

Zeitliche Veränderungen von Bioindikationsparametern in verschiedenen Kompartimenten von Kiefernforsten

3. Kiefernadeln

Kiefernadeln (*Pinus sylvestris* L.) und Baumscheiben wurden zur Erfassung und Kontrolle von Auswirkungen atmosphärischer Stoffeinträge in Altbeständen von Kiefernforsten ausgewählt. Nadeln von halbjährigen Kieferntrieben sind zum Zeitpunkt der Probennahme im Oktober maximal ausgebildet, um Immissionswirkungen über spezifische Inhaltsstoffe (Biomarker) frühzeitig anzuzeigen (vgl. [Poster 3](#)).

Informationen zur Probennahme, Probenaufarbeitung und chemisch/biochemischen Analyse sind in der Einleitung zu dieser Webseite durch Klicken auf [Auswirkungen](#) im Dokument „Auswirkungen von atmosphärischen schwefel- und stickstoffhaltigen Immissionen sowie Stoffeinträgen auf die Vitalität von Waldkiefern (*Pinus sylvestris* L.)“ oder in Publikationen (siehe Publikationsliste dieser Webseite) zu finden.

Auf nachfolgenden Seiten sind Ergebnisse zur zeitlichen Veränderung von ausgewählten Biomarker in halbjährigen Nadeln einschließlich morphologische Parameter von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Rösa (Land Sachsen-Anhalt) in der Dübener Heide im Vergleich zum Backgroundgebiet Neuglobsow am Stechlin See (Land Brandenburg) beispielhaft dargestellt.

Das Untersuchungsgebiet Rösa befindet sich ca. 10 km östlich von Bitterfeld am Westrand der Dübener Heide und besteht aus 5 Testflächen.

GK-Koordinaten:

TF1: 4530,94 (RW); 5721,60 (HW); Forstamt Bitterfeld, Forstrevier Rösa: Abteilung: 269a2

TF2: 4530,93 (RW); 5721,84 (HW); Forstamt Bitterfeld, Forstrevier Rösa: Abteilung: 269a2

TF3: 4531,76 (RW); 5722,09 (HW); Forstamt Bitterfeld, Forstrevier Rösa: Abteilung: 266b4

TF4: 4532,05 (RW); 5722,07 (HW); Forstamt Bitterfeld, Forstrevier Rösa: Abteilung: 266a4

TF5: 4531,43 (RW); 5721,51 (HW); Forstamt Bitterfeld, Forstrevier Rösa: Abteilung: 227b

Das Untersuchungsgebiet Neuglobsow befindet sich ca. 3 km südwestlich vom Ort Neuglobsow am Stechlin See und besteht aus 5 Testflächen.

GK-Koordinaten:

TF1: 4570,48 (RW); 5888,94 (HW); Forstamt Fürstenberg, Forstrevier Roofen: Abteilung: 265b4

TF2: 4570,09 (RW); 5889,43 (HW); Forstamt Fürstenberg, Forstrevier Neuglobsow: Abteilung: 75a3

TF3: 4570,98 (RW); 5890,01 (HW); Forstamt Fürstenberg, Forstrevier Neuglobsow: Abteilung: 73a8

TF4: 4565,83 (RW); 5887,33 (HW); Forstamt Fürstenberg, Forstrevier Sellenweide: Abteilung: 21a

TF5: 4565,07 (RW); 5888,50 (HW); Forstamt Fürstenberg, Forstrevier Sellenweide: Abteilung: 40a1

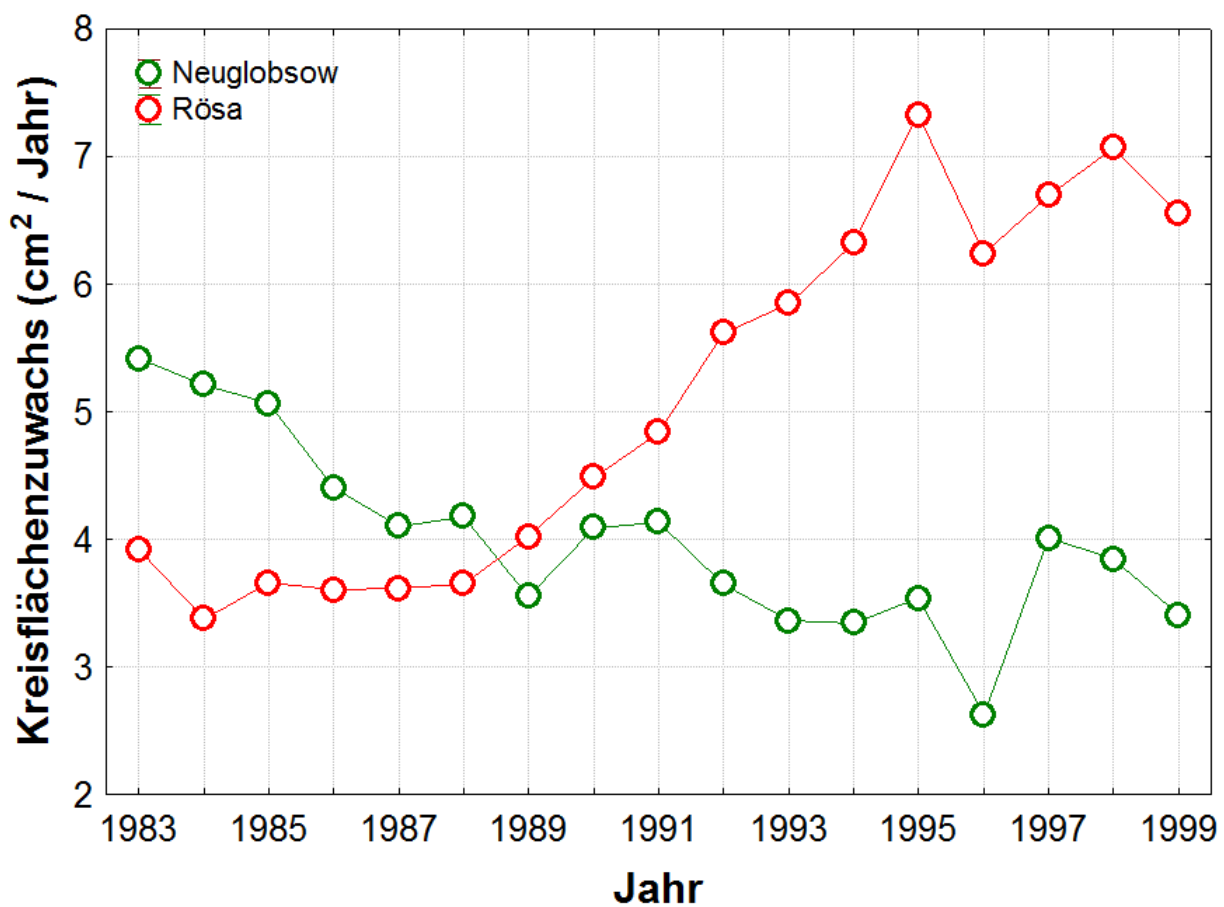


Abb.1: Kreisflächenzuwachs (Mittelwerte, n = 5 Testflächen) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Der mittlere Kreisflächenzuwachs (KFZ) wurde von jeweils 5 Baumscheiben pro Testfläche ermittelt. Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow ist der KFZ der Kiefern im Untersuchungsgebiet Rösa seit 1989 ansteigend. Als Ursache hierfür sind insbesondere die verringerten SO₂-Emissionen aus den Kraftwerken Muldenstein und Zschornewitz westlich von Rösa anzusehen (siehe 1. Kiefernborke in VI. Räumliche Muster dieser Webseite) sowie eine teilweise Harmonisierung von Ungleichgewichten in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Kiefern in den beiden Untersuchungsgebieten (vgl. auch **Abb.14** hier in V. *Zeitliche Veränderungen* oder Klick auf **Auswirkungen** in der Einleitung dieser Website).

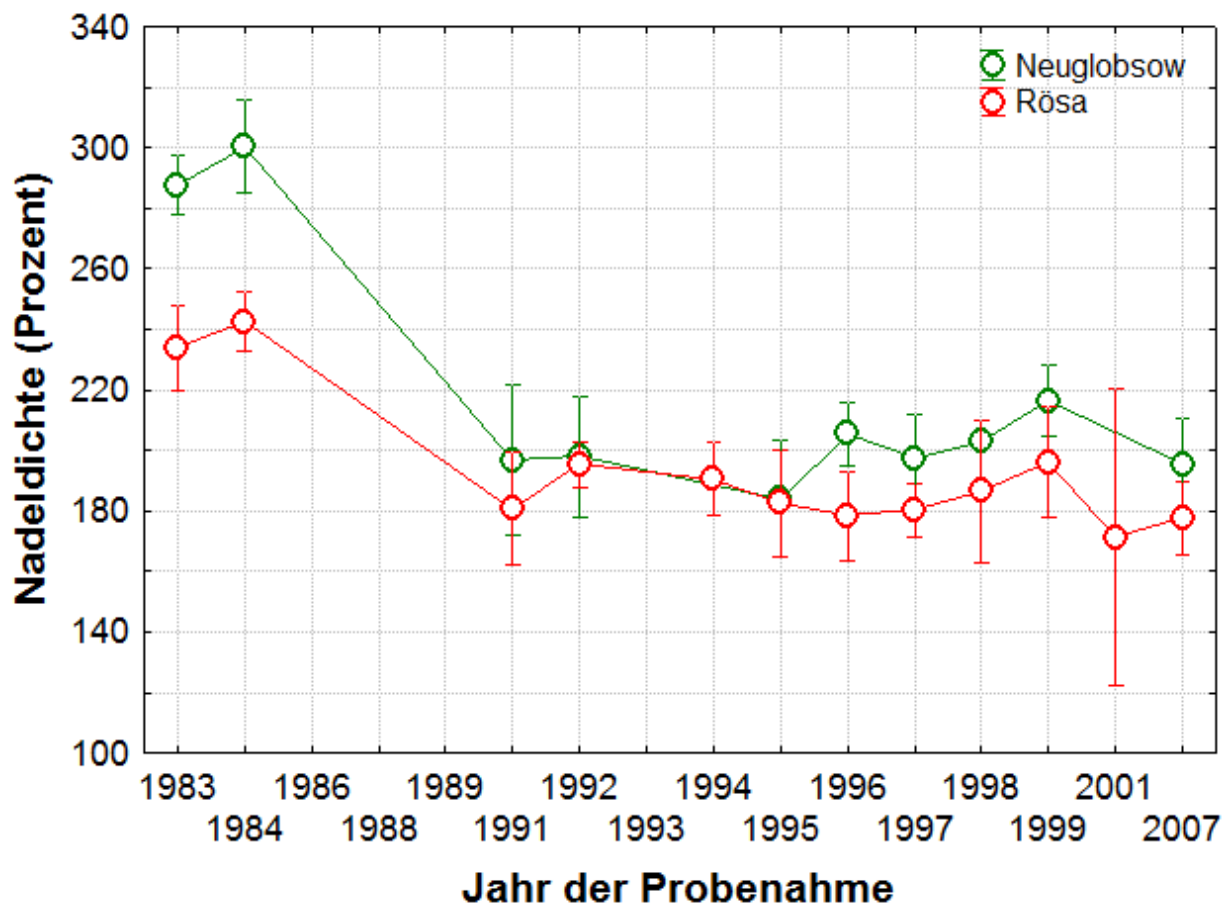


Abb.2: Benadlung (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die Benadlung oder Nadellebensdauer (Summe der Nadeldichte in Prozent von allen Jahrgängen) wurde von jeweils 15 Ästen pro Testfläche geschätzt. Nach starker Abnahme der Nadeldichte in den 80er Jahren stagniert seit 1991 sowohl im Referenzgebiet Neuglobsow als auch im Untersuchungsgebiet Rösa die Benadlung der Kiefernaltbestände. Die Ursachen hierfür sind von komplexer Natur und unspezifisch.

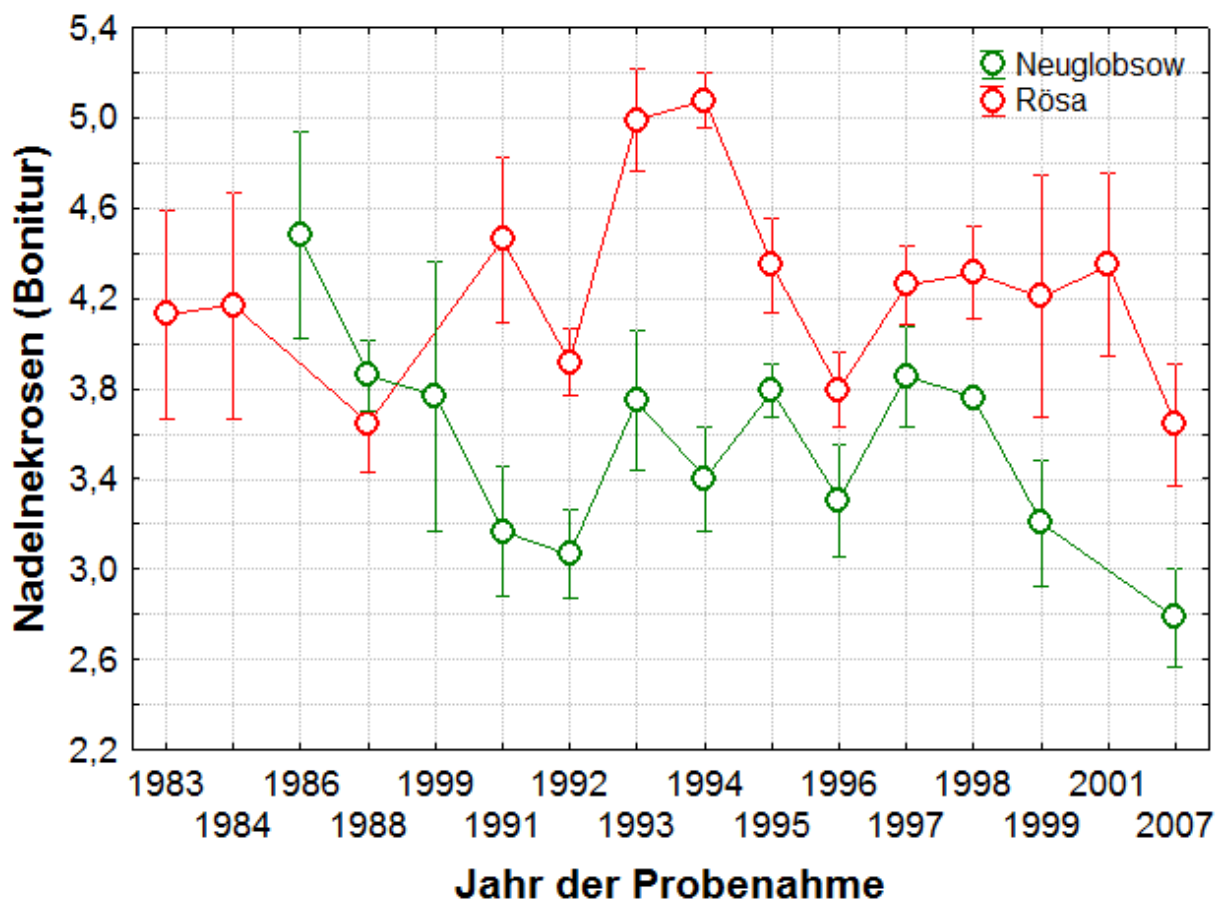


Abb.3: Nadelnekrosen (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die Nadelnekrosen als Summe der Spitzennekrosen von allen Nadeljahrgängen wurden von jeweils 15 Ästen pro Testfläche und Gebiet geschätzt nach SCHULZ und HÄRTLING (2003). Sowohl im Referenzgebiet Neuglobsow als auch im Untersuchungsgebiet Rösa waren an Nadeln des 1. Jahrgangs Spitzennekrosen nachzuweisen, die erst seit 1999 einen rückläufigen Trend anzeigen. Als Ursache hierfür sind Ungleichgewichte in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Nadeln anzusehen (vgl. auch **Abb.14** hier in *V. Zeitliche Veränderungen* oder Klick auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung dieser Webseite).

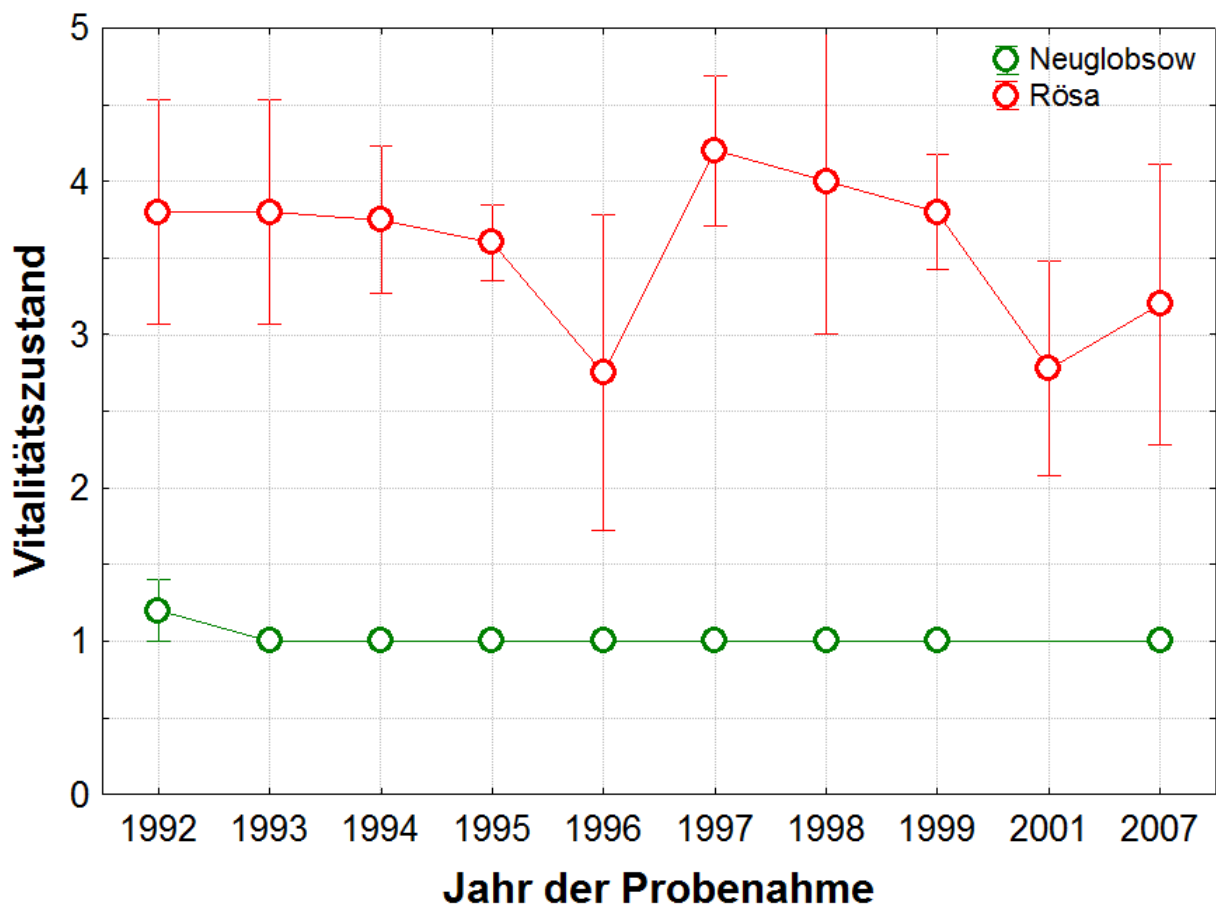


Abb.4: Vitalitätszustand (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Der Vitalitätszustand von Kiefernaltbeständen wurde durch Analyse von spezifischen Biomarkern in halbjährigen Kiefernadeln bestimmt (SCHULZ und HÄRTLING 2003). Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow verbesserte sich die Vitalität der Kiefern im Untersuchungsgebiet Rösa seit 1999. Als Ursache hierfür sind insbesondere verringerte SO_2 -Emissionen aus den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa (siehe **Abb.3**, 1. Kiefernborke in V. Zeitliche Veränderungen dieser Webseite) anzusehen sowie eine teilweise Harmonisierung von Ungleichgewichten in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Kiefernadeln (vgl. **Abb.14** hier in V. Zeitliche Veränderungen oder Klick auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung dieser Webseite).

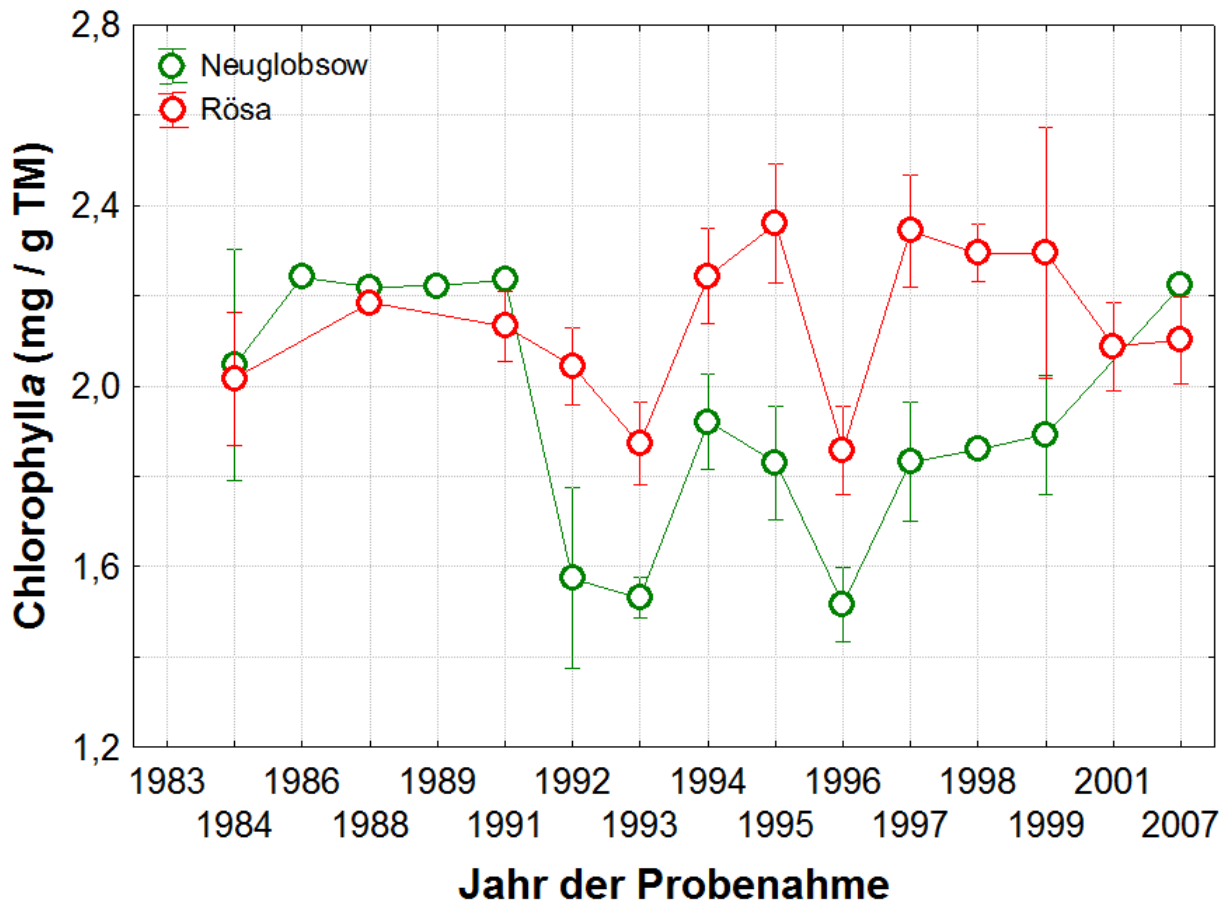


Abb.5: Chlorophylla-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Untersuchungsgebiet Rösa sind die Chlorophylla-Gehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow seit 1991 signifikant niedriger, aber seit 1996 wieder ansteigend. Ursache hierfür sind Ungleichgewichte in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Nadeln (vgl. **Abb.14** hier in *V. Zeitliche Veränderungen* oder Klick auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung dieser Website).

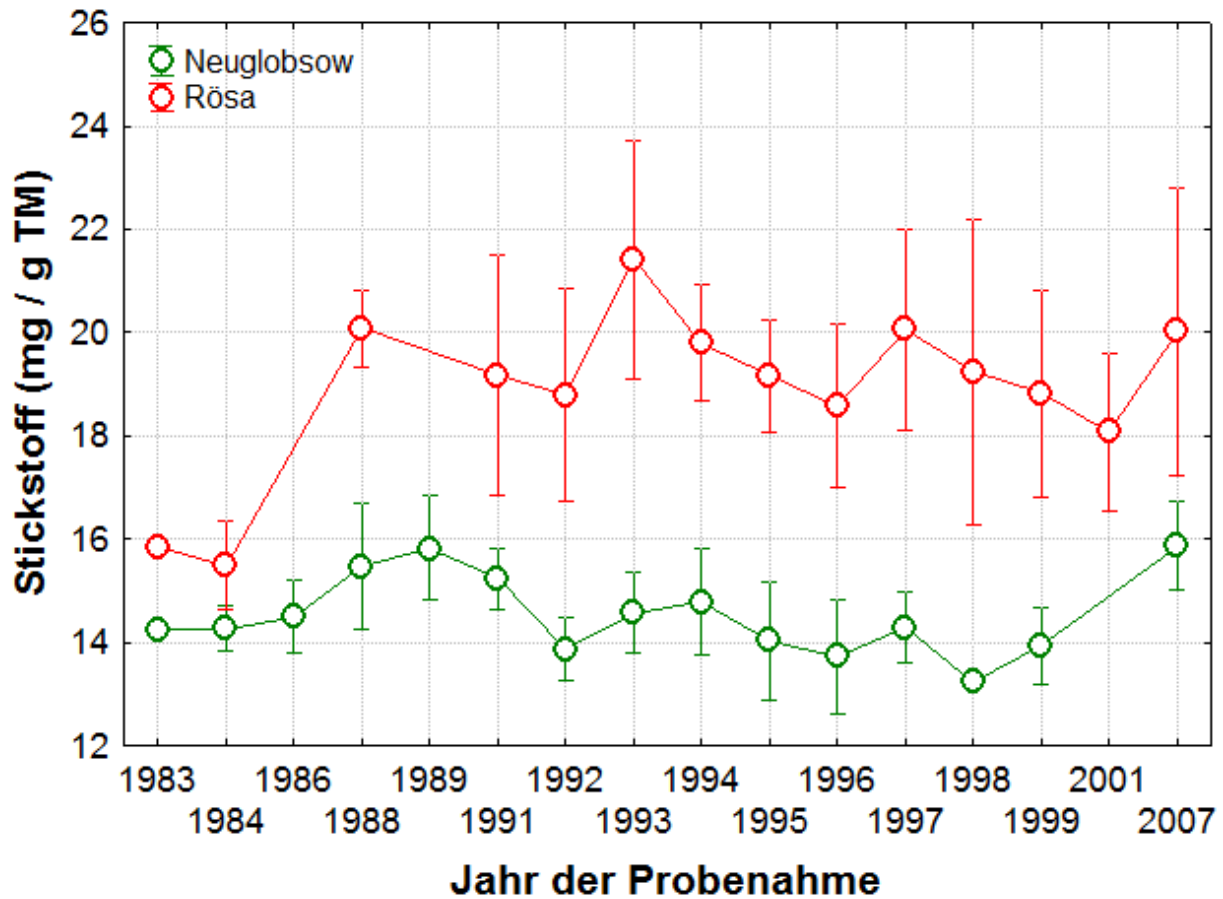


Abb.6: Stickstoff-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Stickstoff-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher. Ursache hierfür sind nachhaltige Auswirkungen von Harnstoff-Düngungen in den 60er und 80er Jahre zur Kompensation von SO_2 -Schäden und atmosphärische N-Einträge.

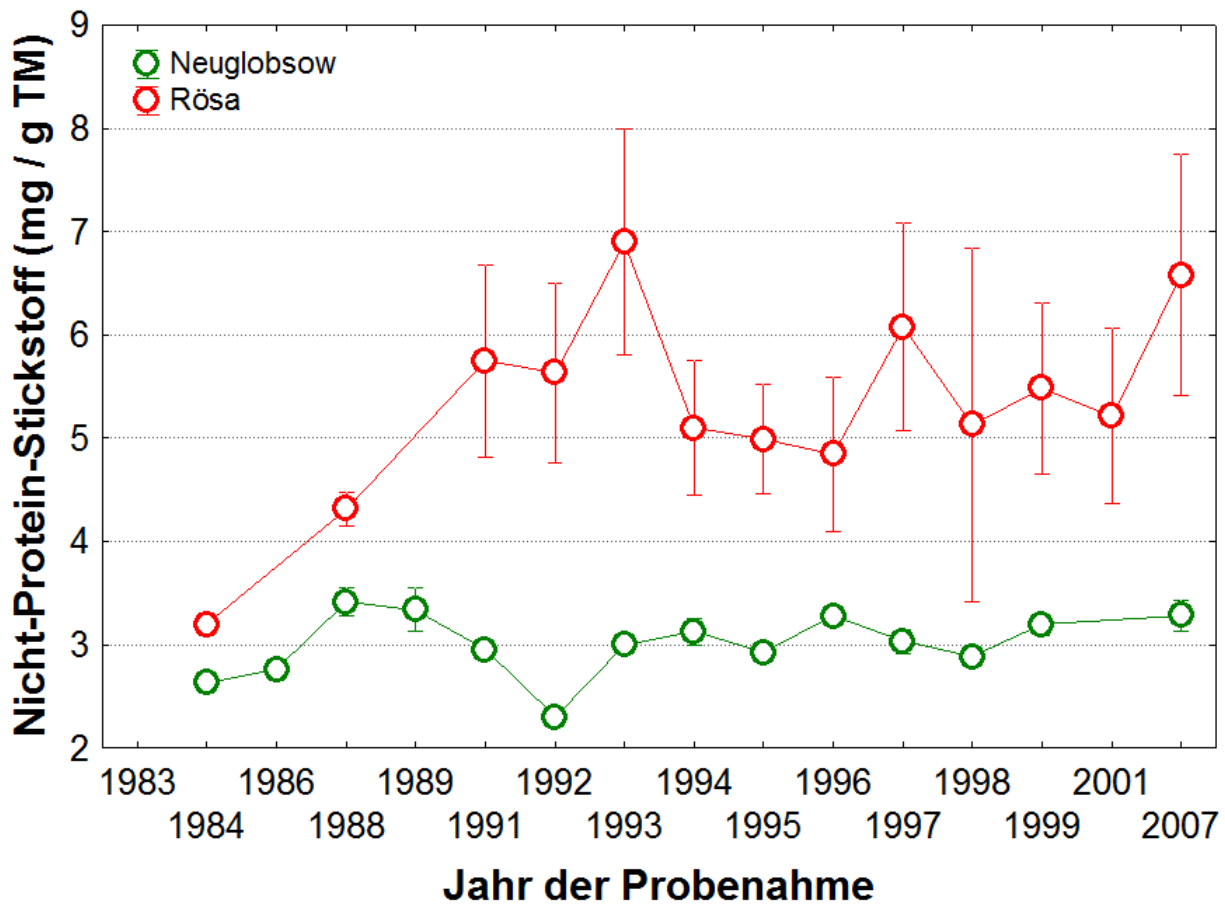


Abb.7: Nicht-Protein-Stickstoff-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die löslichen Nicht-Protein-Stickstoff-Gehalte (vgl. auch **Abb. 18** hier in *V. Zeitliche Veränderungen*) in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher. Ursache hierfür sind atmosphärische N-Einträge sowie Harnstoff-Düngungen in den 60er und 80er Jahren zur Kompensation von SO_2 -Schäden.

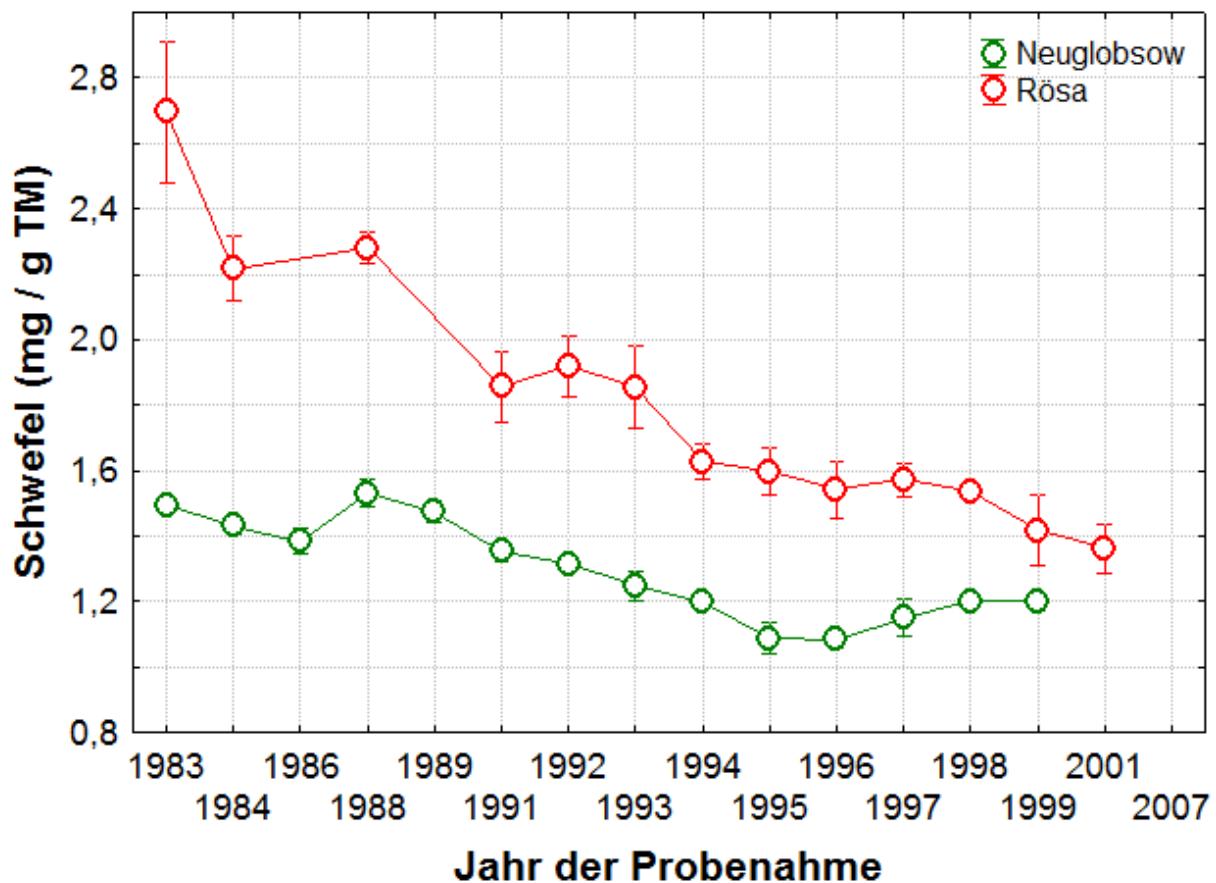


Abb.8: Schwefel-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Schwefel-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher, aber seit 1989 in beiden Gebieten rückläufig. Als Ursache hierfür sind verringerte SO_2 -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahe Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa anzusehen (siehe **Abb.3, 1. Kiefernborke** in V. Zeitliche Veränderungen dieser Webseite).

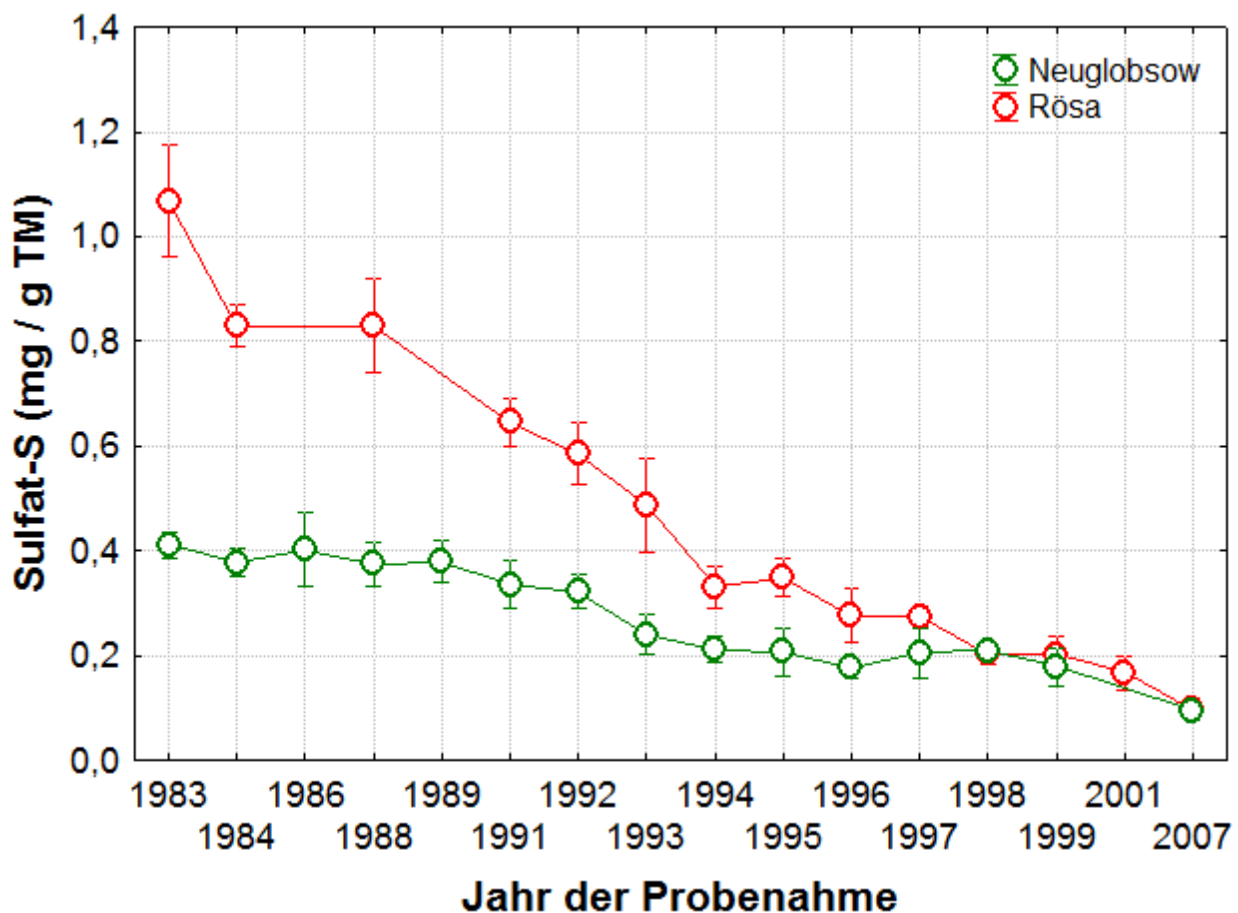


Abb.9: Sulfat-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die wasserlöslichen Sulfat-Gehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher, aber seit 1989 in beiden Gebieten rückläufig. Als Ursache hierfür sind verringerte SO_2 -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahe Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornewitz westlich von Rösa anzusehen (siehe **Abb.3, 1. Kiefernborke** in *V. Zeitliche Veränderungen* dieser Webseite).

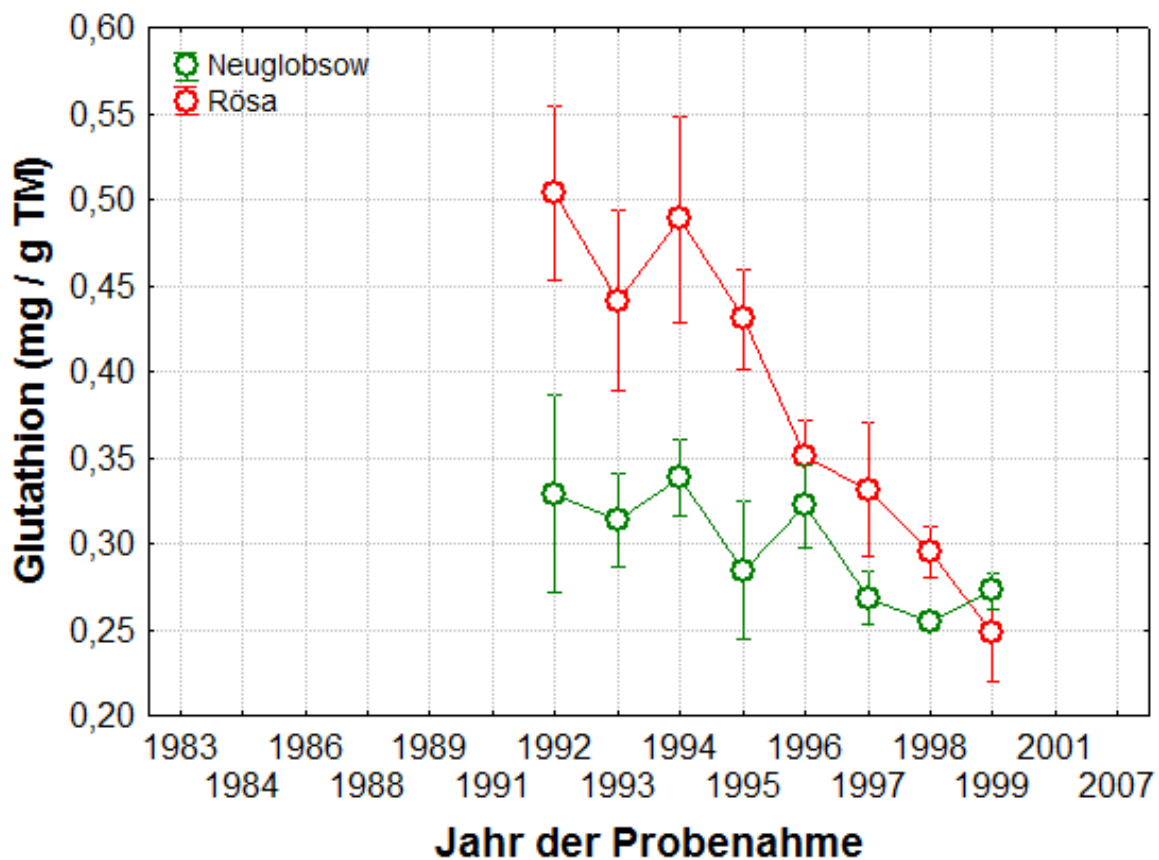


Abb.10: Glutathion-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Glutathion-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher, aber seit 1992 in beiden Gebieten rückläufig. Als Ursache hierfür sind verringerte SO_2 -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahe Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa (siehe **Abb.3**, 1. Kiefernborke in V. Zeitliche Veränderungen dieser Webseite) anzusehen (zu näheren Ausführungen klicke auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung auf dieser Webseite).

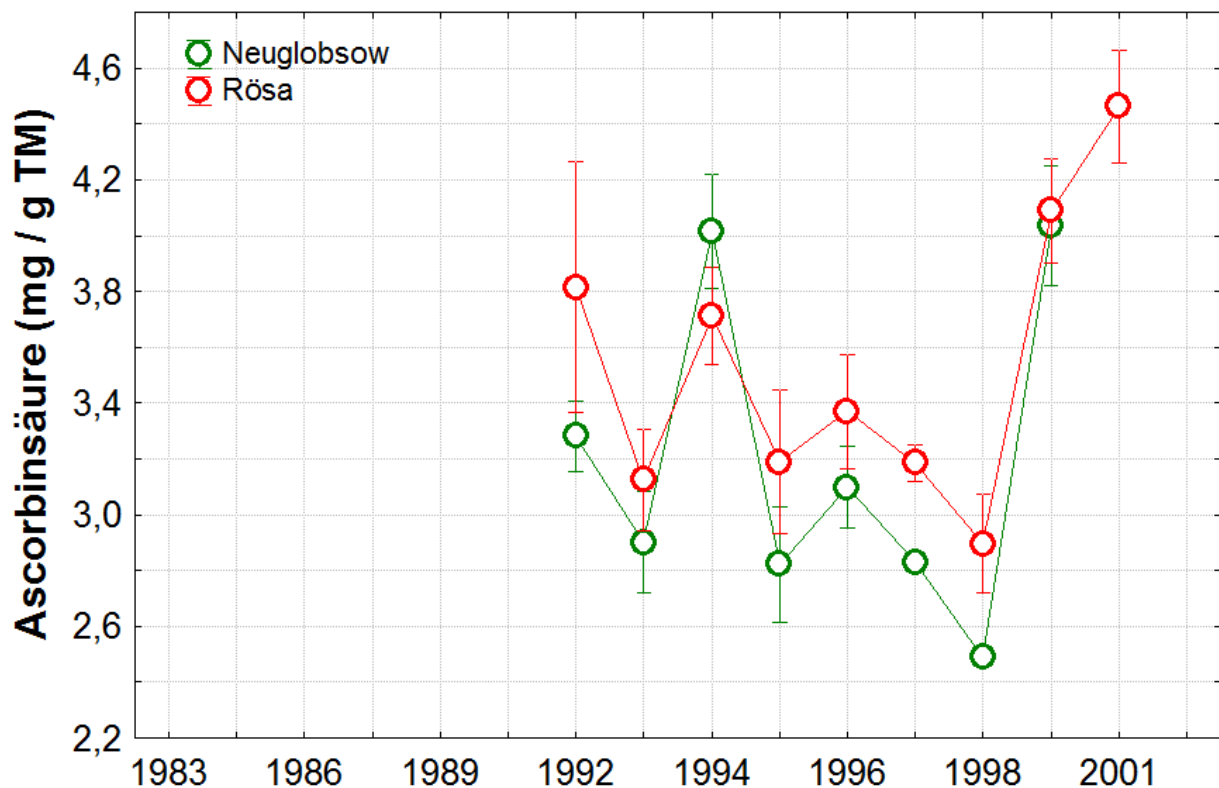


Abb.11: Ascorbinsäure-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Ascorbinsäure-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa teilweise signifikant höher, seit 1992 in beiden Gebieten rückläufig, aber seit 1999 wieder ansteigend aufgrund verringerter Glutathion-Gesamtgehalte (vgl. **Abb.10** hier in *V. Zeitliche Veränderungen*). Als Ursache hierfür sind verringerte SO_2 -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahen Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornewitz westlich von Rösa (siehe **Abb.3**, *1. Kiefernborke* in *VI. Räumliche Muster* dieser Webseite) anzusehen (zu näheren Ausführungen klicke auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung auf dieser Webseite).

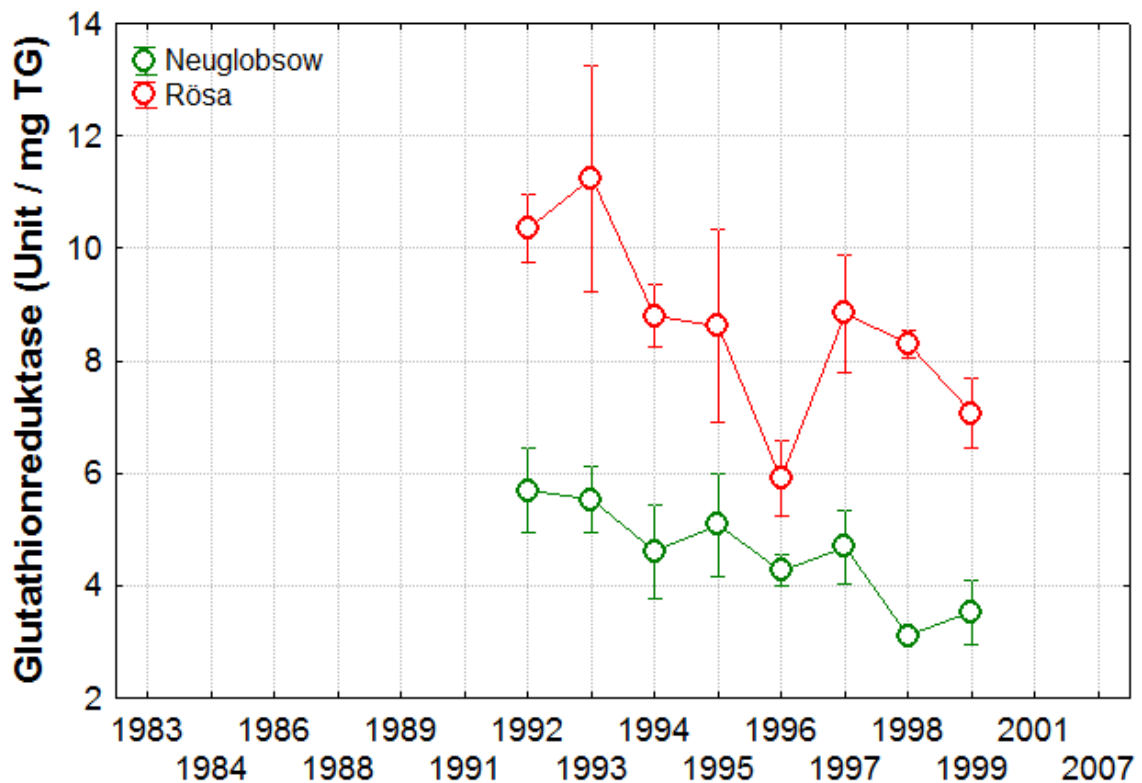


Abb.12: Glutathionreduktase-Aktivität (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Aktivitäten der Glutathionreduktase in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher, aber seit 1992 in beiden Gebieten rückläufig. Als Ursache hierfür sind verringerte SO_2 -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahe Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa (siehe **Abb.3**, 1. Kiefernborke in V. Zeitliche Veränderungen dieser Webseite) anzusehen (zu näheren Ausführungen klicke auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung auf dieser Webseite).

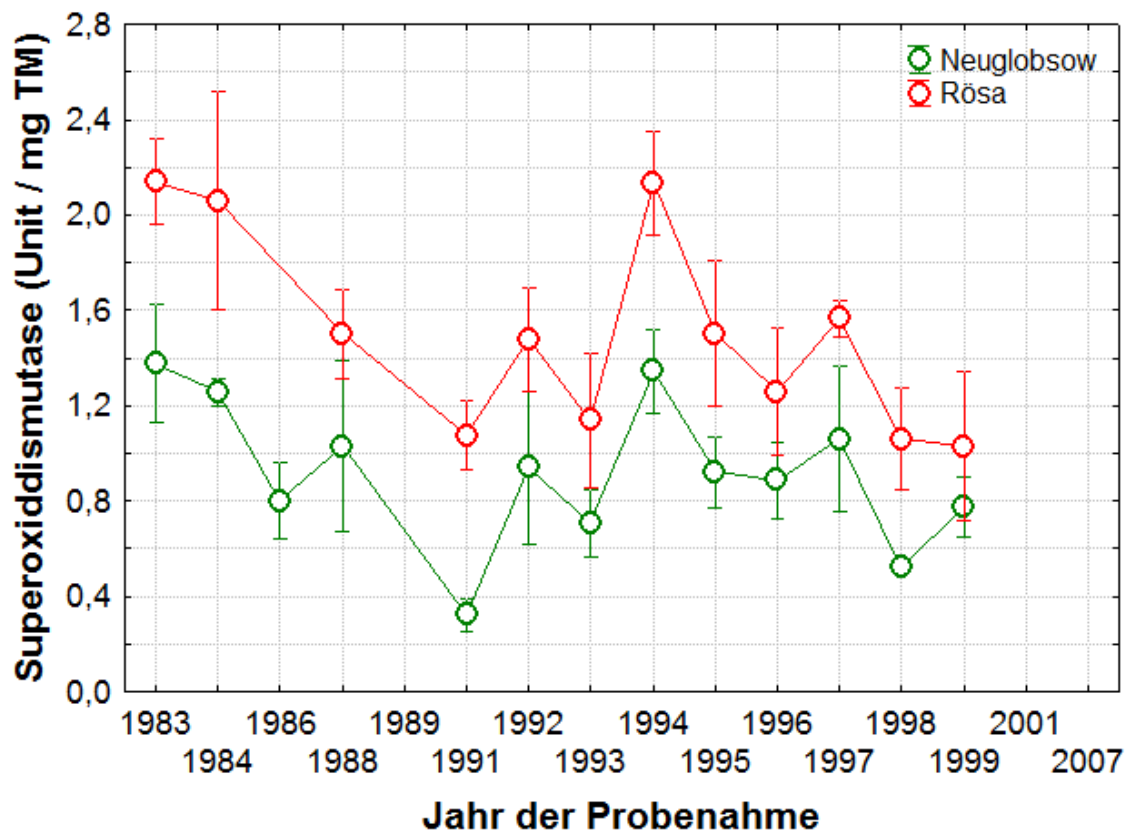


Abb.13: Superoxiddismutase-Aktivität (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Aktivitäten des Superoxiddismutase-Isoenzyms 1 ($R_f = 0,529$) in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher, aber seit 1992 in beiden Gebieten rückläufig. Als Ursache hierfür sind verringerte SO_2 -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahen Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa (siehe **Abb.3**, 1. Kiefernborke in V. Zeitliche Veränderungen dieser Webseite) anzusehen (für nähere Ausführungen klicke auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung auf dieser Webseite).

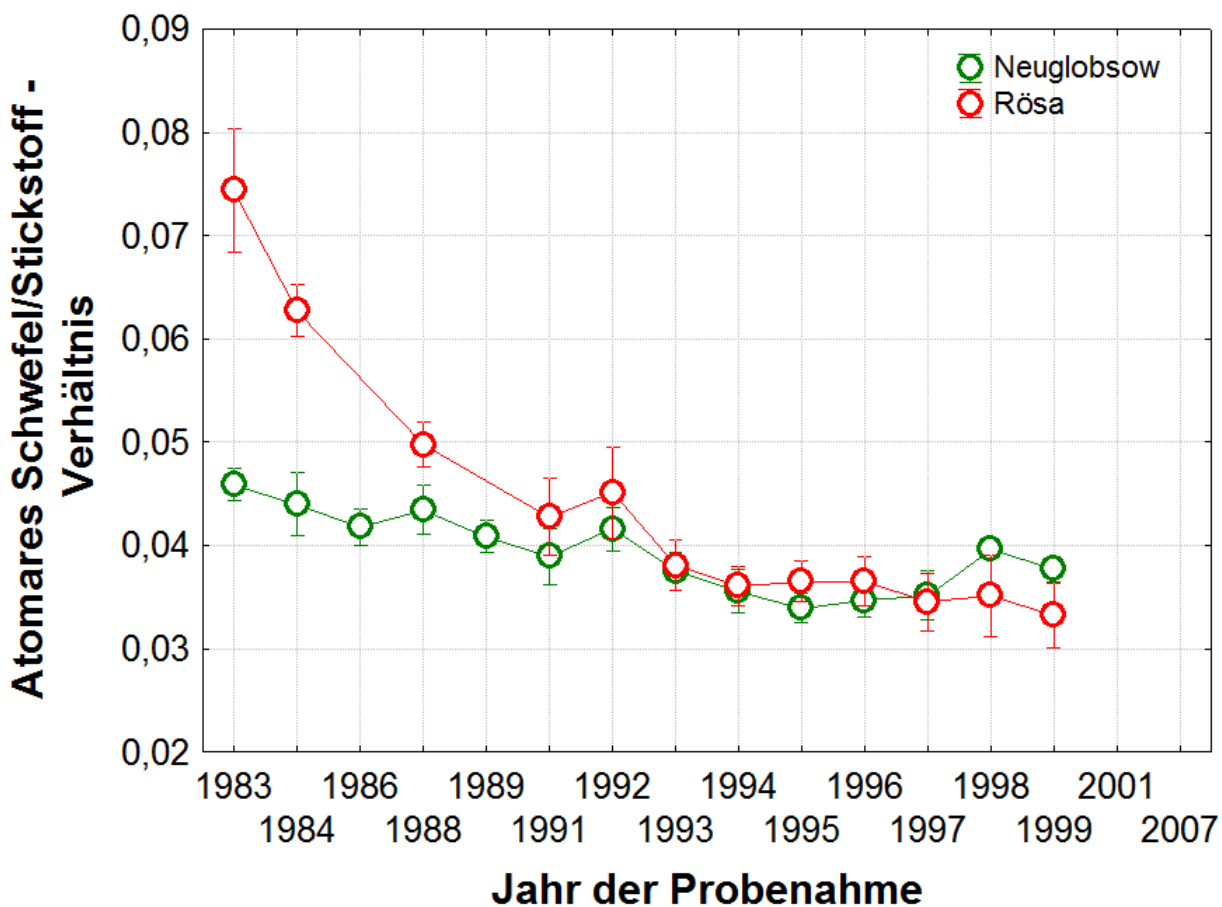


Abb.14: Atomares Schwefel/Stickstoff-Verhältnis (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die atomaren Verhältnisse von Gesamtschwefel (S/32) zu Gesamtstickstoff (N/14) in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow als auch im Untersuchungsgebiet Rösa zeigen seit 1983 einen rückläufigen Trend. Als Ursache hierfür sind insbesondere nachlassende Auswirkungen von Harnstoff-Düngungen zur Kompensation von SO_2 -Immissionsschäden in den Kiefernaltbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa zwischen 1960 bis 1980 anzusehen, die bei nachlassenden SO_2 -Immissionen zu Ungleichgewichten in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Nadeln führten sowie Auswirkungen auf morphologische Merkmale der Kiefernadeln einschließlich Vitalitätsveränderungen und auf den Zuwachs der Kiefernbestände (vgl. **Abb.1, 2, 3, 4, 5** hier in *V. Zeitliche Veränderungen* oder für nähere Ausführungen Klick auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung dieser Website).

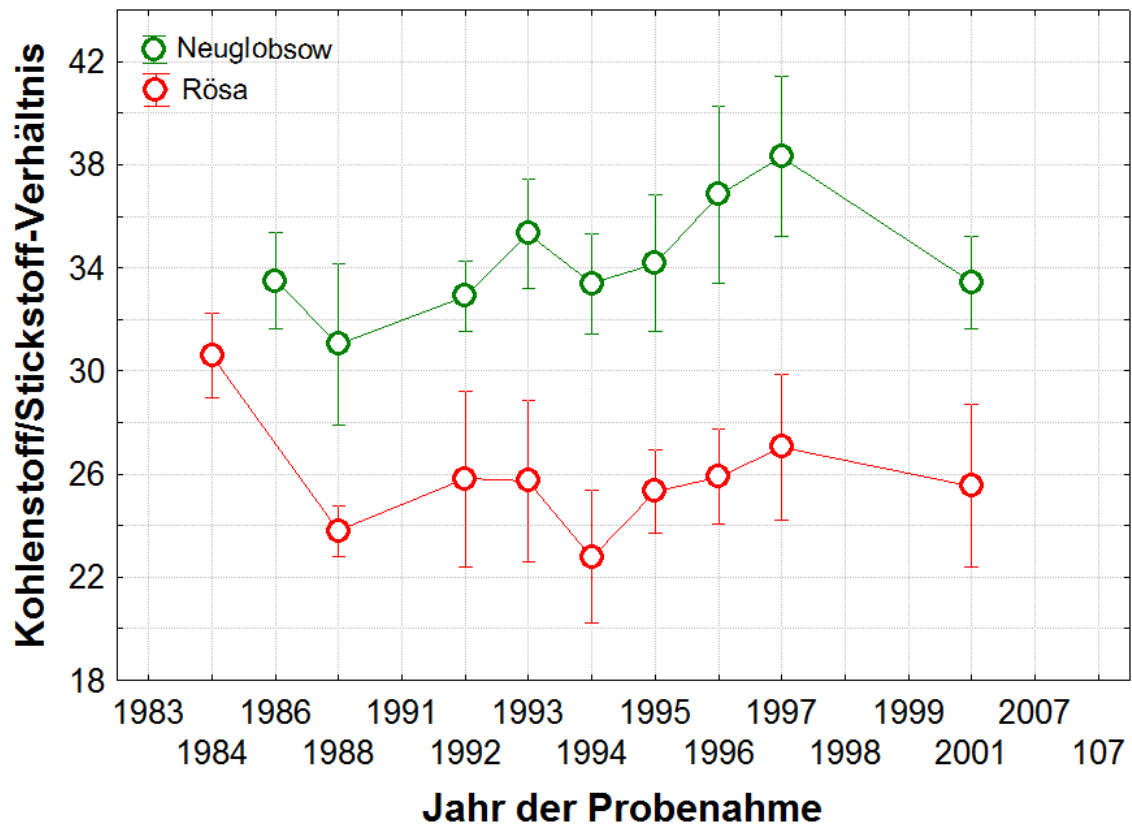


Abb.15: Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die C/N-Verhältnisse in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow als auch im Untersuchungsgebiet Rösa zeigen seit 1988 einen annähernd unveränderten Trend. Die starke Verengung des C/N-Verhältnisses der Kiefernadeln im Untersuchungsgebiet Rösa indiziert eine signifikante N-Eutrophierung der Böden bedingt durch Harnstoffdüngungen und hohe atmosphärische N-Einträge (vgl. auch **Abb.2, 3. Humusauflagen** in *V. Zeitliche Veränderungen*).

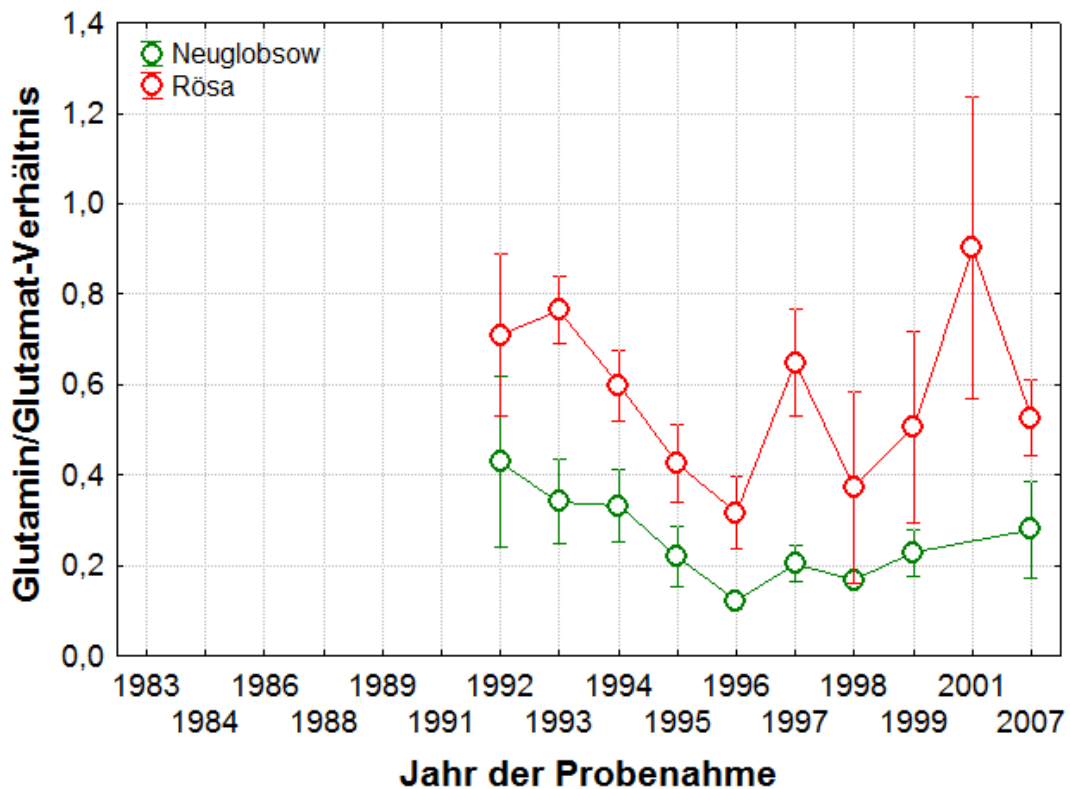


Abb.16: Glutamin/Glutamat-Verhältnis (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow ist das Verhältnis der Gehalte von Glutamin zu Glutamat in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa seit 1992 signifikant höher, aber durchlaufen im Jahr 1996 ein Minimum. Als Ursache hierfür sind Ungleichgewichte in der S- und N-Ernährung der Kiefernbestände anzusehen (vgl. auch **Abb. 14** hier in *V. Zeitliche Veränderungen*). Ab 1996 sind die Kiefernbestände bzw. ihre Nadeln bei reduzierter S-Aufnahme höher mit Stickstoff versorgt, was zu einer Verschiebung der Gehalte von Glutamin und Glutaminsäure in den Nadeln führte. Bei einem Verhältnis $> 0,36$ wird Glutaminsäure nicht mehr zu Glutamin metabolisiert, sondern bevorzugt zu Arginin über Ornithin.

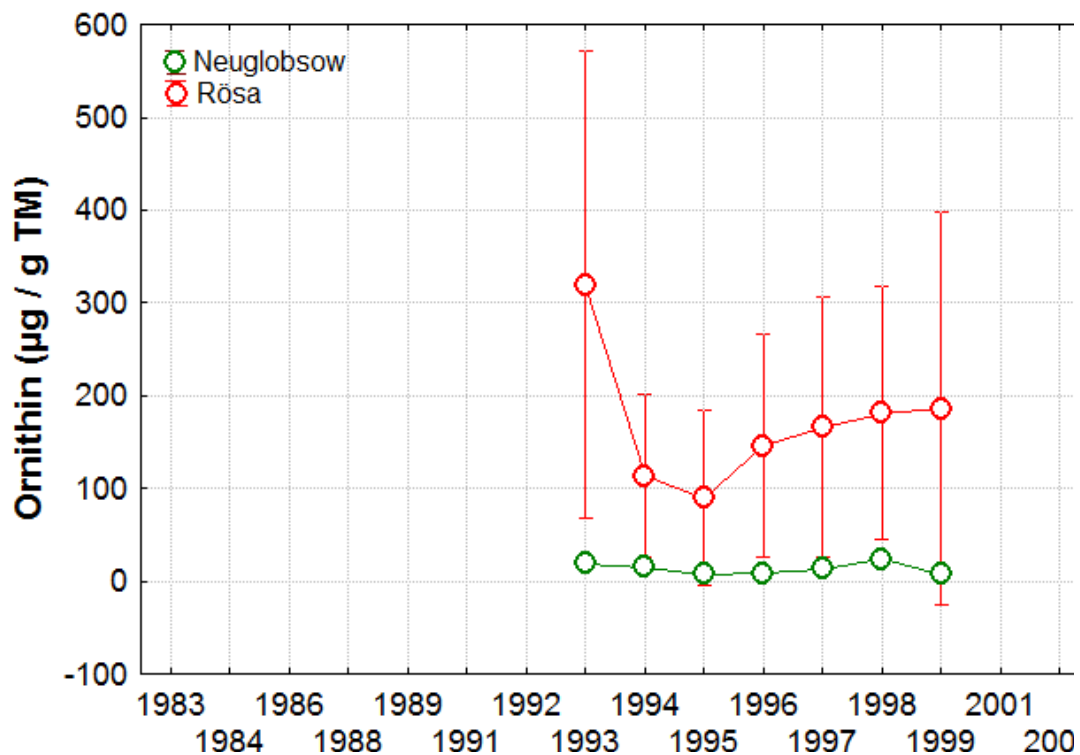


Abb.17: Ornithin-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Gehalte von Ornithin in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher. Die hohen Standardabweichungen resultieren aus unterschiedlichen N-Aufnahmeraten der Kiefern. Für nähere Ausführungen klicke auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung auf dieser Webseite oder SCHULZ et al. 2011 in Publikationsliste dieser Webseite).

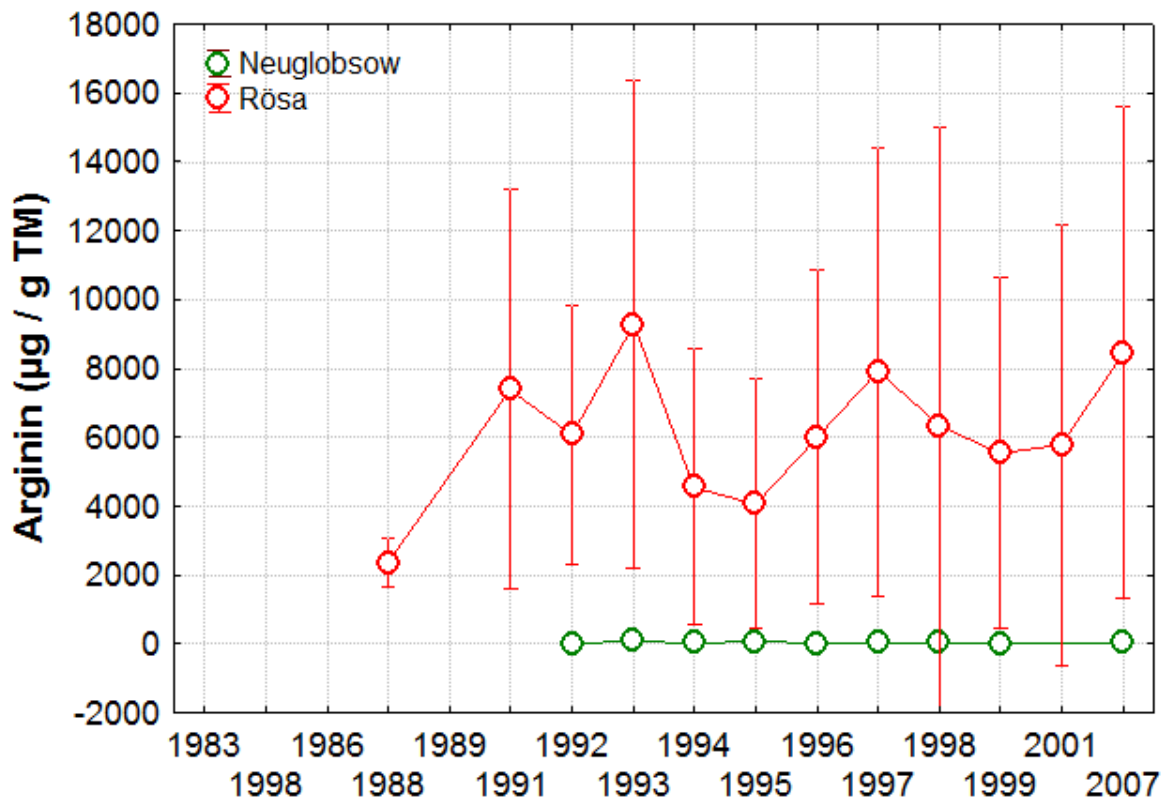


Abb.18: Arginin-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Arginin-Gehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa im Mittel um das bis zu 100-fache höher. Die hohen Arginin-Gehalte und Standardabweichungen der Kiefernadeln im Untersuchungsgebiet Rösa sind auf unterschiedliche N-Aufnahmeraten der Kiefern in den N-belasteten Kiefernbeständen zurückzuführen (siehe Publikationsliste SCHULZ et al. 2011 dieser Webseite). Ursache für die Anreicherung von Arginin in Kiefernadeln ist die erhöhte Aufnahme und Anreicherung von Stickstoff in Form von Ammonium in den Nadeln. Bei einer ausgewogenen N-Ernährung wird Ammonium über die Glutamadehydrogenase und Glutaminsynthetase zu Glutamin metabolisiert. Bei N-Überernährung verläuft die Metabolisierung von NH_4^+ über Glutaminsäure und Ornithin zu Arginin, da Arginin ein günstigeres C/N-Verhältnis aufweist als Glutamin. Andererseits erfolgt über diesen Stoffwechselweg eine Entfernung von Überschuss- NH_4^+ in Kiefernadeln (N-Entgiftung). Der hierfür erforderliche Kohlenstoff (CO_2) wird durch Aktivierung der Phosphoenolpyruvatcarboxylase bereitgestellt. Infolge sind die Gehalte von Glucose in Kiefernadeln vom Untersuchungsgebiet Rösa bei besonders hoher N-Aufnahme in manchen Jahren verringert (vgl. auch **Abb. 20** hier in *V. Zeitliche Veränderungen*).

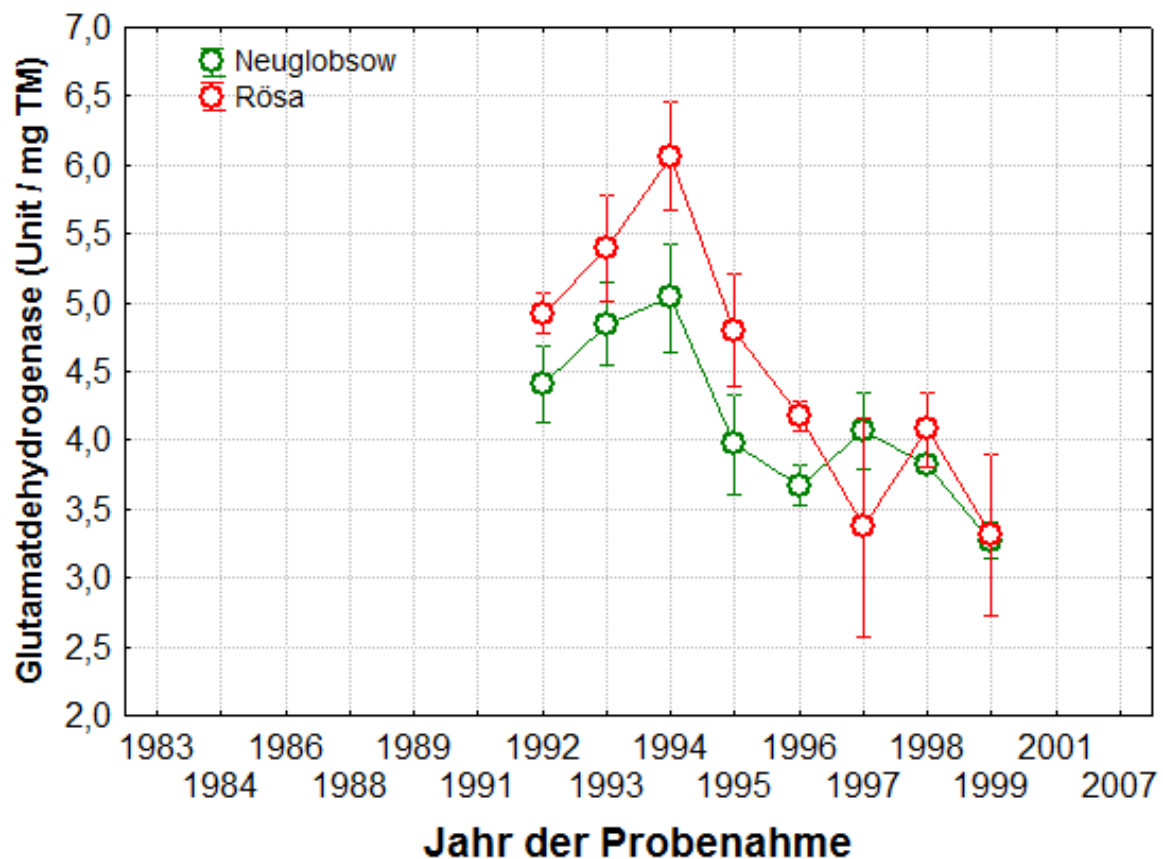


Abb.19: Glutamatdehydrogenase-Aktivität (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Aktivitäten der Glutamatdehydrogenase in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa erhöht. Die Aktivitätsverringering in Kiefernadeln aus beiden Untersuchungsgebieten ab 1995 resultiert aus einer verringerten N-Metabolisierung von Ammonium zu Glutamin bzw. erhöhten N-Metabolisierung von Ammonium zu Arginin (vgl. auch **Abb. 18** hier in *V. Zeitliche Veränderungen*).

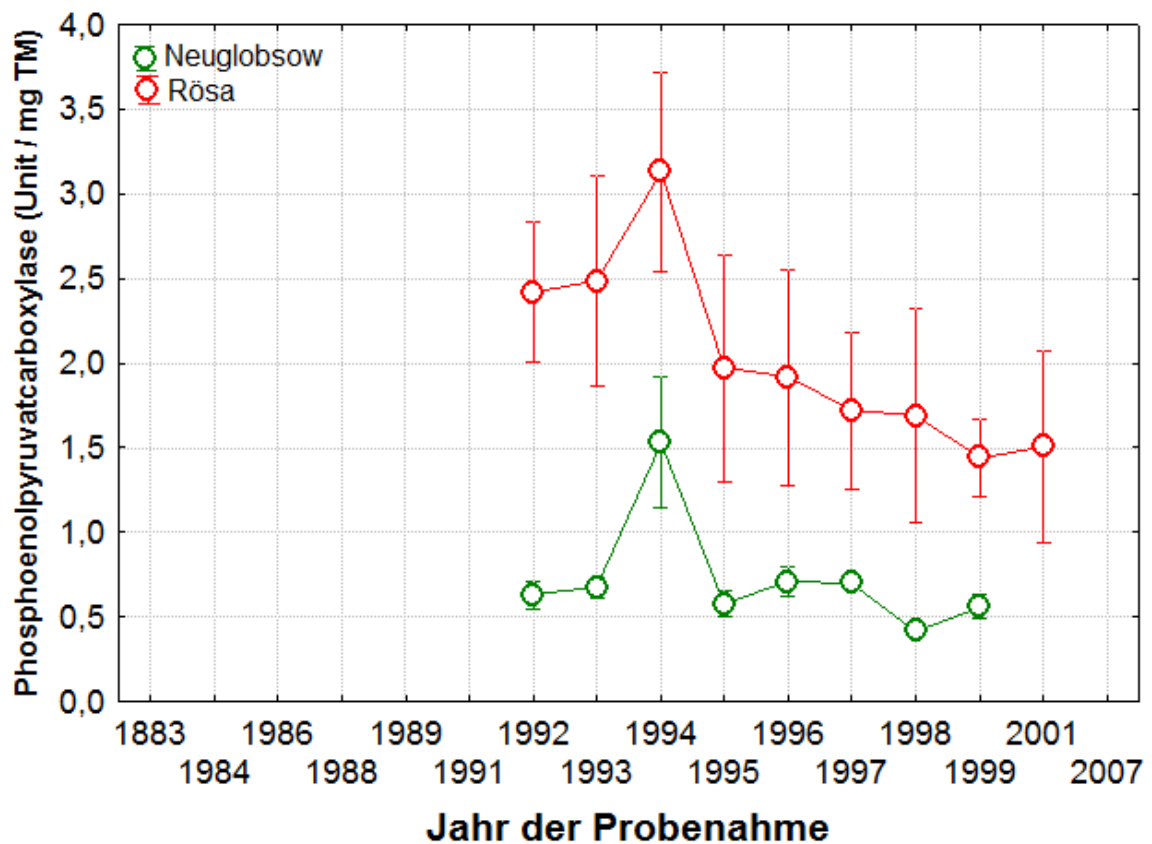


Abb.20: Phosphoenolpyruvatcarboxylase-Aktivität (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Aktivitäten der Phosphoenolpyruvatcarboxylase in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant erhöht (vgl. auch **Abb.18 hier** in *V. Zeitliche Veränderungen* oder für nähere Ausführungen klicke auf [Auswirkungen](#) in der Einleitung auf dieser Webseite).

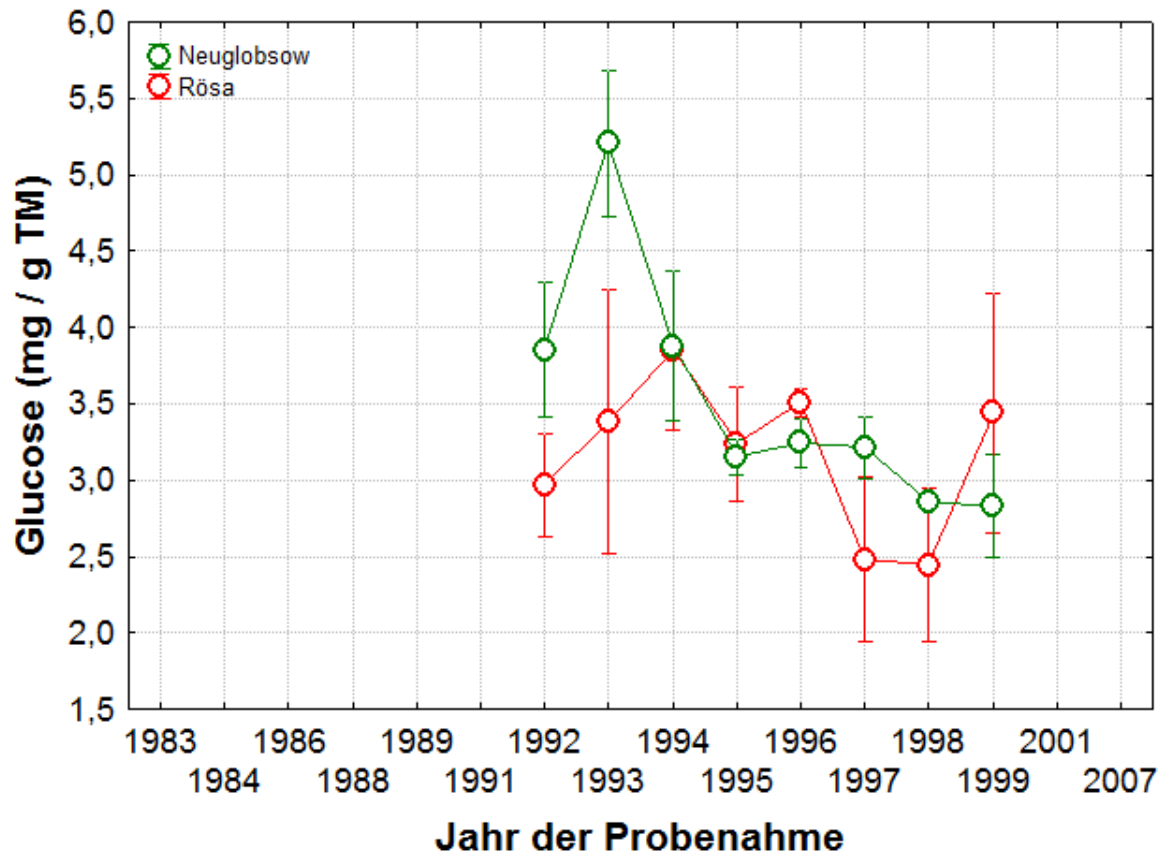


Abb.21: Glucose-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Gehalte von Glucose in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa teilweise verringert. Die geringeren Gehalte resultieren aus einer erhöhten N-Metabolisierung von Ammonium zu Arginin wobei Kohlenstoff (CO_2) dem Kohlenhydratstoffwechsel entzogen wird (vgl. auch **Abb. 18** hier in *V. Zeitliche Veränderungen*).

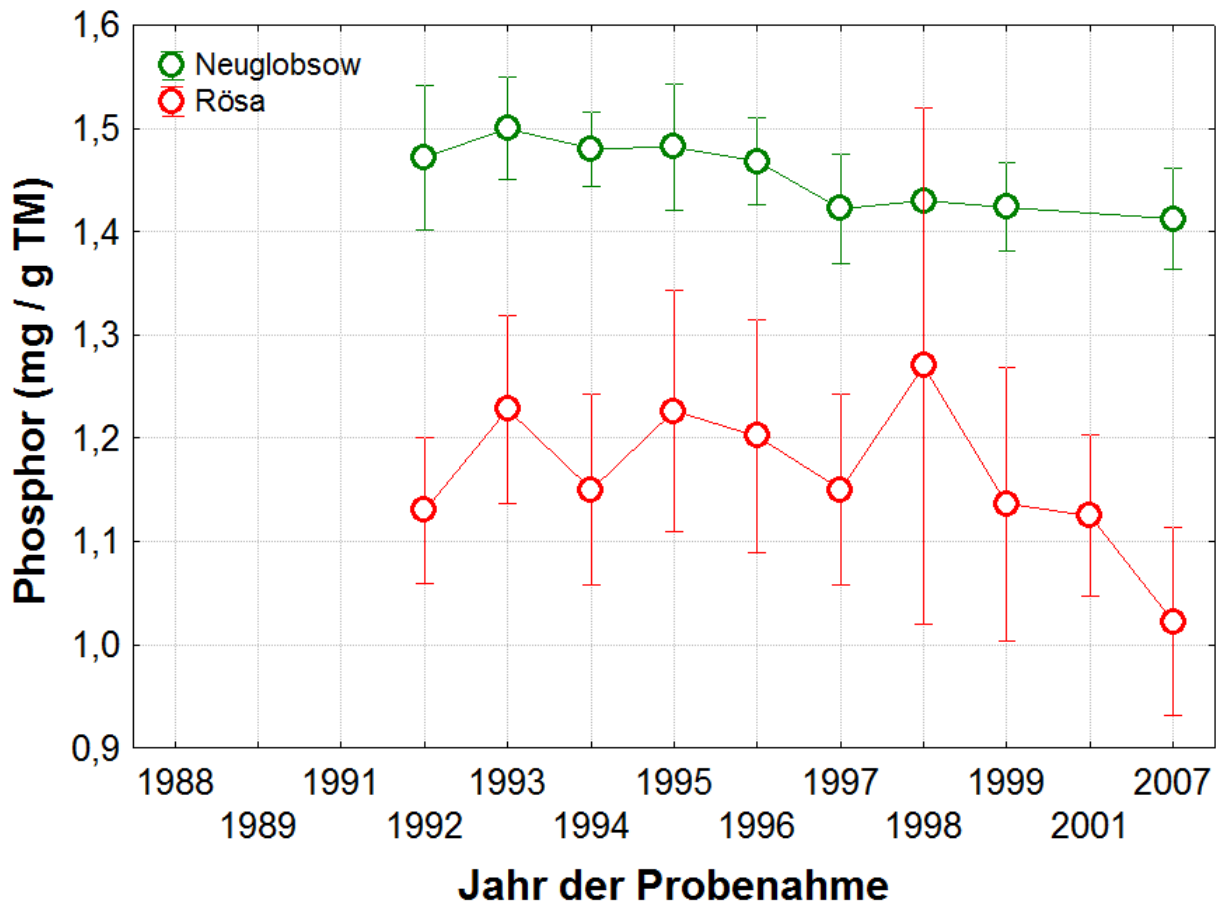


Abb.22: Phosphor-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Untersuchungsgebiet Rösa sind die Phosphor-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow signifikant höher als im Untersuchungsgebiet Rösa, aber seit 1997 rückläufig. Ursache hierfür sind verringerte Einträge von basischen Flugaschen, insbesondere im Untersuchungsgebiet Rösa (vgl. auch **Abb.2, 3. Humusaufgaben in V. Zeitliche Veränderungen**).

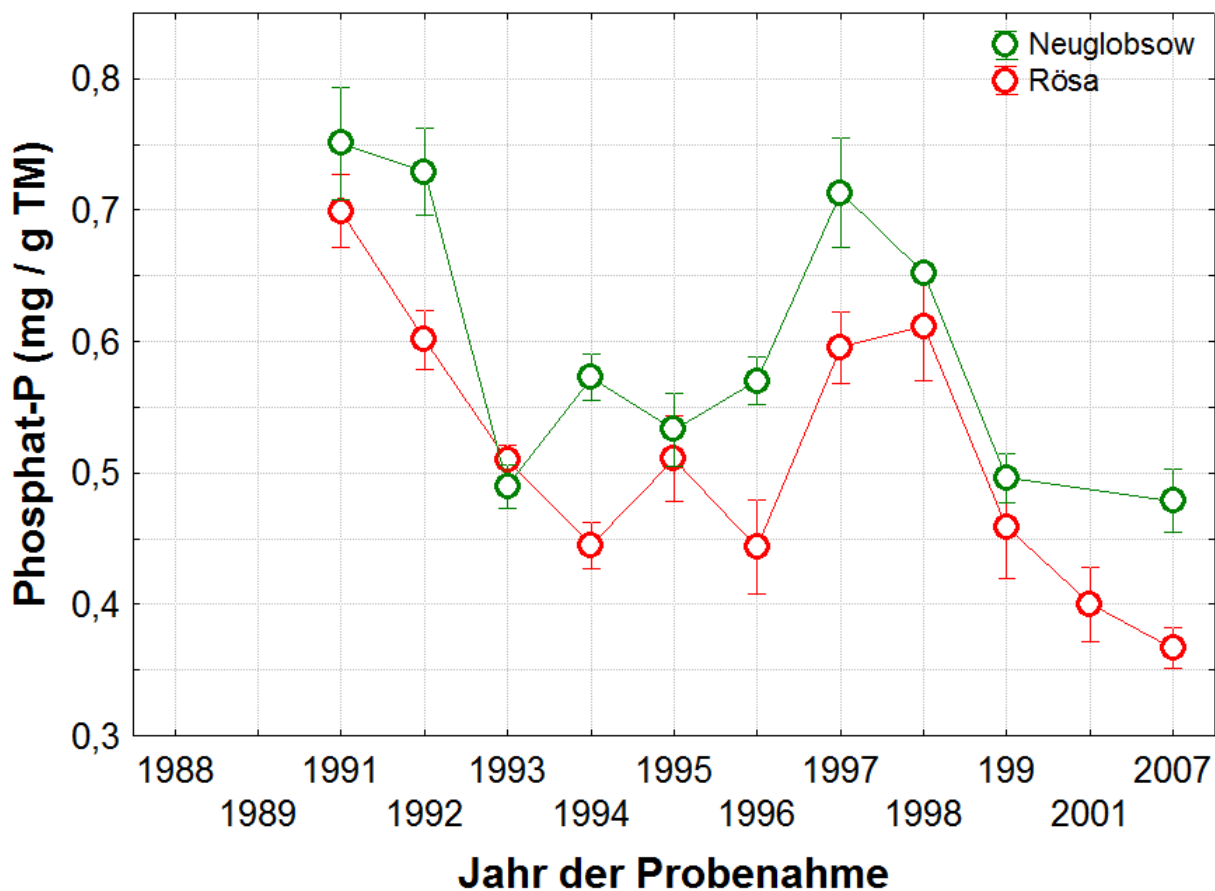


Abb.23: Phosphat-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Untersuchungsgebiet Rösa sind die wasserlöslichen Phosphat-Gehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow signifikant höher, aber seit 1997 in beiden Untersuchungsgebieten wieder rückläufig. Ursache hierfür sind nachhaltige Auswirkungen von ehemaligen Einträgen basischer Flugaschen, insbesondere im Untersuchungsgebiet Rösa, die trotz einsetzender pH-Wert Verringerung in den Humusaufgaben weiterhin zur Immobilisierung von Phosphat führen (vgl. **Abb.1, 3. Humusaufgaben** in *V. Zeitliche Veränderungen*).

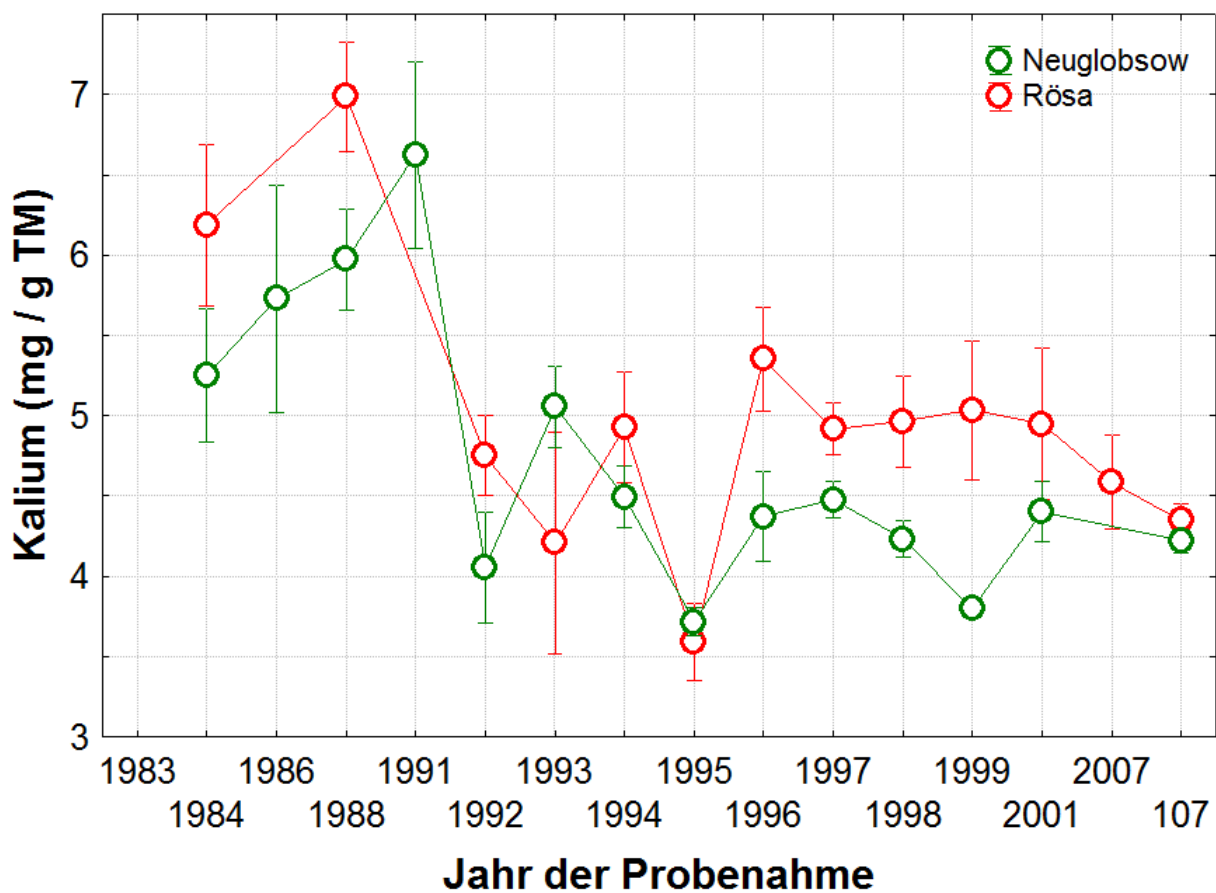


Abb.24: Kalium-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Kalium-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher, aber bleiben seit 1992 nach Reduzierung der Einträge von basischen Flugaschen in beiden Gebieten noch auf einem konstanten Niveau.

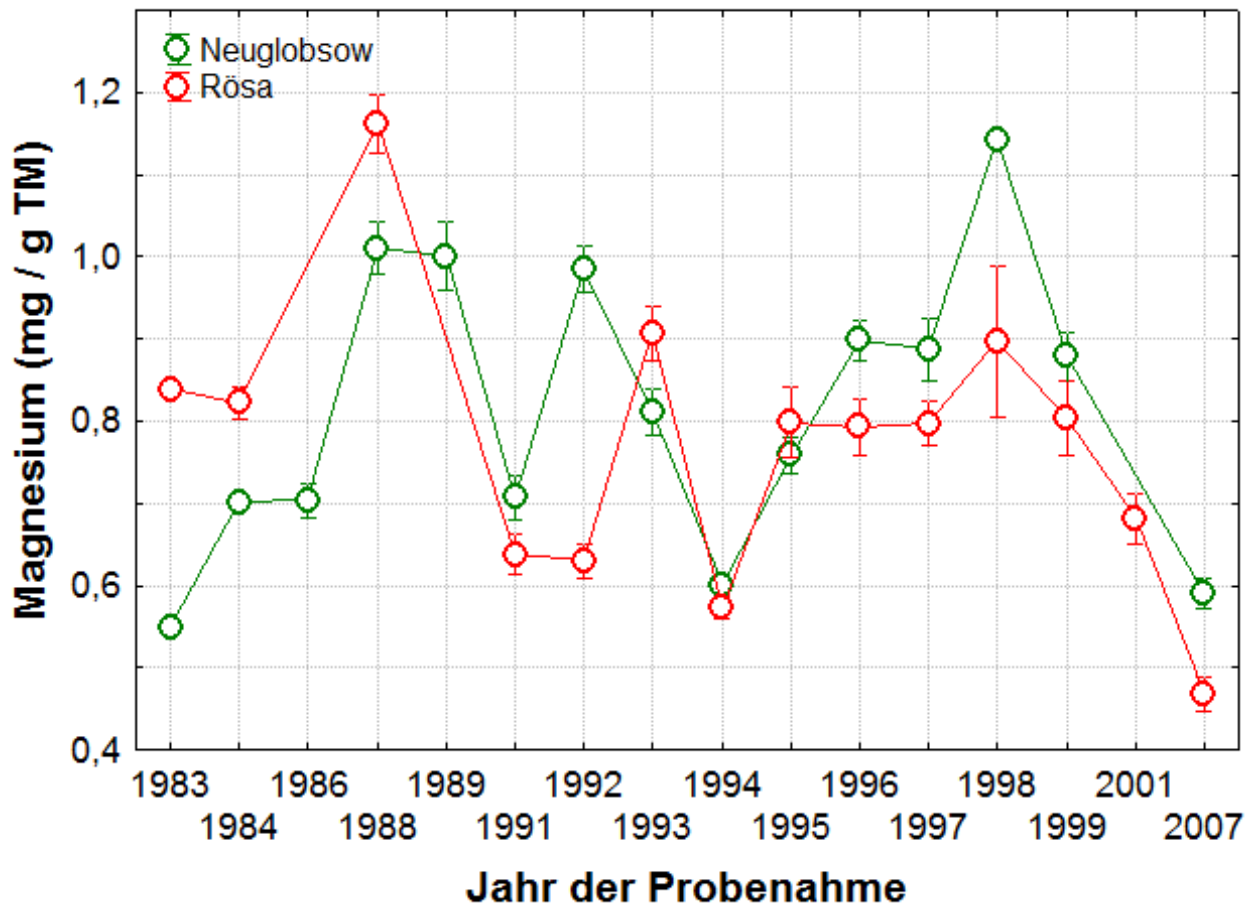


Abb.25: Magnesium-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Magnesium-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant niedriger und zeigen in beiden Gebieten einen deutlich absteigenden Trend aufgrund geringerer Einträge von basischen Flugaschen seit 1999 (vgl. **Abb.2**, 1. Kiefernborke in V. Zeitliche Veränderungen dieser Webseite).

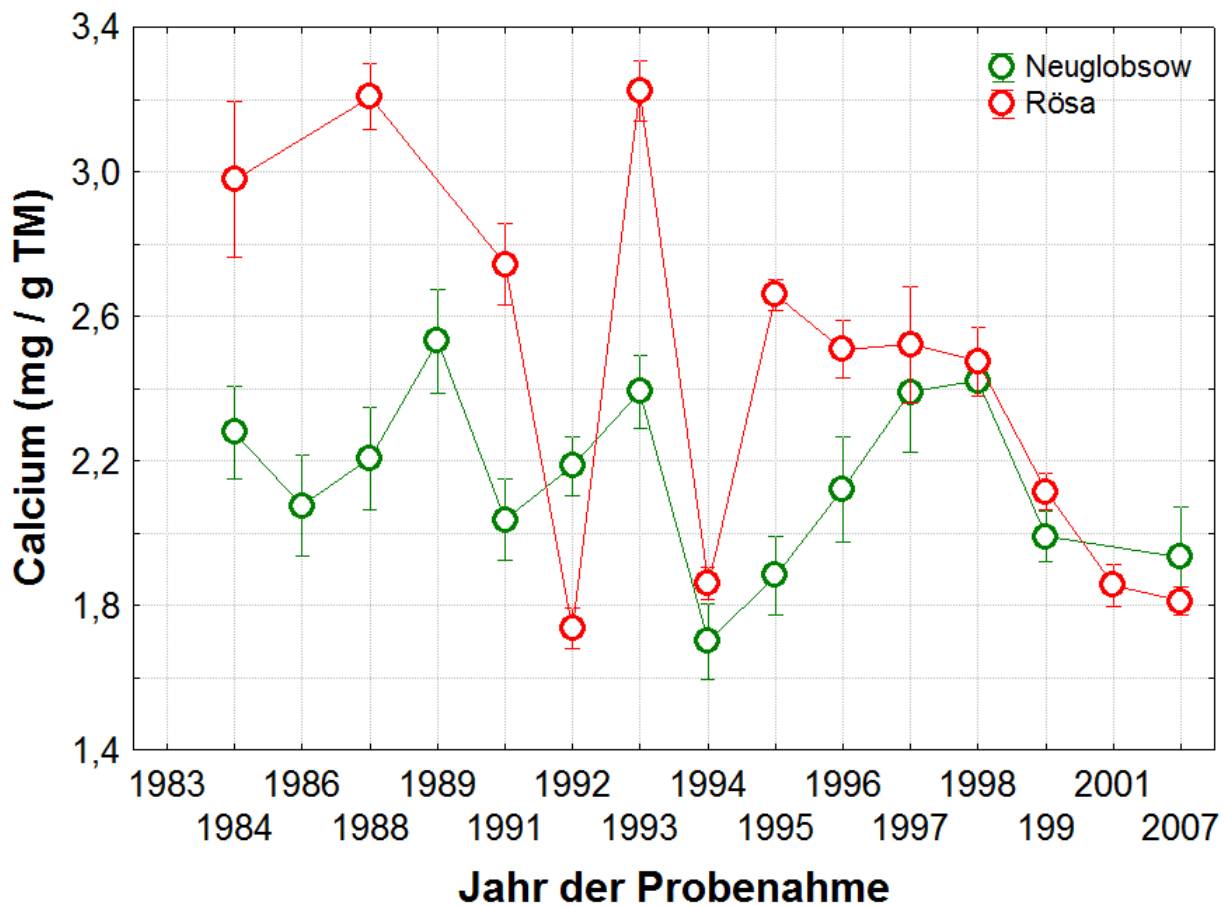


Abb.26: Calcium-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Calcium-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa teilweise signifikant höher, zeigen aber in beiden Gebieten einen absteigenden Trend, insbesondere seit 1999 in Rösa. Als Ursache hierfür sind die reduzierten Einträge von basischen Flugaschen aus den orts-nahen Kraftwerken Muldenstein und Zschornewitz anzusehen (vgl. **Abb.2, 1. Kiefernbor-ken** in *V. Zeitliche Veränderungen* dieser Webseite).

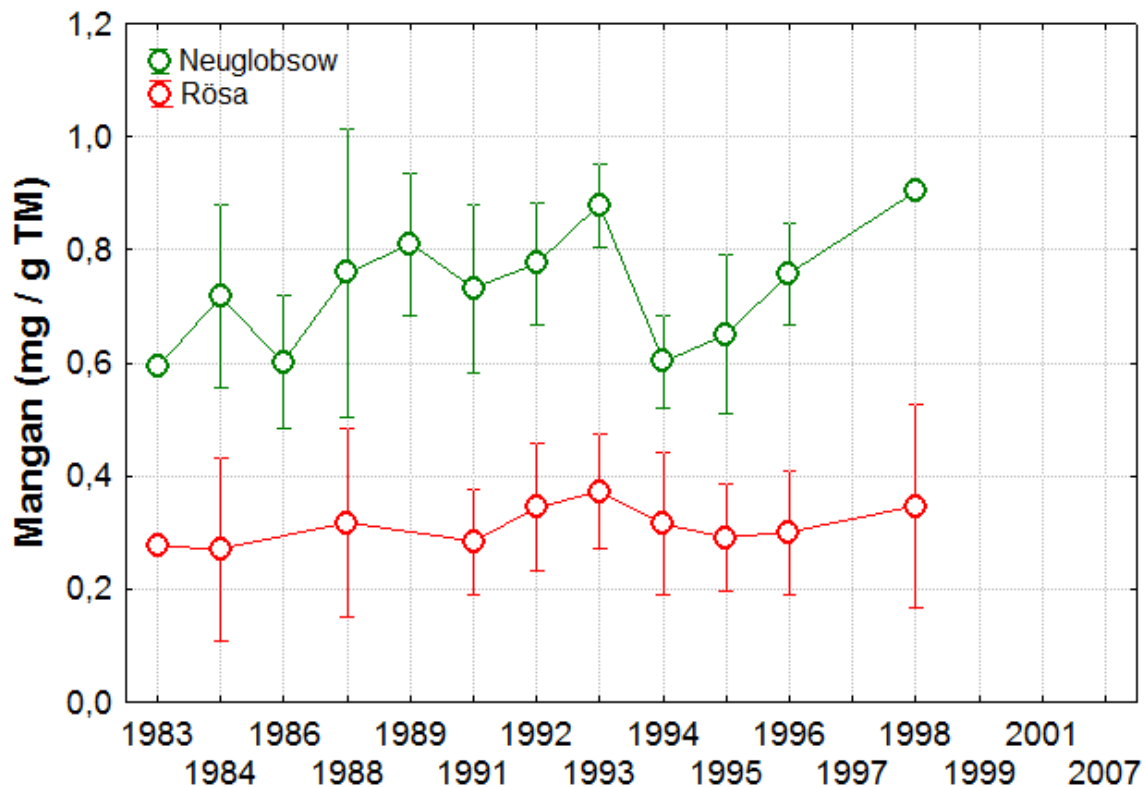


Abb.27: Mangan-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Mangan-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant geringer und zeigen in beiden Gebieten einen ansteigenden Trend, insbesondere seit 1999 in Rösa. Als Ursache hierfür sind die reduzierten Einträge von basischen Flugaschen aus den ortsnahe Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz anzusehen, die mit einsetzender Verringerung des pH-Wertes in den Humusaufgaben zur stärkeren Freisetzung von Mangan im Oberboden führen (vgl. **Abb.2**, 1. Kiefernborke in V. Zeitliche Veränderungen dieser Webseite).

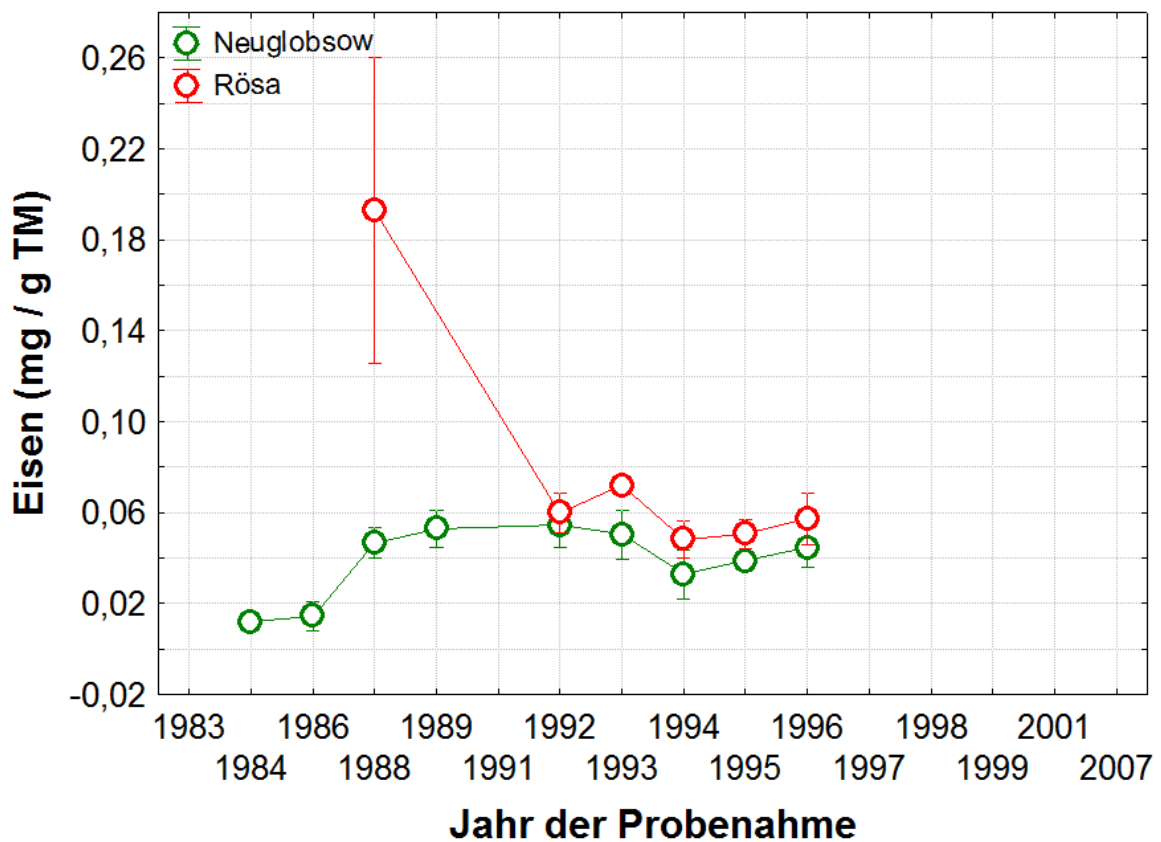


Abb.28: Eisen-Gehalt (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Eisen-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher, zeigen in beiden Gebieten einen absteigenden Trend, insbesondere seit 1999 in Rösa. Als Ursache hierfür sind die reduzierten Einträge von basischen Flugaschen aus den ortsnahen Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz anzusehen (vgl. **Abb.2**, 1. Kiefernborke in V. *Zeitliche Veränderungen* dieser Webseite).

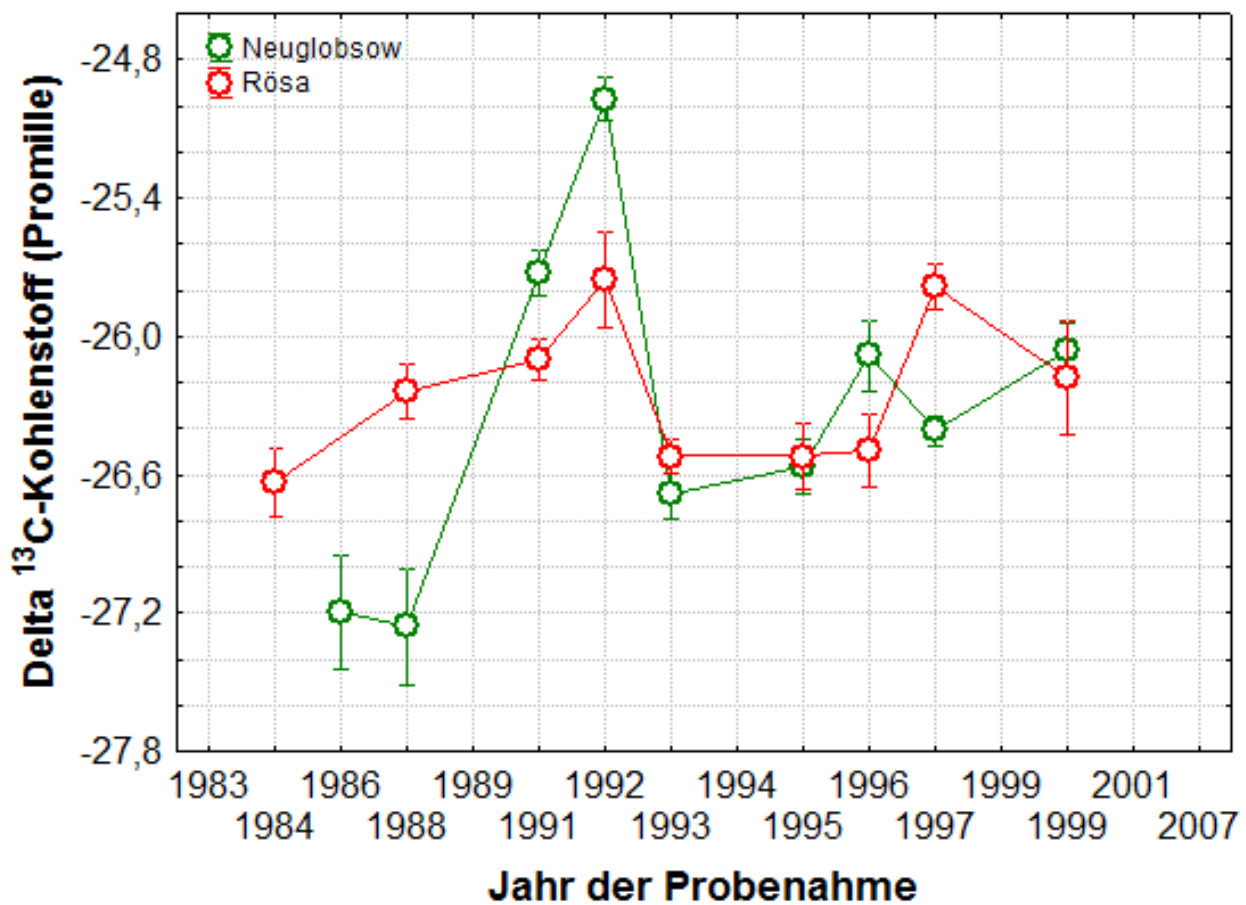


Abb.29: Delta (δ) ^{13}C -Kohlenstoff-Wert (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Das Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C bzw. der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert in Kiefernadeln wird durch die Stoffwechselaktivität und die Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre beeinflusst. Aus fossilen Brennstoffen freigesetztes CO_2 hat einen geringen $\delta^{13}\text{C}$ -Wert als atmosphärisches CO_2 . Andererseits wird bei hoher photosynthetischer Aktivität bevorzugt das leichte Isotop ^{12}C umgesetzt und das schwere Isotop ^{13}C diskriminiert. Folglich ist der Anstieg der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Gesamtkohlenstoff in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow zwischen 1988 und 1992 vermutlich auf eine zwischenzeitlich verringerte Photosynthese-Aktivität und geringere Aufnahme von CO_2 aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführen. Seit 1993 verlaufen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in beiden Untersuchungsgebieten wieder auf gleichem Niveau.

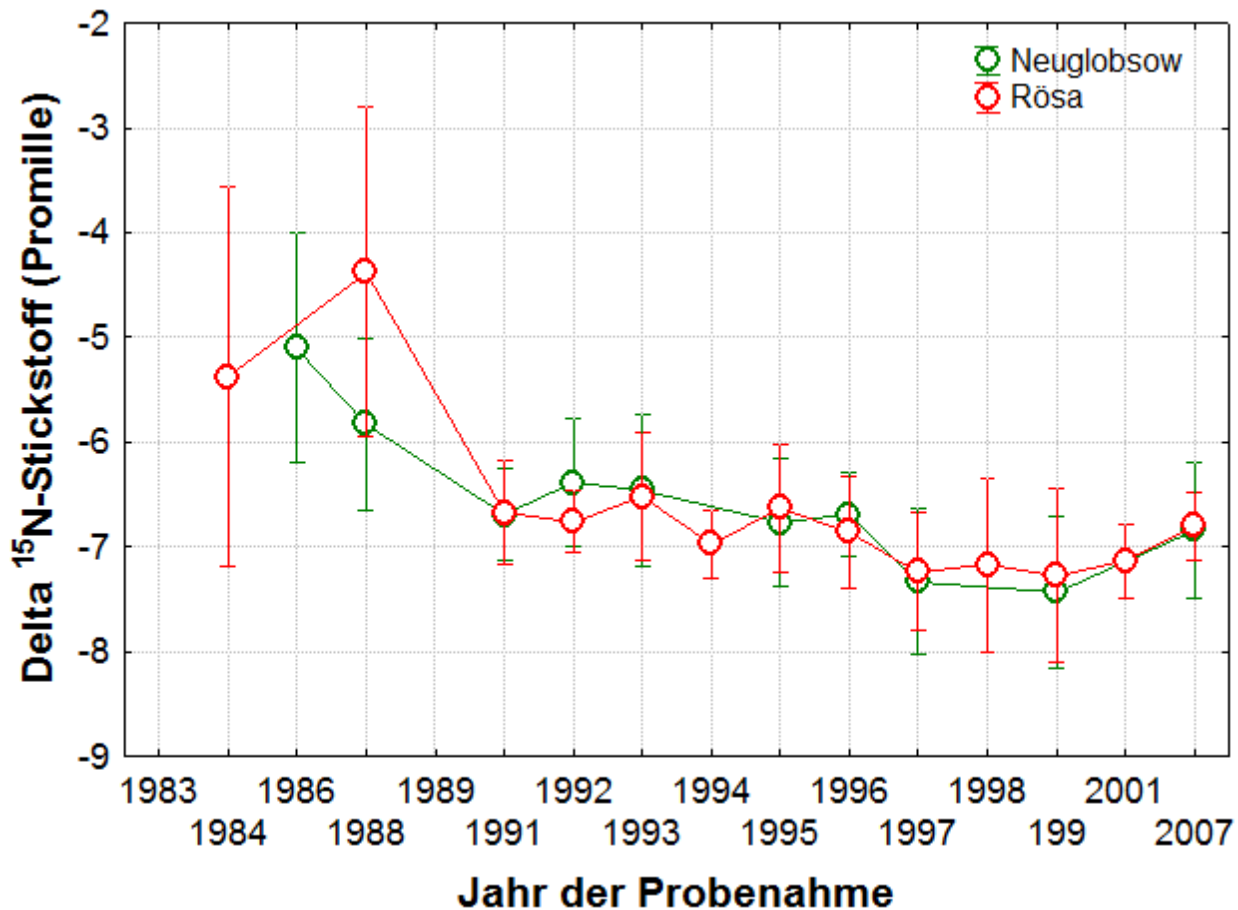


Abb.30: Delta (δ) ^{15}N -Stickstoff-Wert (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Das Verhältnis von ^{15}N zu ^{14}N bzw. der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in Kiefernadeln wird durch die Aufnahme von Ammonium und Nitrat aus der Mineralisation organischer Substanz im Boden über die Wurzeln oder durch Aufnahme von NH_3 oder NO_x über die Spaltöffnungen in die Nadeln beeinflusst. Bei Prozessen der N-Mineralisation und N-Assimilation reagiert das leichte Isotop ^{14}N schneller als das schwere Isotop ^{15}N , wodurch ^{15}N diskriminiert wird. Allgemein besitzen Mineralstickstoff und freigesetztes NH_3 aus landwirtschaftlichen Produktionsanlagen einen geringeren $\delta^{15}\text{N}$ -Wert als NO_x -Emissionen aus Kraftwerken und Industrieanlagen.

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in obiger Abbildung von Gesamtstickstoff in Kiefernadeln von Altbeständen in beiden Untersuchungsgebieten unterscheiden sich nicht und sind seit 1988 absteigend, d. h. es wird zunehmend mineralisierter Stickstoff aus den Humusaufgaben über die Wurzeln oder NH_3 aus der Umgebungsluft über die Spaltöffnungen aufgenommen, welches an ^{15}N abgereichert ist.

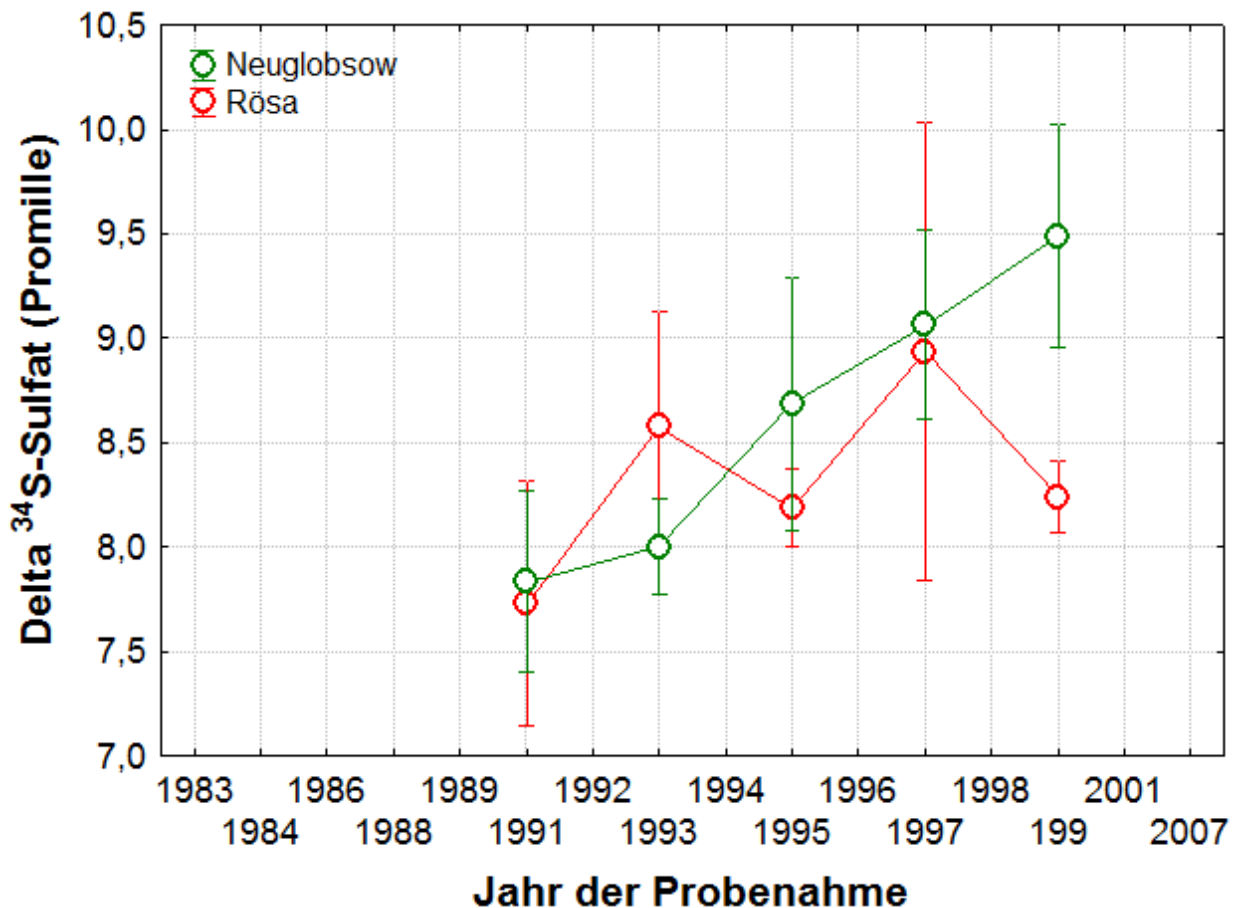


Abb.31: Delta (δ) ^{34}S -Wert von Sulfat (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Das Verhältnis von ^{34}S zu ^{32}S bzw. der $\delta^{34}\text{S}$ -Wert in Kiefernadeln wird durch die Aufnahme von Sulfat aus der Mineralisation organischer Substanz zu Sulfat im Boden über die Wurzeln oder durch Aufnahme von SO_2 über die Spaltöffnungen in die Nadeln beeinflusst. Bei Prozessen der S-Mineralisation und S-Assimilation reagiert das leichte Isotop ^{32}S schneller als das schwere Isotop ^{34}S , wodurch ^{34}S diskriminiert wird. Allgemein besitzt Sulfat aus der Mineralisation organischer Substanz einen geringeren $\delta^{34}\text{S}$ -Wert als Sulfat aus atmosphärischem Eintrag bzw. der Oxidation von SO_2 aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe.

Die $\delta^{34}\text{S}$ -Werte in obiger Abbildung von wasserlöslichem Sulfat in Kiefernadeln von Altbeständen in beiden Untersuchungsgebieten unterscheiden sich nicht und sind seit 1991 ansteigend, d. h. bei dem von den Kiefern über die Wurzeln aufgenommene Sulfat handelt es sich nicht um Sulfat aus der Mineralisation organischer Substanz, sondern um Sulfat aus atmosphärischem Eintrag, welches vermutlich bei nachlassenden SO_2 -Immssionen durch Re-Mineralisation aus Eisen-Humus-Komplexen wieder freigesetzt wurde (SCHULZ et al. 2004).

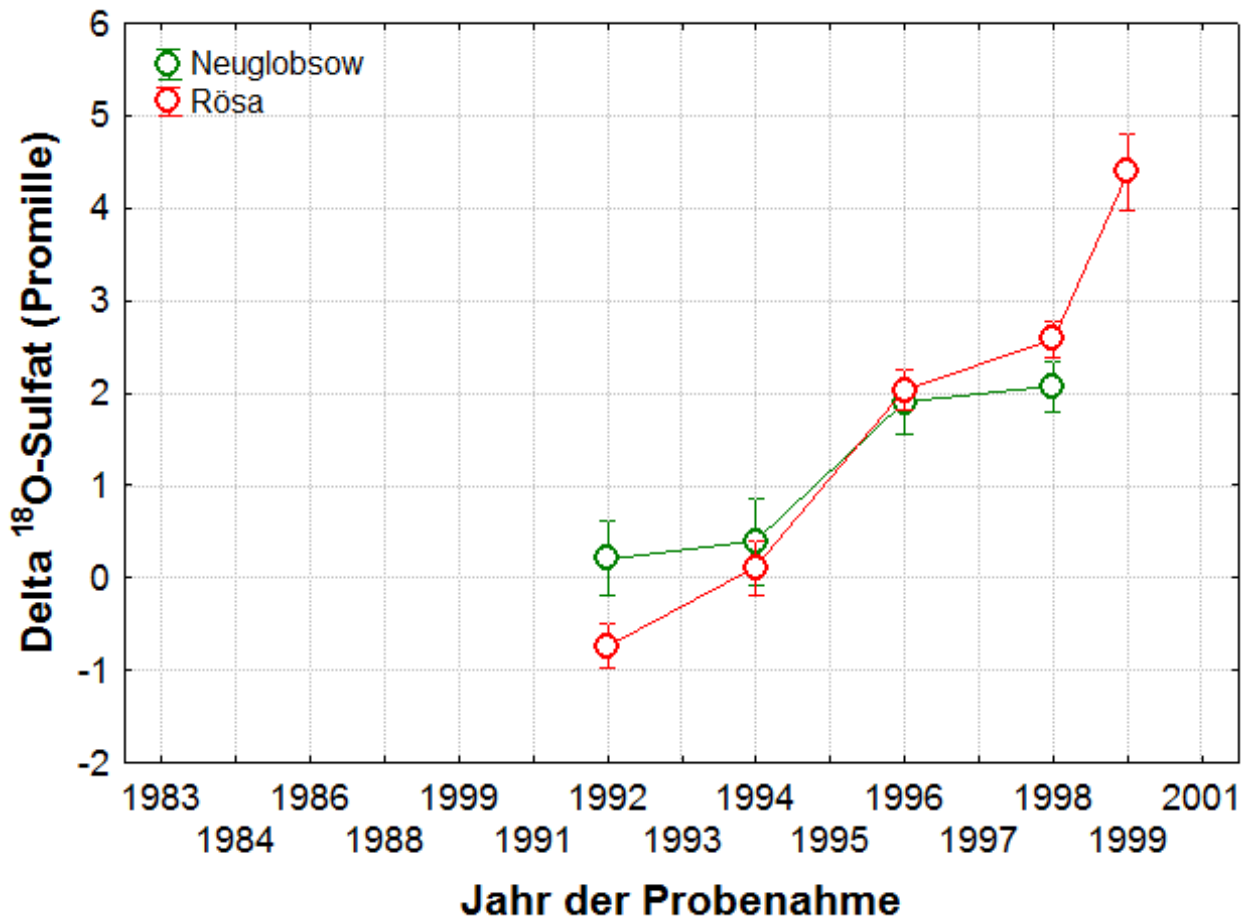


Abb.32: Delta (δ) ^{18}O -Wert von Sulfat (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, $n = 5$) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Sulfat in Kiefernadeln werden durch Mineralisation organischer Substanz im Boden und Oxidation von SO_2 in der Atmosphäre bestimmt. Bei der Mineralisierung organischer Substanz zu Sulfat wird wie beim Schwefel das leichte Isotop ^{16}O gegenüber dem schwereren Isotop ^{18}O im Sulfat angereichert (vgl. **Abb.12**, 1. Borken in V. *Zeitliche Veränderungen* oder SCHULZ et al. 2004 in der Publikationsliste dieser Webseite).

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in obiger Abbildung steigen wie auch die $\delta^{32}\text{S}$ -Werte von Sulfat (**Abb.31** hier in V. *Zeitliche Veränderungen*) im zeitlichen Verlauf an bzw. werden zunehmend positiver, d.h. das Sulfat in den Kiefernadeln beider Gebiete stammt vermutlich nicht aus der Mineralisation organischer Substanz, sondern ist überwiegend atmosphärisches Sulfat, das bei reduzierten SO_2 -Immissionen durch Re-Mineralisation aus Eisen-Humus-Komplexen wieder freigesetzt wird und aufgrund der vergleichbaren $\delta^{34}\text{S}$ -Werte (**Abb.31** hier in V. *Zeitliche Veränderungen*) aus der Verbrennung von Braunkohlen aus den gleichen Tagebauen entstammt.