

# Zeitliche Veränderungen von Bioindikationsparametern in Ökosystemkompartimenten ausgewählter Untersuchungsgebiete

## 3. Kiefernnadeln

Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) wurden zur Erfassung und Kontrolle von Immissionswirkungen in Forstökosystemen ausgewählt. Nadeln von halbjährigen Kieferntrieben sind zum Zeitpunkt der Probennahme im Oktober maximal ausgebildet und hoch sensitiv, um Immissionswirkungen über Inhaltsstoffe bzw. Biomarker frühzeitig anzuzeigen. ([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.)“ zu finden.

Auf nachfolgenden Seiten sind Ergebnisse zur zeitlichen Veränderung von ausgewählten Biomarkern halbjähriger Nadeln und morphologische Parameter von Kiefernalbeständen aus den Untersuchungsgebieten Rösa (Land Sachsen-Anhalt) in der Dübener Heide und dem 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:

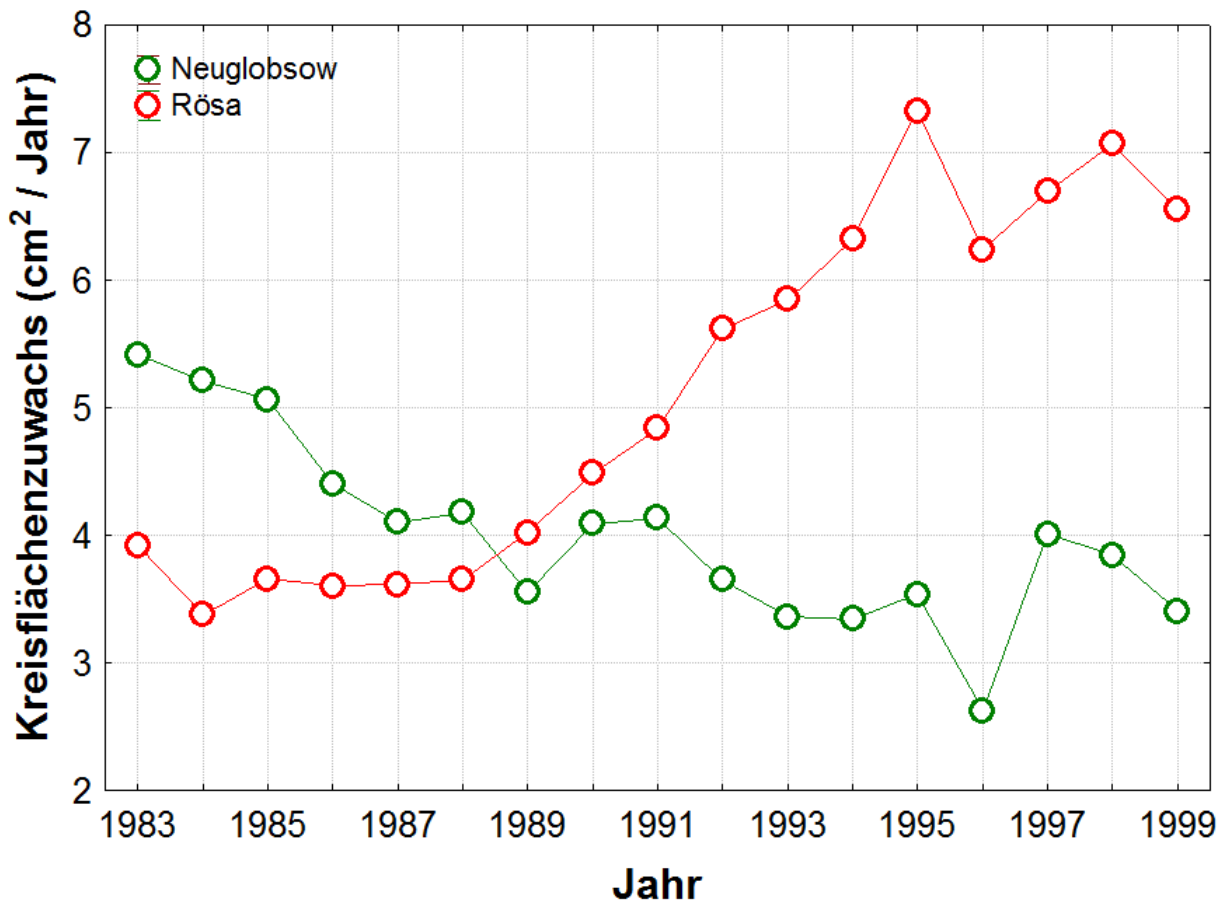
TF1: 4570,48 (RW); 5888,94 (HW); Forstamt Fürstenberg, Forstrevier Roofen: Abteilung: 265b4

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

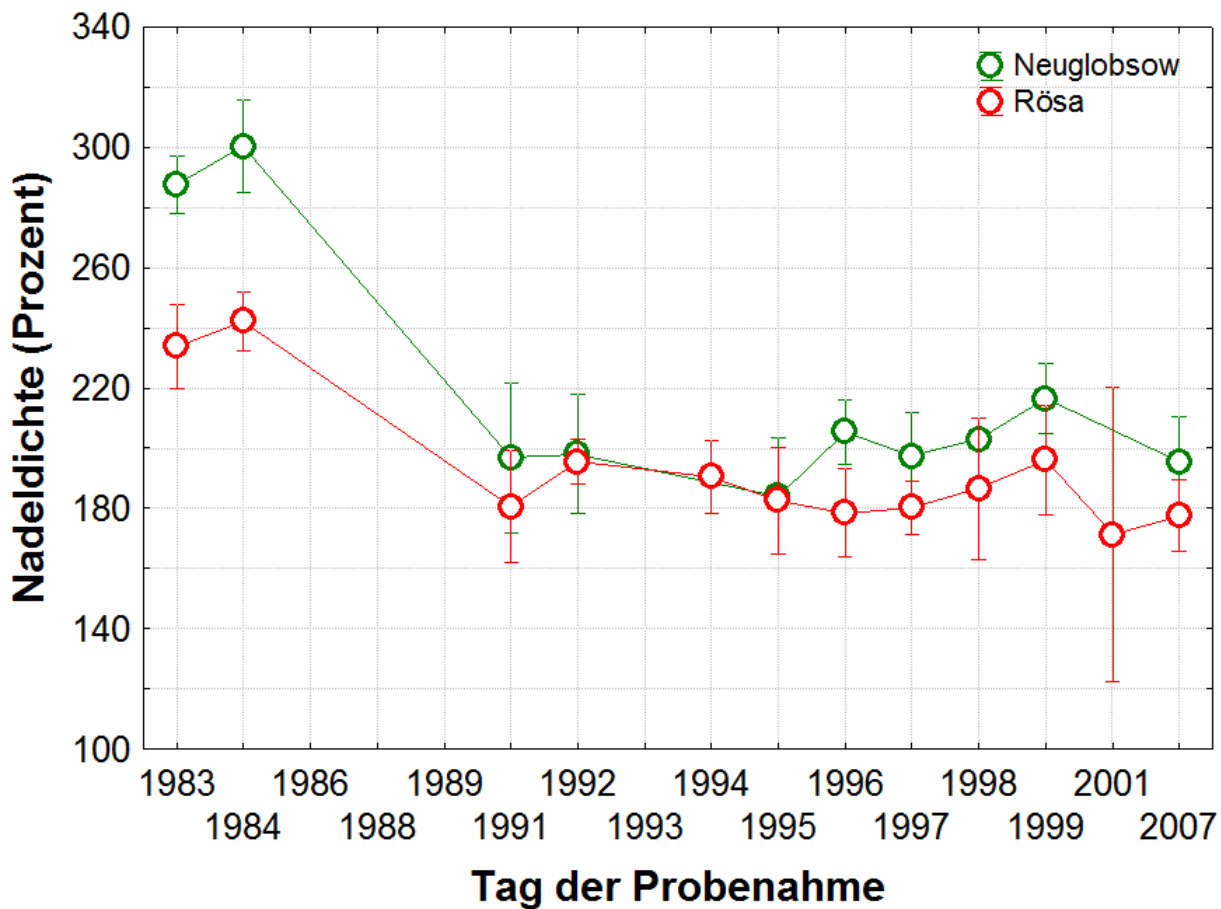
TF4: 4565,83 (RW); 5887,33 (HW); Forstamt Fürstenberg, Forstrevier Sellenweide: Abteilung: 21a

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



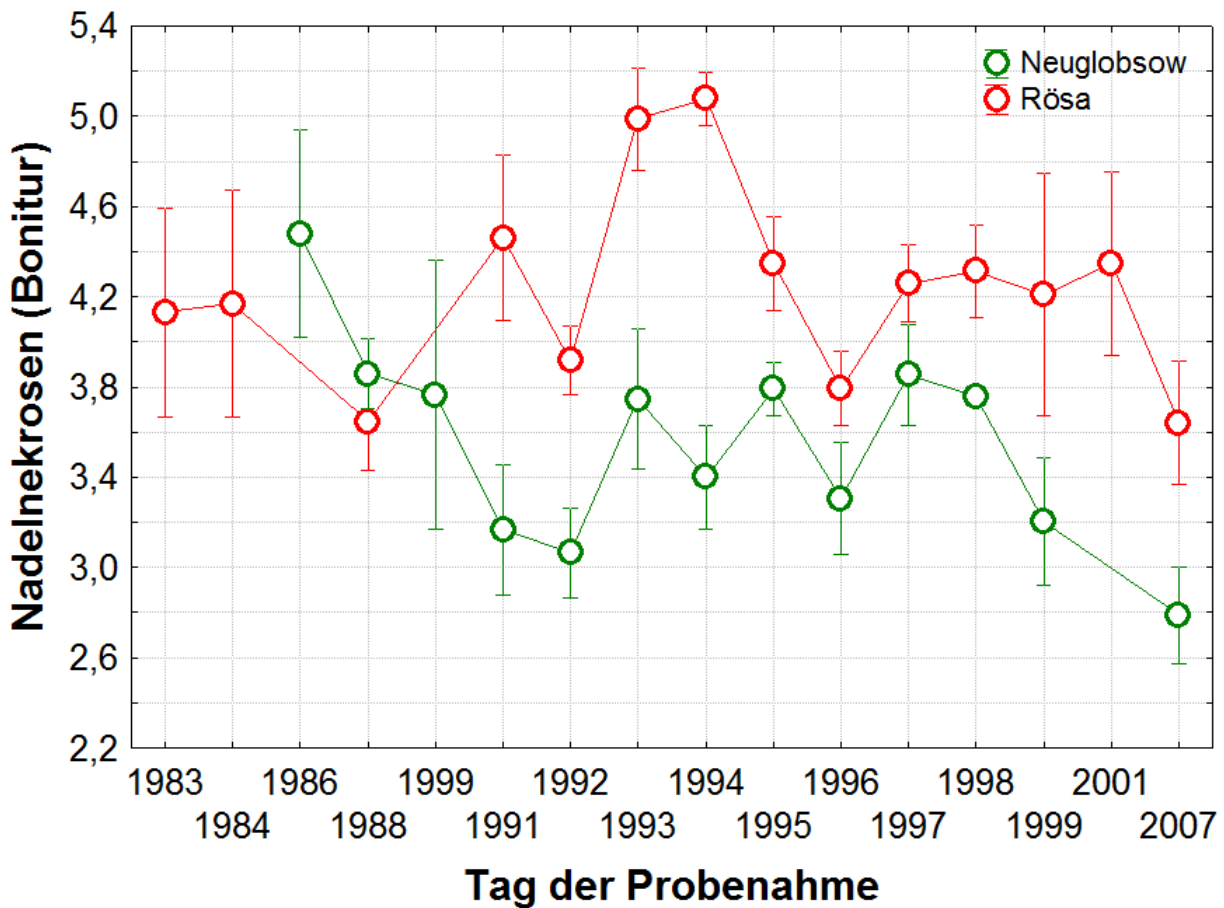
**Abb.1:** Kreisflächenzuwachs (Mittelwerte, n = 5 Testflächen) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

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 SO<sub>2</sub>-Emissionen aus den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa anzusehen sowie eine teilweise Harmonisierung von Ungleichgewichten in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Kiefern in den beiden Untersuchungsgebieten (vgl. auch **Abb.10** sowie Klick auf **Auswirkungen** in der Einleitung dieser Website).



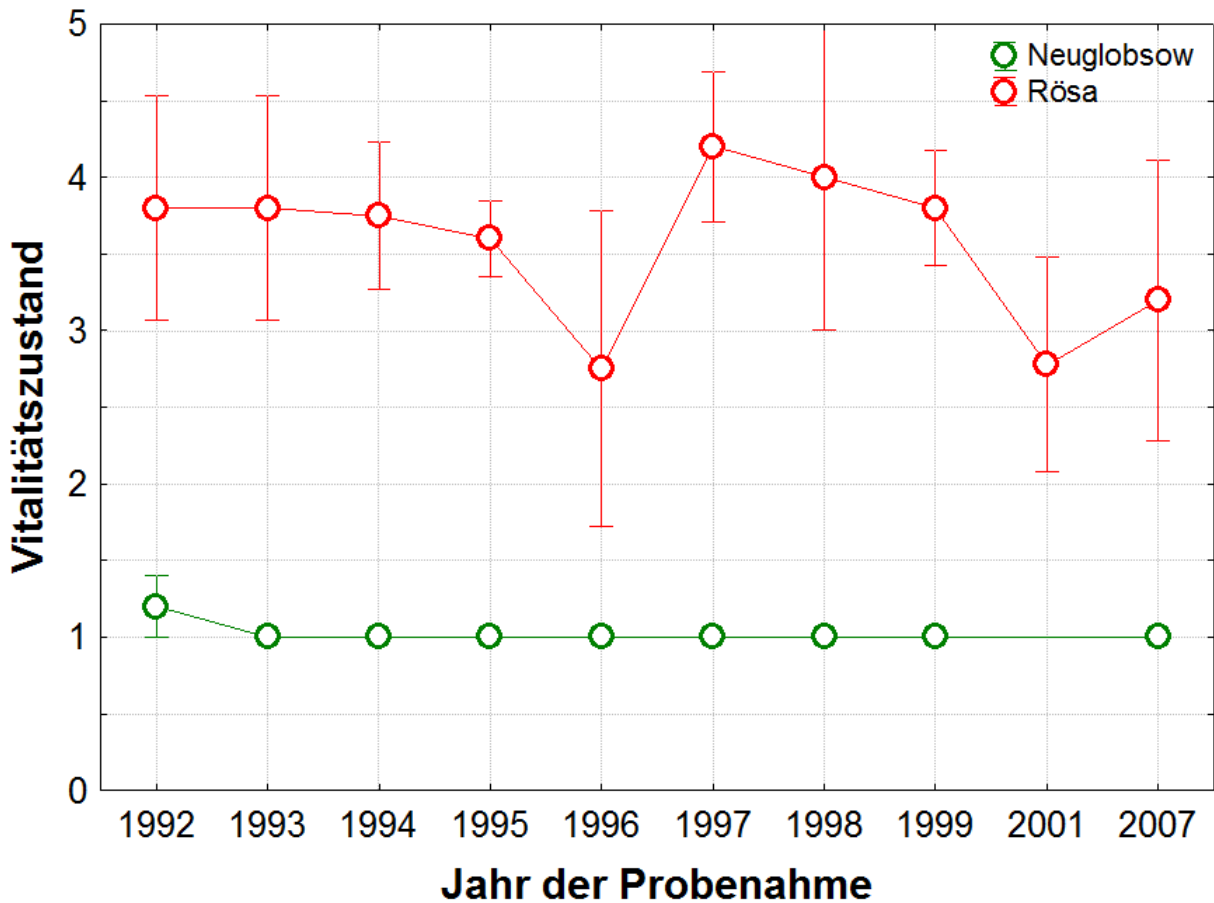
**Abb.2:** Benadelung (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die Benadelung oder Nadellebensdauer als Summe der Nadeldichte 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 Benadelung der Kiefernaltbestände.



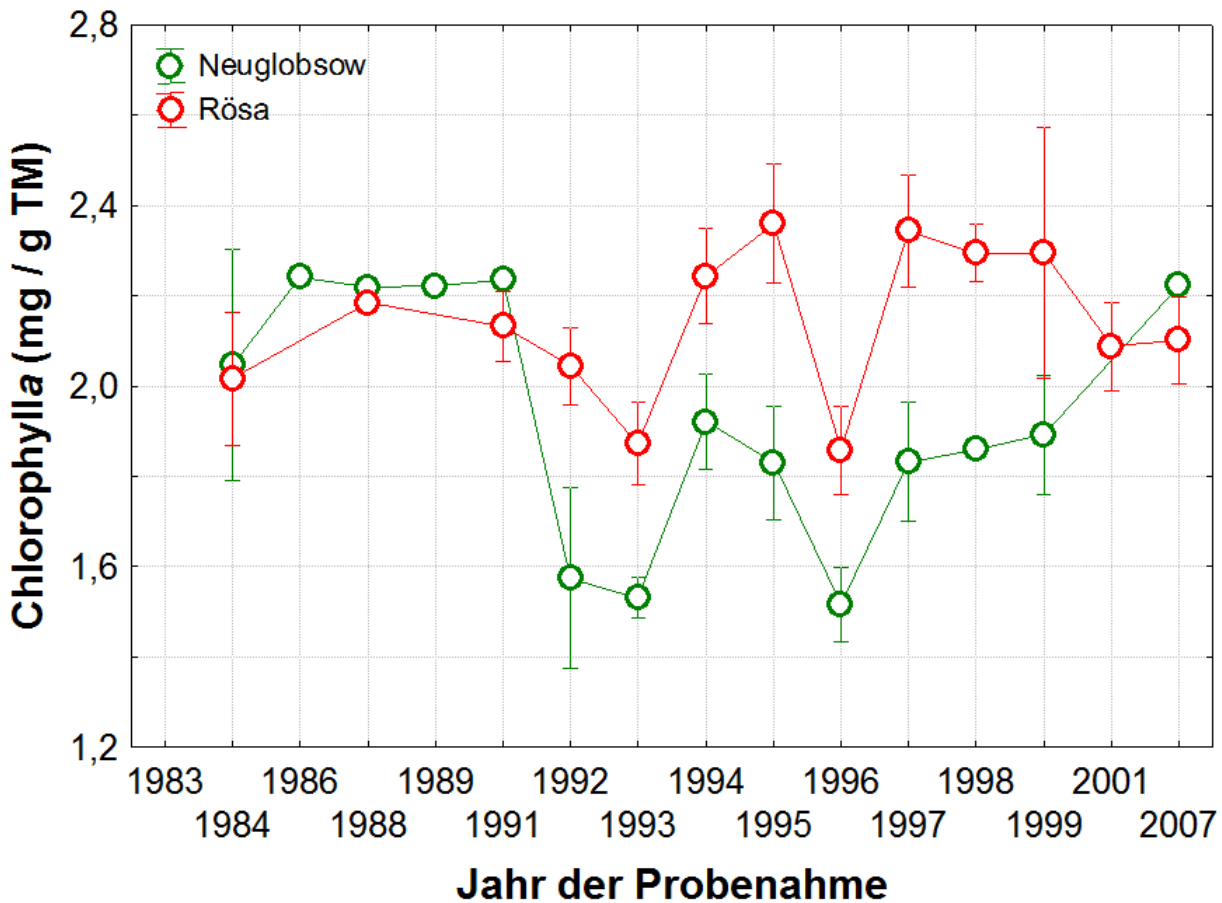
**Abb.3:** Nadelnekrosen (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die Nadelnekrosen als Summe der Spitzennekrosen von allen Nadeljährgängen wurden von jeweils 15 Ästen pro Testfläche und Gebiet geschätzt (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 (vgl. auch **Abb.10** sowie Klick auf **Auswirkungen** in der Einleitung dieser Website).



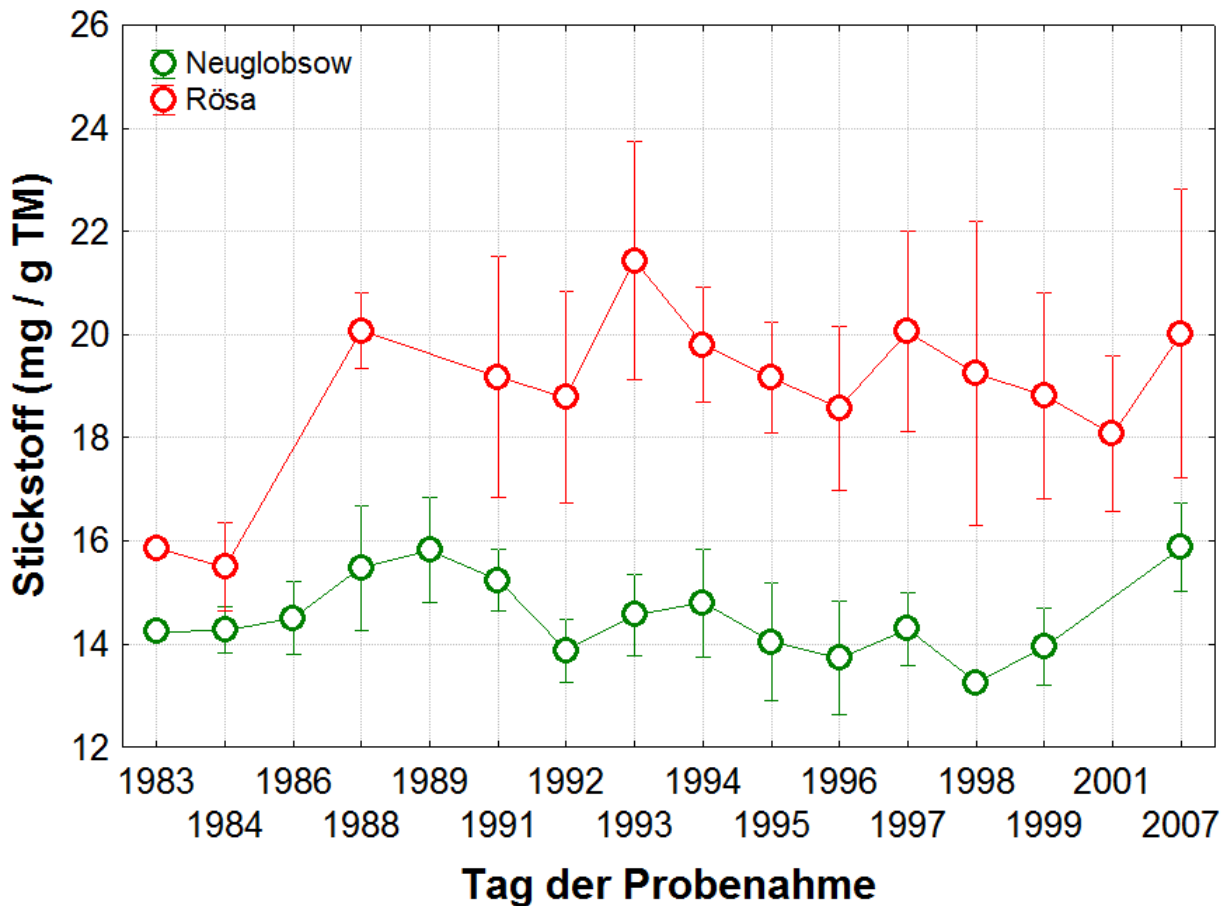
**Abb.4:** Vitalitätszustand (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Der Vitalitätszustand von Kiefernaltbeständen wurde durch Analyse von Biomarkern in halbjährigen Kiefernadeln bestimmt (SCHULZ und HÄRTLING 2003). Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow verbessert sich die Vitalität der Kiefern im Untersuchungsgebiet Rösa seit 1999. Als Ursache hierfür sind insbesondere verringerte  $\text{SO}_2$ -Emissionen aus den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa anzusehen sowie eine teilweise Harmonisierung von Ungleichgewichten in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Kiefernadeln (vgl. auch **Abb.10** sowie Klick auf **Auswirkungen** in der Einleitung dieser Website).



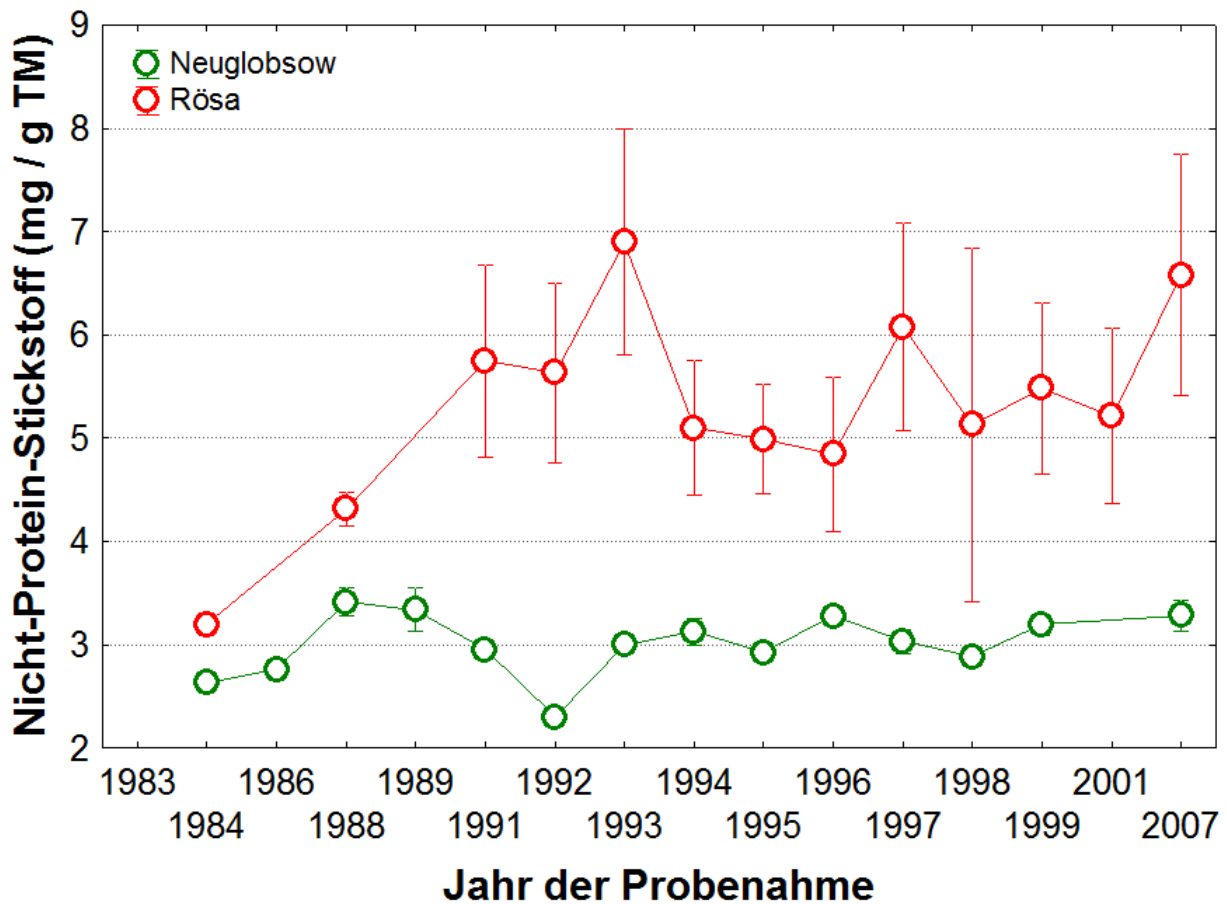
**Abb.5:** Chlorophylla-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

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.10** sowie Klick auf **Auswirkungen** in der Einleitung dieser Website).



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

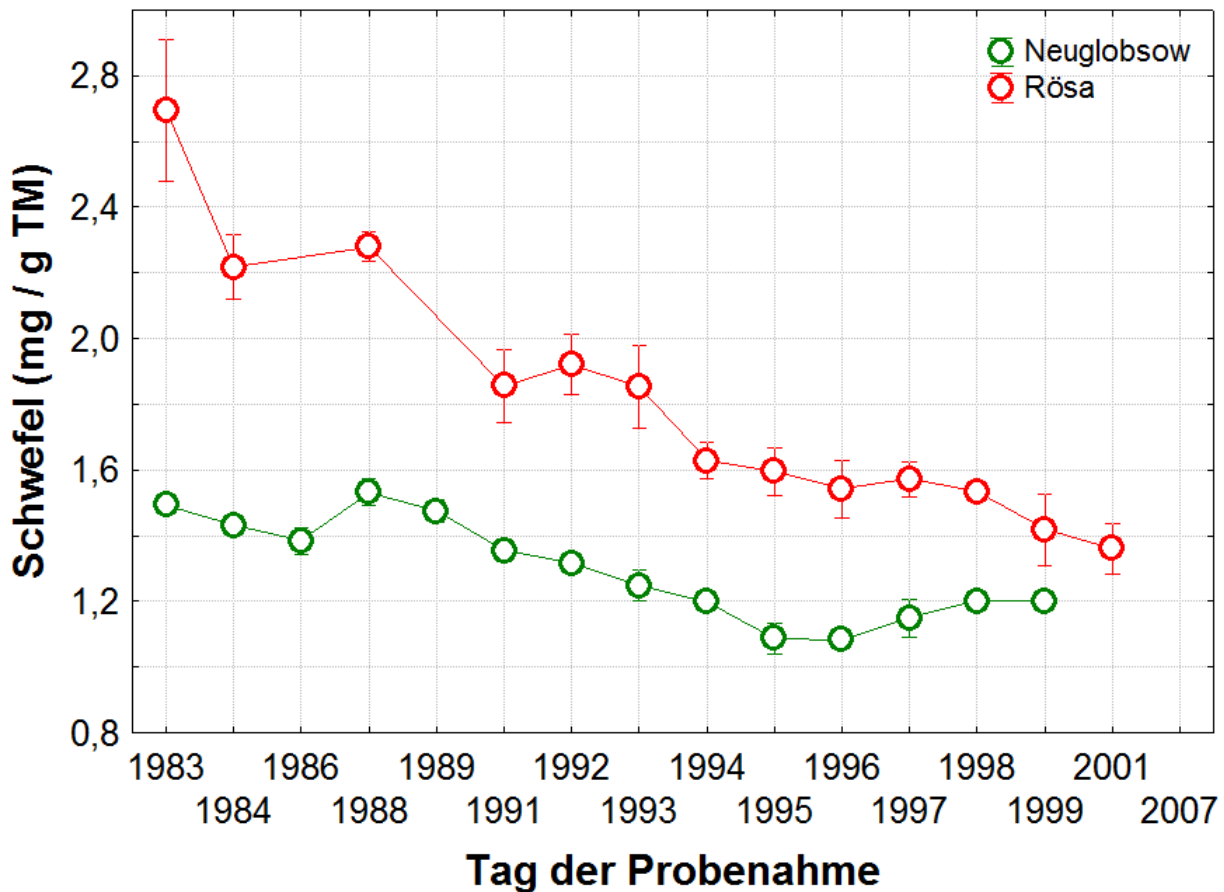
Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Stickstoff-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher. Ursache hierfür sind atmosphärische N-Einträge sowie nachhaltige Auswirkungen von Harnstoff-Düngungen in den 60er und 80er Jahre zur Kompensation von  $\text{SO}_2$ -Schäden.



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

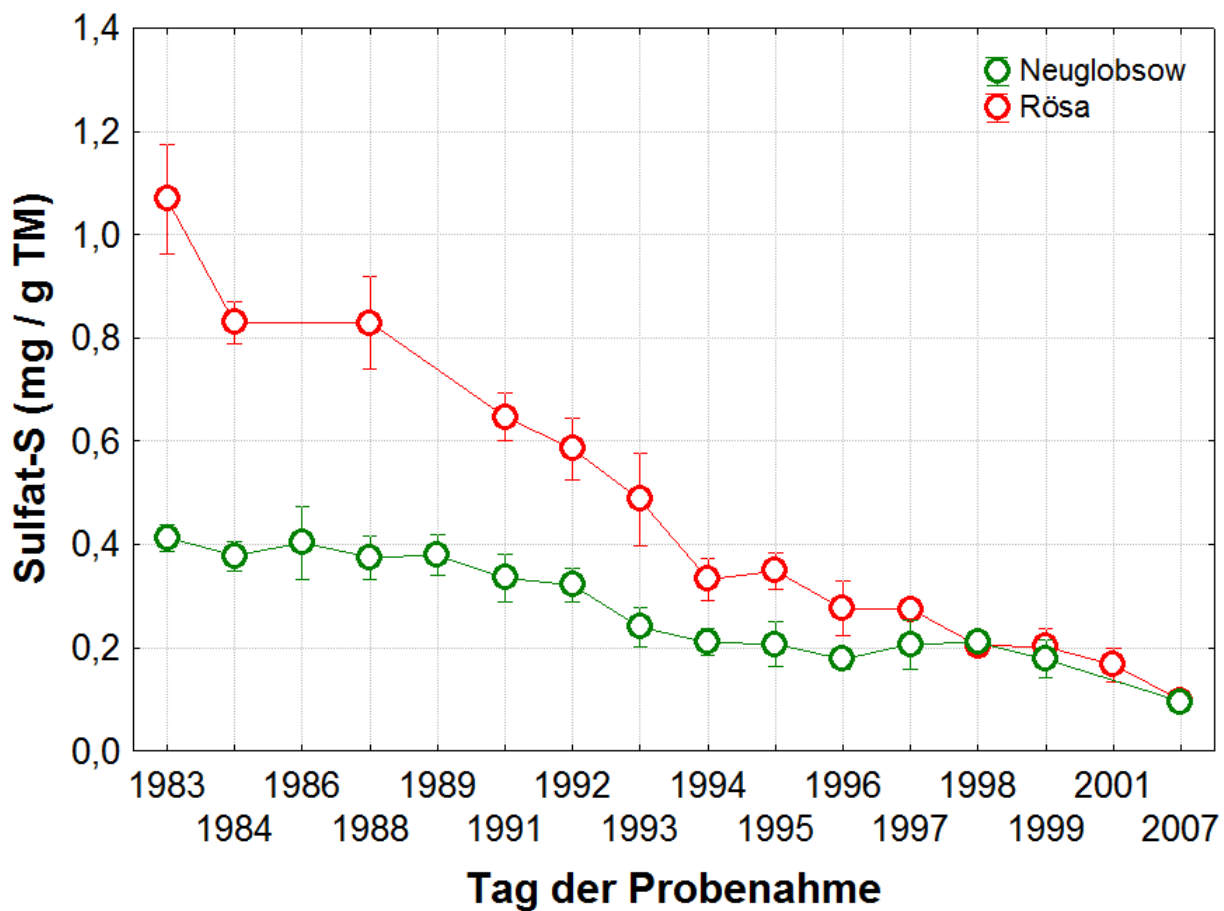
Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die löslichen Nicht-Protein-Stickstoff-Gehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant höher. Ursache hierfür sind atmosphärische N-Einträge sowie Harnstoff-Düngungen in den 60er und 80er Jahren zur Kompensation von  $\text{SO}_2$ -Schäden.





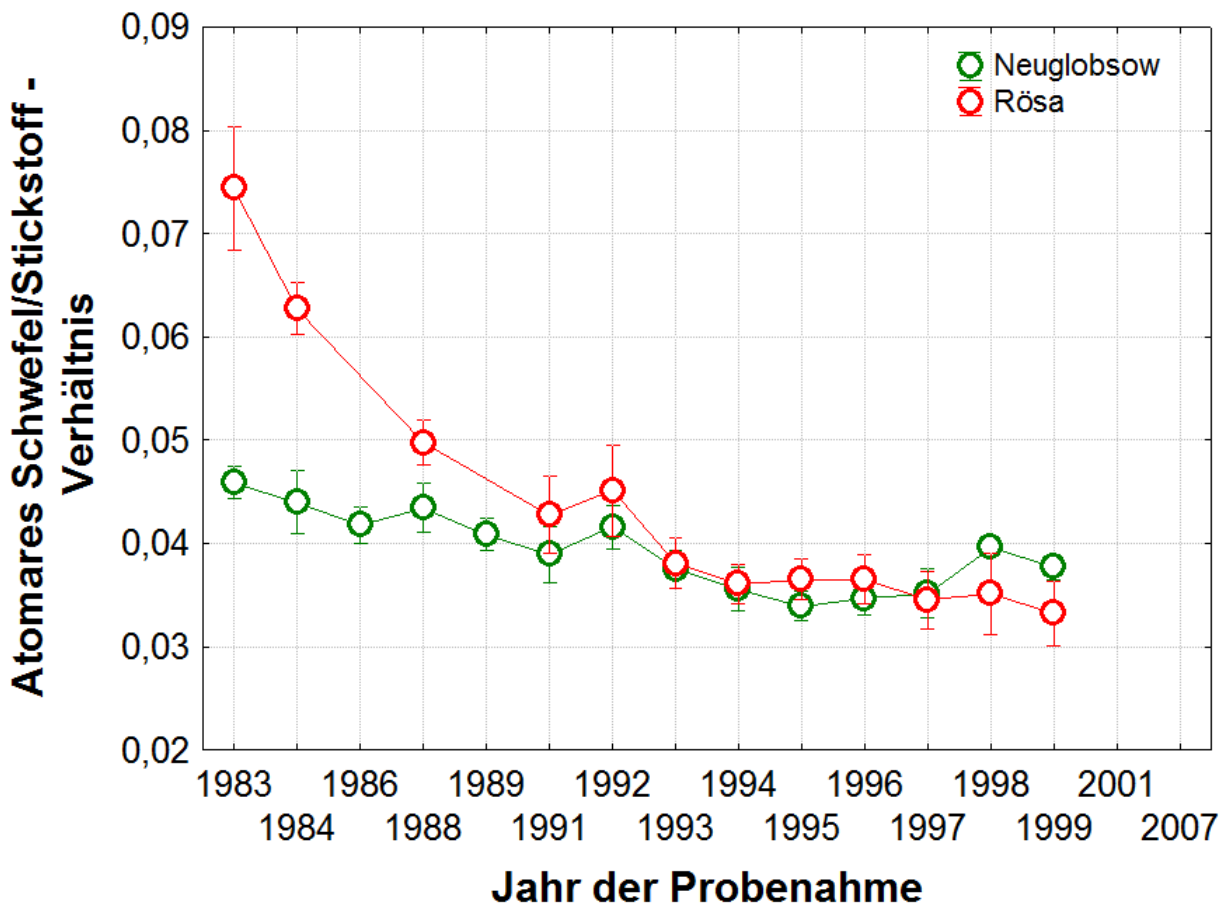
**Abb.8:** Schwefel-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

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  $\text{SO}_2$ -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahen Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa anzusehen.



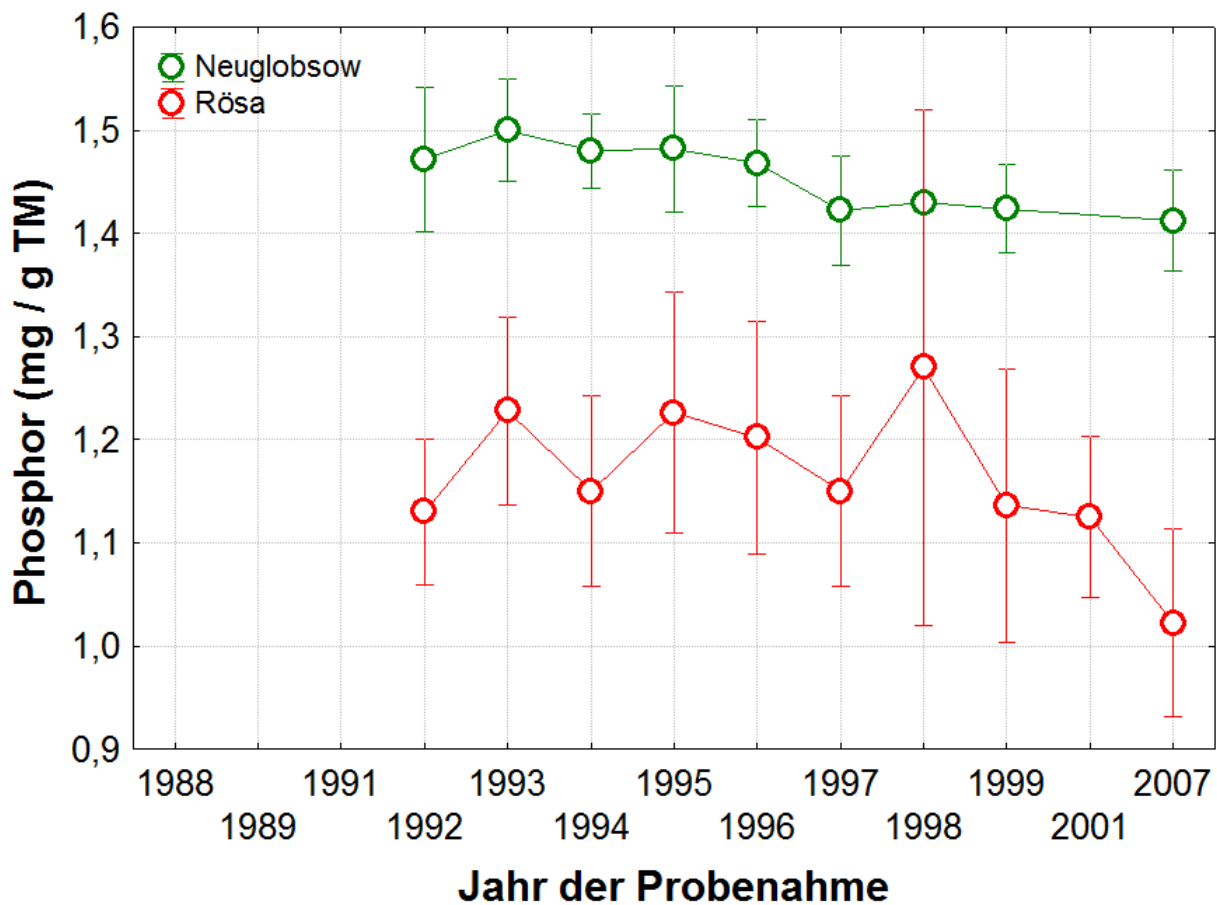
**Abb.9:** Sulfat-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

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  $\text{SO}_2$ -Immissionen und atmosphärische Stoffeinträge von Sulfat aus ortsnahen Haushalten und den Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz westlich von Rösa anzusehen.



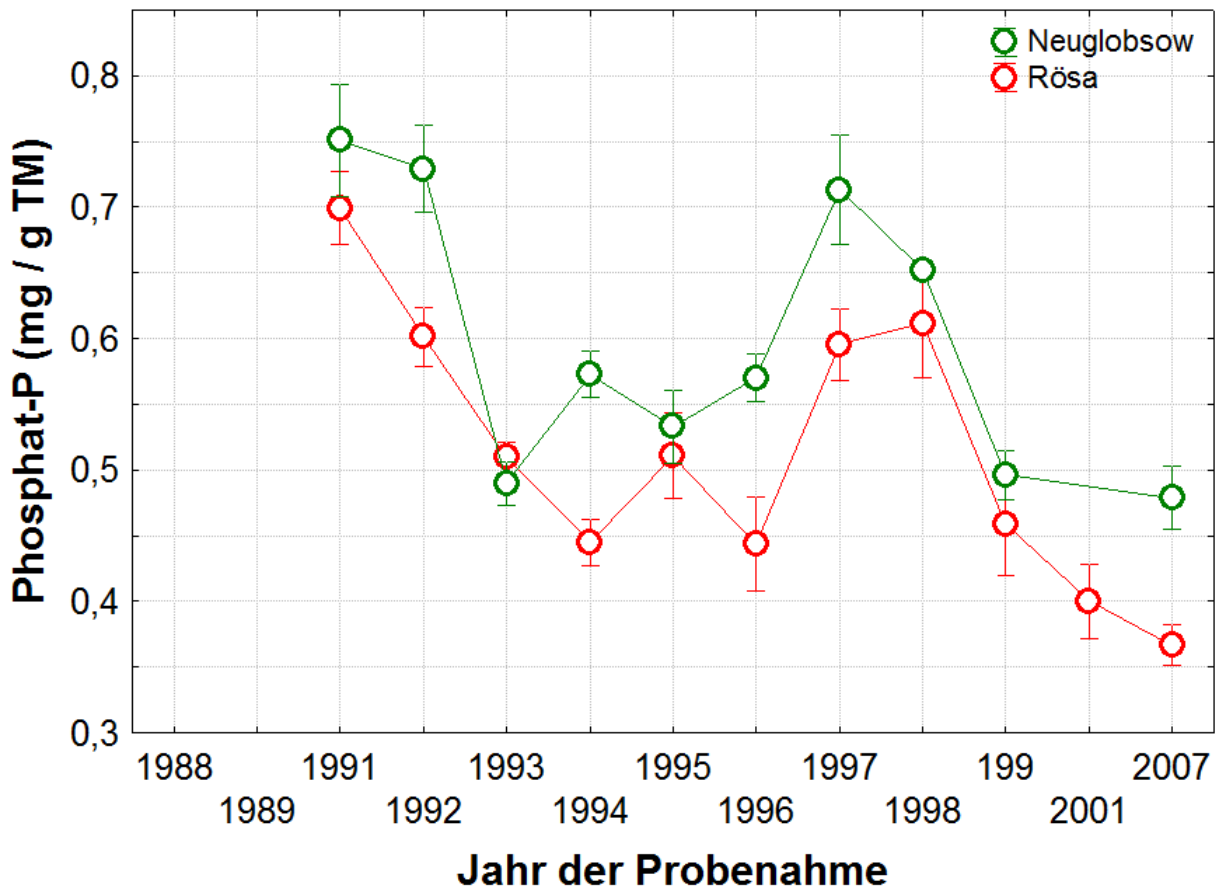
**Abb.10:** Atomares Schwefel/Stickstoff-Verhältnis (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Die atomaren Verhältnisse von Gesamtschwefel (S/32) und 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 wiederholte Harnstoff-Düngungen zur Erhöhung der Stickstoffversorgung der Kiefernaltbestände in Neuglobsow als auch zur Kompensation von  $\text{SO}_2$ -Immissionsschäden in den Kiefernaltbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa zwischen 1960 bis 1980 anzusehen, die bei reduzierten  $\text{SO}_2$ -Immissionen zu Ungleichgewichten in der Schwefel- und Stickstoff-Ernährung der Nadeln führten mit nachhaltigen Auswirkungen auf morphologische Merkmale der Kiefernadeln sowie die Vitalität und den Zuwachs der Kiefernbestände (vgl. **Abb.1, 3, 4, 5** sowie Klick auf **Auswirkungen** in der Einleitung dieser Website).



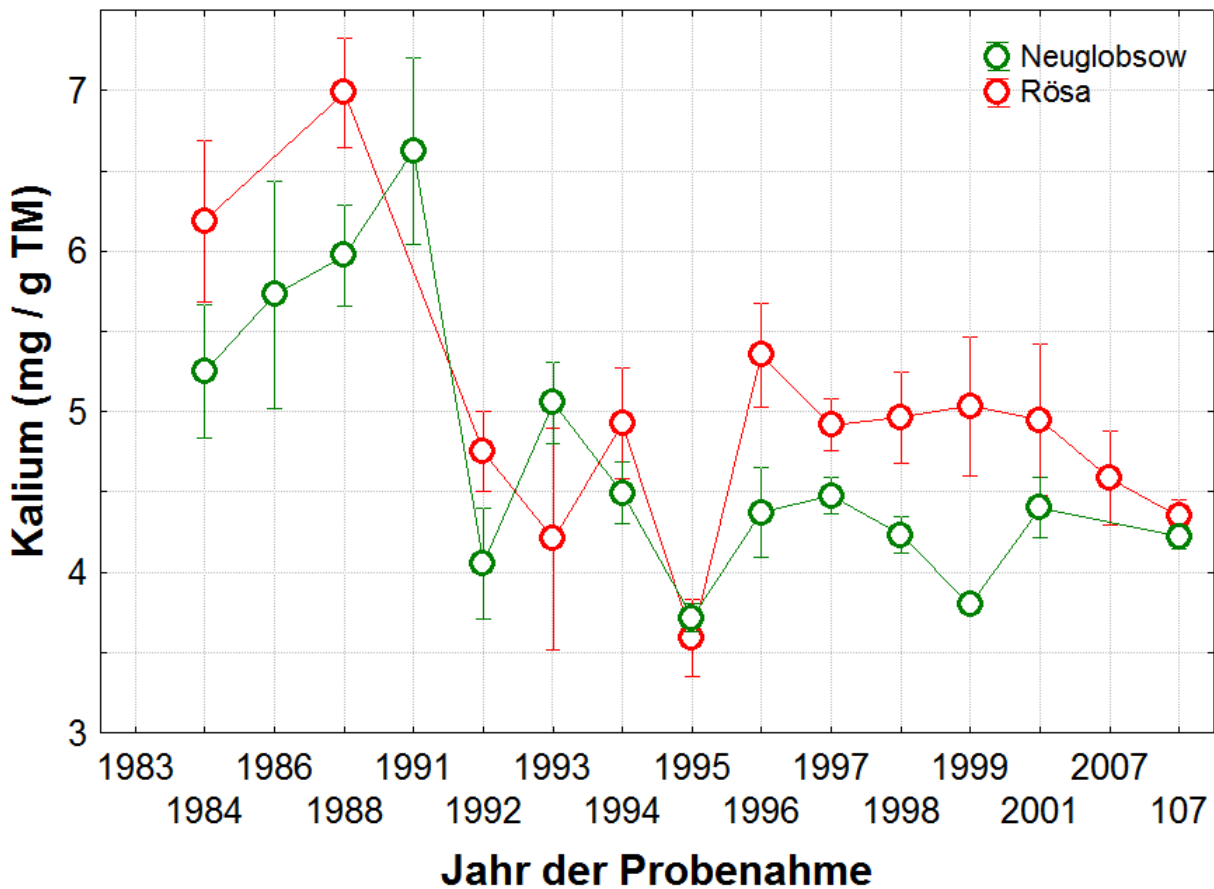
**Abb.11:** Phosphor-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Untersuchungsgebiet Rösa sind die Phosphor-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow signifikant höher und seit 1997 insbesondere im Untersuchungsgebiet Rösa wieder rückläufig. Ursache hierfür sind Einträge von basischen Flugaschen, insbesondere im Untersuchungsgebiet Rösa, die in den Humusaufgaben zur Immobilisierung von Phosphat führten (vgl. **Abb.12**).



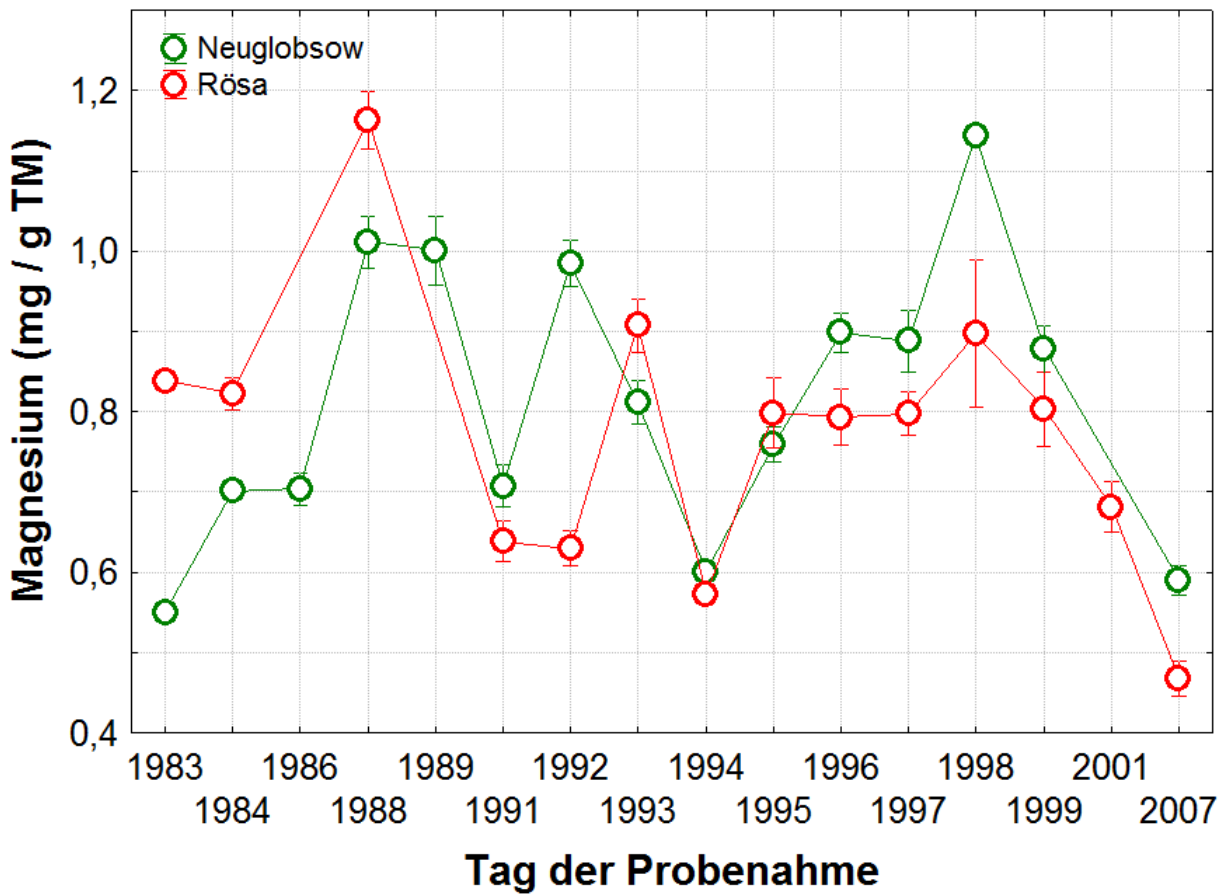
**Abb.12:** Phosphat-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Im Vergleich zum Untersuchungsgebiet Rösa sind die wasserlöslichen Phosphat-Gehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow signifikant höher und nach kurzfristiger Erhöhung der Gehalte seit 1997 in beiden Untersuchungsgebieten wieder rückläufig. Ursache hierfür sind Nachwirkungen von ehemaligen Einträgen basischer Flugaschen, insbesondere im Untersuchungsgebiet Rösa, die in den Humusaufgaben zur Immobilisierung von Phosphat führten (vgl. **Abb.11**).



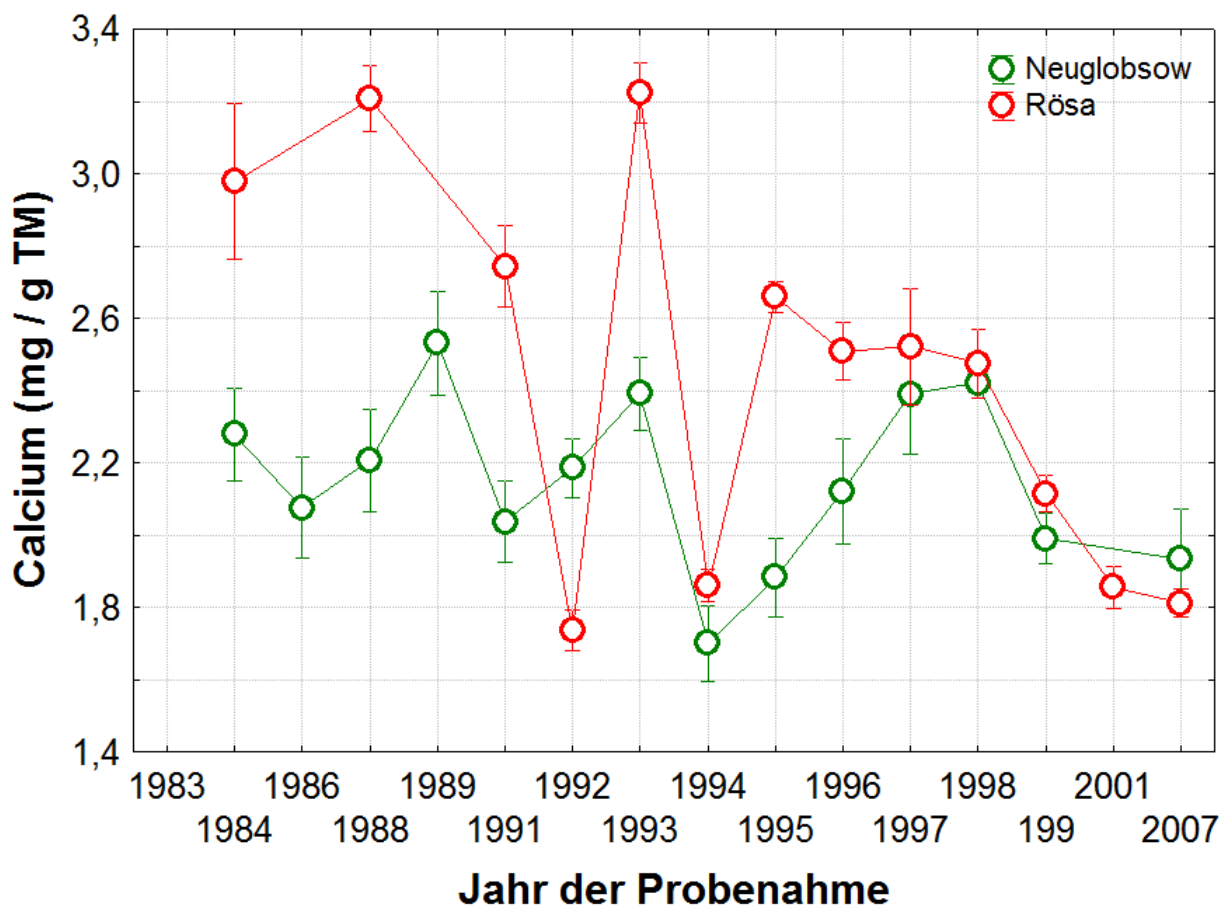
**Abb.13:** Kalium-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

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 auf einem konstanten Niveau.



**Abb.14:** Magnesium-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

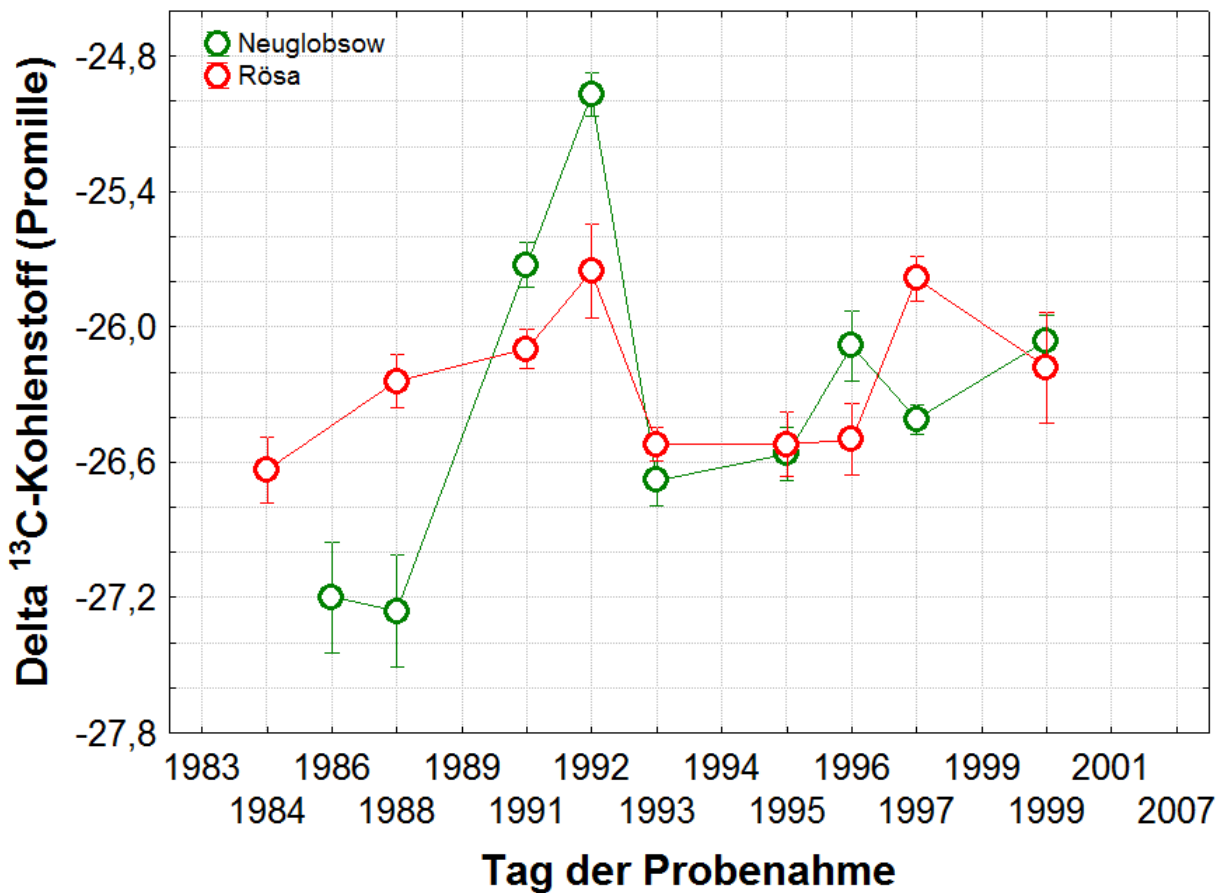
Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Magnesium-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa signifikant niedriger und zeigen in beiden Gebieten einen absteigenden Trend, insbesondere seit 1999.



**Abb.15:** Calcium-Gehalt (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

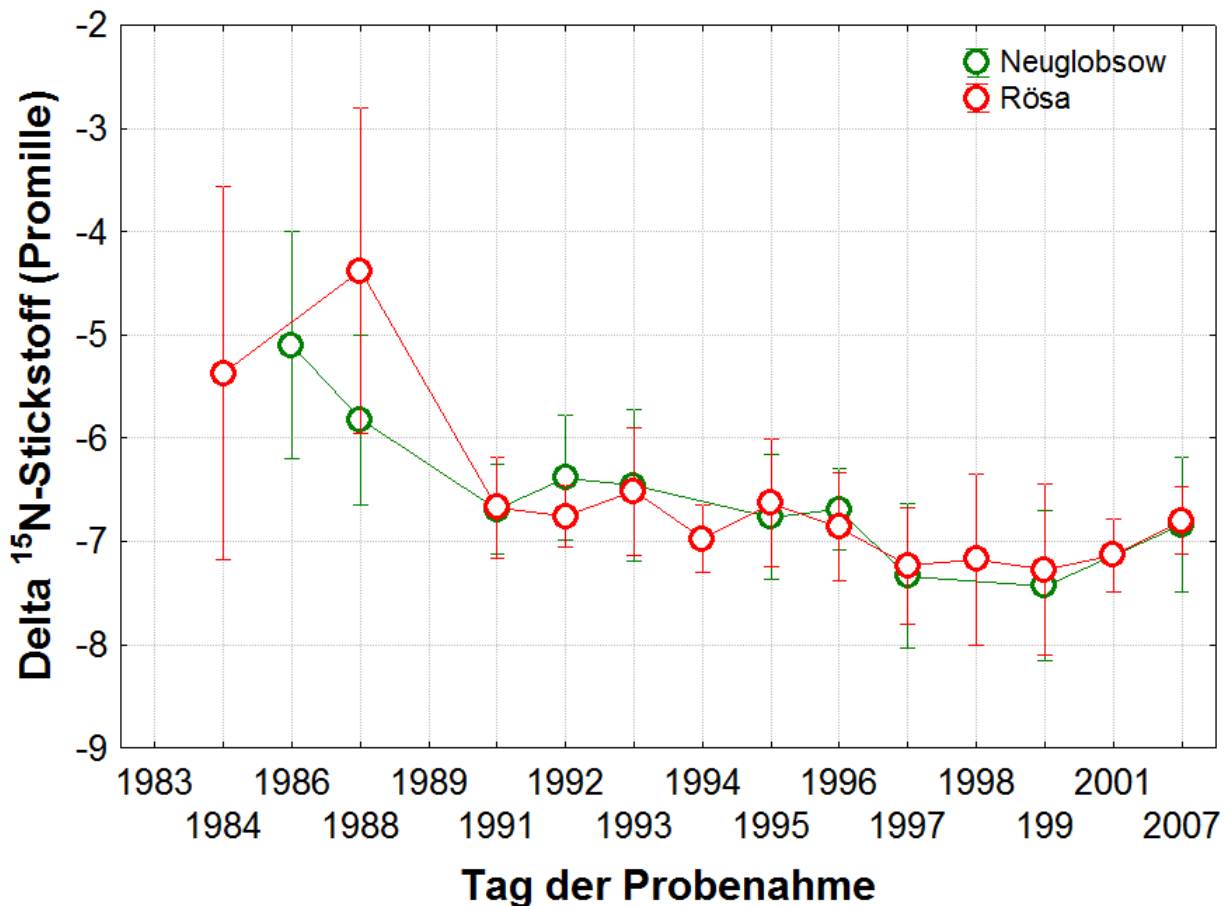
Im Vergleich zum Referenzgebiet Neuglobsow sind die Calcium-Gesamtgehalte in Kiefernadeln von Altbeständen im Untersuchungsgebiet Rösa teilweise signifikant höher und zeigen in beiden Gebieten einen absteigenden Trend, insbesondere seit 1999 in Rösa. Als Ursache sind die reduzierten Einträge von basischen Flugaschen aus den ortsnahen Kraftwerken Muldenstein und Zschornowitz anzusehen.





**Abb.16:** Delta ( $\delta$ )  $^{13}\text{C}$ -Kohlenstoff-Wert (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

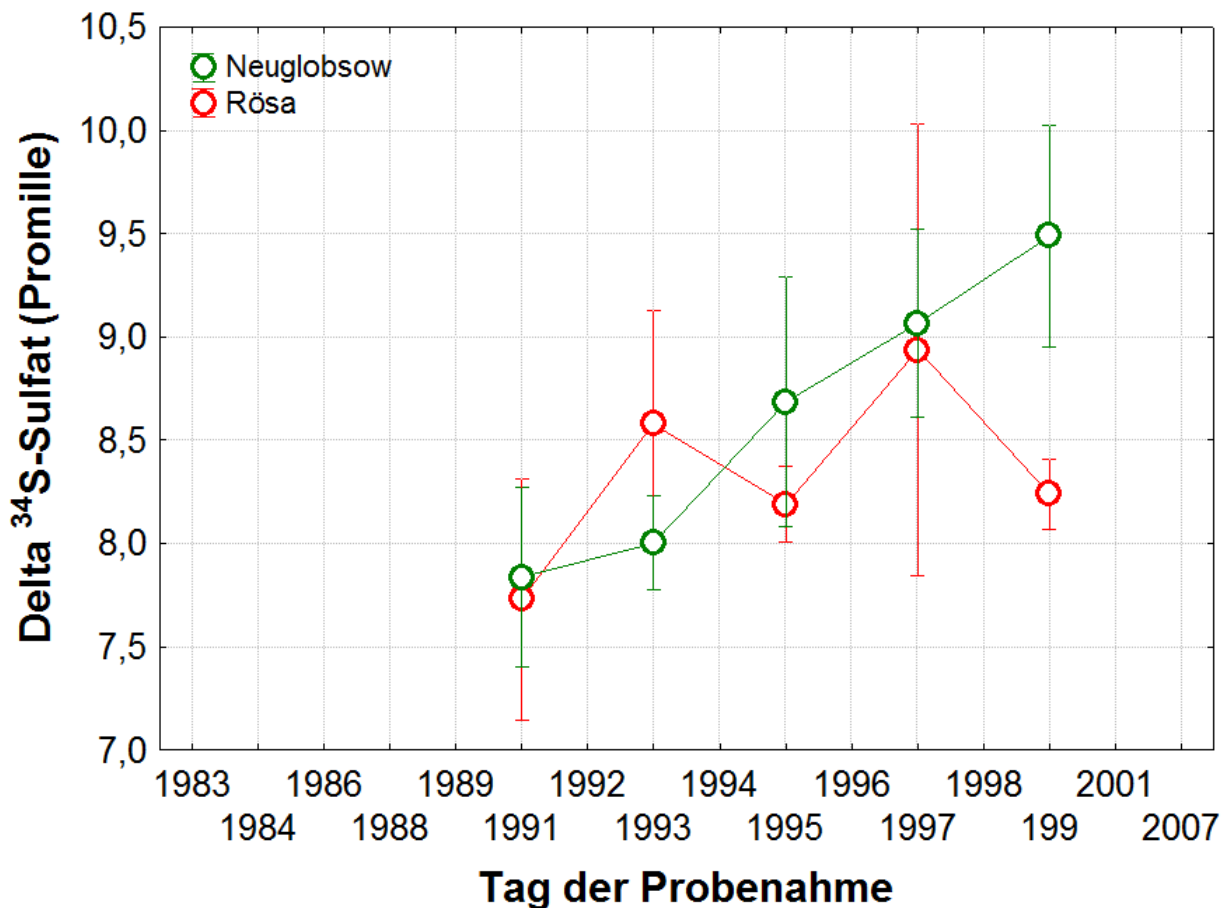
Das Verhältnis von  $^{13}\text{C}$  zu  $^{12}\text{C}$  hängt wesentlich von der Photosyntheseleistung der Kiefernadeln ab. Der Anstieg der  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Gesamtkohlenstoff in Kiefernadeln von Altbeständen im Referenzgebiet Neuglobsow vor 1989 ist vermutlich auf Harnstoff-Düngungen zurückzuführen. Seit 1993 verlaufen die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in beiden Untersuchungsgebieten wieder auf gleichem Niveau.



**Abb.17:** Delta ( $\delta$ )  $^{15}\text{N}$ -Stickstoff-Wert (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Das Verhältnis von  $^{15}\text{N}$  zu  $^{14}\text{N}$  in Kiefernadeln wird wesentlich durch Mineralisation organischer Substanz im Boden, Aufnahme von  $\text{NH}_3$ /Ammonium und/oder  $\text{NO}_x$ /Nitrat über den Nadel- oder Bodenpfad sowie über deren Assimilation in den Nadeln beeinflusst. Bei diesen Prozessen reagiert das leichte Isotop  $^{14}\text{N}$  schneller als das schwere Isotop, wodurch  $^{15}\text{N}$  diskriminiert und im Substrat angereichert wird.

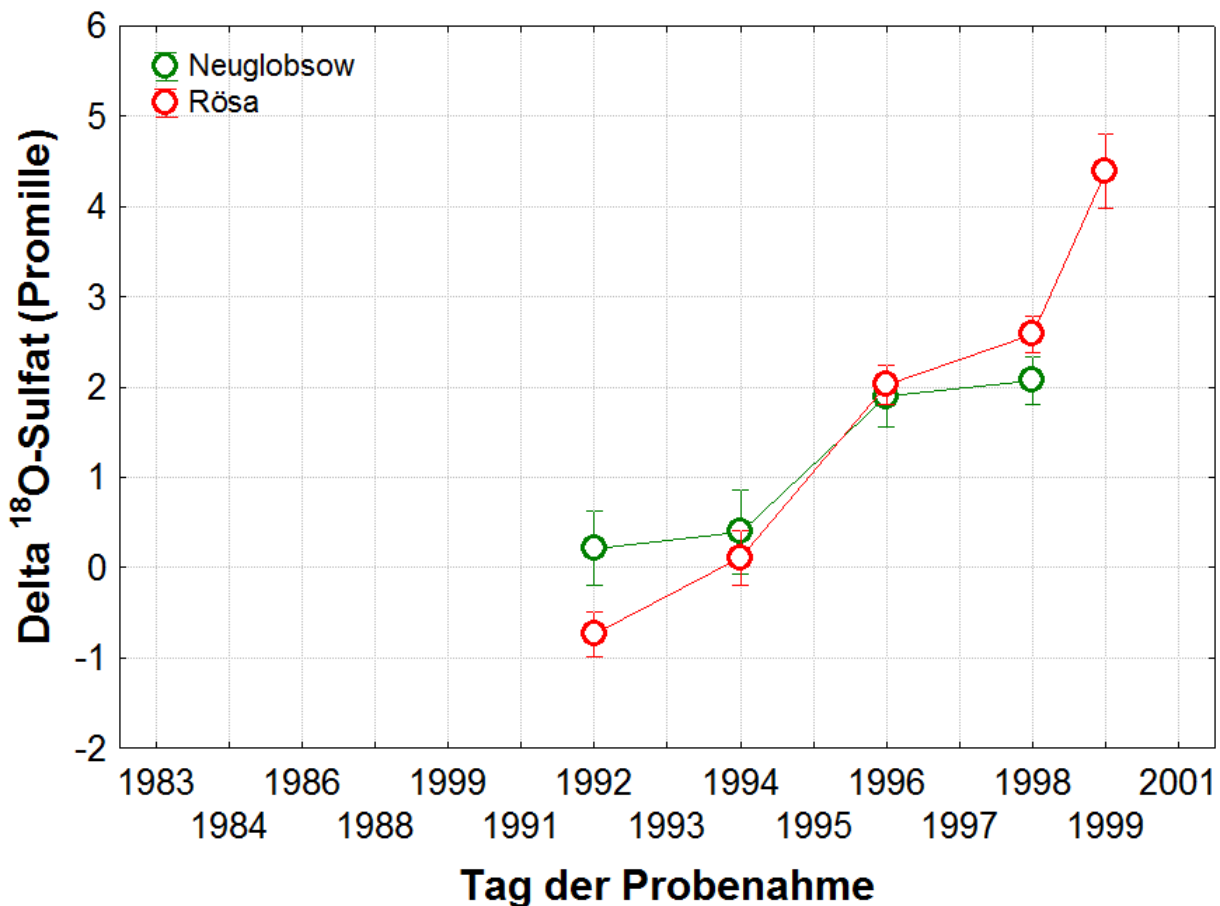
Die  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von Gesamtstickstoff in Kiefernadeln von Altbeständen in beiden Untersuchungsgebieten unterscheiden sich nicht und sind seit 1988 absteigend, d. h. es wird zunehmend Nitrat aus den Humusaufgaben oder  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  aus der Umgebungsluft über die Wurzeln bzw. Spaltöffnungen aufgenommen, welches an  $^{14}\text{N}$  angereichert ist und in den Nadeln zu Proteinstickstoff umgesetzt wird.



**Abb.18:** Delta ( $\delta$ )  $^{34}\text{S}$ -Wert von Sulfat (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Das Verhältnis von  $^{34}\text{S}$  zu  $^{32}\text{S}$  in Kiefernadeln wird wesentlich durch Mineralisation organischer Substanz im Boden, Aufnahme von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) oder Sulfat über den Nadel- bzw. Bodenpfad sowie über deren Assimilation in den Nadeln beeinflusst. Bei diesen Prozessen reagiert das leichte Isotop  $^{32}\text{S}$  schneller als das schwere Isotop, wodurch  $^{34}\text{S}$  diskriminiert und im Substrat angereichert wird.

Die  $\delta^{34}\text{S}$ -Werte von wasserlöslichem Sulfat in Kiefernadeln von Altbeständen in beiden Untersuchungsgebieten unterscheiden sich nicht und sind seit 1991 ansteigend, d. h. bei reduzierten  $\text{SO}_2$ -Immissionen nehmen die Nadeln bevorzugt Sulfat aus den Humusaufgaben auf, welches nicht aus der Mineralisation organischer Substanz stammt, sondern bei reduzierten  $\text{SO}_2$ -Immissionen durch Re-Mineralisation aus Eisen-Humus-Komplexen wieder freigesetzt wurde und an  $^{34}\text{S}$  angereichert ist (Schulz et al. 2004).



**Abb.19:** Delta ( $\delta$ )  $^{18}\text{O}$ -Wert von Sulfat (Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler,  $n = 5$ ) halbjähriger Nadeln von Kiefernaltbeständen aus den Untersuchungsgebieten Neuglobsow und Rösa.

Das Verhältnis von  $^{18}\text{O}$  zu  $^{16}\text{O}$  im wasserlöslichem Sulfat von Kiefernadeln wird wesentlich durch unterschiedliche Oxidationsbedingungen in der Atmosphäre bestimmt, z. B. Unterschiede im  $^{18}\text{O}$ -Gehalt des Reaktionswassers/Niederschlag, das für die Oxidation von  $\text{SO}^2$  zu  $\text{SO}_4^{2-}$  erforderlich ist, aber im Gegensatz zu atmosphärischem Sauerstoff in den  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten nicht konstant ist, sondern regional variieren kann.

Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Sulfat in Kiefernadeln von Altbeständen in beiden Untersuchungsgebieten unterscheiden sich nicht und sind seit 1991 ansteigend, d. h. bei reduzierten  $\text{SO}_2$ -Immissionen nehmen die Nadeln zunehmend Sulfat aus den Humusaufgaben auf, welches über die Zeit bei reduzierten  $\text{SO}_2$ -Immissionen durch Re-Mineralisation aus Eisen-Humus-Komplexen wieder freigesetzt wurde, an  $^{34}\text{S}$  angereichert ist und aus der Verbrennung des gleichen fossilen Brennstoffs stammt (Schulz et al. 2004).