RheinlandPfalz
MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, ERNÄHRUNG UND FORSTEN

MANGANTOXIZITÄT BEI DOUGLASIE

Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 78/16



Landesforsten Rheinland-Pfalz

Impressum

Herausgeber:
Zentralstelle der Forstverwaltung
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF)
Hauptstr. 16
D-67705 Trippstadt
Telefon 06306 911-0, Telefax 06306 911 200
zdf.fawf@wald-rlp.de
www.fawf.wald-rlp.de

Verantwortlich:
Der Leiter der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

Dokumentation:
Mitteilung FAWF, Trippstadt
Nr. 78/16, 130 Seiten

Gestaltung, Grafik und Satz
FAWF Rheinland-Pfalz

ISSN 1610-7705 Mitteilungen aus der
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 78/16

nur als download
http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Titelbild:

Durch Manganüberschuss induziertes starkes Harzen einer Douglasie Foto: H.W. Schröck

MANGANTOXIZITÄT BEI DOUGLASIE (*Pseudotsuga Menziesii {Mirb.} Franco*)

Stand der Kenntnis und Empfehlungen zur Begrenzung der Schäden

Joachim Block, Martin Greve, Hans Werner Schröck,
Friedrich-Wilhelm zum Hingste

Zentralstelle der Forstverwaltung
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland-Pfalz,
Trippstadt 2016

Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung 5

Summary 7

1 Einleitung 9
1.1 Herkunft und Bedeutung der Douglasie in Deutschland und Rheinland-Pfalz 9
1.2 Waldschutzaspekte 10
1.3 „Neuartige" Douglasienschäden 10

2 Symptome der Douglasienerkrankung und deren mögliche Ursachen und Verwechslungsmöglichkeiten 12

3 Ausmaß und Entwicklung der Erkrankung in Rheinland-Pfalz 23

4 Befunde von Boden- und Nadelanalysen 26
4.1 Befunde von Boden- und Nadelanalysen landesweit ausgewählter Douglasienbestände 26
4.1.1 Datenerhebung, Aufbereitung und Bewertung 26
4.1.2 Ergebnisse 28
4.2 Beziehungen zwischen verschiedenen Manganfraktionen im Boden und Mangan-Nadelgehalten gesunder und geschädigter Douglasien im Forstamt Adenau 42

5 Manganvorräte in rheinland-pfälzischen Waldböden 44

6 Untersuchungen zur Elementverteilung in den Douglasien und zum Eisenhaushalt 48
6.1 Mangangehalte in unterschiedlichen Baumkompartimenten auf verschiedenen Standorten 48
6.2 Elementverteilung in Bast und Splintholz symptomfreier und erkrankter Douglasien am Standort Adenau 49
6.3 Eisenhaushalt okular schadfreier und symptomtragender Douglasien 52

7 Düngungsversuche 53
7.1 Untersuchungsbestände und Methodik 53
7.1.1 Untersuchungsbestände und Standorte 53
7.1.2 Düngungskonzept 56
7.1.3 Untersuchungen an den Versuchsanlagen 57
7.2 Ergebnisse der Düngungsversuche 64
7.2.1 Befunde Versuch Adenau 64
7.2.2 Befunde Versuch Hochspeyer 82
7.2.3 Befunde Versuch Cochem 88
7.2.4 Befunde B- und Mo-Versuch Irrel 96

8 Diskussion 98
8.1 Mangantoxizität als Erkrankungsursache 98
8.2 Einfluss der Provenienz auf die Douglasienschäden 101
8.3 Wirkung von Dolomitkalkung und Phosphordüngung bei Mangantoxizität 102

9 Empfehlungen zum Douglasienanbau und zur Behandlung durch Mangantoxizität betroffener Douglasienbestände 106
9.1 Generelle Aspekte des Douglasienanbaus 106
9.2 Ausschluss von Standorten mit Manganüberschuss 107
9.3 Waldbauliche Behandlung von Mangantoxizität betroffener Douglasienbestände 107

10 Literatur 110

11 Danksagung 121

Zusammenfassung

Der Douglasie kommt in Rheinland-Pfalz mit 6,4 % Waldflächenanteil eine besondere Bedeutung zu. Geeignete Herkünfte vorausgesetzt ist sie an milde, regenreiche Winter und trocken-heiße Sommer besser angepasst als beispielsweise die Fichte, womit ihr im Zuge des Klimawandels eine wichtige Rolle im Sinne eines hohen Anpassungsvermögens prognostiziert wird. Waldschutzaspekte spielten bisher, mit Ausnahme der aktuell weit verbreiteten Rußigen Douglasienschütte mit zum Teil beträchtlichen Zuwachsverlusten, keine wesentliche Rolle.

Ernster wurde in den 1970er und 80er Jahren das vermehrte Auftreten von „Neuartigen Douglasienschäden" gesehen, als deren Ursache bereits sehr früh Manganüberschuss vermutet wurde. Die Ergebnisse der seit nahezu drei Jahrzehnten durch die FAWF durchgeführten oder koordinierten Untersuchungen erbrachten keine Hinweise auf eine Verursachung dieser Schäden durch Tiere, Nadel- und Wurzelpilze oder andere Organismen. Hierzu wird in dem Bericht eine Differentialdiagnose häufiger zu Verwechslung führender Schäden aufgezeigt. Die umfangreichen Nadel- und Bodenanalysen, die Befunde physiologischer Untersuchungen von Hydrokulturversuchen mit Douglasiensämlingen sowie die Befunde der hiesigen Düngungsversuche unterstützen die bereits von Meyer (1985) und Schöne (1987) formulierte Hypothese einer durch Manganüberschuss induzierten Erkrankung. In erkrankten Beständen finden sich sowohl im Boden als auch in den Nadeln exzessiv hohe Mangangehalte. Innerhalb geschädigter Bestände weisen erkrankte Bäume in der Regel höhere Mangangehalte als noch symptomfreie Bäume auf.

Mangan ist als essentieller Mikronährstoff an der Aktivierung zahlreicher Enzyme beteiligt. Eine Überversorgung verändert die Aktivität von Enzymen und führt zu Ungleichgewichten im Nährstoffhaushalt. Als wesentliche auf Manganüberschuss hinweisende Symptome erwiesen sich starker Harzfluss, eine Ausbleichung des jüngsten Nadeljahrgangs und Wuchsdeformationen. Bei stark geschädigten Bäumen sind diese Merkmale gleichzeitig zu finden. Nadelanalysen sind ein probates Mittel, Manganüberschüsse zu belegen. Aus den hiesigen Befunden wurde als Schwelle für hohes Risiko einer Mangantoxizität ein Mangangehalt >3,8 mg/g im ersten Nadeljahrgang sowie als weiterer Indikator ein Ca/Mn-Verhältnis <1,25 im ersten Nadeljahrgang abgeleitet. Letzteres trägt der Beobachtung Rechnung, dass Calcium bei der Entgiftung des Mangans eine Schlüsselrolle spielt.

Ursache der hohen Konzentration mobiler Manganionen im Ökosystem ist eine aktuell ablaufende Pufferung von atmogen eingetragenen oder im Ökosystem intern gebildeten Säuren durch pedogene Mangan-Mischoxide. Pufferreaktionen durch Manganoxide spielen insbesondere im pH-Bereich zwischen 4 und 5 eine wesentliche Rolle. Bei pH-Werten >5 wird Mangan in der Bodenmatrix fest gebunden und gelangt nur in geringen Mengen in den Stoffkreislauf. Fortschreitende Bodenversauerung führt dagegen zu nahezu vollständigem Austrag von Mangan mit dem Sickerwasser. Da der Vorrat an Manganoxiden im Allgemeinen sehr begrenzt ist und im Zuge der Bodenversauerung aufgebraucht wird, könnten die Mangankonzentrationen und die hiermit verbundenen Schäden im Laufe der Zeit zurückgehen.

Die durchgeführten genetischen Untersuchungen deuten darauf hin, dass Inlandsdouglasien bzw. Übergangsformen zwischen Inlands- und Küstendouglasie empfindlicher als Küstendouglasien-Herkünfte auf Manganüberschuss reagieren, allerdings können auch Küstendouglasien deutliche Schäden aufweisen. Ähnlich der Empfindlichkeit gegenüber Schüttebefall, variieren die Toleranzschwellen auch bei der Mangantoxizität offenbar von

Baum zu Baum erheblich.

In den durchgeführten Düngungsversuchen zeigten nur die Dolomitkalkung und die Phosphordüngung einen positiven Effekt auf den Bodenzustand, die Ernährung der Douglasien und deren Vitalität. Die positive Wirkung der Kalkung ist im hiesigen Versuch wohl auf die Reduzierung der Manganverfügbarkeit durch die Anhebung des pH-Wertes, die Zuführung von für die Entgiftung von Mangan benötigtem Calcium und die starke Erhöhung der Konzentration an Magnesiumionen in der Bodenlösung mit der hierdurch verursachten Konkurrenz in der Aufnahme dieser zweiwertigen Kationen zurückzuführen. Negativ schlägt die recht deutliche Erhöhung der Nitratkonzentration im Sickerwasser zu Buche, allerdings wurde im hiesigen Versuch mit 6 t/ha feingemahlenem Dolomit eine hohe Dosierung verwendet. Phosphor wird wie Calcium zur Entgiftung von Mangan benötigt.

Die Ergebnisse belegen dass bei der Baumartenwahl für Douglasie Standorte mit Manganüberschuss bei Neupflanzungen ausgeschlossen werden müssen. In Rheinland-Pfalz sind erhöhte Manganvorräte insbesondere bei Lösslehmen, Schichtlehmen, eutrophen Tonschiefern und Standorten des Rotliegenden zu finden. Stocken auf diesen Standorten bereits Douglasien sollte durch geeignete Maßnahmen wie Voranbau von Rotbuche, Sorge getragen werden, dass die Douglasie in der nachfolgenden Waldgeneration nur noch als Mischbaumart vorkommt.

Sind Schäden aufgetreten, vornehmlich im Stangenholz- und jungen Baumholzalter, sollte abgewartet werden, da in der Regel genügend Bäume überleben und Bestände die diese Phase durchlaufen haben, offenbar kaum mehr gefährdet sind. Dies könnte zum einen an der im Versauerungsprozess der Böden abnehmenden Manganverfügbarkeit liegen. Zum anderen dürften Douglasien mit steigendem Baumalter in der Lage sein, mit den Wurzeln zunehmend Nährstoffvorräte zu erschließen und durch Manganüberschuss bedingte Mangelernährungen auszugleichen.

In von Mangantoxizität betroffenen Beständen richtet sich die Auswahl der zu entnehmenden Bäume streng an der Vitalität. Allerdings dient die Baumentnahme nicht als Hygienemaßnahme im Sinne einer Sanierung von geschädigten Bäumen. Da die Entwicklung nicht vorherzusehen ist kann in sehr stark betroffenen Beständen die Auswahl und Wertästung von Douglasien-Z-Bäumen nicht empfohlen werden. In Reinbestandsteilen sollten starke Eingriffe unter Risikoaspekten unterbleiben, die Bewirtschaftungsziele in Mischbeständen wenn möglich auf andere Baumarten gelegt werden. Eine rechtzeitige Vorausverjüngung schattentoleranter Baumarten sollte in die Wege geleitet werden.

In von Mangantoxizität betroffenen Douglasienbeständen wird zudem eine übliche Bodenschutzkalkung mit Dolomitkalk (3 t/ha) empfohlen. Die Möglichkeit einer Phosphorbeimengung wird gegenwärtig noch geprüft.

Summary

In Rhineland Palatinate, Douglas fir is an important tree species with covering 6.4 % of the forest area. Some proveniences of Douglas fir are better adapted to wet winters or dry and hot summers than Norway spruce. Because of these adaptations the importance of Douglas fir is expected to increase due to climate change. Forest pathogens are currently negligible, except the widely spread Swiss needle cast (Phaeocryptopus gaeumannii), which can cause significant growth reduction.

In the 1970s and 1980s, the Appearance of the "novel Douglas fir damage" was taken seriously. Excess manganese nutrition was suspected to be the cause. Over thirty years of research done or coordinated by the FAWF (Research Institute for Forest Ecology and Forestry) didn't show any biotic factors to cause these damages. But the results from soil and needle analysis, experiments with Douglas fir seedlings and fertilizer trials all support the hypothesis, that the damages are a result of excess manganese availability. In damaged forest stands, needle samples of trees with symptoms generally contained more manganese as needle samples of trees without symptoms.

Manganese is an essential micronutrient and acts an activator for a large number of enzymes. An excess supply of manganese can disturb the activity of enzymes and can induce deficiencies of other nutrients. The main symptoms for excess supply of manganese are resinosis, chlorosis of the current year needles and deformed plant growth. Highly damaged trees can show all of these symptoms at once. A high risk of manganese toxicity exists, when manganese concentrations of the current year needles exceed 3.8 mg/kg and the ratio of calcium to manganese falls below 1.25.

Plant available manganese is released by manganese-bearing oxides, when these are compensation the acid load from acid deposition or proton producing, ecosystem internal processes. Proton consumption by manganese oxides occurs in particular in the pH range between 4 and 5. Most of the manganese is lost by seepage water output, when pH values drop below 4. Because of the limited amount of manganese stored in the soil, it is possible that damages caused by excess supply of manganese decline within decades in areas with a high acid load.

Genetic analyses indicate that the variety interior Douglas fir (P. menziesii var. glauca) tends to be more sensitive to manganese toxicity than the variety coast Douglas fir (Pseudotsuga menziesii var. menziesii). But the sensitivity can vary much between tree individuals, ranging from trees with no visible damage to almost dead trees with high resinosis in the same forest stand.

The liming and phosphorus fertilizer trials showed a positive effect on soil status, tree nutrition and tree vitality. Liming increased soil pH leading to reduced manganese availability. Also magnesium released from the dolomitic limestone could inhibit root uptake of manganese by ion competition. Literature and the results also indicate that Calcium and phosphorus are important for detoxification of manganese inside the plant tissue. A negative effect of the liming trial was increasing mobilization of nitrate. However, a high dose of 6 t finely ground limestone powder per hectare was used.

In forestry plans, sites with manganese rich forest soils should be excluded for Douglas fir. In Rhineland Palatinate soils developed from loam with loess addition, layered loam, clay shale and Rotliegendes could contain higher concentrations of manganese. Was Douglas fir already planted at these sites, a mixed-species stand should be established by

underplanting with European beech (Fagus sylvatica).

No actions should be taken, when visual symptoms occur in young Douglas fir stands. In most cases a sufficient number of trees survive, which are no longer threatened by manganese stress at a higher age. Perhaps, older tress can access a bigger root zone or root in deeper soil layers to compensate the nutrient deficiencies caused by excess manganese. It is also possible that due to ongoing acidification most of the manganese is lost by seepage water.

In damaged stands, vitality should be the criteria for tree selection. But this should not be seen as sanitation harvesting. Thus the stand development and the future degree of damage are unknown, a selection of z-trees is not recommended. In pure stand intensive harvesting should be avoided. In mixed stands the other tree species than Douglas fir should be supported and regeneration of shade tolerant tree species should be initiated.
Liming (3 t dolomitic limestone per hectare) is recommended for Douglas fir stands with manganese toxicity. It is investigated recently, if phosphorus should be added to the limestone.

1 Einleitung

1.1 Herkunft und Bedeutung der Douglasie in Deutschland und Rheinland-Pfalz

Die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii {Mirb.} Franco*) ist ursprünglich in Nordamerika beheimatet. Dort besiedelt sie im Westen des Kontinents ein riesiges Areal, das sich über 4500 km von Kanada bis nach Mexiko erstreckt (Hermann 1997). Sie kommt unmittelbar an der Küste des Pazifiks über das Kaskadengebirge bis in 3000 m Höhe in den Rocky Mountains vor. In diesem Areal haben sich zwei Rassen und eine Übergangsform ausgebildet: die Grüne oder Küsten-Douglasie (*var. viridis*), die Blaue oder Inland-Douglasie (*var. glauca*) und als Übergangsform die Graue Douglasie (*var. caesia*) (Konnert 2009). Die Rassen sind genetisch kompatibel, unterscheiden sich aber ökologisch beträchtlich (Kleinschmit et al. 1974, Hermann 1997). So sind die Inlandsdouglasien weit weniger wuchskräftig als die Küstendouglasien und auch erheblich empfindlicher gegenüber der Rostigen Douglasienschütte (*Rhabdocline pseudotsugae*).

Die Douglasie wurde 1792 durch den Naturforscher Archibald Menzies bei einer Forschungsreise nach Nordamerika entdeckt und beschrieben (Hermann 1981). Im Jahr 1826 sandte der Botaniker David Douglas Samen dieser Baumart nach England. Erste wissenschaftlich begleitete Anbauversuche wurden ab 1881 durch die Forstlichen Versuchsanstalten durchgeführt (Ganghofer 1884). Auch in der Region des heutigen Rheinland-Pfalz erfolgten erste Versuchsanbauten um 1880 in den Forstämtern Daun/Eifel und Schweigen/Pfalz.
Die außergewöhnlich boden- und klimavage Douglasie zeigt auf vielen Standorten eine überlegene Wuchsleistung gegenüber den heimischen Baum-arten (Überblick in Vor et al. 2015, S. 142ff). Das Holz der Douglasie (Handelsname: Oregon pine) besitzt gute holztechnische Eigenschaften (Fischer 2009). Dementsprechend wird es sehr vielfältig verwendet, vor allem als Bau- und Konstruktionsholz sowie als Rundholz im Außenbereich. Wertgeastete Douglasien liefern auch hochwertiges Schneide- und Furnierholz.

Die Douglasie ist inzwischen die bedeutsamste Gastbaumart in Deutschland. Nach den Befunden der Bundeswaldinventur (BWI) 3 (2012) (https://bwi.info) sind 217.600 ha, etwa 2 %, der Waldfläche Deutschlands mit Douglasie bestockt. Besonders hoch ist der Anteil der Douglasie in Rheinland-Pfalz. Hier nimmt die Douglasie mit 51.700 ha etwa 6,4 % der Waldfläche des Landes ein. Die Schwerpunkte des Douglasienanbaus in Rheinland-Pfalz liegen im Moseltal, im Gutland, der Osteifel und im Pfälzerwald. 15 der 43 rheinland-pfälzischen Forstämter verfügen im Staats- und Kommunalwald über eine Douglasienfläche von mehr als 1000 ha, 5 Forstämter sogar über mehr als 1500 ha. Der Flächenanteil der Douglasie ist von der BWI 1 (1987) zur BWI 3 (2012) um ca. 13.500 ha gestiegen. Der Vorrat an Douglasie im rheinland-pfälzischen Wald hat sich in diesem Zeitraum auch wegen des Hereinwachsens der nach dem Krieg entstandenen Douglasienbestände in höhere Altersklassen von 6 auf etwas mehr als 18 Mio. Vorratsfestmeter verdreifacht. Damit ist auch die Bedeutung der Douglasie für die Versorgung der Industrie und zur Sicherung der Einnahmen der Waldbesitzenden in den vergangenen Jahrzehnten erheblich gestiegen und wird aller Voraussicht nach weiter steigen.

Bereits 1997 wies Schöne (1997) auf die Bedeutung der Gastbaumart Douglasie für Rheinland-Pfalz im „zu erwartenden Klimawandel" hin, vor allem wegen ihrer Fähigkeit, trockene Sommer gut zu ertragen und einen beträchtlichen Teil der Assimilation von CO_2 und Nährstoffen in den dann wesentlich milderen Wintern zu vollbringen. Heute gilt die Douglasie im Klimawandel als Baum der Zukunft, da sie, geeignete Herkünfte und Standorte vorausgesetzt, an milde, regenreiche Winter und trocken-heiße Sommer besser angepasst ist als die Fichte (Kölling 2008, Spellmann et al. 2011, Stutmöller et al. 2013).

Sehr schnell zeigte sich bei dieser genetisch sehr diversen Art die Bedeutung der Herkunft des Saat- bzw. Pflanzgutes (vgl. Münch 1928, Schwappach 1901, 1912). So wurde bereits 1912 ein Douglasienherkunftsversuch angelegt, von dem sich eine heute noch existierende Anlage im heutigen Forstamt Kaiserslautern befindet (Rohmeder 1956). Während die Küstenherkunft

Snoqualmie in 90 Jahren eine Gesamtwuchsleistung von fast 2000 Vfm erreichte, leisteten die „*caesia*"- und „*glauca*"-Inlandsherkünfte hier nicht einmal die Hälfte oder fielen komplett durch Schüttebefall (*Rabdocline pseudotsugae* und *Phaeocryotopus gaeumannii*) aus (Stimm & Dong 2001, Dong & Eder 2005).

1.2 Waldschutzaspekte

Bei geeigneter Herkunftswahl und geeignetem Standort hat sich die Douglasie in Deutschland als stabile Baumart erwiesen. Zwar identifizierte Delb (2013) auf Grundlage einer eingehenden Recherche nach allen in Nordamerika, Neuseeland und Europa an der Douglasie vorkommenden Schadorganismen 388 verschiedene an der Douglasie vorkommende Insektenarten, allerdings bewertete er ausschließlich in Nordamerika heimische Arten als besonders gefahrenträchtig. Dies sind der „Douglas-fir beetle" (*Dendroctonus pseudotsugae*), die „Douglas-fir tussock moth" (*Orgyia pseudotsugata*) sowie der „Western Spruce budworm" (*Choristoneura occidentalis*). Diese im Herkunftsgebiet der Douglasie große Schäden verursachenden Insekten wurden bislang (noch) nicht nach Europa eingeschleppt. Die in Mitteleuropa heimischen Borkenkäfer können in der Douglasienrinde bisher kaum erfolgreich brüten. Nach bisherigem Kenntnisstand werden in Südwestdeutschland nur liegende und aufgrund anderer Ursachen, wie zum Beispiel extremer Dürreereignisse, stark geschwächte Bäume insbesondere vom Kupferstecher (*Pityogenes chalcographus*), vom Furchenflügligen Fichtenborkenkäfer (*Pityophthorus pityographus*) und durch den Lärchenborkenkäfer (*Ips cembrae*) befallen (Delb 2013). Auch der aus Ostasien stammende Schwarze Nutzholzborkenkäfer (*Xylosandrus germanus*) wurde in Rheinland-Pfalz nachweislich an dieser Baumart beobachtet (Delb 2013). Aus Nordamerika nach Europa eingeschleppt wurde die Douglasienwolllaus (*Gilletteella cooleyi*), deren Schäden sich allerdings meist in Grenzen halten. Bei Massenvermehrungen des Schwammspinners (*Lymantria dispar*) (z.B. Delb 1999) und der Nonne (*Lymantria monacha*) sind häufig auch Douglasien, meist aber mit nur mäßigen Schäden betroffen.

Größere Gefahr als durch Insekten geht für die Douglasie in Europa aktuell von Pilzerkrankungen aus, insbesondere durch die aus Nordamerika eingeschleppte Rostige Douglasienschütte (*Rhabdocline pseudotsugae*) und die Rußige Douglasienschütte (*Phaeocryptopus gaeumannii*) (Liese 1932). Durch die Rostige Douglasienschütte sind insbesondere Inlands- und Übergangsherkünfte erheblich gefährdet (Hartmann et al. 2007).

Bei der Rußigen Douglasienschütte gelten alle Douglasienrassen als anfällig, allerdings zeigen sich auch hier herkunftsabhängige Unterschiede und vor allem große Befallsdifferenzierungen in Abhängigkeit vom Standort (vgl. Hermann 1997).

An pilzlichen Wurzel- und Stammfäulen sind in den Herkunftsgebieten die „Shoestring root rot" (*Armillaria mellea sensu lato*), die „Red ring rot" (*Porodaedalea pini*) und insbesondere die „Laminated root rot" (*Phellinus weirii*) an Douglasie von Bedeutung (Delb 2013, Lavender & Hermann 2014). Während Hallimasch-Arten auch in Europa heimisch sind, kommen die anderen genannten Arten hier noch nicht vor. Die Douglasie wird in unserer Region neben Hallimasch (*Armillaria ssp.*) auch vom Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*), dem Kiefern-Braunporling (*Phaeolus schweinitzii*) und von der Krausen Glucke (*Sparassis crispa*) befallen (Klemm, R. 2010). Das Ausmaß ist aber meist geringer als bei Fichte oder Kiefer.

Auch die Phomopsis-Rindenbrandkrankheit der Douglasie (*Phomopsis pseudotsugae*) führt örtlich zu bedeutsamen Schäden (Möller & Heydeck 2009, Metzler 2010).

Auf gut durchwurzelbaren Standorten zeigt die Douglasie eine vergleichsweise geringe Sturmgefährdung. Schäl- und Rückeschäden werden anders als bei Fichte meist gesund überwallt. Probleme bereiten aber in Kulturen und Naturverjüngungen Wildschäden insbesondere durch Fegen und Schlagen. Auch ist sie in der Jugend empfindlich gegen Frosttrocknis.

1.3 „Neuartige" Douglasienschäden

Erste Hinweise auf nicht durch die vorstehend aufgeführten, herkömmlichen Schaderreger verursachte Schäden in Douglasienbeständen in Rheinland-Pfalz liegen aus dem Jahr 1964 für das Forstamt Saarburg-Ost vor. Dort wurden in einem ca. 30-jährigen Douglasienbestand starker Nadelverlust und Harzfluss auch an ungeasteten herr-

schenden und vorherrschenden Bäumen beobachtet. Untersuchungen von Stammabschnitten im Institut für Holzkunde und Holznutzung der Universität München (Prof. Dr. von Pechmann) ergaben keine Hinweise auf Pilzbefall, aber „eine von der Norm stark abweichende Entwicklung der letzten sechs bis sieben Jahresringe".
Im Frühjahr 1971 bereiste Dr. Schönhar von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg erkrankte Douglasienbestände ebenfalls im Forstamt Saarburg-Ost. Die ca. 40-jährigen Douglasien zeigten eine auffallend schüttere Benadelung sowie bereits einzelne Ausfälle. Weder an den Trieben noch an den Ästen oder am Stamm wurden tierische Schädlinge oder pflanzliche Parasiten gefunden. Dagegen zeigten die untersuchten Feinwurzeln eine Infektion durch *Cylindrocarpon radicicola*. Dieser Pilz wurde allerdings als Sekundärparasit eingewertet, der nur geschwächte Wurzeln befällt. Als Primärursache wurde eine Schwächung der Douglasienwurzeln durch Sauerstoffmangel auf dem betroffenen tonhaltigen Lehmboden aus Tonschiefer angenommen (Schönhar 1971).
Bei einer Bereisung dieser Bestände durch die Waldbau- und Forsteinrichtungsreferenten des Ministeriums und der Forstdirektion Koblenz im November 1971 wurde allerdings angesichts der Bodeneigenschaften in einem besichtigten Bodeneinschlag ausgeführt, dass Bodenverdichtungen als Ursache für die Wurzelfäule kaum in Betracht kämen. Bereits anlässlich dieser Bereisung wurde angeregt, mit Hilfe von Absaaten aus den Schadbeständen zu prüfen, ob es sich bei den Schadflächen um Anbauten der grauen Douglasie handele.
Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre häuften sich dann Meldungen rheinland-pfälzischer Forstämter zu unerklärbaren Schäden in Douglasienbeständen.
Im Herbst 1978/Frühjahr 1979 wurden von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Dr. König) Rindenpartien aus dem Bereich der Rindenrisse und Nekrosen sowie Wurzelstöcke erkrankter Douglasien aus dem Forstamt Mayen untersucht. Die mykologischen Untersuchungen ergaben nur einen sekundären Befall durch saprophytische Pilze, welche am Absterben der Rindenpartien nicht beteiligt waren. Vermutet wurde eine „abiotische" Erkrankungsursache. Die Untersuchung der Wurzelstöcke ergab, dass weder Hallimaschbefall noch Befall durch Wurzelschwamm vorlag.
In den Jahren 1979 bis 1983 wurden wiederholt erkrankte Douglasienbestände in den Forstämtern Saarburg-Ost, Daun-Ost, Adenau und Nastätten durch Dr. Schönhar bereist und Probenmaterial aus diesen Forstämtern untersucht. Dabei wurden die gleichen Schadphänomene wie bei den vorangegangenen Bereisungen beobachtet (fortschreitender Nadelverlust, starker Harzfluss, einzelbaumweise Ausfälle), ohne dass Anzeichen einer Verursachung durch pilzliche Parasiten oder tierische Schädlinge festzustellen waren. Als Schadursachen wurden „ungünstige Bodenfaktoren" und darüber hinaus „zu dichter Stand in der Jugend" vermutet.
Auch Untersuchungen von Dr. Hartmann, Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, an Douglasien im Forstamt Adenau im Jahr 1986 ergaben keine Hinweise auf Nadelpilze oder Hallimaschbefall als Schadursache.
Untersuchungen an Nadel-, Boden- und Wurzelproben erkrankter Douglasienbestände aus dem Forstamt Adenau durch das Institut für Pflanzenkrankheiten der Universität Bonn (Prof. Dr. Nienhaus) im Jahr 1986 konnten weder Viren oder ähnliche Erreger noch parasitische Nematoden nachweisen. Auch Isolierungsversuche von Pilzen an Nadeln verliefen negativ. Biotische Ursachen der Schäden an den untersuchten Bäumen wurden daher ausgeschlossen.

Erste Hinweise auf Manganüberschuss als Ursache der beobachteten Douglasienschäden gab eine am Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen durchgeführte Diplomarbeit über Douglasienschäden in der Nord-eifel (Meyer 1985). Bei einer vorausgegangenen forstpathologisch-beschreibenden Diplomarbeit am Institut für Forstpflanzenkrankheiten der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Hann. Münden, wurden in den von Meyer untersuchten Beständen biotische Ursachen weitgehend ausgeschlossen und Immissionseinwirkungen als Schadursache vermutet (Pankert 1984). Meyer (1985) fand in den untersuchten erkrankten Douglasienbeständen außer-

gewöhnlich hohe Mangankonzentrationen in der Gleichgewichtsbodenlösung, am Austauscher und in den Nadeln. Aus diesen Befunden leitete er die Hypothese ab, dass der Säureinput aus der Atmosphäre Pufferreaktionen von Protonen mit Mangan-Mischoxiden auslöst, die zu toxischen Konzentrationen von Mn^{2+} in der Bodenlösung führen. In den Nadeln werden die aufgenommenen, überschüssigen Manganionen dann deponiert, was möglicherweise zu einer Verringerung der Assimilationsleistung sowie einer Störung im Wasser- und Stoffhaushalt der Bäume führen könne. Als Abhilfemaßnahme schlug er eine Kalkung mit 2 Tonnen Mg-haltigem Kalkmergel vor. Erste orientierende Analysen von Nadeln erkrankter Douglasien aus dem Forstamt Adenau im Jahr 1985 durch die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer im Auftrag des Forstamtes Adenau und im Jahr 1986 durch die Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt erbrachten sehr hohe Mangangehalte von bis zu 11.000 mg/kg im zweiten Nadeljahrgang und deuteten darauf hin, dass Manganüberschuss möglicherweise auch in Rheinland-Pfalz eine wesentliche Schadensursache sein könnte. Gestützt wurde diese Annahme durch Beobachtungen und Analysen durch Dr. Schöne im Forstamt Wittlich-West. Aus den Befunden von Nadelanalysen und einfachen Versuchen einer Eisenchelatbehandlung abgeschnittener Douglasienzweige folgerte er, dass wahrscheinlich ein durch Manganüberschuss bewirkter Eisenmangel die im Forstamt Wittlich-West und in ganz Südwestdeutschland verbreitete Douglasienerkrankung verursache (Schöne 1987).

Im Jahr 1986 begann die neu gegründete Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz (jetzt Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz -FAWF-) mit umfassenden Untersuchungen zu der immer bedrohlicher erscheinenden Douglasienerkrankung. Über Erhebungen zum Auftreten, Art und Ausmaß der Schadsymptome, der betroffenen Standorte und über umfangreiche Boden- und Nadelanalysen, diagnostische Düngungsversuche und genetische Untersuchungen sollte insbesondere die von Meyer (1985) und Schöne (1987, 1992a, b, c) formulierte Hypothese einer durch Manganüberschuss induzierten Erkrankung und des Einflusses der Douglasienherkünfte auf das Schadausmaß geprüft werden.
Eine erste Zusammenführung des damaligen Wissensstandes erfolgte im Rahmen eines Kolloquiums am 15. und 16. April 1997 in Adenau zum „Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden – derzeitige Empfehlungen für die Praxis“ und einen Mitteilungsband der Forstlichen Versuchsanstalt mit den dort gehaltenen Vorträgen (Autorenkollektiv 1997).

Die vorliegende Arbeit stellt nunmehr die Befunde der sich über nahezu drei Jahrzehnte erstreckenden Untersuchungen der FAWF zur Dougla-sienerkrankung vor, bewertet die Befunde vor dem Hintergrund des in der einschlägigen Literatur dargestellten Kenntnisstandes und leitet hieraus Empfehlungen an die forstliche Praxis zur Begrenzung der Schäden ab.

2 Symptome der Douglasienerkrankung und deren möglichen Ursachen und Verwechslungsmöglichkeiten

Nachfolgend werden die durch Mangantoxizität verursachten Schadsymptome beschrieben und zur Differenzialdiagnose auch Schadsymptome dargestellt, die auf anderen Ursachen, vornehmlich Befall mit Schadorganismen, beruhen und gegebenenfalls mit den Symptomen der Mangantoxizität in Verbindung gebrachten Symptomen im Einzelnen auch auf anderen Ursachen beruhen können. So können die auf Nährelementmangel zurückzuführenden Nadelverfärbungen durch Manganüberschuss induziert sein, aber auch auf unzureichendem Gehalt oder Verfügbarkeit des jeweiligen Nährelements im Boden verursacht sein. Konkrete Hinweise auf Mangantoxizität liefert vor allem ein gemeinsames Auftreten der Symptome Harzfluss, Ausbleichung des jünsten Nadeljahrgangs und Wuchsanomalien.

Verfärbungen an älteren Nadeln (Foto: 1 und 2)
Ältere Nadeln (Nadeljahrgang >=2) zeigen gelb-

liche, bronzene, rötliche oder bräunliche Verfärbungen, die an der Nadelspitze beginnen und dann zur Nadelbasis fortschreiten. Die lichtexponierten Nadeloberseiten sind in der Regel stärker betroffen als die lichtabgewandten Nadelunterseiten. Später färben sich die vergilbten Nadeln braun und fallen ab. Die Verfärbungen beginnen im unteren Kroneninnern und dehnen sich zur Kronenperipherie aus, in dem sie jeweils auf den nächstjüngeren Nadeljahrgang übergreifen.
Die Symptome weisen auf den Mangel von einem oder mehreren Nährstoffen hin (vgl. Baule 1978, Bergmann 1986, 1988, Evers & Hüttl 1992, Hartmann et al. 2007, Hüttl 1991, Lyr et al. 1992, Seibt 1971). In Betracht kommen insbesondere:
Magnesiummangel (vgl. Hartmann et al. 2007, Abb. 8a-e-Fichte, Abb. 59a-Kiefer, Abb. 97-Tanne, Bergmann 1986, Abb. 883, 888, 889-Fichte und 891, 894-Douglasie): gelbe Verfärbung von der Spitze ausgehend, lichtabgewandte Bereiche weniger betroffen; im weiteren Verlauf Braunfärbung und Verlust der älteren Nadeljahrgänge; die Gelbverfärbung ist bei erkrankten Douglasien meist aber nicht so deutlich ausgeprägt wie bei der „montanen Vergilbung" der Fichte oder der „Goldspitzigkeit" bei Kiefer;
Phosphormangel: wenig differenzierte, speziell auf P-Mangel hinweisende Symptome; Hüttl (1991) führt als P-Mangelsymptome an älteren Nadeln beginnende schmutziggrau bis blaugrüne, aber auch rötliche und violette Verfärbungen an. Bei Douglasie seien die älteren Nadeln häufig rötlich-violett bis rötlich-braun verfärbt. Die auffallend dunkelgrüne bis bläulichgrün-violette Tönung älterer Nadeln (auffällig insbesondere an Bäumen mit Eisenmangelchlorose, siehe unten) in der beginnenden Erkrankungsphase und die Nadelrötung im weiteren Schadverlauf könnten somit auf P-Mangel hinweisen.
Kaliummangel (vgl. Hartmann et al. 2007, Abb. 7a-c-Fichte, Abb. 59b-Kiefer, Abb. 98-Tanne, Bergmann 1986, Abb. 894-Douglasie): von den Spitzen ausgehende fahl gelbgrüne bis blassgelbe (ohne scharfen Übergang in den meist noch grünen Basalteilen der Nadeln) später braune Verfärbung der Nadeln; bei erkrankten Douglasien fehlt die für Fichte beschriebene violettbraune Verfärbung und Nadelverlust im jüngsten Trieb nahe der Terminalknospen (Evers und Hüttl 1992, Symptomfoto vgl. Bergmann 1986, Abb. 884) und das mit K-Mangel zusammenhängende „Frostschadenssymptom" (vgl. Hüttl 1991, S. 34-36).
Stickstoffmangel (vgl. Hartmann et al. 2007, Abb. 9a-b-Fichte- und Abb. 132-Douglasie): hellgelbe Verfärbung der Nadeln; Triebe zum Teil gestaucht; bei erkrankten Douglasien anders als bei N-Mangel beschriebene Verfärbung nicht gleichmäßig am gesamten Baum, auch fehlt meist die „Kleinnadeligkeit".
Eine Mangelernährung verschiedener Nährstoffe kann durch Manganüberschuss induziert sein (Marschner 2012, S. 205). Beispielsweise beschreibt Horst (1988) einen durch Manganüberschuss verursachten Mangel an Ca, Mg und Fe.

<u>Kronenverlichtung (Foto: 3 und 4)</u>
Im fortgeschrittenen Krankheitsstadium gehen die Nadelverfärbungen in Nadelverluste über. Die Benadelung wird schütter, wobei die Kronenverlichtungen wie die Nadelverfärbungen im unteren Kroneninneren beginnen und sich dann zur Kronenperipherie ausbreiten. Die Benadelung reduziert sich teilweise auf den jüngsten, häufig dann nur noch kümmerlich ausgebildeten Nadeljahrgang.

<u>Ausbleichung des jüngsten Nadeljahrgangs (Foto: 5 und 6)</u>
In vielen Fällen zeigen sich bereits in einem frühen Erkrankungsstadium bei häufig noch weitgehend voller Benadelung am jüngsten Nadeljahrgang weißgelbe Ausbleichungen. Ältere Nadeljahrgänge erscheinen in dieser Phase häufig auffallend dunkelgrün bis violettbraun überlaufen. Die helle Triebfärbung des jüngsten Nadeljahrgangs in deutlichem Kontrast zu älteren Nadeljahrgängen bleibt über die Vegetationszeit hinweg bis zum Austrieb im nachfolgenden Jahr erhalten. Zum Teil werden wegen stockender Triebstreckung nur sehr kurze Maitriebe mit weiß-gelber Farbe („Katzenpfötchen") ausgebildet.
Diese Symptome entsprechen dem Schadbild einer „Kalkchlorose" (vgl. Hartmann et al. 2007, Abb. 4a-Fichte und Abb. 50a-c-Kiefer) und weisen auf Eisen- oder Manganmangel hin. Manganmangel kann allerdings in der Regel bei den durchweg

hohen Mn-Nadelgehalten auf den kalkfreien Substraten ausgeschlossen werden. Für die Auslösung dieses Symptoms kommt daher vor allem ein (induzierter) Eisenmangel in Betracht (Kaus & Wild 1997, Kaus-Thiel 1998).

Harzfluss (Foto: 7, 8, 9 und 10)
Besonders auffällige Schadmerkmale sind Rindenrisse mit zum Teil sehr starkem Harzfluss am Stamm, insbesondere am Kronenansatz, häufig aber auch über den gesamten Stammbereich hinweg. An vielen Bäumen treten auf der Unterseite starker Kronenäste große, in der Regel aber überwallte Längsrisse verbunden mit starkem Harzfluss auf. Eine Überprüfung durch Eis et al. (1997) ergab keine Hinweise auf ein Vorkommen des Wundparasiten *Phomopsis pseudotsugae* an betroffenen Douglasien. Von Schöne (1997) wurde darauf hingewiesen, dass die Rindenschäden (mit Ausnahme des Harzflusses) den Symptomen der „Internal Bark Necrosis – IBN" bei Apfelbäumen in den USA ähneln. Die IBN wird mit Manganüberschuss sowie mit Bormangel in Verbindung gebracht (Shelton et al. 1970, Crocker & Kenworthy 1973).
Harzfluss entsteht im Holz meist durch das Fusionieren von benachbarten pathologischen Harzkanälen. Hält das bereits außerhalb gebildete Spätholz dem Druck stand, bleibt die Harzgalle geschlossen. Bei sehr schmalen rezenten Jahrringen mit geringem Spätholzanteil können die Harzgallen nach außen aufplatzen, so dass das Harz außerhalb der Rinde freigesetzt wird (Metzler 2016, interner Bericht).

Wuchsdeformationen (Foto: 11, 12, 13 und 14)
In fortgeschrittenem Stadium stellen sich mehr oder weniger ausgeprägte Wuchsdeformationen ein. Zu beobachten sind unregelmäßige Terminaltriebbildung, Zwieselbildung, Schlängelwuchs, Wirrwuchs und büschelige Ersatztriebbildungen bis hin zur Ausbildung von Hexenbesen. Diese Wuchsdeformationen können durch Spurenelementmangel, insbesondere Bor, Molybdän, Zink und Kupfer (Bergmann 1986, Hartmann et al. 2007, Oldencamp & Smilde 1966, Schöne 1992c, 1997), gegebenenfalls verstärkt durch Stickstoffüberschuss (Schöne 1997), verursacht werden. Bergmann (1986, S. 9-11) führt beispielsweise bei Kupfermangel eine „Pendulaform" bei Nadelbäumen, bei Bormangel „Hexenbesen" bei Obstbäumen und „Storchennestbildung" bei Nadelbäumen und bei Zinkmangel Sprossstauchungen und büschelartig angeordnete Blätter („Rosettenbildung") bei Dikotylen an. Auch Mangantoxizität führt zu einem Verlust der apikalen Dominanz und zur Ausbildung von Ersatztrieben bis hin zur Entstehung von Hexenbesen (Bañados et al. 2009; Kang & Fox 1980; Marschner 2012, S. 205).

Zuwachseinbrüche (Foto: 10)
Messungen der Terminaltrieblängen in drei erkrankten Beständen im Forstamt Adenau zeigten, dass erkrankte Bäume bis 1982/83 gleiches, z.T. auch merklich besseres Höhenwachstum aufwiesen als symptomfreie Bäume und ab 1983/84 im Wachstum stark nachließen und dann unterlegen waren (Zoth 1990). Kaus-Thiel (1998) führte an 5 symptomtragenden Bäumen aus dem Untersuchungsbestand des Düngungsversuchs Adenau (vgl. Kap. 7.1.1) Jahrringanalysen an Stammscheiben durch. Die Bäume zeigten einen abrupten Einbruch der Jahrringbreite, allerdings jeweils in unterschiedlichen Jahren. Die Jahrringbreite ging von 6-7 mm auf < 1 mm zurück und verharrt bei diesem geringen Wert nahezu ohne Variation.
Die Bäume sind demnach offenbar nicht mehr in der Lage auf variierende Umweltbedingungen zu reagieren.
Die Zuwachseinbußen sind mit der beschriebenen Kronenverlichtung verbunden. Sie können sowohl auf Nährstoffmangel als auch auf Mangantoxizität zurückzuführen sein.

Schadentwicklung, Mortalität und Bestandesverlichtung (Foto: 15, 16 und 17)
Symptombehaftete Bäume können sich sowohl wieder erholen als auch innerhalb weniger Jahre absterben. Nach den Befunden einer von Delb (1989) durchgeführten luftbildgestützten Schadinventur im Bereich der Hohen Acht treten die Schäden in den Beständen einzelstamm- bis truppweise, vereinzelt auch nesterweise auf. Stark erkrankte Bestände können verlichten. Flächiges Absterben ist dagegen auf extreme Ausnahmen beschränkt. Die Schäden scheinen nach Beobachtungen in einem Untersuchungsbestand im Forstamt Adenau in Schüben voranzuschreiten.

Ausschluss biotischer Ursachen
Die vorstehend beschriebenen Schadsymptome ähneln Schäden durch biotische Ursachen wie insbesondere Befall durch die Rostige und die Rußige Douglasienschütte, die Douglasienwolllaus, durch Stamm und Wurzeln befallende Pilze und durch *Phomopsis pseudotsugae*. Zur differenzierenden Diagnose wird nachfolgend die Symptomatik bei diesen biotischen Schadeinwirkungen umrissen. Zu berücksichtigen ist, dass die verschiedenen abiotischen und biotischen Schadeinflüsse gemeinsam in den Douglasienbeständen und auch am einzelnen Baum kombiniert auftreten können.

Rostige Douglasienschütte *(Rhabdocline pseudotsugae)* (Foto: 18 und 19)
Bei der Rostigen Douglasienschütte verfärben sich die befallenen Nadeln leuchtend rostrot (Hartmann et al. 2007, Abb. 136 a). Auf der Nadeloberseite sind im Mai und Juni leuchtend gelbbraune Flecken zu erkennen und auf der Nadelunterseite orange bis gelbbraune Fruchtkörper des Pilzes zu finden, die bei feuchter Witterung kissenartig hervorbrechen (Hartmann et al. 2007, Abb. 136 b). Die betroffenen Nadeln fallen meist im Juni/Juli des Folgejahres nach der Infektion ab (Stephan 1981). An den Zweigen sind häufig einzelne Jahrgänge komplett betroffen, wodurch eine Lücke zwischen älteren Nadeln und dem jüngsten Nadeljahrgang entsteht (Fenstereffekt). Bei aufeinanderfolgenden Schüttejahren verkahlt die Krone von innen heraus. Bei einem langjährigen Befall kümmern die Douglasien und sterben schließlich ab (Stephan 1981).

Rußige Douglasienschütte *(Phaeocryptopus gaeumannii)* (Foto: 20 und 21)
Bei dieser Nadelpilzerkankung treten auf der Unterseite der noch grünen Nadeln punkt- bis kugelförmige schwarze Fruchtkörper auf, die stets auf die Spaltöffnungen zentriert und damit linienförmig angeordnet sind. Die Nadelunterseite erscheint hierdurch wie mit Ruß belegt (Hartmann et al. 2007, Abb. 137 a-c). Während dieses auffällige Symptom bei Betrachtung unter der Lupe oder unter einem Binokular das ganze Jahr über sichtbar ist (Butin 2011), ist die Identifikation der Erkrankung an erwachsenen Bäumen ohne Zugang zu den Zweigen schwierig. Frühe Erkrankungsstadien können am Baum selbst mit dem bloßen Auge zunächst nur schwer erkannt werden, da sich die Krankheitsanzeichen relativ langsam entwickeln. Als erstes Befallssymptom kann im Spätwinter oder Frühjahr bei erkrankten Bäumen ein „Dunkeln" der Krone beobachtet werden. Zu diesem Zeitpunkt brechen aus den Spaltöffnungen auf der Unterseite der Nadeln die schwarzen Fruchtkörper hervor, die diesen Effekt verursachen (Strittmatter 1974). Bei der Rußigen Douglasienschütte handelt es sich in der Regel um einen mehrjährigen Krankheitsverlauf, bei dem die Nadeln erst zwei bis drei Jahre nach der Infektion abgeworfen werden. Komplette Jahrgänge gehen dabei nicht vollständig verloren, sodass einzelne Nadeln abhängig von der Befallsstärke erhalten bleiben. An befallenen Bäumen tritt die Verlichtung typischerweise an der Kronenbasis beginnend und vom Kroneninneren zur Kronenperipherie auf. Bei sehr starkem, wiederholtem Befall bleibt nur der jeweils jüngste Nadeljahrgang erhalten. Da eine starke Infektion die Frosthärte der Nadeln herabsetzt, tritt ein verstärktes Nadelschütten vor allem in Wintern mit starken Barfrösten (unter -10°C) auf (Metzler 2012).

Douglasienwolllaus *(Gilletteella cooleyi)* (Foto: 22)
Junge, von Wollläusen befallene Nadeln weisen gelbliche Flecken und weiße, flaumige Wachsflocken und Häutungsreste auf (Hartmann et al. 2007, Abb. 133b). Ältere Nadeln zeigen intensive gelbe, teils fleckige, teils vollständige Gelb- bis Braunfärbung und an den Saugstellen gekrümmte Nadeln (Hartmann et al. 2007, Abb. 133a). Während ein akuter Befall an jungen Bäumen recht einfach zu erkennen ist, kann der Wolllausbefall an älteren Bäumen vom Boden aus dagegen leicht mit anderen Erkrankungen verwechselt werden.

Sirococcustriebsterben (*Sirococcus conigenus, Syn. Sirococcus strobilinus*) (Foto 23)
und Grauschimmel (*Botrytis cinerea, Syn. Botryotinia fuckeliana*).
Frisch ausgetriebene Douglasientriebe können durch Grauschimmel und den Erreger des Sirococcustriebsterbens befallen werden und absterben. Die Schadsymptome ähneln Schäden durch Spätfrost und wurden bislang nur an jungen Douglasien beobachtet.

Auf Mangantoxizität hinweisende Symptome


Foto: J. Block


Foto: R. Zoth

Foto 1 und 2:
Verfärbungen an älteren Nadeln einer von Mangantoxizität betroffenen Douglasie


Foto: J. Block


Foto: J. Block

Foto 3 und 4:
Starke Kronenverlichtung von Mangantoxizität betroffener Douglasien; ältere Nadeljahrgänge fehlen weitgehend


Foto: R. Zoth


Foto: J. Block

Foto 5 und 6:
Ausbleichungen des jüngsten Nadeljahrgangs bei auffallend dunkelgrünen älteren Nadeljahrgängen (links) und bei deutlichen Nadelverlusten älterer Jahrgänge (rechts)







Foto 7, 8, 9: Geringer, mittlerer und starker Harzfluss an von Mangantoxizität betroffenen Douglasien

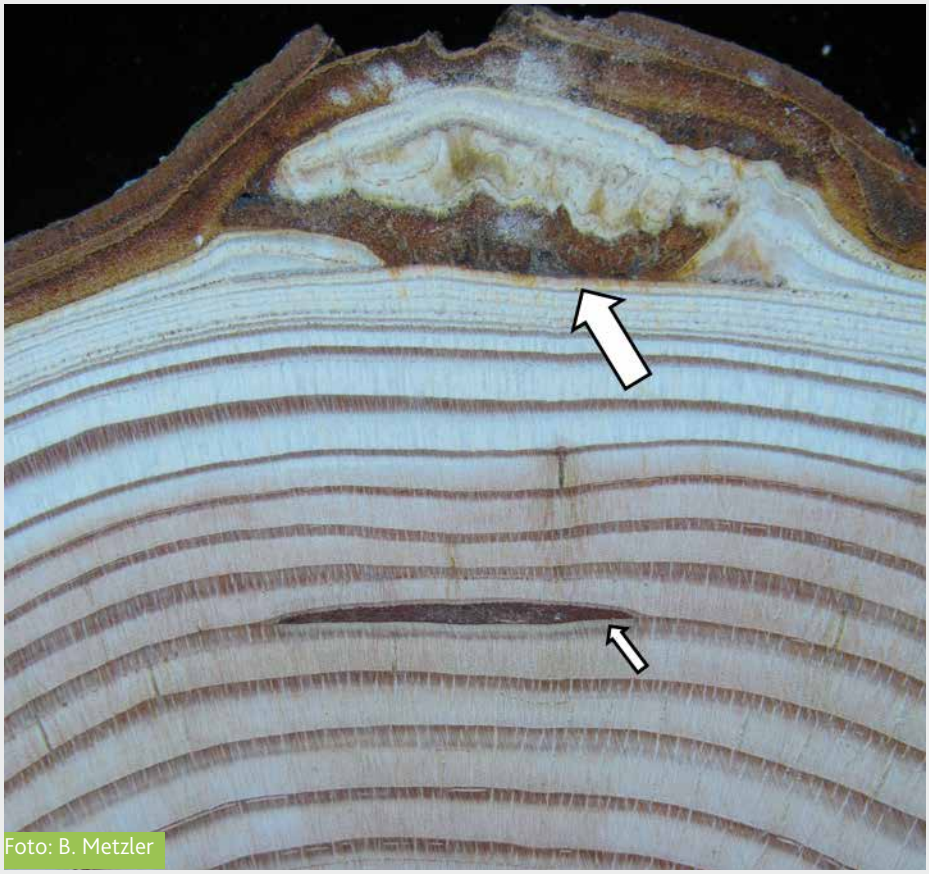


Foto 10:
Stammquerschnitt durch einen mit Mangan belasteten Baum. Harzgallen entstehen in der Regel durch das Fusionieren von benachbarten pathologischen Harzkanälen. Hält das bereits außerhalb gebildete Spätholz dem Druck stand, bleibt die Harzgalle geschlossen (kleiner Pfeil). Bei sehr schmalen rezenten Jahrringen mit geringem Spätholzanteil können die Harzgallen nach außen aufplatzen, so dass das Harz außerhalb der Rinde freigesetzt wird (großer Pfeil; Text und Foto: B. Metzler)





Foto 11 und 12:
Starke Wuchsdeformationen („Hexenbesen") an von Mangantoxizität betroffenen Douglasien





Foto 13 und 14:
Wuchsdeformationen, hier Wipfeltriebkrümmung (links), sind in seltenen Fällen noch im Baumholzalter an der Schaftform erkennbar (rechts)



Foto: R. Zoth

Foto 15:
Infolge von Mangantoxizität absterbende Douglasie. Im Bildvordergrund sind noch benadelte Zweige mit deutlicher Ausbleichung des jünsten Nadeljahrgangs zu erkennen (links)



Foto: J. Block

Foto 16:
Von Mangantoxizität betroffene Douglasie mit Vergilbung und starken Ersatztriebbildungen am Stamm (rechts)



Foto: H.W. Schröck

Foto 17:
Kronenverlichtung von innen und außen, Verfärbungen sowie Wuchsdeformationen bei einer stark durch Mangan geschädigten Douglasie


Foto: B. Metzler


Foto: B. Metzler

Foto 18 und 19: Rostige Douglasienschütte (*Rhabdocline pseudotsugae)* rostrote Verfärbungen (links) und kissenartige Fruchtkörper auf der Nadelunterseite (rechts)


Foto: H.W. Schröck

Foto 20:
Starke Kronenverlichtung durch Rußige Douglasienschütte (*Phaeocryptopus gaeumannii);* nur der jüngste Nadeljahrgang ist noch vollständig vorhanden


Foto: B. Metzler

Foto 21:
Fruchtkörper (schwarze Punkte) der Rußigen Douglasienschütte (*Phaeocryptopus gaeumannii)* an der Nadelunterseite



Foto 22:
Befall durch die Douglasienwolllaus (*Gilletteella cooleyi)* an noch vital erscheinenden Nadeln



Foto 23:
Sirococcusbefall an frisch ausgetriebenen Douglasientrieben



Foto 24 und 25:
Befall von Douglasiennadeln durch die Douglasiengallmücke *(Contarinia pseudotsugae)* Quelle: Julius-Kühn-Institut





Foto 26 und 27:
Braunfäulen an Douglasienstöcken



Foto: R. Klemm

Foto 28:
Fruchtkörper des Klebrigen Hörnlings *(Calocera viscosa)* an einem Douglasienstock



Foto: R. Klemm

Foto 29:
Fruchtkörper des Kiefern-Braunporlings *(Phaeolus schweinitzii)* an einer gebrochenen Douglasie



Foto: H.W. Schröck



Foto: H.W. Schröck

Foto 30 und 31:
Rissbildung ohne (links) und mit Harzfluss (rechts)

Douglasien-Nadelmücke (Contarinia pseudotsugae) (Foto: 24 und 25)
Diese in den USA und Kanada beheimatete Nadelmückenart wurde 2015 in den Niederlanden und Belgien sowie 2016 auch in Rheinland-Pfalz festgestellt. Der Einschleppungsweg ist unbekannt. Die Nadelmücke befällt den jüngsten Nadeljahrgang, der vorzeitig abfällt. Bei starkem Befall sterben die Zweige ab. Die Schäden ähneln in ihrer Anfangsphase Verfärbungen durch Nährstoffmängel. Im fortgeschrittenen Stadium ist der Minierfraß dagegen deutlich von anderen Schadeinflüssen zu unterscheiden.

Phomopsis-Rindenschildkrankheit der Douglasie (Erreger: *Allantophomopsis pseudotsugae* [M. Wilson] Nag Raj, Teleomorphe: *Phacidium coniferarum* [G. G. Hahn] Dicosmo, Nag Raj & W. B. Kendr.)
Ein typisches Merkmal dieser Erkrankung sind ovale Nekrosen („Rindenschilde"), die vom Baum abgestoßen und überwallt werden, häufig mit einem Aststumpf in der Mitte, der als Eintrittspforte gedient hat (Hartmann et al. 2007, Abb. 140 a-d).

Wurzelfäulen (Foto: 26 und 27)
Die Douglasie kann von Hallimasch (*Armillaria* ssp.), Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*), Kiefern-Braunporling (*Phaeolus schweinitzii*), Klebrigem Hörnling (*Calocera viscosa*) und Krause Glucke (*Sparassis crispa*) befallen werden. Äußerlich erkennbare Symptome des Befalls mit diesen Wurzelfäuleerregern sind Harzfluss, eine gelbe bis orangegelbe, später rotbraune Verfärbung der Nadeln und ein Einstellen des Höhenwachstums (Hartmann et al. 2007, Abb. 38 a-e, 145 a und b). Bei stark betroffenen Bäumen tritt beim Ablösen der Rinde im Stammfußbereich ein weißes, flächiges Mycel zutage (Hartmann et al. 2007, Abb. 38b, 91d, 145b). Gegebenenfalls sind auch Fruchtkörper zu finden (Hartmann et al. 2007, Abb. 38 d, 91b, 94 a-c). An gefällten Bäumen treten typische Braunfäulen auf (Hartmann et al. 2007, Abb. 144 a-d).

Rissbildung (Foto: 30 und 31)
Verwechslungsmöglichkeiten können auch durch Harzfluss vermutlich infolge von mangelnder Wasserversorgung entstehen (Goudet et al., 2013). Hierbei kann Rissbildung sowohl ohne als auch mit Harzfluss auftreten.

3 Ausmaß und Entwicklung der Erkrankung in Rheinland-Pfalz

Zu Beginn der Untersuchungen der FVA/FAWF zu den "neuartigen" Douglasienschäden wurden im Jahr 1987 alle Forstämter des Landes zur Douglasienerkrankung befragt. Die Befragung bezog sich auf das Ausmaß der betroffenen Douglasienfläche, die auftretenden Symptome, den Zeitpunkt des ersten Beobachtens der Erkrankung, die Verteilung der Schadbäume im Bestand, die betroffenen Alters- und Ertragsklassen, die betroffenen Herkünfte und die betroffenen Standorte.
Angegeben wurden seinerzeit Schäden auf 1.320 ha, das sind etwa 5 % der damaligen Douglasienfläche in Rheinland-Pfalz. Douglasienschäden wurden aus ganz Rheinland-Pfalz gemeldet. Besonders große Schadflächen wurden in den damaligen Forstämtern Adenau, Ahrweiler, Cochem, Bernkastel, Wittlich-Ost, Elmstein-Süd, Hinterweidenthal-Ost, Hochspeyer und Otterberg festgestellt. In der Mehrzahl der Forstämter wurde die Erkrankung erstmalig Anfang der 80er Jahre beobachtet. Die Erkrankung tritt offensichtlich unabhängig von der Ertragsklasse, hauptsächlich einzelstamm- bis horstweise in Beständen der Altersklassen I bis III auf. Erkrankte Bestände sind in allen Höhenstufen und Expositionen anzutreffen, mit einer Häufung in süd- und westexponierten Hanglagen. Die erkrankten Bestände stocken auf sehr unterschiedlichen Substraten von Rankern aus Quarzit bis hin zu tiefgründigen Braunerden aus Basalt. Besonders häufig sind geschädigte Bestände auf devonischen Grauwacken und Tonschiefern, Unterem und Oberem Rotliegenden und Mittlerem Buntsandstein anzutreffen. Die von der Intensität her gravierendsten Schäden treten offensichtlich auf devonischen Grauwacken und Tonschiefern sowie auf Rotliegendem auf.

Nach den Angaben der Forstämter steht der Erkrankungsbeginn in keinem Zusammenhang mit Witterungsextremen wie dem Trockenjahr 1976 oder dem Temperatursturz an Silvester 1978.
Die Angaben über die betroffenen Herkünfte waren leider so lückenhaft, dass hieraus keine Schlussfolgerungen abzuleiten waren. Auch stellte sich heraus, dass, selbst wenn Angaben zur Herkunft der Pflanzen bei der Kulturbegründung vorhanden waren, häufig mehrmals mit Pflanzen unbekannter Herkunft nachgebessert wurde.
Zu beachten ist, dass dem damaligen Kenntnisstand entsprechend nicht nur Bestände mit den heute als charakteristisch für Mangantoxizität angesehenen Symptomen (insbesondere Harzfluss und Ausbleichung des jüngsten Nadeljahrgangs) als „geschädigt" angegeben wurden, sondern auch Bestände mit Nährstoffmangelsymptomen ohne Bezug zu Manganüberschuss (vgl. Untersuchungsbestand Hochspeyer, Kap. 7).

Wie sich das Schadausmaß seit 1987 entwickelt hat, lässt sich nicht konkret angeben. Seit 1997 werden „neuartige Douglasienschäden" in den jährlichen Waldschutzmeldungen der Forstämter als „Douglasien-Mangelerkrankung" erfasst.

Allerdings werden offensichtlich nur besonders auffällige oder neue Schadfälle angegeben. So werden seither jährliche Schadflächen von 0 bis 80 ha als „wirtschaftlich fühlbar" (Schadgrad 2) und 0 bis knapp 30 ha als „bestandesbedrohend" (Schadgrad 3) gemeldet (Abbildung 1). Ein zeitlicher Trend ist nicht zu erkennen. Nicht bekannt ist, inwieweit die „Mangelerkrankung" von den Forstämtern korrekt von den ebenfalls gemeldeten „Trocknisschäden an Douglasie" (Abbildung 2) und vor allem der Douglasienschütte (Abbildung 3) differenziert werden kann. Vor allem die gemeldeten Schütteschadflächen liegen in den letzten Jahren um eine Größenordnung höher als die Flächen der „Mangelerkrankung". Es ist durchaus wahrscheinlich, dass es sich bei den angegebenen Trocknis- und Schütteschadflächen zum Teil auch um Waldflächen mit „neuartigen Douglasienschäden" oder auch Flächen mit kombinierter Schadursache handelt.
In den Jahren 2015 und 2016 wurden einige Douglasienbestände, in denen Ende der 1980er / Anfang der 1990er Jahre gravierende Schäden festgestellt wurden, erneut bereist. Dabei zeigte sich in allen überprüften Beständen eine deutliche Verbesserung des Vitalitätszustandes. Die

Abbildung 1

Von den rheinland-pfälzischen Forstämtern jährlich angegebene Schadfläche mit „Douglasien-Mangelerkrankung"; Schadgrad 2: „wirtschaftlich fühlbar", Schadgrad 3 „bestandesbedrohend"

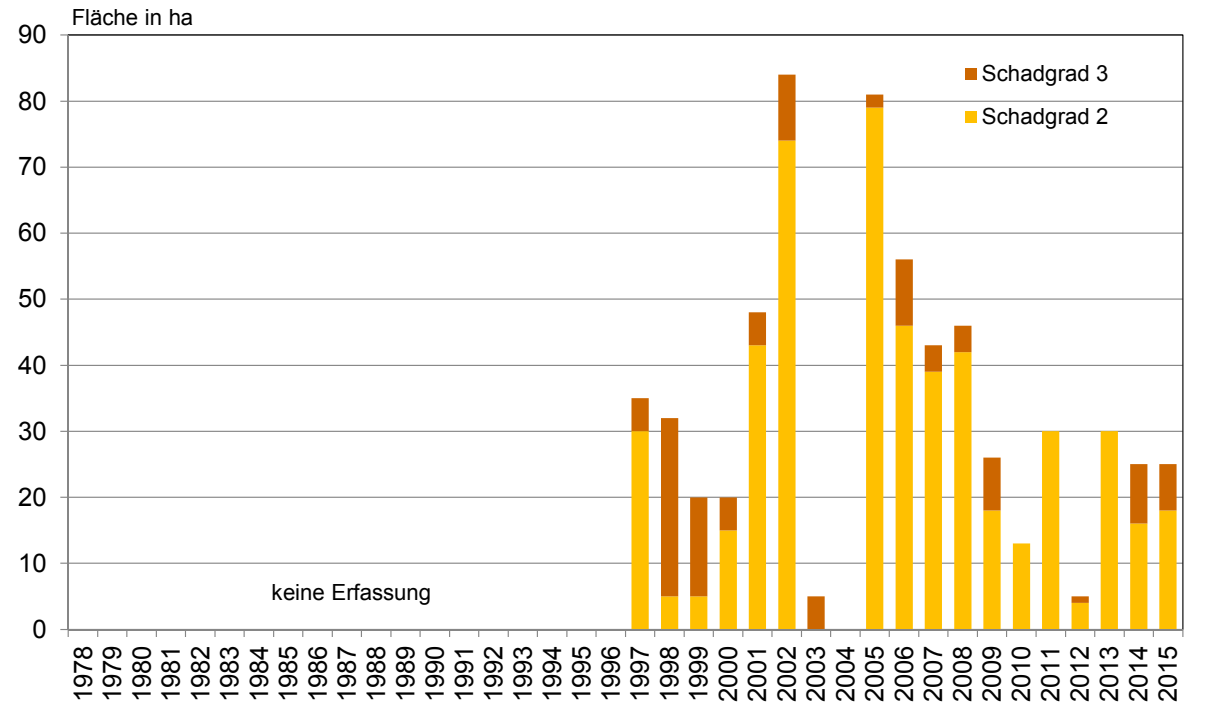


Abbildung 2

Von den rheinland-pfälzischen Forstämtern jährlich angegebene Schadfläche mit „Trocknisschäden“; Schadgrad 2: „wirtschaftlich fühlbar“, Schadgrad 3 „bestandesbedrohend“

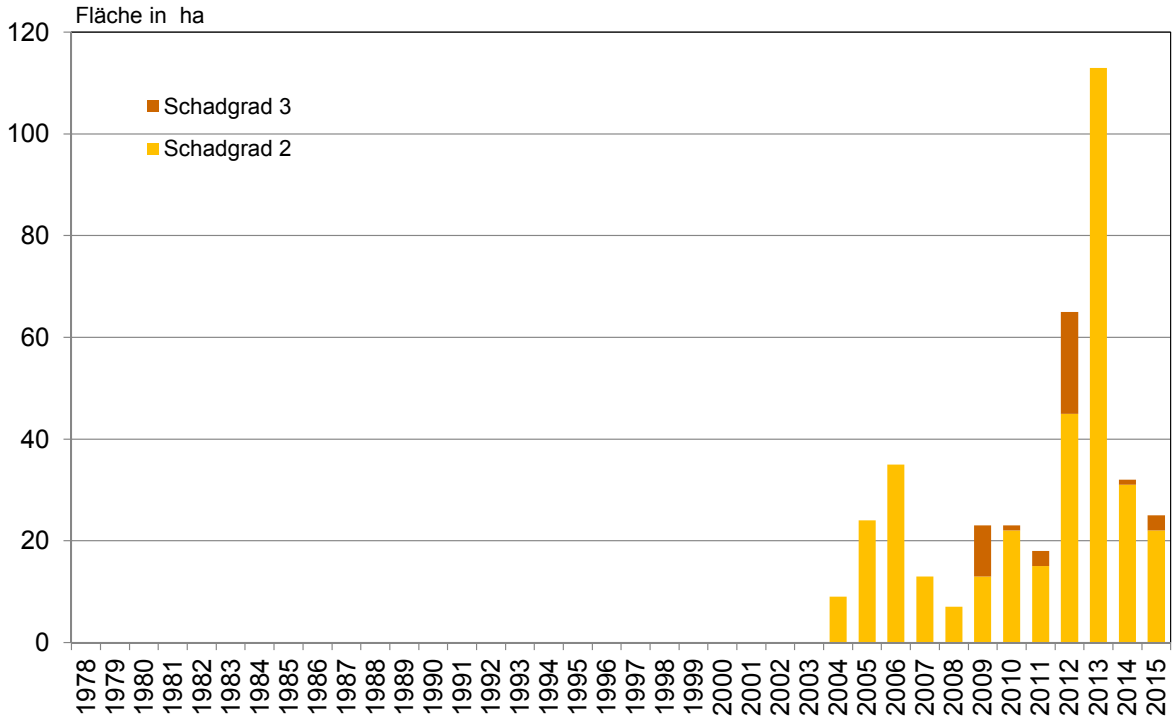
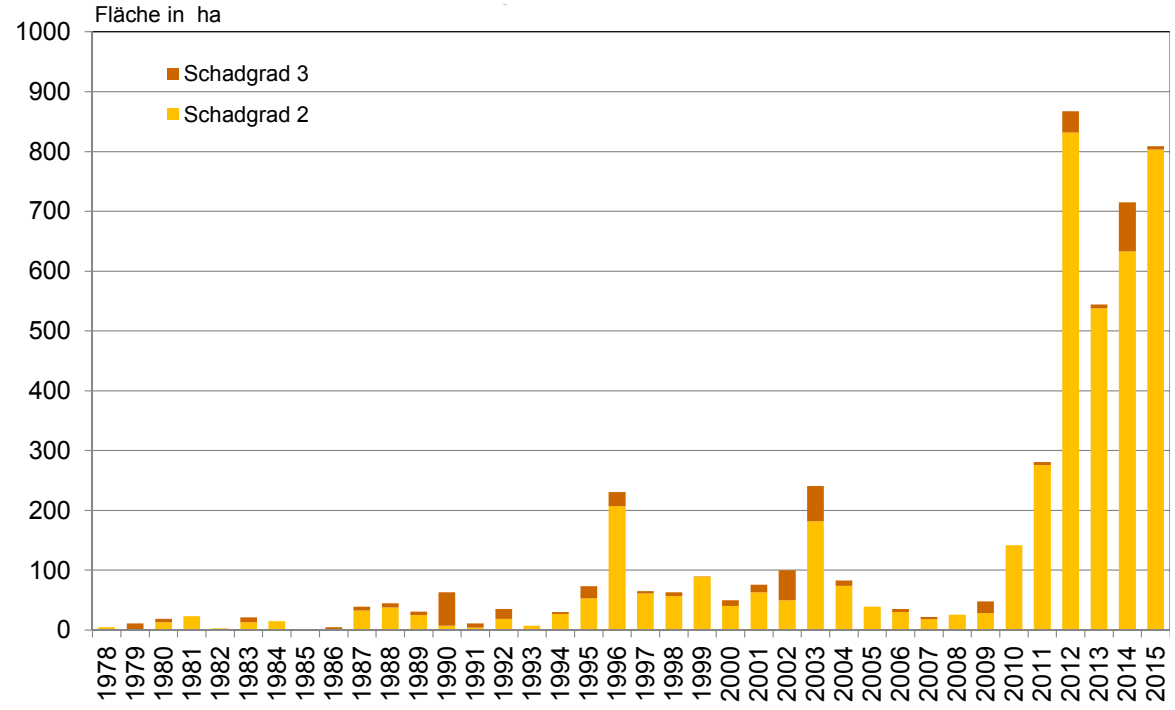


Abbildung 3

Von den rheinland-pfälzischen Forstämtern jährlich angegebene Schadfläche mit „Douglasienschütte“; Schadgrad 2: „wirtschaftlich fühlbar“, Schadgrad 3 „bestandesbedrohend“



seinerzeit stark geschädigten Bäume sind offensichtlich abgestorben oder bei Durchforstungen entnommen worden. Ob stark betroffene Bäume auch revitalisiert sind, ist nicht bekannt, da keine individuenbezogene Aufnahme erfolgte. Neue Schäden sind offenbar in diesen Beständen nicht hinzugekommen. Diese Beobachtungen stimmen mit der Entwicklung der Vitalität am Düngungsversuch Adenau (vgl. Kap. 7.2.1) und auch mit Untersuchungen von Hosius & Leinemann (2003) am Provenienzversuch Sobernheim (vgl. Kap. 8.2) überein.

4 Befunde von Boden- und Nadelanalysen

4.1 Befunde von Boden- und Nadelanalysen landesweit ausgewählter Douglasienbestände

4.1.1 Datenerhebung, Aufbereitung und Bewertung

Aus den Meldungen der Forstämter im Jahr 1987 wurden in den Jahren 1987 bis 1989 20 Douglasienbestände für Nadel- und davon 17 Douglasienbestände für Bodenanalysen ausgewählt. Zusätzlich wurden im Jahr 1993 bei 3 weiteren Douglasienbeständen Nadelproben gewonnen. Vorrangiges Auswahlkriterium war die Erfassung derjenigen Substrate, die für den Douglasienanbau in Rheinland-Pfalz besonders bedeutsam sind (Zoth 1990). In die Untersuchung wurden sowohl erkrankte Bestände als auch zum Vergleich einige symptomfreie Bestände einbezogen. In den erkrankten Beständen erfolgten die Untersuchungen sowohl an symptomfreien als auch an erkrankten Bäumen. In insgesamt vital erscheinenden Beständen wurden 3 Probebäume, in geschädigten Beständen jeweils 3 symptomfreie und 3 symptombehaftete Probebäume ausgewählt. Als „symptombehaftet" bzw. „geschädigt" wurden Bäume mit der in Kapitel 2 beschriebenen Symptomatik der „neuartigen" Douglasienerkrankung gewertet (Nadelverfärbungen, Wuchsanomalien), nicht dagegen Bäume mit Schütte- oder Hallimaschbefall oder sonstigen biotisch verursachten Schäden. Alle Probebäume waren den KRAFT-Klassen 1 oder 2 zugehörig.

Zur Nadelanalytik wurden an den Probebäumen die Nadeln sämtlicher Äste des 7. Quirls getrennt nach den Nadeljahrgängen 1 (c+0) und 3 (c+2)zu einer Mischprobe vereinigt und in der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer die Gehalte der Elemente N, P, K, Ca, Mg, Na, Mn, Al, Fe, Cl, Si, S und der Aschegehalt bestimmt. In einigen Beständen wurden zusätzlich die Gehalte an Pb, Cd, Cu und Zn untersucht.

Für chemische Bodenanalysen wurden an jedem Probebaum stammnah (bis 120 cm Entfernung zum Stammfuß) mit dem Murach`schen Bohrer nach sorgfältiger Entfernung der Humusauflage Mineralboden-Bodenproben gewonnen. An den für Düngungsversuche vorgesehenen Beständen (vgl. Kap. 7) und an den Beständen im Forstamt Adenau erfolgte die Beprobung nach Bodenhorizonten, in den übrigen Beständen für die Tiefenstufen 0 bis 20 und 20 bis 40 cm. Die Bodenanalysen erfolgten im Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen auf C_{org}, N_{ges}, P_{ges}, und austauschbare Kationen (Na, K, Ca, Mg, Al, Mn, Fe, H) nach den von Meiwes et al. (1984) beschriebenen Verfahren. Ein Teil der im Forstamt Adenau gewonnenen Proben wurde zudem auf die Gehalte an Cu, Cd, Co, Zn und Pb im Salpetersäure-Druckaufschluss analysiert. Die Humusauflage wurde nur auf den 5 Flächen im Forstamt Adenau beprobt.

An den Probebäumen erfolgten zudem Zweigbonituren nach den Verfahren der Immissionsökologischen Waldzustandserfassung (Knabe 1981). Hierbei wurden die Benadelungsprozente an einem westexponierten Ast jahrgangsweise geschätzt und über alle Jahrgänge aufsummiert. An drei Beständen im Forstamt Adenau wurden darüber hinaus für alle Probebäume die Terminaltrieblängen der letzten 15 Jahre gemessen.

Über die Boden- und Nadelanalysen an unterschiedlich geschädigten Douglasien sollte geprüft werden, ob Beziehungen zwischen bodenchemischen und nadelanalytischen Merkmalen und der Schadausprägung bestehen. Zur Bewertung der Nadelspiegelwerte wurden ernährungskundliche Grenzwerte verschiedener Quellen verwendet. (Tabelle 1).

Tabelle 1

Grenzwerte des Bereichs einer normalen Ernährung für c+0 Nadeln (1. - jüngster - Nadeljahrgang) bei Douglasie. Bei Garrison et al. (2000) und Moore et al. (2004) sind lediglich die unteren Grenzen des Normalbereichs angegeben. Die in Zehle (2015) angegebenen Werte wurden aus einer umfangreichen Literaturzusammenstellung von van den Burg (1985) hergeleitet. In der Spalte Median Min – Median Max sind die Mediane der in der Tabelle aufgeführten Untergrenzen und der Obergrenzen des Normalbereichs angegeben. Dabei wurden die Angaben von van den Driessche (1979) nicht verwendet, da keine Spanne angegeben wurde.

Hauptnährelemente	**N [mg/g]**	**P [mg/g]**	**K [mg/g]**	**Ca [mg/g]**	**Mg [mg/g]**	**S [mg/g]**
Bergmann (1988, S. 381)	11,0 - 17,0	1,2 - 3,0	6,0 - 11,0	2,0 - 6,0	1,0 - 2,5	-
Fisher (1996)	15,0 - 17,0	1,2 - 2,0	5,0 - 9,0	2,5 - 4,5	0,8 - 1,4	0,9 - 1,4
Garrison et al. (2000)	> 14,0	> 1,2	> 6,0	> 1,5	> 0,8	> 1,1
Krauss & Heinsdorf (1986, 2005)	14,9 - 19,3	1,38 - 1,93	6,4 - 8,7	3,6 - 4,8	0,79 - 1,11	-
Mohren et al. (1986)	17,0 - 25,0	2,0 - 3,0	-	-	-	-
Van den Driessche (1979)	18,0	2,2	8,0	2,0	1,2	1,8
Zehle (2015)	13,3 - 18,8	1,3 - 2,6	5,5 - 9,2	2,4 - 5,0	0,8 - 1,5	1,1 - 2,1
Median Min - Median Max	*14,5 - 18,8*	*1,3 - 2,6*	*6,0 - 9,1*	*2,4 - 4,9*	*0,8 - 1,5*	*1,1 - 1,8*
Spurenelemente	**Fe [mg/kg]**	**Mn [mg/kg]**	**Cu [mg/kg]**	**Zn [mg/kg]**	**Mo [mg/kg]**	**B [mg/kg]**
Bergmann (1988, S. 381)	-	50 - 500	2 - 10	15 - 80	0,05 - 0,2	20 - 40
Fisher (1996)	50 - 80	100 - 400	6 - 12	15 - 40	-	10 - 40
Moore et al. (2004)	> 25	-	-	> 10	-	> 10
Zehle (2015)	67 - 123	220 - 889	4 - 7	22 - 56	-	13 - 35
Median Min - Median Max	*50 - 102*	*100 - 500*	*4 - 10*	*15 - 56*	*0,09 - 0,20*	*12 - 40*

Zusätzlich wurden die Element-Verhältnisse mittels Compositional Nutrient Diagnostic (CND) betrachtet. Die CND ist ein Bewertungsverfahren für die Ausgewogenheit der Pflanzenernährung (Parent & Dafir 1992). Im Gegensatz zu Grenzwerten, anhand derer die absoluten Element-Konzentrationen bewertet werden, werden mittels der CND multivariate Element-Verhältnisse gebildet. Die Element-Verhältnisse der untersuchten Bestände werden dabei mit den Element-Verhältnissen eines Referenz-Bestandes verglichen, der als ausgewogen und damit als optimal ernährt angesehen werden kann. In vorangegangenen Mitteilungsbänden findet sich eine grundlegende Methodenbeschreibung (Greve 2015; Greve et al. 2016). Eine detailliertere Darstellung der Methode und der einzelnen Berechnungsschritte findet sich in Parent & Dafir (1992), Doucet (1997) und Parent et al. (2005).

Als Referenz wurden die 1986 bis 1993 beprobten Individuen von Beständen ohne Schadsymptome verwendet (Tabelle 2). Zwar deuten die ernährungskundlichen Grenzwerte darauf hin, dass diese Bestände nicht die von der Literatur genannten Vorgaben einer optimalen Ernährung erfüllen, der Vergleich ermöglicht jedoch, die Unterschiede in den Elementverhältnissen zwischen Beständen mit und ohne Schadsymptomen zu identifizieren. Die Individuen des Bestandes im Forstamt Bernkastel (201-01), deren Nadelanalysen auf Mn-Toxizität hinweisen, wurden nicht in die Referenz mit aufgenommen (Tabelle 3).
Die als „Referenzbestand" verwendeten 13 Douglasien weisen zumeist als normal bewertete N-, Mg- und S-Konzentrationen auf, wenn die von Zehle (2015) aus dem Datensatz von van den Burg (1985) hergeleiteten Ernährungskennwerte zur Bewertung verwendet werden. Trotz fehlender

Tabelle 2

Deskriptive Statistik und Bewertung der als Referenzbestand für die CND verwendeten c+0 Nadelproben (n = 13) anhand ernährungskundlicher Grenzwerte

	N [mg/g]	P [mg/g]	K [mg/g]	Ca [mg/g]	Mg [mg/g]	S [mg/g]	Mn [mg/g]
Mittelwert	16,6	1,13	6,36	5,84	1,20	1,33	1,74
Standardabweichung	1,95	0,10	1,97	1,92	0,21	0,26	0,69
Minimum	14,10	1,00	3,95	2,85	0,79	1,00	0,82
Maximum	21,10	1,30	10,00	9,80	1,50	2,01	3,40
Bewertung nach Zehle (2015)							
Mangel	0	11	6	0	1	3	0
Normal	12	2	5	4	12	10	1
Überschuss	1	0	2	9	0	0	12

Schadsymptome werden die Mn-Konzentrationen aller Individuen, ausgenommen einer Douglasie in Trippstadt (337-01), dem Überschuss zugeordnet. Die Ca-Konzentrationen liegen bei 9 Individuen im Überschuss. Die K-Konzentrationen sind bei 6 Individuen gering . Bei 11 von 13 Individuen werden die P-Konzentrationen als mangelhaft bewertet.

4.1.2 Ergebnisse

Die Tabellen 3 und 4 sowie 5 und 6 enthalten eine Übersicht der Elementgehalte und deren Bewertung. Der auffälligste Befund der Nadelanalysen sind die verbreitet sehr hohen **Mangan**gehalte, die z. T. sehr deutlich über den in der Literatur (vgl. z.B. van den Burg 1985) beschriebenen Werten liegen. Auch in symptomfreien Beständen wurden an einzelnen Douglasien Mangangehalte von bis zu 7 mg/g im 1. und bis zu 8,8 mg/g im 3. Nadeljahrgang gemessen. In erkrankten Douglasien reichen die Mangangehalte bis zu 17,4 mg/g im 3. Nadeljahrgang einer erkrankten Douglasie im (seinerzeitigen) Forstamt Rengsdorf[1)] (132-01). Diese Werte überschreiten die von Zinke & Stangenberger (1977) genannte Grenze für den Manganüberschuss der Douglasie auf sauren Böden mit hohen Niederschlägen in Nordamerika, die bei Werten größer 1 mg/g in den einjährigen Nadeln liegt, deutlich. Das Auftreten von Mangantoxizität wurde zwar vermutet (Radwan & Brix 1986), da Douglasien-Sämlinge in Nährlösungsversuchen auch bei hohen Mn-Konzentrationen keine Toxizitätssymptome zeigten (Radwan et al. 1979), jedoch als sehr unwahrscheinlich eingestuft (Radwan & Brix 1986). Andere Arbeiten aus dem natürlichen Verbreitungsgebiet der Douglasie berichten zumeist von Werten unter 1 mg/g in den einjährigen Nadeln, selten wurden in diesen Arbeiten Mangangehalte von bis zu 2 mg/g gemessen (Zasoski et al. 1990; Baronius & Fiedler 1996).

In den in Rheinland-Pfalz erkrankten Beständen sind zumeist höhere Mangangehalte anzutreffen als in symptomfreien Beständen auf ähnlichem Standort des gleichen Forstamtsbereichs. Innerhalb der erkrankten Bestände weisen erkrankte Bäume meist höhere Mangangehalte auf als symptomfreie Bäume (vgl. auch Tabelle 8). Die über die Nadelanalysen nachgewiesenen überaus hohen Mangangehalte in symptombehafteten

---

[1)] Die Forstamtsbezeichnungen und -nummern im Text, den Tabellen und Abbildungen beziehen sich auf die Forstamtseinteilung und die Forstamtsnamen zum Zeitpunkt der Probenahmen bzw. Einrichtung der Versuchsflächen.

Tabelle 3

Mittelwert und Standardabweichung der Hauptnährstoff- und Mangangehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) der Erstbeprobungsflächen. Die Gehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs).

Jahr	Variante	Zustand	N [mg/g]	P [mg/g]	K [mg/g]	Ca [mg/g]	Mg [mg/g]	S [mg/g]	Mn [mg/g]
1986	101-58	Geschä.	16,5±1,9	0,77±0,06	6,02±0,71	6,60±1,34	0,83±0,06	1,85±0,04	3,20±1,62
		Gesund	16,3±3,3	0,87±0,15	7,75±1,21	5,55±0,44	0,91±0,08	1,67±0,18	2,42±0,93
1986	101-64	Geschä.	19,0±1,1	1,00±0,10	6,68±0,16	3,75±0,92	0,81±0,07	1,68±0,25	4,60±1,52
		Gesund	19,7±1,4	0,80±0,00	6,85±1,47	3,47±0,62	0,94±0,10	1,94±0,19	2,80±0,36
1986	101-65	+/-	16,7±2,4	0,82±0,13	6,56±0,94	3,13±0,73	0,71±0,03	1,54±0,40	3,95±0,97
1986	101-84	Geschä.	13,1±1,3	0,83±0,21	6,75±0,75	6,33±1,55	0,91±0,03	1,28±0,18	6,13±0,81
		Gesund	15,1±0,7	0,97±0,06	7,48±0,72	4,83±0,58	0,98±0,13	1,70±0,19	3,67±0,64
1987	105-02	Geschä.	19,3±3,0	0,73±0,15	4,55±1,10	7,33±2,18	0,76±0,16	1,51±0,27	3,42±1,85
		Gesund	19,3±2,1	0,90±0,10	5,57±0,53	7,72±1,03	0,94±0,01	1,93±0,14	2,98±0,50
1987	108-02	Geschä.	14,5±1,1	0,73±0,06	5,18±1,81	3,48±0,48	0,82±0,03	1,39±0,10	2,82±0,99
		Gesund	15,3±0,8	0,90±0,00	5,40±1,13	4,13±1,14	0,89±0,09	1,40±0,13	2,95±0,52
1986	108-99	Geschä.	-	0,85±0,07	5,15±0,00	5,73±2,02	0,99±0,05	1,34±0,20	4,80±1,06
		Gesund	-	0,93±0,21	5,35±0,40	5,02±1,46	1,01±0,22	1,50±0,14	3,48±1,57
1988	132-01	Geschä.	15,0±2,8	1,17±0,15	6,92±2,40	6,00±0,61	0,88±0,15	0,18±0,13	8,92±1,21
		Gesund	16,7±1,0	1,07±0,06	5,40±0,61	5,52±1,13	0,88±0,2	1,39±0,22	5,73±1,16
1987	201-02	Geschä.	15,5±2,6	0,83±0,15	4,27±1,72	6,72±1,55	1,00±0,27	1,41±0,30	7,63±1,44
		Gesund	16,4±2,5	0,93±0,12	4,45±1,00	5,13±1,06	1,09±0,28	1,39±0,26	5,70±0,61
1987	210-01	Geschä.	12,8±1,8	1,10±0,20	3,65±1,68	4,37±1,21	1,43±0,41	1,46±0,16	0,34±0,15
		Gesund	14,2±2,1	1,13±0,23	3,08±0,59	4,73±1,79	1,68±0,38	1,66±0,22	0,33±0,07
1993	217-01	Geschä.	10,9	1,14	5,51	3,00	0,71	0,78	0,72
		Gesund	14,3	1,42	2,54	1,87	0,28	0,99	0,78
1987	220-01	Geschä.	20,1±2,8	0,93±0,15	3,98±0,33	5,48±0,53	0,89±0,18	2,03±0,44	5,93±0,33
		Gesund	18,4±1,4	0,97±0,15	5,22±1,07	5,33±0,91	0,87±0,18	1,97±0,03	4,43±0,81
1987	224-02	Geschä.	15,7±1,2	0,77±0,06	5,43±0,81	4,83±0,71	0,63±0,08	1,15±0,20	2,52±0,20
		Gesund	16,0±1,0	0,83±0,06	6,65±1,60	4,37±1,03	0,81±0,09	1,32±0,18	2,32±0,86
1987	311-01	Geschä.	17,6±3,2	0,80±0,10	5,02±1,14	6,00±1,52	0,71±0,01	1,38±0,12	2,03±1,10
		Gesund	17,5±1,8	0,87±0,12	5,58±0,54	5,50±1,18	0,82±0,04	1,66±0,12	1,63±0,46
1987	318-01	Geschä.	14,7±1,9	0,70±0,10	6,27±2,27	4,20±2,73	0,76±0,03	1,54±0,11	1,52±1,03
		Gesund	14,3 ±0,6	0,97±0,15	5,75±1,37	4,85±0,79	0,92±0,25	1,79±0,37	1,27±0,70
1993	340-01	Geschä.	13,7	0,63	7,39	7,33	0,85	1,01	6,69
		Gesund	17,3	0,88	4,15	8,00	1,05	1,39	8,67
1993	340-02	+/-	14,4 ±0	1,05	5,26	8,63	0,79	0,97	3,06
1986	101-72	Gesund	16,5 ±1,5	1,00±0,00	9,63±0,40	4,02±1,11	1,23±0,19	1,54±0,42	1,60±0,15
1987	105-01	Gesund	16,6 ±1,3	1,20±0,10	5,90±0,96	6,62±2,63	1,25±0,21	1,18±0,16	1,77±0,20
1987	108-01	Gesund	18,0 ±3,4	1,20±0,10	5,38±0,40	6,30±0,30	1,06±0,10	1,31±0,27	2,50±1,01
1987	201-01	Gesund	17,3 ±0,8	1,13±0,12	4,38±0,12	7,02±1,22	1,27±0,27	1,48±0,20	4,50±2,31
1987	224-01	Gesund	16,2 ±1,8	1,13±0,06	5,08±1,55	6,98±2,47	1,15±0,32	1,24±0,21	1,41±0,73
1993	337-01	Gesund	14,1	1,05	4,67	4,13	1,49	1,47	0,82

Tabelle 4

Mittelwert und Standardabweichung der Spurennährstoffgehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) der Erstbeprobungsflächen. Die Gehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs).

Jahr	Variante	Zustand	Fe [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Al [mg/kg]	Si [mg/kg]
1986	101-58	Geschä.	120±36,6			229±31	2667±737
		Gesund	82±31,2			174±30	1967±321
1986	101-64	Geschä.	150±13,1			2445±48	1667±208
		Gesund	86±13,0			241±4	1900±100
1986	101-65	+/-	64±8,5			172±14	1483±194
1986	101-84	Geschä.	90±7,2			223±22	1133±351
		Gesund	106±18,4			240±56	1433±58
1987	105-02	Geschä.	138±56,2			244±49	4933±2122
		Gesund	110±15,8			292±29	3167±1401
1987	108-02	Geschä.	102±13,1	4,0±0,6	26±0,0	274±28	1633±153
		Gesund	169±97,0	5,3±0,8	27±5,7	362±194	2033±493
1986	108-99	Geschä.	115±33,9				
		Gesund	112±34,4				
1988	132-01	Geschä.	111±25,4			270±78	2767±404
		Gesund	110±29,6			241±52	2133±208
1987	201-02	Geschä.	149±50,0			238±49	4600±3780
		Gesund	112±14,7			255±57	2667±503
1987	210-01	Geschä.	81±10,3			137±38	833±577
		Gesund	106±21,2			138±39	867±569
1993	217-01	Geschä.	49	2,5	36	184	
		Gesund	52	2,6	29	206	
1987	220-01	Geschä.	180±0,3			245±39	4667±832
		Gesund	132±0,8			248±45	3300±360
1987	224-02	Geschä.	102±0,8	3,6±0,6	55±0,6	241±86	1633±252
		Gesund	102±0,9	3,6±0,6	38±0,6	214±17	2333±850
1987	311-01	Geschä.	93±1,1			197±45	2733±750
		Gesund	90±0,5			241±28	3200±520
1987	318-01	Geschä.	101±1	2,7±0,1	52±1,6	267±90	2867±1343
		Gesund	321±0,7	3,0±0,6	143±1,8	292±72	2633±1026
1993	340-01	Geschä.	117	3,9	38	230	
		Gesund	146	3,0	34	293	
1993	340-02	+/-	61	3,3	29	271	
1986	101-72	Gesund	82±0,2			242±43	1467±306
1987	105-01	Gesund	125±0,2			247±79	2467±1250
1987	108-01	Gesund	109±1,0			273±55	1800±819
1987	201-01	Gesund	165±2,3			303±56	3400±600
1987	224-01	Gesund	105±0,7			221±69	1867±603
1993	337-01	Gesund	67	2,3	37	276	

Tabelle 5

Mittelwert und Standardabweichung der Hauptnährstoff- und Mangangehalte des dritten Nadeljahrgangs (c+2) der Erstbeprobungsflächen

Jahr	Variante	Zustand	N [mg/g]	P [mg/g]	K [mg/g]	Ca [mg/g]	Mg [mg/g]	S [mg/g]	Mn [mg/g]
1986	101-58	Geschä.	21,4 ±5,4	0,57 ±0,12	3,17 ±0,66	13,73 ±3,3	0,64 ±0,17	1,86 ±0,12	6,95 ±4,55
		Gesund	20,5 ±6,8	0,60 ±0,10	4,58 ±0,44	9,78 ±0,90	0,65 ±0,17	1,87 ±0,46	4,55 ±2,40
1986	101-64	Geschä.	17,7 ±2,2	0,77 ±0,21	4,10 ±0,74	6,43 ±3,10	0,63 ±0,13	1,81 ±0,04	7,70 ±4,25
		Gesund	21,9 ±3,9	0,63 ±0,12	3,83 ±1,19	6,02 ±0,95	0,73 ±0,05	2,17 ±0,09	4,62 ±0,81
1986	101-65	+/-	17,9 ±2,9	0,68 ±0,08	3,91 ±0,56	5,46 ±0,88	0,48 ±0,08	1,67 ±0,31	7,07 ±1,52
1986	101-84	Geschä.	16,8 ±3,6	0,70 ±0,17	3,83 ±0,74	10,88 ±2,9	0,71 ±0,16	1,59 ±0,31	11,02 ±2,0
		Gesund	15,3 ±1,9	0,70 ±0,17	5,13 ±1,33	7,42 ±1,58	0,77 ±0,22	1,66 ±0,30	6,08 ±1,58
1987	105-02	Geschä.	20,6 ±3,1	0,63 ±0,15	3,83 ±2,04	7,92 ±1,62	0,67 ±0,34	1,45 ±0,10	4,22 ±3,00
		Gesund	21,3 ±1,3	0,70 ±0,0	3,30 ±0,36	12,2 ±3,38	0,79 ±0,21	1,80 ±0,42	4,05 ±0,65
1987	108-02	Geschä.	19,8 ±3,8	0,60 ±0,0	3,33 ±0,28	5,35 ±0,74	0,53 ±0,12	1,84 ±0,21	3,92 ±1,32
		Gesund	16,2 ±0,6	0,67 ±0,06	3,35 ±0,46	6,33 ±2,31	0,56 ±0,09	1,48 ±0,09	3,90 ±0,48
1986	108-99	Geschä.							
		Gesund							
1988	132-01	Geschä	12,3 ±1,4	0,67 ±0,12	3,13 ±0,42	10,45 ±3,1	0,72 ±0,33	1,00 ±0,10	14,13 ±3,2
		Gesund.	16,8 ±0,9	0,87 ±0,06	4,23 ±0,49	8,97 ±1,64	0,67 ±0,3	1,46 ±0,36	9,15 ±1,78
1987	201-02	Geschä.	17,3 ±3,1	0,87 ±0,15	3,18 ±0,50	13,8 ±2,75	0,85 ±0,1	1,15 ±0,12	13,47 ±3,1
		Gesund	16,7 ±4,0	0,93 ±0,15	3,68 ±0,81	10,8 ±0,96	1 ±0,33	1,19 ±0,18	10,27 ±1,5
1987	210-01	Geschä.	13,7 ±2,2	0,87 ±0,12	2,60 ±1,44	8,72 ±3,69	1,87 ±0,66	2,44 ±0,13	0,47 ±0,13
		Gesund	14,0 ±1,6	0,90 ±0,17	2,68 ±0,97	8,28 ±3,86	2,1 ±0,95	2,93 ±0,30	0,40 ±0,11
1993	217-01	Geschä.							
		Gesund	12,7	1,62	1,43	2,15	0,13	0,95	1,06
1987	220-01	Geschä.	21,2 ±5,6	0,70 ±0,20	2,15 ±0,25	6,7 ±0,05	0,56 ±0,13	1,98 ±0,56	6,60 ±0,09
		Gesund	20,3 ±2,6	0,77 ±0,06	3,62 ±0,78	7,9 ±0,48	0,61 ±0,06	1,84 ±0,27	5,93 ±1,75
1987	224-02	Geschä.	19,9 ±2,6	0,60 ±0,0	3,03 ±0,33	7,07 ±1,67	0,41 ±0,06	1,37 ±0,30	3,82 ±0,83
		Gesund	18,6 ±1,5	0,63 ±0,06	4,18 ±0,99	5,93 ±0,59	0,59 ±0,16	1,41 ±0,15	3,27 ±0,67
1987	311-01	Geschä.	17,6 ±1,7	0,60 ±0,10	3,03 ±0,33	9,33 ±1,23	0,47 ±0,02	1,45 ±0,22	3,23 ±1,05
		Gesund	17,5 ±2,0	0,70 ±0,10	3,73 ±0,34	9,47 ±1,46	0,62 ±0,10	1,57 ±0,10	2,71 ±0,72
1987	318-01	Geschä.	19,0 ±2,7	0,43 ±0,06	3,15 ±0,23	4,38 ±0,83	0,59 ±0,10	2,14 ±0,48	1,03 ±0,28
		Gesund	14,3 ±2,1	0,63 ±0,06	4,68 ±2,79	6,47 ±2,18	0,91 ±0,23	1,80 ±0,63	0,99 ±0,39
1993	340-01	Geschä.	16,3	0,48	3,77	12,1	0,71	1,07	10,97
		Gesund	18,5	0,59	2,07	10,82	0,61	1,17	10,58
1993	340-02	+/-	13,8	0,78	4,98	13,85	0,62	0,95	4,22
1986	101-72	Gesund	16,0 ±1,0	0,70 ±0,0	6,30 ±0,10	7,58 ±1,94	1,16 ±0,18	1,60 ±0,33	3,03 ±0,49
1987	105-01	Gesund	15,9 ±1,0	0,83 ±0,06	4,32 ±0,58	10,63 ±1,5	1,34 ±0,22	1,06 ±0,07	2,45 ±0,82
1987	108-01	Gesund	16,7 ±3,3	0,83 ±0,06	3,70 ±0,46	9,37 ±1,1	0,84 ±0,13	1,16 ±0,22	3,13 ±1,32
1987	201-01	Gesund	15,6 ±0,9	0,87 ±0,06	3,63 ±0,73	9,18 ±2,64	0,97 ±0,15	1,19 ±0,08	5,18 ±3,28
1987	224-01	Gesund	14,3 ±1,1	0,83 ±0,06	3,83 ±0,67	8,93 ±1,65	0,86 ±0,24	1,17 ±0,22	1,79 ±0,67
1993	337-01	Gesund	14,2	0,72	3,55	6,42	1,09	1,84	1,58

Tabelle 6

Mittelwert und Standardabweichung der Spurennährstoffgehalte des dritten Nadeljahrgangs (c+2) der Erstbeprobungsflächen

Jahr	Variante	Zustand	Fe [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Al [mg/kg]	Si [mg/kg]
1986	101-58	Geschä.	174 ± 40,8			275 ± 33	5900 ±1217
		Gesund	124 ± 30,9			232 ± 43	4767 ±950
1986	101-64	Geschä.	179 ± 39,8			312 ± 73	3500 ±1039
		Gesund	123 ± 19,0			294 ± 31	4867 ±379
1986	101-65	+/-	114 ± 11,8			229 ± 38	3817 ±534
1986	101-84	Geschä.	134 ± 9,0			305 ± 55	2733 ±850
		Gesund	137 ± 23,5			252 ± 51	3333 ±551
1987	105-02	Geschä.	139 ± 19,7			264 ± 50	5833 ±2212
		Gesund	149 ± 37,3			321 ± 39	8033 ±1850
1987	108-02	Geschä.	177 ± 9,3	2,4 ± 0,1	30 ± 7,1	379 ± 55	4367 ±1115
		Gesund	155 ± 10,5	2,7	25	396 ± 50	5300 ±2095
1986	108-99	Geschä.					
		Gesund					
1988	132-01	Geschä.	162 ± 37,5			312 ± 78	4233 ±1155
		Gesund	128 ± 28,4			270 ± 76	4933 ±950
1987	201-02	Geschä.	165 ± 40,1			300 ± 21	5900 ±954
		Gesund	128 ± 32,6			310 ± 101	5167 ±1358
1987	210-01	Geschä.	144 ± 31,0			237 ± 102	1767 ±1242
		Gesund	155 ± 49,2			172 ± 29	2000 ±1453
1993	217-01	Geschä.				488	
		Gesund	62	1,8	30	282	
1987	220-01	Geschä.	256 ± 40,4			262 ± 8	9800 ±2042
		Gesund	295 ± 83,2			329 ± 48	9033 ±1501
1987	224-02	Geschä.	186 ± 69,7	2,3 ± 0,4	130 ± 85,6	255 ± 75	4300 ±400
		Gesund	185 ± 54,1	2,2 ± 0,3	61 ± 14,8	253 ± 41	5467 ±709
1987	311-01	Geschä.	113 ± 12,5			267 ± 76	5867 ±1206
		Gesund	157 ± 38,0			256 ± 44	7067 ±416
1987	318-01	Geschä.	137 ± 47,6	1,6 ± 0,1	55 ± 22,6	251 ± 101	5067 ±1026
		Gesund	203 ± 170,6	2,2 ± 0,3	101 ± 69,3	263 ± 119	4367 ±1701
1993	340-01	Geschä.	170	2,1	40	304	
		Gesund	170	2,6	27	303	
1993	340-02	+/-	69	2,5	32	356	
1986	101-72	Gesund	115 ± 10,6			236 ± 27	4033 ±115
1987	105-01	Gesund	142 ± 37,2			210 ± 38	5633 ±2031
1987	108-01	Gesund	160 ± 22,4			332 ± 66	3633 ±1464
1987	201-01	Gesund	225 ± 45,0			325 ± 43	7100 ±1100
1987	224-01	Gesund	127 ± 29,7			217 ± 44	3967 ±777
1993	337-01	Gesund	104	1,7	53	726	

Bäumen unterstützen somit die von der Symptomatik (vgl. Kap. 2 und Kap. 3) ausgehende Vermutung eines Manganüberschusses als Erkrankungsursache. In der Regel sind die Mangangehalte im 3. Nadeljahrgang deutlich höher als im 1. Nadeljahrgang. Dies deutet daraufhin, dass die älteren Nadeln als Depot und möglicherweise auch zur Entsorgung von überschüssigem Mangan benutzt werden.
In den erkrankten Douglasienbeständen sind die **Calcium**gehalte zumeist höher als in den symptomfreien Beständen und korrelieren in den erkrankten Beständen signifikant ($p < 0,01$) mit den Mangangehalten. Bei den Beständen ohne Schadsymptome zeigt sich dieser Zusammenhang nicht. Le Mare (1977) konnte anhand von Experimenten mit Baumwollpflanzen zeigen, dass Calcium für die Immobilisierung von Mangan in den Blättern verwendet wird, um die Störungen im Stoffwechsel durch zu hohe Mangangehalte zu reduzieren. Stand den Pflanzen in der Nährlösung mehr Calcium zur Verfügung, ertrugen sie höhere Mangankonzentrationen bevor Schadsymptome auftraten.
Die Korrelation zwischen Calcium- und Mangangehalten bei den geschädigten Douglasienbeständen deutet darauf hin, dass auch die Douglasie Calcium zur Entgiftung von Mangan benötigt. Demnach sollten nicht nur die Mangangehalte allein, sondern auch das Ca/Mn-Verhältnis für das Auftreten von Schadsymptomen eine Rolle spielen, was sich auch im Datensatz der Nadelanalysen (alle beprobten Individuen/Bestände ohne Düngevarianten) des ersten Jahrgangs (c+0) zeigt. Auch die von Schöne (1992a, b, c) und Kehr & Büttner (2003) untersuchten Nadeln geschädigter Douglasien wiesen neben erhöhten Mangangehalten auch höhere Calciumgehalte im Vergleich zu ungeschädigten Douglasien auf.

Bei den 1987-89 beprobten Beständen weisen bezüglich der Mn-Konzentrationen 75 % der ungeschädigten Individuen geringere Werte als 3,85 mg/g, 75 % der geschädigten Individuen höhere Werte als 3,71 mg/g auf (Abbildung 4). Die Schwelle für hohes Risiko einer Mn-Toxizität wurde aufgrund dieser Verteilung auf 3,8 mg/g festgelegt (Tabelle 7), was nahe der von Schöne (1992a, b, c) angenommenen Grenze für Mangantoxizität von 4-5 mg/g liegt. Auch Ducić & Polle (2006) berichten von einem geringeren Wachstum bei Douglasiensämlingen ab Mangangehalten größer 3,6 mg/g.

Das Ca/Mn-Verhältnis zeigt einen ähnlich deutlichen Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen (Abbildung 4). 75 % der ungeschädigten Individuen weisen ein höheres Verhältnis als 1,2 und 75 % der geschädigten Individuen ein engeres Verhältnis als 1,3 auf. Die Schwelle des Ca/Mn-Verhältnisses für hohes Risiko einer Mn-Toxizität wurde aufgrund dieser Verteilung auf 1,25 festgelegt.
Im Datensatz der beprobten Bestände (ohne Düngevarianten) mit sowohl geschädigten als auch gesunden Douglasien, weisen die geschädigten Individuen von sieben Beständen Mn-Konzentrationen und Ca/Mn-Verhältnisse auf, die nach den abgeleiteten Schwellen auf Mn-Toxizität schließen lassen (Tabelle 8). Die in diesen Beständen mit hohen Mn-Konzentrationen beprobten ungeschädigten Individuen weisen stets niedrigere Mn-Konzentrationen und ein weiteres Ca/Mn-Verhältnis auf, liegen jedoch meistens auch im Risikobereich für Mn-Toxizität. Die Antwortschreiben der Forstämter aus dem Jahr 1987 lassen den Schluss zu, dass zumindest vereinzelt in allen Beständen mit geschädigten Individuen Harzfluss aufgetreten sein könnte. Bei der damals getrof-

Tabelle 7

Aus der Verteilung abgeleitete Schwellen für hohes Risiko einer Mn-Toxizität bei Douglasie

1. Nadeljahrgang (c+0)	Mn-Schäden zu erwarten	Keine Schädigung durch Mn zu erwarten
Mn-Konz [mg/g]	> 3,8	< 3,8
Ca/Mn	< 1,25	> 1,25

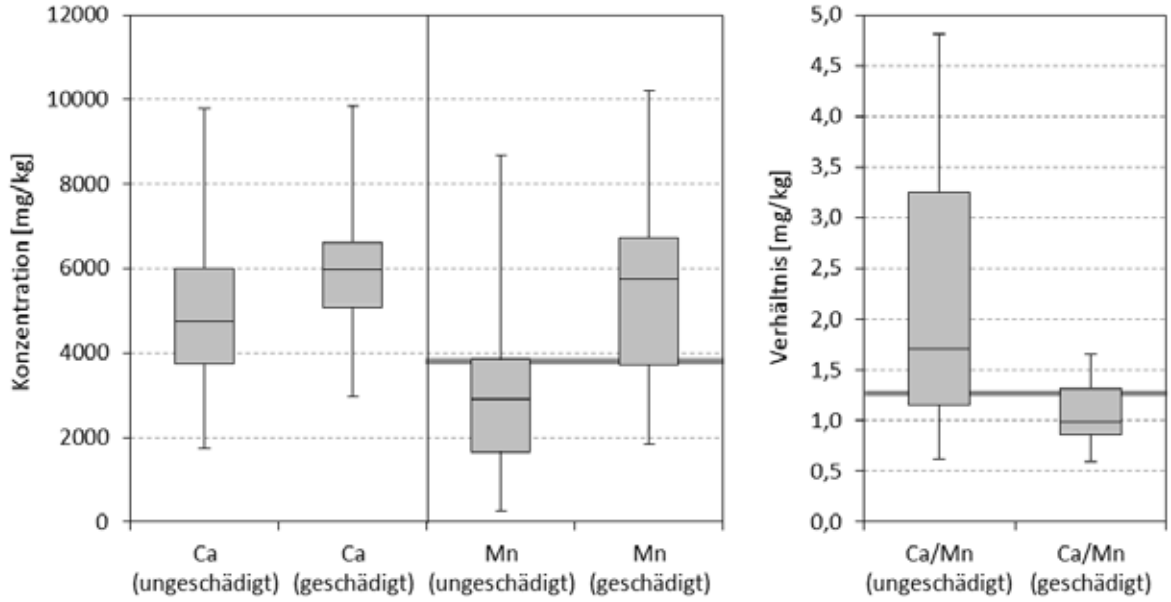
Tabelle 8

Mittelwerte und Standardabweichungen der Mn-Konzentrationen sowie das Ca/Mn-Verhältnis im jüngsten Nadeljahrgang (c+0) der beprobten Douglasienbestände mit (oberer Teil der Tabelle) und ohne (unterer Teil der Tabelle) Schadsymptomen. Werden die Schwellen für ein hohes Risiko einer Mn-Toxizität (Mn-Konzentration >3800 mg/kg; Ca/Mn <1,25) über- bzw. unterschritten sind die entsprechenden Stellen grün unterlegt. Zum Vergleich sind die Werte der Kontrolle späterer Probenahmetermine der drei Düngeversuche Adenau, Cochem und Hochspeyer mit aufgeführt (siehe Kap. 7).

				Mn-Konzentration (mg/kg)		Ca/Mn		CND	
	Forstamt	Flä.-Nr.	Jahr	ohne Symp	geschädigt	ohne Symp.	gesch.	ohne Symp.	gesch.
Douglasienbestände mit Schadsymptomen	Adenau	101-58	1986	2417 ± 929	3200 ± 1622	2,53	2,37	N	Ü
	Adenau		1986	2800 ± 361	4600 ± 1516	1,24	0,83	N	Ü
	Adenau		1986	3950 ± 974		0,81		Ü	
	Adenau	101-84	alle	4224 ± 1357	6356 ± 994	1,26	0,99		
			1986	3667 ± 645	6133 ± 810	1,37	1,02	Ü	Ü
			1989	3883 ± 797	7017 ± 846	1,37	0,98	Ü	Ü
			1993	3850	5040	1,07	0,96	Ü	Ü
			2002	5247 ± 2226		1,11		Ü	
			20012	3473 ± 1002		1,04		Ü	
	Bad Münster	105-02	1987	2983 ± 501	3417 ± 1854	2,65	2,58	N	Ü
	Cochem	108-02	alle	3038 ± 386	2817 ± 993	1,39	1,37		
			1987	2950 ± 522	2817 ± 993	1,44	1,37	Ü	Ü
			1989	2975 ± 284		1,41		N	Ü
			1993	3360 ± 537		1,25		Ü	Ü
			2012	3617 ± 1184		1,78		Ü	
	Cochem	108-99	1986	3483 ± 1567	4800 ± 1061	1,54	1,18	-	-
	Rengsdorf	132-01	1988	5733 ± 1156	8917 ± 1209	0,96	0,68	Ü	Ü
	Bernkastel	201-02	1987	5700 ± 614	7633 ± 1444	0,90	0,91	Ü	Ü
	Irrel	210-01	1988	333 ± 65	338 ± 147	13,89	15,86	M	M
	Prüm-Nord	217-01	1993	780	717	2,40	4,18	N	N
	Saarburg-Ost	220-01	1987	4433 ± 810	5933 ± 333	1,26	0,92	Ü	Ü
	Wittlich-West	224-02	1987	2316 ± 862	2517 ± 202	2,06	1,91	N	N
	Elmstein-Süd	311-01	1987	1633 ± 465	2030 ± 1102	3,42	3,24	N	N
	Hochspeyer	318-01	alle	718 ± 543	794 ± 754	5,23	4,38		
			1987	1272 ± 697	1517 ± 1028	4,64	2,80	N	N
			1989	438 ± 53	455 ± 165	6,35	5,43	M	M
			1991	443 ± 14	411 ± 125	4,70	4,90	M	M
			2012	462 ± 24		5,71		M	
Douglasienbetände ohne Schadsymptome	Winnweiler	340-01	1993	8670	6690	0,92	1,10	Ü	Ü
	Adenau	101-72	1986	1600 ± 150		2,48			
	Bad Münster	105-01	1987	1767 ± 202		3,74			
	Cochem	108-01	1987	2500 ± 1015		2,93			
	Bernkastel	201-01	1987	4500 ± 2308		1,84			
	Wittlich-West	224-01	1987	1413 ± 727		5,18			
	Trippstadt	337-01	1993	821		5,03			

Abbildung 4

Boxplots der Ca- und Mn-Konzentrationen sowie des Ca/Mn-Verhältnisses in den c+0 Nadeln getrennt nach Douglasien ohne (n = 84) und Douglasien mit (n = 29) Schadsymptomen aller Flächen und Jahre. Die Proben der gedüngten Varianten wurden nicht berücksichtig. Aus der Verteilung abgeleitete Grenzwerte sind als graue Linie in der Abbildung eingetragen.



fenen Unterteilung der Probebäume wird jedoch lediglich zwischen geschädigten und ungeschädigten Individuen unterschieden. Auf Harzfluss wurde nicht explizit geachtet oder ein starkes Auftreten erwähnt, sodass bei den Beständen, auf die diese Schwellenwerte für Mn nicht zutreffen, andere Schädigungen mit anderen Ursachen zu vermuten sind. Von denen zum Vergleich ausgewählten Douglasienbeständen ohne Schadsymptome weist nur der Bestand in Bernkastel erhöhte Mn-Konzentrationen, jedoch ein weites Ca/Mn-Verhältnis auf.

Hohe Mangangehalte in den Douglasiennadeln korrespondieren in der Regel mit hohen Mangangehalten in der Humusauflage und im Mineralboden. So weisen die Bodenproben der Bestände mit geschädigten Douglasien, deren Nadelspiegelwerte auf Mn-Toxizität hinweisen (Bestände 101-64, 101-65, 101-84, 201-02, vgl. Tabelle 8), im Oberboden im Vergleich zu Beständen ohne Hinweise auf Mn-Toxizität erhöhte Konzentrationen an austauschbarem Mn und ein engeres Ca/Mn-Verhältnis bei der Austauscherbelegung auf (Tabelle 9). Auf Basis der 1989 gewonnenen Bodenproben können demnach austauschbare Mn-Konzentrationen > 100 mg/kg (entspricht 3,6 µmolc/g Boden) und ein Ca/Mn-Verhältnis < 0,8 (mg/mg) als kritisch angesehen werden. Das kritische Ca/Mn-Verhältnis im Oberboden wird auch von Beständen ohne Schadsymptome unterschritten (108-01, 201-01), jedoch dürfte die verfügbare Menge an Mangan an diesen Standorten zu gering sein, um Schadsymptome hervorzurufen. Tiefere Bodenhorizonte bzw. Tiefenstufen zeigen keine deutlichen Unterschiede in den Mangan- und Calciumkonzentrationen zwischen Beständen mit und ohne Schadsymptomen.

Auffällig sind neben den hohen Mangangehalten die verbreitet sehr geringen **Phosphor**gehalte in den erkrankten Douglasienbeständen (Tabelle 3). Sie liegen mit Werten zwischen 0,7 und 1,2 mg/g im 1. Nadeljahrgang meist deutlich unterhalb des von Bergmann (1988) und von Krauss & Heinsdorf (2005) für Douglasie angenommenen Bereichs „ausreichender" Phosphorgehalte sowie unterhalb der von Zehle (2015) aus van den Burg`s (1985) Literaturzusammenstellung für die Douglasie abgeleiteten Grenze zwischen „Normalbereich" und „Mangelbereich" (Tabelle 1). Bei einem beträchtlichen Teil fällt der P-Nadelgehalt

Tabelle 9

Mittlere austauschbare Mangan-Konzentrationen im Oberboden (Ah-Horizont bzw. Tiefenstufe 0-20 cm) der 1989 beprobten Douglasienbestände. Bei den Beständen mit geschädigten Douglasien wurden Bodenproben in Stammnähe von geschädigten und von symptomfreien Individuen gewonnen. Die Bestände, deren Nadelspiegelwerte auf Mangantoxizität mit Schadsymptomen schließen lassen, sind blau markiert. Über- bzw. Unterschreitungen der definierten Schwellenwerte für ein hohes Risiko von Mangantoxizität sind grün unterlegt.

					Austauschbare Mn-Konzentration [mg/kg]		Ca/Mn [mg/mg]	
	Forstamt	Flä.-Nr.	Probe	Jahr	ohne Symp.	gesch.	ohne Symp.	gesch.
Bestände mit Schadsymptomen	Adenau	101-58	Ah	1989	60	82	1,68	0,74
	Adenau	101-64	Ah	1989	102	271	0,50	0,20
	Adenau	101-65	Ah	1989	223	197	0,32	0,26
	Adenau	101-84	Ah	1989	265	333	0,77	0,64
	Bad Münster	105-02	0-20	1989	36	49	2,25	3,43
	Cochem	108-02	Ah	1989	152	131	0,14	0,14
	Bernkastel	201-02	0-20	1989	133	153	0,34	0,34
	Irrel	210-01	0-20	1989	81	83	0,26	0,32
	Wittlich-West	224-02	0-20	1989	35	34	0,83	0,89
	Elmstein-Süd	311-01	0-20	1989	7	14	1,35	1,35
	Hochspeyer	318-01	Ah	1989	12	6	9,34	5,48
Bestände ohne Schadsymptome	Adenau	101-72	Ah	1989	94		1,16	
	Bad Münster	105-01	0-20	1989	95		1,71	
	Cochem	108-01	0-20	1989	97		0,52	
	Bernkastel	201-01	0-20	1989	72		0,73	
	Wittlich-West	224-01	0-20	1989	82		1,37	

in die Ernährungsstufe „extremer Mangel" (<0,98 mg/g P), in der Krauss & Heinsdorf (2005) nur noch ein sehr geringes Wachstum erwarten. In den symptomfreien Beständen sind die Phosphorgehalte meist etwas höher als in den erkrankten Beständen und dort in den erkrankten Bäumen häufig tendenziell höher als in den symptomfreien (Tabelle 3). Auch beim Phosphor korrespondieren die P-Nadelspiegelwerte recht gut mit der okularen Symptomatik (vgl. insbesondere auch Kap. 7.2.2).
Auffällig niedrige Phosphorgehalte in den Nadeln sind sowohl auf Standorten mit niedrigen Phosphorgehalten im Boden zu finden (z.B. Flächen 318-01 und 311-01 auf Mittlerem Buntsandstein, 105-02 auf Rhyolith) als auch auf Standorten mit vergleichsweise hohen Phosphorgehalten im Boden (z.B. Flächen 101-58, 101-65, 101-84, 108-02 und 201-02 auf Grauwacke/Tonschiefer (Tabelle 10). Bei den letzteren Beständen ist die schwache Phosphorversorgung der Bäume aus dem Phosphorgehalt im Boden nicht erklärbar.

Geringe Phosphorgehalte könnten auch durch eine hohe Versorgung mit Stickstoff hervorgerufen werden, wie Nadelanalysen von Stickstoff-Düngeversuchen zeigen (Beaton et al. 1964). Anhand der Daten von zurückliegenden Düngeversuchen an niederländischen Douglasienbeständen leiteten Mohren et al. (1986) eine mögliche Spanne des N/P-Verhältnisses bei Douglasie von 4 (bei extremer Stickstofflimitierung) bis 30 (bei extremer Phosphorlimitierung) ab. Bei Flächen, die in den 1950er Jahren erstmals

Tabelle 10

Mittlere Phosphor-Konzentrationen (P_{ges}) im Oberboden (Ah-Horizont bzw. Tiefenstufe 0-20 cm) der 1989 beprobten Douglasienbestände im Vergleich zu den P-Konzentrationen im ersten Nadeljahrgang. Bei den Beständen mit geschädigten Douglasien wurden Bodenproben in Stammnähe von geschädigten und von symptomfreien Individuen gewonnen. Die Bestände, deren Nadelspiegelwerte auf Mangantoxizität mit Schadsymptomen schließen lassen, sind blau markiert.

					P_{ges}-Konzentration im Boden [mg/kg]		P-Konzentration c+0 Nadeln [mg/g]	
	Forstamt	Flä.-Nr.	Probe	Jahr	ohne Symp.	gesch.	ohne Symp.	gesch.
Bestände mit Schadsymptomen	Adenau	101-58	Ah	1989	341	346	0,87 ±0,15	0,77 ±0,06
	Adenau	101-64	Ah	1989	368	475	0,80 ±0,00	1,00 ±0,10
	Adenau	101-65	Ah	1989	516	532	0,82 ±0,13	0,82 ±0,13
	Adenau	101-84	Ah	1989	433	459	0,97 ±0,06	0,83 ±0,21
	Bad Münster	105-02	0-20	1989	104	107	0,90 ±0,10	0,73 ±0,15
	Cochem	108-02	Ah	1989	372	349	0,90 ±0,00	0,73 ±0,06
	Bernkastel	201-02	0-20	1989	507	535	0,93 ±0,12	0,83 ±0,15
	Irrel	210-01	0-20	1989	142	359	1,13 ±0,23	0,73 ±0,06
	Wittlich-West	224-02	0-20	1989	205	213	0,83 ±0,06	0,83 ±0,15
	Elmstein-Süd	311-01	0-20	1989	79	95	0,87 ±0,12	1,10 ±0,20
	Hochspeyer	318-01	Ah	1989	142	127	0,97 ±0,15	0,77 ±0,06
Bestände ohne Schadsymptome	Adenau	101-72	Ah	1989	423		1,00 ±0,00	0,80 ±0,10
	Bad Münster	105-01	0-20	1989	277		1,20 ±0,10	0,70 ±0,10
	Cochem	108-01	0-20	1989	437		1,20 ±0,10	
	Bernkastel	201-01	0-20	1989	268		1,13 ±0,12	
	Wittlich-West	224-01	0-20	1989	344		1,13 ±0,06	

Tabelle 11

Aus den in Tabelle 1 genannten Grenzwerten des Bereichs einer normalen Ernährung für c+0 Nadeln bei Douglasie errechnete N/P-Verhältnisse. Dabei wurde sowohl die Untergrenze der noch als ausreichend angesehenen N-Konzentrationen mit der Obergrenze der P-Konzentrationen (Min) als auch die Obergrenze der noch als ausreichend angesehenen N-Konzentrationen mit der Untergrenze der P-Konzentrationen (Max) ins Verhältnis gesetzt.

	Bergmann (1988)	Fisher (1996)	Krauss & Heinsdorf (1986)	Garrison et al. (2000)	Zehle (2015)	Mohren et al. (1986)	Mittelwert
Min	3,7	7,5	7,7	11,7	5,1	5,7	6,9
Max	14,2	14,2	14,0	-	14,5	12,5	13,9

untersucht wurden und unter Stickstoff- und Phosphormangel litten, zeigte sich im Jahr 1984 eine deutliche Zunahme der Stickstoffgehalte und ein weiteres N/P-Verhältnis. Mohren et al. (1986) führten dies auf den hohen atmogenen Eintrag von Stickstoffverbindungen zurück. Das N/P-Verhältnis der 1984 erneut beprobten niederländischen Douglasienbestände lag zwischen 18-29 und deutet damit selbst bei den in den 1950er Jahren phosphorgedüngten Beständen auf eine Entwicklung in Richtung Phosphorlimitierung hin.
Werden aus den in Tabelle 1 genannten Grenzwerten des Bereichs einer normalen Ernährung für c+0 Nadel bei Douglasie die N/P-Verhältnisse berechnet, liegen diese im Mittel zwischen 7 und 14 (Tabelle 11). Insbesondere die Obergrenze variiert wenig, was auf eine phosphorlimitierte Ernährung bei einem N/P-Verhältnis weiter 14 hindeutet. Diese berechnete Spanne liegt in einem ähnlichen Bereich, wie das als ausgeglichen angesehene N/P-Verhältnis von Fichte (7-12 nach Flückiger & Braun (2003)) und Kiefer (12-15 nach Wehrmann (1959)).
Die N/P-Verhältnisse der 1987-1989 in Rheinland-Pfalz beprobten Bestände sowohl mit als auch ohne Schadsymptomen liegen bis auf vier Ausnahmen (105-01, 132-01, 210-01, 217-01) über dem N/P-Verhältnis von 14. Dies deutet darauf hin, dass von einer durch das hohe Stickstoffangebot bedingten phosphorlimitierten Ernährung auszugehen ist. Insbesondere bei den Beständen auf Buntsandstein dürfte ein Überschuss von Stickstoff für die geringen Phosphorgehalte und das weite N/P-Verhältnis verantwortlich sein. Die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche in Rheinland-Pfalz zeigen wie die Douglasienbestände ebenfalls ein eher weites N/P-Verhältnis (Greve et al. 2016).
Die Phosphorernährung dürfte auch durch eine hohe Verfügbarkeit von Mangan beeinträchtigt werden. So weisen Versuche von Ducić & Polle (2006) mit Douglasiensämlingen der Inlands- und Küstendouglasie darauf hin, dass die höhere Toleranz der Küstendouglasie gegenüber Mangan durch die Fähigkeit, Mangan zusammen mit Phosphor (und in geringerem Umfang auch Calcium) in der Wurzel einzulagern, bedingt ist. Demnach könnten die niedrigen Phosphorgehalte der Nadeln auf Standorten mit gleichzeitig hohen Phosphor- aber auch Manganbodenvorräten auch durch diesen Entgiftungsmechanismus mitverursacht werden, da ein Teil des aufgenommenen Phosphors in den Wurzeln festgelegt wird. Dafür spricht die Beobachtung, dass die gesunden Bestände und in den erkrankten Beständen die symptomfreien Bäume meist höhere Phosphorgehalte aufweisen. Auch Schöne (1992a, b, c) und Kehr & Büttner (2003) berichten von höheren Phosphorgehalten bei Douglasienbeständen ohne Schadsymptome und geringeren Mangangehalten.

Niedrige **Phosphor**gehalte in den Nadeln könnten auch mit einer unzureichenden Magnesiumverfügbarkeit im Boden zusammenhängen, da sowohl die Aufnahme von Phosphor aus dem Boden als auch dessen Verwendung im Stoffwechsel stark von der Mg-Versorgung abhängt (Slovik 1997, S. 101 ff, 141). In der hiesigen Untersuchung sind sowohl in den Beständen mit als auch ohne Schadsymptome die Gehalte von Magnesium und Phosphor in den Nadeln signifikant positiv korreliert.

Die **Magnesium**gehalte liegen in den nicht erkrankten Vergleichsbeständen meist merklich über den Befunden aus den erkrankten Untersuchungsbeständen und innerhalb der erkrankten Bestände bei Bäumen ohne Schadsymptome häufig über den Gehalten der geschädigten Individuen (Tabelle 3). Die Magnesiumgehalte bewegen sich zumeist oberhalb der am häufigsten in der Literatur angegebenen Untergrenzen des Normalbereichs (0,8 mg/g, vgl. Tabelle 1), die CND weist demgegenüber in den geschädigten Beständen meist eine unausgewogene Mg-Ernährung aus (zu niedrige Konzentrationen verglichen mit den restlichen Elementen (Tabelle 13)).
Geringe Magnesiumgehalte in den Nadeln sind auf Standorten mit sehr unterschiedlichem Magnesiumgehalt im Boden zu beobachten (Tabelle 12).
Aus der Literatur und den vorliegenden Daten lassen sich mehrere Ursachen für die schlechtere Magnesiumversorgung der Individuen mit Schadsymptomen herleiten. Denkbar und in der Literatur häufig berichtet ist eine kompetitive Hemmung zwischen Kationen bei der Aufnahme über die Wurzel, sodass bei hoher Manganver-

Tabelle 12

Mittlere Konzentrationen an austauschbarem Magnesium im Oberboden (Ah-Horizont bzw. Tiefenstufe 0-20 cm) der 1989 beprobten Douglasienbestände im Vergleich mit den Mg-Konzentrationen im 1. Nadeljahrgang. Bei den Beständen mit geschädigten Douglasien wurden Bodenproben in Stammnähe von geschädigten und von symptomfreien Individuen gewonnen. Die Bestände, deren Nadelspiegelwerte auf Mangantoxizität mit Schadsymptomen schließen lassen, sind blau markiert

					Mg_{aust}-Konzentration im Boden [mg/kg]		Mg-Konzentration c+0 Nadeln [mg/g]	
	Forstamt	Flä.-Nr.	Probe	Jahr	ohne Symp.	gesch.	ohne Symp.	gesch.
Bestände mit Schadsymptomen	Adenau	101-58	Ah	1989	9,3	8,4	0,91 ±0,08	0,83 ±0,06
	Adenau	101-64	Ah	1989	11,3	9,9	0,94 ±0,10	0,81 ±0,07
	Adenau	101-65	Ah	1989	13,7	14,5	0,71 ±0,03	0,71 ±0,03
	Adenau	101-84	Ah	1989	22,9	14,4	0,98 ±0,13	0,91 ±0,03
	Bad Münster	105-02	0-20	1989	17,1	18,8	0,94 ±0,01	0,76 ±0,16
	Cochem	108-02	Ah	1989	11,1	8,8	0,89 ±0,09	0,82 ±0,03
	Bernkastel	201-02	0-20	1989	12,1	12,8	1,09 ±0,28	1,00 ±0,27
	Irrel	210-01	0-20	1989	6,3	6,7	1,68 ±0,38	1,43 ±0,41
	Wittlich-West	224-02	0-20	1989	5,6	6,9	0,81 ±0,09	0,63 ±0,08
	Elmstein-Süd	311-01	0-20	1989	1,7	2,5	0,82 ±0,04	0,71 ±0,01
	Hochspeyer	318-01	Ah	1989	4,8	5,3	0,92 ±0,25	0,76 ±0,03
Bestände ohne Schadsymptome	Adenau	101-72	Ah	1989	24,5		1,23 ±0,19	
	Bad Münster	105-01	0-20	1989	61,0		1,25 ±0,21	
	Cochem	108-01	0-20	1989	18,5		1,06 ±0,10	
	Bernkastel	201-01	0-20	1989	13,2		1,27 ±0,27	
	Wittlich-West	224-01	0-20	1989	40,2		1,15 ±0,32	

fügbarkeit geringere Mengen an Magnesium aufgenommen werden (z.B. Mengel 1991, S. 350; Slovik 1997, S. 133; Marschner 2012, S. 165). Da Mangan besser als Calcium und Kalium geeignet ist, Magnesium im Stoffwechsel zu ersetzten (Slovik 1997, S. 104), wäre auch ein geringerer Magnesiumbedarf und damit eine reduzierte Mg-Aufnahme und Einlagerung denkbar. Mangan könnte ebenfalls anstelle anderer Kationen, vornehmlich Kalium und Magnesium, zur Entgiftung von SO_4^{2-} verwendet werden (vgl. Slovik 1997 S. 141f. Elling et al. 2007, S. 117f.).
Wie von Mohren et al. (1986) vermutet, könnte auch ein erhöhtes Stickstoffangebot für die geringen Magnesiumkonzentrationen verantwortlich sein. Die als ausgeglichen angesehenen N/Mg-Verhältnisse der meisten Bestände lassen jedoch den Schluss zu, dass Stickstoff auf diesen Standorten nicht ausschlaggebend für die geringen Mg-Konzentration ist. Der ausgeglichene Bereich des N/Mg-Verhältnisses liegt zwischen 11-22, wenn dieser analog zu N/P (vgl. Tabelle 11) aus den ernährungskundlichen Grenzwerten berechnet wird. Werden die Konzentrationen der c+0 Nadeln der 1986-1988 beprobten Bestände mit Schadsymptomen mit der aus den Beständen ohne Schadsymptomen gebildeten Referenz verglichen, zeigt sich an dem $CNDr^2$, der ein Kennwert für die Ausgeglichenheit der Ernährung darstellt, dass die Mehrheit der Bestände als unausgeglichen ernährt bewertet wird (Tabelle 13). Bis auf zwei Ausnahmen (Adenau 101-64, Irrel 201-01) weisen

Tabelle 13

Ergebnisse der CND für die c+0 Nadeln der in den Jahren 1987-1989 beprobten Douglasien-Bestände, die Schadsymptome aufwiesen und bei denen bei der Probenahme zwischen Individuen mit und ohne Schadsymptome getrennt wurde. Die Berechnung wurde sowohl für die beprobten Individuen mit Schadsymptomen (geschädigt) als auch ohne Schadsymptomen (ungeschädigt) durchgeführt. Rot unterlegte Zellen zeigen einen Mangel, blau unterlegte Zellen einen Überschuss an, wenn der I-Wert des entsprechenden Elements kleiner bzw. größer als die Extremwerte der Referenz ist. Bei dem Kennwert $CNDr^2$ zeigen rot unterlegte Zellen an, dass der Wert höher ist als der höchste bei der Referenz vorkommende Wert des $CNDr^2$ und der Bestand somit unausgeglichen ernährt ist.

Fläche und Forstamt	Zustand	I_N	I_P	I_K	I_Ca	I_Mg	I_S	I_Mn	$CNDr^2$
Referenz	*Maximum*	*1,8*	*2,1*	*1,8*	*1,7*	*2,1*	*2,0*	*1,8*	*2*
	Minimum	*-2,0*	*-1,8*	*-1,4*	*-2,0*	*-1,8*	*-1,3*	*-1,7*	*11*
101-58	geschädigt	-0,7	-3,3	-0,3	0,5	-2,0	1,9	1,8	23
Adenau	ungeschädigt	-0,7	-2,2	0,6	-0,1	-1,5	1,3	1,0	11
101-64	geschädigt	0,7	-1,4	0,0	-1,5	-2,2	1,1	2,8	19
Adenau	ungeschädigt	1,9	-2,7	0,3	-1,6	-1,2	2,5	1,5	23
101-84	geschädigt	-4,1	-2,9	0,0	0,2	-1,7	-0,8	3,7	43
Adenau	ungeschädigt	-2,3	-1,8	0,4	-0,7	-1,3	1,1	2,1	16
105-02	geschädigt	1,7	-3,3	-1,1	0,9	-2,3	0,8	2,1	26
Bad Münster	ungeschädigt	0,4	-2,5	-0,7	0,8	-1,7	1,8	1,4	16
108-02	geschädigt	-0,2	-2,3	-0,2	-1,1	-1,2	1,2	1,9	13
Cochem	ungeschädigt	-0,5	-1,3	-0,3	-0,8	-1,1	0,7	1,9	8
132-01	geschädigt	-3,5	-1,0	-0,2	-0,3	-2,3	-2,0	4,5	44
Regensdorf	ungeschädigt	-1,2	-1,1	-0,8	-0,3	-1,9	-0,4	3,4	19
201-02	geschädigt	-2,3	-3,1	-1,6	0,3	-1,3	-0,3	4,3	38
Bernkastel	ungeschädigt	-1,2	-2,0	-1,4	-0,5	-0,7	-0,2	3,5	20
210-01	geschädigt	0,4	2,2	-0,8	0,2	2,6	2,6	-4,0	35
Irrel	ungeschädigt	1,2	2,1	-1,5	0,4	3,2	3,2	-4,1	46
220-01	geschädigt	0,8	-2,3	-1,9	-0,4	-2,0	2,1	3,5	30
Saarburg-Ost	ungeschädigt	-0,1	-1,9	-0,9	-0,4	-2,0	2,0	2,6	20
224-02	geschädigt	0,9	-1,9	0,0	0,0	-2,5	-0,1	1,6	13
Wittlich-West	ungeschädigt	0,2	-1,8	0,5	-0,4	-1,4	0,3	1,2	7
311-01	geschädigt	1,7	-1,9	-0,4	0,6	-2,1	0,8	0,8	13
Elmstein-Süd	ungeschädigt	1,4	-1,5	-0,2	0,2	-1,5	1,9	0,1	10
318-01	geschädigt	0,4	-2,4	0,6	-0,4	-1,4	2,1	0,2	13
Hochspeyer	ungeschädigt	-0,8	-0,4	0,0	-0,1	-0,7	2,6	-0,6	9

die ungeschädigten Individuen einen niedrigeren $CNDr^2$ auf als die Individuen mit Schadsymptomen. $CNDr^2$-Werte im Bereich der Referenz finden sich bei fünf Beständen, jedoch nur bei den ungeschädigten Individuen.
Am häufigsten sind die Elemente Mg, Mn und P nicht in einem ausgeglichenen Verhältnis in den Nadeln vorhanden. P und Mg liegt dabei in zu niedrigen Konzentrationen verglichen mit den restlichen Elementen vor, wohingegen Mn im Überschuss vorhanden ist. Eine Ausnahme stellt die Fläche 210-01 im Forstamt Irrel dar, die sehr geringe Mn-Konzentrationen aufweist.
Kalium wird durch die CND zumeist als ausgeglichen bewertet. Die Kaliumgehalte der Nadeln unterschreiten allerdings mit Werten zwischen 1,95 und 10,0 mg/g im 1. Nadeljahrgang häufig die von Bergmann (1988) sowie von Krauss & Heinsdorf (2005) für Douglasie als ausreichend erachteten Bereiche. Erkrankte Douglasien mit erhöhten Mangangehalten weisen zumeist niedrigere Kaliumgehalte als die Individuen ohne Schadsymptome auf (Tabelle 3). Dies könnte auf die auch bei Fichte, Buche und Eiche beobachtete Rolle von K beim Ladungsausgleich hinweisen (Greve et al. 2016, S. 167ff). Durch erhöhte Mengen an freien Kationen, wie beispielsweise Mn^{2+}, wären geringere Mengen K^+ nötig.

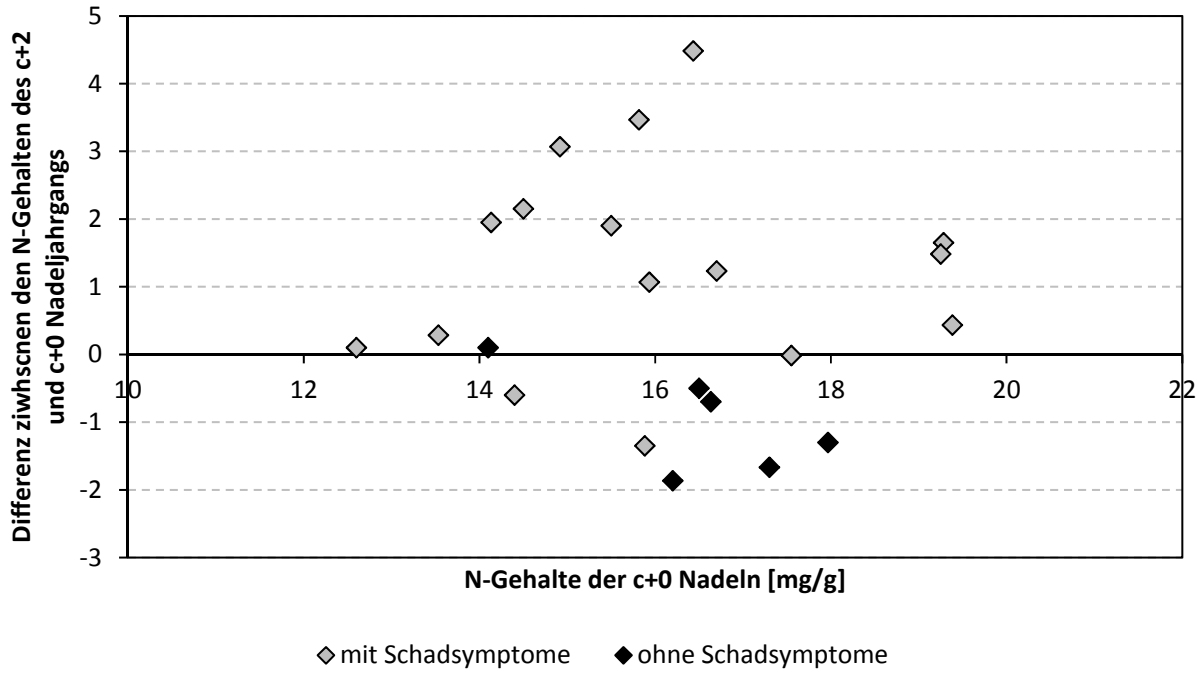
Die **Calcium**konzentrationen liegen auch bei symptomtragenden Douglasien im oder oberhalb des Normalbereichs (Tabelle 3) und auch die CND zeigt keine Hinweise auf eine unausgewogene Ca-Ernährung (Tabelle 13). Die Rolle von Calcium bei der Manganentgiftung wurde vorstehend bereits erörtert.

Die **Schwefel**ernährung ist meist hinreichend und zeigt keine Differenzierung nach dem Vitalitätszustand der Bestände oder Bäume.

Die **Stickstoff**gehalte in den Douglasiennadeln variieren erheblich und reichen von Mangel bis Überschuss, lassen aber keine Differenzierung nach dem Vitalitätszustand erkennen (Tabelle 3). Auch die CND zeigt kein einheitliches Bild (Tabelle 13). Allerdings liegen in Beständen ohne Schadsymptome die Stickstoffgehalte der älteren Nadeljahrgänge zumeist niedriger, in Beständen mit Schadsymptomen dagegen höher als bei den

Abbildung 5

Stickstoffgehalte des c+0 Nadeljahrgangs (X-Achse) aufgetragen gegen die Differenz zwischen den Stickstoffgehalten der c+2 und c+0 Nadeln (Y-Achse) der 1987-89 beprobten Douglasienbestände mit und ohne Schadsymptome. Differenzen größer Null zeigen eine Anreicherung von Stickstoff in älteren Nadeljahrgängen an.



jüngeren Nadeln (Abbildung 5). Dies könnte ein Hinweis sein, dass die Ernährung durch andere Elemente, insbesondere Phosphor oder Magnesium, stark limitiert ist, sodass eine Aufspeicherung von Stickstoff stattfindet.

Bei den Spurennährstoffen war kein Zusammenhang zwischen der Erkrankung und den Nadelgehalten zu erkennen. Die gemessenen **Eisen**gehalte lagen meist um 100 mg/kg (Tabelle 4) und damit über den als unzureichend erachteten Richtwerten (25-67 mg/kg, vgl. Tabelle 1). Mit den Gesamt-Eisengehalten der Nadeln lassen sich die zum Teil beobachteten Eisenmangelsymptome (vgl. Kap. 2) demnach nicht begründen.

Bei **Zink** wurden Gehalte zwischen 23 mg/kg (1. Nadeljahrgang, symptomfreier Baum im Bestand 108) und 255 mg/kg (1. Nadeljahrgang, symptomfreier Baum im Bestand 318) gemessen. Die Zinkgehalte liegen damit alle oberhalb der als ausreichend erachteten Gehaltsschwellen (10-22 mg/kg, vgl. Tabelle 1).

Die **Kupfer**gehalte liegen sowohl in symptomfreien als auch in erkrankten Bäumen mit Gehalten zwischen 2 und 6 mg/kg im 1. Nadeljahrgang in dem bei Fichten meist gemessenen Bereich (vgl. Block et al. 1991, Greve et al. 2016). Je nach Autor befinden sich diese Gehalte teilweise in dem für die Douglasie abgeleiteten Mangelbereich (vgl. Tabelle 1).

An Proben der Standorte 101, 108 und 340 sowie der Düngungsversuche Adenau, Cochem und Hochspeyer (vgl. Kap. 7) wurden darüber hinaus **Bor**- und **Molybdän**analysen durchgeführt. Bei Untersuchungen eines Douglasiensterbens in British Columbia durch Carter et al. (1984), das wie im hiesigen Raum mit Harzflusssymptomen verbunden war, wurde Bormangel als Erkrankungsursache diagnostiziert. In den hiesigen Beständen lagen die gefundenen Borgehalte mit 16 bis 40 mg/kg in einjährigen Nadeln über den von Carter et al. (1984) als kritisch erachteten Werten (8-12 mg/kg), im „Normalbereich" der Ernährungskennwerte nach Zehle (2015), Fisher (1996), Moore et al. (2004) und meist auch über dem von Bergmann (1988) für Douglasie (>20 mg/kg) und von Ahrens (1964) für Fichte (>14 mg/kg) als ausreichend erachteten Gehalt. Die Molybdängehalte lagen in der hiesigen Untersuchung zwischen 0,04 und 0,10 mg/kg und damit in einem Bereich, der in Fichtenbeständen häufig angetroffen wird (Fiedler & Rösler 1988, Lang 1995) und von Ahrens (1964) für Fichte als ausreichend angesehen wird. Allerdings unterschreitet ein Teil der an den Düngungsversuchsflächen gemessenen Mo-Gehalte den von Bergmann (1988) für die Douglasie als ausreichend erachteten Schwellenwert (0,05 mg/kg). Aber weder beim Bor noch beim Molybdän waren zwischen symptomfreien und erkrankten Bäumen Gehaltsunterschiede festzustellen.

Auch wenn **Silicium** nur für wenige Pflanzenarten als essentielles Element angesehene wird, wird es dennoch (auch von Bäumen (vgl. Cornelis et al. 2010)) in größeren Mengen aufgenommen und hat einen positiven Einfluss auf deren Stabilität, Stresstoleranz und Nährstoffhaushalt (Guntzer et al. 2012; Marschner 2012, S. 257). Darunter fällt auch eine Abmilderung von Mangantoxizität, in dem ein hohes Siliciumangebot die Mn-Aufnahme reduzieren kann und eine bessere Manganverteilung im Blattgewebe bewirkt, wodurch Schadsymptome abgeschwächt werden (Mengel 1991, S. 385). Dies wurde bei Versuchen mit verschiedenen Kulturpflanzen nachgewiesen (Horst & Marschner 1978a; Horiguchi 1988; Iwasaki & Matsumura 1999; Guntzer et al. 2012). Unterschiede in den Siliciumgehalten symptomfreier und erkrankter Douglasien sind jedoch im Datensatz der 1987-1989 beprobten Bäume nicht festzustellen (Tabelle 4).

4.2 Beziehungen zwischen verschiedenen Manganfraktionen im Boden und Mangan-Nadelgehalten gesunder und geschädigter Douglasien im Forstamt Adenau

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der Universität Trier (Opp 1989) wurden an den im Forstamt Adenau gewonnenen Bodenproben in symptomfreien und geschädigten Douglasienbeständen (vgl. Kap. 4.1) unterschiedliche Manganfraktionen bestimmt und Beziehungen zwischen den Bodengehalten und den Mangangehalten in den parallel beprobten Nadeln geprüft. Bei den Böden handelt es sich um basenarme Braunerden aus devonischem Tonschiefer (Devon 2, vgl. Kap. 5), Grauwacke

Tabelle 14

Gehalte verschiedener Mn-Fraktionen im Boden (aus Opp 1989)

Bodenuntersuchungsmethoden		arithm. Mittel (fett) und Spanne (kursiv) in mg/kg			
Mn-Fraktion	Extraktions-mittel	A_h *n = 20*	B_v *n = 021*	C_v *n = 18*	total *n = 59*
wasserlösl. Mn	H_2O	**10** *2 - 25*	**9** *1 - 26*	**6** *0 - 24*	**8** *0 - 26*
austauschb. Mn	$CaCl_2$	**120** *44 - 219*	**79** *13 - 167*	**50** *18 79*	**84** *13 - 219*
	NH_4Cl	**172** *50 - 496*	**83** *12 - 159*	**52** *18 - 99*	**105** *12 - 496*
komplexierb. Mn	DTPA (pH 7,3)	**125** *23 - 280*	**78** *10 - 167*	**57** *17 - 102*	**88** *10 - 280*
	EDTA (pH 4,6)	**403** *36 - 1338*	**225** *36 - 656*	**204** *19 - 752*	**279** *19 - 1338*
säurelösl. Mn	HCl	**303** *54 - 1835*	**125** *23 - 290*	**113** *15 - 371*	**182** *15 - 1835*
reduzierb. Mn	NH_2 OH· HCl	**466** *30 - 1373*	**358** *7 - 870*	**322** *22 - 1172*	**384** *7 - 1373*
	NH_4 - Acetat	**492** *35 - 1463*	**347** *0 - 889*	**347** *11 - 1281*	**396** *0 - 1463*

und Quarzit (Devon 1, vgl. Kap. 5, Tabelle 16). An Bodenproben aus dem Ah, dem Bv und dem Cv wurden folgende Mn-Fraktionen bestimmt:

wasserlösliches Mn: $H_2$0-Extraktion nach Sherman et al. (1942) (allerdings an getrockneten Bodenproben)

austauschbares Mn: $CaCl_2$Extraktion nach Köster & Merkel (1983) und NH_4Cl nach BZE-Standard

komplexierbares Mn: DTPA-Extraktion nach Lindsay & Norvell (1978) sowie NaEDTA-Extraktion nach Schüller (1960)

säurelösliches Mn: HCI-Extraktion nach Salcedo & Warncke (1979)

leicht reduzierbares Mn: Hydroxylaminhydrochlorid-Extraktion nach Chao (1972) sowie kombinierte Extraktion mit Ammoniumacetat und Hydrochinon.

Bei allen Manganfraktionen zeigten sich im Ah-Horizont höhere Gehalte als in den tieferen Bodenhorizonten. Generell nahmen die Mangangehalte in der Reihenfolge wasserlösliches, austauschbares, komplexierbares, säurelösliches und leicht reduzierbares Mn zu (Tabelle 14). Die Gehalte aller Fraktionen waren in allen drei Horizonten unter symptomtragenden Douglasien höher als unter symptomfreien Bäumen (nicht dargestellt). Die größten Unterschiede traten bei komplexierbarem und bei austauschbarem Mangan auf.

Bei den Korrelationsanalysen zwischen den Mn-Gehalten im Boden und den Nadelgehalten ergaben sich nur für den Ah-Horizont und für einjährige Nadeln signifikante Koeffizienten (Tabelle 15). Da sich die Korrelationskoeffizienten, mit Ausnahme des wasserlöslichen Mn, größenmäßig kaum voneinander unterscheiden, scheinen außer der $H_2$0-Extraktion alle anderen Verfahren gleich gut für die Prognose von Mn-Überschuss geeignet zu sein. Daher bietet sich die Verwendung des bei der BZE und der Waldbodendauerbeobachtung in Rheinland-Pfalz als Standard eingeführten Bestimmung des mit NH_4Cl-austauschbaren Mangans (Handbuch forstliche Analytik A.3.2.1.1) auch für Untersuchungen von gegebenenfalls durch Manganüberschuss ausgehenden Problemen an.

Tabelle 15

Zusammenhänge zwischen dem Mangangehalt in Douglasiennadeln (1. Nadeljahrgang) und den Gehalten verschiedener Mn-Fraktionen im Boden (aus Opp 1989)

	Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman			
Extraktionsmittel	Ah n = 20	Bv n = 21	Cv n = 18	total n = 59
H_2O	$0{,}43^{ns}$	$0{,}26^{ns}$	$0{,}14^{ns}$	$0{,}27^{ns}$
$CaCl_2$ NH_4Cl	$0{,}59^{**}$ $0{,}51^{*}$	$0{,}32^{ns}$ $0{,}25^{ns}$	$0{,}34^{ns}$ $0{,}45^{ns}$	$0{,}37^{**}$ $0{,}33^{*}$
DTPA EDTA	$0{,}55^{*}$ $0{,}55^{*}$	$0{,}29^{ns}$ $0{,}35^{ns}$	$0{,}32^{ns}$ $0{,}42^{ns}$	$0{,}41^{**}$ $0{,}47^{***}$
HCl	$0{,}57^{**}$	$0{,}23^{ns}$	$0{,}25^{ns}$	$0{,}29^{*}$
$NH_2OH \cdot HCl$ NH_4 - Acetat	$0{,}56^{**}$ $0{,}59^{**}$	$0{,}30^{ns}$ $0{,}34^{ns}$	$0{,}32^{ns}$ $0{,}34^{ns}$	$0{,}42^{**}$ $0{,}46^{***}$

*** P = < 0,001 ** p = < 0,01 * p = < 0,05 ^{ns} p ≥ 0,05

5 Manganvorräte in rheinland-pfälzischen Waldböden

Informationen zum Mangangehalt im Boden geben Hinweise, ob auf dem jeweiligen Standort ein Risiko für die Douglasien im Hinblick auf das Auftreten von Mangantoxizität besteht. Nur bei hohen Gehalten an austauschbarem Mangan im Oberboden sind auch hohe Mangangehalte in den Douglasiennadeln und in anderen Baumkompartimenten zu erwarten (vgl. Kap. 4.1, 4.2, 6.1, 6.2). Daten zu Mangangehalten und Manganvorräten im Mineralboden stehen von insgesamt 2264 mit entsprechenden Analysedaten hinterlegten Bodenprofilen aus der forstlichen Standortskartierung, der Bodenzustandserhebung (BZE I und II), der Boden-Dauerbeobachtungsflächen und weiterer Forschungsprojekte in Rheinland-Pfalz zur Verfügung. Betrachtet wird dabei das mit NH_4Cl-austauschbare Mangan (Handbuch forstliche Analytik A.3.2.1.1), das mit anderen Manganfraktionen im Boden und auch mit dem Mangangehalt in den Nadeln korreliert ist (vgl. Kap. 4.2). Dargestellt werden die über die einzelnen Mineralboden-Horizonte bis zur Profiltiefe aufsummierten Manganvorräte.

Tabelle 16 enthält eine Kurzbeschreibung der zur Differenzierung der Manganvorräte herangezogenen „Substrattypen". Verschiedene Substrattypen mit ähnlichen Eigenschaften wurden zu „Substratgruppen" zusammengefasst, um eine hinreichende Besetzung mit Bodenprofilen zu erzielen.

Die Spanne der Mn-Vorräte im Mineralboden reicht von wenigen Gramm bis zu 3 t je Hektar (Abbildung 6).
Auch innerhalb der Substratgruppen sind die Mn-Vorräte meist über einen großen Wertebereich verteilt (Abbildung 7). Dennoch zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Substratgruppen. Auffällig niedrig sind die Manganvorräte bei den Sandsubstraten (Gruppe 12: Schwemmsande; Gruppe 5: Sande des Buntsandsteins und sonstige oligotrophe Sande sowie den organischen Substraten (Gruppe 16)).
Podsole weisen in der jeweiligen Substratgruppe deutlich geringere Manganvorräte auf als Braunerden (Abbildung 8).

Tabelle 16

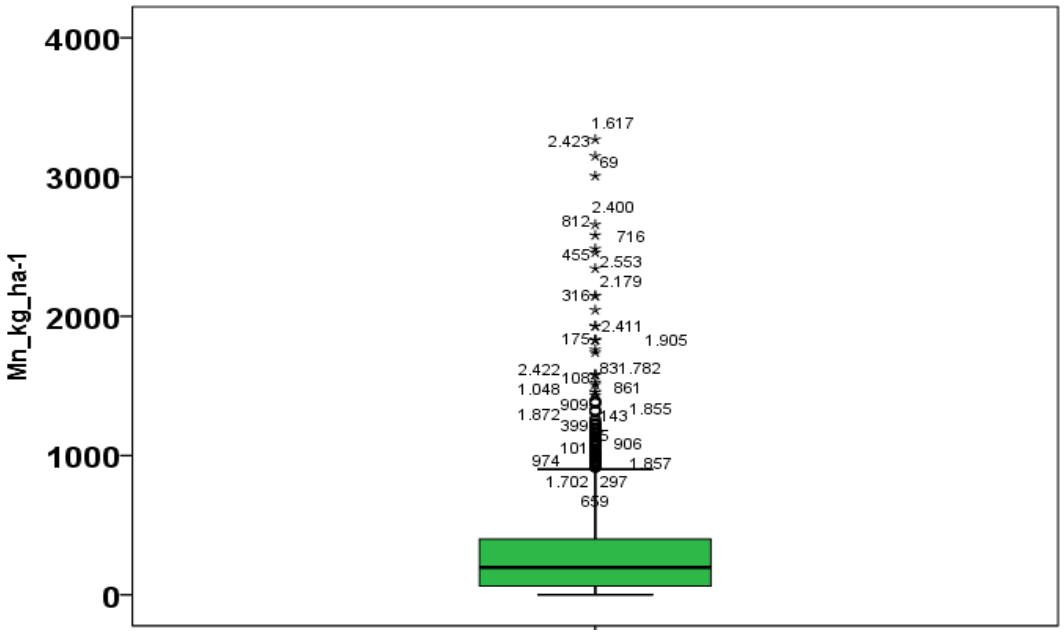
Kurzbeschreibung der Substrattypen, Verteilung der Bodenprofile mit Manganvorratsdaten auf die jeweiligen Substrattypen und Zusammenführung der Substrattypen zu Substratgruppen

Gr.	Substrattyp	Stand.-Nr	Anz.	Bodentypen/Basentypen Kurzbeschreibung Ausgangssubstrate
1	Lösslehme	10	135	Parabraunerden bis Pseudogleye/ im Mittelboden (Unterboden) basenreich
				mächtiger, über die Profiltiefe hinaus entkalkter Lösslehm (Decklehm wenn < 1 m Mächtigkeit)
2	Devon I	71	305	(podsolige) Braunerden (Pseudogleye-Braunerden) / tief basenarm
				periglaziale Hauptlagen aus Schuttlehm über Basislagen / anstehendem (Lehm)-Schutt aus Quarzit oder quarzitischen Sandsteinen (Schiefern) des Devon
	Devon I, Podsol	77	9	Podsole (Pseudogley-Podsole)/tief basenarm; stark podsoliert, tiefe Bleichzone (Ae)
				Schutte bis Schuttlehme aus Quarzit oder quarzitischen Sandsteinen des Devon
3	Devon II	72	346	Braunerden (Pseudogleye) /im Untergrund bis Unterboden basenhaltig
				Lösshaltige Hauptlagen über Basislagen aus meist saprolithisch vorverwitterten Schiefern, Grauwacken und Sandsteinen des Devon
4	Devon III	73	246	Braunerden, Parabraunerden, Pseudogleye / im Mittelboden (Unterboden) basenreich
				Lössreiche Hauptlagen über Mittellagen über Basislagen aus meist saprolithisch vorverwitterten Schiefern, Grauwacken und Sandsteinen des Devon
5	Sande d. Buntsandstein	80	329	podsolige Braunerden /tief basenarm
				(Schutt-) Sande aus quarzreichen Sandsteinen des Buntsandstein
	Sande d. Buntsandstein Podsol	81	86	Podsole / tief basenarm; stark podsoliert, Bleichzone (Ae) besonders tief (> 20 cm)
				(Schutt-) Sande aus quarzreichen Sandsteinen des Buntsandstein
	oligotr. Sande	86	5	podsolige Braunerden /tief basenarm
				(Schutt-) Sande aus quarzreichen Sandsteinen außerhalb des Buntsandstein/Rotliegendem (z.B. Liassandstein)
	oligotr. Sande, Podsol	87	4	Podsole / tief basenarm; stark podsoliert, tiefe Bleichzone (Ae)
				(Schutt-) Sande aus quarzreichen Sandsteinen außerhalb des Buntsandstein/Rotliegendem (z.B. Liassandstein)
6	oligotr. Lehmsande/ Lehme	82	101	Braunerden (Pseudogleye, Gleye)/ tiefbasenarm (Untergrund basenhaltig)
				Sammelgruppe aus Lehmen (Lehmsande bis Tonlehme)
7	Mesotr. Lehmsande/ Lehme	83	65	Braunerden, Kolluvien, Pelosole; Pseudogleye, Gleye / im Unterboden basenhaltig bis im Gesamtboden basenreich
				Sammelgruppe aus Lehmen (Lehmsande bis Tonlehme)
8	mesotr. Sande	85	9	Braunerden / im Unterboden bis im Oberboden basenhaltig bis basenreich
				(Schutt-)Sande aus Glimmer-, Feldspatreicheren Sandsteinen
9	Rotliegendes I	91	26	(podsolige; pseudovergleyte) Braunerden / im Unterboden basenhaltig
				(Schutt-)(Schluff-) Lehme aus (Sand-) und Schluffsteinen des Rotliegenden und des Karbon
	Rotliegendes II	92	40	(pseudovergleyte) Braunerden /im (Unterboden) Mittelboden basenreich
				(Schutt-)(Schluff-) Lehme aus periglazialer Hauptlage über Tonlehmen aus Tonsteinverwitterung des Rotliegenden und des Karbon
	Rotliegendes III	93	19	(pseudovergleyte) Braunerden bis Pelosole / im (Mittelboden) Gesamtboden basenreich
				(flache (Schutt-)(Schluff-) Lehme aus periglazialer Hauptlage über) Tonlehme(n) aus Tonsteinverwitterung des Rotliegenden und des Karbon
10	Sande d. Rotliegenden	94	8	(podsolige) Braunerden / tief basenarm bis im Untergrund basenhaltig
				(Schutt-) Sande aus Sandsteinen des Rotliegenden und des Karbon
	Sande d. Rotliegenden, Podsol	95	2	Podsole / tief basenarm; stark podsoliert, tiefe Bleichzone (Ae)
				(Schutt-) Sande aus quarzreichen Sandsteinen des Rotliegenden und des Karbon
11	Bimslehme	100	53	Andosole / im Mittelboden bis Oberboden basenreich
				Mächtige Gruse bis Gruslehme aus Laacher-See Tephra (Phonolith)
	Bimslehme; über	101	45	Andosol-Braunerden bis Pseudogley-Andosole /im Unterboden bis Mittelboden basenreich
				Gruse bis Gruslehme aus Laacher-See Tephra (Phonolith) über Basislagen aus (saprolithischem) Tonschiefern bis Sandsteinen (Grauwacken)
	Bimslehme;arme; über	102	5	Andosol-Braunerden / tief basenarm
				Gruse bis Gruslehme aus Laacher-See Tephra (Phonolith) über Basislage aus saprolithischem Quarzit (Sandstein) (arme Varianten)
	Bimsmischlehme	105	13	Braunerden bis Pseudogley-Braunerden / im Unterboden basenhaltig bis im Mittelboden basenreich
				Lehme aus Laacher-See Tephra (Phonolith) vermischt mit Löss (Hauptlagen) über Basislagen aus saprolithischem Schiefer bis Sandstein (Grauwacken)

Gr.	Substrattyp	Stand.-Nr	Anz.	Bodentypen/Basentypen
				Kurzbeschreibung Ausgangssubstrate
12	Schwemmsande	120	25	(podsolige) Braunerden bis Gleye / tief basenarm bis im Untergrund basenhaltig
				Schwemmfächer der pleistozänen Rheinterrasse aus periglazial fluviatil umgelagerten, kiesführenden Sanden aus dem Buntsandstein
	Schwemmsande, Podsol	121	1	Podsole und Podsol-Gleye / tief basenarm; stark podsoliert, tiefe Bleichzone (Ae)
				Schwemmfächer der pleistozänen Rheinterrasse aus periglazial fluviatil (lokal dann auch äolisch) umgelagerten kiesführenden Sanden aus dem Buntsandstein
13	magmatische Lehme	132	153	Andosole bis Braunerden / Gesamtboden (Mittelboden) basenreich
				periglazial überprägte Lehme aus der Verwitterung intermediärer bis basischer Vulkanite (Basalte, Andesite)
	saure Magmatite	138	6	(podsolige) Braunerden / tief basenarm bis im Untergrund basenhaltig
				Schuttgruse bis Schuttgrus-Lehme aus Rhyolith; Quarzporphyr; Granit und anderen sauren Magmatiten
14	eutr. Schiefer	135	42	Ranker bis Braunerden (Pseudogleye) / im Mittelboden bis Gesamtboden basenreich
				Schuttlehme bis Löss-haltige Hauptlagen aus/über sehr basenhaltigen (vermutlich primär kalkhaltigen) Schiefern (aber inzw. kalkfrei)
	Schichtlehme	136	6	Braunerden; Braunerde-Pelosole bis Pseudogleye / im Mittelboden basenreich
				Löss-haltige Hauptlagen über tonreichen Basislagen bis Residuale aus Tonsteinverwitterung
15	Kalklehme	139	20	Kalk-Braunerden bis Terrae calcis (Pseudogleye) / Gesamtboden basenreich; kalkhaltig
				periglazial überprägte Lehme und Residuale aus Kalksteinen, Mergeln
	Dolomitlehme	140	26	Kalk-Braunerden bis Terrae calcis (Pseudogleye) / Gesamtboden basenreich; kalkhaltig
				periglazial überprägte Lehme und Residuale aus Dolomiten, Dolomit-Mergeln
	kalkgründige mesotr. Lehme/Lehmsande	239	57	Parabraunerden, Braunerden, Pseudogleye / Unterboden bis Mittelboden basenreich; im Unterboden, Untergrund kalkhaltig
				Lösslehme über kalkhaltigem Löss oder vergleichbare, kalkgründige Substrate
16	organische Böden	900	16	Anmoorgleye bis Moore / tiefbasenarm bis Gesamtboden basenreich
				unterschiedlich mächtige Torfe oder andere organische Substrate über diversen Ausgangssubstraten

Abbildung 6

Boxplot der Manganvorräte im Mineralboden (Alle Standorte: 2268 Bodenprofile)



Auffällig hohe mittlere Manganvorräte zeigen die Substratgruppen 1 (Lösslehme), 9 (Rotliegendes) und 4 (Devon III) (Abbildung 7). Bei Gruppe 1 finden sich besonders hohe Mn-Vorräte (> 1000 kg Mn je Hektar) vor allem in den Substratreihen (Standortseinheiten) „Hydromorphe Lösslehme“ und „ Hydromorphe Lössdecklehme“, in der Substratgruppe 4 in der Substratreihe „Hydromorphe Lössdecklehme über Tonschiefersaprolith des Devons“. Bei der Gruppe 9 sind besonders hohe Vorräte in den Tonlehmen, den Schichtlehmen und den Schlufflehmen des Rotliegenden festzustellen.

Auch andere Standortsgruppen enthalten zum Teil Bodenprofile mit sehr hohen Manganvorräten. So finden sich Manganvorräte über 1000 kg ha^{-1} auch in den Substratgruppen Devon I (Gruppe 2), Devon II (Gruppe 3), mesotrophe Lehme/-Sande (Gruppe 7), magmatische Lehme (Gruppe 13), eutrophe Schiefer (Gruppe 14) und kalkgründige Lehme/Lehmsande (Gruppe 15).

Fazit:
Geringe Risiken des Auftretens von Mangantoxizität bei Douglasie weisen somit Substrate mit der Hauptbodenart Sand auf, insbesondere wenn hier Podsole ausgebildet sind.
Hohe Risiken sind vor allem bei Lösslehmen, Lössdecklehmen, eutrophen Tonschiefern und Standorten des Rotliegenden vorhanden. Aber auch bei anderen lehmigen und tonigen Standorten können vereinzelt hohe Manganvorräte mit dem Risiko von Mangantoxizität auftreten. Dies gilt insbesondere für hydromorphe Standorte.

Abbildung 7

Boxplot der Manganvorräte im Mineralboden für die einzelnen Substratgruppen (siehe Tab. 16) (Ausreißer aus Darstellungsgründen weggelassen)

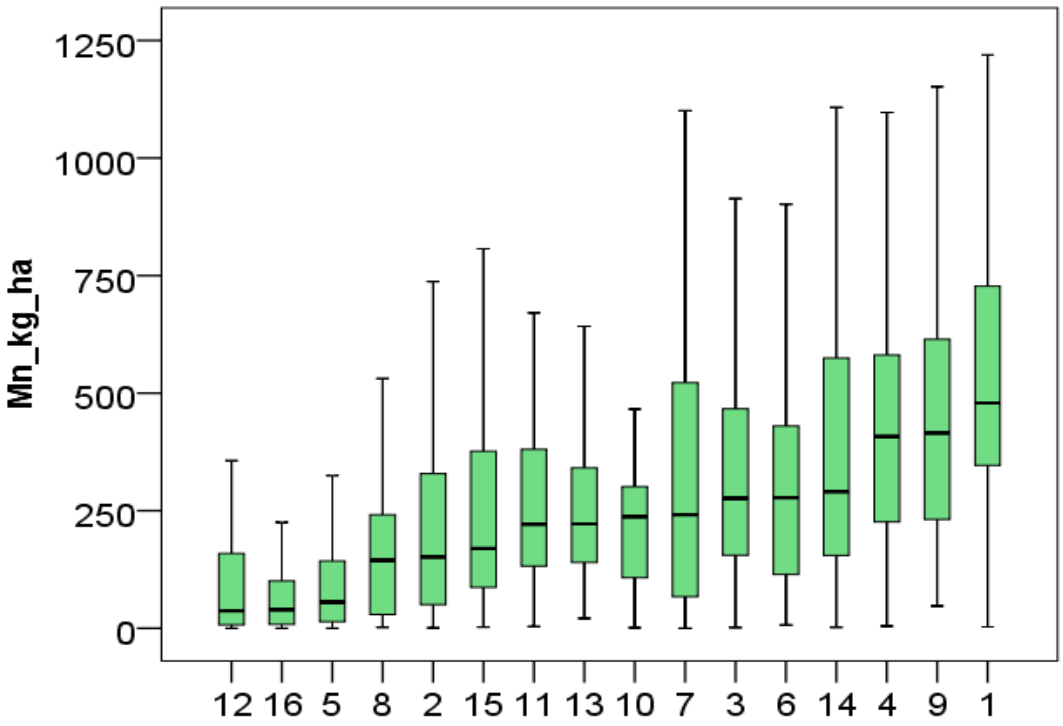
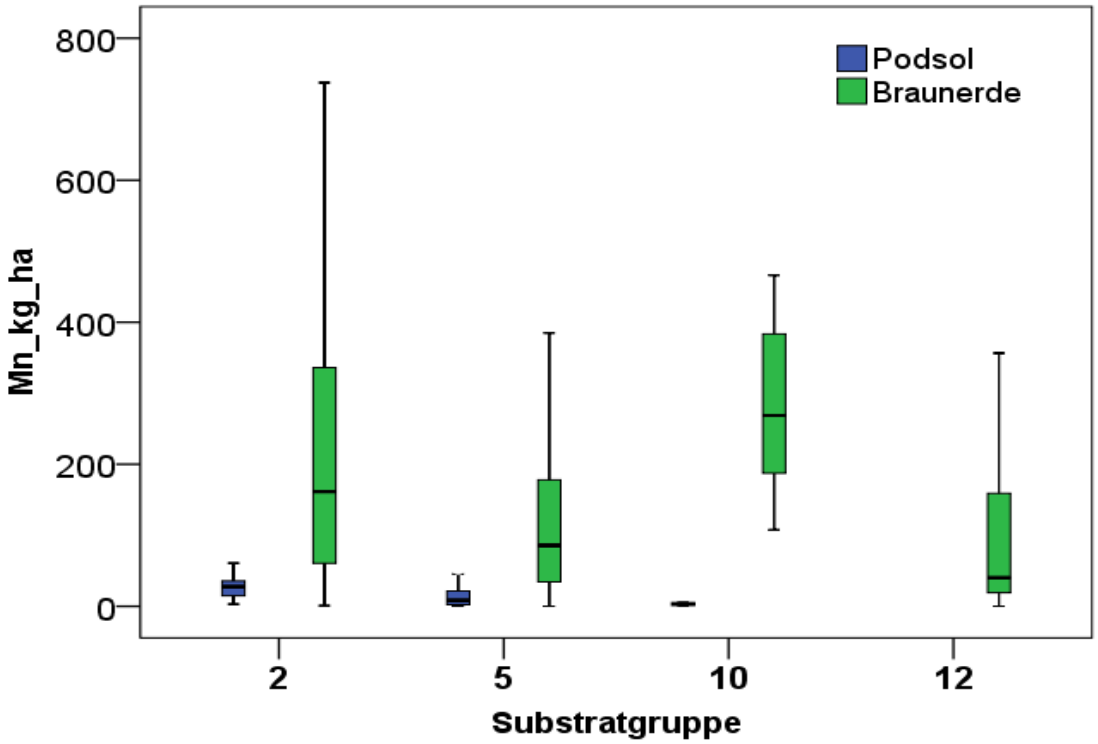


Abbildung 8

Differenzierung der austauschbaren Manganvorräte im Mineralboden verschiedener Substratgruppen nach den Hauptbodentypen Podsol und Braunerde



6 Untersuchungen zur Elementverteilung in den Douglasien und zum Eisenhaushalt

6.1 Mangangehalte in unterschiedlichen Baumkompartimenten auf verschiedenen Standorten

Im Rahmen von Projekten zur Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz (vgl. Pretzsch et al. 2014, Block et al. 2016) wurde auch der Mangangehalt in unterschiedlichen Baumkompartimenten von insgesamt 53 Douglasien untersucht. Die beprobten Douglasien stockten auf folgenden Standorten:

Buntsandstein (S`s) (Stand-Nr. 80)
Tief basenarme quarzreiche Sande aus quarzitisch gebundenem Buntsandstein mit nur sehr geringen Vorräten an pflanzenverfügbarem Calcium, Magnesium und Kalium (6 Douglasien beprobt)

Devon I (Dev_I) (Stand-Nr. 71)
Tief basenarme Schuttlehme und Decklehme aus bzw. über Quarzit oder Quarzit- und Tonschiefer-Saprolithlehm (15 Douglasien beprobt)

Devon II (Dev_II) (Stand-Nr. 72)
Decklehme über Tonschiefer- und Sandstein-Saprolith; im Vergleich zur Gruppe Devon I etwas höhere Basengehalte, die aber auf den Unterboden beschränkt sind (17 Douglasien beprobt)

Rotliegendes I (Rot_I) (Stand-Nr. 91)
Lehmsande bis Lehme des Rotliegenden, nur im Unterboden und Untergrund basenhaltig (5 Douglasien beprobt)

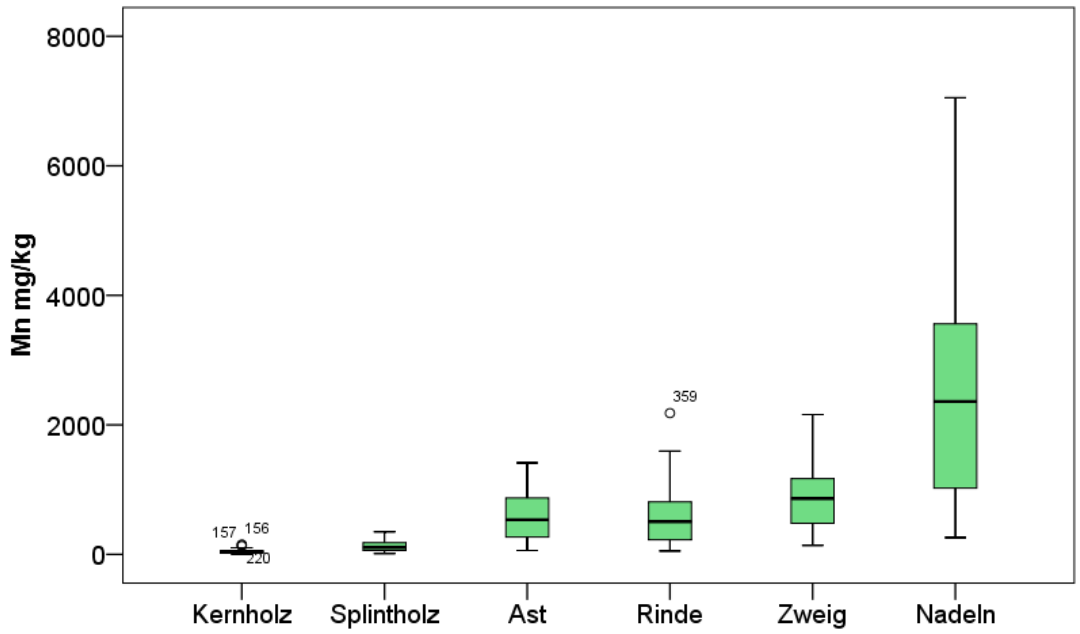
Rotliegendes II (Rot_II) (Stand-Nr. 92)
Schichtlehme des Rotliegenden, in der Regel basenreicher als Rot_I (5 Douglasien beprobt)

Rotliegendes III (Rot_III) (Stand-Nr. 93)
Tonlehme des Rotliegenden, in der Regel basenreicher als Rot_I (5 Douglasien beprobt)

Eine Beschreibung der Substrattypen findet sich in Tabelle 16, Kapitel 5. Eine differenziertere Beschreibung der Substrattypen enthält Block et al. (2016).

Abbildung 9

Boxplots der Mangangehalte in unterschiedlichen Baumkompartimenten von 53 auf unterschiedlichen Standorten beprobten Douglasien



Untersucht wurden die Mangangehalte der Kompartimente:

- Nadeln (Mischprobe über die gesamte Baumkrone, ohne Unterteilung in Nadeljahrgänge)
- Zweige (entnadelte Triebe)
- Äste (mit Rinde)
- Rinde (am Derbholz)
- Splintholz
- Kernholz.

Eine differenzierte Beschreibung der Probenahme, Probenaufbereitung und Analytik enthält Pretzsch et al. (2014).

Abbildung 9 zeigt die Mangangehalte in den verschiedenen Baumkompartimenten ohne Berücksichtigung des Substrattyps. Die höchsten Mangangehalte weisen die Nadeln auf. Allerdings variieren die Konzentrationen zwischen 259 und 7051 mg kg^{-1}. Sehr wenig Mangan findet sich im Kernholz (5-151 mg kg^{-1}) und im Splintholz (14-350 mg kg^{-1}).

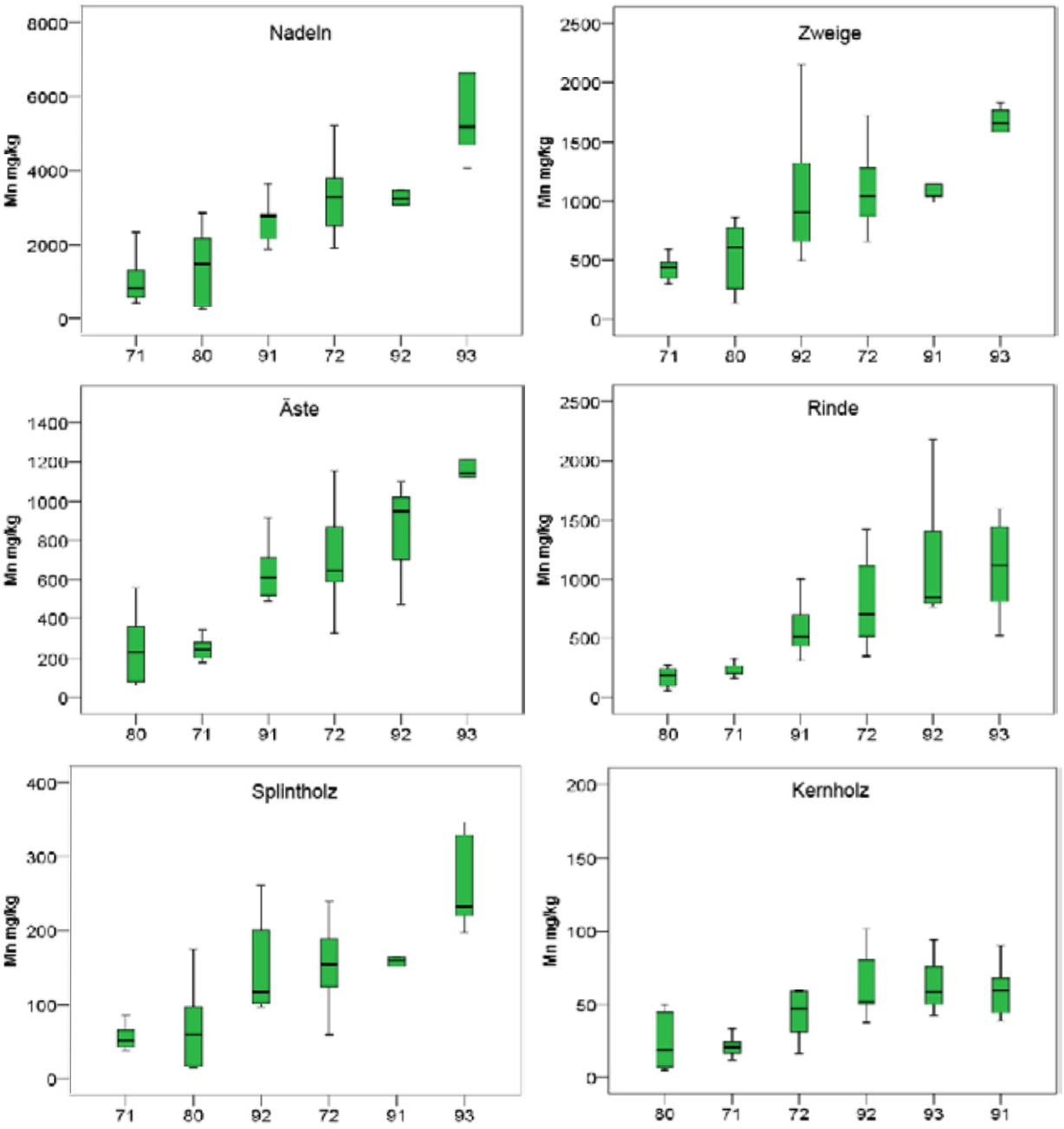
In Abbildung 10 sind die Mangangehalte der Kompartimente Nadeln, Zweige, Äste, Rinde, Splintholz und Kernholz nach den beprobten Substrattypen differenziert. Die auf den verschiedenen Substrattypen beprobten Douglasien weisen in allen Baumkompartimenten sehr unterschiedliche Mn-Gehalte mit einer deutlichen Reihung der Substrate auf: die niedrigsten Gehalte sind stets auf den Sanden des Mittleren Buntsandsteins (Stand-Nr. 80) und den tief basenarmen Schutt- und Decklehmen (Devon I, Stand-Nr. 71), die höchsten Gehalte bei allen Kompartimenten auf den Tonlehmen des Rotliegenden (Rot_III, Stand-Nr. 93) zu finden.

6.2 Elementverteilung in Bast und Splintholz symptomfreier und erkrankter Douglasien am Standort Adenau

Bei Apfelbäumen werden Rindenschäden (Internal Bark Necrosis – IBN) mit Manganüberschuss sowie mit Bormangel in Verbindung gebracht (Shelton et al. 1970, Crocker & Kenworthy 1973). Rindenproben mit den IBN-Symptomen zeigten Mangan- und Calciumanreicherungen in der Nähe der Nekrosen (Crocker & Kenworthy 1973). Diese Beobachtung gab Anlass, zu prüfen, ob auch im Bereich des Harzflusses an den erkrankten Douglasien Mangananreicherungen oder auffällige An- bzw. Abreicherungen anderer Elemente auftreten. Dies könnte auf eine Beeinträchtigung des Nährelementtransports hindeuten und die zum Teil unzureichenden Nährstoffgehalte in Nadeln erkrankter Bäume auch auf Böden mit ausreichenden Nährstoffgehalten

Abbildung 10

Boxplots der Mangangehalte in den Baumkompartimenten Nadeln, Zweige, Äste, Rinde, Splintholz und Kernholz auf unterschiedlichen Substrattypen (Stand-Nr. und Kurzbeschreibung der Substrattypen siehe Text)



erklären helfen.

Untersucht wurden jeweils drei Bäume mit und ohne Harzflusssymptome aus dem Untersuchungsbestand Adenau (101-Abt. 84, vgl. Kap. 7.1.1) und zum Vergleich drei Bäume aus einem in der Nähe gelegenen symptomfreien 31-jährigen Douglasienbestand mit ähnlichen Standortsbedingungen (101-Abt. 174). Analysiert wurden die Gehalte an P, S, K, Ca, Mg, Na, Mn, Cl, Fe, Zn, Cu, B und teilweise auch N, Al, Cd, Pb (N: CHN-Analysator; andere Elemente ICP im HNO_3-Druckaufschluss) im Bast- und im Splintholz aus verschiedenen Stammbereichen (Bäume ohne Harzfluss: Stammfuß, Mitte astfreier Bereich, 1 m unterhalb der grünen Krone, Mitte grüne Krone; Bäume mit Harzfluss: Stammfuß, untere Hälfte

Tabelle 17

Elementverteilung im Bast symptomfreier und erkrankter Douglasien im Forstamt Adenau - Mittelwert aus drei Probebäumen und Standardabweichung; Angaben in ppm

Symptomfreie Bäume aus einem ungeschädigten Bestand

P	K	Ca	Mg		Mn	S	Cl	Al	Fe	Zn	Cu	B
690 *40*	**4543** *1101*	**2130** *351*	**652** *166*	**10-11 m**	**471** *91*	**385** *40*	**105** *9*	**328** *68*	**12** *2*	**49** *19*	**1,7** *0,7*	**12,8** *2,4*
600 *30*	**4487** *1019*	**2163** *371*	**572** *194*	**5-5,8 m**	**402** *38*	**353** *41*	**126** *32*	**264** *12*	**10** *4*	**42** *24*	**1,8** *0,9*	**11,4** *2,6*
590 *110*	**4653** *2210*	**2470** *607*	**582** *180*	**3-3,5 m**	**412** *114*	**377** *49*	**162** *33*	**239** *34*	**12** *7*	**42** *23*	**3,1** *2,3*	**10,1** *1,4*
580 *50*	**3917** *510*	**2163** *761*	**507** *219*	**0,3 m**	**341** *159*	**336** *20*	**158** *10*	**150** *11*	**10** *2*	**34** *24*	**1,7** *1*	**8,1** *1,6*

Symptomfreie Bäume aus einem geschädigten Bestand

P	K	Ca	Mg		Mn	S	Cl	Al	Fe	Zn	Cu	B
560 *180*	**3943** *756*	**1683** *138*	**375** *107*	**11-12 m**	**1669** *752*	**302** *62*	**134** *51*	**439** *140*	**19** *6*	**42** *4*	**2** *0,4*	**14,4** *3*
530 *170*	**3787** *509*	**1750** *118*	**344** *87*	**5-5-7 m**	**1694** *715*	**277** *47*	**137** *48*	**449** *168*	**19** *5*	**44** *5*	**2,2** *0,4*	**11,1** *1*
550 *150*	**3830** *952*	**1740** *171*	**347** *104*	**3-3,4 m**	**1700** *861*	**288** *33*	**152** *31*	**447** *200*	**20** *9*	**47** *10*	**2,8** *0,3*	**10,2** *1,7*
580 *180*	**4110** *1287*	**2220** *240*	**408** *96*	**0,3 m**	**975** *106*	**307** *72*	**168** *48*	**241** *166*	**13** *1*	**39** *3*	**3,2** *0,3*	**8,7** *1,6*

Bäume mit Harzfluss aus einem geschädigten Bestand

P	K	Ca	Mg		Mn	S	Cl	Al	Fe	Zn	Cu	B
600 *50*	**3190** *104*	**2493** *888*	**443** *30*	**13-15 m**	**4100** *881*	**405** *81*	**224** *49*	**286** *233*	**22** *9*	**60** *15*	**3,3** *0,6*	**13,8** *4,7*
580 *30*	**2507** *476*	**2273** *492*	**245** *43*	**8,5-10 m**	**4010** *1720*	**419** *30*	**151** *71*	**298** *206*	**21** *8*	**62** *18*	**4,9** *1,1*	**10** *1,9*
630 *20*	**3003** *709*	**3023** *910*	**286** *88*	**5-8 m**	**4503** *2372*	**433** *82*	**210** *69*	**333** *271*	**22** *10*	**77** *33*	**5,1** *1,2*	**10,1** *2,9*
550 *60*	**2610** *452*	**2670** *1195*	**281** *93*	**0,3-2 m***	**4153** *1713*	**364** *42*	**166** *66*	**365** *260*	**25** *18*	**70** *20*	**4,3** *1,3*	**9,2** *3,2*

*Harzflussbereich

des Harzflussbereichs, obere Hälfte des Harzflussbereichs, oberhalb des Harzflussbereichs).
Die Bäume des symptomfreien Bestandes wiesen im Bast deutlich geringere Mangangehalte und merklich höhere Kalium- und Magnesiumgehalte auf, als die Bäume des erkrankten Bestandes (Tabelle 17). Innerhalb des erkrankten Bestandes zeigten Bäume mit Harzfluss höhere Mangangehalte und meist niedrigere Kalium- und Magnesiumgehalte als Bäume ohne Harzfluss. In den Spurennährstoffgehalten waren keine Unterschiede zwischen erkrankten und symptomfreien Bäumen zu erkennen. Die Befunde der Bastanalysen stimmen demnach mit entsprechenden Befunden von Nadelanalysen überein (vgl. Kap. 4.1).
In den Splintholzgehalten war keine Differenzierung nach der Baumvitalität zu beobachten.
An den Bäumen mit Harzfluss waren weder im Bast noch im Splintholz signifikante Unterschiede in den Elementgehalten zwischen dem Harzflussbereich und den Bereichen ohne Harzfluss festzustellen.

6.3 Eisenhaushalt okular schadfreier und symptomtragender Douglasien

Trotz des kalkfreien, sauren Standorts und in der Regel ausreichender bis hoher Nadelgehalte an Gesamt-Eisen (vgl. Kap. 4.1) zeigen die betroffenen Bäume häufig mit einer Ausbleichung des jüngsten Nadeljahrgangs die charakteristischen Symptome einer Eisenmangelchlorose. Daher hat die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Mitte der 1990er Jahre eine differenzierte Untersuchung zur Beeinflussung des Mineralstoffhaushalts der Douglasie bei Manganüberschuss unter besonderer Berücksichtigung des Eisenhaushalts durch den Fachbereich Biologie der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz unter der Leitung von Prof. Dr. A. Wild angeregt. Die Untersuchungen wurden insbesondere im Rahmen einer Dissertation durchgeführt (Kaus-Thiel 1998). Untersucht wurde der Eisenhaushalt der Douglasien in einem geschädigten Douglasienbestand im Forstamt Adenau (FVA/FAWF Düngungsversuch Adenau, Abt. 84a, vgl. Kap. 7.1.1), einem nahegelegenen ungeschädigten Douglasienbestand (FA Adenau, Hochacht, Abt. 72c) und einem Douglasienbestand mit typischer Kalk-Eisenmangelchlorose auf einem Kalkstandort im damaligen Forstamt Irrel.
An den Nadeln symptomtragender und symptomfreier Bäume wurden neben Mineralstoffanalysen umfangreiche biochemische Untersuchungen (Chlorophyllgehalt, lösliches Fe, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Katalaseaktivität) und anatomische Untersuchungen mit dem Licht- und Elektronenmikroskop vorgenommen. Darüber hinaus erfolgten an den Probebäumen mykologische Untersuchungen zum Ausschluss von *Phomopsis pseudotsugae* als Verursacher des „Harzstickensymptoms" und Untersuchungen des Feinwurzelsystems und der Mykorrhiza zur weiteren Ursachenanalyse der Nährstoffstörungen, sowie Jahrringanalysen an Stammscheiben. Zudem wurden in einem Laborversuch in Hydrokultur angezogene Douglasiensämlinge unterschiedlichen Mangankonzentrationen in der Nährlösung ausgesetzt.
Bei den Mineralstoffanalysen zeigten symptomtragende Bäume in allen Nadeljahrgängen höhere Mangangehalte als symptomfreie Bäume im geschädigten Bestand und vor allem deutlich höhere Gehalte als im ungeschädigten Bestand. Die Nadeln des Referenzbestandes auf Kalk wiesen erwartungsgemäß nur verschwindend geringe Mn-Gehalte auf. Die Gehalte an Gesamt-Eisen waren an symptomtragenden Bäumen zwar geringer als bei symptomfreien Bäumen, sanken aber nicht in den Mangelbereich. Bei Magnesium zeigten symptomtragende Bäume in allen Nadeljahrgängen niedrigere Gehalte als symptomfreie Bäume im geschädigten Bestand und vor allem deutlich geringere Gehalte als im ungeschädigten Referenzbestand. Die Gehalte an Phosphor, Calcium und Kalium unterschieden sich zwischen den Varianten nur wenig. Bei Bor und Zink waren sehr geringe Gehalte auf dem Kalkstandort auffällig.
Die Gehalte an löslichem Eisen und vor allem an Fe^{3+} (nicht aber der Fe^{2+}-Gehalt) waren in den jüngeren Nadeljahrgängen bei den symptomtragenden Bäumen geringer als bei symptomfreien Bäumen und im Referenzbestand und lagen damit in ähnlicher Höhe wie die Bäume mit „klassischer" Eisenmangelchlorose auf dem Kalkstandort. Der Chlorophyllgehalt war auf dem Kalkstandort gefolgt von symptomtragenden Bäumen im geschädigten Bestand am niedrigsten. Die Katalase, als Beispiel für ein eisenabhängiges Enzym, zeigte bei symptomtragenden Bäumen im geschädigten Bestand die niedrigste und im ungeschädigten Referenzbestand die höchste Aktivität, wobei sich ein deutlicher Zusammenhang der Katalaseaktivi-

tät zum Gehalt an Gesamt-Eisen, löslichem Eisen und dreiwertigem Eisen ergab.
Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten an symptomtragenden Douglasien im Vergleich zur Referenzvariante ein reduziertes, stark aufgelockertes Thylakoidsystem nahezu ohne Granastapel und somit Veränderungen im Membransystem des Chloroplasten wie sie auch bei den Douglasien auf dem Kalkstandort zu beobachten waren. Die Röntgenmikroanalyse bestätigt die unterschiedlichen Mangangehalte in den Nadeln der verschiedenen Varianten. Das Mangan befindet sich nicht an der Oberfläche sondern im Inneren der Nadeln. Allerdings war entgegen den Erwartungen keine Mn-Anreicherung in bestimmten Geweben festzustellen.
Die Feinwurzeluntersuchungen an geschädigten und ungeschädigten Bäumen ergaben keinen Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen dem Wurzelzustand und der Schädigung. Die Wurzelspitzen waren in der Regel mykorrhiziert.
Die in Hydrokultur angezogenen Douglasiensämlinge reagierten auf hohe Mangankonzentrationen in der Nährlösung (1100 mg Mn l^{-1}) mit Spross- und Wurzeldeformationen, braunspitzigen bis braunfleckigen Nadeln, Ausbleichungen der jüngsten Nadeln bis hin zum Absterben der Nadeln im weiteren Versuchsverlauf und mit einer Verringerung des Spross-Wurzel-Verhältnisses. Die Mineralstoffanalysen der Sämlinge zeigten bei der Variante mit hoher Mangankonzentration in der Nährlösung einen Anstieg der Mangangehalte auf Werte, wie sie in älteren Nadeln in geschädigten Beständen gemessen werden, entgegen den Erwartungen erhöhte Gehalte an Gesamt-Eisen und einen deutlich reduzierten Phosphorgehalt.
In der Zusammenschau unterstützen die in der Dissertation von Kaus-Thiel (1998) dargelegten Befunde die Hypothese, dass die Douglasienschäden mit der in Kapitel 2 beschriebenen Symptomatik auf durch Manganüberschuss induzierte Nährstoffstörungen, insbesondere im Hinblick auf den Eisenhaushalt, beruhen. Da die Gesamteisengehalte vergleichsweise hoch sind, scheint die Hemmung der Aufnahme nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Vielmehr beeinflusst der Mn-Überschuss die Oxidationsstufen des Eisens und damit dessen Verfügbarkeit für die Pflanzen („induzierter Eisenmangel").

7 Düngungsversuche

Zur Überprüfung der Hypothese manganüberschussinduzierter Nährstoffmängel oder –ungleichgewichte und zur Ableitung möglicher Gegenmaßnahmen wurden 1989 in drei geschädigten Douglasienbeständen diagnostische Düngungsversuche angelegt. Für die Versuche wurden Bestände auf unterschiedlichen Standorten und mit unterschiedlicher Symptomatik ausgewählt.

Ein weiterer Düngungsversuch wurde 1998 im Rahmen einer Kooperation mit dem Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) eingerichtet. Dieser Versuch diente zur Überprüfung der Hypothese, dass die in geschädigten Douglasienbeständen zu beobachtenden Wuchsdeformationen durch Bor- oder Molybdänmangel ausgelöst werden (vgl. Kap. 2). Die Darlegungen zu diesem Versuch sind im Wesentlichen aus Bihl & Matzner (2000) entnommen.

7.1 Untersuchungsbestände und Methodik

7.1.1 Untersuchungsbestände und Standorte

Beim Versuchsbestand **Adenau** (101-Abt. 84a, Staatswald Revier Denn) handelt es sich um einen bei der Versuchsanlage 1989 ca. 37-jährigen Douglasienreinbestand unbekannter Provenienz mit einzelnen beigemischten Buchen und Traubeneichen auf einem steilen Mittelhang südlicher Exposition in einer Höhenlage von 420 bis 470 m über NN. Der Bestand stockt auf einer flachgründigen Braunerde aus unterdevonischen Tonschiefern (verm. Kaltenborner Schiefer) (Bodenprofilaufname siehe Anhang 1). Die chemischen Bodenuntersuchungen vor der Versuchsanlage zeigen pH-Werte um pH 4 im Aluminiumpufferbereich und einen Mangananteil am Austauscher von im Mittel 17 % der AKe im Ah-Horizont und 8 % im Bv-Horizont. Die Humusform ist ein feinhumusarmer Moder mit neigungsbedingten Skelettanteilen.

In diesem Bestand wurde das gesamte, in Kap. 2 beschriebene Symptomspektrum der „neuartigen" Douglasienerkrankung, insbesondere auch zum Teil sehr starker Harzfluss, Ausbleichung des jüngsten Nadeljahrgangs bei metallisch glänzender dunkelgrüner Färbung der älteren Nadeln und hexenbesenartige Triebbüschel beobachtet. Deutliche Schäden traten zum Zeitpunkt der Versuchsanlage an etwa einem Viertel der Bäume auf, einige Bäume waren absterbend oder bereits tot.

Der Versuchsbestand **Cochem** (108-Abt. 25 b (früher 48 d), Staatswald Revier Sommet) war bei der Versuchsanlage 1989 16 Jahre alt. Er stockt an einem mäßig nach Nordwesten geneigten Mittelhang in einer Höhenlage von 280 bis 300 m über NN auf einer mittelgründigen Braunerde aus Decklehm über unterdevonischen Tonschiefern. Die chemischen Bodenuntersuchungen vor der Versuchsanlage zeigen pH-Werte um 3,9 und einen Mangananteil am Austauscher von im Mittel 6 % der AKe in 0 – 20 cm Bodentiefe und 3 % in 20 – 40 cm Bodentiefe. Die Humusform ist ein mullartiger Moder. Trotz geringerer Jahresniederschlagssumme als am Standort Adenau (650 mm in Cochem, 750 mm in Adenau) ist die Wasserversorgung an diesem Standort merklich günstiger. Als Schadsymptome traten in diesem Bestand zum Zeitpunkt der Versuchsanlage deutliche Nadelvergilbungen und Frühfruktifikation, aber keine übermäßigen Nadelverluste, Harzfluss oder auffällige Wuchsanomalien auf. Bei der Versuchsanlage wurde angenommen, dass dieser Bestand am Beginn der Krankheitsentwicklung stand.
Der Bestand wurde im Jahr 1995 im Rahmen des rheinland-pfälzischen Bodenschutzkalkungsprogramms mit 3 t Dolomit je Hektar gekalkt.

Der Versuchsbestand **Hochspeyer** (318-Abt. III, 3c2, Gemeindewald Enkenbach-Alsenborn) ist ein bei Versuchsanlage 1989 16-jähriger Douglasienreinbestand auf einem schwach geneigten, nordwestexponierten Unterhang in einer Höhenlage von 300 bis 320 m über NN. Der Bestand stockt auf einer tiefgründigen podsoligen Braunerde aus Sanden des Mittleren Buntsandsteins – Trifels-Schichten. Bei 750 mm Jahresniederschlag dürfte

Abbildung 11

Anordnung der Düngungsparzellen im Versuchsbestand Adenau Abt. 84 a
0 = Kontrolle, 1 = P_2O_5, 2 = $MgSO_4$, 3 = $Ca(Mg)CO_3$, 4 = Fe-Chelat, 5 = KAS

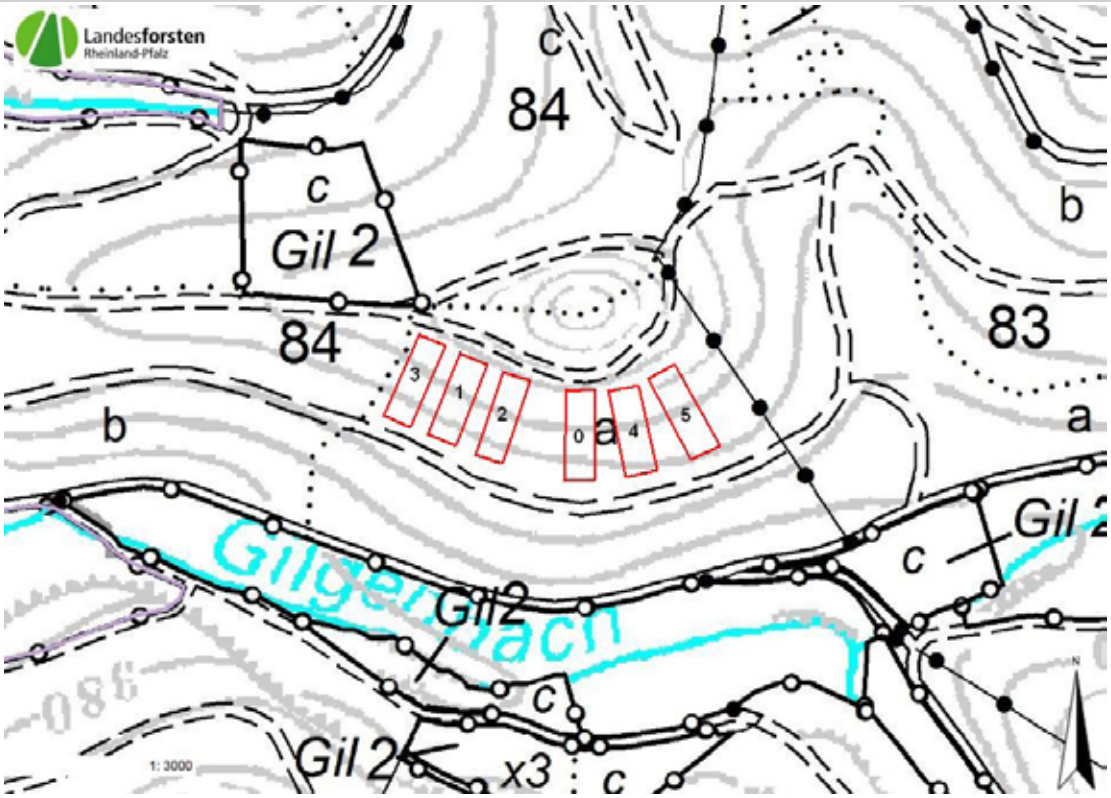


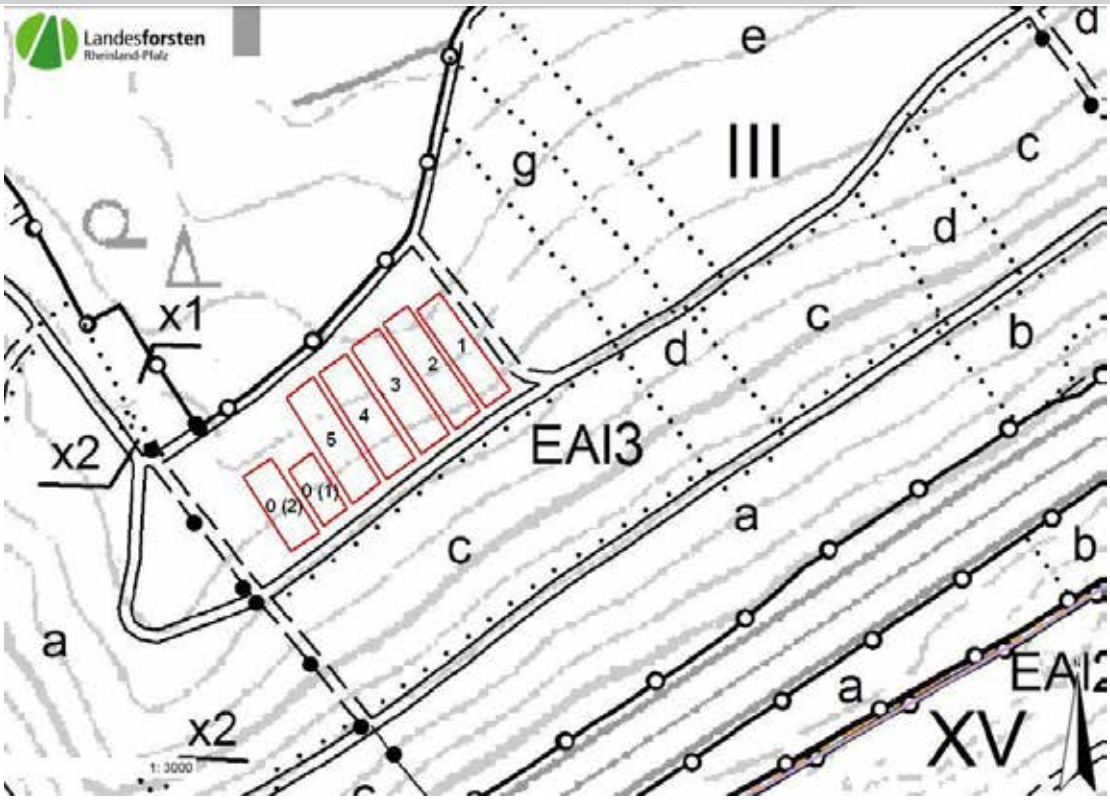
Abbildung 12

Anordnung der Düngungsparzellen im Versuchsbestand Cochem Abt. 25 b
0 = Kontrolle, 1 = $Ca(Mg)CO_3$, 2 = P_2O_5, 3 = KAS



Abbildung 13

Anordnung der Düngungsparzellen im Versuchsbestand Hochspeyer Abt. III $3c^2$
0 (1) = Kontrolle 1, 0 (2) = Kontrolle 2, 1 = $Ca(Mg)CO_3$, 2 = P_2O_5, 3 = $MgSO_4$, 4 = KAS, 5 = NPK-Voll



auf dem Schatthang die Wasserversorgung kein begrenzender Faktor sein. Die chemischen Bodenuntersuchungen vor der Versuchsanlage zeigen pH-Werte zwischen 3,2 und 3,5 im Ahe-Horizont, um pH 4 im Bvh-Horizont und um pH 4,5 im Bv-Horizont. Der Mangananteil am Austauscher liegt in allen Horizonten bei etwa 1 % der AKe. Die Humusform ist ein rohhumusartiger Moder bis Rohhumus. Als Schadsymptome traten zum Zeitpunkt der Versuchsanlage fahlgrüne Nadelverfärbungen, Nadelvergilbungen, teilweise Bräunung der älteren Nadeljahrgänge, mittlere bis starke Nadelverluste und verkürzte Nadel- und Triebausbildungen auf. Ausbleichungen des jüngsten Nadeljahrgangs, Harzfluss oder auffällige Wuchsanomalien wurden an diesem Standort dagegen nicht beobachtet.
Der Bestand wurde im Jahr 2002 im Rahmen des rheinland-pfälzischen Bodenschutzkalkungsprogramms mit 3 t Dolomit je Hektar gekalkt.

Der Versuchsbestand des Bor- und **Molybdän-Düngungsversuchs Irrel** (Gemeindewald Geichlingen, Abt. 2a[2]) war zu Versuchsbeginn 1998 13-15 Jahre alt. Der Bestand ist aus der Aufforstung einer Fichtenwindwurffläche entstanden. Er grenzt an Fettwiesen, die regelmäßig mit Gülle beaufschlagt werden. Der Bodentyp ist eine Braun-
erde aus Decklehm über Tonschiefer in Wechsellagerung mit Grauwacke der Unteremsstufe des Devons. Die Bodenart ist ein schluffiger bis toniger Lehm. Die Humusform variiert zwischen einem feinhumusarmen bis rohhumusartigen Moder.
Die Douglasien zeigen sehr häufig Störungen in der apikalen Dominanz. Oft ist der Gipfeltrieb verkrümmt oder verkümmert. Viele Kronen weisen Mehrtriebigkeit, Wirrwuchs und Verbuschungen auf. Zudem treten erhebliche Nadelchlorosen vornehmlich am zweiten Nadeljahrgang auf.

7.1.2 Düngungskonzept

Das Düngekonzept der Versuche Adenau, Hochspeyer und Cochem wurde gemeinsam mit der seinerzeit von Prof. Dr. H. A. Gussone geleiteten Arbeitsgruppe Forstdüngung Rheinland-Pfalz erarbeitet. Folgende Varianten wurden eingerichtet (vgl. Tabelle 17):

- Kontrolle (Nullfläche): unbehandelte Referenzfläche, keine Kalkung oder Düngung (Kürzel: **Kontrolle**)
- Kohlensaurer Magnesiumkalk (Adenau, Cochem: Herkunft Wellen mit 40 % $MgCO_3$-Anteil; Hochspeyer: Herkunft Hufgard mit 30 % $MgCO_3$-Anteil; Aufwandmenge: 6 t/ha (feingemahlen 0-0,9 mm) (Kürzel: **Ca(Mg) CO_3**).
  Mit dieser Variante sollte versucht werden, über pH-Wert-Anhebungen die Manganverfügbarkeit im Boden zu verringern und damit einen evtl. vorhandenen Manganüberschuss abzubauen. Zugleich war bei dieser Variante eine Verbesserung der Magnesiumversorgung zu erwarten.
- Cederan P 23 mit 23 % P_2O_5; Aufwandmenge: 780 kg/ha = 180 kg P_2O_5/ha (Kürzel: **P_2O_5**)
  Mit dieser Variante sollte ein gegebenenfalls vorhandener Phosphormangel beseitigt werden.
- Kieserit ($MgSO_4$) mit 27 % MgO; Aufwandmenge: 600 kg/ha = 160 kg MgO/ha (Kürzel: **$MgSO_4$**)
  Diese Variante wurde nur an den Standorten Adenau und Hochspeyer eingerichtet. Mit ihr sollte ein evtl. vorhandener Magnesiummangel beseitigt werden, ohne die Befunde durch Aufkalkungseffekte zu beeinflussen.
- Nitrophoska blau mit 12 % N, 12 % P_2O_5, 17 % K_2O und 2 % MgO; Aufwandmenge: 1000 kg/ha = 120 kg N/ha, 120 kg P_2O_5/ha, 170 kg K_2O/ha und 20 kg MgO/ha (Kürzel: **NPK**)
  Diese Variante wurde nur am Standort Hochspeyer eingerichtet, weil dort trotz ausreichender Wasserversorgung das außergewöhnlich schlechte Wachstum der Douglasien auf umfassende Nährstoffmängel schließen ließ.
- Fetrilon (Fe-Chelat) mit 13 % Fe; Aufwandmenge: 80 kg/ha = 10,5 kg Fe/ha (Kürzel: **Fe-Chelat**)
  Dieses Mittel wurde nur am Standort Adenau eingesetzt, da dort deutliche Ausbleichungen des jüngsten Nadeljahrganges auf Eisenmangel hinwiesen.
- Kalkammonsalpeter mit 27 % N, 10 % Ca; Aufwandmenge: Adenau und Hochspeyer 450 kg/ha = 120 kg N/ha, 45 kg Ca/ha, Cochem

Tabelle 17

Übersicht über die Düngungsvarianten der einzelnen Versuchsanlagen

Kürzel	Variante	Adenau	Cochem	Hochspeyer
Kontrolle	Kontrolle	keine Behandlung	keine Behandlung	keine Behandlung
$Ca(Mg)CO_3$	Kohlensaurer Magnesiumkalk	6 t/ha, Herkunft Wellen mit 40 % $MgCO_3$	6 t/ha, Herkunft Wellen mit 40 % $MgCO_3$	6 t/ha, Herkunft Wellen mit 30 % $MgCO_3$
P_2O_5	Cederan P 23 mit 23 % P_2O_5	780 kg/ha = 180 kg P_2O_5/ha	780 kg/ha = 180 kg P_2O_5/ha	780 kg/ha = 180 kg P_2O_5/ha
$MgSO_4$	Kieserit ($MgSO_4$) mit 27 % MgO	600 kg/ha = 160 kg MgO/ha	-	600 kg/ha = 160 kg MgO/ha
NPK	Nitrophoska blau mit 12 % N, 12 % P_2O_5, 17 % K_2O und 2 % MgO	-	-	1000 kg/ha = 120 kg N/ha, 120 kg P_2O_5/ha, 170 kg K_2O/ha und 20 kg MgO/ha
Fe-Chelat	Fetrilon (Fe-Chelat) mit 13 % Fe	80 kg/ha = 10,5 kg Fe/ha	-	-
KAS	Kalkammonsalpeter mit 27 % N, 10 % Ca	450 kg/ha = 120 kg N/ha, 45 kg Ca/ha	500 kg/ha = 135 kg N/ha, 50 kg Ca/ha	450 kg/ha = 120 kg N/ha, 45 kg Ca/ha

500 kg/ha = 135 kg N/ha, 50 kg Ca/ha, (Kürzel: **KAS**)

Die Stickstoffdüngung sollte durch ihre wachstumsfördernde Wirkung evtl. unterschwellig vorhandene Mineralstoffmängel durch „Verdünnungseffekte" verstärken, um diese besser diagnostizieren zu können.

Die Versuchsanlagen sind als Parzellenversuch eingerichtet. Die einzelnen Parzellen sind in Adenau (Abbildung 11) und Hochspeyer (Abbildung 13) 0,1 ha, in Cochem (Abbildung 12) 0,075 ha groß und durch unbehandelte Zwischenfelder voneinander abgegrenzt. Wegen der unzureichenden Größe der symptombehafteten Versuchsbestände konnten bei keiner Versuchsanlage Wiederholungen der jeweiligen Varianten eingerichtet werden. Der Kalk und die körnigen Düngemittel wurden im April 1989 gleichmäßig von Hand aus einer Säwanne, das Fetrilon in Wasser gelöst mit einer Rückenspritze ausgebracht.

Am B- und Mo-Düngungsversuch Irrel wurden folgende Varianten eingerichtet:

- Kontrolle (Nullfläche): unbehandelte Referenzfläche, keine Düngung (Kürzel: **Kontrolle**)
- Natriummolybdat; Aufwandmenge: 12.5 kg/ha (entspricht 5 kg Mo/ha) (Kürzel: **Mo**)
- Borax; Aufwandmenge: 23,5 kg/ha (entspricht 5 kg B/ha) (Kürzel: **B**)
- Rohrzucker; Aufwandmenge: 2000 kg/ha (Kürzel: **Zu**)

Mit der Bor- und Molybdändüngung sollte ein gegebenenfalls vorhandener Mangel an diesen Spurenelementen beseitigt und damit die mögliche Ursache der Wuchsdeformationen behoben werden. Die Zuckerzufuhr sollte über eine mikrobielle Immobilisierung die Stickstoffverfügbarkeit reduzieren.

Jede Variante wurde mit 6 Wiederholungen auf Parzellen mit 24 m^2 Größe eingerichtet. Der Zucker wurde trocken ausgestreut, die Düngemittel in Wasser gelöst mit einer Spritze und Flachdüse ausgebracht. Eine detailliertere Beschreibung der Versuchsanlage enthält Bihl & Matzner (2000).

7.1.3 Untersuchungen an den Versuchsanlagen

Untersuchungen Versuch Adenau

Vitalitätsaufnahmen erfolgten von Versuchsbeginn 1989 bis 1994 jährlich an 25, 1997 und 2001 an 20 sowie 2002 wieder an 25 markierten Stichprobebäumen je Parzelle. In den Jahren 2005, 2009 sowie 2011 - 2015 wurden alle Bäume der

jeweiligen Parzellen bonitiert (Vollaufnahme). Aufnahmeparameter waren Kronenverlichtung, Vergilbung, Harzsticken und die soziale Stellung (KRAFT-Klasse). Die Kronenbonituren erfolgten nach der Methodik der Waldzustandserfassungen (Engels et al. 2013). Zur Bewertung der Harzflusssymptome wurde ein Fotoschlüssel entwickelt (Foto 7, 8 und 9) und bei der Einwertung der Douglasien angewandt (Schröck und zum Hingste 2005, intern).

IRC-Luftbilder des Untersuchungsbestandes wurden in den Jahren 1987 bis 1992 im Maßstab 1:4000 insbesondere zur Überprüfung der Vergleichbarkeit der Versuchsparzellen zu Beginn der Untersuchungen angefertigt und hinsichtlich Kronenverlichtungsstufe und Vergilbungsstufe einzelbaumweise für alle Parzellen interpretiert.

Bodenchemische Untersuchungen erfolgten 1987 (vor Einrichtung des Versuchs, daher keine Differenzierung nach Parzellen, vgl. Kap. 4.1), 1994 und 2013. Bei der Untersuchung 1994 wurden auf jeder Parzelle der Ah- und der Bv-Horizont beprobt. Für jeden Horizont wurden drei Einzelproben gewonnen und als Mischprobe analysiert. Im Jahr 2013 wurde die Beprobung auf die Varianten Null, $Ca(Mg)CO_3$ und P_2O_5 beschränkt. Je Parzelle wurden jeweils 6 Bohrungen mit dem Murach`schen Bohrer durchgeführt. Jeweils 2 Proben aus Oberhang, Mittelhang und Unterhang wurden zu einer Mischprobe zusammengefasst. Beprobt wurden die Humusauflage L+Of+Oh) und die Mineralboden-Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-30 und 30-60 cm. Das Analysespektrum umfasst $pH(_{H2O;\ CaCl2;\ KCl})$, C_{org}, N_{ges} und austauschbare Kationen (H, Na, K, Ca, Mg, Al, Mn, Fe), in der Humusauflage auch P, K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn, Cu, Pb und Cd im Königswasseraufschluss. Die Verfahren der Beprobung, Probenaufbereitung und Analytik entsprechen der Verfahrensweise der rheinland-pfälzischen Waldbodenzustandserhebung (BZE II) und sind in Block & Gauer (2012) eingehend beschrieben.

Sickerwasseruntersuchungen erfolgten im Frühjahr 2013. Die Beprobungen beschränkten sich auf die Varianten Null, $Ca(Mg)CO_3$ und P_2O_5. Die Proben wurden mit jeweils 10 keramischen Saugkerzen je Parzelle in 30 cm Mineralbodentiefe gewonnen. Nach einer Vorlaufphase zur Konditionierung mit einem Verwerfen der Proben wurden die je Saugkerze über etwa zwei Monate gewonnenen Proben separat auf die Komponenten pH, DOC, C_{org}, NO_3-N, NH_4-N, Cl, SO_4-S, PO_4-P, K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Fe und Zn analysiert.

Nadelanalysen wurden 1987[1)] (vor Einrichtung des Versuchs, daher keine Differenzierung nach Parzellen, vgl. Kap. 4.1), 1989, 1993, 2002 und 2012 durchgeführt. Die Verfahren der Probenaufbereitung und Analytik entsprechen der Verfahrensweise im rheinland-pfälzischen Forstlichen Umweltmonitoring und sind eingehend in Greve et al. (2016) beschrieben. Im Jahr 1989 wurden jeweils drei Bäume aus dem ± 7.Quirl mit und ohne Symptome je Parzelle beprobt. 1993 erfolgte eine Hubschrauberbeprobung, wobei je Parzelle eine Mischprobe aus jeweils 3 Bäumen „symptombehaftet" bzw. „symptomfrei" gewonnen wurde. Die Proben wurden dabei aus dem ± 4. Quirl der Douglasien gewonnen. 2002 wurden nur symptomfreie Douglasien aus dem 7.Quirl und zwar 3 je Parzelle beprobt. Es wurde jeweils der 1. und 3. Nadeljahrgang analysiert. Im Jahr 2012 wurde die Beprobung auf die Varianten Null, $Ca(Mg)CO_3$ und P_2O_5 beschränkt. Beprobt wurden jeweils 9 Bäume je Variante ohne Unterteilung nach dem Vitalitätszustand. Die Zweige aus dem ± 7.Quirl von je 3 Bäumen wurden zu einer Mischprobe zusammengefasst. Analysiert wurden der 1. 2. und 3. Nadeljahrgang. Das Analysespektrum der 2012 gewonnenen Proben umfasst C, N, P, S, K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn, Cu, Pb, B, Mo, Ni, Cr, As, Cd und U.

In Ergängzung zu den Nadelanalysen wurden an der Versuchsanlage Adenau auch die **Elementge-**

[1)] Die Nadelproben wurden grundsätzlich in der Vegetationsruhe gewonnen. Unabhängig vom Kalendermonat der Beprobung (Nov. bis März) wird als Probenahmejahr das Jahr angegeben, in dem der jeweils jüngste Nadeljahrgang ausgetrieben ist.

halte in verschiedenen Baumkompartimenten jeweils auf den Varianten Null, $Ca(Mg)CO_3$ und P_2O_5 untersucht. Beprobt wurden im Februar 2013 jeweils 5 Bäume je Parzelle. Untersucht wurden die Gehalte der Elemente N, P, S, K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn, Cu, Pb, B, Mo in den Kompartimenten:

- Nadeln (Mischprobe über die gesamte Baumkrone, ohne Unterteilung in Nadeljahrgänge)
- Zweige (entnadelte Triebe)
- Äste (mit Rinde)
- Rinde (am Derbholz)
- Splintholz
- Kernholz.

Mit Hilfe von SILVA wurden die Biomassen der einzelnen Kompartimente geschätzt und die Elementvorräte in der oberirdischen Baumbiomasse berechnet. Eine differenzierte Beschreibung der Probenahme, Probenaufbereitung, Analytik und Schätzung der Biomasse- und Elementvorräte enthält Pretzsch et al. (2014).

Zur Prüfung, ob die auffallende Ausbleichung des jüngsten Nadeljahrgangs an vielen erkrankten Douglasien tatsächlich auf Eisenmangel zurückzuführen ist, wurde im Versuchsbestand Adenau ein spezieller **„Eisen-Stammdüngungsversuch"** durchgeführt. Hierzu wurde an neun außerhalb der Düngungsparzellen stockenden Douglasien mit typischen Schadsymptomen ein Eisenpräparat unmittelbar in den Stamm appliziert. Hierbei handelt es sich um sogenannte Promi-Ferro-Kapseln der spanischen Firma Promisol S. A., Lerida. Dieses Präparat wurde zur Beseitigung von Eisenchlorosen an Obstbäumen entwickelt. Die Zusammensetzung wurde von der Firma nicht preisgegeben. Nach Herstellerangaben soll es etwa zwei bis drei Jahre lang kontrolliert und kontinuierlich Eisen in den Saftstrom der Pflanzen abgeben. Hierbei werde der Saft-pH-Wert und das Redox-Gleichgewicht positiv beeinflusst und damit der Eisentransport in den Pflanzen verbessert. An den behandelten Bäumen und an nicht behandelten Vergleichsbäumen mit vergleichbarer Symptomatik erfolgten an drei aufeinanderfolgenden Jahren nach der Behandlung Ende Mai 1994 Aufnahmen der Kronenverlichtung, der Vergilbung und weiterer Schadsymptome.

Ertragskundliche Aufnahmen (BHD und Baumhöhen) wurden für alle Versuchsparzellen im Herbst 2013 durchgeführt. Die Messung des Brusthöhendurchmessers erfolgte an jeweils allen Bäumen der jeweiligen Parzelle, die Höhenmessung an jeweils 30 Stichprobenbäumen.

Genetische Untersuchungen

Die verschiedenen Douglasienherkünfte können sehr unterschiedlich auf Stresseinflüsse reagieren (Leinemann 1998, vgl. Kap. 8.2). Daher ist es für die Auswertung des Düngeversuches von Bedeutung zu wissen, welche Douglasien-Provenienz auf der Fläche angebaut worden war, oder ob es sich um eine Mischung handelt und wie diese gegebenenfalls auf der Fläche verteilt ist. Schon der optische Eindruck des Bestandes mit sehr unterschiedlichen Wuchsformen deutete auf verschiedene Herkünfte hin. Allerdings waren in den Forstamtsunterlagen keine verlässlichen Angaben zur Herkunft der Douglasien zu finden. Auch ist die Fläche bei der Bestandesbegründung mehrfach nachgebessert worden, wobei vermutlich jeweils Pflanzen unterschiedlicher Herkunft verwendet wurden. Daher wurden an der Versuchsanlage mehrere, dem Methodenfortschritt folgende genetische Untersuchungen durchgeführt:

In 2005 erfolgte eine genetische Charakterisierung auf Bestandesebene mittels Isoenzym-Genmarkern (Hosius & Leinemann 2005). Hierbei wurden sämtliche Bäume auf der Nullfläche und den fünf einzelnen Düngeparzellen (37 - 48 Bäume je Parzelle) sowie zusätzlich 251 am oberen und unteren Rand der Fläche stockende Bäume durch Abschießen von Ästen mit Schrot beprobt und mit Hilfe von Isoenzymen genetisch untersucht. Alle beprobten Bäume wurden auf Harzfluss und Kronenzustand bonitiert. Die Differenzierung in Inlands- und Küstenrasse erfolgt anhand genetischer Variation an bestimmten Genorten, beispielsweise des Genortes 6-PGDH-A, im Vergleich zu Referenzstrukturen aus Beständen bekannten Ursprungs (Leinemann 1998).

Vor wenigen Jahren wurden Methoden zur Unterscheidung der Rassen mittels DNA-Marker entwickelt (Gugger et al. 2010). Diese Verfahren erlauben eine Rassenzuordnung nicht nur auf Bestandesebene, sondern auch auf Einzelbaumebene.

Im Jahr 2013 wurde der Versuchsbestand erneut beprobt und am Bayerischen Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP) eine differenzierte, auf die Bestimmung der Varietät des Einzelbaumes ausgerichtete genetische Analyse anhand eines Mitochondrienmarkers und von vier Kernmikrosatelliten-Genorten durchgeführt (Fussi & Konnert 2013). Mit dem Mitochondrienmarker werden die mütterlicherseits vererbten Anteile eines Baumes bestimmt (sog. „Mitotypen"). Mit Hilfe von Kernmikrosatelliten, die über beide Elternteile vererbt werden, können auch Hybridisierungseffekte (Vermischung von Genpools der beiden Varietäten) nachgewiesen werden. Insgesamt wurden Zweigproben von 27 Einzelbäumen untersucht. Diese stammten von je 9 Bäumen der Parzellen Nullfläche, $Ca(Mg)CO_3$ und P_2O_5. Als Referenzen zur Varietätenzuordnung dienten bereits am ASP untersuchte Vorkommen der Küstendouglasie, der „grauen" Douglasie und der „blauen" Douglasie mit bekanntem Ursprung.

Untersuchungen Versuch Hochspeyer
Vitalitätsaufnahmen erfolgten von Versuchsbeginn 1989 bis 1993 jährlich an 30 markierten Stichprobebäumen je Parzelle.
IRC-Luftbilder des Untersuchungsbestandes wurden in den Jahren 1989 bis 1992 jährlich angefertigt.
Bodenchemische Untersuchungen erfolgten 1988 (vor Einrichtung des Versuchs, daher keine Differenzierung nach Parzellen, vgl. Kap. 4.1).
Nadelanalysen wurden 1987 (vor Einrichtung des Versuchs, daher keine Differenzierung nach Parzellen, vgl. Kap. 4.1), 1989, 1991 und 2012 durchgeführt.
Ertragskundliche Aufnahmen (BHD und Baumhöhen) wurden im Oktober 2013 durchgeführt.
Im Übrigen entsprechen die Untersuchungsmodalitäten der für den Versuch Adenau beschriebenen Vorgehensweise.

Untersuchungen Versuch Cochem
Vitalitätsaufnahmen erfolgten von Versuchsbeginn 1989 bis 1993 jährlich sowie 1997 an 25 markierten Stichprobenbäumen je Parzelle.
IRC-Luftbilder des Untersuchungsbestandes wurden in den Jahren 1989 bis 1992 jährlich angefertigt.
Bodenchemische Untersuchungen erfolgten 1988 (vor Einrichtung des Versuchs, daher keine Differenzierung nach Parzellen, vgl. Kap. 4.1).
Nadelanalysen wurden 1987 (vor Einrichtung des Versuchs, daher keine Differenzierung nach Parzellen, vgl. Kap. 4.1), 1989, 1992 und 2012 durchgeführt.
Ertragskundliche Aufnahmen (BHD und Baumhöhen) wurden im Februar und März 2014 durchgeführt.
Im Übrigen entsprechen die Untersuchungsmodalitäten der für den Versuch Adenau beschriebenen Vorgehensweise.

Untersuchungen B- und Mo-Versuch Irrel
Am Düngungsversuch Irrel wurden an je Variante 48 Douglasien vor der Düngung im April 1998 und ein Jahr nach der Düngung im September 1999 eingehende **Kronenzustandsbonituren** und Fotodokumentationen durchgeführt. Insbesondere wurden die Ausbildung des aktuellen Gipfeltriebs und des vorjährigen Haupttriebs auf Krummwuchs oder Mehrtriebigkeit angesprochen und auch Verfärbungen rezenter und vorjähriger Nadeln bonitiert.

Auf jeder Parzelle wurden 3 **Boden**bohrungen (18 je Variante) durchgeführt und Humus- und Mineralbodenproben nach BZE-Standard gewonnen. Analysiert wurden pH, C_{ges}, N_{ges}, Gehalte an P, K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn, Cu, Mo, B, Pb und Cd im Salpetersäuredruckaufschluss, austauschbare Kationen (H, Na, K, Ca, Mg, Al, Mn, Fe) und Mo, Mn, Fe, Zn, Cu und Cd im Oxalataufschluss sowie B, Nitrat und Ammonium im Heißwasseraufschluss.
Nadelanalysen auf P, K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn, Cu, Mo, B, Pb und Cd im Salpetersäuredruckaufschluss wurden an Proben des 1. und 2. Nadeljahrgangs an Zweigen des 4. oder 5. Quirls von jeweils 3 Douglasien je Parzelle durchgeführt.
Darüber hinaus erfolgten **Streuabbauversuche** mit 81 Minikontainerstäben je Variante mit unterschiedlicher Maschenweite (vgl. Eisenbeis et al. 1996).
Eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungsmethodik enthält Bihl & Matzner (2000).

Tabelle 18

Bodenanalysebefunde des Düngeversuchs Adenau; Probenahme 1994 - 5 Jahre nach der Düngung; C und N in %, AKe und entsprechende Kationen in $\mu mol_c/g$

		Nullfläche		$MgSO_4$		Ca(Mg) CO_3		P_2O_5		Fe-Chelat		KAS	
		Ah	Bv	Ah	Bv	Ah	Bv	Ah	Bv	Ah	Bv	Ah	Bv
pH(H_2O)	von	3,5	3,6	3,5	3,8	4,6	3,7	3,3	3,7	3,5	3,6	3,5	3,6
	bis	3,7	3,7	3,7	3,9	5,3	3,8	3,6	3,7	3,7	3,8	3,6	3,7
C [%]	MW	5,1	1,5	5,7	1,4	4,8	1,8	4,4	1,8	5,0	1,5	4,6	1,7
	STD	1,6	0,2	0,2	0,4	0,5	0,3	0,5	0,3	0,6	0,3	0,7	0,2
N [%]	MW	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1
	STD	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
C/N	MW	19	15	22	20	20	18	20	18	21	16	20	17
	STD	1	1	2	3	2	2	1	1	2	2	1	1
Ake	MW	84	59	86	45	113	54	76	54	75	48	72	48
[$\mu mol_c/g$]	STD	13	5	7	4	29	2	3	12	4	2	8	6
Na	MW	1,5	1,4	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
[$\mu mol_c/g$]	STD	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
K	MW	3,0	1,6	2,5	1,8	3,1	1,7	2,9	1,7	3,5	1,9	2,8	1,6
[$\mu mol_c/g$]	STD	0,5	0,0	0,5	0,6	1,1	0,4	0,3	0,5	0,4	0,6	0,8	0,2
Ca	MW	24,8	3,4	14,5	2,3	67,5	5,1	20,8	5,1	18,3	2,6	14,6	2,4
[$\mu mol_c/g$]	STD	10,6	1,0	2,5	0,2	21,5	2,1	0,9	4,4	3,8	0,5	6,2	0,9
Mg	MW	3,9	1,1	3,1	1,1	35,8	4,1	2,5	4,1	2,7	0,9	1,7	0,7
[$\mu mol_c/g$]	STD	1,9	0,1	0,5	0,2	7,9	1,3	0,2	0,6	0,5	0,0	0,4	0,2
H	MW	5,9	1,8	5,3	1,1	0,0	1,2	8,5	1,2	4,8	1,6	4,9	1,9
[$\mu mol_c/g$]	STD	1,8	0,3	1,9	0,7	0,0	0,4	4,2	3,3	1,9	0,3	0,2	0,9
Fe	MW	0,4	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	0,3	0,2	0,2	0,0
[$\mu mol_c/g$]	STD	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4	0,2	0,2	0,0	0,1
Mn	MW	10,0	1,7	9,3	1,2	3,6	1,4	5,8	1,4	12,3	2,2	9,3	1,6
[$\mu mol_c/g$]	STD	4,7	0,3	1,2	0,2	0,9	0,4	1,2	1,4	2,4	0,5	2,7	0,3
Al	MW	35	48	49	36	2	39	33	39	32	37	38	38
[$\mu mol_c/g$]	STD	6	3	8	4	2	2	4	10	6	2	6	5

Tabelle 19

Bodenanalysebefunde des Düngeversuchs Adenau; Probenahme 2013 - 24 Jahre nach der Düngung; C und N in %, P in mg/kg, AKe und entsprechende Kationen in µmol$_c$/g (O = Oberhang, M = Mittelhang, U = Unterhang) H = Humusauflage, 1 = 0-5, 2 = 5-10, 3 = 10-30, 4 = 30-60

	Position	Kontrolle					$Ca(Mg)CO_3$					P_2O_5				
		H	1*	2*	3*	4*	H	1*	2*	3*	4*	H	1*	2*	3*	4*
pH(H_2O)	O	4,87	4,60	4,50	4,34	4,45	5,20	5,03	4,90	4,63	4,62	4,91	4,44	4,35	4,40	4,44
	M	5,18	4,70	4,55	4,52	4,53	5,71	5,50	5,06	4,70	4,75	4,92	4,49	4,28	4,39	4,45
	U	5,24	4,83	4,56	4,51	4,48	4,83	4,45	4,44	4,39	4,51	5,16	4,44	4,19	4,12	4,13
pH($CaCl_2$)	O	4,10	3,92	3,74	3,75	3,80	4,58	4,39	4,10	3,81	3,80	4,33	3,75	3,58	3,64	3,72
	M	4,47	4,03	3,79	3,74	3,81	5,05	4,85	4,21	3,85	3,96	4,24	3,75	3,53	3,67	3,82
	U	4,55	4,10	3,79	3,82	3,82	4,17	3,78	3,68	3,67	3,80	4,53	3,74	3,45	3,52	3,53
pH(KCl)	O	3,83	3,69	3,60	3,60	3,70	4,48	4,12	3,75	3,67	3,77	4,12	3,49	3,40	3,48	3,56
	M	4,25	3,77	3,62	3,68	3,73	4,90	4,72	3,83	3,67	3,75	4,10	3,56	3,40	3,55	3,71
	U	4,39	3,85	3,64	3,69	3,70	3,97	3,53	3,49	3,49	3,67	4,36	3,55	3,36	3,44	3,48
C_{org} [%]	O	10,3	4,26	2,49	1,48	1,16	16,4	4,38	2,71	1,52	0,49	19,0	4,90	2,92	2,30	1,46
	M	23,9	4,98	2,59	1,83	1,25	13,6	3,64	2,44	1,51	1,00	22,7	4,29	2,38	1,90	1,67
	U	23,1	4,79	2,32	1,58	0,99	21,3	5,96	2,36	1,41	0,93	19,7	4,60	1,97	1,70	0,86
N [%]	O	0,51	2,26	0,16	0,11	0,11	0,74	0,27	0,17	0,10	0,07	0,83	0,28	0,17	0,13	0,11
	M	1,14	0,31	0,17	0,13	0,11	0,65	0,23	0,16	0,11	0,09	1,07	0,27	0,16	0,15	0,14
	U	1,05	0,29	0,18	0,14	0,11	0,94	0,36	0,16	0,11	0,09	0,94	0,32	0,16	0,15	0,11
P	O	652					604					681				
[mg/kg]	M	933					576					946				
	U	900					753					806				
AKe H^+	O		4,72	4,39	2,94	2,59		1,14	2,76	2,26	1,69		7,38	7,14	4,69	2,90
[µmol$_c$/g]	M		3,25	3,69	2,80	2,26		0,05	2,06	2,93	1,92		6,41	7,43	4,25	2,69
	U		2,82	3,62	2,90	2,37		7,45	6,07	3,19	1,87		6,85	7,16	4,24	3,20
AKe Ca	O	53,40	20,30	6,62	1,56	2,80	146,0	57,40	24,00	6,67	2,32	117,0	29,00	10,80	5,39	3,88
[µmol$_c$/g]	M	167,0	31,10	6,94	2,47	2,10	159,0	71,60	20,40	4,67	5,42	197,0	30,60	9,18	8,42	9,32
	U	196,0	29,10	5,32	2,05	2,01	120,0	48,20	16,10	3,78	4,69	123,0	29,90	4,99	1,42	1,36
AKe Mg	O	6,02	2,66	1,28	0,80	0,93	21,50	9,90	5,90	2,99	1,85	14,50	4,41	1,99	1,13	0,92
[µmol$_c$/g]	M	25,40	4,73	1,60	1,00	1,30	31,80	24,20	11,60	3,81	3,48	23,80	4,11	1,77	1,76	2,20
	U	26,40	5,76	2,09	1,27	2,74	15,60	7,88	5,10	1,96	2,30	18,60	4,65	1,38	0,92	1,28
AKe K	O	7,03	3,16	1,87	1,31	1,47	12,10	2,99	2,04	1,49	0,50	11,60	2,96	1,86	1,41	1,45
[µmol$_c$/g]	M	19,90	4,30	2,46	1,74	1,76	12,80	3,12	1,74	1,11	1,17	17,80	3,73	2,19	2,18	2,50
	U	16,50	3,38	2,06	1,72	1,63	13,20	3,20	1,96	1,29	1,21	18,00	3,37	1,68	1,60	1,43
AKe Na	O	0,65	0,40	0,30	0,50	0,58	1,05	0,31	0,25	0,26	0,67	0,84	0,37	0,32	0,35	0,49
[µmol$_c$/g]	M	1,01	0,66	0,52	0,58	0,60	1,12	0,38	0,37	0,37	0,35	1,07	0,31	0,41	0,51	0,57
	U	0,93	0,34	0,36	0,34	0,47	1,23	0,36	0,29	0,32	0,36	1,19	0,33	0,34	0,52	0,70
AKe Al	O	16,0	32,60	49,80	53,70	46,80	3,04	5,80	24,70	36,30	25,40	6,51	24,40	43,50	51,10	43,40
[µmol$_c$/g]	M	2,96	22,80	42,50	41,70	36,60	0,98	0,70	23,40	36,60	28,10	4,05	21,80	39,70	36,50	33,00
	U	2,27	22,70	44,20	43,60	38,00	6,72	18,10	29,10	43,30	35,00	4,38	27,50	50,90	54,50	52,70
AKe Mn	O	31,40	14,00	3,80	1,78	2,81	34,60	14,50	5,78	1,39	0,66	46,00	11,60	3,77	2,13	3,19
[µmol$_c$/g]	M	72,50	21,60	6,04	5,32	5,37	24,50	6,61	3,49	1,70	1,86	73,10	10,80	2,16	3,67	3,22
	U	66,30	16,40	6,40	5,00	5,83	45,10	11,20	2,70	1,09	2,28	48,60	13,80	1,69	1,03	0,88
AKe Fe	O	0,18	0,16	0,27	0,15	0,07	0,08	0,08	0,19	0,64	0,22	0,24	0,35	0,49	0,29	0,21
[µmol$_c$/g]	M	0,10	0,22	0,23	0,16	0,03	0,10	0,04	0,12	0,11	0,13	0,25	0,35	0,86	0,28	0,19
	U	0,09	0,17	0,18	0,06	0,06	0,18	0,28	0,33	0,26	0,35	0,18	0,34	0,85	0,56	0,24
Basen-	O		34	15	7	10		77	49	22	16		46	21	12	12
sättigung	M		46	18	10	12		93	54	19	25		50	21	22	27
[%]	U		48	15	9	13		62	38	13	18		44	12	7	8

Tabelle 20

Befunde der Sickerwasseranalysen aus 30 cm Mineralbodentiefe von drei Parzellen des Düngungsversuchs Adenau; Mittelwerte und Standardabweichung von 10 Saugkerzen (zwei Probenahmen im Juni 2013)

		Nullfläche	$Ca(Mg)CO_3$	P_2O_5
pH	von	4,07	4,07	3,83
	bis	4,76	4,57	4,11
DOC	MW	49,0	58,5	105,7
	STA	18,2	37,4	14,5
Cl	MW	23,4	39,7	27,7
	STA	12,5	21,9	17,6
NO_3-N	MW	2,9	12,1	3,1
	STA	2,8	6,0	2,1
NH_4-N	MW	0,7	0,3	0,5
	STA	0,9	0,2	0,7
N_{org}	MW	1,5	1,4	2,8
	STA	0,6	0,9	0,5
SO_4-S	MW	11,6	18,6	12,8
	STA	5,0	9,9	9,4
PO_4-P	MW	0,013	0,020	0,038
	STA	0,009	0,000	0,019
Na	MW	12,0	21,0	14,0
	STA	6,5	9,5	7,2
K	MW	2,8	2,1	5,7
	STA	1,3	0,4	0,9
Ca	MW	5,9	9,5	11,3
	STA	2,5	6,0	3,8
Mg	MW	4,0	19,2	4,6
	STA	2,1	8,7	2,7
Fe	MW	0,2	0,2	0,7
	STA	0,1	0,2	0,4
Al	MW	3,6	3,6	6,3
	STA	2,2	2,4	4,5
Mn	MW	6,1	3,8	4,3
	STA	3,9	2,2	2,0
Zn	MW	0,4	0,4	0,3
	STA	0,2	0,1	0,1

7.2 Ergebnisse der Düngungsversuche

7.2.1 Befunde Versuch Adenau

Bodenuntersuchungen

Am Standort Adenau zeigt die **Dolomitkalkung** (Variante $Ca(Mg)CO_3$) den deutlichsten Effekt auf den chemischen Bodenzustand. Bereits bei der Untersuchung im Jahr 1994 - 5 Jahre nach der Kalkung - sind im Ah-Horizont der gekalkten Parzelle der pH-Wert sowie die austauschbaren Gehalte an Magnesium und Calcium gegenüber der unbehandelten Parzelle deutlich erhöht und die Gehalte an austauschbarem Aluminium, Eisen und Protonen und auch an austauschbarem Mangan verringert (Tabelle 18). Im Jahr 2013 – 24 Jahre nach der Kalkung – ist die Wirkung tiefer in den Mineralboden fortgeschritten (Tabelle 19). Mäßige Effekte in Form einer Verringerung der Kationsäurebelegung der Austauscher und einer Erhöhung der Basensättigung treten bis in die Tiefenstufe 30 bis 60 cm auf. Die pH-Werte sind auf der gekalkten Fläche auch im Oberboden nur mäßig erhöht und verbleiben im Bereich hoher Manganmobilität. Auch auf der gekalkten Parzelle ist die Mangansättigung mit 2 bis 16 % der Kationenaustauschkapazität noch vergleichsweise hoch.

Bei den anderen Düngungsvarianten ergaben sich keine auffälligen Veränderungen in der Bodenchemie. Bemerkenswert ist, dass bei der Phosphordüngungsvariante (P_2O_5) 24 Jahre nach der Düngung keine signifikant erhöhten P-Gehalte in der Humusauflage (mehr) festzustellen sind (Tabelle 19). Die P-Düngungsparzelle ist etwas stärker versauert als die Nullparzelle (pH-Werte, H^+, Fe^{+++}, vgl. auch Sickerwasseranalysen). Ob dies mit der Phosphordüngung zusammenhängt oder diese Fläche schon vor der Düngung stärker versauert war, ist unklar.

Sickerwasseranalysen

Die Untersuchungen aus dem Frühjahr 2013 zeigen einen deutlichen Effekt der Dolomitkalkung auf die Elementgehalte im Sickerwasser aus 30 cm Mineralbodentiefe (Tabelle 20). So liegt der Mittelwert der Magnesiumkonzentration um mehr als das Vierfache über den Mittelwerten der Nullfläche und der P-Düngungsfläche. Allerdings ist auch die Nitratkonzentration auf der gekalkten Parzelle gleichermaßen angestiegen. Der Mittelwert des Mangangehalts ist niedriger als auf den anderen beiden Parzellen, allerdings streuen die Werte in einem weiten Rahmen. Auf der unbehandelten Nullfläche liegt der Mn-Anteil an der Kationenäquivalentsumme zwischen 4 und 18 %, der Mg- Anteil zwischen 12 und 26 %; auf der Dolomitkalkungsparzelle variiert der Mn-Anteil zwischen 2 und 6 %, der Mg-Anteil zwischen 35 und 47 %.

Auf der mit Phosphat gedüngten Parzelle ist der (allerdings sehr geringe) Phosphorgehalt im Sickerwasser höher als auf den anderen beiden Parzellen. Merklich höher sind hier auch die Fe- und Al-Gehalte bei vergleichsweise niedrigen pH-Werten. Auffällig sind die an den Proben dieser Fläche ermittelten hohen Konzentrationen an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC). Dies deutet auf einen verstärkten Humusumsatz hin.

Nadelanalysen

Die umfangreichen Nadelanalysen im Versuch Adenau belegen sehr eindrucksvoll den hohen Manganüberschuss in diesem Ökosystem. Auf der unbehandelten Kontrollparzelle variieren die Mn-Gehalte bei Individuen mit Schadsymptomen zwischen 5,04 und 7,02 mg/g im ersten Nadeljahrgang (Tabelle 21) und zwischen 8,36 und 12,63 mg/g im dritten Nadeljahrgang. Die ungeschädigten Douglasien weisen niedrigere Mangangehalte auf, die in den fünf Beprobungsjahren von 3,47 bis 5,25 mg/g variieren und damit trotz nicht erkennbarer Schadsymptome in dem als kritisch angesehen Bereich des Mangangehalts von >3,8 mg/g liegen (vgl. Kap 4.1.2).

Auf der Dolomitkalkungsparzelle sind die Mangangehalte 2002 (13 Jahre nach der Kalkung) und selbst 2012, 23 Jahre nach der Kalkung, in beiden Nadeljahrgängen gegenüber der Nullfläche und den anderen Düngungsvarianten merklich reduziert, liegen aber mit ca. 2000 ppm Mn im ersten und ca. 4000 ppm im dritten Nadeljahrgang nach wie vor hoch (Abbildung 14). Dies dürfte durch die geringeren Mn Konzentrationen im Sickerwasser bedingt sein.

Interessant ist die Reduzierung der Mangangehalte bei den geschädigten Individuen der Phosphordüngungsparzelle kurz nach der Düngung in den Jahren 1989 und 1993. Dies könnte durch die

von Ducić & Polle (2006) beschriebene Fähigkeit der Douglasie, Mangan zusammen mit Phosphor in der Wurzel einzulagern bedingt sein (vgl. Kap. 4.1.2).
Die Douglasien der mit Magnesiumsulfat (Kieserit) gedüngten Variante weisen 1989, 1993 und 2002 die höchsten Mangangehalte im ersten und dritten Nadeljahrgang auf (Tabelle 21). Dies könnte durch die erhöhte Säurebelastung durch die Applikation des sulfatisch gebundenen Düngemittels hervorgerufen werden (vgl. Greve 2015, S. 151). Eine höhere Pufferung der Säurebelastung durch Manganoxide würde zu einer Zunahme der Manganfreisetzung und damit auch zu einer erhöhten Manganaufnahme des Bestandes führen.
Die Stickstoffversorgung ist – bewertet anhand der ernährungskundlichen Grenzwerte – bei allen Varianten zumeist ausreichend bis optimal. Auch auf der Kalkammonsalpeter-Parzelle wurden die Stickstoffgehalte trotz der Stickstoffdüngung offenbar nicht beeinflusst. Auffallend sind die hohen Stickstoffgehalte in den Nadeln der Dolomitkalkungsvariante, die in den Jahren 2002 und 2012 insbesondere im dritten Nadeljahrgang deutlich über den Konzentrationen der anderen Varianten liegen.

Die Sickerwasseranalysen zeigen erhöhte Nitrat-Konzentrationen in 30 cm Tiefe, was den Schluss nahelegt, dass durch die Kalkung die Nitrifikation angeregt wird. Dadurch könnten die Bäume einen höheren Anteil ihres Stickstoffbedarfs durch Nitrat statt durch Ammonium decken, entweder weil nicht mehr genug Ammonium zur Verfügung steht oder weil die Douglasie eine Präferenz für einen höheren Nitratanteil bei der Stickstoffernährung aufweist. In Topfversuchen zeigt die Douglasie eine Präferenz für eine gemischte Stickstoffernährung und ähnelt dabei der Fichte (Evers 1964). Evers (1964) führt diese Präferenz auf einen ausgeglicheneren Kationen-Anionen-Haushalt der Pflanze zurück und bezieht sich auf die Arbeit von De Wit et al. (1963). Wenn den Douglasien des Düngeversuchs in Adenau Stickstoff in großen Mengen zur Verfügung steht, könnte das zusätzlich aufgenommene Nitrat in den Nadeln eingelagert werden und die die erhöhten Stickstoffgehalte bedingen. Nitrat kann im Gegensatz zu Ammonium in der Pflanze ohne weitere Umwandlung transportiert und gespeichert werden, wohingegen Ammonium aufgrund seines ähnlichen Ionenradius zu K^+ sofort nach der Aufnahme in Aminosäuren umgewandelt wird (Schulze et al. 2005, S. 326f).

Abbildung 14

Entwicklung der Mangangehalte in den rezenten c+0 (links) und älteren c+2 Nadeln der Douglasien-Düngungsfläche Adenau. Dargestellt sind die unbehandelte Kontrolle sowie die Varianten Kalkung und Phosphordüngung. In den Jahren 1986, 1989 und 1993 wurde bei der Beprobung zwischen geschädigten und ungeschädigten Individuen unterschieden, in 2002 und 2012 wurden lediglich Douglasien ohne Schadsymptome beprobt, da vor allem auf der Kalkungsparzelle kaum mehr stärker geschädigte Douglasien vorhanden waren.

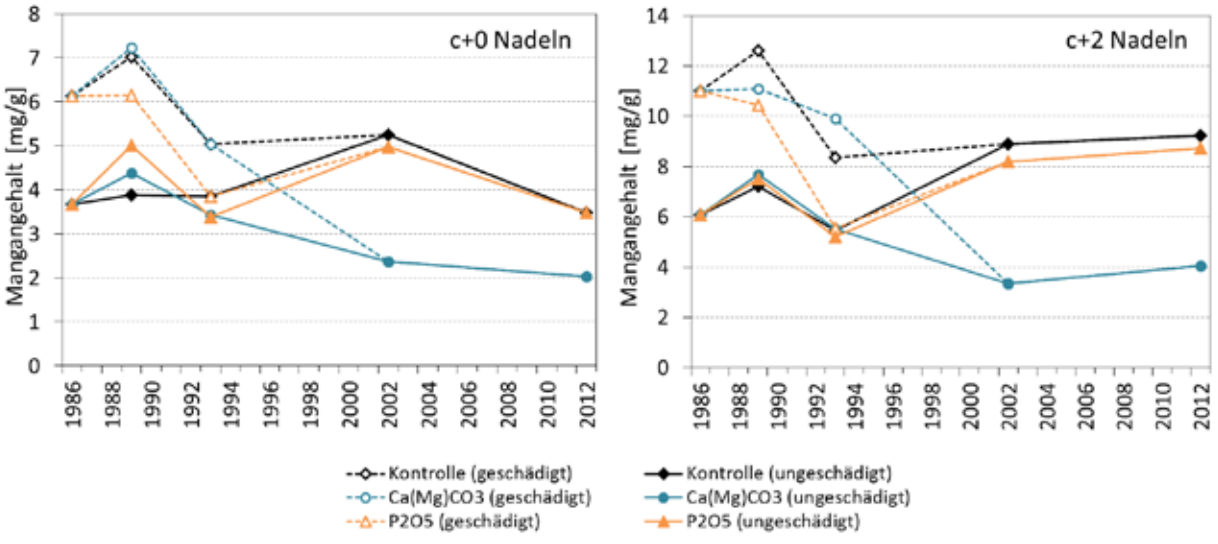


Tabelle 21

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3) der Hauptnährstoff- und Mangangehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) des diagnostischen Düngungsversuchs Adenau. Die Analysen aus dem Jahr 1987 stammen von der Erstbeprobung vor Versuchsbeginn (vgl. Kap. 4). Im Jahr 1993 wurde lediglich eine Mischprobe analysiert, sodass keine Streuung angegeben werden kann. 2002 und 2012 wurden lediglich Douglasien ohne Schadsymptome beprobt, da vor allem auf der Kalkungsparzelle kaum mehr stärker geschädigte Douglasien vorhanden waren. Die Nährstoffgehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs.

Jahr	Variante	Zustand	N [mg/g]	P [mg/g]	K [mg/g]	Ca [mg/g]	Mg [mg/g]	S [mg/g]	Mn [mg/g]
1987	Kontrolle	Geschä.	13,1±1,3	0,83±0,21	6,75±0,75	6,33±1,55	0,91±0,03	1,28±0,18	6,13±0,81
1987	Kontrolle	Gesund	15,1±0,7	0,97±0,06	7,48±0,72	4,83±0,58	0,98±0,13	1,70±0,19	3,67±0,64
1989	Kontrolle	Geschä.	13,0±1,5	0,83±0,06	5,77±0,96	6,8±0,38	1,08±0,21	1,19±0,11	7,02±0,85
1989	Kontrolle	Gesund	14,0±0,8	0,9±0,10	5,23±0,69	5,22±0,45	1,12±0,06	1,44±0,15	3,88±0,80
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	13,9±3,6	0,8±0,10	4,45±1,26	6,57±1,07	0,81±0,09	1,07±0,27	7,23±1,68
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	14,7±0,6	0,87±0,06	5,82±0,66	5,43±0,60	0,93±0,11	1,26±0,15	4,38±0,10
1989	P_2O_5	Geschä.	15,9±1,5	0,97±0,06	4,77±0,68	6,67±0,83	1,03±0,15	1,19±0,13	6,15±1,25
1989	P_2O_5	Gesund	15,0±1,6	1,10±0,00	5,18±0,33	6,50±0,53	1,13±0,1	1,25±0,07	5,02±0,58
1989	Kieserit	Geschä.	15,3±1,0	0,93±0,12	5,72±1,14	8,45±0,22	1,07±0,16	1,16±0,18	8,43±0,42
1989	Kieserit	Gesund	15,2±0,9	0,83±0,15	5,38±1,13	6,18±1,03	1,14±0,28	1,39±0,02	5,52±0,73
1989	Fe-Chelat	Geschä.	15,4±2,7	0,87±0,29	4,6±0,91	6,22±0,64	0,93±0,15	1,26±0,25	5,27±1,73
1989	Fe-Chelat	Gesund	15,2±1,7	0,97±0,06	5,23±0,16	5,55±0,97	1,08±0,2	1,36±0,26	4,20±0,23
1989	KAS	Geschä.	14,0±1,1	0,87±0,15	5,88±0,81	7,05±1,56	0,91±0,21	0,95±0,14	5,40±1,03
1989	KAS	Gesund	16,2±0,5	0,83±0,15	5,23±1,06	5,58±1,08	1,22±0,13	1,15±0,16	3,42±0,70
1993	Kontrolle	Geschä.	16,7	0,98	4,64	4,82	1,06	1,31	5,04
1993	Kontrolle	Gesund	14,7	0,89	4,72	4,11	1,10	1,31	3,85
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	13,0	0,90	4,39	4,39	1,13	1,36	5,05
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	16,4	0,97	5,03	3,70	1,16	1,42	3,43
1993	P_2O_5	Geschä.	14,9	1,26	4,17	4,30	1,03	1,26	3,85
1993	P_2O_5	Gesund	15,6	1,12	4,66	3,94	1,15	1,23	3,39
1993	Kieserit	Geschä.	16,8	0,77	3,95	6,60	1,21	1,27	7,52
1993	Kieserit	Gesund	15,2	0,76	3,73	4,43	1,14	1,15	4,52
1993	Fe-Chelat	Geschä.	13,2	0,86	6,89	4,12	1,03	1,04	4,07
1993	Fe-Chelat	Gesund	15,5	1,12	4,74	3,85	1,09	1,19	3,45
1993	KAS	Geschä.	14,0	0,84	5,21	5,18	0,96	0,96	4,74
1993	KAS	Gesund	15,3	0,89	4,91	6,04	1,31	1,23	2,98
2002	Kontrolle	Gesund	14,6±1,9	0,87±0,20	6,05±2,15	5,87±2,51	1,16±0,24	1,28±0,07	5,25±2,23
2002	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	15,5 ±1,0	0,93±0,14	6,79±0,18	4,23±0,60	1,40±0,28	1,40±0,23	2,37±0,63
2002	P_2O_5	Gesund	14,0±1,5	0,99±0,16	5,90±0,66	5,80±0,85	1,33±0,16	1,20±0,26	4,98±1,32
2002	Kieserit	Gesund	15,2±4,4	0,58±0,04	4,43±1,08	6,74±4,02	1,25±0,21	1,36±0,41	7,09±2,97
2002	Fe-Chelat	Gesund	14,8 ±2,4	0,82±0,10	6,30±0,28	5,31±0,86	1,20±0,17	1,27±0,21	4,82±1,06
2002	KAS	Gesund	14,8 ±2,1	0,80±0,02	5,74±0,52	6,09±1,28	0,95±0,13	1,33±0,16	5,01±0,61
2012	Kontrolle	Gesund	13,5 ±3,1	1,18±0,05	5,71±0,35	3,52±0,74	0,88±0,06	1,06±0,16	3,47±1,00
2012	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	17,6 ±1,4	1,16±0,06	5,52±0,34	3,79±0,35	1,34±0,25	1,34±0,08	2,03±0,15
2012	P_2O_5	Gesund	15,6 ±0,5	1,43±0,10	5,23±0,46	4,03±0,66	1,06±0,18	1,12±0,02	3,47±0,55

Die Phosphorversorgung liegt auf den Versuchsparzellen Adenau mit Ausnahme der Phosphordüngungsparzelle durchweg im Bereich einer „mangelhaften" Ernährung. Die Phosphordüngung wirkte sich bereits wenige Jahre nach der Düngemittelapplikation in einer merklichen Erhöhung des Phosphorgehalts der Nadeln aller untersuchter Nadeljahrgänge aus. Die P-Gehalte des ersten Nadeljahrgangs lagen bereits im Jahr nach der Düngung (1989) meist außerhalb des Mangelbereichs (> 1,2 mg/g). Die im Jahr 2002 gewonnenen Nadeln weisen allerdings im ersten Nadeljahrgang lediglich Phosphorgehalte von 0,99 mg/g auf, liegen damit jedoch über den anderen Düngevarianten (0,58-0,93 mg/g) und der Kontrolle (0,87 mg/g).
Einen deutlichen Hinweis auf eine phosphorlimitierte Ernährung geben die Stickstoffkonzentrationen bzw. das N/P-Verhältnis. Verglichen mit der Kontrolle und der Variante mit Dolomitkalkung nehmen die Stickstoffgehalte auf der Düngevariante mit Phosphor mit steigendem Nadelalter stärker ab (Abbildung 15). Die anderen Varianten zeigen teilweise auch eine Zunahme der Stickstoffgehalte mit steigendem Nadelalter, was auf eine unzureichende Verwertung des Stickstoffs, vermutlich bedingt durch den Mangel eines anderen Nährelements, hier wohl Phosphor, hindeutet. Dieser Mangel wird durch die Phosphordüngung ausgeglichen.

Auch bei Kalium wird der Bereich einer ausreichenden Ernährung auf der Kontrolle meist unterschritten. Die Magnesiumgehalte der Dolomitkalkungsparzelle sind gegenüber den übrigen Parzellen deutlich erhöht. Die offensichtlichen Effekte der Kalkung auf die Mn-Verringerung und Mg-Erhöhung sind allerdings erst eine Reihe von Jahren nach der Dolomitapplikation eingetreten: während bei der Untersuchung im Jahr 1993/94 (4 Jahre nach der Kalkung) noch keine merklichen Unterschiede zwischen Kalkungsparzelle und Nullfläche auftraten, treten die Effekte bei den Probenahmen im Jahr 2002 und 2012 deutlich zutage. Diese Verzögerung lässt sich durch die Ergebnisse anderer Untersuchungen erklären, die zeigen, dass zwischen der Aufnahme von Magnesium und Calcium über die Wurzel bis zum Einbau in die Nadeln bzw. Blätter mehrere Jahre liegen können (Augusto et al. 2011; van der Heijden et al. 2015).

Entgegen den damaligen Erwartungen führte die Düngung mit Magnesiumsulfat (Kieserit) nur zu einer leichten Erhöhung im Magnesiumgehalt der 1989 und 1993 gewonnenen Nadeln. Bei der Untersuchung 1993 war auf der Kieseritdüngungsparzelle der Kaliumgehalt der Nadeln beider Nadeljahrgänge besonders niedrig. Bei den späteren Untersuchungen sind die Kaliumgehalte demgegenüber nicht mehr auffällig. Auf die Kaliumversorgung der Dolomitkalkungsparzelle hatte die Dolomitkalkung trotz der geringen K-Versorgung des Bestandes, der vergleichsweise hohen Dolomit-Aufwandmenge und der feinen Vermahlung keinen erkennbaren Einfluss.

Die Calciumgehalte liegen bei allen Beprobungsterminen und bei allen Varianten oberhalb oder im Bereich einer normalen Ernährung, was auf die in Kap. 4.2.1 beschriebene Entgiftung von Mangan durch zusätzliche Calciumeinlagerung hindeutet. Die verglichen mit anderen Varianten niedrigen Calciumgehalte der Dolomitkalkungsvariante verdeutlichen die pflanzenphysiologische Bedeutung von Calcium für die Immobilisierung von Mangan (Abbildung 16). Denn obwohl in der Humusauflage und am Bodenaustauscher sowie im Bodenwasser dieser Variante mehr Calcium als auf der Kontrolle pflanzenverfügbar vorhanden ist, weisen die Nadeln des ersten als auch des dritten Nadeljahrgangs teils deutlich niedrigere Calciumgehalte auf. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die positive Wirkung der Dolomitkalkung insbesondere auf die Reduzierung der Manganverfügbarkeit zurückzuführen ist. Das zusätzlich vorhandene Calcium wird von den Douglasien auf dieser Versuchsparzelle zur Entgiftung des restlichen Mangans nicht benötigt.
Gegenteiliges zeigt die Variante mit Kalkammonsalpeter. Hier führt die Düngung trotz der deutlich geringeren applizierten Calciummenge zu einem Anstieg der Calciumgehalte im Jahr 1993. Da die Verfügbarkeit von Mangan nicht im gleichen Umfang wie bei der Dolomitkalkung reduziert wird, müssen die Douglasien offenbar weiterhin größere Mengen Calcium zur Immobilisation von Mangan einlagern. Der Anstieg der Calciumge-

halte verglichen mit der Kontrolle kann derart gedeutet werden, dass Calcium bei der hohen Manganverfügbarkeit trotz der vergleichsweise hohen Ca-Nadelspiegelwerte an diesem Standort im Mangel ist.
Bei Bor liegen einige Werte unter 20 mg/kg, was nach Bergmann (1988) auf eine möglicherweise unzureichende Versorgung mit diesem Spurennährstoff hindeutet. Andere Autoren setzten die Untergrenze des Normalbereichs deutlich tiefer (10-13 mg/kg, vgl. Tabelle 1), sodass von keiner Mangelernährung auszugehen wäre. Die Dolomitvariante weist höhere Borwerte als die Kontrolle oder die Variante mit Phosphordüngung auf (Tabelle 22). Für Fichte und Kiefer wird hingegen in der Literatur zumeist von einer Abnahme der Bor-Nadelgehalte nach Kalkung berichtet (Derome 1990; Kreutzer 1995; Børja & Nilsen 2008; Greve 2015), bedingt durch eine geringere Verfügbarkeit von Bor durch die Anhebung des pH Wertes (Lehto & Mälkönen 1994). Deutlicher B-Mangel ist bei Fichte allerdings erst unterhalb von 5 mg/kg zu erwarten (Linder 1995; Saarsalmi & Tamminen 2005).
Für Molybdän werden lediglich von Bergmann (1988) und Carter et al. (1984) Untergrenzen für eine normale Ernährung angegeben (0,05 und 0,12 mg/kg), die von den drei im Jahre 2012 beprobten Varianten unterschritten werden (0,043-0,047 mg/kg).
Bei Eisen sind für die Kontrolle aus den vorliegenden Analysebefunden keine Hinweise auf eine Mangelernährung abzuleiten. Die Eisenchelatapplikation (Fetrilon) konnte offensichtlich entgegen den Erwartungen bei der Versuchsanlage keine erkennbare Erhöhung des Eisengehalts der Nadeln bewirken (Tabelle 22). Auch die pH Werterhöhung des Bodens durch die Dolomitkalkung hat offenbar keinen Einfluss auf die (Gesamt-) Eisengehalte der Nadeln.
Die Kupfergehalte schwanken zwischen 2 und 5 mg/kg und liegen damit im Mangel oder unteren Normalbereich. Zwischen den verschiedenen Varianten gibt es keine Unterschiede in den Cu-Nadelgehalten. Die Nadelgehalte an Zink liegen bei allen Varianten im Normalbereich.
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Bestand des diagnostischen Düngungsversuchs Adenau offenbar unter einem hohen Manganüberschuss leidet, der durch die Dolomitkalkung vermindert wird. Die Elementgehalte der Nadeln und deren Reaktionen auf die Düngevarianten lassen den Schluss zu, dass die Hauptnährelemente Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel und Eisen dem Bestand in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, die Phosphorversorgung des Bestandes jedoch mangelhaft ist. (Tabelle 21).

Elementgehalte und -vorräte in unterschiedlichen Baumkompartimenten

Hohe Mangangehalte sind in diesem Douglasienbestand nicht nur in den Nadeln, sondern auch in den übrigen oberirdischen Baumkompartimenten zu finden (Tabelle 23). Allerdings unterscheiden sich die Mn-Gehalte der verschiedenen Kompartimente beträchtlich. Die höchsten Gehalte weisen die Nadeln auf, gefolgt von Rinde und Zweigen. Die geringsten Gehalte sind erwartungsgemäß im Kernholz zu finden. Demzufolge entfallen große Anteile des im Baum gespeicherten Mangans auf die Nadeln und nur vergleichsweise geringe Anteile auf das Holz, obwohl letzteres etwa drei Viertel der Biomasse ausmacht (Abbildung 17).

Auf der mit **Dolomit** gekalkten Parzelle sind die Mangangehalte in allen Baumkompartimenten gegenüber der unbehandelten Parzelle reduziert (Tabelle 23) und dementsprechend auch die Mn-Vorräte in der oberirdischen Baumbiomasse geringer (Abbildung 18). Die Kompartimente Nadeln und Zweige weisen auf der Dolomitkalkungsparzelle erhöhte Magnesiumgehalte auf (Tabelle 23). Da die Gehalte in den Ästen und im Kernholz vergleichsweise niedrig sind, unterscheiden sich die Mg-Vorräte in der gesamten oberirdischen Biomasse (Vollbaum) aber nur wenig zwischen den Parzellen (nicht dargestellt). Bei den übrigen Nährelementen sind keine signifikanten Effekte der Dolomitkalkung zu erkennen. Interessanterweise ist trotz der mit 6 t feinvermahlenem Dolomit je Hektar recht hohen Kalkdosierung keine Verringerung der Kaliumgehalte und –vorräte in den oberirdischen Baumkompartimenten festzustellen.
Auf der mit **Phosphat** gedüngten Parzelle sind die Phosphorgehalte in den Kompartimenten Nadeln und Zweige gegenüber der Nullfläche erhöht

Tabelle 22

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3) der Spurennährstoffgehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) der Düngeversuchsfläche Adenau. Die Analysen aus dem Jahr 1987 stammen von der Erstbeprobung vor Versuchsbeginn (vgl. Kap. 4). Im Jahr 1993 wurde lediglich eine Mischprobe analysiert, sodass keine Streuung angegeben werden kann. 2002 und 2012 wurden lediglich Douglasien ohne Schadsymptome beprobt, da vor allem auf der Kalkungsparzelle kaum mehr stärker geschädigte Douglasien vorhanden waren. Die Nährstoffgehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs).

Jahr	Variante	Zustand	Fe [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	B [mg/kg]	Al [mg/kg]	Si [mg/kg]
1987	Kontrolle	Geschä.	90±7	-	-	-	-	223±22	1133±351
1987	Kontrolle	Gesund	106±18	-	-	-	-	240±56	1433±58
1989	Kontrolle	Geschä.	75±10	-	-	-	-	205±20	1033±379
1989	Kontrolle	Gesund	102±7	-	-	-	-	263±23	1400±361
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	78±18	-	-	-	-	172±20	1933±321
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	98±8	-	-	-	-	240±10	1933±289
1989	P_2O_5	Geschä.	93±25	-	-	-	-	187±14	2033±351
1989	P_2O_5	Gesund	105±13	-	-	-	-	265±37	1900±173
1989	Kieserit	Geschä.	95±25	-	-	-	-	255±17	2033±1007
1989	Kieserit	Gesund	96±12	-	-	-	-	313±81	1533±551
1989	Fe-Chelat	Geschä.	81±13	-	-	-	-	264±32	1233±473
1989	Fe-Chelat	Gesund	95±30	-	-	-	-	272±82	1133±416
1989	KAS	Geschä.	65±9	-	-	-	-	196±25	
1989	KAS	Gesund	77±9	-	-	-	-	259±76	1166±493
1993	Kontrolle	Geschä.	113	5,0	51	-	-	281	-
1993	Kontrolle	Gesund	109	2,2	49	-	-	316	-
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	99	3,8	54	-	-	306	-
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	101	4,6	45	-	-	293	-
1993	P_2O_5	Geschä.	154	2,5	55	-	-	357	-
1993	P_2O_5	Gesund	116	2,1	53	-	-	321	-
1993	Kieserit	Geschä.	86	4,0	58	-	-	253	-
1993	Kieserit	Gesund	83	3,6	44	-	-	249	-
1993	Fe-Chelat	Geschä.	91	3,1	52	-	-	321	-
1993	Fe-Chelat	Gesund	115	4,0	46	-	-	310	-
1993	KAS	Geschä.	88	4,5	52	-	-	219	-
1993	KAS	Gesund	98	4,2	60	-	-	225	-
2002	Kontrolle	Gesund	85±16	2,8±0,2	40±7,9	-	26±4	234±34	-
2002	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	77±12	3,0±0,2	31±2,6	-	27±2	266±51	-
2002	P_2O_5	Gesund	76±9	2,6±0,2	37±2,9	-	18±3	229±34	-
2002	Kieserit	Gesund	113±48	3,0±0,1	50±18	-	36±7	297±120	-
2002	Fe-Chelat	Gesund	73±7	3,2±0,7	46±17	-	29±4	261±68	-
2002	KAS	Gesund	92±5	3,5±0,2	41±9	-	26±4	371±28	-
2012	Kontrolle	Gesund	58±11	3,9±0,5	34±14	0,043±0,01	20±4	182±48	-
2012	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	62±8	4,5±0,3	33±3	0,043±0,01	25±3	181±26	-
2012	P_2O_5	Gesund	63±4	4,0±0,0	29±2	0,047±0,01	19±1	177±23	-

Abbildung 15

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3 bzw. 6 (1989)) der Stickstoffgehalte der Nadeln des ersten (c+0) und dritten (c+2) Nadeljahrgangs der Varianten des diagnostischen Düngungsversuchs Adenau

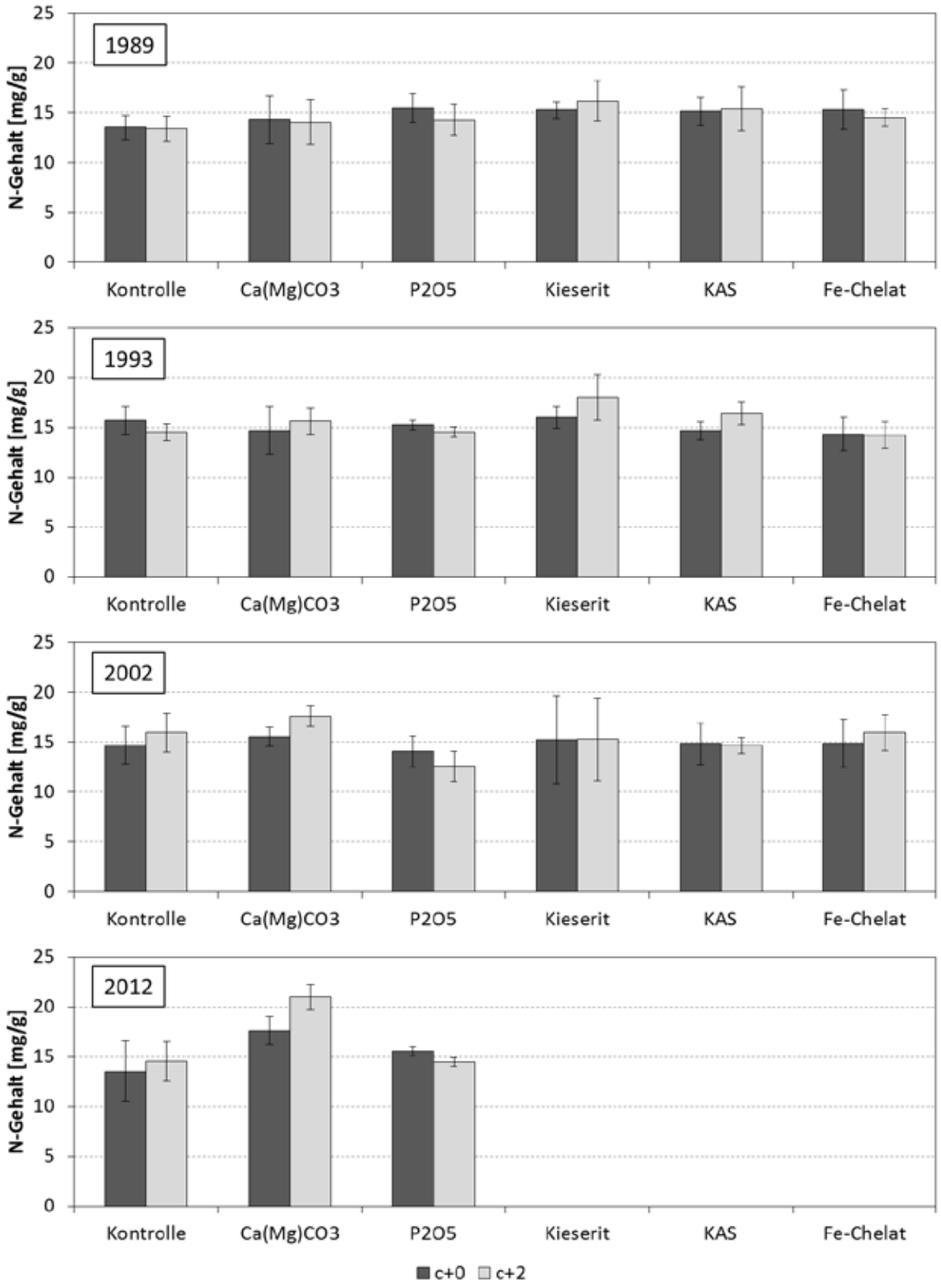


Abbildung 16

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3) der Calciumgehalte der 1993 und 2002 gewonnenen Nadeln des ersten (c+0) und dritten (c+2) Nadeljahrgangs der Varianten des diagnostischen Düngungsversuchs Adenau

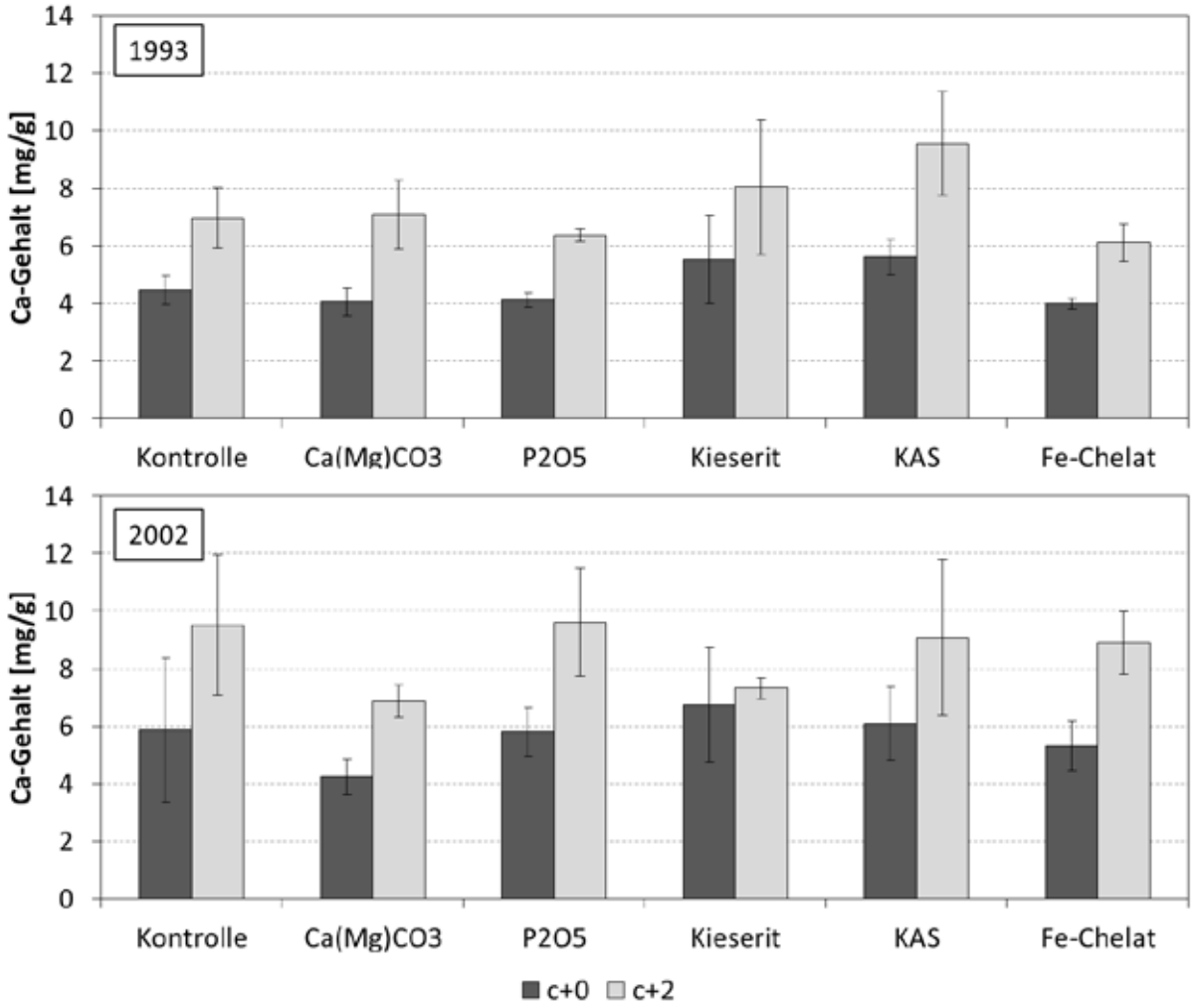


Abbildung 17

Verteilung der oberirdischen Biomasse (links) und der Manganvorräte in der Biomasse (rechts) am Beispiel einer Douglasie (Baum Nr. 4) auf der Nullfläche der Versuchsanlage Adenau

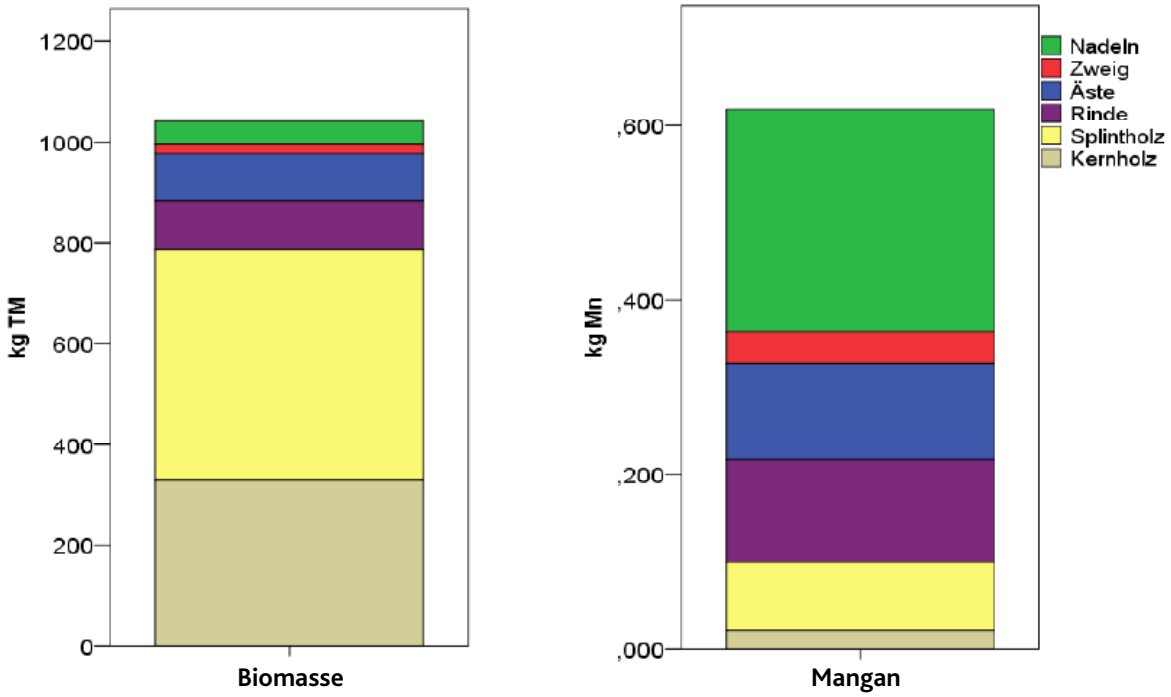


Abbildung 18

Manganvorräte in der oberirdischen Biomasse der beprobten Bäume differenziert nach den Varianten Nullfläche (Null), Dolomitkalkung (Dolomit) und Phosphordüngung (P_2O_5)

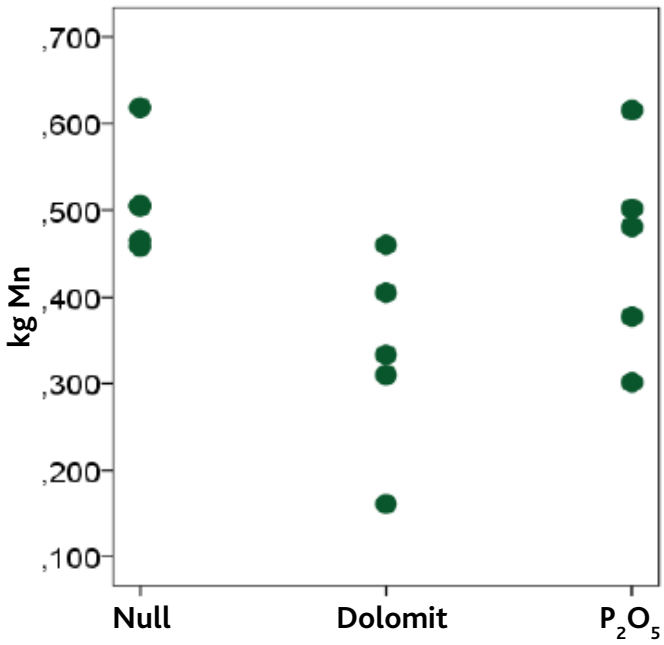


Tabelle 23

Elementgehalte in verschiedenen Baumkompartimenten der Varianten Nullfläche (Null), Dolomitkalkung (Dolomit) und Phosphordüngung (P_2O_5) an der Versuchsanlage Adenau; angegeben sind Mittelwert ± Standardabweichung von jeweils 5 Bäumen

Element	Variante	Nadeln	Zweige	Äste	Rinde	Splintholz	Kernholz
N	Null	14400 ± 500	8600 ± 1700	2000 ± 200	3100 ± 600	500 ± 100	400 ± 100
[mg/kg]	Dolomit	16300 ± 1700	8300 ± 1600	1900 ± 300	3000 ± 200	400 ± 70	400 ± 100
	P_2O_5	14600 ± 700	900 ± 1700	1800 ± 300	2700 ± 200	400 ± 30	300 ± 100
P	Null	1048 ± 60	1050 ± 109	221 ± 31	410 ± 118	58 ± 13	24 ± 7
[mg/kg]	Dolomit	1034 ± 124	946 ± 105	214 ± 35	424 ± 60	46 ± 7	13 ± 3
	P_2O_5	1280 ± 135	1240 ± 131	227 ± 39	436 ± 45	53 ± 4	10 ± 2
K	Null	4608 ± 671	3772 ± 763	1092 ± 122	2112 ± 594	366 ± 74	38 ± 26
[mg/kg]	Dolomit	4844 ± 501	3666 ± 441	1272 ± 261	3058 ± 520	429 ± 68	7 ± 4
	P_2O_5	5616 ± 775	3950 ± 778	1069 ± 185	2372 ± 276	411 ± 73	5 ± 0
Ca	Null	6528 ± 285	3972 ± 537	2050 ± 359	2508 ± 341	384 ± 76	159 ± 34
[mg/kg]	Dolomit	7672 ± 1454	5840 ± 1279	2750 ± 1024	2370 ± 613	407 ± 55	130 ± 39
	P_2O_5	7588 ± 399	5080 ± 490	2278 ± 723	2412 ±856	399 ± 33	135 ± 22
Mg	Null	933 ± 128	671 ±137	232 ± 60	352 ± 111	62 ± 19	14,8 ± 8
[mg/kg]	Dolomit	1328 ± 162	800 ± 155	293 ± 75	417 ± 118	64 ± 12	9 ± 3
	P_2O_5	1138 ± 87	782 ± 111	264 ± 86	361 ± 33	65 ± 18	6 ± 3
S	Null	1112 ± 100	836 ± 132	202 ± 23	339 ± 53	60 ± 10	60 ± 6
[mg/kg]	Dolomit	1291 ± 233	877 ± 164	203 ± 29	340 ± 38	56 ± 7	50 ± 4
	P_2O_5	1196 ± 97	814 ± 97	188 ± 22	335 ± 13	56 ± 7	49 ± 2
Mn	Null	7268 ± 1362	1846 ±233	1261 ± 234	1952 ± 448	296 ± 83	85 ± 30
[mg/kg]	Dolomit	4338 ± 1487	1183 ± 272	659 ± 93	777 ± 113	171 ± 56	49 ± 13
	P_2O_5	6466 ± 564	1758 ±353	1074 ± 298	1313 ± 629	277 ± 21	64 ± 12
Fe	Null	108 ± 11	23 ± 6	72 ± 10	31 ± 5	3 ± 1	5 ± 3
[mg/kg]	Dolomit	116 ± 17	23 ± 7	86 ± 11	28 ± 6	3 ± 2	3 ± 1
	P_2O_5	118 ± 20	18 ± 2	86 ± 17	39 ± 12	2 ± 0,4	15 ± 31
Zn	Null	47 ± 9	21 ± 5	37 ± 13	29 ± 8	3 ± 1	3 ± 1
[mg/kg]	Dolomit	53 ± 5	22 ± 4	30 ± 8	29 ± 7	2 ± 0,2	2 ± 0,4
	P_2O_5	52 ± 5	20 ± 4	27 ± 4	33 ± 11	2 ± 0,2	2 ± 1
Cu	Null	9 ± 1	3 ± 0,2	3 ± 0,2	4 ± 1	1 ± 0,3	1 ± 0,2
[mg/kg]	Dolomit	7 ± 1	3 ± 1	3 ± 0,4	3 ± 1	1 ± 0,1	1 ± 0,2
	P_2O_5	9 ± 1	3 ± 1	3 ± 0,2	4 ± 1	1 ± 0,3	1 ± 0,2
B	Null	13 ± 1	4 ± 0,3	23 ± 4	8 ± 1	2 ± 0,1	1 ± 0,2
[mg/kg]	Dolomit	14 ± 3	5 ± 0,4	31 ± 4	9 ± 0,4	2 ± 0,2	1 ± 0,2
	P_2O_5	13 ± 1	4 ± 1	22 ±1	8 ± 1	2 ± 0,1	1 ± 0,1

(Tabelle 23). Da die Gehalte in den Ästen und im Holz auf der P-Düngungsvariante aber vergleichsweise niedrig sind, unterscheiden sich die P-Vorräte in den Vollbäumen nur wenig zwischen den Parzellen (nicht dargestellt).

Vitalität und Wachstum der Bäume

Die Wirkung der Kalkung und Düngung auf den Vitalitätszustand wird anhand der Entwicklung des Kronenzustands und weiterer Symptome der Douglasienerkrankung, insbesondere des Harzflusses beurteilt.

Zur Bewertung der Homogenität der einzelnen Versuchsparzellen hinsichtlich der Vitalität der Douglasien wurde zu Beginn der Untersuchungen eine Interpretation aller Einzelbäume der Versuchsparzellen mittels CIR-Luftbildansprache vorgenommen.

Bezüglich des Merkmals Kronenverlichtung sind zu Beginn der Untersuchungen 1987-1990 nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten/Düngungsparzellen erkennbar (Abbildung 19). Die mit Dolomit behandelte Variante weist zu Beginn der Erhebungen geringere Anteile, die Fe-Chelat- und KAS-Variante etwas höhere Anteile von Bäumen der Stufe 1 auf. Der Anteil absterbender Bäume (Stufe 3) lag zwischen 0 % auf der Dolomit-Variante und 1 % auf der P_2O_5-Variante; bereits abgestorbene Douglasien waren im Luftbild keine erkennbar.

Hinsichtlich des Merkmals Verfärbung/Vergilbung der Nadeln zeigt sich bei der CIR-Luftbildansprache 1987 ein Anteil von teilweise mehr als 50 % der Douglasien mit Kronenverfärbung (Abbildung 20). In den folgenden Aufnahmen der Jahre 1989 und 1990 lag der Anteil von Douglasien mit Kronenverfärbung stets unterhalb von 50 %. Unterschiede zwischen den Versuchsparzellen sind jedoch aufgrund sehr großer jährlicher Variation lediglich als Tendenz auf der Fe-Chelat-Fläche mit etwas höheren Anteilen vergilbter Bäume zu erkennen.
Zusätzlich zu den CIR-Luftbildern erfolgte ab 1989 eine Auswahl 25 terrestrisch vergleichsweise gut einsehbarer Douglasien der Kraftklassen 1-2, in Ausnahmefällen auch Kraftklasse 3. Diese dienten einerseits als Einhängepunkt zur Interpretation der Luftbilddaten, andererseits zur langfristigen Beobachtung der Bäume und Erfassung zusätzlicher Parameter wie z.B. Harzfluss. Da die Bestandesdichte im Zeitverlauf deutlich abnahm und sich die Einsehbarkeit erheblich verbesserte wurden ab 2005 alle Bäume der jeweiligen Parzellen bonitiert.
Auch bei den terrestrischen Bonituren waren die Unterschiede in der Kronenverlichtung zwischen den verschiedenen Versuchsparzellen zu Beginn der Erhebung nur gering. Um den Einfluss der wechselnden Bonitierer und der unterschiedlichen Stichprobendichte zu reduzieren, ist in Abbildung 21 die Kronenverlichtung der einzelnen Düngungsparzellen in Relation zur Kontrolle dargestellt. Die Kronerverlichtungen der Kieserit- und Fe-Chelatparzelle liegen zu Beginn der Erhebungen deutlich unter der Kontrolle, im weiteren Zeitverlauf dagegen meist darüber. Die Kronenverlichtung der KAS-Parzelle bleibt in der gesamten Zeitreihe – mit Ausnahme des Jahres 2002 – unter der Kontrolle. Auf der mit Phosphat gedüngten Parzelle zeigt die Kronenverlichtung einen uneinheitlichen Verlauf: 1992 und 1993 lag sie oberhalb der Kontrolle, im weiteren Zeitverlauf meist darunter. Auf der Dolomitparzelle lag die Kronenverlichtung in den ersten vier Aufnahmejahren auf dem Niveau der Kontrolle, im weiteren Zeitverlauf dann deutlich darunter.

Auf allen Parzellen stieg die Kronenverlichtung von 1989 und 1990 auf 1992 bis 1993 an, ging im weiteren Zeitverlauf etwas zurück und erreichte bei der Bonitur 2011 ein weiteres Maximum (Tabelle 24). In den letzten vier Aufnahmejahren ist wieder ein Rückgang der Kronenverlichtung zu verzeichnen. Die Entwicklung der Kronenverlichtung auf der Dolomitkalkungsvariante ($Ca(Mg)CO_3$) unterscheidet sich auffällig von den übrigen Varianten: Zu Beginn der Erhebungen zeigte die Dolomitkalkungsvariante zusammen mit der unbehandelten Kontrolle die höchste mittlere Kronenverlichtung, bei den Bonituren ab 1997 dagegen eine merklich geringere mittlere Kronenverlichtung als die anderen Parzellen. Zu beachten ist allerdings die große Streuung der Boniturbefunde.
Die Vergilbung stieg auf allen Parzellen von der Periode 1987 bis 1990 auf die Periode 1991

Abbildung 19

Entwicklung der Kronenverlichtung auf den verschiedenen Versuchsparzellen 1987 bis 1990 der Düngungsversuchsfläche FA Adenau; Interpretation aus CIR-Luftbildern;
Kronenverlichtungsstufen: 0 = 0-10 %; 1 = 15-25 %; 2 = 30-60 %; 3 = 65-99 %; 4 = tot

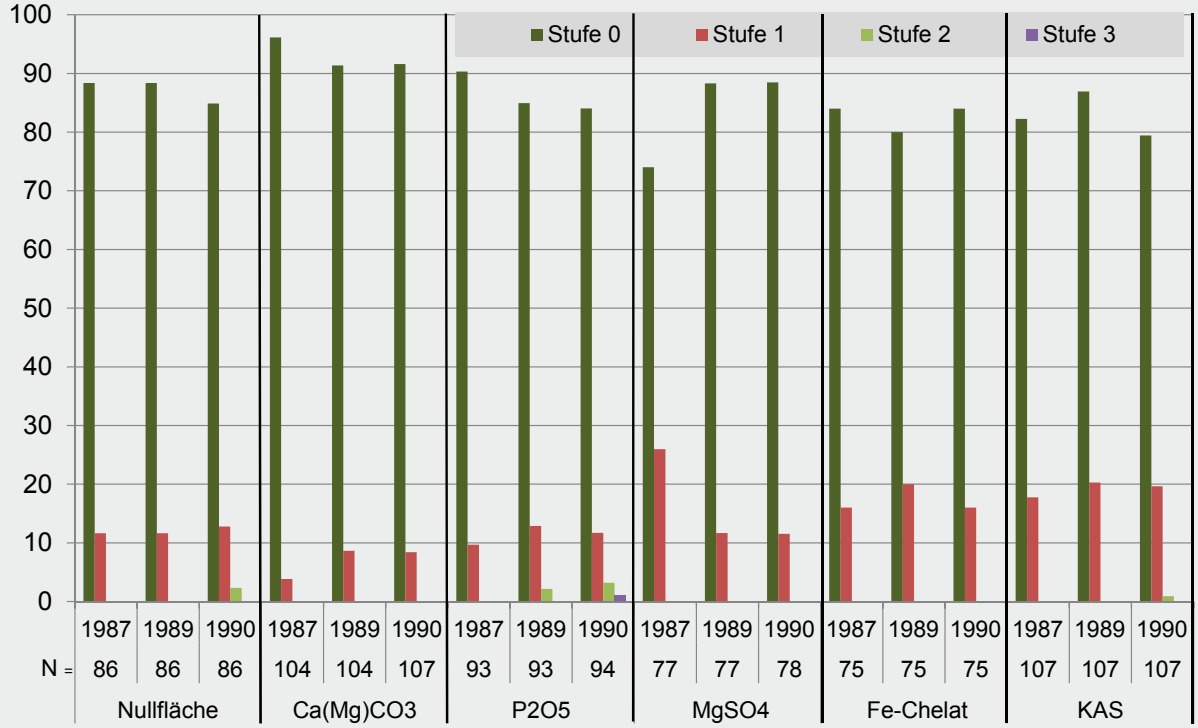


Abbildung 20

Entwicklung der Kronenvergilbung auf den verschiedenen Versuchsparzellen 1987 bis 1990 der Düngungsversuchsfläche FA Adenau; Interpretation aus CIR-Luftbildern;
Kronenverlichtungsstufen: 0 = 0-10 %; 1 = 15-25 %; 2 = 30-60 %; 3 = 65-99 %

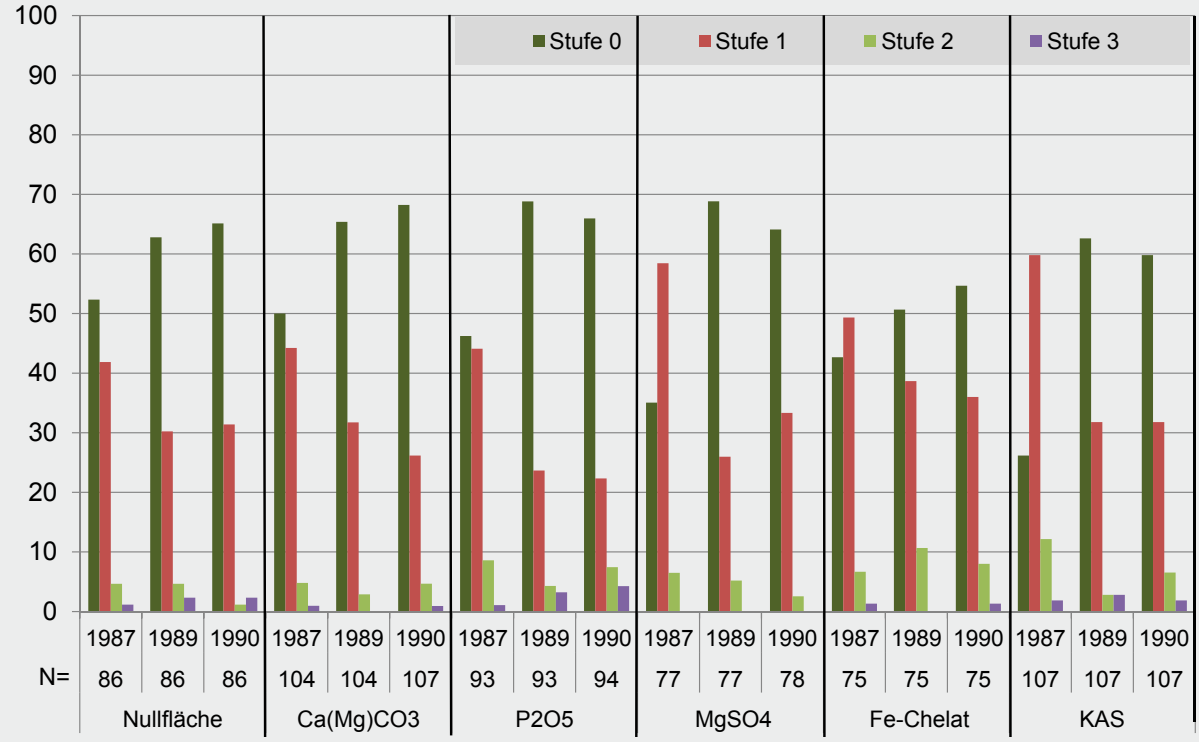


Tabelle 24

Anzahl der angesprochenen Douglasien sowie Mittelwert und Standardabweichung der Kronenverlichtung [%] im Zeitraum 1989 bis 2015 der Düngungsversuchsfläche Adenau.

Jahr	0 (Kontrolle)		$Ca(Mg)CO_3$		P_2O_5		$MgSO_4$		Fe-Chelat		KAS	
	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.
1989	25	14 ± 17	25	15 ± 19	25	11 ± 8	25	11 ± 9	25	10 ± 7	25	11 ± 13
1990	25	14 ± 18	25	13 ± 19	25	9 ± 8	25	9 ± 9	25	7 ± 7	25	8 ± 13
1991	25	24 ± 23	25	24 ± 26	24	25 ± 18	25	24 ± 19	25	10 ± 8	25	18 ± 21
1992	25	33 ± 22	25	34 ± 28	24	40 ± 15	25	36 ± 23	25	26 ± 14	25	27 ± 20
1993	25	35 ± 25	24	30 ± 21	24	39 ± 14	25	40 ± 22	25	30 ± 18	25	28 ± 21
1994	24	29 ± 20	24	25 ± 15	24	31 ± 13	22	30 ± 17	25	27 ± 17	24	22 ± 17
1997	20	24 ± 22	19	19 ± 9	19	17 ± 13	17	33 ± 27	20	21 ± 15	19	22 ± 13
2001	18	26 ± 25	18	15 ± 8	17	14 ± 7	14	20 ± 10	18	21 ± 21	17	22 ± 13
2002	49	31 ± 16	40	18 ± 6	49	16 ± 10	42	31 ± 15	48	26 ± 17	48	33 ± 24
2005	48	26 ± 15	40	15 ± 6	48	25 ± 10	39	37 ± 19	46	28 ± 15	42	24 ± 12
2009	37	31 ± 12	30	18 ± 7	38	27 ± 10	32	40 ± 16	33	30 ± 13	34	26 ± 15
2011	37	34 ± 16	30	24 ± 9	38	30 ± 11	32	43 ± 15	33	40 ± 18	34	32 ± 20
2012	30	29 ± 10	27	22 ± 7	35	25 ± 7	26	31 ± 10	27	29 ± 10	29	23 ± 8
2013	23	24 ± 12	23	18 ± 7	30	23 ± 7	24	28 ± 10	27	27 ± 9	28	20 ± 8
2014	25	25 ± 9	21	16 ± 6	29	20 ± 7	25	26 ± 8	24	26 ± 8	29	19 ± 7
2015	25	22 ± 9	21	14 ± 6	30	17 ± 6	25	22 ± 8	26	24 ± 8	29	18 ± 6

Abbildung 21

Entwicklung der Kronenverlichtung der vom Boden her bonitierten Douglasien auf den verschiedenen Parzellen im Verhältnis zur Kontrolle (Wert der Kontrolle entspricht 100 %) der Düngungsversuchsfläche Adenau im Zeitraum 1989 bis 2015. Die absoluten Werte sind in Tabelle 24 dargestellt

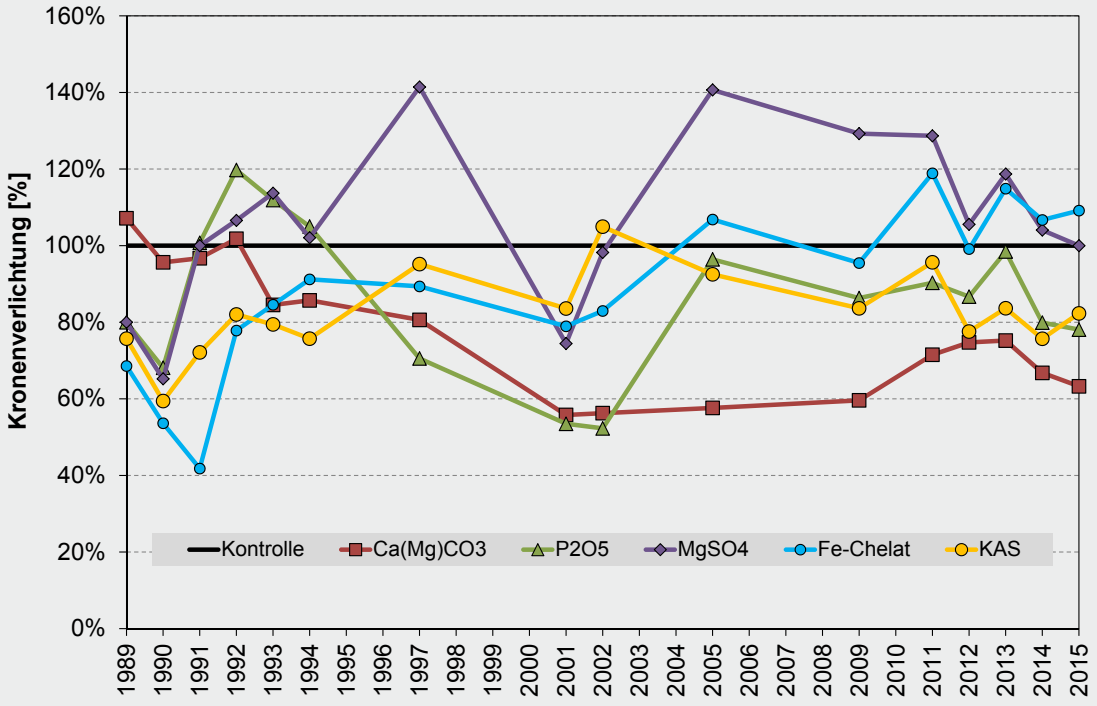


Abbildung 22

Entwicklung der mittleren Kronenvergilbung der vom Boden her bonitierten Douglasien auf den verschiedenen Parzellen der Düngungsversuchsfläche Adenau im Zeitraum 1989 bis 2015.

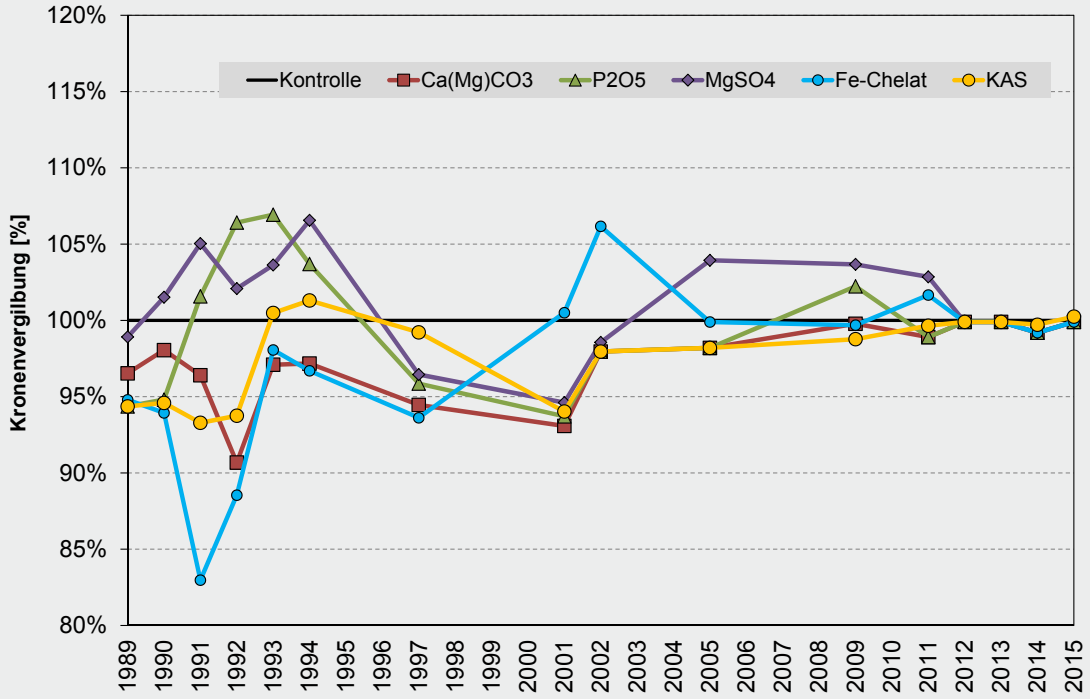


Tabelle 25

Anzahl der angesprochenen Douglasien sowie Mittelwert und Standardabweichung der Kronenvergilbung [%] im Zeitraum 1989 bis 2015 der Düngungsversuchsfläche Adenau

Jahr	0 (Kontrolle)		$Ca(Mg)CO_3$		P_2O_5		$MgSO_4$		Fe-Chelat		KAS	
	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.	n	MW + Stabw.
1989	25	8 ± 20	25	5 ± 9	25	3 ± 4	25	7 ± 15	25	3 ± 3	25	3 ± 6
1990	25	8 ± 19	25	6 ± 16	25	3 ± 3	25	9 ± 21	25	2 ± 3	25	3 ± 8
1991	25	17 ± 24	25	14 ± 25	24	18 ± 21	25	21 ± 28	25	2 ± 4	25	11 ± 20
1992	25	23 ± 22	25	16 ± 21	24	28 ± 16	25	25 ± 23	25	14 ± 12	25	18 ± 20
1993	25	17 ± 16	24	15 ± 15	24	23 ± 14	25	20 ± 17	25	16 ± 12	25	18 ± 20
1994	24	4 ± 10	24	1 ± 3	24	8 ± 8	22	10 ± 22	25	1 ± 4	24	5 ± 12
1997	20	6 ± 8	19	1 ± 3	19	2 ± 5	17	3 ± 5	20	0 ± 0	19	5 ± 10
2001	18	6 ± 18	18	0 ± 0	17	1 ± 2	14	1 ± 5	18	7 ± 15	17	1 ± 3
2002	49	2 ± 9	40	0 ± 0	49	0 ± 0	42	1 ± 2	48	8 ± 23	48	0 ± 0
2005	48	2 ± 12	40	0 ± 0	48	0 ± 0	39	6 ± 22	46	2 ± 12	42	0 ± 0
2009	37	1 ± 7	30	1 ± 5	38	3 ± 16	32	5 ± 17	33	1 ± 5	34	0 ± 0
2011	37	1 ± 7	30	0 ± 0	38	0 ± 0	32	4 ± 12	33	3 ± 14	34	1 ± 4
2012	30	0 ± 0	27	0 ± 0	35	0 ± 0	26	0 ± 0	27	0 ± 0	29	0 ± 0
2013	23	0 ± 0	23	0 ± 0	30	0 ± 0	24	0 ± 0	27	0 ± 0	28	0 ± 0
2014	25	1 ± 4	21	0 ± 0	29	0 ± 0	25	0 ± 0	24	0 ± 0	29	1 ± 3
2015	25	0 ± 0	21	0 ± 0	30	0 ± 0	25	0 ± 0	26	0 ± 0	29	0 ± 2

bis 1994 an und nahm im weiteren Zeitverlauf deutlich ab (Abbildung 22 und Tabelle 25). Seit der Bonitur 2012 ist bei allen Varianten, auch auf der Kontrolle, nahezu keine Kronenvergilbung mehr festzustellen. Auffällig ist auch hier die Dolomitkalkungsparzelle, die im Gegensatz zu den übrigen Varianten bereits 1997 und 2001 fast keine Vergilbung mehr aufwies.
Neben Nadelverfärbungen und Kronenverlichtung wurde bereits zu Beginn der Untersuchungen Harzfluss als mögliches Merkmal einer Schädigung der Douglasien durch Mangantoxizität vermutet (vgl. Kap. 2). 1989 und 1990 wurde dieses Merkmal an den terrestrisch bonitierten Douglasien in einem ja / nein - Schema erfasst, wobei „ja" starkem Harzfluss entsprach. Seit 1991 wurde der Harzfluss in 4 Stufen erfasst die ab 2001 mit Hilfe eines Fotoschlüssels okular dokumentiert wurden (Schröck und zum Hingste 2005).
Der Anteil der erfassten Douglasien mit Harzfluss lag zu Beginn der Untersuchung auf den verschiedenen Parzellen zwischen 16 und 32 % (Abbildung 23). Hierbei wiesen insbesondere die Null-Fläche und die später mit Kalkammonsalpeter behandelte Fläche deutlich geringere Anteile geschädigter Douglasien auf. Auch wenn die selektive Entnahme stark harzender Douglasien im Zuge von Durchforstungen die Bewertung erschwert wird deutlich, dass insbesondere auf der mit Dolomit behandelten Variante, allerdings auch auf der KAS-Variante, 2015 nur noch geringe Anteile stärker harzender Douglasien vorhanden sind.
Bei Douglasien, die bereits zu Beginn der Untersuchungen Harzfluss aufwiesen, blieb der Harzfluss im Beobachtungszeitraum bestehen und hat sich meist sogar verstärkt. Eine Ausnahme bildet die Dolomit-Variante, wo sich lediglich eine von 7 Douglasien, die bereits zu Beginn der Untersuchung Harzfluss aufwiesen, hinsichtlich dieses Symptoms verschlechtert hat. Zu Beginn der Untersuchungen symptomfreie Bäume sind auf der Dolomit-Variante auch symptomfrei geblieben, während auf allen anderen Parzellen im Verlauf der Untersuchung weitere Douglasien mit Harzsymptomen aufgetreten sind.

Zur Prüfung des Einflusses der Düngungsvarianten auf das Wachstum der Bäume erfolgte im Jahr 2013 eine ertragskundliche Aufnahme der Versuchsanlage. Allerdings ist die Bewertung der verschiedenen Varianten aufgrund der geringen Parzellengröße von 0,1 ha - bei einer gewählten Flächenform von 20*50 Meter im Steilhang - und einer am Schadensgeschehen orientierten Durchforstung mit großen Unsicherheiten behaftet.
Die Dolomitvariante weist aktuell die geringste Stammzahl aller Parzellen auf, obwohl hier nahezu keine Bäume wegen ausgeprägter Schadsymptome entnommen werden mussten, aber auch die höchsten mittleren Durchmesser und die nach der Kalkammonsalpeter-Fläche (KAS) zweithöchste Oberhöhe (Tabelle 26). Auffällig ist die im Vergleich zu allen anderen Parzellen höhere Stammzahl der KAS-Variante. Damit verbunden ist ein höhere Vorrat und ein höherer durchschnittlicher Gesamtzuwachs (dGz). Auch ist der Anteil von Bäumen mit gravierenderen Schadsymptomen auf dieser Parzelle nur gering.
Über alle Versuchsparzellen gemittelt erreicht der Bestand eine II Ertragsklasse. Der durchschnittliche Gesamtzuwachs (dGz) liegt, nicht zuletzt aufgrund im Vergleich zur Ertragstafel deutlich reduzierter Stammzahlen, erheblich unter den Ertragstafelwerten (Bergel 1985, mäßige Durchforstung).
Die Anzahl weitgehend symptomfreier Douglasien variiert im Alter von 61 Jahren auf den einzelnen Parzellen zwischen 170 und 260 Bäumen je Hektar. Selbst auf den ungünstigsten Varianten (Kontrolle, Fe-Chelat) dürften somit genügend Bäume der Baumklassen 1 und 2 zur Erreichung des Produktionszieles vorhanden sein, sofern nicht weitere Schäden auftreten .
Bei der Bewertung der Befunde zur Entwicklung von Vitalität und Wachstum auf den unterschiedlichen Düngungsparzellen ist zu berücksichtigen, dass sich in dem langen Beobachtungszeitraum die Bestandesdichte erheblich verringert hat und durch die bevorzugte Entnahme stärker geschädigter Douglasien im Zuge regulärer Durchforstungen in das je Parzelle vergleichsweise kleine Probebaumkollektiv selektiv eingegriffen wurde. Auch wurde je nach Düngevariante offenbar unterschiedlich stark in den Bestand eingegriffen. Dies erschwert die Beurteilung der Wirkung auf die Vitalitätsentwicklung und das Wachstum erheblich. So hat sich die Anzahl der Douglasien

Abbildung 23

Anteil deutlich harzender Douglasien bei Flächenanlage 1989 (N pro Parzelle = 25) und 2015 (Harzstufe 2+3)

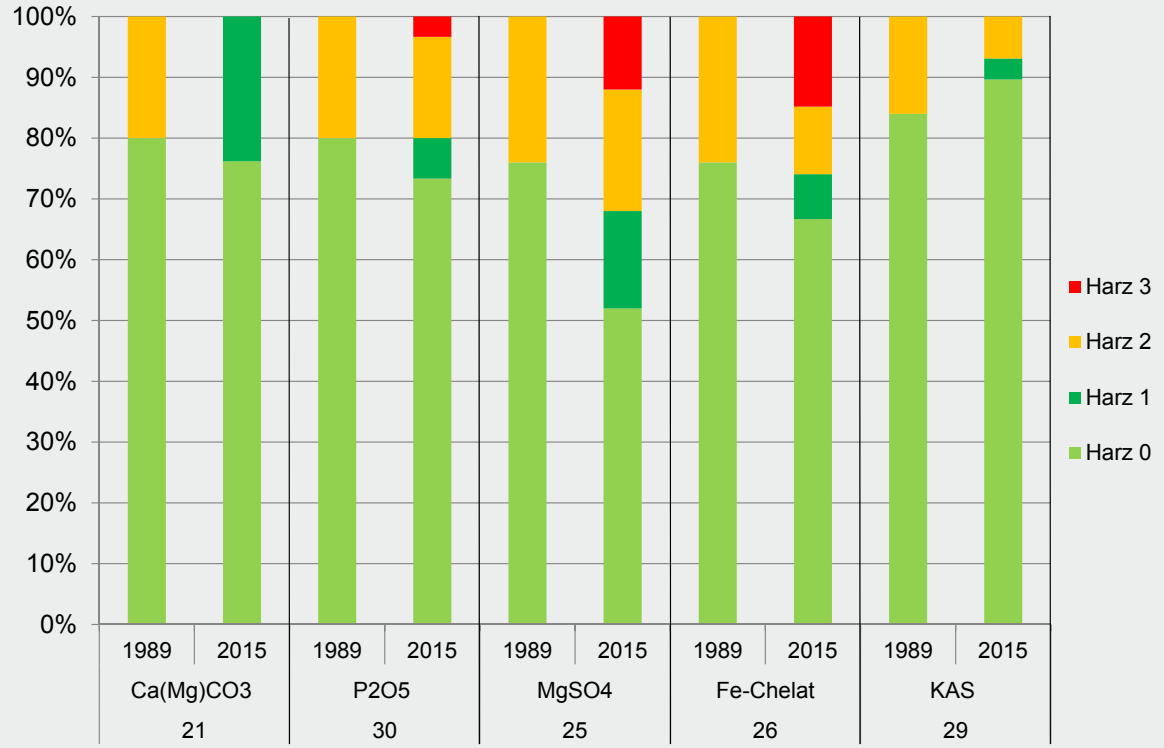


Tabelle 26

Ertragskundliche Kennwerte der einzelnen Varianten. Ertragskundliche Aufnahme 2013; Vitalitätsangabe anhand Harzflussbonitur 2015 (vital = Harzflussstufe 0 oder 1)

h100=Mittelhöhe der 100 stärksten Bäume; d100=mittlerer Brusthöhendurchmesser der 100 stärksten Bäume; hg= Mittelhöhe aller Bäume; dg=mittlerer Brusthöhendurchmesser aller Bäume; G=Grundfläche; V=Gesamtvorrat; dGz=durchschnittlicher Gesamtzuwachs Erntefestmeter ohne Rinde

Variante	Alter	N (ha)	h100 (m)	d100 (cm)	hg (m)	dg (cm)	G (m^2)	V (Vfm)	dGz Efm oR.	Anzahl vitaler Douglasien (ha)
Kontrolle	61	299	29,6	47,1	28,2	38,3	34,6	418,4	6,9	170
$Ca(Mg)CO_3$	61	210	31,5	53,5	30,7	45,2	33,6	434,7	7,1	190
P_2O_5	61	290	29,7	47,5	28,3	39,6	35,6	431,8	7,1	230
$MgSO_4$	61	260	30,4	50,0	28,7	41,9	35,9	438,0	7,2	170
Fe-Chelat	61	260	29,6	47,8	28,9	41,2	34,6	426,6	7,0	180
KAS	61	301	32,3	50,4	30,8	43,1	43,7	570,5	9,4	260

Tabelle 27

Anzahl Douglasien auf den verschiedenen Varianten aus dem Luftbild 1989-1990, aus der terrestrischen Vollaufnahme 2002 und 2015 sowie Anzahl der seit 2002 abgestorbenen bzw. über reguläre Durchforstungen entnommenen Douglasien und der Anteil der ausgeschiedenen Bäume mit deutlichen Harzschäden

Variante	Anzahl Bäume Luftbild 1989	Anzahl Bäume terrestrisch 2002	Anzahl Bäume terrestrisch 2015	Anzahl der 2008 und 2012 durchforsteten Bäume	%-Anteil Harzstufe 2+3 der seit 2008 durchforsteten Bäume
Kontrolle	107	55	27	21	29
$Ca(Mg)CO_3$	86	47	21	19	0
P_2O_5	107	55	30	19	26
$MgSO_4$	94	53	25	14	64
Fe-Chelat	78	53	27	21	52
KAS	75	51	30	12	83

auf der KAS-Parzelle nur halbiert, während auf der Kontrolle und der Dolomit-Parzelle nur noch ein Viertel der im Jahr 1989 erfassten Douglasien vorhanden sind (Tabelle 27). Anzunehmen ist, dass bei den Durchforstungen bevorzugt Bäume mit deutlich sichtbaren Schadsymptomen entnommen wurden. Während auf den Varianten KAS, Kieserit und Fe-Chelat der Großteil der entnommenen Bäume zuvor starken Harzfluss aufwiesen, zeigten auf der Phosphatparzelle nur ein Fünftel und auf der Dolomitfläche keiner der im Zuge der Durchforstungen gefällten Bäume stärkeren Harzfluss.

Trotz der durch die geringe Stichprobe, die selektiven Eingriffe in die jeweiligen Kollektive und in der Zeitreihe variierten Erhebungsmodalitäten bedingten gravierenden Einschränkungen in der Aussagekraft der Vitalitäts- und Wachstumsaufnahmen kann aus den Befunden eine positive Wirkung der Dolomitkalkung und, deutlicher eingeschränkt, auch der Phosphordüngung sowie, entgegen der Erwartung, der Düngung mit Kalkammonsalpeter, auf den Schadverlauf abgeleitet werden.

Genetische Befunde

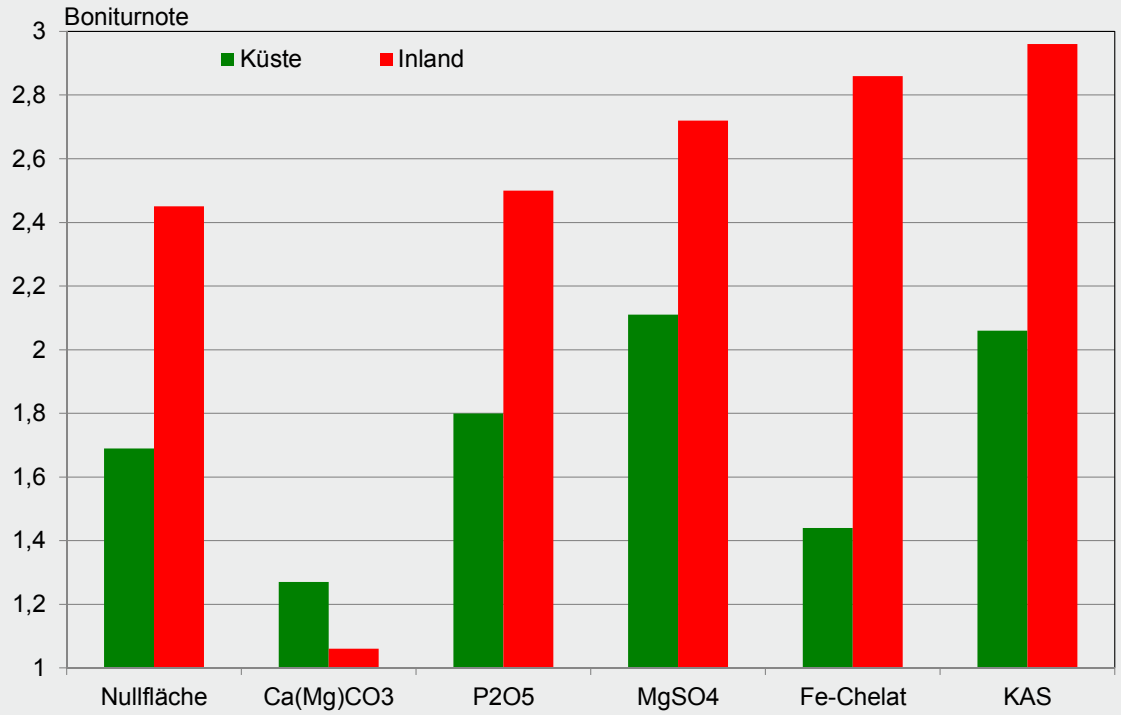
Unterschiede zwischen den einzelnen Parzellen könnten auch genetisch durch das Vorkommen und eine unterschiedliche Verteilung der Douglasienrassen im Versuchsbestand bedingt sein.
Die im Jahr 2005 durchgeführte Untersuchung mit Isoenzym-Genmarkern belegt, dass der Versuchsbestand genetisch sehr inhomogen ist.
Die einzelnen Parzellen bestehen aus Mischungen der Inlands- und der Küstenrasse in unterschiedlichen Anteilen. Auf den Parzellen im westlichen Teil des Bestandes dominieren Küstendouglasien mit geringen Beimischungen an Inlandsdouglasien. Bei den Flächen im östlichen Teil handelt es sich um Mischungen mit deutlich höherem Anteil von Inlandsdouglasien. Im Einzelnen wurde der Anteil an vermutlich der Inlandsrasse zuzuordnenden Douglasien wie folgt bestimmt:

Nullfläche: 37 %
$Ca(Mg)CO_3$: 23 %
P_2O_5: 15 %
$MgSO_4$: 26 %
Fe-Chelat: 44 %
KAS: 31 %

Die der Inlandsrasse zugeordneten Douglasien zeigten deutlich höhere Schäden (Harzen, Kronenverlichtung) als die der Küstenrasse zugeordneten Bäume (Abbildung 24). Bei beiden Rassen zeigen sich auf der Dolomitkalkungsparzelle deutlich geringere Schäden als auf den übrigen Parzellen.
Eine erste Untersuchung durch die Firma ISOGEN im Jahr 2011 mittels DNA-Marker an 20 Doug-

Abbildung 24

Durchschnittliche Boniturnoten der vermuteten Küsten- und Inlandsdouglasien auf der Nullfläche und den einzelnen Düngeparzellen.
Boniturnote: Summe aus Harzfluss (0 = kein Harzfluss bis 3 = starker Harzfluss) und Kronenzustand (0 = gut bis 3 = absterbend) (aus Hosius & Leinemann 2005, verändert)



lasien aus dem Versuchsbestand ergab, dass alle Bäume dem „Mitotype" der Küstenrasse zuzuordnen waren (Leinemann & Hosius 2011). Eine weitere Differenzierung war 2011 in der Etablierungsphase des Verfahrens noch nicht möglich.

Die im Jahr 2013 im ASP durchgeführte Untersuchung mittels DNA-Marker weist 20 der insgesamt 27 untersuchten Douglasien der Küstenrasse, 4 der „grauen" Rasse (Übergangsrasse zwischen der „grünen" Küstendouglasie und der „blauen" Inlandsdouglasie) zu (Fussi & Konnert 2013). 3 Bäume werden als vermutliche Hybriden zwischen der grünen und der grauen Douglasie eingewertet. Auf die einzelnen Parzellen verteilen sich die Rassen wie folgt:
Nullfläche: 7 grüne, 2 graue
$Ca(Mg)CO_3$: 5 grüne, 2 graue, 2 Hybrid grün-grau
P_2O_5: 7 grüne, 1 graue, 1 Hybrid grün-grau.

Auch nach der DNA – Analyse enthält der Bestand demnach eine Mischung unterschiedlicher Douglasienrassen. Die Unterschiede im Vitalitätszustand zwischen der unbehandelten Nullfläche und der Kalkungs- sowie der Phosphordüngungsfläche lässt sich hiermit aber nicht erklären, da sich zumindest anhand der jeweils 9 Probebäume keine deutlichen Unterschiede in der Verteilung der Rassen erkennen lassen.

Befunde des Stammdüngungsversuchs

Wie vorstehend beschrieben, hatten die Bäume am Standort Adenau auf bodenappliziertes Eisenchelat weder im Kronenzustand, noch hinsichtlich des Eisengehaltes in den Nadeln erkennbar reagiert. Dies könnte auf einer durch Manganüberschuss in der Bodenlösung behinderten Eisenaufnahme beruhen. Mit dem Stammdüngungsversuch mit Promi-Ferro-Kapseln sollte geprüft werden, ob diese mögliche Behinderung der Fe-Aufnahme aus dem Boden umgangen werden kann. Es zeigte sich aber keinerlei Verbes-

Tabelle 28

Entwicklung des Kronenzustandes von mit Promi-Ferro-Kapseln versehenen Bäumen und unbehandelten Vergleichsbäumen am Standort Adenau – Abt. 84a; Düngemittelapplikation im Mai 1994; VLP: mittleres Nadelverlustprozent von je 9 Bäumen ± Standardabweichung; VGP: mittleres Vergilbungsprozent (differenzierte Vergilbungsbonitierung nur bei Aufnahme 1997)

		Mai 1994	Juni 1995	März 1997
behandelte Bäume	VLP	42 ± 19	57 ± 23	57 ± 26
	VGP	?	?	24 ± 24
unbehandelte Bäume	VLP	43 ± 20	59 ± 25	54 ± 25
	VGP	?	?	13 ± 22

serung des Zustands der behandelten Bäume. Die Kronenverlichtung ist weitgehend unverändert geblieben. Die Vergilbung hat sich offensichtlich sogar verstärkt (Tabelle 28). Auch die auf Eisenmangel hindeutende Ausbleichung des jeweils jüngsten Nadeljahrgangs blieb unverändert erhalten. Eingehende Analysen durch das Botanische Institut der Universität Mainz an Probenmaterial aus den Jahren 1995 und 1996 zeigten weder bei Gesamteisen noch beim löslichen Eisen erhöhte Gehalte in den behandelten Bäumen und auch keine signifikanten Effekte auf den Chlorophyllgehalt und die Katalaseaktivität (Kaus-Thiel 1998). Denkbar ist, dass die in das Splintholz eingebrachten Kapseln von den Bäumen mit Harz umschlossen wurden und dies die Abgabe des Eisens in den Saftstrom verhindert hat.

Zusammenschau

Die im Versuchsbestand Adenau beobachteten Schäden werden offensichtlich durch Mangantoxizität verursacht. Der Manganüberschuss verstärkt dabei den Magnesiummangel und vor allem den deutlichen Phosphormangel in diesem Ökosystem. Die Dolomitkalkung verringert den Manganüberschuss im Boden, reduziert die Mangangehalte in den Douglasiennadeln und auch in den anderen Baumkompartimenten (Holz, Rinde, etc.), verbessert die Magnesiumernährung und erhöht die Vitalität der Douglasien. Auch die Phosphordüngung hat sich in einer Abmilderung der Mangantoxizität ausgewirkt. Daher ist für diesen Standort eine Kombination einer Dolomitkalkung mit einer Phosphordüngung, zum Beispiel als Dolomit-Holzasche-Phosphatgemisch (vgl. Kap. 8.3), zu empfehlen.

7.2.2 Befunde Versuch Hochspeyer

Nadelanalysen

Die Nadelanalysen für die Versuchsanlage Hochspeyer zeigen auf der Kontrolle vergleichsweise mäßige Mangangehalte zwischen 0,41 und 1,52 mg/g im ersten und zwischen 0,43 und 1,03 mg/g im dritten Nadeljahrgang (Tabelle 29). Damit liegen die Werte im Normalbereich oder wenig oberhalb des Normalbereichs der Manganernährung (vgl. Tabelle 1). Auf der Dolomitkalkungsparzelle sind die Mangangehalte gegenüber der Nullfläche und den anderen Düngungsvarianten merklich reduziert (0,24-0,46 mg/g).

Die Stickstoffgehalte liegen 1987, 1989 und 1991 zumeist wenig unterhalb oder noch im Normalbereich. Die Düngung mit Kalkammonsalpeter führt zu einer deutlichen Steigerung der Stickstoffgehalte, wohingegen die Phosphordüngung ein Absinken bewirkt.

Die Phosphordüngung macht sich bereits wenige Jahre nach der Düngemittelapplikation bis selbst 20 Jahre nach der Düngung nicht nur durch geringere Stickstoffgehalte, sondern auch durch deutlich erhöhte Phosphorgehalte in den 2012 gewonnenen Nadeln bemerkbar. Einzig in den Nadeln der Bäume dieser Varianten werden die Phosphorgehalte dem Normalbereich zugeordnet. Alle anderen Varianten liegen im Mangelbereich. Die NPK Düngung bewirkt zwar ebenfalls einen Anstieg der Phosphorgehalte, jedoch fällt dieser verglichen mit der Phosphordüngung niedriger aus.

Die Abnahme der Stickstoffgehalte nach der Phosphordüngung dürfte durch Verdünnungs-

Tabelle 29

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3) der Hauptnährstoff- und Mangangehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) des diagnostischen Düngungsversuchs Hochspeyer. Die Analysen aus dem Jahr 1987 stammen von der Erstbeprobung vor Versuchsbeginn (vgl. Kap. 4). Die Nährstoffgehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs).

Jahr	Variante	Zustand	N [mg/g]	P [mg/g]	K [mg/g]	Ca [mg/g]	Mg [mg/g]	S [mg/g]	Mn [mg/g]
1987	Kontrolle	Geschä.	14,7±1,9	0,70±0,10	6,27±2,27	4,20±2,73	0,76±0,03	1,54±0,11	1,52±1,03
1987	Kontrolle	Gesund	14,3±0,6	0,97±0,15	5,75±1,37	4,85±0,79	0,92±0,25	1,79±0,37	1,27±0,70
1989	Kontrolle	Geschä.	17,2±0,4	0,63±0,06	5,88±0,60	2,38±0,48	0,74±0,23	1,72±0,06	0,46±0,16
1989	Kontrolle	Gesund	18,2±1,0	0,63±0,06	5,88±0,36	2,77±0,15	0,81±0,06	1,72±0,04	0,44±0,05
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	14,2±2,1	0,53±0,06	5,80±0,48	2,38±0,23	0,76±0,04	1,48±0,22	0,29±0,04
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	17,2±1,5	0,70±0,10	5,42±0,46	3,88±0,52	1,02±0,16	1,86±0,20	0,46±0,12
1989	P_2O_5	Geschä.	14,3±0,4	2,27±0,15	6,92±0,46	4,02±0,25	1,20±0,18	2,08±0,04	0,58±0,11
1989	P_2O_5	Gesund	15,6±0,7	2,27±0,25	6,52±0,20	5,30±0,56	1,27±0,13	1,86±0,03	0,80±0,09
1989	Kieserit	Geschä.	14,6±2,4	0,63±0,06	6,25±0,30	3,00±0,65	0,86±0,09	1,75±0,05	0,70±0,25
1989	Kieserit	Gesund	16,0±0,5	0,73±0,06	6,07±1,01	4,20±0,26	1,15±0,10	1,85±0,21	0,77±0,03
1989	KAS	Geschä.	21,1±1,4	0,60±0,00	4,77±0,75	3,25±0,10	1,86±0,08	1,37±0,06	0,70±0,04
1989	KAS	Gesund	26,0±3,3	0,60±0,00	4,10±0,54	3,62±0,50	0,88±0,07	1,52±0,14	0,79±0,17
1989	NPK	Geschä.	17,4±1,4	1,10±0,10	6,42±0,50	3,15±0,44	0,77±0,08	1,23±0,11	0,71±0,16
1989	NPK	Gesund	18,6±1,3	1,20±0,00	6,75±0,46	3,98±0,60	0,96±0,08	1,38±0,07	0,86±0,06
1991	Kontrolle	Geschä.	14,4±0,6	0,61±0,02	5,64±1,15	1,96±0,39	0,83±0,20	1,43±0,04	0,41±0,12
1991	Kontrolle	Gesund	14,2±0,8	0,66±0,07	5,43±0,60	2,08±0,23	0,93±0,16	1,39±0,06	0,44±0,01
1991	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	14,1±0,6	0,57±0,02	4,91±0,83	2,43±0,47	1,04±0,13	1,27±0,10	0,24±0,05
1991	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	15,2±0,7	0,65±0,03	4,64±0,75	3,25±0,24	1,42±0,12	1,46±0,07	0,29±0,02
1991	P_2O_5	Geschä.	11,3±0,8	1,46±0,10	4,41±0,23	3,37±0,17	0,96±0,11	1,22±0,09	0,54±0,34
1991	P_2O_5	Gesund	12,2±1,1	1,68±0,15	5,39±0,19	5,11±0,64	1,11±0,05	1,22±0,05	0,54±0,15
1991	Kieserit	Geschä.	14,1±0,8	0,65±0,06	5,21±0,21	1,89±0,22	1,07±0,12	1,29±0,09	0,50±0,10
1991	Kieserit	Gesund	13,3±0,8	0,73±0,03	5,18±0,34	2,84±0,59	1,22±0,05	1,44±0,16	0,58±0,13
1991	KAS	Geschä.	16,2±0,8	0,55±0,04	4,50±0,32	2,79±0,32	0,79±0,15	1,25±0,14	0,53±0,03
1991	KAS	Gesund	15,5±1,2	0,63±0,02	4,79±0,40	2,60±0,31	0,82±0,06	1,27±0,09	0,51±0,03
1991	NPK	Geschä.	13,2±1,1	1,19±0,12	6,13±0,35	1,98±0,21	0,77±0,12	1,00±0,06	0,38±0,08
1991	NPK	Gesund	14,2±0,3	1,20±0,04	6,23±0,68	2,30±0,47	0,83±0,07	0,99±0,16	0,38±0,05
2012	Kontrolle	Gesund	18,8±1,0	1,07±0,04	5,41±1,18	2,61±0,71	1,39±0,09	1,37±0,14	0,46±0,02
2012	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	18,8±2,7	0,97±0,08	5,16±0,19	2,63±0,63	1,53±0,17	1,66±0,17	0,28±0,07
2012	P_2O_5	Gesund	16,9±0,5	1,42±0,11	6,34±0,40	2,68±0,65	1,34±0,09	1,26±0,10	0,48±0,08

effekte aufgrund der Anregung der Biomasseproduktion begründet sein und verdeutlicht den stärkeren Phosphormangel an diesem Standort verglichen mit dem Düngeversuch Adenau. Die starke Zunahme der Stickstoffgehalte vom ersten zum dritten Nadeljahrgang mit Ausnahme der Varianten mit Phosphordüngung zeigt, dass Stickstoff zwar in ausreichenden Mengen verfügbar ist, jedoch von den Douglasien nicht verwertet werden kann (Abbildung 25). Die einzelnen Mischproben der Kontrolle weisen Stickstoffgehalte bis 22,7 mg/g, auf der Dolomitkalkungsparzelle bis 25,7 mg/g und am extremsten bei der Düngung mit Kalkammonsalpeter bis zu 34,6 mg/g auf. Die Varianten mit Phosphordüngung (P_2O_5 und NPK) zeigen ab 1991 als einzige eine Abnahme der Stickstoffgehalte in älteren Nadeln.
Bei Kalium wird der Bereich einer ausreichenden Ernährung mit Ausnahme der NPK-Volldüngungsparzelle häufig unterschritten, was aber, wie in Kap. 4.1.2 erörtert, nicht auf einen Kaliummangel hindeuten muss, sondern durch den Ladungsausgleich und durch die Gehalte anderer Kationen bedingt sein kann.

Bei Magnesium waren bei den Untersuchungen Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre auf der Kontrolle unzureichende oder im unteren Normalbereich liegende Mg-Gehalte festzustellen. Bei der Untersuchung 2012 lagen die Mg-Gehalte demgegenüber im „ausreichenden" Bereich. Dies dürfte durch die im Rahmen des regulären Kalkungsprogramms durchgeführte Dolomitkalkung - auch der Referenzfläche - im Jahr 2002 bewirkt worden sein. Auf der Dolomitkalkungsparzelle sind die Magnesiumgehalte seit 1991 deutlich erhöht und liegen nicht mehr im Mangelbereich. Die Effekte der Kalkung sind an diesem Standort rascher eingetreten als am Standort Adenau. Entgegen den Befunden am Standort Adenau führte die Düngung mit Magnesiumsulfat (Kieserit) am Standort Hochspeyer zu einer deutlichen Erhöhung des Magnesiumgehalts der Nadeln (Tabelle 29).

Auffällig gering sind auf dieser Versuchsanlage die Calciumgehalte verglichen mit den anderen beprobten Douglasienbeständen – auch auf der Dolomitkalkungsparzelle. Dies weist auf die in Kap. 4.1.2. diskutierte physiologische Bedeutung von Calcium bei der Immobilisation von Mangan hin. Da dieser Standort geringere austauschbaren Manganvorräte im Boden aufweist und dadurch die Manganaufnahme und Mangangehalte der Nadeln verglichen mit den restlichen Standorten deutlich geringer sind, wird weniger Calcium zur Entgiftung des Mangans benötigt. Die erhöhten Calcium- und Kaliumgehalte der Phosphatdüngevariante könnten auf eine gemeinsame Aufnahme von $H_2PO_4^-$ und Ca^{2+} und K^+ hindeuten.

Bei Kupfer liegen einige Werte unter 2 mg/kg und bei Molybdän unter 0,08 mg/kg, was auf eine möglicherweise unzureichende Versorgung mit diesen Spurennährstoffen hindeutet. Bei Eisen, Zink und Bor sind aus den vorliegenden Analysebefunden keine Hinweise auf eine Mangelernährung abzuleiten. Die Fe-, B- und Mo-Gehalte der Dolomitkalkungsvariante liegen leicht oberhalb der Kontrolle (Tabelle 30).

Der insbesondere hinsichtlich Phosphor sowie vor der Kalkung auch Magnesium ungünstige Ernährungszustand des Bestandes dürfte neben dem armen Ausgangssubstrat auch mit der Waldgeschichte an diesem Waldort zusammenhängen. Vorbestände waren jeweils Kiefernbestände. Der Vorbestand brach im Bestandesalter von ca. 40 Jahren durch Schneebruch zusammen und wurde flächig geräumt. Der Schlagabraum und sicherlich ein wesentlicher Teil der Humusauflage wurde auf Wälle zusammengeschoben. Dies dürfte mit einer erheblichen Verarmung der Zwischenfelder verbunden gewesen sein.

<u>Vitalität und Wachstum der Bäume</u>
Auch auf der Versuchsanlage Hochspeyer wurde, entsprechend der Vorgehensweise beim Versuch Adenau, zur Bewertung der Homogenität der einzelnen Versuchsparzellen hinsichtlich der Vitalität der Douglasien zu Beginn der Untersuchungen (1989 und 1990) eine Interpretation der CIR-Luftbilder durchgeführt.
In der Kronenverlichtung weisen die verschiedenen Varianten zu Beginn der Untersuchungen nur geringe Unterschiede auf (Abbildung 26). Die Kieserit- und die KAS-Parzelle zeigen eine etwas höhere Verlichtung, allerdings nur im Jahr 1990.

Abbildung 25

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3 bzw. 6 (1989)) der Stickstoffgehalte der Nadeln des ersten (c+0) und dritten (c+2) Nadeljahrgangs der Varianten des diagnostischen Düngungsversuchs Hochspeyer

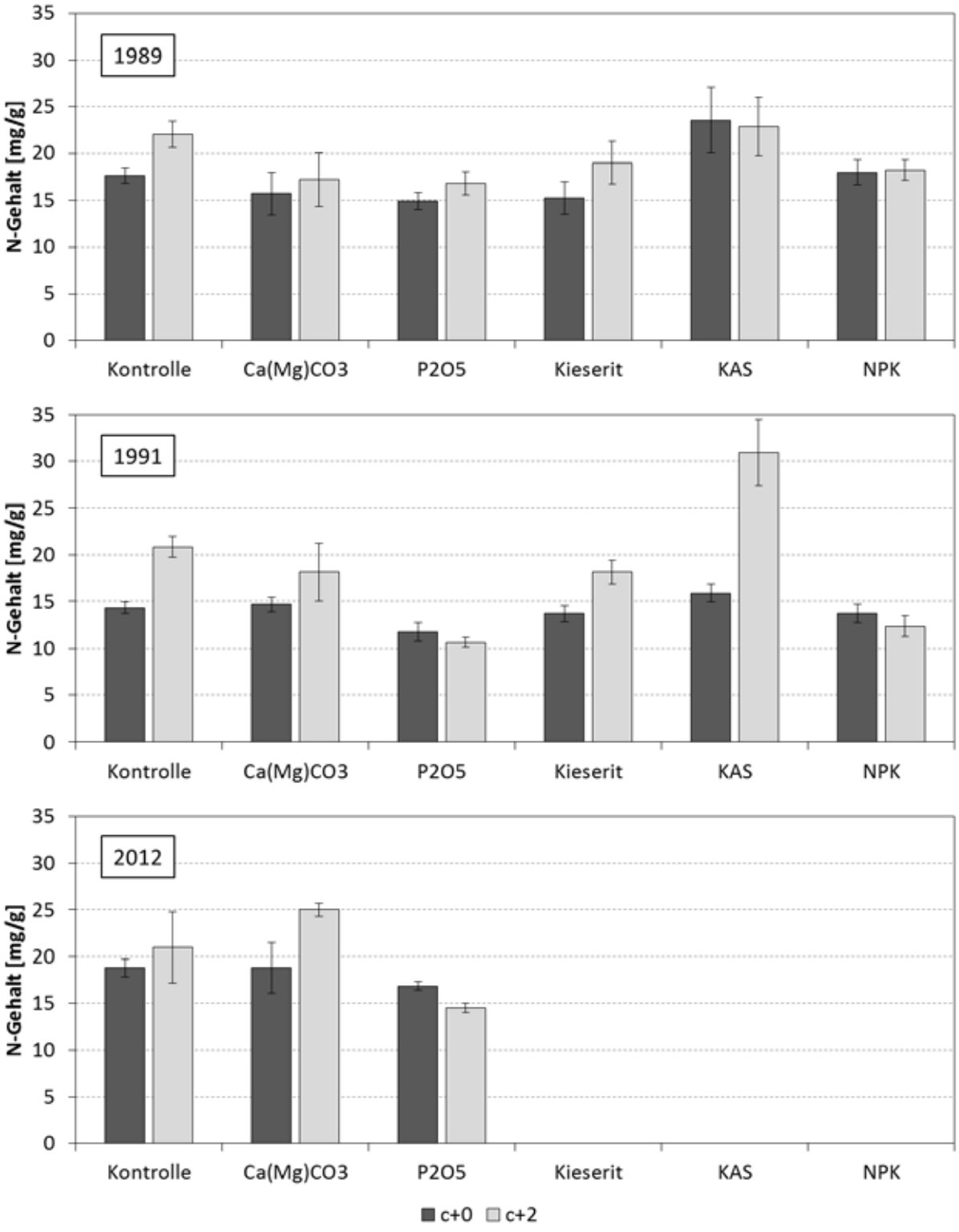


Abbildung 26

Entwicklung der Kronenverlichtung auf den verschiedenen Versuchsparzellen der Düngungsversuchsfläche Hochspeyer 1989 und 1990; Interpretation aus CIR-Luftbildern;
Kronenverlichtungsstufen: 0 = 0-10 %; 1 = 15-25 %; 2 = 30-60 %; 3 =65-99 %; 4 = tot

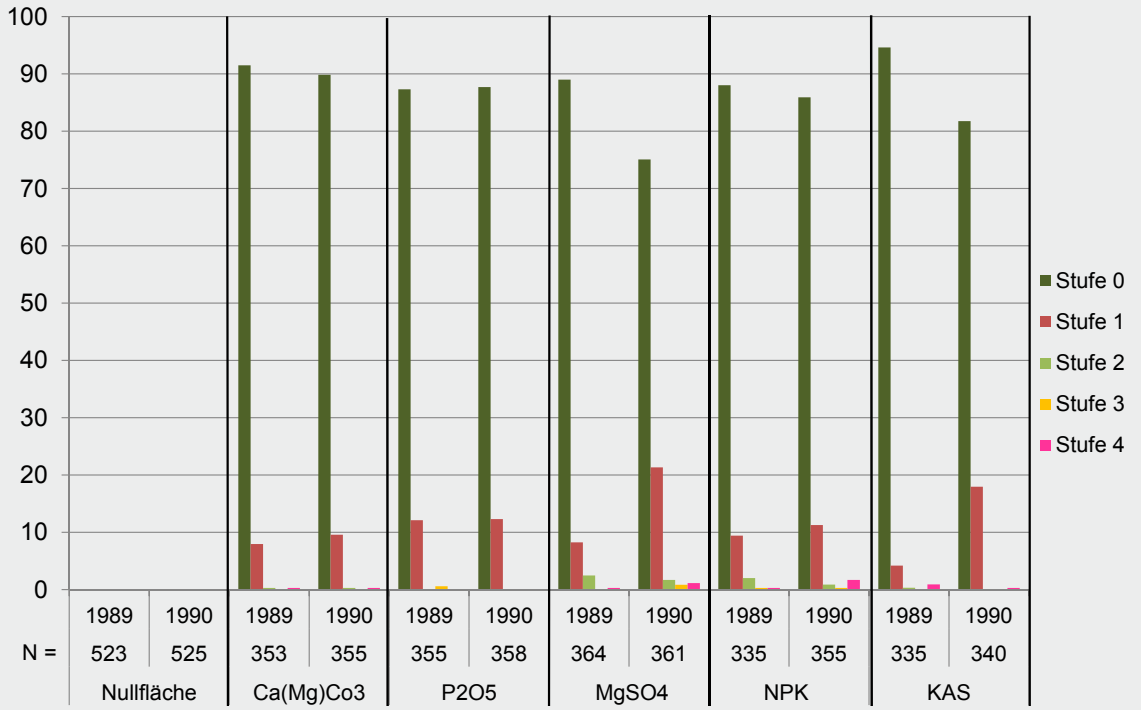


Abbildung 27

Entwicklung der Kronenvergilbung auf den verschiedenen Versuchsparzellen der Düngungsversuchsfläche Hochspeyer 1989 und 1990; Interpretation aus CIR-Luftbildern;
Kronenverlichtungsstufen: 0 = 0 -10 %; 1 = 15-25 %; 2 = 30-60 %; 3 = 65-99 %

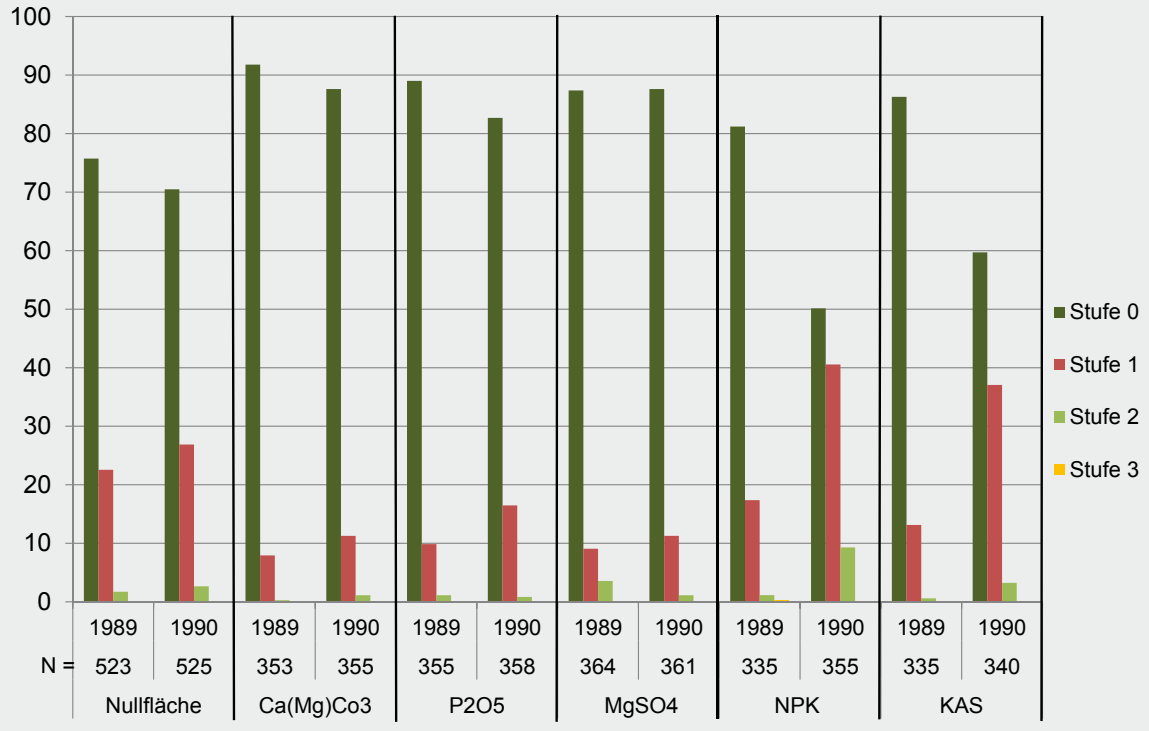


Tabelle 30

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3) der Spurennährstoffgehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) der Düngeversuchsversuchsfläche Hochspeyer. Die Analysen aus dem Jahr 1987 stammen von der Erstbeprobung vor Versuchsbeginn (vgl. Kap. 4). Die Nährstoffgehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs).

Jahr	Variante	Zustand	Fe[mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	B [mg/kg]	Al [mg/kg]	Si [mg/kg]
1987	Kontrolle	Geschä.	101±47	1,8±1,6	35±45,4	-	-	270±90	2866±1343
1987	Kontrolle	Gesund	321±350	2,0±1,8	95±139,1	-	-	290±72	2633±1026
1989	Kontrolle	Geschä.	71±6	-	-	-	-	220±43	2900±100
1989	Kontrolle	Gesund	58±1	-	-	-	-	230±6	2700±300
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	65±12	-	-	-	-	200±29	4166±569
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	71±9	-	-	-	-	200±11	4033±611
1989	P_2O_5	Geschä.	65±6	-	-	-	-	190±12	3500±346
1989	P_2O_5	Gesund	57±3	-	-	-	-	200±28	3166±416
1989	Kieserit	Geschä.	64±6	-	-	-	-	190±20	2300±361
1989	Kieserit	Gesund	52±1	-	-	-	-	220±22	2267±58
1989	KAS	Geschä.	58±6	-	-	-	-	250±119	2467±351
1989	KAS	Gesund	51±3	-	-	-	-	210±38	2433±153
1989	NPK	Geschä.	64±10	-	-	-	-	190±20	1900±265
1989	NPK	Gesund	68±2	-	-	-	-	220±32	2067±153
1991	Kontrolle	Geschä.	82±8	3,0±0,1	22±1,5	-	-	230±24	2033±58
1991	Kontrolle	Gesund	77±10	3,1±0,4	24±0,6	-	-	230±21	1633±115
1991	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	88±15	2,7±0,6	27±6,4	-	-	200±18	3500±889
1991	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	82±10	2,7±0,2	30±4,0	-	-	210±7	2500±693
1991	P_2O_5	Geschä.	72±6	2,6±0,5	18±3,2	-	-	180±22	2133±231
1991	P_2O_5	Gesund	81±2	3,2±1,1	26±1,2	-	-	180±22	2167±252
1991	Kieserit	Geschä.	102±2	2,8±0,5	20±0,6	-	-	170±14	1367±153
1991	Kieserit	Gesund	80±15	3,1±0,1	22±2,1	-	-	210±20	1533±153
1991	KAS	Geschä.	112±22	2,7±0,8	26±2,5	-	-	200±27	2333±1185
1991	KAS	Gesund	75±7	3,0±0,3	24±1,5	-	-	210±33	1767±208
1991	NPK	Geschä.	120±62	2,3±0,1	19±2,0	-	-	180±14	1167±58
1991	NPK	Gesund	95±15	2,6±0,2	19±1,5	-	-	190±31	1233±58
2012	Kontrolle	Gesund	56±2	5,3±0,8	27±4,4	0,06±0,03	30±1	280±45	-
2012	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	66±12	4,8±0,4	28±5,1	0,07±0,02	33±4	220±29	-
2012	P_2O_5	Gesund	59±9	5,0±0,5	21±2,6	0,04±0,01	30±8	280±54	-

Hinsichtlich des Merkmals Verfärbung/Vergilbung der Nadeln zeigen sich bei der CIR-Luftbildansprache deutlichere Unterschiede zwischen den Versuchsparzellen (Abbildung 27). So weisen die Varianten Dolomit, P_2O_5 und $MgSO_4$ im Vergleich zu den übrigen Varianten einen höheren Anteil an Douglasien ohne Vergilbung auf.
Terrestrische Kronenzustandsbonituren wurden im Zeitraum 1989 bis 1993 jährlich an 30 Probebäumen je Parzelle durchgeführt. Sie zeigten einen vergleichbaren Ausgangszustand zwischen den Varianten und eine rasche und sehr deutliche Verbesserung der Kronenverlichtung auf der Phosphat- und NPK-Parzelle (Abbildung 28). Bei den übrigen Parzellen veränderte sich der Kronenzustand bis 1993 nicht (Tabelle 31). Da die Befunde der Nadelanalysen und die deutliche Reaktion der Douglasien auf die P-Düngung schon wenige Jahre nach Versuchsbeginn zeigten, dass es sich bei diesem Douglasienbestand nicht um Mangantoxizität, sondern um einen standortbedingten und durch Übernutzung verstärkten Phosphormangel handelt, wurden die Vitalitätsaufnahmen nach 1993 eingestellt.
Die Verbesserung des Kronenzustandes auf der Phosphat- und Volldüngungsvariante ging einher mit einer vom okularen Eindruck her sehr deutlichen Steigerung des Höhenwachstums auf diesen Parzellen. Leider liegen hierzu keine entsprechenden Messdaten vor. Im Jahr 2013 wurde eine ertragskundliche Aufnahme des Versuchsareals durchgeführt. Allerdings war ein Variantenvergleich dabei nicht möglich, da die Grenzen der einzelnen Parzellen nicht hinreichend zu rekonstruieren waren und einzelne Parzellen zudem durch nach der Versuchsanlage eingelegte Rückegassen beeinträchtigt sind.

Die Verbesserung des Kronenzustandes auf der Phosphat- und Volldüngungsvariante ging einher mit einer vom okularen Eindruck her sehr deutlichen Steigerung des Höhenwachstums auf diesen Parzellen. Leider liegen hierzu keine entsprechenden Messdaten vor. Im Jahr 2013 wurde eine ertragskundliche Aufnahme des Versuchsareals durchgeführt. Allerdings war ein Variantenvergleich dabei nicht möglich, da die Grenzen der einzelnen Parzellen nicht hinreichend zu rekonstruieren waren und einzelne Parzellen zudem durch nach der Versuchsanlage eingelegte Rückegassen beeinträchtigt sind.
Die Mittelhöhe von durchschnittlich 24,2 Meter entspricht einer I. Ertragsklasse (Bergel 1985, mäßige Durchforstung).

Zusammenschau
Die an diesem Standort beobachteten Schäden wurden offensichtlich nicht durch Mangantoxizität, sondern durch einen standortsbedingten und durch die Nutzungsgeschichte verstärkten Phosphormangel verursacht. Die Befunde sind ein sehr anschaulicher Beleg für die Beeinträchtigung der Standortsproduktivität durch Verletzung der Nährstoffnachhaltigkeit, im Wesentlichen wohl über die intensive Schlagräumung der Vorbestände. Da neben Phosphor auch die Magnesiumversorgung unzureichend ist, ist für diesen Standort eine Kombination einer Dolomitkalkung mit einer Phosphordüngung, zum Beispiel als Dolomit-Holzasche-Phosphatgemisch (vgl. Kap. 8.3), zu empfehlen.

7.2.3 Befunde Versuch Cochem

Nadelanalysen
Die Nadelanalysen im Versuch Cochem weisen auf einen Manganüberschuss in diesem Ökosystem hin (Tabelle 32). Im ersten Nadeljahrgang variieren die Mn-Gehalte der unbehandelten Kontrolle zwischen 1,7 und 3,7 mg/g und im dritten Nadeljahrgang zwischen 2,4 und 8,0 mg/g, wobei die Maximalwerte des dritten Nadeljahrgangs auf der Kontrolle im Jahr 2012 gemessen wurden. Die Mangangehalte liegen zwar deutlich über der Grenze der normalen Ernährung, jedoch ebenfalls deutlich unter den Gehalten der Douglasiennadeln des Düngeversuchs Adenau (vgl. Kap. 7.2.1). Auch die in Kap. 4.1.2 definierten Schwellen für eine, die beschriebenen Symptome auslösende Mangantoxizität (vgl. Tabelle 1) werden nur selten überschritten.
Auf der Dolomitkalkungsparzelle sind die Mangangehalte aller Nadeljahrgänge gegenüber der Kontrolle und den anderen Düngungsvarianten deutlich verringert. Diese Wirkung ist ansatzweise bereits bei den 1989 erhobenen Daten zu erkennen und hat sich auf 2012 deutlich verstärkt. 2012 liegen die Mn-Gehalte im ersten Nadeljahrgang mit 0,8 bis 1,0 mg/g bei einem Drittel der

Abbildung 28

Entwicklung der Kronenverlichtung der vom Boden her bonitierten 30 Douglasien auf den verschiedenen Parzellen im Verhältnis zur Kontrolle (Wert der Kontrolle entspricht 100 %) der Düngungsversuchsfläche Hochspeyer im Zeitraum 1989 bis 1993. Die absoluten Werte sind in Tabelle 30 dargestellt.

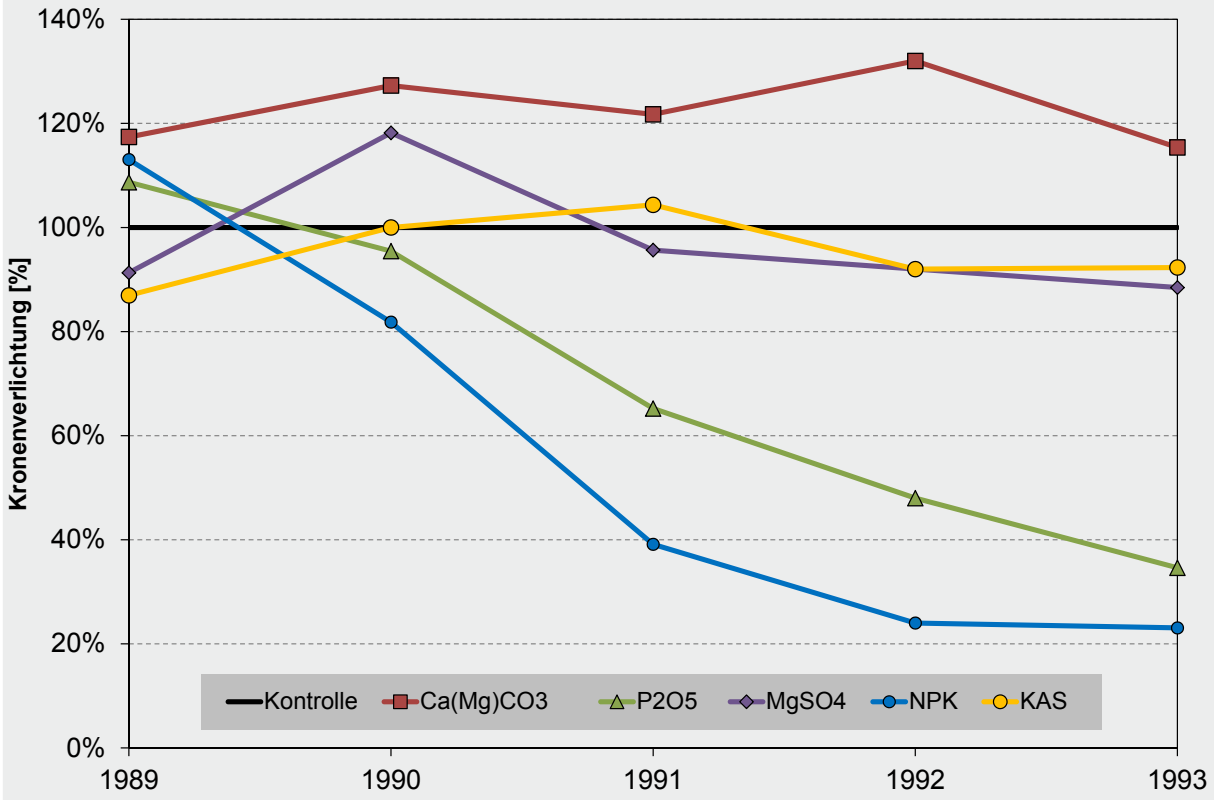


Tabelle 31

Mittelwert und Standardabweichung der Kronenverlichtung [%] der angesprochenen Douglasien (n = 30) im Zeitraum 1989 bis 1993 der Düngungsversuchsfläche Hochspeyer

Jahr	0 (Kontrolle)	$Ca(Mg)CO_3$	P_2O_5	$MgSO_4$	KAS	NPK
1989	23 ± 20	27 ± 17	25 ± 17	21 ± 17	20 ± 14	26 ± 17
1990	22 ± 16	28 ± 17	21 ± 11	26 ± 22	22 ± 14	18 ± 11
1991	23 ± 16	28 ± 17	15 ± 8	22 ± 20	24 ± 14	9 ± 8
1992	25 ± 16	33 ± 17	12 ± 8	23 ± 20	23 ± 11	6 ± 6
1993	26 ± 16	30 ± 17	9 ± 8	23 ± 22	24 ± 14	6 ± 8

Ausgangswerte.
Aber auch auf der Phosphordüngungsvariante sind die Mangangehalte gegenüber der Kontrolle reduziert, was sich auch schon in den Nadelanalysen von 1993 andeutet. Wie in Adenau könnte dies durch die von Ducić & Polle (2006) beschriebene Fähigkeit der Douglasie, Mangan zusammen mit Phosphor in der Wurzel zu immobilisieren, bedingt sein (vgl. Kap. 4.1.2).

Die Stickstoffversorgung ist 1989 und 2012 durchweg ausreichend bis optimal (Tabelle 32). Im Jahr 1993 weisen dagegen ein Großteil der beprobten Douglasien Stickstoffgehalte unterhalb des Normalbereichs auf. Die Düngung mit Kalkammonsalpeter erhöht kurzfristig die Stickstoffgehalte des ersten Nadeljahrgangs, führt aber offensichtlich zu einer Reduktion der P-, K- und Mg-Gehalte. Nährelementmangelsymptome traten aber auch auf der KAS-Parzelle nicht auf. Im Jahr 1993 sind nur die Stickstoffgehalte des dritten Nadeljahrgangs auf der KAS-Parzelle noch deutlich gegenüber den anderen Varianten erhöht (Abbildung 29).
Dass in 2012 alle Varianten höhere Stickstoffkonzentrationen im dritten Nadeljahrgang im Vergleich zum ersten Nadeljahrgang aufweisen, kann auf eine generell angestiegene Stickstoff-Verfügbarkeit an diesem Standort hinweisen. Ursache könnten die hohen atmogenen Stickstoffeinträge in Verbindung mit der Stabilisierung des Humushaushaltes nach den starken Eingriffen in den Humus vor der Bestandesbegründung (siehe unten) sein. Eine andere Erklärung der Stickstoffanreicherung im dritten Nadeljahrgang wäre eine gehemmte Ausnutzung des Stickstoffangebots. Dies würde bedeuten, dass entweder ein oder mehrere andere Nährelemente im Mangel sind (worauf sich nachfolgend dargestellte Hinweise ergeben) oder aber die Photosynthese und damit die Bereitstellung von Kohlehydraten gehemmt ist (vgl. Schulze et al. 2005, S. 378ff).

Bei Phosphor waren bei den Untersuchungen Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre unzureichende Gehalte festzustellen. Bei der Untersuchung 2012 lagen die Phosphorgehalte demgegenüber deutlich höher als bei den früheren Untersuchungen und auch auf der Nullfläche knapp über den angegebenen Mangelschwellen (vgl. Tabelle 1, Tabelle 32). Die Phosphordüngung bewirkte wenige Jahre nach der Düngemittelapplikation eine Erhöhung des Phosphorgehalts der Nadeln. Bei der Untersuchung 2012 sind demgegenüber, offenbar aufgrund der auch ohne Phosphordüngung angestiegenen Phosphorgehalte in den Nadeln, keine Unterschiede zwischen der Phosphordüngungsvariante, der Nullfläche und der Kalkungsvariante mehr zu erkennen. Trotz dieser erhöhten Phosphorgehalte liegt das N/P Verhältnis der Varianten zwischen 14 und 15 und damit im oberen Bereich einer ausgeglichenen Ernährung an der Grenze zu Phosphor-Limitierung (vgl. Tabelle 11). Gleiches zeigen auch die Berechnungen der CND, die auch Phosphor, selbst auf der Phosphordüngungsvariante, als stärkstes Mangelelement ausweisen (Daten nicht gezeigt).

Auch bei Magnesium und bei einigen Proben auch bei Calcium liegen die Gehalte der Nadeln der Untersuchungen 1987 und 1989 deutlich unter der späteren Untersuchung in 2012. Bereits 1993 ist ein leichter Anstieg zu erkennen. Insbesondere die Dolomitkalkungsparzelle zeigt eine deutliche Erhöhung der Magnesiumgehalte verglichen mit den restlichen Varianten. 2012 ist bei insgesamt guter Mg-Versorgung kein Unterschied mehr in den Magnesiumgehalten zwischen Kalkungs- und Nullfläche festzustellen. Diese Verbesserung aller Varianten dürfte durch eine Dolomit-Praxiskalkung - auch der Kontrollfläche - im Jahr 1995 beschleunigt worden sein.
Bei Kalium wird der Bereich einer ausreichenden Ernährung auch 2012 meist unterschritten. Ein negativer Einfluss der Kalkung auf die Kaliumversorgung ist am Standort Cochem nicht zu erkennen.
Bei Molybdän liegen einige Werte unter der Mangelgrenze von Carter et al. (1984), was auf eine möglicherweise unzureichende Versorgung mit diesen Spurennährstoffen hindeutet (Tabelle 33). Die Kupfergehalte liegen ebenfalls im unteren Bereich einer normalen Ernährung. Bei Bor, Eisen und Zink sind aus den vorliegenden Analysebefunden keine Hinweise auf eine Mangelernährung abzuleiten.
Die auffällige zeitliche Entwicklung der Ernährung der Douglasien auch auf der Referenzfläche dürfte

Tabelle 32

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3) der Hauptnährstoff- und Mangangehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) des diagnostischen Düngungsversuchs Cochem. Die Analysen aus dem Jahr 1987 stammen von der Erstbeprobung vor Versuchsbeginn (vgl. Kap. 4). Die Nährstoffgehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs). Im Jahr 1993 wurde lediglich eine Mischprobe analysiert, sodass keine Streuung angegeben werden kann.

Jahr	Variante	Zustand	N [mg/g]	P [mg/g]	K [mg/g]	Ca [mg/g]	Mg [mg/g]	S [mg/g]	Mn [mg/g]
1987	Kontrolle	Geschä.	14,5±1,1	0,73±0,06	5,18±1,81	3,48±0,48	0,82±0,03	1,39±0,1	2,82±0,99
1987	Kontrolle	Gesund	15,3±0,8	0,90±0,00	5,40±1,13	4,13±1,14	0,89±0,09	1,4±0,13	2,95±0,52
1989	Kontrolle	Geschä.	16,2±1,3	0,83±0,06	7,48±0,29	3,98±0,89	0,89±0,13	1,26±0,09	2,87±0,38
1989	Kontrolle	Gesund	15,6±0,4	0,93±0,06	6,93±0,69	4,42±0,25	0,98±0,11	1,31±0,03	3,08±0,15
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	15,0±1,3	0,77±0,06	5,88±0,64	4,28±0,35	0,93±0,07	1,33±0,03	2,68±0,25
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	15,5±1,1	0,90±0,00	6,23±0,53	4,35±0,46	0,94±0,05	1,25±0,07	2,90±0,10
1989	P_2O_5	Geschä.	15,4±2,2	1,20±0,17	6,68±0,51	4,37±1,02	0,99±0,16	1,09±0,27	3,13±0,78
1989	P_2O_5	Gesund	14,7±0,9	1,17±0,06	5,98±0,15	4,40±0,46	0,91±0,05	1,20±0,10	3,02±0,53
1989	KAS	Geschä.	21,3±3,4	0,70±0,10	5,70±0,87	4,07±0,71	0,84±0,07	1,25±0,13	3,07±0,41
1989	KAS	Gesund	19,7±0,2	0,77±0,06	5,55±0,31	4,85±0,40	0,93±0,11	1,19±0,06	3,28±0,03
1993	Kontrolle	Geschä.	13,90	0,75	6,18	3,76	1,02	1,22	2,98
1993	Kontrolle	Gesund	16,00	0,79	5,28	4,61	1,05	1,27	3,74
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	12,80	0,70	5,51	5,28	1,32	1,19	2,44
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	14,20	0,83	5,83	4,80	1,33	1,16	2,20
1993	P_2O_5	Geschä.	14,20	1,08	5,60	4,37	1,09	1,09	2,83
1993	P_2O_5	Gesund	13,00	1,18	4,92	4,59	1,08	1,07	2,34
1993	KAS	Geschä.	14,40	0,66	4,94	4,15	0,91	1,06	3,25
1993	KAS	Gesund	15,70	0,71	4,66	4,20	0,90	1,09	3,32
2012	Kontrolle	Gesund	17,7±1,9	1,25±0,06	4,99±0,41	6,14±1,52	1,53±0,07	1,46±0,22	3,62±1,18
2012	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	18,9±1,1	1,27±0,13	5,09±0,22	4,17±0,62	1,56±0,12	1,42±0,11	0,93±0,10
2012	P_2O_5	Gesund	17,6 0,7±	1,29±0,02	4,96±0,19	4,98±0,33	1,43±0,16	1,54±0,23	1,84±0,19

damit zusammenhängen, dass vor der Bestandesbegründung der Schlagabraum und wohl auch ein wesentlicher Teil der Humusauflage auf Wälle geschoben worden ist. Hierdurch ist die Zwischenfläche verarmt, woraus sich die ungünstige Ernährungssituation zu Beginn des Versuchs erklären ließe. Mit zunehmendem Bestandesalter dürfte es den Douglasien auch gelungen sein, mit zunehmender Wurzeltiefe im tieferen Bodenbereich verfügbare Nährstoffvorräte zu erschließen und auch den Humushaushalt wieder zu stabilisieren. Die Verbesserung der Ca- und Mg-Ernährung dürfte zudem durch die Praxis-Dolomitkalkung im Jahr 1995 beschleunigt worden sein.

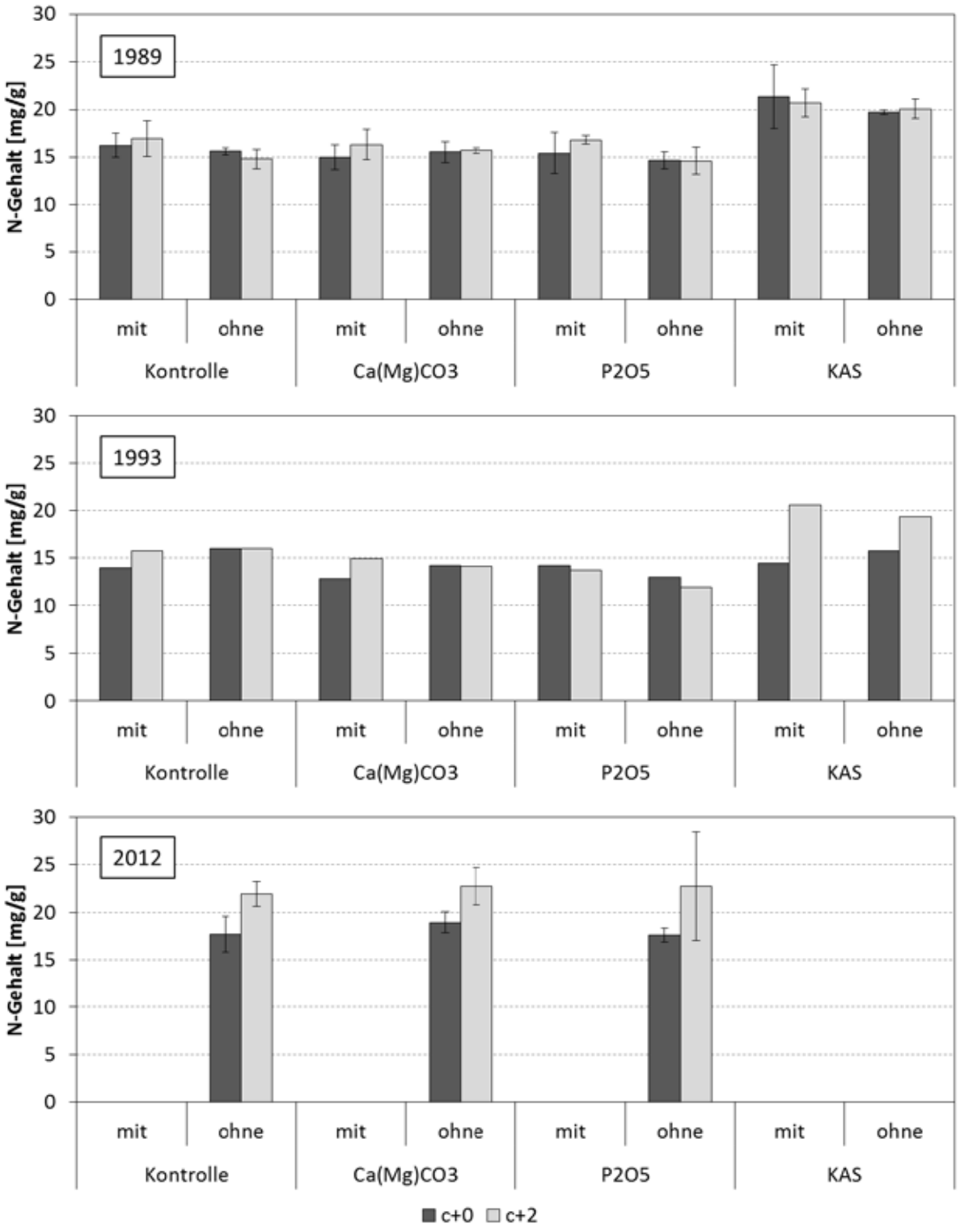
Vitalität und Wachstum der Bäume

Auch auf der Versuchsanlage Cochem wurde die Wirkung der Kalkung und Düngung auf den Vitalitätszustand anhand der Entwicklung der Kronenverlichtung und weiterer Symptome der Douglasienerkrankung, insbesondere des Harzflusses beurteilt.

Zur Bewertung der Homogenität der einzelnen Versuchsparzellen hinsichtlich der Vitalität der Douglasien wurde wie in den beiden anderen Düngungsversuchen zu Beginn der Untersuchungen eine Interpretation aller Einzelbäume der Versuchsparzellen mittels IRC-Luftbildansprache vorgenommen (Abbildung 30).

Abbildung 29

Mittelwert und für die Daten aus 1989 und 2012 die Standardabweichung (n = 3) der Stickstoffgehalte der Nadeln des ersten (c+0) und dritten (c+2) Nadeljahrgangs der Varianten des diagnostischen Düngungsversuchs Cochem. Im Jahr 1993 wurde nur eine Mischprobe pro Variante analysiert.



Bezüglich des Merkmals Kronenverlichtung weisen die verschiedenen Varianten zu Beginn der Untersuchungen bei insgesamt geringem Anteil schwach geschädigter Bäume (ca. 20%) keine deutlich erkennbaren Unterschiede auf.
Hinsichtlich des Merkmals Verfärbung/Vergilbung der Nadeln zeigt sich bei der IRC-Luftbildansprache ein deutlicher Rückgang der Vergilbung von 1989 auf 1990 (Abbildung 31). Unterschiede zwischen den Versuchsparzellen sind als Tendenz auf der Dolomit- und Phosphat-Fläche mit etwas geringeren Anteilen vergilbter Bäume zu erkennen.
Zusätzlich zu den IRC-Luftbildern erfolgte 1989 eine Auswahl von 25 terrestrisch vergleichsweise gut einsehbarer Douglasien der Kraftklassen 1 und 2 je Düngevariante. Diese dienten einerseits als Einhängepunkt zur Interpretation der Luftbilddaten, andererseits zur langfristigen Beobachtung der Bäume und zur Erfassung zusätzlicher Parameter wie z.B. Harzfluss.
Zu Beginn der Erhebung waren keine Unterschiede in der Kronenverlichtung auf den verschiedenen Versuchsparzellen vorhanden (Abbildung 32). In den Folgejahren wurde – allerdings auf insgesamt sehr niedrigem Niveau (Tabelle 34) – eine geringere durchschnittliche Kronenverlichtung der Phosphat-Variante beobachtet. Bei den

Tabelle 33

Mittelwert und Standardabweichung (n = 3) der Spurennährstoffgehalte des ersten Nadeljahrgangs (c+0) der Düngeversuchsfläche Cochem. Die Analysen aus dem Jahr 1987 stammen von der Erstbeprobung vor Versuchsbeginn (vgl. Kap. 4). Die Nährstoffgehalte wurden anhand der Mediane der in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte bewertet (rot = unterhalb des Normalbereichs, grün = innerhalb des Normalbereichs, blau = oberhalb des Normalbereichs). Im Jahr 1993 wurde lediglich eine Mischprobe analysiert, sodass keine Streuung angegeben werden kann.

Jahr	Variante	Zustand	Fe [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	B [mg/kg]	Al [mg/kg]	Si [mg/kg]
1987	Kontrolle	Geschä.	102±13	4,0±0,6	26±0,0	-	-	274±28	1633±153
1987	Kontrolle	Gesund	169±97	5,3±0,8	27±5,7	-	-	362±194	2033±493
1989	Kontrolle	Geschä.	94±7	-	-	-	-	253±13	1133±153
1989	Kontrolle	Gesund	84±4	-	-	-	-	261±14	1167±153
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	91±9	-	-	-	-	247±22	1767±208
1989	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	89±12	-	-	-	-	237±19	1533±58
1989	P_2O_5	Geschä.	90±10	-	-	-	-	222±18	1500±265
1989	P_2O_5	Gesund	87±3	-	-	-	-	177±44	1833±231
1989	KAS	Geschä.	74±5	-	-	-	-	243±29	1333±351
1989	KAS	Gesund	80±2	-	-	-	-	240±18	1533±153
1993	Kontrolle	Geschä.	76	4,0	30	-	-	237	-
1993	Kontrolle	Gesund	85	3,8	32	-	-	295	-
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Geschä.	138	3,4	28	-	-	308	-
1993	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	121	3,9	24	-	-	308	-
1993	P_2O_5	Geschä.	95	2,4	26	-	-	259	-
1993	P_2O_5	Gesund	94	2,5	26	-	-	249	-
1993	KAS	Geschä.	96	3,1	32	-	-	293	-
1993	KAS	Gesund	92	2,9	27	-	-	280	-
2012	Kontrolle	Gesund	70±10	5,8±0,4	51±6,3	0,05±0,00	26±3	313±26	-
2012	$Ca(Mg)CO_3$	Gesund	64±9	5,4±0,4	29±3,2	0,05±0,01	24±6	225±38	-
2012	P_2O_5	Gesund	74 ±4	5,1±0,3	37±6,8	0,06±0,01	20±4	230±8	-

Abbildung 30

Entwicklung der Kronenverlichtung auf den verschiedenen Versuchsparzellen der Düngungsversuchsfläche Cochem 1989/1990; Interpretation aus CIR-Luftbildern;
Kronenverlichtungsstufen: 0 = 0-10 %; 1 = 15-25 %; 2 = 30-60 %; 3 =65-99 %; 4 = tot

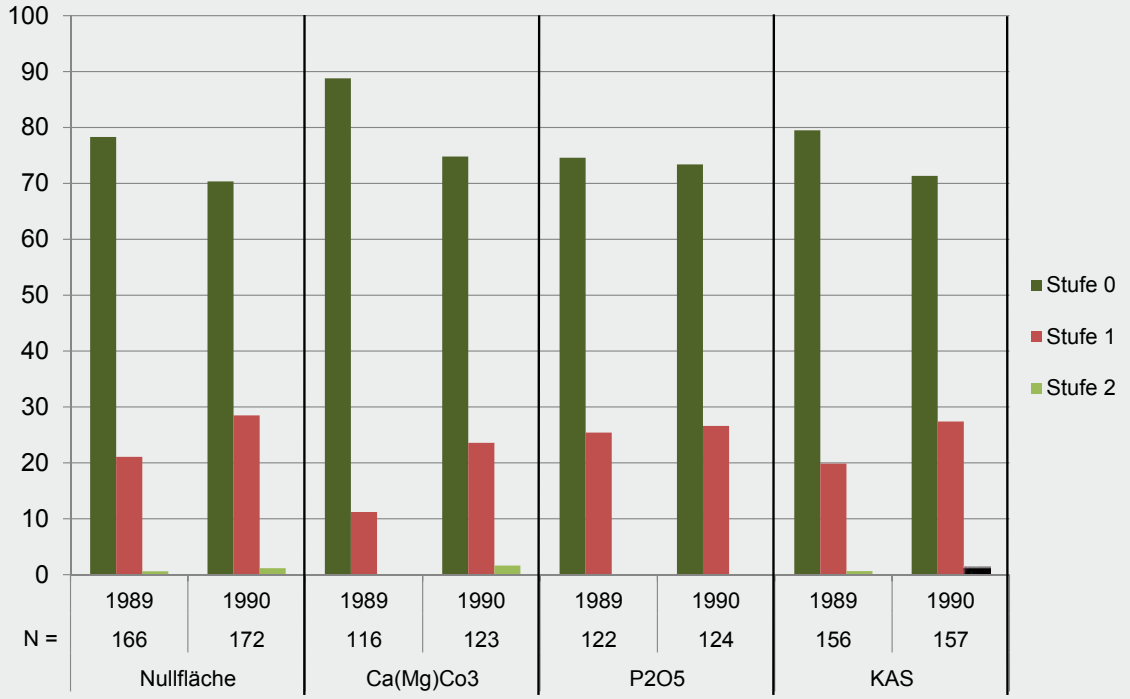


Abbildung 31

Entwicklung der Kronenvergilbung auf den verschiedenen Versuchsparzellen der Düngungsversuchsfläche Cochem 1989/1990; Interpretation aus CIR-Luftbildern;
Kronenvergilbungsstufen: 0 = 0-10 %; 1 = 15-25 %; 2 = 30-60%; 3 =65-99 %

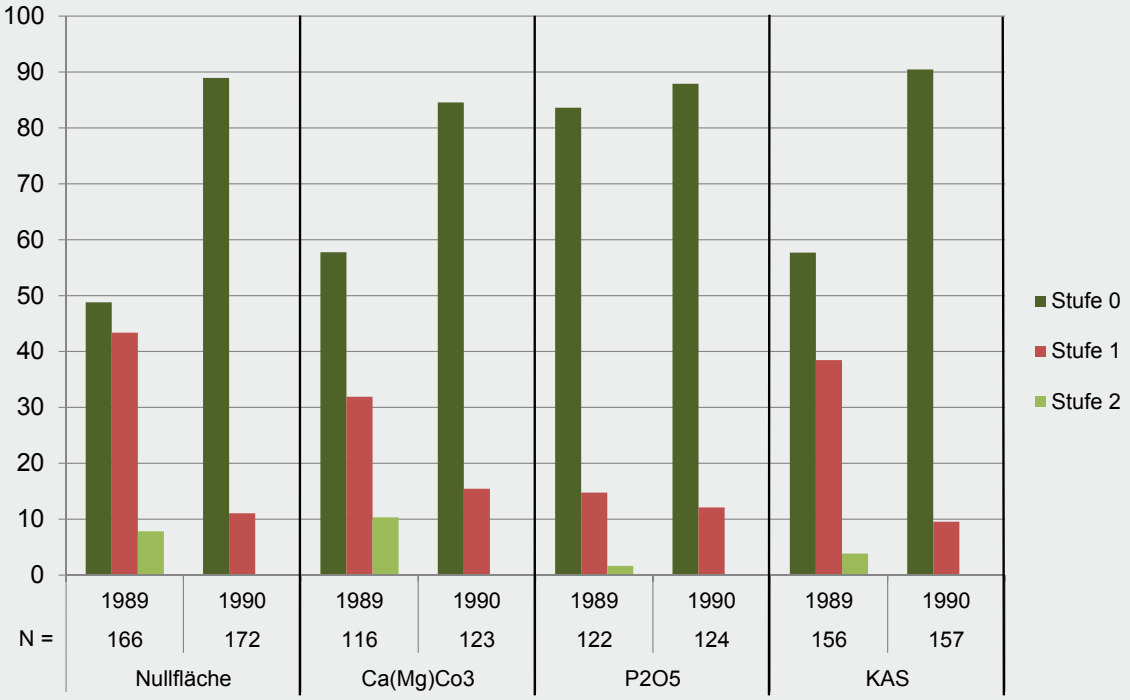


Tabelle 34

Mittelwert und Standardabweichung der Kronenverlichtung [%] der angesprochenen Douglasien (n = 25) im Zeitraum 1989 bis 1997 der Düngungsversuchsfläche Cochem

Jahr	0 (Kontrolle)	$Ca(Mg)CO_3$	P_2O_3	KAS
1989	7 ± 4	7 ± 6	7 ± 5	7 ± 5
1990	5 ± 4	8 ± 7	6 ±6	7 ± 6
1991	8 ± 6	7 ± 6	6 ± 5	10 ± 7
1992	11 ± 7	12 ± 8	5 ± 4	16 ± 8
1993	11 ± 7	11 ± 7	5 ± 4	16 ± 6
1994	7 ± 5	7 ± 5	4 ± 4	11 ± 6
1997	7 ± 4	7 ± 6	7 ± 5	7 ± 5

terrestrisch bonitierten Douglasien wurden nur gering vergilbte Einzelbäume beobachtet (nicht dargestellt).
Da auf dieser Versuchsanlage die ursprünglich erwartete Schadenszunahme nicht eingetreten ist, sondern im Gegenteil die bei Versuchsanlage beobachtete Vergilbung unabhängig von den Düngungsvarianten schon 1990 kaum mehr auftrat, wurde die systematische Kronenzustandsansprache nach 1997 ausgesetzt. Auf der Fläche erfolgt lediglich jährlich eine Bereisung zur Feststellung, ob deutlich erkennbare Schäden auftreten, was eine Wiederaufnahme der Kronenansprache sinnvoll erscheinen lassen würde. Aktuell (2015) stellt sich der Bestand in seiner Gesamtheit vital dar.
Im Jahr 2013 erfolgte eine ertragskundliche Aufnahme der Versuchsanlage. Allerdings ist eine nach den Düngungsvarianten differenzierte Bewertung des Wachstums aufgrund der sehr geringen Parzellengröße (0,075 ha) mit großen Unsicherheiten behaftet. Der im Jahr 2013 40-jährige Douglasienbestand ist insgesamt sehr wüchsig: Die Mittelhöhe von durchschnittlich 28,1 Meter entspricht einer 0.2 Ertragsklasse (Bergel 1985, mäßige Durchforstung). Die mit Phosphat gedüngte Parzelle zeigt einen merklich über den übrigen Varianten liegenden durchschnittlichen Gesamtzuwachs (dgz) (Tabelle 35). Dies deutet zusammen mit der geringeren Kronenverlichtung und -vergilbung dieser Variante auf eine positive Wirkung der Phosphordüngung hin.

Zusammenschau

Auch beim Versuch Cochem lassen sich wie beim Versuch Hochspeyer aus den Befunden deutliche Hinweise auf die Beeinträchtigung des Nährstoffhaushaltes durch die Eingriffe in den Humus bei Räumung des Vorbestandes und die Vorbereitung

Tabelle 35

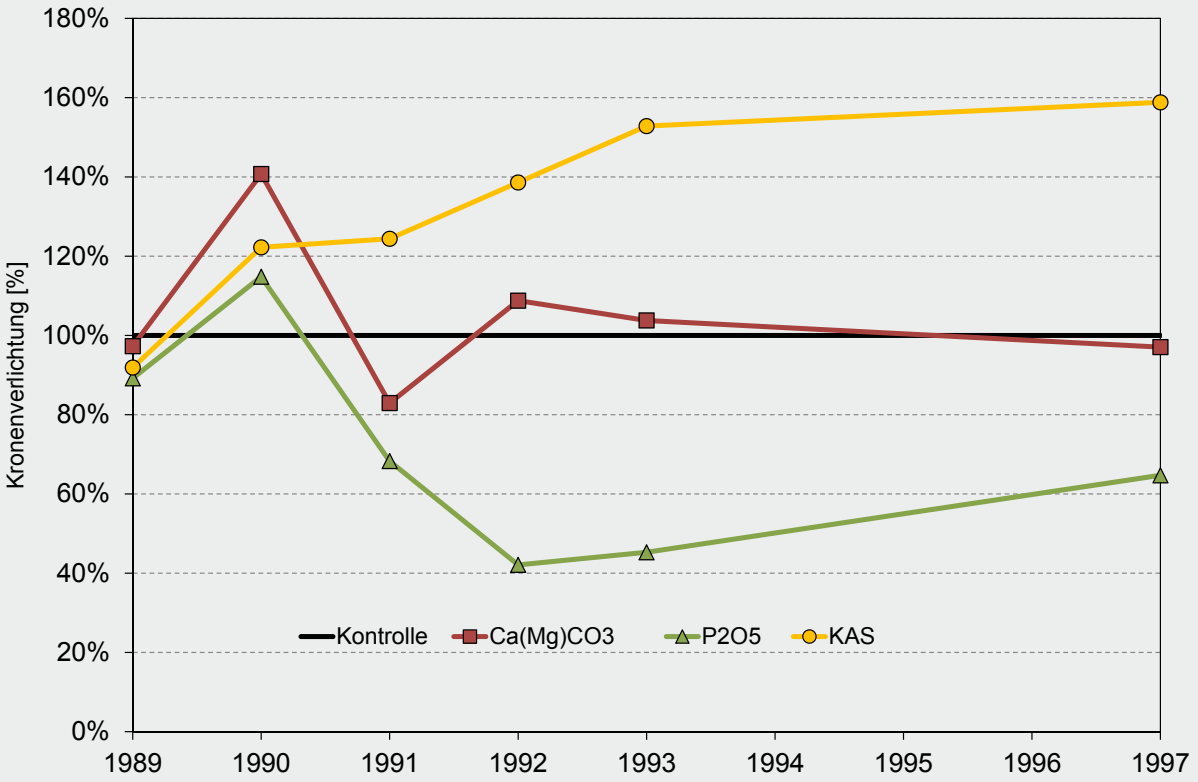
Ertragskundliche Kennwerte der einzelnen Varianten. Aufnahme 2013

h100=Mittelhöhe der 100 stärksten Bäume; d100=mittlerer Brusthöhendurchmesser der 100 stärksten Bäume; hg= Mittelhöhe aller Bäume; dg=mittlerer Brusthöhendurchmesser aller Bäume; G=Grundfläche; V=Gesamtvorrat; dGz=durchschnittlicher Gesamtzuwachs Erntefestmeter ohne Rinde

Variante	Alter	N (ha)	h100 (m)	d100 (cm)	hg (m)	dg (cm)	G (m^2)	V (fm)	dgz (fm)
Kontrolle	50	427	28,66	45,75	27	32,7	35,9	423	8,46
$Ca(Mg)CO_3$	50	360	30,69	49,71	29,1	34,9	34,5	433,1	8,66
P_2O_5	50	427	29,66	51,59	28,6	36,6	44,8	551,6	11
KAS	50	347	30,31	51,27	28,4	35,6	34,6	422,3	8,45

Abbildung 32

Entwicklung der Kronenverlichtung der vom Boden her bonitierten 25 Douglasien auf den verschiedenen Parzellen im Verhältnis zur Kontrolle (Wert der Kontrolle entspricht 100 %) der Düngungsversuchsfläche Cochem im Zeitraum 1989 bis 1997. Die absoluten Werte sind in Tabelle 34 dargestellt



der Douglasienkultur ableiten. Allerdings ist der Decklehm über unterdevonischen Tonschiefern am Standort Cochem vom Mineralbestand her reicher als die in Hochspeyer anstehenden Sande der Trifelsschichten des Buntsandsteins. Daher konnte sich der Nährstoffhaushalt am Versuch Cochem auch ohne Kalkung oder Düngung wieder stabilisieren. Manganüberschuss hat an diesem Standort offenbar insbesondere im Hinblick auf eine Beeinträchtigung der Phosphorversorgung mitgewirkt, aber nicht so ausgeprägt, dass hierdurch längerfristig Mangelernährung und Wachstumseinbußen auftraten. Auch waren/sind die Mangankonzentrationen nicht so hoch, dass die typischen Symptome von Mangantoxizität ausgebildet wurden. Zu empfehlen ist auf diesem Standort insbesondere eine humuspflegliche Bewirtschaftung. Sollten weitere Bodenschutzkalkungen vorgesehen sein, sollte der Einsatz eines Dolomit-Holzasche-Phosphat-Gemischs (vgl. Kap. 8.3) erwogen werden, um einer Phosphorlimitierung auf diesem Standort zu begegnen.

7.2.4 Befunde B- und Mo-Versuch Irrel

Die Nadelanalysen zeigen einen erheblichen P- und vor allem Mg-Mangel (Tabelle 36). Die Borgehalte liegen knapp unterhalb des von Bergmann (1988) für Douglasie angegebenen Bereichs ausreichender Versorgung (20-40 mg/g) aber oberhalb der von Zehle (2015) aus der Van den Burg´schen (1985) Literaturzusammenstellung abgeleiteten Grenze des Mangelbereichs (13 ppm). Bei Molybdän ist eine Bewertung wegen der unzureichenden Bestimmungsgrenze nicht möglich. Die Mangangehalte liegen im Überschuss, allerdings deutlich unterhalb des von Schöne (1992c) als Toxizitätsschwelle benannten Gehalts von 4 bis 5 mg/g in einjährigen Nadeln. Die Molybdändüngung hat den Gehalt an oxalatlöslichem Mo in der Humusauflage und im oberen Mineralboden erhöht und auch die Mo-Versorgung der Nadeln merklich verbessert (Tabelle 36). Desgleichen hat die Bordüngung den im Heißwasserauszug bestimmten, pflanzenver-

Tabelle 36

Nadelspiegelwerte des B- und Mo-Düngungsversuchs Irrel; grau hinterlegt: Signifikanz gegenüber unbehandelter Variante (aus Biehl & Matzner 2000)
O = Kontrolle, Zu = Rohrzucker, Mo = Natriummolybdat, B = Borax

	1. Nadeljahrgang				2. Nadeljahrgang			
Element	**0**	**Zu**	**Mo**	**B**	**0**	**Zu**	**Mo**	**B**
B [µg/g]	19,3±1,4	19,8±1,4	18,0±2,2	26,7±3,3	31,8± 3,8	32,2± 9,2	30,6± 4,8	43,2± 4,1
Mo [µg/g]	<0,06	0,07	0,08±0,02	<0,06	0,08±0,01	0,09±0,01	0,10±0,01	0,10±0,01
Al [mg/g]	0,19±0,05	0,20±0,05	0,19±0,03	0,17±0,03	0,44±0,1	0,52±0,1	0,43±0,1	0,43±0,05
Ca [mg/g]	3,23±0,4	3,58±0,4	3,19±0,6	3,15±0,7	7,14±1,2	7,05±1,7	7,48±1,1	7,35±1,3
Cd [µg/g]	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
Cu [µg/g]	4,94±0,9	4,70±1,0	4,04±0,4	3,75±0,4	3,12±0,3	3,45±0,3	3,16±0,2	3,5±0,4
Fe [µg/g]	65,6±8,7	60,0±10	73,4±7,7	68,5±6,0	133,8±19	138,4±18	132,6±7,7	131,6±7,5
K [mg/g]	6,30±0,7	6,40±0,4	6,32±1,0	6,10±0,7	4,15±0,1	4,62±0,6	4,16±0,6	4,24±0,5
Mg [mg/g]	0,72±0,1	0,75±0,1	0,76±0,2	0,65±0,05	0,55±0,2	0,45±0,1	0,54±0,3	0,41±0,1
Mn [mg/g]	1,64±0,2	1,86±0,3	1,99±0,4	1,97±0,4	4,35±0,7	4,84±1,5	5,16±1,1	5,7±1,3
Na [mg/g]	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
P [mg/g]	1,06±0,1	1,04±0,1	1,05±0,1	1,04±0,2	0,78±0,2	0,76±0,1	0,73±0,2	0,66±0,06
Pb [mg/g]	0,64±0,3	0,57±0,1	0,49±0,05	0,50±0,2	1,06±0,2	1,21±0,2	1,13±0,1	1,24±0,4
S [mg/g]	0,92±0,03	0,93±0,06	0,93±0,07	0,89±0,06	1,08±0,1	1,06±0,04	1,54±0,5	1,50±0,3
Zn [mg/g]	0,04±0,02	0,05±0,02	0,03±0,01	0,03±0,00	0,05±0,01	0,05±0,01	0,06±0,02	0,06±0,02

fügbaren Borgehalt im Boden erhöht und die Borversorgung der Nadel verbessert (Tabelle 36). Der Streuabbau wurde bei beiden Düngungsvarianten beschleunigt. Die Zuckergabe verringerte die N-Gehalte der Nadeln nicht und bewirkte demnach offenbar nicht die erwartete N-Immobilisierung. Keine der drei Düngungsvarianten bewirkte eine Verbesserung der Wuchsdeformationen, die B-Gabe sogar eher eine Verschlechterung. Auch auf die Nadelverfärbungen hatten die drei Düngungsvarianten keinen erkennbaren Einfluss. Eingehendere Darstellungen der Befunde enthält Biehl & Matzner (2000).

8 Diskussion

8.1 Mangantoxizität als Erkrankungsursache

Die bis Mitte der 60er Jahre zurückreichenden Untersuchungen verschiedener Institutionen zur Douglasienerkrankung in Rheinland-Pfalz und in der angrenzenden nordrhein-westfälischen Nordeifel erbrachten keine Hinweise auf eine Verursachung der Douglasienschäden mit den in Kapitel 2 beschriebenen Symptomen durch Tiere, Nadel- und Wurzelpilze oder andere Organismen (vgl. Kap. 1.3). Vielmehr unterstützen die umfangreichen Nadel- und Bodenanalysen (hiesiges Projekt sowie Kaus-Thiel 1998, Kehr & Büttner 2003, Merrem 1991, Pankert 1984, Schöne 1992 a, b, c, 1997, Weissen 1997), die Befunde der physiologischen Untersuchungen (Kaus & Wild 1997, Kaus-Thiel 1998), von Hydrokulturversuchen mit Douglasiensämlingen (Kaus-Thiel 1998, Ducić et al. 2006) und die Befunde der hiesigen Düngungsversuche die von Meyer (1985) und Schöne (1987) formulierte Hypothese einer durch Manganüberschuss induzierten Erkrankung.

In der Mehrzahl der untersuchten, symptomtragenden Douglasienbestände wurden sowohl im Boden als auch in den Nadeln exzessiv hohe Mangangehalte gefunden. Dabei wiesen erkrankte Bäume in der Regel höhere Mangangehalte auf als noch symptomfreie Bäume. Besonders hoch sind die Mangangehalte an Bäumen, die starken Harzfluss, eine Ausbleichung des jüngsten Nadeljahrgangs und Wuchsdeformationen aufweisen, Symptome, die im besonderen Maße mit Mn-Toxizität in Verbindung stehen (vgl. Kap. 4.1). Bestätigt werden diese Befunde durch Mineralstoffanalysen symptomtragender und symptomfreier Douglasien durch Kaus-Thiel (1998) und Schöne (1997).

Auch Kehr & Büttner (2003) kommen zu dem Schluss, dass die von ihnen im Douglasienherkunftsversuch Sobernheim (Hunsrück) untersuchten Schäden „höchstwahrscheinlich durch einen Überschuss des Elements Mangan in den Douglasiennadeln verursacht wurden". Auch sie fanden nicht nur exzessiv hohe Mangangehalte in Boden und Nadeln, sondern auch stets höhere Gehalte in geschädigten Bereichen und den symptombehafteten Bäumen im Vergleich zu nicht geschädigten Bereichen.

Mangan ist ein essentieller Mikronährstoff. Seine physiologische Bedeutung beruht auf dem Redoxpotential des Mangans. Aufgrund dieser Eigenschaft ist Mangan an der Aktivierung und an Reaktionen zahlreicher Enzyme beteiligt. Es erfüllt essentielle Funktionen bei der Photosynthese und im Eiweiß- und Kohlenhydratstoffwechsel (Larcher 2001, S. 178).

Eine phytotoxische Wirkung eines Überangebots an Mangan („Mangantoxizität") ist für landwirtschaftliche Nutzpflanzen wie Baumwolle, Getreide, Bohnen und Wein in der Literatur eingehend dargelegt und spielt auf den betroffenen Standorten häufig eine ertragsbegrenzende Rolle (siehe Überblick in Marschner 2012, Foy et al. 1978, Wolt 1990). Beschrieben werden durch Manganüberschuss induzierte Ungleichgewichte im Nährstoffhaushalt und Veränderungen in der Aktivität von Enzymen. Auch Waldbodenpflanzen wie das Wald-Greiskraut (*Senecio sylvaticus* L.) reagieren auf hohe Mangangehalte in der Nährlösung mit Wachstumseinbußen (Ernst 1985). In der Literatur beschriebene Befunde von Nadel-/Blattanalysen belegen deutliche Zusammenhänge zwischen der Manganverfügbarkeit und der Ca- und Mg-Ernährung bei Waldbäumen (Albert & Hobler 1988, Kazda 1990, Katzensteiner 1992). Dies gilt auch für Hydrokulturversuche mit Fichte (Keil et al 1986) und Douglasie (Kaus-Thiel 1998).

Die an den Douglasien beobachteten Symptome passen zu der bei Mangantoxizität an landwirtschaftlich genutzten Pflanzen beschriebenen Symptomatik. So waren hohe Mangangehalte häufig mit sehr niedrigen Nadelgehalten an Phosphor und Magnesium verbunden – auch auf Standorten, an denen die Gehalte dieser Elemente im Boden ausreichend erscheinen (Kap. 4.1.2). Dies deutet entweder auf eine Behinderung der Phosphor- und Magnesiumaufnahme aus dem Boden oder Probleme bei der Verteilung dieser Nährelemente in der Pflanze hin. Derartige Störungen im Nährstoffhaushalt werden im Zusammenhang mit Manganüberschuss beschrieben: Mangan induziert in hohen Konzentrationen durch kompetitive Hemmung der Aufnahme und des Transports einen Mangel an anderen Nähr-

stoffen in der Pflanze (Foy et al. 1978, Horst & Marschner 1978b, Horst 1988, Keil et a. 1986, Marschner 2012, Kaus-Thiel 1998).
Auch die an Douglasien mit exzessivem Mangangehalt in den Nadeln vielfach zu beobachtenden, auf Eisenmangel hinweisenden Ausbleichungen des jüngsten Nadeljahrgangs lassen sich mit Manganüberschuss in Verbindung bringen. Nach Untersuchungen von Kaus-Thiel (1998) beeinträchtigt Mangan den Eisenhaushalt. Manganüberschuss beeinflusst vor allem den Fe^{3+}-Gehalt in den Nadeln und führt zu einem induzierten physiologischen Eisenmangel im ersten Nadeljahrgang (vgl. Kap. 6.3).
Ob auch manganinduzierte Spurenelementmängel zu den Douglasienschäden beitragen, wie von Schöne (1987, 1992c) vermutet, lässt sich – mit Ausnahme des Eisens (vgl. Kap. 6.3) - aus den hiesigen Untersuchungen nicht belegen. Die festgestellten Kupfer-, Zink-, Bor- und Molybdän-Gesamtgehalte in den Nadeln erkrankter Douglasien lagen in der Regel in einem Bereich, der für die Versorgung der Douglasien als ausreichend erachtet wird und zeigen keine Differenzierung zwischen erkrankten und symptomfreien Bäumen. Denkbar ist, dass die überaus hohen Mangangehalte ähnlich wie beim Eisen den physiologisch verfügbaren Anteil des jeweiligen Spurennährstoffs reduzieren, ohne den analytisch ermittelten Gesamtgehalt in den Nadeln zu beeinflussen. Allerdings zeigten die Bor- und Molybdändüngungen im Versuch Irrel zwar eine Erhöhung der B- und Mo-Nadelgehalte, aber keinerlei Verbesserung des Kronenzustandes (vgl. Kap. 7.2.4).

Die beobachteten Wuchsanomalien bis hin zur Ausbildung von Hexenbesen an Douglasien mit exzessivem Mangangehalt in den Nadeln deuten auf Störungen im Enzymbereich hin, wie sie bei agrarisch genutzten Pflanzen als Folge von Manganüberschuss vielfach belegt sind (Foy et al. 1978, Gangwar et al. 2011, Marschner 2012). Durch Mn-Überschuss induzierte Veränderungen im Enzymbereich sind auch bei Douglasie dokumentiert. So fand Kaus-Thiel (1998) an symptomtragenden Douglasien des Untersuchungsbestandes des Düngungsversuchs Adenau die niedrigste und im ungeschädigten Referenzbestand die höchste Katalaseaktivität (vgl. Kap. 6.3).

Die Rindenschäden an Douglasien mit exzessiv hohen Mn-Gehalt ähneln Rindenschäden an Apfelbäumen (Internal Bark Necrosis), die auf Manganüberschuss zurückgeführt werden (Crocker & Kenworthy 1973). Douglasien mit Harzfluss im Untersuchungsbestand des Düngungsversuchs Adenau wiesen gegenüber symptomfreien Bäumen deutlich höhere Mn-, und geringere K- und Mg-Gehalte im Bast auf (vgl. Kap. 6.2).
Laborversuche mit Douglasiensämlingen bei unterschiedlichem Mangangehalt in der Nährlösung zeigten bei hohen Mn-Konzentrationen Wachstumsdepressionen, Wuchsanomalien in Spross und Wurzel und Aufhellungen der jüngsten Nadeln bis hin zum Absterben der Nadeln (Kaus-Thiel 1998, Ducić et al. 2006) und somit Symptome, die den in den Douglasienbeständen in situ beobachteten Symptomen entsprechen.

Angesichts der Fülle und Konsistenz dieser Belege kann daher kein Zweifel bestehen, dass Douglasienschäden mit der in Kapitel 2 beschriebenen Symptomatik durch Manganüberschuss verursacht werden.
Die Mangantoleranz unterscheidet sich von Pflanzenart zu Pflanzenart beträchtlich (Marschner 2012, Bergmann 1988). Waldbäume sind gegenüber Manganüberschuss eher wenig empfindlich (Nebe 1967, Zöttl 1985). Die Douglasie ist hier offenbar eine Ausnahme. Nur bei dieser Baum-art sind unseres Wissens gravierende Schäden bekannt. In Mischbeständen mit anderen Baumarten waren stets okular nur Douglasien, nicht aber Fichten, Buchen, Eichen oder Sträucher, wie Himbeere oder Brombeere betroffen. In einem Douglasien-Buchen-Traubeneichen-Küstentannen-Mischbestand im Forstrevier Stahlberg, Forstamt Otterberg, zeigten die Douglasien sehr starke, auf Mangantoxizität hinweisende Schäden; alle anderen Baumarten, auch die aus Nordamerika stammende Küstentanne (*Abies grandis*), waren symptomfrei. Offenbar unterscheiden sich die Baumarten schon in der Aufnahme des Mangans. Merrem (1991) untersuchte die Mangangehalte unterschiedlicher Baumarten in einem Mischbestand im damaligen Forstamt Wittlich auf einem Standort mit sehr hohem Mn-Angebot im Boden (in 0-5 cm Mineralbodentiefe 9,6 µmolc Mn g^{-1}). Die Mn-Gehalte der Nadeln bzw. Blätter

und der Rinde waren folgendermaßen gereiht: Douglasie >> Fichte > Buche >> Kiefer, wobei die Kiefer weniger als ein Fünftel der Mn-Gehalte der Douglasie aufwies. Bei der jahrringweisen Analyse des Mn-Gehalts im Holz fand Merrem (1991) in Übereinstimmung mit den hiesigen Untersuchungen (vgl. Kap. 6.1 und 6.2) deutliche Unterschiede zwischen Kern- und Splintholz der Douglasie mit einem sprunghaften Anstieg der Mn-Gehalte an der Kern-Splint-Grenze von weniger als 100 µg/g im Kern auf 400 µg/g im Splint, während die anderen Baumarten keine derartigen Unterschiede im Mn-Gehalt des Holzes aufwiesen. Bei Kiefer stellte Merrem (1991) eine Anreicherung von Mangan in der äußeren Wurzelrinde fest, während die übrigen Baumkompartimente nur wenig Mangan aufwiesen. Offenbar vermag diese Baumart Mangan bereits an der Wurzel auszuschließen. Lindner (1988) stellte bei Untersuchungen des Mangan-Verteilungsmusters von Fichte und Douglasie deutliche Unterschiede zwischen diesen beiden Baumarten fest. Die Fichte ist offenbar an saure Standorte mit hoher Manganverfügbarkeit angepasst. Sie nimmt vergleichsweise wenig Mn auf und akkumuliert dies im Speicherbast und in älteren Nadeljahrgängen, was Lindner (1988) als Mn-Schutzmechanismus interpretiert. Die Douglasie nimmt dagegen nicht nur sehr viel mehr Mangan auf, sondern verlagert auch sehr viel Mn in den Leitbast und den jüngsten Nadeljahrgang. Sie ist damit offenbar eher an eine schlechte Mn-Verfügbarkeit angepasst. An Standorten mit einem Mn-Überangebot kann dies dann offenbar zu Toxizität führen.

Bei Buche treten auf Standorten mit hohem Mangangehalt im Boden Flecken im Holz auf (Kubiniok & Gerber 2006). Röntgenmikroskopische Untersuchungen zeigten, dass die Flecken offenbar durch Polyphenole verursacht werden, die sich an Zell-Proliferationen anreichern, und ihrerseits durch Kationenaustauch Mangan binden (Fritz et al. 2006). Die Schäden im Buchenholz sind allerdings nur für die Holzvermarktung von Bedeutung und scheinen die Vitalität der Bäume nicht zu beeinträchtigen.

Aus den hiesigen Befunden wurde als Schwelle für hohes Risiko einer Mangantoxizität bei Douglasie ein Mangangehalt von > 3,8 mg/g im ersten Nadeljahrgang abgeleitet (vgl. Kap. 4.1.2). Dies liegt nur wenig unter der von Schöne (1992c) angenommenen Grenze für Mangantoxizität von 4-5 mg/g. Unterstützt wird die aus der hiesigen Untersuchung abgeleitete Schwelle durch Untersuchungen von Ducić & Polle (2006), die ab Mangangehalten größer 3,6 mg/g bei Douglasiensämlingen ein geringeres Wachstum beobachteten und auch durch Untersuchungen von Kehr & Büttner (2003) im Herkunftsversuch Sobernheim, da dort die geschädigten Bäume Mangangehalte oberhalb, die ungeschädigten knapp unterhalb dieser Schwelle besaßen. Als weiterer Indikator für ein hohes Risiko einer Mangantoxizität bei Douglasie wurde aus den hiesigen Befunden ein Ca/Mn-Verhältnis < 1,25 im ersten Nadeljahrgang abgeleitet. Dies trägt der Beobachtung Rechnung, dass offenbar Calcium bei der Entgiftung des Mangans eine Schlüsselrolle spielt (vgl. Kap. 4.1.2, Kap. 7.2.1 und Kap. 8.3).

Die hohen Konzentrationen mobiler Manganionen im Ökosystem beruhen auf einer aktuell ablaufenden Pufferung von atmogen eingetragenen oder im Ökosystem intern gebildeten Säuren durch pedogene Mangan-Mischoxide (Ulrich 1981, Wolt 1990). Pufferreaktionen durch Manganoxide spielen insbesondere im pH-Bereich zwischen 4 und 5 eine wesentliche Rolle (Ulrich 1981). Auf manganreichen Substraten (vgl. Kap. 5) kann Mn hohe Anteile an der Belegung des Kationenaustauschers (vgl. Kap. 4) und auch in der Bodenlösung (vgl. Kap. 7.2.1) einnehmen. Aufgrund der hohen Mobilität der Manganionen bestehen zwischen den Mangankonzentrationen aller Ökosystemkompartimente meist sehr enge Korrelationen (Block & Wunn 1996, Gärtner 1985). Hohe Mangangehalte im Boden (Humusauflage, Mineralboden-Festphase, Bodenlösung) korrespondieren daher in der Regel mit hohen Mn-Gehalten in den Douglasiennadeln (vgl. Kap. 4 und Kap. 7.2).
Nach den hiesigen Daten besteht ein erhöhtes Mn-Toxizitätsrisiko bei austauschbaren Mn-Konzentrationen > 100 mg/kg^{-1} (entspricht 3,6 µmolc /g^{-1} Boden) und einem Ca/Mn-Verhältnis < 0,8 (mg mg^{-1}) (vgl. Kap. 4.1.2). Die Schwellenwerte gelten für den oberen Mineralboden, das

Ca/Mn-Verhältnis nur in Verbindung mit hohen Mn-Gehalten.
Bei pH-Werten > 5 wird Mangan in der Bodenmatrix fest gebunden und gelangt nur in sehr geringen Mengen in den Stoffkreislauf. Bei fortschreitender Bodenversauerung wird Mangan demgegenüber nahezu vollständig mit dem Sickerwasser aus dem Ökosystem ausgetragen. Die Mangangehalte im Boden und in den Vegetationsorganen werden dann sehr klein. Hohe Mangangehalte deuten daher auf eine beginnende, noch nicht allzu weit fortgeschrittene Versauerung hin.
Da der Vorrat an Manganoxiden im Allgemeinen sehr begrenzt ist und im Zuge der Bodenversauerung aufgebraucht wird (vgl. Ulrich 1981), ist es durchaus möglich, dass die Mangankonzentrationen und hiermit möglicherweise verbundene Schadeinwirkungen im Laufe der Zeit zurückgehen. Der Zeithorizont dieser Veränderungen ist nur schwer abschätzbar. Allerdings stellten Meyer & Ulrich (1990) bei Untersuchungen in von Mangantoxizität betroffenen Douglasienbeständen innerhalb des nur wenige Jahre umfassenden Beobachtungszeitraums einen Wechsel vom Manganpuffer in Richtung Dominanz des Aluminiumpuffers fest.

Die nadelanalytischen Befunde (vgl. Kap.4.1.2) und vor allem die Ergebnisse des diagnostischen Düngeversuchs Hochspeyer (vgl. Kap.7.2.2) belegen, dass nicht alle mit Nährelementmangelsymptomen verbundenen Douglasienschäden in Rheinland-Pfalz mit Manganüberschuss in Verbindung stehen. In einigen untersuchten Beständen haben offensichtlich geogen und durch die Nutzungsgeschichte bedingte Nährstoffmängel auch bei geringen Mangangehalten die beobachteten Schäden hervorgerufen. In diesen Beständen war kein Harzsticken an Stamm und Ästen zu beobachten. Demgegenüber war dieses Symptom in allen Schadbeständen mit exzessiv hohen Mangankonzentrationen in den Nadeln immer zu finden. Das Harzsticken kann daher als ein differentialdiagnostisches Merkmal für die manganinduzierte Erkrankung angesehen werden. Verwechselungen mit Harzfluss nach Rissbildung (s. Kap. 2) können, da die übrigen beschriebenen Schäden nicht auftreten, leicht ausgeschlossen werden.

8.2 Einfluss der Provenienz auf die Douglasienschäden

Innerhalb des überaus großen Verbreitungsgebietes der Douglasie werden zwei Varietäten und eine Übergangsform unterschieden: die „Küstendouglasie“ (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*), auch „grüne Douglasie“ genannt, die „Inlandsdouglasie“ (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*), auch „blaue Douglasie“ genannt und als Zwischen- oder Übergangsform die „graue Douglasie“ (*Pseudotsuga menziesii* var. *caesia*). Letztere wird nur in Europa beschrieben. In der amerikanischen Fachliteratur wird sie der Inlandsdouglasie zugeordnet, was auch ihren Wuchseigenschaften entspricht.
Die Küstendouglasie und die Inlandsdouglasie unterscheiden sich deutlich in ihren Wuchseigenschaften und in ihrer Resistenz gegenüber Pathogenen, insbesondere der Rostigen Douglasienschütte *(Rhabdocline pseudotsugae)* . Für den Anbau in Europa hat sich die Küstendouglasie als besonders geeignet erwiesen. In umfangreichen Herkunftsversuchen auf verschiedenen Standorten und unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zeigte sich die Inlandsdouglasie im direkten Vergleich stets als deutlich unterlegen (Kleinschmit et al. 1991). Die rheinland-pfälzischen Douglasienbestände weisen häufig eine Mischung der verschiedenen Douglasienrassen auf (Maurer 2005).

Während die unterschiedliche Empfindlichkeit der jeweiligen Douglasienrassen gegen Pathogene vielfach belegt ist (vgl. Delb 2013, Hermann 1997, Liese 1932), sind die Befunde hinsichtlich einer unterschiedlichen Sensitivität gegenüber Mangantoxizität nicht so eindeutig. Leinemann (1997, 1998) untersuchte die genetischen Strukturen gesunder und geschädigter Douglasienbestände in Rheinland-Pfalz auf der Basis von Isoenzymmarkern. Beim Vergleich der genetischen Strukturen dieser Bestände mit Referenzen für beide Rassen mit gesichertem Ursprung fand er, dass die erkrankten Bestände der Inlandsrasse zuzuordnen waren, während die gesunden Bestände die Strukturen der Küstenrasse aufwiesen. Allerdings wurde beim damaligen Kenntnisstand die Symptomatik noch nicht eindeutig differenziert. So trat in den als „geschädigt“ ausgewiesenen Beständen

nach eigener Anschauung auch massiver Schüttebefall auf. Daher könnte die Beziehung zwischen den Schäden und der Zuordnung zur Inlandsrasse auf deren Sensitivität gegenüber Schütte beruhen und muss nicht zwangsläufig mit einer höheren Vulnerabilität der Inlandsrasse gegenüber Mangantoxizität zusammenhängen. Allerdings wurden auch im Bestand der Versuchsanlage Adenau deutlich höhere Schäden an den anhand von Isoenzymmarkern der Inlandsrasse zugeordneten Douglasien im Vergleich zu den der Küstenrasse zugeordneten Douglasien festgestellt (vgl. Kap. 7.2.1; Hosius & Leinemann 2005). In diesem intensiv beobachteten Bestand spielte Schüttebefall keine Rolle. Auf eine höhere Empfindlichkeit der Inlandsdouglasie (var. *glauca*) gegenüber der Küstendouglasie (var. *viridis*) weisen auch Befunde von Hydrokulturversuchen mit ^{54}Mn mit Sämlingen beider Varietäten hin (Ducić et al. 2006). Die „*glauca*"-Sämlinge zeigten nicht nur eine geringere Biomasseproduktion, sondern auch eine deutlich höhere Mn-Aufnahme als die „*viridis*"-Sämlinge. Allerdings bleiben Küstenherkünfte nicht, wie von Ducić et al.(2006) angenommen, generell von Mn-Toxizität verschont. So zeigen auch die der Küstenrasse zugeordneten Bäume im Versuch Adenau zum Teil beträchtliche, der Mn-Toxizität zuzuschreibende Schadsymptome (vgl. Kap 7.2.1). Kehr & Büttner (2003) untersuchten den Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Schäden, der Herkunft und den bodenchemischen Gegebenheiten im Provenienzversuch Sobernheim, Hunsrück. Im Versuch Sobernheim sind mit einer Ausnahme durchweg „*viridis*"-Herkünfte angebaut. Dennoch zeigt der Versuch bei der im Jahr 1990 durchgeführten Bonitur sehr beträchtliche Schäden mit der Symptomatik der Mangantoxizität. Die Mangankonzentrationen liegen mit 3,2 – 7,3 mg/g (7. Quirl, 1. Nadeljahrgang) im „gesunden" Kollektiv und 7,0 – 13,5 mg/g im „geschädigten" Kollektiv sehr hoch. Der Versuch ist auf Lehmen des Rotliegenden angelegt, einem Substrat, das nach den hiesigen Befunden in besonderem Maße durch Mangantoxizität gefährdet ist (vgl. Kap. 5). Kehr & Büttner (2003) fanden mit einer Ausnahme keine gerichteten Unterschiede in der Mangan-Schadensanfälligkeit der einzelnen Herkünfte. Offenbar weniger anfällig war nur eine „*viridis*"-Herkunft („Duncan-Paldi"); die einzige „*glauca*"-Herkunft der Anlage, „Salmon Arm", zeigte keine deutlich höhere Anfälligkeit gegenüber den „*viridis*"-Herkünften. Das Verteilungsmuster der Schäden auf der Versuchsanlage ließ sich demnach nicht mit der Provenienz, sondern mit der Lage der Parzelle im Versuch und mit bodenchemischen Unterschieden erklären. In den „geschädigten" Bereichen lag die Manganbelegung des Austauschers um das Doppelte höher als in den „gesunden Bereichen. Im Jahr 2003 wurde die gleiche Versuchsanlage im Auftrag der FAWF von der Firma ISOGEN erneut im Hinblick auf den Vitalitätszustand und die genetischen Strukturen der einzelnen Herkünfte untersucht (Hosius & Leinemann 2003). Im Vergleich zu den Aufnahmedaten aus dem Jahr 1990 ergaben sich ein deutlich verbesserter Vitalitätszustand und eine deutliche Verlagerung des Schadensschwerpunktes. Vergilbungserscheinungen konnten kaum mehr festgestellt werden, der Nadelverlust hielt sich in Grenzen und der Harzfluss war in der Regel nicht frisch. Auch bei dieser Aufnahme zeigte sich, dass der Vitalitätszustand im Wesentlichen von der räumlichen Lage der jeweiligen Parzelle bestimmt wurde. Innerhalb der Küstenherkünfte deutete sich ein Zusammenhang zwischen dem Heterozygotenanteil und dem Schädigungsgrad sowie der geographischen Lage der Ursprungsorte und der Schädigung an.
Die im Jahr 2013 im Düngungsversuch Adenau durchgeführte Untersuchung mittels DNA-Marker zeigt eine Mischung unterschiedlicher Douglasienrassen ohne erkennbaren Zusammenhang zwischen der Verteilung der Rassen und dem Schadmuster in diesem Bestand (Fussi & Konnert 2013).

8.3 Wirkung von Dolomitkalkung und Phosphatdüngung bei Mangantoxizität

In den Düngungsversuchen zeigten nur die Dolomitkalkung und die Phosphordüngung positive Wirkungen im Hinblick auf eine Verringerung der durch Mangantoxizität hervorgerufenen Schäden an den Douglasien.
Die Applikation von Magnesiumsulfat (Kieserit) führte offenbar zu eher erhöhten Mangangehalten in den Nadeln, was durch die erhöhte Säurebelastung durch das sulfatisch gebundene Düngemittel und der Pufferung durch Mangan-

oxide hervorgerufen sein dürfte (vgl. Greve 2015, S. 151). Im Versuch Adenau bewirkte die Kieseritdüngung eher eine Verschlechterung als eine Verbesserung des Vitalitätszustandes.
Die Applikation des Eisendüngemittels (Fetrilon) in Adenau zeigte keine erkennbare Wirkung. Die Bor- und Molybdänapplikation im Versuch Irrel bewirkte keine Verbesserung der Wuchsdeformationen, die B-Gabe sogar eher eine Verschlechterung. Auch auf die Nadelverfärbungen hatten die Düngungsvarianten keinen erkennbaren Einfluss. Die NPK-Düngung verbesserte am Standort Hochspeyer vor allem die Phosphorversorgung. Allerdings sind die Douglasienschäden hier durch standortsbedingten und die Nutzungsgeschichte verschärften P-Mangel, nicht dagegen durch Mangantoxizität verursacht.

Dolomitkalkungen können auf unterschiedliche Weise Einfluss auf die Mangantoxizität nehmen. Zum einen kann Mangan durch eine pH-Anhebung infolge der Kalkung stärker an der Bodenmatrix gebunden werden, wodurch die Gehalte mobiler Manganionen in der Bodenlösung zurückgehen. Dadurch wird folglich auch die Manganaufnahme durch die Wurzeln reduziert. Zum anderen werden dem Ökosystem durch Dolomit, Calcium und Magnesium zugeführt, was ebenfalls zu einer reduzierten Manganaufnahme und einer besseren Entgiftung von Mangan führen kann. Die Kalkung dürfte zudem die Umsetzung von organischem Material beschleunigen und könnte über die damit verbundene Aktivierung des Stoffumsatzes auch die Versorgung mit anderen Nährelementen verbessern. Demzufolge wurden bereits 1987 von Schöne Dolomitkalkungen als vorsorgende Maßnahme gegen Mangantoxizität bei Douglasie vorgeschlagen.

Die Befunde der hiesigen Düngungsversuche belegen einen positiven Effekt der Dolomitkalkung auf den Bodenzustand, die Ernährung der Douglasien und deren Vitalität.
Bereits wenige Jahre nach der Kalkung sind auf den gekalkten Parzellen der pH-Wert sowie die austauschbaren Gehalte an Magnesium und Calcium gegenüber der unbehandelten Parzelle erhöht und die Gehalte an austauschbarem Aluminium, Eisen und Protonen und auch an austauschbarem Mangan verringert (vgl. Kap. 7.2). Im weiteren Verlauf ist die Wirkung tiefer in den Mineralboden fortgeschritten. Allerdings verbleibt der Boden zumeist im Bereich hoher Manganmobilität. Im Sickerwasser ist die Magnesiumkonzentration, aber auch die Nitratkonzentration auf der gekalkten Parzelle erheblich angestiegen. Der Mn-Anteil an der Kationenäquivalentsumme nimmt auf der Dolomitkalkungsparzelle gegenüber der unbehandelten Kontrolle deutlich ab, der Anteil an Magnesium deutlich zu (vgl. Kap. 7.2.1.). Negativ schlägt die recht deutliche Erhöhung der Nitratkonzentration im Sickerwasser zu Buche. Allerdings kam in den Versuchen mit 6 t feingemahlenem Dolomit je Hektar eine recht hohe Dosierung zum Einsatz. Zudem werden die Nitrationen auf der gekalkten Parzelle überwiegend durch Basekationen, vor allem Mg^{2+} begleitet. Auf den gekalkten Flächen zeigt sich eine deutliche Reduktion der Mangangehalte in den Douglasiennadeln und auch in den anderen Baumkompartimenten (Holz, Rinde, etc.), eine Verbesserung der Magnesiumernährung und eine gegenüber unbehandelten Teilarealen verbesserte Vitalität der Douglasien (vgl. Kap. 7.2). Diese Befunde stehen im Einklang mit den Ergebnissen der von Fiedler (1969) durchgeführten Kalkungsversuche bei Fichte und Douglasie, die ebenfalls eine Verringerung der Mn-Konzentration in den Nadeln nach der Kalkung zeigten, was von den Autoren auf die pH-Erhöhung im Boden zurückgeführt wird.

Neben der pH-Erhöhung dürfte die Wirkung der Dolomitkalkung bei der Verringerung der Mangantoxizität auch auf der gesteigerten Verfügbarkeit von Magnesium beruhen. Die CND weist in den geschädigten Douglasienbeständen meist eine unausgewogene Mg-Ernährung aus (zu niedrige Konzentrationen verglichen mit den restlichen Elementen (vgl. Kap. 4.1.2)). Dies könnte auf einer kompetitiven Hemmung zwischen Kationen bei der Aufnahme über die Wurzel beruhen, sodass bei hoher Manganverfügbarkeit geringere Mengen an Magnesium aufgenommen werden (Mengel 1991, S. 350; Slovik 1997, S. 133; Marschner 2012, S. 165). Heenan & Campbell (1981) stellten in Nährlösungsversuchen mit Sojabohnen fest, dass die Magnesiumaufnahme

bei steigender Mn-Konzentration in der Nährlösung reduziert ist. Nach einer Dolomitkalkung wird demgegenüber die Manganaufnahme durch die hohe Verfügbarkeit an Mg-Ionen gehemmt. Auch bei agrarisch genutzten Pflanzen konnte der Mangantoxizität durch eine hohe Mg-Versorgung begegnet werden (Löhnis 1960).

Calcium spielt offenbar eine erhebliche Rolle bei der Entgiftung des Mangans. Le Mare (1977) fand bei Experimenten mit Baumwollpflanzen heraus, dass diese höhere Mn-Konzentrationen ohne Ausbildung von Schadsymptomen tolerierten, wenn den Pflanzen in der Nährlösung mehr Calcium zur Verfügung stand. Auch in der hiesigen Untersuchung finden sich Hinweise auf die Bedeutung des Calciums bei drohender Mangantoxizität: So waren die Ca-Gehalte in den erkrankten Douglasienbeständen zumeist höher als in den symptomfreien Beständen und korrelieren in den erkrankten Beständen, nicht aber in den symptomfreien Beständen, signifikant positiv mit den Mangangehalten (vgl. Kap.4.1.2). Auch die von Schöne (1992a, b, c) und Kehr & Büttner (2003) untersuchten Nadeln geschädigter Douglasie wiesen neben erhöhten Mangangehalten auch höhere Calciumgehalte im Vergleich zu ungeschädigten Douglasien auf. Offenbar nehmen die Douglasien zusätzliches Calcium auf, um Mangan in den Nadeln zu immobilisieren und so zu entgiften. Auf die Kalkung reagierten die Douglasien im Versuch Adenau nicht mit erhöhten, sondern sogar merklich verringerten Ca-Gehalten in den Nadeln, obwohl in der Humusauflage, am Bodenaustauscher und im Bodenwasser der gekalkten Variante mehr Calcium als auf der Kontrolle zur Verfügung stand (vgl. Kap. 7.2.1). Die positive Wirkung der Kalkung ist wohl insbesondere auf die Reduzierung der Manganverfügbarkeit durch die Anhebung des pH-Werts und die starke Erhöhung der Konzentration an Magnesiumionen in der Bodenlösung mit der hierdurch verursachten Konkurrenz in der Aufnahme dieser zweiwertigen Kationen zurückzuführen. Das zusätzlich vorhandene Calcium wird von den Douglasien zur Entgiftung des dann nur noch in geringerem Umfang aufgenommenen Mangans dann offenbar nicht benötigt und dementsprechend, anders als in der nicht gekalkten Kontrolle, nicht zusätzlich in den Nadeln eingelagert. Die vergleichsweise hohen Ca-Nadelgehalte symptomtragender Douglasien und die Verringerung der Ca-Nadelgehalte nach Kalkung stehen daher keineswegs im Widerspruch zur Mangantoxizität als Erkrankungsursache und zur Wirksamkeit der Kalkung zur Schadverringerung bei dieser Erkrankung.

Im durch Mangantoxizität betroffenen Düngungsversuch Adenau hat die Dolomitkalkung eine merkliche Verbesserung der Vitalität der Douglasie in Form einer Abnahme der Kronenverlichtung, der Nadelvergilbungen und insbesondere des Harzflusses bewirkt. Allerdings tritt die Wirkung einer Dolomitkalkung offenbar erst nach längerer Zeit ein. So waren die Effekte in Form einer Verminderung des Manganüberschusses in den Nadeln und einer Verbesserung des Kronenzustandes im 1989 eingerichteten Düngungsversuch Adenau bis 1997 nicht zu erkennen und führten seinerzeit zu dem Schluss, dass „sich die Kalkung als nicht hinreichend wirksam erwies" (Block 1997). Auch Meyer & Ulrich (1990) stellten bei Untersuchungen auf unbehandelten und mit 2 t Kalkmergel/ha gekalkten Douglasienbeständen mit Mangantoxizität in der Nordeifel wenige Jahre nach der Kalkung keine wesentliche Abnahme der Mn-Gehalte in den Nadeln und auch keine Verbesserung des Kronenzustandes der Bäume fest. Die Verzögerung in der Wirkung der Kalkung dürfte auf die lange Zeitspanne zwischen der Aufnahme von Magnesium und Calcium über die Wurzel bis zum Einbau in die Nadeln bzw. Blätter zurückzuführen sein (vgl. Augusto et al. 2011; van der Heijden et al. 2015).

Auf die Kaliumgehalte in den Nadeln hatte die Dolomitkalkung trotz der, im Abgleich mit in der Literatur angegebenen Schwellenwerten, geringen K-Versorgung des Bestandes, der vergleichsweise hohen Dolomit-Aufwandmenge und der feinen Vermahlung keinen erkennbaren Einfluss. Auch in den übrigen Baumkompartimenten (Holz, Rinde etc.) zeigte sich keine Reduzierung der K-Gehalte. Kalium dient in der Pflanze im Wesentlichen auch dem Ladungsausgleich. Denkbar ist, dass bei hoher Manganverfügbarkeit der Ladungsausgleich durch Mn^{2+} erfolgt und demzufolge weniger K^+ in die Nadeln eingelagert wird. Sinkt

die Mn-Verfügbarkeit durch die Kalkung, erfolgt der Ladungsausgleich verstärkt durch Mg^{2+}. K^{+} wird trotz etwas reduzierter Verfügbarkeit in der Bodenlösung in unverminderter Menge in den Nadeln eingelagert.

Neben der Dolomitkalkung zeigte auch die Phosphordüngung in den hiesigen Düngungsversuchen einen positiven Effekt. Die Cederan-Applikation bewirkte im Sickerwasser einen leichten Anstieg des Phosphorgehalts und einen deutlichen Anstieg des Calciumgehalts. Merklich erhöhte Konzentrationen an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) weisen auf einen verstärkten Humusumsatz hin.
Auf den Parzellen mit P-Applikation war eine Verbesserung der Phosphorernährung und eine gegenüber unbehandelten Teilarealen verbesserte Vitalität der Douglasien zu verzeichnen (vgl. Kap. 7.2).

Generell weisen die in der hiesigen Untersuchung ermittelten Phosphorgehalte in den Nadeln der Douglasien im Abgleich mit den in der einschlägigen Literatur angegebenen Schwellenwerten, die weiten N/P-Verhältnisse und die Befunde der CND auf eine meist Phosphor-limitierte Ernährung der Douglasien, auch der vital erscheinenden Bäume, hin (vgl. Kap. 4.1.2). Insbesondere bei den Beständen auf Buntsandstein dürfte ein Überschuss von Stickstoff für die geringen Phosphorgehalte und das weite N/P-Verhältnis verantwortlich sein. Dies stimmt mit Befunden anderer Baumarten (Fichte, Kiefer, Buche und Eiche) in Rheinland-Pfalz überein (Greve et al. 2016).

Manganüberschuss kann die schon angespannte Phosphorernährung zusätzlich beeinträchtigen. Versuche von Ducić & Polle (2006) mit Douglasiensämlingen der Inlands- und Küstendouglasie weisen darauf hin, dass die höhere Toleranz der Küstendouglasie gegenüber Mangan auf der Fähigkeit der Küstenrasse beruhen könnte, Mangan zusammen mit Phosphor (und in geringerem Umfang auch mit Calcium) in der Wurzel in Form unlöslicher Komplexe in der Vakuole und in Apoplasten einzulagern und damit zu entgiften. Diese Befunde stehen im Einklang mit in der Literatur beschriebenen Befunden an landwirtschaftlich genutzten Pflanzen. So stellte Heintze (1968) bei Untersuchungen zu Mangan-Phosphor-Interaktionen bei Hafer eine Verringerung der Mn-Aufnahme bei Phosphordüngung fest. Er vermutet, dass Phosphor zu einer Festlegung des Mn in der Wurzel führt. Bortner (1935) fand Belege, dass Phosphor die Mangantoxizität bei Tabak durch Inaktivierung des Mn in der Pflanze reduzieren kann. Auch Bergmann (1988) gibt an, dass bei hohen P-Gaben die Mn-Aufnahme der Pflanzen verringert wird.
Die in der hiesigen Untersuchung festgestellten niedrigen Phosphorgehalte in Douglasiennadeln auf Standorten mit hohen Phosphorvorräten und zugleich hohen Mangangehalten im Boden dürften demnach darauf beruhen, dass ein Teil des aufgenommenen Phosphors zusammen mit dem Mangan in den Wurzeln festgelegt wird. Dafür sprechen insbesondere auch die Befunde sowohl der hiesigen Erhebungen als auch der Untersuchungen von Schöne (1992a, b, c) und Kehr & Büttner (2003), dass die Douglasien in gesunden Beständen und in den erkrankten Beständen die symptomfreien Bäume meist höhere Phosphorgehalte aufweisen. Auch die im Versuch Adenau beobachtete Reduzierung der Mangangehalte bei den geschädigten Individuen schon wenige Jahre nach der Phosphordüngung (vgl. Kap. 4.1.2) kann als Hinweis auf eine Immobilisierung von Mangan zusammen mit Phosphor in der Wurzel und damit die Wirkung einer P-Zufuhr zur Reduzierung von Mangantoxizität gewertet werden.

Niedrige Phosphorgehalte in den Nadeln könnten auch mit einer unzureichenden Magnesiumverfügbarkeit im Boden zusammenhängen. So hängt sowohl die Aufnahme von Phosphor aus dem Boden als auch dessen Verwendung im Stoffwechsel stark von der Mg-Versorgung ab (Slovik 1997, S. 101 ff, 141). In der hiesigen Untersuchung sind sowohl in den Beständen mit als auch ohne Schadsymptome die Gehalte von Magnesium und Phosphor in den Nadeln signifikant positiv korreliert. Auf den P-schwachen Standorten sprechen diese Befunde für eine kombinierte Applikation von P und Mg zum Beispiel über einen mit Phosphat und/oder phosphathaltiger Holzasche angereicherten Dolomit.

9 Empfehlungen zum Douglasienanbau und zur Behandlung durch Mangantoxizität betroffener Douglasienbestände

9.1 Generelle Aspekte des Douglasienanbaus

Die Douglasie ist schon jetzt eine sehr bedeutsame Baumart für die Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz und wird weiter an Bedeutung gewinnen (Egidi 2009). Die mehr als ein Jahrhundert zurückreichenden praktischen Anbauerfahrungen und umfangreiche, langjährige wissenschaftliche Anbauversuche belegen die Anbauwürdigkeit der Douglasie (Überblick in Vor et al. 2015, S. 142-165). Die Douglasie erzielt auch auf den in Rheinland-Pfalz dominierenden sauren und nährstoffarmen Standorten eine hohe Wuchsleistung (Dong & Eder 2005). Sie lässt sich gut natürlich verjüngen und als Mischbaumart in heimische Ökosysteme integrieren (De Wall et al. 1998, Egidi 2009, Otto 1994, Schütz & Pommerening 2013). Das waldbauliche Leitbild sind dementsprechend standortgerechte, strukturreiche Mischbestände mit Douglasie.

Da bei einer Beschränkung auf Stammholznutzung die Nährstoffentzüge mit der Holzernte vergleichsweise gering sind, verfügt die Douglasie über eine hohe Nährstoffnutzungseffizienz (Block et al. 2010, 2016). In Mischbeständen mit Laubholz ist sie bodenpfleglich und auf vielen Standorten standortsgerecht (Block 2009). Sie nutzt beispielsweise auf armen Sanden gegenüber der Kiefer das Standortspotenzial besser aus und wirkt sich positiv auf die Nährstoffverfügbarkeit im Boden und den Umsatz der organischen Substanz aus (König et al. 2010). Auf den rheinland-pfälzischen Buntsandsteinstandorten hat sie selbst im Optimumbereich der Buche Konkurrenzvorteile insbesondere durch eine hohe Wassernutzungseffizienz bei Trockenheit, eine hohe Wurzelbiomasseproduktion im Oberboden und die Befähigung auf diesen gut belüfteten Standorten mit den Wurzeln sehr tief in den Boden und selbst in Gesteinsspalten vorzudringen und in Trockenphasen dort vorhandenes Wasser zu nutzen (Thomas et al. 2015).

Die Douglasie ist bei geeigneter Standortswahl und geeigneter genetischer Herkunft derzeit nicht übermäßig durch abiotische Einflüsse oder biotische Gegenspieler gefährdet (Delb 2013) und im Vergleich zu Fichte und Kiefer sogar deutlich weniger bedroht (Schmidt 2012). Allerdings müssen Risiken durch die Einschleppung gefährlicher Arten aus den Herkunftsgebieten und die mögliche Anpassung heimischer Arten an den Wirt Douglasie beachtet werden (Blaschke et al. 2008, Delb 2013, Roques 2010, Tomiczek 2008).

Gegenüber Wassermangel ist die Douglasie sehr tolerant (Rais et al. 2014). Sie verträgt Sommertrockenheit besser als die heimischen Nadelhölzer (Lévesque et al. 2013, 2014). Im Vergleich zu Buche verfügt die Douglasie über eine effektivere Stomataregulierung und ist daher besser an warm-trockene Perioden angepasst (Bögelein et al. 2012, Thomas et al. 2015). Vor dem Hintergrund des Klimawandels kann die in Mischung mit anderen Baumarten angebaute Douglasie daher zur Risikominimierung und –verteilung dienen (Spellmann et al. 2011).

Eine Fülle von Arbeiten befasst sich mit der naturschutzfachlichen Bewertung des Anbaus der Douglasie außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets (Überblick in Kownatzki et al. 2011, Vor et al. 2015, Tschopp et al. 2012). Von Vor et al. (2015) kürzlich veröffentlichte Baumartenportraits mit einer naturschutzfachlichen Bewertung kommen für die Douglasie zu der Schlussfolgerung, dass diese Baumart aufgrund ihrer Verjüngungsökologie und der Kontrollierbarkeit ihrer Ausbreitung nicht invasiv sei. Sie stelle für natürlich vorkommende Ökosysteme, Biotope und Arten keine Gefährdung dar. Für rheinland-pfälzische Verhältnisse bestätigen dies Ergebnisse aus zwei von der Douglasie geprägten Naturwaldreservaten im Pfälzerwald und in der Westeifel (Balcar 2015). Beobachtete Einwanderungstendenzen auf einzelnen Sonderstandorten, wie lichten und warmen, blocküberlagerten Waldstandorten, ließen sich mit geringem Aufwand, zum Beispiel durch Einhaltung eines ausreichenden Puffers, kontrollieren bzw. verhindern (Vor et al. 2015). Allerdings wird die Frage der Invasivität der Douglasie und der notwendigen Maßnahmen zur Verhinderung einer unkontrollierten Ausbreitung nach wie vor kontrovers diskutiert (vgl. BfN 2015).

Unstrittig ist, dass die Douglasie nur auf geeigneten Standorten und in Mischung mit anderen Baumarten angebaut werden darf. Geeignet sind mindestens frische Standorte mit mäßiger bis geringer Trophie auf gut durchlüfteten Böden, die im Durchwurzelungsbereich keine Grund- oder Staunässe aufweisen (Egidi 2009). Ungeeignet sind insbesondere wechselfeuchte Böden oder Nassstandorte. Dort bildet die Douglasie – anders als auf gut durchlüfteten terrestrischen Standorten - nur ein unzureichendes Wurzelsystem aus und ist windwurfgefährdet (Foerst 1981, Englisch 2008). Die Mischung mit anderen Baumarten, in der Regel insbesondere mit der Rotbuche, dient der Risikominimierung und -streuung, der Erhöhung der Vielfalt und der Beachtung von Naturschutzaspekten (Egidi 2009, Matthes 2009). Unstrittig ist auch, dass sie nicht in Trockenlebensräumen/Felsstandorten und in deren Nachbarschaft angebaut werden darf, bzw. auf solchen Standorten sowie auf Naturschutzvorrangflächen zurückgedrängt werden sollte (Egidi 2009, Matthes 2009).
Auch wenn die Zusammenhänge zwischen Schäden durch Mangantoxizität und der Genetik nicht eindeutig geklärt sind, steht außer Frage, dass bei Pflanzungen der Provenienz eine entscheidende Bedeutung für die Entwicklung der Douglasien zukommt. Generell kommt nur der Anbau der „viridis"-Rasse in Betracht. Haase (2009) empfiehlt auf die Einfuhr von Saatgut aus Nordamerika zu verzichten und stattdessen auf bewährte heimische Herkünfte in der Rangfolge „Geprüftes Vermehrungsgut", „Qualifiziertes Vermehrungsgut", Sonderherkünfte, „Ausgewähltes Vermehrungsgut" zurückzugreifen. Sofern dieses Saatgut nicht verfügbar ist, können als Ersatz Herkünfte aus den Saatgutzonen des Westabhanges der Kaskaden < 600 m ü. N.N. (Washington) verwendet werden.

9.2 Ausschluss von Standorten mit Manganüberschuss

Neben Standorten, die zu trocken, zu nährstoffreich, zu dicht oder zu nass sind, sollten auch Standorte, bei denen das Auftreten von Mangantoxizität zu erwarten ist, nicht für den Anbau der Douglasie vorgesehen werden.

In Kapitel 5 ist dargelegt, dass hohe, den Douglasien zugängliche Manganvorräte vor allem bei Lösslehmen, Lössdecklehmen, Schichtlehmen, eutrophen Tonschiefern und Standorten des Rotliegenden zu finden sind. Verdichtung und Vernässung erhöht nicht nur das Sturmwurfrisiko sondern auch das Risiko des Auftretens von Mn-Toxizität.
Auf den vorgenannten Standorten mit hohem Mangantoxizitätsrisiko sollten grundsätzlich keine Neuanpflanzungen von Douglasien erfolgen. Stocken auf diesen Standorten bereits Douglasien oder verjüngt sich die Douglasie in diese Standorte hinein, sollte durch geeignete waldbauliche Maßnahmen, wie den Voranbau von Rotbuche, Sorge getragen werden, dass die Douglasie in der nachfolgenden Waldgeneration nur noch als nachrangige Mischbaumart vorkommt.

9.3 Waldbauliche Behandlung der Douglasie auf Standorten mit erhöhter Gefährdung durch Mangantoxizität

Angesichts der drastischen Schadbilder mit zum Teil hohen Ausfallraten kamen die vor Ort tätigen Forstleute häufig zu dem Schluss, dass die Bestände nicht mehr zu retten seien und ein Räumen und eine Neubegründung mit einer anderen Baumart geboten sei. Dies hat sich in vielen Fällen als nicht notwendig erwiesen. Meist haben sich die Schäden nicht so dramatisch entwickelt wie befürchtet (vgl. Kap. 3).
Die Schäden treten vornehmlich an unter 30-jährigen Bäumen, also noch in der Phase beginnender Dimensionierung, auf. In höherem Alter ist die Douglasie offenbar deutlich weniger gefährdet. Dies könnte zum einen an der im Versauerungsprozess der Böden abnehmenden Manganverfügbarkeit liegen. Zum anderen dürften die Douglasien mit zunehmendem Baumalter in der Lage sein, mit den Wurzeln die Nährstoffressourcen im Boden besser zu erschließen und hierdurch sowie durch die höhere Speicherkapazität von Nährstoffen im (stärker dimensionierten) Baum durch Manganüberschuss bedingte Mangelernährung auszugleichen. In vielen Fällen reichen die verbliebenen Bäume zumindest zu Erreichung bauholzfähiger Sortimente aus. Beispielsweise stocken im Bestand des Düngungsversuchs Adenau im Jahr 2013 (Bestandesalter 61 Jahre) auch auf der un-

behandelten Kontrolle und den nicht wirksamen Düngungsvarianten noch zumindest 170 vitale Douglasien je Hektar in hinreichender Verteilung (vgl. Kap. 7.2.1). Auch im Provenienzversuch Sobernheim (vgl. Kap. 8.2) zeigten die Bäume zwischen den Aufnahmen 1990 und 2003 eine offenkundige Verbesserung des Vitalitätszustandes (Hosius & Leinemann 2003). Als wesentliche Konsequenz für die forstliche Praxis bleibt somit die bereits nach den ersten Untersuchungsbefunden ausgesprochene Empfehlung bestehen, auch stark von Mangantoxizität betroffene Bestände nicht aufzugeben, sondern weiter vitalitätsorientiert zu behandeln.

In Beständen, die nicht nur von Mangantoxizität betroffen waren, sondern in denen auch massiv Rußige Douglasienschütte auftrat, waren zum Teil so große Ausfälle zu verzeichnen, dass mehr oder minder große Lücken entstanden sind.

Auch hier sollten die verbleibenden Douglasien nicht abgeräumt, sondern nur abgängige Bäume entnommen werden. Wichtig ist, dass die Lücken rechtzeitig zur klumpenweisen Vorausverjüngung ausreichend schattentoleranter Baumarten genutzt werden, bevor verjüngungshemmende oder gar –blockierende Bodenvegetation auftritt.

Bei stark von Mangantoxizität betroffenen Douglasien sollte generell auf die Auswahl von Z-Bäumen und ihre Ästung verzichtet werden. Da für den einzelnen Baum nicht abgeschätzt werden kann, ob und wann er von Mangantoxizität betroffen sein wird (betroffene Bäume sind meist bis kurz vor Sichtbarwerden der Toxizitätssymptome gut gewachsen), muss damit gerechnet werden, dass ein Teil der gegebenenfalls ausgewählten Z-Bäume vorzeitig ausscheidet. Daher kann die Auswahl und Wertästung von Douglasien-Z-Bäumen unter diesen Voraussetzungen nicht empfohlen werden. Vielmehr sollten die Douglasien unter Berücksichtigung der individuellen Vitalitätsunterschiede so behandelt werden, dass sie eine den Umständen entsprechend höchste Flächenleistung beibehalten. Zielsetzung der Bewirtschaftung ist dann die verstärkte Berücksichtigung anderer Baumarten –sofern vorhanden- sowie die Volumenerzeugung von Douglasie in Bauholzqualität.

Die Auswahl der zu entnehmenden Bäume sollte streng an deren Vitalität ausgerichtet sein. Vorrangig entnommen werden sollten Bäume mit starkem Harzfluss und/oder starker Kronenverlichtung. Die Baumentnahme dient nicht als Hygienemaßnahme. Zur Erhaltung der Bestandesstruktur können daher gegebenenfalls auch stark betroffene Bäume belassen werden. Allerdings sollte auch Dichtstand vermieden werden, da dieser die Anfälligkeit gegenüber Trockenstress erhöht (Rais et al. 2014).

Sollten auf Manganrisikostandorten bei nur geringfügig aufgetretenen Schäden Z-Bäume ausgewählt werden, erfolgt die Z-Baumauswahl der sich von Natur sehr gut ausdifferenzierenden Douglasie (Dong und Eder 2005) gemäß der Dimensionierungsrichtlinie (Landesforsten Rheinland-Pfalz 2003) dann, wenn die größte Kronenbreite in etwa bei 25 % der Endhöhe des Baumes liegt. Dies ist unter den bei uns verbreiteten Standortverhältnissen überwiegend in einem Höhenrahmen von etwa 18-22 m der Fall.

In Douglasienbeständen, in denen die Schäden vermutlich durch Mangantoxizität verursacht werden (Harzsticken, sehr hohe Mangangehalte in den Nadeln), wird eine Dolomitkalkung im Zuge der „regulären“ Bodenschutzkalkungen empfohlen. Hierbei kommen 3 t Dolomit je Hektar der Mahlfeinheit 0-2 mm zum Einsatz. Als Turnus werden für die durch Mangantoxizität gefährdeten Douglasienbestände 20 Jahre empfohlen. Von der Kalkung ist keine kurzfristige Beseitigung von Schadsymptomen, sondern eine nur allmählich einsetzende, aber langzeitig die Manganaufnahme reduzierende und die Calcium- und vor allem auch Magnesiumernährung verbessernde Wirkung zu erwarten (vgl. Kap. 8.3).

Inwieweit in von Mangantoxizität betroffenen Douglasienbeständen die Ausbringung eines Dolomit-Holzasche-Phosphat- Gemischs empfohlen werden kann wird gegenwärtig noch geprüft. Gezielte Spurenelementdüngungen erscheinen beim gegenwärtigen Wissensstand demgegenüber als nicht sinnvoll, da bislang nicht geklärt ist, inwieweit Spurenelementmängel an der Schadentstehung beteiligt sind und entsprechende Düngungsversuche erfolglos waren (vgl. Kap. 7.2.4).

10 Literatur

Autorenkollektiv (1997): Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden – derzeitige Empfehlungen für die Praxis. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 41/97: 1-173

Ahrens, E. (1964): Untersuchungen über den Gehalt von Blättern und Nadeln verschiedener Baumarten an Kupfer, Zink, Bor, Molybdän und Mangan. AFZ: 8-16

Albert, R.; Hobler, K. M. (1988): Mineralstoff- und Ionenhaushalt von Fichten I bis III. FIW-Projekt Zl. 36.009/1-23/84 bis 86, Endbericht, Institut für Pflanzenphysiologie, Univ. Wien

Augusto, L.; Zeller, B.; Midwood, A. J.; Swanston, C.; Dambrine, E.; Schneider, A.; Bosc, A. (2011): Two-year dynamics of foliage labelling in 8-year-old Pinus pinaster trees with 15N, 26Mg and 42Ca - Simulation of Ca transport in xylem using an upscaling approach. Annals of Forest Science 68, S. 169–178, doi:10.1007/s13595-011-0018-x

Balcar, P. (2015): Arten- und Strukturvielfalt in Douglasienwäldern - Untersuchungen zum Wachstum, Biodiversität und Invasivität in zwei Douglasien-Naturwaldreservaten und ihren bewirtschafteten Vergleichsflächen in Rheinland-Pfalz. Forstarchiv 86, 4, 107-113

Bañados, M. P., Ibáñez, F. and Toso, A. M. (2009): Manganese toxicity induces abnormal shoot growth in 'O'Neal' blueberry. Acta Hortic. 810: 509-512

Baronius, K.; Fiedler, H. J. (1996): Ernährungszustand der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] *Franco*) auf dänischen und deutschen Standorten im Vergleich zu ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet. Forstwissenschaftliches Centralblatt 115, S. 10–16

Baule, H. (1978): Grundlagen der Forstpflanzenernährung und –düngung. -Die Bedeutung der einzelnen Nährstoffe-. Forstpflanzen - Forstsamen Nr. II, 78, S. 34-42

Beaton, J. D.; Kosick, R.; Speer, R. C. (1964): Chemical Composition of Foliage from Fertilized Plus Douglas Fir Trees and Adjacent Unfertilized Check Trees. Soil Science Society of America Journal 28, S. 445, doi:10.2136/sssaj1964.03615995002800030043x

Bergel, D. (1985): Douglasien-Ertragstafel für Nordwestdeutschland. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen

Bergmann, W. (1986): Farbatlas - Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1986, 306 S.

Bergmann, W. (1988): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1988, 762 S.

Bihl, C.; Matzner, E. (2000): Wuchsdeformationen an Douglasien: Eine Folge von Molybdän- oder Bormangel? Bericht des BITÖK an die FVA Rheinland-Pfalz und Diplomarbeit C. Bihl im Fach Geoökologie der Universität Bayreuth: 99 S.

Blaschke, M., Bussler, H., Schmidt, O. (2008): Die Douglasie - (k)ein Baum für alle Fälle. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.): Die Douglasie - Perspektiven im Klimawandel. LWF Wissen 59: 57-61

Block, J. (1997): Schadsituation der Douglasie in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 41/97. S. 46-75

Block, J. (2009): Douglasie: eine standortspflegliche Baumart? Seminar 2.2.4 Douglasie - Neophyt oder Baum der Zukunft? 28.05.2009. http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Veroeffentlichungen/haase-dougl.pdf (besucht am 25.06.2015)

Block, J., Bopp, O., Gatti, M., Heidingsfeld, N., Zoth, R. (1991): Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz – Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten, Nr. 17/91

Block, J., Heidingsfeld, N., Schüler, G. (1992): Ökochemische Kennwerte aus Boden- und Nadelanalysen zur Beurteilung der Kalkungs- bzw. Düngungsbedürftigkeit der Wälder. In: Unterlagen zum Seminar: „Aktuelle Ergebnisse aus der Arbeit der Forstlichen Versuchsanstalt des Landes Rheinland-Pfalz, Juli 1992

Block, J.; Wunn, U. (1996): Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand. In: Sensitivität rheinland-pfälzischer Waldböden gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 35/96, S. 15-42

Block, J.; Gauer, J. (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 70/2012, 228 S.

Block, J.; Schuck, J.; Seifert, Th. (2010): Nutrient removal by wood harvesting in Douglas-fir stands for different silvicultural treatments and varying harvesting intensities. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 85: Opportunities and risks for Douglas-fir in a changing climate: 58-59

Block, J.; Dieler, J.; Gauer, J.; Greve, M,; Moshammer, R.; Schröck, H.W.; Schuck, J.; Schwappacher, V.; Wunn, U. (2016). Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung bei der Holz- und Biomassenutzung im rheinland-pfälzischen Wald. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, im Druck

Bögelein , R.; Hassdenteufel, M.; Thomas, F. M.; Werner, W. (2012): Comparison of leaf gas exchange and stable isotope signature of water-soluble compounds along canopy gradients of co-occurring Douglas-fir and European beech. Plant, Cell and Environment (2012): 1-13. doi: 10.1111/j.1365-3040.2012.02486.x

Børja, I.; Nilsen, P. (2008): Long term effect of liming and fertilization on ectomycorrhizal colonization and tree growth in old Scots pine (Pinus sylvestris L.) stands. Plant and Soil 314, S. 109–119, doi:10.1007/s11104-008-9710-5

Bortner, C. E. (1935): Toxicity of manganese to Turkish tobacco in acid Kentucky soils. Soil Sci. 39: 15-33

Butin, H. (2011): Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Diagnose, Biologie, Bekämpfung. Ulmer Verlag Stuttgart, 320 S.

Carter, R., Otchere-Boateng, I., Klinka, K. (1984): Dieback of a 30-year-old Douglas-fir plantation in the Brittain River Valley, British Columbia: Symptoms and Diagnosis. Forest Ecology and Management, 7, S. 249-263, doi:10.1016/0378-1127(84)90002-1

Chao; , T. T. (1972): Selective dissolution of manganese oxides from soils and sediments with acidified hydroxylamine hydrochloride. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36, 764 -768

Cornelis, J. T.; Ranger, J.; Iserentant, A.; Delvaux, B. (2010): Tree species impact the terrestrial cycle of silicon through various uptakes. Biogeochemistry 97, S. 231–245, doi:10.1007/s10533-009-9369-x

Crocker, T., Kenworthy, A. (1973): Investigations of internal bark necrosis in ‚Delicious', apple trees. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 98(6): S. 559-562

Davis, J. G. (1996): Soil pH and magnesium effects on manganese toxicity in peanuts. J. Plant Nutr. 19: 535-550

Delb, H. (1989): Einzelbaumweise CIR-Luftbildinterpretation zur Kartierung kleinräumlicher Verteilungsmuster in geschädigten Douglasienbeständen. Diplomarbeit am Institut für Forsteinrichtung und Forstliche Betriebswirtschaft – Abteilung Luftbildmessung und Fernerkundung-, Universität Freiburg, 92 S.

Delb, H. (1999): Folgewirkungen der Schwammspinner-Kalamität 1992 bis 1995 (Lymantria dispar L.) in einem mitteleuropäischen Eichenwaldgebiet am Beispiel des Bienwaldes in Rheinland-Pfalz. Dissertation Universität Göttingen, 154 S. und Anhang

Delb, H. (1999): Schwammspinner-Kalamitäten in Rheinland-Pfalz. In: Delb, H., Block, J. (Hrsg.): Untersuchungen zur Schwammspinner-Kalamität 1992 bis 1994 in Rheinland-Pfalz. Mitt. Forstl. Versuchsanst. Rheinland-Pfalz, Nr. 45/99, S. 2-13

Delb, H. (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald in Rheinland-Pfalz. Teilbericht Waldschutz und Klimawandel – RHEINLAND-PFALZ KOMPETENZZENTRUM FÜR KLIMAWANDELFOLGEN [Hrsg.]: Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 4, Modul Wald: 59 S.

Derome, J. (1990): Effects of forest liming on the nutrient status of podzolic soils in Finland. Water, Air, & Soil Pollution 54, S. 337–350, doi:10.1007/BF00298677

de Varennes, A., Carneiro, J. P. and Goss, M. J. (2001): Characterization of manganese toxicity in two species of annual medics. J. Plant Nutr. 24: 1947-1955

de Wall, K.; Dreher, G.; Spellmann, H.; Pretzsch, H. (1998): Struktur und Dynamik von Buchen-Douglasien-Mischbeständen in Niedersachsen. Forstarchiv 69: 179-191

de Wit, C.; Dijkshoorn, W. & Noggle, J. (1963): Ionic balance and growth of plants. In: Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen 69

Dong, P. H.; Eder, W. (2005): Wachstum der Douglasie in Rheinland-Pfalz. In: Dong, P. H. (Hrsg.): Zum Anbau und Wachstum der Douglasie. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Nr. 55/2005: 9-36

Doucet K. (1997): Compositional Nutrient Diagnosis of Forest Trees in North Western Quebec. Master Thesis, McGill Universität Montreal, Canada

Dučić, t.; Polle, A. (2005): Manganese and copper toxicity and detoxification in plants. Brazilian Journal of Physiology 172: 115-122

Dučić, t.; Polle, A. (2006): Manganese toxicity in two varieties of Douglas fir (Pseudotsuga menziesii var. varidis and glauca) seedlings as affected by phosphorus supply. Functional Plant Biology 34, S. 31-40, doi: 10.1071/FP06157

Dučić, T.; Leinemann, L.; Finkeldey, R.; Polle, A. (2006): Uptake and translocation of manganese in seedlings of two varieties of Douglas fir. New Phytologist 170; 11-20

Egidi, H. (2009): Waldbau mit der Douglasie, Stand und Perspektiven. Seminar 2.2.4 Douglasie - Neophyt oder Baum der Zukunft? 28.05.2009. http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Veroeffentlichungen/haase-dougl.pdf

Eis, U.; Kaus, A.; Wild, A. (1997): Mykologische Untersuchungen an unterschiedlich geschädigten Douglasien. A. Untersuchungen des Feinwurzelsystems und der Mykorrhiza; B. Überprüfung des Vorkommens des Wundparasiten Phomopsis pseudotsugae in der Rinde erkrankter Douglasien. In: Autorenkollektiv: Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden – derzeitige Empfehlungen für die Praxis. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 41/97: 107-116

Eisenbeis, G.; Lenz, R.; Dogan, H.; Schüler, G. (1996): Zur biologischen Aktivität von Nadelwaldböden: Messung der tierischen Fraßaktivität mit Köderstreifen-Test sowie Bestimmung der Streuabbauraten mit dem Minicontainer-Test. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 26: 305-311

Elling, W.; Heber, U.; Polle, A.; Beese, F. (2007): Schädigung von Waldökosystemen: Auswirkungen anthropogener Umweltveränderungen und Schutzmaßnahmen. Spektrum Akademischer Verlag, München

Engels, F.; Block, J.; Wunn, U. (2013): Methodenbeschreibung Terrestrische Waldzustandserhebung in Rheinland-Pfalz. http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/FUM/umweltmonitoring/methoden.pdf

Englisch, M. (2008): Die Douglasie - Für und Wider aus standortskundlicher Sicht. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien. In: BFW Praxisinformation, Nr. 16: 6-8

Ernst, W. H. O. (1985): Bedeutung einer veränderten Mineralstoffverfügbarkeit (Schwermetalle, Al, Ti) für Wachstums- und Selektionsprozesse in Wäldern. Bielefelder Ökol. Beitr. 1: 143-158

Evers, F. H. (1964): Die Bedeutung der Stickstoff-Form für Wachstum und Ernährung der Pflanzen, insbesondere der Waldbäume. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung 14, S. 19–37

Evers F. H., Hüttl R. F. (1992): Magnesium-, Calcium- und Kaliummangel bei Waldbäumen - Ursachen, Symptome, Behebung. Reihe FVA-Merkblätter, Heft 42

Fiedler, H. (1969): Auswertung eines Meliorationsversuches auf unterem Buntsandstein im Revier Schwarza , StFB Schmalkalden. Archiv für Forstwesen 18, S. 351–377

Fiedler, H. J.; Rösler H. J. (1988): Spurenelemente in der Umwelt. Enke Verlag Stuttgart, 278 S.

Fischer, H. (2009): Das Holz der Douglasie, vielseitig verwertbar. Seminar 2.2.4 Douglasie - Neophyt oder Baum der Zukunft? 28.05.2009. http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Veroeffentlichungen/haase-dougl.pdf

Fisher, J. H. (1996): SAMPA Research Update: Adequate Nutrient Ranges for Scotch Pine, Douglas-fir and Fraser Fir Christmas Trees in Michigan. Michigan Christmas Tree Journal, S. 25–27

Flückiger, W. & Braun, S. (2003): Critical limits for nutrient concentrations and ratios for forest trees - a comment. Empirical critical loads for nitrogen – Proceedings. SAEFL, Bern, S. 273–280

Foerst, K. (1981): Empfehlungen zum Douglasienanbau in Bayern. AFZ 36: 1071-1072

Foy, C. D.; Chaney, R. L.; White, M. C. (1978): The physiology of metal toxicity to plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 29: 511-566

Fritz, E.; Langenfeld-Heyser; R.; Polle, A.; Petercord, R. (2006). Mangan in braunfleckigem Holz der Buche (Fagus silvatica L.). Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft 59/06: 167-180

Fussi, B.; Konnert, M. (2013): Ergebnisse der genetischen Analysen zur Unterscheidung von Küsten- und Inlandsdouglasie auf Einzelbaumniveau. Studie für die FAWF Rheinland-Pfalz: 7 S. (unveröffentlicht)

Gärtner, E. (1985): Mangangehalte in Altfichten, Boden und Kronendurchlass an jeweils gleichen Standorten. VDI-Berichte 560: 559-573

Ganghofer, A. (1884): Das forstliche Versuchswesen. Schmid'sche Verlagsbuchhandlung, Augsburg, 477 S.

Gangwar, S., Singh, V. P., Prasad, S. M. and Maurya, J. N. (2011): Differential responses of pea seedlings to indole acetic acid under manganese toxicity. Acta Physiol. Plant. 33: 451-462

Garrison M. T.; Moore, J. a.; Shaw, T. M. & Mika, P. G. (2000): Foliar nutrient and tree growth response of mixed-conifer stands to three fertilization treatments in northeast Oregon and north central Washington. Forest Ecology and Management 132, S. 183–198, doi:10.1016/S0378-1127(99)00228-5

Goudet, M.; Baubet, O.; Vansteavel, B.; Mozzicoacci Y.; Goudet B. (2013): Les necroses cambiales en bande sur douglas. In: Forest enterprise (212): S.9-11

Greve, M. (2015): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 73, 388 S.
nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601

Greve, M.; Block, J.; Schröck, H.W.; Schultze, J.; Werner, W.; Wies, K. (2016): Nährstoffversorgung Rheinland-Pfälzischer Wälder - Bewertung von Status und Entwicklung der Waldernährung und Erprobung neuerer Bewertungs-Verfahren. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 76/16 , 228 S.

Gugger P. F.; SHINYA S.; CAVENDER-BARES, J. (2010): Phylogeography of Douglas-fir based on mitochondrial and chloroplast DNA sequences: testing hypotheses from the fossil record. Molecular Ecology 19, 1877–1897

Guntzer, F.; Keller, C.; Meunier, J. D. (2012): Benefits of plant silicon for crops: A review. Agronomy for Sustainable Development 32, S. 201–213, doi:10.1007/s13593-011-0039-8

Haase, B. (2009): Richtige Herkunftswahl: Basis des waldbaulichen Erfolges. Seminar 2.2.4 Douglasie - Neophyt oder Baum der Zukunft? 28.05.2009. http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Veroeffentlichungen/haase-dougl.pdf

Hartmann, G.; Nienhaus, F.; Butin, H. (2007): Farbatlas Waldschäden - Diagnose von Baumkrankheiten, 3. Auflage, Stuttgart (Hohenheim): 269 S.

Heenan, D. P.; Campbell, L. C. (1981): Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (Glycine max (L.) Merr. cv. Bragg). Plant and Soil, Vol. 61, Issue 3: 447-456

Heintze, S. G. (1968): Manganese-phosphate reactions in aqueous systems and the effects of applications of monocalcium phosphate on the availability of manganese to oats on an alkaline fen soil. Plant Soil 29, 407-423

Hermann, R. K. (1981): Die Gattung Pseudotsuga – Ein Abriss ihrer Systematik, Geschichte und heutigen Verbreitung. Forstarchiv 52: 204-212

Hermann, R. K. (1997): Die Situation der Douglasie in Nordamerika. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 41, 9-29

Horiguchi, T. (1988): Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. Soil Science and Plant Nutrition 34, S. 65–73, doi:10.1080/00380768.1988.10415580

Hosius, B.; Leinemann, L. (2003): Isoenzymatische Untersuchung des Douglasien-Herkunftsversuches im Forstamt Entenpfuhl zwecks Charakterisierung der genetischen Diversität und Differenzierung der aus den Ursprungsgebieten eingebrachten 14 Herkünften sowie Ansprache der analysierten Bäume hinsichtlich ihres Vitalitätszustandes. Abschlussbericht zur Studie im Auftrag der FAWF Rheinland-Pfalz. 21 S. und Anhang (unveröffentlicht)

Hosius, B.; Leinemann, L. (2005): Genetische Charakterisierung des Douglasienbestands 84a im FR Denn (FA Adenau) mittels Isoenzym-Genmarkern. Abschlussbericht zur Studie im Auftrag der FVA Rheinland-Pfalz: 19 S. (unveröffentlicht)

Horst, W. J. and Marschner, H. (1978a): Effect of silicon on manganese tolerance of beanplants (Phaseolus vulgaris L.). Plant Soil 50, 287-303

Horst, W. J. and Marschner, H. (1978b): Effect of excessive manganese supply on uptake and translocation of calcium in bean plants (Phaseolus vulgaris L.). Z. Pflanzenphysiol. 87, 137-148

Horst, W. J. (1988): The physiology of manganese toxicity. In: Manganese in Soils and Plants (R. D. Graham, R. J. Hannam and N. C. Uren, eds., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 175-188

Horst, W. J., Fecht, M., Naumann, A., Wissemeier, A. H. and Maier, P. (1999): Physiology of manganese toxicity and tolerance in Vigna unguiculata (L.) Walp. J. Plant Nutr. Soil Sci. 162, 263-274

Hüttl R. F. (1991): Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (Hrsg.): Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Nr. 28, 440 S.

Iwasaki, K.; Matsumura, A. (1999): Effect of silicon on alleviation of manganese toxicity in pumpkin (Cucurbita moschata Duch cv. Shintosa). Soil Science and Plant Nutrition 45, S. 909–920, doi:10.1080/00380768.1999.10414340

Kang, B. T.; Fox R. L.(1980): A methodology for evaluating the manganese tolerance of cowpea (Vigna unguiculata) and some preliminary results of field trials. Field. Crop Res. 3; S. 199-210

Katzensteiner, K. (1992): Mineralstoffernährung, Bodenzustand und Baumvitalität in Fichtenwaldökosystemen des Böhmerwaldes. FIW-Forschungsbericht 1992/1, Institut für Waldökologie, Univ. f. Bodenkultur, Wien

Kaus-Thiel, A. (1998): Die Douglasienerkrankung - eine manganinduzierte Nährstoffstörung? Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung des Eisengehaltes - Dissertation. 222 S.

Kaus, A.; Wild, A. (1997): Physiologische Aspekte der Erkrankung der Douglasie (Pseudotsuga menziesii var. viridis). In: Autorenkollektiv: Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden – derzeitige Empfehlungen für die Praxis. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 41/97, 117-127

Kazda, M. (1990): Zusammenhang zwischen Stoffeintrag, Bodenwasserchemismus und Baumernährung in drei Fichtenbeständen im Böhmerwald, Oberösterreich. Forstliche Schriftenreihe, Bd. 3, Univ. f. Bodenkultur, Wien

Kehr I.; Büttner, G. (2003): Manganschäden an Douglasien im Provenienzversuch Sobernheim, Forstarchiv 74, 2; 53-61

Keil, P.; Hecht-Buchholz, Ch.; Ortmann, U. (1986): Zum Einfluß von erhöhtem Mangan-Angebot auf Fichtensämlinge. AFZ 34/35: 855-858

Kleinschmit, J. (1973): Zur Herkunftsfrage bei der Douglasie. In: Der Forst- und Holzwirt (28) Nr. 11, Verlag M. & H. Schaper: 209-213

Kleinschmit, J.; Racz, J.; Weisgerber, H.; Dieze, W.; Dieterich, H.; Dimpfelmeier, R. (1974): Ergebnisse aus dem internationalen Douglasien Herkunftsversuch von 1970 aus der Bundesrepublik Deutschland. Sonderdruck aus Silvae Genetica 23, 6: 167-226

Kleinschmit, J.; Svolba, J; Weisgerber, H.; Rau, H. M.; Dimpflmeier, H.; Ruetz, W.; Franke, A. (1991): Ergebnisse des IUFRO-Douglasien-Herkunftsversuches in West-Deutschland im Alter 20. Forst und Holz 46: 238-242

Klemm, R. (2010): Holzentwertende Stockfäulen an der Douglasie. Bachelorarbeit im Studium Forstwirtschaft, HAWK Hildesheim/Holzminden/Göttingen, 44 S.

Knabe, W. (1981): Immissionsökologische Waldzustandserfassung in Nordrhein-Westfalen. AFZ 26, 641-643

Kölling, C. (2008): Die Douglasie im Klimawandel: Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. In: Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF Wissen 59: Die Douglasie - Perspektiven im Klimawandel, Freising: 12-21

König, Th.; Tischer, A.; Makeschin, F.; Martens, S. (2010): Sustainable cultivation of Douglas-fir on dry and acid sandy soils in the old-glacial lowlands of eastern Germany – aspects of nutrient and humus dynamics. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 85: 4

Köster, W. W.; Merkel, D. (1983): Beziehungen zwischen den Gehalten an Zink, Cadmium, Blei und Kupfer in Böden und Pflanzen bei Anwendung unterschiedlicher Bodenuntersuchungsmethoden. Landwirtsch. Forsch. Sonderh. 39, 245 -254

Konnert, M. (2009): Genetische Aspekte und Herkunftsfragen bei der Douglasie. Potsdam: Ministerium Infrastruktur u. Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 43, 28-32

Konnert, M.; Ruetz, W.; Schirmer, R. (2008): Fragen zum forstlichen Vermehrungsgut bei Douglasie. In: Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF Wissen 59 Die Douglasie - Perspektiven im Klimawandel, Freising, Seite 22-26

Kownatzki, D.; Kriebitsch, W -U.; Bolte, A.; Liesebach, H.; Schmitt, U.; Elsasser, P. (2011): Zum Douglasienanbau in Deutschland - Ökologische, waldbauliche, genetische und holzbiologische Gesichtspunkte des Douglasienanbaus in Deutschland und den angrenzenden Staaten aus naturwissenschaftlicher und gesellschaftspolitischer Sicht. Sonderheft 344, Johann Heinrich von Thünen-Institut - Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (VTI) (Hrsg.), Braunschweig, 67 S.

Krauss H.-H.; Heinsdorf, D. (2005): Ernährungsstufen für wichtige Wirtschaftsbaumarten. Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie 39, S. 172–179

Krauss H.-H.; Heinsdorf, D.; Hippeli, D. & Tölle, H. (1986): Untersuchungen zu Ernährung und Wachstum wirtschaftlich wichtiger Nadelbaumarten im Tiefland der DDR. Beiträge für die Forstwirtschaft 20, S. 156–164

Kreutzer, K. (1995): Effects of forest liming on soil processes. Plant and Soil 168-169, S. 447–470

Kubiniok, J.; Gerber, C. (2006): Untersuchungen zu Ursachen der Fleckenbildung in Buchenhölzern an rheinland-pfälzischen und saarländischen Standorten. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft 59/06: 157-165

Lang, F. V. (1995): Molybdän auf sauren Waldstandorten – Vorräte, Mobilität und DOC-Sorptionskonkurrenz. Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Bayreuth 1995, Band 45

Larcher, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Auflage, UTB, Stuttgart, 408 S.

Lavender, D.P.; Hermann, R.K. (2014): Douglas-fir. The Genus Pseudotsuga. Corvallis: Oregon State University Press, 352 S.

Lehto, T.; Mälkönen, E. (1994): Effects of liming and boron fertilization on boron uptake of Picea abies. Plant and Soil 163, S. 55–64

Leinemann, L. (1996): Genetic differentiation of damaged and healthy Douglas-fir stands in Rheinland-Pfalz with respect to their origin. Silvae Genetica 45: 250-256

Leinemann, L. (1997): Genetische Strukturen gesunder und geschädigter Douglasienbestände in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 41/97:145-160.

Leinemann, L. (1998): Genetische Untersuchungen an Rassen der Douglasie (Pseudotsuga menziesii [Mirb.] Franco) am Beispiel gesunder und geschädigter Bestände. Göttinger Forstgenetische Berichte 23: 151 S.

Leinemann, L.; Hosius, B. (2011): Untersuchung von 20 Douglasien-Proben aus Rheinland-Pfalz mit Hilfe neu etablierter DNA-Marker. Kurzbericht zum Auftrag der FAWF, 3 S. (unveröffentlicht)

le Mare, P. H. (1977): Experiments on effects of phosphorus on the manganese nutrition of plants. II. Interactions of phosphorus, calcium and manganese in cotton grown with nutrient solutions. Plant and Soil 47, S. 607–620, doi:10.1007/BF00011030

Lévesque, M.; Saurer, M., Siegwolf, R., Eilmann, B., Brang, P., Bugmann, H. (2013): Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch. Glob. Change Biol. 19: 3184-3199

Lévesque, M.; Rigling, A., Bugmann, H., Weber, H., Brang, P. (2014): Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. Agricultural and Forest Meteorology 197: 1-12

Liese, L. (1932): Zur Biologie der Douglasiennadelschütte. Z. Forst- u. Jagdw. 64: 680-693

Linder, S. (1995): Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. Ecological Bulletins, S. 178–190

Lindner, M. (1988): Mangan-Verteilungsmuster von Fichte und Douglasie. Diplomarbeit am Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Univ. Freiburg: 61 S.

Lindsay, W. L.; Norvell, W. A. (1978): Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42, 421 -428

Löhnis, M. P. (1960): Effect of magnesium on calcium supply on the uptake of manganese by various crop plants. Plant Soil 12, 339-376

Lyr, H.; Fiedler, H.-J.; Tranquillini, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart, 620 S.

Marschner, P. (2012): Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3. Auflage, Academic Press, 651 S.

Mengel, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Jena

Merrem, M. (1991): Nährelementhaushalt von Douglasie, Fichte, Buche und Kiefer bei exzessiver Mangan-Versorgung. Diplomarbeit am Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Freiburg: 59 S.

Matthes, U. (2009): Arten- und Strukturvielfalt in Douglasienwäldern. Seminar 2.2.4 Douglasie - Neophyt oder Baum der Zukunft? 28.05.2009. http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Veroeffentlichungen/haase-dougl.pdf

Maurer, W. D. (2005): Ergebnisse genetischer Untersuchungen an Vorkommen der Douglasie in Rheinland-Pfalz. In: Dong, P. H. (Hrsg.): Zum Anbau und Wachstum der Douglasie. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Nr. 55/2005: 165-196

Metzler, B. (2003): Rußige Douglasienschütte. Waldschutz-Info 2/2003, Online-Version Stand: 30.07.2010. www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/pilze_nematoden/fva_douglasienschuette

Metzler, B. (2010): Waldschutzaspekte bei der Douglasie. FVA-einblick 3/2010, S. 6 – 8

Metzler, B. (2012): Waldschutz - Info 2/2012, Rußige Douglasienschütte. Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.), Freiburg Br., 4 Seiten

Metzler, B. (2016): Harzende und schlecht wüchsige Douglasien im Gemeindewald Oberwörresbach. Beratungsbericht für das FA Birkenfeld

Meyer, M. (1985): Bodenversauerung und Mangan-Überschuss. Untersuchungen in Douglasienbeständen über Buntsandstein in der Nordeifel. Diplomarbeit an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen, 82 S.

Meyer, M.; Ulrich, B. (1990):): Auswirkungen einer Kalkung auf Böden mit Mangantoxizität bei Douglasienbeständen auf Buntsandstein in der Nordeifel. Forst u. Holz 17: 493-498

Mohren G. M. J.; van den Burg, J.; Burger, F. W. (1986): Phosphorus deficiency induced by nitrogen input in Douglas fir in the Netherlands. Plant and Soil 95, S. 191–200, doi:10.1007/BF02375071

Möller, K. und Heydeck, P. (2009): Risikopotenzial und akute Gefährdung der Douglasie - biotische und abiotische Faktoren. In: Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) (Hrsg.): Die Douglasie im nordostdeutschen Tiefland - Chancen und Risiken im Klimawandel. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 43, S. 49-58

Moore J. A.; Mika, P. G.; Shaw, T. M.; Garrison-Johnston, M. I. (2004): Foliar Nutrient Characteristics of Four Conifer Species in the Interior Northwest United States. Western Journal of Applied Forestry 19, S. 13–24

Morgenstern, K. und Krabel D. (2012): Untersuchungen zur Rostigen Douglasienschütte-Rhabdocline pseudotsugae (SYDOW) ein Endophyt? - Vortragsunterlagen, Technische Universität Dresden. Online verfügbar: http://anmeldung.fowita.de/Presse/Vortraege/Freising /Forstschutz/Morgenstern_Untersuchungen%20zur%20Rostigen%20Douglasiensch%C3%BCtte.pdf.

Münch, E. (1928): Klimarassen der Douglasie. Cbl. ges. Forstw.: 9

Nebe, W. (1967): Zur Manganernährung der Fichte. Arch. Forstwes.16: 109-118

Oldencamp I.; Smilde, K. W. (1966): Copper defiency in douglas fir. Pant Soil 25, S. 150-152

Opp, D. (1989): Mangan-Toxizität bei Douglasien: Beziehungen zwischen den verschiedenen Manganfraktionen im Boden und den Mangan-Nadelgehalten gesunder und geschädigter Douglasien des Forstamtes Adenau/Eifel. Diplomarbeit im Fach Angewandte Physische Geographie, Abteilung Bodenkunde, Univ. Trier: 86 S.

Otto, H.-J. (1994): Waldökologie. Ulmer Eugen Verlag, Stuttgart, 391 S.

Pankert, Ch. (1984): Untersuchungen über neuartige Schäden in Douglasienbeständen im Raum Gemünd/Eifel. Diplomarbeit an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen, 52 S.

Parent, L. E.; Dafir, M. (1992): A Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis. Journal of American Society of Horticultural Science 117, S. 239–242

Pretzsch, H.; Block, J.; Dieler, J.; Gauer, J.; Göttlein, A.; Moshammer, R.; Schuck, J.; Weis, W.; Wunn, U. (2014): Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 185. Jg., 11/12: 261-285

Parent, L. E.; Khiari, L. & Pettigrew, A. (2005): Nitrogen diagnosis of Christmas tree needle greenness. Canadian Journal of Plant Science 85, S. 939–947, doi:10.4141/P03-101

Radwan, M. A.; Shumway, J. S.; Debell, D. S. (1979): Effects of Manganese and Manganese-Nitrogen Applications on Growth and Nutrition of Douglas-fir Seedlings. In: USDA Forest Service Research Papers PNW-265

Radwan, M. A. und Brix, H. (1986): Nutrition of Douglas-fir. In: Oliver et al. (Hrsg.): Proceedings of the Douglas-fir: Stand management for the future symposium, June 1985, 18-20,

Rais, A., van de Kuilen, J.-W.G., Pretzsch, H. (2014): Growth reaction pattern of tree height, diameter, and volume of Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii [Mirb.] Franco) under acute drought stress in Southern Germany. Eur. J. Forest Res. 133: 1043-1056

Rohmeder, E. (1956): Professor Münchs Anbauversuch mit Douglasien verschiedener Herkunft und anderen Nadelbaumarten im Forstamt Kaiserslautern-Ost 1912 bis 1954. Z. Forstgenetik, 5. Bd., Nr. 5-6: 142-156

Roques, A. (2010): Review of present and potential insect pests affecting Douglas-fir in Europe in a context of global change. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 85: Opportunities and risks for Douglas-fir in a changing climate, abstracts: 20

Saarsalmi, A. & Tamminen, P. (2005): Boron , Phosphorus and Nitrogen Fertilization in Norway Spruce Stands Suffering from Growth Disturbances. Silva Fennica 39, S. 351–364

Salcedo, I. H.; Warncke, D. D. (1979): Studies in soil manganese: I. Factors affecting manganese extractability. Soil Sci. Soc. Am. J. 43, 135 -138

Schmidt, O. (2012): Fragen und Antworten zur Douglasie. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Forstinfo 04/2012: 8

Schmidt, M.; Spellmann, H.; Nagel, J. (2001): Waldwachstumskundliche Entscheidungshilfen zur Ästung der Douglasie. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 172: 126-136

Schöne, D. (1987): Eine Mangan-induzierte Eisenchlorose bei Douglasie. Allgemeine Forstzeitschrift Nr. 45/1987, S. 1154-1157

Schöne, D. (1992a): Standorts- und immissionsbedingte Ernährungsstörungen bei Douglasie im Mosel-Eifelraum. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 163., Jg. 3: S. 53-60

Schöne, D. (1992b): Standort- und immissionsbedingte Wachstumsstörungen bei Douglasie. Allgemeine Forstzeitschrift Nr. 2/1992: S. 100-103

Schöne, D. (1992c): Hypothesen und Beobachtungen zu Mangantoxizität und Spurenelementernährung bei Douglasien im Mosel-Eifelraum. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 163., Jg. 5: S. 88-93

Schöne, D. (1997): Nährstoffmängel, Wuchsanomalien und Manganüberschuss bei Douglasie im Mosel-Eifelraum. In: Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden - derzeitige Empfehlungen für die Praxis. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 41/97 S. 76-106

Schönhar, S. (1971): Schreiben der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg an das Forstamt Saarburg-Ost vom 23.06.1971, Tgb.-Nr.: 296/3

Schröck, H.W.; zum Hingste, F.W. (2005): Untersuchungen zur Douglasienerkrankung - Diagnostischer Düngeversuch Adenau. 26 S., interner Bericht, unveröffentlicht.

Schütz, J.P.; Pommerening, A. (2013): Can Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii [Mirb.] Franco) sustainably grow in complex forest structures? For. Ecol. Manage. 303: 175-183

Schulze, E.-D.; Beck, E.; Müller-Hohenstein, K. (2005): Plant Ecology. Springer, Berlin, Heidelberg, New York

Schwappach, A. (1901): Die Ergebnisse der in den Preußischen Staatsforsten ausgeführten Anbauversuche mit fremdländischen Holzarten. Zeitschr. f. Forst- u. Jagdwes. 33: 137-169, 195-225, 261-292

Schwappach, A. (1912): Der Einfluß der Herkunft des Samens von Ps. Douglasie auf das Wachstum der Pflanzen. Mitt. Deutsche Dendrolog. Gesellschaft 35

Seibt, (1971): Empfehlungen zur Walddüngung in Nordwestdeutschland. Erkennungsmerkmale von Nährstoffmangel und Herbizideinwirkung. Forst- und Holzwirt, Nr. 9, 1971, S. 180-185

Shelton, J., Zeiger, D., Jackson, W. (1970): Distribution of manganese-54 in Delicious apple trees in relation to the occurrence of internal bark necrosis (IBN). J. Amer. Soc. Hort. Sci, 95: S. 758-762

Sherman, G. D.; Mchargue, J. S.; Hodkiss, W. S. (1942): Determination of active manganese in soil. Soil Sci. 54, 257-259

Slovik, S. (1997): Tree physiology. Magnesium deficiency in forest ecosystems

Spellmann, H.; Albert, M., Schmidt, M., Sutmöller, J., Overbeck, M. (2011): Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. AFZ-Der Wald 66: 19-23

Stephan, B. R. (1973): Über die Anfälligkeit und Resistenz von Douglasien-Herkünften gegenüber Rhabdocline pseudotsugae, Institut für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Schmalenbeck, 5 S.

Stephan, B. R. (1981): Douglasienschütte – Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 1981 - Nr. 2, Paul Parey Verlag, Hamburg, 8 S.

Stimm, B.; Dong, P.H. (2001): Der Douglasien-Herkunftsversuch Kaiserslautern nach neun Jahrzehnten Beobachtung. Forstw. Cbl. 120, S. 173-186

Strittmatter, W. (1974): Ökologische und biologische Studien an der Baumart Douglasie im Zusammenhang mit dem Auftreten von Phaeocryptopus gaeumannii (Rhode) Petr. In: Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg Band 43, Stuttgart, 75 S.

Thomas, F.M.; Bögelein, R.; Werner, W. (2015): Interaction between Douglas fir and European beech – investigations in pure and mixed stands. Forstarchiv 86, Heft 4: 83-91

Tomiczek, C. (2008): Ist die Douglasie hinsichtlich des Forstschutzes weniger problematisch als heimische Koniferen? Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien. In: BFW Praxisinformation 16: 7-18

Tschopp, T. Holderegger, R., Bollmann, K. (2012): Die Douglasie in der Schweiz: Auswirkungen auf Biodiversität und Lebensräume im Wald. Eine Literaturübersicht. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 53 S.

Ulrich, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 144, S. 289-305

Van den Burg, (1985): Foliar analysis for determination of tree nutrient status – A compliation of literature data. Rijksinstituut Voor Onderzoek In De Bosen Landschapsbouw „De Dorschkamp" Wageningen, Rapport nr. 414, 615 S.

van den Driessche, R. (1979): Estimating Potential Response to Fertilizer Based on Tree Tissue and Litter Analysis. 1979 Forest Fertilization Conference in Alderbrook Inn Union, Washington

Van der Heijden, G.; Dambrine, E.; Pollier, B.; Zeller, B.; Ranger, J.; Legout, A. (2015): Mg and Ca uptake by roots in relation to depth and allocation to aboveground tissues: results from an isotopic labeling study in a beech forest on base-poor soil. Biogeochemistry 122, S. 375–393, doi:10.1007/s10533-014-0047-2

Vor, T.; Spellmann, H.; Bolte, A.; Ammer, CH. (Hrsg.) (2015): Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten - Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung. Studie des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA): Kap. 4.12 Douglasie (Pseudotsuga menziesii [Mirb.] Franco) (Autoren: H. Spellmann, A. Weller, P. Brang, H.-G. Michiels, A. Bolte): 142-165

Wehrmann, J. (1959): Die Mineralstoffernährung von Kiefernbeständen (Pinus silvestris) in Bayern. Forstwissenschaftliches Centralblatt 78, S. 129–149, doi:10.1007/BF01825420

Wissemeier, A. H. and Horst, W. J. (1987): Callose deposition in leaves of cowpea (Vigna unguiculata L. Walp.) as a sensitive response to high Mn supply. Plant Soil 102, 283-286

Wissemeier, A. H. and Horst, W. J. (1991): Simplified methods for screening cowpea cultivars for manganese leaf-tissue tolerance. Crop Sci. 31, 435-439

Wissemeier, A, H., Diening, A., Hergenröder, A., Horst, W. J. and Mix-Wagner, G. (1992): Callose formation as parameter for assessing genotypical plant tolerance of aluminium and manganese. Plant Soil 146, 67-75

Wolt, J. D. (1990):): Effects of Acidic Deposition on the chemical form and bioavailability of soil aluminum and manganese. in: (Lucier, A. A.; Haines, S. G., Hrsg.): Mechanisms of forest response to acidic deposition. Springer New York, Berlin, Heidelberg, S. 62-107

Zasoski, R. J.; Porada, H. J.; Ryan, P. J.; Greenleaf-Jenkins, J. & Gessel, S. P. (1990): Observations of copper, zinc, iron and manganese status in western Washington forests. Forest Ecology and Management 37, S. 7–25, doi:10.1016/0378-1127(90)90043-B

Zehle, R. (2015): Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Nebenbaumarten in Mitteleuropa - Eine statistische Herleitung aus van den Burg's Literaturzusammenstellung. TU München

Zinke P. J.; Stangenberger, alan G. (1977): Ponderosa Pine & Douglas-fir Foliage Analyses Arrayed in Probability Distribution. 1979 Forest Fertilization Conference in Alderbrook Inn Union, Washington

Zöttl, H. W. (1985): Schwermetalle im Stoffumsatz von Waldökosystemen. Bielefelder Ökol. Beitr. 1: 31-49

Zoth, R. (1990): Untersuchungen zur Douglasienerkrankung in Rheinland-Pfalz. Interner Bericht der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, 127 S.

11 Danksagung

Die dargestellten Untersuchungen beruhen im Wesentlichen auf den durch unseren, leider verstorbenen, Kollegen Raimund Zoth durchgeführten landesweiten Befragungen der Forstämter, und den daraus resultierenden Probenahmen in zahlreichen Untersuchungsbeständen, sowie der durch ihn angelegten Düngungsversuche in besonders geschädigten Beständen.

Auch die Kolleginnen und Kollegen der örtlichen Forstämter haben das Projekt sehr wesentlich durch Rat und Tat bei der Auswahl und Betreuung der Untersuchungsflächen, der Bereitstellung und Fällung von Probebäumen und vieles mehr unterstützt.

Dank geht auch an Dr. Berthold Metzler, Abt. Waldschutz der FVA Baden-Württemberg, ein aufgrund seines Fachwissens unverzichtbarer Ansprechpartner in Waldschutzfragen.

Die umfangreichen chemischen Analysen sind für das Projekt von zentraler Bedeutung. Bei den Laborteams der LUFA Speyer möchten wir uns für die zuverlässige und sorgfältige Analytik und die Beratung in allen „chemischen Fragen“ herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch den Kolleginnen und Kollegen in der FAWF, ohne deren unermüdlichen und fachkundigen Einsatz das Projekt nicht hätte durchgeführt werden können. Nahezu alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des FB 5.2 haben an diesem Projekt mitgewirkt.

Unser besonderer Dank gilt dem Leiter der FAWF, Herrn Hans-Peter Ehrhart, für die umfassende Unterstützung des Projekts, die kritische Durchsicht des Manuskripts und die Beratung in vielen Fachfragen.

Viele, hier nicht namentlich aufgeführte Personen, sowie eine Vielzahl von studentischen Hilfskräften, Praktikantinnen und Praktikanten haben unmittelbar oder mittelbar zum Projekt beigetragen. Auch ihnen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Die Verfasser

Bisher sind folgende Mitteilungen aus der *Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* erschienen:

77/2016	Ditmar Huckschlag Demographisches Großkarnivoren-Monitoring in Rheinland-Pfalz Monitoringjahr 2015 ISSN 1610-7705 nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601	
76/2016	Greve, Block, Schröck, Schultze, Werner und Wies Nährstoffversorgung Rheinland-Pfälzischer Wälder ISSN 1610-7705 nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601	
75/2016	Ditmar Huckschlag: Die Großkarnivoren in Rheinland-Pfalz - Hinweise seit Ausrottung der Großkarnivoren bis zum Monitoringjahr 2014 ISSN 1610-7705 nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601	
74/2015	Ernst Segatz (Hrsg.), [Autorenkollektiv]: Die Edelkastanie am Oberrhein - Aspekte ihrer Ökologie, Nutzung und Gefährdung - Ergebnisse des Interreg IVa-Oberrhein-Projektes ISSN 1610-7705 nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601	
73/2015	Martin Greve Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt ISSN 1610-7705 nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601	
72/2012	Karl, Block, Schultze und Scherzer Untersuchungen zu Wasserhaushalt und Klimawandel an ausgewählten forstlichen Monitoringflächen in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705 nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601	
71/2012	Karl, Block, Schüler, Schultze und Scherzer Wasserhaushaltsuntersuchungen im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings und bei waldbaulichen Versuchen in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705 nur als download: http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601	
70/2012	Block und Gauer Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705	€ 16,--
69/2011	Maurer und Haase (Hrsg.): Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage. Tagungsbericht 28. Internationale Tagung ARGE Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung, 4.-6. November 2009 in Treis-Karden (Mosel)	€ 18,--

68/2009	Engels, Jochum, Krug und Seegmüller (Hrsg.): Käferschäden im Buchenholz: Einbußen und Verwendungsoptionen ISSN 1610-7705	€ 10,--
67/2009	Phan Hoang Dong (Hrsg.): Zum Anbau und Wachstum von Vogelkirsche und Birke ISSN 0931-9662	€ 10,--
66/2008	Werner D. Maurer und Bolko Haase (Hrsg.): Walnuss-Tagung 2008 ISSN 1610-7705	€ 10,--
65/2008	Block (Hrsg.): Forstliche Forschung Grundlage für eine zukunftsfähige Forstwirtschaft ISSN 1610-7705	€ 10,--
64/2007	Schüler, Gellweiler und Seeling (Hrsg.): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen ISSN 1610-7705	€ 15,--
63/2007	Dong (Hrsg.): Eiche im Pfälzerwald ISSN 0931-9662	€ 10,--
62/2007	Bücking, Moshammer und Roeder: Wertholzproduktion bei der Fichte mittels kronenspannungsarm gewachsener Z-Bäume ISSN 0931-9622	€ 15,--
61/2007	Jahresbericht 2006 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
60/2006	Block und Schüler (Hrsg.): Stickstoffbelastung der rheinland-pfälzischen Wälder; Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen für Bodenmaßnahmen im Wald ISSN 1610-7705	€ 10,--
59/2006	Petercord und Block (Hrsg.): Strategien zur Sicherung von Buchenwäldern ISSN 1610-7705	€ 10,--
58/2006	Jahresbericht 2005 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
57/2005	Seegmüller (Hrsg.): Die Forst-, Holz- und Papierwirtschaft in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662	€ 10,--
56/2005	Jahresbericht 2004 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
55/2005	Dong (Hrsg.): Zum Aufbau und Wachstum der Douglasie ISSN 0931-9662	€ 10,--

54/2004	Dong (Hrsg.): Kiefer im Pfälzerwald ISSN 0931-9662	€ 10,-- vergriffen
53/2004	Jahresbericht 2003 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
52/2004	Maurer (Hrsg.): Zwei Jahrzehnte Genressourcen-Forschung in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705	€ 15,-- (vergriffen)
51/2003	Jahresbericht 2002 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
50/2003	Maurer (Hrsg.): Ökologie und Waldbau der Weißtanne – Tagungsbericht zum 10. Internationalen IUFRO Tannensymposium am 16-20. September 2002 an der FAWF in Trippstadt ISSN 1610-7705	€ 15,--
49/2002	Maurer (Hrsg.): Vom genetischen Fingerabdruck zum gesicherten Vermehrungsgut: Untersuchungen zur Erhaltung und nachhaltigen Nutzung forstlicher Genressourcen in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705	€ 15,-- (vergriffen)
48/2002	Jahresbericht 2001 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
47/2001	Jahresbericht 2000 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
46/1999	Jahresbericht 1999 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
45/1999	Delb und Block: Untersuchungen zur Schwammspinnerkalamität von 1992–1994 in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662	€ 13,--
44/1998	Jahresbericht 1998 SSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
43/1997	Jahresbericht 1997 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
42/1997	Bücking, Eisenbarth und Jochum: Untersuchungen zur Lebendlagerung von Sturmwurfholz der Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie und Eiche ISSN 0931-9662	€ 10,--

41/1997	Maurer und Tabel (Hrsg.): Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden – derzeitige Empfehlungen für die Praxis ISSN 0931-9662	€ 10,--
40/1997	Schröck (Hrsg.): Untersuchungen an Waldökosystemdauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz – Tagungsbericht zum Kolloquium am 04. Juni 1996 in Trippstadt - ISSN 0931-9662	€ 8,--
39/1997	Jahresbericht 1996 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
38/1996	Balcar (Hrsg.): Naturwaldreservate in Rheinland-Pfalz: Erste Ergebnisse aus dem Naturwaldreservat Rotenberghang im Forstamt Landstuhl ISSN 0931-9662	€ 13,--
37/1996	Hunke: Differenzierte Absatzgestaltung im Forstbetrieb - Ein Beitrag zu Strategie und Steuerung der Rundholzvermarktung ISSN 0931-9662	€ 10,--
36/1996	Jahresbericht 1995 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
35/1995	Block, Bopp, Butz-Braun und Wunn: Sensitivität rheinland-pfälzischer Waldböden gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung ISSN 0931-9662	€ 8,--
34/1995	Maurer und Tabel (Hrsg.): Genetik und Waldbau unter besonderer Berücksichtigung der heimischen Eichenarten ISSN 0931-9662	€ 8,--
33/1995	Eisenbarth: Schnittholzeigenschaften bei Lebendlagerung von Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) aus Wintersturmwurf 1990 in Abhängigkeit von Lagerart und Lagerdauer ISSN 0931-9662	€ 6,--
32/1995	Autorenkollektiv: Untersuchungen an Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662	€ 6,--
31/1995	Jahresbericht 1994 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
30/1994	Schüler: Ergebnisse forstmeteorologischer Messungen für den Zeitraum 1988 bis 1992 ISSN 0931-9662	€ 6,--

29/1994	Fischer: Untersuchung der Qualitätseigenschaften, insbesondere der Festigkeit von Douglasien-Schnittholz (Pseudotsuga Menziesii (Mirb.)Franco), erzeugt aus nicht-wertgeästeten Stämmen ISSN 0931-9662	€ 6,--
28/1994	Schröck: Kronenzustand auf Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz - Entwicklung und Einflußfaktoren - ISSN 0931-9662	€ 6,--
27/1994	Oesten und Roeder: Zur Wertschätzung der Infrastrukturleistungen des Pfälzerwaldes ISSN 0931-9662	€ 6,--
26/1994	Jahresbericht 1993 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
25/1994	Wierling: Zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten und den Konsequenzen für die Forstwirtschaft am Beispiel des Pfälzerwaldes ISSN 0931-9662	€ 6,--
24/1993	Block: Verteilung und Verlagerung von Radiocäsium in zwei Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz insbesondere nach Kalk- und Kaliumdüngungen ISSN 0931-9662	€ 6,--
23/1993	Heidingsfeld: Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung flächenhafter Waldschäden ISSN 0931-9662	€ 10,--
22/1993	Jahresbericht 1992 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
21/1992	Autorenkollektiv: Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen - Zwischenergebnisse aus den Versuchsjahren 1988 - 1991 - ISSN 0931-9662	€ 6,-- vergriffen
20/1992	Jahresbericht 1991 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
19/1991	Autorenkollektiv: Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Sturm- und Immissionsschäden im Vorderen Hunsrück - „SIMS" - ISSN 0931-9662	€ 6,--
18/1991	Schüler, Butz-Braun und Schöne: Versuche zum Bodenschutz und zur Düngung von Waldbeständen ISSN 0931-9662	€ 6,--

17/1991	Block, Bopp, Gatti, Heidingsfeld und Zoth: Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662	€ 6,--
16/1991	Block, Bockholt, Borchert, Fingerhut, Heidingsfeld und Schröck: Immissions-, Wirkungs- und Zustandsuntersuchungen in Waldgebieten von Rheinland-Pfalz - Sondermeßprogramm Wald, Ergebnisse 1983-1989 ISSN 0931-9662	€ 6,--
15/1991	Jahresbericht 1990 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
14/1990	Block: Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen in rheinland-pfälzischen Waldgebieten 1984 - 1989 ISSN 0931-9662	€ 6,-- vergriffen
13/1990	Schüler: Der kombinierte Durchforstungs- und Düngungsversuch Kastellaun - angelegt 1959 - heute noch aktuell ? ISSN 0931-9662	€ 6,--
12/1990	Jahresbericht 1989 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067	
11/1989	Block, Deinet, Heupel, Roeder und Wunn: Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematische Untersuchungen zur Wipfelköpfung der Fichte ISSN 0931-9662	€ 6,--
10/1989	Heidingsfeld: Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv-Waldschadenserhebung in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662	€ 13,--
9/1989	Jahresbericht 1988 ISSN 0936-6067	
8/1988	Gerecke: Zum Wachstumsgang von Buchen in der Nordpfalz ISSN 0931-9662	€ 13,--
7/1988	Beutel und Block: Terrestrische Parkgehölzschadenserhebung (TPGE 1987) ISSN 0931-9662	€ 6,--
6/1988	Jahresbericht 1987 ISSN 0931-9662	
5/1988	Die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz im Dienste von Wald und Forstwirtschaft - Reden anläßlich der Übergabe des Schlosses Trippstadt als Dienstsitz am 10.04.1987 - ISSN 0931-9662	€ 6,--

4/1987	Beutel und Block: Terrestrische Feldgehölzschadenserhebung (TFGE 1986) ISSN 0931-9662	€ 6,-- vergriffen
3/1987	Block, Fraude und Heidingsfeld:Sondermeßprogramm Wald (SMW) ISSN 0931-9662	€ 6,--
2/1987	Block und Stelzer: Radioökologische Untersuchungen in Waldbeständen ISSN 0931-9662	€ 6,--
1/1987	Jahresbericht 1984-1986 ISSN 0931-9662	vergriffen



RheinlandPfalz

MINISTERIUM FÜR UMWELT,
ENERGIE, ERNÄHRUNG
UND FORSTEN

Kaiser-Friedrich-Strasse 1
55116 Mainz

www.mueef.rlp.de
www.wald-rlp.de