



Ozon im Wald

Schutzwirkung bei hoher Ozonbelastung?

Praktikumsbericht

Kurztitel: Ozon im Wald
Praktikumsbericht von: Marianne Leuenberger, Dipl. Umwelt-Natw. ETH
Juni 2007

Betreuung: Thomas Brunner
Amt für Umweltschutz des Kantons St.Gallen
Lämmli brunnenstrasse 54, 9000 St.Gallen
Tel. 071 229 42 51, E-Mail: thomas.brunner@sg.ch

Bezug: Download unter www.ostluft.ch

oder Bestellung bei
OSTLUFT, Geschäftsleitung
Stampfenbachstr. 12, Postfach, 8090 Zürich
Tel. 043 259 30 18, Fax 043 259 51 78, E-Mail: bestellungen@ostluft.ch

Copyright: Abdruck mit Quellenangabe erwünscht

Inhalt

Zusammenfassung	4
1. Fragestellung.....	5
1.1 Verhaltensempfehlungen	5
1.2 Ausgangsthesen	6
2. Parallelmessungen.....	7
2.1 Auswertungsidee	7
2.2 Recherchen.....	7
2.3 Ausgewertete Parallelmessungen	8
2.3.1 Zürichberg ZH	9
2.3.2 Ottenberg TG	10
2.3.3 Pian San Giacomo GR.....	12
2.3.4 Südschweden	13
3. Vertikale Ozonprofile	14
3.1 Recherchen.....	14
3.2 Übersicht Vertikalprofile	14
3.3 Vertikalprofile über offenem Gelände: POLLUMET	16
3.4 Vertikalmessungen im Wald	17
3.4.1 Turmmessungen im Misox GR	17
3.4.2 LUBETRAX: Turmmessungen im Urnertal	17
3.4.3 Nationales Forschungsprogramm 14: Turmmessungen in Alptal	18
3.4.4 ECHO: Turmmessungen bei Jülich, Deutschland.....	19
3.4.5 Turmmessungen Bayerischer Wald.....	20
3.4.6 Turmmessungen in Südwestfrankreich.....	21
3.4.7 Turmmessungen in Südschweden.....	23
3.4.8 Turmmessungen in Pennsylvania, US	23
4. Synthese	25
4.1 Wirkungshypothesen	25
4.2 Aussagen zur Belastungsverminderung	26
5. Schlussfolgerungen	27
5.1 Empfehlungen für das weitere Vorgehen.....	27
5.1.1 Ostluft.....	27
5.1.2 Übergeordnete Ebenen.....	27
5.2 Konsequenzen für die Verhaltensempfehlungen	28
5.3 Fazit	28
6. Literatur	29
Dank	30
Kontakte	30
Glossar	31

Zusammenfassung

Seit Jahren ist im Hochsommer das Thema der hohen Ozonbelastungen ein Dauerbrenner in den Medien. In der Bevölkerung besteht das Bedürfnis, die aktuelle Ozonsituation zu kennen. Zusätzlich interessieren Informationen zu möglichem Schutzverhalten. Aus diesem Grunde enthalten die von offiziellen Stellen bei hohen Belastungswerten verbreiteten Medienmitteilungen auch Verhaltensempfehlungen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ozonbelastung im Wald generell tiefer sei als im offenen Gelände und daher ein Aufenthalt im Wald eine Belastungsminderung bringe. Diese generellen Aussagen wurden in der vorliegenden Praktikumsarbeit anhand bestehender Messreihen überprüft und die resultierenden Erkenntnisse im Hinblick auf die Öffentlichkeitsarbeit aufgearbeitet.

Verschiedene Parallelmessungen an je einem Wald- und Feldstandort wurden zusammengetragen und spezifisch für Tage mit hohen Ozonbelastungen ausgewertet. Dazu standen zwei Datensätze von Parallelmessungen in der Ostschweiz sowie Auswertungen von zwei weiteren Messreihen zur Verfügung. Die Untersuchungen zeigen, dass im Tagesverlauf die Ozonwerte vor allem nachts im Wald etwas geringer sind als im offenen Gelände. Tagsüber hingegen weisen einige Messungen keine klaren Belastungsdifferenzen auf.

Um diese Befunde besser einordnen zu können, wurde nach weiteren Untersuchungen zu verwandten Themen recherchiert. So wurden Studien zu vertikalen Ozongradienten über freiem Feld und in Waldbeständen zur Beurteilung der möglichen Belastungsverminderung im Wald beigezogen. Vergleiche der Vertikalprofile zu verschiedenen Tageszeiten ermöglichten Rückschlüsse auf die Belastungsdifferenzen. Qualitativ konnte gezeigt werden, dass sich die Vertikalprofile im Wald am späteren Nachmittag und frühen Abend von denjenigen im offenen Gelände unterscheiden. Hingegen ergab die Auswertung der Vertikalprofile im Wald, dass während der Nachmittagsstunden die Ozonbelastung in Bodennähe oftmals praktisch identisch ist mit derjenigen über dem Wald. Folglich sind während der typischerweise nachmittags auftretenden Höchstbelastungen im Wald vergleichbare Ozonkonzentrationen zu erwarten wie im offenen Gelände.

Die Auswertungen der Vertikalprofile stützen also die Beobachtungen aus den Parallelmessungen. Mit den verfügbaren Untersuchungen kann die Hypothese, dass im Wald generell tiefere Ozonbelastungen zu erwarten seien, nicht bestätigt werden. Nur vom späteren Abend bis in die frühen Morgenstunden kann von einer tieferen Ozonbelastung im Wald ausgegangen werden. In den Mittags- und Nachmittagsstunden hingegen scheinen die Belastungsdifferenzen deutlich geringer.

Die bisher gebräuchlichen Verhaltensempfehlungen sollten demzufolge angepasst werden. Der Aufenthalt im Wald kann weiterhin als sinnvolles Hitzeschutzverhalten empfohlen werden, nicht aber als generelle Massnahme zum Schutz vor hohen Ozonwerten.

Mit dem heutigen Datenmaterial sind keine detaillierteren Aussagen möglich. Der starke Einfluss lokaler Gegebenheiten auf die Ozonwerte macht es schwierig, mit den vereinzelt Messungen konsistente Resultate zu erhalten. Für exaktere Aussagen müssten im Wesentlichen die Prozesse hinter der Belastungsverminderung besser verstanden sein. Dazu wären spezifischer auf die Fragestellung ausgelegte Messanordnungen nötig.

1. Fragestellung

1.1 Verhaltensempfehlungen

Seit Jahren werden im Sommer erhöhte Ozonbelastungen gemessen, wobei der Grenzwert von $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Sommerhalbjahr regelmässig überschritten wird. Das reaktive Ozon kann bei Konzentrationen über dem Grenzwert unter anderem die Atemwege reizen. Ozonempfindliche Personen leiden aber bereits bei Ozonbelastungen unterhalb des Grenzwertes unter solchen Symptomen (Cerc'l'Air 2006; ELK Eidgenössische Kommission für Lufthygiene, 2004). Deshalb ist Ozon immer wieder ein Thema für die Berichterstattung zur Luftqualität, wobei stets auch auf Massnahmen zur Verminderungen der Ozonbelastung hingewiesen wird.

Zur Schadensminderung gibt es grundsätzlich zwei Strategien: Primär sollten die Emissionen der Vorläuferstoffe grossräumig stark reduziert werden. Gemessen an der Ozonbelastung konnten allerdings noch keine grösseren Verbesserungen festgestellt werden. Neben der Ursachenbekämpfung wird auch individuelles Schutzverhalten empfohlen. Da Ozon vor allem zu akuten Beschwerden führt und sich in geschlossenen Räumen schnell abbaut, kann die individuelle Belastung mit einem geeigneten Ausweichverhalten gesenkt werden. Dazu werden von offiziellen Stellen verschiedene Verhaltensempfehlungen herausgegeben:

BPUK (Pressemitteilung vom 19.7.2006)

"Im Allgemeinen ist der Aufenthalt im Freien - z.B. Spaziergang, Baden oder Picknick - unproblematisch. Bei empfindlich reagierenden Personen können aber Schleimhautreizungen in Augen, Nase und Hals auftreten. Bei körperlicher Anstrengung kann bei diesen Personen auch die Lungenfunktion um 5 bis 10% reduziert werden. Sportanlässe, Ausdauersport und sonstige starke körperliche Anstrengungen im Freien sollten so geplant werden, dass diese Leistungen möglichst dann erbracht werden, wenn tiefere Ozonwerte zu erwarten sind, d.h. meist vormittags oder nach Sonnenuntergang. Auf Menschen, die Beschwerden infolge der Ozonbelastung verspüren, soll kein Leistungszwang ausgeübt werden. Belastungsmindernd sind z.B. Aktivitäten im Wald, wo die Ozonwerte in der Regel niedriger sind als auf freiem Feld."

Ozon Info (Broschüre "Ozon schadet")

"Vermeiden Sie extreme körperliche Anstrengungen bei hohen Luftbelastungen und grosser Hitze. Normale körperliche Aktivitäten sind dagegen bei den in der Schweiz üblichen Ozonwerten normalerweise unbedenklich. Tiefere Ozonbelastungen an sommerlichen Tagen finden Sie in den frühen Morgenstunden, in Parks und Gärten mit dichtem Baumbestand, in Wäldern oder im kühlen Zimmer – also an Orten, an denen Sie sich an heissen Tagen wohl fühlen."

Auf Grund der typischen Ozontagesgänge ist es sicherlich sinnvoll, körperlich anstrengende Tätigkeiten möglichst am Morgen zu verrichten. Ob und wie stark allerdings ein dichter Baumbestand eine Belastungsverminderung bewirken kann, ist bisher nicht durch Messresultate bestätigt worden.

Daraus ergibt sich die Fragestellung für dieses Praktikum. Mit Recherchen und spezifischen Auswertungen soll abgeklärt werden, ob aus verfügbaren Daten einfach kommunizierbare Verhaltensempfehlungen abgeleitet werden können, welche die Aussagen der heutigen Verhaltensempfehlungen konkretisieren:

"Können mit Hilfe verfügbarer Messwerte im Ostluft-Gebiet die Verhaltensempfehlungen zum Schutz vor hohen Ozonbelastungen veranschaulicht werden?"

1.2 Ausgangsthesen

Thesen zu den Wirkungsmechanismen, weshalb eine Belastungsdifferenz überhaupt auftreten kann, spielen in der Interpretation der Daten und der vorliegenden Studien eine zentrale Rolle. Die gängigsten stützen sich vor allem auf folgende Ansätze:

1. Ozon reagiert sehr schnell mit oxidierbaren Oberflächen. Im Wald steht mehr Oberfläche, z.B. Blätter, für Ozon-Abbaureaktionen zur Verfügung als im offenen Gelände. Zusätzlich wird Ozon über die Stomata aufgenommen (Erisman et al., 2005). Daraus kann geschlossen werden, dass die Ozonkonzentrationen im Wald schneller abnehmen als im offenen Gelände.
2. Je höher die Umgebungstemperatur und die Sonneneinstrahlung sind, desto höher ist die Ozonproduktionsrate (Staehelin, J. 2002). Im Wald findet man typischerweise tiefere Temperaturen und schattigere Verhältnisse als im Freiland, so dass eine lokale Ozonproduktion im Wald geringer sein dürfte als im offenen Gelände (Karpfenbauer, 1989).

Für die Bildung von Ozon durch photochemische Prozesse braucht es Vorläuferstoffe. Dazu gehören hauptsächlich Stickstoffdioxid (NO_2) und flüchtige organische Verbindungen (VOC). Es ist bekannt, dass die Schadstoffzusammensetzung in der Waldluft anders ist als in der Luft über dem offenen Gelände. Daher herrschen im Wald andere Bedingungen für die Bildung und den Abbau von Ozon als auf freiem Feld. Unter der Annahme, dass der Effekt biogener VOC die geringere NO_2 -Konzentration der Waldluft nicht kompensiert, wären im Wald weniger Vorläuferstoffe für die Ozonbildung verfügbar.

Diese Arbeit erhebt nicht den Anspruch diese Thesen zu verifizieren. Sie werden aber zur Diskussion der Resultate verwendet.

2. Parallelmessungen

2.1 Auswertungsidee

Die bestehenden Messreihen vom Ottenberg (1995) und Zürichberg (2001) wurden für die Fragestellung spezifisch ausgewertet. Dabei wurden Ozontagesgänge von Tagen mit vergleichbarem Ozonbildungspotenzial betrachtet. Dazu existiert ein Hilfsmittel, welches eine gezielte Auswahl von so genannten "Ozonwettertagen" (OWT) erlaubt. Dieser Kriteriensatz wurde von Künzle und Neu (1994) entwickelt und von Kernen (2004) für das Ostluft-Gebiet adaptiert. Der Kriteriensatz basiert auf der Abhängigkeit der Ozonwerte von Witterungsparametern. Mit einem Filter können Tage mit günstigen meteorologischen Bedingungen herausgefiltert werden. Ein Ozonwettertag muss alle in Tabelle 2.1.1 aufgeführten Kriterien erfüllen. Als Leitstation für das Ostluft-Gebiet dient die ANETZ-Station Tänikon.

Tabelle 2.1.1: Kriteriensatz für die Selektion von Tagen mit ozongünstigen Wetterbedingungen.

Parameter	Kriterium
Temperatur	>23.0° C (Arithmetisches Mittel von 11.00 Uhr bis 19.00 Uhr)
Windgeschwindigkeit	< 4.0 m/s (Arithmetisches Mittel von 11.00 Uhr bis 19.00 Uhr)
Globalstrahlung	> 500 W/m ² (Arithmetisches Mittel von 11.00 Uhr bis 16.00 Uhr)

Die Datensätze wiesen oftmals genau während interessanter Smogperioden grosse Datenlücken aus, was teilweise zu geringen Stichprobengrössen führte. Zur Beurteilung wurde jeweils der Median des selektierten Kollektivs verwendet, da er weniger anfällig ist auf extreme Messwerte. In den meisten Fällen wich er eher geringfügig vom Mittelwert ab.

Die Messungen sind in mitteleuropäischer Zeit (MEZ), entsprechend unserer "Winterzeit", registriert. Falls nichts anderes vermerkt ist, wurde diese Zeitangabe weiterverwendet. Dies ist bei der Kommunikation der Ergebnisse zu berücksichtigen, da während der Ozonsaison im Betrachtungsgebiet typischerweise die Sommerzeit gilt.

2.2 Recherchen

Drei Schweizer Messreihen dienten als Ausgangslage zur Untersuchung der Fragestellung. Für fundiertere Analysen war es aber unerlässlich, weitere Messreihen oder Auswertungen zur Beurteilung des Effekts des Waldes auf die Ozonbelastung beizuziehen. Dazu wurden verschiedene Forschungsinstitutionen kontaktiert (s. Anhang). Da auch Untersuchungen aus Deutschland oder Österreich die Verhältnisse im Betrachtungsgebiet relativ gut repräsentieren können, wurde die Recherche auf diese Nachbarländer ausgedehnt. Weiter wurden Literaturdatenbanken nach möglichen Informationen zum Thema durchsucht.

Trotz intensiver Recherchen konnte nur eine zusätzliche Parallelmessung aus Südschweden ausfindig gemacht werden. Entgegen der weit verbreiteten Meinung, dass zahlreiche Parallelmessungen existieren müssten, scheinen kaum derartige Daten vorzuliegen. Die meisten Ozonmessungen im Wald dienten der Waldschadensforschung, welche vorwiegend auf Begasungsexperimenten oder Vertikalprofilen basieren.

2.3 Ausgewertete Parallelmessungen

Für einen einfachen Überblick über die verschiedenen Messreihen sind die wichtigsten Informationen in einer Tabelle dargestellt. Neben den Informationen zu den Messreihen sind in Tabelle 2.3.1 die geschätzten Belastungsverminderungen für die verschiedenen Messstandorte angegeben. Da teilweise beträchtliche Unterschiede zwischen der Belastungsdifferenz in der Nacht und derjenigen tagsüber resultierten, sind die Resultate getrennt dargestellt.

Die Tabelle zeigt, dass die Ozonwerte im Wald nachts bei allen Messreihen tiefer als im Freiland sind. Während des Tages variieren die Belastungsverminderungen zwischen den verschiedenen Messungen jedoch beträchtlich. Die Zürcher und Thurgauer Daten zeigen zeitweise sogar höhere Ozonbelastungen im Wald, wohingegen die Bündner und die schwedische Studie eher eine permanente Belastungsverminderung vermuten lassen.

Tabelle 2.3.1: Übersicht über die Messanordnungen und die gemessenen Belastungsverminderungen im Wald.
 N = Anzahl relevante Messtage. OP = Auswertung bezieht sich auf eine Phase mit hohem Ozonbildungspotenzial.
 ΔO_3 = Belastungsminderung im Wald (geschätzte / ungefähre Werte)

Messreihe	N	OP	Messstandort	Waldtyp	Messhöhen über Boden	ΔO_3 Nacht ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ΔO_3 Tag ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ΔO_3 Nacht (%)	ΔO_3 Tag (%)
Zürich (Zürichberg)	17	✓	Schweiz, Zürich (Zoo),	Lichte Fläche nahe Waldrand	Wald: 2.3m Feld: 4m	(-5) - 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(-15) - 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0 - 5%	(-5) - 20%
Thurgau (Ottenberg)	30	✓	Schweiz, Ottenberg, 600 m.ü.M, WNW Hang	Jungforst (Sanasilva-Fläche) (ca. 1m hoch)	Wald: 3.1m Feld: 4.2m	5-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(-5) - 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0 - 10%	(-10) - (-5)%
Graubünden (Misox)	14	-	Schweiz, Pian San Giacomo, 1180 m.ü.M., Alpensüdseite Hanglage (SSW)	Lichter Nadelwald	Wald: 5m Feld: 4m	5-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10-15%	15 - 25%
Schweden (Antens Kapell)		-	Südschweden, Antens Kapell, 100 m.ü.M., 1989	Nadelwald (<i>Picea abies</i>)	Alle Standorte: 3m	ca. 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10-15%	3 - 8%

Diskussion

Die bestehenden Parallelmessungen ergeben keine konsistenten Aussagen. Die Resultate aus der Alpensüdseite weichen grundsätzlich von den übrigen Messreihen ab. Würde eine Verhaltensempfehlung ausschliesslich auf den Bündner Resultaten beruhen, so erschiene die Belastungssituation im Wald während des gesamten Tages deutlich besser. Dahingegen ergibt eine Beurteilung nach den Daten vom Zürich- oder Ottenberg keine klare Verhaltensempfehlung. Beide zeigen im Mittel tagsüber höhere Ozonbelastungen im Wald und in der Nacht nur eine geringe Belastungsverminderung.

Die morgendliche Abnahme der Belastungsdifferenzen deutet darauf hin, dass tagsüber nicht Depositionsprozesse konzentrationsbestimmend sind. Viel mehr scheint die Beeinflussung aus der darüber liegenden Reservoirschicht eine Angleichung der Standorte zu bewirken. Sobald die Sonnenstrahlung die bodennahen Luftmassen genügend erwärmt hat, ist durch konvektive und advective Strömungen eine effiziente Durchmischung der Luftschichten und somit der Eintrag von Ozon aus der Reservoirschicht zu erwarten. Demzufolge kann nicht von grundsätzlich tieferen Ozonbelastungen im Wald ausgegangen werden.

Für robustere Aussagen zur Belastungsverminderung im Wald steht insgesamt eine zu schmale Datenbasis zur Verfügung. Mit exemplarischen Messungen kann das komplexe System mit dem von zahlreichen Faktoren abhängigen Ozoneintrag, -abbau und -bildung nur ungenügend charakterisiert werden. Ein detaillierteres Prozessverständnis wäre aber notwendig, um qualitativ und quantitativ genauere Aussagen machen zu können.

2.3.1 Zürichberg ZH

Auf dem Zürichberg wurde im Jahr 2001 von der Abteilung Umwelt des Umwelt- und Gesundheitsschutzes Zürich (UGZ) eine Parallelmessung durchgeführt. Dabei wurde die Station Heubeeribüel als permanente Referenzstation im offenen Gelände verwendet. Sie wurde durch eine zusätzliche Messstation unter einem leichten Blätterdach beim Zoo Zürich ergänzt.



Abbildung 2.3.1: Luftbild von den Messtandorten am Zürichberg. Unten: Schulhaus Heubeeribüel. Oben: Waldstandort beim Zoo Zürich. (Quelle: Teletlas, 2006)

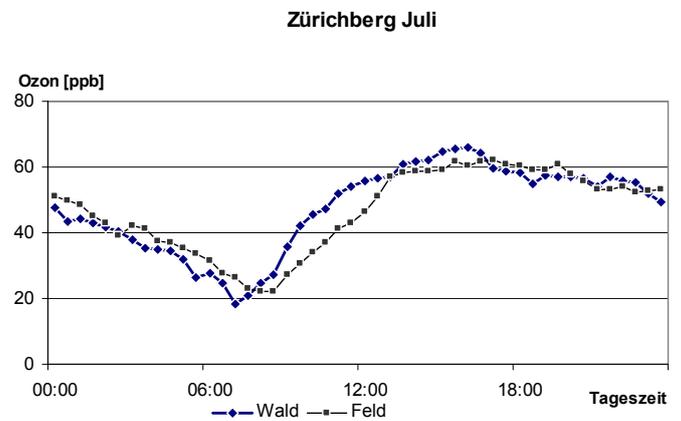


Abbildung 2.3.2: Durchschnittlicher Ozontagesgang an Ozonwettertagen am Zürichberg im Juli 2001. (Median, N=6)

Die Auswertungen des UGZ ergaben, dass die Spitze der Ozonbelastung vor allem im Hochsommer im Wald verringert war. Im Gegensatz dazu konnte zu Beginn der Vegetationsperiode im April und Mai keine Verminderung der Ozonbelastung festgestellt werden (Zürich, Umwelt und Gesundheitsschutz 2001). Ein exemplarischer Vergleich der Verlaufskurven der Abbildungen 2.3.3 und 2.3.4 zeigt ausserdem, dass im Hochsommer die Tagesgänge nicht mehr parallel verlaufen. Die Ozonwerte im Wald sinken nach Erreichen des Maximums schneller ab, so dass am Waldstandort am Abend deutlich tiefere Ozonbelastungen resultieren. Allerdings ist die im Einzelfall beobachtete Abschwächung hochsommerlicher Ozonpeaks im mittleren Verlauf der Ozonwettertage im Juli nicht erkennbar (Abbildung 2.3.2).

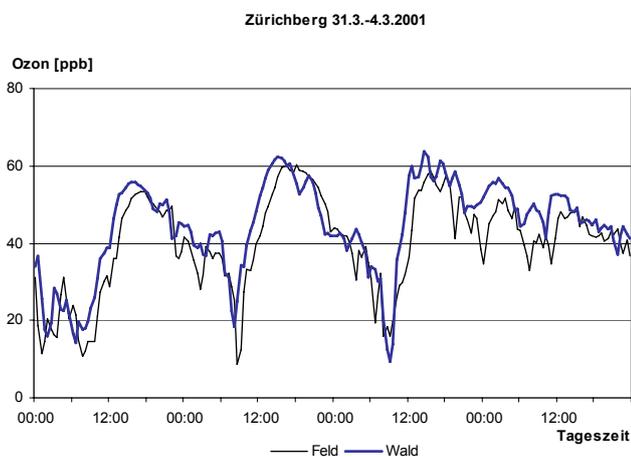


Abbildung 2.3.3: Ozontagesgänge im Frühling

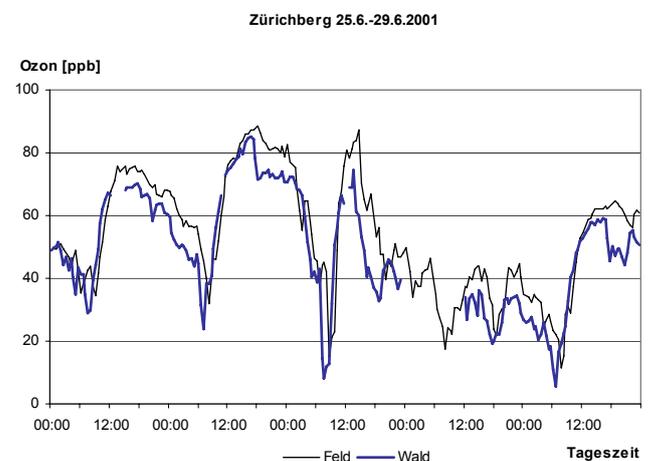


Abbildung 2.3.4: Ozontagesgänge im Juni

Diskussion

Die erst im Sommer zu beobachtende Abschwächung des Ozonpeaks bei der Waldstation Zoo könnte mit der Vegetationsentwicklung zusammenhängen. Eine dichtere Vegetation kann die Ozonzufuhr stärker bremsen und vergrössert die für den Ozonabbau zur Verfügung stehende Oberfläche.

Der früher einsetzende Anstieg der Ozonwerte im Wald kann wahrscheinlich auf den Messstandort zurückgeführt werden. Wenn der morgendliche Anstieg durch die Luftmassen aus der Reservoirschicht zu erklären ist, könnte die zeitliche Verschiebung einerseits mit der leicht erhöhten Lage der Waldstation erklärt werden. Andererseits könnten lokale Expositionsunterschiede zu unterschiedlicher Ausprägung der Thermik und damit zu unterschiedlichen Luftmassen führen.

2.3.2 Ottenberg TG

Das Amt für Umwelt hat von November 1994 bis Februar 1996 eine Parallelmessung am Ottenberg durchgeführt. Dafür wurde ein Messwagen in den Wald und ein zweiter ins benachbarte offene Feld stationiert (Abbildungen 2.3.5 und 2.3.6). Der Waldstandort befand sich auf einer Jungforstfläche, welche im Rahmen des Sanasilva Projektes beobachtet wurde.

Erste Auswertungen durch ein externes Ingenieurbüro liessen keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Belastungsdifferenz zu. Die Unterschiede der beiden Stationen sind gering und können nicht eindeutig erklärt werden (Etter, R., Eugster, M. 1997). Mit zusätzlichen Auswertungen der Ozonwettertage wurde ein klareres Bild der Belastungsdifferenz zwischen Wald und offenem Feld angestrebt.

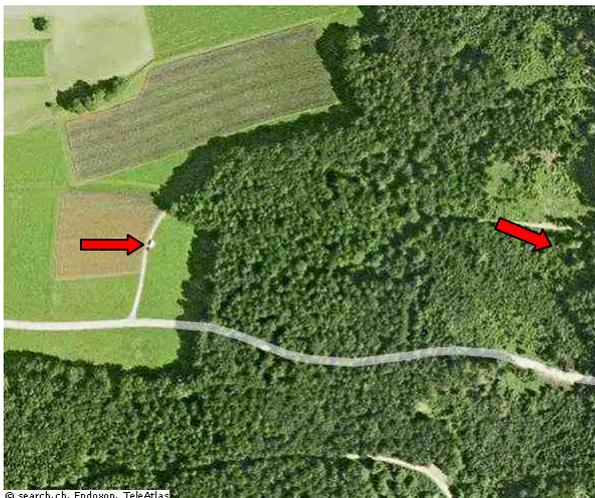


Abbildung 2.3.5: Luftbild der Messstandorte am Ottenberg. Quelle: TeleAtlas, 2006.



Abbildung 2.3.6: Bild der Messstation im Wald. (Quelle: Etter & Eugster, 1995)

Station	Koordinaten
Ottenberg Feld	724.340/272.325
Ottenberg Wald	724.650/272.320

Die Ozonwerte im Wald sind besonders in der Nacht leicht verringert. Tagsüber erreichen Sie aber die gleich hohen Spitzenwerte wie ausserhalb des Waldes (Abb. 2.3.7). Durch den schnelleren Abfall der Ozonwerte kann der Grenzwert im Wald ein bis drei Stunden früher als im Feld wieder eingehalten werden. Die Differenz zwischen den beiden Standorten liegt aber mehrheitlich in der Grössenordnung von 0-10%.

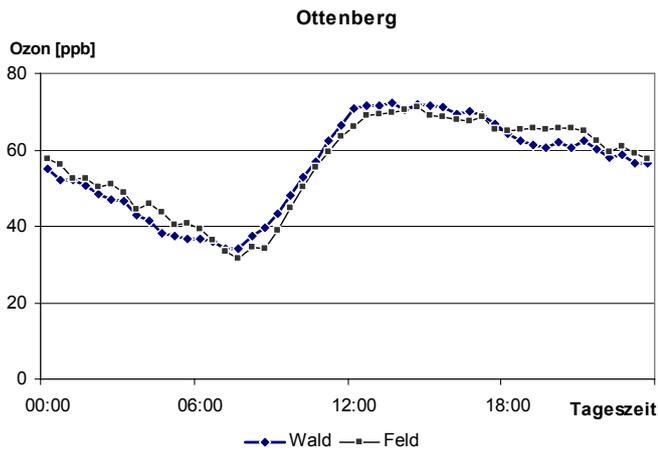


Abbildung 2.3.7: Durchschnittlicher Ozontagesgang an Ozonwettertagen am Ottenberg im Jahr 1995. (Median, N=30)

Eine Aufschlüsselung der Ozonwettertage nach Frühlings- und Sommermonaten ergab keine zusätzlichen Erkenntnisse zum Verlauf der beiden Tagesgänge. Auch die Auswertung einzelner Tage brachte keine neuen Informationen. Die in Abbildung 2.3.7 gezeigten durchschnittlichen Tagesgänge repräsentieren das Verhältnis zwischen den beiden Stationen für alle Ozonwettertage gut. Neben der Variabilität der absoluten Ozonwerte werden keine saisonalen Schwankungen verzeichnet.

Diskussion

Auch hier kann der Grund für die geringeren Differenzen zwischen den Kurven in der Messanordnung liegen. Die Waldstation mass auf vier Metern über Boden, wobei die Vegetation im Jungforst erst bis einen Meter über Boden reichte. Auch hier lag die Waldstation rund 20 Meter höher als die Feldstation, so dass der frühere Anstieg der Ozonwerte analog zu den Ergebnissen vom Zürichberg erklärt werden könnte.

2.3.3 Pian San Giacomo GR

Im Jahr 1999 wurden im Misox bei Pian San Giacomo Ozonmessungen in einem für die Südalpen typischen Nadelwaldhang durchgeführt. Dazu wurde ein Messturm errichtet, welcher Probeentnahmen in 5, 10, 15 und 20m über dem Waldboden ermöglichte. Als Referenzstation betrieb das Amt für Natur- und Umweltschutz ANU des Kantons Graubünden einen Messwagen rund 800m weiter talaufwärts, dessen Sonde auf 4m über Boden frei anströmbar war (s. Abb. 2.3.8).



Abbildung 2.3.8: Luftbild der Messstandorte bei Pian San Giacomo. Quelle: TeleAtlas, 2006.

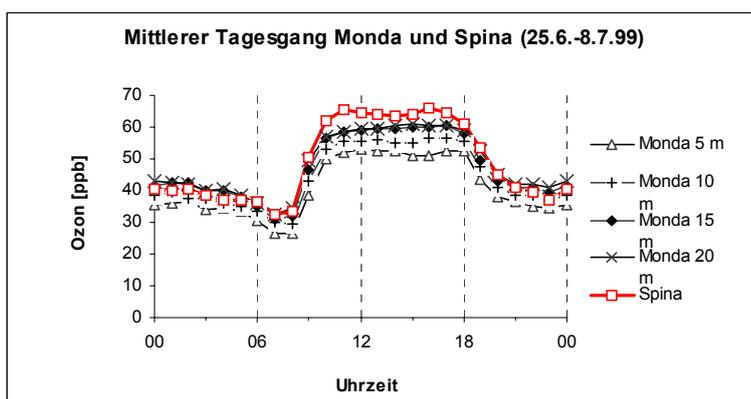


Abbildung 2.3.9: Mittlerer Ozontagesgang an den Messstandorten Spina (Feld) und Monda (Wald). Quelle: Thudium, J., Frei, A., Tschurr, M., Lötscher, H., 1999.

In der relativ kurzen Messperiode zwischen dem 25.6.1999 und dem 8.7.1999 wurde unter anderem eine Phase mit hochsommerlichem Wetter erfasst. Die Abbildung 2.3.9 repräsentiert demzufolge durchschnittliche Tagesgänge aus verschiedenen Wetterlagen.

Die Auswertungen zeigen ein anderes Muster der Belastungsdifferenzen als die Thurgauer und die Zürcher Daten. An der Feldstation Spina sind die Messwerte über den ganzen Tagesgang hinweg höher als die Werte des untersten Waldniveaus auf 5 Metern über dem Waldboden. Gegensätzlich verschieden präsentiert sich vor allem auch der Verlauf der prozentualen Veränderungen. Der kleinste Unterschied wurde mit 10-15% zwischen 20 Uhr und 6 Uhr gemessen. Deutlich grösser ist die relative Differenz tagsüber. Sie beträgt bis zu 25% und erreicht ihr Maximum in den Nachmittagsstunden.

Diskussion

Im Gegensatz zu den Messungen am Zürichberg bzw. Ottenberg wurden die Messungen in einem dichteren Nadelwaldbestand durchgeführt. Möglicherweise wurde deshalb die Luft im Waldesinneren weniger stark von konvektiven und advektiven Strömungen beeinflusst als bei den anderen beiden Messungen, die im Umfeld weniger dichter Baumbestände durchgeführt wurden. Somit würde der Ozonabbau an den organischen Oberflächen dieses Waldes weniger rasch durch erneute Ozonzufuhr von aussen kompensiert.

2.3.4 Südschweden

Aus Antens Kapell, Südschweden, ist eine Parallelmessung dokumentiert mit ähnlicher Messanordnung wie in Pian San Giacomo. In einem Nadelwald wurde an zwei Stellen und als Referenz im benachbarten offenen Gelände je eine Messstation errichtet. Es wurden auf 3m und auf 13m Höhe je ein Messpunkt angebracht, so dass neben dem horizontalen auch ein vertikaler Gradient erfasst wurde (Abb. 2.3.10 A).

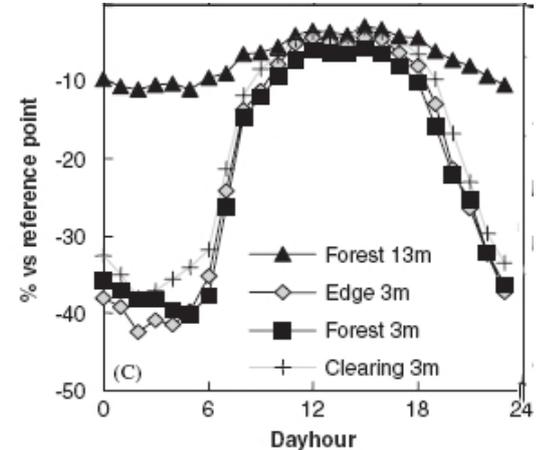
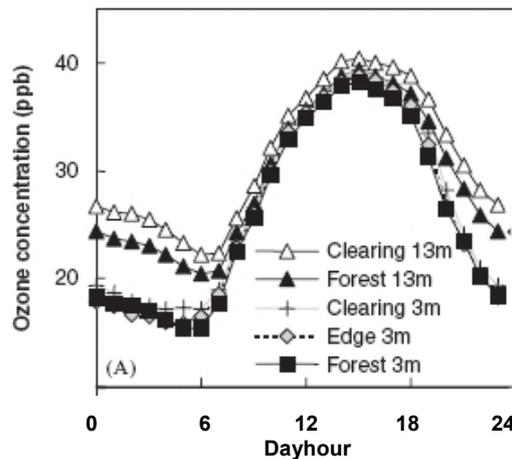
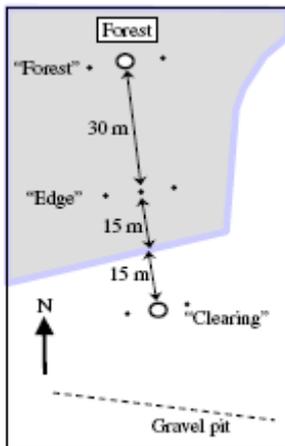


Abbildung 2.3.10 A):
Messanordnung in Antens
Kapell. Quelle: Karlsson et
al., 2006.

Abbildung 2.3.10 B): Mittlere Ozontagesgänge
der verschiedenen Messpunkte für die
Messperiode vom 7. Juli bis 30. September
1989. Quelle: Karlsson et al., 2006.

Abbildung 2.3.10 C): Ozontagesgänge relativ zur
Messstation im Feld auf 13m Höhe. Berechnet
aus den mittleren Ozontagesgängen (s. Grafik B).
Quelle: Karlsson et al., 2006.

Für unsere Fragestellung sind vor allem die Aufzeichnungen der Tagesgänge der bodennahen Messungen interessant (Abb. 2.3.10 B). Es sind kaum Unterschiede zwischen den drei bodennahen Messpunkten in 3m Höhe zu erkennen. Die Unterschiede zwischen Feld- und Waldstationen bewegen sich in der Größenordnung von wenigen Prozenten. Abbildung 2.3.10 C) zeigt in den frühen Morgenstunden eine leicht grössere Differenz der Ozonbelastung zwischen Feld und Wald. Tagsüber liegen die Belastungsdifferenzen im Bereich von 0 bis 5%, wobei während der höchsten Belastung kaum Differenzen auftreten. Zwischen Mitternacht und 6 Uhr beträgt der maximale Unterschied zwischen Wald- und Feldstation 5 bis 10%. Karlsson et al. schreiben diesen Effekt den nächtlichen Temperaturinversionen zu. Die Autoren der Studien bemerken zusätzlich, dass die Ozonkonzentration im Wald gegenüber dem Feld umso stärker abfällt, je länger die Luftmassen sich in Waldumgebung befunden haben (travel time & travel distance).

Diskussion

Interessant ist hier vor allem die Vergleichsmöglichkeit zwischen horizontalen und vertikalen Differenzen. Am Nachmittag ist weder horizontal noch vertikal ein starker Gradient zu erkennen. Die untersten 15 Meter der Atmosphäre scheinen am Nachmittag sowohl im Wald als auch auf dem freien Feld relativ gut durchmischt, so dass in etwa gleiche Ozonwerte auftreten. Nachts hingegen sind die vertikalen Differenzen viel grösser als die horizontalen. Dies deutet darauf hin, dass sich in Bodennähe die Abbauraten im Wald und auf dem Feld nicht allzu stark unterscheiden.

3. Vertikale Ozonprofile

3.1 Recherchen

Nachdem die Auswertungen der Parallelmessungen nicht zu konsistenten Ergebnissen führten, wurden die Recherchen weiter ausgedehnt. Mit der Idee, dass ein Vergleich vertikaler Ozonprofile im Wald und über offenem Gelände Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Tagegänge ermöglichen sollte, wurde die Recherche auf Vertikalprofile ausgeweitet. Dahinter steht die Überlegung, dass die Ozontagesgänge vor allem das Wechselspiel zwischen der Anreicherung bodennaher Luftschichten mit Ozon aus der Reservoirschicht tagsüber und dem nächtlichen Ozonabbau in Bodennähe darstellen. Diese Durchmischungsprozesse sind in Vertikalprofilen ersichtlich. Wenn nun zu bestimmten Tageszeiten die vertikalen Gradienten über Wald und Feld unterschiedlich sind, kann man auch von einer horizontalen Belastungsdifferenz zwischen Feld und Wald ausgehen. Kann hingegen im Wald kein deutlich unterschiedlicher Ozongradient festgestellt werden, dürfte die Ozonbelastung im und ausserhalb des Waldes gleich hoch sein.

Im Rahmen des Forschungsprojektes Luftverunreinigungen und Meteorologie in der Schweiz POLLUMET wurden mit Fesselballonen zu verschiedenen Tageszeiten vertikale Ozonprofile über offenem Gelände gemessen. Diese Profile wurden hier als Freilandreferenz für die Ozonprofile im Wald verwendet.

Die Waldschadensforschung hat in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Ozonmessungen im Wald durchgeführt. Daher wurden zum Vergleich des vertikalen Ozonprofils im Wald Daten und Auswertungen von Turmmessungen im Wald gesucht. Die gezielte Recherche bei Experten wurde durch Literaturrecherchen ergänzt. So entstand ein Überblick über die für die Fragestellung möglicherweise hilfreichen Untersuchungen.

3.2 Übersicht Vertikalprofile

Die Resultate der nachfolgend beschriebenen Messreihen sind in der Tabelle 3.2.1 zusammengefasst. Für jede Untersuchung ist die geschätzte Belastungsdifferenz zwischen dem obersten und untersten Messpunkt in absoluten und relativen Werten aufgelistet.

Aus diesen Resultaten wird ersichtlich, dass die Ozonbelastung im Wald vor allem nachts deutlich verringert ist. Im offenen Gelände scheint der Gradient nachts etwas weniger stark zu sein. Tagsüber hingegen variieren die Belastungsdifferenzen beträchtlich. In manchen Fällen konnte keine Abnahme der Ozonwerte in Bodennähe gemessen werden. Andere Untersuchungen fanden auch tagsüber grössere vertikale Ozongradienten im Wald.

Tabelle 3.2.1: Übersicht über die Messanordnungen und die gemessenen Vertikalgradienten.

N = Anzahl relevante Messtage. OP = Auswertung bezieht sich auf eine Phase mit hohem Ozonbildungspotenzial.

ΔO_3 = Belastungsminderung im Wald (geschätzte / ungefähre Werte)

Studie	N	OP	Messstandort	Messumgebung	Messhöhen	ΔO_3 Nacht	ΔO_3 Tag
POLLUMET	1	✓	Berner Seeland	Offenes Gelände	Unten: 0m Oben: 50m	20-6 Uhr: 5-25% bzw. 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6-20 Uhr: 0-5% 0-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Graubünden	3*	✓	Schweiz, Pian San Giacomo, 1180 m.ü.M., Alpensüdseite Hanglage (SSW), 1999	Lichter Nadelwald	Unten: 5m Oben: 20m (Kronendach bei 30m)	15-11 Uhr: 15 - 25% bzw. 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11-15 Uhr: 10-15% bzw. 20-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Uri (LUBETRAX)	2*	✓	Schweiz, div. Standorte im Urnerthal, 400-1200m.ü.M., 1997	Laubmischwald oder Nadelwald	Unten: 2m Oben: 20m (unterhalb Kronendach)	22-7 Uhr: 20-40% Bzw. 10-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	7-19 Uhr: 0-10% bzw. 0-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 19-22 Uhr: 10-20% bzw. 5-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NFP 14	10	✓	Schweiz, Alptal, 1185 m.ü.M, Voralpin, 1987 Hanglage (W)	Mehrstufiger Fichtenbestand	Unten: 4m Oben: 40m	18 - 6 Uhr: 20% bzw. 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6 - 18 Uhr: 0-3% bzw. 0-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ECHO	2	✓	Deutschland, Nordrhein Westfalen, Jülich, 83 m.ü.M, 2002	Einstufiger Mischwaldbestand	Unterste: 1m Oberste: 40m (Westturm)	22 - 6 Uhr: 40-50% bzw. 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6 - 11 Uhr: 10-20% bzw. 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 11 - 22 Uhr: 5 -10% bzw. 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Bayern (Enders, 1992)	>1500	-	Deutschland, Bayerischer Wald, Grosse Ohe, 1989	Mischwaldbestand (70% Nadelhölzer, 30% Laubbäume)	Unterste: 6m Oberste: 51m	12 - 6 Uhr: 50% bzw. 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5-20% bzw. 5-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	6 - 12Uhr: 10 - 15% bzw. 5-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 0-5% bzw. 0-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Frankreich (Fontan et al., 1992)	1*	-	Südfrankreich, Region Les Landes, nahe Atlantik, 1984	Nadelwald	Unterste: 5m Oberste: 35m	22 - 5 Uhr: 30 - 50% bzw. 20-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	17 - 22 Uhr: 5 - 20% bzw. 0-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Schweden 1 (Karlsson et al., 2006)	85	-	Südschweden, Antens Kapell, 100 m.ü.M., 1989	Nadelwald (<i>Picea abies</i>)	Unten: 3m Oben: 13m (Kronendach bei 20m)	18 - 6 Uhr: 10 - 20% bzw. 15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6 - 18 Uhr: ca. 5% bzw. 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Schweden 2 (Karlsson et al., 2006)	93	-	Südschweden, Niklasdam, 115 m.ü.M., 2003	Nadelwald (<i>Picea abies</i>)	Unten: 2m Mitte: 10m Oben: 20m (Kronendach bei 20 - 25m)	20 - 6 Uhr: 20-30 % bzw. 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6 - 18 Uhr: 7 - 15% bzw. 5-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pennsylvania (Skelly et al. 1996)	153**	-	Pennsylvania, US, Moshannon State Forest, 655 m.ü.M., 1993-95	Mischwaldbestand (<i>Prunus serotina</i> , <i>Quercus rubra</i> , <i>Acer rubrum</i>)	Unten: 2m Oben: 23m	15 - 10 Uhr: 20% bzw. 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 - 15 Uhr: 0 -5% bzw. 5-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Aus diesen Untersuchungen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Nachts sind im Wald die Ozonwerte in Bodennähe meist deutlich tiefer als am obersten Messniveau (Grössenordnung 20 bis 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Über offenem Gelände ist der nächtliche Gradient kleiner (ca. 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Tagsüber kommt es über offenem Gelände zu einer gleichmässigen Durchmischung der Luftmassen, so dass kaum vertikale Ozondifferenzen gemessen werden. Ähnliche Veränderungen des Vertikalprofils können im Wald beobachtet werden. Dabei reduzieren sich die Belastungsdifferenzen zwischen Wald und freiem Feld auf ca. 5 bis 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Am späten Nachmittag nehmen die Differenzen wieder zu und erreichen ihr Maximum am frühen Morgen. Wann genau dieser Prozess einsetzt, variiert je nach Untersuchung. Mehrheitlich kann im Wald ab 18 Uhr eine deutliche Abnahme der Ozonkonzentration in Bodennähe beobachtet werden. Wann genau dieser Prozess auch über offenem Gelände einsetzt, dürfte in Abhängigkeit von der Topographie und den Strahlungsverhältnissen variieren.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Studien kurz erläutert und relevante Fakten präsentiert. Für detailliertere Informationen wird auf die Originalliteratur verwiesen.

Diskussion

In allen hier vorgestellten Forschungsarbeiten zu vertikalen Ozonprofilen konnte zeitweise eine Durchmischung der Luftmassen im Wald mit den darüber liegenden Luftschichten festgestellt werden. Allerdings trat dieses Phänomen nicht in allen Studien gleich häufig und gleich stark auf:

Messreihen, welche die Ozongradienten über längere Zeiträume erfassten, weisen darauf hin, dass die Ozonkonzentration zum Waldboden hin im Normalfall abnimmt. Die Häufigkeit der Tage, an welchen eine praktisch vollständige Durchmischung der Waldluft auftrat, scheint besonders bei starker Sonneneinstrahlung hoch zu sein.

Aufgrund der Strahlungsabhängigkeit von Ozonbelastung *und* Konvektion ergibt sich die Frage, ob nicht in Zeiten hoher Ozonbelastung die Waldluft derart stark von den Luftmassen ausserhalb des Waldes beeinflusst wird, dass im Wald keine grosse Belastungsverminderung gegenüber dem Freiland mehr zu erwarten ist. Die verfügbare Datenlage enthält Indizien sowohl für als auch gegen diese Annahme. Da die Meteorologie und die Luftchemie in Waldbeständen stark von lokalen Faktoren abhängen (Sundberg et al., 2006), kann eine derartige Hypothese vermutlich nicht für alle Waldstandorte generalisiert werden – so wenig wie ihr Gegenteil.

3.3 Vertikalprofile über offenem Gelände: POLLUMET

Im Rahmen des Forschungsprojektes POLLUMET wurden mit Fesselballonen Vertikalprofile von Luftschadstoffen über dem offenen Gelände erhoben. Aus den Gradienten in Abbildung 3.3.1 A) ist ersichtlich, dass es in der Nacht in Bodennähe zu einem Ozonabbau kommt, während die Ozonkonzentrationen in grösseren Höhen praktisch unverändert bleiben. Unter Einfluss des Sonnenlichts und den damit steigenden Temperaturen am Boden kommt es zu einer konvektiven Durchmischung der bodennahen Luft mit den Luftmassen aus der Reservoirschicht, so dass sich die Ozonkonzentrationen der verschiedenen Höhen angleichen (Abbildung 3.3.1 B). Zwischen 19 und 20 Uhr setzt wieder eine Abnahme der bodennahen Ozonkonzentrationen ein (Abbildung 3.3.1 C)

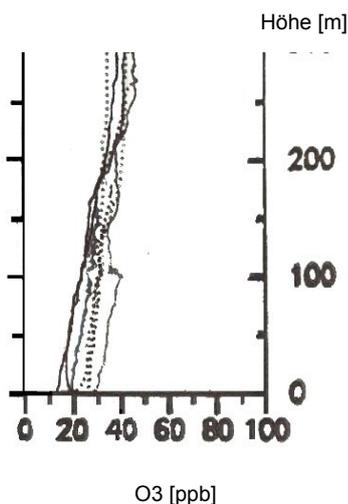


Abbildung 3.3.1 A): Ozonprofile über offenem Gelände gemessen am 10.7.1991 zwischen 0.00 und 8.30 Uhr

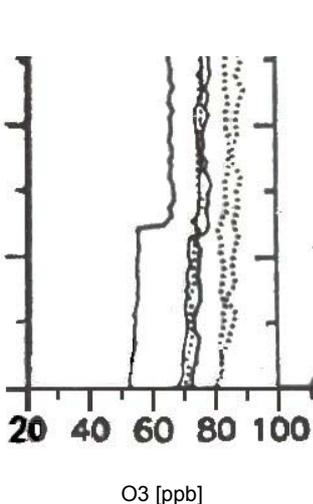


Abbildung 3.3.1 B): Ozonprofile über offenem Gelände gemessen am 10.7.1991 zwischen 13.00 und 19.00 Uhr

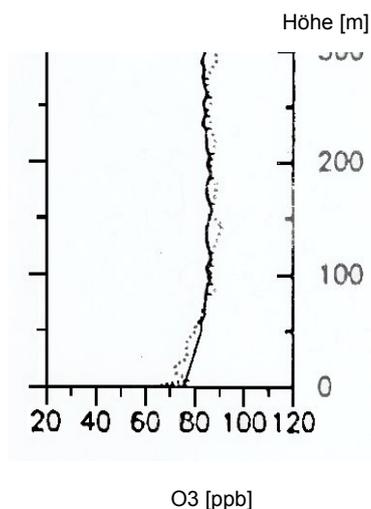


Abbildung 3.3.1 C): Ozonprofile über offenem Gelände gemessen am 10.7.1991 zwischen 19.30 und 20.30 Uhr

3.4 Vertikalmessungen im Wald

3.4.1 Turmmessungen im Misox GR

Turmmessungen in einem lichten Nadelwald bei Pian San Giacomo zeigen eine klare Abnahme der Ozonkonzentration im Wald. Die Abbildung 3.4.1 zeigt den gemittelten Ozontagesgang für eine Phase mit hochsommerlichem Wetter und hoher Ozonbelastung. Wie schon im Kapitel 2.3.3 gezeigt, ist weder der horizontale noch der vertikale Gradient tagsüber abgeschwächt. Der Messwagen stand in einem dichten Nadelwald, so dass das Sonnenlicht den Waldboden auch in den Nachmittagsstunden nur teilweise erreichen (und eine allfällige Temperaturinversion auflösen) konnte.

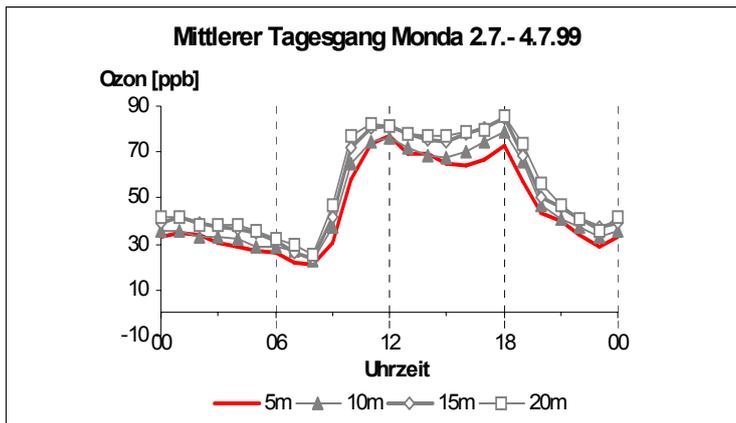


Abbildung 3.4.1: Ozontagesgänge auf verschiedenen Messhöhen an der Waldstation in Monda, Pian San Giacomo. Quelle: Thudium et al., 1999.

Diskussion

Diese Resultate unterscheiden sich zum Teil wesentlich von den nachfolgenden Untersuchungen. Wie schon im Kapitel 2.3.3 erläutert, könnte dies eine Folge der konkreten Standortwahl sein.

3.4.2 LUBETRAX: Turmmessungen im Urnertal

An vier verschiedenen Standorten entlang der A2 wurden 1997 Turmmessungen durchgeführt, wobei die Standorte teils nahe an der Autobahn gewählt wurden. Die beiden Messstandorte Ober Intschi und Bodenwald lagen in einem Mischwald, 400 respektive 1100 Meter von der Autobahn entfernt. In den Abbildungen 3.4.2 A) und B) wird ersichtlich, dass die Vertikalprofile von Ozon je nach Standort und Tageszeit variieren. Am Nachmittag kann an beiden Standorten eine leichte Abnahme der Ozonkonzentrationen in Bodennähe beobachtet werden. Auffallend sind zudem die verstärkten Abnahmen zwischen zwei und fünf Metern über Boden. Eine zusätzliche Auswertung der Messdaten zeigte, dass tagsüber auch Fälle ohne Abnahme oder gar mit einer Zunahme der Ozonwerte Richtung Waldboden auftraten. Nachts hingegen bewegt sich die Differenz zwischen dem obersten und untersten Messpunkt zwischen 20 und 40%.

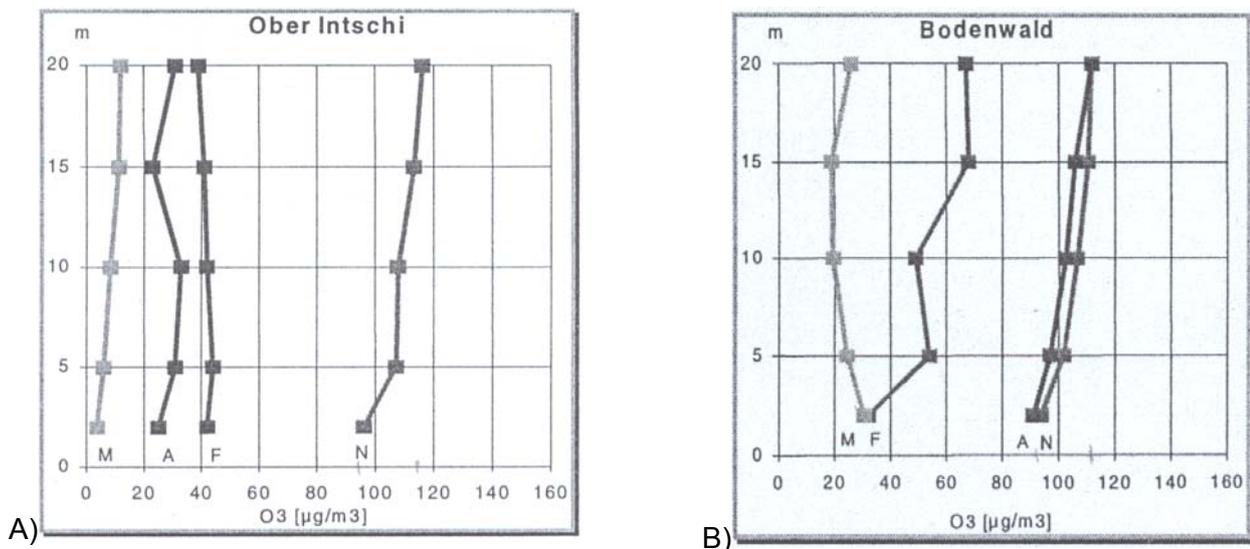


Abbildung 3.4.2: Vertikalprofile im Urnertal. A) Ober Intschi: 690 m.ü.M., B) Bodenwald: 490 m.ü.M. F: 4-5 Uhr, M: 6-8 Uhr, N: 14-18 Uhr, A: 19-21 Uhr. Quelle: Bericht LUBETRAX, Thudium, J., Frei, A., Kocsis, O., Lötscher, H., 1998

Diskussion

Auf Grund der teilweise sehr unterschiedlichen Vertikalprofile kann vermutet werden, dass hier die Ozonwerte sowohl durch Durchmischung der Luftmassen als auch durch lokale Abbau- und Bildungsprozesse beeinflusst wurden. Bei Messstandorten in der Nähe von Schadstoffquellen dürfte die Senkenfunktion des Waldes wesentlich von anderen Prozessen überlagert werden.

3.4.3 Nationales Forschungsprogramm 14: Turmmessungen in Alptal

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramm 14 (NFP14) wurden an drei verschiedenen Standorten Messtürme errichtet, um die Schadstoffbelastung des Waldes abschätzen zu können. Bei Alptal wurde auf zwei Messniveaus gemessen: 2m über der Baumkrone und 4m über Boden. Die Abbildung 3.4.4 stellt die Ozontagesgänge für die beiden Messhöhen während einer Schönwetterperiode dar. Aus der untersten Kurve mit der Differenz der beiden Verläufe ist zu erkennen, dass um die Mittagsstunden der Unterschied zwischen den Messhöhen gering ist und praktisch die gleichen Ozonmaxima erreicht werden. Erst in der zweiten Nachmittagshälfte, zwischen 16 und 20 Uhr, sinken die Ozonwerte im Wald schneller ab als darüber.

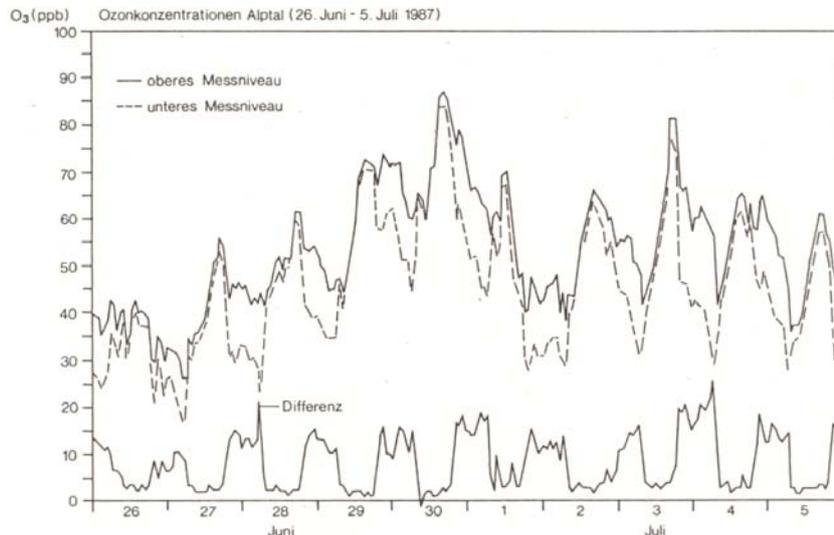


Abbildung 3.4.3: Ozonmessungen im und über dem Wald. Quelle: Gehrig, R., 1994

Diskussion

Der gleichzeitige morgendliche Anstieg und das Erreichen der praktisch gleich hohen Maxima ist ein Hinweis auf die Beeinflussung der Waldluft durch die darüber liegenden Luftmassen. Der anschließende, raschere Abbau des Ozonpeaks im Wald könnte mit einer schnelleren Ozonzerstörung im Wald erklärt werden.

3.4.4 ECHO: Turmmessungen bei Jülich, Deutschland

Innerhalb des Forschungsprojektes zu Emissionen und chemischen Umwandlungen von biogenen flüchtigen organischen Verbindungen ECHO in einem Mischwaldbestand bei Jülich wurden mehrere Turmmessungen durchgeführt. Unterschiedliche Vertikalprofile der Ozonkonzentrationen im Wald sind in den Abbildungen 3.4.4 A) und B) dargestellt. Im Beispiel A) ist sind die Ozonwerte in Bodennähe meist verringert. Im Beispiel B) hingegen wurde über die Mittags- und Nachmittagsstunden auf allen Höhen eine ähnliche Ozonkonzentration gemessen. Zu beachten gilt, dass an beiden Tagen die Ozonkonzentration unterhalb von zwei Metern stark abnimmt und in grosser Bodennähe deutlich geringer ist als in der darüber liegenden Waldluft.

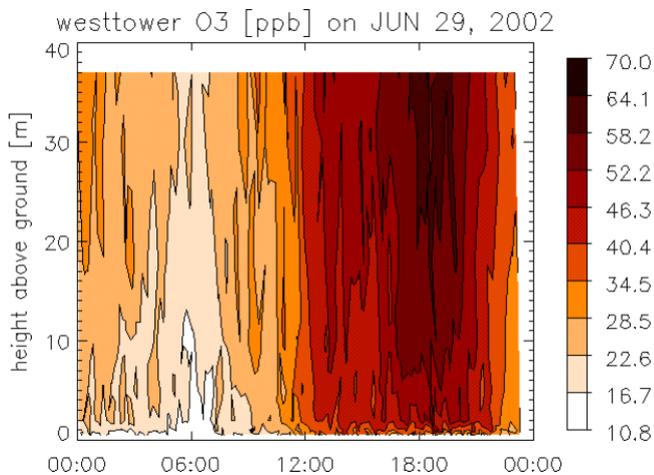


Abbildung 3.4.4 A) Quelle: Koppmann, R., 2004

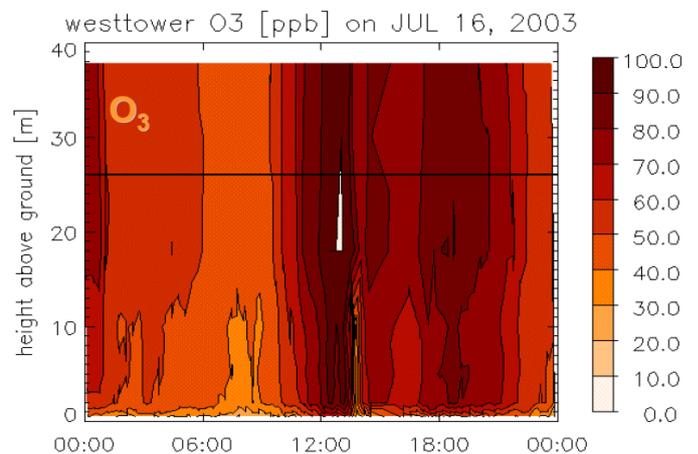


Abbildung 3.4.4 B). Quelle: Koppmann, R., 2004

Diskussion

Der Vergleich der beiden Beispiele deutet darauf hin, dass sich auch im Wald der Vertikalgradient in manchen Fällen auflöst. Interessanterweise sind am Tag mit der höheren Ozonbelastung praktisch die gleichen Werte gemessen worden wie über den Baumkronen. Dies könnte witterungsbedingt sein, z.B. indem sich an Tagen mit starker Sonneneinstrahlung die Ozonwerte eher denjenigen in grösserer Höhe angleichen als an Tagen mit diffuserer Einstrahlung.

Die starke Abnahme der Ozonkonzentration unterhalb von zwei Metern macht deutlich, dass für die Beurteilung der menschlichen Exposition zwischen ein und zwei Metern über Boden gemessen werden müsste. Mit Standardmesshöhen von 3 oder 4 Metern könnte die Ozonbelastung im Wald überschätzt werden.

Bei schräg einfallender Sonne ist es denkbar, dass die konvektiven Prozesse die untersten Schichten der Waldluft weniger beeinflussen, als die Luftmassen auf einigen Metern Höhe. Dies würde bedeuten, dass ein bis zwei Meter über Waldboden Depositionsprozesse länger dominant bleiben als über offenem Gelände.

Analog zeigen Jäggi et al. (in press) in ihrer Arbeit, dass die Ozonwerte über Grasland erst innerhalb der von Gras umgebenen Luftmassen stark abnehmen.

Somit könnte die unterschiedliche Wirksamkeit von Depositions- und Durchmischungsprozessen auf menschlicher Kopfhöhe zeitweise wesentliche Belastungsdifferenzen begründen.

3.4.5 Turmmessungen Bayerischer Wald

Enders (1992) präsentiert Ozonmessungen, welche über fünf Jahre im Bayerischen Wald gemacht wurden. Er analysiert verschiedene Muster von vertikalen Profilen und geht näher auf die Profile und deren Abhängigkeit von der Wettersituation ein. Die Messpunkte auf 31, 41 und 51m liegen über den Baumkronen. Die Messung auf sechs Metern Höhe repräsentiert eine Ozonkonzentration im Waldesinneren.

Abbildung 3.4.5 A) stellt die von Enders als „Normalfall“ bezeichneten Ozontagesgänge dar. Es ist eine deutliche Abnahme entlang der Vertikalen zu erkennen, wobei sowohl in der Nacht als auch am Nachmittag die Ozonbelastung in Bodennähe um 50% verringert ist. Nur während des morgendlichen Anstiegs der Ozonkonzentrationen liegen die Kurven näher zusammen.

Demgegenüber zeigt Abbildung 3.4.5 B) verschiedene Abweichungen zum "Normalfall". Enders beobachtete, dass sich der typische vertikale Gradient beispielsweise während Schönwetterperioden auflöste. Obwohl verschiedene meteorologische Daten in die Beurteilung dieser Phänomene beigezogen wurden, konnte keine eindeutige Begründung gefunden werden.

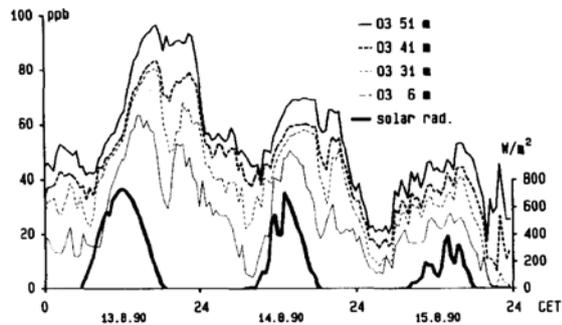


Abbildung 3.4.5 A): Exemplarischer Ausschnitt aus den Ozonmessungen für einen normalen vertikalen Ozongradienten. Quelle: (Enders, G. 1992)

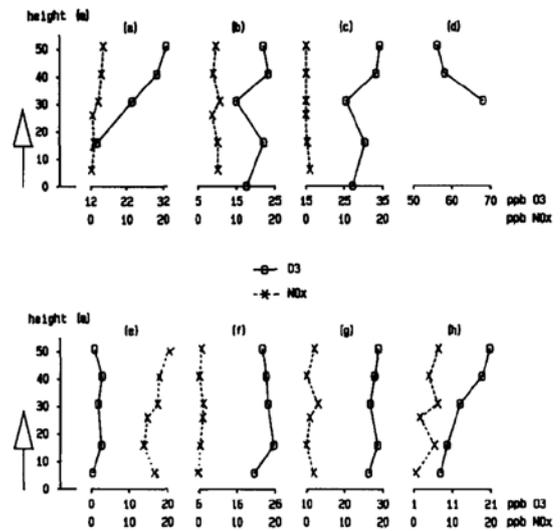


Abbildung 3.4.5 B): Vertikale Profile für den 18. 9.1990 a) 2:15 Uhr, b) 10:15 Uhr, c) 14:45 Uhr, d) den 3.3.1988 17:00 Uhr und den 13.12.1990 e) 1:45 Uhr, f) 11:45 Uhr, g) 15:15 Uhr, h) 21:45 Uhr

Diskussion

Der zeitliche Verlauf des Kurvenanstiegs ist ein Hinweis darauf, dass der morgendliche Anstieg vor allem durch Konvektion geprägt ist. Interessant wäre zu erfahren, ob die Abweichungen vom so genannten Normalfall tatsächlich während Schönwetterperioden vermehrt auftreten – also zu jenen Zeiten, in welchen mit den Ozonmaxima auch das Bedürfnis nach Schutzmöglichkeiten am größten ist.

3.4.6 Turmmessungen in Südwestfrankreich

Fontan (1992) untersuchte in seiner Studie die Prozesse, welche den Ozongradienten im Wald beeinflussen können. Abbildung 3.4.6 zeigen die vertikalen Gradienten für a) neun Nächte im September und b) die Nacht vom 6. auf den 7. September. Der Autor schreibt, dass während des Tages kaum ein Unterschied zwischen den Ozonkonzentrationen über dem Wald und am Waldboden festzustellen ist. In der Nacht sind offenbar in Bodennähe starke Gradienten aufgetreten. Somit unterscheidet sich nachts die Ozonkonzentration am Waldboden beträchtlich von derjenigen auf 5-10m über dem Waldboden. Die Untersuchungen haben weiter gezeigt, dass die Oxidation an organischen Materialien der Hauptprozess ist, welcher die nächtliche Ozonkonzentration in Bodennähe reduziert.

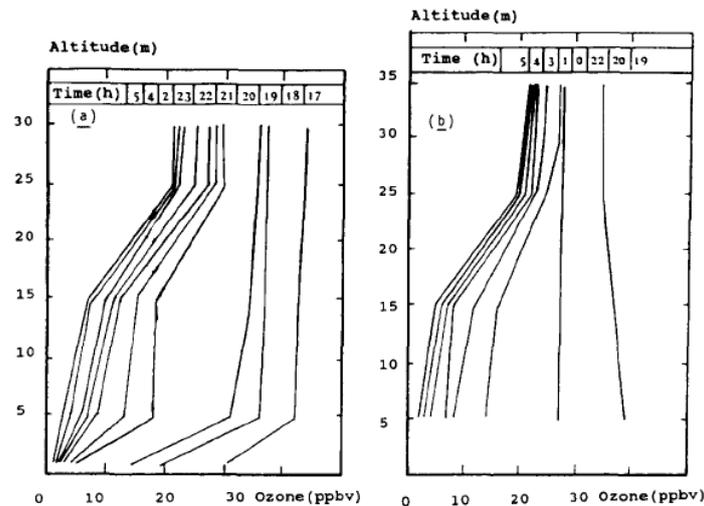


Abbildung 3.4.6: Vertikale Ozongradienten. a) gemittelt über neun Nächte, b) exemplarisches Resultat für eine Nacht. Quelle: Fontan et al. 1992.

Diskussion

In diesem Beispiel dürfte tagsüber kaum eine Schutzwirkung des Waldes zu erwarten sein.

Aus den nächtlichen Grafiken wird hingegen deutlich, dass in Bodennähe ein stärkerer Gradient zu finden ist als im übrigen Raum unter den Baumkronen. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die menschliche Exposition anhand von Werten, welche auf ein bis zwei Metern gemessen wurden, beurteilt werden sollte (vergleiche Kapitel 3.4.4). Innerhalb des Waldes kann in unmittelbarer Bodennähe der Abbau von Ozon stärker dominieren als in mittleren Höhen.

3.4.7 Turmmessungen in Südschweden

Neben der bereits im Kapitel 2.3.4 vorgestellten Messreihe in Antens Kapell, Südschweden, wurde von den Autoren in Niklasdam eine zweite Turmmessung durchgeführt, wobei in Niklasdam nur der vertikale Ozongradient gemessen wurde.

Der Vergleich der Messpunkte auf 20 und auf zwei Metern über dem Waldboden ergibt eine durchschnittliche Reduktion der Ozonbelastung in Bodennähe von 30% in der Nacht und 8% während des Tages (Abbildung 3.4.8)

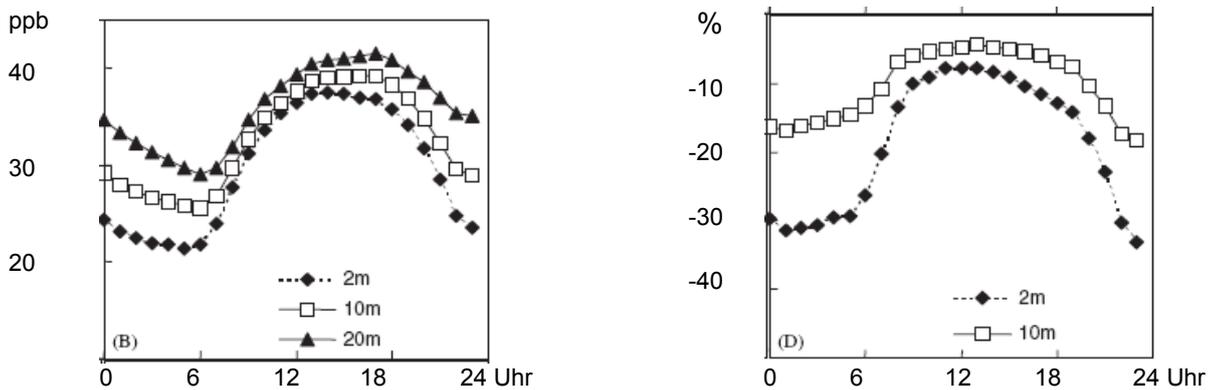


Abbildung 3.4.7: Links: Durchschnittliche Ozontagesgänge für die 3 Messpunkte, Rechts: Relative Abnahme der Ozonwerte gegenüber dem Messpunkt auf 20m Höhe. Messperiode: 1.April bis 30.September 2003. Quelle: (Karlsson et al., 2006)

Diskussion

Die bisher vorgestellten Untersuchungen zeigten Abnahmen der Belastungsdifferenzen über die Nachmittagsstunden nur anhand von kleinen Stichproben. Die südschwedische Studie zeigt diesen Effekt aber sogar mit Durchschnittswerten der gesamten Ozonsaison.

Der Befund entspricht somit nicht den Aussagen von Enders, der eine durchgehende Abnahme der Ozonkonzentrationen in Bodennähe als "Normalfall" bezeichnet.

3.4.8 Turmmessungen in Pennsylvania, US

In einem Laubmischwald in Pennsylvania wurde zwischen 1993 und 1995 Ozon an verschiedenen Messpunkten über, in und unterhalb der Baumkrone gemessen. Die Abbildung 3.4.8 zeigt die durchschnittlichen Tagesgänge für die verschiedenen Messhöhen. Die Werte für die Messungen zwischen Mai und September wurden für alle drei Jahre 1993 bis 1995 gemittelt.

Skelly (1996) präsentiert zusätzlich Auswertungen für die einzelnen Monate und stellt fest, dass die geringste Differenz zwischen den Ozonkonzentrationen über den Baumkronen und in Bodennähe im Mai auftritt und dann stetig zunimmt bis im August. Im September nimmt die Stärke des vertikalen Gradienten wieder ab.

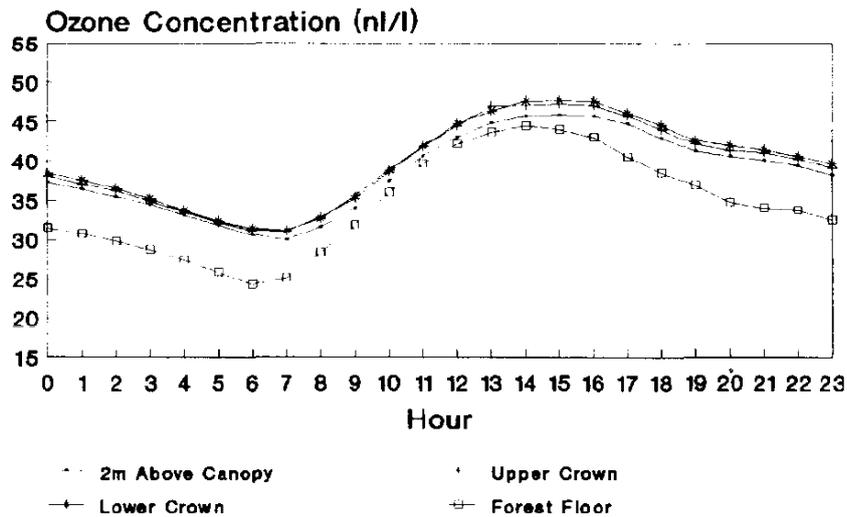


Abbildung 3.4.8: Ozontagesgänge für die verschiedenen Messhöhen gemittelt für die Monate Mai bis September der Jahre 1993 bis 1995. Quelle: (Skelly et al., 1996)

Diskussion

Erneut sind die nächtlichen Belastungsdifferenzen im Tagesverlauf deutlicher als während des strahlungsinduzierten Anstieges.

Die Beobachtung, wonach die Belastungsdifferenzen in einem Laubmischwald auch saisonal unterschiedlich ausfallen, können, wie bereits am Zürichberg vermutet, mit dem Verlauf der Vegetationsperiode in Verbindung gebracht werden.

4. Synthese

4.1 Wirkungshypothesen

Die Zusammenstellung vertikaler Ozonprofile im Wald und offenen Gelände hat gezeigt, dass sich die Profile während den Nachmittagsstunden oftmals kaum unterscheiden. Folglich kann gegenüber dem Freiland nicht von einer generellen Belastungsverminderung ausgegangen werden, denn während der Höchstbelastungsphase tritt auch im Wald nicht immer ein deutlicher Gradient auf.

Dieses Ergebnis stimmt mit der aus den Parallelmessungen gewonnenen Hypothese überein: Typischerweise gleichen sich während des morgendlichen Ozonanstiegs die Werte im Wald und auf dem freien Feld tendenziell denjenigen der darüber liegenden Reservoirschicht an und erreichen ähnliche Höchstwerte.

Am späteren Nachmittag sinkt die Ozonbelastung im Wald aber schneller, so dass bis Sonnenaufgang nachweisbare Belastungsdifferenzen zwischen Feld und Wald resultieren.

Das Zusammenspiel folgender Prozesse könnte diese Beobachtungen erklären:

- Im Wald steht eine grössere Oberfläche zur Reduktion von Ozon zur Verfügung als über Freiland. Dadurch kann Ozon schneller abgebaut werden.
- Im Wald ebenso wie über freiem Feld dominiert die Anreicherung der bodennahen Luftschichten durch Ozon aus der Reservoirschicht den morgendlichen Anstieg der Ozonwerte. Dabei gleichen sich die Ozonwerte im Wald *und* über freiem Feld denjenigen der Reservoirschicht an.
- Je nach lokalen Bedingungen stellt sich in schattigen Waldpartien bereits im Verlauf des Nachmittags, spätestens jedoch am Abend, eine schnellere Abnahme der Ozonwerte ein als über freiem Feld.

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass bodennahe Ozonwerte in Feld und Wald je nach Tageszeit und Umweltbedingungen von unterschiedlichen Prozessen bestimmt werden. Beispielsweise können die Schadstoffchemie und/oder lokalmeteorologische Prozesse in der Ozonkonzentration vertikale und horizontale Belastungsdifferenzen bewirken beziehungsweise auflösen (Fließgleichgewicht).

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass in Ozonbelastungsphasen tagsüber die Ausbreitungsbedingungen entscheidend sind, da die Ozonzufuhr aus der Reservoirschicht der dominierende Prozess darstellt. Nachts hingegen führen die systemspezifischen Abbauraten zu vegetationsabhängigen Ergebnissen.

Deutlich wurde auch, dass weder unterschiedliche Wälder noch das Waldesinnere in sich als einheitlicher Raum zu betrachten ist. So ist in bodennahen Bereichen in einem Wald mit dichtem Unterholz / Krautschicht bereits auf zwei Metern über Boden eine grosse Oberfläche zum Ozonabbau verfügbar, während dies in anderen Beispielen erst der eigentliche Waldboden sein kann.

Neben dem unterschiedlichen Ozonbildungs- und -abbaupotential der verschiedenen Standorte erklären sich die festgestellten Belastungsdifferenzen auch durch lokalklimatologische Faktoren. Kleinräumige Windsysteme modifizieren die örtliche Belastung ebenso wie lokalspezifische Senken.

Generell aber gilt, dass in Bodennähe die zeitlichen Belastungsunterschiede (Tagesgang) sehr viel grösser ausfallen als örtliche wie z.B. vegetationsbedingte Unterschiede zwischen Wald und Feld. Generell treten die tiefsten Ozonkonzentrationen am frühen Vormittag auf, vor dem Wiederanstieg der Werte.

4.2 Aussagen zur Belastungsverminderung

Die Vielzahl der Hinweise, wonach die postulierte Belastungsverminderung nicht in jedem Fall existiert, sollte zu einem vorsichtigeren Umgang mit generalisierenden Aussagen führen. Im Hinblick auf korrektere Verhaltensempfehlungen sollten mit den vorliegenden Erkenntnissen mindestens folgende Fragen beantworten lassen:

- Wann kann mit einer robusten Belastungsverminderung gerechnet werden?
- Wie wesentlich ist die Belastungsverminderung?

Eine Synthese der vorliegenden Messergebnisse führt zu folgenden Aussagen:

- In Bodennähe sind am Morgen bis ca. 9 Uhr die Ozonbelastungen relativ klein, wobei bis 8 Uhr morgens im Wald verbreitet noch etwas tiefere Ozonbelastungen auftreten.
- Während der nachmittäglichen Spitzenbelastungen kann nicht von wesentlichen geringeren Ozonkonzentrationen im Wald ausgegangen werden
- Nach 19 Uhr kann in dichten Wäldern wieder mit etwas geringeren Ozonbelastungen als im Freiland gerechnet werden
- Erst ab 22 Uhr sinkt die Ozonbelastung wieder überall merklich.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen sollten die bestehenden Verhaltensempfehlungen modifiziert werden.

Zwar fehlen für detailliertere Aussagen konsistente Ergebnisse aus der Fragestellung entsprechenden Versuchsanordnungen. Hingegen enthalten die vorgestellten Studien zahlreiche Hinweise auf die Vielzahl der Faktoren, welche die lokalen Ozonkonzentrationen beeinflussen können. Eine vollständige Beurteilung der örtlich-zeitlichen Belastungsdifferenzen würde erfordern, dass die beteiligten Prozesse und Zusammenhänge besser bekannt und quantifizierbar sind.

So könnte beispielsweise geklärt werden, unter welchen Bedingungen auch bei steigender Ozonbelastung systematische Belastungsminderungen zu erwarten sind. Unbeantwortet ist auch die Frage, wie sich vegetationspezifische Belastungsdifferenzen an Tagen mit Ozonbelastungen über der Informationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verhalten. An diesen Tagen wären Alternativen zum Aufenthalt in geschlossenen Räumen während der Mittags- und Nachmittagsstunden besonders gefragt.

5. Schlussfolgerungen

5.1 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

5.1.1 Ostluft

Die ursprüngliche Praktikumsidee, möglichst anschauliches Material zur den Verhaltensempfehlungen bei hohen Ozonbelastungen zu erarbeiten, kann mit bestehenden Daten nicht umgesetzt werden. Mit Parallelmessungen könnten aber durchaus Messreihen entstehen, die exemplarisch die unterschiedlichen Tagesgänge zeigen. Dabei ist eine sorgfältige Messanordnung zentral. Folgende Kriterien müssten beachtet werden:

- (1) maximaler horizontaler Abstand der beiden Stationen: ca. 500m
- (2) geringe vertikale Differenz (<20m)
- (3) vergleichbare topographisch-lufthygienische Lage
- (4) Minimalabstand der Stationen vom Waldrand: 50m (360°)
- (5) Waldrand vom Messstandort aus nicht sichtbar und Blätterdach deckend
- (6) Messhöhe über Feld und Wald: einheitlich, ca. 1-2m über Boden
- (7) minimale Messperiode: April – September
- (8) Kontinuierliche Messungen: optimalerweise 10-Minuten-Mittel, mindestens ½-Stunden-Mittel
- (9) Unterstützende Zusatzparameter: mindestens Temperatur, Wind, Globalstrahlung, evtl.: Luftfeuchtigkeit, NO, NO_x, VOC

Beispielsweise würde sich die Messstation Stuelegg oberhalb von St.Gallen für eine Parallelmessung anbieten. Im nahe gelegenen Wald könnte eine zweite Messstation so eingerichtet werden, dass die oben aufgeführten Punkte eingehalten würden. Die Station repräsentiert einen Hintergrundstandort mit Naherholungsnutzung, so dass die Tagesgänge nur wenig von lokalen Effekten (z.B. starke Beeinflussung der O₃-Werte durch lokale Vorläufersubstanzen) beeinflusst sind. Dadurch ist zu erwarten, dass ein schnelleres Absinken der Ozonwerte im Wald konkret dokumentiert werden könnte.

Mehr als eine exemplarische Aussage kann jedoch von einer derartigen Messanordnung nicht erwartet werden. Auf Grund der verhältnismässig geringen zusätzlichen Aussagekraft einer einzelnen Messreihe sind derzeit keine zusätzlichen Messungen in Bezug auf diese Fragestellung in Planung.

5.1.2 Übergeordnete Ebenen

Die vorliegenden Recherchen zeigen eine grundsätzliche Wissenslücke auf, deren Schliessung nicht zu den Aufgaben der kantonalen Fachstellen zählt. So lange aber nicht klar ist, welche Prozesse im Wald die Ozonkonzentration zu welchen Tageszeiten dominieren, können keine spezifischeren Aussagen zu allfälligen Belastungsverminderungen im Wald gegenüber offenem Gelände gemacht werden.

Die übergeordnete Bundesbehörde BAFU teilt die Auffassung, dass die Anpassungen der Verhaltensempfehlungen, wie im Abschnitt 5.1 beschrieben, vorgenommen werden sollen. Die Schliessung der Wissenslücke betrachtet das BAFU jedoch ebenfalls nicht als seine Kernaufgabe und sieht momentan keinen dringenden Handlungsbedarf.

Sollte aber die Möglichkeit bestehen, in Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen Synergien zu einem geeigneten Forschungsprojekt zu nutzen, wäre das BAFU an einer weiteren Bearbeitung der Fragestellung interessiert. Die Datenerhebung und -auswertung in einer Anordnung, die sich für die hier mittels Sekundärstudien bearbeiteten Fragestellung eignen, dürften einer Masterarbeit entsprechen.

5.2 Konsequenzen für die Verhaltensempfehlungen

Die aktuellen Verhaltensempfehlungen gehen von einer allgemeingültigen Belastungsverminderung im Wald aus. Angesichts der hier präsentierten Datenlage sollten die bestehenden Verhaltensempfehlungen jedoch angepasst werden, da mit merklichen Belastungsdifferenzen nur nachts und in den Tagesrandstunden zu rechnen ist. Solange nicht klar ist, ob bzw. wie stark eine allfällige Schutzwirkung von Wäldern zu Zeiten maximaler Ozonbelastungen überhaupt ist, sollten nicht nachgewiesene, generelle Aussagen vermieden werden wie zum Beispiel:

" Tiefere Ozonbelastungen an sommerlichen Tagen finden Sie in den frühen Morgenstunden, in Parks und Gärten mit dichtem Baumbestand, in Wäldern oder im kühlen Zimmer – also an Orten, an denen Sie sich an heissen Tagen wohl fühlen." (Ozon Info, 2006)

Verhaltensempfehlungen sollten weniger auf einen einzelnen Einzelschadstoff fokussieren, sondern die Summe der Risikofaktoren für die menschliche Gesundheit berücksichtigen wie Hitze, UV-Strahlung und typischer Schadstoffmix. Erhebliche Dosisverringerungen sind im Freien insbesondere bei Nutzung der morgendlichen Ozonminima erzielbar.

Die Anfragen von Privatpersonen und das Interesse der Medien an konkreten Verhaltensempfehlungen zeigen, dass zweckmässige Hinweise, wie das persönliche Gesundheitsrisiko verringert werden kann, ein verbreitetes Bedürfnis sind.

5.3 Fazit

Im Wald sind die Ozonkonzentrationen nicht durchgehend tiefer als auf freiem Feld.

Die vorliegenden Erkenntnisse legen eine Anpassung der Verhaltensempfehlungen nahe.

Detailliertere Aussagen sind derzeit schwierig, weil:

- (1) Die komplexe Dynamik innerhalb der Vegetation noch zu wenig verstanden ist und
- (2) die entscheidenden Prozesse stark von spezifisch lokalen Rahmenbedingungen der Standorte abhängig sein dürften.

6. Literatur

- Cercl'Air (2006). Ozon schadet! Informieren Sie sich und handeln Sie! Website: http://www.ozon-info.ch/vorlage/flyer_05_d.pdf. Download am: 20.5.2006.
- ELK (Eidgenössische Kommission für Lufthygiene, 2004). Sommersmog. Website: http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/luft/fachgebiet/d/grundlagen/sommersmog_2004_ekl.pdf. Download am: 18.7.2006.
- Enders, G. (1992). "Deposition of ozone to a mature spruce forest: measurements and comparison to models." Environmental Pollution **75**: 61-67.
- Erisman, J. A., Vermeulen, A., Hensen, A., Flechard, C., Dämmgen, U., Fowler, D., Sutton, M., Grünhage, L., Tuovinen, J.P. (2005). "Monitoring and modelling of biosphere/atmosphere exchange of gases and aerosols in Europe." Environmental Pollution **133**: 403-413.
- Etter, R., Eugster, M. (1997). Luftmessdatenauswertung Ottoberg 1995. Bericht Nr. 96938., Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft Thurgau.
- Fontan, J., Minga, A., Lopez, A., Druilhet, A., 1992. "Vertical ozone profiles in a pine forest". Atmospheric Environment Part A **26**: 863-869.
- Gehrig, R., Bonvin, J.M., Tercier, P., Jeannet, P. (1994). Untersuchungen auf den Beobachtungsflächen: Spurengase. In: Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen. E. Schüpbach. (Hrsg.) Zürich, Verlag der Fachvereine, vdf. **Band 4**: 71-101.
- Jäggi, M., Ammann, C., Neftel, A., Fuhrer, J., 2006. "Environmental control of profiles of ozone concentration in a grassland canopy." Atmospheric Environment. (*In press*).
- Karlsson, P. E., Hansson, M., Höglund, H.-O., Pleijel, H. (2006). "Ozone concentration gradients and wind conditions in Norway spruce (*Picea abies*) forests in Sweden." Atmospheric Environment **40**: 1610-1618.
- Kernen, R. (2004). Ozontrends in der Ostschweiz. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Bern.
- Koppmann, R. (2004). Abschlussbericht für das Vorhaben: Emission und chemische Umwandlung biogener flüchtiger organischer Verbindungen Untersuchungen in und über einem Mischwaldbestand (ECHO). Website: <http://www.fz-juelich.de/icg/icg-ii/echo/publikationen/>. Download am: 11.6.2006.
- Künzle, T., Neu, U. (1994). Experimentelle Studie zur räumlichen Struktur und Dynamik des Sommersmogs über dem Schweizer Mittelland. Ph.D. thesis, Geographisches Institut der Universität Bern.
- Skelly, J. M., Fredericksen, T.S., Savage, J.E., Snyder, K.R. (1996). "Vertical gradients of ozone and carbon dioxide within a deciduous forest in central Pennsylvania." Environmental Pollution **94**(2): 235-240.
- Sundberg, J., Karlsson, P.E., Schenk, L., Pleijel, H., 2006. "Variation in ozone concentration in relation to local climate in south-west Sweden". Water, Air and Soil Pollution. (*In press*).
- Staehelin, J. (2002). Ozone measurements and trends (Troposphere). In: Encyclopedia of Physical Science and Technology. Academic Press. **Vol. 11**: p. 539-561.
- Thudium, J., Frei, A., Kocsis, O., Lötscher, H. (1998). Ozon-Monitoring in verschieden exponierten Waldbeständen. Juli, August 1997. LUBETRAX, Amt für Umweltschutz Uri.
- Thudium, J., Frei, A., Tschurr, M., Lötscher, H. (1999). Ozonprofilmessungen in einem Nadelwald bei Monda, Amt für Natur- und Umweltschutz Graubünden.
- Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ (2001). Immissionsmessungen Zoo Zürich. Ozon im Wald., Abteilung Umwelt, Fachbereich Labor.

Dank

Zahlreiche Fachpersonen haben die Recherchen mit wertvolle Informationen und Hinweise unterstützt, so dass ein umfassendes Bild über den heutigen Stand des Wissens zum Thema „Ozonbelastung im Wald“ entstehen konnte. Besonderer Dank gilt Christof Ammann (ART) und Marcus Schaub (WSL) für die ausführlichen Diskussionen, die der Arbeit neue Impulse verliehen haben, sowie Peter Federer und Alfred Meier (beide OSTLUFT) für die Begleitung der Praktikumsarbeit.

Kontakte

Institution	Kontaktperson	Abteilung/Arbeitsgruppe
ART	Ammann, Christof	Lufthygiene/Klima
ART	Neftel, Albrecht	Lufthygiene/Klima
ASU (USA)	Neufeld, Howard S.	Appalachian State University
BAFU	Achermann, Beat	Luftreinhaltung/Messnetz NABEL
BAFU	Filliger, Paul	Klimatologie
BAFU	Strähli, Peter	Luftreinhaltung/Gesundheit
BFW (A)	Smidt, Stefan	Bundesamt für Wald, Wien
EMPA	Gehrig, Robert	Luftfremdstoffe/Umwelttechnik
EMPA	Hüglin, Christoph	Luftfremdstoffe/Umwelttechnik
ETH	Brönnimann, Stefan	Institut für Atmosphäre und Klima IAC
ETH	Eugster, Werner	Institut für Pflanzenwissenschaften IPW
IAP	Braun, Sabine	Institut für angewandte Pflanzenbiologie
IVL (S)	Karlsson, Per Erik	Swedish Environmental Research Institute Ltd. Göteborg
Oekoscience AG	Thudium, Jürg	
ProClim	Neu, Urs	
PSI	Dommen, Joseph	Labor für Atmosphärenchemie
PSI	Furger, Markus	Labor für Atmosphärenchemie
PSI	Prevôt, André	Labor für Atmosphärenchemie
PSU (USA)	Skelly, John M.	Pennsylvania State University (Prof. Emeritus)
UMEG (D)	Peranic, Zarko	LfU Baden-Württemberg
WSL	Goerg- Günthard, Madeleine	Umweltwandel und Waldentwicklung
WSL	Häsler, Rudolf	
WSL	Landolt, Werner	
WSL	Schaub, Marcus	Waldreaktionen auf atmosphärische Veränderungen

Glossar

ANETZ	Nationales Messnetz für Meteorologische Daten
BPUK	Schweizerische Bau-, Planungs- und Umweltdirektoren-Konferenz
ECHO	Emissionen und chemische Umwandlungen von biogenen flüchtigen organischen Verbindungen (Projektname)
LUBETRAX	„Luftbelastung entlang der Alpen transitachse N2 im Kanton Uri“
MEZ	Mitteleuropäische Zeit ("Winterzeit")
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
NFP14	Nationales Forschungsprogramm 14: Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz
OP	Ozonperiode
OWT	Ozonwettertage
POLLUMET	Projekt "Luftverunreinigung und Meteorologie in der Schweiz"
Ppb	Parts per billion
UGZ	Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich
VOC	Volatile Organic Compounds
