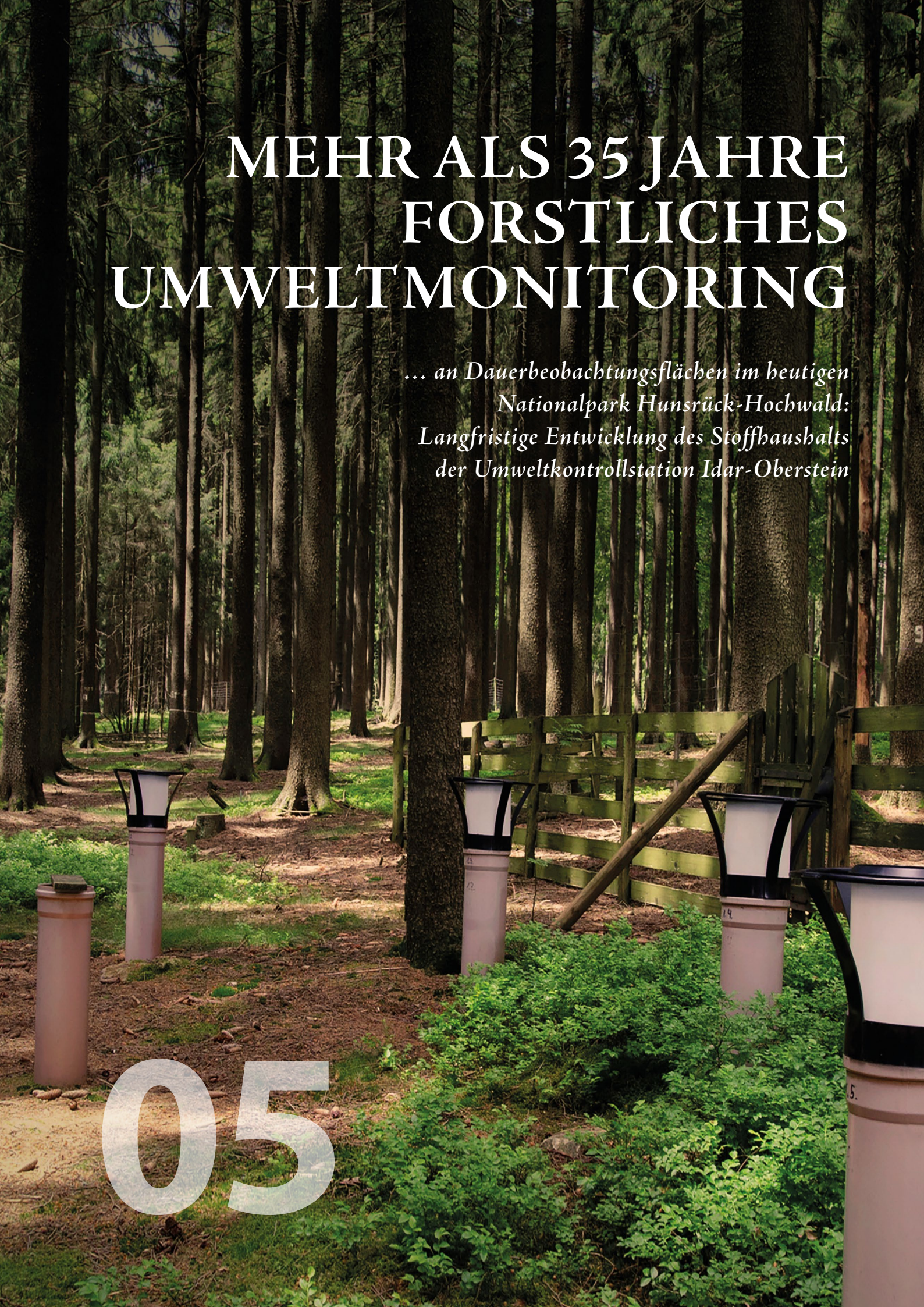

MEHR ALS 35 JAHRE FORSTLICHES UMWELTMONITORING

… an Dauerbeobachtungsflächen im heutigen Nationalpark Hunsrück-Hochwald: Langfristige Entwicklung des Stoffhaushalts der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein

05

Menschliche Eingriffe durch Nutzung, Luftverunreinigungen und Witterungsextreme beeinflussen unsere Waldökosysteme. Das forstliche Umweltmonitoring zielt darauf ab, diese Einflüsse zu überwachen und die durch sie hervorgerufenen Veränderungen zu erfassen. Dies geschieht mittels Dauerbeobachtungsflächen und Übersichtserhebungen, deren Ergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse für die Politikberatung und zur Ableitung von Maßnahmen für die Waldbewirtschaftung genutzt werden. Am Beispiel der im Nationalpark liegenden Umweltkontrollstation Idar-Oberstein werden die Entwicklung und die Auswirkungen der Schwefel- und Stickstoffeinträge betrachtet. Biodiversitätsverluste, eine unausgewogene Pflanzenernährung, Schädigung zentraler Bodenfunktionen und Belastung von Gewässern sind nur einige der heute messbaren Folgen der Luftschadstoffeinträge. Während die Schwefelemissionen durch Luftreinhaltemaßnahmen zügig reduziert werden konnten, haben die Stickstoffeinträge im Beobachtungszeitraum kaum abgenommen. Allerdings wurden zu Zeiten hoher Schwefeleinträge große Vorräte im Boden aufgespeichert, die heute noch das Waldökosystem belasten. Diese langfristige Wirkung der Schwefelaltlasten macht deutlich, wie wichtig eine zügige Reduktion der Stickstoffemissionen ist. Denn auch durch die starke Anreicherung von Stickstoff baut sich ein hohes Belastungspotential auf, das bei Erreichen einer Stickstoffsättigung aktiviert wird. Andere Wälder in Rheinland-Pfalz haben diesen Punkt bereits erreicht.

Konzept des forstlichen Umweltmonitorings

Die Waldökosysteme in Mitteleuropa werden seit Jahrhunderten durch menschliche Eingriffe wie Holznutzung, Kohlebrennen, Streurechen, Rott- und Schiffelwirtschaft geprägt (vgl. Ellenberg 1996: 38–52). Seit dem späten 19. Jahrhundert gewann zudem im Zuge der Industrialisierung der Eintrag von Luftverunreinigungen in den Waldboden an Bedeutung. In den letzten Jahrzehnten nehmen die Auswirkungen der durch den Klimawandel hervorgerufenen Witterungsextreme zu. Um den Zustand und die Veränderungen der Waldökosysteme zu erfassen, ist eine dauerhafte Überwachung der anthropogenen Einflüsse auf deren Funktionsfähigkeit eine vordringliche Aufgabe (vgl. Block 1995: 1).

Der Grundstein für das forstliche Umweltmonitoring in Rheinland-Pfalz war das 1982 initiierte Sondermessprogramm Wald (vgl. Mühlhaus 1985: 656). Die im Nationalpark bis heute von der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft untersuchten Fichtenbestände gehören mit zu den 1983 angelegten Untersuchungsflächen und weisen damit die längsten Messreihen in Rheinland-Pfalz auf. Neben diesen intensiv untersuchten Flächen liefern Übersichtserhebungen Informationen über den landesweiten Umweltzustand. Bei der seit 1984 jährlich durchgeführten Waldzustandserhebung wird auf einem systematischen Raster der Vitalitätszustand der Bäume durch eine differenzierte Kronenansprache erfasst. Bei der Bodenzustandserhebung werden auf einer Unterstichprobe des gleichen Rasters in Abständen von 10 bis 15 Jahren Bodenproben gewonnen und morphologische, physikalische und chemische Kennwerte ermittelt.

Während mit den Daten der Übersichtserhebungen Schadensschwerpunkte lokalisiert und Aussagen über die landesweite Entwicklung der Waldökosysteme getroffen werden können, ermöglicht das intensive Messprogramm an den Dauerbeobachtungsflächen Rückschlüsse auf die Wirkung von anthropogenen und natürlichen Einflussfaktoren. Diese dienen der Klärung und dem grundlegenden Verständnis von Ursache-Wirkungsbeziehungen im Ökosystem Wald.

DIE AUTOREN

Dr. Martin Greve ist Referent im Forschungsbereich Waldmonitoring und Umweltvorsorge der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft. Seine Forschungsschwerpunkte sind Stoffhaushalt von Waldökosystemen, Waldernährung und Bodenschutz.

Hans-Werner Schröck leitet den Forschungsbereich Waldmonitoring und Umweltvorsorge und ist stellvertretender Leiter der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft. Er beschäftigt sich mit Vitalitätsparametern von Waldbäumen und deren Ursache-Wirkungsbeziehungen mit Schwerpunkt Kronenzustand, Zuwachs und Phänologie.

Zu den Untersuchungen gehören u. a. jährliche Aufnahmen zur Bewertung der Baumvitalität (beispielsweise Kronenverlichtung und Zuwachs), regelmäßige Untersuchungen des Bodens und der Humusauflage, Analysen des in Richtung Untergrund sickernden Bodenwassers und eine Bewertung der Ernährung der Waldbäume anhand von Nadel- und Blattproben. Wichtige Informationen liefern auch Untersuchungen zur Biodiversität der Bodenvegetation und Moosen sowie ausgewählten Artengruppen wie Mykorrhiza-Pilze, Regenwürmer und verschiedene Bodeninsekten. An meteorologischen Waldklima-Messstationen werden Temperatur, Niederschlag, Wind, Sonneneinstrahlung und Luftfeuchte erfasst. Zusätzlich messen die Wald-Luftmessstationen des Zentralen Immissions-Messnetzes (ZIMEN) kontinuierlich die Konzentrationen der wichtigsten Luftschadstoffe.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Dynamik in Waldökosystemen und die Reaktion dieser Systeme auf veränderte Umweltbedingungen fließen einerseits in die Politikberatung ein, beispielsweise für Empfehlungen zu Schadstoffreduktion und Klimaschutz. Andererseits ermöglichen sie die Ableitung von Maßnahmen für die Waldbewirtschaftenden, wie die Steuerung der Kompensationskalkungsmaßnahmen oder Empfehlungen zur Holznutzungseinschränkung auf nährstoffarmen Standorten.

Ein Ziel der Waldökosystem-Dauerbeobachtung ist die Erfassung langfristiger Auswirkungen der Deposition von Luftverunreinigungen auf den Stabilitätszustand der Waldökosysteme. Im nachfolgenden Text wird auf die Entwicklung und die Auswirkungen der Schwefel- und Stickstoffeinträge an der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein eingegangen. Die verschiedenen chemischen Verbindungen beider Elemente waren bei Beginn der Messungen die dominierenden Luftverunreinigungen. Sie verändern das chemische Bodenmilieu über Versauerung und Eutrophierung und können durch Veränderungen im Nährelementangebot und Schädigung der Baumwurzeln den Wasser- und Nährstoffhaushalt der Bäume beeinträchtigen.

Zeigen die in der Vergangenheit ergriffenen Luftreinhaltemaßnahmen Wirkung? Und welche Folgen sind heute noch zu beobachten?

Stoffhaushalt an der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein

Die nachfolgenden Auswertungen stammen von der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein, die im Jahre 1983 eingerichtet und in Betrieb genommen wurde. Sie zählt zu den am intensivsten und längsten untersuchten forstlichen Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz. In direkter Nähe befindet sich die in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Umwelt betriebene ZIMEN-Station Hunsrück-Leisel auf einer Freifläche, an der die Luftqualität fortlaufend überwacht und die langfristige Entwicklung der Luftschadstoffe aufgezeichnet wird.

Der Fichtenbestand stammt aus einer Pflanzung im Jahr 1877 und war bis Ende des Jahres 2017 im Bereich der Versuchsanlage weitgehend geschlossen. Seit dem Trockensommer 2018 sind ein Großteil der Fichten durch starken Buchdruckerbefall abgestorben, sodass sich die Verhältnisse an dem Standort in einem Wandel befinden. Die Fläche liegt im Wuchsbezirk „Hoch- und Idarwald“ auf ca. 660 m über N. N. und weist eine mittlere Jahrestemperatur von 6,9 °C auf. Im Jahresverlauf fallen im Durchschnitt 1027 mm, 40 % davon in der Vegetationszeit. Aus dem Taunusquarzit mit Decklehm hat sich eine für die Region typische mittelgründige Braunerde mit sandigem Lehm als Bodenart entwickelt. Auf der Fläche bei der Bodenprobenahme gefundene Kohlereste weisen auf frühere Köhlerplätze hin.

Ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Entwicklung und Auswirkungen von Luftverunreinigungen ist die Betrachtung der Ein- und Austräge sowie der Bilanzen

wesentlicher Bioelemente. Dies ermöglicht zudem eine Quantifizierung der Säurebelastung und deren Pufferung im Ökosystem (vgl. Ulrich 1994: 1). Zur Herleitung der Bilanz dienen die kontinuierlich erhobenen meteorologischen Daten, die Freiland- und Bestandesdeposition, die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser an der Untergrenze der Humusauflage und in drei Tiefenbereichen im Mineralboden sowie die mittels Modellen hergeleitete Tiefensickerung und Mineralverwitterung. Eine detaillierte Methodenbeschreibung findet sich in Greve (2015: 23-37).

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Depositionsmessungen zeigen eine deutliche Abnahme der jährlichen Schwefeleinträge von zu Beginn über 30 auf mittlerweile unter 5 kg/ha (Abb. 1). Zum einen zeigen die Daten, wie stark noch in den 1980er Jahren selbst siedlungsferne Wälder betroffen waren, zum anderen, wie wirksam die Emissionen durch Rauchgasentschwefelung, Altanlagensanierung und Einsatz schwefelarmer Kraft- und Brennstoffe im Kraftfahrzeug- und Hausbrandbereich reduziert werden konnten.

Die Emissionen oxidierter Stickstoffverbindungen konnten insbesondere durch den Einsatz von Katalysatoren in Kraftfahrzeugen und Entstickungsanlagen in Kraftwerken reduziert werden. Dies schlägt sich tendenziell auch in den Depositionsmessungen nieder. Die hauptsächlich aus der Landwirtschaft stammenden reduzierten Stickstoffverbindungen zeigen hingegen keine Abnahme seit Beginn der Messungen.

Die Austräge von Schwefel mit dem Sickerwasser übersteigen seit Beginn der Messungen um ein Vielfaches die Einträge (Abb. 2). Durch die schon vor Beginn der Messungen hohen Schwefeleinträge wurden im Boden große Schwefelvorräte gebunden, die bis heute allmählich abgebaut werden (vgl. Alewell 2001: 1275). Dieser Abbau trägt weiterhin zur Säurebelastung des Bodens bei (vgl. van Breemen et al. 1983: 291). Die Deposition wurde zwar wirksam verringert, Schwefel wird aber auch in den kommenden Jahrzehnten als Säurealtlast im Boden das Ökosystem weiter belasten. Eine gravierende Auswirkung ist die mit den Schwefelausträgen gekoppelte Verlagerung von Nährstoffen aus dem Boden, sodass dieser Standort selbst ohne Nutzung eine negative Magnesiumbilanz aufweist.

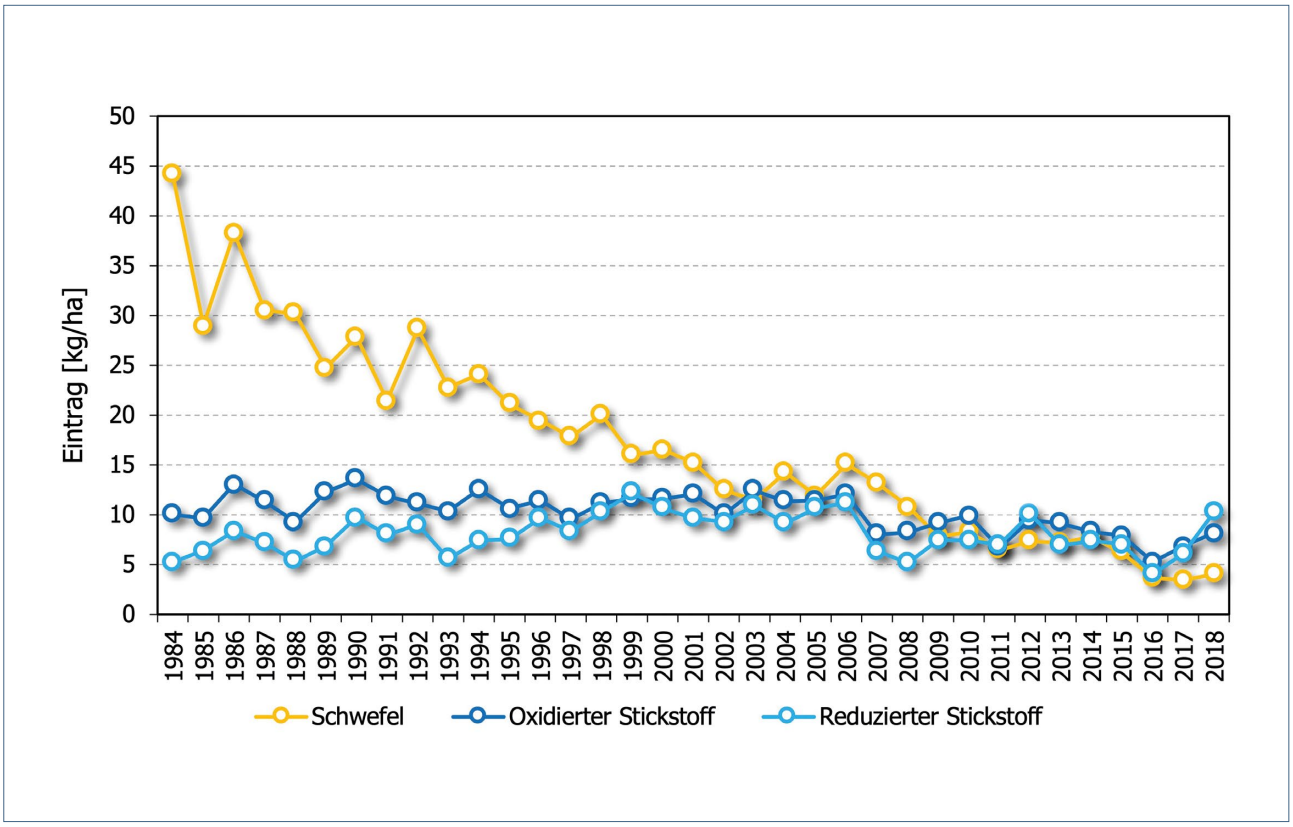

Abbildung 1: *Atmosphärischer Eintrag der Schwefel- und Stickstoffverbindungen in das Waldökosystem der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein im Beobachtungszeitraum.*

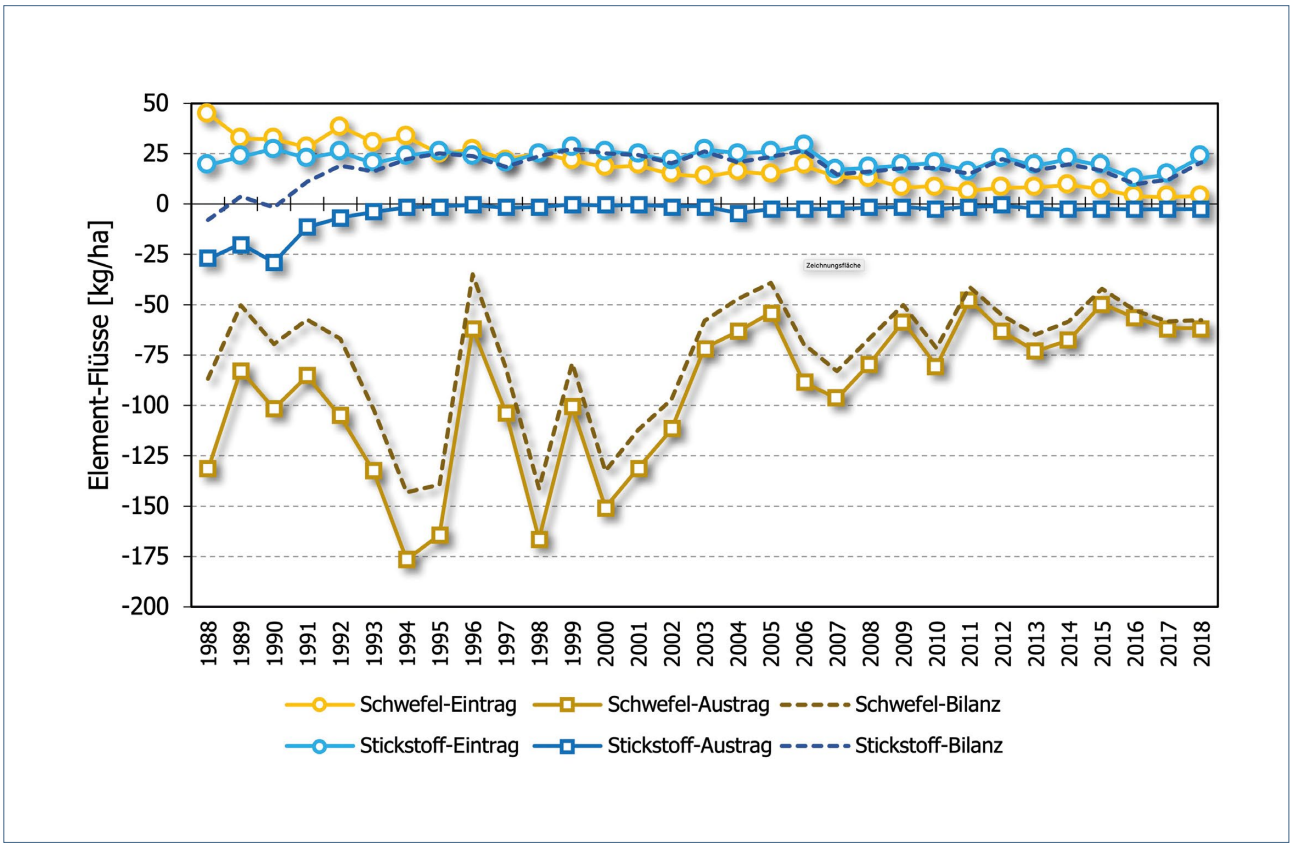

Abbildung 2: *Jahressumme der Ein- und Austräge der gemessenen Schwefel- und Stickstoffverbindungen im Waldökosystem der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein seit Beginn der Sickerwasserbeprobung im Jahr 1988.*

Die hohen Stickstoffeinträge werden zu einem großen Anteil im Ökosystem gespeichert (Abb. 2). Die Anreicherung dieses sich natürlicherweise in den meisten Waldökosystemen im Mangel befindenden Nährstoffes kann zu Artverschiebungen in der ganzen Biozönose (vgl. Ellenberg 1996: 80–85) und zu einer unausgewogenen Ernährung der Vegetation führen, die dadurch anfälliger gegenüber Schädlingen wird (vgl. Flückiger et al. 2011: 4). Die critical loads für eutrophierenden Stickstoff werden auf der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein um das 2-3-Fache überschritten. Durch die Anreicherung von Stickstoff baut sich ein zusätzliches Versauerungspotential auf (vgl. Alewell et al. 2000: 857), das wirksam wird, sobald das Ökosystem keinen weiteren Stickstoff mehr binden kann und dieser mit dem Sickerwasser verlagert wird. Auf den Monitoringflächen im Nationalpark ist dies bisher nur in geringem Umfang festzustellen. Andere Flächen in Rheinland-Pfalz, die in der Vergangenheit noch größeren Einträgen ausgesetzt waren, zeigen hingegen Anzeichen für eine Stickstoffsättigung und steigende Auswaschung mit dem Sickerwasser (vgl. Block and Gauer 2012: 87–95).

Die Säurebelastung und die Pufferreaktionen lassen sich ebenfalls anhand der Elementbilanzen herleiten. Die Schwefelaltlasten verursachen über den gesamten Messzeitraum den höchsten Anteil an der gesamten Säurebelastung (Abb. 3). Durch die noch stattfindende Aufspeicherung und dem nahezu ausgeglichenen Verhältnis zwischen reduzierten und oxidierten Verbindungen trägt Stickstoff bisher kaum zur Säurebelastung bei, was sich aber schlagartig ändern kann, sobald Stickstoff mit dem Sickerwasser ausgewaschen wird. Der geringe Beitrag der organischen Säuren zeigt, dass an diesem Standort noch keine starke Podsolierung abläuft. Der Rückgang in der Säurebelastung durch H^+ ist durch die verminderten Schwefelemissionen bedingt, wodurch der pH-Wert des Niederschlagswassers im Messzeitraum durch eine geringere Belastung an schwefeliger Säure oder Schwefelsäure wieder über 5 gestiegen ist.

Die Säurebelastung wird durch verschiedene Prozesse im Ökosystem abgepuffert (vgl. van Breemen et al. 1983: 290–291) (Abb. 3). Die Pufferung durch Magnesium-, Kalium-, Calcium- und Natriumoxide, die durch Staubdeposition in das Ökosystem eingetragen werden oder im Mineralboden vorhanden sind, hat keine negativen Auswirkungen. Der Anteil dieser ökosystemverträglichen Pufferung an der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein

liegt bei etwa 30 %. Absolut gesehen nimmt diese Pufferung durch einen Rückgang der Staubdeposition im Beobachtungszeitraum leicht ab.

Mehr als zwei Drittel der Säurebelastung wird jedoch insbesondere durch Aluminium-, zu einem geringeren Anteil auch durch Mangan- oder Eisenoxide abgepuffert (Abb. 3). Durch diesen Vorgang werden die Tonminerale im Boden, an deren Aufbau die Aluminiumoxide zentral beteiligt sind, geschädigt und verlieren ihre Fähigkeit, Nährstoffe und Wasser zu speichern (vgl. Veerhoff und Brümmer 1989: 1206). Je länger dieser Vorgang anhält, desto stärker gehen diese zentralen Ökosystemfunktionen des Bodens verloren. Ergebnisse einer nahegelegenen Versuchsfläche zeigen, dass Teile der Tonminerale im Oberboden bereits unwiederbringlich zerstört sind.

Zusätzlich schädigt das freigesetzte Aluminium Pflanzenwurzeln und wirkt toxisch auf viele Mikroorganismen. Davon ist nicht nur der Waldboden betroffen, sondern auch angrenzende aquatische Ökosysteme, in die das Aluminium mit dem Sickerwasser verlagert wird. So zeigen mehrere Messstellen an Gewässern im Hunsrück weiterhin periodisch erhöhte Aluminiumgehalte, die schädigend und toxisch auf Bachorganismen wirken (vgl. Westermann 2018: 25–31).

IM ÜBERBLICK

- Das Umweltmonitoring ermöglicht, die Auswirkungen anthropogener Einflüsse zu überwachen
- Schwefelaltlasten im Boden belasten die Waldökosysteme
- Überhöhte Stickstoffeinträge führen zu Eutrophierung und bauen ein Versauerungspotential auf
- Zusätzliche Luftreinhaltemaßnahmen sind dringend erforderlich

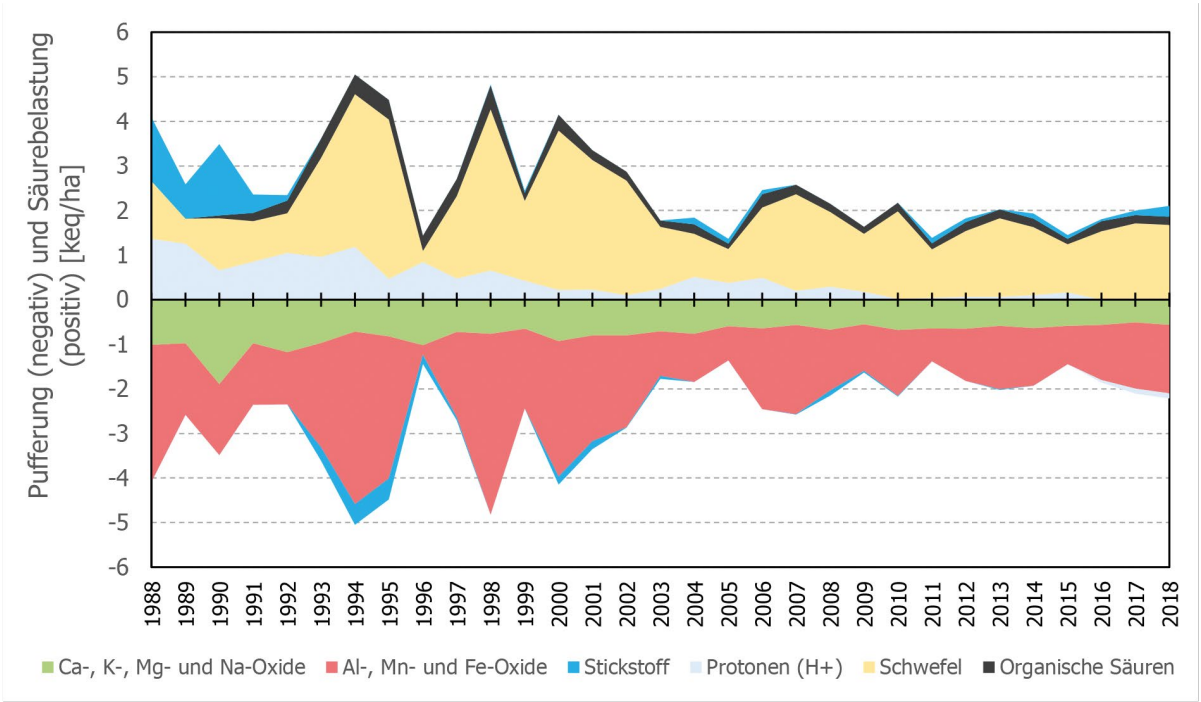

Abbildung 3: *Gegenüberstellung der jährlichen Säurebelastung (positive Werte) und der diese kompensierenden Pufferreaktionen (negative Werte) im Waldökosystem der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein. Farblich differenziert sind die Beiträge der an den Reaktionen beteiligten Elemente und Verbindungen.*

Ausblick

Die noch immer starke Belastung der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein durch Schwefelaltlasten zeigt, wie wichtig eine frühzeitige Reduktion der Einträge ist. Was bei Schwefel durch restriktive Luftreinhaltemaßnahmen in relativ kurzer Zeit umgesetzt wurde, geht bei Stickstoff nur schleppend voran. Die Projektionen des 2019 veröffentlichten Nationalen Luftreinhalteprogramms gehen davon aus, dass die reduzierten Stickstoffemissionen bis 2030 lediglich um 9 % vermindert werden können, wenn kein umfangreiches Maßnahmenpaket eingeführt wird (vgl. BMU 2019: 72). Die Belastung der Wälder – auch ohne direkte Nähe zu Industrie oder intensiver Landwirtschaft – durch überhöhte Stickstoffeinträge und Schwefelaltlasten wird somit voraussichtlich noch lange Bestand haben. Um wichtige Bodenfunktionen zu erhalten und die Ökosysteme zu stabilisieren, kann mittelfristig eine standortangepasste Bodenschutzkalkung helfen, die die anthropogen bedingte Säurebelastung kompensiert und das durch die Schwefelausträge ausgewaschene Magnesium zurückführt (vgl. Block et al. 2016: 124–128). Die einzige dauerhafte Lösung ist jedoch eine Reduktion insbesondere der aus der Landwirtschaft stammenden Stickstoffemissionen.

Der fast vollständige Verlust des Altbestandes innerhalb von zwei Jahren durch starken Buchdruckerbefall wird deutliche Veränderungen im Stoffhaushalt mit sich bringen. Das Umweltmonitoring an dieser Fläche wird fortgeführt. Im Einklang mit den Nationalparkzielen wird, im Gegensatz zu den anderen Intensivmessstationen, diese Fläche genutzt, um die Auswirkungen einer natürlich ablaufenden Sukzession auf das Waldökosystem langfristig zu untersuchen.

Die regelmäßig aktualisierten Messdaten sowohl der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein als auch der anderen landesweit betriebenen Dauerbeobachtungsflächen können unter der Rubrik „Forschung an Dauerbeobachtungsflächen“ auf der Internetseite der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft abgerufen werden:
https://fawf.wald-rlp.de/de/forschung-und-monitoring-unsere-aufgaben/forstliches-umweltmonitoring/dauerbeobachtungsflaechen/forschung-an-dauerbeobachtungsflaechen/
Ergänzend dazu liefert der jährlich erscheinende Waldzustandsbericht einen Überblick der aktuellen Situation der rheinland-pfälzischen Waldökosysteme:
https://fawf.wald-rlp.de/de/veroeffentlichungen/waldzustandsbericht/

Abbildung 4: *Bäume mit Zuwachsmessbändern sowie Streusammelbehälter auf der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein*

Abbildung 5: *Sickerwassergewinnung (Foto: Landesforsten.RLP.de / Markus Hoffmann)*

Quellen

Alewell, C., (2001): Predicting reversibility of acidification: The European sulfur story. In: Water, Air, & Soil Pollution 130, 1271–1276. https://doi.org/10.1023/A:1013989419580

Alewell, C., Manderscheid, B., Meesenburg, H., Bittersohl, J., (2000): Is acidification still an ecological threat? In: Nature 407, 856–7; discussion 857-8. https://doi.org/10.1038/35038158

Block, J., (1995): Konzept der Waldökosystem-Dauerbeobachtung in Rheinland-Pfalz. In: Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz 32, 1–11.

Block, J., Dieler, J., Gauer, J., Greve, M., Moshammer, R., Schuck, J., Schwappacher, V., Wunn, U., (2016): Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung bei der Holz- und Biomassenutzung im Rheinland-Pfälzischen Wald, Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz 79. 230 S.

Block, J., Gauer, J., (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz, Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz 70. 232 S.

BMU, Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, (2019): Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland.

Ellenberg, H., (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. UTB. 1095 S.

Flückiger, W., Braun, S., Mainiero, R., Schütz, K., Thomas, V., (2011): Auswirkung erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes - Synthesebericht im Auftrag des BAFU. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch. 88 S.

Greve, M., (2015): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt, Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz 73. 333 S.

Mühlhaus, B., (1985): Sondermeßprogramm Wald - Konzept, Kosten, Entwicklungstendenzen. In: Allgemeine Forst Zeitschrift 25/26, 656–658.

Ulrich, B., (1994): Nutrient and acid-base budget of central European forest ecosystems. In: Godbold, D.L., Hüttermann, A. (Hg.), Effects of Acid Rain on Forest Processes. Wiley-Liss, New York, 1–50.

van Breemen, N., Mulder, J., Driscoll, C.T., (1983): Acidification and alkalinization of soils. In: Plant and Soil 75, 283–308. https://doi.org/10.1007/BF02369968

Veerhoff, M., Brümmer, G., (1989): Silicatverwitterung und Tonmineralumwandlung in Waldböden als Folge von Versauerungsprozessen. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 59, 1203–1207.

Westermann, F., (2018): Gewässerschutz und Luftschadstoffe. 30 Jahre Monitoring versauerter Waldbäche in Rheinland-Pfalz. Zwischenbilanz zur langfristigen Entwicklung der Gewässerversauerung im Hunsrück. Chemisch-physikalische und gewässerbiologische Trends. 114 S.