



## Nitratausträge unter Wald

Untersuchungen auf Standorten mit  
hohen luftbürtigen Stickstoffeinträgen



Niedersachsen



# Grundwasser

**Band 9**

Niedersächsischer Landesbetrieb für  
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

## Nitratausträge unter Wald

Untersuchungen auf Standorten mit  
hohen luftbürtigen Stickstoffeinträgen



**Niedersachsen**

Herausgeber:  
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

Projektkoordination:  
Hubertus Schültken, NLWKN Betriebsstelle Hannover-  
Hildesheim

Redaktion:  
NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim  
Petra Hannig  
Hans-Christian von Korn  
Hubertus Schültken

Projektbearbeitung:  
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt  
Dr. Balázs Horváth  
Dr. Karl Josef Meiwes  
Dr. Henning Meesenburg  
Jörg Ackermann

Bearbeitung Titelseite:  
Peter Schader, NLWKN-Direktion, Hannover-Hildesheim  
Titelphoto: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

1. Auflage 2010, 350 Ex.

Schutzgebühr: 5 € zzgl. Versandkostenpauschale

Bezug:  
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küsten- und Naturschutz (NLWKN) – Naturschutzinformation –  
Postfach 91 07 13, 30427 Hannover  
E-Mail: [naturschutzinformation@nlwkn-h.niedersachsen.de](mailto:naturschutzinformation@nlwkn-h.niedersachsen.de)  
fon: 0511/3034-3305  
fax: 0511/3034-3501  
[www.nlwkn.de](http://www.nlwkn.de) > Service > Veröffentlichungen/Webshop

# Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                                                                 |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|       | Abbildungsverzeichnis.....                                                                                      | 4  |
|       | Tabellenverzeichnis.....                                                                                        | 5  |
|       | Abkürzungsverzeichnis.....                                                                                      | 6  |
|       | Erläuterungen zur Statistik .....                                                                               | 6  |
|       | Vorwort.....                                                                                                    | 7  |
| 1     | Einleitung und Zielsetzung .....                                                                                | 8  |
| 2     | Untersuchungskonzept.....                                                                                       | 11 |
| 3     | Untersuchungsstandorte .....                                                                                    | 11 |
| 4     | Bodenprobenahme und -untersuchung .....                                                                         | 12 |
| 5     | Statistische Auswertung .....                                                                                   | 13 |
| 6     | Ergebnisse.....                                                                                                 | 14 |
| 6.1   | Gemessene Nitratkonzentrationen im Bodenwasser .....                                                            | 14 |
| 6.2   | Nitratkonzentration im Sickerwasser in Abhängigkeit von<br>Bestandeseigenschaften auf sandigen Standorten ..... | 15 |
| 6.3   | Nitrataustragsraten auf sandigen Standorten.....                                                                | 18 |
| 6.3.1 | Zusammenhänge zwischen Stickstoffvorräten<br>im Boden und Nitratversickerung.....                               | 19 |
| 6.3.2 | Zusammenhänge zwischen Stickstoffmineralisation und<br>Nitratversickerung .....                                 | 21 |
| 6.4   | Nitrataustrag bei lehmigen Standorten .....                                                                     | 21 |
| 6.5   | Bedeutung der Kalkung für den Nitrataustrag .....                                                               | 22 |
| 6.6   | Bedeutung alter Schlagabraumwälle für den Nitrataustrag .....                                                   | 23 |
| 6.7   | Bedeutung historisch alter Waldstandorte für den Nitrataustrag .....                                            | 24 |
| 7     | Karten des Nitrataustragsrisikos .....                                                                          | 27 |
| 8     | Fazit und Ausblick.....                                                                                         | 31 |
| 9     | Literatur.....                                                                                                  | 32 |



## Abbildungsverzeichnis

|          |                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1:  | Vereinfachtes Schema des Stickstoffkreislaufes mit Darstellung der Stickstoffflüsse.....                                                                                                                                   | 8  |
| Abb. 2:  | Räumliche Verteilung des atmosphärischen Stickstoffeintrags in Niedersachsen im Jahr 1999.....                                                                                                                             | 9  |
| Abb. 3:  | Nitratkonzentrationen im Bodenwasser in 60 – 90 cm Tiefe an den Probenahmepunkten der Bodenzustandserhebung 1990 unter Wald .....                                                                                          | 10 |
| Abb. 4:  | Schematische Darstellung des Untersuchungskonzeptes.....                                                                                                                                                                   | 11 |
| Abb. 5:  | Räumliche Lage der Probenahmepunkte.....                                                                                                                                                                                   | 12 |
| Abb. 6:  | Untersuchungsschema zur Bodenbeprobung.....                                                                                                                                                                                | 13 |
| Abb. 7:  | Häufigkeitsverteilung der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser im Untersuchungsgebiet Cloppenburg. ....                                                                                                                   | 14 |
| Abb. 8:  | Tiefenverlauf der Nitratkonzentration in ausgewählten Waldbeständen.....                                                                                                                                                   | 15 |
| Abb. 9:  | Mittlere Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung in 1-5 m Tiefe (Mittelwerte + Standardabweichung) im Untersuchungsgebiet Cloppenburg im Herbst 2004. ....                                                                | 16 |
| Abb. 10: | Mittlere Nitratkonzentrationen im Bodenwasser unter Douglasie (pink), Eiche (gelb) und Kiefer (grau) in Abhängigkeit von der Bestandeshöhe.....                                                                            | 16 |
| Abb. 11: | Vergleich der mittleren Nitratkonzentration mit dem statistischen Modell berechneten und der 2005/2006 gemessenen Nitratkonzentrationen ( $\text{mg NO}_3/\text{l}$ ) im Untersuchungsraum Cloppenburg .....               | 17 |
| Abb. 12: | Nitrataustragsraten unter Jung- und Altbeständen von Douglasien, Eichen und Kiefern. (Mittelwerte und Standardabweichung) .....                                                                                            | 18 |
| Abb. 13: | Stickstoffvorrat im Auflagehumus und im Mineralboden (0-20 cm). (Mittelwerte und Standardabweichung des Gesamt-vorrates). ....                                                                                             | 19 |
| Abb. 14: | C:N-Verhältnis in der Humusauflage und im oberen (0-20 cm) Mineralboden. (Mittelwerte und Standardabweichung).....                                                                                                         | 20 |
| Abb. 15: | C:NH/B (C:NHumusauflage / C:NMineralboden) im Raum Cloppenburg (n = 50) und Góhrde (n = 77) (Mittelwerte und Standardabweichung). ....                                                                                     | 20 |
| Abb. 16: | Netto-Nitrifikation in der Humusauflage und im oberen Mineralboden (0-20 cm; gemessen bei 23 °C).....                                                                                                                      | 21 |
| Abb. 17: | Vergleich der mittleren, mit dem statistischen Modell von 2004 berechneten Nitratkonzentrationen und der gemessenen auf lehmigen Böden in Barnstorf.....                                                                   | 22 |
| Abb. 18: | Nitratgehalt im Boden in Fichtenbeständen kennzeichnen Standorte mit signifikant unterschiedlichen Nitratkonzentrationen .....                                                                                             | 22 |
| Abb. 19: | Beispiel für die Nitratkonzentrationen im Wall- und im „Zwischen-Wall-Bereich“ in einem Eichenbestand.....                                                                                                                 | 23 |
| Abb. 20: | Historisch alter Wald nach der Lecoq'schen Vermessung .....                                                                                                                                                                | 25 |
| Abb. 21: | Nitratkonzentrationen an historisch alten (haw) und historisch nicht alten (hnaW) Waldstandorten.....                                                                                                                      | 26 |
| Abb. 22: | Karte des Risikos bzw. der Wahrscheinlichkeit [%] der Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes für Nitrat von 50 $\text{mg NO}_3/\text{l}$ im Untersuchungsgebiet Cloppenburg, Reviere Augustendorf und Cloppenburg. .... | 29 |
| Abb. 23: | Karte des Risikos beziehungsweise der Wahrscheinlichkeit [%] der Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes für Nitrat von 50 $\text{mg NO}_3/\text{l}$ im Untersuchungsgebiet Cloppenburg, Revier Baumweg. ....            | 30 |

## Tabellenverzeichnis

|         |                                                                                                                                                                                                                            |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1: | Kenngroßen der untersuchten Waldbestände im Untersuchungsgebiet Cloppenburg. (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung) .....                                                                                                   | 12 |
| Tab. 2: | Mittlere Nitratkonzentrationen im Boden unter Schlagabraumwällen und im Zwischen-Wall-Bereich im Vergleich zur Nitratkonzentration im gesamten Waldbestand.....                                                            | 24 |
| Tab. 3: | Wahrscheinlichkeiten [%] der Überschreitung der Nitratkonzentration von 50 mg NO <sub>3</sub> /l unter Waldbeständen im Untersuchungsraum Cloppenburg .....                                                                | 27 |
| Tab. 4: | Wahrscheinlichkeitsklassen der Überschreitung der Nitratkonzentration von 50 mg NO <sub>3</sub> /l .....                                                                                                                   | 27 |
| Tab. 5: | Risiko bzw. Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Nitrat-Trinkwassergrenzwertes von 50 mg NO <sub>3</sub> /l auf Waldflächen im Untersuchungsgebiet Cloppenburg .....                                              | 27 |
| Tab. 6: | Flächenanteile der Risikoklassen für Nitrataustrag in den niedersächsischen Forstämtern (NFA) im Raum Weser-Ems .....                                                                                                      | 28 |
| Tab. 7: | Flächenanteil in der Risikokarte für Nitrataustrag in den Niedersächsischen Forstämtern (NFA) im Raum Weser-Ems, dessen Wahrscheinlichkeitsklassen direkt auf Messungen, auf Interpolation und Extrapolation beruhen ..... | 28 |

# Abkürzungsverzeichnis

| Allgemeines           |                                                                               |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| EG                    | Europäische Gemeinschaft                                                      |
| EU                    | Europäische Union                                                             |
| NLWKN                 | Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz |
| NFA                   | Niedersächsisches Forstamt                                                    |
| LBEG                  | Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie                                   |
| TK 1 : 100 000        | Topographische Karte 1 : 100 000                                              |
| TrinkwV               | Trinkwasserverordnung                                                         |
| Einheiten             |                                                                               |
| °C                    | Grad Celsius                                                                  |
| cm                    | Zentimeter                                                                    |
| g                     | Gramm                                                                         |
| kg N /ha/a            | Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr                                      |
| kg N /ha              | Kilogramm Stickstoff pro Hektar                                               |
| g N/ha/h              | Gramm Stickstoff pro Hektar und Stunde                                        |
| mg NO <sub>3</sub> /l | Milligramm Nitrat pro Liter                                                   |
| km                    | Kilometer                                                                     |
| m                     | Meter                                                                         |
| mm                    | Millimeter                                                                    |
| m ü. NN               | Meter über Normal Null des Meeresspiegels                                     |
| t                     | Tonne                                                                         |

| Baumarten          |                                                                              |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Dgl                | Douglasie                                                                    |
| Ei                 | Eiche                                                                        |
| Ki                 | Kiefer                                                                       |
| Chemische Elemente |                                                                              |
| C                  | Kohlenstoff                                                                  |
| N; N <sub>2</sub>  | Stickstoff; molekularer Stickstoff                                           |
| N <sub>2</sub> O   | Distickstoffoxid, Lachgas                                                    |
| NO <sub>3</sub> -N | Nitrat-Stickstoff                                                            |
| NO <sub>3</sub>    | Nitrat                                                                       |
| NH <sub>4</sub>    | Ammonium                                                                     |
| NH <sub>3</sub>    | Ammoniak                                                                     |
| Nmin               | mineralischer Stickstoff im Bodenwasser (NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> ) |
| C:NH               | C : N – Verhältnis im Auflagehumus                                           |
| C:NB               | C : N – Verhältnis im Mineralboden                                           |
| C:NH/B             | C:N Auflagehumus dividiert durch C:N Mineralboden                            |
| 1 N KCl-Lösung     | 1 normale Kaliumchlorid-Lösung                                               |
| KCl                | Kaliumchlorid                                                                |
| Statistik          |                                                                              |
| n                  | Anzahl                                                                       |
| $\bar{x}$          | Mittelwert                                                                   |
| SD                 | Standardabweichung                                                           |

## Erläuterungen zur Statistik

### Varianzanalyse:

Varianzanalyse (ANOVA, **AN**alysis **Of** **VA**riance) ist ein Verfahren zur statistischen Analyse von Mittelwertsunterschieden. Mit der Varianzanalyse wird geprüft, ob bestimmte Faktoren (z.B. die Hauptbaumart) einen signifikanten Effekt auf eine untersuchte Variable (z.B. Nitratkonzentration im Sickerwasser) haben.

### Tukey HSD-Test:

Mit dem Mittelwertvergleich Tukey HSD-Test wird festgestellt, ob es signifikante Unterschiede der Mittelwerte einer untersuchten Variable (z.B. Nitratkonzentration im Sickerwasser) innerhalb eines Faktors (z.B. Hauptbaumart) mit mehreren Kategorien (z.B. Douglasie, Kiefer, Eiche) gibt.

### Lineare Regression:

In dem Verfahren der linearen Regression werden Werte einer Variablen (z. B. Nitratkonzentration im

Sickerwasser mit anderen Variablen (z.B. luftbürtiger Stickstoffeintrag oder C:N-Verhältnis in der Humusaufgabe) in Beziehung gesetzt.

### Standardabweichung, Standardfehler, Konfidenzintervall:

Statistische Maße für die Streuung der Einzelwerte um einen mittleren Wert.

### Statistische Signifikanz:

Die statistische Signifikanz gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der Unterschiede beispielsweise der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser unter verschiedenen Baumarten oder eine Beziehung zwischen zwei Größen (z.B. Nitratkonzentration im Sickerwasser und luftbürtiger Stickstoffeintrag) durch Zufall zustande kommen. Auf dem 5%-Signifikanzniveau beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass die Nitratkonzentrationen von der Baumart und nicht vom Zufall abhängen 95 %.

## Vorwort

Die Qualität des Grundwassers zu schützen ist ein umweltpolitischer Auftrag, der dem Land Niedersachsen durch die Wassergesetze und die EG-Wasserrahmenrichtlinie aufgegeben wurde.

Ziel der Wasserrahmenrichtlinie ist es grundsätzlich, die Qualität des Grundwassers zu erhalten oder zu verbessern. In Niedersachsen stellt das Nitrat hinsichtlich der Grundwasserqualität das Hauptproblem dar; der Zusammenhang mit der Landwirtschaft ist unbestritten. Dabei ist auch der Wald zu betrachten, der von Natur aus ein stickstoffarmes System ist. Über die Luft wird dieser mit Stickstoff angereichert; Überschüsse werden als Nitrat abgegeben, wenn die Speicherkapazität des Waldbodens überschritten ist.

Hohe Stickstoffeinträge aus der Luft werden in Niedersachsen insbesondere in der Region Weser-Ems gemessen. Die vorliegende Untersuchung hat zum Ziel, in der Region Weser-Ems das Risiko von „Nitratausträgen unter Wald“ über ein statistisches Modell zu beschreiben. Außerdem sollen die Steu-

ermechanismen des Nitrataustrages unter Wald herausgearbeitet werden, um die Möglichkeiten der Waldbewirtschaftung zur Vermeidung und Reduzierung der Nitratreinträge in das Grundwasser auszuloten.

Das Risiko von Nitratausträgen unter Wald wird in Auswertungskarten dargestellt. Die Karten stellen für Anwender in den Bereichen Wasserwirtschaft, Raumplanung, Forstwirtschaft oder in den Gebietskooperationen eine hilfreiche Planungsunterlage dar. Aus diesen lassen sich Maßnahmen zur Land- und Wasserbewirtschaftung ableiten. Letztendlich macht die Broschüre mit der Untersuchung des Nitrataustrages unter Wald deutlich, dass die Stickstoffemission im Raum Weser-Ems verringert werden muss.

### **Siegfried Popp**

Direktor des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz

# 1 Einleitung und Zielsetzung

In Niedersachsen stellt das Nitrat eines der Hauptprobleme hinsichtlich der Grundwasserqualität dar. Der Grenzwert für Nitrat im Trinkwasser gemäß Trinkwasserverordnung (TrinkwV) liegt bei 50 mg/l (TrinkwV, 2001). Dieses Qualitätsziel wird im oberflächennahen Grundwasser häufig überschritten. Der Haupteintrag von Nitrat erfolgt aus landwirtschaftlich genutzten Flächen als diffuser Eintrag ins Grundwasser. Unter Wald liegt der Nitrataustrag in der Regel deutlich niedriger als unter landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen (FÖRSTER, 1975; WIENHAUS et al. 2008). Dies unterstreicht die Notwendigkeit, die gering belasteten Grundwasserressourcen unter Wald zu schützen und genaue Kenntnisse zur Steuerung der Nitratausträge unter Wald vorzuhalten.

Dennoch sind auch unter Wald zum Teil höhere Nitratkonzentrationen im Sickerwasser zu beobachten (WIENHAUS et al. 2008). Der Grund dafür liegt in den regional zum Teil hohen bis sehr hohen luftbürtigen Stickstoffeinträgen in die Wälder. Seit einigen Jahrzehnten befinden sich die Stickstoffemissionen auf einem hohen Niveau. Als Quellen kommen Hochtemperaturprozesse z.B. in Automotoren infrage, in denen Stickoxide entstehen. Ferner stellen die Stallabluft aus der intensiven Viehhaltung sowie die Verwertung der Gülle auf landwirtschaftlich genutzten Flächen eine Quelle für Ammoniakemissionen dar. Der Wald ist ein nahezu idealer Filter für diese Stickstoffverbindung. Dies hat zwei Gründe: Zum einen filtern die Wälder infolge ihrer Höhe und der unregelmäßigen Oberfläche des Kronendaches große Mengen Stickstoff aus der Luft. Zum anderen stellt der saure Auflage-

humus auf dem Waldboden eine wirksame Senke für das basisch wirkende Ammoniakgas dar.

Im Wald ist der Stickstoff unter Reinfluftbedingungen in der Regel ein Mangellement, und es kommt in der Regel kaum Nitrat im Sickerwasser vor. Dies liegt daran, dass der Stickstoff im Gegensatz zu anderen Nährstoffen nicht in den Bodenmineralen vorkommt und durch Verwitterung freigesetzt wird. Unter Bedingungen von Stickstoffmangel ist Ammonium die zentrale anorganische Stickstoffform. Sobald aus dem Humus organisch gebundener Stickstoff zu Ammonium mineralisiert worden ist (Abb. 1, Ziffer 1 - Ammonifikation), wird er von Mikroorganismen oder von den Pflanzen aufgenommen (Abb. 1, Ziffer 2 - N-Aufnahme). Deshalb kann kein Nitrat gebildet werden. Erst wenn in dem Kreislauf von Mineralisation von organischem Stickstoff und der Ammoniumaufnahme mehr Ammonium gebildet wird als von den Pflanzen und Mikroorganismen aufgenommen werden kann, kann sich Ammonium im Boden anreichern und als Ausgangsprodukt für die mikrobielle Nitratbildung zur Verfügung stehen (Abb. 1, Ziffer 3 - Nitrifikation). Das Nitrat wiederum wird von den Pflanzen und Mikroorganismen aufgenommen (Abb. 1, Ziffer 4 - N-Aufnahme). Erst wenn deren Bedarf gedeckt ist, verbleibt im Boden freies Nitrat, das mit dem Sickerwasser ausgetragen wird (Abb. 1, Ziffer 5 - Nitrat-Versickerung). Daneben wird Nitrat unter sauerstoffarmen Bedingungen reduziert und gasförmig an die Atmosphäre abgegeben (Abb. 1, Ziffer 6 - Denitrifikation). Dabei wird unter anderem das klimawirksame Lachgas ( $N_2O$ ) gebildet.

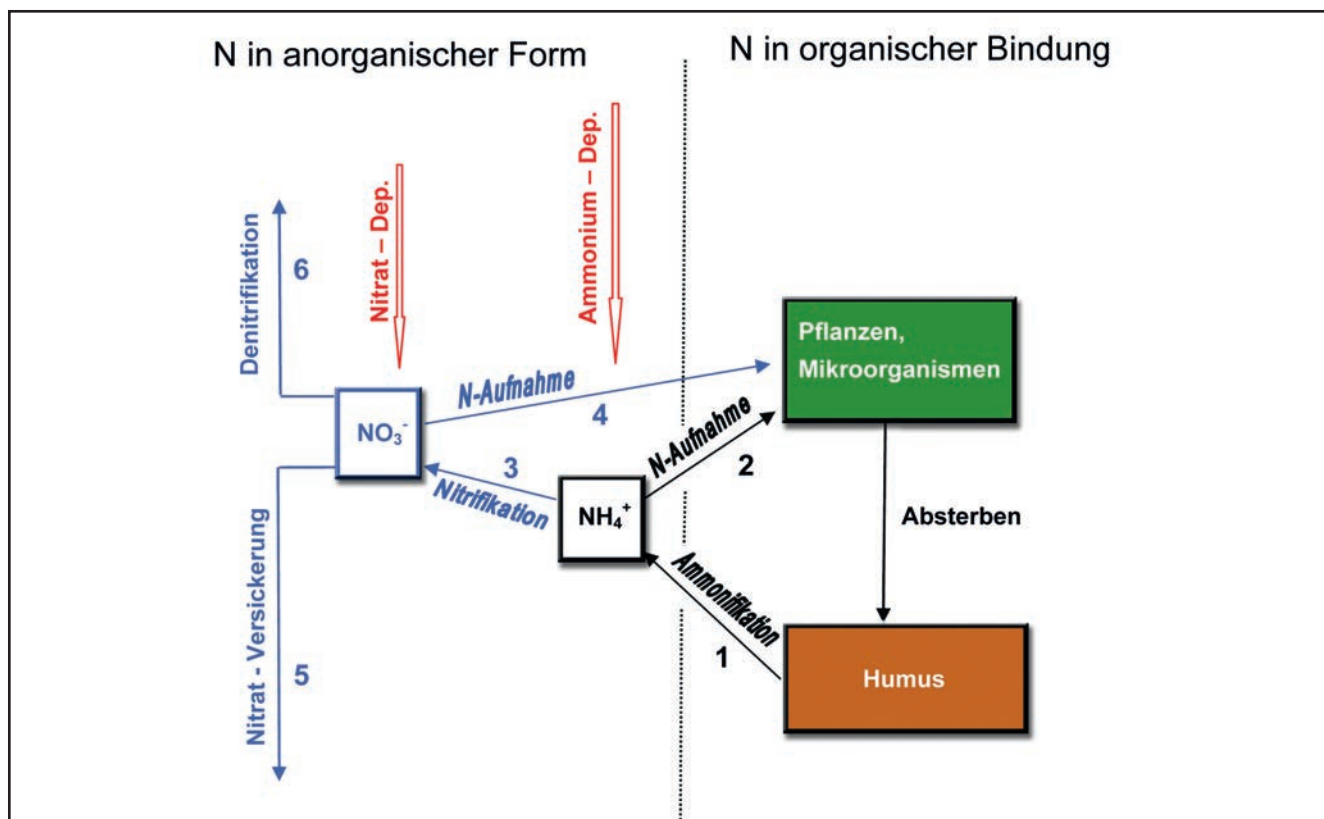


Abb. 1: Vereinfachtes Schema des Stickstoffkreislaufes mit Darstellung der Stickstoffflüsse, die in einer Situation mit hohen luftbürtigen Stickstoffeinträgen besonders hohe Raten aufweisen (Nr. 3 – 6).

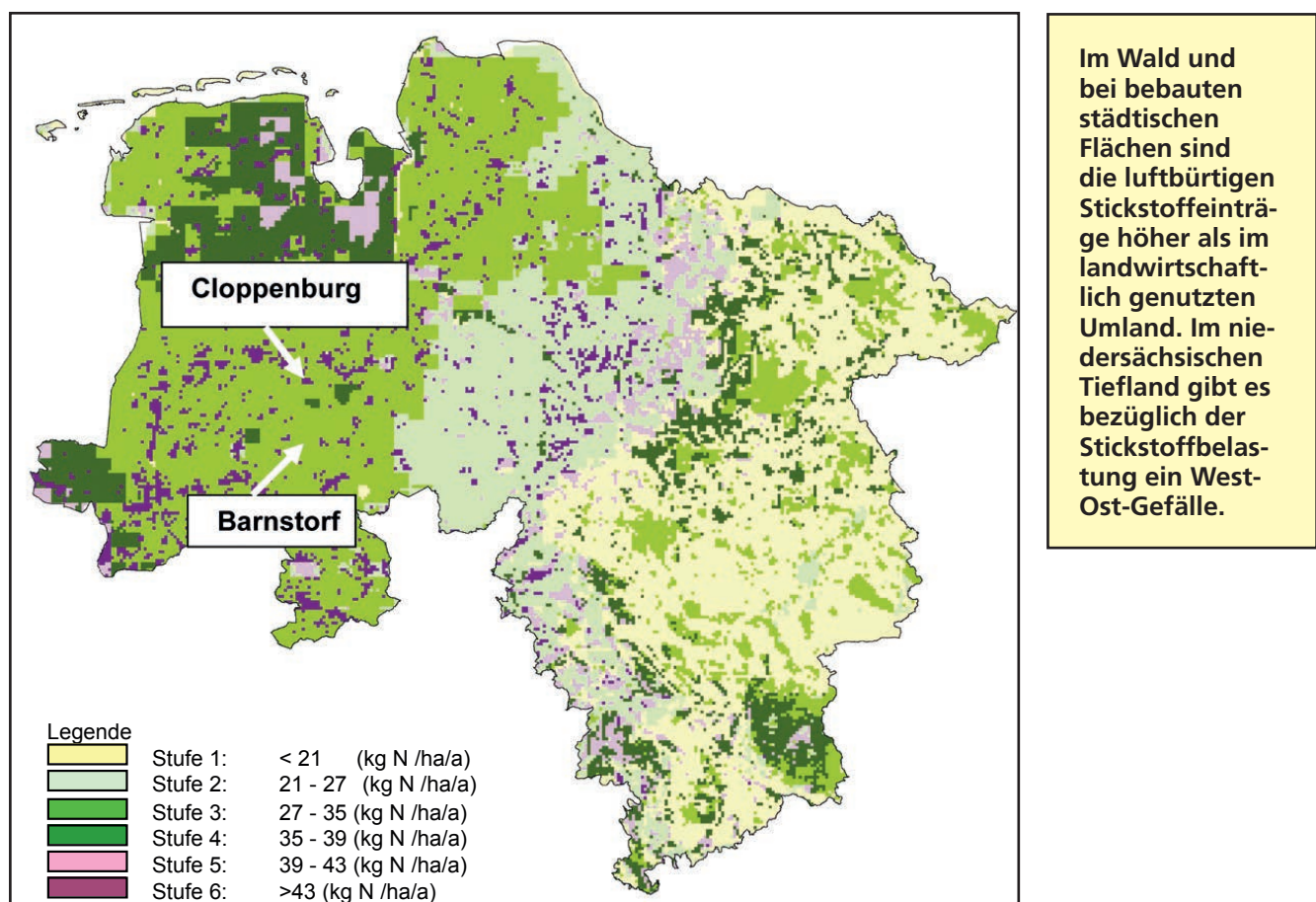


Nitratausträge mit dem Sickerwasser treten auf, wenn die Ammonium- und Nitrataufnahme durch die Organismen geringer sind als das Ammonium- und Nitratangebot. Das heißt, wenn die Pflanzenaufnahme und das Angebot durch Mineralisation und Nitrifikation zeitlich nicht deckungsgleich sind. Auch bei Stickstoffmangelsituationen kann dies kurzfristig vorkommen. Wenn jedoch einem System laufend Stickstoff zugeführt wird, wird allmählich die Aufnahmekapazität, d. h. der Einbau von Stickstoff in organische Substanz und dessen Speicherung überschritten, so dass die Phasen des Stickstoffüberschusses und damit des Nitrataustrages häufiger und länger auftreten; im Extremfall wird ständig Nitrat mit dem Sickerwasser ausgetragen. Dieser Zustand wird auch als Stickstoffsättigung bezeichnet.

In Niedersachsen gibt es eine Reihe von Hinweisen, die auf eine zunehmende Stickstoffsättigung der Wälder deuten. Die Messungen zur Stickstoffdeposition in die Wälder, die im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtungsflächen des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) bzw. der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt und des Depositionsmessnetzes des NLWKN durchgeführt werden, sowie die Modellierungen des Umweltbundesamtes weisen für Niedersachsen Einträge aus, die deutlich über dem Bedarf der Wälder liegen (Abb. 2). Die Angaben zum Stickstoffeintrag in die Wälder in hoch belasteten Gegenden reichen von 30 – 80 kg N/ha/a. Diese Werte liegen deutlich

über dem Bedarf der Wälder für das Wachstum des Holzes, der bei 5 – 15 kg N/ha/a liegt. Deshalb ist zu erwarten, dass in einer solchen Eintragsituation auch unter Wald mit zunehmenden Nitratausträgen zu rechnen ist.

Neben den direkten Messungen des Stickstoffeintrages gibt es verschiedene Indikatoren, die auf eine hohe luftbürtige Stickstoffzufuhr und eine zunehmende Sättigung der Wälder mit Stickstoff hinweisen. So äußert sich ein hoher Stickstoffeintrag in erhöhten N-Gehalten in den Blättern bzw. Nadeln (MINDRUP et al. 2001). Das hohe Stickstoffangebot hat wesentlich dazu beigetragen, dass sich der Holzzuwachs der Wälder in den letzten Jahrzehnten um ca. 20 – 30 % erhöht hat (PRETSCH, 1996). Ferner bilden sich bei höherem Stickstoffangebot bei der Zersetzung abgestorbener pflanzlicher Substanz vermehrt schwer abbaubare organische Verbindungen, mit der Folge, dass sich der organische Stickstoff-Vorrat im Boden bzw. im Auflagehumus erhöht (BERG, 2000; MEIWES et al. 2002; BERG u. MCCLAUGHERTY, 2003). Die sich mit der Zeit verengenden Verhältnisse von Kohlenstoff zu Stickstoff (C:N) im Auflagehumus, wie sie von ZEJSCHWITZ (1989) und BUBERL et al. (1994) beobachtet wurden, geben Hinweise auf veränderte Umsätze der organischen Bodensubstanz und des Stickstoffs. Bei einer Verengung des C:N-Verhältnisses und gleich bleibenden C-Vorräten wird Stickstoff gespeichert.



**Abb. 2:** Räumliche Verteilung des atmosphärischen Stickstoffeintrags in Niedersachsen im Jahr 1999  
Untersuchungsgebiete Cloppenburg und Barnstorf

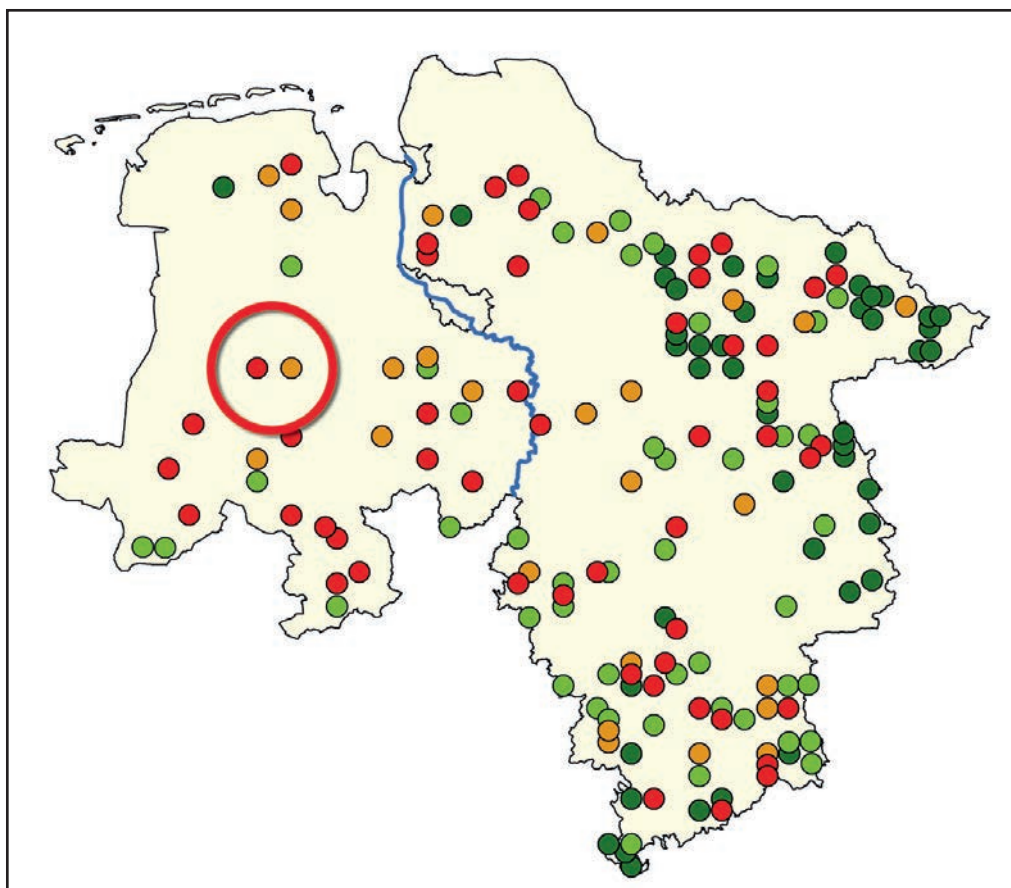
Ferner gibt es Messungen zu den Nitratausträgen im Sickerwasser, die etwas zum Sättigungsgrad der Wälder aussagen und gleichzeitig auf Belastungen des oberflächennahen Grundwassers hindeuten. Auf einigen forstlichen Boden-Dauerbeobachtungsflächen wird im Sickerwasser Nitrat gefunden (BORKEN und MATZNER, 2004). Auch die Bodenzustandserhebung von 1990 hat gezeigt, dass in Niedersachsen unter Wald vermehrt Nitrat im Sickerwasser auftritt (Abb. 3). Die Nitratkonzentrationen weisen eine hohe Streuung auf, insgesamt betrachtet ist der Anteil hoher Nitratwerte im westlichen Tiefland höher als östlich der Weser.

Ziel der hier vorliegenden Studie ist es, in der Region Weser-Ems:

- das Risiko von erhöhten Nitratausträgen unter Wald mit Hilfe eines statistischen Modells zu beschreiben,
- dieses Risiko beispielhaft in Karten darzustellen,
- die Steuergrößen für den Nitrataustrag zu benennen, um Hinweise für die Bewirtschaftung der Wälder geben zu können.

Unter natürlichen Bedingungen (ohne Belastung durch menschliche Aktivitäten) ist der Stickstoff im Wald ein Mangel-element, und es gibt keinen Nitrataustrag mit dem Sickerwasser. Bei hoher Stickstoffdeposition sättigt sich der Wald allmählich auf. Die zunehmende Stickstoffverfügbarkeit äußert sich in verändertem Wachstum der Bäume, veränderten mikrobiellen Stickstoffumsätzen im Boden und letztlich in der Abgabe von Stickstoff als Nitrat im Sickerwasser und in Form von Gas (z.B. Lachgas, das zur Erwärmung der Atmosphäre beiträgt).

In der vorliegenden Untersuchung wird das Risiko von erhöhten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser unter Wald im Raum Weser-Ems beschrieben und ein statistisches Modell hierfür entwickelt. Darüber hinaus werden Risikokarten des Nitrataustrages exemplarisch erstellt.



Westlich der Weser (Linie Verden – Nienburg) sind die Nitratkonzentrationen in den Böden unter Wald insgesamt höher. In diesem Bereich liegt das Untersuchungsgebiet Cloppenburg (roter Kreis).

Abb. 3: Nitratkonzentrationen im Bodenwasser in 60 – 90 cm Tiefe an den Probenahmepunkten der Bodenzustandserhebung 1990 unter Wald. (dunkelgrün < 2, grün 2 – 13, orange 13 – 26, rot > 26 mg NO<sub>3</sub>/l; blau: Weser; nach Büttner 1997)

## 2 Untersuchungskonzept

Das Untersuchungsziel, die Beschreibung des Risikos von Nitratausträgen, lässt sich am sichersten erreichen, wenn man an möglichst vielen Orten das Nitrat im Bodenwasser untersucht und die Sickerwasserraten ermittelt. Wegen der hohen Kosten ist dies jedoch kein gangbarer Weg. Um für ein größeres Gebiet oder eine Region Aussagen über die Nitratausträge machen zu können, muss man auf leicht ermittelbare Faktoren (Baumart, Bestandesalter, Bodeneigenschaften) zurückgreifen, die nach einer statistischen Bewertung als Eingangsgroßen für das statistische Modell zum Nitrataustrag dienen (siehe Abb. 4). Das Modell besteht aus der statistischen Beziehung zwischen dem Nitrat im Bodenwasser und den genannten Faktoren.

In der vorliegenden Untersuchung wird das Risiko des Nitrataustrages unter Wald für einen Ausschnitt der Region Weser-Ems, die Umgebung von Cloppenburg, beschrieben.

Um flächenhafte Informationen für den Wald in diesem Gebiet zu bekommen, wird auf vorliegende Flächendaten wie Baumart, Bestandesalter oder -höhe sowie auf die forstliche Standortskartierung zurückgegriffen. Beispielhaft werden Probenahmepunkte in Waldbeständen mit unterschiedlichen Baumarten, verschiedenem Bestandesalter und den wichtigsten vorkommenden Böden bzw. Standorttypen auf Nitrat untersucht. Dazu werden Nitrattiefenprofile bis in 5 m Tiefe entnommen und auf die Nitratkonzentration im Bodenwasser untersucht und dabei nach statistischen Beziehungen zwischen Nitratkonzentration und Waldbestand bzw. Bodeneigenschaften gesucht. Das Nitrataustragsrisiko wird aus flächendeckend vorhandenen Bestandesparametern abgeschätzt und das Ergebnis in Karten dargestellt.

Neben den Bodeneigenschaften, die flächenhaft in der forstlichen Standortskarte beschrieben sind, wird an den Probenahmepunkten auch nach Beziehungen zwischen Nitratkonzentration und anderen Bodenkenngroßen wie Stickstoffvorrat oder Stickstoffmineralisierung gesucht um zu prüfen, ob und welche Ansatzpunkte es zur Feinsteuerung des Nitrataustrages unter Wald gibt.

## 3 Untersuchungsstandorte

Als Hauptuntersuchungsgebiet wurde der Raum Cloppenburg ausgewählt, in dem das Wasserwerk Thülsfelde liegt. Entsprechende forstliche Flächendaten wurden vom Niedersächsischen Forstplanungsamt für das Forstamt Ahlhorn zur Verfügung gestellt. Diese Daten beinhalten Informationen zu den Indikatoren Baumarten, Bestandesalter und -höhe sowie forstlicher Standortstyp als umfassendes Bodenmerkmal (siehe Abb. 4). Die luftbürtigen Stickstoffeinträge in die Wälder im Raum Cloppenburg betrugen im Referenzjahr 1999 > 43 kg N/ha/a (Abb. 2, GAUGER et al., 2002).

Alle Standorte befinden sich im niedersächsischen Tiefland. Die Ausgangssubstrate der Böden sind saaleiszeitlichen Ursprungs, die während der Weichseleiszeit periglazial überprägt wurden.

Das Untersuchungsgebiet Cloppenburg im Niedersächsischen Forstamt Ahlhorn gehört naturräumlich zur Ems-Hunte-Geest (Abb. 2). Es liegt zwischen ca. 30 und 50 m über NN. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 820 mm, die mittlere Jahrestemperatur bei 9 °C. Die Böden bestehen vorwiegend aus Sanden und verlehnten Sanden.

Der Standort Barnstorf, ebenfalls im Gebiet des Niedersächsischen Forstamtes Ahlhorn, befindet sich im Landkreis Vechta (Abb. 2). Hinsichtlich des Substrates unterscheiden sich die Flächen in Barnstorf von denen im Untersuchungsgebiet Cloppenburg. In Barnstorf treten Lehme und lehmige, schluffige, schlickige Feinsande auf.

Im Untersuchungsgebiet Cloppenburg wurden in jungen und alten Kiefern-, Douglasien-/Fichten- und Eichenbeständen Bodenproben entnommen und auf Nitrat untersucht. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Waldbestände standen zwei Gesichtspunkte im Vordergrund:

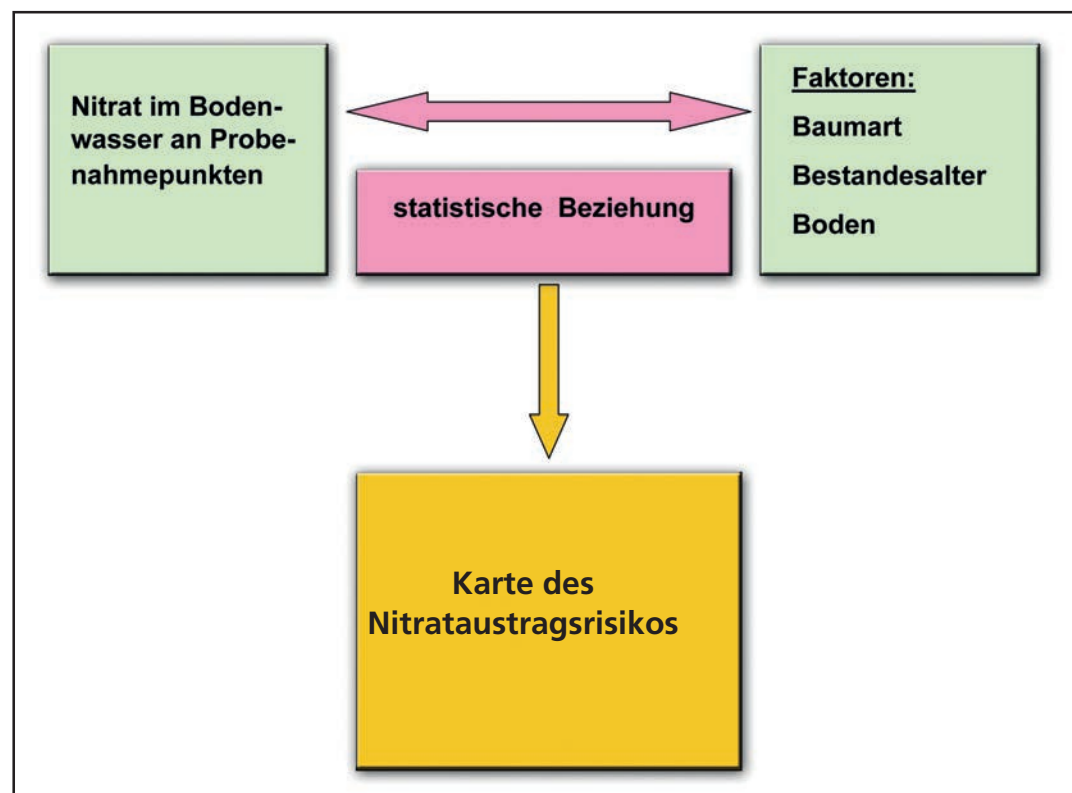


Abb. 4: Schematische Darstellung des Untersuchungskonzeptes



1. Die untersuchten Baumarten und Standorte sollten einen möglichst hohen Anteil der Wälder im Niedersächsischen Forstamt Ahlhorn und in der Region Weser-Ems repräsentieren.
2. Es sollten die Bestände untersucht werden, die laut Hinweisen aus der Literatur sehr gering und sehr stark mit Stickstoff belastet und gesättigt sind, um hinsichtlich der Nitratausträge ein möglichst breites Spektrum an Waldbeständen zu erfassen. Es wurde erwartet, dass junge Bestände weniger stark mit Stickstoff belastet sind als alte.

**Tab. 1: Kenngrößen der untersuchten Waldbestände im Untersuchungsgebiet Cloppenburg (Mittelwert ( $\bar{x}$ )  $\pm$  Standardabweichung (SD)).**

| Waldbestand |       | Anzahl der Waldbestände | Alter [Jahr] |            | Höhe [m]  |           |
|-------------|-------|-------------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| Baumart     | Alter |                         | $\bar{x}$    | SD         | $\bar{x}$ | SD        |
| Douglasie   | jung  | 11                      | 21           | $\pm 4,5$  | 16,0      | $\pm 3,3$ |
|             | alt   | 7                       | 57           | $\pm 10,6$ | 25,3      | $\pm 3,7$ |
| Eiche       | jung  | 6                       | 22           | $\pm 3,3$  | 10,0      | $\pm 0,8$ |
|             | alt   | 5                       | 115          | $\pm 8,4$  | 28,4      | $\pm 4,6$ |
| Kiefer      | jung  | 8                       | 22           | $\pm 4,9$  | 10,9      | $\pm 2,5$ |
|             | alt   | 13                      | 58           | $\pm 23,2$ | 19,2      | $\pm 3,2$ |

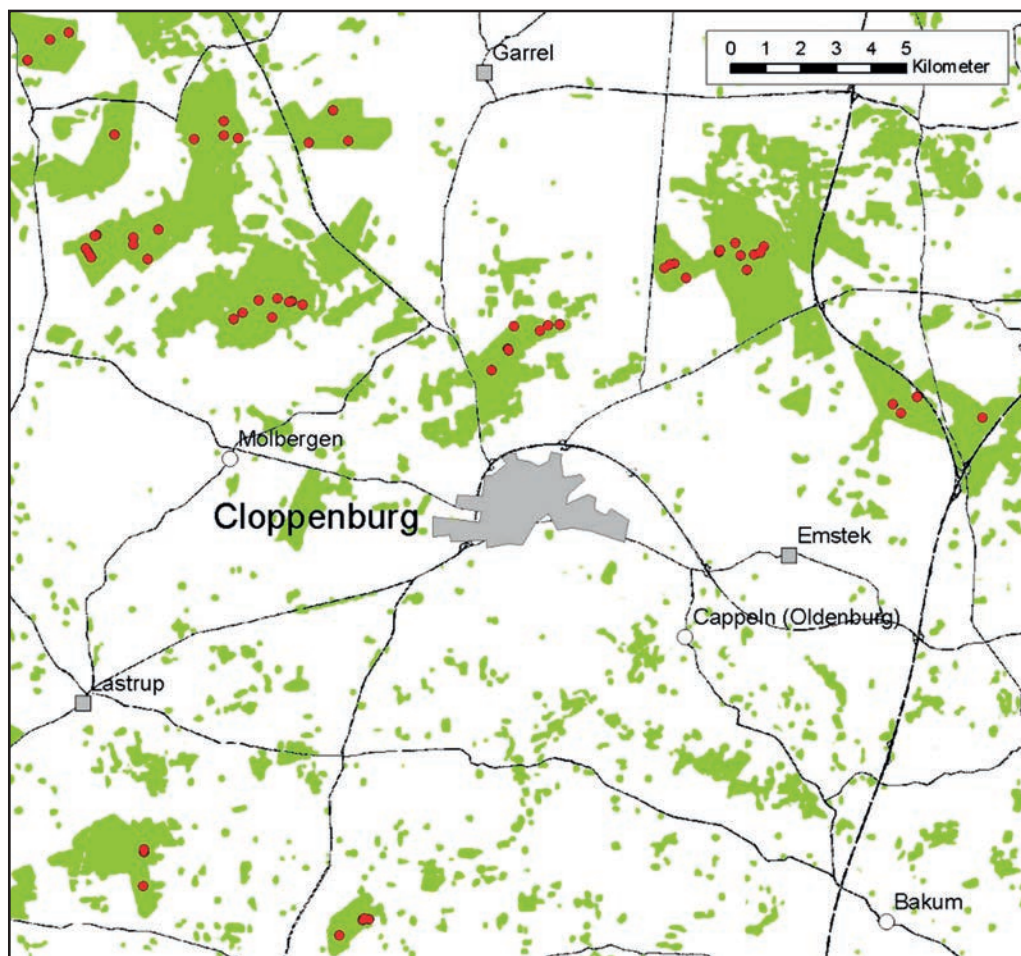
## 4 Bodenprobenahme und -untersuchung

Die räumliche Lage der Probenahmepunkte richtete sich nach dem Vorkommen von Baumart, Bestandesaltersgruppe und Standortstyp. Dementsprechend waren die Probenahmepunkte nicht gleichmäßig verteilt, sondern konzentrierten sich auf wenige Bereiche im Wald (siehe Abb. 5).

Die Bodenbeprobung (Zeitraum 2004 – 2006) zur Erstellung der Nitrattiefenprofile wurde mit einem Edelman-Handbohrer der Fa. Eijkelkamp bis 5 m tief bzw. bis zum Grundwasserspiegel durchgeführt. In jedem Waldbestand wurden drei Bohrungen bis zum Grundwasserspiegel bzw. bis in 5 m Tiefe niedergebracht. Die gemessenen Nitratkonzentrationen sind somit für einen längeren Zeitraum repräsentativ. Folgende Tiefenabschnitte wurden beprobt: 0 – 0,3 m, 0,3 – 1,0 m, 1 – 2 m, 2 – 3 m, 3 – 4 m und 4 – 5 m. Da die Sickerungsgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet bei diesen Bodeneigenschaften etwa 1,5 – 2,0 Meter pro Jahr beträgt, wird mit der Probenahme eine Fließstrecke von zwei bis drei Jahren erfasst. Damit stellen die gemessenen Nitratkonzentrationen nicht nur eine Momentaufnahme dar, wie es bei der Beprobung einer geringmächtigen Bodenschicht der Fall wäre, sondern repräsentieren einen längeren Zeitraum.

Den Proben wurde jeweils am Tag der Probenahme zur Extraktion von Nitrat 1 N KCl-Lösung zugesetzt (100 ml Lösung, 100 g frischer Boden), die nach 2 Stunden abfiltriert wurde. Das 1:1-Verhältnis zwischen Lösung und Boden hat die Messung von niedrigen Nitratkonzentrationen ermöglicht.

Mit der umgehenden Probenaufbereitung vor Ort wurde der mikrobiologischen Veränderung im Nitratgehalt verhindert. Die chemische Analyse der KCl-Extrakte erfolgte jeweils in der darauf folgenden Woche im Labor. Die Nitratkonzentrationen wurden photometrisch (Cd-Reduktions-Methode; KÖNIG und FORTMANN 1996/1999) bestimmt.



**Abb. 5: Räumliche Lage der Probenahmepunkte, beispielhaft dargestellt für das Untersuchungsgebiet Cloppenburg (grün: Wald; rote Kreise: Probenahmepunkte für Nitratuntersuchung)**

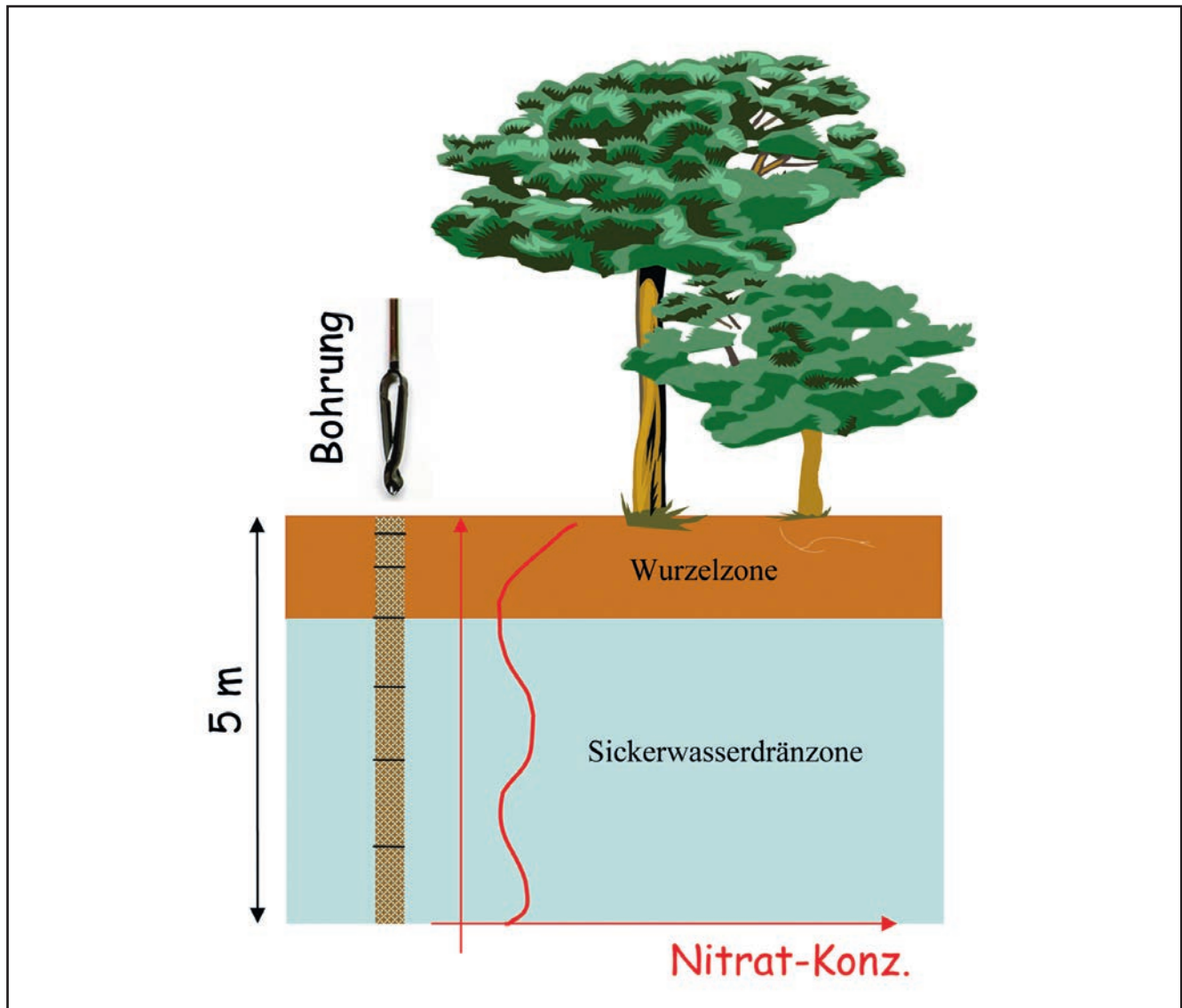


Abb. 6: Untersuchungsschema zur Bodenbeprobung

## 5 Statistische Auswertung

Die gewonnenen Mess-Ergebnisse wurden mit statistischen Verfahren untersucht, um insbesondere Wirkungszusammenhänge zwischen dem Nitrataustrag und den beeinflussenden Faktoren wie Baumart, Bestandsalter und -höhe sowie forstlicher Standortstyp aufzuzeigen. Nachfolgend sind die statistischen Methoden im Einzelnen erläutert, um die Auswertung der Messergebnisse nachvollziehbar und überprüfbar zu beschreiben.

Es wurde mit folgenden statistischen Verfahren gearbeitet:

1. Die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit dem posteriori Mittelwertvergleich (Tukey HSD-Test) wurde angewendet, um den Effekt von Faktoren (z.B. Bestandesaltersgruppe, Hauptbaumart oder Standorteigenschaften) auf die untersuchten Variablen (z.B. Nitratkonzentration im Sickerwasser, Stickstoffvorrat in der Humusauflage oder potentielle Netto-N-Mineralisation) zu bestimmen.

2. Die lineare Regression wurde angewendet, um die Beziehung zwischen der Nitrat-Konzentration im Sickerwasser (als abhängige Variable) und anderen Variablen (z.B. geschätzte N-Kronentraufe, C:N-Verhältnis in der Humusauflage, potentielle Netto-Nitrifikation) zu untersuchen. Dabei wurden die nicht skalierten Faktoren als Dummy-Variablen berücksichtigt.

Für die Anwendung von Varianz- und Regressionsanalyse wurden die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser bzw. die Nitrat-Austragsraten einer logarithmischen Transformation mit Null-Punkterhaltung unterzogen. Damit wurde eine Verteilung im Toleranzbereich der Normalverteilung erzeugt (Kolmogorov-Smirnov-Test). Die Schätzwerte des Modells wurden für die Darstellung der Ergebnisse entlogarithmiert.

Das Signifikanzniveau lag jeweils bei 0,05. Testergebnisse, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit ( $\alpha$ -Fehler) von weniger als 0,001 wurden als hochsignifikant markiert. Die statistische Analyse wurde mit dem Programm SPSS 11.5 durchgeführt.

## 6 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung dargestellt. Dabei erfolgt zunächst die Darstellung und Bewertung der Höhe der Nitratwerte. Anschließend werden die Zusammenhänge zwischen Nitratkonzentrationen und Bestandes-eigenschaften statistisch ausgewertet. Danach werden die Ergebnisse des statistischen Modells zu den Nitratkonzentrationen mit den gemessenen Werten verglichen, um die Qualität des Modells zu bewerten. Die Berechnung des Nitrataustrages in kg/ha/a geschieht aus den Nitratkonzentrationen und den geschätzten Sickerwasserraten. Anschließend werden die Zusammenhänge zwischen Nitrataustrag und den Eigenschaften der organischen Substanz des Bodens analysiert. Dabei werden sowohl der Stickstoff-Vorrat in der Humusaufgabe und im Mineralboden, das C:N-Verhältnis als auch die Stickstoff-Mineralisationsraten berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Untersuchung weiterer Faktoren wie Bodentextur, Waldkalkung, alte Schlagabraumwälle und historische Landnutzung, die den Nitrataustrag beeinflussen können, in die Betrachtung mit einbezogen.

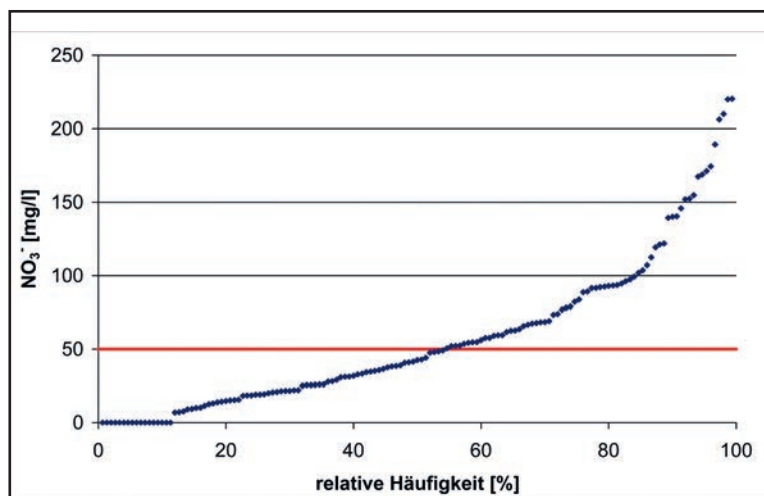
### 6.1 Gemessene Nitratkonzentrationen im Bodenwasser

Im Untersuchungsgebiet Cloppenburg wurden im Herbst 2004, also nach dem Abschluss der Vegetationsperiode, in 50 Waldbeständen 250 Bodenproben auf den Nitratgehalt im Bodenwasser untersucht.

Aus der Häufigkeitsverteilung der Nitratkonzentrationen in den Proben geht hervor, dass in 44% der Proben die gemessenen Nitratkonzentrationen den Grenzwert der TrinkwV (50 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ ) überschritten haben (Abb. 7). In 82 % der Proben lagen die Nitratkonzentrationen oberhalb von 10 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ , die als Schwellenwert für die Nitratsättigung betrachtet werden können (MELLERT et al. 2005). Im Vergleich zu einer in Bayern durchgeführten umfassenden Raster-Untersuchung sind die im Untersuchungsgebiet Cloppenburg gefundenen Nitratgehalte im Sickerwasser vergleichsweise hoch. In Bayern lagen lediglich bei 12 % der Raster-Punkte die Nitratkonzentrationen oberhalb des Trinkwassergrenzwertes, und in ca. 30 % der Fälle wurde die Konzentration von 10 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$  überschritten (MELLERT et al. 2005). Der Vergleich mit den Daten aus Bayern zeigt, dass der Zustand des Sickerwassers hinsichtlich der Belastung mit Nitrat im Untersuchungsgebiet Cloppenburg insbesondere aus wasserwirtschaftlicher Sicht sehr problematisch ist.

In den Niederlanden wurden schon vor einem Jahrzehnt unter vergleichbaren Bedingungen (hohe N-Deposition und silikatarmer Standorte) ähnlich hohe Konzentrationen gemessen: Dort betrug die mittlere Nitratkonzentration etwa 30 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$  (DE VRIES und JANSEN, 1994).

Die Nitratbelastung des Sickerwassers unter Wald ist im Untersuchungsgebiet Cloppenburg im Vergleich zu anderen Standorten deutlich erhöht. In nahezu der Hälfte der Fälle wird der Grenzwert der Trinkwasserverordnung überschritten.



Annähernd 50 % der Nitratkonzentrationswerte lagen über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 50 mg/l. Fast 90 % der Werte lagen über 10 mg/l, was dem Schwellenwert für Stickstoffsättigung im Wald entspricht.

Abb. 7: Häufigkeitsverteilung der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser im Untersuchungsgebiet Cloppenburg. 50/250 (Anzahl beprobte Bestände / Anzahl untersuchte Proben). Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung (50 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ ) ist rot markiert.



## 6.2 Nitratkonzentration im Sickerwasser in Abhängigkeit von Bestandeseigenschaften auf sandigen Standorten

Der Tiefenverlauf der Nitratkonzentrationen in drei Beständen ist in Abb. 8 beispielhaft dargestellt. Unter dem Eichenbestand waren die Nitratkonzentrationen über das gesamte Profil einheitlich niedrig. Dagegen konnten unter den Nadelbeständen nicht nur höhere Konzentrationswerte beobachtet werden, sondern auch eine große Schwankung der Werte innerhalb der Profile. Mit diesem Beispiel soll verdeutlicht werden, dass die Nitratkonzentrationen unter Wald eine hohe Heterogenität bzgl. der Bestandesart aufweisen. Darüber hinaus zeigt sich auch eine hohe zeitliche Variabilität.

Bei der statistischen Auswertung der 50 Standorte, die in 2004 im Raum Cloppenburg untersucht wurden, erfolgte eine Gruppierung nach Baumart und Bestandesalter. Ferner wurden bei den Douglasien Altbestände auf Sanden und auf lehmigen Sanden unterschieden. Bei der Kiefer fanden neben Jung- und Altbeständen zusätzlich mittel alte Bestände Berücksichtigung.

Hinsichtlich der Höhe der Nitratkonzentrationen lässt sich für die Jungbestände und für die Gruppe der Altbestände von Eiche und Douglasie einschließlich der mittelalten Kiefernbestände folgende Reihenfolge aufstellen:

Eiche < Kiefer < Douglasie.

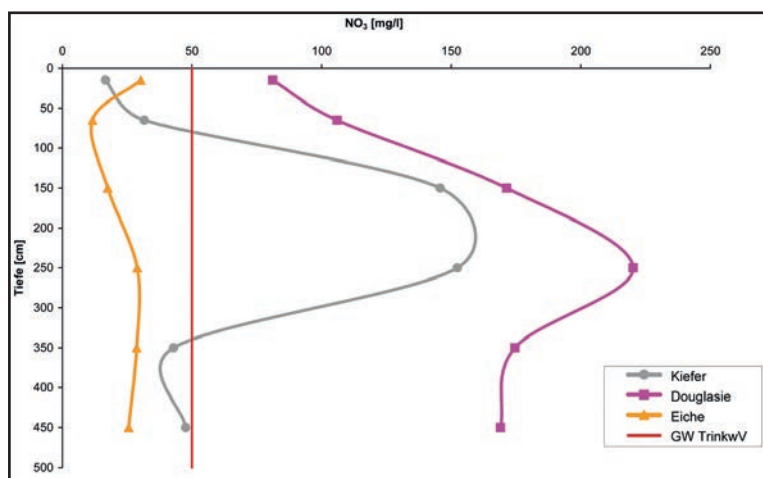
Unter den Kiefernaltbeständen waren die Nitratkonzentrationen niedriger als unter den mittelalten Beständen. Dies mag an der Struktur der Kiefernbestände liegen; die Altbestände sind wesentlich lichter als die mittelalten; wahrscheinlich ist dies mit geringeren luftbürtigen Stickstoffeinträgen verbunden. Bei den Douglasienaltbeständen waren die Nitratkonzentrationen an den Standorten mit lehmigem Sand als Bodensubstrat signifikant höher als an den sandigen Standorten.

Generell waren die Nitratkonzentrationen unter den Jungbeständen niedriger als unter den Altbeständen bzw. den mittel alten Kiefernbeständen. Unter den Eichenjungbeständen waren die Nitratkonzentrationen am geringsten, unter den jungen

Douglasien lagen die Nitratkonzentrationen höher als unter den Kiefernjungbeständen.

Im Untersuchungsraum Cloppenburg hängt die Stickstofffracht in der Kronentraufe von der Bestandeshöhe ab, wobei die beiden Größen linear korrelieren. Dies haben MOHR et al. (2005) an 13 der 50 hier untersuchten Bestände nachgewiesen. Es ist nahe liegend, zwischen dem Stickstoffeintrag und der Höhe der Nitratkonzentrationen einen Zusammenhang zu vermuten. Wenn gezeigt werden kann, dass zwischen der Bestandeshöhe und den Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ein Zusammenhang besteht, kann gefolgert werden, dass der luftbürtige Stickstoffeintrag eine wesentliche Steuergröße für die Höhe der Nitratkonzentrationen ist. In Abb. 10 ist die mittlere Bestandeshöhe gegen die mittleren Nitratkonzentrationen aufgetragen. Die Darstellung bezieht sich auf dieselben Baumarten (Douglasie, Kiefer, Eiche), Altersgruppen (jung, alt, mittelalt) und Standortstypen (Sand, lehmiger Sand) wie in Abb. 9. Mit Ausnahme der mittelalten Kiefernbestände und der Eichenaltbestände liegen die Gruppenmittelwerte der Nitratkonzentrationen auf einer Geraden. Dies zeigt, dass die luftbürtigen Stickstoffeinträge wesentlich die Nitratkonzentrationen im Bodenwasser beeinflussen. Dieses Ergebnis untermauert die Vermutung, dass der Standortseffekt bei den alten Douglasienbeständen letztendlich auf die unterschiedliche Nährstoffversorgung der beiden Substratgruppen zurückzuführen ist. Douglasien auf lehmigeren Standorten wachsen schneller und filtern deshalb mehr Stickstoff aus der Atmosphäre.

Die abweichende Lage der Punkte der mittelalten Kiefern und der alten Eichenbestände in Abb. 10 deutet darauf hin, dass außer dem luftbürtigem Stickstoffeintrag auch noch andere, ökosysteminterne Faktoren das Stickstoffspeichervermögen der Waldböden und damit auch den Nitrataustrag beeinflussen. Alte, aufgelichtete Kiefernbestände filtern einerseits weniger Ammonium aus der Luft, andererseits fungiert der üppige Unterwuchs als eine zusätzliche Senke für Stickstoff. Die andere Ausnahme bilden die Eichenaltbestände: die über eine erhöhte Stickstoff-Speicherkapazität zu verfügen scheinen.



Die exemplarisch ausgewählten Nitrat-tiefenprofile zeigen, dass die Konzentrationen zwischen den Baumarten und innerhalb eines Bodenprofils bis zu einer Größenordnung unterschiedlich sein können. Höhere Konzentrationen in der Tiefe von 2 bis 4 m waren bei dem überwiegenden Anteil der Profile zu beobachten.

Abb. 8: Tiefenverlauf der Nitratkonzentration in ausgewählten Waldbeständen. Der Grenzwert gemäß Trinkwasserverordnung (50 mg NO<sub>3</sub>/l) ist rot markiert.

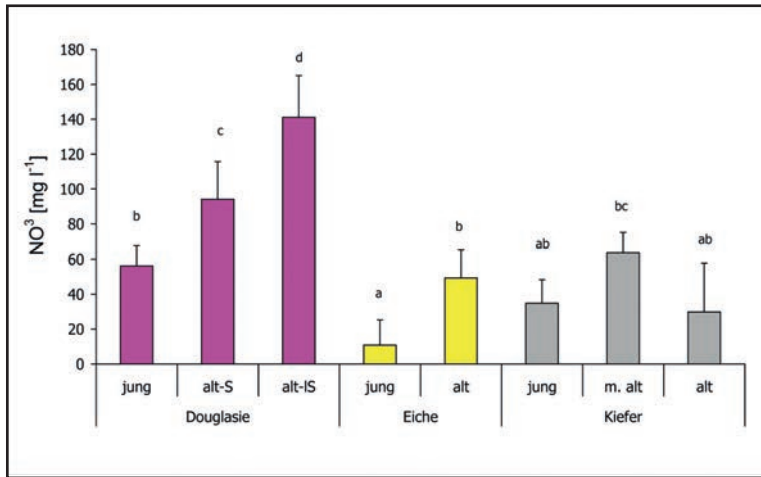


Abb. 9: Mittlere Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung in 1-5 m Tiefe (Mittelwerte + Standardabweichung) im Untersuchungsgebiet Cloppenburg im Herbst 2004.

Hinsichtlich der Nitratkonzentration im Bodenwasser lassen sich die Waldbestände wie folgt gruppieren: junge Eiche ≤ junge Kiefer = alte Kiefer ≤ alte Eiche = junge Douglasie ≤ mittelalte Kiefer ≤ alte Douglasie auf Sandboden < alte Douglasie auf lehmig-sandigem Boden

Erläuterungen (Anzahl beprobte Bestände / Anzahl untersuchte Proben): junge Douglasie: 11/54, alte Douglasie auf Sand: 4/20; alte Douglasie auf lehmigem Sand: 3/16; junge Eiche: 6/32; alte Eiche: 5/26; junge Kiefer: 8/38; mittelalte Kiefer 10/53; alte, aufgelichtete Kiefer: 3/10.

Erläuterung zur statistischen Auswertung in der Abb. 9: Die Mittelwerte der Nitratkonzentrationen in Bestandesgruppen, die mit dem gleichen Buchstaben (z.B. „a“) gekennzeichnet sind, sind bei der Interpretation der Daten als gleich groß zu betrachten, solche mit verschiedenen Buchstaben („a“ und „b“) als unterschiedlich. Douglasie-jung und

Kiefer-jung sind beide mit dem Buchstaben „b“ gekennzeichnet; die Mittelwerte dieser beiden Bestandesgruppen sind zahlenmäßig unterschiedlich: 52 gegenüber 35 mg NO<sub>3</sub>/l. Aufgrund der Streuung der Einzelwerte werden die beiden Mittelwerte jedoch im Sinne von statistischer Wahrscheinlichkeit als gleich groß betrachtet. Eiche-jung und Eiche-alt sind mit verschiedenen Buchstaben („a“ und „b“) gekennzeichnet; die Mittelwerte ihrer Nitratkonzentrationen werden als unterschiedlich interpretiert. Mit zwei Buchstaben gekennzeichnete Mittelwerte (z.B. „ab“ bei Kiefer-alt) unterscheiden sich nicht von den Mittelwerten, die mit einem „a“ oder einem „b“ gekennzeichnet sind.

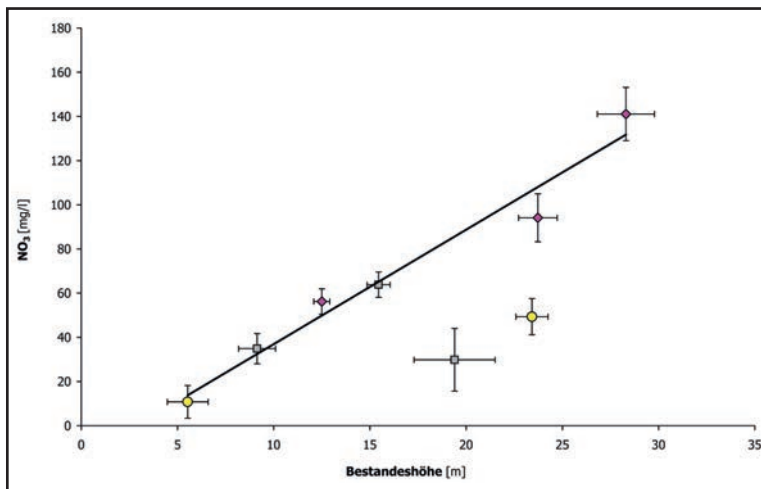
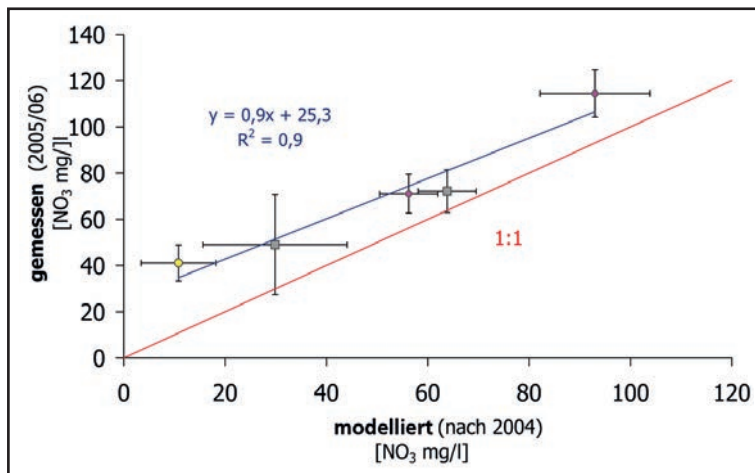


Abb. 10: Mittlere Nitratkonzentrationen im Bodenwasser unter Douglasie (pink), Eiche (gelb) und Kiefer (grau) in Abhängigkeit von der Bestandeshöhe. (Mittelwerte; ± Standardfehler).

Die Nitratkonzentration im Sickerwasser steht in engem Zusammenhang mit der Baumhöhe, die in dieser Region eng mit der Ammonium-Deposition verbunden ist. Lediglich zwei Bestandesgruppen fallen aus der Reihe: alte Kiefern- und alte Eichenbestände.

Erläuterung zu Abb. 10: Die Douglasien-altbestände (Rauten pink rechts oben) waren im Mittel 28,3 m (± 1,5 m Standardabweichung) hoch. Die mittlere Nitratkonzentration im Sickerwasser unter diesen Beständen betrug 141 mg/l (± 12 mg/l Standardabweichung).



Die mit dem statistischen Modell von 2004 vorhergesagten Werte stimmen gut mit den Messwerten von 2005/06 überein. Das Modell liefert zuverlässige Vorhersagen.

Abb. 11: Vergleich der mittleren Nitratkonzentration mit dem statistischen Modell von 2004 berechneten und 2005/2006 gemessenen Nitratkonzentrationen (mg NO<sub>3</sub>/l) im Untersuchungsraum Cloppenburg

*Erläuterung zu Abb. 11: Unter alten Douglasien auf sandigem Substrat (pink, rechts oben) wurden in 2004 im Mittel 93 mg NO<sub>3</sub>/l gemessen mit einer Standardabweichung von 11 mg NO<sub>3</sub>/l. In 2005/2006 wurden unter alten Douglasien im Mittel 114 mg NO<sub>3</sub>/l gemessen mit einer Standardabweichung von 10 mg NO<sub>3</sub>/l. (Anzahl der beprobten Bestände / untersuchten Proben: gelb = Eiche (2004 = 6/32; 2005/06 = 7/59), grau = alte (2004 = 3/10; 2005/06 = 1/5) und mittelalte (2004 = 10/53; 2005/06 = 5/7) Kiefer, pink = junge (2004 = 11/54; 2005/06 = 6/49) und alte Douglasie auf Sand (2004 = 4/20; 2005/06 = 4/20).*

Die Abhängigkeit der Nitratkonzentrationen von Baumart, Bestandesalter und Standorttyp gilt streng genommen nur für die untersuchten Bestände und nur für den untersuchten Zeitraum (2003-2004). Es stellt sich die Frage, wie weit diese Auswertungsergebnisse auf andere Bestände und andere Zeiträume übertragen werden können. Um das zu prüfen, wurden in den Jahren 2005 und 2006 im Untersuchungsraum Cloppenburg die Beprobung und Untersuchung auf Nitrat an 23 teils neuen, teils schon in 2004 untersuchten Standorten durchgeführt. Die 2005/2006 gemessenen Nitratkonzentrationen wurden den Ergebnissen aus 2004 beziehungsweise den hergeleiteten Gesetzmäßigkeiten des statistischen Modells gegenübergestellt, um das Modell zu validieren, d.h. das statistische Modell wurde mittels weiterer Messdaten überprüft.

Die Modellvorhersage (Abb. 11, rote Linie) und das Gruppenmittel der Messwerte (blaue Linie) lagen relativ nah zusammen, wobei die Werte 2005/06 insgesamt, insbesondere bei niedrigeren Werten, etwas höher liegen. Diese Validierung kann als Beleg für die allgemeine Gültigkeit des auf Baumart, Altersklasse und Bodenart basierenden statistischen Modells für Bestände mit Böden aus sandigem und lehmig-sandigem Substrat betrachtet werden. Andererseits weisen die Unterschiede zwischen vorhergesagten und gemessenen Werten in Abb. 11 darauf hin, dass die Übertragung des Modells auf andere Waldbestände und andere Zeiträume nur mit einer gewissen Toleranz möglich ist. Wegen dieser Toleranz werden in den Karten zum Risiko des Nitrataustrages (siehe Kapitel 7) Wahrscheinlichkeitsklassen und nicht konkrete Werte von Wahrscheinlichkeiten benutzt.

**Auf den sandigen Standorten hängen die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser vor allem von der Baumart und dem Bestandesalter ab. Hinsichtlich der Höhe der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser besteht die Reihenfolge: Bestandesalter: Jungbestände < Altbestände Bestandesart: Eiche < Kiefer < Douglasie Weil die Nitratkonzentrationen und die Bestandeshöhe sowie die Bestandeshöhe und der luftbürtige Stickstoffeintrag jeweils eng miteinander gekoppelt sind, muss der Stickstoffeintrag als wichtigste Steuergröße für die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser betrachtet werden.**

### 6.3 Nitrataustragsraten auf sandigen Standorten

Für die Wasserwirtschaft sind die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser bzw. im Grundwasser insbesondere mit Blick auf den vorsorgenden Grundwasserschutz und die Vorgaben der TrinkwV von vorrangigem Interesse. Aus ökologischer Sicht sind neben den Konzentrationen auch die Nitratfrachten von besonderer Bedeutung, weil sie über die Speichermöglichkeiten des Waldbodens zusätzliche Informationen liefern. Aus diesem Grund wurden die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ( $\text{NO}_3$  mg/l) in Nitratversickerungsraten ( $\text{NO}_3\text{-N}$  kg/ha/a) umgerechnet.

Die Raten des Nitrataustrages ergeben sich aus den gemessenen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser und dem Sickerwasserfluss. Der Sickerwasserfluss hängt von der Menge des Niederschlagswassers sowie der Verdunstung ab. Im Vergleich zu den Laubbäumen fangen die Nadelbäume in ihrer Krone mehr Niederschlagswasser auf, das von dort wieder verdunstet und gar nicht den Waldboden erreicht. Die ermittelten Sickerwasserraten liegen im Bereich von 175 – 240 mm/a.

In Abb. 12 sind die Nitrataustragsraten unter Douglasien-, Eichen- und Kiefernbeständen jeweils für die Gruppen Jung- und Altbestände dargestellt. Im Gegensatz zu den Betrachtungen der Konzentrationen wurde hier auf eine Unterscheidung in drei Altersgruppen bei der Kiefer und zwei Standortgruppen bei den Douglasienaltbeständen verzichtet, weil mit der Ermittlung der Sickerwasserraten eine solche Unterteilung aus Gründen der Genauigkeit nicht mehr gerechtfertigt war.

Unter den Douglasienaltbeständen waren die Nitratausträge am höchsten; sie lagen im Mittel bei 48 kg N/ha/a. Bei den Eichenjungbeständen lagen die Austräge im Mittel bei 2 kg N/ha/a. Bei den übrigen Bestandesgruppen lagen die mittleren Austräge zwischen 12 und 23 kg N/ha/a.

Ferner wurden die Nitratausträge zu den luftbürtigen Stickstoffeinträgen in Beziehung gesetzt. Mit Hilfe der Regressionsanalyse konnte ermittelt werden, zu welchem Anteil der Stickstoffeintrag und die Baumart den Nitrataustrag erklären bzw. verursachen. Insgesamt ließen sich 44 % der Varianz der Nitratausträge durch Stickstoffeintrag und Baumart erklären. Der überwiegende Teil der

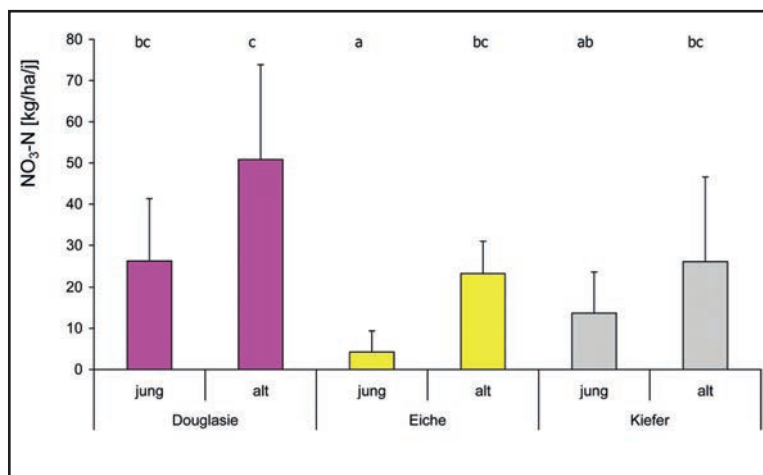
Varianz, nämlich 39 %, ergab sich durch den luftbürtigen Stickstoffeintrag, der Einfluss der Baumart betrug 5 %.

Angesichts der komplexen Vorgänge im Stickstoffkreislauf von Wäldern ist ein Erklärungsgrad von 39 % sehr hoch. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass die Höhe des luftbürtigen Stickstoffeintrages in die Wälder im Raum Cloppenburg die wesentliche Steuergröße für den Nitrataustrag ist, und es macht deutlich, dass waldbauliche Maßnahmen zur Verringerung des Nitrataustrages bzw. der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser nur verhältnismäßig wenig effektiv sind.

Der Befund, dass die Stickstoffeinträge die wichtigste Steuergröße für den Nitrataustrag mit dem Sickerwasser sind, steht im Einklang mit den Ergebnissen des „Dachexperimentes“ im Solling. Dort führte das Herausfiltern des Stickstoffs aus dem Bestandesniederschlag innerhalb eines Jahres zu einem Rückgang des Nitrataustrages auf Null (CORRE und LAMERSDORF, 2004).

Der Nitrataustrag führt nicht nur zu Problemen bei der Qualität des Grundwassers, im Boden selbst zieht er auch eine starke Versauerung und den damit verbundenen Nährstoffverlust von Kalium, Calcium und Magnesium nach sich (vgl. auch NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (NLWKN 2007)). Für die Waldbestände der Region Weser-Ems mit den häufig schwach gepufferten, silikatarmer Böden ist dies besonders gravierend. Wegen der Knappheit dieser Nährstoffe sind die Folgen einer unausgeglichene Nährstoffaufnahme besonders schnell zu erwarten.

**Waldbestände mit einem Stickstoffaustrag von über 5 kg N/ha/a gelten als Stickstoff gesättigt auf niedrigem Niveau. Die Bestände, die einen Austrag von über 15 kg N/ha/a aufweisen, werden als Stickstoff gesättigt auf hohem Niveau eingestuft (BMVEL, 2000). Nach dieser Klassifizierung können die jungen Eichenbestände im Mittel als nicht Stickstoff gesättigt eingestuft werden. Die jungen Kiefernbestände gelten als gesättigt auf niedrigem Niveau, bei der Mehrheit der übrigen Bestände liegt der Nitrataustrag über 15 kg N/ha/a; damit sind die Bestände als auf hohem Niveau Stickstoff gesättigt zu bewerten.**



**In den Waldbeständen wurden im Mittel 24 kg Stickstoff / ha / Jahr in Form von Nitrat ausgewaschen. Das Spektrum der Werte reicht von 2 bis 48 kg N/ha/a.**

Abb. 12: Nitrataustragsraten unter Jung- und Altbeständen von Douglasien, Eichen und Kiefern. (Mittelwerte und Standardabweichung). Anzahl untersuchter Bestände: junge Douglasie: n=11, alte Douglasie: n= 7, junge Eichen: n= 6, alte Eichen: n= 5, junge Kiefer: n= 8, alte Kiefer: n=13



### 6.3.1 Zusammenhänge zwischen Stickstoffvorräten im Boden und Nitratversickerung

Neben dem Einfluss von Baumart, Bestandesalter und Standort wurde untersucht, ob der Stickstoffvorrat im Boden und das C:N-Verhältnis im Auflagehumus als Indikatoren für die N-Speicherkapazität bzw. für den Nitrataustrag in Frage kommen. Der Gesamtvorrat an Stickstoff im Boden ist als Indikator relativ unspezifisch, weil er verschiedene Fraktionen des Stickstoffs umfasst, die in unterschiedlicher Weise an den Umsetzungsprozessen im Boden teilnehmen. Dagegen ist das C:N-Verhältnis an die Auflagehumusformen geknüpft, dessen Bildung von der Art der Streuzersetzung und damit auch von der Art der Stickstoffumsätze abhängt. Ein enges C:N-Verhältnis bedeutet höhere Umsatzraten. Im Laufe der letzten Jahre wurde vermehrt eine Verengung der C:N-Verhältnisse beobachtet, die als Folge der hohen luftbürtigen Stickstoffeinträge gedeutet wird (V. ZEJSCHWITZ 1989; BUBERL et al. 1994, PRIETZEL et al. 2006). Höhere Stoffumsatzraten bei einem engen C:N-Verhältnis sind ein Zeichen für höhere Stickstoffmineralisationsraten, die für den Nitrataustrag mit dem Sickerwasser förderlich sind. Dies wird durch experimentelle Befunde bestätigt. In einer europaweiten Untersuchung von Stoffbilanzflächen stieg an den Standorten mit einem C:N-Verhältnis von  $< 25$  der Nitrataustrag bei zunehmendem Stickstoffeintrag stärker an als an Standorten mit einem C:N-Verhältnis  $> 25$  (MACDONALD et al. 2002). Für den Raum Cloppenburg wurde geprüft, ob hier ähnliche Zusammenhänge bestehen, die zur Optimierung des Nitrataustragsmodells beitragen können.

Im Raum Cloppenburg reichte der Stickstoffvorrat in der Humusauflage im Mittel von 0,4 t N/ha (junge Eiche) bis 2,5 t/ha (alte Eiche) (Abb. 13). Innerhalb einer Baumart waren die N-Vorräte der Humusauflage in den Altbeständen signifikant höher als in den Jungbeständen, die Unterschiede

zwischen den Baumarten innerhalb einer Altersgruppe waren nicht signifikant. Die Stickstoffvorräte im oberen Mineralboden (0 - 20 cm) lagen zwischen 1,8 t N/ha (Kiefernaltbestände) und 2,7 t N/ha (Kiefernjungbestände). Die N-Vorräte in der Humusauflage und im oberen Mineralboden waren in den Eichenaltbeständen am höchsten (5,0 t N/ha) und in den Eichenjungbeständen am niedrigsten (2,8 t N/ha). Von dem erfassten Stickstoff im Auflagehumus und im oberen Mineralboden befanden sich bei den Jungbeständen 80 - 90 % im Mineralboden, bei den Altbeständen waren es 45 - 50 %.

Die Differenz der N-Vorräte im Auflagehumus zwischen Alt- und Jungbeständen deutet auf eine N-Speicherung im Auflagehumus. Rechnerisch ergibt sich für die Douglasienbestände eine zusätzliche Speicherung von 26 kg N/ha/a für die Eichenbestände von 24 kg N/ha/a und für die Kiefernbestände von 21 kg N/ha/a.

In ihren Untersuchungen ermittelten BÖTTCHER und SPRINGOB (2001) in 14 Kiefernbeständen im Raum Fuhrberg den C-Vorrat im Auflagehumus als Funktion des Bestandesalters. Unterstellt man ein C:N-Verhältnis von 25, so ergibt sich anhand ihrer Daten eine Stickstoffspeicherung von 17 kg N/ha/a. In Bayern fanden PRIETZEL et al. (2006) in ehemals streugenutzten Kiefernbeständen N-Akkumulationsraten von insgesamt 13 bzw. 18 kg N/ha/a im Auflagehumus und Oberboden (0 - 30 cm). Die genannten Raten der Stickstoffspeicherung im Auflagehumus liegen niedriger als die Werte, die in der vorliegenden Untersuchung aus Cloppenburg ermittelt wurden.

Im oberen Mineralboden ist das C:N-Verhältnis in der Regel enger als im Auflagehumus, weil im Mineralboden zusätzlich zum organisch gebundenen Stickstoff Ammonium austauschbar und fixiert an bzw. in Tonmineralen vorkommt. Im Raum Cloppenburg waren dagegen die mittleren C:N-Verhältnisse im Auflagehumus enger (19 - 23) als im Mineralboden (24 - 29). Zur Interpretation dieses abweichenden Verhaltens sind in Abb. 15 die Verhältnisse von C:N Auflagehumus / C:N Mineralbo-

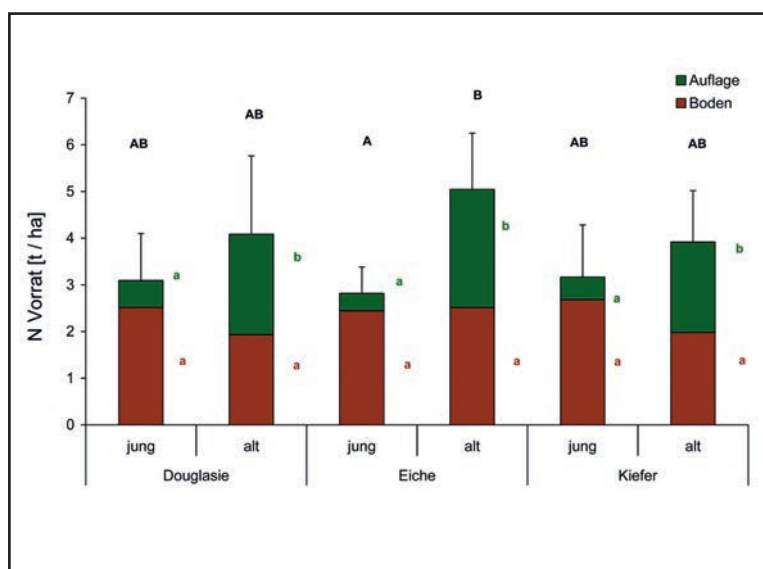


Abb. 13: Stickstoffvorrat im Auflagehumus und im Mineralboden (0-20 cm). (Mittelwerte und Standardabweichung des Gesamtvoorates).

**Der Stickstoffvorrat in der Humusauflage nimmt bei jeder Baumart mit dem Alter zu. Das heißt, dass der Humus bei den Jungbeständen als N-Senke fungiert. Unter den Altbeständen betrug der Stickstoffvorrat in der Humusauflage 1,9 bis 2,5 t/ha. Dies gilt als sehr hoch. Dieser wenig stabile Stickstoffvorrat im Auflagehumus kann relativ schnell mobilisiert werden, zum Beispiel bei einer starken Störung wie Windwurf.**

*Erläuterungen: Auflagehumus plus Mineralboden: verschiedene Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede; Großbuchstaben beziehen sich auf den N-Vorrat im Auflagehumus plus Mineralboden, Kleinbuchstaben auf den N-Vorrat in Auflagehumus (grün) beziehungsweise Mineralboden (braun).*

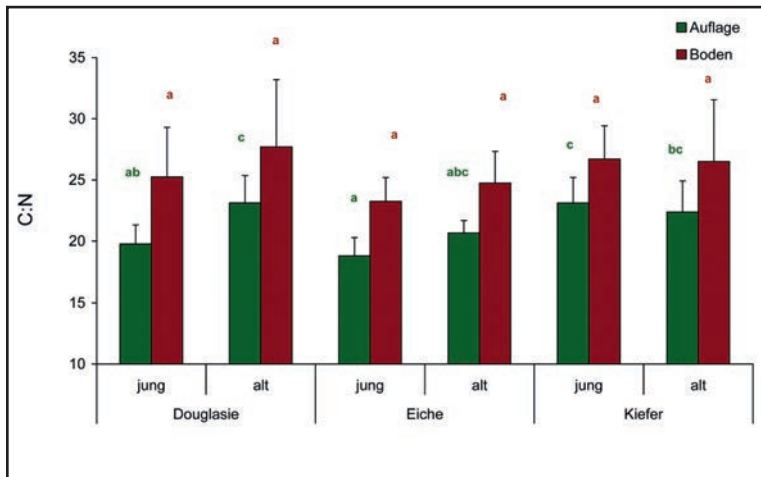


Abb. 14: C:N-Verhältnis in der Humusauflage und im oberen (0-20 cm) Mineralboden. (Mittelwerte und Standardabweichung).

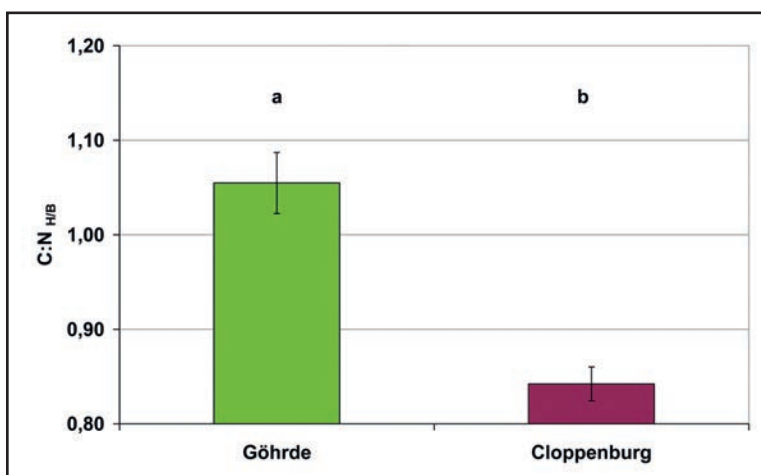
Das C:N-Verhältnis in der Humusauf-  
lage liegt zwischen 19 und 23, was  
als niedrig gilt. Es ist als Indikator für  
hohe N-Sättigung dieser Wälder zu  
bewerten.

Erläuterungen zu Abb. 14: Unterschied-  
liche Buchstaben zeigen signifikante  
Unterschiede (siehe auch Erläuterungen in  
Abb. 9).

den (= C:NH/B) der Daten aus dem Untersuchungs-  
gebiet Cloppenburg mit Daten der forstlichen  
Standortskartierung aus dem Bereich der Göhrde  
im östlichen Niedersachsen (Landkreis Lüchow-Dan-  
nenberg) dargestellt. Das Verhältnis von C:NH/B  
betrug im Raum Cloppenburg  $0,8 \pm 0,1$ . Im Bereich  
der Göhrde, wo die luftbürtigen Stickstoffeinträge  
deutlich niedriger sind als in Cloppenburg, betrug  
das Verhältnis (C:NH/B)  $1,1 \pm 0,3$ . In beiden Fällen  
handelt es sich um vorwiegend sandige Böden mit  
geringem Tongehalt, so dass bei dieser Betrachtung  
der Einfluss des Tongehaltes auf das C:N-Verhältnis  
vernachlässigt werden kann. Diese Unterschiede  
im C:NH/B-Verhältnis sind aller Wahrscheinlichkeit  
nach als Folge der hohen luftbürtigen Stickstoffein-  
träge zu betrachten. Durch den hohen luftbürtigen  
Stickstoffeintrag sind vermutlich die Stickstoffge-  
halte im Streufall höher, und es kommt auch zu  
einer höheren Absorption von Ammoniakgas im  
Auflagehumus, was zu höheren N-Gehalten im  
Auflagehumus führt. Das C:NH/B-Verhältnis kann  
als Indikator für eine hohe Stickstoffbelastung  
betrachtet werden.

Der Wertebereich der C:N-Verhältnisse, für den  
MACDONALD et al. (2002) einen Einfluss auf den  
Nitrataustrag ermittelte, reichte von etwa 15 bis  
40. Dagegen lag im Raum Cloppenburg das Spek-  
trum der C:N-Verhältnisse in einem sehr engen  
Bereich (19 – 23). Dies mag erklären, dass zwischen  
den C:N-Verhältnissen und den Nitratkonzentration-  
en im Bodenwasser keine Korrelation gefunden  
wurde. Bei Untersuchungen in kleinen geographi-  
schen Räumen ist das C:N-Verhältnis im Auflage-  
humus wahrscheinlich kein guter Indikator für den  
Nitrataustrag mit dem Sickerwasser.

Stickstoffvorräte im Auflagehumus und im  
oberen Mineralboden haben nur einen ge-  
ringen Einfluss auf den Nitrataustrag. Aus  
den Stickstoffvorräten im Auflagehumus von  
Jung- und Altbeständen errechnen sich Stick-  
stoffspeicherraten von 21 bis 26 kg N/ha/a.



Im Untersuchungsgebiet Cloppen-  
burg deutet das enge C:N-Verhältnis  
im Auflagehumus im Vergleich zum  
C:N-Verhältnis im Mineralboden  
(C:NH/B) auf den hohen Stickstof-  
feintrag aus der Luft hin. Auf dem  
wenig belasteten Vergleichsstandort  
Göhrde (Raum Lüchow-Dannenberg)  
ist dieses Verhältnis weiter.

Erläuterungen zu Abb. 15: Unterschied-  
liche Buchstaben zeigen signifikante  
Unterschiede.

Abb. 15: C:NH/B (C:N Humusaufgabe / C:N Mineralboden) im Raum  
Cloppenburg (n = 50) und Göhrde (n = 77). (Mittelwerte und Stan-  
dardabweichung).

### 6.3.2 Zusammenhänge zwischen Stickstoffmineralisation und Nitratsickerung

Bei der Mineralisation von organisch gebundenem Stickstoff wird Ammonium gebildet. Dieses wird, wenn es nur in geringen Mengen vorkommt, von den Pflanzen und Mikroorganismen aufgenommen. Ist das Angebot an Ammonium größer als der Bedarf der Pflanzen und Mikroorganismen, kann es von den Mikroorganismen zu Nitrat oxidiert (Nitrifikation) werden. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass Nitrat mit dem Sickerwasser ausgetragen werden kann. Daraus folgt die Frage, ob die Höhe der Nitrifikationsrate im Boden einen Hinweis auf erhöhte Nitratkonzentrationen im Sickerwasser gibt.

Ziel der Untersuchung der Nitrifikationsraten war es, eine Beziehung zu den Nitratkonzentrationen im Sickerwasser zu finden und die Eignung der Nitrifikationsraten als Indikator für den Nitrataustrag zu prüfen. Die dazu im Labor erhobenen Daten liefern Informationen über die maximal mögliche Netto-Nitrifikation des im Boden vorhandenen Substratangebotes für die Mikroorganismen bei optimalen Feuchtigkeitsbedingungen. „Netto“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass es sich um das gebildete überschüssige Nitrat handelt, das

nicht wieder von den Mikroorganismen aufgenommen wird.

Die Netto-Nitrifikationsraten lagen im Mittel zwischen 22 und 58 g N ha/h, was auf 8 °C mittlere Bodentemperatur bezogen, einer Rate von 70 – 190 kg N/ha/a entspricht (Abb. 16). Zwischen den Baumarten und Altersgruppen bestanden keine Unterschiede. In den Altbeständen gab es im Auflagehumus eine Tendenz zu höheren Nitrifikationsraten, was auf die höheren Auflagehumusmengen zurückzuführen ist. Im Mineralboden waren in den Eichenjungbeständen die Nitrifikationsraten am höchsten, in den Douglasienaltbeständen am niedrigsten. Zwischen Nitrifikationsraten und Nitrataustrag konnte kein ursächlicher Zusammenhang gefunden werden. Die Umwandlungsprozesse zwischen N-Deposition und N-Austrag sind wahrscheinlich zu komplex, um die relativ einfachen Parameter beschreiben zu können.

**Im Untersuchungsgebiet Cloppenburg sind die hohen luftbürtigen Stickstoffeinträge die treibende Kraft für den Nitrataustrag unter Wald. Andere Parameter, die die organische Bodensubstanz statisch und dynamisch charakterisieren, konnten das auf N-Deposition und Baumart basierende Nitrataustragsmodell nicht wesentlich verbessern.**

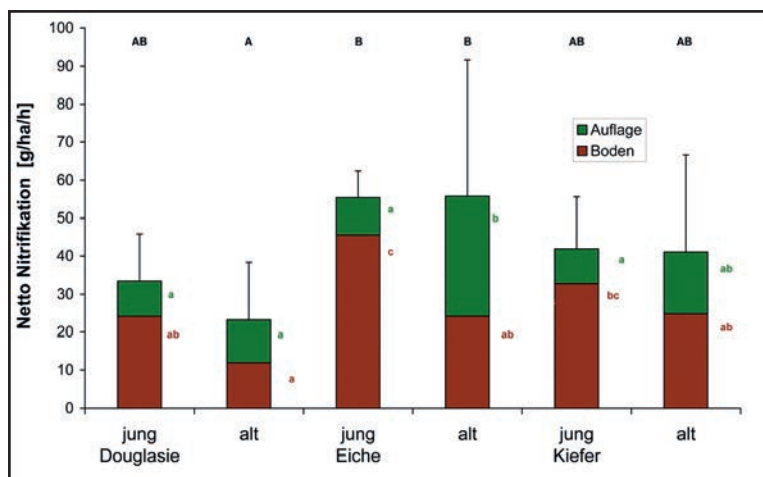


Abb. 16: Netto-Nitrifikation in der Humusauflage und im oberen Mineralboden (0-20 cm; gemessen bei 23 °C). (Mittelwerte und Standardabweichung) Auflagehumus plus Mineralboden: Ungleiche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede.

**Im Bebrütungsversuch wurden hohe potentielle Nitrifikationsraten gemessen, die man als Indikator für hohe N-Sättigung bewerten kann. Für die Prognose der Nitratausträge konnten dagegen die potentiellen Nitrifikationsraten nicht genutzt werden.**

*Erläuterungen zu Abb. 16: Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede (siehe auch Erläuterungen in Abb. 9).*

### 6.4 Nitrataustrag bei lehmigen Standorten

Im Untersuchungsgebiet Cloppenburg überwiegen Böden mit sandigen bzw. lehmig sandigen Substraten, die gut durchlässig sind. Am Forststandort Barnstorf (Abb. 2) wurden lehmige Standorte untersucht, deren Böden weniger durchlässig sind. Hier lagen die Nitratkonzentrationen weit unter den Werten, die mit dem Modell für die sandigen Böden aus dem Untersuchungsraum Cloppenburg berechnet wurden (Abb. 17). Dabei zeichnete sich hinsichtlich der Baumarten eine ähnliche Reihenfolge ab wie auf den sandigen Standorten: Eiche < Kiefer < Douglasie. Die Gründe für das von den sandigen Standorten abweichende Verhalten sind

möglicherweise ein höheres Speichervermögen sowie ein anderes Denitrifikationsverhalten. Beides hängt eng mit dem Kohlenstoffhaushalt der Böden zusammen. Da Stickstoff hauptsächlich in der organischen Substanz des Bodens gespeichert wird, hängt die Stickstoffakkumulation hauptsächlich von der Kohlenstoffdynamik des Bodens ab.

Sandige Böden sind relativ durchlässig, so dass Nitrat ungehindert mit dem Sickerwasser ausgetragen werden kann. Auf Standorten mit lehmigem oder tonigem Substrat im Unterboden und hoch anstehendem Grund- bzw. Stauwasser kann die Denitrifikation von Nitrat zu einer Reduzierung

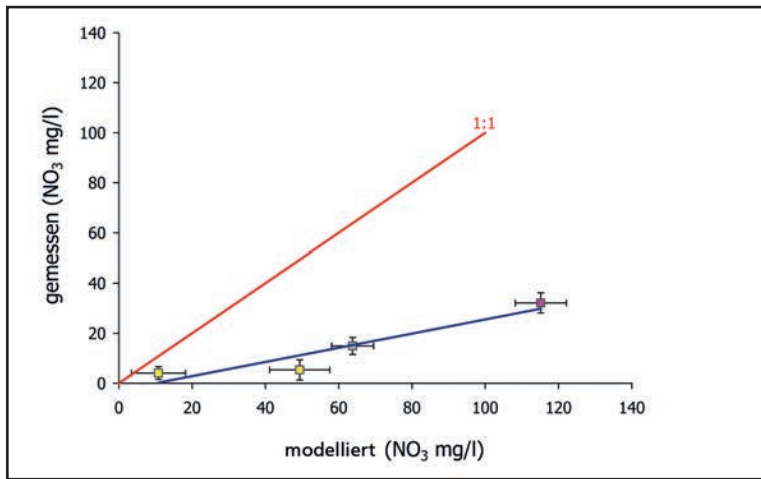


Abb. 17: Vergleich der mittleren, mit dem statistischen Modell von 2004 berechneten Nitratkonzentrationen und mit den gemessenen Werten am Standort Barnstorf (lehmige Böden)

Die Höhe der Nitratkonzentrationen auf lehmigen Standorten liegt insgesamt weit unter denen auf den sandigen Standorten. Die Reihenfolge der Baumarten entspricht der auf den Sandböden:  
Eiche < Kiefer < Douglasie

Erläuterungen: (gelb: junge Eiche (2/24, Anzahl der beprobten Bestände / untersuchten Proben) und alte Eiche/Buche (1/15), grau: Kiefer (1/12), pink: alte Douglasie/Fichte (1/15); rote Linie = mit dem Modell berechnet, blaue Linie = gemessene Ausgleichsgerade zwischen den mittleren Messpunkten

der Nitratbelastung im Sickerwasser führen, allerdings führt das dabei entstehende Lachgas ( $N_2O$ ) als klimarelevantes Spurengas zu einer weiteren Belastung der Atmosphäre.

**An Standorten mit lehmigem Substrat im Unterboden sind die Nitratkonzentrationen niedrig. Dies ist vermutlich auf eine Denitrifikation des Nitrats und der damit verbundenen Lachgasbildung zurückzuführen.**

## 6.5 Bedeutung der Kalkung für den Nitrat- austrag

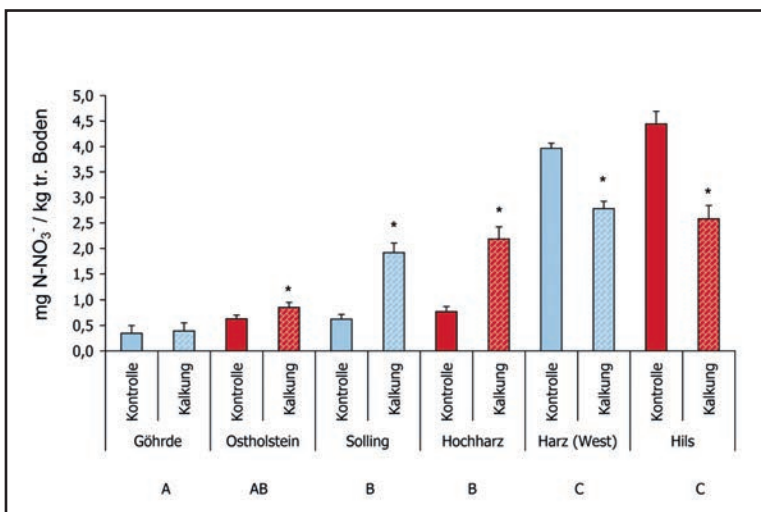
Um der Bodenversauerung und ihren Folgen für die Stabilität der Wälder entgegenzuwirken, gibt es einerseits die Möglichkeit der Verringerung der Emission sauer wirkender Stoffe (wie z.B. Ammoniak) und andererseits die Ausbringung von basisch wirksamen Kalk, mit dem die im Boden vorhandene und die eingetragene Säure gepuffert wird. Die versauernden Schwefeleinträge sind durch die Bemühungen zur Luftreinhaltung gegenüber den ausgehenden 1970er Jahren um mehr als 70 % zurückgegangen. Heute stellt der Eintrag von Stickstoff die wichtigste luftbürtige Quelle der Versauerung dar, wobei dem Ammoniak in Regio-

nen mit intensiver Viehhaltung eine Schlüsselrolle zukommt.

Den Auswirkungen der versauernden Einträge wird seit Mitte der 80er Jahre mit der Waldkalkung entgegengewirkt. Hierbei wird der mild und langsam wirkende kohlen saure Kalk in geringen Mengen (ca. 3 t/ha) eingesetzt. Ziel der Kalkung ist es, die versauernden Schadstoffeinträge zu kompensieren und der weiteren Bodenversauerung entgegenzuwirken. Zur Kompensation der versauernden Schadstoffeinträge ist es erforderlich, die Kalkungsmaßnahme nach einigen Jahren zu wiederholen.

Das durch die Versauerung gestörte chemische Milieu der Mikroorganismen wird durch die Kalkung wieder ins Gleichgewicht gebracht. Das heißt, dass die mikrobielle Biomasse und die Intensität der Mineralisationsprozesse wieder zunehmen. Das erhöhte Stickstoffangebot wirkt sich wachstumsfördernd auf die Bodenvegetation und die Bäume aus. Die Menge an mineralisiertem Stickstoff, die über den Bedarf der Mikroorganismen und Pflanzen hinausgeht und die nicht im Humus gespeichert werden kann, unterliegt potentiell der Auswaschung mit dem Sickerwasser.

Wegen der hohen Stickstoffeinträge und der damit verbundenen Bodenversauerung sind fast alle Untersuchungsbestände in Cloppenburg gekalkt. Hierbei stellt sich die Frage, ob die Kalkung zu



Die Kompensationskalkung kann sowohl zu einer erhöhten als auch zu einer niedrigeren Nitrat-  
auswaschung führen. Die Reaktion des Waldökosystems auf die Kalkung scheint unter anderem durch den N-Sättigungsgrad des Waldbestandes beeinflusst zu sein.

Abb. 18: Nitratgehalt im Boden in Fichtenbeständen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Standorte mit signifikant unterschiedlichen Nitratkonzentrationen. Die Sterne zeigen einen signifikanten, Doppelterne einen hochsignifikanten Effekt der Kalkung (Je Standort und Behandlung wurden 4 Bodenprofile in 5 Tiefenstufen untersucht).



einem höheren Nitrataustrag mit dem Sickerwasser führt.

Lediglich zwei nicht gekalkte Bestände wurden in der Region Cloppenburg gefunden. Beide befinden sich in Barnstorf. Diese wurden zusammen mit benachbarten gekalkten Beständen auf gleichem Standort und mit gleicher Baumart auf den Nitratgehalt im Sickerwasser untersucht. Die Werte in den nicht gekalkten Beständen lagen in der Regel unter der Bestimmungsgrenze, was eine statistische Analyse unmöglich macht. Die Nitratwerte der gekalkten Bestände lagen mit wenigen Ausnahmen über der Bestimmungsgrenze, was auf einen durch Kalkung gesteigerten Nitrataustrag hinweist.

Zur weiteren Klärung der Bedeutung der Kalkung wurden Daten von acht gekalkten und nicht gekalkten Bestandespaaren von sechs Waldstandorten in Norddeutschland (EBERL, 2001) ausgewertet. Die Bodenproben stammten aus der Tiefe 0 – 60 cm. Das Nitrat wurde mittels eines wässrigen Extraktes aus den getrockneten Bodenproben gewonnen. Deshalb sind die Ergebnisdaten auf trockenen Boden bezogen, die Umrechnung in Sickerwasserkonzentration war nicht möglich. Die hier untersuchten Bestände liegen im Harz (Braunlage, Seesen), Solling, Hils, in der Göhrde und im ostholsteinischen Hügelland.

Die Bestände haben auf die Kalkung nicht einheitlich reagiert (Abb. 18). In der Göhrde, wo die Nitratgehalte niedrig waren, hatte die Kalkung

keinen Einfluss. An den Standorten Solling und ostholsteinisches Hügelland und Hochharz (Braunlage), wo die Nitratgehalte höher waren, wurden durch die Kalkung die Nitratgehalte erhöht. Im Hils und im Harz (Seesen) hatten die Nitratgehalte das höchste Niveau. Hier führte die Kalkung zu einer Erniedrigung der Nitratgehalte.

Im Untersuchungsgebiet Cloppenburg reicht das Spektrum der Nitratausträge unter Wald von sehr geringen bis zu sehr hohen Werten. Je nach Ausgangsniveau der Werte wirkt die Kalkung erhöhend oder erniedrigend auf die Nitratausträge. Großflächig betrachtet wird von der Kalkung erwartet, dass sie auf den Nitrataustrag keinen oder nur einen gering erhöhenden Einfluss hat.

**Mit der Kalkung wird der Säurebelastung durch den Stickstoffeintrag entgegengewirkt. Dabei erhöht sich die biologische Aktivität im Boden. Ob die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser durch die Kalkung erhöht werden, ist nicht eindeutig vorherzusagen. Offensichtlich haben die Standortseigenschaften sowie die Höhe der jeweiligen Nitratkonzentrationen im ungekalkten Boden (Kontrolle) darauf einen Einfluss. Vermutlich kann die Kalkung nur in Waldökosystemen, in denen der Stickstoff durch die anthropogene Belastung kein Mangel-element ist, zu einer erhöhten Nitratauswaschung führen.**

## 6.6 Bedeutung alter Schlagabraumwälle für den Nitrataustrag

Bei der Bestandesbegründung von Eichen sowie nach den Aufforstungsmaßnahmen nach dem Sturmwurf von 1972 wurde häufig der Schlagabraum (Äste, Kronenholzreste usw.) mit einem Teil des Auflagehumus zu Wällen zusammengeschoben. Nach dem Sturmwurf sollten die Flächen für eine maschinelle Pflanzung geeignet sein, um die Voraussetzung für eine schnelle Wiederbegründung der geworfenen Waldbestände zu schaffen (ANTON u. GUSSONE, 1983). In den Wällen war viel nährstoffreiches Substrat enthalten, aus dem

wahrscheinlich wesentlich mehr Stickstoff mineralisiert wurde als von den darauf wachsenden Pflanzen, zunächst der Schlagflora, später häufig Birken, aufgenommen werden konnte. Heute sind diese Schlagabraumwälle immer noch sichtbar. Möglicherweise gibt es dort noch vergleichsweise hohe Nitratausträge mit dem Sickerwasser.

Zum Verständnis der Bedeutung der Wälle für den Stickstoffhaushalt wird im Folgenden überschlägig der Stickstoffvorrat in den Wällen geschätzt: Unterstellt man im Auflagehumus einen Stickstoffvorrat von 1.300 kg N/ha – dies ist der mittlere Stickstoffvorrat im Auflagehumus von ca. 200 Profilen der forstlichen Standortskartierung in der Lüneburger Heide –, so führt das Zusammen-

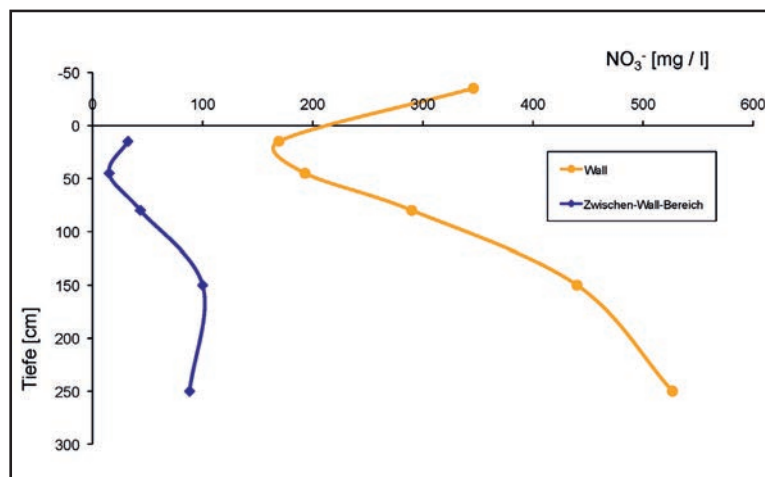


Abb. 19: Beispiel für die Nitratkonzentrationen im Wall- und im „Zwischen-Wall-Bereich“ in einem Eichenbestand

**In dem exemplarisch dargestellten Profil zeigt sich, dass unter 30 Jahre alten Schlagabraumwällen bis heute wesentlich mehr Nitrat zu finden ist, als unter dem Waldbestand außerhalb des Bereichs der Wälle.**

schieben des Auflagehumus auf ein Sechstel der Fläche eines Bestandes zu einem Stickstoffvorrat in den Wällen von entsprechend ca. 8.000 kg N ha<sup>-1</sup>. Bei den zuvor genannten 200 Profilen betrug der Stickstoffvorrat im Auflagehumus plus Mineralboden bis in 150 cm Tiefe ca. 4000 kg N/ha. Das heißt, dass sich dort, wo die Wälle sich befinden, der Stickstoffvorrat etwa verdreifacht hat. Diese Betrachtung verdeutlicht, in welcher Größenordnung die Stickstoffvorräte am Ort der Wälle liegen. In der vorliegenden Untersuchung wurden die Stickstoffvorräte in den Wällen nicht quantifiziert, da es nicht primär um die Stickstoffdynamik in den Wällen ging, sondern es wurde der Frage nachgegangen, ob die Wälle heute einen signifikanten Anteil an den Nitratausträgen unter Wald haben. Unabhängig davon ist anzunehmen, dass heute in den Wällen noch beträchtliche Stickstoffvorräte von bis zu mehreren tausend Kilogramm pro Hektar Stickstoff vorhanden sind.

Im Untersuchungsgebiet Cloppenburg wurden in sieben Eichenjungbeständen und in einem Douglasienjungbestand Proben jeweils unter einem Wall und im „Zwischen-Wall-Bereich“ untersucht. Die mittleren Nitratkonzentrationen im „Zwischen-Wall-Bereich“ reichten von 3 bis 95 mg NO<sub>3</sub>/l. Unter den Wällen lagen die mittleren Nitratkonzentrationen im Bereich von 49 bis 730 mg NO<sub>3</sub>/l (Abb. 19). Die Unterschiede zwischen Wall und „Zwischen-Wall-Bereich“ waren statistisch signifikant.

Die Wälle hatten einen Anteil von 5 bis 20 % der jeweiligen Bestandesfläche. Es stellt sich die Frage, ob der erhöhte Nitrataustrag unter dem Wall signifikant auf den Nitrataustrag auf der gesamten Bestandesfläche wirkt. Aus diesem Grund wurde die flächengewichtete Nitratkonzentration errechnet. Dabei wurde der Querschnitt der Wälle als Trapez idealisiert, und es wurde angenommen, dass sich die ausgeschüttete Nitratmenge linear mit der Höhe der Wälle ändert (Tab. 2).

## 6.7 Bedeutung historisch alter Waldstandorte für den Nitrataustrag

In Untersuchungen zum Einfluss der historischen Landnutzung auf den Stickstoffhaushalt gibt es Hinweise, dass sich Standorte mit historisch alten Wäldern von solchen unterscheiden, die über einen längeren Zeitraum landwirtschaftlich genutzt wurden und erst im Laufe der letzten 100 – 200 Jahre aufgeforstet wurden.

An historisch alten Waldstandorten fanden KOERNER et al. (1997) in den Vogesen, und RUF (2001) in Norddeutschland keine bzw. niedrige Nitrifikationsraten, wobei unter nicht alten Waldstandorten der Nitrifikationsgrad vergleichsweise hoch war. Dieser Befund deutet auf Unterschiede zwischen dem Nitrataustrag von Waldstandorten mit unterschiedlicher Landnutzungsgeschichte hin.

Diese Erkenntnisse zum Verhalten alter Waldstandorte gaben Anlass, im Untersuchungsraum Cloppenburg der Frage nachzugehen, ob dort Unterschiede im Nitratgehalt der Böden auf die Geschichte der Landnutzung zurückzuführen sind.

Im Mittel lagen die flächengemittelten Nitratkonzentrationen im Gesamtbestand um 15 mg NO<sub>3</sub>/l höher als die Nitratkonzentrationen, die im „Zwischen-Wall-Bereich“ gemessen wurden. Diese Differenz ist statistisch signifikant und beträgt in ihrem absoluten Wert etwa ein Drittel des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung (50 mg NO<sub>3</sub>/l).

**Tab. 2: Mittlere Nitratkonzentrationen im Boden unter Schlagabraumwällen und im „Zwischen-Wall-Bereich“ im Vergleich zur Nitratkonzentration im gesamten Waldbestand**

| Bestand   | Zwischen-Wall-Bereich<br>NO <sub>3</sub> [mg / l] | Wall<br>NO <sub>3</sub> [mg / l] | Gesamter Waldbestand<br>flächengewichtet<br>NO <sub>3</sub> [mg / l] |
|-----------|---------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Eiche 1   | 24                                                | 364                              | 54                                                                   |
| Eiche 2   | 3                                                 | 736                              | 29                                                                   |
| Eiche 3   | 3                                                 | 90                               | 14                                                                   |
| Eiche 4   | 80                                                | 126                              | 85                                                                   |
| Eiche 5   | 78                                                | 430                              | 111                                                                  |
| Eiche 6   | 95                                                | 81                               | 93                                                                   |
| Eiche 7   | 18                                                | 48                               | 20                                                                   |
| Douglasie | 70                                                | 66                               | 70                                                                   |

**Der nach dem Sturmwurf 1972 auf Wälle zusammengeschobene Schlagabraum und Auflagehumus gibt noch heute Nitrat ab. Dadurch hat sich die Sickerwasserqualität in Waldbeständen deutlich verschlechtert. Wegen der hohen Nährstoffverluste wird heute der Schlagabraum so weit wie möglich auf der Fläche belassen. Dies ist auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht sinnvoll.**

Historisch alte Wälder sind nach WULF (1994) als Wälder definiert, für die es Hinweise in historischen Karten, Bestandesbeschreibungen oder andere Indizien gibt, dass sie seit mehreren Jahrhunderten existieren. In Norddeutschland gründen sich die Informationen zu historisch alten Wäldern im Wesentlichen auf Landvermessungen ab Mitte des 18. Jahrhunderts. Für den Raum Cloppenburg liegen Kartenunterlagen aus der Lecoq'schen Vermessung von 1805 vor. Die Probenahmepunkte wurden anhand der Angaben zur Lecoq'schen Vermessung als historisch alter bzw. historisch nicht alter Waldstandort eingruppiert.

Im statistischen Test wurden unmittelbar benachbarte Standorte historisch alter und historisch nicht alter Waldstandorte einbezogen (Abb. 20). Mit dieser Art der Gruppierung wurde der Einfluss der Faktoren Baumart und Bestandesalter auf die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser bei der statistischen Auswertung ausgeschlossen.



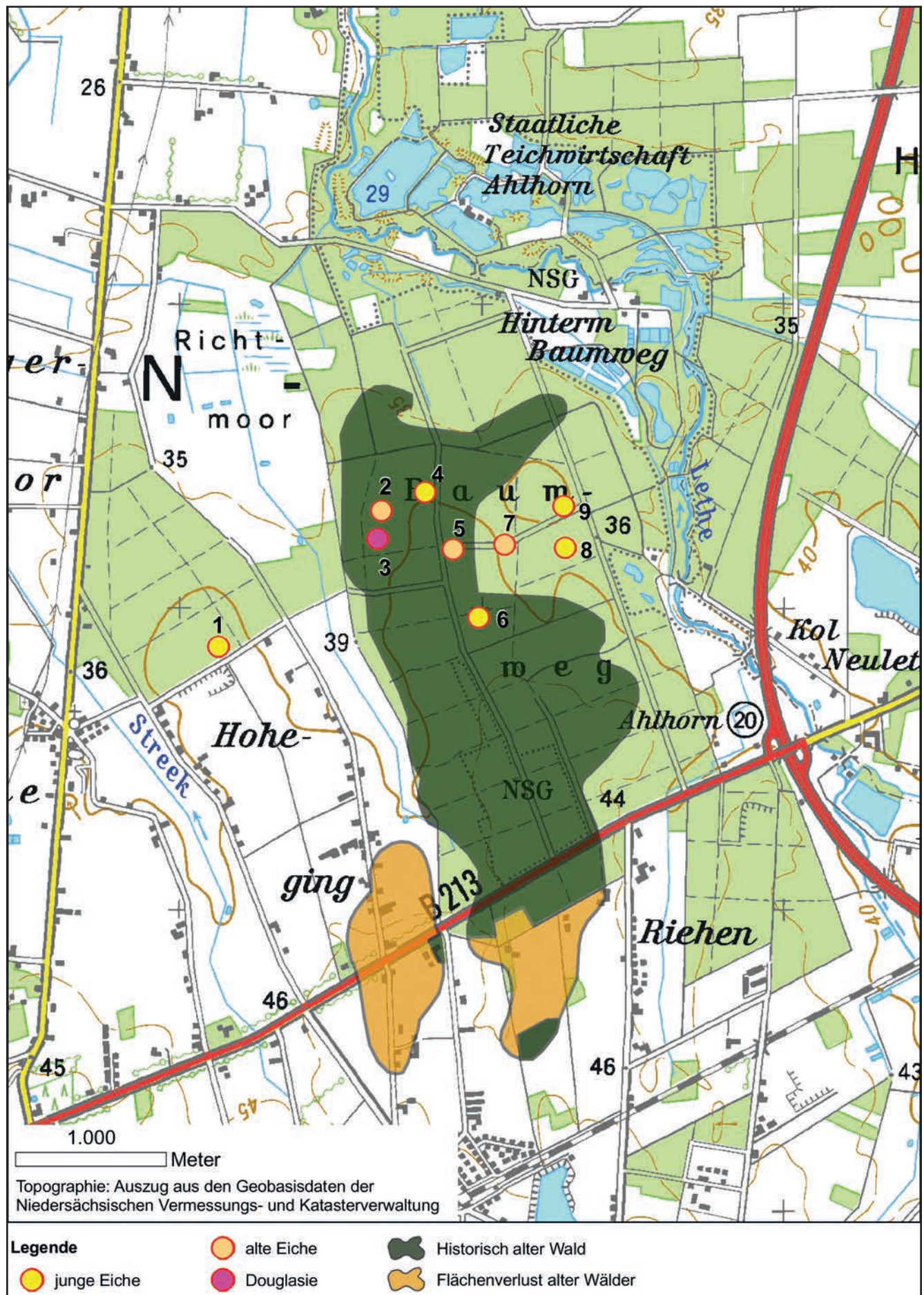
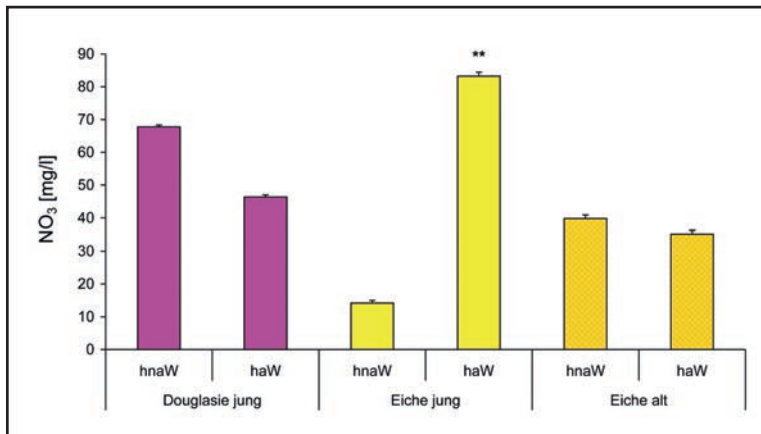


Abb. 20: Historisch alter Wald nach der Lecoq'schen Vermessung. Dunkelgrüne Farbe: bei LECOQ (1805) sicher als Wald erkennbar dargestellt und heute noch als Wald vorhanden (TK 1 : 100 000); orange Farbe: Flächenverluste alter Wälder (1805- Lecoq - ca.1900); rote Kreise mit unterschiedlichen Farben: Orte der Probenahme für die Nitratuntersuchungen (Quelle: NDS. FORSTAMT HASBRUCH 1995)



Die Annahme, dass historisch alte Waldstandorte bei gleichen Stickstoffeinträgen niedrigere Nitratausträge aufweisen als historisch nicht alte Wälder, konnte im Untersuchungsgebiet Cloppenburg nicht bestätigt werden.

**Abb. 21:** Nitratkonzentrationen an historisch alten (haW) und historisch nicht alten (hnaW) Waldstandorten (geschätzte Randmittel und Standardfehler). Die Doppelsterne zeigen einen hochsignifikanten Effekt der Nutzungsgeschichte. In aktuellen Douglasienjungbeständen ( $n = 4/22$  [haW];  $n = 6/29$  [hnaW]) und Eiche Jung- ( $n = 2/10$  [haW],  $n = 3/16$  [hnaW]) und Altbeständen ( $n = 2/12$  [haW];  $n = 3/14$  [hnaW])

Folgt man den Vorstellungen von RUF (2001), so müssten unter historisch alten Waldstandorten die Nitratkonzentrationen geringer sein als unter historisch nicht alten Waldstandorten. Dieses Muster wurde im Raum Cloppenburg nicht gefunden. Bei den Douglasienjungbeständen und den Eichenaltbeständen gab es keine Unterschiede zwischen historisch alten und historisch nicht alten Waldstandorten. Statistisch ließ sich nur im Fall der Eichenjungbestände ein Einfluss des Faktors Nutzungsgeschichte zeigen: an den historisch alten Waldstandorten waren die Nitratkonzentrationen höher als an den historisch nicht alten Waldstandorten (Abb. 21).

Der Einfluss der Nutzungsgeschichte ist offenbar nicht so groß, dass sich daraus klare Effekte ergeben. Die Gründe dafür sind nicht eindeutig. Es spricht vieles dafür, dass der Einfluss der Nutzungsgeschichte durch die hohen luftbürtigen Stick-

stoffeinträge in den letzten 30 – 40 Jahren hohen luftbürtigen Stickstoffeinträgen überprägt worden sind. Ferner ist ungeklärt, wie die historisch nicht alten Waldstandorte in der Zeit, in der sie nicht mit Wald bestanden waren, genutzt wurden. Hinsichtlich Nährstoffimport bzw. -export gibt es bei den historisch nicht alten Waldstandorten zwei gegensätzliche Nutzungen: Ackerstandorte, auf denen Stickstoff mit dem Dung aufgebracht wurde, und Heidestandorte, auf denen mit dem Plaggenhieb ein Nährstoffexport erfolgte. Dazwischen sind verschiedene Mischformen denkbar.

**Standorte, auf denen sich nachweislich seit mehr als 200 Jahren Wald befindet, unterscheiden sich hinsichtlich der Nitratgehalte im Boden nicht von ehemaligen Heide- und Ackerstandorten, die erst in den letzten 200 Jahren aufgeforstet worden sind.**



## 7 Karten des Nitrataustragsrisikos

Ziel der dargestellten Untersuchungen war es, das Risiko erhöhten Nitrataustrages kartenmäßig darzustellen. Bei den Karten, die zur Darstellung der Prognose der Nitratausträge dienen, wurde auf die statistischen Beziehungen der Nitratkonzentrationen zu Baumart, Bestandesalter und Bodensubstrat zurückgegriffen. Diese stellen den Zusammenhang zwischen den Stickstoffeinträgen als Funktion der Baumart und Baumhöhe sowie dem Nitrataustrag zutreffend dar (siehe Abb. 10). Dabei wurden die Wahrscheinlichkeiten für die Überschreitung der Nitratkonzentration von 50 mg NO<sub>3</sub>/l anhand der Ergebnisse berechnet, die im Jahr 2004 an 50 Probenahmepunkten im Untersuchungsgebiet Cloppenburg ermittelt worden sind. Die in Tab. 3 angegebenen Wahrscheinlichkeiten stellen die statistische Grundlage für die Karten des Risikos von Nitratausträgen dar. Dieses statistische Modell gilt für Böden aus Sanden und verlehmtten Sanden, wie sie im Untersuchungsgebiet Cloppenburg vorkommen (Substrat-Lagerungszahlen 2.1 - 2.6, 2.8, 3.1 - 3.8, 4.1 - 4.4, der Niedersächsischen Forstlichen Standortaufnahme). Das Modell gilt nicht für Lehme und lehmige, schluffige, schlickige Feinsande, wie sie in Barnstorf untersucht wurden (Substrat-Lagerungszahlen 5.3 und 6.3).

Aus den in Tab. 3 enthaltenen Wahrscheinlichkeiten wurden Risikoklassen erstellt, die bei der kartenmäßigen Darstellung verwandt wurden. In Tab. 4 wird zwischen Wahrscheinlichkeiten unterschieden, die auf Messungen und auf Interpolationen bzw. Schätzungen basieren.

**Tab. 3: Wahrscheinlichkeiten [%] der Überschreitung der Nitratkonzentration von 50 mg NO<sub>3</sub>/l unter Waldbeständen im Untersuchungsraum Cloppenburg**

| Baumart   | Alter          | Mittelwert | Standardabweichung | 95 % Konfidenzintervall von bis | Tukey HSD |
|-----------|----------------|------------|--------------------|---------------------------------|-----------|
| Douglasie | jung           | 45         | ± 6                | 33 57                           | b         |
| Douglasie | alt-Sand       | 88         | ± 10               | 68 107                          | cd        |
| Douglasie | alt-lehm. Sand | 90         | ± 11               | 69 111                          | d         |
| Eiche     | jung           | 0          | ± 8                | - 15                            | a         |
| Eiche     | alt            | 49         | ± 8                | 32 66                           | bc        |
| Kiefer    | jung           | 23         | ± 7                | 9 37                            | ab        |
| Kiefer    | mittelalt      | 50         | ± 6                | 39 62                           | bcd       |
| Kiefer    | alt            | 33         | ± 15               | 4 62                            | ab        |

*Erläuterungen: Buchstaben in letzter Spalte „Tukey HSD“ siehe Erläuterungen unter Abb. 9*

Wegen des begrenzten Stichprobenumfanges konnten nicht alle vorkommenden Baumarten und Standortstypen erfasst werden. Um dennoch eine vollständige Darstellung in den Abbildungen 22 und 23 zu bekommen, wurden für die nicht in der Untersuchung enthaltenen Baumarten und Standortstypen Annahmen oder Interpolationen aus den vorliegenden Daten zugrunde gelegt. So wurde, um mittelalte Eichen- und Douglasienbestände in der Karte berücksichtigen zu können, zwischen den Jung- und Altbeständen linear interpoliert. Für die

Fichte, die in ihrer Baum- und Bestandesstruktur der Douglasie ähnelt, wurden die Wahrscheinlichkeiten der Douglasie übernommen und entsprechend der Höhenalterskurve - die Douglasie wächst schneller als die Fichte - angepasst. Das Risiko des Nitrataustrages in Beständen der Altersstufe < 15 Jahre wird nach Experteneinschätzung als gering eingestuft.

**Tab. 4: Wahrscheinlichkeitsklassen der Überschreitung der Nitratkonzentration von 50 mg NO<sub>3</sub>/l**

| Bestandestyp                    | Alter [J] |      | Wahrscheinlichkeit [%]          |     |
|---------------------------------|-----------|------|---------------------------------|-----|
|                                 | von       | bis  | > 50 mg NO <sub>3</sub> / l von | bis |
| Dougl < 15 <sup>4)</sup>        |           | < 15 | 0                               | 20  |
| Dougl. jung <sup>1)</sup>       | 15        | 35   | 40                              | 60  |
| Dougl. m-alt <sup>2)</sup>      | 35        | 50   | 60                              | 80  |
| Dougl. alt <sup>1)</sup>        | 50        | 80   | 80                              | 100 |
| Eiche < 15 <sup>4)</sup>        |           | <15  | 0                               | 20  |
| Eiche jung <sup>1)</sup>        | 15        | 40   | 0                               | 20  |
| Eiche mittelalt <sup>2)</sup>   | 40        | 100  | 20                              | 40  |
| Eiche alt <sup>1)</sup>         | 100       | 140  | 40                              | 60  |
| Kiefer < 15 <sup>4)</sup>       |           | <15  | 0                               | 20  |
| Kiefer jung <sup>1)</sup>       | 15        | 35   | 20                              | 40  |
| Kiefer mittel alt <sup>1)</sup> | 35        | 65   | 40                              | 60  |
| Kiefer alt <sup>1)</sup>        | 65        | 120  | 20                              | 40  |
| Fichte <15 <sup>4)</sup>        |           | <15  | 0                               | 20  |
| Fichte jung <sup>3)</sup>       | 25        | 50   | 40                              | 60  |
| Fichte mittel alt <sup>3)</sup> | 50        | 90   | 60                              | 80  |
| Fichte alt <sup>3)</sup>        | 90        | 120  | 80                              | 100 |

*Erläuterungen:*

1) auf Messwerten basierend

2) basierend auf Interpolation (Ergänzung innerhalb des Bereiches der Messwerte): mittelalte Bestände: linear interpoliert zwischen Jung- und Altbeständen

3) basierend auf Extrapolation (Ergänzung außerhalb des Bereiches der Messwerte), Altershöhenkurven korrigiert von Douglasie analog übertragen

4) Experteneinschätzung

**Tab. 5: Risiko beziehungsweise Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Nitrat-Trinkwassergrenzwertes von 50 mg NO<sub>3</sub>/l auf Waldflächen im Untersuchungsgebiet Cloppenburg**

| Wahrscheinlichkeit [%] | Fläche [ha] | Flächenanteil [%] |
|------------------------|-------------|-------------------|
| 0 - 20                 | 1.173       | 20                |
| 20 - 40                | 1.939       | 33                |
| 40 - 60                | 2.319       | 40                |
| 60 - 80                | 281         | 5                 |
| 80 - 100               | 148         | 3                 |

Die Karten (siehe Abb. 22, 23) geben einen Überblick über die räumliche Verteilung des Risikos der Überschreitung des Nitrat-Trinkwassergrenzwertes. Sie hängt im Wesentlichen von der Baumartenverteilung und dem Bestandesalter ab. Auf 80 % der Fläche besteht eine Wahrscheinlichkeit von > 20 %, bei der man mit einer Überschreitung der

Nitratkonzentration von 50 mg NO<sub>3</sub>/l im Sickerwasser rechnen muss. Nur auf einem Fünftel der Waldfläche ist das Risiko der Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes gering (< 20 %). Diese Zahlen unterstreichen, dass die Wälder im Untersuchungsraum Cloppenburg sehr hoch mit Stickstoff gesättigt sind und dass die Neubildung qualitativ hochwertigen Grundwassers unter Wald infrage gestellt ist.

Waldbaulich bestehen kaum Möglichkeiten, beispielsweise über Maßnahmen wie die Baumartenwahl steuernd auf die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser einzuwirken. Es bestehen Unterschiede zwischen den Laubbäumen, in diesem Fall der Eiche und den Nadelbäumen Kiefer und Douglasie, aber selbst unter den Eichenaltbeständen liegt das Risiko der Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes von 50 mg NO<sub>3</sub>/l bei 40 – 60 %. Auf 74 % der Fläche im Raum Cloppenburg sind die Nitratkonzentrationen über Messungen belegt, für 7 % der Fläche musste zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von 50 mg NO<sub>3</sub>/l interpoliert werden und für 19 % der Fläche wurde auf der Basis der Messdaten extrapoliert. Die Standorte im Untersuchungsgebiet Cloppenburg bzw. im Forstamt Ahlhorn (Standort Barnstorf) sind für den Raum Weser-Ems repräsentativ. Deshalb ist es möglich, dieses Modell zur räumlichen Vorhersage der Nitratausträge unter Forst in Veredelungsgebieten im Raum Weser-Ems anzuwenden. Voraussetzung dafür ist, dass die entsprechenden Eingangsdaten (Baumarten, Bestandesalter, Standortstyp) für das Modell zur Verfügung stehen.

In Tab. 6 wurden die Waldbestände der Niedersächsischen Forstämter im Raum Weser-Ems in Risikoklassen eingestuft. Ähnlich wie der Untersuchungsraum Cloppenburg liegen in jedem Forstamt über 80 % der Fläche in einer Klasse mit erhöhtem Nitrataustragsrisiko. Diese Zahlen sind sehr hoch.

In Tab. 7 ist der Anteil der Flächen auf den Karten angegeben, bei denen das ausgewiesene Nitratriskiko auf Messwerten, auf Inter- und Extrapolationen basiert. Der Flächenanteil kann als Maßstab für die Güte der Karten zum Nitrataustragsrisiko gewertet werden. Der Anteil der Flächen, die nicht von dem Modell beschrieben werden können, lag in drei von vier Forstämtern bei 20 %.

**Die Datengrundlage für Karten, die das Risiko von erhöhten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser beschreiben, ist gut: 70 – 80 % der Waldfläche in den niedersächsischen Forstämtern im Bereich Weser-Ems werden von den Daten bzw. von dem daraus abgeleiteten statistischen Modell abgedeckt. Das Risiko, dass die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser unter Wald den Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 50 mg/l Nitrat überschreiten, ist sehr hoch. Voraussetzung für die Erstellung flächendeckender Karten ist die Verfügbarkeit der entsprechenden forstlichen und standörtlichen Eingangsdaten.**

**Tab. 6: Flächenanteile der Risikoklassen für Nitrataustrag in den Niedersächsischen Forstämtern (NFA) im Raum Weser-Ems**

| Forstamt      | Fläche*<br>[ha] | Wahrscheinlichkeit<br>der Überschreitung<br>von 50 mg NO <sub>3</sub> /l |           |           |           |            |
|---------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|               |                 | 0 – 20 %                                                                 | 20 – 40 % | 40 – 60 % | 60 – 80 % | 80 – 100 % |
| NFA Ahlhorn   | 8.943           | 18                                                                       | 30        | 38        | 11        | 3          |
| NFA Neuenburg | 7.770           | 15                                                                       | 26        | 44        | 13        | 2          |
| NFA Hasbruch  | 9.039           | 6                                                                        | 33        | 38        | 18        | 5          |
| NFA Ankum     | 6.112           | 12                                                                       | 37        | 44        | 5         | 2          |

\* Waldfläche, über die Informationen zu den Beständen verfügbar waren, und die von dem Nitrataustragsmodell abgedeckt sind.

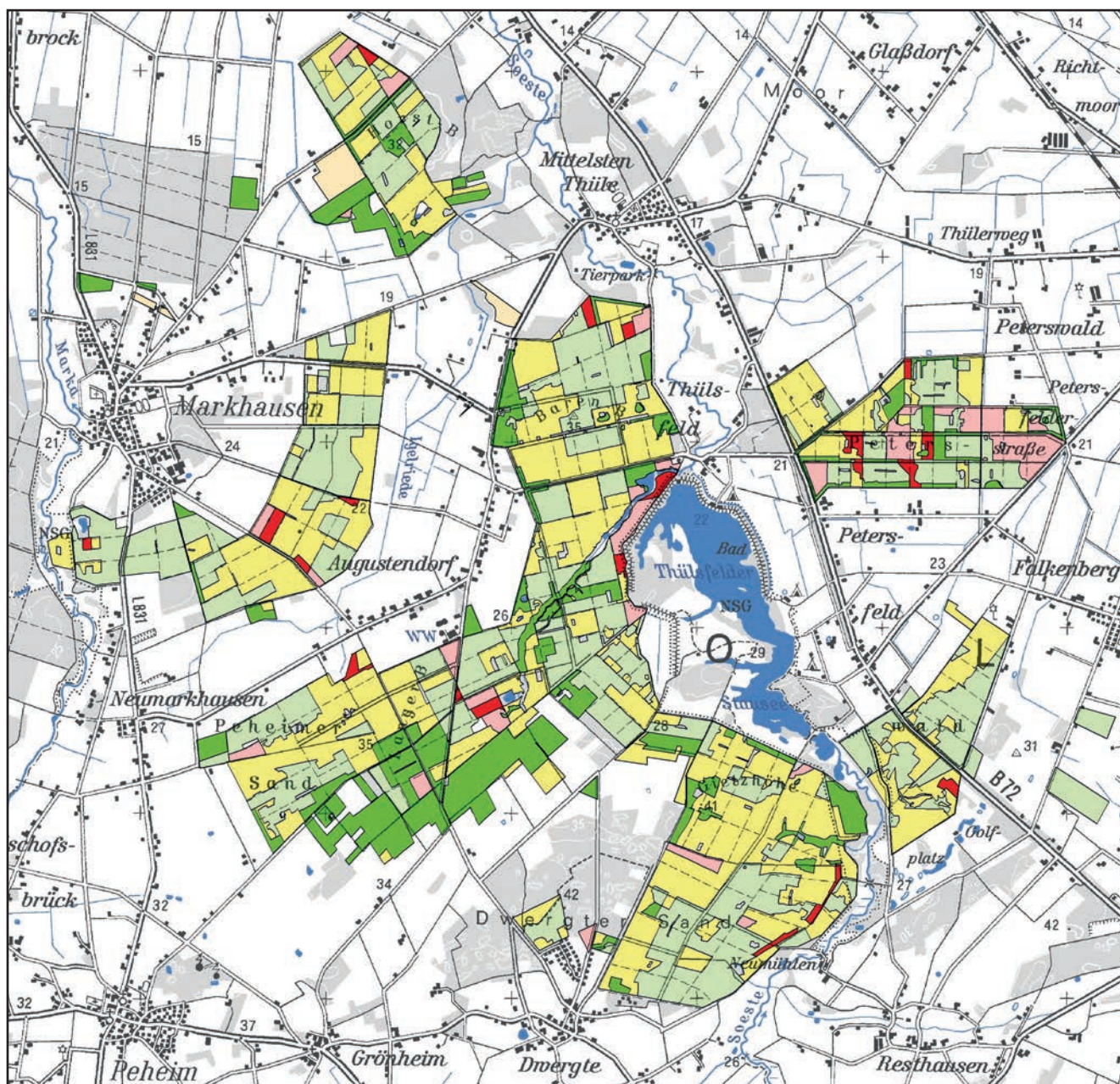
**Tab. 7: Flächenanteil in der Risikokarte für Nitrataustrag in den Niedersächsischen Forstämtern (NFA) im Raum Weser-Ems, dessen Wahrscheinlichkeitsklassen direkt auf Messungen, auf Interpolationen und Extrapolationen beruhen.**

| Forstamt      | Gesamtfläche*<br>[ha] | Messungen<br>[%] | Interpolation<br>[%] | Extrapolation<br>[%] | nicht modelliert**<br>[%] |
|---------------|-----------------------|------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| NFA Ahlhorn   | 10.878                | 43               | 20                   | 19                   | 18                        |
| NFA Neuenburg | 11.345                | 31               | 11                   | 26                   | 32                        |
| NFA Hasbruch  | 11.042                | 32               | 15                   | 35                   | 18                        |
| NFA Ankum     | 7.785                 | 36               | 26                   | 16                   | 21                        |

\* Die Waldfläche, für die Bestockungsinformationen verfügbar waren

\*\* Standortseigenschaften oder Baumart waren nicht durch die Wahrscheinlichkeitsklassen in Tab. 4 abgedeckt





#### Legende

Wahrscheinlichkeit [%] der Überschreitung des Grenzwertes nach TrinkwV von 50 mg NO<sub>3</sub>/l

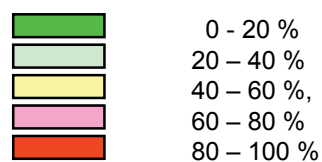
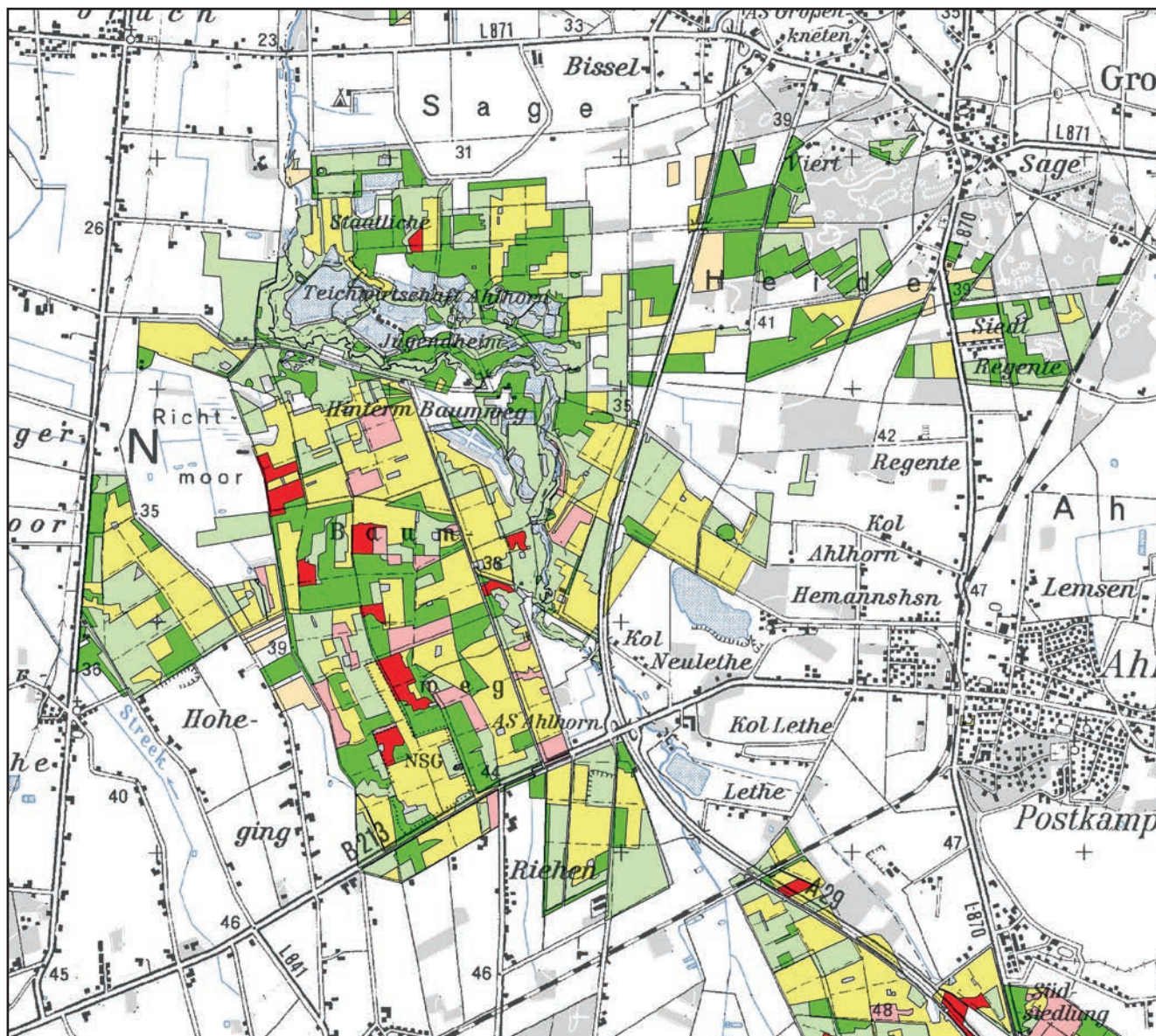


Abb. 22: Karte des Risikos bzw. der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes für Nitrat von 50 mg NO<sub>3</sub>/l im Untersuchungsgebiet Cloppenburg, Reviere Augustendorf und Cloppenburg.





#### Legende

Wahrscheinlichkeit [%] der Überschreitung des Grenzwertes nach TrinkwV von 50 mg NO<sub>3</sub>/l

|  |            |
|--|------------|
|  | 0 - 20 %   |
|  | 20 - 40 %  |
|  | 40 - 60 %  |
|  | 60 - 80 %  |
|  | 80 - 100 % |

Abb. 23: Karte des Risikos beziehungsweise der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes für Nitrat von 50 mg NO<sub>3</sub>/l im Untersuchungsgebiet Cloppenburg, Revier Baumweg.



## 8 Fazit und Ausblick

Aufgrund zum Teil hoher bis sehr hoher luftbürtiger Stickstoffeinträge im Raum Weser-Ems treten in dieser Region im Sickerwasser unter Wald vielerorts erhöhte Nitratkonzentrationen auf. Zielsetzung der vorliegenden Untersuchung war es, die Höhe der Nitratausträge unter Wald zu beschreiben und aufzuzeigen, welche Möglichkeiten von Seiten der Forstwirtschaft bestehen, die Nitratausträge zu verringern. Dazu wurden die Beziehungen zwischen den Nitratkonzentrationen bzw. -austrägen im Sickerwasser und den Eigenschaften der Waldbestände und der Standorte analysiert. Es wurden Bestandesalter und -höhe, Baumart und Bodeneigenschaften untersucht, und Risikokarten für den Nitrataustrag erstellt, um darauf aufbauend Empfehlungen für waldbauliche Maßnahmen zur Verringerung der Nitratausträge abzuleiten.

Im Untersuchungsgebiet Cloppenburg wurden auf den dort vorherrschenden Sandstandorten folgende Ergebnisse erzielt:

- Die Nitratbelastung des Sickerwassers unter Wald ist im Vergleich zu anderen Regionen in Niedersachsen und Deutschland deutlich erhöht. Auf knapp 5000 ha des in der Region Weser-Ems untersuchten Landeswaldes ist mit 60 %-iger Wahrscheinlichkeit mit einer Überschreitung des Grenzwertes für Nitrat nach der Trinkwasserverordnung (50 mg/l NO<sub>3</sub>) zu rechnen.
- Der hohe luftbürtige Stickstoffeintrag stellt die wichtigste treibende Kraft für den Nitrataustrag dar.
- Bei der vorgefundenen hohen Belastung der Atmosphäre mit reaktivem Stickstoff hängt der Stickstoffeintrag in den Wald weitgehend von der Bestandeshöhe ab.
- Unter Eichenbeständen ist das Stickstoffspeichervermögen höher als unter Nadelbaumbeständen. Damit ist das Nitrataustragsrisiko unter Nadelbaumbeständen höher als unter Eichenbeständen.

Aus diesen Befunden ergeben sich für die Forstwirtschaft theoretisch folgende Möglichkeiten zur Verringerung des Nitrataustrages mit dem Sickerwasser:

- Vermeidung großer Bestandeshöhen durch Verkürzung des Produktionszeitraumes und vorzeitige Ernte der nicht hiebsreifen Bestände.
- Vollbaumnutzung zur Erhöhung des Stickstoffexportes mit dem Erntegut.
- Vermehrter Anbau von Laubbäumen.

Die genannten Maßnahmen sind aus ökologischer Sicht wenig sinnvoll und effektiv. Nach den Ergebnissen dieser Untersuchung müsste der Produktionszeitraum bei der Fichte von 80 - 100 Jahren auf 50 Jahre und bei der Douglasie von 70 Jahren auf 35 Jahre verkürzt werden, damit auf der genannten Fläche von 5000 ha die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hoher Nitratkonzentrationen von 60 % auf 40 % vermindert wird. Diese Verkürzung der Produktionszeiträume ist mit erheblichen Ertragseinbußen für die Forstbetriebe verbunden, und sie ist ökologisch nicht sinnvoll, weil gerade in der zweiten Hälfte des Produktionszeitraumes viel Holz bei verhältnismäßig geringem Nährstoffeinsatz zuwächst. Zudem führt die Verkürzung der Produktionszeiträume zu keiner substanziellen Reduzierung des Nitratproblems.

Bei der Vollbaumnutzung wird dem Wald, insbesondere in Jungbeständen, vermehrt überschüssiger Stickstoff entnommen, gleichzeitig wird jedoch der Export von anderen Nährstoffen überproportional erhöht. Dies ist auf den schwach und mäßig versorgten Standorten in der Region Weser-Ems nicht vertretbar, weil sie die Nährstoffnachhaltigkeit der Standorte verletzt.

Der vermehrte Anbau von Laubbäumen ist ökologisch wie ökonomisch nur auf besser versorgten Standorten sinnvoll. Diese Standorte kommen in der Region Weser-Ems nur in geringem Ausmaß im Wald vor. Deshalb sind einem vermehrten Anbau von Laubbäumen enge Grenzen gesetzt. Darüber hinaus ist die überwiegende Anzahl der Waldbestände erst nach dem Sturmwurf von 1972 begründet worden, so dass ein gegebenenfalls zu erwägender Waldumbau erst in den nächsten Jahrzehnten ansteht. Somit scheidet ein Baumartenwechsel als wirksame Maßnahme zur Verringerung des Nitrataustrages unter Wald in dieser Region praktisch aus.

Für landwirtschaftlich genutzte Flächen haben die so genannten freiwilligen Vereinbarungen der Kooperationen in Trinkwassergewinnungsgebieten eindrucksvoll bewiesen, dass mit einem reduzierten Einsatz von Stickstoffdünger die Nitratausträge mit dem Sickerwasser verringert werden können. In der Forstwirtschaft ist dies nicht möglich, da der luftbürtige Stickstoffeintrag in den Wald nicht über Freiwillige Vereinbarungen steuerbar ist. Durch waldbauliche Maßnahmen kann der Stickstoffeintrag in die Waldbestände nur unwesentlich beeinflusst werden. Zudem wirken diese Maßnahmen relativ langsam.

Im Raum Weser-Ems lässt sich deshalb die Qualität des Grundwassers unter Wald nur durch eine Verringerung der Stickstoffemissionen verbessern.

## 9 Literatur

- ANTON, K.K., GUSSONE, H.J. (1983): Düngung von Douglasien-Jungwüchsen im Bezirk Weser/Ems. Forst- und Holzwirt 38, 226 – 230.
- ASCHE, N., DOHMEN, H., DAME, G., NOLTE, N., HUSEMANN, T. (2007): Grundwasserschutz durch intensive Biomassenutzung. AFZ/Der Wald 62, 594-597.
- BERG, B. (2000): Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. Forest Ecology and Management 133: 13-22
- BERG, B., MCCLAUGHERTY, C. (2003): Plant litter. Springer Verlag, Berlin.
- BMVEL (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystemen-Dauerbeobachtungsflächen. – Arbeitskreis C der Bund-/Länder Arbeitsgruppe Level II, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; Bonn.
- BORKEN, W., MATZNER, E. (2004): Nitrate leaching in forest soils: an analysis of longterm monitoring sites in Germany, Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 167, 277-283.
- BÖTTCHER J., SPRINGOB, G. (2001): A Carbon balance model for organic layers of acid forest soils. J. Plant Nutr. Soil Sci 164, 399 – 405.
- BUBERL H.G., V. WILPERT, K., TREFFZ-MALCHER, G., HILDEBRAND, E.E., WIEBEL, M. (1994): Der chemische Zustand von Waldböden in Baden-Württemberg. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 182, Freiburg im Breisgau.
- BÜTTNER, G. (1997): Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) in Niedersachsen 1990-1991. Schriften aus der Forstl. Fak. der Univ. Göttingen und der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt 122, 205 S.
- CORRE, M. D., LAMERSDORF, N. P. (2004): Reversal of nitrogen saturation after long term deposition reduction: impact on soil nitrogen cycling. Ecology, 85:3090-3104.
- DE VRIES, W., JANSEN, P.C. (1994). Effects of acid deposition on 150 forest stands in the Netherlands. Input-output budgets for sulphur, nitrogen, base cations and aluminium. Report 69.3. Agricultural Research Department. The Winand Staring Centre for integrated Land. Soil and Water Research, Wageningen. The Netherlands, pp. 1-60. zitiert by: CALLESEN, I., RAULUND-RASMUSSEN, K., GUNDERSEN, P., STRYHN, H. 1999. Nitrate concentrations in soil solutions below Danish forests. Forest Ecology and Management 114, 71-82.
- EBERL, C. (2001): Wirkungen der praxisüblichen Kompensationskalkung auf Indikatoren des Humus-, Mineralboden- und Kronenzustandes auf Dauerbeobachtungsflächen in Niedersachsen und Schleswig-Holstein. In: Freiburger Forstliche Forschung, 33, 167 – 181.
- FÖRSTER, P. (1975): Mineralische Stoffbelastung im boden- und oberflächennahen Grundwasser unter Nadelwald und bei Ackernutzung in einem Sandboden Nordwestdeutschlands. Forstw. Cbl. 94, 67-78.
- GAUGER, T.H., ANSHELM, F., SCHUSTER, H., ERISMAN, J.W., VERMEULEN, A.T., DRAAIJERS, P.G., BLEEKER, A., NAGEL, H.D. (2002): Mapping of ecosystem specific long-term trends in deposition loads and concentrations of air pollutants in Germany and their comparison with critical loads and critical levels. Part 1: Deposition loads 1990-1999. Final Report Project 299 42 210, Umweltbundesamt und Institut für Navigation der Universität Stuttgart.
- KOERNER, W., DUPOUEY, J.L., DAMBRINE, E., BENOÎT, M. (1997): Influence of past landuse on vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. J. Ecology 85, 351 – 358.
- KÖNIG, N., FORTMANN, H. (1996/1999): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltanalytik-Labors der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt und des Zentrallabor II des Forschungszentrums Waldökosysteme, Teil 1-4. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme B46-49, 58-59.
- MACDONALD, J.A., DISE, N.B., NATZNER, E., ARMBRUSTER, M., GUNDERSEN, P., FORSIUS, M. (2002): Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. Global Change Biology 8: 1028 – 1033.
- MEIWES, K.J., MEESENBURG, H., BARTENS, H., RADEMACHER, P., KHANNA, P.K. (2002): Akkumulation des Auflagehumus im Solling – mögliche Ursachen und Bedeutung für den Nährstoffkreislauf. Forst und Holz 57, 428-433.
- MELLERT, K.H., GENSIO, A., KÖLLING, C.H. (2005): Stickstoffsättigung in den Wäldern Bayerns - Ergebnisse der Nitratinventur. Forstarchiv 76: 35-43.
- MINDRUP, M., MEIWES, K.J., KHANNA, P.K. (2001): Long-term nutrient dynamics of a spruce stand fertilized periodically for more than 50 years. In: Horst WJ et al. (Eds.) Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers. 908- 909.
- NIEDERSÄCHSISCHES FORSTAMT HASBRUCH (1995): Auswertung zu historisch alten Wäldern im Reg.-Bez.-Weser-Ems auf Basis der Karten von Lecoq 1787-1798; 6 topograph. Karten; unpubl. (Mskr. Stelle für Waldökologie und Waldnaturschutz Hasbuch)
- NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (NLWK) (2007): Grundwasserversauerung, Methoden zur Gefährdungsabschätzung und Möglichkeiten zu Gegenmaßnahmen, Grundwasser, Band 7
- MOHR, K., SCHAAF, S., HORVÁTH, B., MEESENBURG, H., DÄMMGEN, U. (2005): Stoff- und Energieflüsse der im ANSWER-Projekt untersuchten Waldbestände. Landbauforschung, Sonderheft 279, 69 – 94.
- PRETSCH, H. (1996): Growth trends of forest in Southern Germany. In: Growth trends in European forests (eds: Spieker H, Mielikäinen K, Köhl M, Skovsgaard J) pp. 107 – 131. European Forest Institute Research Rep. 5, Springer, New York.
- PRIETZEL, J., STETTER, U., KLEMMT, J.H., REHFUESS, K.E. (2006): Recent carbon and nitrogen accumulation and acidification in soils of two Scots pine ecosystems in Southern Germany. Plant and Soil, 289: 153 – 170.
- RUF, A. (2001): Stoffumsatzleistungen in Böden von zwei historisch alten und zwei rezenten Laubwäldern im Niedersächsischen Flachland. Andrias 15, 173-184.
- TRINKWV (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für die menschliche Gesundheit (Trinkwasserverordnung). Vom 21. Mai 2001. BGBl I, S. 2001, S. 959. Zuletzt geändert durch Art. 263 V v. 25.11.2003. BGBl I 2003, S. 2304.
- WIENHAUS, S., HÖPER, H., EISELE, M., MEESENBURG, H., SCHÄFER, W. (2008): Nutzung bodenkundlicher-hydrologischer Informationen zur Ausweisung von Zielgebieten für den Grundwasserschutz. – Ergebnisse eines Modellprojektes (NOLIMP) zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie. GeoBerichte 9, 1 – 56.
- ZEZSCHWITZ, E. VON (1989): Humusformenwandel unter Wald. Mittl. D. Dtsch. Bodenkundlichen Gesellsch. 59, 1249 – 1254.