

**60 Jahre Waldbodenkalkung im Habsburg-
Lothring'schen Gut Persenbeug**
Eine ökonomische und ökologische Auswertung

durchgeführt von:
Höhere Lehranstalt für Umwelt und Wirtschaft
des Zisterzienserstiftes Zwettl, 3683 Yspertal

Februar 2012

Autoren

Mag. Mathias Eichinger (HLUW)

Prof. DI Dr. Otto Eckmüller (BOKU)

Kontakt:

Höhere Lehranstalt für Umwelt und Wirtschaft
des Zisterzienserstiftes Zwettl

Schulstraße 13

3683 Yspertal

Tel: 07415/7249-20

Fax: 07415/7249-19

Mail: meichinger@hlaysper.ac.at

www.hlaysper.ac.at

Kurzzusammenfassung

An Hand von **60 Jahren Waldbodenkalkungen** im Revier Gutenbrunn des Habsburg-Lothring'schen Gutes Persenbeug (Niederösterreich, Bezirk Zwettl) konnte nachgewiesen werden, dass sich Waldbodenkalkungen auf sauren degradierten Standorten sowohl **ökonomisch** durch mehr Holzertrag, als auch **ökologisch** durch verbesserte Bestandesvitalität und höherer Biomasseproduktion (CO₂ Bindung) **rechnen**.

Die ertragskundliche Untersuchung zeigte einen **kurzfristigen Mehrzuwachs** von **24%** auf gekalkten Flächen und einen **langfristigen** (länger als 20 Jahre) **Mehrzuwachs** von **13%**. Diese Mehrzuwächse führen zu einer **Amortisation** der **Kalkungsmaßnahmen** im Zeitraum von **6** bis **10** Jahren.

Die bodenkundlichen Untersuchungen zeigten, dass die Kalkungsmaßnahmen den **Säurezustand** der **Böden** signifikant **verbessern** (pH Wert, Basensättigung, molare Ca/Al Verhältnisse). Zum kontinuierlichen Säureausgleich ist eine **Kalkung alle 15 bis 20 Jahre** empfehlenswert.

Durch den gesteigerten Biomassezuwachs wurden auf den gekalkten Flächen (~260ha) **jährlich** zusätzlich **163 bis 560 Tonnen CO₂** gebunden. Umgelegt auf die aktuellen (2012) Preise der CO₂ Zertifikate von EURO 15,00 sind dies **EURO 2.440 bis 8.400 pro Jahr!**

Danksagung

Mein Dank gebührt all jenen Personen und Institutionen, die mich persönlich und die HLUW Yspertal sowohl fachlich als auch finanziell unterstützt haben:

- dem Auftraggeber und Initiator dieser Studie, dem Habsburg-Lothringen'schen Gut Persenbeug, Schloßstraße 1, A 3680 Persenbeug, Dipl.-HLFL-Ing. Christian Häusler, Ing. Gerhard Juster und Fadj. Michael Mollatz.
- Herrn Dipl. Ing. Andreas Zuser, Forstsekretär der Bezirksbauernkammer Melk.

Die bodenanalytischen Daten wurden von BoWaSan, Herrn Dipl. Ing. Hans Unterfrauner, ausgewertet und aufbereitet.

Finanziell unterstützt wurde die Studie von:

- Fa. Bodenkalk e.Gen. (8041 Graz)
- Ebenseer Carbonat GmbH (4802 Ebensee)
- Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (1090 Wien)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Problemstellung	6
1.2	Ziele der Arbeit.....	7
2	Beschreibung des Untersuchungsgebietes	8
2.1	Geologische und klimatische Beschreibung	8
2.2	Bestandesbeschreibung	9
2.3	Bodenkundliche Beschreibung der Standorte	10
3	Bodenversauerung.....	11
3.1	Allgemeines.....	11
3.2	Wege der Versauerung	11
3.3	Wirkung der Versauerung	12
3.4	Gegenmaßnahmen: Kalkung	14
4	Material und Methoden	16
4.1	Bodenkundliche Analysen	16
4.1.1	Werbung und Dokumentation der Bodenproben und Probepunkte für die Winkelzählprobe	16
4.2	Ertragskundliche Analysen	17
4.3	Kosten-Nutzen-Rechnung	18
4.4	Berechnung der CO ₂ -Bindung in der oberirdischer Biomasse.....	18
5	Ergebnisse	20
5.1	Ergebnisse der bodenkundlichen Analysen	20
5.1.1	pH Werte	20
5.1.2	Basensättigung.....	22
5.1.3	Ausnutzung der potentiellen Austauschkapazität	23
5.1.4	Ca Sättigung des Sorptionskomplexes	24
5.1.5	Al Sättigung des Sorptionskomplexes	25
5.1.6	Molare Ca:Al Verhältnisse der Bodenlösung.....	25
5.2	Ergebnisse der ertragskundlichen Analyse	27
5.2.1	Vitalitätsweiser.....	27
5.2.2	Ertragskunde	28
5.3	Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Rechnung	30
5.4	Ergebnisse der kalkungsbedingten zusätzlichen CO ₂ - Bindung	31
6	Resümee und Ausblick:.....	33
7	Anhang.....	34
7.1	Standorte A1 und N1	34
7.2	Standorte A3 und N3	36

7.3	Standorte A4 und N4	38
7.4	Standorte A5 und N5	40
7.5	Standorte A7 und N6	42
7.6	Standorte A9 und N6	44
7.7	Standorte A11 und N11.....	46
7.8	Standorte A12 und N12.....	48
7.9	Ergebnisse der Winkelzählprobe	50
7.10	Erhebungsschlüssel.....	51
8	<i>Literatur</i>.....	52

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die **Versauerung** von Waldökosystemen führt zu einer **Reduktion** der **Ertragsleistung** (Produktionsfunktion) und zunehmender Verringerung der **ökologischen** Funktionen (zB. Wasserspeicherung, Bodenfilter- und Pufferwirkung, biologische Aktivität und Bestandesvitalität).

Gründe für die Versauerung von Waldökosystemen sind:

1) Basenarmes Ausgangsgestein der Böden

Das untersuchte Gebiet liegt in der Böhmischer Masse, die Böden haben sich aus Granit und Gneisverwitterungsprodukten gebildet.

2) Intensive Waldstreunutzung in der Vergangenheit

Streunutzung, Waldweide und Schneitelung förderten die Nährstoffverarmung und Versauerung der Standorte.

3) Immissionen

Immissionen wie „Saurer Regen“, führten zu einer Senkung des Boden-pH-Wertes und Auswaschung von Nährstoffen.

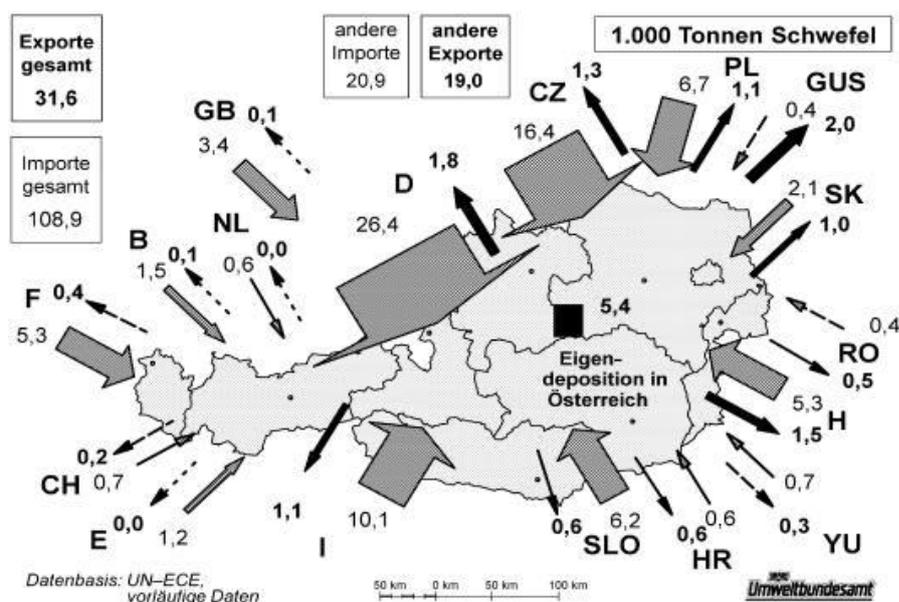


Abbildung 1: Deposition: Importe und Exporte von Schwefelverbindungen von und aus Österreich im Jahr 1995 (UMWELTBUNDESAMT 1998, zit. nach SZEDNYI 2000)

1.2 Ziele der Arbeit

An Hand von 60 Jahren gut dokumentierten Waldbodenkalkungen im Habsburg-Lothring'schen Gut Persenbeug (Niederösterreich, Bezirk Zwettl) soll nachgewiesen werden, dass sich **Waldbodenkalkungen** auf sauren degradierten Standorten sowohl **ökonomisch** durch mehr Holzertrag, als auch **ökologisch** durch verbesserte Vitalität und höhere Biomasseproduktion (CO₂-Bindung) **rechnen**.

Dazu wurden an **10 gekalkten** und an **10 Nullflächen** umfangreiche bodenkundliche, ertragskundliche und waldbauliche Erhebungen (inklusive Vitalitätsbestimmungen) durchgeführt.

2 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

2.1 Geologische und klimatische Beschreibung

Das **Untersuchungsgebiet** liegt auf dem **Granitplateau** des Weinsberger Waldes, das einen Teil der **Böhmischen Masse** darstellt, an der niederösterreichisch-oberösterreichischen Grenze, im Gemeindegebiet von Gutenbrunn (**Bezirk Zwettl**). Es reicht mit seinem südlichen Teil ins Waldviertel, mit seinem nördlichen ins Mühlviertel und gipfelt im Weinsberg (1041 m). Im Weinsberger Wald entspringen die Flüsse Kamp, Krens, Ysper und Naarn.

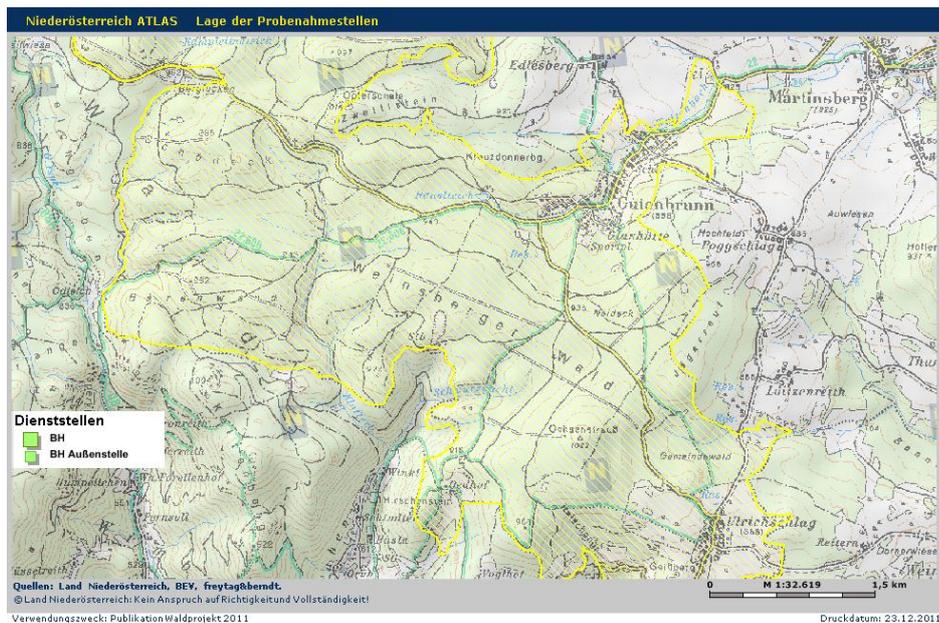


Abbildung 2: Projektgebiet gelb schraffiert

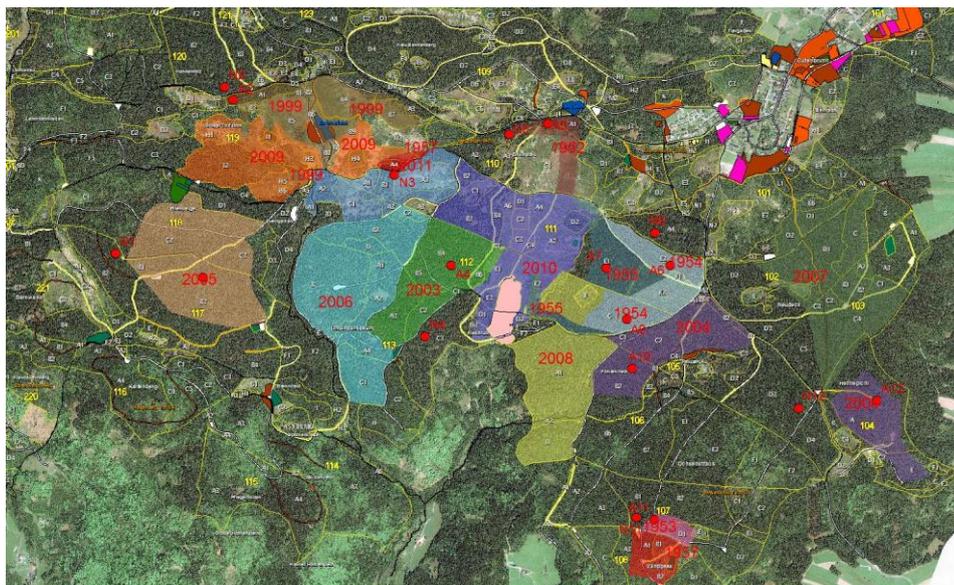


Abbildung 3: Überblick über die Probeflächen. Farbige markiert sind die gekalkten Schläge, mit dem jeweiligen Jahr der Kalkung

Klimatische Verhältnisse

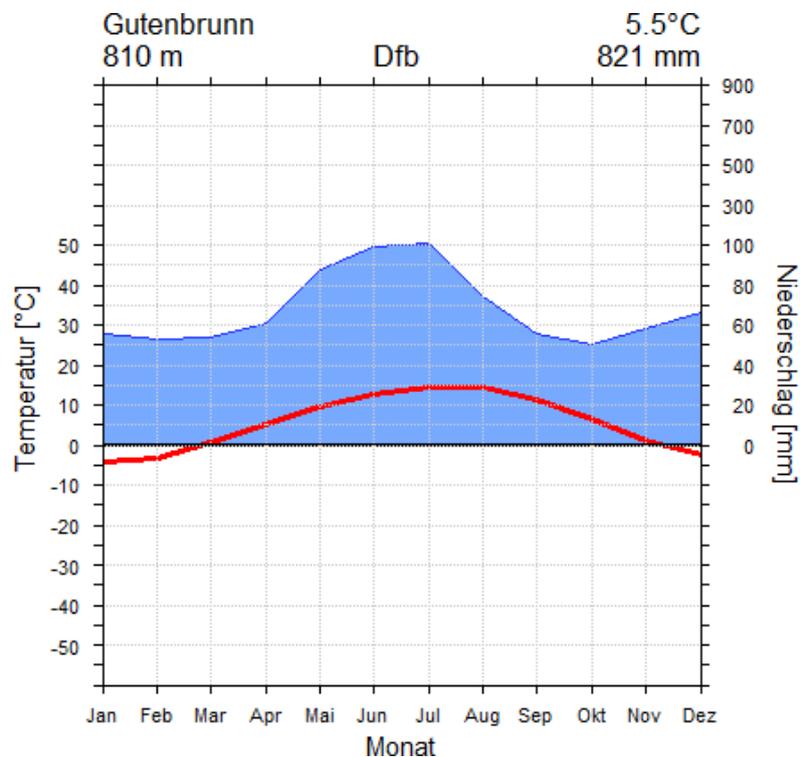


Abbildung 4: Das Klima in Gutenbrunn (MÜHR, B.)

Gutenbrunn gehört dem **Dfb-Klimatyp** an, dies ist ein Klima, in dem die Temperaturen des kältesten Monats unter -3°C fallen, und im wärmsten Monat über $+10^{\circ}\text{C}$ betragen. Das Klima ist immer feucht. Es gibt warme Sommer mit Durchschnittstemperaturen von $< 22^{\circ}\text{C}$. Die Temperatur beträgt im Jahresdurchschnitt **$5,5^{\circ}\text{C}$** , die Jahressummen der Niederschläge betragen im langjährigen Durchschnitt **821 mm** . Ein solches Klima wird als atlantisches Hochflächenklima bezeichnet.

2.2 Bestandesbeschreibung

Die forstlichen Bestände liegen im **Wuchsgebiet 9.2** auf einer Seehöhe zwischen 900 und 1000m, d.h. in der **mittelmontanen** Höhenstufe. An Baumarten dominiert die **Fichte** mit einer **Bonität** zwischen **7** und **11** und einem **Baumalter** zwischen **35** und **125** Jahren. Einzelne sowie gruppen- und horstweise kommen Rotbuche und Lärche vor. Die Bodenvegetation gehört größtenteils den **Heidelbeer-Drahtschmiele**-Typen an. Die untersuchten Bestände weisen einen Bestockungsgrad zwischen 0,55 und 0,83 auf.

2.3 Bodenkundliche Beschreibung der Standorte

Die **Böden** im Projektgebiet haben sich aus den verwitterten **Graniten** und **Gneisen** – zum Teil mit 80% Quarzanteil - entwickelt. Die Erosionsdynamik ist aufgrund der Reliefeigenschaften des Plateaus (eben bis schwach geneigt) gering.

Als Bodentypen haben sich **Ranker, verbraunter Ranker, Braunerden** und **podsolige Braunerden** mit allen Übergangsformen ausgeprägt. Klassische Podsole wurden keine vorgefunden.

Die Böden weisen durchwegs einen **Auflagehorizont** (O Horizont) auf. In diesem findet man unzersetzte Nadeln, Äste und Zapfen (**Ol Horizont** = Streu). Dem folgt ein **Of Horizont** (= Grobmoder), die Pflanzenreste ähneln in ihren Formen noch jenen des Ol Horizontes. Die höheren Feinsubstanzanteile und die meist vorhandene, mehr oder weniger starke Verpilzung verursachen die verschiedenen Lagerungsdichten des Of Materials. Wurzelfilz kann auftreten, mineralische Beimengungen sind selten.

Darunter kann ein **Oh Horizont** (= Feinmoder) folgen. Die organische Substanz überwiegt stark und hat einen Feinanteil von > 70 vol%. Das Oh Material ist schwärzlich gefärbt, es können allerdings auch dunkelrötlichbraune bis rötlichschwarze Farbtöne auftreten. Mineralische Substanz fehlt oder ist bis zu etwa der Hälfte des Substanzvolumens vorhanden.

Der **A Horizont** ist der durch Humus gefärbte oberste Mineralbodenhorizont. Liegt keine Podsoligkeit vor und ist der Humus biogen in den Mineralboden eingemischt wird der Horizont als Ah Horizont bezeichnet. Bei den Horizonten **Ahe** und **Ae** wurden bereits unterschiedliche Mengen an Sesquioxiden (Eisen und Aluminiumoxide und Hydroxide) durch Säuren gelöst und in tiefere Schichten verlagert. Ebenso können Huminstoffe ausgewaschen werden. Dies wird als Prozess der Podsolierung bezeichnet. Dadurch wird der schwarz gefärbte Ah Horizont gräulich „bleich“. Ist dieses Phänomen deutlich und flächig ausgeprägt, wird ein eigener Horizont, der E Horizont ausgewiesen.

Beim Bodentyp „**Ranker**“ folgt dem Ah Horizont unmittelbar das Muttergestein (Ausgangsmaterial der Bodenbildung), welches als **C Horizont** bezeichnet wird. Beginnt sich der C Horizont durch Eisenoxide zu verfärben, liegt ein verbraunter Ranker, die Übergangsform zwischen Ranker und Braunerde, vor.

Beim Bodentyp „**Braunerde**“ folgt dem Ah Horizont ein durch Eisenoxide gefärbter Verwitterungshorizont, welcher als **B Horizont** bezeichnet wird. Dem schließt sich nach unten der C Horizont an.

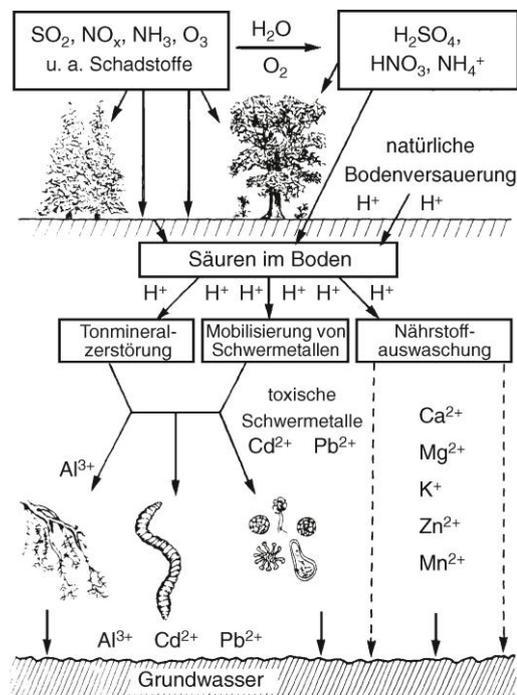
Ist der B Horizont deutlich durch Einwaschung von Humusstoffen aus Podsolierungsprozessen aus den Ahe, Ae und E Horizonten geprägt, wird dieser als **Bh** bezeichnet, sind die eingewaschenen Sesquioxide bestimmend, wird dieser als **Bs** bezeichnet. Der Bodentyp wird als „**podsolige Braunerde**“ bezeichnet.

3 Bodenversauerung

3.1 Allgemeines

Die Böden im Projektgebiet haben den **typischen Versauerungs-** bzw. **sauren Degradationsprozess** durchlaufen, wie er seit der Nacheiszeit speziell auf Waldstandorten vonstattenging bzw. geht. Dabei wurde die **Säurepufferkapazität überschritten** und die Böden gelangten aus einem ursprünglich annähernd neutralen Reaktionsbereich in ein saures Milieu, dem sich die Biosysteme angepasst haben.

Die **Leistungsfähigkeit** des Bodens (Speicherfunktion, Pufferfunktion, Lebensraumfunktion, Transformationsfunktion und auch die Filterfunktion (Grundwasserqualität) hat, je nach Fortschritt der Versauerung, **abgenommen** (Scheffer & Schachtschabel, 2010).



Aus: Scheffer/Schachtschabel: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl. © Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010

Abbildung 5: Direkte und indirekte Wirkung sauer wirkender Schadstoffe auf Wälder und Böden

3.2 Wege der Versauerung

Schwefel und Stickstoff sind für Pflanzen, Tier und Menschen unentbehrliche Nährelemente. Beide Elemente bewirken bei höheren Konzentrationen in Form von SO_2 und NO_x sowie als Säuren Schäden an Pflanzen und können vor allem bei Waldstandorten eine starke Versauerung und Degradierung der Waldböden bewirken.

Der **Eintrag** von **Schwefel** und **Stickstoff**, sowie von anderen Stoffen aus der **Luft** findet in Form von **nasser** (Regen, Schnee), **feuchter** (Nebel, Smog) und **trockener** (Gas, Staub) Deposition statt. Neben dem Eintrag mit den Niederschlägen können vor allem SO₂ und andere S Verbindungen sowie in geringem Maße NO_x und andere N Verbindungen direkt von der Vegetation und den Boden adsorbiert und aus der Luft herausgefiltert werden. Vor allem bei SO₂ ist die trockene Deposition hoch und kann mehr als 50% der gesamten S Deposition betragen. Die **Interzeption** der Vegetation ist vor allem für den Schwefeleintrag von großer Bedeutung, weshalb in Waldgebieten deutlich höhere Schwefeleinträge als im Freiland gemessen werden.

Die Nutzung der Boden- und **Schneitelstreu** von Waldsystemen wurde in Österreich auf 10 bis 50% der zugänglichen Flächen von etwa 1850 bis in die 1960er Jahre betrieben. Die Entnahme lag bei ~ 8t Trockenmasse/ha und einem Zyklus von 4 Jahren (UBA, 2000). Die in der Streu enthaltenen Stoffe (zB Ca, Mg, K) wurden dem Systemkreislauf entzogen, eine Verarmung an Basen und eine Beschleunigung der Versauerung waren die Folge.

3.3 Wirkung der Versauerung

Der **Säureschub** hat in Mitteleuropa seit Beginn der Industrialisierung bis 1988 zu einer Absenkung der **pH Werte** im Niederschlagswasser von im Mittel 5,7 auf **4,1** geführt (Scheffer & Schachtschabel, 2010). Infolge des verstärkten Einbaues von Filteranlagen sind die pH Werte im Mittel seitdem wieder um ca. 0,5 pH Einheiten gestiegen. Insbesondere Nebel und Tau können pH Werte < 3 aufweisen und zu einer **direkten Säureschädigung** der Pflanzen führen. Die Photosyntheseleistung wird vermindert, aus Nadeln und Blättern werden Nährstoffe ausgewaschen. Die Veränderung der Physiologie der Stoffwechselfvorgänge führt zu gestörten Stofftransporten in die Wurzeln, das Ausbilden von Mykorrhiza und des Wurzelsystems wird behindert.

Indirekte Wirkungen der SO₂ und NO_x Emissionen auf das Wachstum der Waldbäume werden durch Säureeinträge in die Böden ausgelöst. Neben den in gemäßigten bis kühlhumiden Klimabereichen bereits seit langer Zeit ablaufenden Prozesse der Bodenversauerung sowie einer die Bodendegradierung (Nährstoffverarmung, Versauerung durch Rohhumusbildung) fördernde Form der Bodennutzung (Holz-, Streu-Waldweidennutzung) haben vor allem in den letzten 40 Jahren stattfindenden erhöhten Säureeinträge aus der Luft zu einer starken Versauerung der obersten Bodenhorizonte geführt. In vielen Gebieten sind in dieser Zeit die pH Wertabnahmen um mehr als 1 pH Einheit (zB pH CaCl₂ von 4,5 auf 3,3) in den Oberböden von Waldstandorten festgestellt worden. Heute werden in den O- und A- Horizonten von Waldböden weit verbreitet **pH Werte von 2,8 bis 3,8** gemessen. Besonders in wenig puffernden Böden aus basenarmen sandigen Ausgangsgesteinen ist die Versauerung stark fortgeschritten. Dabei stellen pH Werte < 3.0 bei Mineralböden den Grenzbereich für das Pflanzenwachstum dar.

Die in den Boden gelangenden Säuren werden zwar weitgehend abgepuffert, doch führt dies zu gravierenden nicht reversiblen Veränderungen der Bodeneigenschaften.

Bei **pH Werten <5** findet eine zunehmende **Auflösung** von Al Oxiden und eine Zerstörung von **Tonmineralien** und anderen Silikaten statt. Dadurch wird eine **irreversible** Degradierung bewirkt. **Al³⁺** - Ionen werden aus dem Gitter der Silikate freigesetzt. In humosen Böden wird

der größte Teil durch Komplexierung festgelegt. Daneben können Al^{3+} - Ionen in die Zwischenschichten von aufgeweiteten Tonmineralen eingebaut werden. Dadurch findet eine Umwandlung der Tonminerale zu Al-Chloriten mit deutlich herabgesetzter Kationenaustauschkapazität statt. Freigesetztes Al^{3+} - kann mit Wasser zu Hydroxy-Al Ionen reagieren (AlOH^{2+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$) und somit wiederum **Säure bilden**. Schließlich können Al^{3+} und die Hydroxide an den Oberflächen von Tonmineralen adsorbiert werden. Dort verdrängen sie aufgrund der hohen Einstauschstärke Nährstoffkationen, welche ausgewaschen werden. Insgesamt steigen bei zunehmender Versauerung der Al Anteil an den Austauschern und die Al Konzentration in der Bodenlösung.

Bei extrem sauren Böden ($\text{pH CaCl}_2 < 3$) beginnt die Auflösung von schwach kristallinen Fe Oxiden, die zu einer Freisetzung von Fe^{3+} - Ionen führt.

Bei **Al** Konzentrationen in der **Bodenlösung** von 10 bis 20 mg/l können **toxische Al Wirkungen** auf die **Wurzeln** (insbesondere Feinwurzeln) der Waldbäume und deren Mykorrhiza-System ausgelöst werden. Das Ausmaß der Al Toxizität hängt auch vom Gehalt der Böden an verfügbaren Pflanzennährstoffen, insbesondere an Ca und Mg ab. Deshalb ist das Verhältnis von **Ca/Al** und **Mg/Al** in der Bodenlösung ein gutes Maß für eine mögliche Al Toxizität. So ist bei einem molaren Ca/Al in der Bodenlösung von **<1** eine **Schädigung** von **Fichtennadeln** möglich, bei 0,1 **unvermeidlich**.

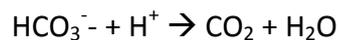
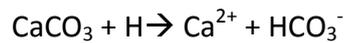
Die durch Nährstoffmangel und Al Toxizität ausgelösten Baumschäden betreffen neben den oberirdischen Teilen vor allem die Feinwurzeln der Bäume. Deren Absterben bewirkt dass die Nährstoff- und Wasseraufnahme stark verringert wird. Die Folge sind **verminderte Frost-Dürre- und Krankheitsresistenz**.

Auch **Bodenflora** und **Bodenfauna** werden durch Al Toxizität **geschädigt**. Lumbriciden sind bei pH Werten < 4 kaum mehr in Waldböden zu finden, Arten und Individuenanzahl anderer Bodentiere werden stark verringert. Von den Mikroorganismen sind Bakterien, welche die höchsten Abbauleistungen bringen kaum noch aktiv, in Verbindung mit nährstoffarmer Nadelstreu bilden sich organische Auflagehorizonte und ungünstige Humusformen. Mit zunehmender Al und Schwermetall Mobilisierung geht eine steigende Verlagerung und **Auswaschung** dieser Elemente einher, sodass auch Grund- und Oberflächengewässer im Einzugsgebiet von Waldböden steigenden Konzentrationen ausgesetzt sind.

3.4 Gegenmaßnahmen: Kalkung

Sinkt der **pH Wert** von **Böden** unter sein Optimum (meist < 5, siehe oben), so kann er durch Zufuhr **neutralisationsfähiger** basischer **Stoffe** angehoben werden. Solche Stoffe sind Kalkstein, Mergel und Dolomit-Mehle.

Die Neutralisationsgeschwindigkeit der Kalke steigt mit sinkendem pH Wert des Bodens und mit abnehmender Korngröße. Der erste Neutralisationsschritt des CaCO_3 läuft in unmittelbarer Nähe des Kalkkorns ab, wirkt sich auf den Unterboden zunächst nicht aus.



Gelöste Ca^{2+} + und HCO_3^- -Ionen können mit dem Sickerwasser abwärtswandern und den **pH** Wert des Unterbodens **erhöhen**. Ca^{2+} fördert den Austausch und die Auswaschung von sauren Kationen (H^+ , Al^{3+}) und bewirkt eine Erhöhung der Basensättigung. HCO_3^- wirkt als Base und reagiert unter stark sauren Bedingungen ($\text{pH} < 5$) mit H^+ zu H_2CO_3 (bzw. CO_2 und H_2O).

Bei Waldböden ist die **Tiefenwirkung** einer Kalkung oft **verzögert** und nur abgeschwächt erkennbar. Die Ausbringung der Produkte erfolgt mit Hubschrauber oder mittels Verblasegeräte. Die Produkte bleiben zunächst auf der Rohhumusaufgabe liegen. Der Tiefentransport durch Niederschläge wird oftmals durch die stark hydrophobe Wirkung der Nadelstreu erschwert. Die **Streu** kann wie ein **Schilddach** den Waldboden „abdecken“ und das Niederschlagswasser fließt oberflächlich ab. Dadurch werden das Risiko von Wassererosion und Hochwasserereignissen gesteigert.

Reicht die Menge der Kalkung nicht aus den Säureanteil des Auflagehumus soweit zu neutralisieren, dass die mikrobiologischen Prozesse die hydrophoben Wachsschichten abbauen können, bleibt der Unterboden von der Kalkung weitgehend unberührt. Ist allerdings die Kalkmenge zu hoch, wird Auflagehumus schnell mineralisiert („verbrannt“), die freigesetzten Nährstoffe können nicht im System gebunden werden (die dazu notwendigen Änderungen der Systemeigenschaften haben sich noch nicht vollzogen) und werden ausgewaschen.

Zu einer **nachhaltigen** Sanierung sollte das Gesamtsystem „Boden“ mit einer **speziell erstellten Produktmischung** melioriert werden.

Zu Therapie der Wald- und Bodenschäden sind auch Maßnahmen zur Minderung der Al Toxizität erforderlich. Dazu wird in Deutschland die Zufuhr von ca. **3t/ha dolomitischen Kalk** mit einer Wiederholung in **3 bis 5 jährigem Abstand** empfohlen (Scheffer & Schachtschabel 2010).

Wie schnell ein Boden unter humiden Klimabedingungen versauert hängt neben dem Säure- (=Protonen) eintrag pro Zeiteinheit auch von seiner Fähigkeit ab, diese abzupuffern. Die Pufferfähigkeit ergibt sich aus seiner **Säureneutralisationskapazität** (SNK). Als Puffersysteme bezeichnet man chemische Reaktionen, bei denen freie Protonen in eine undissoziierte Form

überführt werden. Ein Protoneneintrag führt somit immer zu einer Reduktion der SNK, nicht aber des pH Wertes.

Für Mitteleuropa wurde abgeschätzt, dass die SNK in der Nacheiszeit um ca. 8000 kmol/ha (= ca. **400 t CaCO₃**!) abgenommen hat.

Im Jahr 2001 hat das BMLFUW die Broschüre „**Waldbodensanierung**“ herausgegeben, mit dem Ziel:“ **den Zustand degradierter Böden und geschädigter Bestände soweit wieder herzustellen, dass eine ökologische nachhaltige Nutzung ohne Düngung möglich wird**“.

Dieses Ziel soll erreicht werden durch waldbauliche Maßnahmen (...) und Düngung. Vor allem in Form **magnesiumbetonter Kalkung** soll den negativen biologischen und chemischen Folgen von Bodenversauerung und Nährstoffverarmung entgegengewirkt werden.

Der zugeführte Kalk

- verbessert den Säurezustand des Bodens (pH Wert steigt, Basensättigung steigt, potentielle Säure nimmt ab)
- erhöht den Anteil an Ca und Mg am Sorptionskomplex und in der Bodenlösung
- führt zu einer verminderten Wurzeltoxizität von Al durch ein weiteres molares Ca:Al Verhältnis
- verbessert die Milieubedingungen für die Mikrobiologie
- verbessert die Aggregatstabilität
- stoppt den Zerfall und den Verlust von Tonmineralen
- fördert den passiven Hochwasserschutz (Abbau der hydrophoben Wachsschichten der Nadeln erleichtert das Infiltrieren des Niederschlagswassers in den Boden)
- bringt höhere und stabilere Erträge (klimarelevant, CO₂ wird).

Seit den 50er Jahren werden im Gebiet des „Weinsberger Waldes“ Waldkalkungen durchgeführt. Bei vorliegendem Projekt wurden Flächen, die in den vergangenen **60 Jahren** gekalkt wurden, mit gleichartigen ungekalkten Flächen in Hinblick auf Bodenzustand, Bestandesvitalität und forstlicher Ertragskunde verglichen.

4 Material und Methoden

4.1 Bodenkundliche Analysen

Die bodenkundlichen Parameter wurden nach dem Methode der **fraktionierten Analyse** erhoben (ÖNORM S 2122-1, 2004). Von jeder Bodenprobe werden die Basisparameter pH-Wert im Wasser und Neutralsalz (KCl), Kalkgehalt, elektrische Leitfähigkeit, Humusgehalt, C/N-Verhältnis, Kationenaustauschkapazität, Basensättigung und Belegung des Sorptionskomplexes erhoben.

Zusätzlich werden Nähr- und potentiell toxische Stoffe in verschiedenen Verfügbarkeitsfraktionen (Pools) ermittelt.

- Wasserlösliche Elemente
- Austauschbare Elemente
- Nachlieferbare Elemente.

4.1.1 Werbung und Dokumentation der Bodenproben und Probepunkte für die Winkelzählprobe

Die Probenahme von Waldböden ist schwierig, da die Flächen sehr heterogen sein können (z.B. Unterwuchs, Wurzeln, Bewaldung, Fahrwege, Rückegassen, Bauten, Senken, Buckeln). Zur Vereinheitlichung der Entnahme von Bodenproben wurde für das vorliegende Projekt eine eigene Anleitung erstellt.

Es erfolgt die Auswahl einer möglichst homogenen Fläche, die sowohl den Bestand, als auch die Bodenverhältnisse repräsentiert. Die Auswahl erfolgt in Zusammenarbeit von einem **Waldbaufachmann** und einem **Bodenkundler**, jedoch nicht aufgrund eines starren Stichprobenrasters.

Im Mittelpunkt der Fläche wird 1 Hauptprofil (HP) angelegt, an dem das Bodenprofil dokumentiert wird. In einem Radius von 10 m werden 4 Nebenprofile (NP) angelegt.

Zur Probennahme wird aus allen 5 Profilen jeweils den Horizonten des Bodenprofils folgend (A- Horizont, B- Horizont) Bodenmaterial für eine Mischprobe entnommen.

Der Auflagehumus wird nicht mit beprobt.

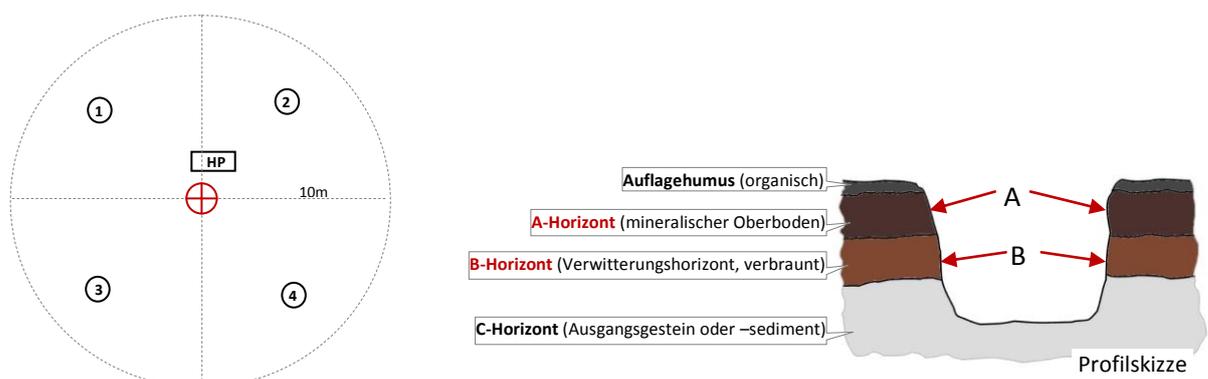


Abbildung 6: Schema zur Entnahme von Bodenproben

Zur Dokumentation wurde die Bezeichnung „**A**“ = „Applikationsfläche“, für jene Flächen verwendet, auf denen Kalk appliziert wurde. „**N**“ bedeutet „Nullfläche“, das sind jene Vergleichsflächen, auf denen keine Kalkung durchgeführt wurde.

Folgende Parameter wurden erhoben:

- Jahr der Kalkung und ausgebrachte Menge in t/ha.
- GPS-Koordinaten der Fläche
- Seehöhe in Metern
- Baumarten
- Bestandesalter
- Bodentyp
- Profilbeschreibung
- Foto des Standorts
- Foto des Bodenprofils.

Für die Festlegung der Standorte der je 4 **Winkelzählproben** pro Probefläche, wurde vom verflochten Mittelpunkt jeweils 12,5 Meter mittels einer Bussole in jede Himmelsrichtung (N, O, S & W) gemessen.

4.2 Ertragskundliche Analysen

Mittels eines Spiegelrelaskops, unter Anwendung der Zählbreite 4, wurden die Messungen zur Vorratsermittlung des Waldbestandes mit der **Winkelzählprobe** durchgeführt.

Folgende Parameter wurden erhoben:

- G/ha = Grundfläche je Hektar in m²
- N/ha = Anzahl der Bäume je Hektar
- H = mittlere Höhe in Meter
- Kr% = mittleres Kronenprozent
- dg = Durchmesser des Grundflächenmittelstamms
- SDI = Stand Density Index nach Reinecke

Zur Bewertung der Zuwächse im Zeitverlauf wurde eine **Bohrkernanalyse** durchgeführt.

Von jeder Probefläche wurden 12 Bohrkerne, jeweils von den 3 stärksten Bäumen der 4 Winkelzählproben, entnommen (Spezialbohrer SUUNTO). Zur Messung der Jahresringe wurden die Bohrkerne leicht eingewässert und abgehobelt, und im Mikroskop (25 fache Vergrößerung) computerunterstützt ausgewertet.

Der „**Gesundheitszustand**“ der Bestände wurde über mehrere **Vitalitätsweiser** beurteilt. Die Vitalität lässt sich schwer quantifizieren, jedoch kann sie auf Basis verschiedener Merkmale beschrieben werden.

Erhoben wurden:

- Leitungswiderstand mittels Konditiometer AS1 in Kilo-Ohm
- Vitalitätsansprache der Bäume
- Kronenzustand
- Kronenlängen.

Die Messergebnisse der ertragskundlichen Erhebung und der Vitalitätsbeschreibung wurden von Prof. ECKMÜLLNER bearbeitet und ausgewertet.

Die kurzfristigen **Zuwachsreaktionen** wurden durch die Division der durchschnittlichen Zuwächse nach der Kalkung (das Folgejahr der Kalkung bis heute) durch die durchschnittlichen Zuwächse vor der Kalkung (der mittlere Zuwachs der gleichen Anzahl an Jahren wie nach der Kalkung) ermittelt. Die Vorgangsweise war bei den Vergleichsflächen analog. Der durch die Kalkung bedingte Mehrzuwachs wurde durch Differenzbildung (Delta) bzw. durch die Division (Quotient) festgestellt.

Die langfristigen Zuwachsreaktionen wurden in vergleichbarer Weise ermittelt. Es wurden alle Jahre nach dem Jahr der Kalkung bis heute (2010) verwendet; als Vergleich wurden 10-20 Jahre vor der Kalkung herangezogen, wobei der Zeitraum sich an der Zuwachskulmination orientiert.

4.3 Kosten-Nutzen-Rechnung

Der ökonomische Erfolg der Kalkung wurde nach Vorgaben von Prof. ECKMÜLLNER berechnet und ergibt sich aus der Multiplikation des laufenden Zuwachses mit dem prozentuellen Mehrzuwachs und dem Deckungsbeitrag.

Der laufende Zuwachs wurde aus dem durchschnittlichen Gesamtzuwachs (DGZ = Bonität) abgeschätzt. Beide Werte wurden den Ertragstafeln (Marschall, J., 1975) entnommen.

4.4 Berechnung der CO₂-Bindung in der oberirdischer Biomasse

Die Berechnung folgt den Vorgaben von Prof. Eckmüller.

Tabelle 1: Parameter der kalkungsbedingten zusätzlichen CO₂-Bindung

Bestandesalter Jahre	75
Bonität	11
Mehrzuwachs 35 Jahre in Efm	43,2
Mehrzuwachs Biomasse 35 Jahre in Tonnen (*)	24,4
dies entspricht ~CO ₂ in Tonnen	44,7

(*) Holz, Rinde und Äste (keine Nadeln) absolut trocken

Efm....Erntefestmeter

Vfm....Vorratsfestmeter

Der Faktor zur Umrechnung von Efm zu Vfm beträgt 0,78.

Der Faktor zur Umrechnung von Volumen (Vfm) zu Gewicht (t) beträgt 0,420.

Der Faktor zur Umrechnung von Biomasse (t) zu gebundenem CO₂ beträgt 1,833.

Bonität: Sie stellt ein Maß für die Standortgüte dar. In Österreich werden absolute Bonitäten im Sinne des durchschnittlichen Gesamtwachses verwendet. Der Gesamtwuchs beziehungsweise die Gesamtwuchsleistung ist der aktuelle Vorrat (Holzmenge) zuzüglich des Holzvolumens der durch Durchforstungen oder Mortalität ausgeschiedenen Bäume. Für die Hauptbaumarten wird das Referenzalter von 100 Jahren verwendet. Ermittelt wird die Bonität vom jeweiligen Waldstandort und Baumart mit Hilfe von Ertragstabellen unter Verwendung des Wertepaares Oberhöhe (mittlere Höhe der 100 stärksten Bäume je Hektar) und Alter.

Eine Bonität von 11 bedeutet einen Zuwachs von 11 Vorratsfestmetern pro Hektar und Jahr.

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der bodenkundlichen Analysen

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die **A** Horizonte als „**Oberboden**“, die **B** Horizonte als „**Unterboden**“ bezeichnet.

Die Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen können nicht linear von einem Standort auf den anderen übertragen werden, da sowohl Applikationsmengen, als auch die Jahre der Applikation verschieden sind. Im ersten Teil erfolgt eine Übersicht der Auswirkung der Kalkung auf das Säuresystem des Bodens, im **Anhang** werden die einzelnen **Standortpaare** miteinander verglichen.

5.1.1 pH Werte

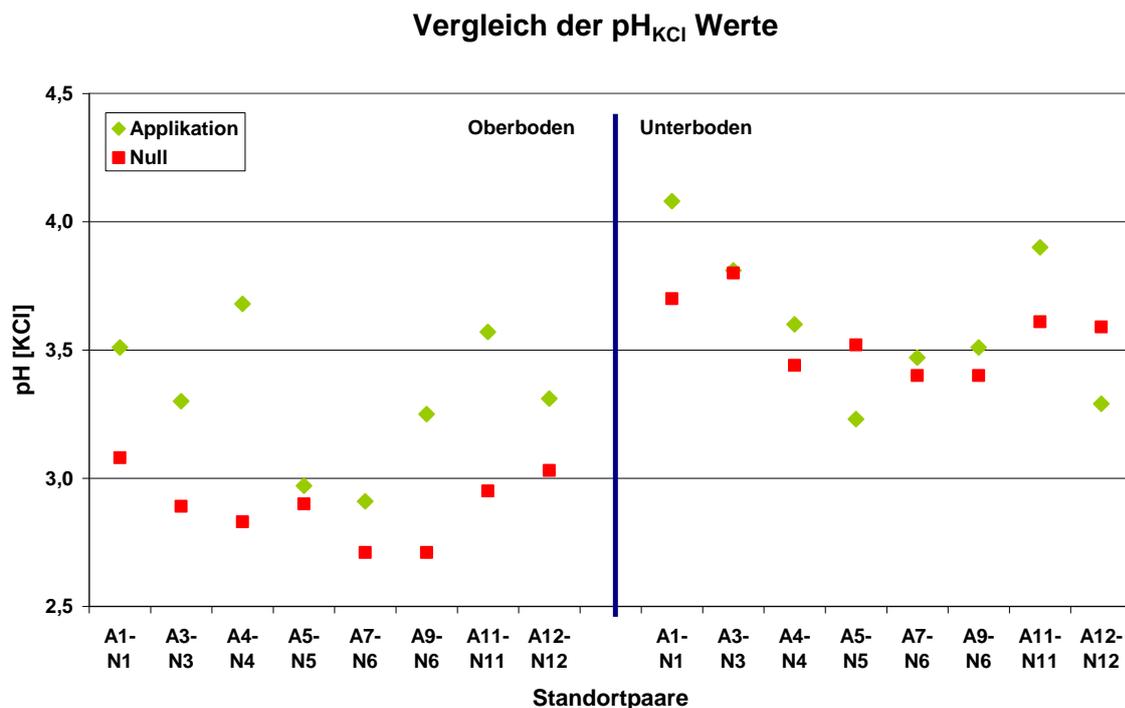


Abbildung 7: pH_{KCl} Werte der Ober- und Unterböden der Standortpaare

Der pH Wert im Neutralsalz (KCl) dient zum Einteilen eines Bodens in sein Puffersystem und erfasst auch die leicht austauschbare Säure. Wie weiter oben dargestellt, beginnen sich ab **pH Werten < 5 irreversible** Vorgänge einzustellen, da sich Silikate aufzulösen beginnen und deren Bestandteile ausgewaschen werden können.

Die Oberböden sind naturgemäß stärker versauert als die Unterböden, da die Versauerungs- und Verwitterungsfront von oben nach unten fortschreitet.

Für die Oberböden zeigt sich eine **signifikante** Auswirkung der Kalkungsmaßnahmen, die pH_{KCl} Werte sind auf den Applikationsflächen durchwegs **deutlich höher**, als bei den

Nullflächen. Im Schnitt liegen die pH Werte auf den Applikationsflächen **um 0,5 pH** Einheiten höher (pH = logarithmische Einheit). Eine Ausnahme bildet das Standortpaar A5-N5 bei dem die Kalkung in den Jahren 1952 durchgeführt wurde und die Differenz gering ist.

Die Böden der applizierten Standorte befinden sich weitgehend im Al Pufferbereich, die Böden der Nullflächen teilweise bereits im Fe Pufferbereich.

Die Unterschiede im **Unterboden** sind **gering**, können aber gerade das „Zünglein an der Waage“ für bestimmte chemische Prozesse darstellen.

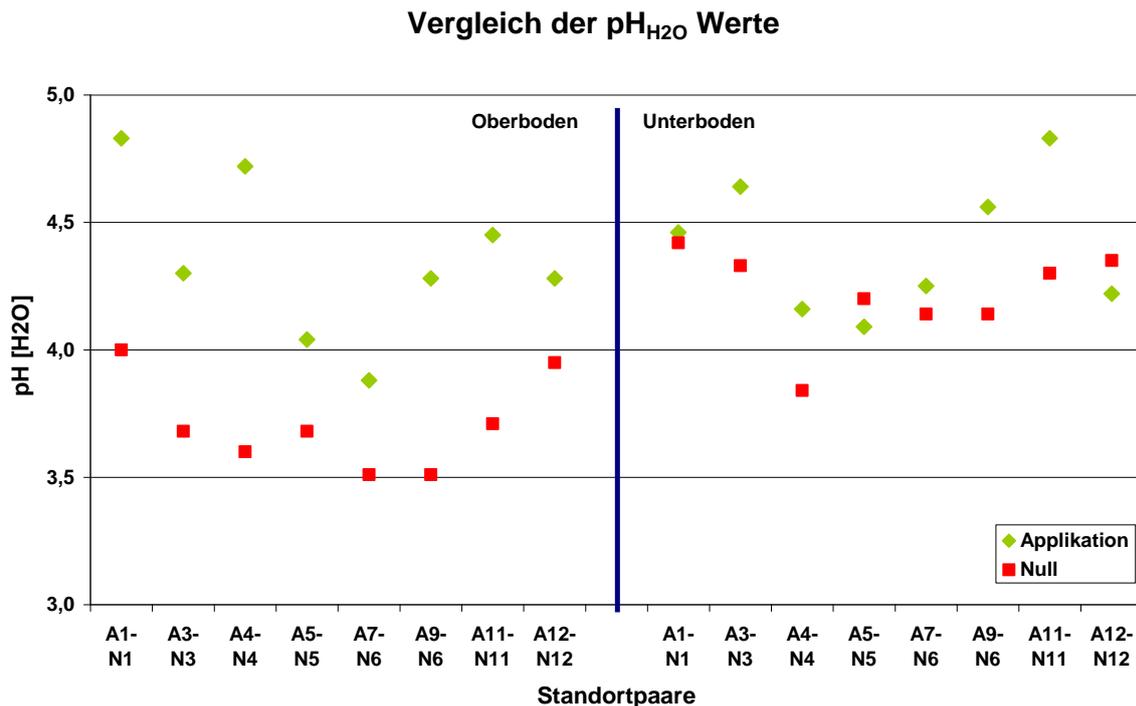


Abbildung 8: pH_{Wasser} Werte der Ober- und Unterböden der Standortpaare

Der pH Wert im Bodenwassersättigungsextrakt charakterisiert das Säuremilieu für die **Mikroorganismen**, welche im Bodenwasser leben und bedingt die Spezies der gelösten Ionen. Das Optimum liegt [pH_{Wasser}] zwischen 6,5 und 7,5. Bei stark sauren Verhältnissen nimmt die Anzahl der Arten ab und es erfolgt eine Verschiebung in Richtung der acidophilen (säureliebenden) Arten. Das Spektrum verschiebt sich von den Bakterien hin zu den Pilzen. Als Folge ist mit einem eingeschränkten Um- und Abbauverhalten der organischen Substanz zu rechnen. Bestandesabfall (Streu) akkumuliert sich und bildet die für versauerte Waldböden typischen **Rohhumusauflagen** (O Horizonte).

Sehr deutlich sind die **Unterschiede** in den Oberböden ausgeprägt, die Differenzen der Standortpaare betragen **0,3 bis 1,2 pH Einheiten**. Die Unterschiede lassen sich auch an der Mächtigkeit und Ausprägung der O Horizonte erkennen (siehe Abbildungen der Profile im Anhang).

In den **Unterböden** sind die Unterschiede **weniger deutlich** ausgeprägt. Beim Standortpaar A5-N5 wurden auf der Nullfläche leicht höhere pH_{Wasser} gemessen als auf der Applikationsfläche.

5.1.2 Basensättigung

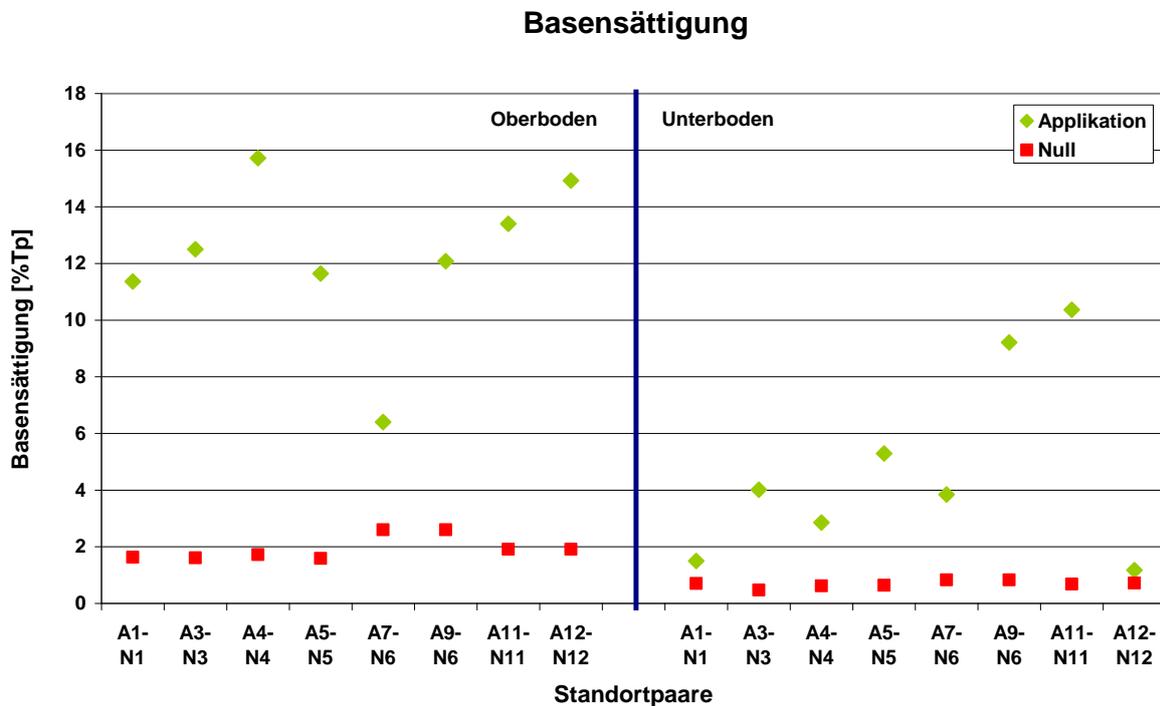


Abbildung 9: Basensättigung der Ober- und Unterböden der Standortpaare

Die **Basensättigung** ist mit dem pH_{KCl} und $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Säuresituation eines Bodens. Die Basensättigung gibt an wie viele Äquivalenteinheiten (in Prozent) an der potentiellen Austauschkapazität (Tp) von den „Basen“ **Ca+Mg+K+Na** eingenommen werden. Je geringer die Basensättigung eines Bodens ist, desto geringer ist seine Fähigkeit weitere Säureinträge zu puffern. Der Teil der Austauschkapazität, der nicht von „Basen“ eingenommen wird, ist von „Säuren“ (zB H, Al, Fe, Mn) belegt. Die Säuren haben sich im Zuge von Pufferreaktionen angehäuft, indem Säuren austauschbar angelagert wurden und im Gegenzug dazu „Basen“ mobilisiert wurden. Böden mit einer Basensättigung von **<50%** verlieren zunehmend die Eigenschaft des „Austauscherpuffers“. Die weitere Pufferung findet durch den Zerfall der Silikate (Tonminerale) und Bildung von Al und später von Fe Oxiden und Hydroxiden statt.

Soll durch eine **Kalkung** oder einer Zufuhr von **Meliorationsmischungen** der Säurezustand eines Bodens gezielt verbessert werden, sind folgende Parameter unbedingt zu erheben:

- $-\text{pH}_{\text{KCl}}$
- $-\text{pH}_{\text{Wasser}}$
- -Austauschkapazität potentiell
- -Basensättigung.

Eine Kalkung bzw. Zufuhr von karbonatischen Substanzen führt zwar auch in „pauschalierter“ Menge zu einer momentanen Verbesserung der Basensättigung und des pH Wertes im Wasser. Sind die Mengen jedoch unterdimensioniert, kann es sein, dass sich der pH_{KCl} -Wert nicht verändert.

In der Broschüre „**Waldbodensanierung**“ vom BMLFUW (2001) wird eine Basensättigung von <5% als „extrem niedrig“ und eine Basensättigung von 5,1 bis 10% als „sehr niedrig, von 10,1 bis 15% als „niedrig“ bezeichnet“. Erst der Bereich von 15 bis 30% wird als „mäßig bis ausreichend“ betrachtet.

Praktisch alle **Nullflächen** liegen im **extrem niedrigen** Bereich. Durch die **Kalkung** wurden die Oberböden der Applikationsflächen durchwegs in den „**niedrigen**“ Bereich gehoben. Eine Ausnahme bildet die Fläche A7, bei der die Kalkung im Jahre 1955 durchgeführt wurde. Diese Fläche weist auch den niedrigsten pH Wert der Applikationsflächen auf. Die Flächen A4 und A12 wurden in den Jahren 2003 bzw. 2004 gekalkt und weisen die höchste Basensättigung auf (Untergrenze von mäßig bis ausreichend).

In den Unterböden ist die Tendenz gegenläufig, bei den Flächen die vor kurzem gekalkt wurden, liegen die geringsten Änderungen vor. Dies ist auf die verzögerte Tiefenwirkung (siehe weiter oben) zurückzuführen.

5.1.3 Ausnutzung der potentiellen Austauschkapazität

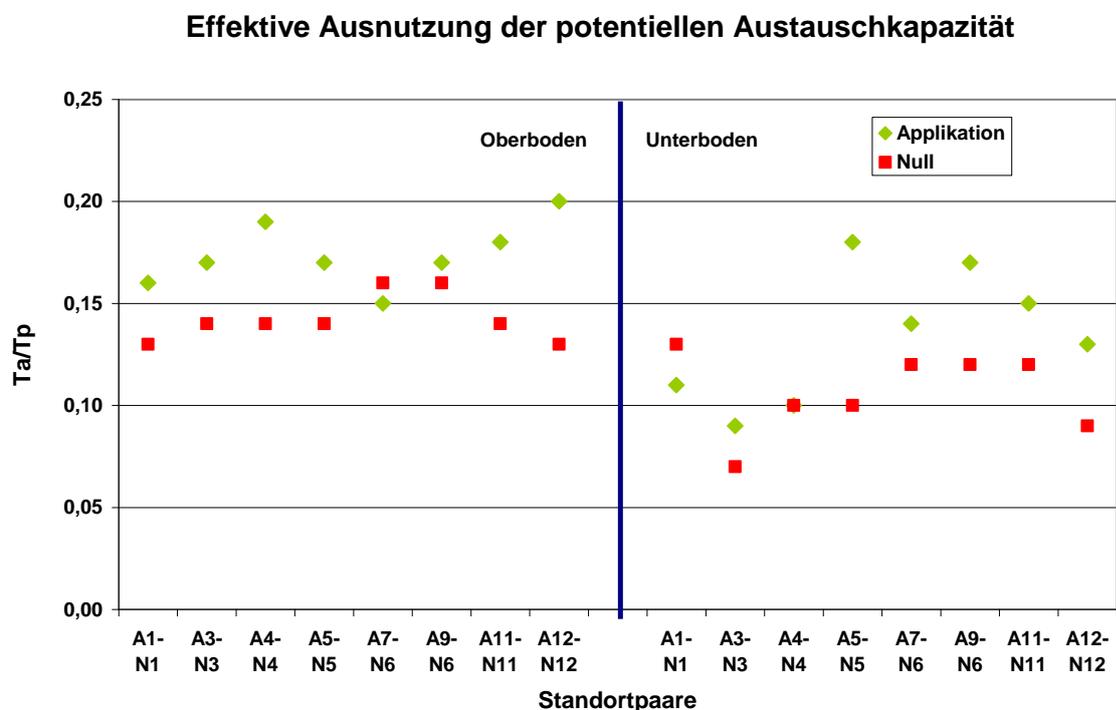


Abbildung 10: Ausnutzung der potentiellen Austauschkapazität der Ober- und Unterböden

Der effektive (aktuelle) Ausnutzungsgrad der potentiellen Austauschkapazität ist eine Maßzahl für den **Degradationszustand** eines Standortes. Ab einem Ausnutzungsgrad von

<50% beginnen irreversible Vorgänge, Austauscherkapazität geht verloren. An den Austauschprozessen zwischen **Bodenlösung / Wurzelausscheidungen / Austauscher / Bodenlösung** nimmt im **Fließgleichgewicht** nur der aktuell genutzte Anteil der Austauschkapazität teil. Als typische Bestandteile der aktuellen Sorptionsträger gelten die Tonminerale, welche eine **permanente** Ladung (unabhängig vom pH Wert) aufweisen. Oxide und Hydroxide sind Träger der variablen Ladung, die je nach pH Wert positiv oder negativ sein kann. Mit sinkendem pH Wert, zerfallen Träger der permanenten Ladung, die effektive Austauschkapazität sinkt.

Der aktuell genutzte Anteil liegt bei den Oberböden bei etwa 15 bis 20%, in den Unterböden bei etwa 10 bis 20%. Die **Applikationsflächen** weisen tendenziell **höhere Werte** auf.

5.1.4 Ca Sättigung des Sorptionskomplexes

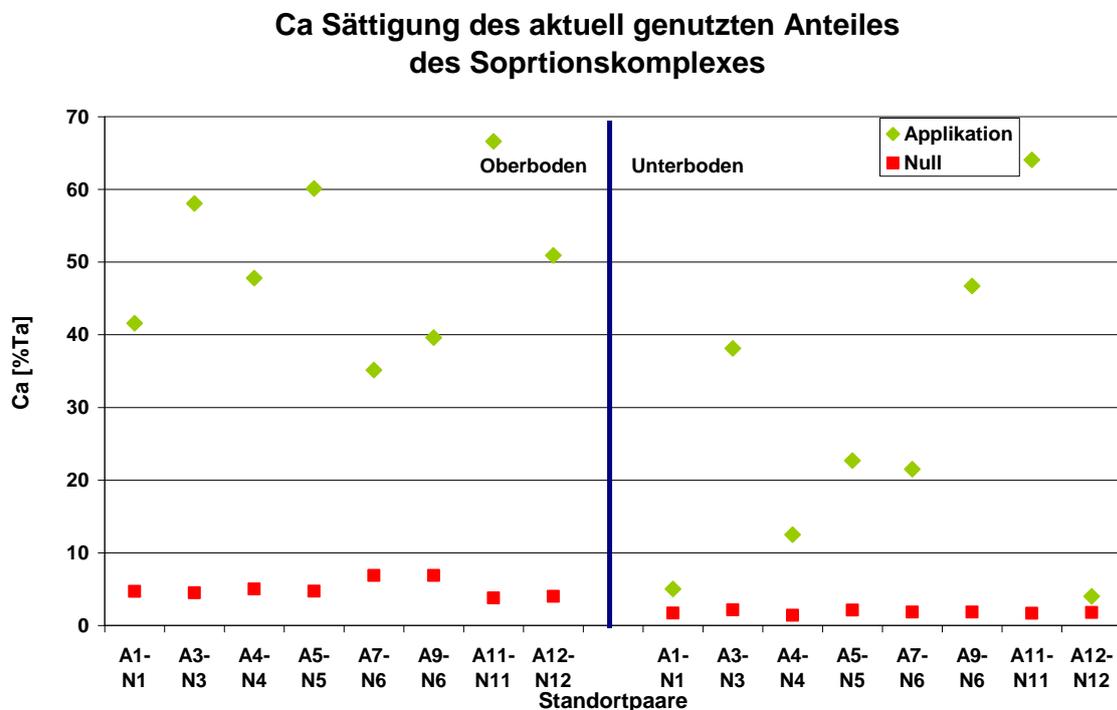


Abbildung 11: Ca Sättigung am aktuell genutzten Teil des Sorptionskomplexes der Ober- und Unterböden

In Abbildung 11 wird dargestellt wie hoch der Anteil von Ca an der effektiven Austauschkapazität und damit an den Reaktionen im Fließgleichgewicht ist. Die **Unterschiede** sind **signifikant**, bei den Nullflächen liegt der Ca Anteil deutlich < 10%, im Oberboden der Applikationsflächen liegt der Anteil zwischen 30 und 65%. Als ideal hat sich ein Ca Anteil von 60 bis 80% erwiesen, da hierbei günstige Voraussetzungen für chemische, physikalische (zB Aggregatstabilität) und mikrobiologische Prozesse herrschen.

5.1.5 Al Sättigung des Sorptionskomplexes

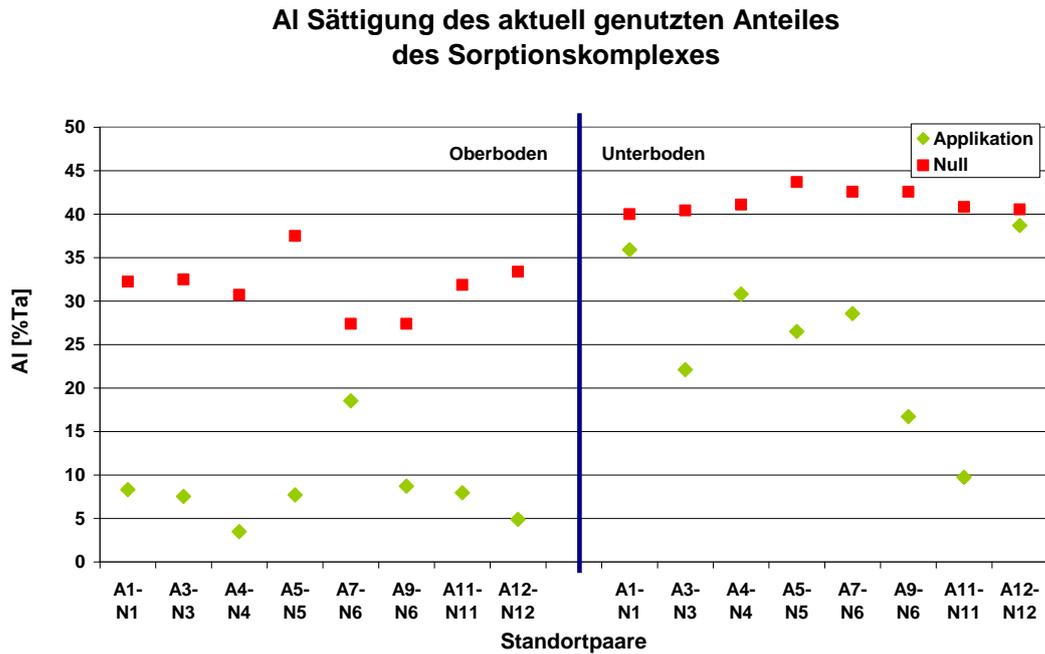


Abbildung 12: Al Sättigung am aktuell genutzten Teil des Sorptionskomplexes der Ober-und Unterböden
Das Al verhält sich komplementär zum Ca. Al bildet mit Ca bei stark degradierten Böden das wichtigste Kation am Sorptionskomplex. Auf den Flächen werden derzeit 10 bis 15% der Austauschkapazität genutzt. Von diesem Anteil werden bei den **Nullflächen** wiederum 30 bis **45%** von Al belegt. Bei den **Applikationsflächen** liegt der Anteil bei den Oberböden bei **<10%**, bei den Unterböden bei **< 30%**.

5.1.6 Molare Ca:Al Verhältnisse der Bodenlösung

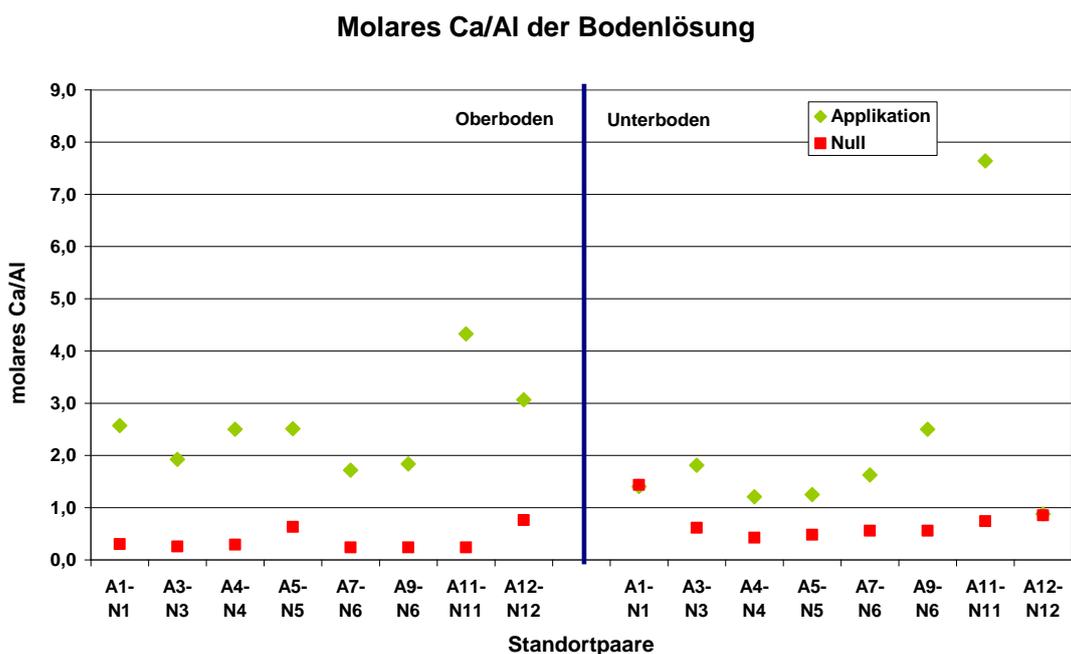


Abbildung 13: molares Ca/Al Verhältnis der Bodenlösung

Das molare Verhältnis von gelöstem Ca und Al in der Bodenlösung ist ein Hilfsmittel zur Beurteilung der **Al Toxizität auf Wurzeln und Mykorrhiza**. Ab einem Verhältnis von < 1 sind Schäden an Nadeln zu erwarten, ab $< 0,1$ **unvermeidlich**. Praktisch **alle Nullflächen** befinden sich innerhalb des kritischen Bereiches, die Werte der Applikationsflächen liegen vor allem in den Oberböden deutlich höher.

5.2 Ergebnisse der ertragskundlichen Analyse

Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

5.2.1 Vitalitätsweiser

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Vitalitätsweiser

	Konditiometermessungen in Kilo-Ohm		Anzahl
	Mittelwert	Standardabweichung	
gekalkte Flächen	11,5	2,1	89
ungekalkte Vergleichsflächen	11	2,6	80
Gesamt	11,2	2,3	169

	Vitalitätsansprachen		Anzahl
	Mittelwert	Standardabweichung	
gekalkte Flächen	1,9	0,4	314
ungekalkte Vergleichsflächen	2	0,3	294
Gesamt	2	0,3	608

	Kronenzustandsansprachen		Anzahl
	Mittelwert	Standardabweichung	
gekalkte Flächen	0,019	0,3	314
ungekalkte Vergleichsflächen	0,014	0,3	294
Gesamt	0,016	0,3	608

	Kronenlängen		Anzahl
	Mittelwert	Standardabweichung	
gekalkte Flächen	1,8	0,3	314
ungekalkte Vergleichsflächen	1,9	0,3	294
Gesamt	1,9	0,3	608

Zwischen gekalkten und ungekalkten Vergleichsflächen bestehen bezüglich der Vitalität keine signifikanten Unterschiede.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung – die eine Momentaufnahme darstellt - ging es den untersuchten Bäumen relativ gleich gut. Obwohl die untersuchten Individuen keinen signifikanten Unterschied zeigen, wirkt das **Gesamtbild der gekalkten Bestände vitaler** (Nadelfärbung, Kronenlänge, Bodenvegetation).

5.2.2 Ertragskunde

Kurzfristig wirkten sich die Kalkungsmaßnahmen so aus, dass durchschnittlich ein **Mehrzuwachs** von **24%** erzielt werden konnte, **langfristig** wurde ein durchschnittlicher Mehrzuwachs von **13%** erreicht. Durch die Kalkung wurden kurzfristig Nährstoffe aus der Humusschicht mobilisiert, wodurch die kurzfristigen Erfolge erklärt werden können. Langfristig gelangen mit Calcium gut versorgte Nadeln in die Streu, welche leichter umsetzbar wird.

Tabelle 3: Kurzfristige Zuwächse der Kalkungsflächen

Kalkungsfläche	Jahr der Kalkung	Vergleichsfläche ungekalkt	Kalkungsfläche	Vergleichsfläche	Delta	Quotient
A1	2005	N1	115%	85%	30%	35%
A3	1957	N3	118%	94'%	24%	26%
A4	2003	N4	100%	69%	32%	46%
A5	1952	N5	111%	92%	19%	21%
A7	1955	N6	143%	118'%	25%	21%
A9	2008	N6	100%	93%	6%	7%
A11	2003	N11	127%	95%	32%	33%
A12	2004	N12	102%	97%	5%	6%
					20%	24%

Tabelle 4: Langfristige Zuwächse

Kalkungsfläche	Jahr der Kalkung	Vergleichsfläche ungekalkt	Kalkungsfläche	Vergleichsfläche	Delta	Quotient
A3	1957	N3	117%	106%	10%	10%
A5	1952	N5	105%	100%	6%	6%
A7	1955	N6	112%	92%	21%	22%
A9	1954	N6	104%	91%	13%	15%
					12%	13%

Die Zuwachsfeinanalyse zeigt folgendes Bild:

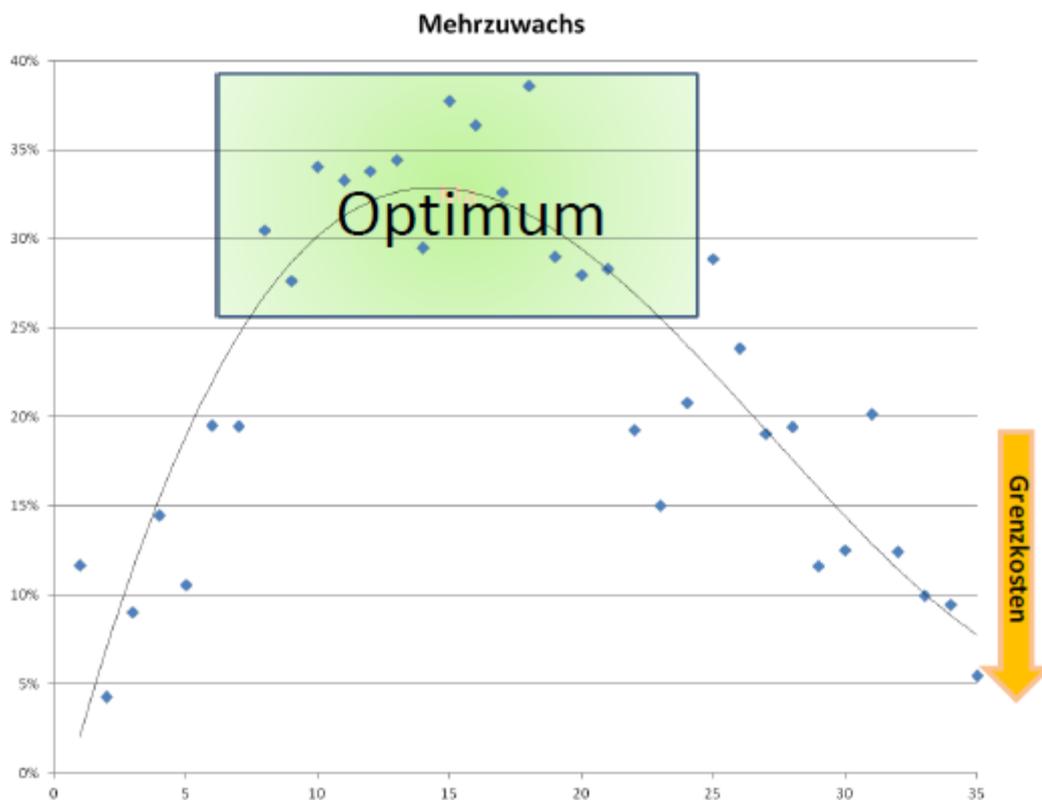


Abbildung 14: Mehrzuwachs im Zeitverlauf (ECKMÜLLNER 2011)

In Bezug auf Mehrzuwächse stellt sich die Wirkung der Kalkung bereits nach wenigen Jahren ein, um nach **5 bis 10** Jahren einen **maximalen Effekt** zu erreichen. Im Zeitraum von **10 bis 25** Jahren nach der Kalkung werden die **höchsten Zuwächse** erzielt, danach tritt eine Abnahme des Effekts auf. Nach mehr als 35 Jahren sind kalkungsbedingt keine Mehrzuwächse mehr zu erkennen. Durch die Vorlaufzeit von 5-10 Jahren empfiehlt sich eine **Kalkung etwa alle 20 Jahre**.

5.3 Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Rechnung

Die Ergebnisse wurden auf **1 Hektar Fichtenbestand** mit den **Bonitäten 7 und 11** bezogen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Rechnung

Alter	30	50	70	90
Bonität	7	7	7	7
DB1	€ 40	€ 40	€ 40	€ 40
Kosten	€ 250	€ 250	€ 250	€ 250
Amortisationszeit in Jahren	8	8	9	10
Mehrzuwachs 35 Jahre in Efm	47,3	41,2	31,5	21,2
Mehrwert 35 Jahre	€ 1.891	€ 1.650	€ 1.259	€ 847

Alter	30	50	70	90
Bonität	11	11	11	11
DB1	€ 40	€ 40	€ 40	€ 40
Kosten	€ 250	€ 250	€ 250	€ 250
Amortisationszeit in Jahren	6	6	7	8
Mehrzuwachs 35 Jahre in Efm	73,2	61,4	46,8	32,6
Mehrwert 35 Jahre	€ 2.929	€ 2.456	€ 1.871	€ 1.306

Erklärung der Begriffe:

Alter: Alter (Jahre) der Bäume zum Zeitpunkt der Kalkung

Bonität: Fichte/Weitra (Marschall J., 1975) im Sinne des durchschnittlichen Gesamtzuwachses im Alter von 100 Jahren

DB1: erntekostenfreier Erlös, also Holzerlös abzüglich der Erntekosten je Efm (Erntefestmeter ohne Rinde = FMO Holz)

Kosten: Kosten der Kalkung (Material, Transport und Ausbringung) je Hektar

Amortisationszeit: Anzahl der Jahre bis der Wert der Mehrproduktion die Kosten der Kalkung erreicht oder überschreitet, ohne Berücksichtigung von Zinsen.

Eurobeträge verstehen sich exklusiver Mehrwertsteuer.

Es zeigt sich, dass abhängig von der Bonität und dem Alter des Bestandes, die **Kalkungsmaßnahmen** eine **Amortisationszeit** von **6-10 Jahren** haben. Nachdem die Kalkung eine zeitliche Wirkung von ca. 35 Jahren hat, kann nur durch eine **mehrfache Kalkung** der **optimale Mehrzuwachs** über die gesamte **Umtriebszeit** erreicht werden. Die Kosten für die Maßnahme rechnen sich jedenfalls.

5.4 Ergebnisse der kalkungsbedingten zusätzlichen CO₂ - Bindung

Der Berechnungsmethode von Prof. ECKMÜLLNER folgend, wurden unten stehende Ergebnisse der CO₂-Bindung für jeweils **1 ha Fichten-Bestand** mit den **Bonitäten 7 und 11** erzielt:

Tabelle 6: Ergebnisse der kalkungsbedingten zusätzlichen CO₂-Bindung bei Bonität 7

Alter (Jahre)	30	50	70	90
Bonität	7	7	7	7
Mehrzuwachs 35 Jahre in Efm	47,3	41,2	31,5	21,2
Mehrzuwachs Biomasse 35 Jahre in Tonnen (*)	26,7	23,3	17,8	12
dies entspricht ~ CO ₂ in Tonnen	48,9	42,6	32,6	21,9

(*) Holz, Rinde und Äste (keine Nadeln) absolut trocken

Tabelle 7: Ergebnisse der kalkungsbedingten zusätzlichen CO₂-Bindung bei Bonität 11

Alter (Jahre)	30	50	70	90
Bonität	11	11	11	11
Mehrzuwachs 35 Jahre in Efm	73,2	61,4	46,8	32,6
Mehrzuwachs Biomasse 35 Jahre in Tonnen (*)	41,3	34,7	26,4	18,4
dies entspricht ~CO ₂ in Tonnen	75,7	63,5	48,4	33,7

(*) Holz, Rinde und Äste (keine Nadeln) absolut trocken

Die CO₂- Bindung folgt dem Mehrzuwachs und ist wie dieser von der Bonität und vom Alter des Bestandes abhängig.

Der **Mehrzuwachs** eines einzigen gekalkten Hektars Wald bindet je nach Bonität zwischen **21,9 und 75,7 Tonnen CO₂** im Verlauf von **35 Jahren**.

Im Untersuchungsgebiet gibt es insgesamt 260 ha gekalkte Flächen. Unter Zugrundelegung eines Fichtenbestandes der **Bonität 7** und einem durchschnittlichen Alter von 90 Jahren, würden allein durch den **jährlichen Zuwachs zusätzlich 163 Tonnen CO₂** gebunden werden.

Wären die gesamten Waldbestände 30 Jahre jung und hätten eine **Bonität von 11**, so würden durch den kalkungsbedingten Zuwachs **zusätzlich 560 Tonnen CO₂ pro Jahr** gebunden werden.

Durch den gesteigerten Biomassezuwachs wurden auf den gekalkten Flächen (~260ha) jährlich zusätzlich 163 bis 560 Tonnen CO₂ gebunden. Umgelegt auf die aktuellen (2012) Preise der CO₂ Zertifikate von EURO 15,00 sind **dies EURO 2.440 bis 8.400 pro Jahr!**

Die jährliche CO₂-Bindung sowie die daraus resultierende monetäre Bewertung an CO₂-Zertifikaten ist für die gesamten gekalkten Flächen in den Tabellen 8 und 9 pro Jahr ersichtlich, die Tabellen 10 und 11 stellen die Ergebnisse bei einer angenommenen Umtriebszeit von 100 Jahren dar.

Tabelle 8: Jährliche CO₂-Bindung und monetäre Bewertung im gesamten Untersuchungsgebiet bei Bonität 7

Alter	30	50	70	90
Bonität	7	7	7	7
gebundenes CO ₂ in Tonnen	364	317	242	164
monetäre Bewertung in €	5.310	4.755	3.630	2.460

Tabelle 9: Jährliche CO₂-Bindung und monetäre Bewertung im gesamten Untersuchungsgebiet bei Bonität 11

Alter	30	50	70	90
Bonität	11	11	11	11
gebundenes CO ₂ in Tonnen	560	471	359	234
monetäre Bewertung in €	8.400	7.065	5.475	3.510

Tabelle 10: CO₂-Bindung und monetäre Bewertung bei 100jähriger Umtriebszeit, Bonität 7

Alter	30	50	70	90
Bonität	7	7	7	7
gebundenes CO ₂ in Tonnen	36.400	31.700	24.200	16.400
monetäre Bewertung in €	531.000	475.500	363.000	246.000

Tabelle 11: CO₂-Bindung und monetäre Bewertung bei 100jähriger Umtriebszeit, Bonität 11

Alter	30	50	70	90
Bonität	11	11	11	11
gebundenes CO ₂ in Tonnen	56.000	47.100	35.900	23.400
monetäre Bewertung in €	840.000	706.500	547.500	351.000

6 Resümee und Ausblick:

Die **nachhaltige Sicherung** von **forstlichen Ökosystemen** ist nicht nur für den Forstbetrieb, sondern für die **gesamte Gesellschaft** von großer Bedeutung. Die Produktion von **mehr Holz**, die Erhaltung der **Biodiversität**, der **Schutz** des **Grundwassers**, der präventive **Hochwasserschutz** und die **Wohlfahrtsfunktionen** der Wälder sind nur durch „**Wald(boden)pflfegemaßnahmen**“ langfristig zu erhalten. Dazu ist es unbedingt notwendig die natürlichen Prozesse der Versauerung durch die Zufuhr neutralisierender Stoffe hintanzuhalten.

Die **Waldbodenkalkung** neutralisiert Säuren, erhält das Ökosystem auf einem bestimmten Vitalitätsniveau und bringt durch bessere Zuwachsraten zusätzliche wirtschaftliche Erfolg. Durch auf die Bodenverhältnisse abgestimmte Sanierungsmischungen (aus Kalk und anderen dem Boden fehlenden Komponenten) und exakt dosierten Applikationsmengen könnten die Effekte in ihrer Effizienz und Nachhaltigkeit noch gesteigert werden.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass sich die **Kalkung** bei den untersuchten Beständen (Bonität 7 und 11, Alter 30-90 Jahre) im Zeitraum von **6 bis 10 Jahren** bereits durch den Mehr-Nutzholzertrag **rechnet**.

Der Zusatznutzen von „klimarelevanter“ **erhöhter CO₂-Bindung**, Vitalitätssteigerung und der Verbesserung und Erhaltung von wichtigen Boden- und Waldwohlfahrtsfunktionen ist sicherlich mit einem noch höheren **Mehrwert** zu bewerten.

In Bezug auf Mehrzuwächse stellt sich die Wirkung der Kalkung bereits nach wenigen Jahren ein, um nach 5 bis 10 Jahren einen **maximalen Effekt** zu erreichen. Im Zeitraum von 10 bis 25 Jahren nach der Kalkung werden die höchsten Zuwächse erzielt, danach tritt eine Abnahme des Effekts auf. Nach mehr als 35 Jahren sind kalkungsbedingt keine Mehrzuwächse mehr zu erkennen. Durch die Vorlaufzeit von 5-10 Jahren empfiehlt sich eine **Kalkung etwa alle 20 Jahre**.

Für den **Klimaschutz** hat die Aufrechterhaltung der standortstypischen Zuwachsraten eine wichtige Bedeutung. Das Projekt belegt eine zusätzliche **jährliche CO₂-Bindung** von 0,63 bis **2,16 t CO₂ pro ha** und Jahr durch den Mehrzuwachs der gekalkten Waldbestände.

Schätzungen gehen von einer Fläche von mindestens 400.000 ha an sanierungswürdigen Waldflächen in **Österreich** aus (Böhmische Masse, Teile der Zentralalpen, Nördliches Alpenvorland, Südöstliches Alpenvorland). Hieraus errechnen sich auf Basis der Projektergebnisse eine jährlich zusätzliche CO₂-Bindung in Österreich von 252.000 bis 864.000 Tonnen. Berechnet zu den aktuellen (2012) Preisen für CO₂-Zertifikate von 15 € pro Tonne CO₂ könnten **jährlich (!) 3,8 bis 13 Millionen Euro** an **CO₂ - Zertifikaten** **eingespart** werden.

7 Anhang

7.1 Standorte A1 und N1

	A1	N1
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha ⁻¹	2005 / 4,6	keine
Koordinaten	N48 21.255, E15 04.412	N48 21.325, E15 04.004
Seehöhe	960m	977m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	Braunerde	Braunerde



Abbildung 15: A1 Wald



Abbildung 17: N1 Wald



Abbildung 16: A1 Bodenprofil

Olfh
Ah
B
C



Abbildung 18: N1 Bodenprofil

Tabelle 12: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A1	N1	Differenz
pH Wasser	4,8	4,0	+ 0,8
pH KCl	3,5	3,1	+ 0,4
Humus [%]	22	18	+ 4
Ca [%Ta]	41	4,6	+ 36,4
Mg [%Ta]	26,6	3,7	+ 22,9

Tabelle 13: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A1	N1	Differenz
pH Wasser	4,5	4,4	+ 0,1
pH KCl	4,1	3,7	+ 0,4
Humus [%]	11	8	+ 3
Ca [%Ta]	5,2	1,7	+ 3,5
Mg [%Ta]	6,8	1,3	5,5

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

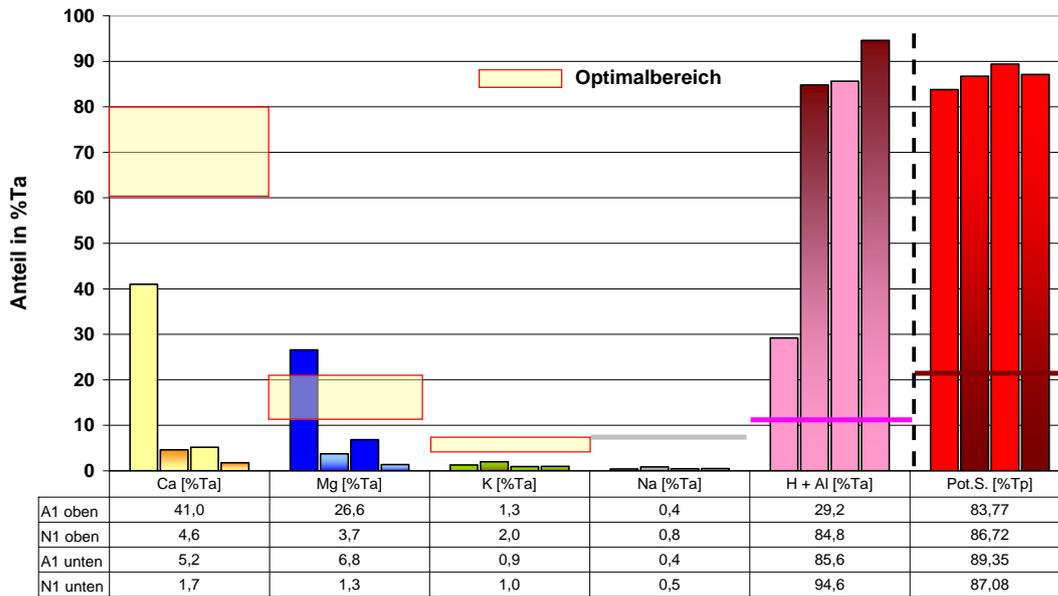


Abbildung 19: Vergleich der Zusammensetzung des aktuell genutzten Sorptionskomplexes (A1-N1)

Tabelle 14: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A1-N1)

Nährstoff	A1 oben	N1 oben	A1 unten	N1 unten
Ca	6	1	2	2
Mg	3	1	2	1
K	0	1	0	0
Na	1	2	1	2
NH4-N	0	0	0	0
NO3-N	1	1	3	2
PO4	0	0	0	0
SO4	5	4	4	2
Cl	2	1	1	1
Al	1,6	2,2	1,0	0,9
Fe	1,9	2,6	0,9	0,4
Mn	0,03	0,04	0,03	0,03
B	0,05	0,04	0,03	0,04
Zn	0,02	0,02	0,03	0,03
Cu	0,01	0,00	0,00	0,00
Si	5,0	5,1	5,0	5,1
mol Ca/Al	0,15 / 0,06	0,025 / 0,08	0,05 / 0,03	0,05 / 0,03

7.2 Standorte A3 und N3

	A3	N3
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha ⁻¹	1957 / 10	keine
Koordinaten	N48 21.611, E15 05.292	N48 21.585 E15 05.292
Seehöhe	966m	947m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	podsolige Braunerde	verbraunter Ranker



Abbildung 20: A3 Wald



Abbildung 22: N3 Wald



Abbildung 21: A3 Bodenprofil



Abbildung 23: N3 Bodenprofil

Tabelle 15: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A3	N3	Differenz
pH Wasser	4,3	3,7	+ 0,6
pH KCl	3,3	2,9	+ 0,4
Humus [%]	20,6	30,6	+ 10
Ca [%Ta]	56,8	4,3	+ 52,5
Mg [%Ta]	12,9	3,7	+ 9,2

Tabelle 16: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A3	N3	Differenz
pH Wasser	4,6	4,3	+ 0,3
pH KCl	3,3	2,9	+ 0,4
Humus [%]	2,8	11,2	- 8,4
Ca [%Ta]	37,6	2,0	+ 35,6
Mg [%Ta]	3,9	1,5	+ 2,4

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

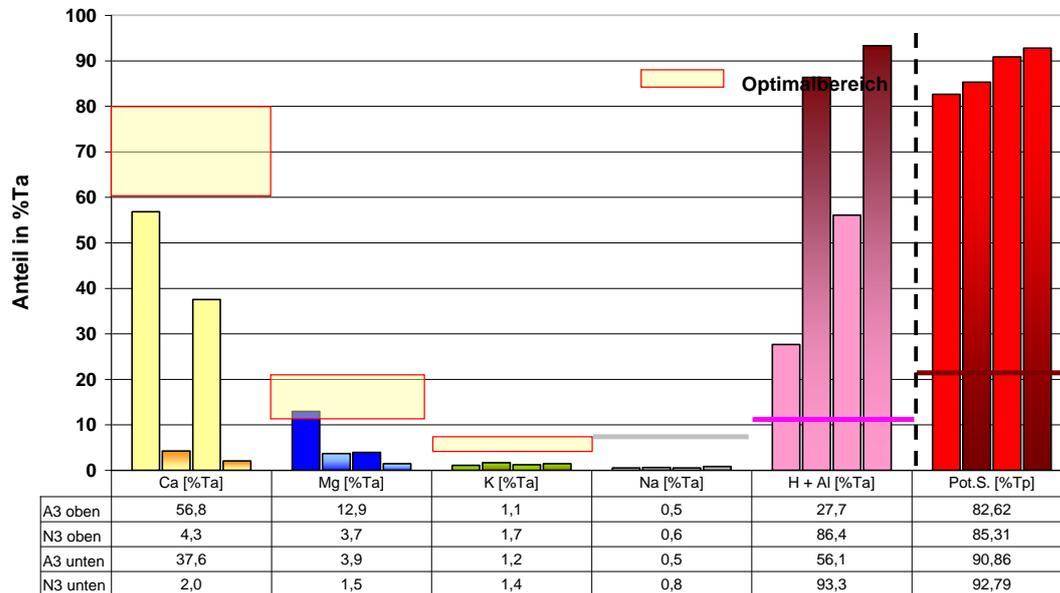


Abbildung 24: Vergleich der Zusammensetzung des Sorptionskomplexes (A3-N3)

Tabelle 17: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A3-N3)

Nährstoff	A3 oben	N3 oben	A3 unten	N3 unten
Ca	9	1	6	1
Mg	2	1	1	1
K	1	1	0	0
Na	1	1	1	1
NH4-N	0	0	0	0
NO3-N	0	0	1	1
PO4	0	0	0	0
SO4	5	3	7	3
Cl	1	1	1	1
Al	3,2	2,6	2,2	1,1
Fe	2,7	2,9	1,5	0,2
Mn	0,01	0,02	0,01	0,03
B	0,03	0,03	0,03	0,02
Zn	0,04	0,05	0,00	0,04
Cu	0,01	0,01	0,00	0,00
Si	5,6	5,0	5,9	7,2
mol Ca/Al	0,225 / 0,112	0,025 / 0,09	0,15 / 0,08	0,025 / 0,04

7.3 Standorte A4 und N4

	A4	N4
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha ⁻¹	2003 / 3,2	keine
Koordinaten	N48 21.302, E15 05.574	N48 21.080 E15 05.445
Seehöhe	965m	930m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	podsolige Braunerde	podsolige Braunerde



Abbildung 25: A4 Wald



Abbildung 27: N4 Wald



Abbildung 26: A4 Bodenprofil

Olfh
Ahe
B
C



Abbildung 28: N4 Bodenprofil

Tabelle 18: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A4	N4	Differenz
pH Wasser	4,7	3,6	+ 1,1
pH KCl	3,7	2,8	+ 1,1
Humus [%]	19,7	22,8	- 3,1
Ca [%Ta]	47,7	4,7	+ 43
Mg [%Ta]	32,8	3,3	29,5

Tabelle 19: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A4	N4	Differenz
pH Wasser	4,2	3,8	+ 0,4
pH KCl	3,6	3,4	+ 0,2
Humus [%]	8,8	8,3	+ 0,5
Ca [%Ta]	12,1	1,4	10,7
Mg [%Ta]	12,6	1,3	+ 11,3

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

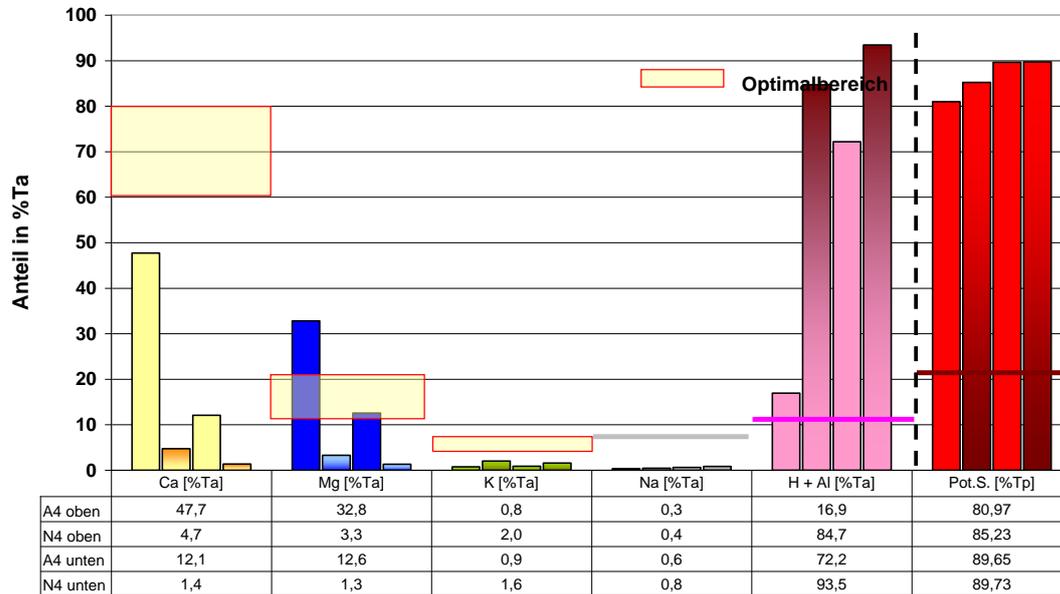


Abbildung 29: Vergleich der Zusammensetzung des Sorptionskomplexes (A4-N4)

Tabelle 20: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A4-N4)

Nährstoff	A4 oben	N4 oben	A4 unten	N4 unten
Ca	7	1	3	1
Mg	5	1	3	1
K	0	1	0	0
Na	1	2	1	2
NH4-N	0	0	0	0
NO3-N	1	0	2	0
PO4	0	0	0	0
SO4	7	3	6	4
Cl	2	1	2	1
Al	1,9	2,3	1,7	1,6
Fe	2,2	2,5	1,7	0,8
Mn	0,02	0,03	0,03	0,04
B	0,03	0,03	0,02	0,04
Zn	0,02	0,03	0,02	0,05
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00
Si	7,7	5,1	7,3	5,3
mol Ca/Al	0,175 / 0,07	0,025 / 0,08	0,075 / 0,063	0,025 / 0,06

7.4 Standorte A5 und N5

	A5	N5
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha ⁻¹	1952 / 10	keine
Koordinaten	N48 21.753 E15 06.004	N48 21.720 E15 05.827
Seehöhe	935m	947m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	Ranker	Podsol



Abbildung 30: A5 Wald



Abbildung 32: N5 Wald



Abbildung 31: A5 Bodenprofil



Abbildung 33: N5 Bodenprofil

Tabelle 21: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A5	N5	Differenz
pH Wasser	4,0	3,7	+ 0,3
pH KCl	3,0	2,9	+ 0,1
Humus [%]	49	17	+ 32
Ca [%Ta]	60	4,7	+ 55,3
Mg [%Ta]	5,0	3,1	+ 1,9

Tabelle 22: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A5	N5	Differenz
pH Wasser	4,1	4,1	- 0,1
pH KCl	3,2	3,5	- 0,3
Humus [%]	3,7	10,6	- 6,9
Ca [%Ta]	23,1	2,0	+ 21,1
Mg [%Ta]	3,4	1,6	+ 1,8

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

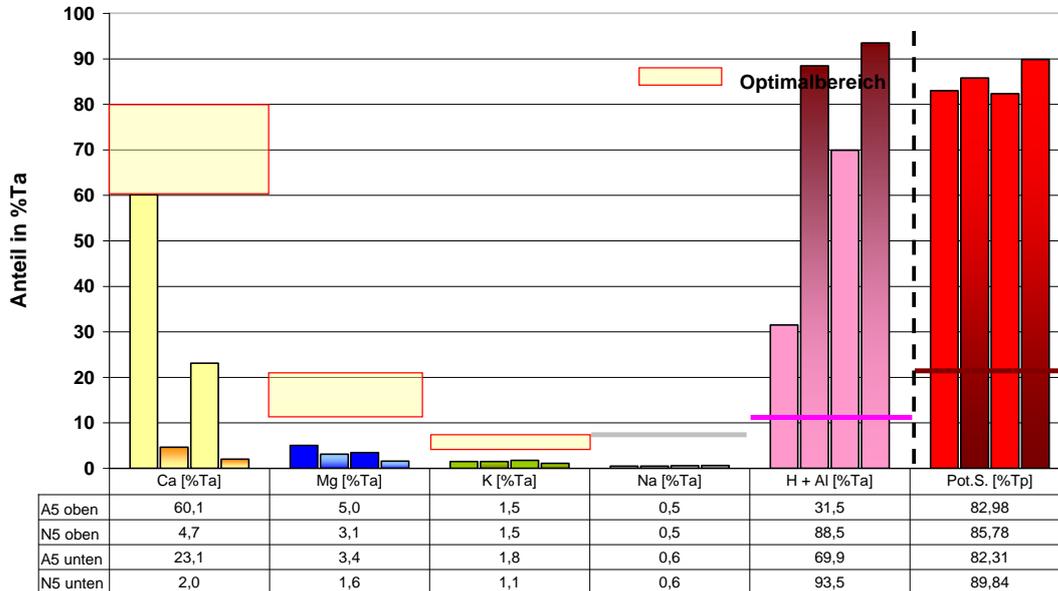


Abbildung 34: Vergleich der Zusammensetzung des Sorptionskomplexes (A5-N5)

Tabelle 23: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A5-N5)

Nährstoff	A5 oben	N5 oben	A5 unten	N5 unten
Ca	6	2	4	1
Mg	1	1	1	1
K	1	1	1	1
Na	1	2	2	2
NH4-N	0	1	0	0
NO3-N	0	2	0	3
PO4	0	0	0	0
SO4	3	4	5	3
Cl	1	2	3	2
Al	1,6	2,1	2,2	1,4
Fe	0,3	1,9	0,6	0,3
Mn	0,01	0,01	0,02	0,03
B	0,03	0,03	0,01	0,03
Zn	0,03	0,04	0,05	0,04
Cu	0,00	0,00	0,01	0,00
Si	2,0	4,5	4,9	6,3
mol Ca/Al	0,15 / 0,06	0,05 / 0,077	0,1 / 0,08	0,025 / 0,05

7.5 Standorte A7 und N6

	A7	N6
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha ⁻¹	1955 / 7	keine
Koordinaten	N48 21.302 E15 06.286	N48 21.421 E15 06.512
Seehöhe	956m	933m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	Braunerde	Braunerde



Abbildung 35: A7 Wald



Abbildung 37: N6 Wald



Abbildung 36: A7 Bodenprofil

Olfh
Ah
B
C



Abbildung 38: N6 Bodenprofil

Tabelle 24: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A7	N6	Differenz
pH Wasser	3,9	3,5	+ 0,4
pH KCl	2,9	2,7	+ 0,2
Humus [%]	28,6	42,9	- 14,3
Ca [%Ta]	36,4	7,0	+ 29,4
Mg [%Ta]	4,6	5,9	- 0,7

Tabelle 25: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A7	N6	Differenz
pH Wasser	4,3	4,1	+ 0,2
pH KCl	3,5	3,4	+ 0,1
Humus [%]	9,6	8,2	+ 1,4
Ca [%Ta]	21,9	1,8	+ 20,1
Mg [%Ta]	3,3	2,2	+ 1,1

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

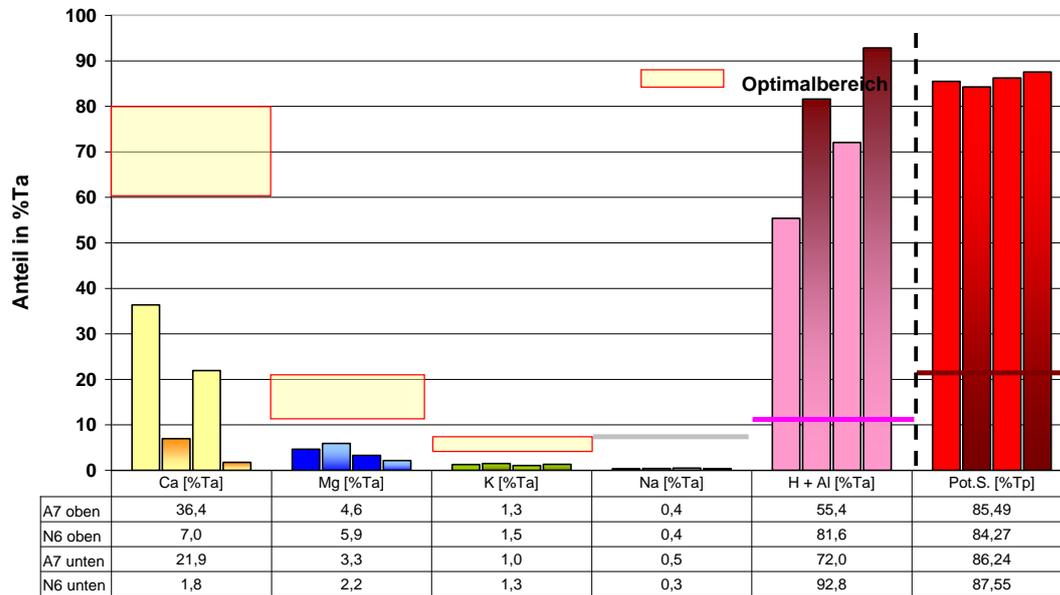


Abbildung 39: Vergleich der Zusammensetzung des Sorptionskomplexes (A7-N6)

Tabelle 26: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A6-N7)

Nährstoff	A7 oben	N6 oben	A7 unten	N6 unten
Ca	8	1	6	1
Mg	1	1	1	1
K	1	1	0	1
Na	1	1	1	1
NH4-N	1	1	0	0
NO3-N	0	0	3	1
PO4	1	0	0	0
SO4	6	4	6	4
Cl	2	1	2	2
Al	3,1	2,8	2,5	1,2
Fe	4,0	2,9	5,8	0,7
Mn	0,04	0,07	0,05	0,06
B	0,02	0,02	0,04	0,03
Zn	0,05	0,06	0,05	0,03
Cu	0,01	0,01	0,00	0,00
Si	3,5	3,3	4,4	5,0
mol Ca/Al	0,2 / 0,11	0,025 / 0,10	0,15 / 0,09	0,025 / 0,044

7.6 Standorte A9 und N6

	A9	N6
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha ⁻¹	1954 und 2008 / 7 und 3,6	keine
Koordinaten	N48 21.143 E15 06.384	N48 21.421 E15 06.512
Seehöhe	954m	933m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	Braunerde	Braunerde



Abbildung 40: A9 Wald



Abbildung 42: N6 Wald



Abbildung 41: A9 Bodenprofil

Olfh
Ah
B
C



Abbildung 43: N6 Bodenprofil

Tabelle 27: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A9	N6	Differenz
pH Wasser	4,3	3,5	+ 0,8
pH KCl	3,3	2,7	+ 0,6
Humus [%]	33,9	42,9	- 9,0
Ca [%Ta]	38,4	7,0	+ 31,4
Mg [%Ta]	27,7	5,9	+ 21,8

Tabelle 28: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A9	N6	Differenz
pH Wasser	4,6	4,1	+ 0,5
pH KCl	3,5	3,4	+ 0,1
Humus [%]	7,8	8,2	- 0,4
Ca [%Ta]	45,9	1,8	+ 44,1
Mg [%Ta]	5,1	2,2	+ 2,9

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

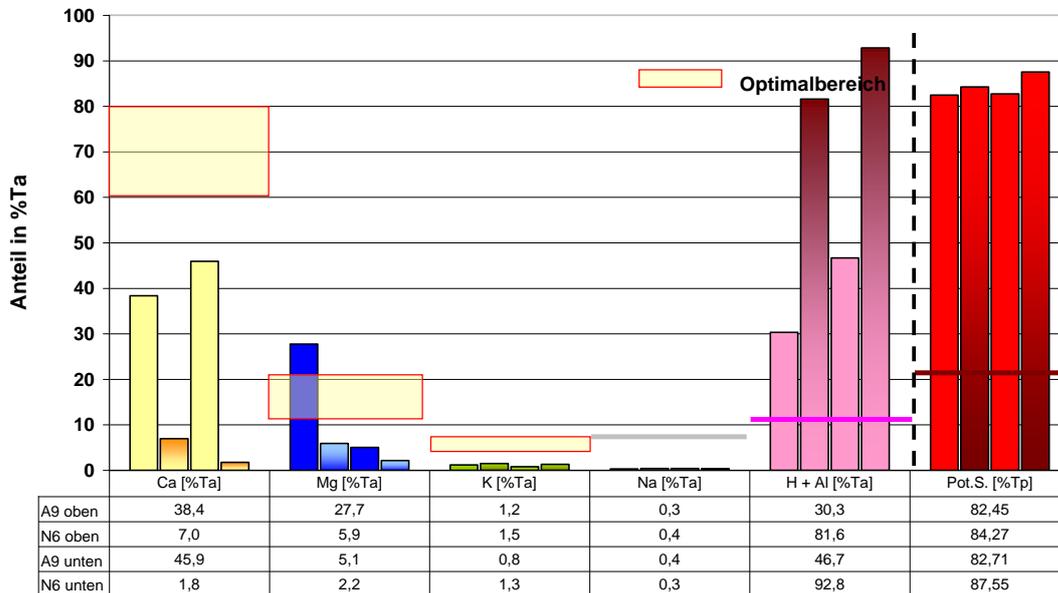


Abbildung 44: Vergleich der Zusammensetzung des Sorptionskomplexes (A9-N6)

Tabelle 29: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A9-N6)

Nährstoff	A9 oben	N6 oben	A9 unten	N6 unten
Ca	5	1	10	1
Mg	3	1	1	1
K	0	1	0	1
Na	1	1	1	1
NH4-N	0	1	0	0
NO3-N	0	0	2	1
PO4	0	0	0	0
SO4	3	4	15	4
Cl	2	1	2	2
Al	1,8	2,8	2,7	1,2
Fe	2,0	2,9	5,9	0,7
Mn	0,02	0,07	0,06	0,06
B	0,02	0,02	0,04	0,03
Zn	0,02	0,06	0,02	0,03
Cu	0,01	0,01	0,01	0,00
Si	3,1	3,3	6,1	5,0
mol Ca/Al	0,125 / 0,066	0,025 / 0,104	0,25 / 0,1	0,025 / 0,044

7.7 Standorte A11 und N11

	A11	N11
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha ⁻¹	1953 / 9,0	keine
Koordinaten	N48 20.522 E15 06.522	N48 20.518 E15 06.437
Seehöhe	972m	958m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	Braunerde	Braunerde



Abbildung 45: A11 Wald



Abbildung 47: N11 Wald



Abbildung 46: A11 Bodenprofil

Olfh
Ah
B
C



Abbildung 48: N11 Bodenprofil

Tabelle 30: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A11	N11	Differenz
pH Wasser	4,5	3,7	+ 0,8
pH KCl	3,6	3,0	+ 0,6
Humus [%]	24,4	34,4	- 10,0
Ca [%Ta]	66,6	3,7	+ 62,9
Mg [%Ta]	4,4	4,8	- 0,4

Tabelle 31: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A11	N11	Differenz
pH Wasser	4,8	4,3	+ 0,5
pH KCl	3,9	3,6	+ 0,3
Humus [%]	9,8	6,6	+ 3,2
Ca [%Ta]	65,2	1,7	+ 63,5
Mg [%Ta]	2,8	1,5	+ 1,3

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

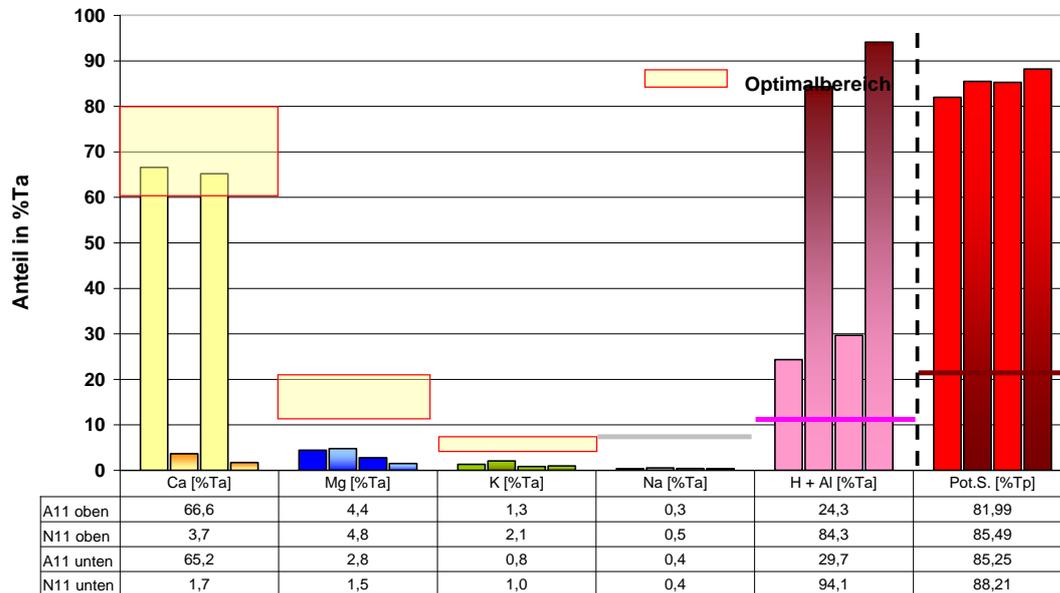


Abbildung 49: Vergleich der Zusammensetzung des Sorptionskomplexes (A11-N11)

Tabelle 32: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A11-N11)

Nährstoff	A11 oben	N11 oben	A11 unten	N11 unten
Ca	12	1	12	1
Mg	1	1	1	1
K	1	2	0	0
Na	1	1	1	1
NH4-N	1	1	0	0
NO3-N	3	0	4	2
PO4	0	0	0	0
SO4	7	5	11	3
Cl	2	2	2	1
Al	1,9	2,8	1,1	0,9
Fe	1,2	2,8	1,0	0,1
Mn	0,04	0,05	0,02	0,04
B	0,03	0,01	0,01	0,03
Zn	0,03	0,06	0,02	0,03
Cu	0,00	0,01	0,00	0,00
Si	4,7	3,5	3,8	2,8
mol Ca/Al	0,3 / 0,07	0,025 / 0,10	0,3 / 0,04	0,025 / 0,033

7.8 Standorte A12 und N12

	A12	N12
Kalkung	ja	nein
Jahr der Kalkung/Menge in t*ha-1	2004 / 5,2	keine
Koordinaten	N48 20.904 E15 07.557	N48 20.874 E15 07.190
Seehöhe	981m	976m
Baumarten	Fichte, Tanne	Fichte, Tanne
Bestandesalter	Altbestand	Altbestand
Bodentyp	Podsol	Braunerde



Abbildung 50: A12 Wald



Abbildung 52: N12 Wald



Abbildung 51: A12 Bodenprofil



Abbildung 53: N12 Bodenprofil

Tabelle 33: Ergebnisse Oberboden

Parameter	A12	N12	Differenz
pH Wasser	4,3	3,3	+ 1,0
pH KCl	3,3	3,0	+ 0,3
Humus [%]	45,7	28,7	+ 17
Ca [%Ta]	51,7	3,9	+ 47,8
Mg [%Ta]	21,8	6,1	+ 15,7

Tabelle 34: Ergebnisse Unterboden

Parameter	A12	N12	Differenz
pH Wasser	4,2	4,4	- 0,2
pH KCl	3,3	3,6	- 0,3
Humus [%]	7,4	7,6	- 0,2
Ca [%Ta]	4,1	1,7	+ 2,4
Mg [%Ta]	2,5	2,4	+ 0,1

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

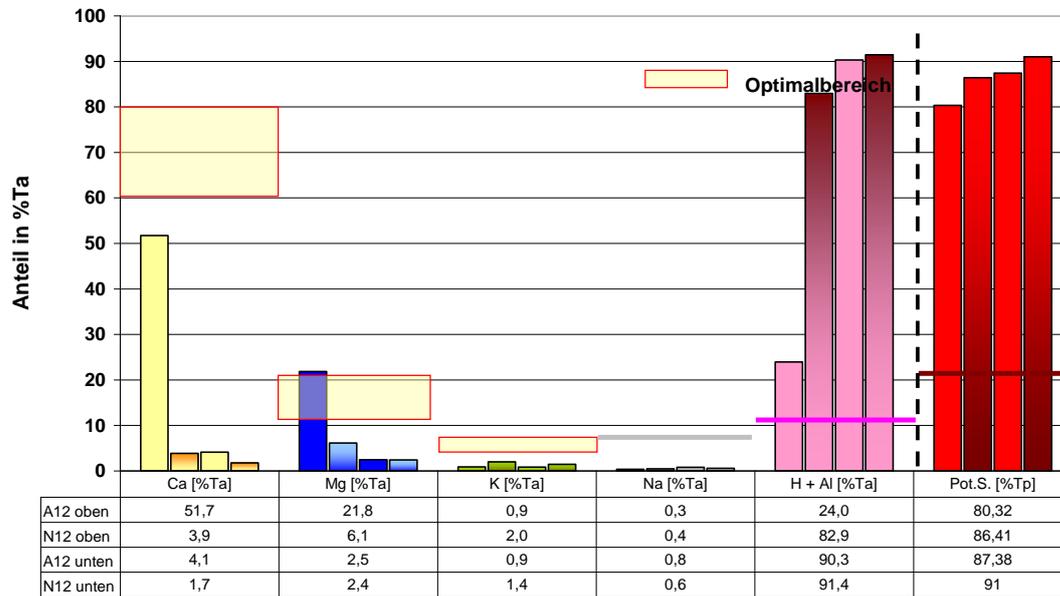


Abbildung 54: Vergleich der Zusammensetzung des Sorptionskomplexes (A12-N12)

Tabelle 35: Zusammensetzung der Bodenlösung in mg/l (A12-N12)

Nährstoff	A12 oben	N12 oben	A12 unten	N12 unten
Ca	7	2	2	1
Mg	3	1	1	1
K	0	1	0	0
Na	1	1	1	1
NH4-N	0	0	0	0
NO3-N	0	0	1	1
PO4	0	0	0	0
SO4	7	3	6	3
Cl	1	1	1	1
Al	1,5	1,8	1,5	0,8
Fe	1,4	1,8	1,1	0,3
Mn	0,01	0,05	0,03	0,05
B	0,03	0,03	0,03	0,03
Zn	0,04	0,06	0,04	0,03
Cu	0,01	0,01	0,00	0,00
Si	5,0	4,5	7,0	5,0
mol Ca/Al	0,175 / 0,055	0,05 / 0,066	0,05 / 0,055	0,025 / 0,029

7.9 Ergebnisse der Winkelzählprobe

Das Datenmaterial wurde vom Personal des Habsburg-Lothring'schen Gutes Persenbeug erhoben.

Auf jeder gekalkten und nicht gekalkten Fläche wurden 4 Stichproben erhoben (WZP k=4).

Tabelle 36: Hauptergebnisse der Winkelzählprobe

	G/ha	N/ha	h	Kr%	dg	SDI
A1	33	413	26	43	32	611
A11	45	963	21	55	24	924
A12	37	362	27	48	37	651
A3	50	437	30	52	39	861
A4	29	325	26	51	34	525
A5	30	322	30	54	40	517
A7	41	443	24	49	34	735
A9	37	340	28	57	38	644
N1	52	675	25	40	31	968
N11	40	521	26	54	31	746
N12	44	443	27	47	36	779
N3	26	202	30	60	41	437
N4	45	414	31	38	37	783
N5	28	172	33	54	46	450
N6	49	486	32	49	37	863

Wobei G/ha die Grundfläche je Hektar in m², N/ha die Anzahl der Bäume je Hektar, h die mittlere Höhe in Meter, Kr% das mittlere Kronenprozent, dg der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes und SDI der Stand Density Index nach Reinecke (1933) sind.

Tabelle 37: Vergleich der biometrischen Werte der Probeflächen

		G/ha	N/ha	h	Kr%	dg	SDI
Gekalkte Flächen	Mittelwert	39	455	26	50	35	702
Ungekalkte Vergleichsflächen	Mittelwert	41	413	29	49	37	716
Gekalkte Flächen	Standardabweichung	8	199	3	5	5	149
Ungekalkte Flächen	Standardabweichung	9	164	3	8	5	186

Wobei G/ha die Grundfläche je Hektar in m², N/ha die Anzahl der Bäume je Hektar, h die mittlere Höhe in Meter, Kr% das mittlere Kronenprozent, dg der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes und SDI der Stand Density Index nach Reinecke (1933) sind.

7.10 Erhebungsschlüssel

Probefl. Nr.	WZP-Nr.	Exposition	Gras	Vja	Vjt	Vjh	vbfi	vbta	Vjbeurt	Baum Nr.	Bohrkernnummer	Kilo-Ohm	BHD	mep	Azi	Distanz	Baumart	Bestandeschicht	Vitalität	Schaftgüte	Kronenlänge	Nadelverlust	ohne Schäden	Splitter	Wipfelbruch	Rückeschäden	Frost	Schälschäden	Schlägerungsschäden	Pilzschäden	Insektenbefall	Sonst. Schaden	Baumhöhe	Höhe Kronenansatz
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	1		280	65	31	2	Fi	1	2	5	2	0											26,5	15	
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	2		308	54	100	3	Fi	1	2	5	2	0											26,5	15	
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	3	A1W1	15	370	37	157	7	Fi	1	2	6	2	0				2						26,5	15	
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	4		325	48	170	1,9	Fi	1	2	6	2	0											26,5	15	
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	5		285	63	183	4,9	Fi	1	2	5	2	0											26,5	15	
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	6	A1W2	10	370	37	265	3,8	Fi	1	2	6	2	0										26,5	15	
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	7		320	50	312	4,2	Fi	1	2	5	2	0											26,5	15	
A1	A1W	0	2	2	1	2	0	0	0	8	A1W3	13	335	45	338	3,4	Fi	1	2	5	2	0										26,5	15	

Restliche Baummerkmale, sofern sie nicht selbsterklärend sind, siehe nachfolgende Tabelle.

Baummerkmale:

<i>JUFRO</i>	
<u>Bestandesschicht</u>	
Oberschicht	1
Mittelschicht	2
Unterschicht	3
<u>Vitalität</u>	
Kräftig	1
Normal	2
Schwach	3
<u>Schaftgüte</u>	
Hochwertig (A-Furnier)	4
Normal (B, C Qualität)	5
Geringwertig (unter 50% Blochh.)	6
<u>Kronenlänge</u>	
Langkronig (> 1/2 Baumlänge)	4
Mittelkronig (1/2 bis 1/4 Bauml)	5
Kurzkronig (< 1/4 Baumlänge)	6

<i>Nadelverlust</i>	
0 bis 10 %	0
11 bis 25%	1
20 bis 60%	2
61 +	3
Abgestorben	4

<i>Baumschäden</i>	
Ohne Schaden	0
Splitter	1
Wipfelbruch	2
Rückeschäden	3
Frost	4
Schälschaden	5
Lagerungsschaden	6
Wegbauscha-den	7
Schlägerungsschaden	8
Pilzscha-den	9
Steinschlag	10
Insektenbefall	11
Sonst. Schaden (Blitz)	12

8 Literatur

ANDERL, M. et al., Klimaschutzbericht 2009, Umweltbundesamt, Wien.

[online] URL: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0226.pdf>,
01.02.2012

BÄCK, M. et al., Deckungsbeiträge für die Betriebsplanung 2008, BMLFUW, Wien.

[online]URL:

http://www.agraroekonomik.at/fileadmin/download/Deckungsbeitraege_und_Daten_2008.pdf;
22.02.2012

EISENHUT; M., 1982: Bodenfibel. Leopold Stocker Verlag, Graz-Stuttgart.

FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ, 2006: Richtlinien für die sachgerechte Düngung, Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft, 6.Auflage. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. [online] URL: http://oebg.boku.ac.at/files/rl_sgd.pdf,
01.02.2012

FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT und BODENSCHUTZ , 2001: Waldbodensanierung (BMLFUW)

FUCHS, G., und FUCHS W., 1986: Geologische Karte der Republik Österreich. Blatt 36 Ottenschlag. Geologische Bundesanstalt, Wien.

HELLBERG-RODE, G., 2004. Projekt Hypersoil, Entwicklung einer hypermedialen Lern-und Arbeitsumgebung zum Thema „Boden“ im Unterricht, Westfälische Wilhelms-Universität Münster. [online] URL: <http://hypersoil.uni-muenster.de/0/00.htm>, 01.02.2012

HUSZ, G., 2002: Vererdung von Abfallstoffen, Band I: Bodenwissenschaftliche Grundlagen für die Vererdung und Anwendung von Erden.

[online] URL: www.oeko-datenservice.com, 01.02.2012

KAMMLEITNER, J., 1988: Ertragskundliche Auswertung alter Kalkungsflächen aus dem Jahr 1951. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien, 87. Zusammenfassung (gekürzt).

KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGER, G., 1994: Bodenkunde. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

LEITGEB; E., 2000: Bodenkunde für Ökologen, Studienblatt zur Vorlesung „Bodenkunde für Ökologen“. Institut für Forstökologie, Forstliche Bundesversuchsanstalt.

[online] URL:http://bfw.ac.at/300/pdf/Vorlesung_Bodenkunde.pdf, 01.02.2012

MÜHR, B., 2011: Klimadiagramme weltweit.

[online] URL:http://www.klimadiagramme.de/GMA_neu/Europa/Oesterreich/gutenbrunn.html, 01.02.2012

Ohne Verfasser (HLGP), 2011: Kalkungen 2011. Habsburg-Lothring'sches Gut Persenbeug.

[e-mail] ch.haeusler@habsburg.at, 29.6.2011

Ohne Verfasser (BFW): Einführung. Die Aufgabe der Bodenkartierung. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien.

[online] URL: http://bfw.ac.at/300/pdf/Einfuehrung_Bodenkartierung.pdf, 01.02.2012

Ohne Verfasser(Land NÖ): NÖ Atlas 3.0. Land Niederösterreich, Abteilung für Hydrologie und Geoinformation.

[online]:

[http://www.intermap1.noel.gv.at/webgisatlas/\(S\(mgxkz42a30gr34ealo0blw55\)\)/init.aspx?karte=atlas_bh](http://www.intermap1.noel.gv.at/webgisatlas/(S(mgxkz42a30gr34ealo0blw55))/init.aspx?karte=atlas_bh), 01.02.2012

Ohne Verfasser (USDA): Soilprofile. US Department of Agriculture.

[online] URL: <http://soils.usda.gov/education/resources/lessons/profile/profile.jpg>, 01.02.2012

ÖNORM S2122-1, 2004: Erden aus Abfällen. Teil 1: Fraktionierte Analyse – Untersuchungsmethoden. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM S2122-2, 2004: Erden aus Abfällen. Teil 2: Bewertung auf Basis der fraktionierten Analyse. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL; P., 1992: Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL, P. 2010: Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

SCHROEDER, D., 1992: Bodenkunden in Stichworten. 5. Auflage, Borntraeger, Berlin-Stuttgart.

SZEDNYI, I., 2000: Gegenüberstellung der Entwicklung der Emissionen und Immissionen saurer Luftschadstoffe sowie der Waldzustände Österreichs und der Nachbarländer Österreichs. Diplomarbeit, Technische Universität Wien.

[online] http://bfw.ac.at/600/pdf/1518_01.pdf, 01.02.2012

UMWELTBUNDESAMT 1998: Umweltsituation in Österreich, Fünfter Umweltkontrollbericht. Wien.

UNTERFRAUNER, H., 2007: Ökologische Bodenbewertung Wald. Ökologische Bodenbewertung – Musteranalyse Wald.

[Online] <http://www.bowasan.at>, 01.02.2012

UNTERFRAUNER, H., 2011: Bodenkundliche Beschreibung.

[e-mail] h.unterfrauner@bowasan.at, 05.12.2012