

# **30 JAHRE ÖKOSYSTEMARE UMWELTBEOBACHTUNG AM STANDORT ZÖBELBODEN**

Thomas Dirnböck  
Gisela Pröll  
Heike Brielmann  
Ika Djukic  
Sam Erpelding  
Karl Knaebel  
Johannes Kobler  
Bradley Matthews  
Michael Mirtl  
Ivo Offenthaler  
Wolfgang Spangl

BARRIEREFREIE ZUSAMMENFASSUNG  
REP-0857

WIEN 2023

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

## **Kurzbeschreibung der Forschungsstation**

Die Messstation Zöbelboden im Reichraminger Hintergebirge in Oberösterreich ist eine der größten und bestausgestatteten Monitoring- und Forschungsstandorte Österreichs. Das Umweltbundesamt betreibt dort, unterstützt vom Nationalpark Kalkalpen und den Österreichischen Bundesforsten, seit 30 Jahren ökosystemare Umweltbeobachtung, die einzigartige Einblicke in die Auswirkungen von Luftschadstoff-Belastungen und Klimawandel auf Bergwaldökosysteme in den Alpen erlaubt. Ziel dieser Umweltbeobachtung war ursprünglich, den Zustand und die langfristigen Veränderungen der Land- und Süßwasserökosysteme durch Luftschadstoffe zu bestimmen und deren künftige Entwicklung vorherzusagen. Dafür wurde von den Vereinten Nationen ein umfassendes Beobachtungssystem eingerichtet, das seit vier Jahrzehnten die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Emissionsreduktion bewertet. Der Zöbelboden ist Teil dieses Systems und hat sich über die Jahre zu einem hochinstrumentierten Standort für ökologische Langzeitforschung zu Biodiversität, Klimawandelfolgen und -anpassung, Treibhausgasbilanzen, Trinkwasserqualität sowie Prozessforschung von Ökosystemfunktionen entwickelt.

Heute werden die Messinfrastruktur und die Langzeitdaten in 18 Monitoring-Systemen und Forschungsnetzwerken verwendet. Der Zöbelboden gilt somit als einer der europaweit raren „Hotspots“ für Langzeitdaten, die quer über alle Kompartimente eines Ökosystems verfügbar sind. Der vorliegende Bericht präsentiert die Ergebnisse aus 30 Jahren ökosystemarer Umweltbeobachtung.

## 1.1 Luftreinhaltung

### **Ferntransport von Schadstoffen**

Die Messung von Luftschadstoffen (v. a. Stickstoff, Schwefel, Ozon, Schwermetalle) am Zöbelboden dient dazu, die Belastungssituation von Ökosystemen zu erfassen und wirkungsbezogene Schwellenwerte festzulegen. Sie zielt auch darauf ab, Maßnahmen zur Emissionsreduktion zu evaluieren und faktenbasierte Empfehlungen an die Politik für künftig zu setzende Maßnahmen zu entwickeln. Dafür werden am Zöbelboden Luftschadstoff-Konzentrationen, Luftschadstoffeinträge und deren Wirkungen in Ökosystemen gemessen, die durch Ferntransportweitab von Emittenten entstehen.

Das Internationale Kooperationsprogramm ICP-IM<sup>1</sup> und das EMEP-Protokoll<sup>2</sup> der Genfer Luftreinhaltekonvention<sup>3</sup> sowie das Österreichische Immissionschutzgesetz-Luft<sup>4</sup> und das Ozongesetz<sup>5</sup> sind die rechtlichen Grundlagen für die Messungen.

Die Ergebnisse der Messungen, die im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention durchgeführt worden sind, dienen als Grundlage für europaweite Maßnahmen zur Emissionsminderung. Seit ihrem Inkrafttreten im Jahr 1979 konnten die Stickstoffemissionen aus Verbrennungsprozessen europaweit mehr als halbiert werden, die Emissionen von Schwefel und einzelnen Schwermetallen (Blei, Cadmium) wurden um mehr als 90 % verringert.

### **positive Wirkungen von Emissionsreduktionen**

Die Erfolge dieser Minderungsmaßnahmen konnten anhand der Luftqualitätsmessungen am Zöbelboden evaluiert werden:

- Die SO<sub>2</sub>-Konzentrationen am Zöbelboden nahmen seit Beginn der Messung 2000 bis 2021 um 70 % ab, jene von NO<sub>x</sub> um 35 %. Diese Trends spiegeln die Entwicklung der Emissionen im Einzugsbereich der Messstelle wider – für SO<sub>2</sub> v. a. Österreich, Tschechien, Polen, die Slowakei und das östliche Deutschland, für NO<sub>x</sub> v. a. das nördliche Österreich. Die Belastung durch SO<sub>2</sub>, Stickstoffoxide und Feinstaub liegt am Zöbelboden im österreichweiten Vergleich im untersten Bereich. Die Grenz- und Zielwerte für SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und NO<sub>2</sub> zum Schutz der Ökosysteme und der Vegetation sowie die im Göteborg-Protokoll definierten kritischen Konzentrationswerte (Critical Levels) wurden auf dem Zöbelboden seit Beginn der Messungen durchgehend eingehalten.
- Auch die mit der Reduktion der Schwermetall-Emissionen einhergehende Abnahme der Einträge in Ökosysteme konnte am Zöbelboden eindeutig nachgewiesen werden. Die Konzentrationen und Depositionen toxischer Schwermetalle (Cadmium, Blei, Zink) liegen am Zöbelboden durchgehend seit Beginn der Messungen weit unter den Richt- bzw. Grenzwerten. Die Boden- und Abflussmessdaten zeigen, dass Blei in den Jahren hoher Einträge von den oberen Bodenschichten tiefer in den Mineralboden wanderte. Dort ist es großteils immer noch gespeichert und nur in sehr geringem Ausmaß in das Grundwasser gelangt.

### **Stickstoffeinträge über Belastungsgrenzen**

Während die Einträge von Schwefelverbindungen und Schwermetallen in Ökosysteme stark zurückgingen, nahmen jene von Nitrat-Stickstoff nur geringfügig ab, jene von Ammonium blieben konstant. Bedingt durch die Lage in den Nordstaulagen der Alpen gehört der Zöbelboden zu den Waldgebieten mit den höchsten Stickstoffeinträgen in Österreich. Die Gesamtdeposition von Stickstoff in die Wälder am Zöbelboden liegt bei 25 bis 30 kg N/ha/a. Dies ist mehr als das

<sup>1</sup> The International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems

<sup>2</sup> Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe

<sup>3</sup> Convention on long-range transboundary air pollution (C-LRTAP)

<sup>4</sup> IG-L, BGBl. I 115/1997 i.d.g.F.

<sup>5</sup> BGBl. 210/1992 i.d.g.F.

Doppelte der kritischen Belastungsgrenzen (Critical Loads) für diese Waldökosysteme. Die langzeitigen Messdaten vom Zöbelboden zeigen, dass Ammonium ca. die Hälfte der gesamten Stickstoffdeposition ausmacht. Hauptquelle dafür ist die landwirtschaftliche Düngung. Die Ammoniak-Konzentrationen, die seit Juni 2021 gemessen werden, liegen im Bereich der kritischen Konzentrationen, bei denen Schäden an Flechten und Moosen auftreten können.

### **negative Wirkungen**

Negative Wirkungen der hohen Stickstoffeinträge auf die Wälder am Zöbelboden und den darin vorkommenden Arten waren:

- Die Überdüngung mit Stickstoff führte zu einem massiven Verlust an Flechtenarten und Änderungen in der Artenzusammensetzung bei Moosen und höheren Pflanzen. Diese Änderungen gingen zulasten von Arten, die an geringe Stickstoffverfügbarkeit angepasst sind.
- Die zunehmende Nährstofflimitierung der Bäume bei Phosphor und Kalium ist sehr wahrscheinlich eine Folge hohen Wachstums durch Stickstoff (und Klimaerwärmung). Dies könnte in Zukunft in Kombination mit klimabedingter Wasserlimitierung zu einer Stagnation oder Verringerung des Baumwachstums führen.
- Der Großteil des eingetragenen Stickstoffs (70–83 %) verblieb durch Aufnahme in Bäumen im Ökosystem. Die durchschnittlichen Nitratausträge in das Quellwasser von 8–11 kg N/ha/a lagen dennoch über den Critical Loads von Eutrophierungseffekten in natürlichen Ökosystemen. Die mittleren jährlichen Konzentrationen von Nitrat im Einzugsgebietsabfluss blieben kleiner als 10 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l und liegen damit weit unter den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung.

Erhebliche Emissionsreduktionen, v. a. im Bereich Landwirtschaft, wären notwendig, um diese Ökosystemeffekte zu verhindern.

### **Ozonbelastung zu hoch**

Die Ozonbelastung am Zöbelboden liegt im österreichweiten Vergleich im mittleren Bereich und ist repräsentativ für Mittelgebirgslagen nördlich des Alpenhauptkamms. Die Belastung durch Ozon nahm aufgrund der Abnahme der Emissionen von NO<sub>x</sub> und NMVOC zwar leicht ab, ist aber nach wie vor hoch. Die Critical Levels für Ozon zum Schutz des Waldes und Zielwerte des Ozongesetzes werden am Zöbelboden seit Beginn der Messung durchgehend überschritten. Ökosystemare Auswirkungen der Ozonbelastung wurden am Zöbelboden nicht untersucht. Wissenschaftliche Studien der letzten Jahre haben gezeigt, dass die anhaltend hohe Ozon-Konzentration in Zentraleuropa weiterhin zu Blattschäden an Gehölzpflanzen führt, den Wasserhaushalt von Wäldern beeinträchtigt und einer von vielen Faktoren der Nährstoffmängel in Bäumen und der entsprechenden Wachstumseinbußen ist.

### **Referenz für weitere Belastungen**

Der Zöbelboden diente in vielen Projekten als Referenzstandort für die in den Nördlichen Kalkalpen vorherrschende Hintergrundbelastung von Luft, Humus und Böden mit aromatischen Kohlenwasserstoffen, persistenten organischen Schadstoffen (POPs) oder Quecksilber.

## 1.2 Zustand der Schutzfunktionen des Waldes

- überregional repräsentative Ergebnisse** Der Zöbelboden ist in vielerlei Hinsicht typisch für bergige Waldökosysteme über karbonatischem Untergrund in den Alpen, v. a. in Bezug auf Bodenschutz, Regulation des Wasserhaushaltes, Grundwasserbildung und Filterung von Luftschadstoffen durch den Wald. Daher lassen sich die Ergebnisse weitgehend auf andere Gebiete übertragen.
- dünne Bodenschicht** Ein wesentliches Merkmal sind seichtgründige, grobskelettreiche Böden, die vor allem in den steileren Landschaftseinheiten dieser Regionen weit verbreitet sind. Sie bilden die wichtigsten Filter gegenüber Schadstoffen, da in Karstgebieten schnelle Abflüsse in das Grund- und Oberflächenwasser vorherrschen. Die seichtgründigen Böden geben zwar während intensiver Niederschlagsereignisse große Sickerwassermengen ab, bilden jedoch einen wesentlichen Schutz für das Quellwasser durch Bindung von Schadstoffen (z. B. Schwermetalle, persistente organische Schadstoffe oder Stickstoff) an organisches Material. Da die Bodenbildung über Kalk und Dolomit extrem langsam vonstattengeht, ist die Vermeidung von Bodenerosion essenziell. Nur eine dauerhaft geschlossene Waldbedeckung kann das gewährleisten.
- Bodenwasserspeicher** Obwohl die Wasserspeicherfähigkeit der Böden in Karstwaldökosystemen sehr eingeschränkt ist, ist sie zentral für die Versorgung der Bäume. Die Messungen am Zöbelboden zeigen, dass die hohen und gleichmäßig verteilten Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode die Bodenwasserspeicher gut befüllen und so die Wasserversorgung der Bäume in niederschlagsarmen Perioden gewährleisten. Erst substanzielle Abnahmen der Niederschläge (stärker als es bislang der Fall war) könnten zum Problem für die Wasserversorgung werden.
- Ernährungssituation Bäume** Die Ernährungssituation der Bäume ist (vor allem in den Steilhängen) schlecht. Das könnte in Zukunft in Kombination mit zunehmender Trockenheit das Wachstum einschränken und die Mortalität der Bäume erhöhen – mit entsprechenden Folgen für die Schutzfunktion des Waldes (z. B. Bodenerosion, Stickstoffimmobilisierung, Kohlenstoffbindung).

## 1.3 Klimawandelfolgen und Klimaschutz

- Langzeitüberwachung** Der Klimawandel verändert den Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf sowie die Artenzusammensetzung von Waldökosystemen. Aufgrund der Langsamkeit dieser Veränderungen und der oft starken jährlichen Variabilität ist die Langzeitüberwachung von Ökosystemen ein äußerst nützliches Instrument zur Früherkennung von Trends. Die negativen Effekte des Klimawandels und insbesondere jene von häufigeren klimatischen Extremereignissen wird eine der größten Herausforderungen in den kommenden Jahrzehnten.

**geringere  
Kohlenstoffbindung  
durch Trockenheit**

Während die mittleren Niederschläge am Zöbelboden bei starken jährlichen Schwankungen seit 1950 konstant blieben, stieg die mittlere Jahrestemperatur um 1,4 °C. Auch wenn – wie oben beschrieben – die Niederschläge und die Bodenwasserspeicherung bislang ausreichen, um die Wasserversorgung der Bäume zu gewährleisten, konnten in den trockensten Jahren messbare Auswirkungen festgestellt werden. Die trockensten Jahre der letzten beiden Jahrzehnte bewirkten ein um 10 % verringertes Baumwachstum. Trockenjahre führen also, wenn auch in geringem Ausmaß, auch in den niederschlagsreichen Berggebieten der Alpen zu einer Verringerung der Klimaschutzfunktion durch geringere Kohlenstoffbindung. Die Bergmischwälder kompensieren bislang aber stärkere Effekte gut durch das Vorkommen trockenresistenterer (Buche, Lärche) neben trockenheitssensiblen Baumarten (Fichte).

Wie das reiche Relief, die räumliche Verteilung und die unterschiedlich ausgebildeten Waldbestände die Kohlenstoffsенке Wald prägen, zeigt die Analyse der Messdaten vom Zöbelboden. Die Ergebnisse dienen auch dazu, Unsicherheiten in der Treibhausgasbilanz zu verringern.

**Folgen von  
Waldstörungen**

Eine der größten Einflussgrößen auf die Kohlenstoffbindung des Waldes sind Störungen durch Windwurf und Schädlingskalamitäten. Von ihnen verursachte großflächige Waldstörungen führen unmittelbar dazu, dass ein Wald durch den Verlust der Bindung von CO<sub>2</sub> über die Fotosynthese und den Abbau von Bodenkohlenstoff zu einer Quelle von Kohlenstoff wird. Am Zöbelboden konnte gezeigt werden, dass bei einem häufigen Störungsregime, von dem nur Einzelbäume betroffen sind, die Senkenfunktion aufrecht bleibt. Darüber hinaus konnte die zeitliche Entwicklung der Kohlenstoffbindung nach großflächigen Störungen quantifiziert werden. Obwohl die dichte Bodenvegetation die Naturverjüngung durch Konkurrenz vielerorts beeinträchtigt und Verjüngungsprozesse nach Störungen verzögert, speichert die Konkurrenzvegetation beträchtliche Mengen an Kohlenstoff und reduziert somit den Kohlenstoffverlust auf Störungsflächen erheblich. Das Zusammenspiel von Unterwuchsentwicklung (sogenannte Vergrasung) und rascher Verjüngung der Bäume ist essenziell dafür, die Kohlenstofffreisetzung nach Störungsereignissen zu minimieren.

## 1.4 Biologische Vielfalt und Naturschutz

**gefährdete Arten**

Am Zöbelboden werden 409 Gefäßpflanzenarten, 192 Moose, 114 Flechten und 65 Vogelarten seit dem Jahr 1992 beobachtet. Davon sind 46 Arten in den Roten Listen als gefährdet oder vom Aussterben bedroht eingestuft und 17 Arten finden sich in den Anhängen der Europäischen Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie).

Das Monitoring der biotischen Wirkungen der Eutrophierung durch hohe Stickstoffeinträge lieferte wesentliche Beiträge zur Festlegung von Belastungsgrenzen (Critical Loads/Levels) von Ökosystemen. Die erhebliche Überschreitung der Critical Loads für Stickstoff führte zu starken Diversitätsverlusten bei Flechten.

Effekte sind auch bei Moosen und Gefäßpflanzen feststellbar, jedoch ist keine systematische Verringerung der Artenvielfalt erkennbar.

**Referenzsystem** Der Standort Zöbelboden dient zusätzlich als Referenzsystem für naturnahe Karbonat-Buchenmischwälder, die in Österreich weit verbreitet sind. Durch die Lage im Nationalpark Kalkalpen werden die Hangwälder nicht bewirtschaftet und sind den natürlichen Zerfalls- und Wiederbesiedlungsprozessen ausgesetzt. Eine Reihe von Indikatorarten weisen darauf hin, dass die Hangwälder Urwaldcharakter besitzen.

**Ausbau Monitoring** Der weitere Ausbau des Monitorings für Biodiversität hilft, das Wissen zum Zustand und den Einflussgrößen auf diese Lebensräume weiter zu vertiefen. Besonders zu berücksichtigen sind dabei wenig bekannte Organismengruppen wie Insekten oder Bodenorganismen. Voraussetzung dafür ist der Einsatz standardisierter Methoden mit nationaler (Österreichisches Biodiversitäts-Monitoring) und internationaler Ausrichtung (z. B. eLTER Forschungsinfrastruktur).

## 1.5 Wasserqualität

**Hintergrund-Konzentrationen** Die Messdaten vom Zöbelboden sowie die Studien und Bewertungen liefern – repräsentativ für ein bewaldetes Karstsystem – wichtige Informationen über den Zustand und die Entwicklung der Hintergrund-Konzentrationen in Grund- und Oberflächenwasser. Im österreichischen Kontext sind diese Ergebnisse von besonderer Bedeutung, da 50 % des Trinkwassers aus Karstgebieten gewonnen wird.

**Karsthydrologie** In den vergangenen 30 Jahren wurden eine Reihe von wissenschaftlicher hydrologischer Arbeiten durchgeführt, die eine Einordnung des Karstsystems Zöbelboden im Vergleich mit anderen Gebieten Österreichs zulassen. Mittels Tracer-Experimenten konnte so das allgemeine karsthydrologische Verständnis vom Zöbelboden verstärkt werden. Hierbei konnten mittlere Verweilzeiten bestimmt werden, die von Tagen bis hin zu mehreren Monaten und Jahren reichen. Langsame Abflusswege spielen dabei mengenmäßig eine untergeordnete Rolle. Hydrologische Modellierungen am Zöbelboden ermöglichten außerdem, den Einfluss von Waldstörungen auf die Wasserqualität zu erforschen.

**Folgen der Emissionsreduktion** Die Zeitreihendaten geben die Reaktion des Karstquellwassers auf die durch Emissionsreduktion erzielte Verringerung der Einträge von Luftschadstoffen wieder:

- Abgesehen von vereinzelt überschrittenen Schwellenwerten für Nickel, Blei, Chrom und Cadmium zum Beginn der Messungen werden die Grundwasserswellenwerte für Schwermetalle generell deutlich unterschritten.
- Die abnehmenden Schwefeldepositionen über die Luft spiegelt sich auch in sinkenden Sulfat-Konzentrationen im Quellwasser wider. Seit Beginn der

Messung (1995) nahm die Sulfat-Konzentration im Durchschnitt mit 0,1 mg/l/a und insgesamt um 68 % ab.

**Nitratabfluss** Die anhaltend hohen Stickstoffeinträge führten nicht zu einem übermäßigen Nitratabfluss. Der Grundwasserswellenwert für Nitrat von 45 mg/l wurde innerhalb der letzten 30 Jahre nicht überschritten. Die höchste gemessene Konzentration lag bei 15,6 mg/l. Im Jahresmittel lag die Nitrat-Konzentration unter 10 mg/l. Die höchsten Nitratabflüsse waren die Folge von Windwurf und Borkenkäferkalamitäten. Eine verringerte Aufnahme von Stickstoff durch die Vegetation sowie durch eine erhöhte Mineralisation führte zu einer Auswaschung von Nitrat in das Boden- und Quellwasser.

## 2 SUMMARY

### ***brief description of the research site***

The Zöbelboden monitoring station in the Reichraminger Hintergebirge in Upper Austria is one of the largest and best-equipped monitoring and research sites in Austria. The Federal Environment Agency, supported by the Kalkalpen National Park and the Austrian Federal Forests, has been conducting ecosystem-based environmental monitoring there for 30 years, which allows unique insights into the effects of air pollutant loads and climate change on mountain forest ecosystems in the Alps. The original aim of this environmental monitoring was to determine the status and long-term changes in terrestrial and freshwater ecosystems caused by air pollutants and to predict their future development. For this purpose, a comprehensive monitoring system was established by the United Nations, which has been assessing the effectiveness of emission reduction measures for four decades. The Zöbelboden is part of this system and has developed over the years into a highly instrumented site for long-term ecological research on biodiversity, climate change impacts and adaptation, greenhouse gas balances, drinking water quality and process research of ecosystem functions.

Today, the measurement infrastructure and the long-term data are used in 18 monitoring systems and research networks. The Zöbelboden is thus considered one of the rare "hot spots" in Europe for long-term data available across all compartments of an ecosystem. This report presents the results of 30 years of ecosystem-based environmental monitoring and research.

### 2.1 Air pollution control

#### ***long-distance transport of pollutants***

The measurement of air pollutants (especially nitrogen, sulfur, ozone, heavy metals) at the Zöbelboden serves to record the pollution situation of ecosystems and to determine impact-related threshold values. It also aims to evaluate emission reduction measures and to develop fact-based recommendations to policy-makers for measures to be taken in the future. For this purpose, air pollutant concentrations, air pollutant inputs and their effects in ecosystems are measured at the Zöbelboden, far away from emitters.

The legal basis for the measurements is provided by the International Cooperation Programme ICP-IM<sup>6</sup> and the EMEP Protocol<sup>7</sup> of the Geneva Convention on

---

<sup>6</sup> The International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems

<sup>7</sup> Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe

Air Pollution<sup>8</sup> as well as the Austrian Immission Control Act on Air<sup>9</sup> and the Ozone Act.<sup>10</sup>

The results of the measurements carried out within the framework of the Geneva Clean Air Convention served as the basis for Europe-wide measures to reduce emissions. Since it came into force in 1979, nitrogen emissions from combustion processes have been more than halved across Europe, and emissions of sulfur and individual heavy metals (lead, cadmium) have been reduced by more than 90 %.

***positive effects of emission reductions***

The success of these mitigation measures could be evaluated based on the air quality measurements at Zöbelboden:

- SO<sub>2</sub> concentrations at Zöbelboden decreased by 70 % from the beginning of measurements in 2000 to 2021, while NO<sub>x</sub> concentrations decreased by 35 %. These trends reflect the development of emissions in the catchment area of the measuring point – for SO<sub>2</sub> mainly Austria, the Czech Republic, Poland, Slovakia and eastern Germany, for NO<sub>x</sub> mainly northern Austria. The pollution by SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particulate matter at Zöbelboden is in the lowest range in an Austria-wide comparison. The limit and target values for SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> for the protection of ecosystems and vegetation, as well as the critical concentration values defined in the Gothenburg Protocol, have been consistently complied with at Zöbelboden since the beginning of measurements.
- The reduction of inputs into ecosystems associated with the reduction of heavy metal emissions could also be clearly demonstrated at Zöbelboden. The concentrations and depositions of toxic heavy metals (cadmium, lead, zinc) at the Zöbelboden have been consistently far below the guideline and limit values since measurements began. The soil and discharge measurement data show that lead migrated from the upper soil layers deeper into the mineral soil during the years of high inputs. It is still largely stored there and has reached the groundwater only to a very small extent.

***nitrogen inputs above critical load limits***

While the inputs of sulfur compounds and heavy metals into ecosystems decreased strongly, those of nitrate-nitrogen decreased only slightly, while those of ammonium remained constant. Due to its location in the northern dusty areas of the Alps, the Zöbelboden is one of the forest areas with the highest nitrogen inputs in Austria. The total deposition of nitrogen into the forests at the Zöbelboden is 25 to 30 kg N/ha/a. This is more than twice the amount of nitrogen in the forests. This is more than twice the critical loads for these forest ecosystems. The long-term measurement data from the Zöbelboden show that ammonium accounts for about half of the total nitrogen deposition. The main source of this is agricultural fertilization. The ammonia concentrations measured since June 2021 are in the range of critical concentrations at which damage to lichens and mosses can occur.

<sup>8</sup> Convention on long-range transboundary air pollution (C-LRTAP)

<sup>9</sup> IG-L, Federal Law Gazette I 115/1997 as amended

<sup>10</sup> BGBl. 210/1992 i.d.g.F.

**negative effects** Negative effects of the high nitrogen inputs on the forests at Zöbelboden and the species found in them were:

- Over-fertilization with nitrogen led to a massive loss of lichen species and changes in the species composition of mosses and higher plants. These changes were at the expense of species adapted to low nitrogen availability.
- The increasing nutrient limitation of trees in phosphorus and potassium is very likely a consequence of high growth due to nitrogen (and climate warming). This, in combination with climate-induced water limitation, could lead to stagnation or reduction of tree growth in the future.
- The majority of the nitrogen input (70–83 %) remained in the ecosystem through uptake in trees. The average nitrate discharges into the spring water of 8–11 kg N/ha/a were nevertheless above the critical loads of eutrophication effects in natural ecosystems. The mean annual concentrations of nitrate in the catchment runoff remained below 10 mg NO<sub>3</sub>/l and thus far below the limits of the Drinking Water Ordinance.

Substantial emission reductions, especially in agriculture, would be necessary to prevent these ecosystem effects.

**ozone pollution too high**

The ozone pollution at Zöbelboden is in the medium range in an Austria-wide comparison and is representative for low mountain ranges north of the main Alpine ridge. Although ozone pollution decreased slightly due to the decrease in NO<sub>x</sub> and NMVOC emissions, it is still high. The critical levels for ozone to protect the forest and the target values of the Ozone Act have been consistently exceeded at Zöbelboden since measurements began. Ecosystem effects of ozone pollution have not been studied at Zöbelboden. Scientific studies in recent years have shown that the persistently high ozone concentrations in Central Europe continue to cause leaf damage to woody plants, impair the water balance of forests and are one of many factors in nutrient deficiencies in trees and corresponding growth losses.

**reference site for further contamination**

In many projects, the Zöbelboden served as a reference site for the background contamination of air, humus and soils with aromatic hydrocarbons, persistent organic pollutants (POPs) or mercury prevailing in the Northern Limestone Alps.

## 2.2 State of the protective functions of the forest

**results nationally representative**

The Zöbelboden is in many respects typical for mountainous forest ecosystems above carbonate bedrock in the Alps, particularly with regard to soil protection, regulation of the water balance, groundwater formation and immission control. Therefore, the results are largely transferable to other areas.

**thin soil layer**

A key feature are shallow, coarse-skeletal soils, which are widespread especially in the steeper landscape units of these regions. They form the most important filters against pollutants, as rapid runoff into groundwater and surface water is

prevalent in karst areas. Although the shallow soils release large amounts of seepage water during intense precipitation events, they form an essential protection for the spring water by binding pollutants (e.g. heavy metals, persistent organic pollutants or nitrogen) to organic material. Since the formation of new soil over lime and dolomite is extremely slow, the prevention of soil erosion is essential.

**soil water reservoirs** Although the water storage capacity of the soils in karst forest ecosystems is very limited, it is central for the supply of the trees. The measurements at the Zöbelboden show that the high and evenly distributed precipitation totals in the vegetation period compensate well for the low water storage capacity of the soils and ensure the water supply of the trees in periods of low precipitation. Only substantial decreases in precipitation (stronger than has been the case so far) could become a problem for the water supply.

**nutritional situation of trees** The nutritional situation of the trees is poor (especially on steep slopes). In combination with increasing drought, this could restrict growth and increase tree mortality in the future – with corresponding consequences for the protective function of the forest (e.g. nitrogen immobilization, carbon sequestration).

## 2.3 Climate change impacts and climate protection

**Long-term monitoring** Climate change alters the carbon and nutrient cycles as well as the species composition of forest ecosystems. Due to the slowness of these changes and the often strong annual variability, long-term monitoring of ecosystems is an extremely useful tool for early detection of trends. The negative effects of climate change and especially those of more frequent extreme climatic events will be one of the greatest challenges in the coming decades.

**Reduced carbon sequestration due to drought** While the mean precipitation at the Zöbelboden has remained constant with strong annual fluctuations since 1950, the mean annual temperature increased by 1.4 °C. Even though – as described above – precipitation and soil water storage have so far been sufficient to ensure the water supply of the trees, measurable effects could be observed in the driest years. The driest years of the last two decades caused a 10 % reduction in tree growth. Dry years thus lead, albeit to a lesser extent, to a reduction of the climate-protective function due to lower carbon sequestration also in the mountain areas of the Alps with high-precipitation. So far, however, the mixed mountain forests compensate well for stronger effects through the occurrence of more drought-resistant (beech, larch) and drought-sensitive tree species (spruce).

The analysis of the measurement data from the Zöbelboden shows how the rich relief, the spatial distribution and the differently formed forest stands shape the forest as a carbon sink. The results also serve to reduce uncertainties in the greenhouse gas balance.

**effects of forest disturbance** One of the biggest influencing factors on forest carbon sequestration is disturbance caused by windthrow and pest calamities. Large-scale forest disturbances caused by them directly lead to a forest becoming a source of carbon due to the loss of the binding of CO<sub>2</sub> via photosynthesis and the decomposition of soil carbon. On the Zöbelboden, it could be shown that in a regime of frequent disturbance affecting only individual trees, the sink function is maintained. Furthermore, the temporal development of carbon sequestration after large-scale disturbances could be quantified. Although dense ground vegetation impairs natural regeneration through competition in many places and delays regeneration processes after disturbance, the competing vegetation stores considerable amounts of carbon and thus significantly reduces carbon loss on disturbed areas. The interplay of understory development (so-called grass encroachment) and rapid regeneration of trees is essential to minimize carbon release after disturbance events.

## 2.4 Biodiversity and nature conservation

- endangered species** At Zöbelboden, 409 vascular plant species, 192 mosses, 114 lichens and 65 bird species have been observed since 1992. Of these, 46 species are classified as endangered or threatened with extinction in the Red Lists and 17 species are found in the Annexes of the European Habitats Directive.
- The monitoring of biotic effects of eutrophication due to high nitrogen inputs provided essential contributions to the definition of critical loads/levels of ecosystems. Significant exceedance of critical loads for nitrogen led to severe losses of diversity in lichens. Effects can also be observed in mosses and vascular plants, but no systematic reduction in species diversity is discernible.
- reference system** The Zöbelboden site additionally serves as a reference system for near-natural carbonate beech mixed forests, which are widespread in Austria. Due to their location in the Limestone Alps National Park, the slope forests are not managed and are exposed to natural decay and recolonization processes. A number of indicator species indicate that the slope forests have primeval forest character.
- expansion of monitoring** The further expansion of biodiversity monitoring helps to further deepen the knowledge of the status of these habitats and the factors that influence them. Particular attention will be paid to little-known groups of organisms such as insects or soil organisms. A prerequisite for this is the use of standardized methods with a national (Austrian Biodiversity Monitoring) and an international orientation (e.g. eLTER Research Infrastructure).

## 2.5 Water quality

- background** The measurement data from the Zöbelboden as well as the studies and assessments, representative of a forested karst system, provide important information on the status and development of background concentrations in groundwater and surface water. In the Austrian context, these results are of particular importance, as 50 % of drinking water is obtained from karst areas.
- karst hydrology** In the past 30 years, a number of scientific hydrological studies have been carried out that allow the classification of the Zöbelboden karst system in comparison with other areas in Austria. By means of tracer experiments, the general karst hydrological understanding of the Zöbelboden could be strengthened. Mean residence times ranging from days to several months and years could be determined. Slow runoff paths play a subordinate role in terms of quantity. Hydrological modelling at the Zöbelboden also made it possible to explore the influence of forest disturbances on water quality.
- effects of emissions reduction** The time series data reflect the response of the karst spring water to the reduction in air pollutant inputs achieved by reducing emissions:
- Apart from isolated exceedances of the threshold values for nickel, lead, chromium and cadmium at the beginning of the measurements, they generally stay well below groundwater threshold values for heavy metals.
  - The decreasing sulfur deposition via the air is also reflected in falling sulphate concentrations in the spring water. Since the beginning of the measurement (1995), the sulphate concentration has decreased by an average of 0.1 mg/l/a and by a total of 68 %.
- Nitrate runoff** The persistently high nitrogen inputs did not lead to excessive nitrate runoff. The groundwater threshold value of 45 mg/l for nitrate has not been exceeded within the last 30 years. The highest concentration measured was 15.6 mg/l and the annual mean nitrate concentration was below 10 mg/l. The highest nitrate discharges were the result of windthrow and reduced uptake of nitrogen by vegetation, as well as increased mineralization and leaching into soil and spring water.

## **Impressum**

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH  
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich

*Diese Publikation erscheint ausschließlich in elektronischer Form auf <https://www.umweltbundesamt.at/>.*

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2023  
Alle Rechte vorbehalten