

# **Ozonbelastung rheinland-pfälzischer und saarländischer Waldökosysteme**

## **Ausführlicher Bericht über die Datengrundlage und Berechnung von Bewertungskriterien des Einflusses troposphärischen Ozons auf Waldökosysteme**

**Willy Werner, Universität Trier, Fachbereich VI Raum- und Umweltwissenschaften, Fach Geobotanik**

### **1. Einleitung**

Es gibt viele Belege, dass Ozon (O<sub>3</sub>) Schäden an Bäumen verursacht (Wittig et al., 2009; Matussek et al., 2010). Diese O<sub>3</sub>-Effekte reichen von Auswirkungen wie sichtbare Blattschäden (Schaub, 2005), abnehmendem Blattchlorophyllgehalt und Fotosyntheseraten (Wittig et al., 2009), Veränderungen der Kohlenstoffallokation (Paoletti et al., 2009) und die Biomasseproduktion (Wittig et al., 2009), vorzeitige Blattseneszenz (Pell et al., 1999), und veränderte Baumwassernutzung (Sun et al., 2012). Durch Kenntnis des O<sub>3</sub> Flusses in das Blatt (abhängig von der stomatären Blattleitfähigkeit und der blattumhüllenden Ozonkonzentration) können basierend auf Dosis-Wirkungs-Beziehungen aus Feldexperimenten kritische Werte (CL) abgeleitet werden.

Solche Critical Level werden im Übereinkommen der Vereinten Nationen über Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention, 2010) verwendet. Die LRTAP Convention benutzt die CL als politisches Instrument, um Bereiche der CL Überschreitung über Europa zu identifizieren und anschließend in Strategien zur Emissionsminderung und zur Verbesserung der Luftqualität für Europa umzusetzen.

### **2. Material und Methoden**

#### **2.1 Ozonbewertung**

Für die Bewertung des Ozoneinflusses liegt es nahe, die Ozonkonzentration heranzuziehen.

Dabei muss als erster Schritt die standardgemäß in 3 m Höhe gemessene O<sub>3</sub>-Konzentration (unter Berücksichtigung des atmosphärischen Widerstandes, des Grenzschichtwiderstandes und des Oberflächenwiderstandes in Abhängigkeit von der Messhöhe der Windgeschwindigkeit) in die Ozonkonzentration im Kronenraum umgerechnet werden. Mit dieser Konzentration auf Stundenbasis lassen sich dann die Beurteilungsverfahren für die Ozongefährdung anwenden. Diese Berechnung wird durch das angewendete Modell DO<sub>3</sub>SE (Büker et al. 2012, s. auch Emberson et al. 2000a und 2000b) durchgeführt, so dass die Ozonkonzentration in Bestandhöhe dem Outputfile zu entnehmen sind. Alle in der

vorliegenden Arbeit genannten und angewendeten Ozonkonzentrationen beziehen sich auf diese Umrechnung.

Toxikologisch exakt wird die Bewertung aber erst, wenn der Ozonfluss bekannt ist. 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. Zur Zeit werden in Deutschland drei verschiedene Beurteilungsverfahren unterschiedlicher Komplexität für die Bewertung der Wirkung von Ozon angewendet.

Die Bewertung, die nur von der herrschenden Ozonkonzentration ausgeht, ist die MPOC-Methode (Maximum Permissible Ozone Concentration; Grünhage et al. (2001) und VDI Richtlinie, 2310 Blatt 1 (2010)). Im Rahmen dieser MPOC-Bewertung wird der Schutzstatus der Vegetation über Mittelwerte unterschiedlicher Zeitdauer (8 Stunden, 24 Stunden, 7 Tage, 30 Tage, 90 Tage und die gesamte Vegetationsperiode April bis einschließlich September) der Ozonkonzentrationen im Kronenbereich abgeschätzt. Artspezifische Empfindlichkeiten werden nicht berücksichtigt, allenfalls sind Unterschiede in akuter und chronischer Ozoneinwirkung festzustellen.

Bewertungsmaßstäbe innerhalb Europas und der UNECE werden durch die Beurteilung mit Hilfe des AOT40 und des Ozonflusses PODy gesetzt. Die Berechnung und die Beurteilungskriterien nach sogenannten Critical Levels werden im Mapping Manual (LRTAP Convention 2014; herunterzuladen unter:

[http://icpvegetation.ceh.ac.uk/publications/documents/Updatedchapter3\\_formattedSep2014.pdf](http://icpvegetation.ceh.ac.uk/publications/documents/Updatedchapter3_formattedSep2014.pdf))

detailliert beschrieben.

Der AOT40 ist ein Index, der zur Beurteilung der Ozoneffekte alle Ozonkonzentrationen in der Kronenschicht über 40 ppb bei Tageslicht (Globalstrahlung über  $5 \text{ Wm}^{-2}$ ) akkumuliert (Fuhrer et al. 1997). Die Critical Level (CL) für Waldbäume werden in der Zeitspanne einer Vegetationsperiode (April bis einschließlich September) auf  $5 \text{ ppm.h} = 50000 \text{ ppb.h}$  für alle Waldbaumarten festgelegt (s. LRTAP Convention, 2014).

Der AOT40 berücksichtigt eine gewisse Entgiftungskapazität der Pflanze, weil erst Konzentrationen über 40 ppb in den Index einfließen und berücksichtigt auch, dass ohne Licht die Spaltöffnungen weitgehend geschlossen sind und kein Ozon in das Blatt eindringen kann. Deshalb fließen bei dieser Bewertung nur Ozonkonzentrationen über 40 ppb bei Tageslicht ein.

Bei der Abschätzung des PODy handelt es sich um die mathematische Abschätzung des Ozonflusses in die Blätter, also um die tatsächliche Ozondosis oberhalb eines Ozonschwellenwertes  $y$  [ $\text{nmol O}_3 \text{ m}^{-2}$ ], der die Pflanze ausgesetzt ist. Dieser Fluss berechnet sich aus der Leitfähigkeit der Blätter gegenüber dem Ozon und der blattumhüllenden Ozonkonzentration. Der Schwellenwert repräsentiert die Entgiftungskapazität der Pflanzenart, der resultierende Fluss wird über die Vegetationsperiode zum PODy akkumuliert, für die im

Mapping Manual Critical Level definiert sind (Braun & Flückinger 1995, Uddling et al. 2004, Karlsson et al. 2003, Karlsson et al. 2004, Karlsson et al. 2006, Mills et al. 2011).

Für die Buche (*Fagus sylvatica*) ist zur Zeit ein  $POD_1$  von 4 mmol  $O_3$  m<sup>-2</sup> PLA (Kriterium 4% jährliche totale Biomassenreduktion) und für die Fichte (*Picea abies*) 8 mmol  $O_3$  m<sup>-2</sup> PLA (Kriterium 2% jährliche totale Biomassereduktion) festgeschrieben (LRTAP Convention 2014).

Zur Berechnung des  $POD_y$  wird das Programm  $DO_3SE$  eingesetzt. Dies ist von der Seite des SEI-International (link auf der ICP Vegetation Seite: <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/> unter der Adresse: <http://sei-international.org/do3se> nebst Manual herunterzuladen.

Als Input zur Berechnung (Modell antreibende Daten) wurden folgende Daten benutzt:

Tag, Monat, Jahr, Tag im Jahr, Uhrzeit (0-23, Stunde),  
Stundenmittel der Lufttemperatur [°C], Stundesummen des Niederschlag [mm],  
Stundenmittel der Globalstrahlung [Wm<sup>-2</sup>], der Windgeschwindigkeit [ms<sup>-1</sup>], des  
Wasserdampfsättigungsdefizits der Luft (vpd in [kPa]), des Luftdrucks [kPa] und der  
Ozonkonzentration [ppm]  
sowie einmalig die Geographische Länge, Breite und Höhe des Waldstandortes,  
Messhöhen der Ozonkonzentration, der Windgeschwindigkeit und meteorologischen  
Größen sowie ihre Referenzhöhen zur Umrechnung der Ozonkonzentration von  
Messhöhe in Bestandeshöhe, was für alle Beurteilungsmethoden (MPOC, AOT40 und  
 $POD_y$ ) notwendig ist.

Für die Angabe der Wassernachlieferung aus dem Boden ist bei  $DO_3SE$  ein Bodenwasserhaushaltsmodell integriert (Büker et al. 2012) welches die Angabe der Bodenart getrennt nach sandigen Lehm, schluffigen Lehm, Lehm und tonigen Lehm für den Bodenwasserhaushalt und die Messtiefe des Bodenwassergehaltes sowie die Durchwurzelungstiefe benötigt. Als einmaliger Modellinput pro Jahre ist ebenfalls die Bestandeshöhe und die Angabe des LAI des Bestandes berechnet aus hemisphärischen Fotos oder aus dem gemessenen Streufall notwendig.

Da nicht für alle Stationen und Jahre phänologische Beobachtungen vorlagen, kann für den Start und Ende der Vegetationsperiode das Latitude Modell von EMEP benutzt werden, um für alle Bestände untereinander vergleichbare Längen für die Vegetationsperioden zu bekommen.

## **2.2 ZIMEN Messnetz und Level II Flächen der FAWF**

In Rheinland-Pfalz gibt es Messstationen des ZIMEN-Messnetzes in Wäldern in der Nähe von forstlichen Dauerbeobachtungsflächen der FAWF, die für Beurteilungen der Ozonbelastung von Waldökosystemen herangezogen werden können (Tab.1).

Tabelle 1: ZIMEN Wald-Messstationen in Rheinland-Pfalz

Zimen-Messstation	FAWF Dauerbeobachtungsfläche	Bestandesbaumart	Höhe [m ü.NN]
Pfälzerwald-Hortenkopf	Merzalben(Umweltkontrollstation)	Eiche	550
	Merzalben Forestclim-Fläche Buche jung	Buche	550
Westeifel-Wascheid	Adenau	Fichte	600
Westerwald-Neuhäusel	Neuhäusel	Buche	390
Westerwald-Herdorf	Kirchen	Fichte	440
Hunsrück-Leisel	Idar-Oberstein	Fichte	660

Die ZIMEN-Messstationen messen vorrangig die Luftqualität O<sub>3</sub>; SO<sub>2</sub>, Stickoxide NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Particulate Matter verschiedener Größe (PM<sub>10</sub>, PM<sub>5</sub>, PM<sub>2.5</sub>; die Zahlen beziehen sich auf die Größe der Teilchen in µm, ab PM<sub>10</sub> sind die Teilchen lungengängig). Meteorologische Parameter wie Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und evt. Luftdruck (nur in Neuhäusel) werden lediglich beiläufig erfasst. Deren Datenqualität ist deshalb eventuell nicht so hoch, wie die der chemischen Luftqualität und der PM Messungen.

### 2.2.1 Plausibilität und Qualität der meteorologischen Daten

Um die Datenqualität zu beleuchten, wurden Plausibilitätsvergleiche der ZIMEN-Messstationen nach Angaben aus dem ICP Forest Manual Part IX (2010) Meteorological measurements durchgeführt.

Ein Plausibilitätsabgleich der vorliegenden Witterungsdaten der ZIMEN-Stationen mit oberen und unteren Plausibilitätsgrenzen (vgl. ICP Forest Manual Part IX (2010) erbrachten keine Unstimmigkeiten. Korrelationen meteorologischer Parameter der ZIMEN-Stationen untereinander insbesondere der Globalstrahlung und Temperatur, wie auch der Ozonkonzentrationen ergaben hohe Korrelationen, während andere Parameter wie Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte nur mäßig untereinander korrelieren, weil sie stärker lokal abhängig sind. Vergleiche der ZIMEN-Daten mit Messdaten der FAWF decken auf, dass die Niederschlagsdaten an den ZIMEN Messstationen sehr stark unterschätzt sind.

Deshalb wurden die Werte auch zusätzlich mit Werten benachbarter DWD-Stationen und FAWF-Stationen verglichen. Auch bei diesem Vergleich war festzustellen, dass die Niederschlagsmessungen der ZIMEN-Messstationen als zu niedrig anzusehen sind (vgl. Tab. 2). Möglicherweise wird das durch die Aufstellung der Niederschlagstotalisatoren im Zentralen Immissionsmessnetz auf den Dächern der ZIMEN-Messcontainer in 3 m Höhe verursacht, im Vergleich zu den standardmäßig in 1 m Höhe gemessenen DWD-Niederschlagsangaben.

Da aber die Niederschlagsangaben wesentlich für den Bodenwasserhaushalt sind und dieser sich als ein sehr einflussreicher Parameter auf die Blattleitfähigkeit herausstellte, wurde auf die Kalkulation des Ozonflusses für die Stationen mit sehr hoher Abweichung (von mehr als 18 %) verzichtet. Somit verbleiben lediglich die meteorologischen Daten der ZIMEN-Station Hortenkopf (Merzalben), die durch den Vergleich mit umliegenden andern Klimastationen als

am besten abgesichert gelten können und auch als der vollständigste Datensatz bezeichnet werden kann. Dieser Datensatz wurde pro Niederschlagsereignis um 11.56% (vgl. Tab. 2) angehoben und mit diesen Daten das DO3SE-Modell betrieben.

Die Zeitreihen der anderen ZIMEN-Messstationen müssen ebenfalls einer Korrektur und anschließender Plausibilitätsprüfungen unterzogen werden, bevor sie als Modellinput verwendet werden können. Dies ist zur Zeit in Arbeit.

Tab. 2: Absolute mittlere Abweichungen einzelner meteorologischer Parameter vom Mittel der ZIMEN und FAWF-Stationen. Die Angaben sind in % des gemeinsamen Mittels angegeben.

	Abweichungen in % vom gemeinsamen Mittel		
	Lufttemperatur	Globalstrahlung	Niederschlag
Herdorf	2.63	2.68	40.10
Neuhäusel	4.80	0.96	34.53
Hortenkopf	8.84	6.47	11.56
Leisel	0.46	4.89	18.74
Wascheid	0.46	9.66	56.54

Die Vollständigkeit der meteorologischen Datensätze (auf Stundenbasis) ist in Tabelle 3 dokumentiert. Hier treten vor allem an den ZIMEN-Messstationen Neuhäusel und Wascheid in mehreren Jahren bei mehreren Parametern größere Lücken auf, die ersetzt wurden.

Die vorhandenen Aufzeichnungs-Lücken wurden in den Dateien dokumentiert und für die einzelnen Jahre in Tabelle 3 zusammengefasst. Einzelne fehlende Daten einschließlich Lücken bis zu 5 fehlenden Daten (2,5 Stunden Andauer) wurden durch gleitende Mittelwertbildung ergänzt. Lücken von 3 Stunden Dauer und länger wurden durch Regressionsgleichungen mit anderen möglichst benachbarten ZIMEN-Stationen rechnerisch gefüllt. Auffällig ist die erhöhte Anzahl von fehlenden Ozonkonzentrationen, die dadurch zustande kommt, dass die Ozonkonzentration täglich einer Eichüberprüfung (vorwiegend nachts) unterliegt und deshalb täglich eine Stunde als gleitendes Mittel ergänzt werden muss

Kritisch sind vor allem große Lücken in der Globalstrahlung (s. Tab 3: Neuhäusel 2010 und 2011 sowie Wascheid 1999 und 2004). Dies ist jedoch noch akzeptabel, weil diese Lücken größtenteils außerhalb der Vegetationsperiode liegen.

Tab. 3: Absolute und relative Anzahl fehlender Stundenwerte der in das DO3SE-Modell einfließenden meteorologischen Parameter als Antriebsvariablen für die Ozonflussberechnung. Rote Schrift bedeutet, dass mehr als 10 % der Werte fehlen und ersetzt worden sind.

																			Maximum fehlender Werte	Jahr
<b>Herdorf</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>			
Globalstrahlung	909	128	3	74	5	4	2	403	4	4	3	2	3	0	26	16	8		909	
	10.4%	1.5%	0.0%	0.8%	0.1%	0.0%	0.0%	4.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	0.1%		10.4%	
Temperatur	82	107	4	74	7	5	2	7	4	4	3	2	3	0	26	15	8		107	
	0.9%	1.2%	0.0%	0.8%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	0.1%		1.2%	
Relative Luftfeuchte	81	132	3	74	5	9	2	5	14	4	3	2	3	0	26	15	8		132	
	0.9%	1.5%	0.0%	0.8%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	0.1%		1.5%	
Windgeschwindigkeit	412	495	3	74	5	4	2	5	4	4	3	2	3	0	26	15	201		495	
	4.7%	5.7%	0.0%	0.8%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	2.3%		5.7%	
Niederschlag	84	109	3	72	3	4	0	136	4	4	1	266	3	191	26	15	8		266	
	1.0%	1.2%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	0.0%	0.0%	0.0%	3.0%	0.0%	2.2%	0.3%	0.2%	0.1%		3.0%	
Ozonkonzentration	138	490	386	618	388	388	518	384	389	389	389	388	391	408	463	419	412		618	
	1.6%	5.6%	4.4%	7.1%	4.4%	4.4%	5.9%	4.4%	4.4%	4.4%	4.4%	4.4%	4.5%	4.7%	5.3%	4.8%	4.7%		7.1%	
<b>Neuhäusel</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>			
Globalstrahlung	1.00	579	321	28	210	17	2	0	89	12	2	322	2790	2143	470	59	152		2790	
	0.0%	6.6%	3.7%	0.3%	2.4%	0.2%	0.0%	0.0%	1.0%	0.1%	0.0%	3.7%	31.8%	24.5%	5.4%	0.7%	1.7%		31.8%	
Temperatur	2.00	15	46	29	218	40	0	7	89	12	2	361	2	27	1711	56	152		1711	
	0.0%	0.2%	0.5%	0.3%	2.5%	0.5%	0.0%	0.1%	1.0%	0.1%	0.0%	4.1%	0.0%	0.3%	19.5%	0.6%	1.7%		19.5%	
Relative Luftfeuchte	6.00	579	322	28	209	16	2	2	91	12	2	324	191	44	469	56	152		579	
	0.1%	6.6%	3.7%	0.3%	2.4%	0.2%	0.0%	0.0%	1.0%	0.1%	0.0%	3.7%	2.2%	0.5%	5.3%	0.6%	1.7%		6.6%	
Windgeschwindigkeit	74.00	175	44	99	218	16	4	0	89	12	2	321	1	261	3267	809	311		3267	
	0.8%	2.0%	0.5%	1.1%	2.5%	0.2%	0.0%	0.0%	1.0%	0.1%	0.0%	3.7%	0.0%	3.0%	37.2%	9.2%	3.6%		37.2%	
Luftdruck	2.00	15	44	26	206	0	505	2	88	10	3	321	181	42	463	71	152		505	
	0.0%	0.2%	0.5%	0.3%	2.4%	0.0%	5.7%	0.0%	1.0%	0.1%	0.0%	3.7%	2.1%	0.5%	5.3%	0.8%	1.7%		5.7%	
Niederschlag	6.00	20	1158	27	664	16	1	1	89	11	2	320	218	43	467	56	152		1158	
	0.1%	0.2%	13.2%	0.3%	7.6%	0.2%	0.0%	0.0%	1.0%	0.1%	0.0%	3.7%	2.5%	0.5%	5.3%	0.6%	1.7%		13.2%	
Ozonkonzentration	199.00	414	765	430	605	392	1578	1262	950	519	495	819	396	431	2014	456	599		2014	
	2.3%	4.7%	8.7%	4.9%	6.9%	4.5%	18.0%	14.4%	10.8%	5.9%	5.6%	9.3%	4.5%	4.9%	22.9%	5.2%	6.8%		22.9%	
<b>Wascheid</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>			
Globalstrahlung	142	898	140	2	103	7	1596	1	2	24	23	826	13	6	5	17	19		1596	
	1.6%	10.3%	1.6%	0.0%	1.2%	0.1%	18.2%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	9.4%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%		18.2%	
Temperatur	140	168	140	1	100	8	10	3	2	24	21	10	11	4	4	4	19		168	
	1.6%	1.9%	1.6%	0.0%	1.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%		1.9%	
Relative Luftfeuchte	140	197	140	1	100	8	10	3	2	24	21	11	11	4	4	1197	19		1197	
	1.6%	2.2%	1.6%	0.0%	1.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	13.7%	0.2%		13.7%	
Windgeschwindigkeit	525	478	190	1	100	7	10	1	2	23	18	7	10	4	3	14	66		525	
	6.0%	5.5%	2.2%	0.0%	1.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.8%		6.0%	
Niederschlag	144	629	136	0	95	8	7	0	1	22	13	7	28	493	4	16	19		629	
	1.6%	7.2%	1.5%	0.0%	1.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.1%	0.1%	0.3%	5.6%	0.0%	0.2%	0.2%		7.2%	
Ozonkonzentration	531	1060	764	617	562	392	404	386	592	416	419	404	749	518	406	415	449		1060	
	6.1%	12.1%	8.7%	7.0%	6.4%	4.5%	4.6%	4.4%	6.8%	4.7%	4.8%	4.6%	8.6%	5.9%	4.6%	4.7%	5.1%		12.1%	
<b>Leisel</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>			
Globalstrahlung	108	85	35	13	10	10	45	72	68	28	13	25	8	8	26	7	110		110	
	1.2%	1.0%	0.4%	0.1%	0.1%	0.1%	0.5%	0.8%	0.8%	0.3%	0.1%	0.3%	0.1%	0.1%	0.3%	0.1%	1.3%		1.3%	
Temperatur	110	61	30	6	9	10	45	72	67	29	8	28	6	6	17	5	109		110	
	1.3%	0.7%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	0.5%	0.8%	0.8%	0.3%	0.1%	0.3%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	1.2%		1.3%	
Relative Luftfeuchte	113	85	30	18	9	10	45	72	473	31	16	29	6	6	17	5	109		473	
	1.3%	1.0%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.5%	0.8%	5.4%	0.4%	0.2%	0.3%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	1.2%		5.4%	
Windgeschwindigkeit	687	176	30	43	8	13	91	81	68	29	13	24	6	6	18	5	1285		1285	
	7.8%	2.0%	0.3%	0.5%	0.1%	0.1%	1.0%	0.9%	0.8%	0.3%	0.1%	0.3%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	14.7%		14.7%	
Niederschlag	108	62	28	10	8	7	43	69	68	24	11	22	6	6	17	5	109		109	
	1.2%	0.7%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	0.5%	0.8%	0.8%	0.3%	0.1%	0.3%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	1.2%		1.2%	
Ozonkonzentration	496	461	53	411	410	403	497	460	68	415	416	393	479	479	416	538	516		538	
	5.7%	5.3%	0.6%	4.7%	4.7%	4.6%	5.7%	5.3%	0.8%	4.7%	4.7%	4.5%	5.5%	5.5%	4.7%	6.1%	5.9%		6.1%	

## 2.3 Bewertung nach MPOC

Das MPOC Verfahren bewertet mögliche Ozoneinflüsse durch die Berücksichtigung einfacher Ozon Konzentrationsangaben in der Luft (Grünhage et al. (2001) bzw. VDI Richtlinie, 2310 Blatt 1 (2010)). Unabhängig wie und wo das Ozon Schäden verursacht und welcher Akzeptor (Pflanzenart) eine Rolle spielt, wird lediglich die über eine Stunde gemittelte Ozonkonzentration in Bestandeshöhe für die Beurteilung der Gefährdung herangezogen. Zur Bewertung werden Konzentrationen über unterschiedliche Zeiträume benötigt:

- i. 3 Stunden
- ii. 24 Stunden
- iii. 7 Tage
- iv. 30 Tage
- v. 90 Tage und
- vi. April bis September

und mit Hilfe von Tabellenwerten (Grünhage et al. (2001) bzw. VDI Richtlinie, 2310 Blatt 1 (2010) in vier Kategorien pro Zeitspanne klassifiziert:

- (1) maximaler Schutz gewährleistet,
- (2) weitestgehend geschützt,
- (3) steigendes Risiko,
- (4) dauerhafte Schäden

Diese Klassifikation lässt eine Beurteilung von akuter und chronischer Gefährdung durch Ozon zu, trifft allerdings keinerlei Aussagen über die Qualität und Quantität von Ozonschäden (z. B. sichtbare Blattschäden, Ertragseinbußen u.v.m.).

## 2.4 Berechnung des AOT40

Für die Schätzungen des AOT40 (Kumulierte Ozonkonzentrationen über einer Schwelle von 40 ppb Ozon bei Tageslicht (Globalstrahlung  $\geq 50 \text{ W m}^{-2}$ ; ersatzweise (wenn keine Globalstrahlungswerte bekannt sind zwischen 8-20 Uhr)) werden von den gemessenen stündlichen Ozonkonzentrationen 40 ppb subtrahiert und nur die positiven Werte oberhalb 40 ppb bei Tageslicht aufsummiert. Während der jeweiligen Vegetationsperiode (Mai bis September) wurden nach der Methode in der Arbeitsanleitung der LRTAP Convention (2014) berechnet [1]

Diese Berechnung erfolgt auf den Grundlagen von Fuhrer et al (1997).

Die Berechnung des AOT 40 beruht auf Stundenwerten der  $\text{O}_3$ -Konzentration im Kronendach ( $c_i$ , s.o.).

$$AOT40 = \sum_{i=1}^n \max[c_i - 40, 0] \times \Delta t \quad \text{bei Tageslicht (GS} \geq 50 \text{ W m}^{-2}\text{) [1]}$$

Der AOT40 berücksichtigt eine gewisse Entgiftungskapazität der Pflanze, weil erst Konzentrationen über 40 ppb in den Index Berücksichtigung finden. Da in den Index nur Ozonkonzentrationen bei Tageslicht einfließen, wird auch berücksichtigt, dass ohne Licht die Spaltöffnungen weitgehend geschlossen sind und kein Ozon in das Blatt eindringen kann.

Der Critical Level für Waldbäume ist im aktuellen CLRTAP-Manual auf 5 ppm.h (=50.000ppb.h) in der Zeitspanne einer Vegetationsperiode (1. Mai bis einschließlich 30. September) festgelegt. Dieser Wert gilt für alle Waldbaumarten. Bei Buche wird die ozonbedingte Wachstumsreduktion bei Einhaltung dieses CL auf 5% begrenzt (vgl. CLRTAP 2014).

## 2.5. Das DO<sub>3</sub>SE-Modell (akkumulierter Ozonfluss)

### 2.5.1. Abschätzung der stomatären Leitfähigkeit $g_s$ für Ozon;

Der Ozonfluss wurde mit dem Modell DO<sub>3</sub>SE (Deposition of O<sub>3</sub> for Stomata Exchange) berechnet.

Für die Berechnung des Flusses sind die Kenntnisse zweier variabler Größen nämlich der stomatären Leitfähigkeit und der Ozonkonzentration von Bedeutung. Das Modell DO<sub>3</sub>SE errechnet den Ozonfluss aus dem Produkt der stomatären Leitfähigkeit für Ozon ( $g_s$  (O<sub>3</sub>) und der umhüllenden Ozonkonzentration (s. Gleichung 2).

$$F_{st} = c(z_1) \times g_s \times \frac{r_c}{r_b + r_c} \quad (\text{nmol O}_3\text{m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}) \quad [2]$$

Gleichung [2] berücksichtigt die cuticuläre und stomatäre Aufnahme durch den cuticulären Widerstand  $r_c$  und dem Grenzschicht Widerstand  $r_b$ .

Wobei  $c(z_1)$  die Ozonkonzentration in ppm;(nmolO<sub>3</sub>m<sup>-3</sup>) an der Spitze des Kronendachs (in  $z_1$  meter Höhe ),  $g_s$  die stomatäre Leitfähigkeit (in  $\text{m s}^{-1}$ )  $r_b$  der quasi laminare Blattwiderstand und  $r_c$  der Blattoberflächenwiderstand (beide in  $\text{s m}^{-1}$ ) ist.

DO<sub>3</sub>SE berechnet die stomatäre Leitfähigkeit ( $g_s$ , den Kehrwert des stomatären Widerstandes ( $r_s$ ) mit Hilfe eines multiplikativen Algorithmus, bezogen auf die auf Jarvis zurückgehende Gleichung (Jarvis 1976) die für O<sub>3</sub> Flussschätzungen modifiziert wurde (Emberson et al., 2000a, 2000b, 2001, 2007; Büker et al., 2012),als:

$$g_s = g_{max} \times f_{Phän} \times f_{Licht} \times \max\{f_{min}, f_T * f_{vpd} * f_{SW}\} \quad [3]$$

Es wird davon ausgegangen, dass jede Pflanzenart aufgrund ihres Blattbaus eine maximale Leitfähigkeit bei völlig geöffneten Spalten ( $g_{max}$ ) hat. Sie wird diese Spalten nie vollständig schließen, sondern es bleibt immer eine geringe Öffnung ( $g_{min}$ ,  $f_{min}$ ) zurück, da auch während der Nacht Gaswechselforgänge (Atmung) durch Diffusion stattfinden müssen. Die Höhe der maximalen Blattleitfähigkeit wird durch die Phänologie überlagert. Junge in der Entwicklung befindliche Blätter, wie auch alte in der Seneszenz befindliche Blätter haben eine geringere Blattleitfähigkeit als voll funktionsfähige. Deshalb wird die maximale Blattleitfähigkeit mit den Faktoren (Größenordnung zwischen 0 und 1{vollfunktionstüchtig})  $f_{phen}$  und  $f_{Licht}$  je nach Entwicklungszustand der Blätter in Abhängigkeit vom julianischen Datum (Tag im Jahr) und der Lichtintensität [4] (Photonenflussdichte PPF, berechnet aus der Globalstrahlung) multipliziert, um die wirkliche Blattleitfähigkeit abzuschätzen.

$$f_{Licht} = f_{min} + 0.9 \times (1 - \text{EXP}(\text{Licht}_a \times \text{PPFD})) \quad [4]$$

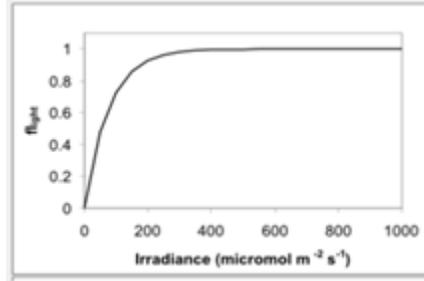


Abb.1: Licht-Effektkurve. Mit zunehmender Strahlung (PPFD) steigt der Faktor  $f_{\text{Licht}}$  von 0 auf 1. Die artspezifische Lichtreaktion hängt von dem Parameter  $\text{Licht}_a$  ab.

Die stomatäre Leitfähigkeit wird im Laufe eines Tagesganges, weiterhin durch das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft (berechnet nach der Gleichung von Campbell aus Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte s WILLERT et al. 1995), der Lufttemperatur und Wassernachleitfähigkeit aus dem Boden beeinflusst und somit die  $g_{\text{max}}$  gemindert.

In Gleichung [3] wird der maximal wirkende relative Faktor (zwischen 0 und 1) von den Einflussfaktoren Temperatur [6, 6a], VPD und Soil Water Potential (SWP) [7a, 7b] benutzt, um die stündliche aktuelle Leitfähigkeit abzuschätzen.

Diese Faktoren sind wiederum wie folgt mathematisch definiert:

$$f_{vpd} = \max\left\{f_{min}, \left(1 - f_{min} \times \frac{(VPD_{min} - VPD)}{(VPD_{min} - VPD_{max})} + f_{min}\right)\right\} \quad [5]$$

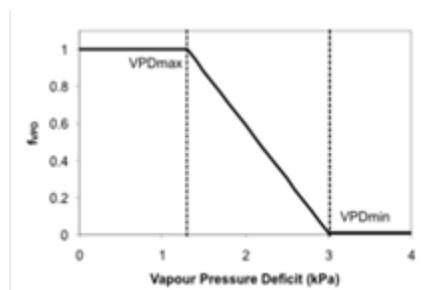


Abb. 2: VPD-Effektkurve. Bei niedrigem Wassersättigungsdefizit ist der Faktor 1, d.h.  $g_{\text{max}}$  unbeeinflusst. Steigt das Wassersättigungsdefizit, dann sinkt  $f_{vpd}$  ab  $vpd_{min}$  bis auf null ab, was bedeutet, dass die Spaltöffnungsweite auf  $g_{min}$  absinkt. Die Parametrisierung einzelner Arten hängt von den Größen  $vpd_{min}$  und  $vpd_{max}$  ab.

$$f_T = \max\left(f_{min}, \left(\frac{(T - T_{min})}{(T_{opt} - T_{min})}\right) \times \left(\frac{(T_{max} - T)}{(T_{max} - T_{opt})}\right)^{bt}\right) \quad [6]$$

$$bt = \frac{T_{max} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{min}} \quad [6a]$$

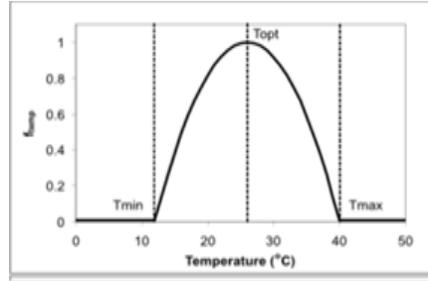


Abb. 3: Der Temperatureffekt wirkt sich als Optimumkurve aus. Ab einer Temperatur  $T_{min}$  steigt  $f_{Temp}$  auf ein Optimum bei  $T_{opt}$  ( $f_{Temp}=1$ ) und sinkt danach bis zu  $T_{max}$  ( $f_{Temp}=0$ ) wieder ab.

Die Bodenwasserverfügbarkeit kann auf zweierlei Weise definiert und in DO<sub>3</sub>SE berechnet werden. Einerseits wie in Gleichung [7a] das Blattwasserpotential (LWP) vor Sonnenaufgang (pre dawn) für die Wasserversorgung des Bestandes herangezogen. Dies  $LWP_{PD}$  ist niedrig bei guter Wassernachleitung aus dem Boden und wird bei abnehmender Wasserverfügbarkeit aus dem Boden hoch, d.h. die Pflanze/Bestand welkt.

$$f_{SW} = \min\{1, \max\{f_{min}, 0.355(-LWP_{PD})^{-0.706}\}\} \quad [7a]$$

$LWP_{pd}$ = Blattwasserpotential [MPa] vor Sonnenaufgang

$$f_{PAW} = \min\left\{1, \max\left\{f_{min}, f_{min} + \frac{(1-f_{min})\left(\left(\frac{100PAW}{Fc}\right) - PAW_{min}\right)}{PAW_{crit} - PAW_{min}}\right\}\right\} \quad [7b]$$

$F_c$ -Feldkapazität,  $PAW_{min}$ -durch die Bodenart bestimmter permanenter Welkepunkt,  $PAW_{crit}$ -Wassergehalt bei 50% des pflanzenverfügbaren Wassers

Eine zweite Möglichkeit, die auch bei den Berechnungen angewendet wurde ist die Definition über das pflanzenverfügbare Wasser (PAW) [7b], wie es sich aus pF-kurven des jeweiligen Bodens ergibt, wobei hier vereinfachend nur vier verschiedene Korngrößenklassen (s.o.) berücksichtigt werden.

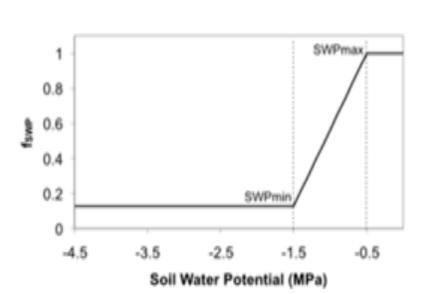


Abb. 4. Effekt des Pflanzenverfügbaren Wassers: Bei niedrigen Bodenwasserpotential, sprich niedriger Saugspannung ist  $f_{SWP}$  gleich 1, d.h.  $g_{max}$  wird nicht beeinträchtigt. Bei abnehmenden Bodenwasserpotential (hohen Saugspannungen) wird  $SWP_{min}$  erreicht und damit  $f_{SWP}$  zu einem Minimum. Es wird angenommen, dass die Regelung linear verläuft.

In Tabelle 4 sind die wichtigsten ökophysiologischen Parameter der Baumarten Buche, Eiche und Fichte, wie sie in DO3SE angewendet werden, zusammengefasst.

Ein direkter Einfluss von Ozon auf Spaltenschluss konnte bei Waldbäumen nicht nachgewiesen werden und wird deshalb nicht berücksichtigt (LRTAP Convention 2014).

Tabelle 4: Parameter zur Berechnung der stomatären Leitfähigkeit aus (LRTAP Convention 2014).

Baumart	Buche	Eiche	Fichte
$g_{\max}$ [mmolO <sub>3</sub> m <sup>-2</sup> PLA s <sup>-1</sup> ]	150	255	130
$f_{\min}(g_{\min})$ fraction of $g_{\max}$	0.13	0.06	0.15
Light_a	0.006	0.003	0.006
T <sub>min/opt/max</sub> [°C]	5/16/33	0/20/36	0/14/35
VPD <sub>min/max</sub> [kPa]	1/3.1	1/3.25	0.5/3.0
Leaf dimension [cm]	7	5	0.8

### 2.5.2 Phytotoxic Ozone Dose over a Threshold $y$ (POD<sub>y</sub>)

Die Berechnung der phytotoxischen Ozondosis (POD) setzt eine Berechnung des stomatären Flusses  $F_{st}$  (mmol O<sub>3</sub>m<sup>-2</sup> Projected Leaf Area (PLA) s<sup>-1</sup>) [s. Gleichung 2] voraus

$$POD_y = \sum_{i=1}^n \max[F_{st} - y], 0 \times \Delta t \quad [8]$$

Die auf Stundenbasis errechneten Flüsse  $F_{st}$  [2] über einem Schwellenwert von  $y$  (nmol) werden aufaddiert und ergeben die phytotoxische Ozondosis über einem Schwellenwert von  $y$  (POD<sub>y</sub> in mmol O<sub>3</sub>m<sup>-2</sup>PLA<sup>-1</sup>).

Die  $g_{\max}$  Werte, die einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der Flüsse haben wurden nach neu verfügbaren Datenmengen, überarbeitet (Karlsson et al. 2007, vgl. LRTAP Convention 2014). Berücksichtigung fand auch das erst kürzlich geänderte Leitfähigkeitsverhältnis ( $g_s$  (H<sub>2</sub>O) /  $g_s$ O<sub>3</sub> von 0.663 (Grünhage et al., 2012).

### 2.6 Ozon-Konzentrations-Messungen

Um die Ozonbelastung zu charakterisieren, ist die Messung der Ozonkonzentration der Luft von besonderer Bedeutung. Normalerweise erfolgt diese Messung aktiv mit Hilfe der UV-Absorptionsmessung. Luft wird dafür in 3 m Höhe angesaugt und mittels UVA-Absorption im Vergleich zu einer Küvette, die mit ozonfreier Luft gefüllt ist, gemessen. Diese Messung kann kontinuierlich durchgeführt werden. Die O<sub>3</sub>-Messgeräte werden im Prüflabor nach einem UV-photometrisch kontrollierten Prüfgas gemäß VDI 2468, Blatt 6, eingestellt. Die Kalibrierung der O<sub>3</sub>-Geräte vor Ort erfolgt durch Vergleich mit einem zuvor im Prüflabor justierten Messgerät

(www.luft-rlp.de). Die Ozon-Konzentration wird ab dem 24.07.1995 gemäß der EU-Richtlinie 92/72 EWG auf 20°C (293K) und auf Normaldruck von 1013 hPa bezogen ([www.luft-rlp.de](http://www.luft-rlp.de)).

Für eine solche Messung der Ozonkonzentration ist eine Stromversorgung notwendig, so dass sie vor allem in Waldökosystemen nicht überall durchführbar ist. Aus diesem Grunde können auch passiv Messungen mit sogenannten Passivsamplern durchgeführt werden (vgl. ICP-Forest Manual Part XV, 2010). Bei diesen passiv samplern wird das Ozon auf einem Absorber festgehalten und kann dann nach einer Expositionszeit von 14 Tagen nass-chemisch als akkumulierte Ozonkonzentration analysiert werden. Sind benachbart in der Region aktiv Messungen verfügbar, können solche passiv sampler Werte in AOT40 Werte umgerechnet werden (vgl. Gerosa et al. 2007 und Ferretti et al. 2012).

Mit Hilfe von Passivsammlern des Schwedischen Umweltinstituts (IVL) werden von April bis September in 14-tägiger Zeitspanne Ozonkonzentration gemessen (akkumuliert). 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.

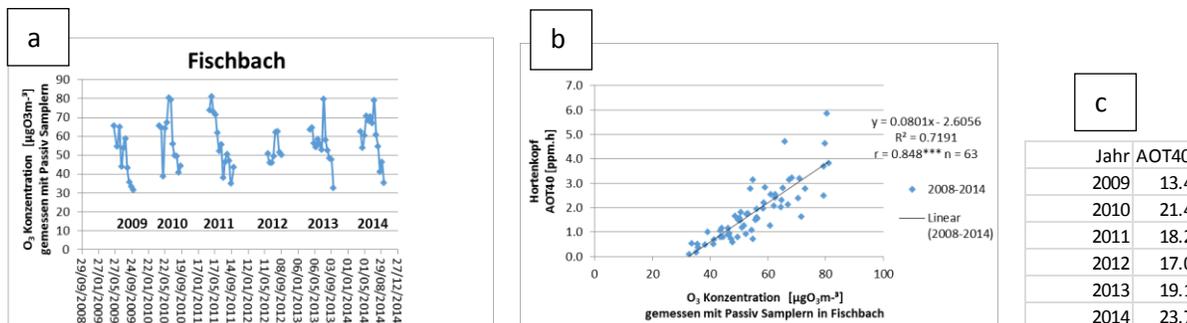


Abb. 5: Vom Passiv sampler Ergebnis zum AOT40 Wert:

- Mit Passiv Sammlern in 14 tägigem Abstand gemessene Ozonkonzentration in Fischach(Saarland):
- Korrelation zwischen Passiv Sammler Konzentration in Fischbach und AOT40 auf dem Standort Hortenkopf: Die Korrelation ist hoch signifikant.
- daraus resultierende AOT40 Werte [ppm.h] für den Standort Fischbach

Aus den Ergebnissen der Passiv Sammler (auf der Monitoringfläche Fischbach im Saarland) lassen sich mit Hilfe kontinuierlich aktiv messender Ozonstationen wie im ZIMEN-Messnetz von Rheinland-Pfalz AOT40 Werte für die Passiv Sammler Stationen ableiten. Dazu wählt man die am nächsten gelegene Station Hortenkopf und berechnet eine Regression zwischen den

mit Passiv Sammlern gemessenen Konzentrationen und AOT40 Werten der aktiven Messstation für die gegebenen Zeitabschnitte mit Passiv Sammlern, um sie dann für den Zeitraum April bis September zu einem AOT40 für die Passiv Sammler Station zu akkumulieren (Gerosa et al. 2008, Feretti et al. 2012). Der Nachteil der Passiv Sampler Messung ist, dass Stundenkonzentrationen nicht verfügbar sind und deshalb MPOC Bewertungen nicht durchführbar sind.

## 2.7 Charakterisierung der Witterung: Was sind feuchte, was trockene Jahre?

Da die Höhe der Ozonkonzentration und des Ozonflusses in die Pflanze von der Einstrahlung, Temperatur und VPD der Luft abhängig ist, ist es sinnvoll, die Witterung der Einzeljahre zu charakterisieren und zu gruppieren, um später die Ergebnisse der Ozonbelastung mit den Witterungsdaten interpretieren zu können. Deshalb sind in Abb. 6 die Klimatogramme der Zeitreihe dargestellt. Nur in sehr wenigen Jahren unterschreitet die Niederschlagskurve die Temperaturkurve und kennzeichnet somit aride d.h. trockene Zeiträume:

- |            |               |
|------------|---------------|
| Mai 2001   | Mai 2002      |
| April 2007 | April 2011    |
| Mai 2011   | November 2011 |
| März 2014  | April 2014    |
| Juni 2014  |               |

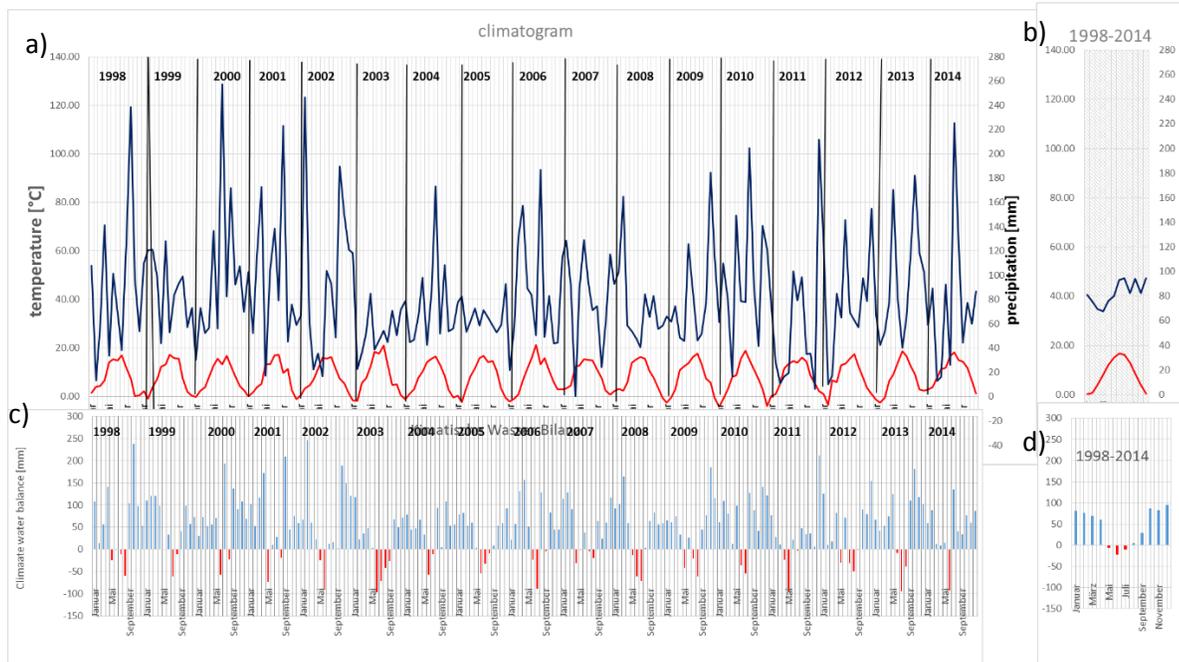


Abb. 6:a: Klimatogramme der Untersuchungsjahre 1998 – 2014  
 b) Klimadiagramm des Untersuchungszeitraums 1998 - 2014  
 c) monatliche klimatische Wasserbilanz (Niederschlag - potentielle Evapotranspiration nach Penman-Monteith) über den Untersuchungszeitraum 1998-2014  
 d) Mittelwert über den Untersuchungszeitraum (1998-2014) der Klimatischen Wasserbilanz

Um die Trockenheitsperioden noch exakter zu charakterisieren, wurde die Potentielle Evapotranspiration (PET) nach Penman Monteith berechnet und von der monatlichen Niederschlagssumme abgezogen. Die negativen (rot gekennzeichneten) Monate sind Zeiträume mit höherem atmosphärischen Wasserverlusten, als Niederschläge zur gleichen Zeit fallen. Also Monate in denen Wasservorräte des Bodens verbraucht werden. Dies ist gemittelt über die gesamte Zeitspanne (1998-2014) im April, Mai und Juni geringfügig der Fall. In einigen Jahren wie 2002, 2003, 2005, 2008, 2009 und 2011 gibt es hier einige Monate in Folge eine negative klimatische Wasserbilanz. Deshalb sind diese Jahre als Trockenjahre einzustufen.

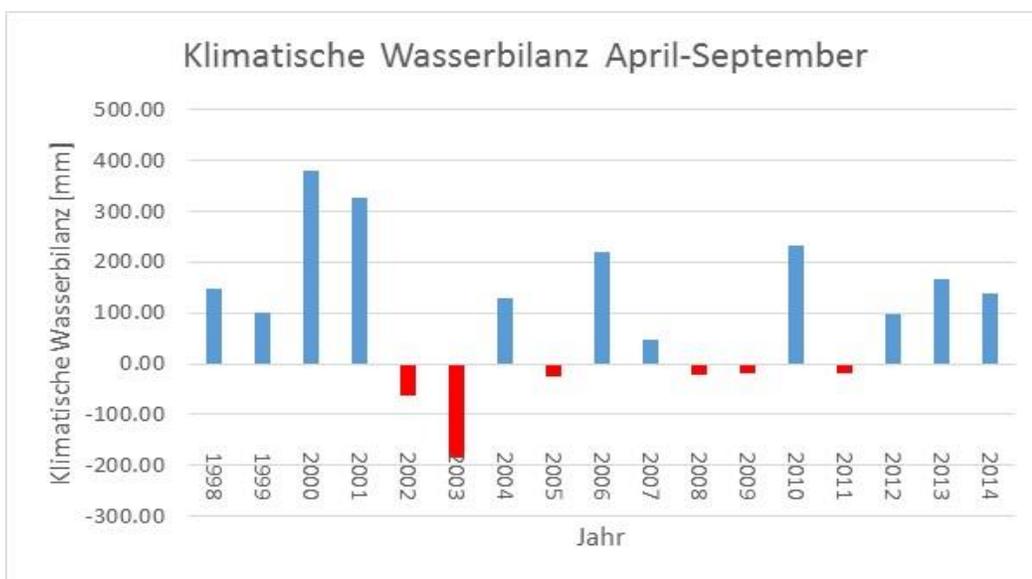


Abb. 7: Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (Monate April bis September).

Fast man die Monate der Vegetationsperiode (April-September) zusammen (Abb. 7), so sind die Jahre 2002 und 2003 die trockensten Jahre des Untersuchungszeitraums. Während 2005, 2008, 2009 und 2011 (April Mai) als leicht trockene Jahre zu charakterisieren sind. Im Gegensatz dazu als nasse Jahre mit extremen Niederschlagsüberschuss (mehr als 200 mm während der Vegetationsperiode) können 2000, 2001, 2006 und 2010 bezeichnet werden. Die Jahre 1998, 1999, 2004, 2007, 2012, 2013 und 2014 werden als feuchte Jahre mit kurzen Trockenperioden während der Vegetationsperiode bezeichnet.

### 3. Bewertung der Ozonbelastung

Zur Abschätzung der Ozonrisiken für Pflanzen stehen verschiedene Beurteilungsverfahren unterschiedlicher Komplexität zur Verfügung (vgl. Kap. 2).

In dem vorliegenden Beitrag werden drei unterschiedliche Verfahren zur Einschätzung der Ozonbelastung unserer Wälder eingesetzt.

### 3.1 MPOC

Die MPOC (Maximum Permissible Ozone Concentration)-Methode nach Grünhage et al. (2001) bzw. VDI Richtlinie, 2310 Blatt 1 (2010) geht von der herrschenden Ozonkonzentration aus (vgl. Tab. 8).

Tabelle 8: Ozon-Risikoabschätzung nach der MPOC-Methode

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>Herdorf (Fichte) 480 m ü.NN</b>																	
8 Stunden O <sub>3</sub> -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	100.1	83.6	84.0
24 Stunden O <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> -Mittel mean	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 <sub>3</sub> -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
<b>Neuhäusel (Buche) 540 m ü.NN</b>																	
8 Stunden O <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> -Mittel mean	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 <sub>3</sub> -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
<b>Hortenkopf (Buche) ForeStClim-Fläche 550m ü.NN</b>																	
8 Stunden O <sub>3</sub> -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	104.0	90.7	106.3	93.8	100.7
24 Stunden O <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> -Mittel mean	53.3	48.6	45.3	48.5	45.8	57.9	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 <sub>3</sub> -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
<b>Hortenkopf (Eiche-Buche) Umweltkontrollstation 550 m ü NN</b>																	
8 Stunden O <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> -Mittel mean	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 <sub>3</sub> -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
<b>Leisel (Fichte) 650 m ü.NN</b>																	
8 Stunden O <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> -Mittel mean	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 <sub>3</sub> -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
<b>Wascheid (Fichte) 680 m ü.NN</b>																	
8 Stunden O <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> -Mittel mean	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 <sub>3</sub> -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

Die unterschiedliche Färbung der Tabellenzellen zeigt nach dem Ampelprinzip die Belastung in den verschiedenen Jahren. Grün bedeutet, dass es keine Gefahr durch den Einfluss von Ozon

gibt, Gelb, dass der Schutz weitestgehend gewährleistet ist, orange, dass ein steigendes Risiko bei wiederkehrender Belastung innerhalb von 3 Jahren besteht und rot, dass die Belastung so hoch ist, dass sie zu dauerhaften Schäden führt.

Betrachtet man die Tabelle 8 unter den Gesichtspunkten der Gefährdung bzw. Schutz der Vegetation, sind Fälle für eine dauerhafte Schädigung auszuschließen. Auch kurzzeitige Mittel (8 und 24 h Dauer) zeigen keine rote oder orangene Färbung, d.h. akute Schäden sind nicht zu erwarten. Ein Risiko besteht auf allen Standorten bei längerfristigen Mittelwerten (über 90 Tage oder die gesamte Vegetationsperiode von April bis September. Hier sind vor allem die ozonreichen Jahre 2003 und 2006 zu nennen, in denen ein steigendes Risiko auch bei mittelfristiger Dauer von 7 bis 30 Tagen erreicht wird. Während in ozonarmen Jahren 2000, 2001, 2002 und 2011, 2012, 2013 und 2014 nach der MPOC Bewertung ein weitgehender Schutz besteht. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zu 41% der untersuchten Zeitspanne kein Ozonrisiko besteht, während in den anderen Jahren besonders die chronische Belastung stärker zu befürchten ist, als akute hohe Konzentrationen, die nur kurzfristig auftreten. Dies entspricht dem auch vom UBA festgestellte allgemeinen Trend, dass die Spitzenbelastung durch Ozon in den letzten Jahren geringer geworden ist, aber die Mittelwerte der Ozonkonzentration nicht wesentlich verändert haben.

Durch die MPOC-Bewertung bleibt aber weiterhin unklar, was für Schäden/Verluste an Pflanzen auftreten (sichtbare Blattschäden, Ertragsverluste, Wachstumsreduktion, Qualitätsverluste).

### **3.2 AOT40**

Die AOT40-Werte in der untersuchten Zeitreihe von 1998 bis 2014 liegen zwischen 13 und 38 ppm.h und überschreiten auf alle Standorten in allen Jahren den kritischen Level von 5ppm (Abb. 8) Die Höhe des jeweiligen AOT40 wird durch die Ozonkonzentration bestimmt. Die höchsten Werte sind auf allen Flächen im ozonreichsten Jahr 2003 zu finden, gefolgt von 1998, 2006 und 2010. Die niedrigsten Werte sind in den Jahren 2000, 2011 und 2012 aufzufinden. Die aus Passivsammlern für Ozon interpolierten Werte für den Eichen-Buchenwald Fischbach sind den Werten aus aktiv gemessenem entsprechend. Folglich werden sich im Saarland ähnliche Ozonrisiken zeigen wie in Rheinland-Pfalz.

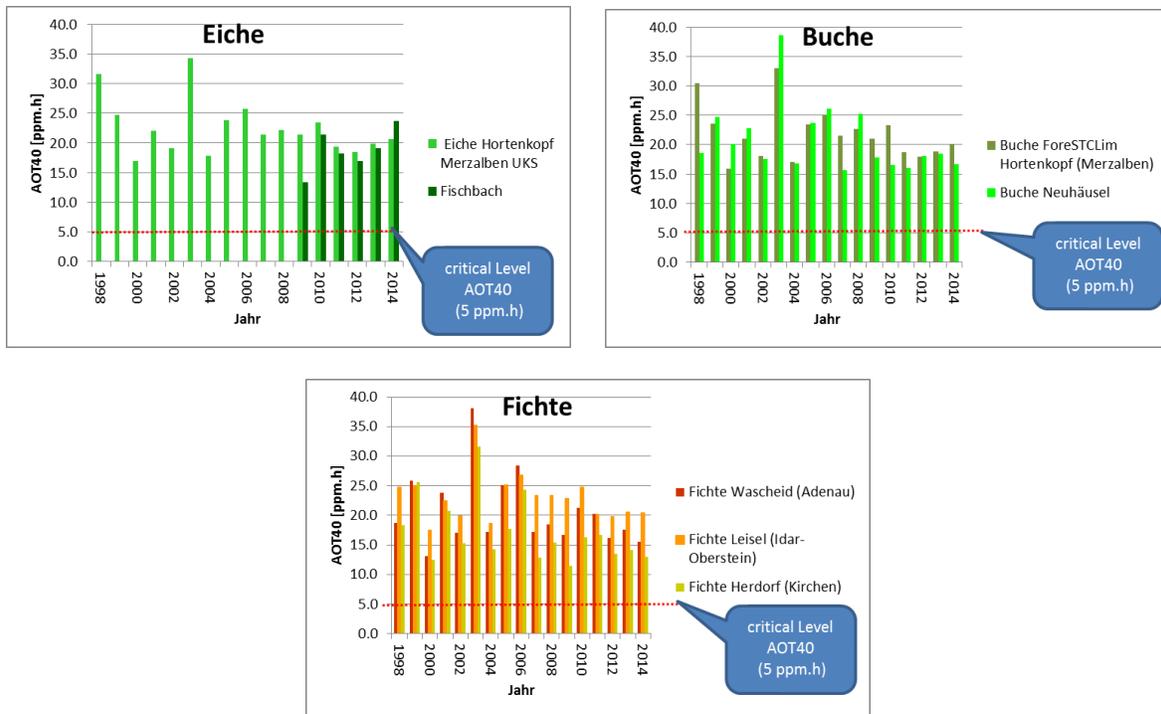


Abb. 8: Ozon-Risikoabschätzung mit dem AOT40-Index. Durch die hohen AOT40 Werte müssten Wachstumseinbußen der Waldbäume jährlich zwischen von 5 bis 10 % zu erwarten sein.

Die Überschreitung des kritischen Levels für AOT40 erfolgt bei allen Waldbaumarten zwischen dem 125ten (Anfang Mai) und 160ten Tag (Anfang Juni) im Jahr, also 20 bis 40 Tage nach dem Blattaustrieb der Buche bzw. Eiche (Abb. 9). Dies ist sehr früh und kann bei geringen Abwehreigenschaften (phytotoxische Entgiftung, Kompensationswachstum usw.), schnell zu nicht mehr behebbaren Schäden (wie Ertragseinbußen, eingeschränkte Fruktifikation, geringeres Wurzelwachstum) führen.

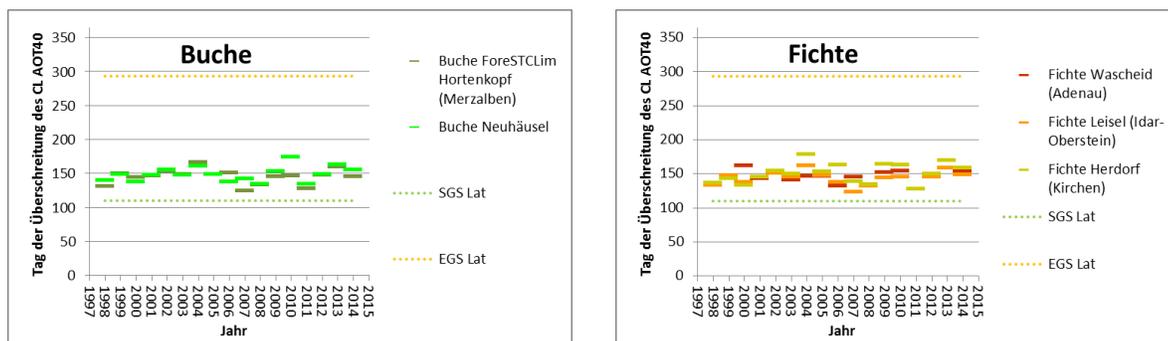


Abb. 9: Eintrittsdatum der Überschreitung des Critical Level des AOT50 von 5 ppm.h. Die Y-Achse ist als Julianisches Datum (Tag im Jahr skaliert). Als gepunktete Linien sind der Start der Vegetationsperiode (SGS) und das Ende der Vegetationsperiode (EGS) nach dem Latitude-Modell von EMEP wieder gegeben.

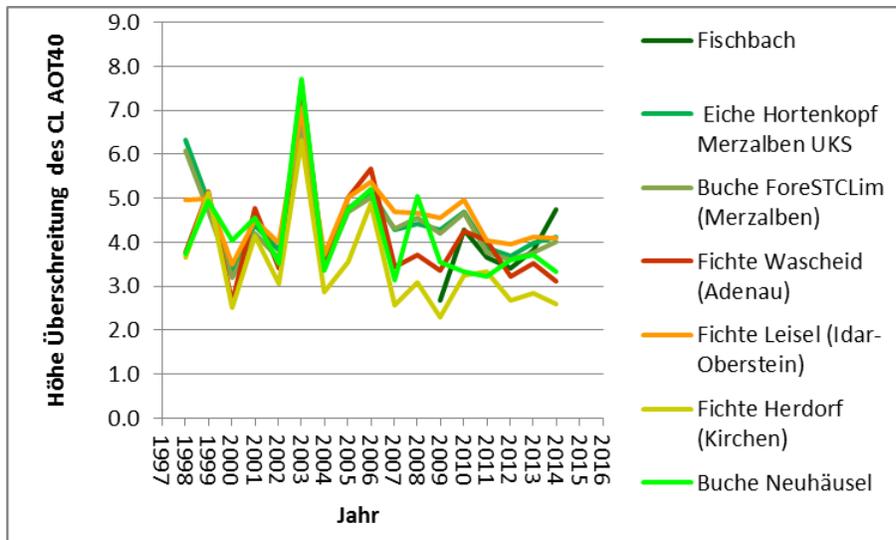


Abb. 10: Die Höhe der Überschreitung des Critical Level (von 5 ppm.h) auf den einzelnen Standorten in jedem Jahr der Zeitspanne von 1989 bis 2014 pro Jahr und Standort.

Die jährlich akkumulierten AOT40-Werte überschreiten den kritischen Level im Mittel der Zeitreihen zwischen dem 2 bis 3 bis maximal fünffachen Wert (Abb. 10) und können in ozonreichen Jahre die 6 bis 7 fache Überschreitung erreichen. Aus den zum AOT40 gehörigen Dosis-Wirkungs-Beziehungen lassen sich jährlich Biomasseverluste der Buche im Mittel von 16 % errechnen. In Extremjahren sind das minimal 11.7% im Jahr 2000 und maximal 24.2 % im Jahr 2003 als Biomasseverluste durch Ozonstress.

Die Bewertungsmethode des AOT40 für Waldbäume lässt keine Unterscheidung verschiedener Rezeptoren zu. Die Bewertung ist für Laub- und Nadelbäume für alle Arten gleich. Dies spricht nicht für die Zuverlässigkeit dieser Beurteilungsmethode, da nur in die Blätter eingedrungenes Ozon seine oxidative und damit schädigende Wirkung entfalten kann.

### 3.3 Ozonfluss (PODy) Bewertung

Gegenüber den vorstehend beschriebenen konzentrationsbasierten Bewertungsansätzen erfolgt bei der Bewertung mittels PODy (Phytotoxic Ozone Dose) 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 (MPOC und AOT40). Beim PODy handelt es sich um die mathematische Abschätzung des Ozonflusses in die Blätter, also um die modellierte Ozondosis oberhalb eines Ozonschwellenwertes  $y$  [ $\text{nmol O}_3 \text{ m}^{-2}$ ], der die Pflanze ausgesetzt ist. Der Schwellenwert repräsentiert die Entgiftungskapazität der Pflanzenart. Der resultierende Fluss wird über die

Vegetationsperiode zum PODy akkumuliert, für die im CLRTAP-Manual Critical Level definiert sind. Für die Buche (*Fagus sylvatica*) ist aktuell ein  $POD_1$  von  $4 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA}$  (zur Sonne ausgerichtete Blattfläche - Projected Leaf Area - PLA) und für die Fichte (*Picea abies*)  $8 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA}$  vorgegeben.

Für die PODy-Kalkulationen mit  $DO_3SE$  ist eine umfangreiche Datenbasis erforderlich, u. a. die Stundenmittel

- der Ozonkonzentration [ppm],
- der Lufttemperatur [°C],
- der Globalstrahlung [ $W \text{ m}^{-2}$ ],
- der Windgeschwindigkeit [ $ms^{-1}$ ],
- des Wasserdampfsättigungsdefizits der Luft [kPa],
- des Luftdrucks [kPa] und
- die Stundensummen des Niederschlags [mm]

Weiterhin werden Daten zur Geographischen Lage, zur Messhöhe der Ozonkonzentration, der Windgeschwindigkeit und der anderen meteorologischen Größen sowie ihre Referenzhöhen zur Umrechnung der Ozonkonzentration von Messhöhe in Bestandeshöhe benötigt. 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.

Für die jeweilige Vegetationsperiode (Akkumulationszeitraum) werden stündliche Werte der aktuellen stomatären Leitfähigkeit für Ozon hergeleitet und die  $O_3$ -Konzentration in Bestandeshöhe um den Thresholdwert ( $y$ ) gemindert und diese Ozonkonzentration mit der Leitfähigkeit zum Ozonfluss multipliziert. Danach wird dieser stündliche  $O_3$ -Fluss über die Vegetationsperiode zum  $POD_y$  akkumuliert.

Durch Einhaltung der Critical Level soll die ozonbedingte Wachstumsreduktion bezogen auf die gesamte Biomasseproduktion bei Buche auf maximal 4%, bei Fichte auf maximal 2% beschränkt werden.

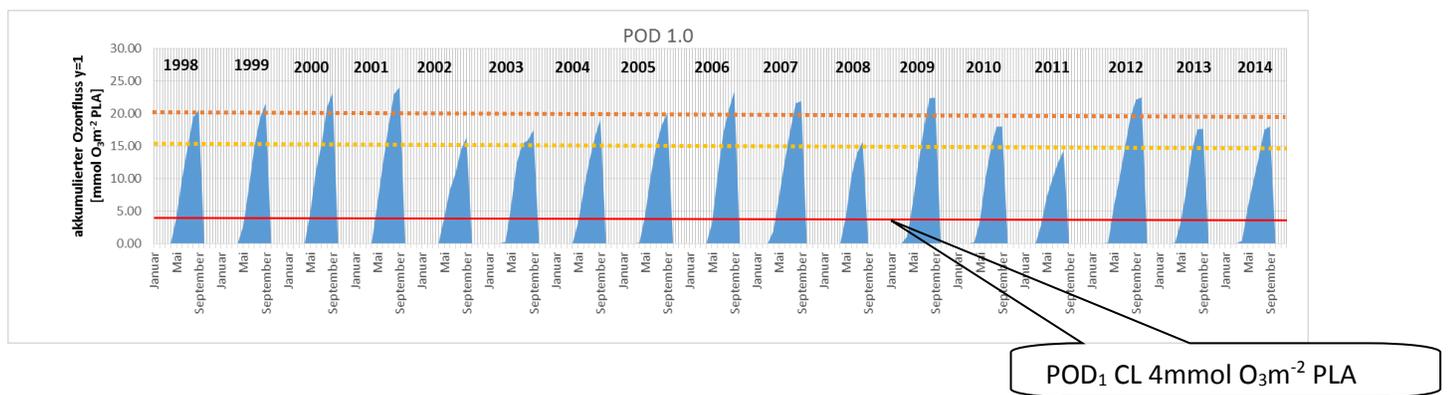


Abb. 11:  $POD_1$  Werte am Standort Merzalben (ForeStClim-Fläche) Buche für die Jahre 1998 bis 2014. Die rote Linie gibt die Höhe der Critical Levels von  $4 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA}$  an, die beiden gepunkteten Hilfslinien dienen zur besseren Einschätzung der Höhe des Flusses.

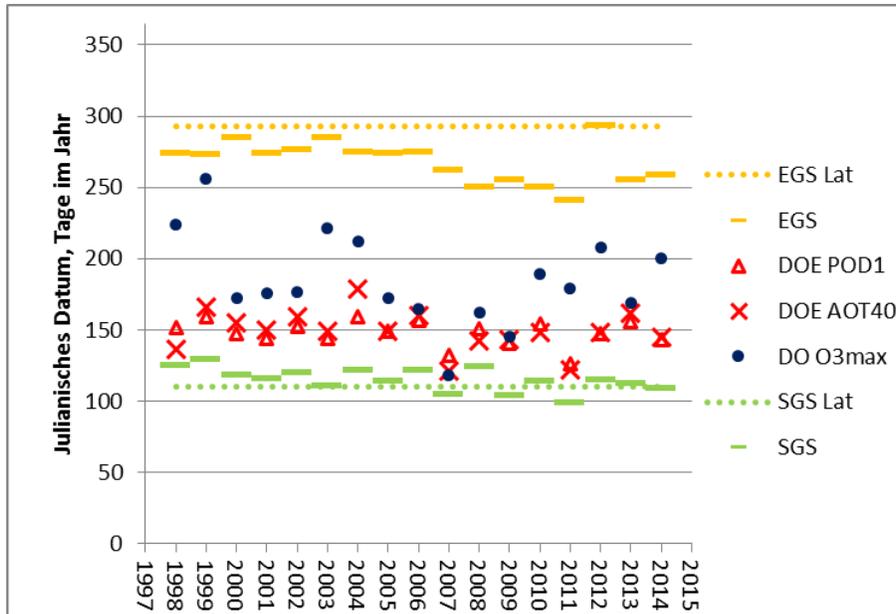


Abb. 12: Eintrittsdatum (als Julianisches Datum) verschiedener Ereignisse für die Ozonbelastung am Standort Merzalben ForeStCLIM-Fläche Buche für die Jahre 1998 bis 2014. SGS-Start of growing season (Start der Vegetationsperiode) EGS End of growing season (Ende der Vegetationsperiode) als Beobachtungsdaten der FAWF; EGS Lat und SGS Lat berechnet nach dem EMEP Latitude Modell. DOE POD1 (Day of exceedance (Tag der ersten Überschreitung des CL für den POD1), DOE AOT40 Day of exceedance des CL für den AOT40, DO O3 max. Tag des jährlichen maximal Wertes (Stundewert) der Ozonkonzentration.

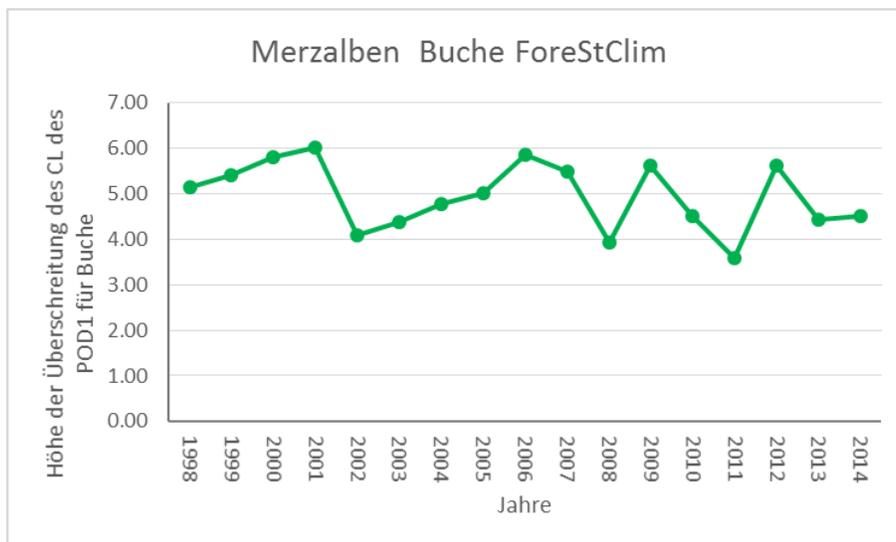


Abb. 13: Die Höhe der Überschreitung des CL für den POD<sub>1</sub> am Standort Merzalben ForeStClim-Fläche Buche für die Jahre 1998 bis 2014.

Die  $POD_1$  Werte (Abb. 11) schwanken in den Jahren für die Buche zwischen 17 (2011) und 24  $mmol\ O_3\ m^{-2}\ PLA$ . Der kritische Wert ( $CL\ POD_1 = 4\ mmol\ O_3\ m^{-2}\ PLA$ ) wird in allen Jahren schon im Mai (Abb. 12) und zum Ende der Vegetationsperiode bei der Buche im Pfälzer Wald um das 4 bis 6 fache überschritten (Abb. 13).

Etwa 41 % der Jahre weisen Flüsse zwischen 15 und 20  $mmolO_3m^{-2}\ PLA$  und ca. 53% sogar Flüsse über 20  $mmolO_3m^{-2}\ PLA$  auf. Nur das Jahr 2011 liegt unter 15  $mmmolO_3m^{-2}\ PLA$ . Im Vergleich zum CL des AOT40, wird der CL des  $POD_1$  früher oder zu mindestens gleichzeitig erreicht, die Überschreitung ist  $POD_1\ CL$  ist dem 3.5 bis 6 fachen niedriger als bei AOT40, wo er zwischen dem 3,5 bis 7fachen (ForeStClim Fläche Merzalben) liegt.

Kann man den Dosis Wirkungsbeziehungen LRTAP Convention (2014) vertrauen, sind Ertragseinbußen bei der Buche in Merzalben zwischen 16 und 26 % jährlich zu erwarten.

### **3.4 Sichtbare Ozonschäden**

Hohe Ozonbelastungen verursachen an den Blättern oder Nadeln der Waldbäume und Waldbodenvegetation charakteristische, zum Teil schon mit bloßem Auge erkennbare Schadsymptome (Schaub 2005, Abb. 14 - 19 vgl. auch Internet Bildatlasmaterial unter [www.wsl.ch/ozoneeffects/Pictorial\\_Data\\_Bases\\_EN](http://www.wsl.ch/ozoneeffects/Pictorial_Data_Bases_EN)). 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 (Abb. 14, Abb. 16, Abb. 18a). Unter dem Mikroskop erkennt man, dass die oberen Enden des Palisadenparenchyms durch Einlagerungen dunkel verfärbt sind (Abb. 16). Oft ist auch ein deutlicher „Schatteneffekt“ zu erkennen: die Schäden treten nur an sonnenexponierten Blattflächen, nicht aber an Bereichen, die durch darüber liegende Blätter beschattet werden (Abb. 15, Abb. 18). Der Schatteneffekt und die Beschränkung der punktförmigen Schadsymptome auf die Blattoberseite zwischen den Blattvenen (nicht auf den Leitbündeln, Blattnerven) dienen zur Unterscheidung von Ozon-bedingten Schäden und 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 Part VIII (2010) „Assessment of Ozone Injury“ beschriebenen Methode erhoben. Die LESS ist ein entlang eines süd/südwest exponierten Waldrandes angelegter 1m 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.

Das sogenannte LESS („Light Exposed Sampling Site“) wird entlang des süd/südwest exponierten Waldrandes der Freifläche (auf der auch die O<sub>3</sub>-Passivsammler exponiert sind) als 1m breiter und 100m langer Transekt eingemessen und in 2 m lange Parzellen unterteilt. Diese nicht überlappenden Parzellen werden nummeriert und eine Anzahl von 33 Flächen per Zufallsprinzip ausgelost. Mit einem Rahmen von 1 m Breite und 2 m Länge werden die gelosten Flächen eingegrenzt und alle holzigen Pflanzen notiert und eventuelle Schädigungen nach dem im Anhang des Manual vorgegebenen Schlüsselnotiert. (**0** - keine Symptome; **1** - Ozonsymptome (nach Ozon-Diagnose-Flowchart, Anhang ICP-Manual); **2** Symptome andere Art; **3** – Symptome nach 1 und 2; **4** - unbekannte nicht validierte Symptome; **5** – keine holzigen Pflanzen vorhanden)

Während bis 2015 noch nie sichtbare Ozonschäden an Eichen- und Buchenblättern aus der Lichtkrone der Bäume in Fischbach (Saarland) gefunden wurden, konnten 2015 erstmalig leichte Ozonschäden an Buchenblättern bei der Blattprobenahme Ende Juli dokumentiert werden, die jedoch stark mit Verbrennungen der Epidermis überdeckt waren, so dass sie nur mikroskopisch durch schwarze Ablagerungen im Palisadenparenchym als Ozonschäden diagnostiziert werden konnten.



Abb. 14: Bronzierung an Buchenblättern entlang des LESS auf der Freifläche Fischbach am 4. September 2014

Wie auch in den Vorjahren 2011, 2013, 2014 wurden auch 2015 Ozonschäden an Buchenblättern zweier Buchenindividuen im LESS von Fischbach aufgefunden (Abb.14). Diese äußerten sich in Bronzierungen, als auch in typischen Schatteneffekt. Auch mikroskopisch waren schwarze Einlagerungen in den Zellen des Palisadenparenchyms festzustellen, so dass sie als validierte Ozonschäden gelten.



Abb. 15: Beschattungseffekte (4. September 2014): Das mit einem beschen 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 Blatteile (lila Pfeil) sind bronziert. Ein typisches Zeichen für den Einfluss von Photoxidantien, dessen Leitstoff Ozon ist.

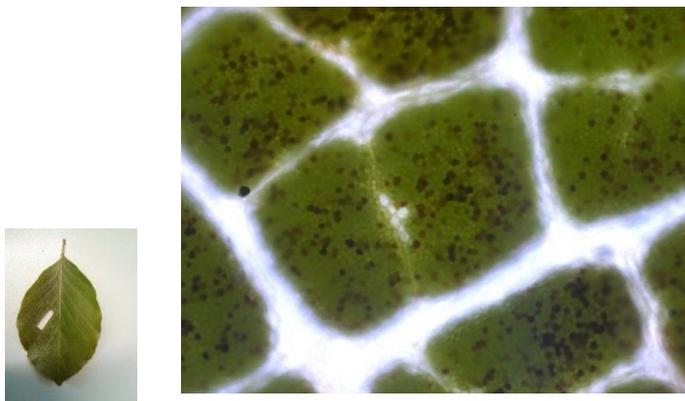


Abb. 16: 200fache mikroskopische Vergrößerung (Auflicht) eines Blatteilstücks (wie unten links aus dem Blatt getrennt) mit Bronzierungen. Es sind Schwarze/Braunen Punkte zu erkennen, die die Enden von Palisadenparenchymzellen darstellen, in denen als Einfluss von Photoxidantien Phenole (Schwarz) abgelagert wurden.

Im Jahr 2015 zeigten alle Buchenblätter, die der Sonne exponiert waren am LESS Fischbach Bronzierungen (Abb. 18 a, b, Abb. 19 a-d). So eine hohe Häufigkeit wurde bislang noch nie beobachtet, die letzten Jahre wurden sichtbare Ozonschäden immer nur an einzelnen

Exemplaren gefunden. Auch an einigen Individuen der Hainbuche (*Carpinus betulus*) gab es sichtbare Blattschäden durch Ozon (Abb 17a und b)



Abb 17a: Hainbuche mit Ozonschäden auf der Blattoberseite  
25.8.2015



Abb 17b: Ozongeschädigtes Hainbuchenblatt im Bestand



Abb 18a: Buchenblätter mit starken Bronzierungen zwischen den Blattveenen



Abb. 18b: Buche mit Bronzierungen und Schattenfekten (grüne Bereiche)



Abb.19 a-d: typische Ozonschäden an der Buche (*Fagus sylvatica*) aufgenommen am 25.8.2015 am LESS in Fischbach

#### 4. Diskussion

Ähnliche Bewertungen der Ozonbelastung wie in der vorliegenden Untersuchung liegen aus dem Bundesland Bayern aus den Jahren 2002 bis 2005 vor (Baumgarten et al. 2009). In der bayrischen Untersuchung werden ähnliche Ergebnisse genannt. Eine Bewertung nach MPOC zeigt, dass die Ozonkonzentrationen verschiedener Dauer lediglich im chronischen Bereich ein leichtes Risiko darstellen. Eine dauerhafte Gefährdung kann in Bayern und im Südwesten der Bundesrepublik (Saarland und Rheinland-Pfalz) aufgrund der vorherrschenden Ozonkonzentrationen ausgeschlossen werden.

Der AOT 40 Index ist in der bayrischen Untersuchung ähnlich hoch, in einigen Fällen höher, erste Überschreitungen des CL treten ebenfalls im Juni (später als der CL für Ozonfluss) auf und die Überschreitungen des CL liegen in „normalen Jahren“ bei dem 2 bis 4 fachen, in dem Extremjahr 2003 beim 4 bis 10 fachen (Baumgarten et al. 2009). Der CL für den Ozonfluss wird in Bayern um das 2 bis 3 fache überschritten und ist im ozonreichen Jahr 2003 niedriger als in den anderen Jahren (Baumgarten et al. 2009). Diese Ergebnisse decken sich in ihrer Höhe und Aussage mit denen im Südwesten Deutschlands (Saarland und Rheinland-Pfalz). Jedoch ergibt sich aus den bayrischen Ergebnissen ein Höhengradient, der in Rheinland-Pfalz und im Saarland aufgrund der fehlenden extremen Höhenlagen nicht aufzufinden ist.

Durch die Berechnung von Ozonflüssen, gewinnt die Wirksamkeit und Bedeutung von Ozon auch in kühl feuchten Jahren an Bedeutung. Denn in solchen Jahren gibt es Ozonflüsse, die laut Dosis Wirkungsbezug (LRTAP Convention 2010) möglicherweise Ertragsverluste bis zu 10% verursachen. Bei solchen Aussagen den Zuwachs unter Ozonstress betreffend, ist jedoch kritisch zu bemerken, dass viele der Dosis Wirkungsbeziehungen von Waldbäumen an jungen Individuen in Begasungsexperimenten durchgeführt wurden (Büker et al 2015). Diese müssen

unbedingt durch mehr epidemiologische Untersuchungen an adulten Bäumen ergänzt werden. Es sei bemerkt, dass noch eine Menge an Potential in der vorliegenden Untersuchung steckt, denn wenn die Klimadaten der restlichen ZIMEN-Stationen korrigiert und valide sind, können die Flüsse mit den Zuwachsdaten der angrenzenden Level II Dauerbeobachtungsflächen korreliert werden. Ergeben sich signifikante Zusammenhänge, sollte überdacht werden, ob sie nicht zur Ermittlung von Dosis-Wirkungsbeziehungen herangezogen werden können. Ebenfalls muss bei den Berechnungen der Schwellenwert  $y$  in sinnvollen Größen variiert werden und dessen Einfluss auf die Korrelation zwischen Höhe des Ozonflusses und dem Zuwachs beurteilt werden. Dies ist aber erst möglich, wenn valide Klimadatenreihen vorliegen, an denen zur Zeit gearbeitet wird.

Es ist auffällig, dass die Flüsse in Jahren mit Trockenperioden (2002, 2003, 2005, 2008, 2011) erkenntlich durch rote negative Säulen der monatlichen klimatischen Wasserbilanz (vgl. Abb. 6c) geringere  $POD_1$ -Werte aufweisen, als in Jahren mit geringerem Wasserstress (2000, 2001, 2006, 2012). In diesen Jahren konnten trotz geringerer Ozonkonzentrationen die Spaltöffnungen aufgrund der feuchteren Witterung (geringere VPD, als auch höhere Vorräte pflanzenverfügbaren Wassers im Boden) länger geöffnet werden und es ging somit ein intensiverer Gaswechsel inklusive des Einstroms von Ozon von statten. Während in den trocken heißen ozonreichen Jahren (z.B. 2003) die  $POD_1$  wesentlich geringer ausfällt als es die konzentrationsbasierten Indices (z.B. AOT40) glauben lassen.

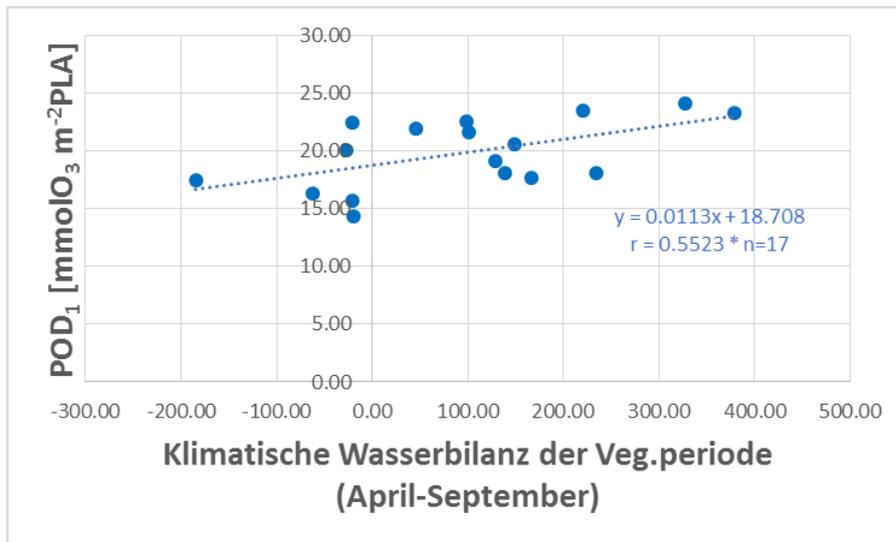


Abb. 20: Korrelation zwischen der klimatischen Wasserbilanz und dem akkumuliertem Ozonfluss ( $POD_1$ ) auf dem Standort Merzalben (ForeStclim) für die Zeitspanne 1998-2014.

Die Korrelation zwischen der klimatischen Wasserbilanz der Monate April bis September mit den  $POD_1$  im gleichen Zeitraum zeigt den eindeutigen Trend, dass bei besserer klimatischer Wasserbilanz die Phytotoxischen Ozondosen ansteigen (Abb. 20). Das heißt die Beurteilung

des Ozonstresses darf nicht allein auf Ozonkonzentrationen beruhen, sondern muss mit dem Gaswechselgeschehen (Transpiration und Fotosynthese) in Verbindung gebracht werden, denn bei Wasserstress, der vor allem in trocken heißen Sommern mit hohem Ozonbildungspotential häufig ist, wird die stomatäre Leitfähigkeit so weit wie möglich herabgesetzt, um Wasserverluste durch Transpiration zu vermeiden. Das mindert auch den Ozonfluss ins Blattgewebe. Typische Symptome wie sichtbare Ozonschäden oder hohe Ertragseinbußen sind deshalb in trocken heißen Jahren nicht zwangsläufig zu erwarten.

Die Höhe des Ozonflusses wird bestimmt durch die Ozonkonzentration, die das Blatt umhüllt und der Blattleitfähigkeit der Pflanzen. Diese vor allen Dingen als stomatäre Blattleitfähigkeit vorliegende Porosität für Ozon wird durch die Spaltöffnungsweite bestimmt. Diese ist wiederum abhängig vom Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft, der Lufttemperatur, der Lichtintensität (Photonenflussdichte berechnet aus der Globalstrahlung) und der Bodenwasserverfügbarkeit. 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 Wasserdampfsättigungsdefizit sowie die Blattfläche werden baumartenspezifisch differenziert. Ein direkter Einfluss von Ozon auf den Spaltenschluss konnte bei Waldbäumen nicht nachgewiesen werden und wird deshalb nicht berücksichtigt (CLRTAP 2014).

Die einzelnen Faktoren sind in Gleichung [3] Kap. 2.5 aufgeführt. Sie sind zur Errechnung der stomatären Leitfähigkeit ( $g_{st}$ ) zwischen den Werten 0 und 1 skaliert. Welchen Einfluss diese einzelnen Faktoren im Witterungsverlauf auf die stomatäre Blattleitfähigkeit haben, zeigt die Abb. 21.

In jedem einzelnen Jahr bildet sich deutlich der jährliche Verlauf von  $f_{temp}$  (rote Kurve) mit einem Optimum während der wärmsten Jahreszeit ab. Der Verlauf von  $f_{light}$  (gelbe Kurve) während der phänologisch aktiven Zeit variiert täglich zwischen 0 (nachts) und einem Wert über 0, in Abhängigkeit von dem täglichen Strahlungsmaximum. Die hellblaue Kurve stellt den Einfluss des Wassersättigungsdefizites (VPD,  $f_{vpd}$ ) dar und zeigt den Effekt der Lufttrockenheit auf die Leitfähigkeit. Dies ist von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich. In einigen, auch wiederkehrenden Perioden kann  $f_{vpd}$  die niedrigsten  $f$ -Werte aller Faktoren erreichen und somit tagsüber die Öffnungsweite der Stomata bestimmen. In niederschlagsreichen Zeiten ist der Einfluss der Luftfeuchte geringer. Deshalb ist der Haupteinfluss auf die warmen Frühjahrsmonate, den Sommer und warmen Herbstzeit beschränkt. Die dunkelblaue Kurve  $f_{SW}$  zeigt den Einfluss des Bodenwassers (soil water). In nassen Jahren wie 2000 und 2001 ist dieser Einfluss nicht vorhanden ( $f_{SW}=1$  das ganze Jahr durchgängig) während er in anderen Jahren insbesondere im Spätsommer und Herbst und in trockenen Jahren wie z.B. 2003 und 2008 einen erheblich mindernden Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit hat. Abb. 21 ist gut zu geeignet, um die unterschiedlichen Einflüsse auf die stomatäre Blattleitfähigkeit zu beurteilen und verschiedene Standorte miteinander zu vergleichen.



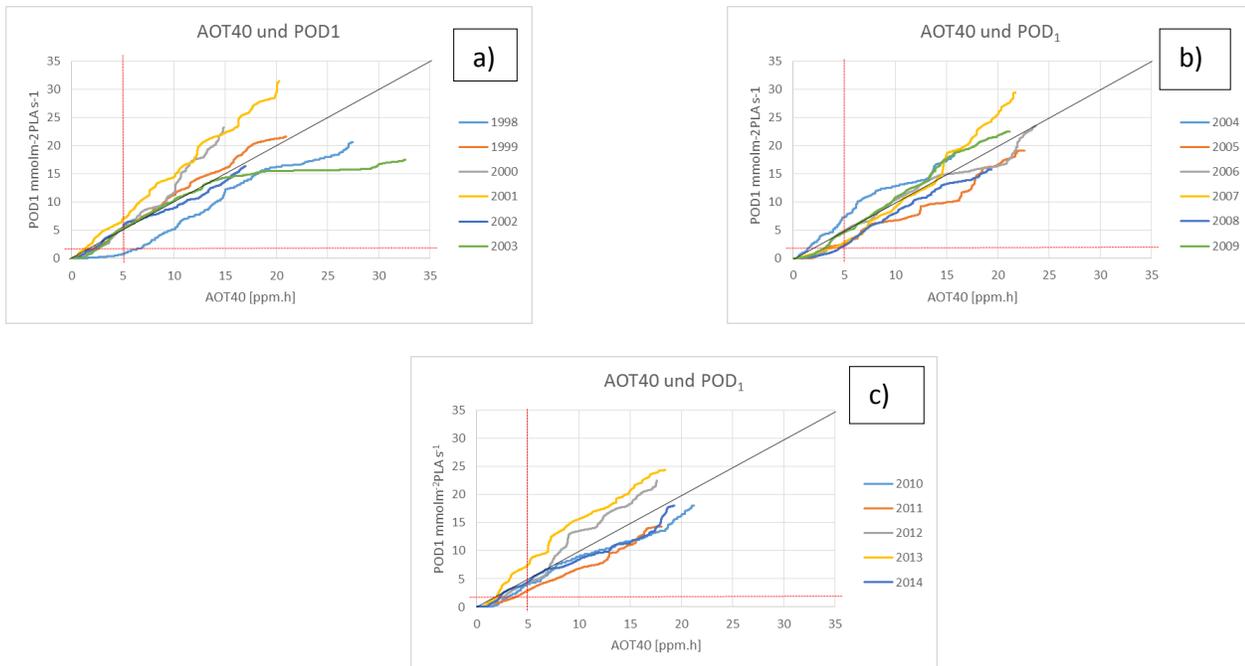


Abb. 22 a -c: Anstieg der akkumulierten Flüsse ( $POD_1$ ) in Abhängigkeit vom Zuwachs des AOT40. Die graue Winkelhalbierende zeigt die Gerade  $y=x$  an. Wenn beide Kennwerte ( $POD_1$  und AOT 40) auf dieser Geraden verlaufen, sind sie gleichwertig. Linien oberhalb von  $y=x$  haben höhere Flussraten, bedingt durch eine höhere Leitfähigkeit bei niedrigen Ozonkonzentrationen, Linien unterhalb von  $y=x$  werden durch eine niedrige Blattleitfähigkeit an der Ozonaufnahme gehindert. Die roten Geraden geben die CL für AOT 40 und  $POD_1$  wieder.

Vergleicht man den Anstieg des AOT40 und des  $POD_1$  über verschiedene Vegetationsperioden, können verschiedene Ozon-Belastungswege unterschieden werden. In trocken heißen ozonreichen Jahren (wie z.B. 2003 oder 1998) wird eine hohe stomatare Leitfähigkeit durch Wassermangel so weit unterdrückt, dass die AOT40 Werte erheblich schneller ansteigen als der akkumulierte Ozonfluss, was durch einen Kurvenverlauf unterhalb der Winkelhalbierenden  $y=x$  zu erkennen ist. Der Anstieg in den Frühjahrstagen ist noch sehr ähnlich, danach wird aber durch Spaltenschluss der Ozonfluss ins Blatt gemindert (Abb. 22a).

Anders verhält sich der akkumulierte Ozonfluss in nassfeuchten ozonarmen Jahre wie z.B. 1999, 2000 und 2001. Hier steigt der  $POD_1$  (Fluss über dem Schwellenwert von  $1 \text{ n ml O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ und s}^{-1}$ ) schneller als der AOT40, konsequenterweise verläuft der Kurvenzug über der Winkelhalbierenden. In dem nassen, kühlen, ozonarmen Jahr sind es vor allem die niedrigen Ozonkonzentrationen unter 40 ppb, die in die Blätter einfließen und den AOT40 Index nicht ansteigen lassen. Dadurch dringen aber im Laufe einer Vegetationsperiode größere Mengen an Ozon in die Pflanze (höherer  $POD_1$ ) als im Trockenjahr 2003, in dem die hohen Ozonkonzentrationen durch Spaltenschluss gar nicht ins Blatt eindringen können.

Die Kalkulation der phytotoxischen Ozondosis ist sehr komplex. Die Befunde werden durch eine Reihe von Annahmen beeinflusst, die weiterer Untersuchungen bedürfen. So ist beispielsweise die Ozonentgiftungskapazität, konventionell auf 1 nmol O<sub>3</sub> gesetzt (LRTAP Convention 2010), möglicherweise für die Buche zu niedrig. BÜKER et al. 2015 fand heraus, dass die Buche bei einem threshold von  $y=3$  die höchsten Bestimmtheitsmaße zum Zuwachs von Bäumen in Begasungsexperimenten aufwies. Auch die artenspezifische maximale Leitfähigkeit bedarf weiterer Untersuchungen. Daher muss die Kalkulation des Ozonbelastungsindikators PODy beständig an den jeweiligen Wissensstand angepasst werden.

Dies bringt auch den Schwellenwert erneut zur Diskussion, denn was können Pflanzen entgiften? (1 nmol O<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> oder 40ppb O<sub>3</sub> pro Stunde). Dies ist mit Sicherheit abhängig von der genetischen Ausstattung des jeweiligen Genotyps, ob er überhaupt in der Lage ist Antioxidantien (Ascorbinsäure, Polyphenole (Flavonoide), Carotinoide, Enzyme wie Superoxiddismutase, Glutathionperoxidase) zu bilden und dann in welchem Ausmaß sie diese Verteidigung gegenüber andern Lebensansprüchen umsetzen kann (Fitness). Denn die Investition in Antioxidantien verbraucht Energie, die ohne Antioxidantien in andere Lebensvorgänge (Wachstum, Fruktifikation) investiert werden könnte.

Leider war die Qualität der zu Berechnung notwendigen stündlichen Witterungsdaten nicht auf allen ZIMENstationen gleicher Qualität. Mit Ausnahme der Station Hortenkopf gibt es auf den anderen Flächen zweifelhafte und nicht kongruente Angaben zum Niederschlag, Globalstrahlung, Temperatur und Luftfeuchte. Deshalb ist erst nach Aufarbeitung der originalen ZIMEN Witterungsparameter aufgefallen, dass sie erst mit Ergebnissen umliegender Wetterstationen abgeglichen und korrigiert werden müssen um solide und korrekte Ozonflüsse und PODy berechnen zu können. Dieser Abgleich erfolgt zur Zeit und konnte nur für den Hortenkopf realisiert werden, weil hier lediglich Niederschlagsdaten zu korrigieren waren.

Um die nötige Qualität der Ergebnisse anzustreben, wird eine vollständige Analyse zwischen Zuwachs und Ozonflüssen erst in nächster Zeit vorliegen können.

Sichtbare Ozonschäden wurden auf den Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz nur auf den Flächen mit Laubbäumen festgestellt. Nadelbäume zeigten bislang keine Symptome.

Ozonsymptome werden jeweils bei der Blattprobenahme (im Juli/August) zur Nährstoffanalytik der Blätter kontrolliert. Dies kann nur dann zu Erfolg führen, wenn schon im zeitigen Frühjahr erhebliche Ozonkonzentrationen/Flüsse einwirken konnten wie im Jahr 2015. Ozonsymptome treten wesentlich häufiger in Spätsommertagen in sonnenexponierten Kronenteilen auf und müssen dann symptomatisch unverkennbar von Seneszenzerscheinungen unterschieden werden. Das geht optimal mittels der Bronzierungen die durch Ozon hauptsächlich nur auf der

Blattoberseite zwischen den Blattvenen (nicht auf den Leitbündeln, Blattnerven) punktförmig (um Spaltöffnungshöfe) in Erscheinung treten.

Angaben zu sichtbaren Ozonschäden an Blättern der Lichtkrone zur Blatternte für die Blatt-Nadelanalyse sind nur kärglich vorhanden und nicht häufig. Lediglich in den Jahren 2001, 2003, 2007 und 2010 wurden sporadisch sichtbare Ozonschäden an Buchenblättern in Neuhäusel beobachtet. Auch die Krautschichtvegetation zeichnete 2001 und 2003 Ozonschäden an den Blättern.

Auf der Fläche Merzalben wurden 2001 leichte Ozonschäden an Eichenblättern beobachtet und im Jahr 2003 Ozonschäden an den unterständigen Buchenblättern und Blättern der Krautschichtarten. Leider sind alle diese Angaben nicht häufig genug, um Korrelationen zu Konzentrationen oder Flüssen und den sichtbaren Ozonschäden herzustellen. Dies mag einer der Gründe sein, dass bisher keine Dosis-Wirkungsbeziehungen zu sichtbaren Ozonschäden bekannt sind. Ebenfalls kann man spekulieren, dass solche sichtbaren Ozonschäden häufig während der Seneszenz-Phase der Blätter im Frühherbst zeitlich früher als Vergilbungsphänomene auftreten (das ist der Normalfall), oder die Belastung (wie im Jahr 2015) im Frühsommer akut sehr hoch sein muss, damit sich sichtbare Schäden auch während des Sommers etablieren.

Deshalb sind Untersuchungen an einem sogenannten LESS (Light exposed sampling side) wie im Saarland in Fischbach durchgeführt unerlässlich, da hier Ozonschäden ohne Baumkelterer zu jeder Zeit der Vegetationsperiode festgestellt werden können. Kontrolliert werden dabei Ozonschäden an holzigen und krautigen Pflanzen entlang eines südlich exponierten Waldrandes mit hohem Besonnungsgrad. Auch später im Jahr auftretende sichtbare Ozonschäden sind ohne großen Aufwand einfach aufzufinden und zu dokumentieren. Die Untersuchung von mindestens 33 zwei Meter langen und 1 m breiten Flächen lassen als quantitative Maßzahl Häufigkeitsangaben des Auftretens zu.

Die drei in der vorliegenden Arbeit angewendeten Beurteilungskriterien zur Ozonbelastung von Waldbäumen in Rheinland-Pfalz und im Saarland ergeben sehr unterschiedliche Beurteilungen. Wendet man lediglich das MPOC Verfahren an, ist keine große Gefahr im Verzug. Lediglich langfristige erhöhte Konzentrationen könnten einen chronischen Einfluss ausüben. Die Beurteilungskriterien nach AOT40 und Ozonfluss zeigen jedoch, dass die CL jedes Jahr um das x fache überschritten werden. Das sind Tatsachen, die eine Gefährdung sehr wahrscheinlich machen. Nun stellt sich die Frage ob Konzentrationsbasierte Ansätze, wie MPOC oder AOT40 den Stress wirklich beurteilen lassen, da sie die Leitfähigkeit und damit das Eindringen des Ozons in die Pflanzen unberücksichtigt lassen. Andererseits beruhen die Angaben zum CL des AOT40 und des PODy nur auf wenigen Begasungsexperimenten mit für Bäumen sehr geringen Lebensalter der Experimentalpflanzen (Büker et al 2015). Begasungsversuche an adulten Bäumen gibt es zu wenige, die für die Ableitung von CL

herangezogen werden können. Ein greifbares Beispiel stammt aus dem Kranzberger Forst (Nunn et al. 2005, Karnosky et al. 2007, Matyssek et al. 2010) und ein weiteres aus China (Zhang et al. 2002).

Deshalb ist es von großer Wichtigkeit epidemiologische Untersuchungen zum Ozonfluss und zu strukturellen, phänologischen, ökophysiologischen und biochemischen Parametern inklusive des Zuwachsverhaltens und der Fruktifikation an natürlich wachsenden adulten Bäumen durchzuführen, um validere CL für adulte Bäume zu bekommen. Denn der Einfluss ohne Ozoneinwirkung ist nur bei Ausschlussbegasung mit ozonfreier Luft erkennbar und das ist nur unter sehr hohem experimentellem Einsatz erreichbar.

Mit den Flüssen, vor allem mit ansteigenden  $y$  sollten die Zuwächse, die am einfachsten, und schnellsten zu messen sind, korreliert werden, um Effekte der Ozonkonzentration auf die Produktion zu ermitteln. Eventuell lassen sich aus der Dosis-Wirkungsbeziehung unter Einbeziehung der berechneten Ozonflüsse potentielle Wachstumsraten errechnen, die auf Plausibilität überprüft werden müssten (Umkehrschluss). Dabei müssen allerdings immer Fruktifikationsjahre, die einen hohen Einfluss auf den Radialzuwachs haben, berücksichtigt werden.

## Schlussfolgerungen

Unsere Wälder sind nach wie vor hohen Ozonbelastungen ausgesetzt. Daher müssen Ozonmessungen integraler Bestandteil des Forstlichen Umweltmonitorings sein. Die vorliegenden Untersuchungen und Betrachtungen zeigen, dass neben der bisherigen konzentrationsbasierten Bewertung des Ozons auch der Ozonfluss in die Blätter bzw. Krone der Bäume die physiologischen und toxikologischen Wirkungen des Ozons wesentlich besser abgebildet werden können. 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 Ozonvorläufer-substanzen Stickstoffoxide und flüchtige Kohlenwasserstoffe. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass weiterhin Forschung notwendig ist, um die Dosis Wirkungsbeziehungen besser zu erfassen.

## Literatur

Baumgarten, M., Huber C., Büker P., Emberson L., Dietrich H.-P., Nunn A.J., Heerd C., Beudert B. & Matyssek R. (2009): Are Bavarian Forests (southern Germany) at risk

from ground LevelOzone? Assesment using exposure and flux based ozone indices. Env. Poll. 157,2091-2107. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.02.12

Braun, S., Flückiger, W., 1995. Effects of ambient ozone on seedlings of *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. New Phytologist 129, 33-44.

Büker, P., Morrissey, T., Briolat, A., Falk, R., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., Alonso, R., Barth, S., Baumgarten, M., Grulke, N., Karlsson, P.E., King, J., Lagergren, F., Matyssek, R., Nunn, A., Ogaya, R., Penuelas, J., Rhea, L., Schaub, M., Uddling, J., Werner, W., Emberson, L.D., 2012. DO3SE modelling of soil moisture to determine ozone flux to forest trees. Atmos. Chem. Phys. 12, 5537e5562. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-12-5537-2012>.

Büker P., Feng Z., Uddling J., Briolat A., Alonso R., Braun S., Elvira S., Gerosa G., Karlsson P.E., Le Thiec D., Marzuoli L., G., Öksanen, E., Wieser G., Wilkinson M, & Emberson L.D. (2015): New flux based dose-response relationships for ozone for European forest tree species. Env. Poll. 206, 163-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.033>

Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Cambridge, H.M., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., 2000a. Modelling stomatal ozone flux across Europe. Environ. Pollut. 109, 403-413.

Emberson, L.D., Wieser, G., Ashmore, M.R., 2000b. Modelling of stomatal conductance and ozone flux of Norway spruce: comparison with field data. Environ. Pollut. 109, 393-402.

Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., Cambridge, H.M., 2001. Modelling and mapping ozone deposition in Europe. Water Air Soil Pollut. 130, 577-582.

Emberson, L.D., Büker, P., Ashmore, M.R., 2007. Assessing the risk caused by ground level ozone to European forest trees: a case study in pine, beech and oak across different climate regions. Environ. Pollut. 147, 454-466. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2006.10.026>.

Ferretti M., Cristofolini F., Cristofori A., Gerosa G. & E. Gottardini (2012): A simple linear model for estimating ozone AOT40 at forest sites from raw passive sampling data. J. Environ. Monit., 2012, 14, 2238–2244 DOI: 10.1039/c2em30137g

Fuhrer, J., Skärby, L. & Ashmore, M.R. (1997). Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. Environmental Pollution 97, 91-106.

Gerosa, G., Ferretti, M., Bussotti, F. & D. Rocchini (2007): Estimates of ozone AOT40 from passive sampling in forest sites in South-Western Europe. Environmental Pollution 145 (2007) 629-635 doi:10.1016/j.envpol.2006.02.030

Grünhage L., Krause GHM, Köllner B, Bender J, Weigel H-J, Jäger H-J, Guderian R (2001): A new flux-orientated concept to derive critical levels for ozone to protect vegetation Environmental Pollution, 111, (3), 355–362

- Grünhage, L., Pleijel, H., Mills, G., Bender, J., Danielsson, H., Lehmann, Y., Castell, J.-F., Bethenod, O., 2012. Updated stomatal flux and flux-effect models for wheat for quantifying effects of ozone on grain yield, grain mass and protein yield. *Environ. Pollut.* 165, 147e157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2012.02.026>.
- ICP-Forest-Manual (2010): Part VIII „Assessment of Ozone Injury“, 16 pp. + Annex I, II, III, IV, V, 6 pp, [http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL\\_AAQsympt.pdf](http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL_AAQsympt.pdf)
- ICP Forest Manual Part (2010): Part IX, Meteorological Measurements, 16 pp. + Annex 1, 2, 3, 4, 20pp. [http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL\\_Meteo.pdf](http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL_Meteo.pdf)
- ICP-Forest Manual (2010): Part XV, Monitoring of Air Quality, 13 pp. [http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL\\_AAQ.pdf](http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL_AAQ.pdf)
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos. Trans. Royal Soc. B: Biol. Sci.* 273, 593-610. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>.
- Karlsson, P.E., Uddling, J., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Gimeno, B.S., Le Thiec, D., Oksanen, E., Vandermeiren, K., Wilkinson, M., Emberson, L., 2004. New critical levels for ozone effects on young trees based on AOT40 and simulated cumulative leaf uptake of ozone. *Atmos. Environ.* 38, 2283-2294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.027>.
- Karlsson, P.E., Uddling, J., Skärby, L., Wallin, G., Sellden, G., 2003. Impact of ozone on the growth of birch (*Betula pendula*) saplings. *Environ. Pollut.* 124, 485-495. [http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00010-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00010-1)
- Karlsson, P.E., Örlander, G., Langvall, O., Uddling, J., Hjorth, U., Wiklander, K., Areskoug, B. & Grennfelt, P. (2006). Negative impact of ozone on the stem basal area increment of mature Norway spruce in south Sweden. *Forest Ecology and Management* 232, 146-151.
- Karlsson, P.E., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Emberson, L., Gimeno, B.S., Le Thiec, D., Novak, K., Oksanen, E., Schaub, M., Uddling, J., Wilkinson, M., 2007. Risk assessments for forest trees: the performance of the ozone flux versus the AOT concepts. *Environ. Pollut.* 146, 608-616. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.012>.
- Karnosky D.F., Werner H., Holopainen T., Percy K., Oksanen T., Oksanen E., Heerdt C., Fabian P., Nagy J., Heilman W., Cox R., Nelson N. & Matyssek R. (2007): Free-Air Exposure Systems to Scale up Ozone Research to Mature Trees. *Plant Biol.* 9: 181–190.
- LRTAP Convention, 2010. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. In:Chapter 3:

Mapping Critical Levels for Vegetation.

[http://icpvegetation.ceh.ac.uk/publications/documents/Updatedchapter3\\_formattedSep2014.pdf](http://icpvegetation.ceh.ac.uk/publications/documents/Updatedchapter3_formattedSep2014.pdf)

- Matyssek, R., Karnosky, D.F., Wieser, G., Percy, K., Oksanen, E., Grams, T.E.E., Kubiske, M., Hanke, D., Pretzsch, H., 2010. Advances in understanding ozone impact on forest trees: messages from novel phytotron and free-air fumigation studies. *Environ. Pollut.* 158, 1990-2006. <http://dx.doi.org/10.1016/>
- Mills, G., Pleijel, H., Braun, S., Büker, P., Bermejo, V., Calvo, E., Danielsson, H., Emberson, L., Fernandez, I.G., Grünhage, L., Harmens, H., Hayes, F., Karlsson, P.-E., Simpson, D., 2011. New stomatal flux-based critical levels for ozone effects on vegetation. *Atmos. Environ.* 45, 5064-5068. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.009>.
- Nunn A.J., Reiter I.M., Häberle K.-H., Langebartels C., Bahnweg G., Pretzsch H., Sandermann H. & Matyssek, R. (2005): Response patterns in adult forest trees to chronic ozone stress: identification of variations and consistencies. *Environmental Pollution* 136 365-369.
- Paoletti, E., Conran, N., Bernasconi, P., Günthardt-Goerg, M.S., Vollenweider, P., 2009. Structural and physiological responses to ozone in Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) leaves of seedlings and mature trees under controlled and ambient conditions. *Sci. Total Environ.* 407, 1631e1643. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.061>.
- Pell, E.J. Sinn, J.P., Brendley, B.W., Samuelson, L., Vinten-Johansen, C., Tien, M., Skillman, J., 1999. Differential response of four tree species to ozone-induced acceleration of foliar senescence. *Plant Cell Environ.* 22, 779-790.
- Schaub, M., 2005. Physiological and foliar symptom response in the crowns of *Prunus serotina*, *Fraxinus americana* and *Acer rubrum* canopy trees to ambient ozone under forest conditions. *Environ. Pollut.* 133, 553-567. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2004.06.012>.
- Sun, G., McLaughlin, S.B., Porter, J.H., Uddling, J., Mulholland, P.J., Adams, M.B., Pederson, N., 2012. Interactive influences of ozone and climate on streamflow of forested watersheds. *Glob. Change Biol.* 18, 3395e3409. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02787.x>.
- Uddling, J., Günthardt-Goerg, M.S., Matyssek, R., Oksanen, E., Pleijel, H., Selldén, G., Karlsson, P.E. 2004. Biomass reduction of juvenile birch is more strongly related to stomatal uptake of ozone than to indices based on external exposure. *Atmospheric Environment* 38, 4709-4719
- VDI 2310 Blatt 1 (2010): Maximale Immissions-Werte zum Schutz der Vegetation. Kritische Dosis-Kenngrößen für Ozon. Berlin: Beuth Verlag, 2011

Wittig, V.E., Ainsworth, E.A., Naidu, S.L., Karnosky, D.F., Long, S.P., 2009. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 15, 396-424. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01774.x>.

Willert von, D.J., Matyssek R. & Herppich W., 1995: Experimentelle Pflanzenökologie Grundlagen und Anwendungen Georg Thieme Verlag Stuttgart, 344 S.

Zhang, W., Feng, Z., Wang, X., Niu, J., 2012. Responses of native broadleaved woody species to elevated ozone in subtropical China. *Environ. Pollut.* 163, 149-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.035>.

Internetseiten:

[http://www.wsl.ch/ozoneeffects/Pictorial\\_Data\\_Bases\\_EN](http://www.wsl.ch/ozoneeffects/Pictorial_Data_Bases_EN) Herausgeber: **Swiss Federal Research Institute WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf.** Eingesehen am 2.11.2015

[www.luft-rlp.de](http://www.luft-rlp.de) Aktuelle Informationen zum ZIMEN-Messnetz. Herausgeber: Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz. Abt. 6, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz und Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten, Kaiser-Friedrich-Straße 1, 55116 Mainz. Eingesehen am 2.11.2015)

<http://icpvegetation.ceh.ac.uk/>

<http://sei-international.org/do3se>