage von Ernährungs- und Kronenzustandsdaten weiter unterteilt. Hierzu wurden zunächst für das Gesamtkollektiv baumartenspezifisch 2 Gruppen gebildet, die sich durch besonders geringe mit der Kennzeichnung 0 bzw. hohe Kronenverlichtung mit der Kennzeichnung 1 oder durch eine ausgeglichene bzw. besonders ungünstige Ernährungssituation (deutliche Nährstoffmängel) voneinander unterscheiden (Tab.34). Die Bewertung der Kronenverlichtung erfolgte unter Berücksichtigung des Bestandesalters unter Zuhilfenahme des Schadpotentialindex (vgl.

Wolff & Riek 2000). Es wurden nun innerhalb der einzelnen abiotischen Waldzustandstypen Diskriminanzanalysen mit den Ernährungs- und Kronenzustandsdaten durchgeführt und typenspezifische Trennfunktionen zwischen den "biotischen Waldzustandstypen" abgeleitet (Tab. 35). Daraus ergaben sich 16 biotische Waldzustandstypen mit der Kennzeichnung 1.0 bis 8.1.

Daraus ergaben sich folgende Gruppen:

Tab. 34: Anzahl der Kombinationen von biotischen Waldzustandstyp

Abiot. Waldzustandstyp	Biot. Subtyp		Gesamtanzahl
	0	1	
1	79	49	128
2	21	8	29
3	90	22	112
4	59	11	70
5	19	28	47
6	49	54	103
7	108	48	156
8	729	223	952
Gesamtanzahl	1154	443	1597

Diese 16 biotischen Waldzustandstypen wurden wie folgt zu 12 Waldzustandstypen zusammengefasst.

Tab. 35: Einordnung von abiotischen und biotischen Zustandstypen zu Waldzustandstypen

Waldzustandstyp	biot. + abiotischer Typ	Waldzustandstyp	biot. + abiotischer Typ
1	5.1	7	8.1
2	1.1	8	6.0
3	7.1	9	7.0
4	2.1	10	4.1 + 4.0
5	3.1	11	8.0
6	6.1	12	1.0 + 2.0 + 3.0 + 5.0

#### BERECHNUNG VON ZUORDNUNGSWAHRSCHEINLICHKEITEN ZU DEN BIOTISCHEN WALDZUSTANDSTYPEN

Um eine Zuordnung innerhalb der abiotischen Zustandstypen zu den beschriebenen biotischen Waldzustandstypen (Tab. 34) zu erreichen, wurde eine Diskriminanzanalyse durchgeführt. Folgende Parameter finden Eingang in die Gleichungen 5.11 bis 5.18:

Tab. 36: Erläuterung zu den Gleichungen 5.11 bis 5.18

Abkürzung	Erklärung
t	Diskriminanzwert für abiotische Waldzustandstypen
Ern_Mg	Magnesiumgehalt in Nadeln/ Blättern [mg g <sup>-1</sup> ]
Ern_S	Schwefelgehalt in Nadeln/ Blättern [mg g <sup>-1</sup> ]
Ern_Mn	Mangangehalt in Nadeln/ Blättern [mg g <sup>-1</sup> ]
Ern_N/Ca	Verhältnis Stickstoff- zu Calciumgehalte in Nadeln/ Blättern [mg g <sup>-1</sup> ]
Ern_N/Mg	Verhältnis Stickstoff- zu Magnesiumgehalte in Nadeln/ Blättern [mg g <sup>-1</sup> ]
Ern_N	Stickstoffgehalt in Nadeln/ Blättern [mg g <sup>-1</sup> ]
Schad24	Anteil der Schadklassen 2 bis 4 [%]
Fichte	1, falls Standort Fichtenstandort, sonst 0
Buche	1, falls Standort Buchenstandort, sonst 0

Trennung Gruppe 1.1 und 1.0

$$t = 1,721 * \text{Ern Schwefel} + 0,998 * \text{Ern Mangan} - 4,515$$

Gl.5.11

Trennung Gruppe 2.1 und 2.0

$$t = 0,038 * \text{SCHAD24} + 2,429 * \text{Fichte} + 0,373 * \text{Ern N/Ca} - 3,721$$

Gl.5.12

Trennung Gruppe 3.1 und 3.0

$$t = 0,061 * \text{SCHAD24} - 1,986$$

Gl.5.13

Trennung Gruppe 4.1 und 4.0

$$t = 0,024 * \text{SCHAD24} - 1,162 * \text{Ern Magnesium} + 2,372 * \text{Ern Schwefel} - 3,157$$

Gl.5.14

Trennung Gruppe 5.1 und 5.0

$$t = 0,023 * \text{SCHAD24} + 2,251 * \text{Ern Schwefel} - 2,765 * \text{Ern Magnesium} - 2,311$$

Gl.5.15

Trennung Gruppe 6.1 und 6.0

$$t = 0,022 * \text{SCHAD24} + 2,401 * \text{Ern Schwefel} + 0,127 * \text{Ern Stickstoff/Magnesium} - 6,276$$

Gl.5.16

Trennung Gruppe 7.1 und 7.0

$$t = 0,026 * \text{SCHAD24} + 0,159 * \text{Ern Stickstoff/Magnesium} - 1,833 * \text{Buche} - 3,369$$

Gl.5.17

Trennung Gruppe 8.1 und 8.0

$$t = 0,033 * SCHAD24 + 0,11 * \text{Ern Stickstoff/Magnesium} - 3,737 * \text{Buche} + 1,096$$

Gl.5.18

$$* \text{Ern Schwefel} + 0,203 * \text{Ern Stickstoff} - 6,752$$

Mittels logistischer Modelle ließen sich wiederum Gleichungen zur Berechnung der Zuordnungswahrscheinlichkeit berechnen.

Abiotischer Waldzustandstyp 1

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (0,1653 * (0,2836^t))) * 100$$

Gl.5.20

$$r = 0,964$$

Abiotischer Waldzustandstyp 2

Gl.

5.21

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (0,1376 * (0,0662^t))) * 100$$

$$R = 0,879$$

Abiotischer Waldzustandstyp 3

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (0,0215 * (0,1074^t))) * 100$$

Gl.5.22

$$r = 0,900$$

Abiotischer Waldzustandstyp 4

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (1,7674 * (3,371^t))) * 100$$

Gl.5.23

$$r = 0,894$$

Abiotischer Waldzustandstyp 5

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (18,4217 * (11,4518^t))) * 100$$

Gl.5.24

$$r = 0,976$$

Abiotischer Waldzustandstyp 6

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (0,75 * (0,084^t))) * 100$$

Gl.5.25

$$r = 0,931$$

Abiotischer Waldzustandstyp 7

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (0,7028 * (0,1744^t))) * 100$$

Gl.5.26

$$r = 0,964$$

Abiotischer Waldzustandstyp 8

$$Y = 1 / (1 / 1,001 + (1,4429 * (0,3205^t))) * 100$$

Gl.5.27

$$r = 0,872$$

wobei :

Y= Zuordnungswahrscheinlichkeit [%]

t = Diskriminanzwert aus den entsprechenden Gleichungen 5.11 bis 5.18

## CHARAKTERISTIKA DER WALDZUSTANDSTYPEN

Anhand des Medians der Eingangsparameter aus Bodenzustand, atmosphärischer Deposition, Klima, Alter und Kronenzustand können die verschiedenen Waldzustandstypen wie folgt beschrieben werden (Tab. 36, Abb. 31 bis Abb. 33). Die Mittelwerte der verwendeten Eingangsdaten sind in Anhang 22 bis 24 zu finden

**Waldzustandstyp 1** weist die höchsten SCHAD24-Werte auf. Im Einklang damit stehen die höchsten atmosphärischen Einträge an Schwefel, Stickstoff, Kalium, Calcium und potentieller Säure ebenso wie die höchsten Ca-Gehalte in den Blättern und Nadeln der betroffenen Bäume. Der Bodenzustand, insbesondere die pH-Werte, deuten auf eine Versauerung der Böden hin. Langfristiger Trockenstress ist nicht festzustellen. Die Standorte dieses Typs sind vor allem im Fichtel-, Erzgebirge und im Bayerischen Wald sowie im durch hohe landwirtschaftliche Einträge gekennzeichneten Norddeutschen Tiefland und im Südöstlichen Bayern zu finden.

Obwohl die Standorte des **Waldzustandstyps 2** zusätzlich durch Trockenstress gefährdet sind, ergeben sich deutlich niedrigere SCHAD24-Werte (Median). Ursache hierfür sind vermutlich die geringeren atmosphärischen Einträge und der bessere Bodenzustand. Im Vergleich zur Gesamtstichprobe sind diese allerdings immer noch als erhöht anzusehen. Indikator für die Belastungssituation könnten die hohen Mn- und S- Gehalte in den Nadeln und Blättern sein. Die räumliche Verteilung zeigt eine Häufung in Ostdeutschland an. Die Einordnung in diesen Typ kann für die Baumarten Fichte und Kiefer durchgeführt werden.

Auf der Basis des Kronenzustandes (SCHAD24-Wert) ist eine deutliche Belastung der betroffenen Waldökosysteme des **Waldzustandstyps 3** zu erkennen, die sich auch im schlechten Bodenzustand widerspiegelt. Die Basensättigung und die pH-Werte in den oberen mineralischen Horizonten sind besonders niedrig. Zusammen mit den hohen N-Vorräten in der Auflage ist ein gehemmter Abbau der organischen Substanz aufgrund der Bodenversauerung zu vermuten. Auffällig ist auch die geringe Verfügbarkeit an Magnesium (Mg-Verhältnis in der Auflage zum Mineralboden). Da die atmosphärischen Einträge an Säurebildnern gering sind, ist zu vermuten, dass der Bodenzustand geogen bedingt ungünstig ist. Dafür spricht auch die hohe Streuung der räumlichen Verteilung.

Der Kronenzustand der Bäume des **Waldzustandstyps 4** ist deutlich besser als bei der vorherigen Gruppe, obwohl der Bodenzustand niedrige Basensättigung, geringe pH-Wert<sub>Auflage</sub>, weite C/N-Verhältnisse aufweist. Entscheidend scheinen jedoch die deutlich niedrigeren atmosphärischen Einträge zu sein. Charakteristisch sind zudem die niedrigen Ca-Gehalte in den Nadeln der untersuchten Bäume und ein Ungleichgewicht gegenüber Stickstoff (N/Ca). Die Einordnung zu diesem Typ kann für die Baumarten Fichte und Kiefer durchgeführt werden.

Ähnlich hohe SCHAD24-Werte wie Typ 4 weist **Waldzustandstyp 5** auf. Der Bodenzustand zeichnet sich jedoch durch die höchste, durchschnittliche Basensättigung und maximale pH-Werte aus. Die Werte der atmosphärischen Deposition sind ähnlich erhöht wie bei Typ 2. Der Ernährungszustand der Bäume ist durch hohe Kalium-, Stickstoff- und Mangangehalte sowie ein weites N/Ca-Verhältnis gekennzeichnet. Ein möglicher Stressfaktor stellt das Klima, das durch eine negative klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr geprägt ist, dar. Diese Standorte sind vor allem im Norddeutschen Raum auf sandigen Böden zu finden. Die Einordnung in diesen Typ kann nur für die Baumart Kiefer durchgeführt werden.

Der **Waldzustandstyp 6** wird ebenso wie die vorherigen beiden Typen durch hohe SCHAD24-Werte charakterisiert, obwohl die Wahrscheinlichkeit, dass an diesen Standorten Trockenstress auftritt als gering einzuschätzen ist. Kennzeichnend sind vor allem die hohen Eintragsraten an Stickstoffverbindungen, Schwefel und potentieller Säure. Aber auch die Basensättigung der Böden ist gering. Die Ernährungssituation kann als durchschnittlich bezeichnet werden. Dieser Typ tritt räumlich gemeinsam mit Typ 1 auf. Im Gegensatz dazu ist der Bodenzustand jedoch etwas besser. Die pH-Werte sind deutlich höher. Die Einordnung in diesen Typ kann für die Baumarten Fichte und Kiefer durchgeführt werden.

Der **Waldzustandstyp 7** gehört zu den Gruppen mit besserem durchschnittlichem Kronenzustand, die Streuung der Werte innerhalb der Gruppe ist jedoch noch sehr hoch. Die Werte der Eingangsparameter sind durchschnittlich, z.T. liegen sie sogar unterhalb des Medians der Gesamtstichprobe; daher erstaunen die teilweise sehr hohen SCHAD24 – Werte. Zum einen können andere, nicht erfasste Faktoren, wie z.B. biotische Schädlinge, Ursache für den schlechten Kronenzustand sein. Eine andere Möglichkeit könnten Fehler bei der Erhebung des Kronenzustandes oder anderer verwendeter Eingangsparameter darstellen. Dieser Typ ist bundesweit zu finden.

Einen ähnlich niedrigen SCHAD24-Wert (Median) wie Typ 7 weist der **Waldzustandstyp 8** auf. Auffällig sind die hohen atmosphärischen Einträge vor allem an reduziertem Stickstoff, die im Gegensatz zum relativ guten Bodenzustand (mittlere pH-Werte und mittlere Basensättigung) stehen. Die Vorräte an Stickstoff in den oberen 10 cm sind wahrscheinlich depositionsbedingt sehr hoch. Klimabedingter Trockenstress ist nicht zu erwarten. Bei den Standorten dieses Waldzustandstyps handelt es sich wahrscheinlich um Standorte, die atmosphärische Einträge durch ihre bessere Pufferung kompensieren und daher geringe Kronenschäden aufweisen. Zu finden sind diese Standorte im Nordwestdeutschen Tiefland, Südostbayern und dem bayrischen Wald. Die Einordnung zu diesem Typ kann für die Baumarten Fichte und Kiefer durchgeführt werden.

Der Kronenzustand des **Waldzustandstyp 9** ist durch niedrige SCHAD24-Werte gekennzeichnet. Auch die atmosphärischen Einträge und die Klimabedingungen deuten auf eine geringe Belastung hin. Der Bodenzustand ist durch mittlere bis geringe Basensättigung und niedrige pH-Werte charakterisiert. Die Stickstoffvorräte in der Auflage und in den obersten Mineralhorizonten sind hoch. Im Widerspruch dazu steht die Ernährungssituation. Sie ist vermutlich geogen bedingt weniger günstig. Kalium- aber auch Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern sowie Calciumgehalte sind sehr gering bis gering. Es ist kein räumlicher Schwerpunkt festzustellen.

Den besten Kronenzustand weisen die Bäume des **Waldzustandstyps 10** auf. An diesen Standorten, die den größten Umfang innerhalb der Stichprobe ausmachen, ist weder Trockenstress oder ökochemischer Stress (Bodenzustand und Deposition) zu erwarten. Allein die Ernährungssituation kann in Einzelfällen ungünstig sein. Die Bestände dieses Waldzustandstyps sind deutlich jünger (Abb. 31+ 32). Die räumliche Verteilung weist einen Schwerpunkt in Norddeutschland auf.

Charakteristisch für den **Waldzustandstyp 11** sind ebenfalls geringe mittlere SCHAD24-Werte. Auch Klima und Deposition weisen ein ähnliches geringes Risikopotential auf. Im Gegensatz zu Typ 10 sind die Ernährungssituation und der Bodenzustand aber deutlich besser. Die Standorte dieses Typs sind in ganz Deutschland zu finden.

Der mittlere SCHAD24-Wert des **Waldzustandstyps 12** ist trotz der hohen säurewirksamen, atmosphärischen Einträge vergleichbar mit jenen des Typ 11. Ursache könnte zum einen der gute Bodenzustand, zum anderen können sich auch nicht erfasste Einflußfaktoren positiv ausgewirkt haben. Wie die Darstellung des mittleren Bestandesalters der verschiedenen Waldzustandstypen zeigen, ist kein Alterseinfluß zu erwarten (Abb. 31/32). Zudem wirken sich die – auch gegenüber den Säureeinträgen - sehr hohen seesalzkorrigierten Baseneinträge puffernd aus. Dieser Waldzustandstyp ist vor allem in Ostdeutschland zu finden.

Tab. 37: Beschreibung der Waldzustandstypen bezüglich möglicher Stressfaktoren und der biotischen Reaktion des Ökosystems

Waldzustandstyp	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von			
	Trockenstress	Ökochemischer Stress		biot. Reaktion
		Bodenzustand	Deposition	SCHAD24, Nährstoffmangel und -überschuß
<b>1</b> n= 28	gering	hoch	hoch	hoch
<b>2</b> n=49	hoch	hoch	hoch	hoch
<b>3</b> n=48	gering	gering	hoch	hoch
<b>4</b> n=22	hoch	hoch	gering	hoch
<b>5</b> n=8	hoch	gering	hoch	hoch
<b>6</b> n=54	gering	gering	hoch	hoch
<b>7</b> n=223	gering	gering	gering	hoch
<b>8</b> n=49	gering	gering	hoch	gering
<b>9</b> n=108	gering	hoch	gering	gering
<b>10</b> n=59	hoch	gering	gering	indifferentes Verhalten
<b>11</b> n=729	gering	gering	gering	gering
<b>12</b> n=209	niedrige SCHAD24-Werte <b>obwohl</b> mindestens einer der untersuchten Risikofaktoren eine Rolle spielt			gering

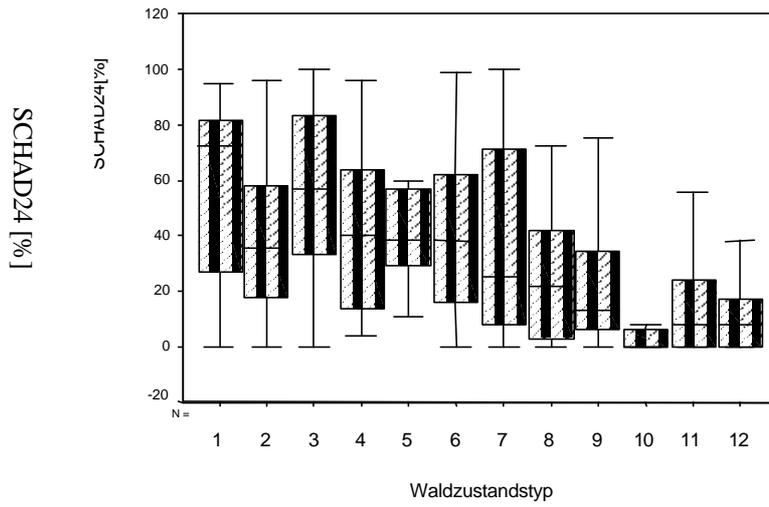


Abb. 30: Mittlerer Schad24-Wert der verschiedenen Waldzustandstypen

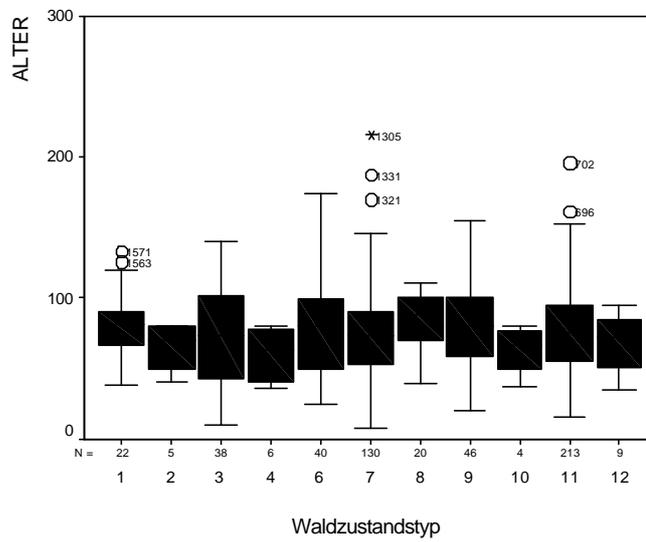


Abb. 31: Mittleres Bestandesalter der Waldzustandstypen bei **Fichtenbeständen**

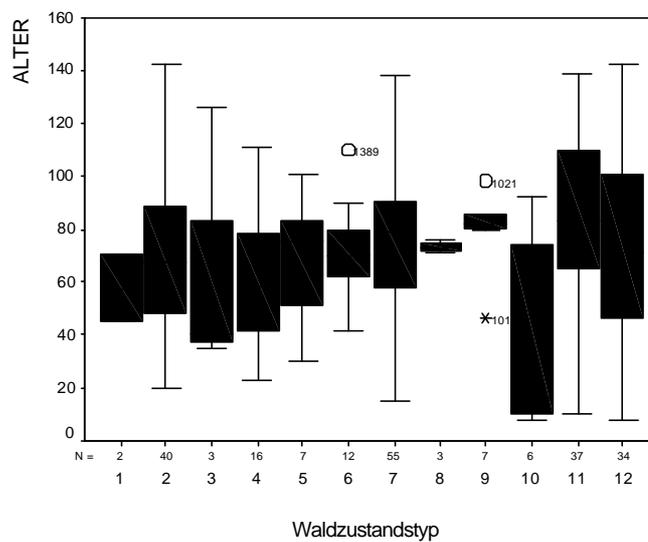


Abb. 32: Mittleres Bestandesalter der Waldzustandstypen bei **Kiefernbeständen**

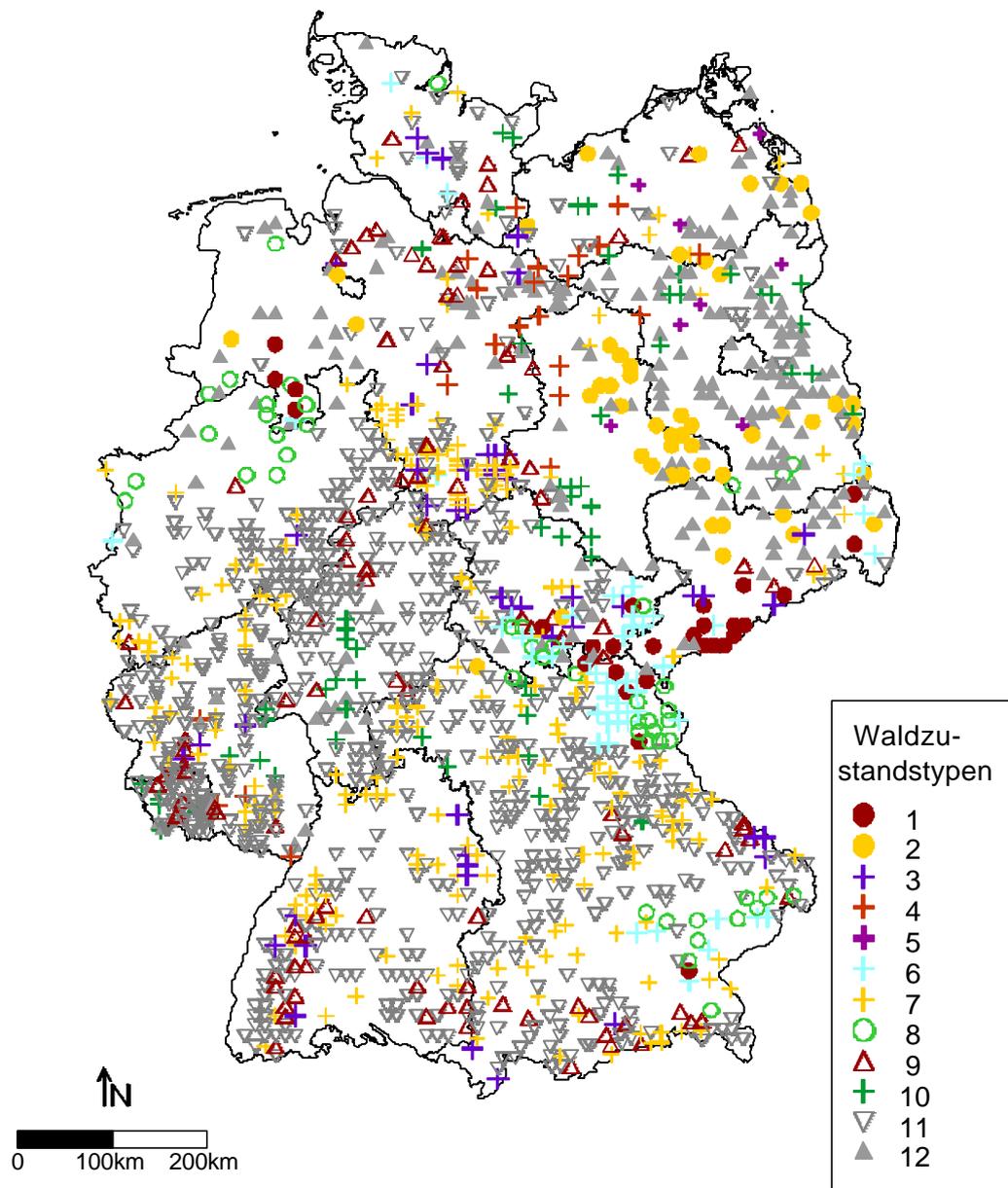


Abb. 33: Räumliche Verteilung der Waldzustandstypen

## BEZIEHUNGSGEFÜGE AUF DER GRUNDLAGE VON WALDZUSTANDSTYPEN

Die Boden-Klima-Depositionssituation ist für baumartenunspezifische Typen entscheidend - für alle Hauptbaumarten stellt sich eine ähnliche Schadsituation ein. Aus Abbildung 34 geht z.B. hervor, dass sich Waldzustandstypen mit starker Kronenverlichtung durch geringe Basensättigungen im Oberboden, weite N/Mg-Verhältnisse der Nadelspiegelwerte und hohe Einträge an potentieller Säure auszeichnen. Das trifft für die Typen 1 und 3 in besonderem Maße zu. Starke Kronenverlichtungen sind außerdem gehäuft auf Standorten mit sehr niedrigen mittleren Sommertemperaturen (montane Regionen) sowie sehr hohen Temperaturen, die auf Wassermangel hindeuten, zu finden. Die enge Beziehung zwischen SCHAD24 und dem N/Mg-Quotienten verdeutlicht, dass es durch erhöhte Stickstoffeinträge auf den betroffenen Standorten zu Disharmonien zwischen den Nährelementen und Nährstoffengpässen insbesondere in Bezug auf die Magnesiumversorgung kommen kann. Bei Standorten mit besonders geringen Kronenverlichtungen, wie sie durch die Waldzustandstypen 11 und 10 repräsentiert werden, finden sich indes tendenziell geringe Säureeinträge, mittlere bis hohe Basensättigungen im Mineralboden bzw. pH-Werte in der Humusaufgabe sowie besonders enge N/Mg-Relationen, die auf eine gute Magnesiumversorgung schließen lassen.

Die folgenden Scatterplots spiegeln grundsätzliche Muster wider, von denen die Merkmale am Einzelstandort selbstverständlich deutlich abweichen können (Abb. 34). Die Auswertungen zeigen, dass die Klassifizierung von Standorten des Level I-Erhebungsnetzes nach ihren abiotischen und biotischen Eigenschaften für weitergehende integrierende Ursache-Wirkungs-Analysen von großer Wichtigkeit sind. So kommt den ermittelten Waldzustandstypen zukünftig als Bindeglied zwischen den beiden Inventurebenen des Level I- und Level II-Programms eine wichtige Rolle bei deren Verknüpfung zu. Um die Waldzustandstypen und gegebenenfalls weitere Sub-Typen noch stärker durch biotische Merkmale zu unterlegen, werden gegenwärtig im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Konzept und Machbarkeitsuntersuchung für die Integrierende Auswertung von Daten des Umweltmonitorings im Wald“ auf ausgewählten Flächen standorts- und waldwachstumskundliche Erhebungen durchgeführt und nach den Typen stratifiziert ausgewertet.

## Waldzustandstyp

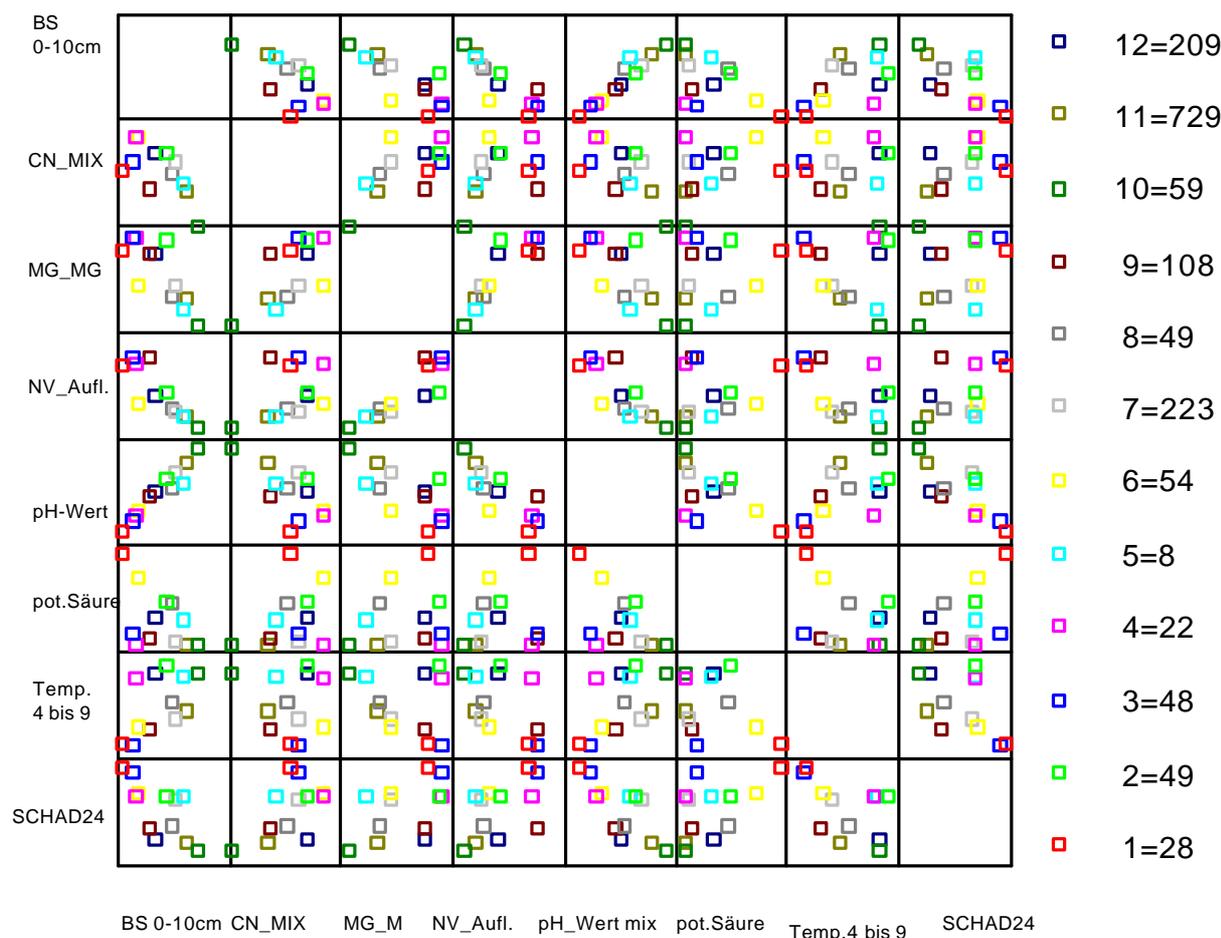


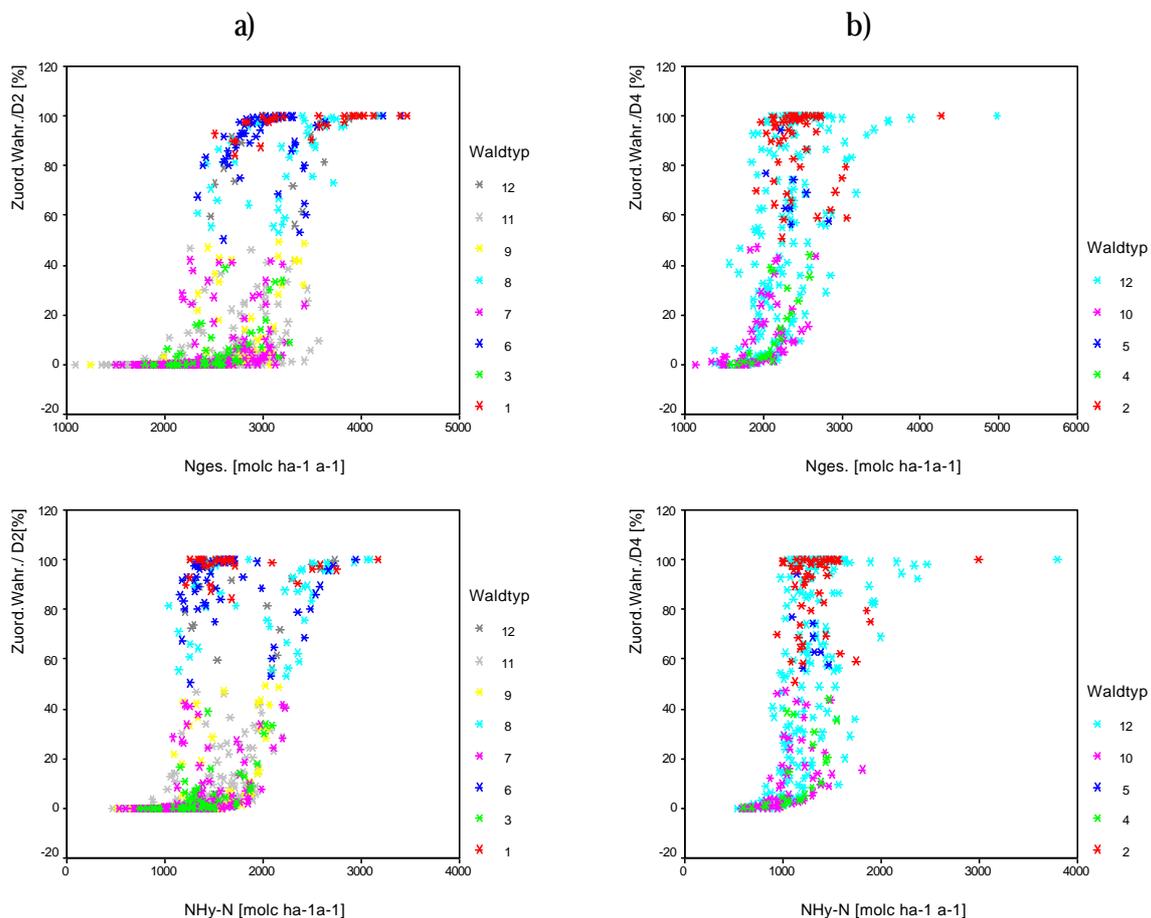
Abb. 34: Streudiagramme verschiedener Ökosystemmerkmale berechnet als Mittelwert (Median) innerhalb der Waldzustandstypen

Abkürzung	Erklärung
Temp4_9	Langfristiges Temperaturmittel von April bis September [ °C]
pH-Wert	pH-Wert in der Auflage
pot.Saeu	Atmosphärische Gesamtdeposition potentielle Säure nach Bleeker et al. 2000 des Jahres 1989 [molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
Mg_Mg	Verhältnis Mg- in der Auflage zu Mg in den obersten 30 cm des Mineralbodens
Nv_Hu	N- Vorrat in der Auflage [kg *ha <sup>-1</sup> ]
C/Nmix	C/N- Verhältnis in der Auflage
Schad24	Anteil der Schadklassen 2 bis 4 [%]
BS 0-10 cm	Basensättigung in 0 bis 10 cm



## RISIKO VON VITALITÄTSVERLUSTEN AUFGRUND VON ATMOSPHERISCHEN EINTRÄGEN

In der folgenden Abbildung 36 ist das Risiko für Vitalitätsverluste (gemessen anhand des Kronenzustandes) in Abhängigkeit von atmosphärischen Einträgen (D2 bzw. D4) und gleichzeitig erhöhtem bzw. niedrigem Risiko von Trockenstress dargestellt. Es zeigt sich, dass die Streuung bei Standorten mit geringem Trockenstressrisiko (D2) höher ist, d.h. dass weitere Faktoren (z.B. Bodenzustand) einen Einfluß auf die Risikowahrscheinlichkeit besitzen. Die dargestellte Punktwolke scheint bei diesen Standorte zweigeteilt zu sein. Es gibt also Flächen bei denen geringere Einträge schon zu erhöhtem Risiko führen. In geringerem Maße ist dies bei Standorten mit erhöhtem Trockenstressrisiko zu erkennen. Unabhängig von der verwendeten Gleichung und der eingetragenen Verbindung (Ausnahme: Natrium) scheint es einen Punkt zu geben, an dem das Risiko von ökochemischem Stress aufgrund von atmosphärischen Einträgen exponentiell ansteigt. Eine Ausnahme bildet Natrium, das keinen Zusammenhang zwischen Zuordnungswahrscheinlichkeit und Höhe der Einträge erkennen läßt. Dies erscheint plausibel, da Natriumeinträge keine Auswirkungen auf den Waldzustand aufweisen (Abb. 36).



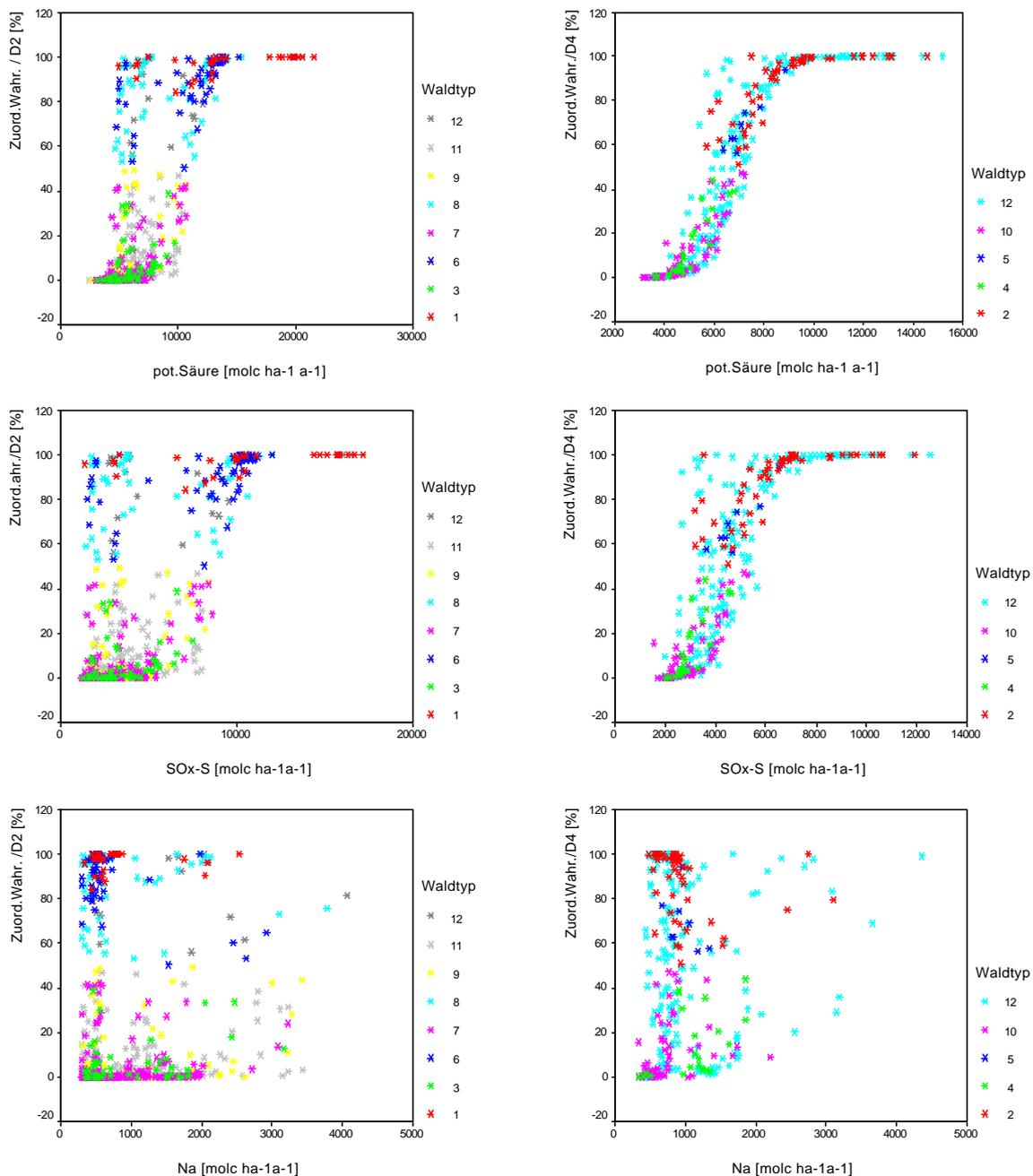


Abb. 36: Zuordnungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Eintragsraten und hohem a) bzw. geringem b) Trockenstressrisiko

#### SCHLÜSSEL ZUR ABLEITUNG VON WALDZUSTANDSTYPEN

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen der Diskriminanzanalysen kann der im folgenden erläuterte Schlüssel dazu genutzt werden, Standorte für die entsprechende Primärdaten vorliegen in Waldzustandstypen einzuordnen. Basis zur Ableitung bilden die Gleichungen 5.1 bis 5.27 Grundsätzlich werden zunächst Diskriminanzwerte berechnet, die dann mittels einer weiteren Gleichung der Berechnung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten dienen.

Als erstes wird eine Unterteilung der Standorte nach Trockenstressrisiko mit Hilfe der Gleichungen 5.1 und 5.10 vorgenommen (A). Trennend ist die

Zuordnungswahrscheinlichkeit von 50 %. Dann kann die Zuordnung zu abiotischen Waldzustandstypen vorgenommen werden (**B**). Je nachdem, ob die Wahrscheinlichkeit für Trockenstress hoch (Gleichungen 5.8 und 5.9) oder niedrig (Gleichungen 5.6. und 5.7) ist, ergibt sich aus den zu berechnenden Diskriminanzwerten wieder eine Zuordnungswahrscheinlichkeit, die größer oder kleiner als 50 % ist. Jetzt liegt für jeden Standort eine Zuordnungswahrscheinlichkeit für die 3 Risikofaktoren Bodenzustand, Deposition und Klima (Trockenstress) vor, anhand derer eine Einteilung in die abiotischen Waldzustandstypen 1 bis 8 erfolgen kann (Gleichungen 5.11 bis 5.18). Als nächstes findet eine Bewertung der biotischen Reaktion durch Kronenzustand und Ernährungssituation, wie in Tabelle 35 beschrieben, statt (**C**). Es werden hierzu wiederum aus Diskriminanzwerten Zuordnungswahrscheinlichkeiten berechnet (Gleichung 5.11 bis 5.27). Als letzter Schritt (**D**) findet eine Einteilung der zuletzt gebildeten Gruppen zu den endgültigen Waldzustandstypen statt.

#### A. Abschätzung des Risikos von langfristigem Trockenstress

<b>1.</b>	Berechnung von Diskriminanzwerten		
<b>1.a</b>	Gleichung 5.1	Bedingung	
<b>1.b</b>	Eingabe des Disk.wertes in Gl.5. 10		
	wenn Zuordnungswahr.	> 50 %	zu. 2.1
		< 50 %	zu 2.2

#### B. Ableitung von abiotischen Waldzustandstypen

<b>2</b>	Berechnung von Diskriminanzwerten		
<b>2.1</b>	Gl. 5.1 und Gl. 5.2	Wert von 5.2 in Gl.5.8 bzw. Wert 5.3 in Gl. 5.9 einsetzen	zu 3.1
<b>2.2</b>	Gl. 5.3 und Gl. 5.4	Wert von 5.3 in Gl.5.6 bzw. Wert 5.4 in Gl. 5.7 einsetzen	zu 3.2

<b>3</b>	Berechnung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten		
<b>3.1</b>	Gleichungen	Bedingung	
<b>3.1 a</b>	Gl. 5.8 und Gl. 5.9	> 50 %	zu 4. a
<b>3.1 b</b>	Gl. 5.8 und Gl. 5.9	< 50 %	zu 4. d
<b>3.1 c</b>	Gl. 5.8 Gl. 5.9	< 50 % > 50 %	zu 4. b
<b>3.1 d</b>	Gl. 5.8 Gl. 5.9	> 50 % < 50 %	zu 4. c
<b>3.2</b>	Gleichungen	Bedingung	
<b>3.2 a</b>	Gl. 5.6 und Gl. 5.7	> 50 %	zu 4. e
<b>3.2 b</b>	Gl. 5.6 und Gl. 5.7	< 50 %	zu 4. h
<b>3.2 c</b>	Gl. 5.6 Gl. 5.7	> 50 % < 50 %	zu 4. g
<b>3.2 d</b>	Gl. 5.6 Gl. 5.7	< 50 % > 50 %	zu 4. f

### C. Ableitung von biotischen Waldzustandstypen

4.	Berechnung von Diskriminanzwerten		
4.a	Gl. 5.11	Wert eingeben in	5.20
4.b	Gl. 5.12	Wert eingeben in	5.21
4.c	Gl. 5.13	Wert eingeben in	5.22
4.d	Gl. 5.14	Wert eingeben in	5.23
4.e	Gl. 5.15	Wert eingeben in	5.24
4.f	Gl. 5.16	Wert eingeben in	5.25
4.g	Gl. 5.17	Wert eingeben in	5.26
4.h	Gl. 5.18	Wert eingeben in	5.27

Berechnung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten			
	Gleichung	Zuord. wahr.	
5.a	Gl. 5.20	> 50 %	zu 6. b
		< 50 %	zu 6. l
5.b	Gl. 5.21	> 50 %	zu 6. d
		< 50 %	zu 6. d
5.c	Gl. 5.22	> 50 %	zu 6. e
		< 50 %	zu 6.l
5.d	Gl. 5.23	> 50 %	zu 6. j
		< 50 %	zu 6. j
5.e	Gl. 5.24	> 50 %	zu 6. a
		< 50 %	zu 6. l
5.f	Gl. 5.25	> 50 %	zu 6. f
		< 50 %	zu 6. h
5.g	Gl. 5.26	> 50 %	zu 6. c
		< 50 %	zu 6. i
5.h	Gl. 5.27	> 50 %	zu 6. g
		< 50 %	zu 6. k

### D. Ableitung von Waldzustandstypen

	Waldzustandstyp		Waldzustandstyp
6. a	1	6. g	7
6. b	2	6.h	8
6. c	3	6. i	9
6. d	4	6. j	10
6. e	5	6. k	11
6. f	6	6. l	12

#### BERECHNUNG VON WALDZUSTANDSTYPEN ANHAND VON BEISPIELEN

Die ausgewählten Standorte sollten möglichst alle Waldzustandstypen abdecken und zusätzlich die räumliche Spannweite wiedergeben. Daher wurden bundesweit Fichtenstandorte ausgewählt. Mit Ausnahme von Waldzustandstyp 5, dem keiner der untersuchten Fichtenstandorte zugeordnet werden konnte, fanden alle Typen Eingang in die Berechnung. Diese Vorgehensweise stellt keine Validierung der Waldzustandstypen dar.

Dazu wäre die Verwendung von Daten aus unabhängig erhobenen Flächen wie jene des Level II-Monitorings notwendig. Zur Zeit ist die Vergleichbarkeit der Daten an den BZE/Level I- und Level II-Punkten jedoch nur begrenzt gegeben (siehe Kapitel 2.2.7).

#### VORGEHENSWEISE

Entsprechend dem in Kapitel 5.1.9 beschriebenen Schlüssel zur Ableitung von Waldzustandstypen wurden anhand der Primärdaten Diskriminanzwerte und Zuordnungswahrscheinlichkeiten berechnet. Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den Risikofaktoren Bodenzustand, Deposition und Trockenstress und die Einteilung in Waldzustandstypen sind für die Standorte in Tabelle 38 dargestellt. Mit Hilfe der Abbildung 37 kann die Lage jedes Standortes innerhalb des „Risikodreiecks“ visualisiert werden. Anhand der Tabelle 38 ist z.B. zu erkennen, dass die Standorte B, D und I eine Zuordnungswahrscheinlichkeit zum Trockenstress von über 50 % aufweisen. Plot B weist zudem ein hohes Risiko von depositions- und bodenzustandsbedingtem Stress auf. Keinen Trockenstress, d.h. eine Zuordnungswahrscheinlichkeit von unter 50 % haben die Standorte A, C, E, G, J und K. Auf ähnlicher Weise lassen sich die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den einzelnen Risiken ermitteln und grafisch, wie in Abbildung 37 aufgezeigt, darstellen.

Tab. 38: Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den Risikofaktoren an 11 Beispielstandorten

Waldzustands- typen	Standort	D 1	D 2	D 5	D 3	D 4
1	A	98.19	100.00	.31		
2	B			97.34	53.63	69.48
3	C	99.16	.16	.23	.	
4	D			75.93	72.00	1.79
5						
6	E	51.94	.26	.00		
7	F	16.03	7.92	.37		
8	G	53.41	1.23	.01		
9	H			3.87	16.56	.26
10	I			58.33	64.55	65.97
11	J			0.0	3.88	16.42
12	K	91.16	72.66	3.76		

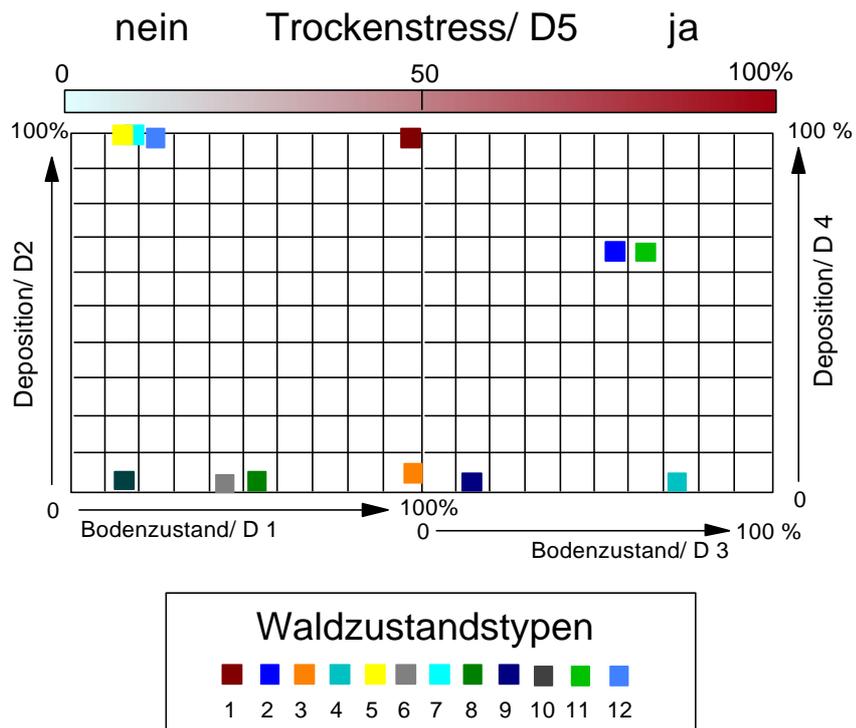


Abb. 37: Einordnung der Beispielstandorte abiotischen Risikofaktoren anhand der Diskriminanzfunktionen D1- D5

Ansatz 2: Verschneidung von berechneten SCHAD24-Werten zu Waldzustandstypen  
 Mit Hilfe von Regressionsmodellen werden bei diesem Ansatz zunächst Kombinationen von Variablen ermittelt, welche mit der Ausprägung des Kronenzustandes in signifikantem Zusammenhang stehen (siehe Kap. 3.7 /4.11 und Riek & Wolff 1999). Als Kennwert des Kronenzustandes dient die Variable SCHAD24; das ist der prozentuale Anteil der Bäume in den Schadstufen 2 bis 4. Die anhand von Depositions-, Ernährungs-, Bodenzustands- und Klimadaten berechneten SCHAD24-Werte der Fichten- und Kiefernbestände wurden anschließend einer Clusteranalyse unterzogen, um Standorte mit ähnlichem Einfluß der Ausgangsparameter auf den Kronenzustand zusammenzufassen. Folgende Gleichungen dienen zur Berechnung der SCHAD24-Werte:

**Gleichungen zur Berechnung von SCHAD24`-Werten aus verschiedenen Einflußfaktoren bei Fichtenbeständen:**

---

**Deposition**

$$\text{SCHAD24}' = (100/1 + 3.72 * \exp(-0.018 \text{ Bestandesalter})) + 0.018 * \text{Ca}^{0.554} - 48.84$$

**Klima**

$$\text{SCHAD24}' = 1,1 * \text{Bestandesalter}^{0,85} - 12,6 * \text{pEt}^{0,86} + 0,33 * \text{aEt}^{1,3} - 351,98 * \text{Q9}^{0,57} + 734,6$$

**Bodenzustand**

*Hauptkollektiv I*

$$\begin{aligned} \text{SCHAD24}' = & 100/ (1+3,21*\exp(-0,0215*\text{Bestandesalter}))- 22,47*\log (\text{Mn-Vorrat Auflage}) - 55,14* \\ & \lg (\text{C-Vorrat 0-30 cm}) + 65,41 * \lg (\text{N-Vorrat Auflage}) + 18,51 * \lg(\text{Al-Gehalt 10-30 cm}) \\ & - 60,271\text{g} * \text{C-Vorrat Aufl}) + 27,81 * \lg (\text{N-Vorrat 0-30cm}) + 223,53 \end{aligned}$$

*Hauptkollektiv II*

$$\text{SCHAD24}' = 100/ 1 + 10,37 * \exp (-0,0175 * \text{Bestandesalter})$$

**Ernährung**

$$\begin{aligned} \text{SCHAD24}' = & 100/ (1 + 4,069 * \exp (-,0208 * \text{Bestandesalter} )) + 170,54 * \text{S-Gehalt}^{0,1356} + \\ & 0,2524 * \text{Ca-/Mg-Quotient}^{2,06} - 79,46 * \text{Mn-Gehalt}^{0,0589} - 126,92 \end{aligned}$$


---

**Gleichungen zur Berechnung von SCHAD24`-Werten aus verschiedenen Einflußfaktoren bei Kiefernbeständen:**

---

**Deposition**

$$\text{SCHAD24}' = 0.99 * \text{Bestandesalter}^{0.58} + 0.055 * \text{Ca}^{0.88} + 0.027 \text{ Nges} - 32.94$$

**Klima**

$$\text{SCHAD24}' = 0,36 * \text{Bestandesalter}^{0,75} - 0,24 * \text{KWB}_{\text{jahr}}^{0,86} + 0,36 * \text{aEt}^{0,75} - 130,08 * \text{Q9} + 77,85$$

**Bodenzustand**

*Hauptkollektiv I*

$$\begin{aligned} \text{SCHAD24}' = & -124,51 * \lg (\text{C-Vorrat 0-30cm}) + 111,65 * \lg (\text{N-Vorrat 0-30cm}) - 13,35 * \\ & \lg (\text{Mn-Gehalt 0-10cm}) - 14,65 * \text{pH-WertAufl} - 25,96 * \text{AKe 0-10 cm} + 276,5 \end{aligned}$$

*Hauptkollektiv II*

SCHAD24` = 2,78 \* C/N-Verhältnis - 13,2

## Ernährung

SCHAD24` = 73,58 \* Bestandesalter<sup>0,088</sup> - 15,902 \* P-Gehalt + 0,1136 \* Ca-Gehalt<sup>3,1458</sup> + 391,65  
 \* S-Gehalt<sup>0,07297</sup> - 469,14

## CHARAKTERISIERUNG DER WALDZUSTANDSTYPEN (2. ANSATZ) DER BAUMART FICHTE

Insgesamt ergeben sich mit Hilfe der Clusteranalyse 5 deutlich voneinander verschiedene Gruppen, d.h. Waldzustandstypen (Tab. 38, Abb. 38).

Der Kronenzustand, der mit Hilfe des Schad24-Wertes bewertet werden kann, stellt sich als innerhalb des **Waldzustandstyps 1** Ansatz 2 als durchschnittlich dar. Die Bodenzustand kann als gut bezeichnet werden. Die atmosphärischen Einträge sind gering und die Ernährungssituation günstig. Die räumliche Verteilung deutet auf keinen besonderen Schwerpunkt hin.

Der **Waldzustandstyp 2** Ansatz 2 ist durch einen schlechteren Kronenzustand gekennzeichnet. Die atmosphärischen Einträge (S, C<sub>at</sub>) vor allem aus Industrie und Verkehr sind überdurchschnittlich hoch. Die Ernährungssituation ist ebenfalls durch sehr hohe Schwefelwerte geprägt. Die Standorte dieses Typs sind bundesweit zu finden

Einen guten Kronenzustand weist der **Waldzustandstyp 3** Ansatz 2 auf. Die atmosphärischen Einträge vor allem an Stickstoffverbindungen sind gering. Die Ernährungssituation deutet allerdings auf eine gute Stickstoffversorgung hin. Der Bodenzustand ist eher ungünstig. Die Basensättigung und pH-Werte sind niedrig. Dieser Typ weist keinen räumlichen Schwerpunkt auf.

Charakteristisch für den **Waldzustandstyp 4** Ansatz 2 ist ein mittlerer bis guter Kronenzustand. Die atmosphärischen Einträge an Standorten dieses Typ sind als gering einzustufen. Die Elementgehalte in den Nadeln sind durchschnittlich und im Fall von Kalium gering. Die N-Vorräte im Mineralboden sind ebenfalls gering. Die meisten Standorte liegen in Baden-Württemberg aber auch in Bayern und Sachsen.

Die höchsten SCHAD24-Werte weist der **Waldzustandstyp 5** Ansatz 2 auf. Gleichzeitig sind dies auch die ältesten Bestände. Der Bodenzustand durch hohe C-Vorräte in der Auflage und ein enges C/N-Verhältnis sowie eine geringe Basensättigung und die höchsten pH-Werte gekennzeichnet. Die atmosphärischen Einträge ist durch hohe seesalzkorrigierte Calcium- und Gesamtstickstoffeinträge geprägt. Die klimatische Wasserbilanz deutet auf eine sehr gute Wasserversorgung hin. Die Temperaturen sind aufgrund der Höhenlage niedrig. Diese Standorte sind nur in den Alpen zu finden.

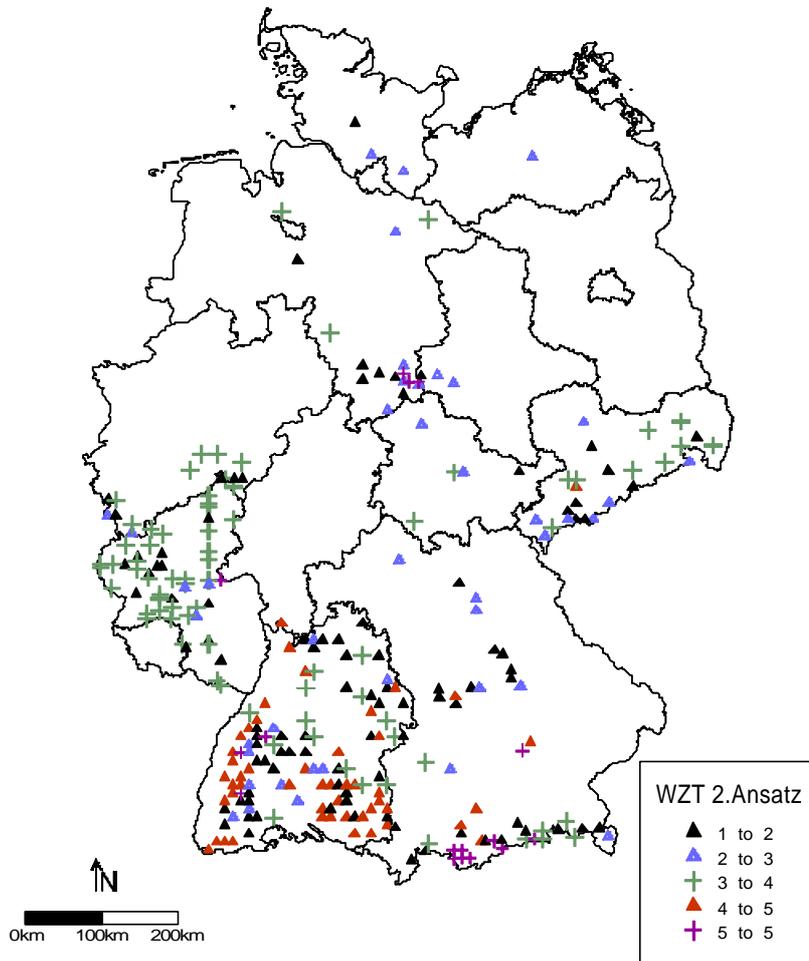


Abb. 38: Räumliche Verteilung der Waldzustandstypen (WTZ) berechnet für Fichtenbestände

Tab. 39: Charakterisierung der Waldzustandstypen anhand von Mittelwerten (Fichte)

## A. Depositions- und Klimadaten

## B.

Waldzustandstyp		Ca <sub>ssc</sub>	Nges.	NHy-N	SOx-S	pot.Säure	Na	pET /aET	KWB JAHR mm
		-molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> -							
<b>1</b>	<b>Mittel</b>	<b>649</b>	<b>2453</b>	<b>1264</b>	<b>3044</b>	<b>5437</b>	<b>639</b>	<b>1.0</b>	<b>574</b>
n=96	Stdab.	383	513	325	2963	3318	389	0.0	415
<b>2</b>	<b>Mittel</b>	<b>806</b>	<b>2514</b>	<b>1236</b>	<b>4406</b>	<b>6844</b>	<b>783</b>	<b>1.1</b>	<b>473</b>
n=43	Stdab.	451	579	302	3980	4425	493	0.1	351
<b>3</b>	<b>Mittel</b>	<b>615</b>	<b>2190</b>	<b>1113</b>	<b>2967</b>	<b>5113</b>	<b>641</b>	<b>1.1</b>	<b>452</b>
n=78	Stdab.	317	392	287	1633	1815	404	0.0	338
<b>4</b>	<b>Mittel</b>	<b>512</b>	<b>2281</b>	<b>1248</b>	<b>1940</b>	<b>4172</b>	<b>439</b>	<b>1.0</b>	<b>572</b>
n=49	Stdab.	256	525	382	1903	2215	83	0.0	297
<b>5</b>	<b>Mittel</b>	<b>829</b>	<b>2701</b>	<b>1247</b>	<b>2322</b>	<b>4953</b>	<b>768</b>	<b>1.0</b>	<b>1031</b>
n=16	Stdab.	333	446	358	1186	1242	383	0.0	451
<b>Insges.</b>	<b>Mittel</b>	<b>650</b>	<b>2374</b>	<b>1214</b>	<b>2998</b>	<b>5315</b>	<b>634</b>	<b>1.0</b>	<b>551</b>
n=282	Stdab.	366	511	328	2699	3014	390	0.0	389

## B. Ernährungsdaten

Waldzustandstyp		Ern_Ca	Ern_K	Ern_Mg	Ern_Mn	Ern_N	Ern_S	Ern_N/ Ca	Ern_N/ Mg
		g mg <sup>-1</sup>							
<b>1</b>	<b>Mittel</b>	<b>4.84</b>	<b>5.01</b>	<b>1.07</b>	<b>1.17</b>	<b>13.90</b>	<b>1.21</b>	<b>3.31</b>	<b>14.62</b>
n=96	Stdab.	1.73	1.27	0.38	0.98	2.02	0.34	1.51	5.65
<b>2</b>	<b>Mittel</b>	<b>5.49</b>	<b>5.13</b>	<b>1.07</b>	<b>1.19</b>	<b>14.03</b>	<b>1.31</b>	<b>3.14</b>	<b>14.47</b>
n=43	Stdab.	2.44	1.26	0.36	1.20	1.88	0.32	1.71	4.94
<b>3</b>	<b>Mittel</b>	<b>4.39</b>	<b>5.61</b>	<b>0.91</b>	<b>1.66</b>	<b>14.66</b>	<b>1.21</b>	<b>4.02</b>	<b>17.70</b>
n=78	Stdab.	1.94	1.34	0.29	0.98	1.80	0.40	1.86	6.34
<b>4</b>	<b>Mittel</b>	<b>4.16</b>	<b>4.92</b>	<b>1.04</b>	<b>1.02</b>	<b>13.16</b>	<b>1.16</b>	<b>3.53</b>	<b>13.79</b>
n=49	Stdab.	1.42	1.22	0.32	0.78	1.42	0.24	1.20	4.50
<b>5</b>	<b>Mittel</b>	<b>4.49</b>	<b>4.82</b>	<b>1.36</b>	<b>0.51</b>	<b>12.99</b>	<b>1.04</b>	<b>2.98</b>	<b>11.05</b>
n=16	Stdab.	0.79	0.94	0.47	0.62	1.70	0.20	0.68	5.04
<b>Insges.</b>	<b>Mittel</b>	<b>4.68</b>	<b>5.17</b>	<b>1.04</b>	<b>1.24</b>	<b>13.95</b>	<b>1.21</b>	<b>3.50</b>	<b>15.10</b>
n=282	Stdab.	1.87	1.29	0.36	1.01	1.90	0.34	1.59	5.79

## C. Bodenzustandsdaten

Waldzustandstyp		BS 0-10cm	C/N	Corg 0-10cm	Corg. Aufll.	Mg/ Mg	N <sub>VorAufll</sub>	N <sub>Vor</sub> 0-10cm	PH <sub>KCL</sub>
<b>1</b>	<b>Mittel</b>	<b>43</b>	<b>20</b>	<b>83665</b>	<b>24</b>	<b>0.43</b>	<b>1036</b>	<b>38</b>	<b>3.8</b>
n=96	Stdab.	40	5	47579	17	0.31	746	37	1.3
<b>2</b>	<b>Mittel</b>	<b>39</b>	<b>21</b>	<b>88619</b>	<b>34</b>	<b>0.59</b>	<b>1391</b>	<b>46</b>	<b>3.7</b>
n=43	Stdab.	40	6	47651	25	0.30	1076	43	1.4
<b>3</b>	<b>Mittel</b>	<b>25</b>	<b>22</b>	<b>72326</b>	<b>24</b>	<b>0.59</b>	<b>1017</b>	<b>52</b>	<b>3.5</b>
n=78	Stdab.	30	4	33852	12	0.26	555	45	0.9
<b>4</b>	<b>Mittel</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>87806</b>	<b>19</b>	<b>0.41</b>	<b>846</b>	<b>24</b>	<b>3.7</b>
n=49	Stdab.	39	5	30267	15	0.28	648	18	1.2
<b>5</b>	<b>Mittel</b>	<b>61</b>	<b>22</b>	<b>106656</b>	<b>31</b>	<b>0.49</b>	<b>1353</b>	<b>20</b>	<b>4.7</b>
n=16	Stdab.	46	5	45331	16	0.35	753	16	1.7
<b>Insges.</b>	<b>Mittel</b>	<b>37</b>	<b>21</b>	<b>83305</b>	<b>25</b>	<b>0.50</b>	<b>1070</b>	<b>40</b>	<b>3.7</b>
n=282	Stdab.	39	5	41877	17	0.30	760	39	1.3

## CHARAKTERISIERUNG DER WALDZUSTANDSTYPEN (2. ANSATZ) DER BAUMART KIEFER

Es ergeben sich 4 voneinander deutlich verschiedene Cluster (Tab. 39, Abb.39).

**Waldzustandstyp 1** <sup>Ansatz 2</sup> ist durch erhöhte SCHAD24-Werte und das höchste mittlere Bestandesalter gekennzeichnet. An diesen Plots sind gleichzeitig die höchsten atmosphärischen Einträge von potentieller Säure, Schwefel, seesalzkorrigiertem Calcium und Stickstoff zu finden, deren Quellen zumeist Industrie, Verkehr und Landwirtschaft darstellen. Die Ernährung weist Überschuß an Calcium und Stickstoff auf. Letzteres spielt auch im Boden eine bedeutende Rolle. Die Vorräte im Mineralboden sowie in der Auflage sind maximal und das C/N-Verhältnis eng. Die klimatische Wasserbilanz weist deutlich negative Werte im Jahr auf. Diese Gruppe ist in Ostdeutschland und vereinzelt in Nordrhein-Westfalen zu finden.

Die höchsten mittleren SCHAD24-Werte weist der **Waldzustandstyp 2** <sup>Ansatz 2</sup> auf. Die atmosphärischen Einträge an potentieller Säure, Schwefel, Stickstoff und seesalzkorrigiertem Calcium sind ähnlich hoch wie bei Typ 1. Der Bodenzustand ist durch eine hohe Basensättigung im Oberboden und geringe C-Vorräte gekennzeichnet. Die Ernährungssituation ist in bezug auf Stickstoff eher ungünstig. Bei Mangan und Magnesium ist sie dagegen als günstig zu bezeichnen. Auch diese Gruppe ist ausschließlich in Ostdeutschland zu finden.

Deutlich besser stellt sich der Kronenzustand an Standorten des **Waldzustandstyps 3** <sup>Ansatz 2</sup> dar. Diese Bestände sind im Durchschnitt deutlich jünger als jene der anderen Cluster. Die Deposition ist an diesen Standorten als gering einzustufen. Der Bodenzustand wird durch hohe N-Vorräte im Mineralboden und geringe C- und N-Vorräte in der Auflage charakterisiert. Das durchschnittliche C/N-Verhältnis ist weit. Innerhalb dieses Typs sind die geringsten Nährstoffgehalte an Calcium, Magnesium und Schwefel in den Nadeln und Blättern zu verzeichnen. Die räumliche Verteilung zeigt keinen Schwerpunkt.

Der **Waldzustandstyp 4** <sup>Ansatz 2</sup> ist charakterisiert durch mittlere SCHAD24-Werte und durch das geringste durchschnittliche Bestandesalter. Im Vergleich zu den Waldzustandstypen 1 bis 3 sind die atmosphärischen Einträge und die Ernährungssituation durchschnittlich. Der Bodenzustand kann als ungünstig bezeichnet werden. Die Basensättigung, die N-Vorräte im Mineralboden und in der Auflage und der pH-Wert sind gering. Die Standorte dieses Typ sind bundesweit zu finden.

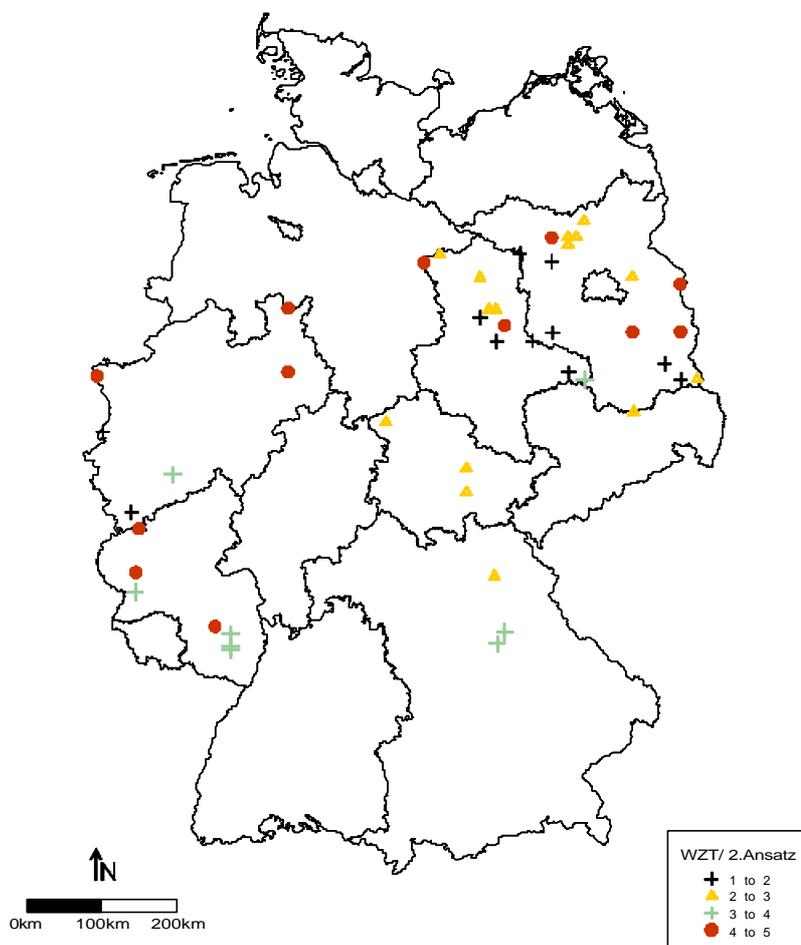


Abb. 39: Räumliche Verteilung der Waldzustandstypen (WZT) berechnet für Kiefernbestände

Tab. 40: Charakterisierung anhand von Mittelwerten (Kiefer)

#### A. Depositions- und Klimadaten

Waldzustandstyp		Ca <sub>ssc</sub>	Nges.	NHy-N	SOx-S	pot. Säure	pET /aET	KWB JAHR	Temp. April-Sept. °C
		-molc ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> -						mm	
<b>1</b>	<b>Mittel</b>	1138.7	2427.6	1105.9	6034.4	8561.6	1.2	-142.9	13.9
n=11	Stdab.	233.5	341.3	120.2	1637.7	1564.3	0.1	70.2	0.7
<b>2</b>	<b>Mittel</b>	1048.1	2360.2	1090.8	5899.4	8293.0	1.2	-121.7	13.5
n=15	Stdab.	238.2	226.7	155.3	2426.6	2587.4	0.2	67.1	0.6
<b>3</b>	<b>Mittel</b>	503.6	1903.0	1012.6	3009.1	4892.0	1.1	-45.8	13.5
n=8	Stdab.	291.7	261.5	197.2	1818.9	1945.9	0.1	64.6	0.7
<b>4</b>	<b>Mittel</b>	732.0	2197.6	1013.0	3989.4	6143.0	1.2	-101.0	13.5
n=12	Stdab.	311.9	366.3	126.9	1780.9	1741.2	0.1	65.6	0.5
<b>Insges.</b>	<b>Mittel</b>	892.6	2254.4	1060.5	4930.8	7204.9	1.2	-108.2	13.6
n=46	Stdab.	351.3	345.2	150.0	2285.0	2460.2	0.1	72.5	0.7

## B. Ernährungsdaten

		Ern_Ca	Ern_K	Ern_Mg	Ern_Mn	Ern_N	Ern_S	Ern_N/ Ca	Ern_N/ Mg
<b>Waldzustandstyp</b>		<b>g mg<sup>-1</sup></b>							
<b>1</b>	<b>Mittel</b>	3.4	6.0	1.0	0.7	17.4	2.0	5.3	19.9
n=11	Stdab.	0.7	1.4	0.3	0.3	2.6	0.4	1.4	7.8
<b>2</b>	<b>Mittel</b>	3.3	5.0	1.1	0.9	15.0	1.8	5.0	14.0
n=15	Stdab.	1.1	1.1	0.2	0.6	2.3	0.4	1.8	2.7
<b>3</b>	<b>Mittel</b>	2.6	5.2	0.9	0.6	16.2	1.5	6.4	21.0
n=8	Stdab.	0.7	0.9	0.4	0.3	1.9	0.8	1.4	10.7
<b>4</b>	<b>Mittel</b>	2.8	5.2	1.0	0.5	16.4	1.6	6.2	18.2
n=12	Stdab.	0.7	0.8	0.3	0.4	2.7	0.4	1.7	5.7
<b>Insges.</b>	<b>Mittel</b>	3.1	5.3	1.0	0.7	16.1	1.7	5.6	17.7
n=46	Stdab.	0.9	1.1	0.3	0.5	2.5	0.5	1.7	7.0

## C. Bodenzustandsdaten

		BS	C/N	Corg	Corg.	Mg/ Mg	N <sub>VorAuf</sub>	N <sub>Vor</sub>	PH <sub>KCL</sub>
		0-10cm		0-10cm	Aufl.			0-10cm	
<b>Waldzustandstyp</b>		<b>%</b>		<b>kg ha<sup>-1</sup></b>			<b>kg ha<sup>-1</sup></b>		
<b>1</b>	<b>Mittel</b>	36	21	52151	27	0.66	1183	3.7	<b>3.8</b>
n=96	Stdab.	25	4	38977	14	0.32	605	1.2	1.3
<b>2</b>	<b>Mittel</b>	45	24	42233	21	0.55	893	3.6	<b>3.7</b>
n=43	Stdab.	34	3	30496	9	0.36	413	0.8	1.4
<b>3</b>	<b>Mittel</b>	40	25	71415	25	0.57	914	3.9	<b>3.5</b>
n=78	Stdab.	38	6	17399	15	0.32	431	1.6	0.9
<b>4</b>	<b>Mittel</b>	29	22	55115	20	0.59	832	3.6	<b>3.7</b>
n=49	Stdab.	33	6	26153	13	0.29	433	1.1	1.2
<b>5</b>	<b>Mittel</b>	38	23	53040	23	0.59	953	3.7	<b>4.7</b>
n=16	Stdab.	32	5	30684	12	0.32	478	1.1	1.7

### Bewertung der Ansätze zur Ableitung von Waldzustandstypen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden 2 Ansätze zur Ableitung von Waldzustandstypen getestet. Zum einen die Verschneidung von Gruppen (Bodenzustands-, Depositions-, Ernährungstypen) mittels Diskriminanzanalyse und zum anderen die Typisierung von geschätzten SCHAD24-Werten, die aus verschiedenen Eingangsparametern (Klima, Ernährung, Deposition, Bodenzustand) über Regressionsanalysen berechnet wurden. Beide Methoden ergeben Gruppen von Standorten, die im Zusammenhang mit dem Vitalitätszustand (SCHAD24) der untersuchten Waldökosysteme stehen. Da es jedoch auch ein Ziel der nächsten Projektphase ist, eine Regionalisierung der Waldzustandstypen vorzunehmen, um Maßnahmebündel z.B. auf der Ebene von forstlichen Wuchsgebieten abzuleiten, kann der erste Ansatz als günstiger im Rahmen der angestrebten Ziele bewertet werden. Dafür spricht das regional zusammenhängenden Auftreten von Waldzustandstypen des 1. Ansatzes. Ein weiterer Nachteil des zweiten Ansatzes stellt der starke Bezug zur Baumart dar. Daher konnten Waldzustandstypen nur für die Baumarten Fichte und Kiefer berechnet werden, da keine ausreichend große Stichprobe für andere Arten vorliegt.

### Einordnung von Level II-Standorten am Beispiel der atmosphärischen Deposition

Ähnlich wie für die Flächen des systematischen Rasternetzes des Level I, lassen sich auch die Intensivmeßflächen des Level II-Programms anhand ihres Depositionsgeschehens mit Hilfe der in Kapitel 3.2 beschriebenen Depositionstypen des Jahres 1989 klassifizieren. Tabelle 41 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Depositionstypen und deren Zuordnungswahrscheinlichkeit zu den verschiedenen Typen an den Level II-Flächen. Die zusammenfassende Darstellung der Entwicklungstendenzen (Tab. 40) zeigt sich, dass die dargestellten Level II-Flächen zum überwiegenden Teil mittlere bis geringe Eintragsraten repräsentieren. Dies kann zum einen in der fehlenden Flächenrepräsentanz begründet

liegen und zum anderen an der deutlichen Veränderung des Depositionsgeschehens seit 1989.

Extreme Eintragungssituationen (TYP 2), die durch hohe Schwefel- und Säureinträge gekennzeichnet sind, treten nach 1993 nicht mehr auf. Auch die Anzahl an Flächen mit einem hohen Anteil an Ammoniumstickstoffeinträgen (TYP 3) nehmen ab. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen der Level I /BZE-Plots, die keinen Trend erkennen lassen. Vermutlich ist die Anzahl der Level II-Flächen zu gering und die fehlende Flächenrepräsentanz wirkt sich auch hier aus. Als Konsequenz sollte eine Fortführung der Modellierung von Depositionsdaten erfolgen und darauf aufbauend eine weitere Typisierung des Depositionsgeschehens.

Wie Berechnungen von Critical Loads und ihren Überschreitungen an Level II sowie Level I-Plots ergaben, kann - trotz der verbesserten Depositionssituation - die Fähigkeit der Waldökosysteme zur unschädlichen Festlegung der Einträge überschritten sein (Becker et al. 2000, Bolte & Wolff 2001).

Tab. 41: Zuordnungswahrscheinlichkeiten [%] der Level II -Standorte je Depositionstyp auf der Grundlage der Depositionstypen Level I des Jahres 1989

Level II-Plot	Jahr	Zuord.	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6 und 1
101	1993	4	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
101	1994	4	0.00	0.00	0.86	0.00	0.14
101	1995	4	0.00	0.00	0.82	0.00	0.18
301	1993	3	0.00	0.69	0.15	0.00	0.16
301	1994	6	0.00	0.00	0.09	0.00	0.91
301	1995	6	0.00	0.00	0.08	0.00	0.92
302	1993	6	0.00	0.00	0.36	0.00	0.64
302	1994	6	0.00	0.00	0.01	0.00	0.99
302	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
303	1993	6	0.00	0.00	0.36	0.00	0.64
303	1994	6	0.00	0.00	0.01	0.00	0.99
303	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
304	1993	6	0.00	0.21	0.01	0.00	0.78
304	1994	6	0.00	0.01	0.01	0.00	0.98
304	1995	6	0.00	0.00	0.03	0.00	0.97
305	1993	3	0.00	0.99	0.00	0.00	0.01
305	1994	3	0.00	0.51	0.02	0.00	0.47
305	1995	6	0.00	0.00	0.08	0.00	0.91
306	1993	3	0.00	0.99	0.00	0.00	0.01
306	1994	3	0.00	0.83	0.00	0.00	0.17
306	1995	6	0.00	0.00	0.01	0.00	0.99
307	1993	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
307	1994	4	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00
307	1995	4	0.00	0.00	0.99	0.00	0.01
501	1993	3	0.00	0.99	0.01	0.00	0.00
501	1994	4	0.00	0.05	0.95	0.00	0.00
501	1995	4	0.00	0.00	0.92	0.00	0.08
502	1993	3	0.00	0.97	0.03	0.00	0.00
502	1994	4	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00
502	1995	4	0.00	0.00	0.92	0.00	0.08
503	1993	6	0.00	0.33	0.01	0.00	0.65
503	1994	4	0.00	0.00	0.96	0.00	0.04

503	1995	6	0.00	0.00	0.36	0.00	0.64
504	1993	6	0.00	0.00	0.31	0.00	0.69
504	1994	4	0.00	0.00	0.96	0.00	0.04
504	1995	4	0.00	0.00	0.98	0.00	0.02
505	1993	6	0.00	0.13	0.01	0.00	0.87
505	1994	3	0.00	0.48	0.24	0.00	0.28
505	1995	6	0.00	0.00	0.13	0.00	0.87
506	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
506	1994	6	0.00	0.01	0.03	0.00	0.96
506	1995	6	0.00	0.00	0.01	0.00	0.99
507	1993	6	0.00	0.27	0.29	0.00	0.44
507	1994	4	0.00	0.00	0.99	0.00	0.01
507	1995	4	0.00	0.00	0.78	0.00	0.22
601	1993	6	0.00	0.06	0.00	0.00	0.94
601	1994	3	0.00	0.96	0.00	0.00	0.04
601	1995	6	0.00	0.02	0.08	0.00	0.89
602	1993	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
602	1994	6	0.00	0.43	0.00	0.00	0.57
602	1995	6	0.00	0.07	0.04	0.00	0.89
603	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
603	1994	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
603	1995	6	0.00	0.00	0.16	0.00	0.84
604	1993	3	0.00	0.66	0.01	0.00	0.34
604	1994	3	0.00	0.82	0.05	0.00	0.13
604	1995	6	0.00	0.01	0.14	0.00	0.85
605	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
605	1994	6	0.00	0.09	0.00	0.00	0.91
605	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
606	1993	6	0.00	0.17	0.04	0.00	0.79
606	1994	6	0.00	0.16	0.04	0.00	0.80
606	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
607	1993	6	0.00	0.02	0.00	0.00	0.98
607	1994	6	0.00	0.19	0.01	0.00	0.80
607	1995	6	0.00	0.15	0.12	0.00	0.73
701	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
701	1994	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
701	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
702	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
702	1994	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
702	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
703	1993	3	0.00	0.98	0.00	0.00	0.02
703	1994	3	0.00	0.99	0.00	0.00	0.01
703	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
704	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
704	1994	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
704	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
705	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
705	1994	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
705	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
706	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
706	1994	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

706	1995	6	0.00	0.13	0.00	0.00	0.87
707	1993	6	0.00	0.17	0.00	0.00	0.83
707	1994	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
707	1995	6	0.00	0.12	0.00	0.00	0.88
801	1993	3	0.00	0.74	0.00	0.00	0.26
801	1994	6	0.00	0.38	0.01	0.00	0.62
801	1995	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
802	1993	6	0.00	0.07	0.00	0.00	0.93
802	1994	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
802	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
803	1993	6	0.00	0.06	0.01	0.00	0.93
803	1994	6	0.00	0.12	0.03	0.00	0.85
803	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
804	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
804	1994	6	0.00	0.01	0.02	0.00	0.97
804	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
805	1993	6	0.00	0.03	0.01	0.00	0.96
805	1994	6	0.00	0.21	0.02	0.00	0.77
805	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
806	1993	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99
806	1994	6	0.00	0.01	0.01	0.00	0.98
806	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
808	1993	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
808	1994	3	0.00	0.99	0.01	0.00	0.00
808	1995	6	0.00	0.40	0.02	0.00	0.58
809	1993	6	0.00	0.02	0.00	0.00	0.98
809	1994	6	0.00	0.03	0.01	0.00	0.96
809	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
810	1993	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
810	1994	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99
810	1995	6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
811	1993	6	0.00	0.06	0.00	0.00	0.94
811	1994	6	0.00	0.11	0.03	0.00	0.86
811	1995	6	0.00	0.01	0.02	0.00	0.97
1401	1993	3	0.00	0.94	0.00	0.00	0.06
1401	1994	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1401	1995	3	0.00	0.99	0.00	0.00	0.01
1402	1993	6	0.07	0.20	0.00	0.00	0.73
1402	1994	3	0.00	0.99	0.00	0.00	0.01
1402	1995	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1403	1993	2	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01
1403	1994	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1403	1995	6	0.00	0.24	0.00	0.00	0.76
1404	1993	2	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
1404	1994	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1404	1995	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1405	1993	6	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51
1405	1994	6	0.00	0.05	0.00	0.00	0.95
1405	1995	6	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99

Tab. 42: Anzahl von Level II-Standorten je Depositionstyp und Diskriminanzanalyse der Depositionstypen 1989)

Depositionstyp		1993			
		1 n=30	2 n=2	3 n=11	4 n=1
1995	1 n= 35	27	1	7	0
	2 n=0	0	0	0	0
	3 n=3	1	1	1	0
	4 n=6	2	0	3	1

## Zusammenfassung

### UNTERSUCHUNG DES DEPOSITIONSGESCHEHENS

- Anhand der Faktorenanalyse der Gesamtdepositionsraten des Jahres 1989 konnte gezeigt werden, dass die Deposition von Schwefelverbindungen stark mit Säureeinträgen korrelieren und beide einen hohen Erklärungswert bezüglich der gesamten Beziehungsstruktur der atmosphärischen Deposition aufweisen. Stickstoffverbindungen als Säurebildnern kommt hingegen nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Einträge marinen Ursprungs, die in weiten Teilen des Nordwestdeutschen Tieflandes dominieren, besitzen ebenfalls einen hohen Erklärungswert bezüglich der Variabilität des Depositionsgeschehens.
- Die Trockene und Nasse Gesamtdeposition unterscheiden sich bezüglich der erklärenden Faktorenmatrix. Die Faktorenladungsmatrix der Trockenen Deposition gleicht jener der Gesamtdeposition, d.h. dass an vielen Erhebungspunkten die Trockene Deposition die Gesamtdeposition bestimmt.
- Bei der Nassen Deposition korrelieren Stickstoffverbindungen mit Protoneneinträgen, d.h. bei der Nassen Deposition spielen sauer wirkende Stickstoffverbindungen eine grössere Rolle als bei der Trockenen.
- Die Emissionen von 1989 bis heute haben sich jedoch dramatisch verändert so sind z.B. Schwefelemissionen deutlich zurückgegangen. Als Folge davon hat sich das Eintragsgeschehen und damit auch die Faktorenladungsmatrix der Depositionsdaten von 1989 bis 1995 verändert. Im Jahr 1993 laden neben Schwefelverbindung mit Säureeinträgen zusätzlich oxidierte Stickstoffverbindungen den Faktor 1, der den höchsten Erklärungswert der Gesamtvariabilität der Depositionsdaten aufweist. Vermutlich wird die Bedeutung von Stickstoff- relativ zu Schwefeleinträgen als anthropogen bedingter Stressfaktor für Waldökosysteme noch weiter zunehmen. Gleichzeitig ist die Bedeutung basischer Stäube (K, Ca, Mg) vor allem in Ostdeutschland zurückgegangen.

### BEZIEHUNGSGEFÜGE DEPOSITION, BODEN- UND ERNÄHRUNGSZUSTAND

- Auf der Grundlage der Faktorenwerte konnten zum Teil deutliche Beziehungen zwischen dem Ernährungszustand der Bäume und der atmosphärischen Deposition nachgewiesen werden. Insbesondere atmosphärische Einträge, die ihren Ursprung in der industriellen Produktion haben, weisen eine deutliche Beziehung zu den Ernährungswerten auf. Allgemein sind es vor allem eine extreme Eintragssituation (z.B. Erz- und Fichtelgebirge) die Auswirkungen auf die Nährstoffversorgung aufweisen.
- Die deutlichsten Beziehungen zwischen Bodenzustand und Depositionsgeschehen weisen Einträge auf, deren Quellen Emissionen aus Industrie und Energieumwandlung oder solche die marinen Ursprungs sind. Die bessere Pufferung der carbonathaltigen Böden des Hauptkollektives II läßt sich am geringeren Einfluß der atmosphärischen Deposition auf den Bodenzustand erkennen.

## EINFLUß VON DEPOSITION, BODEN- UND ERNÄHRUNGSZUSTAND AUF DEN KRONENZUSTAND

- **Fichte:** Die Ausprägung des Indikators SCHAD24 (Anteil der Bäume der Schadstufe 2 bis 4) scheint bei der Fichte insbesondere vom Bestandesalter abhängig zu sein. Zudem weisen Calcium- und Schwefeleinträge einen Einfluss auf den Kronenzustand auf. Darüber hinaus belegen auch Betrachtungen des Ernährungs- und des Bodenzustandes (Riek & Wolff 1999) die Bedeutung von Calcium und Schwefel für den Zustand von Fichtenbeständen.
- **Kiefer:** Bei der Kiefer wirken sich neben dem Bestandesalter und Gesamtstickstoffeinträgen vor allem Calciumeinträge auf den Anteil deutlich geschädigter Bäume aus. Diese Ca-Einträge aus Industrie und Energieumwandlung treten zusammen mit hohen Säure- und Schwefeleinträgen auf.
- **Buche:** Bei der Buche scheint die Kaliumverfügbarkeit eine Beziehung zum Kennwert SCHAD24 aufzuweisen. Das Bestandesalter spielt bei der Buche als Einflussfaktor auf den Kronenzustand nur eine untergeordnete Rolle. Unter Verwendung der seesalzkorrigierten Daten verlieren atmosphärische Einträge zugunsten von Bodenfaktoren (Hauptkollektiv I 1,4; Hauptkollektiv II 10,11) an Bedeutung. Auf den besser gepufferten Böden besteht eher ein Zusammenhang zwischen der S- bzw. N-Versorgung und dem Anteil deutlich geschädigter Bäume.

## BEZIEHUNG ZWISCHEN KLIMA UND KRONENZUSTAND

- **Fichte:** Wie bei den vorangegangenen Untersuchungen, hat auch in diesem Fall das Bestandesalter einen deutlichen Einfluß auf den Kronenzustand (SCHAD24). Darüber hinaus spielt die Verdunstung eine bedeutende Rolle. Sowohl die potentielle ( $pEt$ ) und die aktuelle Evapotranspiration ( $aEt$ ) als auch der Quotient aus  $pEt$  und  $aEt$  des Monats September ( $Q_9$ ) werden als wichtige Faktoren in die Regressionsgleichung einbezogen. Dieser Quotient kann als Maß für den Verbrauch an Wasser im Sommer angesehen werden. Daher bietet er die Möglichkeit den Trockenstress im Sommer abzuschätzen.
- **Kiefer:** Der Anteil der deutlich geschädigten Kiefern hängt – ähnlich wie bei der Fichte – vom Bestandesalter ab. Es wird aber auch durch die klimatische Jahreswasserbilanz ( $KWB_{\text{Jahr}}$ ), der aktuellen Evapotranspiration ( $aEt$ ) sowie dem Quotienten aus potentieller Evapotranspiration ( $pEt$ ) und  $aEt$  des Monats September beeinflusst.
- **Buche:** Die Ausprägung des SCHAD24-Wertes wird bei den untersuchten Buchenbeständen nur durch das Bestandesalter und die potentielle Evapotranspiration beeinflusst.

## ABLEITUNG VON WALDZUSTANDSTYPEN

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden grundsätzlich zwei Wege zur Ermittlung von Waldzustandstypen verfolgt. Zum einen die Verschneidung von Gruppen (Bodenzustands-, Depositions-, Ernährungstypen) (Ansatz 1) und zum anderen die Typisierung von geschätzten SCHAD24-Werten, die aus verschiedenen Eingangsparametern (Klima, Ernährung, Deposition, Bodenzustand) über Regressionsanalysen berechnet wurden (Ansatz 2) (siehe Riek & Wolff 2000). Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist in den Kapiteln 5.1 und 5.2 zu finden.

- Der **erste Ansatz** ergab 12 Waldzustandstypen, bei denen abiotische Standortverhältnisse (Boden, Klima, Deposition) und biotische Reaktion (Kronenzustand, Ernährungszustand) in plausiblen Zusammenhang stehen und die

zudem räumliche Schwerpunkte bilden. Anhand dieser Waldzustandstypen kann der Vitalitätszustand der untersuchten Waldökosysteme dargestellt und Entwicklungstendenzen aufgezeigt werden. Bei der Ableitung der Waldzustandstypen wurden Gefährdungspotentiale anhand von diskriminanzanalytisch gefundenen Zuordnungswahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Vitalitätsverlusten aufgrund des Bodenzustandes, atmosphärischer Einträge oder durch Trockenstress berechnet. Diese Gefährdungspotentiale können z.B. in Relation zur aktuellen Deposition gesetzt werden, um das Risiko am Standort zu bewerten.

- Es wurde zudem ein Schlüssel zur Ableitung von Waldzustandstypen entwickelt mit dem es möglich ist, bei entsprechender Datenlage Waldzustandstypen für Waldökosysteme zu ermitteln.
- Der **zweite Ansatz** konnte aufgrund des benötigten Mindestumfanges der Stichprobe nur für die Baumarten Fichte und Kiefer durchgeführt werden. Im Fall der Fichte ergaben sich 5 Waldzustandstypen, die zwar eine plausible Beziehung zwischen Standortverhältnissen und Kronenzustand aufwiesen, deren räumliche Streuung aber sehr groß war. Die Clusteranalyse führte bei Kiefernbeständen zu 4 Waldzustandstypen, die ebenfalls biotische Reaktion und abiotische Verhältnisse plausibel widerspiegeln. Aber auch hier gab es keine räumlichen Schwerpunkte.
- **Bewertung der beiden Ansätze:** Da es auch ein Ziel der nächsten Projektphase ist, eine Regionalisierung der Waldzustandstypen vorzunehmen, um Maßnahmenbündel z.B. auf der Ebene von forstlichen Wuchsgebieten abzuleiten, kann der erste Ansatz als günstiger im Rahmen der angestrebten Ziele bewertet werden. Dafür spricht das regional zusammenhängende Auftreten von Waldzustandstypen des 1. Ansatzes. Ein weiterer Nachteil des zweiten Ansatzes stellt der starke Bezug zur Baumart dar. Daher konnten Waldzustandstypen nur für die Baumarten Fichte und Kiefer berechnet werden, da keine ausreichend große Stichprobe für andere Arten vorliegt.

#### EINBEZIEHUNG VON LEVEL II-DATENSÄTZEN

Ein Problem bei der Übertragbarkeit stellt vor allem die Vergleichbarkeit der Datensätze auf den beiden Monitoringebenen Level I und II dar. Daher können zur Zeit keine Waldzustandstypen für Level II-Standorte berechnet werden. In der vorliegenden Studie wurde nach Möglichkeiten gesucht zumindest das Depositionsgeschehen zu untersuchen. Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse zeigen, dass an insgesamt 44 Level II-Flächen bundesweit eine Typisierung des Depositionsgeschehens anhand der an Level I-Plots berechneten Depositionstypen auf der Basis des Jahres 1989 vorgenommen werden kann. Dabei wird deutlich, dass die untersuchten Level II-Standorte das durchschnittliche Depositionsgeschehen gut widerspiegeln. Extreme Standorte wie auf Level I-Ebene sind aber unterrepräsentiert. Ebenso Standorte, die eine deutliche Stickstoffbelastung aufweisen. Die Entwicklung der Deposition von 1989 bis 1995 konnte ebenfalls mittels Diskriminanzanalyse verfolgt werden und zeigt den bundesweiten Trend der Abnahme von Schwefeleinträgen in Waldökosysteme deutlich. Eine Abnahme von Stickstoffeinträgen insbesondere aus der Landwirtschaft war nicht zu erkennen, d.h. der Stichprobenumfang ist zu gering. Daher sollte in Zukunft eine Vergleichbarkeit der Datensätze auf Level I und II –Ebene angestrebt werden.

## Ausblick

### DATENGRUNDLAGE

Die bisherigen statistischen Ergebnisse geben Hinweise auf eine wesentliche Bedeutung der atmosphären Stoffeinträge, des Klimas sowie des Boden- und Ernährungszustandes zum Zustand der untersuchten Wälder. Deshalb ist die Einbeziehung weiterer modellierter Depositionsdaten über das Jahr 1995, wie sie in der jetzigen Projektphase durchgeführt wurde, von grosser Wichtigkeit für die gewünschte Ableitung kausal interpretierbarer Zusammenhänge zwischen Belastungsfaktoren und "neuartigen Waldschäden". Erste Trenduntersuchungen zum Depositionsgeschehen von 1989 bis 1995 bestätigen die Veränderung der Eintragungssituation. Wie Untersuchungen (Spangenberg 1999, Wellbrock 2001 in prep.) zeigen, sind bis zum heutigen Datum diese Veränderungen wirksam, so dass aktuelle Daten weiteren Erkenntnisgewinn zur Folge hätten. Neben der Eintragungssituation sollte unbedingt auch das Klima und dessen Auswirkungen auf den standörtlichen Wasserhaushalt berücksichtigt werden, wenn aus den rein statistischen Zusammenhängen und Kohärenzen auf kausale Ursache-Wirkungs-Beziehungen geschlossen werden soll. Auch hier wäre eine Einbeziehung weiterer Datensätze wichtig, so z.B. die Verwendung bodenphysikalischer Daten wie gemessene nFK-Werte zur Ableitung von Wasserstressindikatoren.

### ERWEITERUNG DES DATENPOOLS

Auf der bisherigen Datenbasis konnten Waldzustandstypen abgeleitet werden, wobei die biotische Reaktion der Wälder vor allem anhand des Schadindex SCHAD24 und in geringerem Maße anhand der Ernährungssituation bewertet wurde. Im Rahmen des BMBF-Projektes „Konzept und Machbarkeitsuntersuchungen für die integrierende Auswertung von Daten des Umweltmonitorings im Wald“ sollen zusätzlich an 60 Standorten Wachstumsdaten einbezogen werden, die der Verifizierung der Waldzustandstypen dienen können. Eine Zusammenarbeit innerhalb der Arbeitsgruppen erscheint daher sinnvoll. Außerdem ist es angestrebt, Vegetationsdaten aus dem Level II-Programm einzubeziehen. Zur Interpretation der Kronenzustandszeitreihen könnten darüber hinaus noch interpolierte Wetterdaten für mehrere Jahre einbezogen werden. In diesem Zusammenhang wäre eine Aufstockung der Kronenzustandsdaten sinnvoll, so dass in späteren Auswertungen die baumbezogenen prozentualen Nadel-/ Blattverluste für alle Level I-Erhebungspunkte (n=1800) im Zeitraum 1990-98 zur Verfügung stehen werden. Diese Daten liegen an der BFH bisher nur für die EU-Stichprobe (n=412) vor.

### WEITERE VORGEHENSWEISE

Mit Abschluß der vorliegenden Studie beginnt die für 2 Jahre genehmigte 3. Phase der Integrierenden Auswertung von bundesweiten Waldzustandsdaten. Aus den bisherigen Ergebnissen folgt die weitere Vorgehensweise.

Der Schlüssel zur Ableitung von Waldzustandstypen liegt bisher als hardcopy vor. Es soll im Rahmen der nächsten Phase ein digitaler Schlüssel entwickelt werden, der es dem Benutzer in einfacher Form erlaubt, anhand der Primärdaten Waldzustandstypen abzuleiten.

Eine Regionalisierung der Waldzustandsdaten auf der Grundlage der forstlichen Wuchsgebiete kann dazu dienen Maßnahmenbündel mit Hilfe der Waldzustandstypen

abzuleiten. Unter Zuhilfenahme der dann vorliegenden Zeitreihen können auch die Entwicklung der Umwelt wie der atmosphärischen Deposition mit einbezogen werden.

#### KONZEPT DER BISHERIGEN UND GEPLANTEN PROJEKTPHASEN

##### **Phase I (Projektbericht Riek & Wolff 1999)**

- Auswertung von Kronenzustandsdaten
- Analyse der räumlichen / zeitlichen Variabilität
- Repräsentanzstudien
- Beschreibung und Interpretation des Beziehungsgefüges zwischen Boden-, Ernährungszustand und Schädigung
- numerische Klassifikation zur Ableitung von
  - → Standortstypen
  - → Waldernährungstypen
  - → Schadens(verlaufs)typen
- Analyse regionaler Muster und Kohärenz der Typen
- Repräsentativität der „Level II“-Flächen bzgl. der ermittelten Standortstypen
- Datenbeschaffung und -aufbereitung für Phase II (DWD, UBA, RIVM, INS, SC-DLO)

##### **Phase II (vorliegende Studie)**

- Einbeziehung von Immissions-/ Depositionsdaten als zusätzliche Einflussgrößen
- Untersuchung räumlicher Muster
- Verknüpfung von Klimadaten mit BZE-Daten zur Ableitung von Wasserhaushaltskennwerten
- „Erklärung“ der Schadensausprägung durch Standortfaktoren (Ernährung, Bodenzustand, Deposition)
- Überprüfung der Übertragbarkeit von Level II-Parametern auf Level I-Punkte
- Ableitung von Waldzustandstypen

##### **Phase III (Fortführung ab 11/2001)**

- Ableitung von Maßnahmenbündeln für Standortstypen aufgrund der Ergebnisse der Modellstudien
- Modellstudien und Szenarien anhand variierender Klima- und Immissionsparameter
- Ableitung von Zuordnungskriterien für Maßnahmenbündel
- Ableitung der Belastbarkeit der Standorte anhand des Indikators Stickstoffhaushalt

## Literaturverzeichnis

- BECKER R., BLOCK J., SCHIMMING C.-G., SPRANGER T. & WELLBROCK N. (2000): Critical Load-Kalkulationen an Level II-Dauerbeobachtungsflächen. Forstarchiv **71**, H. 2: 54-58. Göttingen.
- BLEEKER A., DRAAIJERS G.P.J., KLAP J.M. & VAN JAARVELD J.A. (2000): Deposition of acidifying components and base cations in Germany in the period 1987-1995. RIVM, report 722108027. Bilthoven. pp.124.
- BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (1997): Stellungnahme zur Erhebung des Waldzustandes und Empfehlung zur Weiterentwicklung des Verfahrens. Bericht der vom BML eingesetzten Expertengruppe.
- BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (1998): Bericht zum Zustand des Waldes 1998. Ergebnisse des forstlichen Umweltmonitorings: pp.148. Bonn
- BOLTE A. & WOLFF B. (2001): Validierung von Critical Loads Überschreitungen mit Indikatoren. 1. Teil Waldökosysteme des Abschlußberichtes des UBA-Forschungsvorhabens FKZ 298 423 09
- BRANDING A. (1997): Die Bedeutung der atmosphärische Deposition für die Forst- und Agrarökosysteme der Bornhöveder Seenkette. EcoSys Suppl-Bd. **14**, Kiel.
- DRAAIJERS G.P.J., VAN LEEUWEN E.P., JONG P.G.H. & ERISMAN J.W. (1997): Base cation deposition in Europe. Part I - model description, results and uncertainties. Atmospheric Environment **31**: 4139-4157.
- DRAPER N. & H.SMITH (1981): Applied Regressionsanalyses. New York.
- EICHHORN J. (1995): Stickstoffsättigung und ihre Auswirkungen auf das Buchenwaldökosystem der Fallstudie Zierenberg. Habilitationsschrift. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, **124**, pp. 175.
- GAUGER T., KÖBLE R. & SMIAITEK G. (1997): Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und -raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern. Teil 1: Deposition Loads. Endbericht zum Forschungsvorhaben 10601061 des Umweltbundesamtes: pp.126.
- GAUGER T., KÖBLE R. & SMIAITEK G. (1999): Kritische Luftschadstoff-Konzentrationen und -Eintragsraten für Waldökosysteme sowie ihre Überschreitungen für Wald und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme. Endbericht zum Forschungsvorhaben 10601061 des Umweltbundesamtes: pp. 131.
- GILL, P., M. MURRAY, M.WRIGHT (1981): Practical optimization. London.
- HUTCHINSON M. F. (1995). "Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines." International Journal for Geographical Information Systems 9(4): 385-403.
- IBROM A. (1993): Die Deposition und die Pflanzenauswaschung (Leaching) von Pflanzennährstoffen in einem Fichtenbestand im Solling. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. **105**.
- LEEUWEN VAN E.P., POTMA C.J.M., DRAAIJERS G.P.J., ERISMAN J.W. & VAN PUL W.A.J. (1995): European wet deposition maps based on measurements. RIVM report No 722108006, Bilthoven.
- PRENTICE I. C., CRAMER W. (1992): A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate; Journal of Biogeography 19(2): 117-134.
- PUL VAN W.A.J., POTMA C.J.M., VAN LEEUWEN E.P., DRAAIJERS G.P.J. & ERISMAN J.W. (1995): EDACS: European Deposition maps of Acidifying Components on a small scale. Model description and results. RIVM report No 722401005, Bilthoven.
- RIEK W. & WOLFF B. (1999): Integrierende Auswertung von Waldzustandsdaten. 1. Projektphase.Abschlussbericht. BFH Eberswalde: pp.137.
- RIEK W. & WOLFF B. (2000): Ansätze zur Ableitung von Waldzustandstypen auf der Grundlage nationaler Inventurdaten. Tagung der Biometrischen Gesellschaft. Arbeitskreis Ökologie.
- SEIDLING W. (2000): Multivariate statistics within integrated studies on tree crown condition in Europe- an overview. BFH: pp. 45 .
- SPANGENBERG A. (1997): Heterogenität und Dynamik der Bodenlösungsschemie am Beispiel verschiedener Nährelemente im Freiland und Tracer-Transport an Bodensäulen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, 146: pp. 165. Göttingen

- SPRANGER T. (1992): Erfassung und ökosystemare Bewertung der atmosphärischen Deposition und weiterer oberirdischer Stoffflüsse im Bereich der Bornhöveder Seenkette. *EcoSys*, Beiträge zur Ökosystemforschung, Suppl. 4.
- SYKES M. T. & PRENTICE I. C. (1996): A bioclimatic model for the potential distributions of North European tree species under present and future climates; *Journal of Biogeography* 23(2): 203-233.
- UBA (Umweltbundesamt) (1996) Umweltbundesamt: Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. UBA-Texte 71/96.
- ÜBERLA, K. (1972): Faktorenanalyse. Berlin.
- WARD, J.H. (1963): Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Amer Stat As.* 58, 236-254.
- WELLBROCK, N. (2001): Veränderungen und ökosystemare Bewertung der atmosphärischen Deposition eines Buchenwaldes und Übertragung des Bewertungskonzeptes auf ausgewählte Waldökosysteme in Schleswig-Holstein. *EcoSys Suppl.* Bd. 35.
- WOLFF B. & RIEK W. (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustands -erhebung im Wald von 1987-1993 (BZE) Bd. 1 und 2. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): pp. 144
- Wolff B. (2000) : Identifizierung von Belastungsräumen und Schadverlaufstypen auf der Basis forstlicher Inventurdaten. Tagung der Biometrischen Gesellschaft. Arbeitskreis Ökologie.