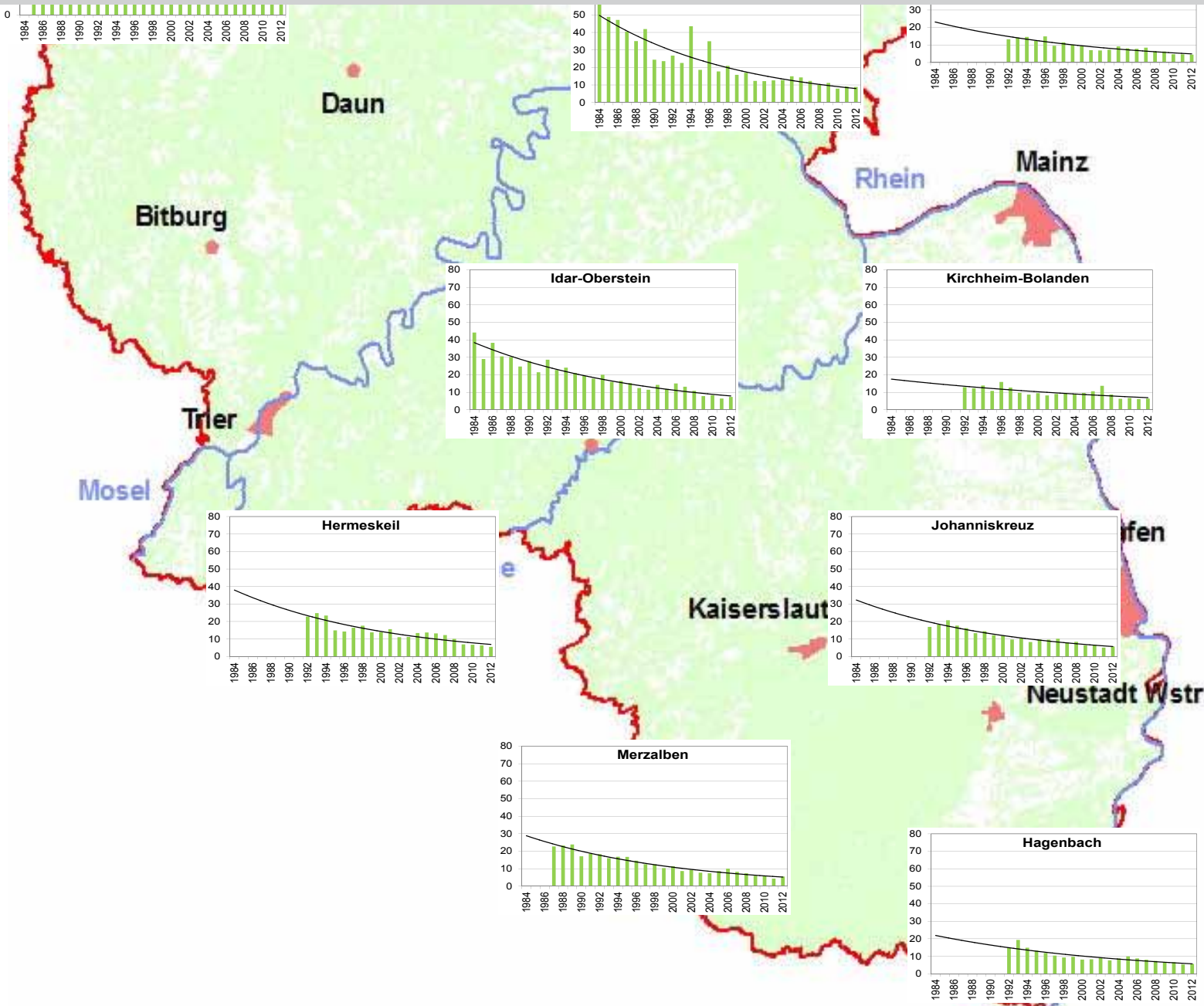


# LANGZEITMESSREIHEN - UNVERZICHTBARE GRUNDLAGE DER UMWELTKONTROLLE IM WALD



Wie hat sich der Waldzustand entwickelt?

Hat sich die Belastungssituation des Waldes verändert?

Sind die Luftschadstoffbelastungen zurückgegangen und zeigen die Luftreinhaltemaßnahmen die erhoffte Wirkung?

Diese und andere Fragen können mit den Langzeitmessreihen des Forstlichen Umweltmonitorings beantwortet werden.

Die Waldzustandserhebung wird seit 1984 nach einem einheitlichen Verfahren durchgeführt. Somit steht zur Bewertung der Entwicklung des Vitalitätszustandes unserer Wälder eine 30-jährige Zeitreihe zum Kronenzustand zur Verfügung. Bei der Erstaufnahme im Sommer 1984 wurden landesweit 10.248 Stichprobenbäume ausgewählt, dauerhaft markiert und erstmals begutachtet. Von diesen „Startbäumen“ befinden sich noch 4431 Bäume im aktuellen Aufnahmekollektiv. Die übrigen sind durch reguläre Nutzung oder Absterben ausgeschieden und wurden durch benachbarte Bäume ersetzt.

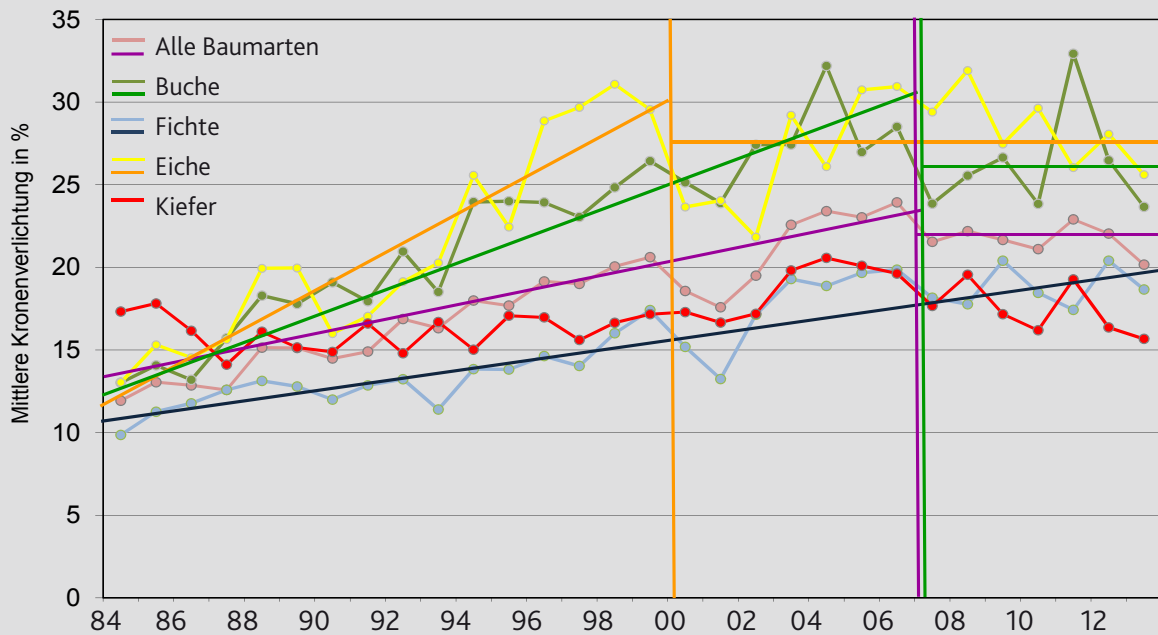
Die Zeitreihe der Waldzustandserhebung zeigt über alle Baumarten von 1984 bis 2006 eine Verschlechterung des Kronenzustandes mit einer Verdoppelung der mittleren Kronenverlichtung. Von 2007 bis 2013 ergibt sich kein statistisch signifikanter Trend. Allerdings ist die Kronenverlichtung aktuell niedriger als im Mittel dieser Periode. Nach Baumarten differenziert zeigt die Buche einen aufwärts gerichteten Trend in der Kronenverlichtung bis zum Jahr 2006 und in den Folgejahren keine gerichtete Entwicklung. Bei Eiche liegt der Trendbruch bereits zwischen den Jahren 1999 und 2000. Seit dem Höchstwert im Jahr 2009 nimmt die Kronenverlichtung wieder ab. Bei Fichte ist die Kronenverlichtung weniger stark angestiegen als bei Buche und Eiche, zeigt aber bislang keinen signifikanten Bruch im aufwärtsgerichteten Trend. Bei Kiefer liegt kein signifikanter Trend in der Zeitreihe der Kronenverlichtung vor.

Die Zeitreihen der Waldzustandserhebung sind zugleich eine wichtige Datengrundlage für weiterführende Auswertungen. So wurden beispielsweise die Zeitreihendaten der rheinland-pfälzischen Waldzustandserhebungen zur Schätzung der Überlebensfunktionen der Hauptbaumarten verwendet (STAUPENDAHL und ZUCCHINI 2010). Die Befunde werden zur Einbindung von Risiken in der forstlichen Planung verwendet, was vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit voraussichtlich einhergehenden Zunahme von Kalamitäten immer bedeutsamer wird.

Um Ursache-Wirkungszusammenhänge zu untersuchen, wurden Mitte der 80er Jahre parallel zur Waldzustandserhebung auch Messungen der Umweltbedingungen im Wald gestartet. Zur Erfassung der Belastung der Wälder durch gasförmige Luftschadstoffe (Immission) wurden in den wichtigsten Waldgebieten des Landes in

Eine detaillierte Darstellung der Langzeitbefunde des Forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz enthalten die Webseiten der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft: <http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=3017>. Dort finden Sie auch Angaben zur Lage und eine differenzierte Beschreibung der Messprogramme für die in den nachfolgenden Karten aufgeführten Messstationen.

## Trends der mittleren Kronenverlichtung seit 1984, Hauptbaumarten und über alle Baumarten

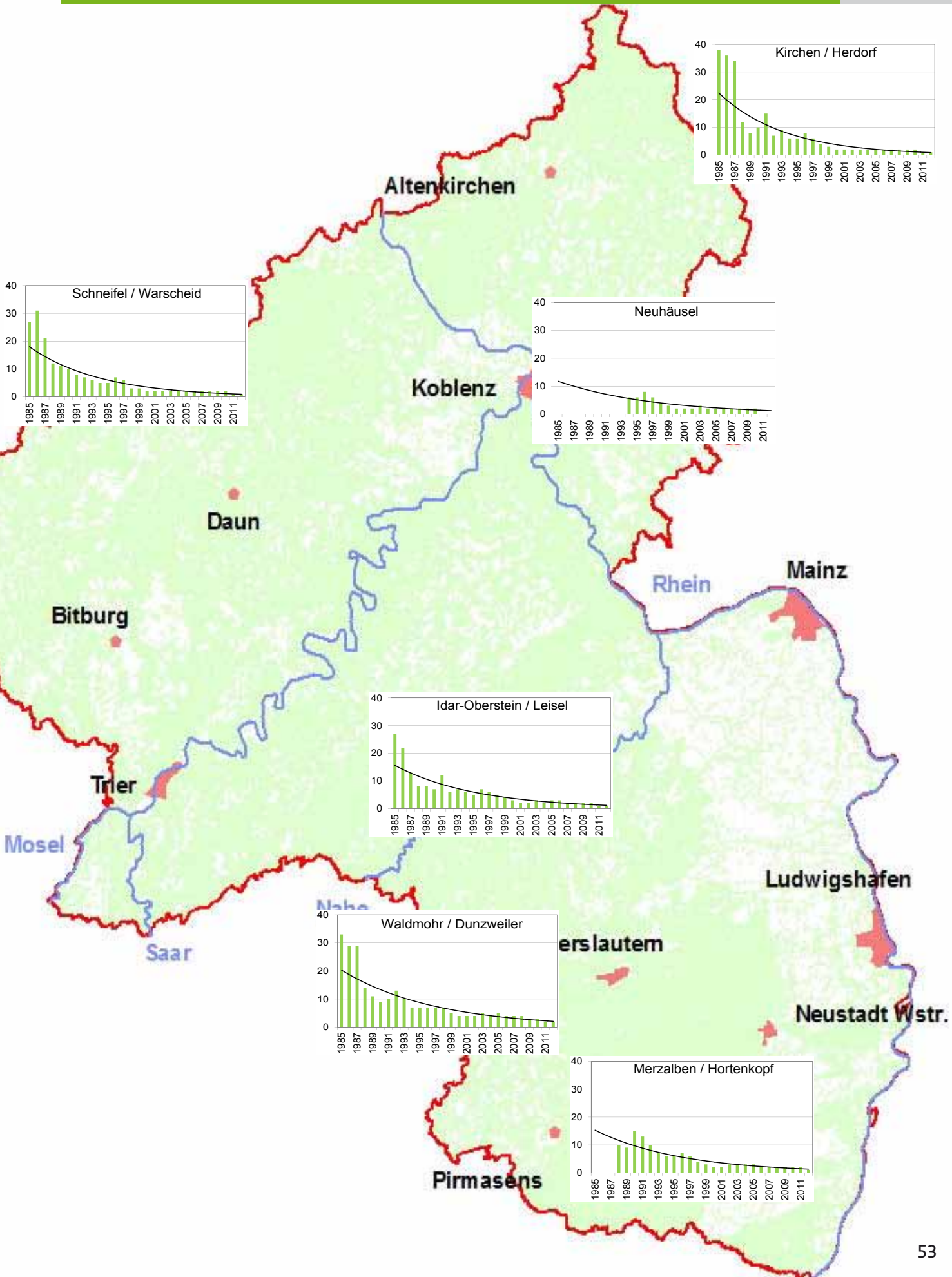


Höhenlagen zwischen 455 und 680 m über NN 6 Waldmessstationen des Zentralen Immissionsmessnetzes (ZIMEN) eingerichtet. Seit 1984/87 werden hier kontinuierlich die Konzentrationen der Gase Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Stickstoffmonoxid (NO) und Ozon (O<sub>3</sub>) sowie die Schwebstaubkonzentrationen und seit 2001/02 auch die Konzentrationen der Feinstäube erfasst. Die Zeitreihen zeigen eine deutliche Veränderung der Luftschadstoffbelastung des Waldes und belegen die Erfolge der Luftreinhaltung. Entsprechend der beträchtlichen Verringerung der SO<sub>2</sub>-Emission in Deutschland um mehr als 90 % seit 1980 sind auch die Schwefeldioxidkonzentrationen in der bodennahen Luft in unseren Waldgebieten erheblich gesunken. Mitte der 1980er Jahre lagen die SO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte in den Waldgebieten zwischen 25 und 40 µg/m<sup>3</sup>, heute dagegen meist nur noch zwischen 1 bis 2 µg/m<sup>3</sup>. Der starke Rückgang der SO<sub>2</sub>-Emission und -Immission ist auf die deutlich verbesserte Abgasreinigungstechnik (Rauchgasentschwefelung) im Kraftwerksbereich, die Altanlagenanierung nach TA-Luft und den Einsatz schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraft- und Brennstoffe im Kraftfahrzeug- und Hausbrandbereich zurückzuführen.

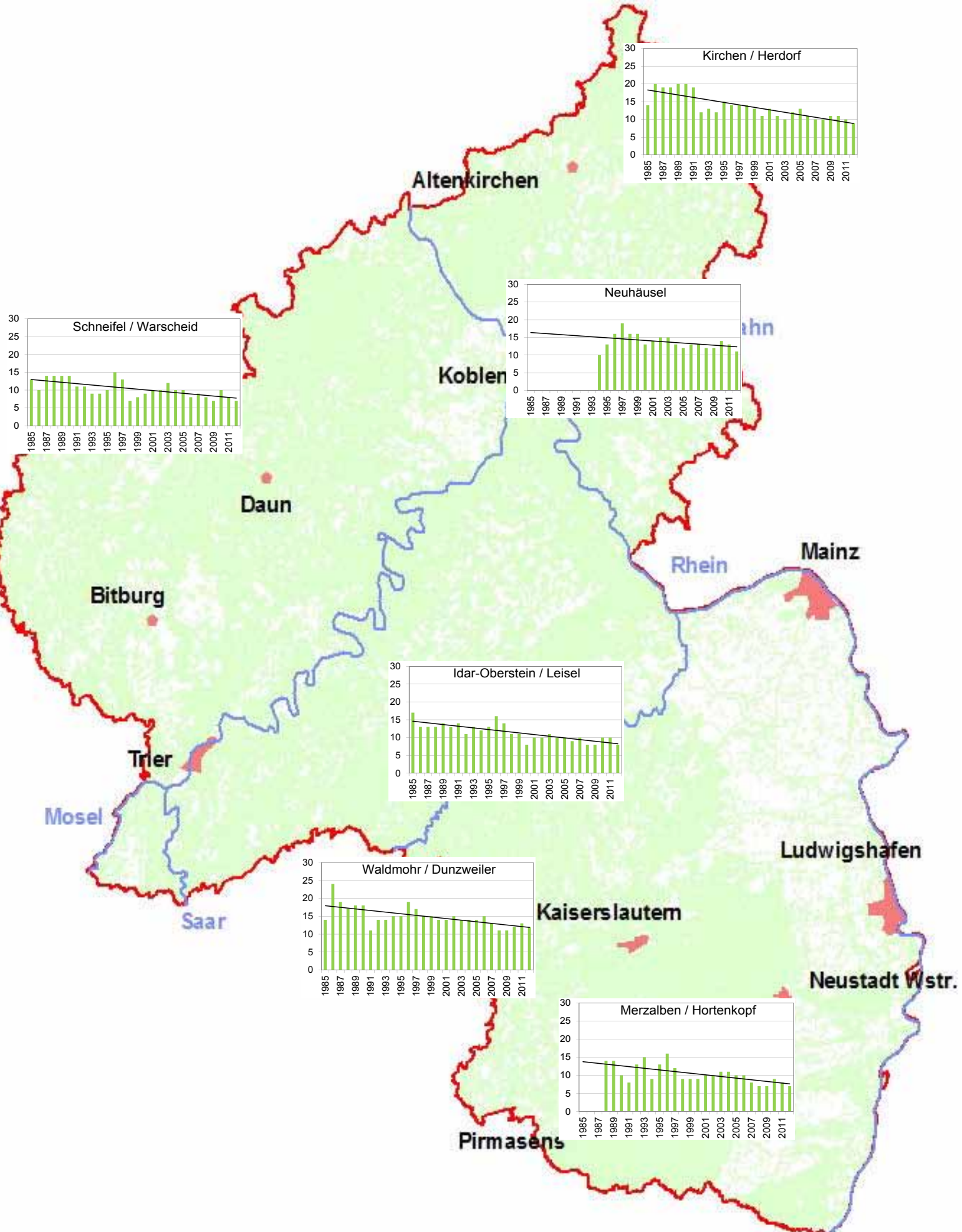
Auch bei den Stickstoffoxiden (NO und NO<sub>2</sub>, zusammengefasst NO<sub>x</sub>) hat sich dank erfolgreicher Verringerung der Stickoxidemissionen im Industriebereich und beim Straßenverkehr durch die Festlegung von Euro-Normen (1 bis 5 für PKW und I bis V für LKW) die NO<sub>2</sub>-Immission in den Waldgebieten deutlich verbessert. Allerdings ist die Reduktion bei den Stickoxiden nicht so stark wie beim Schwefeldioxid.

Ozon ist ein Sekundärschadstoff, der in einem komplexen photochemischen, radikalischen Prozess unter Einwirkung des Sonnenlichts aus Vorläufersubstanzen wie Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen gebildet wird. Die Ozonkonzentration in der bodennahen Luft wird daher nicht nur von der Verfügbarkeit der Vorläufersubstanzen, sondern auch vom Witterungsverlauf, insbesondere der Sonneneinstrahlung, beeinflusst. Ozon gelangt über die Spaltöffnungen ins Pflanzeninnere und schädigt dort die Zellstrukturen. Für den Schadeinfluss auf die Pflanzen sind nicht die Spitzenkonzentrationen, sondern die Ozonaufnahme über die gesamte Vegetationszeit entscheidend. Daher geht bereits von mittleren Ozonkonzentrationen eine hohe Gefährdung aus. Zur Bewertung des Ozoneinflusses auf die

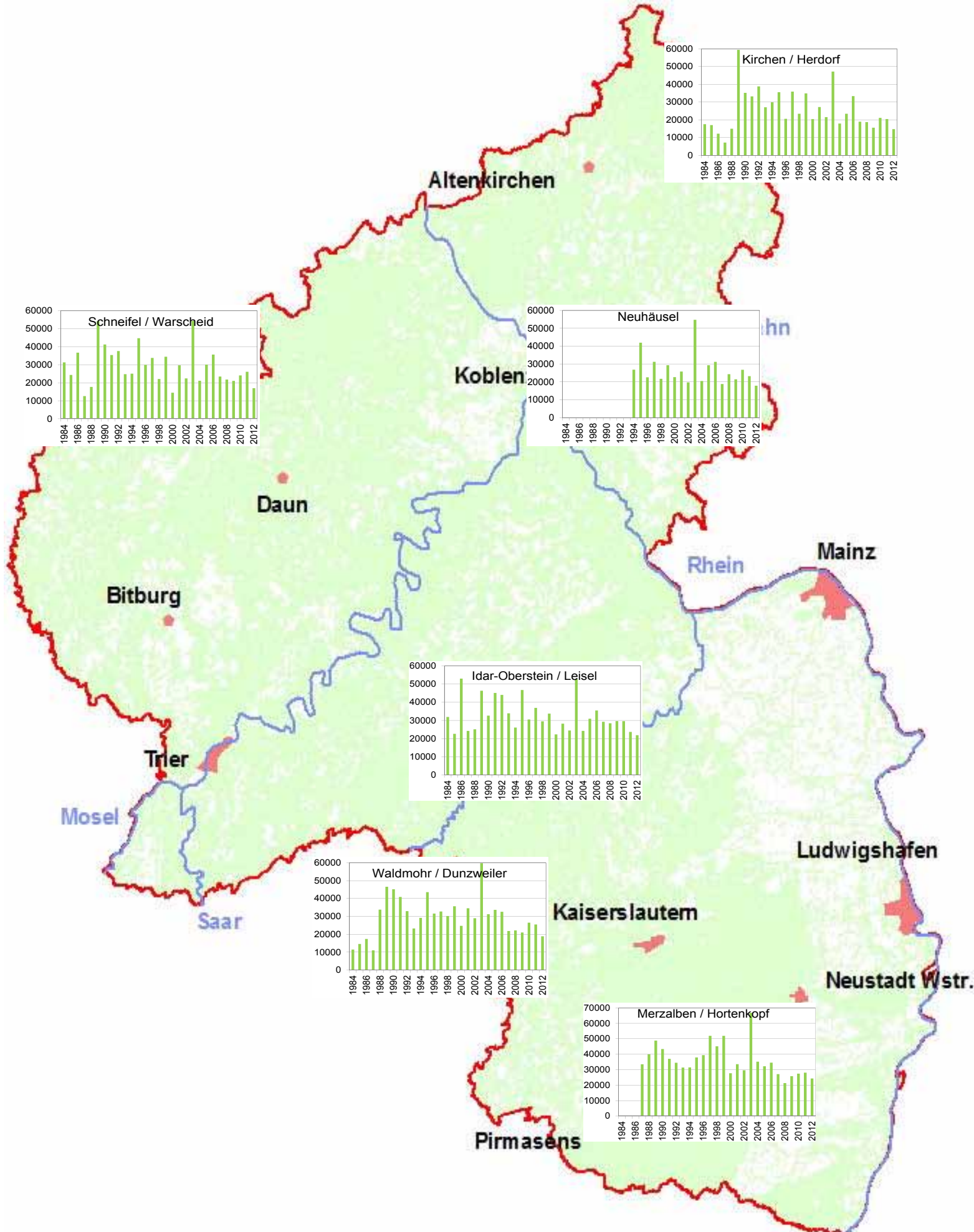
# Entwicklung der SO<sub>2</sub>-Immission (Jahresmittelwerte in µg/m<sup>3</sup>) in den Waldgebieten



Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Immission (Jahresmittelwerte in µg/m<sup>3</sup>) in den Waldgebieten



Entwicklung der AOT 40 Werte in ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ) in den Waldgebieten



Vegetation werden sogenannte AOT 40-Werte berechnet („AOT40 = **A**ccumulated exposure **O**ver a **T**hreshold of **40** ppb“). Der Kennwert wird als Summe der Überschreibungsbeträge von 80 µg Ozon je m<sup>3</sup> (= 40 ppb) unter ausschließlicher Verwendung der 1-Stundenmittelwerte zwischen 8 Uhr und 20 Uhr mitteleuropäischer Zeit kalkuliert. Für Waldbäume wird meist ein Kalkulationszeitraum von April bis September (= forstliche Vegetationszeit) verwendet. Während die Ozon-Spitzenwerte deutlich zurückgegangen sind, zeigen die Zeitreihen der AOT 40-Werte an den Waldstationen bislang meist keinen signifikant abnehmenden Trend. Die Belastungsschwelle für Waldökosysteme von 10 000 (µg/m<sup>3</sup>) \* h wird an allen Messorten in allen Jahren überschritten. Um einer Schädigung der Waldbäume durch Ozon zukünftig vorbeugen zu können, reichen die bislang ergriffenen Luftreinhaltemaßnahmen demnach nicht aus.

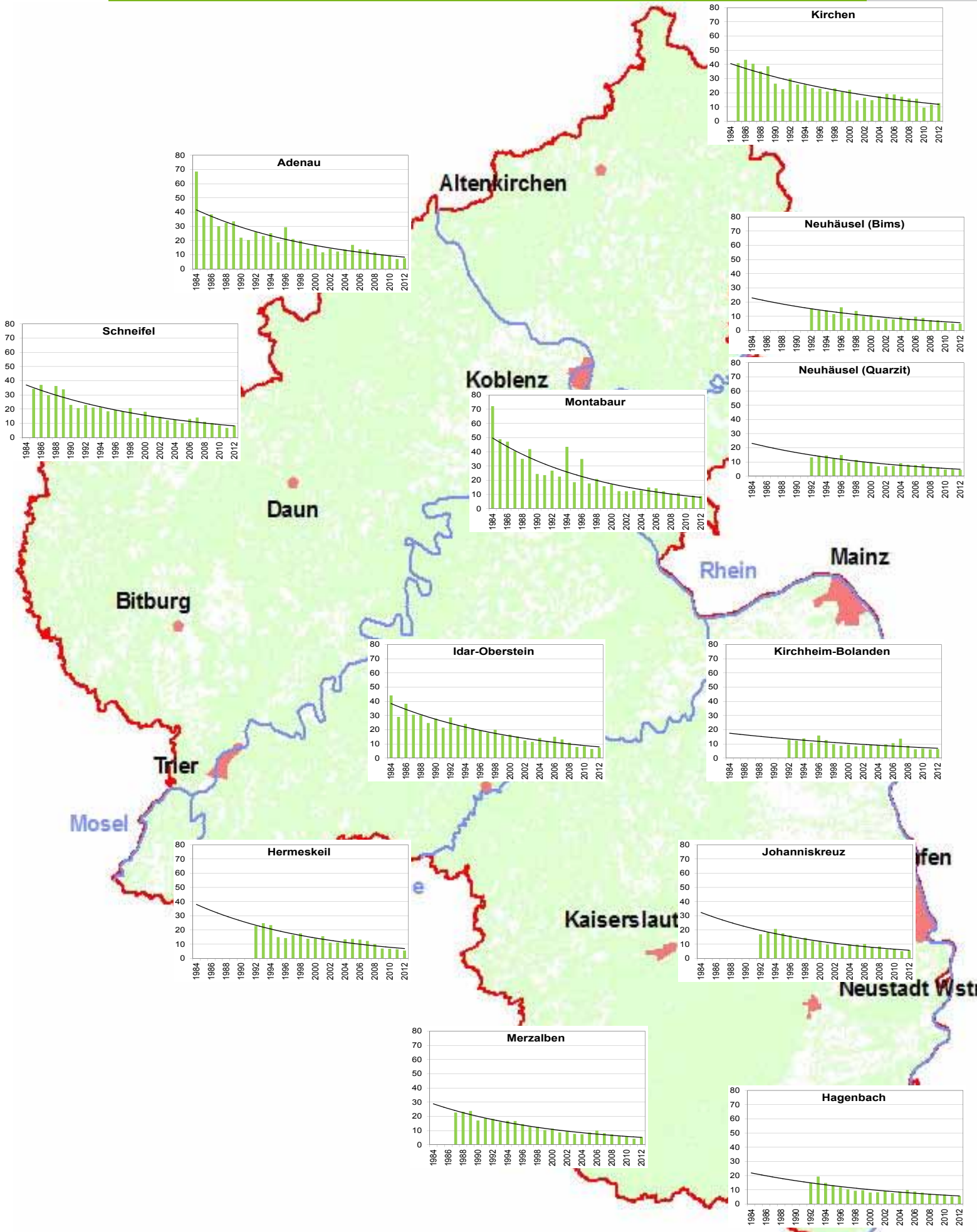
Um den Weg der Luftverunreinigungen von der Emission über die Immission weiter zu verfolgen, wird seit Mitte der 1980er Jahre auch die atmosphärische Deposition der Luftverunreinigungen in den Waldökosystemen gemessen. Unter „Deposition“ versteht man in diesem Zusammenhang den Fluss von Fremdstoffen, die durch natürliche und anthropogene Prozesse in die Atmosphäre gelangen und von dort nach mehr oder weniger weitem Transport wieder an der Erdoberfläche deponiert werden. Wälder besitzen mit ihrem Kronenraum meist eine große und raue Oberfläche. Daher sind die atmosphärischen Stoffeinträge unter Wald meist höher als bei anderen Landnutzungsformen. Über die atmosphärische Deposition werden vor allem Schwefel- und Stickstoffverbindungen, Calcium, Magnesium und Kalium, aber auch Meersalz (Natrium, Chlorid) und eine Fülle von Spurenstoffen darunter auch Schwermetalle in den Waldökosystemen abgelagert. Die atmosphärische Deposition trägt zum einen zur Versorgung der Ökosysteme mit Nährstoffen bei, führt auf der anderen Seite aber auch zu Bodenversauerung, Stickstoffeutrophierung und Belastung der Böden mit gegebenenfalls toxisch wirkenden Schwermetallen. Depositionsmessungen erfolgen in Rheinland-Pfalz aktuell an 11 Standorten jeweils auf Frei-

flächen und unter Waldbeständen. Aus den ermittelten Flussraten mit dem Freiland- und Bestandesniederschlag werden unter Einsatz von Kronenraummodellen Gesamtdositionsraten aller bedeutsamen Komponenten und auch die (potentielle) Säuredeposition hergeleitet. Auch werden die Daten zur Eintrags-Austragsbilanzierung von Nähr- und Schadstoffen verwendet. Dabei werden neben Eintrag aus der atmosphärischen Deposition auch die Freisetzung aus der Mineralverwitterung, die Entnahme mit der Holzernte und der Austrag mit dem Sickerwasserfluss kalkuliert. Diese Bilanzierungen lassen Aussagen zu, ob die Ökosysteme unter den aktuellen Bedingungen Nährstoffe verlieren oder anreichern und ob die Böden weiterhin versauern.

Die Schwefeldeposition in unseren Waldökosystemen ist von 40 bis 70 kg/ha\*Jahr Mitte der 1980er Jahre auf aktuell 5 bis 13 kg/ha\*Jahr zurückgegangen. Die Luftreinhaltemaßnahmen führen somit zu einer erheblichen Entlastung der Waldökosysteme im Hinblick auf den Eintrag von Schwefelverbindungen. Allerdings besitzen unsere Waldböden ein „Langzeitgedächtnis“ in Form von im Boden aufgespeichertem Sulfat. Dieses stammt aus der Zeit mit deutlich höheren Schwefeleinträgen. Das gespeicherte Sulfat wird nur sehr langsam wieder aufgelöst und mit dem Sickerwasser ausgetragen. Die hiermit verbundenen immer noch hohen Sulfatkonzentrationen im Sickerwasser haben zur Folge, dass zusammen mit den Sulfatanionen in hohen Raten auch Kationen ausgewaschen werden. Dabei gehen dem Ökosystem wichtige Nährstoffe, vor allem Magnesium, Calcium und Kalium verloren. Die „Altlasten“ aus den überhöhten Schwefeleinträgen bis Ende der 1980er Jahre wirken demnach immer noch negativ auf den Nährstoffhaushalt unserer Waldökosysteme nach.

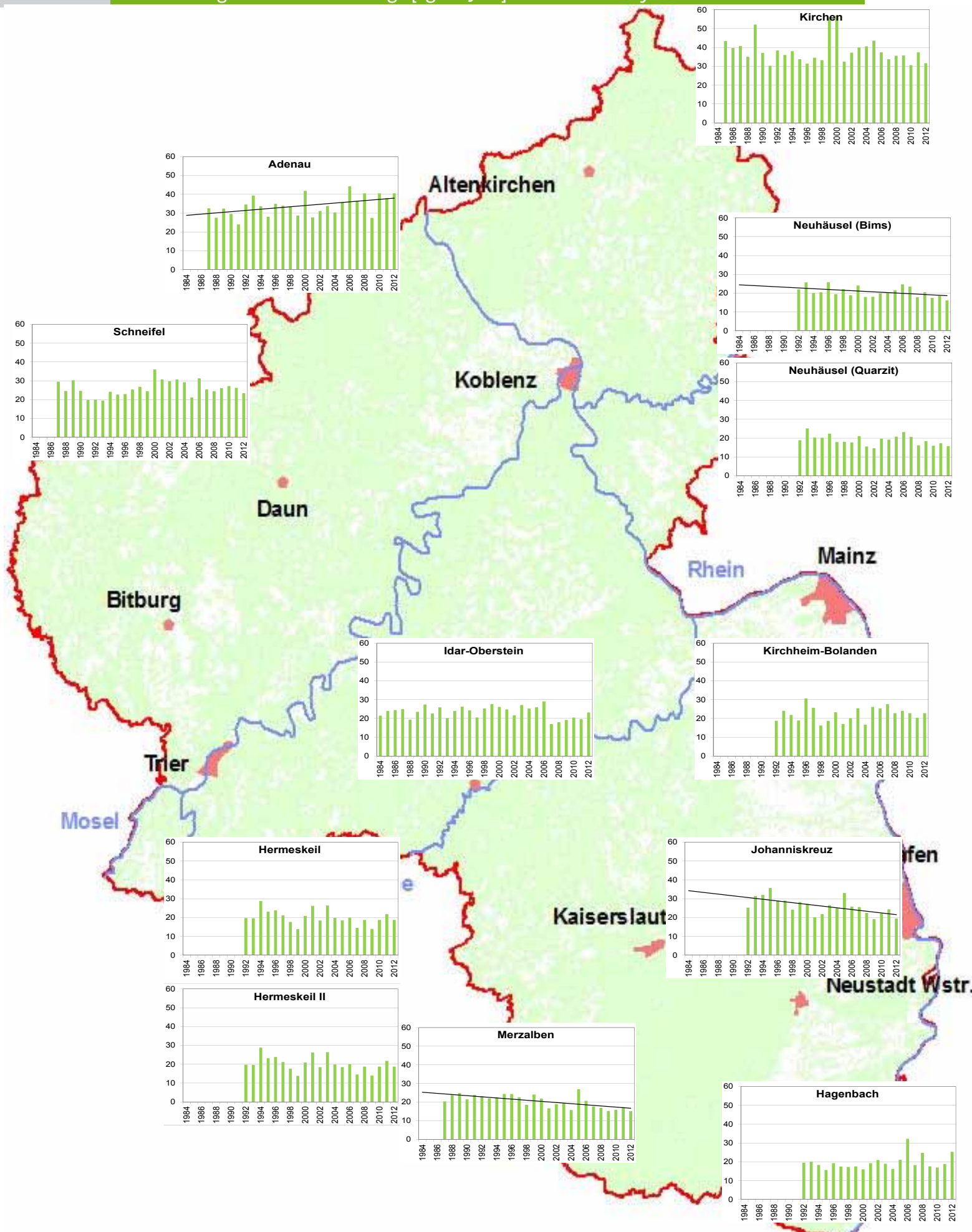
Stickstoff gelangt in unterschiedlichen Verbindungen in unsere Waldökosysteme. Über die atmosphärische Deposition werden vor allem Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) und organisch gebundener Stickstoff (N<sub>org</sub>) eingetragen. Der Gesamtstickstoffeintrag (NO<sub>3</sub>-N + NH<sub>4</sub>-N + N<sub>org</sub>) liegt über die gesamte Zeitreihe an nahezu allen Messorten über den ökosystemverträg-

# Entwicklung der Schwefeleinträge [kg/ha·Jahr] in die Waldökosysteme

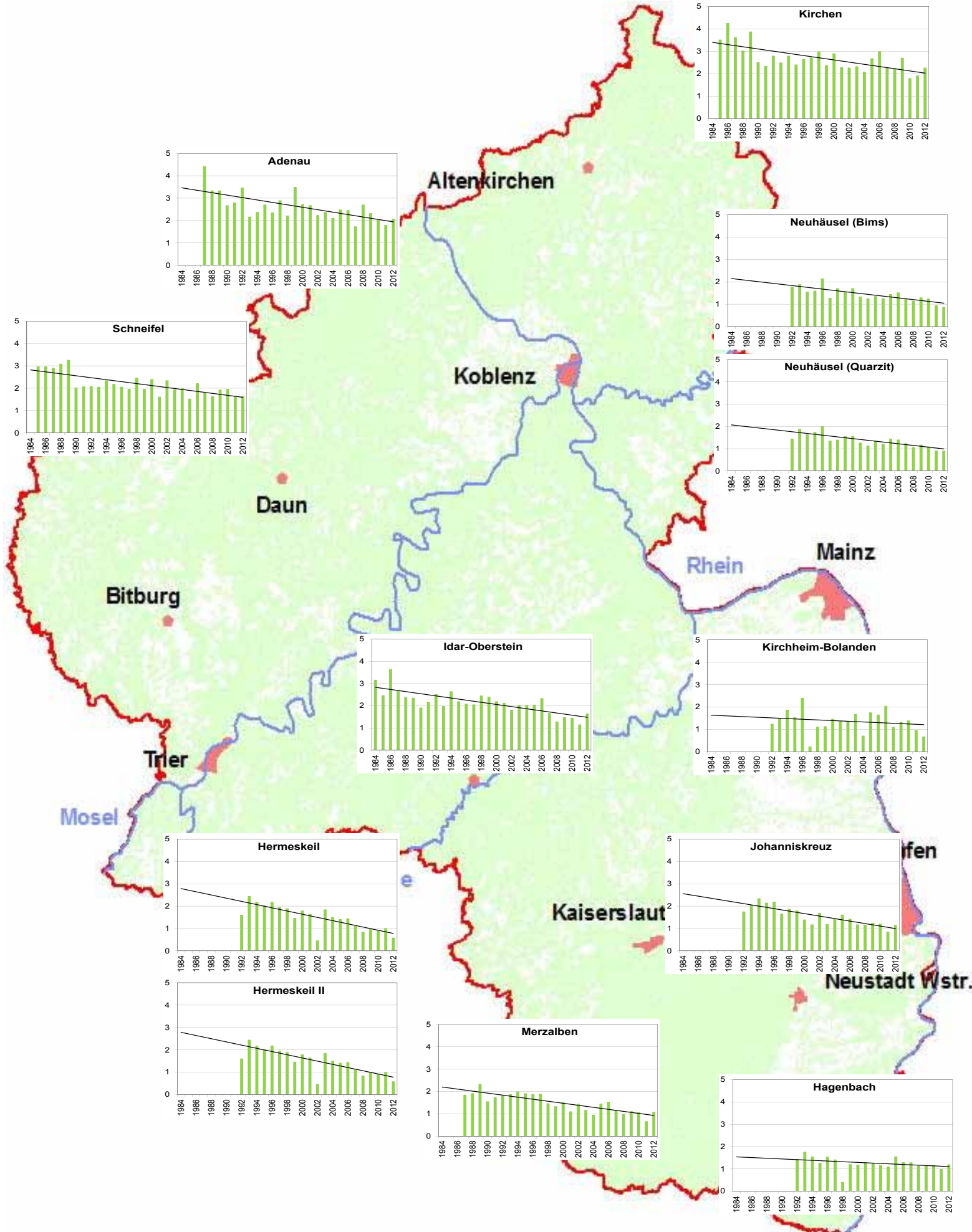




# Entwicklung der Stickstoffeinträge [kg/ha·Jahr] in die Waldökosysteme



# Entwicklung der Säureeinträge [kmol<sub>e</sub>/ha·Jahr] in die Waldökosysteme





lichen Schwellenwerten (maximal 5 bis 15 kg N/ha\*Jahr). Zudem zeigen die Ökosystembilanzen in der Regel deutliche Überschüsse. Daher ist mit einer kontinuierlichen Stickstoffanreicherung in den Waldökosystemen und einer fortschreitenden Stickstoffeutrophierung mit einer Fülle an negativen Folgen wie Bodenversauerung, Nährstoffungleichgewichte, Schädigung von Bodenlebewesen und Veränderungen in der Zusammensetzung der Waldbodenvegetation zu rechnen.

Die Zeitreihen der Stickstoffeinträge zeigen bislang keine einheitliche Entwicklung: nur an drei der 11 Messstationen ergibt sich ein signifikant abnehmender, an einer Station ein signifikant zunehmender und an sieben Stationen kein signifikanter Trend. Die Anstrengungen zur Verringerung der Stickstoffemission aus dem Straßenverkehr und vor allem aus der Landwirtschaft müssen daher verstärkt fortgesetzt werden.

Aus den Depositionsmessdaten lassen sich auch die Einträge an (Netto-)Säure herleiten. Hierzu werden die Gesamtdepositionen der Einträge an Sulfat, Nitrat, Ammonium und Chlorid aufsummiert und die Summe der Einträge an Calcium, Magnesium und Kalium hiervon abgezogen. Die Berechnungen erfolgen auf Ionenäquivalentbasis ( $\text{kmol}_c/\text{ha}^*\text{Jahr}$ ) und in die Kalkulationen gehen nur die nicht meersalzbürtigen Anteile der Deposition ein.

Die Säureeinträge sind in der Zeitreihe an neun der elf Messstationen signifikant gesunken. Dies korrespondiert mit dem deutlich angestiegenen pH-Wert des Niederschlagswassers sowohl im Freiland als auch im Kronentraufwasser unter den Waldbeständen (vgl. Kap. „Einflüsse auf den Waldzustand“). Die Abnahme der Säureeinträge ist vor allem auf die deutlich gesunkenen Einträge an Sulfat zurückzuführen und belegt somit die Wirksamkeit der Schwefeldioxid-Emissionsminderung. Allerdings überschreiten die Säureeinträge zum Teil noch die Verträglichkeitsschwellen der Ökosysteme (Critical Loads). Daher sind weitere Anstrengungen zur Reduktion insbesondere der Emission der Stickstoffverbindungen und auch weiterhin Bodenschutzkalkungen erforderlich.

Luftreinhaltemaßnahmen, insbesondere der Ersatz von Blei als Antiklopfmittel in Kraftstoffen, aber auch andere Maßnahmen im Industriebereich haben zu einem deutlichen Rückgang der Schwermetalleinträge in den Waldgebieten geführt. So ist der Bleieintrag in die rheinland-pfälzischen Waldökosysteme seit den 1980er Jahren um mehr als 90 % gesunken. Auch die Einträge an Zink und Cadmium sind merklich zurückgegangen. Die Befunde der landesweiten Waldbodenzustandserhebung belegen eine deutliche Abnahme der Bleigehalte in der Humusaufgabe zwischen den Erhebungen 1989 und 2006. Da zudem infolge der zurückgegangenen Säureeinträge und der Bodenschutzkalkung eine Verringerung der Bodenversauerung in der Humusaufgabe und im oberen Mineralboden und damit in den besonders schwermetallreichen Bodenschichten erreicht wurde, dürfte die biologische Verfügbarkeit der Schwermetalle und damit ihr Schadpotential inzwischen merklich reduziert sein.

Für viele Ökosystemfunktionen, wie die Puffer- und Filterwirkung des Bodens und die Bereitstellung von Nährstoffen, ist die chemische Beschaffenheit des Bodenwassers von großer Bedeutung. Daher werden im forstlichen Umweltmonitoring in Rheinland-Pfalz an aktuell 14 Flächen mit Hilfe von Saugkerzen und Unterdrucksystemen Bodenwasserproben aus unterschiedlichen Bodentiefen gewonnen und chemisch analysiert. Die Flächen sind nicht gekalkt. An zwei Flächen wurden gesonderte Kalkungssparzellen eingerichtet.

An 6 der 14 Flächen zeigt die 20 bis 25 Jahre umfassende Zeitreihe einen leichten Anstieg des pH-Wertes, an den übrigen Flächen keinen Trend. Die Sulfatkonzentration ist überall deutlich gesunken. Die Nitratgehalte im Bodenwasser sind an 4 Flächen angestiegen und an einer Fläche gesunken. An den übrigen Flächen zeigen sich erheblich schwankende Nitratkonzentrationen ohne gerichteten Trend. Die Gehalte der als Kationen im Bodenwasser befindlichen Elemente Calcium, Kalium, Magnesium und Aluminium sind meist mehr oder minder deutlich gesunken. Dies dürfte im Wesentlichen auf der erheblichen Abnahme

der Konzentration der Sulfatanionen zurückzuführen sein. Das molare Verhältnis der Summe der Basekationen  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  und  $\text{K}^+$  zu  $\text{Al}^{+++}$ , ein Indikator für die Gefährdung von Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen durch Aluminiumtoxizität, ist meist unverändert geblieben und liegt an einigen Flächen nach wie vor im „Risikobereich“ (Werte  $<1$ ). Auf gekalkten Parzellen wurde demgegenüber der „Risikobereich“ wenige Monate nach der Kalkung verlassen.

Die Zeitreihen der Bodenwasseranalysen bestätigen somit die Befunde der Immissions- und Depositionsmessungen: Die Belastungen durch Schwefel sind zurückgegangen, nicht dagegen die Belastungen durch Stickstoff. Die Gefährdung der Ökosysteme durch Versauerung ist auf nicht gekalkten Flächen mit basenarmen Böden nach wie vor akut.

In der Zusammenschau belegen die bis zu drei Jahrzehnte umfassenden Zeitreihen des forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz eindeutig die Erfolge der Maßnahmen zur Emissionsminderung, weisen aber auch auf die noch bestehenden Defizite, vor allem in der Verringerung der Stickstoffemission und der Vorläufersubstanzen für Ozon hin.

Zur Reduzierung der Stickoxidemission im Verkehrsbereich sind weitere Maßnahmen bereits vorgesehen - etwa die Euro 6/VI-Norm für PKW/

LKW. In der Landwirtschaft sind zur Verringerung der Ammoniakemission die konsequente Anwendung der guten fachlichen Praxis und insbesondere die strikte Einhaltung der Vorschriften zur Ausbringung und Lagerung von Wirtschaftsdüngemitteln zwingend. Auch jeder Einzelne kann durch bewusste Ernährung, insbesondere eine sinnvolle Einschränkung des Fleischkonsums, zur Reduktion der Ammoniakemission beitragen. Auf versauerungsgefährdeten Standorten muss der Waldboden zudem weiterhin durch Bodenschutzkalkung geschützt werden. Dank der Abnahme der Säurebelastungen sind Kalkungen allerdings nicht mehr so häufig notwendig wie in den vergangenen Jahrzehnten. Zur Verringerung der Ozonbelastung muss der Ausstoß der Vorläufersubstanzen im Verkehrsbereich, bei der Verwendung von Lösemitteln, bei Industrieprozessen, im Gewerbe und in privaten Haushalten weiter gesenkt werden.

Trotz der bereits deutlich sichtbaren Erfolge dürfen die Anstrengungen zur weiteren Emissionsbegrenzung nicht nachlassen. Da sich Luftverunreinigungen grenzüberschreitend ausbreiten, gilt dies nicht nur für Deutschland: Die für 2010 festgelegten nationalen Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie 2001/81/EG vom 23.10.2001 sollten in allen europäischen Ländern mit ambitionierten Zielen fortgeschrieben werden.

Zeitreihen des pH-Wertes und der Konzentrationen von Sulfatschwefel, Nitratstickstoff, Calcium, Kalium, Magnesium, Aluminium sowie des Stressindikators BC/Al im Bodenwasser aus 60 cm Tiefe auf einer Kiefern-Buchen-Level II-Fläche (0707 Johanniskreuz) im Pfälzerwald

