

OZONBELASTUNG RHEINLAND-PFÄLZISCHER UND SAARLÄNDISCHER WALDÖKOSYSTEME



Die kurzfristigen Ozonspitzenwerte sind erfreulicherweise seit Jahren rückläufig. Dennoch sind unsere Wälder nach wie vor einer erhöhten langfristigen Ozonbelastung ausgesetzt. Daher sind Ozonmessungen integraler Bestandteil des Forstlichen Umweltmonitorings beider Länder. Neben der bisherigen konzentrationsbasierten Bewertung der Ozonmessungen wird nun auch der Ozonfluss in die Vegetationsorgane der Bäume kalkuliert. Hiermit können die physiologischen und toxikologischen Wirkungen des Ozons wesentlich besser nachgebildet werden. Die Befunde zeigen an allen Standorten eine erhebliche Überschreitung der Verträglichkeitsgrenzen (Critical Levels) und sind ein deutlicher Beleg für die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen zur Reduktion der Emission der Ozonvorläufersubstanzen Stickstoffoxide und flüchtige Kohlenwasserstoffe.

Das in der bodennahen Atmosphäre befindliche Ozon ist ein hoch phytotoxischer Luftschadstoff. Ozon (O_3) entsteht unter der Einwirkung der Sonneneinstrahlung aus Vorläufersubstanzen, im Wesentlichen aus Luftsauerstoff, Stickoxiden und flüchtigen Kohlenwasserstoffen. Entscheidend für die Ozonkonzentration ist nicht nur die Konzentration der Vorläufersubstanzen, sondern insbesondere auch der Witterungsverlauf. Hohe Ozonkonzentrationen sind daher vor allem in sonnenscheinreichen Sommern, wie beispielsweise im aktuellen Jahr, zu erwarten.

Es gibt eine Fülle von Belegen, dass Ozon auch an Bäumen Schäden verursacht. Diese O_3 -Effekte reichen von abnehmenden Blattchlorophyllgehalten und Photosyntheseraten, veränderter Wassernutzungseffizienz, vorzeitiger Blattseneszenz bis zu Veränderungen der Kohlenstoffallokation und einer Verringerung der Biomasseproduktion. Zum Teil treten auch mit bloßem Auge erkennbare Blattschäden auf. Letztlich dürften überhöhte Ozonbelastungen auch die Kohlenstoffspeicherung der Waldökosysteme und deren Biodiversität beeinflussen.

Zur Überwachung der Ozonbelastung unserer Wälder werden bereits seit langer Zeit die Ozonkonzentrationen in der bodennahen Atmosphäre im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings beider Länder gemessen. Hierzu werden zum einen sogenannte „Passivsammler“ und zum anderen auch kontinuierliche O_3 -Aktivmessungen an Waldmessstationen des rheinland-pfälzischen Zentralen Immissionsmessnetzes – ZIMEN – eingesetzt. Darüber hinaus werden an ausgewählten Standorten regelmäßig an den Blättern oder Nadeln der Bäume und an der Waldbodenvegetation sichtbare Ozonschäden begutachtet.

Zur Bewertung der Ozoneinwirkung auf die Waldbäume werden aus den gemessenen Ozonkonzentrationen verschiedene wirkungsbezogene Kennwerte hergeleitet, die mit „kritischen Werten – Critical Levels (CL)“ abgeglichen werden. Die CL basieren auf Dosis-Wirkungs-Beziehungen aus Feldexperimenten. Solche Critical Level werden im Übereinkommen der Vereinten Nationen über grenzüberschreitende Luftverunreinigungen

**Aufnahme von Ozonschadsymptomen
an einer LESS**

Foto J. Block

Umfassendere Informationen:

zu den Messflächen und den dortigen Messprogrammen:

Saarland: www.saarland.de/70484.htm

Rheinland-Pfalz: www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=3017

Zur Methodik der Passivsammler: [www.icp-forests.net/
page/icp-forests-manual](http://www.icp-forests.net/page/icp-forests-manual)

Zu den Ozonmessungen im ZIMEN: www.luft-rlp.de

Ozonmessungen im Forstlichen Umweltmonitoring

Saarland

Level II Dauerbeobachtungsfläche mit Passivsammlern: Fischbach, Eiche mit Buche, 320 m ü. NN

Rheinland-Pfalz

Dauerbeobachtungsflächen mit ZIMEN-Waldstation:

Umweltkontrollstation Idar-Oberstein (ZIMEN Hunsrück-Leisel); Fichte, 650 m ü. NN

Umweltkontrollstation Merzalben (ZIMEN Pfälzerwald-Hortenkopf), Eiche, 550m ü. NN

ForeStClim Merzalben (ZIMEN Pfälzerwald-Hortenkopf), Buche, 550m ü. NN

Schneifel (ZIMEN Westeifel-Wascheid), Fichte, 680 m ü. NN

Kirchen (ZIMEN Westerwald-Herdorf), Fichte, 480 m ü. NN

Neuhäusel (ZIMEN Westerwald-Neuhäusel), Buche, 540 m ü. NN

Dauerbeobachtungsflächen mit Passivsammlern:

Schaidt, Stieleiche, 129 m ü. NN

Adenau, Fichte, 600 m ü. NN

Messverfahren:

Mit Hilfe von Passivsammlern des Schwedischen Umweltinstituts (IVL) werden in der forstlichen Vegetationszeit (April bis September) 14-Tageswerte der Ozonkonzentration gemessen. Bei dieser auch für andere Luftschadstoffe geeigneten Methode werden kleine Container verwendet, die mit speziellen Chemikalien behandelte Filterblättchen enthalten, die von der (passiv) vorbeistreichenden Umgebungsluft mit Luftschadstoffen beladen werden. Nach einer Expositionszeit von zwei Wochen werden die Filterblättchen eingesammelt und im Labor analysiert. Aus den gespeicherten Stoffen bzw. den hiervon verursachten chemischen Reaktionen lässt sich auf die Durchschnittskonzentration der jeweiligen Luftschadstoffe während der Expositionszeit schließen. Über Korrelationen der mit Passivsammlern gemessenen 14-Tages- O_3 -Konzentrationen zu AOT40 Werten nahe gelegener kontinuierlich aktiv messender Ozonstationen wie im ZIMEN-Messnetz von Rheinland-Pfalz kann auch für Standorte mit O_3 -Passivsammlern der AOT40 abgeleitet werden.

An den ZIMEN-Stationen wird die Umgebungsluft (aktiv) angesaugt und in ein kontinuierlich die O_3 -Konzentration ermittelndes Analysegerät geleitet.



Passivsammlersystem an der saarländischen Station Fischbach Foto D. Hemmerling



ZIMEN-Messcontainer am Hortenkopf (Umweltkontrollstation Idar-Oberstein, Hunsrück)

Foto H. W. Schröck

(Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution – CLRTAP <http://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html>) verwendet. Das LRTAP-Übereinkommen benutzt die CL als politisches Instrument, um Bereiche der CL-Überschreitung in Europa zu identifizieren und anschließend in Strategien zur Emissionsminderung und zur Verbesserung der Luftqualität für Europa umzusetzen.

Zur Abschätzung der Ozonrisiken für Pflanzen stehen verschiedene Beurteilungsverfahren unterschiedlicher Komplexität zur Verfügung. Neben der bisherigen konzentrationsbasierten Bewertung der Ozonmessungen wird im Rahmen einer Kooperation mit dem Fachbereich VI, Geobotanik, der Universität Trier (Prof. Dr. Willy Werner) nun auch der Ozonfluss in die Vegetationsorgane der Bäume kalkuliert. Hiermit können die physiologischen und toxikologischen Wirkungen des Ozons wesentlich konkreter abgebildet werden.

Als Basis für die Herleitung aller wirkungsbezogenen Kennwerte zur Ozongefährdung von Waldbäumen werden auf den Kronenraum der Waldbäume bezogene Stundenwerte der Ozonkonzentration verwendet. Hierzu wird die standardgemäß in 3 m Höhe gemessene O₃-Konzentration mit Hilfe des Modells DO₃SE (Deposition of Ozone for Stomatal Exchange) in die Ozonkonzentration in Bestandeshöhe umgerechnet.

Gegenwärtig werden drei unterschiedliche Verfahren zur Einschätzung der Ozonbelastung unserer Wälder eingesetzt:

MPOC (Maximum Permissible Ozone Concentration)

Die MPOC-Methode nach Grünhage et al. (2001) bzw. VDI Richtlinie, 2310 Blatt 1 (2010) geht nur von der herrschenden Ozonkonzentration aus. Der Schutzstatus der Vegetation wird über Mittelwerte der Ozonkonzentration im Kronenbereich bei unterschiedlicher Zeitdauer (8 Stunden, 24 Stunden, 7 Tage, 30 Tage, 90 Tage und die gesamte Vegetationsperiode April bis einschließlich September) abgeschätzt. Artsspezifische Emp-

findlichkeiten werden dabei nicht berücksichtigt. Auch bleibt bei der MPOC-Bewertung unklar, welcher Art Schäden oder Verluste an Pflanzen auftreten (sichtbare Blattschäden, Ertragsverluste, Wachstumsreduktion, Qualitätsverluste). Bei diesem ausschließlich konzentrationsbasierten Ansatz ist zudem allenfalls eine Differenzierung in akute und chronische Ozoneinwirkung möglich.

Die Bewertung des Ozonrisikos nach der MPOC-Methode zeigt für die Mehrzahl der Jahre einen „weitgehenden Schutz“ der Waldbäume. Jedoch gibt es ozonreiche Jahre wie 2003 und 2006, in denen ein „steigendes Risiko“ eintritt. In keinem Jahr wird aber die Bewertungsstufe „dauerhafte Schäden“ erreicht. Die 8-Stunden und 24-Stunden-Mittel fallen meist in die Bewertungsstufen „maximaler“ oder „weitgehender Schutz“, während langfristige Mittel (30-Tagesmittel oder Mittel über die Vegetationsperiode), auch über mehrere Jahre hinweg Ozonrisiken durch chronische Wirkungen anzeigen. Die Zeitreihen belegen auch den vom Umweltbundesamt festgestellten allgemeinen Trend, dass die Spitzenbelastung durch Ozon in den letzten Jahren geringer geworden ist, sich aber die Mittelwerte der Ozonkonzentration nicht wesentlich verändert haben.

AOT40 (Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 parts per billion)

(Kumulierte Ozonbelastung oberhalb des Grenzwertes von 40 ppb)

Der AOT40 ist ein Index, der zur Beurteilung der Ozoneffekte alle Ozonkonzentrationen in der Kronenschicht über 40 ppb bei Tageslicht (Globalstrahlung über 50 W/m²) akkumuliert. Der Critical Level für Waldbäume ist im aktuellen CLRTAP-Manual auf 5 ppm·h (= 5.000 ppb·h) in der Zeitspanne einer Vegetationsperiode (April bis einschließlich September) festgelegt. Dieser Wert gilt für alle Waldbaumarten. Bei Buche wird die ozonbedingte Wachstumsreduktion bei Einhaltung dieses CL auf 5 % begrenzt (vgl. CLRTAP 2014). Der AOT40 berücksichtigt eine gewisse Entgiftungskapazität der Pflanze, weil erst Konzentrationen über 40 ppb in den Index einfließen. Da in den Index nur Ozonkonzentrationen bei

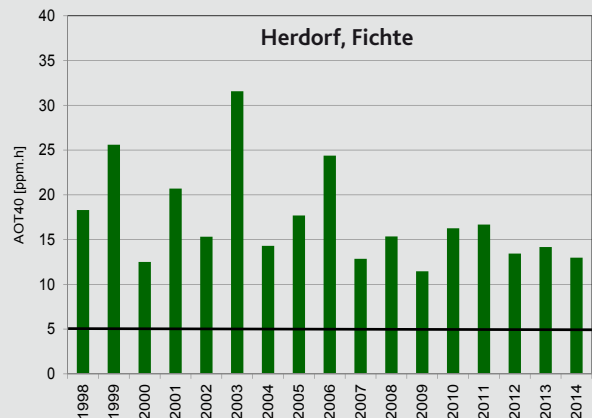
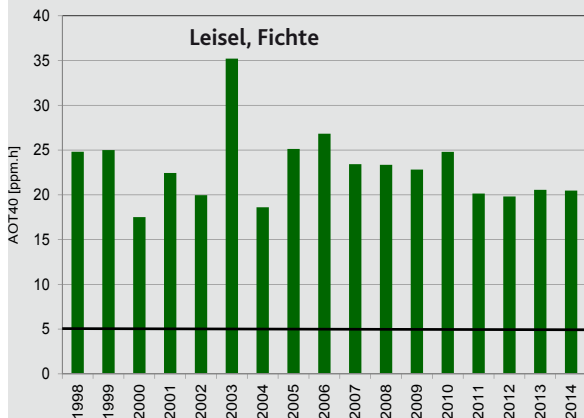
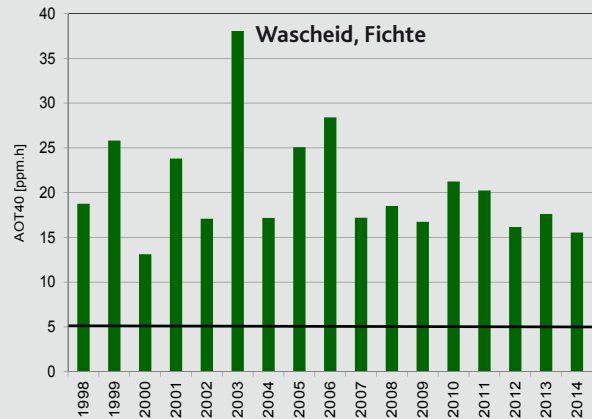
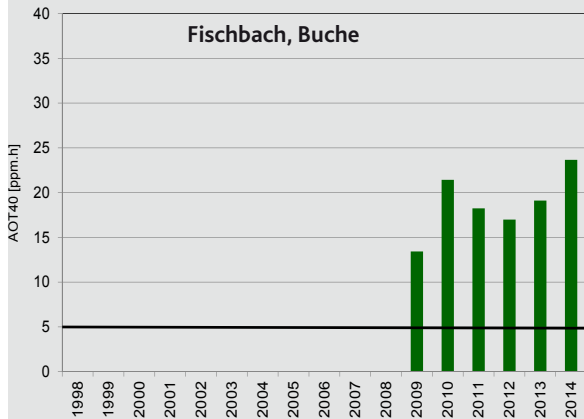
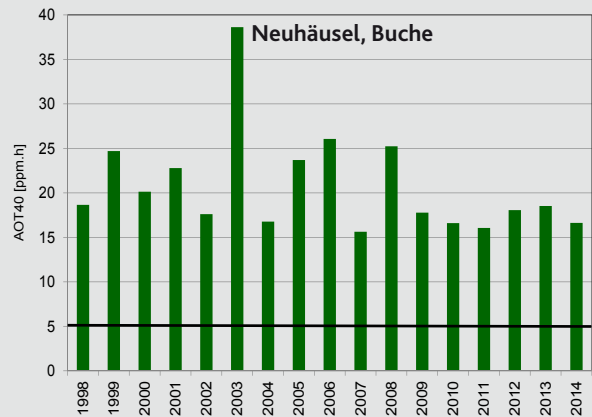
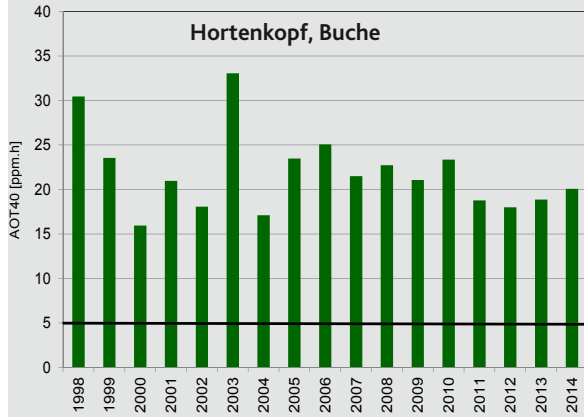
Ozon-Risikoabschätzung nach der MPOC-Methode für 6 Dauerbeobachtungsflächen mit ZIMEN-Waldstationen

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Herdorf (Fichte)																	
8 Stunden O ₃ -Mittel	123,3	100,5	87,4	106,0	93,5	122,4	90,8	104,0	112,4	91,1	90,0	91,0	99,7	88,6	100,0	83,6	84,0
24 Stunden O ₃ -Mittel	105,7	85,9	82,2	95,5	76,7	113,0	86,0	89,1	97,2	83,1	76,2	76,8	94,7	83,5	89,0	73,0	74,6
7 Tage O ₃ -Mittel	73,2	76,3	66,8	73,3	61,7	98,7	70,2	64,5	76,3	68,3	54,5	53,8	72,5	75,4	61,9	61,6	56,3
30 Tage O ₃ Mittel	53,5	52,9	50,1	50,7	46,6	66,9	51,5	50,5	62,8	54,9	54,5	45,2	60,0	60,7	48,3	50,4	47,5
90 Tage O ₃ -Mittel	43,1	49,0	44,3	46,4	44,2	55,7	41,5	44,7	53,3	46,1	45,7	41,6	46,1	47,3	40,3	42,3	42,4
April-September O ₃ -Mittel	39,6	45,5	37,6	41,1	39,8	49,0	38,4	39,9	43,7	37,6	38,1	38,0	39,1	39,8	38,8	38,4	37,7
Neuhäusel (Buche)																	
8 Stunden O ₃ -Mittel	126,5	96,9	102,0	118,7	93,8	144,0	95,9	112,2	118,6	93,7	111,6	97,6	101,0	87,0	104,3	92,5	97,5
24 Stunden O ₃ -Mittel	105,0	79,9	97,4	95,1	80,7	123,1	88,5	100,5	100,1	79,1	110,0	84,3	69,1	63,7	68,4	81,2	82,7
7 Tage O ₃ -Mittel	72,5	68,4	67,9	74,1	54,0	102,0	69,9	73,8	79,4	60,2	77,9	58,8	54,9	52,2	53,3	68,6	62,1
30 Tage O ₃ Mittel	59,6	52,3	51,9	51,8	46,6	72,8	53,2	57,4	63,9	49,1	56,3	48,1	48,1	42,3	41,2	55,9	52,1
90 Tage O ₃ -Mittel	51,6	48,8	45,5	47,7	43,4	60,3	44,0	49,1	54,9	44,9	49,5	44,5	37,1	37,9	37,3	46,7	46,5
April-September O ₃ -Mittel	39,4	44,3	40,2	41,5	40,4	52,0	40,3	43,5	43,4	39,1	44,4	41,7	30,6	31,4	33,8	42,0	40,8
Hortenkopf (Buche)																	
8 Stunden O ₃ -Mittel	121,2	87,3	97,7	98,4	88,5	113,5	95,8	100,3	104,3	97,8	95,9	85,9	104,7	90,7	106,3	93,8	100,7
24 Stunden O ₃ -Mittel	110,6	80,4	83,4	84,0	83,3	106,3	89,0	91,4	91,9	89,9	80,5	77,9	95,4	77,3	100,9	82,2	99,9
7 Tage O ₃ -Mittel	84,5	80,4	63,0	68,2	58,5	90,4	75,0	72,4	78,0	73,2	67,1	65,1	75,5	69,4	69,5	64,9	64,5
30 Tage O ₃ Mittel	64,7	51,9	48,7	50,2	48,4	68,6	55,7	56,7	64,3	57,5	56,6	52,7	63,7	57,8	52,5	55,6	55,6
90 Tage O ₃ -Mittel	53,3	48,6	45,3	48,5	45,8	45,8	46,2	49,6	54,0	51,2	51,4	49,1	51,7	48,9	45,0	47,8	50,2
April-September O ₃ -Mittel	50,0	45,6	40,3	43,1	43,0	51,5	41,9	45,2	46,0	44,4	44,4	45,4	45,2	43,2	43,3	43,4	45,1
Hortenkopf (Eiche-Buche)																	
8 Stunden O ₃ -Mittel	121,9	87,4	99,0	98,8	89,4	112,0	96,5	100,2	104,7	95,0	96,0	84,9	102,1	89,9	106,2	93,2	101,0
24 Stunden O ₃ -Mittel	111,3	80,1	84,4	85,3	84,1	104,9	89,3	91,2	91,5	87,8	79,6	77,2	93,6	78,1	100,8	83,6	100,1
7 Tage O ₃ -Mittel	85,3	74,4	63,8	69,1	59,2	89,4	75,5	72,3	78,1	72,0	66,4	64,8	75,0	68,9	70,0	66,3	64,4
30 Tage O ₃ Mittel	65,4	52,5	49,3	50,8	49,0	68,1	56,0	56,7	64,3	57,0	55,7	52,4	63,2	57,5	52,8	56,3	55,8
90 Tage O ₃ -Mittel	53,7	49,2	45,7	49,0	46,3	57,7	46,4	49,5	54,1	50,9	51,0	48,9	51,1	48,7	45,1	48,3	50,3
April-September O ₃ -Mittel	50,4	45,9	40,7	43,5	43,4	51,1	42,0	45,0	46,0	44,0	44,0	45,1	44,7	43,1	43,3	43,7	45,1
Leisel (Fichte)																	
8 Stunden O ₃ -Mittel	105,2	87,0	97,0	98,2	89,2	113,5	95,4	100,9	103,9	101,0	96,7	85,5	104,9	90,2	106,2	93,0	86,0
24 Stunden O ₃ -Mittel	100,1	81,2	84,1	85,6	84,1	106,3	89,8	92,6	93,0	92,6	80,5	78,1	95,3	80,9	102,2	84,3	79,7
7 Tage O ₃ -Mittel	74,5	73,3	63,9	69,2	59,3	90,4	75,8	73,1	78,7	76,0	57,4	65,9	76,2	72,3	70,9	66,8	64,4
30 Tage O ₃ Mittel	57,5	52,5	49,7	51,1	49,3	68,6	56,3	57,5	64,9	59,2	57,4	53,3	64,3	59,1	53,7	56,7	54,8
90 Tage O ₃ -Mittel	48,5	49,5	46,3	49,3	46,7	57,9	46,9	50,5	54,9	52,4	51,7	49,8	52,4	49,6	45,9	48,8	49,2
April-September O ₃ -Mittel	45,3	46,4	41,2	44,0	43,9	51,5	42,7	46,0	46,8	45,3	44,8	46,1	45,8	43,8	44,3	44,3	44,0
Warscheid (Fichte)																	
8 Stunden O ₃ -Mittel	109,3	96,4	94,1	112,0	91,6	137,7	83,0	105,5	113,9	98,8	96,5	88,9	97,3	90,8	108,4	89,8	85,6
24 Stunden O ₃ -Mittel	97,4	84,2	83,8	98,6	87,1	120,7	75,8	97,0	97,4	93,1	86,3	77,8	89,6	86,5	98,5	78,6	77,6
7 Tage O ₃ -Mittel	77,3	73,8	56,6	74,0	59,6	101,1	62,9	71,8	78,8	76,5	68,6	60,1	73,8	78,8	68,8	62,7	60,8
30 Tage O ₃ Mittel	56,9	54,5	46,0	52,7	48,9	71,3	47,9	56,5	64,8	58,7	56,5	47,7	61,1	63,3	49,9	52,3	50,8
90 Tage O ₃ -Mittel	47,2	50,5	40,5	50,0	46,4	59,4	45,4	50,4	55,9	49,6	48,4	46,0	49,4	50,5	43,2	44,5	44,9
April-September O ₃ -Mittel	42,9	47,5	38,8	45,2	43,3	53,2	42,5	45,3	47,2	41,5	41,7	42,1	42,8	43,5	41,2	41,6	40,6

	max. möglicher Schutz	weitgehender Schutz	steigendes Risiko mit der Zeit (z.B. > 3 Jahre)	Überschreitung führt zu dauerhaften Schäden
8 Stunden O ₃ -Mittel	<92	92-164	165-295	>295
24 Stunden O ₃ -Mittel	<74	74-130	131-229	>229
7 Tage O ₃ -Mittel	<50	50-86	87-148	>148
30 Tage O ₃ -Mittel	<37	37-63	64-108	>108
90 Tage O ₃ -Mittel	<29	29-50	51-86	>86
April-September O ₃ -Mittel	<25	25-43	44-74	>74

nach Grünhage et al. (2011)

Ozon-Risikoabschätzung mit dem AOT40-Index für 6 Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz und im Saarland; die durchgezogene Linie markiert den Critical Level von 5ppm·h



Bei einer Lufttemperatur von 20°C entspricht 1 ppb Ozon etwa 2 µg Ozon je Kubikmeter Luft.

Tageslicht einfließen, wird auch berücksichtigt, dass ohne Licht die Spaltöffnungen weitgehend geschlossen sind und kein Ozon in das Blatt eindringen kann.

Die für die Waldmessstationen beider Länder ermittelten AOT40-Werte liegen zwischen 13 und 38 ppm·h und überschreiten damit an allen Flächen und in allen Jahren den kritischen Level von 5ppm·h überaus deutlich. Die Höhe des jeweiligen AOT40 wird durch die Ozonkonzentration bestimmt. Die höchsten Werte sind demzufolge auf allen Flächen im ozonreichsten Jahr 2003 zu finden, gefolgt von 1998, 2006 und 2010. Die niedrigsten AOT40-Werte zeigen die Jahre 2000, 2011 und 2012. Die Überschreitung des kritischen Levels für AOT40 erfolgt bei allen Waldbaumarten zwischen Anfang Mai und Anfang Juni, also 20 bis 40 Tage nach dem Blattaustrieb der Buche bzw. Eiche. Dies ist sehr früh und kann, wenn die Verteidigungsmöglichkeit des Baumes zum Beispiel durch Entgiftung des Ozons, Kompensationswachstum usw. nicht hinreichend ist, zu Schäden wie reduzierter Biomasseproduktion bei Spross und Wurzeln oder eingeschränkter Fruktifikation führen. Die Überschreitung liegt im Mittel der Zeitreihen zwischen dem Zwei- und Fünffachen des Critical Levels und kann in ozonreichen Jahren wie 2003 beim Sechs- bis nahezu Achtfachen liegen. Dem aktuellen Kenntnisstand der AOT-bezogenen Dosis-Wirkungsbeziehungen zufolge lassen sich bei den für die Waldgebiete

in Rheinland-Pfalz und im Saarland ermittelten hohen AOT40 Überschreitungen jährliche ozonbedingte Wachstumseinbußen der Waldbäume zwischen 10 bis 20 % schlussfolgern.

POD_y (Phytotoxic Ozone Dose)

Gegenüber den vorstehend beschriebenen konzentrationsbasierten Ansätzen erfolgt beim Indikator POD_y eine Kalkulation des Ozonflusses in die Pflanze. Der Ozonfluss umfasst die Menge Ozon, die im Rahmen des Gaswechsels durch die Spaltöffnungen in die Pflanze eindringt und im ungeschützten Blattgewebe seine Oxidationskraft entfalten kann. Hiermit werden die physiologischen und toxikologischen Wirkungen des Ozons wesentlich besser abgebildet als über die konzentrationsbasierten Ansätze. Beim POD_y handelt es sich um die mathematische Abschätzung des Ozonflusses in die Blätter, also um die tatsächliche Ozondosis oberhalb eines Ozonschwellenwertes y [$\text{nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], der die Pflanze ausgesetzt ist. Der Schwellenwert repräsentiert die Entgiftungskapazität der Pflanzenart. Der resultierende Fluss wird über die Vegetationsperiode zum POD_y akkumuliert, für die im CLRTAP-Manual Critical Level definiert sind. Für die Buche (*Fagus sylvatica*) ist aktuell ein POD₁ von $4 \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA}$ (zur Sonne ausgerichtete Blattfläche - Projected Leaf Area - PLA) und für die Fichte (*Picea abies*) $8 \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA}$ vorgegeben. Bei Einhaltung der Critical Level soll die ozonbedingte Wachstumsreduktion bezogen auf

Die in diesem Kapitel enthaltenen AOT40- und POD_y-Kalkulationen und -Bewertungen basieren auf:

CLRTAP (2014): Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Entwurf August 2014)
http://icpvegetation.ceh.ac.uk/publications/documents/Updatedchapter3_formattedSep2014.pdf

Berechnung POD_y mit DO₃SE (Deposition of Ozone for Stomatal Exchange):
<http://sei-international.org/do3se>

die gesamte Biomasseproduktion bei Buche auf maximal 4 %, bei Fichte auf maximal 2 % beschränkt werden.

Zur Berechnung des POD_y wurde für die hiesigen Messstationen das Programm DO_3SE (Deposition of O_3 Stomata Exchange) verwendet. Für die POD_y -Kalkulationen mit DO_3SE ist eine umfangreiche Datenbasis erforderlich, u. a. die Stundenmittel der Ozonkonzentration [ppm], der Lufttemperatur [°C], der Globalstrahlung [$W m^{-2}$], der Windgeschwindigkeit [ms^{-1}], des Wasserdampf-sättigungsdefizits der Luft [kPa], des Luftdrucks [kPa] und die Stundensummen des Niederschlags [mm], sowie Daten zur geographischen Lage, die Messhöhe von Ozon und der meteorologischen Größen und ihre Referenzhöhen zur Umrechnung der Ozonkonzentration von Messhöhe in Bestandeshöhe. Für die Angabe der Wassernachlieferung aus dem Boden ist bei DO_3SE ein Bodenwasserhaushaltsmodell integriert, welches Angaben zur Bodenart, zur Messtiefe des Bodenwassers, zur Durchwurzelungstiefe, zur Bestandeshöhe und zum Blattflächenindex benötigt. Da nicht für alle Stationen und Jahre phänologische Beobachtungen vorlagen, wurde für den Start und das Ende der Vegetationsperiode das Latitude Modell von EMEP benutzt.

Für die jeweilige Vegetationsperiode (Akkumulationszeitraum) werden stündliche Werte der O_3 -Konzentration und der jeweiligen aktuellen stomatären Leitfähigkeit für Ozon hergeleitet und miteinander zum Ozonfluss multipliziert. Danach wird der die Entgiftungskapazität der jeweiligen Pflanzenart übersteigende Anteil des O_3 -Flusses über die Vegetationsperiode zum POD_y akkumuliert.

Die stomatäre Blattleitfähigkeit wird vor allem durch das Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft, die Lufttemperatur, die Lichtintensität (Photonenflussdichte berechnet aus der Globalstrahlung) und die Bodenwasserverfügbarkeit beeinflusst. Darüber hinaus wird auch der Entwicklungszustand der Blätter in Abhängigkeit vom julianischen Datum (Tag im Jahr) berücksichtigt. Die maximale und minimale Leitfähigkeit, die Abhängigkeit der Blattleitfähigkeit von Licht,

Temperatur und Wasserdampf-sättigungsdefizit sowie die Blattfläche werden baumartenspezifisch differenziert. Ein direkter Einfluss von Ozon auf den Spaltenschluss konnte bei Waldbäumen demgegenüber nicht nachgewiesen werden und wird deshalb nicht berücksichtigt (CLRTAP 2014).

POD₁-Befunde, Buche Pfälzerwald

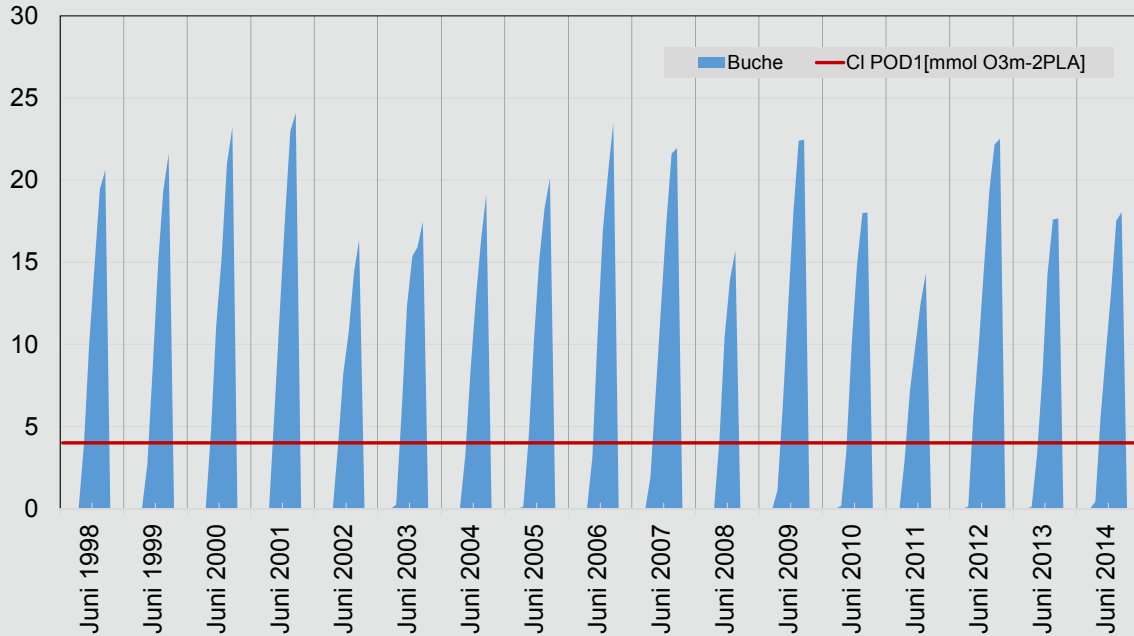
Die Ergebnisse der Ozonflusskalkulationen werden am Beispiel eines Buchenbestandes im Pfälzerwald (ForeStClim-Fläche Merzalben, ZIMEN-Station Hortenkopf) erörtert:

Die phytotoxische Ozondosis (POD_1) als akkumulierte Ozonflüsse über einem Schwellenwert von $1 \text{ nmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ variieren in der Zeitreihe 1998 bis 2014 zwischen 14 (2011) und 24 (2001) $\text{mmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA}$. Der kritische Wert ($CL \text{ } POD_1 = 4 \text{ mmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA}$) wird in allen Jahren schon im Mai/Juni überschritten, zum Ende der Vegetationsperiode um das 4- bis 7-Fache. Nach den in CLRTAP (2014) dargelegten Dosis-Wirkungs-Beziehungen sind bei diesen POD_1 -Werten jährliche ozonbedingte Wachstumseinbußen zwischen 10 und 20 % zu erwarten.

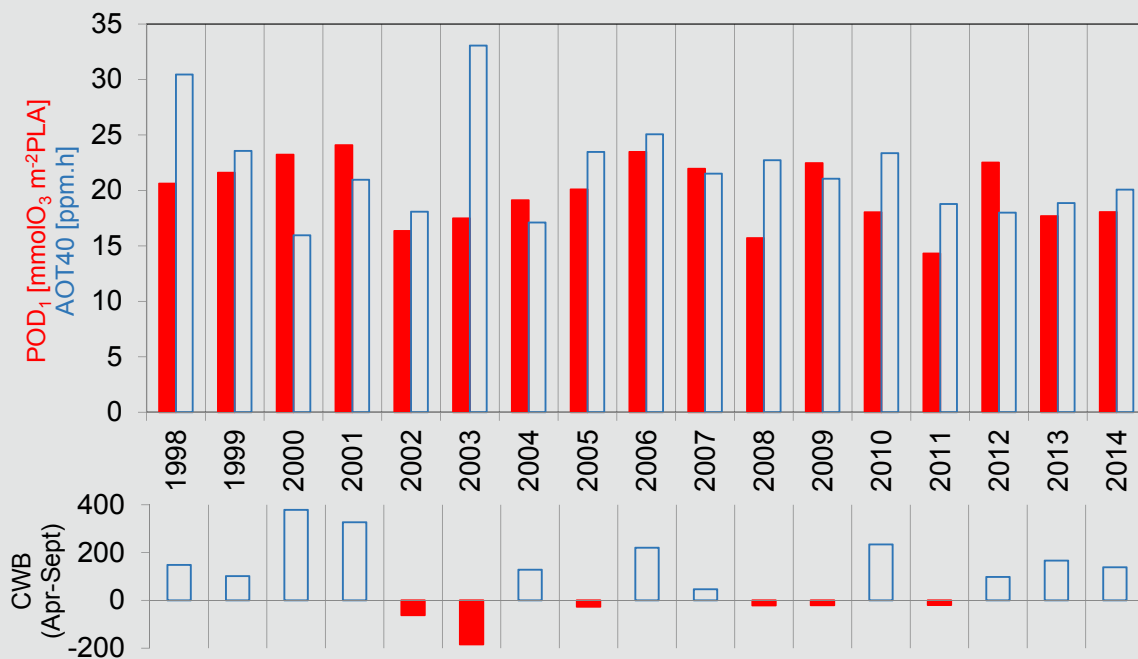
Jahre mit Trockenperioden (2002, 2003, 2008, 2011) weisen geringere POD -Werte auf als Jahre mit geringerem Wasserstress (2000, 2001, 2006, 2014). In Jahren mit feuchterer Witterung können die Spaltöffnungen aufgrund des geringeren Wasserdampf-sättigungsdefizits als auch der höheren Vorräte an pflanzenverfügbarem Wasser im Boden länger geöffnet werden. Somit erfolgt in diesen Jahren ein intensiver Gaswechsel inklusive des Einstroms von Ozon mit der Folge höherer POD_1 trotz vergleichsweise niedriger O_3 -Konzentrationen. In den trocken-heißen ozonreichen Jahren fällt die POD demgegenüber wesentlich geringer aus als es die konzentrationsbasierten Indizes (MPOC, AOT40) glauben lassen.

Zwischen der klimatischen Wasserbilanz der Monate April bis September und den POD_1 im gleichen Zeitraum zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang: Bei besserer klimatischer Wasserbilanz steigt die phytotoxische Ozondosis an. Die Beurteilung des Ozonstresses darf daher nicht allein auf Ozonkonzentrationen beruhen,

Zeitreihe der Phytotoxischen Ozon Dosis (POD_1 in $mmol\ O_3\ m^{-2}\ PLA$) für den Buchenbestand Merzalben (ZIMEN Hortenkopf). In den jeweiligen Jahren sind die monatlich aufsummierten POD_1 -Werte dargestellt. Die rote Linie markiert den Critical Level von $4\ mmol\ O_3\ m^{-2}\ PLA$



Über die Vegetationszeit aufsummierte phytotoxische Ozondosis (POD_1 in $mmol\ O_3\ m^{-2}\ PLA$) für den Buchenbestand Merzalben im Vergleich zu den AOT40-Werten in $ppm\cdot h$; im unteren Teil der Abbildung ist die klimatische Wasserbilanz (CWB in $l\ m^{-2}$) April bis September der jeweiligen Jahre dargestellt



sondern muss mit dem Gaswechselgeschehen (Transpiration und Photosynthese) in Verbindung gebracht werden. Bei Wasserstress, der vor allem in trocken-heißen Sommern mit hohem Ozonbildungspotential häufig ist, schließen die Blätter die Spaltöffnungen so weit als möglich, um Wasserverluste durch Transpiration zu vermeiden. Das unterdrückt auch den Ozonfluss ins Blattgewebe. Damit sind trocken-heiße Jahre mit besonders hohen Ozonkonzentrationen nicht zwingend auch Jahre mit hohen Ozonschäden.

Vergleicht man den Anstieg des AOT40 und des POD_1 innerhalb der Vegetationsperiode in trockenen und feuchten Jahren, können verschiedene Ozon-Belastungswege unterschieden werden. In trocken-heißen ozonreichen Jahren (wie z.B. 2003 oder 1998) wird die stomatare Leitfähigkeit durch Wassermangel so weit unterdrückt, dass die AOT40 Werte erheblich schneller ansteigen als der akkumulierte Ozonfluss POD_1 . Der Anstieg in den Frühjahrestagen ist noch sehr ähnlich, danach wird aber durch trockenheitsbedingten Schluss der Spaltöffnungen der Ozonfluss in das Blatt gemindert und der Anstieg des POD_1 gebremst. Anders in nassfeuchten ozonarmen Jahren wie z.B. 1999, 2000 und 2001. Hier steigt der POD_1 schneller als der AOT40. In diesen Jahren sind es vor allem die niedrigen Ozonkonzentrationen unter 40 ppb, die den AOT40 Index nicht ansteigen lassen, während dies beim POD_1 der Fall ist, da weiter Ozon durch die weit geöffneten Spaltöffnungen in die Blätter einfließt.

Weiterer Forschungsbedarf

Die Kalkulation der Ozonkennwerte, insbesondere der phytotoxischen Ozondosis ist sehr komplex. Die Befunde werden durch eine Reihe von Annahmen beeinflusst, die weiterer Untersuchungen bedürfen. Einen großen Einfluss auf die Bewertung des Ozonrisikos hat die Entgiftungskapazität der Pflanzen. Um Ozon oder im Rahmen der Photosynthese bei überschüssigem Licht auftretende Sauerstoffradikale zu entgiften, bildet die Pflanze Antioxidantien (Ascorbinsäure, Polyphenole, Flavonoide, Carotinoide, Enzyme wie Superoxid-dismutase, Glutathionperoxidase). Aber in welchem Ausmaß die verschiedenen Baumarten und

Genotypen hierzu in der Lage sind, ist noch unzureichend bekannt. Wenig erforscht ist auch, wie sich die Erfordernis der Ozonentgiftung und die Antioxidantienbildung auf andere Lebensansprüche der Pflanze, zum Beispiel ihre Fitness und ihre Befähigung Gegenspieler wie Pilze abzuwehren auswirkt. Denn die Investition in Antioxidantien verbraucht Energie, die ohne Antioxidantien in andere Lebensvorgänge (Wachstum, Fruktifikation, Abwehr) investiert werden könnte.

Beim AOT40 wird von Belastungen erst ab Konzentrationen von 40 ppb ausgegangen, wobei die Pflanze aber auch das bei niedrigeren Konzentrationen über die Spaltöffnungen eindringende Ozon entgiften muss. Bei der POD_y -Kalkulation wird die Ozonentgiftungskapazität konventionell auf $1 \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gesetzt. Gegenwärtig wird diskutiert, dass dies möglicherweise für die Buche zu niedrig ist.

Die den Critical Levels der Kennwerte AOT40 und POD_y zugrunde liegenden Dosis-Wirkungs-Beziehungen beruhen im Wesentlichen auf der Reaktion relativ junger Bäume. Zwar gibt es Hinweise, dass auch erwachsene Bäume ebenso empfindlich auf Ozon reagieren, doch sind derartige Untersuchungen sehr aufwändig und entsprechend rar. Auch die artenspezifische maximale Leitfähigkeit bedarf weiterer Untersuchungen. Daher muss die Kalkulation der Ozonbelastungsindikatoren beständig an den jeweiligen Wissensstand angepasst werden.

Eine eingehendere Darstellung der zur Schätzung der Ozonbelastung der rheinland-pfälzischen und saarländischen Wälder angewendeten Methodik, der einschlägigen Literatur sowie weitere Befunde und Bewertungen finden Sie unter: https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb6/prof/GEB/Lehre/OzonBericht_2015_Langfassung.pdf



An den hiesigen Waldmessstationen wird auch das Wachstum der Waldbestände erfasst. In einem weiteren Arbeitsschritt ist daher vorgesehen, die errechneten Ozonflüsse mit den Zuwachsdaten der Bestände abzugleichen, wobei auch der Schwellenwert von $1 \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zu überprüfen ist.

Sichtbare Ozonschäden

Hohe Ozonbelastungen führen an den Blättern oder Nadeln der Waldbäume und Waldbodenvegetation zu charakteristischen, zum Teil schon mit bloßem Auge erkennbaren Schadsymptomen. Für Ozoneinwirkungen typisch sind je nach Pflanzenart und Stärke der Schädigung hellgrüne bis olivfarbene oder braune Punkte zwischen den Blattnerven auf der Blattoberfläche, die später zu größeren Nekrosen zusammenwachsen können. Unter dem Mikroskop erkennt man, dass die Köpfe des Palisadenparenchyms durch phenolische Einlagerungen dunkel verfärbt sind. Meist ist ein deutlicher „Schatteneffekt“ zu erkennen: die Schäden treten nur an sonnenexponierten Blattflächen, nicht aber an durch darüberliegende Blätter beschatteten Blattbereichen auf (siehe Kasten „Sichtbare Ozonschäden“). Der Schatteneffekt und die Beschränkung der Schadsymptome punktförmig (um Spaltöffnungshöfe) auf die Blattoberseite zwischen den Blattvenen (nicht auf den Leitbündeln, Blattnerven) dienen zur Unterscheidung von ozonbedingten Schäden von

anderen Ursachen (Milben, Blattpilze, Seneszenzerscheinungen). An Nadelbäumen verursacht Ozon helle punktförmige Verfärbungen an der besonnten Nadelseite vorjähriger Nadeln.

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings werden sichtbare Ozonschäden zum einen an den für Nährstoffanalysen im Juli gewonnenen Zweigen aus der Oberkrone der Waldbäume und zum anderen an sogenannten LESS („Light Exposed Sampling Site“) nach der im ICP-Forest-Manual (2010, Part VIII „Assessment of Ozone Injury“) beschriebenen Methodik erhoben. Die LESS ist ein entlang eines Südsüdwest exponierten Waldrandes angelegter 1 m breiter und 100 m langer, in Parzellen unterteilter Streifen, in dem die Blätter/Nadeln holziger und krautiger Pflanzen nach vorgegebenen Schlüsseln auf Ozonschadsymptome begutachtet werden. Bei beiden Verfahren werden Zweifelsfälle mikroskopisch überprüft. In Rheinland-Pfalz wurden bei den Blattprobenahmen aus der Lichtkrone in den Jahren 2001, 2003, 2007, 2010 und 2015 jeweils auf der Fläche Neuhäusel Ozonschadsymptome an Buchenblättern, 2001 auch an Eichenblättern der Fläche Merzalben gefunden. Im Saarland wurden an der Fläche Fischbach 2015 Ozonsymptome an Buchenblättern der Lichtkrone und in den Jahren 2011, 2013, 2014 und 2015 an Buchenblättern auf der LESS gefunden. Im aktuellen Jahr (2015) waren die Schäden auf der LESS besonders deutlich.

Sichtbare Ozonschäden

Nach starken Ozoneinwirkungen sind an den Blättern der Waldbäume und der Waldbodenvegetation schon mit bloßem Auge charakteristische Ozon-Schadsymptome an der Blattoberseite zu erkennen. Sie treten an älteren Blättern häufiger auf als an jungen Blättern:



Deutliche Ozonschadsymptome Mitte August 2015 an Spitzahorn, Hartriegel und Hainbuche am Antonihof (Nähe Trippstadt)

Foto C. Lemmen



Beschattungseffekt bei Ozonschadsymptomen an Buche, LESS-Fläche Fischbach, aufgenommen am 4. September 2014: Das mit einem beigeen Pfeil gekennzeichnete Blatt wurde unter das vorherstehende Blatt gesteckt, um den Schatteneffekt zu demonstrieren. Die überdeckte und somit nicht so stark lichtexponierte Fläche ist wesentlich intensiver grün gefärbt. Die stärker der Strahlung exponierten Blattteile (lila Pfeil) sind bronziert. Dies sind typische Zeichen für den Einfluss von Photoxidantien, dessen Leitstoff Ozon ist.

Foto W. Werner

200-fache mikroskopische Vergrößerung (Auflicht) eines Blattstückes (wie unten links aus dem Blatt getrennt) mit Bronzierungen. Es sind braune und schwarze Punkte zu erkennen. Dies sind die Enden von Palisadenparenchymzellen, in denen als Einfluss von Photoxidantien Phenole abgelagert wurden.

Foto W. Werner

