

Ozonentwicklung im polnisch-sächsischen Grenzraum



Ozonentwicklung im polnisch-sächsischen Grenzraum im Rahmen des Projektes KLAPS

Majana Heidenreich, Kathrin Riedel, Stefanie Fischer, Christian Bernhofer

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Grundlagen	7
2.1	Troposphärisches Ozon	7
2.2	Zeitlich-räumliche Variabilität der Ozonkonzentration.....	9
2.3	Wechselwirkungen zwischen Klima und Luftqualität	11
2.4	Monitoring der Ozonkonzentrationen.....	11
3	Projektgebiet	12
4	Datengrundlage	14
4.1	Ozonkonzentration und meteorologische Daten.....	14
4.2	Synoptische Daten	16
5	Methodik	19
5.1	Abhängigkeit der Ozonkonzentration von meteorologischen Kenngrößen	19
5.2	Ozonkonzentration mit Bezug auf Wetterlagenklassen	20
5.2.1	Wetterlagenklassen als Indikatoren für Ozonzielwertüberschreitungen	20
5.2.2	Projektionen zukünftiger Wetterlagenklassen.....	22
6	Ergebnisse	23
6.1	Abhängigkeit der Ozonkonzentration von meteorologischen Kenngrößen	23
6.1.1	Zeitliche und räumliche Variabilität der Ozonkonzentration.....	23
6.1.2	Korrelationsanalyse	28
6.2	Ozonkonzentrationen mit Bezug auf Wetterlagenklassen	37
6.2.1	Mittlere Tagesgänge der Ozonkonzentration bezogen auf Wetterlagenklassen.....	37
6.2.2	Wetterlagenklassen als Indikatoren für Ozonzielwertüberschreitungen	41
6.2.3	Projektionen zukünftiger Wetterlagenklassen.....	45
6.3	Mögliche Auswirkungen hoher Ozonkonzentrationen im KLAPS-Projektgebiet	46
6.3.1	Auswirkungen auf Gesundheit und Tourismus	46
6.3.2	Wirkungen auf Ökosysteme und Nutzpflanzen.....	47
7	Zusammenfassung	48
8	Ausblick	51
9	Abstract	51
10	Literaturverzeichnis	53
11	Anhang I	55
12	Anhang II	56
13	Anhang III	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Per Satellit gemessenes Gesamt Ozon in der Atmosphäre in Dobson Einheiten DU (Dobson Units: Maß für die Ozonschichtdicke; 100 DU entsprechen 1 mm Ozon unter Normalbedingungen) (Quelle: World Meteorological Organization, 2003).....	9
Abbildung 2: Mittleres Ozonprofil mit statistischer Unsicherheit ($\pm 1\sigma$). Quelle: Ozonbulletin des DWD Nr. 130, 18. Mai 2012.....	10
Abbildung 3: Mittlere Ozonprofile über Payerne in der Schweiz (rot) und Frankfurt (grün) und Daten von Bodenstationen (schwarze Punkte) für Januar 2001 bis Juli 2004 mit Standardabweichung (Quelle: geändert nach Chevalier et al., 2007; zusätzlich drei Bergstationen aus dem KLAPS-Projektgebiet).....	10
Abbildung 4: Topographie des KLAPS-Projektgebietes mit Lage der Ozonmessstationen.....	13
Abbildung 5: Landnutzung (CORINE Land Cover 2006) im KLAPS-Projektgebiet mit Lage der Ozonmessstationen	13
Abbildung 6: Relative Häufigkeiten bestimmter Klassifikationsindizes an Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Monate April bis August.	21
Abbildung 7: Trendbereinigung der jährlichen Häufigkeit von Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (links) und von Tagen mit antizyklonalen Strömungsbedingungen in 950 und 500 hPa (rechts) für die Station Königs Wusterhausen.	22
Abbildung 8: Jahrgänge der Ozon-Tagesmaxima der 8h-Mittelwerte (Box = 25-75% aller Werte, Whisker = 10-90%, ■ = Mittelwert, ● = Minimum/Maximum); Zielwert $120\mu\text{g}/\text{m}^3$	24
Abbildung 9: Zeitreihen einzelner Jahresmittel der Ozon-Tagesmaxima (8h-Mittel) für die Monate April bis August.....	25
Abbildung 10: Mittlere Wochengänge der Ozon-Tagesmaxima (8h-Mittel) für die Monate April bis August.....	25
Abbildung 11: Mittlere Wochengänge der Ozon-Tagesmaxima (8h-Mittel) und der Tagesmittelwerte von NO_x , NO_2 und NO für die Stationen Dresden-Nord (links) und Zinnwald (rechts) für die Monate April bis August (1997-2012).....	26
Abbildung 12: Mittlere Tagesgänge der Ozonkonzentration der einzelnen Stationen für die Monate April bis August (1997-2012).....	27
Abbildung 13: Mittlerer Tagesgänge von Ozon und Stickoxiden (NO_x , NO_2 und NO) für die Stationen Dresden-Nord (links) und Zinnwald (rechts) für die Monate April bis August (1997-2012).....	28
Abbildung 14: Korrelation zwischen Tagesmaximumtemperatur und Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen (Zinnwald andere Skalierung).....	30
Abbildung 15: Durchschnittliche Anzahl der Überschreitungstage des Tagesmaximums der 8h-Mittel von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pro Jahr und Temperaturklasse	31
Abbildung 16: Korrelation zwischen dem Tagesmittel der Globalstrahlung und dem Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen.....	32
Abbildung 17: Korrelation zwischen dem Tagesmittel der relativen Feuchte und dem Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen.....	33
Abbildung 18: Korrelation zwischen dem Tagesmittel der Windgeschwindigkeit und dem Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen	36
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Windrichtung und Ozonkonzentration für die Monate April bis August an ausgewählten Stationen (Stundendaten).....	37
Abbildung 20: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Anströmrichtung der Luftmassen	39
Abbildung 21: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Zyklonalität der Luftmassen.....	40
Abbildung 22: Exemplarische Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten bestimmter Klassifizierungsindizes (a bzw. b: antizyklische Strömungsbedingungen einer feuchten Luftmasse in 950 bzw. 500 hPa, c: feuchte (warme), westliche Luftmassen und d: Wetterlage Nummer 9, SWAAF).....	43
Abbildung 23: Mittlere Anomalie der Auftretenshäufigkeit von mit Ozonüberschreitungseignissen korrelierenden Klassifikationsindizes (außer NW, SW und SOZAF) für die SRES Szenarien A1B, A2 und B1, der Referenzzeitraum bezieht sich auf 1961–1990, Mittelwerte beziehen sich auf das Ensemble der vorhandenen Modellläufe (Tabelle 5, Datengrundlage), die Fehlerbalken decken die Ergebnisspannweite der einzelnen Modellläufe ab (links: Anomalie für 2021–2050, rechts: für 2070–2099, andere Achseneinteilung beachten).....	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ozonzielwerte (39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 02.08.2010 (BGBl. I S. 1065)	8
Tabelle 2: Verwendete Klassifikation der Stationsumgebung nach RL 2011/850/EU sowie die entsprechenden Kriterien nach Anhang VIII Richtlinie 2008/50/EG (Ozon) (siehe auch Handbuch „Luftqualitätsdaten- und Informationsaustausch in Deutschland“, Umweltbundesamt II 4.2, Version V3.0).....	12
Tabelle 3: Verwendete Stationen in Deutschland (DE) und Polen (PL), Zeiträume und Datenquellen (LfULG = Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; LUGV= Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg).....	15
Tabelle 4: Für die Auswertung verwendete Messgrößen	16
Tabelle 5: Zusammenfassung verwendeter Modellläufe, welche den genutzten oWLK zugrunde liegen (nach Krahe et al. 2010).....	17
Tabelle 6: Übersicht der 40 objektiven Wetterlagen des DWD (nach Bissolli und Dittmann 2001)	18
Tabelle 7: Ausgewählte Klassifizierungsindizes zur Detektion bestimmter Luftmasseneigenschaften bei Ozonzielwertüberschreitungen	20
Tabelle 8: Bestimmtheitsmaße zwischen der Tagesmaximumtemperatur und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null)	29
Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße zwischen dem Tagesmittel der Globalstrahlung und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null)	31
Tabelle 10: Bestimmtheitsmaße zwischen dem Tagesmittel der relativen Feuchte und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null).....	34
Tabelle 11: Bestimmtheitsmaße zwischen dem Tagesmittel der Windgeschwindigkeit und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (Auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null).....	35
Tabelle 12: Die zehn häufigsten Wetterlagen für die Monate April bis August, links: sortiert nach Auftretenshäufigkeit im jeweiligen Messzeitraum aller Stationen, rechts: sortiert nach Auftretenshäufigkeit an Ozonüberschreitungstagen (Tagesmaximum der 8h-Mittel $\geq 120 \text{ mg/m}^3$) aller Stationen	42
Tabelle 13: Signifikante Korrelationen zwischen jährlichen Ozonüberschreitungstagen und jährlichem Auftreten bestimmter Klassifizierungsindizes (trendbereinigt). Positiv bedeutet günstige Bedingungen für Ozonzielwertüberschreitungen bei jeweiligem Merkmal, negative ungünstige.	44

Abkürzungsverzeichnis

AOT40	Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 ppb
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU	Europäische Union
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KLAPS	EU-Projekt „Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum“
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LGUV	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz in Brandenburg
MOSAIC	Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft
NMVOG	Non Methane Volatile Organic Compounds
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide (NO + NO ₂)
O ₃	Ozon
oWLK	objektive Wetterlagenklassifikation
PM	Particulate matter
RCP	Representative Concentration Pathways
UV	Ultraviolett
VOC	Volatile Organic Compounds
WHO	World Health Organisation

1 Einleitung

Im grenzübergreifenden Projekt „KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum“ werden von August 2012 bis Dezember 2014 die Auswirkungen des rezenten und projizierten Klimawandels sowie der Einfluss von Luftschadstoffen auf die vorhandenen Ökosysteme untersucht. Bisher existieren für den polnisch-sächsischen Grenzraum weder eine Diagnose von Klima und Luftqualität (Vergangenheit und Gegenwart) noch eine Analyse der potentiell möglichen Änderungen in der Zukunft. Projektpartner sind das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden (Lead Partner), das polnische Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej) in Wrocław und die Universität Wrocław, Institut für Geographie und Regionalentwicklung (Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego). Im Ergebnis des Projektes KLAPS soll das Risiko (Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schaden) des Klimawandels und der Ausbreitung von Luftschadstoffen für die Bevölkerung sowie für die vorhandenen Ökosysteme in der Projektregion abgeschätzt werden.

Ein Teilziel des Projektes ist eine auf die Projektregion ausgerichtete Analyse der Ozonbelastung in Abhängigkeit klimatischer Einflussfaktoren. Insbesondere soll geprüft werden, ob Ozonzielwerte gehäuft bei bestimmten Klimaverhältnissen und Wetterlagen überschritten werden. Weiterhin soll die Tendenz der zukünftigen Ozonbelastung unter geänderten klimatischen Bedingungen abgeschätzt werden. Die Ergebnisse sind qualitativ einzuordnen und vor dem Hintergrund der im Projektgebiet vorliegenden Landnutzungen, insbesondere Land- und Forstwirtschaft sowie einer touristischen Nutzung, zu bewerten.

2 Grundlagen

2.1 Troposphärisches Ozon

Ozon (dreiatomiger Sauerstoff, O_3) ist ein unsichtbares, giftiges und phytotoxisches Gas mit stark oxidierender Wirkung. Es kommt als natürliches Spurengas in der Atmosphäre vor. Die höchsten Ozonkonzentrationen werden in der Stratosphäre erreicht. Der Anteil beträgt 90 % des gesamten atmosphärischen Ozons. Die restlichen 10 % des Ozons kommen in der Troposphäre vor (Graedel und Crutzen, 1994). In die obere Troposphäre wird Ozon aus der Stratosphäre eingemischt. Hauptquelle des bodennahen Ozons sind chemische Reaktionen. Unter Einwirkung von Sonnenlicht wird Ozon aus Vorläuferstoffen gebildet. Dieser Vorgang wird photochemische Oxidation genannt. Zu den wichtigsten Ozonvorläuferstoffen zählen die Stickoxide – Stickstoffdioxid und -monoxid ($NO_x = NO_2 + NO$) – sowie leicht flüchtige organische Substanzen ohne Methan (NM VOC). Der detaillierte Ablauf der Ozonbildung kann in Seinfeld (2006) nachgelesen werden.

Hauptverursacher hoher Konzentrationen an Vorläuferstoffen ist der Kraftfahrzeugverkehr. Weiterhin werden Stickoxide von Kraftwerken emittiert. Überdüngte Böden sind Quellen biogener Stickoxide. Leicht flüchtige organische Substanzen entstehen bei der Herstellung und Anwendung von Lacken und Lösemitteln. Aber sie können auch natürlichen Ursprungs sein, als Ausdünstungen von Laub- und Nadelbäumen (Umweltbundesamt, 2009). Hauptsinken für Ozon sind einerseits der photochemische Abbau (ca. 2/3) und andererseits die trockene Deposition (ca. 1/3). Weitere Senken sind der Ozonabbau über NO und wolkenchemische Prozesse (Möller, 2000). Beim photochemischen Abbau wird durch die Einwirkung von Sonnenlicht sowie im Beisein von Wasserdampf das Ozonmolekül aufgespalten. Dabei entstehen Sauerstoff (O_2) und zum Teil Hydroxylradikale (OH) durch die Reaktion eines freien Sauerstoffatoms mit Wasser. Als trockene Deposition wird der Abbau von Ozon durch chemische Reaktionen mit Materialien an der Erdoberfläche und durch Pflanzen bezeichnet, wobei der Umfang der Deposition von Art und Ausmaß der Reaktionsfläche abhängt.

Wie intensiv die Ozonbildung abläuft, hängt von der Menge und dem Verhältnis der Vorläuferstoffe sowie den meteorologischen Bedingungen ab, die das Ausmaß der Auswaschung der Vorläuferstoffe und die Reaktionsbedingungen für die Ozonbildung bestimmen. Entsprechend der Konzentrationsverhältnisse der Vorläuferstoffe können die Stickoxide oder die organischen Substanzen (VOC) die Ozonbildung limitieren. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer NO_x- bzw. VOC-Sensitivität der Ozonbildung (Sillman, 1999). Weiterhin sind die bodennahen Ozonkonzentrationen abhängig von Temperatur, Feuchte, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und damit auch von der Mächtigkeit der Durchmischungsschicht (Dawson et al., 2009; Demuzere et al., 2009; Jacob und Winner, 2009; Racherla und Adams, 2008). Wobei die Konzentration z. B. mit steigenden Temperaturen zunimmt. Aus diesen Gründen zeigen die Ozonkonzentrationen eine ausgesprochene Saisonalität. Bei Vorhandensein von ausreichend Vorläuferstoffen werden hohe Konzentrationen in den Sommermonaten bei stabilen strahlungsreichen und damit niederschlagsarmen Wetterlagen erreicht. Die Verweilzeit von Ozon reicht von wenigen Tagen in der planetaren Grenzschicht (< 2000 m) bis zu mehreren Wochen in der freien Troposphäre (Jacob und Winner, 2009), weshalb zusätzlich der Transport von Ozon und damit das großräumige Wettergeschehen einen Einfluss auf die Ozonkonzentrationen haben.

Da Ozon ein hochtoxisches Gas ist und aus Vorläuferstoffen gebildet wird, gehört es zur Gruppe der sekundären Luftschadstoffe. Ozon wirkt sowohl auf die menschliche Gesundheit als auch auf das Pflanzenwachstum schädigend. Beim Menschen führt Ozon zu Atembeschwerden, Entzündungsreaktionen und einer verminderten Lungenfunktion. Die negativen Auswirkungen auf Ökosysteme und Nutzpflanzen werden v. a. durch Blattschäden sichtbar, da Ozon durch die Spaltöffnungen der Blätter aufgenommen wird. Die Folge sind Einbußen bei Ernteerträgen, eine verminderte Qualität landwirtschaftlicher Produkte und Waldschäden. Um negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt durch zu hohe Ozonkonzentrationen vorzubeugen, ist es nötig, die Emissionen von Schadstoffen zu vermeiden oder zu verringern sowie Ziele für die Luftqualität festzulegen. Zu diesem Zweck hat die Europäische Union auf Grundlage der Leitlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO)¹ u. a. die Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa und den Durchführungsbeschluss 2011/850/EU erlassen. Letzterer regelt den Austausch von Informationen und die Berichterstattung über die Luftqualität.

Tabelle 1: Ozonzielwerte (39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 02.08.2010 (BGBl. I S. 1065)

Ozonzielwert	Zeitraum/Berechnungsvorschrift	Ziel	Empfehlung der WHO ¹
180 µg/m ³	Stundenmittel	Informationsschwelle	
240 µg/m ³	Stundenmittel	Alarmschwelle	
120 µg/m ³	Tagesmaximum der 8h-Mittel (gleitend, 3-Jahresmittel)	Schutz der menschlichen Gesundheit – ab 2010 höchstens 25 Überschreitungstage im Kalenderjahr (langfristiges Ziel: keine Überschreitungen)	100 mg/m ³
18000 µg/m ³	AOT40 ² , Summe aller Stundenmittel von Mai–Juli, 8–20 Uhr (Differenz zwischen Messwert und 80 µg/m ³ , 5-Jahresmittel)	Schutz der Vegetation – ab 2010 so weit wie möglich einzuhalten (langfristiges Ziel: 6000 µg/m ³)	

¹ WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02

² Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 ppb; 40ppb entsprechen ca. 80 µg/m³

Die Vorgaben der EU wurden in nationales Recht in der 39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen umgesetzt. In Tabelle 1 sind die aktuellen Zielwerte der Ozonkonzentration aufgelistet. Weiterhin ist Ozon ein starkes Treibhausgas – das drittstärkste nach Kohlendioxid und Methan –, weshalb die starke Zunahme der Ozonkonzentrationen v. a. im letzten Jahrhundert auch aus Sicht des Klimawandels von hohem Interesse ist (IPCC, 2007).

2.2 Zeitlich-räumliche Variabilität der Ozonkonzentration

Die Ozonkonzentration in der Atmosphäre unterliegt räumlichen und zeitlichen Schwankungen. „Die Gesamt-ozonkonzentration variiert mit der Breite, Länge und Jahreszeit, mit den höchsten Werten in den mittleren Breiten und den geringsten Werten in den Tropen“ (World Meteorological Organization, 2003).

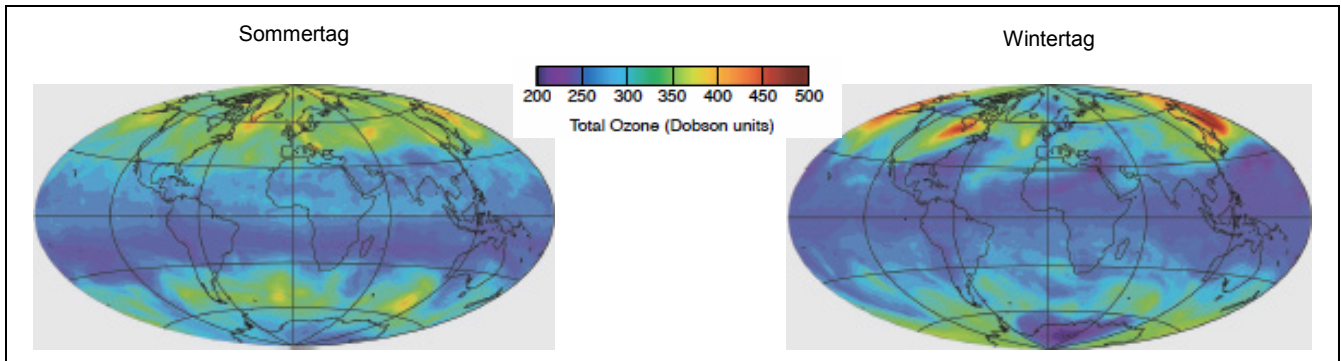


Abbildung 1: Per Satellit gemessenes Gesamt-ozon in der Atmosphäre in Dobson Einheiten DU (Dobson Units: Maß für die Ozonschichtdicke; 100 DU entsprechen 1 mm Ozon unter Normalbedingungen) (Quelle: World Meteorological Organization, 2003)

Ein typisches Vertikalprofil der Ozonkonzentration bis in eine Höhe von 60 km zeigt Abbildung 2. Man erkennt deutlich die Lage der Ozonschicht in der Stratosphäre in 15–25 km Höhe, in der die höchsten Ozonkonzentrationen erreicht werden. Die Variabilität des Ozons in der Troposphäre unterliegt anderen Einflüssen als in der Stratosphäre. Die Verteilung des troposphärischen Ozons wird vor allem durch die photochemische Bildung in dicht besiedelten Gebieten, die Transportprozesse in der Troposphäre, Einträge aus der Stratosphäre und damit auch über die Geländehöhe bestimmt. Abbildung 3 zeigt mittlere Ozonkonzentrationen aus der unteren Hälfte der Troposphäre von Bodenstationen und Vertikalprofile, die mit Ballonaufstiegen über Payerne in der Schweiz sowie mit Hilfe von Langstreckenjets erhoben wurden (MOZAIC). Die Vertikalprofile zeigen eine deutliche Höhenabhängigkeit der Ozonkonzentration (Chevalier et al., 2007). Hier wird der abnehmende Einfluss der bodennahen Emissionen und der Grenzschichtchemie auf die Ozonkonzentrationen deutlich, bis in einer Höhe von rund 1000–1200 m der Einfluss der freien Troposphäre überwiegt. Aber auch die Bodenstationen aus verschiedenen Höhenlagen folgen in guter Näherung den Konzentrationen aus den Vertikalprofilen.

Die „Schwankungen der Luftqualität sind erwartungsgemäß innerhalb von und zwischen urbanen Räumen am größten, weil dort die meisten anthropogenen Emissionen in die Atmosphäre vorkommen“ (Graedel und Crutzen, 1994). Bisherige Beobachtungen zeigen, dass die geringsten mittleren Ozonkonzentrationen an urbanen Messstationen mit hohen Konzentrationen an Stickoxiden auftreten, während an höher gelegenen Stationen in gebirgigen Regionen die höchsten Konzentrationen erreicht werden.

Die Ozonkonzentration zeigt einen typischen saisonalen Verlauf, der aber teilweise von der Lage der Station abhängig ist. In den Wintermonaten treten die niedrigsten Konzentrationen auf. Im späten Frühjahr wird in der nördlichen Hemisphäre ein erstes Maximum beobachtet. Anfangs wurde der vertikale Transport stratosphärischen Ozons als Hauptursache vermutet. Arbeiten von Monks (2000) und Vingarzan (2004) zeigen jedoch

verschiedene Mechanismen auf, die zu dem frühzeitigen Anstieg der Ozonkonzentration führen können. Dieses Maximum tritt vor allem an hochgelegenen Stationen, die unbeeinflusst von photochemischem Smog

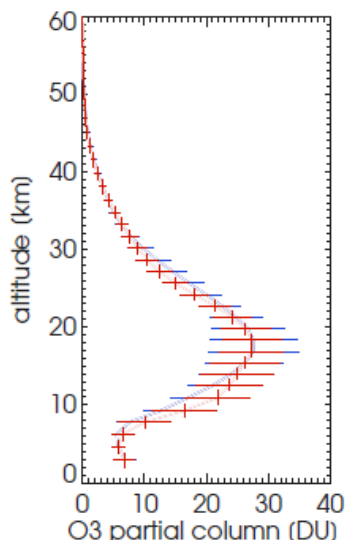


Abbildung 2: Mittleres Ozonprofil mit statistischer Unsicherheit ($\pm 1\sigma$). Quelle: Ozonbulletin des DWD Nr. 130, 18. Mai 2012

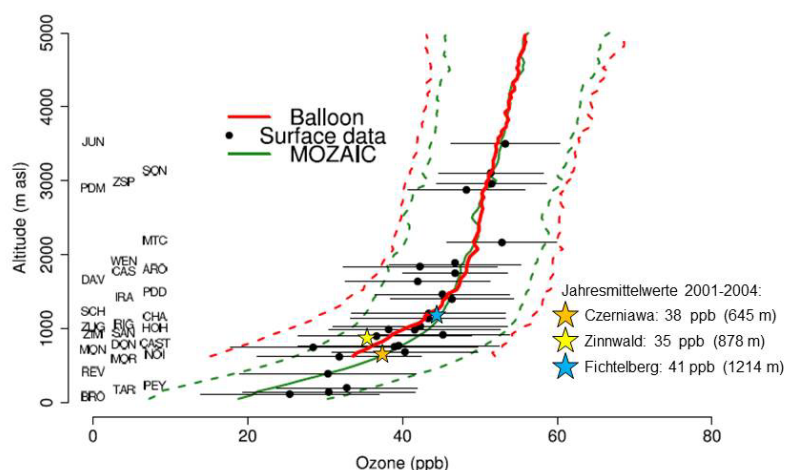


Abbildung 3: Mittlere Ozonprofile über Payerne in der Schweiz (rot) und Frankfurt (grün) und Daten von Bodenstationen (schwarze Punkte) für Januar 2001 bis Juli 2004 mit Standardabweichung (Quelle: geändert nach Chevalier et al., 2007; zusätzlich drei Bergstationen aus dem KLAPS-Projektgebiet)

und repräsentativ für die Hintergrundkonzentration sind, auf. Im weiteren Verlauf des Jahres nimmt die Bedeutung der photochemischen Oxidation zu, so dass es zu einem sogenannten breiten Sommermaximum von April bis August oder September kommen kann (Chevalier et al., 2007). Das ist der typische Verlauf der Ozonkonzentration an Stationen, die deutlich durch lokale oder regionale Ozonquellen beeinflusst sind.

Die Tagesgänge sind bodennah sowie in urbanen Gebieten am stärksten ausgeprägt. Je höher eine Station liegt, desto geringer wird der Einfluss regionaler Effekte innerhalb der Grenzschicht und desto stärker der Einfluss aus der freien Troposphäre (Chevalier et al., 2007). Die maximale Ozonkonzentration wird bei einem deutlichen Tagesgang in den frühen Nachmittagsstunden erreicht. Für dieses Maximum sind das Angebot an Vorläuferstoffen sowie hohe Werte der solaren Einstrahlung und der Temperatur entscheidend. Nach Sonnenuntergang sinkt die Ozonkonzentration durch die Reaktion mit NO. An speziellen Stationslagen ist ein weiterer, geringerer Anstieg in der zweiten Nachthälfte möglich. Da nachts die photochemische Oxidation als Ozonquelle ausscheidet, werden meteorologische Gründe für den erneuten Konzentrationsanstieg verantwortlich gemacht. Klein et al. (2014) und Strassburger und Kuttler (1998) konnten durch Modellsimulationen für Oklahoma City und Feldexperimente für Essen zeigen, dass der vertikale Transport aus Schichten mit höherer Ozonkonzentration diesen Anstieg verursacht. Aber auch der horizontale Transport aus der ländlichen Umgebung, angetrieben durch lokale und mesoskalige Windsysteme, kann zu einem Anstieg der Ozonkonzentration in der Nacht führen, wie Eliasson et al. (2003) für Göteborg in Schweden zeigen konnten. Eine generelle Übertragbarkeit auf andere Stationen resultiert daraus nicht.

Der Wochengang der Ozonkonzentration zeigt ebenfalls einen typischen Verlauf. Im Gegensatz zu den Stickoxiden, deren Konzentrationen am Wochenende abnehmen, steigen die Ozonkonzentrationen an. Dieser Effekt wurde schon 1977 von Graedel et al. beschrieben und als „Sonntagseffekt“, heute meist „Wochenendeffekt“, bezeichnet. Diese ausgeprägten Wochengänge sind typisch für städtische Stationen mit hoher Verkehrsdichte und belegen die NO_x-Abhängigkeit der Bildung und des Abbaus von Ozon. Trotzdem scheinen die konkreten Mechanismen hinter diesem Effekt noch nicht eindeutig geklärt zu sein. In der Literatur werden verschiedene Hypothesen vertreten, die im Detail in Melkonyan und Kuttler (2012) beschrieben sind.

2.3 Wechselwirkungen zwischen Klima und Luftqualität

Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre ist eine von mehreren Einflussgrößen, die unser Klima bestimmen. Aber auch das Klima kann umgekehrt die Luftqualität beeinflussen. Nach der Emission von Luftschadstoffen entscheiden die großräumige Zirkulation und die aktuellen meteorologischen Bedingungen über die Verteilung der Luftschadstoffe, die charakteristische chemische Zusammensetzung der Luft und damit über deren Qualität im Sinne der Europäischen Richtlinien (Fiore et al., 2012; Graedel und Crutzen, 1994; Melkonyan und Kuttler, 2012; Seinfeld, 2006). Um den klimatischen Einfluss auf die oberflächennahen Konzentrationen von Luftschadstoffen zu untersuchen, gibt es verschiedene Ansätze (Jacob und Winner, 2009):

- Korrelationen zwischen Indizes der Luftqualität und meteorologischer Variablen
- Sensitivitätsuntersuchungen mit Modellen (perturbed meteorological parameters)
- Direkte Simulation der Luftqualität durch die Kopplung von Klima- und Chemietransportmodellen

Dabei spielt die Auswahl des zeitlichen und räumlichen Maßstabes eine große Rolle, da die Zusammenhänge zwischen einzelnen meteorologischen Variablen und Luftschadstoffen in Raum und Zeit variieren. Bisherige Untersuchungen auf Grundlage von Modellen und Beobachtungen kommen zu dem Ergebnis, dass ein wärmeres Klima zu einer allgemeinen Verschlechterung der Luftqualität führt. Untersuchungen von Jacob und Winner (2009) verweisen auf einen möglichen Anstieg der Ozonkonzentration in den Sommermonaten um 1 bis 10 ppb in den nächsten Jahrzehnten allein durch die Auswirkungen des Klimawandels. Fiore et al. (2012) beziffern diesen Anstieg für Europa auf 6 ppb bis 2030. Jedoch zeigen Simulationen mit gekoppelten Modellen unter den RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways siehe Moss, 2010), dass die NO_x -Emissionen und infolge die Ozonkonzentrationen abnehmen. Einzige Ausnahme ist das Szenario RCP8.5. Der größte Einfluss auf die Ozonkonzentrationen wird daher eher auf Seiten der Emissionen als auf der Klimaseite gesehen, wobei die Unsicherheiten hoch sind.

2.4 Monitoring der Ozonkonzentrationen

An mehr als 700 Messstationen in Deutschland überwachen die Länder und der Bund kontinuierlich die Qualität der Außenluft. Zum Messumfang gehören neben Ozon (O_3), Stickoxiden (NO und NO_2) und Feinstaub (PM_{10}) eine Vielzahl weiterer Stoffe, z. B. organische Verbindungen und Schwermetalle im Feinstaub. Der Ozongehalt der Probenluft wird durch UV-Photometrie bestimmt (DIN EN 14625). Die Konzentrationen werden im Allgemeinen volumenbezogen in ppb (Parts per Billion, Teile pro Milliarde) oder in Gewichtsanteilen $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mikrogramm pro Kubikmeter) angegeben. Bei einer Temperatur von $20\text{ }^\circ\text{C}$ und einem Luftdruck von 1013 hPa entsprechen $1\text{ ppb} = 0,001\text{ ppm} = 1,99\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Also ein Milliardstel Volumenanteil entspricht rund zwei Millionstel Gramm pro Kubikmeter.

Die Messstationen werden entsprechend der EU Richtlinie 2011/850/EU nach zwei Merkmalen klassifiziert, der Emissionsquelle (Stationstyp: Verkehr, Industrie, Hintergrund) und der Lage der Station (Stationsumgebung, siehe Tabelle 2). Für weitere Auswertungen wurden diese Klassen nach einer Vorgabe des Umweltbundesamtes in drei Stationsregimes zusammengefasst:

- Verkehrsnah: alle Stationen des Stationstyps Verkehr
- Städtischer Hintergrund: alle Stationen des Stationstyps Hintergrund und der Stationsumgebung städtisch oder vorstädtisch
- Ländlicher Hintergrund: alle Stationen des Stationstyp Hintergrund und weder Stationsumgebung städtisch noch vorstädtisch

Beim Stationsregime kommt die Kategorie Industrie nicht vor, da es sehr wenige Stationen mit industriellen Emissionsquellen gibt. In Sachsen gibt es keine Station und in Brandenburg aktuell zwei Stationen vom Typ Industrie – eine davon im KLAPS-Projektgebiet gelegen. Für das Projektgebiet wurden Ozonmessstationen aus Brandenburg, Sachsen und Polen verwendet. Details zu den ausgewählten Stationen und der Datenverfügbarkeit werden im Kapitel 4 Datengrundlagen erläutert.

Tabelle 2: Verwendete Klassifikation der Stationsumgebung nach RL 2011/850/EU sowie die entsprechenden Kriterien nach Anhang VIII Richtlinie 2008/50/EG (Ozon) (siehe auch Handbuch „Luftqualitätsdaten- und Informationsaustausch in Deutschland“, Umweltbundesamt II 4.2, Version V3.0)

Stationsumgebung nach Richtlinie 2011/850/EU		Stationsumgebung nach Anhang VIII Richtlinie 2008/50/EG (Ozon)
städtisch		städtisch
vorstädtisch		vorstädtisch
ländlich	stadtnah	ländlich
	regional	
abgelegen		ländlich Hintergrund

3 Projektgebiet

Das Projektgebiet setzt sich aus Teilen der deutschen Bundesländer Brandenburg und Sachsen sowie Westpolen und Tschechien zusammen. Die Ausdehnung beträgt rund 200 km x 200 km (Abbildung 4). Die Orographie ist hauptsächlich durch Flachland mit Geländehöhen kleiner 200 m geprägt. Im Süden wird das Projektgebiet von Mittelgebirgen abgeschlossen, im Südwesten beginnend mit dem Erzgebirge, Zittauer Gebirge, Isergebirge, Riesengebirge und Altwatergebirge. Die höchste Erhebung ist die Schneekoppe im Riesengebirge mit 1603 m.

Makroklimatisch wird das Projektgebiet dem Übergangsklima zwischen maritimem westeuropäischem und kontinentalem osteuropäischem Klima zugeordnet. Der maritime Einfluss überwiegt jedoch und Unterschiede im regionalen Klima sind hauptsächlich auf den Einfluss der Mittelgebirge (z. B. Stau- und Abschirmungseffekte beim Niederschlag) und die Geländehöhe zurückzuführen. Aufgrund der geringen Ausdehnung des Projektgebietes spielt die Entfernung zum Meer nur eine untergeordnete Rolle.

Infolge der Orographie existiert ein Nord-Süd-Gradient der Temperatur. Die höchsten Temperaturen werden in der nördlichen Hälfte des Projektgebietes erreicht. Die Jahresmitteltemperaturen für den Referenzzeitraum 1971–2000 bewegen sich zwischen 9,2 °C in Lindenberg (98 m) und 0,8 °C auf der Schneekoppe (1603 m). Die Analysen von Berkeley Earth (<http://berkeleyearth.lbl.gov/locations/50.63N-16.48E>) zeigen einen deutlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur aufgrund des anthropogenen Klimawandels. Über zweihundert Jahre – 1750 bis Mitte der neunziger Jahre – bewegte sich die Jahresmitteltemperatur zwischen 7 °C und 8 °C. Ein deutlicher Temperaturanstieg beginnend in den achtziger Jahren hat in nur zwei Jahrzehnten dazu geführt, dass sich die Jahresmitteltemperatur um fast ein Grad erhöht hat und mittlerweile die Marke von 9 °C anstrebt. Eine ausführliche Charakterisierung thermischer und bioklimatischer Bedingungen im Projektgebiet erfolgt in dem Bericht „Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum“ (Mehler et al., 2014).

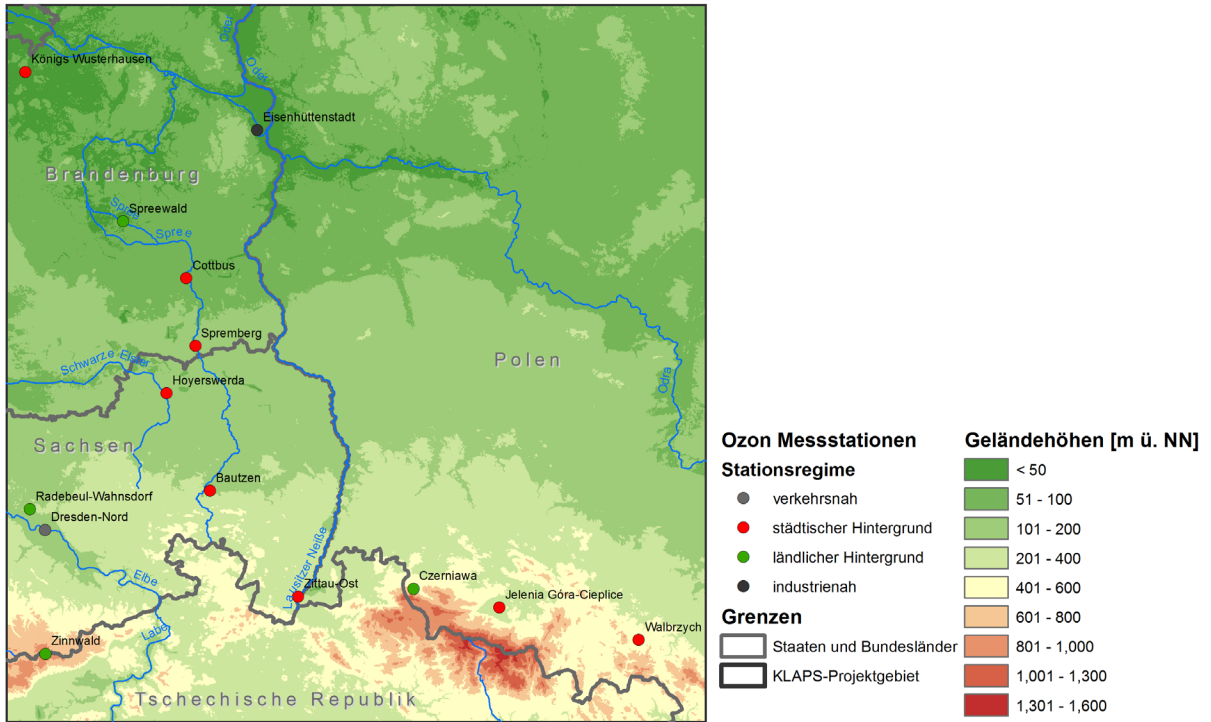


Abbildung 4: Topographie des KLAPS-Projektgebietes mit Lage der Ozonmessstationen

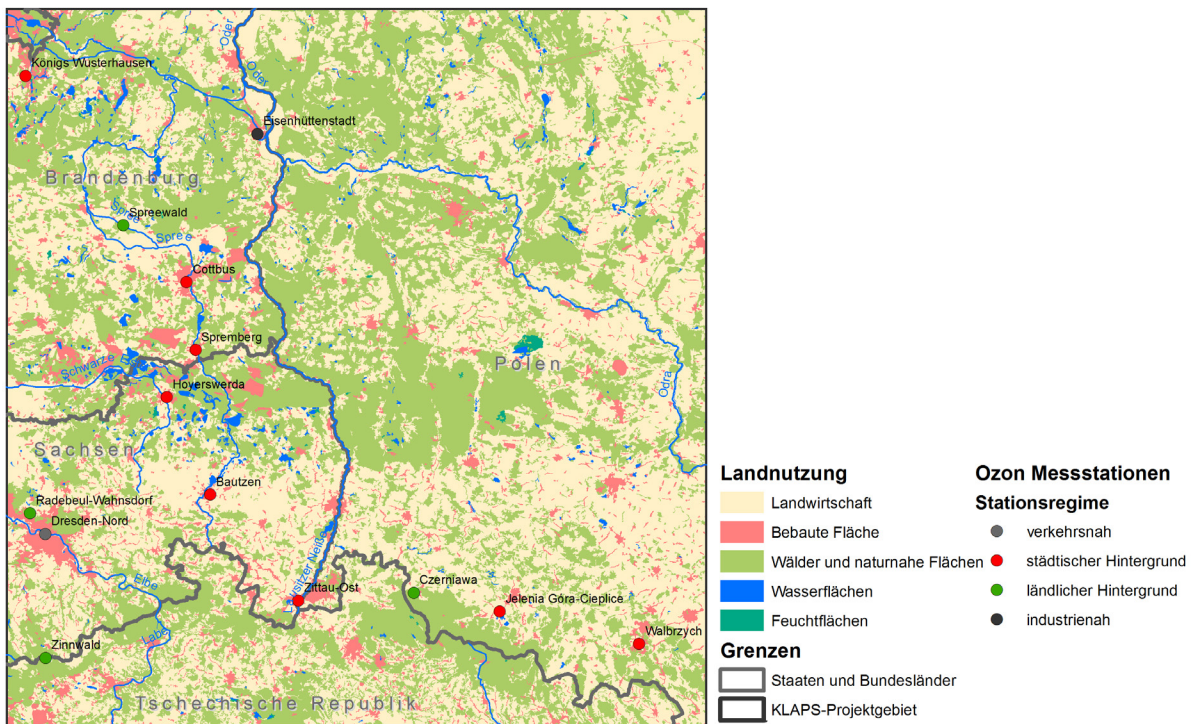


Abbildung 5: Landnutzung (CORINE Land Cover 2006) im KLAPS-Projektgebiet mit Lage der Ozonmessstationen

Die Jahresniederschlagssummen sind im nördlichen Teil des Projektgebietes am geringsten (z. B. Lindenberg 560 mm) und in den Gebirgsregionen am höchsten (Schneekoppe 1151 mm). Das Gebietsmittel der Jahresniederschlagssummen beträgt 643 mm und ist damit ca. 10 % geringer als für Sachsen – eine Auswirkung der zunehmenden Kontinentalität Richtung Osten (Lünich et al., 2014). Auch die Sonnenscheindauer ist im Vergleich zu Sachsen erhöht. Insgesamt sind die tiefen Lagen des Projektgebietes wärmer, sonnenreicher und trockener als die höheren Lagen.

Die Hauptwindrichtung im Projektgebiet ist Südwest bis Nordwest. Eine erhöhte Häufigkeit der westlichen bis nordwestlichen Richtungen findet man vor allem in den Mittelgebirgen der Sudeten (vom Zittauer Gebirge bis zum Altwatergebirge, siehe Kapitel 3 in Surke et al., 2013). In diesem Bericht geht es um die Windverhältnisse in der freien Atmosphäre, so dass die Ergebnisse nicht zur Charakterisierung der bodennahen Windverhältnisse geeignet sind, da diese stark durch die lokale Topographie beeinflusst sein können. An einigen Orten tritt ein zweites Maximum bei Ost-Südost-Anströmung auf.

Landschaftlich dominieren landwirtschaftlich genutzte Flächen mit einem Anteil von rund 50 % und Waldflächen mit einem Anteil von 42 %. Bebaute Flächen (6 %) zusammen mit Wasser- und Feuchtflächen (2 %) machen nur einen geringen Teil der Landnutzung aus (Abbildung 5). Nichtsdestotrotz spielen bebaute und besiedelte Gebiete bei der negativen Beeinträchtigung der Luftqualität die entscheidende Rolle.

4 Datengrundlage

4.1 Ozonkonzentration und meteorologische Daten

Verschiedene Rahmenrichtlinien der EU zielen auf die Überwachung der Luftqualität im Hinblick auf die Vermeidung von schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Die Beurteilung der Luftqualität, die Information der Bevölkerung, insbesondere bei der Überschreitung von Grenz- bzw. Zielwerten, sowie die Erhaltung oder Verbesserung der Luftqualität sind Inhalt dieser Richtlinien. Daraus ergibt sich die Verpflichtung zur landesweiten Überwachung der Luftqualität. Um diesen Aufgaben gerecht zu werden, unterhalten die einzelnen Bundesländer in Deutschland umfangreiche Messnetze zur Beobachtung von Luftschadstoffen, unter anderem auch von Ozon. Im KLAPS-Projektgebiet sind dafür auf deutscher Seite das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LGUV) zuständig. Die Stationen dieser Messnetze erfassen beispielsweise derzeit in Sachsen Schwefeldioxid (SO_2), Feinstaub <10 bzw. $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$), Staubbiederschlag, Ozon (O_3), Stickoxide (NO_x) sowie flüchtige organische Verbindungen (Benzol, Toluol und Xylol). Staubinhaltsstoffe (Schwermetalle, Ruß, Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) werden mittels Laboranalysen bestimmt. Zusätzlich werden auch meteorologische Größen gemessen (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014a).

Die in diesem Bericht verwendeten Daten wurden vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und vom Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LGUV) bezogen. Die Daten für die polnischen Stationen stellte ebenfalls das LfULG zur Verfügung. Die Stationen in Sachsen, Brandenburg und auf polnischer Seite wurden nach verschiedenen Kriterien ausgewählt. Es wurden Stationen mit einer möglichst langen Zeitreihe an verfügbaren Daten verwendet und eine gleichmäßige Verteilung der Stationen im Projektgebiet angestrebt. In die Auswertung flossen 14 Stationen ein: sechs Stationen in Sachsen, fünf Stationen in Brandenburg und drei Stationen in Polen (Abbildung 4). Dabei gab es eine verkehrsnaher Station (Dresden-Nord), eine industrienaher Station (Eisenhüttenstadt), acht Stationen im städtischen Hintergrund und vier ländlich geprägte Stationen (siehe Tabelle 3). Für die zeitlichen Verläufe der Ozonkonzentration wurden die Stundendaten der Messstationen aus Tabelle 3 für Ozon (O_3), Stickoxid (NO_x), Stickstoffdioxid (NO_2) und Stickstoffmonoxid (NO) genutzt. Für die Darstellung und Bewertung des

Zusammenhangs zwischen der Ozonkonzentration und ausgewählten meteorologischen Variablen wurden die Stundendaten und die Tagesmaxima der 8h-Mittel der Ozonkonzentration ausgewertet.

Tabelle 3: Verwendete Stationen in Deutschland (DE) und Polen (PL), Zeiträume und Datenquellen (LfULG = Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; LUGV= Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg)

Station	Land	Höhe (m)	Lage Länge; Breite (dez Grad)	Zeitraum	Stationsregime	Datenquelle
Dresden-Nord	DE	116	13,7414; 51,0649	1.1.1995 - 31.12.2012	verkehrsnahe	LfULG
Eisenhüttenstadt	DE	43	14,6382; 52,1463	1.1.1994 - 31.12.2012	industrienah	LUGV
Bautzen	DE	207	14,4438; 51,1757	1.1.1995 - 31.12.2012	städtischer Hintergrund	LfULG
Cottbus	DE	77	14,3346; 51,7463	1.1.1993 - 31.12.2012	städtischer Hintergrund	LUGV
Hoyerswerda	DE	117	14,2543; 51,4369	1.1.1995 - 31.12.2009	städtischer Hintergrund	LfULG
Königs Wusterhausen	DE	37	13,6198; 52,2946	1.1.1994 - 31.12.2012	städtischer Hintergrund	LUGV
Spremberg	DE	101	14,3764; 51,5645	1.1.1992 - 31.12.2012	städtischer Hintergrund	LUGV
Zittau Ost	DE	233	14,8228; 50,8924	1.1.1995 - 31.12.2012	städtischer Hintergrund	LfULG
Jelenia Góra	PL	346	15,6792; 50,8608	1.1.2007 - 31.12.2012	städtischer Hintergrund	LfULG
Wałbrzych	PL	436	16,2703; 50,7689	1.1.2007 - 31.12.2012	städtischer Hintergrund	LfULG
Radebeul	DE	245	13,6750; 51,1195	1.1.1995 - 31.12.2012	ländlicher Hintergrund	LfULG
Spreewald	DE	51	14,0571; 51,8976	1.1.1996 - 31.12.2012	ländlicher Hintergrund	LUGV
Zinnwald	DE	878	13,7515; 50,7315	1.1.1996 - 31.12.2012	ländlicher Hintergrund	LfULG
Czerniawa	PL	645	15,3142 ; 50,9128	1.1.2007 - 31.12.2012	ländlicher Hintergrund	LfULG

Die Klimakenngrößen Temperatur, Globalstrahlung, relative Feuchte sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden ebenfalls an den Stationen zur Luftqualitätsmessung erfasst (Tabelle 4). Aus den vorliegenden Stundenwerten wurden für die weiteren Analysen Tagesmittelwerte berechnet – bis auf die Windrichtung. Die Windrichtung ist mittels Gradzahlen angegeben, 360° entsprechen Wind aus Richtung Nord und 180° Wind aus Richtung Süd.

Durch Stationsverlegungen mussten die Ozondaten und die meteorologischen Daten der brandenburgischen Stationen Cottbus, Königs Wusterhausen, Spreewald und Spremberg aus jeweils zwei Zeitreihen zusammengesetzt werden. Die Entfernungen zwischen der alten und der neuen Station sind sehr gering (≤ 1 km bzw. zwischen Burg (Spreewald) und Spreewald 9 km). Ein systematischer Unterschied/Konzentrationsprung nach dem Stationswechsel war nicht erkennbar. Für die polnischen Stationen Jelenia Góra, Wałbrzych und Czerniawa wurden lediglich die Ozonstundendaten in Form von zeitlichen Verläufen verwendet, da die meteorologischen Daten nur für kurze Zeitabschnitte vorlagen.

Bei der Analyse des meteorologischen Einflusses auf die Ozonkonzentration wurden die meteorologischen Messdaten verwendet, die direkt an den Luftqualitäts-Messstationen erhoben werden. Der Standort der Stationen zur Beurteilung der Luftqualität wird jedoch nach anderen Vorgaben ausgewählt als z. B. der Standort von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Gerade die Messung von meteorologischen Parametern an innerstädtischen Stationen, neben großen Straßen und mit umgebener Bebauung kann zu deutlichen Abweichungen im Vergleich zu Werten des DWD führen. Zum Beispiel kann dichte Bebauung die Temperaturmessung beeinflussen und zu Abschirmungseffekten beim Wind führen. Daher können die Ergebnisse eventuell von bisherigen Auswertungen meteorologischer Kenngrößen im Gebiet geringfügig abweichen. So zeigen beispielsweise Auswertungen der heißen Tage über 30 °C an Stationen des Luftgütemessnetzes teilweise höhere Werte als an vergleichbaren DWD-Stationen.

Tabelle 4: Für die Auswertung verwendete Messgrößen

Messgröße	Abkürzung	Einheit
Ozonkonzentration	O ₃	µg/m ³
Tagesmaximum des 8h-Mittels	O ₃ -8h-max	µg/m ³
Stickoxide	NO _x	µg/m ³
Stickstoffdioxid	NO ₂	µg/m ³
Stickstoffmonoxid	NO	µg/m ³
Temperatur	T	°C
Relative Feuchte	RF	%
Globalstrahlung	RG	W/m ²
Windgeschwindigkeit	FF	m/s
Windrichtung	FR	°

4.2 Synoptische Daten

Die Analyse eines möglichen Zusammenhangs zwischen der Überschreitung von Ozonzielwerten und bestimmten meteorologischen Situationen erfolgte unter Zuhilfenahme der objektiven Wetterlagenklassen (oWLK) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die oWLK werden seit dem 01.01.1979 täglich anhand des Klassifikationsansatzes nach Dittmann et al. (1995) bestimmt und basieren auf meteorologischen Größen des operationellen, numerischen Wetteranalyse- und Vorhersagesystems des DWD. Die Klassifizierung bezieht sich auf Deutschland und benachbarte Regionen, erfolgt täglich zum Analysetermin um 12 Uhr UTC und repräsentiert die Wetterlage des jeweiligen Tages. Nähere Informationen zu den zugrunde liegenden Modellen, dem Klassifikationsgebiet und dessen räumlicher Auflösung im Gitternetz können Bissolli und Dittmann (2001) entnommen werden.

Zur Analyse möglicher klimatischer Änderungen und deren Bedeutung für zukünftige Ozonüberschreitungen wurden objektive Wetterlagen von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bereitgestellt (Krahe et al., 2010). Diese basieren auf langjährigen Klimaszenarien der in Tabelle 5 angegebenen globalen Klimamodelle, wobei sich der Zeitraum 1950–2000 bzw. 1950–1999 auf deren jeweiligen Kontrollläufe (20C3M) bezieht und der Zeitraum 2001–2100 bzw. 2001–2099 ausgewählte Modellläufe unter den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 (IPCC, 2000) abdeckt. Weiteres zum methodischen Rahmen, der technischen Durchführung und Auswertung der Klimamodelle ist Krahe et al. (2010) zu entnehmen. Den aus der Klimamodellierung resultierenden objektiven Wetterlagen liegt, analog zum oben genannten Datensatz des DWD, die Klassifikationsmethodik nach Dittmann et al. (1995) zugrunde, welche im Folgenden etwas näher erläutert werden soll.

Die meteorologischen Kriterien zur Bestimmung der objektiven Wetterlagen setzen sich aus der großräumigen Anströmrichtung der Luftmassen, den Zirkulationsformen der Atmosphäre (Zyklonalität) in 950 und 500 hPa sowie dem Feuchtegehalt der Troposphäre zusammen. Daraus resultieren insgesamt 40 mögliche Wetterlagen, welche in Tabelle 6 zusammengefasst sind. Die Anströmrichtung bzw. Advektion der Luftmassen wird anhand der horizontalen Windkomponenten in 700 hPa bestimmt. Dabei lassen sich die Windrichtungen als 90° Segmente innerhalb eines Vollkreises darstellen, welcher beginnend bei 0° in Nordost (NO), Südost (SO), Südwest (SW) und Nordwest (NW) eingeteilt werden kann. Die Hauptwindrichtung wird festgelegt, sofern mindestens zwei Drittel aller im Klassifikationsgebiet gewichteten Windvektoren in einem der genannten Sektoren

Tabelle 5: Zusammenfassung verwendeter Modellläufe, welche den genutzten oWLK zugrunde liegen (nach Krahe et al. 2010)

Modell	Bezeichnung	Herkunft	Antrieb	Lauf	Zeitraum
BCCR-BCM2.0	BCM2	NOR	20C3M	1	01.01.1950-31.12.1999
			A1B	1	01.01.2001-31.12.2099
CNRM-CM3	CNCM3	FR	20C3M	1	01.01.1950-31.12.2000
			A1B	1	01.01.2001-31.12.2100
			A2	1	01.01.2001-31.12.2100
DMI-ECHAM5-MPIOM	DMIEH5	DK	20C3M	4	01.01.1950-31.12.2000
			A1B	4	01.01.2001-31.12.2100
EGMAM	EGMAM	D	20C3M	3	01.01.1950-31.12.1999
			A1B	3	01.01.2001-31.12.2099
HadCM3	HADCM3C	GB	20C3M	1	01.01.1950-31.12.1999
			A1B	1	01.01.2001-31.12.2099
ECHAM5-MPIOM	MPEH5	D	20C3M	1, 2, 3	01.01.1950-31.12.2000
			A1B	1, 2, 3	01.01.2001-31.12.2100
			A2	1, 3	01.01.2001-31.12.2100
			B1	1, 3	01.01.2001-31.12.2100

liegen (Details zum Algorithmus sind Bissolli und Dittmann 2001 zu entnehmen.). Ist diese Bedingung nicht erfüllt, erfolgt die Kategorisierung der Anströmrichtung als nicht definiert und bleibt unbestimmt (XX).

Das Klassifikationskriterium der Zyklonalität bezieht sich auf zwei isobare Flächen bzw. den Luftdruck 950 und 500 hPa. Entlang der beiden Druckflächen wird jeweils die Änderung der geopotentiellen Höhe im Klassifikationsgebiet bestimmt, aus welcher schließlich ein gewichteter Gebietsmittelwert berechnet wird. Das resultierende Gebietsmittel ist ein Maß für die Krümmung der Geopotentialfläche und wird auch als Zyklonalitätsindex bezeichnet, welcher je nach Vorzeichen die Rotationseigenschaften des Strömungsfeldes charakterisiert. Dabei entspricht ein positives Vorzeichen zyklonaler (Z), ein negatives Vorzeichen antizyklonaler (A) Strömung. Zyklonale Luftströmungen treten in der nördlichen Hemisphäre um Gebiete tiefen Luftdrucks auf, wobei umgebene Luftmassen gegen den Uhrzeigersinn abgelenkt werden. Im Gegensatz dazu bilden sich um ein Hochdruckgebiet antizyklonale Luftströmungen aus, welche im Uhrzeigersinn rotieren. Wetterlagen unter zyklonalem Einfluss sind durch die großräumigen Hebungsprozesse in Tiefdruckgebieten meist mit Wolkenbildung und evtl. Niederschlag verbunden und an sich relativ (zur Umgebung) kalt. Antizyklonale Wetterlagen hingegen sind durch absinkende Luftmassen in Hochdruckgebieten meist an Wolkenauflösung gekoppelt und relativ warm (Häckel, 2008).

Der dritte Index zur Klassifizierung der Feuchte von Wetterlagen ist definiert als der gewichtete Gebietsmittelwert des niederschlagsfähigen Wassers (precipitable water) in der Troposphäre. Zu dessen Bestimmung erfolgt zunächst eine vertikale Integration des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes über die Isobarenflächen 950, 850, 700, 550 und 300 hPa (Bissolli und Dittmann, 2001). Anschließend kann daraus für jedes Niveau (und jeden horizontalen Referenzpunkt) der niederschlagsfähige Wassergehalt abgeleitet werden, welcher abschließend als gewichteter Mittelwert über das Klassifikationsgebiet zusammengefasst wird. Der somit ermittelte Index wird auch als aktueller Feuchteindex bezeichnet, welcher mit seinem entsprechenden langjährigen Monatsmittelwert (basiert auf der Zeitreihe 01.06.1979–31.12.1996) verglichen wird. Eine Wetterlage wird letztendlich als feucht (F) klassifiziert, sofern der aktuelle Feuchteindex höher als der dazugehörige langjährige monatliche Mittelwert ist. Im umgekehrten Fall, also kleinerem Feuchteindex, wird die Wetterlage als trocken (T) charakterisiert.

Tabelle 6: Übersicht der 40 objektiven Wetterlagen des DWD (nach Bissolli und Dittmann 2001)

oWLK-Nr.	oWLK-Kennung	Anströmrichtung	Zyklonalität in 950 hPa	Zyklonalität in 500 hPa	Feuchte
1	XXAAT	nicht definiert			
2	NOAAT	Nordost			
3	SOAAT	Südost	antizyklonal	antizyklonal	trocken
4	SWAAT	Südwest			
5	NWAAT	Nordwest			
6	XXAAF	nicht definiert			
7	NOAAF	Nordost			
8	SOAAF	Südost	antizyklonal	antizyklonal	feucht
9	SWAAF	Südwest			
10	NWAAF	Nordwest			
11	XXAZT	nicht definiert			
12	NOAZT	Nordost			
13	SOAZT	Südost	antizyklonal	zyklonal	trocken
14	SWAZT	Südwest			
15	NWAZT	Nordwest			
16	XXAZF	nicht definiert			
17	NOAZF	Nordost			
18	SOAZF	Südost	antizyklonal	zyklonal	feucht
19	SWAZF	Südwest			
20	NWAZF	Nordwest			
21	XXZAT	nicht definiert			
22	NOZAT	Nordost			
23	SOZAT	Südost	zyklonal	antizyklonal	trocken
24	SWZAT	Südwest			
25	NWZAT	Nordwest			
26	XXZAF	nicht definiert			
27	NOZAF	Nordost			
28	SOZAF	Südost	zyklonal	antizyklonal	feucht
29	SWZAF	Südwest			
30	NWZAF	Nordwest			
31	XXZZT	nicht definiert			
32	NOZZT	Nordost			
33	SOZZT	Südost	zyklonal	zyklonal	trocken
34	SWZZT	Südwest			
35	NWZZT	Nordwest			
36	XXZZF	nicht definiert			
37	NOZZF	Nordost			
38	SOZZF	Südost	zyklonal	zyklonal	feucht
39	SWZZF	Südwest			
40	NWZZF	Nordwest			

Der klassifizierte Feuchtegehalt der Troposphäre darf nicht mit tatsächlich auftretendem Niederschlag gleichgesetzt werden, da sowohl aktueller als auch langjähriger niederschlagsfähiger Wassergehalt nur einen theoretisch möglichen Niederschlag beschreiben, welcher lediglich in Verbindung mit entsprechenden Abkühlungs- oder Hebungsprozessen ausfallen kann.

5 Methodik

5.1 Abhängigkeit der Ozonkonzentration von meteorologischen Kenngrößen

Ziel dieser Analyse ist die Darstellung und Bewertung des Zusammenhangs zwischen der Ozonkonzentration und ausgewählten meteorologischen Variablen. Zunächst wurden verschiedene zeitliche Verläufe der Ozonkonzentration dargestellt. Dazu wurden die vorliegenden Ozon-Stundendaten und die Tagesmaxima der 8h-Mittel verwendet. Die 8h-Mittelwerte werden gleitend für jede Stunde eines Tages berechnet, der maximale Wert ist dann das hier verwendete Tagesmaximum der 8h-Mittel. Die genaue Vorschrift kann in der EU-Richtlinie 2008/50/EG nachgelesen werden.

Für die Analyse der Ozonkonzentrationen im KLAPS-Projektgebiet wurden für jede ausgewählte Station die Zeitreihe sowie Jahres-, Tages- und Wochengänge untersucht. In der Literatur (z. B. Chevalier et al., 2007; Demuzere et al., 2009) wird eine Ozonbelastung vorwiegend in den Frühjahrs- und Sommermonaten beschrieben. Bei der Darstellung der Jahresgänge (Abbildung 8) bestätigt sich dieses Bild. Hierfür wurden alle Tagesmaxima der 8h-Mittel für jeden Monat als Box-Whisker-Plot dargestellt. In diesen Monaten traten die höchsten Ozonkonzentrationen und die meisten Überschreitungen des Zielwertes von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf. Aufgrund dieses Verteilungsmusters wurden für alle weiteren Auswertungen die Monate April bis August als Untersuchungszeitraum festgelegt.

Für die Zeitreihen der Stationen wurden jährliche Tagesmaxima der 8h-Mittel der Ozonkonzentration aus den Monaten April bis August verwendet. Der Wochengang für jede Station beruht auf den Tagesmaxima der 8h-Mittel der Ozonkonzentration und Tagesmittelwerten der Vorläufersubstanzen (Stickoxid (NO_x), Stickstoffdioxid (NO_2) und Stickstoffmonoxid (NO)) der Monate April bis August für jeden Wochentag. Für die Darstellung der Tagesgänge wurden die mittleren Stundenwerte der Ozonkonzentrationen und der Stickoxide aus den Monaten April bis August verwendet.

Für die Untersuchung der Abhängigkeit hoher Ozonkonzentrationen von meteorologischen Kenngrößen wurde eine Korrelationsanalyse zwischen den Tagesmaxima der 8h-Mittel und den Variablen Tagesmaximumtemperatur, Globalstrahlung, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit für die Monate April bis August durchgeführt. Mit dem Korrelationskoeffizient R nach Pearson wurde der statistische (lineare) Zusammenhang zwischen der Ozonkonzentration und den Klimakenngrößen für jede Station bestimmt. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson kann Werte zwischen 1 und -1 annehmen. Ein hoher statistischer Zusammenhang kann bei Werten nahe 1 abgeleitet werden, ein hoher negativer statistischer Zusammenhang bei Werten nahe -1. Bei Werten um 0 ist kein statistischer Zusammenhang gegeben. Für die Ergebnisdarstellung wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 als ein Maß für den erklärten Anteil der Variabilität (Varianz) verwendet. Die Korrelationsanalyse wurde mit Tagesdaten durchgeführt, da das Tagesmaximum der 8h-Mittel der Ozonkonzentration verwendet werden sollte und eine vergleichende Korrelationsanalyse unter Verwendung von Stundendaten keine anderen bzw. aussagekräftigeren Ergebnisse brachte.

Für die Auswertung der Anzahl der Überschreitungen des Zielwertes von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in verschiedenen Temperaturklassen (Abbildung 15) wurde die Tagesmaximumtemperatur aus den Stundendaten verwendet. Für die

Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Windrichtung und der Ozonkonzentration wurden die verfügbaren Stundenwerte der Monate April bis August genutzt.

5.2 Ozonkonzentration mit Bezug auf Wetterlagenklassen

5.2.1 Wetterlagenklassen als Indikatoren für Ozonzielwertüberschreitungen

Um einen ersten Eindruck über den Zusammenhang zwischen Zielwertüberschreitungen von Ozonkonzentrationen und bestimmten synoptischen Situationen zu gewinnen, wurde eine Häufigkeitsanalyse durchgeführt. Dabei wurden lediglich solche Tage innerhalb der Bezugsmonate (April bis August) berücksichtigt, an welchen das Tagesmaximum der 8h-Mittel der gemessenen Ozonkonzentration einen Wert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht bzw. überschritten hat. Diese Konzentration bezieht sich auf einen vorgegebenen Zielwert der Richtlinie 2008/50/EG der Europäischen Union mit dem Ziel schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit insgesamt zu vermeiden, zu verhindern oder zu verringern, wobei die genannte Ozonkonzentration von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an höchstens 25 Tagen im Jahr, gemittelt über drei Jahre, überschritten werden darf.

Tabelle 7: Ausgewählte Klassifizierungsindizes zur Detektion bestimmter Luftmasseneigenschaften bei Ozonzielwertüberschreitungen

Index	Bezeichnung
Anströmrichtung	XX, NO, SO, SW, NW
Zyklonalität	AA, AZ, ZA, ZZ A950, Z950, A500, Z500
Feuchte	F, T
Kombinationen:	Westwetterlagen SWNW-F, SWNW-T
	Ostwetterlagen NOSO-F, NOSO-T
	Zyklonal Z950-F, Z950-T, Z500-F, Z500-T
	Antizyklonal A950-F, A950-T, A500-F, A500-T

Für diese Ereignistage wurden anschließend die relativen Häufigkeiten aller 40 Wetterlagen bestimmt, also der Anteil einer bestimmten Wetterlage an der Gesamtanzahl aller definierten Tage mit einer Ozonzielwertüberschreitung. Da dies in Bezug auf allgemeinere Luftmasseneigenschaften ein sehr eingeschränktes Ergebnis liefert, wurde ebenfalls die Auftretenshäufigkeit bestimmter Klassifizierungsindizes bestimmt. Die Indizes sind in Tabelle 7 zusammengefasst und begrenzen die meteorologischen Gegebenheiten auf Anströmrichtung der Luftmassen, Zyklonalität und Feuchtegehalt der Troposphäre. Eine Kombination der Indizes ermöglicht darüber hinaus auch eine Differenzierung in beispielsweise feuchte bzw. trockene West- und Ostwetterlagen. Das Ergebnis der Häufigkeitsanalyse diente zunächst der Detektion bestimmter meteorologischer Situationen, welche einen eindeutigen quantitativen Zusammenhang mit hohen Ozonereignissen aufweisen. Exemplarisch ist in Abbildung 6 zu sehen, dass mit einer Zielwertüberschreitung von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vor allem feuchte (F), in 500 hPa antizyklonale (AA, ZA), unbestimmte (XX) und westliche (SW) Wetterlagen einhergehen (weitere Ergebnisse befinden sich in Anhang III-2 bis Anhang III-5).

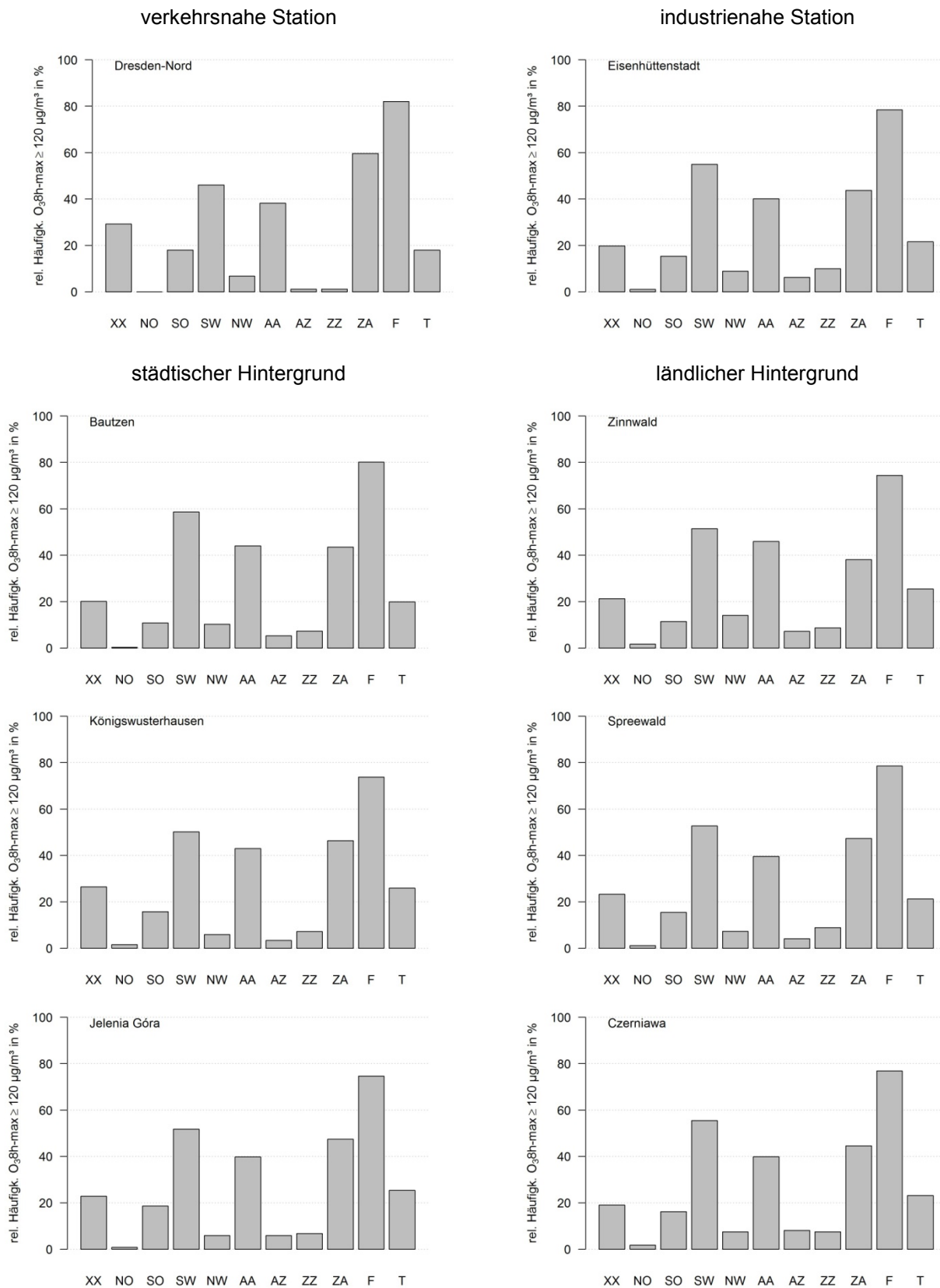


Abbildung 6: Relative Häufigkeiten bestimmter Klassifikationsindizes an Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Monate April bis August.

Die detektierten Klassifikationsindizes wurden anschließend mit den Ereignissen erhöhter Ozonkonzentrationen korreliert. Dabei wurde zunächst für jede Station separat für jedes Jahr die Anzahl der Tage ermittelt, an welchen das Tagesmaximum der 8h-Mittel eine Konzentration von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht bzw. überschritten hat. Analog dazu wurden für dieselben Jahre die Häufigkeiten der jeweilig aufgetretenen Klassifikationsindizes bestimmt. Daraus ergaben sich für jede Station je eine Zeitreihe jährlicher Ozonüberschreitungshäufigkeiten und eine Zeitreihe pro Index, welche im nächsten Schritt für die Korrelationsanalyse trendbereinigt³ wurden. Das Ergebnis der trendbereinigten Jahressgänge ist exemplarisch in Abbildung 7 für die Station Königs Wusterhausen und den Klassifizierungsindex AA dargestellt. Mittels der jeweils korrelierten trendbereinigten Zeitreihen wurde abschließend ein linearer Zusammenhang hergestellt. Dieser wurde dann als eindeutig gegeben bewertet, wenn die Regressionsgerade einen signifikanten Trend ($p \leq 0,01$) aufwies. Somit ist auch bei einem niedrigerem Bestimmtheitsmaß R^2 und einer höheren Anzahl von Wertepaaren eine Aussage bezüglich des linearen Zusammenhangs zwischen Ozonzielwertüberschreitung und entsprechender Wetterlagenklasse möglich.

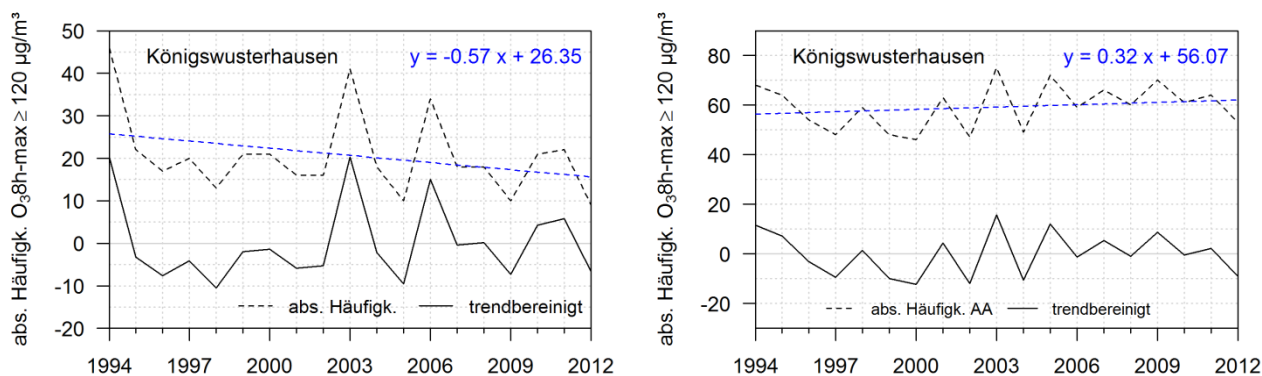


Abbildung 7: Trendbereinigung der jährlichen Häufigkeit von Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (links) und von Tagen mit antizyklonalen Strömungsbedingungen in 950 und 500 hPa (rechts) für die Station Königs Wusterhausen.

Da aufgrund der kurzen Zeitreihen für die polnischen Stationen nur sehr wenige Datenpaare zur Durchführung einer Korrelation vorhanden waren, wurde zusätzlich der mittlere Tagesgang der Ozonkonzentration in Abhängigkeit verschiedener Klassifikationsindizes ermittelt. Hierbei wurden die Stundenmittel der gemessenen Ozonkonzentrationen bei gleichzeitigem Auftreten einer bestimmten Wetterlagenklasse berechnet. Als Bezugszeitraum wurden erneut die Monate April bis August verwendet, also jener Jahresabschnitt mit gewöhnlich hohen Ozonkonzentrationen. Der mittlere Tagesgang dient auch der Veranschaulichung von Ozonbildungs- und Abbauprozessen sowie zur Darstellung von Unterschieden zwischen verschiedenen Messumgebungen (städtisch, ländlich, industrie- und verkehrsnah) (Abbildung 21).

5.2.2 Projektionen zukünftiger Wetterlagenklassen

Der statistische Zusammenhang zwischen Ozonzielwertüberschreitungen und dem Auftreten bestimmter Klassifizierungsindizes diente als Ausgangspunkt für die Analyse möglicher zukünftiger Wetterlagen und einer qualitativen Beurteilung bezüglich der einhergehenden Luftqualität. Hierbei wurden die modellierten objektiven Wetterlagen der BfG genutzt, welche in drei Perioden mit einer Dauer von 30 Jahren eingeteilt wurden. Als Referenz bzw. Ist-Klima wurde für das jeweils betrachtete Klimamodell der Kontrolllauf (20C3M) für den Zeitraum 1961 bis 1990 herangezogen. Dem gegenübergestellt wurden die Perioden 2021 bis 2050 als nahe Zu-

³ Die Trendbereinigung erfolgt durch die Subtraktion des geschätzten Trends von der Zeitreihe. Die Korrelationsanalyse wird danach mit den Residuen durchgeführt.

kunft und 2070 bis 2099 als fernere Zukunft. Die beiden Zukunftszeiträume wurden separat (je nach Verfügbarkeit des Modelllaufs, siehe Tabelle 3) für die Szenarien A1B, A2 und B1 betrachtet. Entsprechend Formel 1 erfolgte die Auswertung der modellierten Klassifikationsindizes anhand der Anomalie aus deren Auftretenshäufigkeit im jeweiligen Zukunftszeitraum und in der Referenzperiode. Analog zur Korrelationsanalyse wurden auch hier lediglich die Monate April bis August betrachtet. Anhand der ermittelten Anomalien lässt sich das Klimasignal bewerten. Nach Formel 1 bedeutet ein positives Signal ein häufigeres Auftreten, ein negatives Signal einen Rückgang bestimmter Klassifikationsindizes für den jeweils betrachteten Zukunftszeitraum.

$$\Delta H(\text{oWLKidx}) = H_P(\text{oWLKidx}_{M,L,S}) - H_R(\text{oWLKidx}_{M,L,20C3M}) \quad (1)$$

Mit $H(\text{oWLKidx})$ als Auftretenshäufigkeit des jeweiligen Klassifikationsindex entsprechend Tabelle 7, M als jeweiliges Klimamodell, L als zugehöriger Modelllauf, P als Projektionsperiode (2021–2050 bzw. 2070–2099), S als Szenario (A1B, A2 bzw. B1), R als Referenzperiode (1961–1990) und 20C3M als Kontrolllauf des entsprechenden Klimamodells.

6 Ergebnisse

6.1 Abhängigkeit der Ozonkonzentration von meteorologischen Kenngrößen

6.1.1 Zeitliche und räumliche Variabilität der Ozonkonzentration

Um einen ersten Eindruck von der Verteilung der Ozonkonzentration gewinnen zu können, wurden zunächst verschiedene zeitliche Verläufe der Ozonkonzentration erstellt (Abbildungen 9 bis 14). Die Jahressgänge des Tagesmaximums der 8h-Mittel ausgewählter Stationen sind in Abbildung 8 dargestellt und zeigen das typische Muster mit Maximalwerten im Frühjahr und Sommer und niedrigen Werten im Winter (Chevalier et al., 2007; Demuzere et al., 2009). Dieses sogenannte breite Sommermaximum ist an allen Stationen erkennbar. Die Medianwerte sind im Mai und teilweise auch im April am höchsten. Die höchsten Konzentrationen und die maximale Variabilität werden meist im Juli und August erreicht (außer Station Czerniawa). Während an der Station Dresden-Nord mehr als 90 % (Whisker) aller Werte auch von April bis August unter dem Zielwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen, betrifft das beispielsweise in Zinnwald von Mai bis August nur 75 % aller Werte (Obergrenze Box). Auch für die restlichen Stationen liegen meist weniger als 90 % der Tagesmaxima der 8h-Mittel unter dem Zielwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Insbesondere ländliche Stationen in Reinluftgebieten weisen oft ein Maximum der Ozonkonzentration im Frühjahr auf (Kap. 2.2, Monks, 2000; Vingarzan, 2004). Im KLAPS-Projektgebiet ist an der Station Czerniawa dieses Frühjahrsmaximum in den Monaten April und Mai zu erkennen (Abbildung 8). Abbildung 9 zeigt die Zeitreihen einiger ausgewählter Stationen von 1993 bis 2012. Der extrem warme und sonnenscheinreiche Sommer 2003 lässt sich hier deutlich durch die überdurchschnittlich hohe Ozonbelastung erkennen. Die zwischenjährliche Variabilität hat in den letzten Jahren eher abgenommen. Für die Station Dresden-Nord sieht man seit 2005 geringe Schwankungen und einen deutlich ansteigenden Trend seit 1995, der sich in den letzten Jahren abgeschwächt hat. Zinnwald dagegen zeigt einen leicht abfallenden Trend – bei Ozonkonzentrationen auf hohem Niveau. Die anderen Stationen weisen eher gleichbleibende Werte ohne einen deutlichen Trend auf.

Schaut man auf die wöchentliche Verteilung der Tagesmaxima der 8h-Mittel für die Monate April bis August, fällt auch hier wieder Dresden-Nord als die Station mit der geringsten Ozonbelastung und Zinnwald mit der

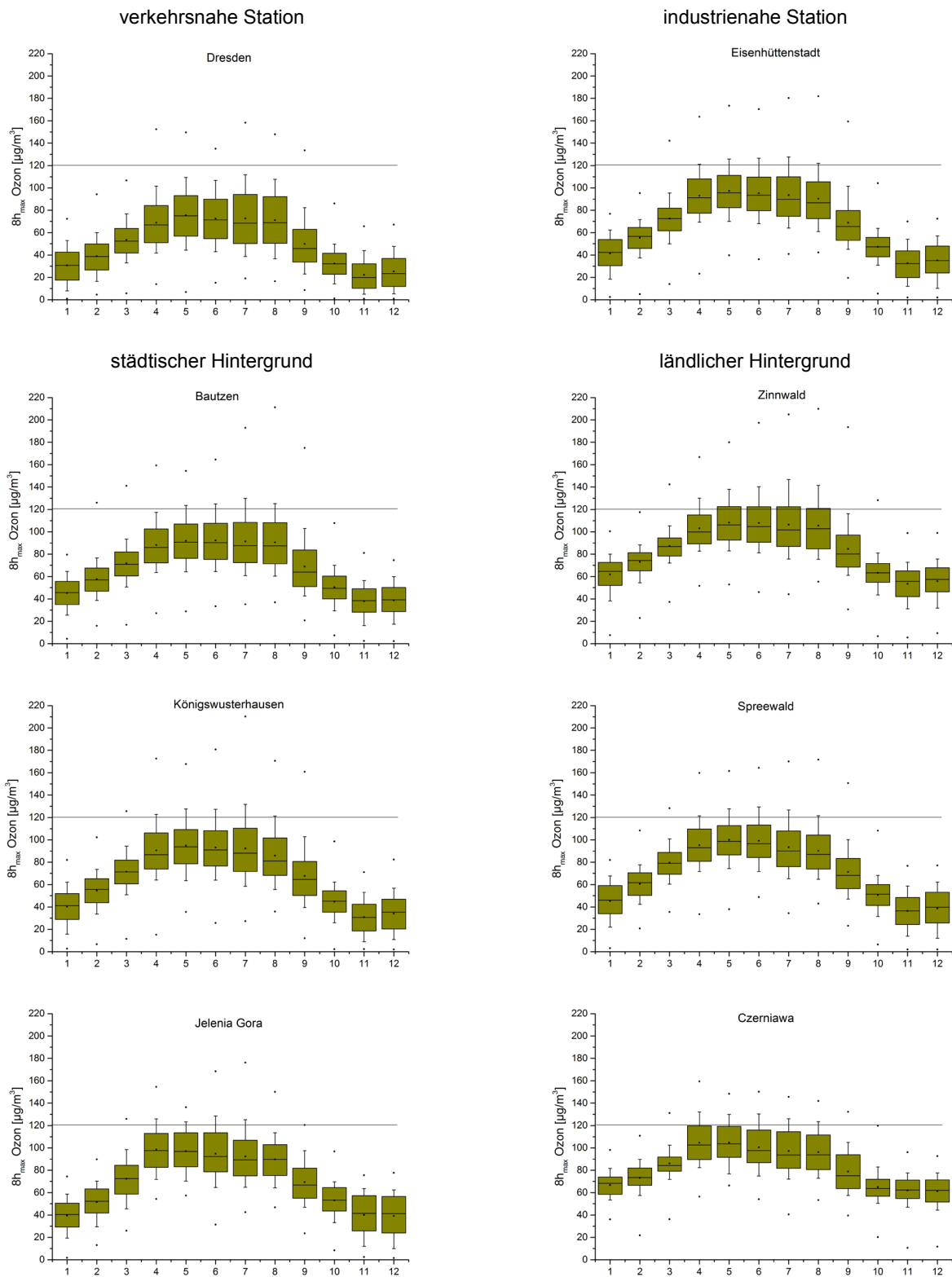


Abbildung 8: Jahrgänge der Ozon-Tagesmaxima der 8h-Mittelwerte (Box = 25-75% aller Werte, Whisker = 10-90%, ■ = Mittelwert, ● = Minimum/Maximum); Zielwert 120µg/m³

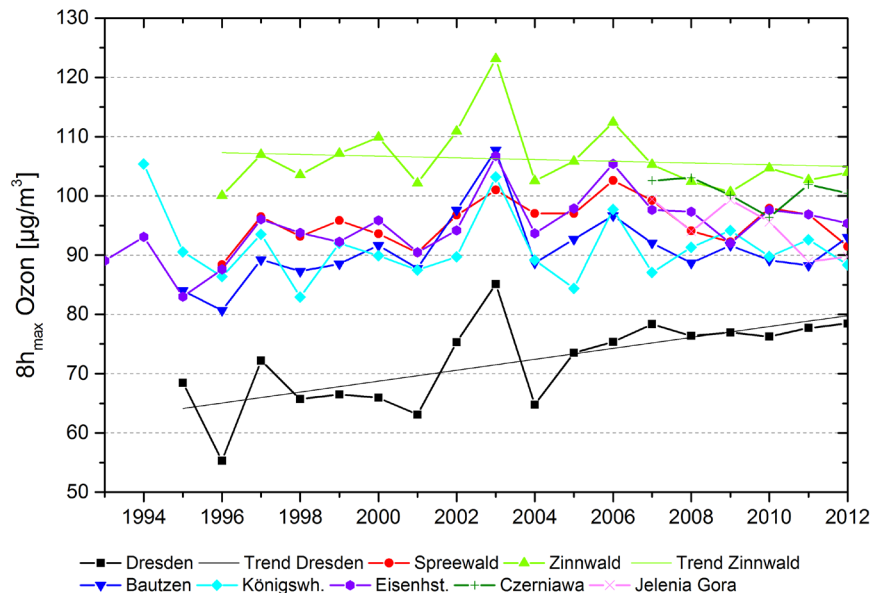


Abbildung 9: Zeitreihen einzelner Jahresmittel der Ozon-Tagesmaxima (8h-Mittel) für die Monate April bis August

höchsten Belastung auf (Abbildung 10). Einflüsse des Stadtverkehrs an der Verkehrsstation Dresden-Nord sind hier deutlich zu erkennen. Montag bis Freitag liegen die Ozonkonzentrationen mit ca. $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich niedriger als am Wochenende ($76 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Auch an den Stationen Bautzen und Königs Wusterhausen im städtischen Umfeld ist dieser sogenannte Wochenendeffekt erkennbar, wenn auch schwächer als in Dresden-Nord. Stationen im ländlichen Hintergrund zeigen dieses Muster nicht (siehe auch Demuzere et al., 2009; Melkonyan und Kuttler, 2012). Weiterhin wurden die Wochengänge der Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung – wie Stickoxide, Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid (NO_x , NO_2 und NO) – untersucht (Abbildung 11). Für die Station Dresden-Nord lässt sich feststellen, dass am Wochenende durch den fehlenden Berufsverkehr deutlich niedrigere Konzentrationen der Vorläufersubstanzen vorliegen (Abbildung 11, links).

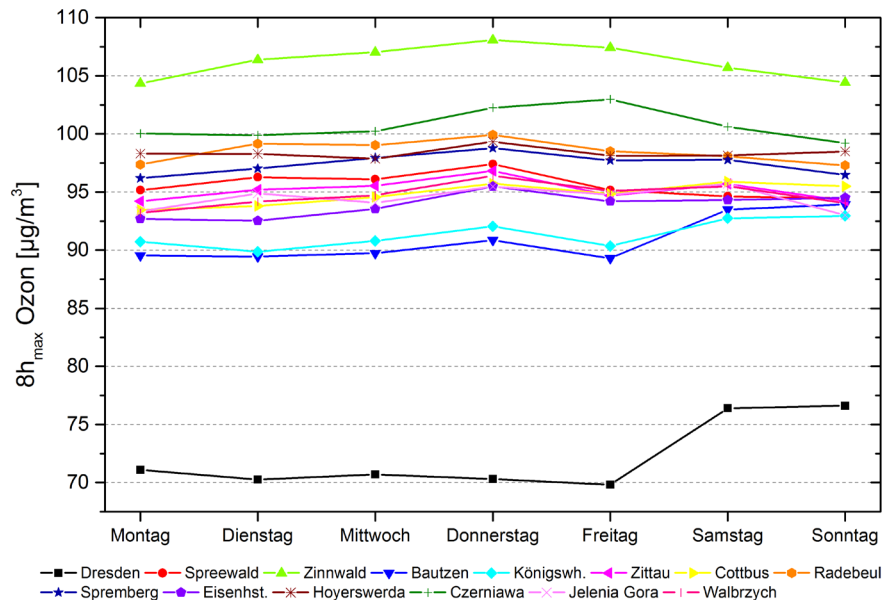


Abbildung 10: Mittlere Wochengänge der Ozon-Tagesmaxima (8h-Mittel) für die Monate April bis August

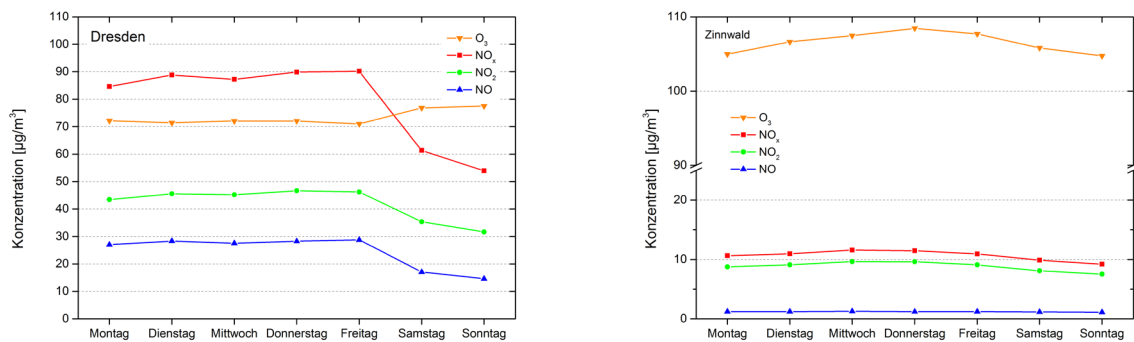
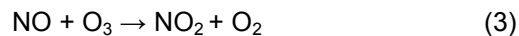
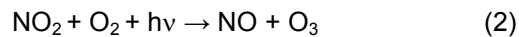


Abbildung 11: Mittlere Wochengänge der Ozon-Tagesmaxima (8h-Mittel) und der Tagesmittelwerte von NO_x, NO₂ und NO für die Stationen Dresden-Nord (links) und Zinnwald (rechts) für die Monate April bis August (1997-2012).

Die photochemische Ozonbildung aus Vorläufersubstanzen (u. a. Stickoxide) findet in den tieferen Luftschichten statt. Einerseits sind diese Vorläufersubstanzen, insbesondere Stickstoffdioxid, Quelle der Ozonbildung. Aus NO₂ und O₂ entstehen unter der Einwirkung von Sonnenlicht (Photooxidation) Ozon und Stickstoffmonoxid (Formel 2). Andererseits wirkt das gebildete Stickstoffmonoxid gemäß einer Rückreaktion (Formel 3) als eine Ozonsenke.



Erst durch die Anwesenheit der flüchtigen organischen Substanzen (NM VOC) wird dieses Gleichgewicht in Richtung einer Netto-Ozonproduktion verschoben, da die NM VOC dazu führen, dass NO zu NO₂ oxidiert wird⁴ und damit mehr NO₂ für die Ozonbildung und gleichzeitig weniger NO für den Ozonabbau zur Verfügung stehen.

Für den beobachteten Wochenend-Effekt könnte dies bedeuten, dass am Wochenende durch die Abnahme der Stickoxidkonzentrationen ein Wechsel von einer VOC-Limitierung hin zu einer NO_x-Limitierung stattfindet. In Bezug auf den Wochenendeffekt werden jedoch auch andere Mechanismen diskutiert (Melkonyan und Kuttler, 2012). In Zinnwald (Abbildung 11, rechts) als ländlicher Hintergrundstation stellt sich die Situation gänzlich anders dar. Die Konzentration der Stickoxide ist sehr gering im Gegensatz zu einer sehr hohen Ozonkonzentration. Das lässt vermuten, dass dieses Ozon nicht durch Photolyse aus den wenig vorhandenen Stickoxiden entsteht, sondern durch Ferntransport aus urbanen Gebieten sowie aus höheren Schichten der Troposphäre dorthin gelangt. Stickstoffmonoxid ist hier kaum vorhanden, was somit auch einen geringeren Ozonabbau zur Folge hat (Kuttler und Zmarsly, 1996).

Im Anhang I ist die zeitliche Charakteristik der Stickoxidkonzentrationen für die Stationen Dresden-Nord (verkehrsnahe), Bautzen (städtischer Hintergrund) und Zinnwald (ländlicher Hintergrund) dargestellt. Im Gegensatz zum Ozon sind die Stickoxidkonzentrationen im Sommer niedriger als im Winter, speziell bei Stickstoffmonoxid. Die dargestellten Wochen- und Tagesgänge zeigen die Konzentrationen in den für die Überschreitung der Ozonzielwerte relevanten Monaten April bis August. Je größer der Einfluss des Kraftfahrzeugverkehrs desto höher die Stickoxidkonzentrationen und desto ausgeprägter die zeitlichen Verläufe. Insgesamt hat die Konzentration an Stickoxiden im Vergleich zu den 90er Jahren in Dresden-Nord und Bautzen stark abgenommen (NO_x Rückgang um ca. 30–40 µg/m³). In Zinnwald erkennt man eine leichte Abnahme auf einem deutlich nied-

⁴ NM VOC reagieren mit OH-Radikalen und Sauerstoff zu Peroxyradikalen, die zur Oxidation von NO zu NO₂ nötig sind.

rigeren Konzentrationsniveau. Wichtig für die Ozonbildung ist das Verhältnis von NO zu NO₂. Dieses Verhältnis zeigt einen abnehmenden Trend, der auf den schwächeren Rückgang der NO₂-Konzentrationen zurückzuführen ist. Melkonyan und Kuttler (2012) fanden für Nordrhein-Westfalen ebenfalls einen Rückgang der Stickoxide, der für NO wesentlich stärker als für NO₂ ausfiel. Ein sinkendes NO/NO₂-Verhältnis hat dabei steigende Ozonkonzentrationen zur Folge. Die Emissionsszenarien, die das Umweltbundesamt in Auftrag gegeben hat, gehen auch für die Zukunft (bis 2030) von einer weiteren Abnahme der NO_x-Konzentrationen aus (Umweltbundesamt, 2014a).

Die mittleren Tagesgänge der Ozonkonzentration für die Monate April bis August (1997–2012) sind unterschiedlich stark ausgeprägt (Abbildung 12). An der Station Dresden-Nord mit den höchsten Stickoxidkonzentrationen sind die Unterschiede der Ozonkonzentration zwischen Tag und Nacht am stärksten. Dabei schwankt die mittlere Ozonkonzentration zwischen einem Minimum von 20 µg/m³ am zeitigen Morgen und einem Maximum von 70 µg/m³ am Nachmittag. Das Maximum am Nachmittag hat seine Gründe v. a. in der Konzentration und dem Konzentrationsverhältnis der anthropogenen Vorläufersubstanzen, der Intensität der Solarstrahlung (und damit der photochemischen Prozesse) und der Lufttemperatur (Kuttler und Zmarsly, 1996). Ab 16 Uhr gehen die Konzentrationen bis zum frühen Morgen zurück. Der Tagesgang der anderen Stationen sieht ähnlich aus, ist aber weniger stark ausgeprägt und weist grundsätzlich höhere Ozonkonzentrationen auf. Auffällig ist, dass die größten Konzentrationsunterschiede zwischen den Stationen in der Nacht auftreten.

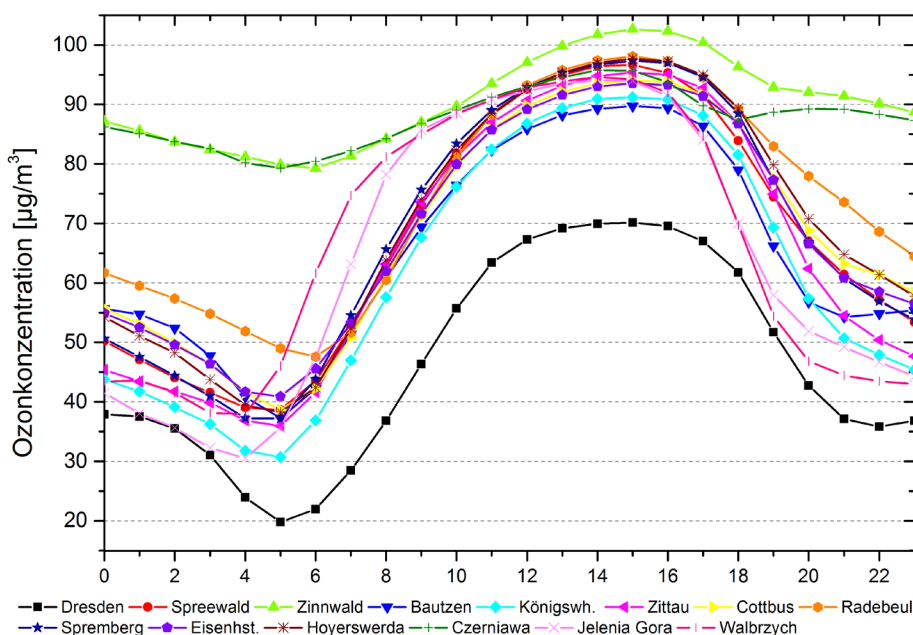


Abbildung 12: Mittlere Tagesgänge der Ozonkonzentration der einzelnen Stationen für die Monate April bis August (1997-2012)

An den Hintergrundstationen Zinnwald und Czerniawa ist der Tagesgang am schwächsten ausgeprägt. Wobei die höher gelegene Station Zinnwald größere Tag-Nacht-Unterschiede aufweist (in Zinnwald zwischen 79 µg/m³ und 102 µg/m³; in Czerniawa zwischen 79 µg/m³ und 95 µg/m³). Die höchsten Ozonkonzentrationen im KLPAS-Projektgebiet zusammen mit dem geringen Tagesgang an den Stationen Zinnwald (878 m) und Czerniawa (645 m) geben einen Hinweis auf den steigenden Einfluss der freien Troposphäre (Chevalier et al., 2007), auf eine reduzierte photochemische Ozonbildung und einen verminderten Ozonabbau in Folge der niedrigen Stickoxidkonzentrationen (NO₂ und NO). Generell weist laut Ordóñez et al. (2005) ein ausgeprägter Tagesgang eher auf photochemische Ozonentstehung hin, kein Tagesgang auf die Dominanz der Hinter-

grundbelastung. Dass Zinnwald trotz einer höheren Lage einen stärkeren Tagesgang aufweist als Czerniawa, könnte hier auf stärkere lokale/regionale Einflüsse, z. B. Ferntransport aus dem Böhmischem Becken, zurückzuführen sein. Um diese beiden Stationen besser vergleichen zu können, wären u. a. die Stickoxidkonzentrationen für Czerniawa von Interesse sowie die Konzentrationen von umliegenden Stationen aus potentiellen Quellregionen.

Abbildung 13 zeigt im Vergleich die mittleren Tagesgänge der Konzentrationen von Stickoxiden und Ozon an den Stationen Dresden-Nord und Zinnwald. Für Dresden-Nord finden sich wie auch beim Ozon ausgeprägte Tagesgänge für die Stickoxide (NO_x , NO_2 und NO), die mit ihren Maxima (bis $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) gegenläufig zum Tagesgang der Ozonkonzentration ausfallen. In Zinnwald dagegen sind die Konzentrationen an Stickoxiden mit etwa $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich geringer. In höheren Lagen sinken die Konzentration der Vorläufersubstanzen und somit auch die Möglichkeit von Bildung und Abbau von Ozon durch Stickoxide.

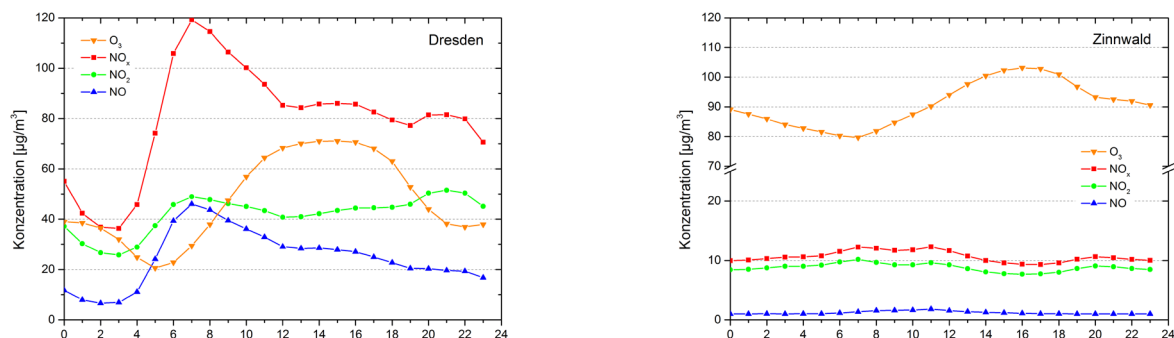


Abbildung 13: Mittlerer Tagesgänge von Ozon und Stickoxiden (NO_x , NO_2 und NO) für die Stationen Dresden-Nord (links) und Zinnwald (rechts) für die Monate April bis August (1997-2012)

6.1.2 Korrelationsanalyse

Temperatur

Abbildung 14 stellt den Zusammenhang zwischen der Tagesmaximumtemperatur und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August und die jeweiligen linearen Regressionen für ausgewählte Stationen des Projektgebietes dar (weitere Stationen im Anhang II). Es gibt einen positiven Zusammenhang zwischen der Tagesmaximumtemperatur und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August. Mit steigender Temperatur steigen auch die Ozonkonzentrationen. Die Bestimmtheitsmaße liegen im Mittel bei 0,39 (mittlerer Korrelationskoeffizient $R=0,62$) mit einer Signifikanz von 0,05. Das heißt, dass circa 40 % der Variabilität der Ozonkonzentration durch die Maximumtemperatur erklärt werden. Den stärksten Zusammenhang zeigen die Stationen Hoyerswerda und Radebeul mit $R^2 > 0,44$, den schwächsten die Station Zittau mit $R^2 = 0,33$. Allerdings scheint der Zusammenhang nicht über den gesamten Wertebereich linear zu sein. Camalier et al. (2007) beschreiben nichtlineare Zusammenhänge zwischen Ozon und der Temperatur. Bloomer et al. (2009) fanden eine lineare Temperatur-Ozon-Beziehung im Bereich von $19 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Da bei den meisten Stationen höhere Ozonwerte vorwiegend bei hohen Temperaturen auftreten, würde sich die Korrelation in diesen Bereichen wesentlich verbessern. Eine Ausnahme ist die Station Zinnwald, denn dort liegt die Temperatur auf Grund der geografischen Höhe generell niedriger. Klimaprojektionen zeigen, dass es im KLAPS-Projektgebiet bis Ende des 21. Jahrhunderts sehr wahrscheinlich eine Temperaturzunahme in der Größenordnung von $3,5$ bis $4 \text{ }^\circ\text{C}$ geben wird (Kreienkamp et al., 2013).

Tabelle 8: Bestimmtheitsmaße zwischen der Tagesmaximumtemperatur und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null)

Station	Bestimmtheitsmaß (R^2)
Dresden-Nord	0,35
Eisenhüttenstadt	0,37
Bautzen	0,41
Cottbus	0,40
Hoyerswerda	0,44
Königs Wusterhausen	0,38
Spremberg	0,40
Zittau	0,33
Radebeul	0,44
Spreewald	0,35
Zinnwald	0,37

Um abschätzen zu können, bei welchen Temperaturen der Zielwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vorrangig überschritten wird, wurden die Maximumtemperaturen und die Tagesmaxima der 8h-Mittel ausgewertet. Dafür wurden die Maximumtemperaturen an Tagen mit einem Tagesmaximum der 8h-Mittel größer oder gleich $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in verschiedene Klassen unterteilt:

- Temperaturen über $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (heiße Tage)
- Temperaturen von $25\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ (Sommertage)
- Temperaturen von $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperaturen unter $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Zielwertüberschreitungen mit fehlendem Temperaturwert

Abbildung 15 zeigt für die deutschen Stationen die durchschnittliche Anzahl der Überschreitungstage des Tagesmaximums der 8h-Mittel von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pro Jahr in Abhängigkeit von der Temperaturklasse. Für die polnischen Stationen standen keine Temperaturdaten zur Verfügung. Die meisten Überschreitungen zeigt wieder Zinnwald, die wenigsten die Station Dresden-Nord. Außer bei der Station Zinnwald fällt bei allen Stationen auf, dass die Überschreitungen des Zielwertes von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Ozon überwiegend an sogenannten Sommertagen mit Maximumtemperaturen über $25 \text{ }^\circ\text{C}$ auftreten. In Dresden-Nord, Eisenhüttenstadt und Cottbus treten sogar über die Hälfte der Grenzwertüberschreitungen an heißen Tagen mit Temperaturen über $30 \text{ }^\circ\text{C}$ auf. An der Station in Zinnwald kommen kaum Tage über $30 \text{ }^\circ\text{C}$ vor, dagegen gibt es schon hohe Ozonbelastungen bei niedrigen Temperaturen.

Nach der 39. BImSchV (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen) darf der maximale 8h-Wert eines Tages an höchstens 25 Tagen pro Kalenderjahr, gemittelt über 3 Jahre, den Wert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreiten. Dieser Zielwert soll seit dem Jahr 2010 erreicht werden⁵. Langfristig sollen die maximalen 8h-Mittel den Wert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gar nicht mehr überschreiten (39. BImSchV).

⁵ „Die Einhaltung der Zielwerte wird zu diesem Termin beurteilt. Dies bedeutet, dass das Jahr 2010 das erste Jahr sein wird, das zur Berechnung der Einhaltung im betreffenden Drei- bzw. Fünfjahreszeitraum herangezogen wird.“ (EU Richtlinie 2008/50/EG, Anhang VII)

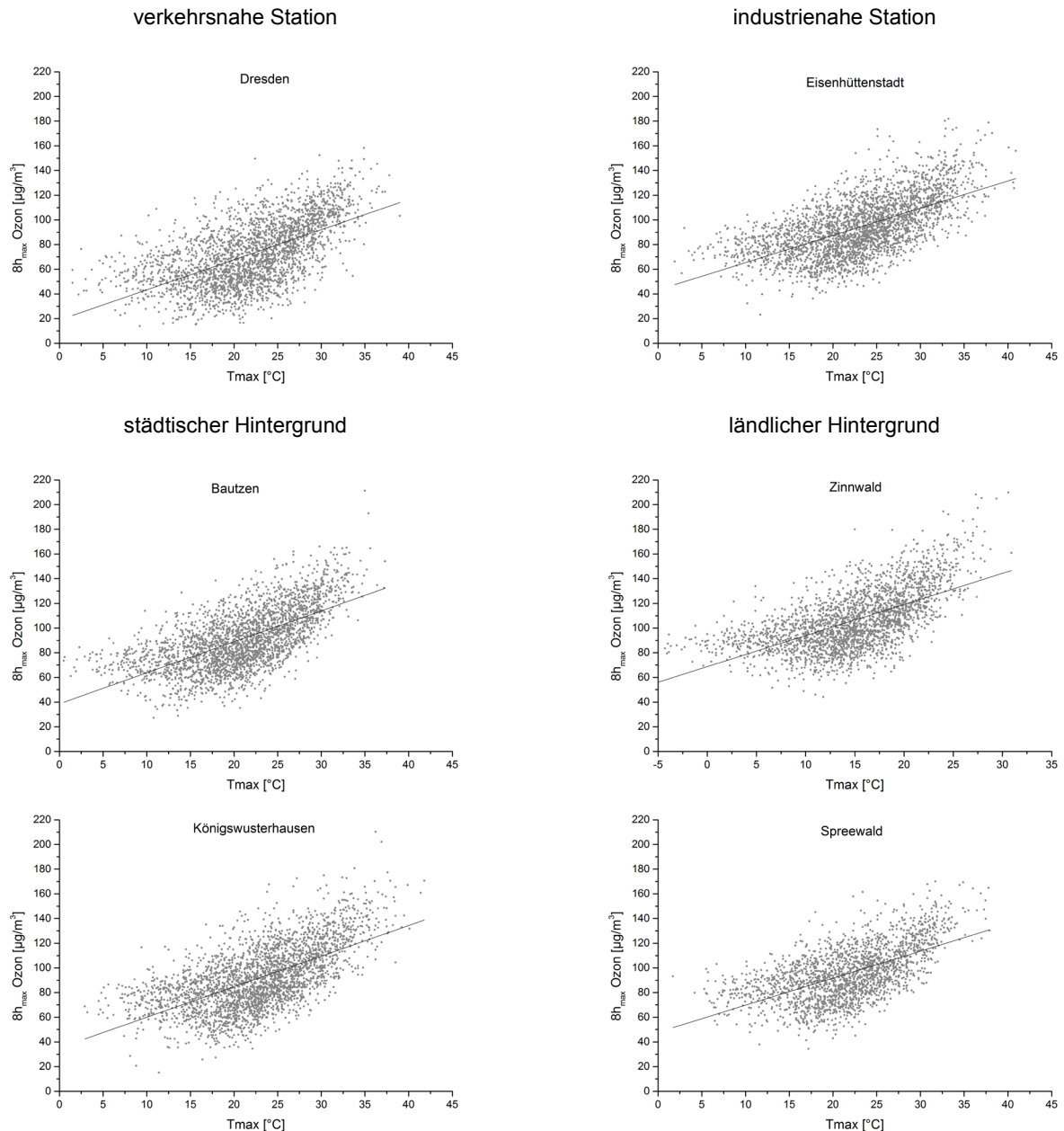


Abbildung 14: Korrelation zwischen Tagesmaximumtemperatur und Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen (Zinnwald andere Skalierung)

An der Station Dresden-Nord wurde im Mittel an 5,1 Tagen im Jahr das Tagesmaximum der 8h-Mittel von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten. An anderen Stationen gibt es dagegen wesentlich mehr Überschreitungstage, zwischen 20 und 34 Tage im Jahr. Zinnwald als höchstgelegene Station im KLAPS-Projektgebiet weist im Mittel die meisten Überschreitungen auf. Der Rückgang der Ozonspitzenbelastungen in den letzten Jahren infolge verringerter Emissionen der Vorläufersubstanzen führte dazu, dass es außer an den Bergstationen seit 2009 keine Probleme mehr mit der Einhaltung des Zielwertes zum Schutz der menschlichen Gesundheit gibt (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014b). Andererseits verweisen Klimaprojektionen für Sachsen auf eine mögliche Verdopplung der warmen Tage und eine Verdreifachung der heißen Tage bis 2100 (Bernhofer et al., 2011). Somit sind weiterhin abnehmende Konzentrationen der Vorläufersubstanzen für das Einhalten der Zielwerte wichtig. Analysen des Umweltbundesamtes zeigten für den extrem heißen Juli 2013, dass nur aufgrund zurückgegangener NO_x -Konzentrationen nicht die Ozon-Spitzenkonzentrationen aus dem Jahr 2003 erreicht wurden (Umweltbundesamt, 2014b).

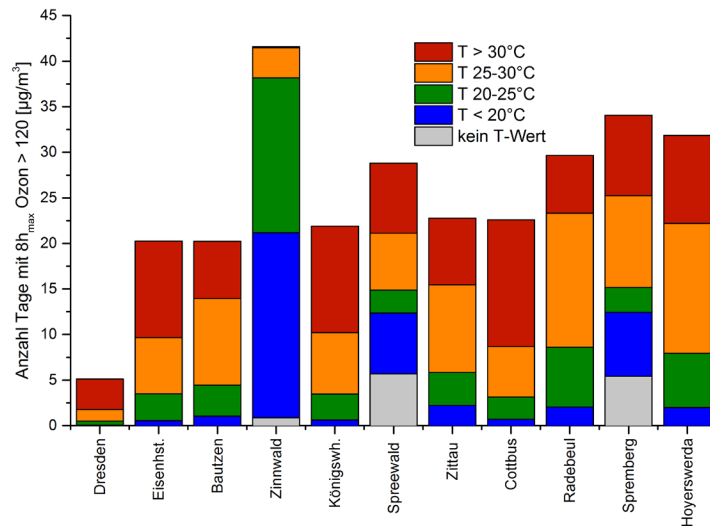


Abbildung 15: Durchschnittliche Anzahl der Überschreitungstage des Tagesmaximums der 8h-Mittel von 120 µg/m³ pro Jahr und Temperaturklasse

Globalstrahlung

Die Energie für die photochemische Bildung von Ozon kommt aus dem Sonnenlicht. Neben der Temperatur gilt daher die Globalstrahlung als wichtigste Einflussgröße für die Ozonvariabilität im Frühjahr und Sommer (Jacob und Winner, 2009; Melkonyan und Kuttler, 2012; Ordóñez et al., 2005). Für das KLAPS-Projektgebiet lässt sich diese Beobachtung bestätigen. Der Zusammenhang zwischen dem Tagesmittel der Globalstrahlung und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August ist in Abbildung 16 dargestellt. Bei zunehmender Globalstrahlung steigen auch die Ozonkonzentrationen. Hier sind für alle Stationen eindeutig positive Korrelationen zu verzeichnen, die auf einen starken Zusammenhang hinweisen. Die Bestimmtheitsmaße liegen im Mittel bei 0,34 mit einer Signifikanz von 0,05.

Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße zwischen dem Tagesmittel der Globalstrahlung und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null)

Station	Bestimmtheitsmaß (R ²)
Dresden-Nord	0,40
Eisenhüttenstadt	0,34
Bautzen	0,39
Cottbus	0,37
Hoyerswerda	0,36
Königs Wusterhausen	0,41
Spremberg	0,36
Zittau	0,36
Radebeul	0,39
Spreewald	0,40
Zinnwald	0,30

Den stärksten Zusammenhang zeigen die Stationen Königs Wusterhausen, Spreewald und Dresden-Nord mit R² > 0,40, den schwächsten die Station Zinnwald mit R² = 0,30. Insbesondere an Stationen, an denen die Ozonbildung stark von den (photo)chemischen Prozessen abhängt, ist die Globalstrahlung ein treibender Fak-

tor. Je nach Standort können allerdings auch andere meteorologische Variablen und Faktoren als die Temperatur und die Globalstrahlung einen stärkeren Einfluss auf die Ozonkonzentration haben (Camalier et al., 2007). An der Station Zinnwald, an der die Ozonkonzentrationen eher vom Ferntransport und der freien Troposphäre beeinflusst werden, spielt die Globalstrahlung eine geringere Rolle.

Für die Globalstrahlung wird in den nächsten Jahrzehnten ein leichter Anstieg projiziert. In Sachsen liegt dieser bei etwa 5 % (Bernhofer et al., 2011).

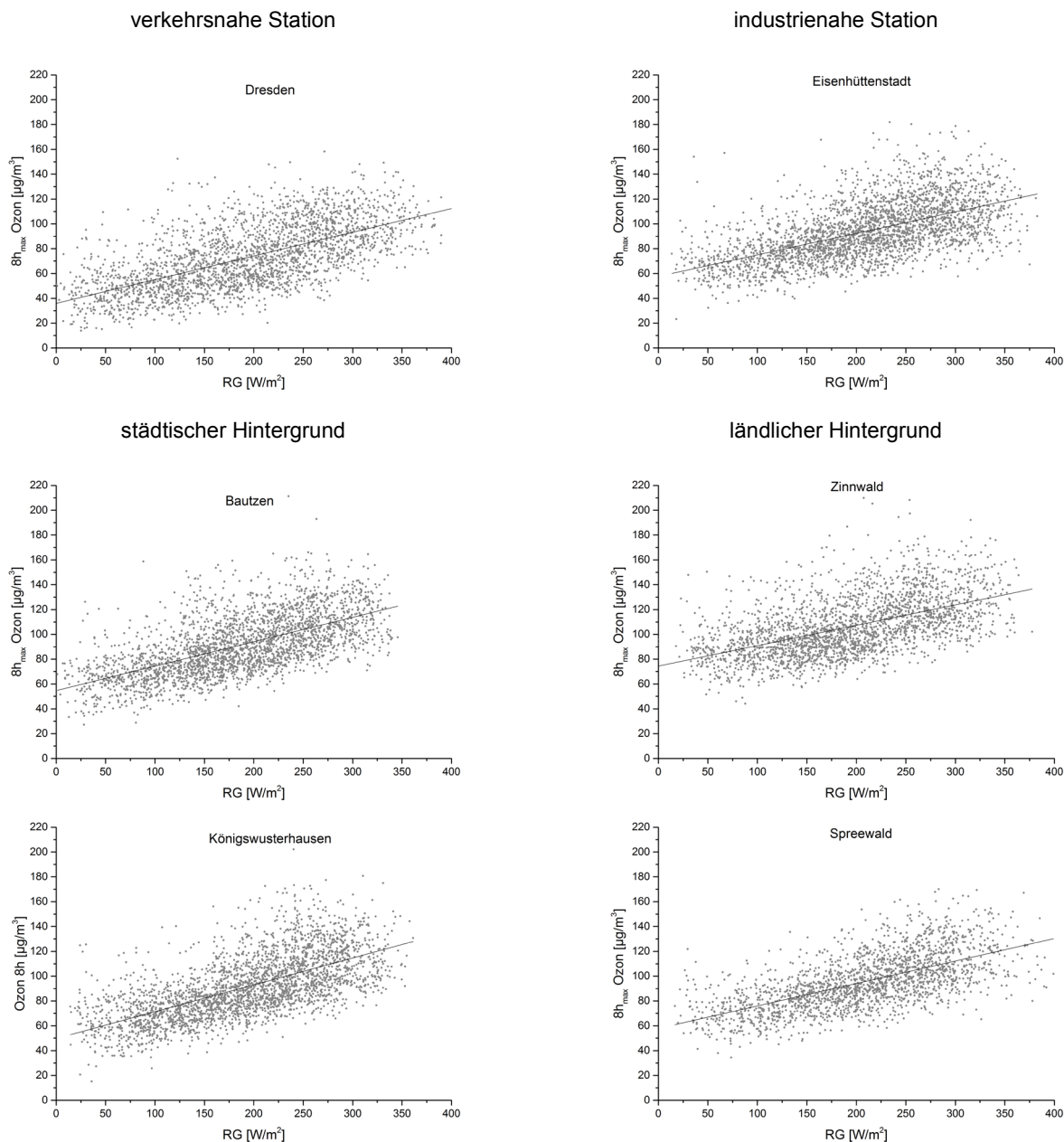


Abbildung 16: Korrelation zwischen dem Tagesmittel der Globalstrahlung und dem Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen

Relative Feuchte

Der Zusammenhang zwischen dem Tagesmittel der relativen Feuchte und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels der Ozonkonzentration für die Monate April bis August und die jeweiligen linearen Regressionen für ausgewählte Stationen des Projektgebietes ist in Abbildung 17 dargestellt. Die negative Korrelation zwischen der relativen Feuchte und der Ozonkonzentration ist deutlich erkennbar. Das heißt, bei steigender Luftfeuchte

sinkt die Ozonkonzentration. Die Bestimmtheitsmaße liegen hier im Mittel bei $R^2 = 0,38$ mit einer Signifikanz von 0,05. Die stärkste Korrelation zeigt die Station Zittau, die schwächste die Station Eisenhüttenstadt (Tabelle 10).

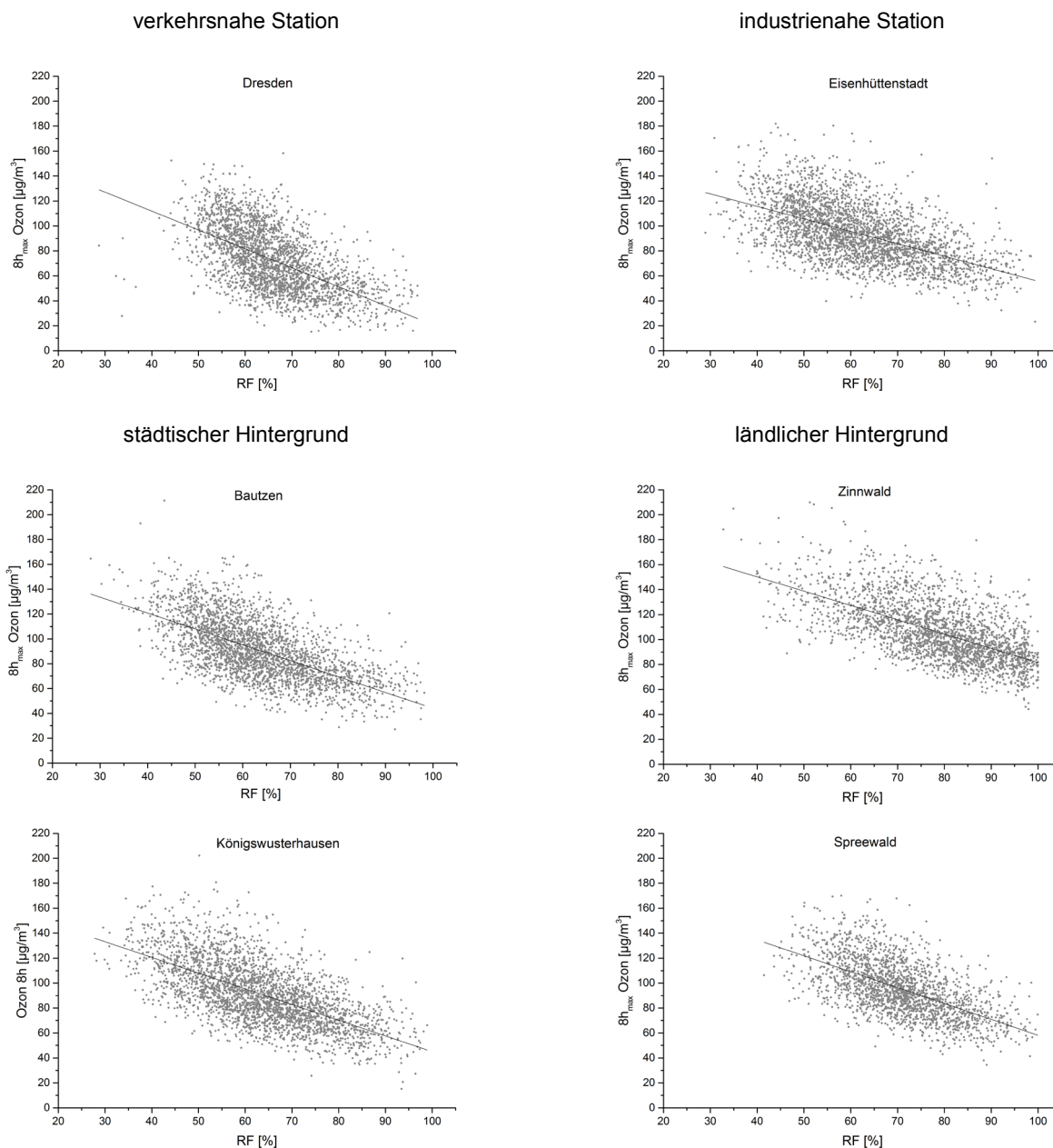


Abbildung 17: Korrelation zwischen dem Tagesmittel der relativen Feuchte und dem Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen

Camalier et al., (2007) fanden ebenfalls einen stark negativen Effekt der relativen Feuchte auf die Ozonkonzentration. Hohe Feuchtigkeitswerte korrespondieren meistens mit einer größeren Wolkenbedeckung und atmosphärischer Instabilität, welche die photochemische Ozonbildung negativ beeinflussen (Camalier et al., 2007). Eine ganzjährig negative Korrelation zwischen Ozon und der relativen Feuchte wird auch bei Demuzere et al. (2009) beschrieben. Nach dem aktuellen Stand der Forschung wird sich die relative Luftfeuchte bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) wahrscheinlich kaum ändern. Klimamodelle zeigen für Deutschland eine Veränderung von +1 %. Jedoch weisen Modelle bei gleichbleibender relativer Feuchte auf ein Ansteigen der spezifischen Feuchte (Wasserdampfgehalt, g/kg_{Luft}) infolge zunehmender Temperaturen hin (Regionale

Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft, 2014). Dieser Anstieg wurde auch in verschiedenen Regionen beobachtet (Willett et al., 2007). Erwartet wird aufgrund eines höheren Wasserdampfgehaltes der Luft im künftigen wärmeren Klima ein stärkerer Abbau von Ozon in Regionen mit niedrigen NO_x-Konzentrationen (Fiore et al., 2012). So können Ozonkonzentrationen an Hintergrundstationen und in urbanen Gebieten gegenläufigen Einflüssen unterworfen sein (Jacob und Winner, 2009). In einigen Gebieten können aber auch andere Faktoren dieser Entwicklung der Hintergrundkonzentration entgegenwirken, beispielsweise eine verstärkte Bildung von Stickoxiden durch Blitze, die Einmischung von Ozon aus der Stratosphäre, zunehmende biogene VOC-Emissionen (Isoprene und Terpene) oder Veränderungen im Ferntransport (Fiore et al., 2012; Jacob und Winner, 2009).

Tabelle 10: Bestimmtheitsmaße zwischen dem Tagesmittel der relativen Feuchte und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null)

Station	Bestimmtheitsmaß (R ²)
Dresden-Nord	0,33
Eisenhüttenstadt	0,31
Bautzen	0,39
Cottbus	0,37
Hoyerswerda	0,38
Königs Wusterhausen	0,41
Spremberg	0,40
Zittau	0,43
Radebeul	0,39
Spreewald	0,36
Zinnwald	0,39

Windgeschwindigkeit

Wind kann hohe Ozonkonzentrationen am Entstehungsort verdünnen und Ozon sowie Vorläufersubstanzen in die Hintergrundgebiete transportieren. Damit ist eine Beeinflussung der Ozonkonzentration durch Wind möglich. In Abbildung 18 sind die Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit und das Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen dargestellt. Tabelle 11 zeigt die dazu gehörigen Bestimmtheitsmaße zwischen dem Tagesmittel der Windgeschwindigkeit und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels. Dabei kann für das KLAPS-Projektgebiet kein statistisch gesicherter Zusammenhang hergestellt werden (Abbildung 18, Zinnwald mit anderer Skalierung). Keine Station zeigt hier eine eindeutige Korrelation. Die Bestimmtheitsmaße liegen im Mittel bei 0,036 (Tabelle 11). Auch Melkonyan et al. (2012) fanden keinen Einfluss von Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf die Ozonkonzentration. Die Windgeschwindigkeit scheint eher im Winter eine wichtige Einflussgröße zu sein. Demuzere et al. (2009) beschreiben in Untersuchungen in den Niederlanden einen negativen Zusammenhang im Sommer, im Winter allerdings einen positiven. Auch Ordóñez et al. (2005) weisen darauf hin, dass meteorologische Einflüsse, wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung, die die Durchmischung beeinflussen, im Winter von größerer Bedeutung sind. Da zukünftig bei den Windgeschwindigkeiten keine wesentlichen Änderungen erwartet werden (Bernhofer et al., 2011; Regionale Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft, 2014), ist mit einem wachsenden Einfluss dieser Größe nicht zu rechnen.

Tabelle 11: Bestimmtheitsmaße zwischen dem Tagesmittel der Windgeschwindigkeit und dem Tagesmaximum des 8h-Mittels für die Monate April bis August (Auf einem Niveau von 0,05 unterscheidet sich die Steigung signifikant von null)

Station	Bestimmtheitsmaß (R^2)
Dresden-Nord	0,07
Eisenhüttenstadt	0,06
Bautzen	0,04
Cottbus	0,02
Hoyerswerda	0,04
Königs Wusterhausen	0,004
Spremberg	0,05
Zittau	0,06
Radebeul	0,03
Spreewald	0,02
Zinnwald	0,05

Windrichtung

In Form von Polardiagrammen wurde der Zusammenhang zwischen Windrichtung und Ozonkonzentration auf der Grundlage von Stundendaten für die Monate April bis August dargestellt (Abbildung 19). Die Messstelle befindet sich jeweils im Zentrum der konzentrischen Kreise. Die Windrichtungen sind in Grad auf dem Umfang, die Konzentrationen auf den Radien aufgetragen. Dabei bedeutet 0° Wind aus Richtung Nord, 180° bedeutet Wind aus Richtung Süd.

Die Verteilung der Windrichtungen ist an allen Stationen recht unterschiedlich. Jedoch muss beachtet werden, dass die Messstationen nicht frei von Beeinflussungen durch die Bebauung sind (siehe auch Kapitel 4.1) und nicht mit den Windrosen von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes verglichen werden können. Das Vorherrschen der westlichen Windrichtung ist jedoch an allen Stationen erkennbar. Dass spezielle Windrichtungen mit eher hohen Ozonkonzentrationen zusammenhängen, kann man nicht ableiten. Die äußere Form der Punkteverteilung sieht sehr gleichmäßig aus. Nur an der Station Zinnwald deutet sich bei der Richtung Südost bis Süd (150° - 180°) eine Tendenz zu höheren Ozonkonzentrationen an. Insgesamt ist an dieser Station das höhere Konzentrationsniveau zu erkennen. Auch der geringe Tagesgang mit durchgängig hohen Konzentrationen wird in dem Diagramm sichtbar. Ozonkonzentrationen von 0 – $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ treten selten auf. Um den Einfluss der Windrichtung weiter herauszuarbeiten, könnte man in einem nächsten Schritt nur die Messwerte im Bereich des Tagesmaximums betrachten.

Allgemein ist der Einfluss der Windrichtung für verkehrsnahe und städtische Stationen als geringer einzuschätzen, da die Entstehung von Vorläufersubstanzen und die photochemische Umsetzung vor Ort ablaufen. Für Hintergrundstationen ist die Bedeutung der Windrichtung größer, da hier die Belastung mit Vorläuferstoffen und Ozon stark über den Ferntransport beeinflusst werden kann.

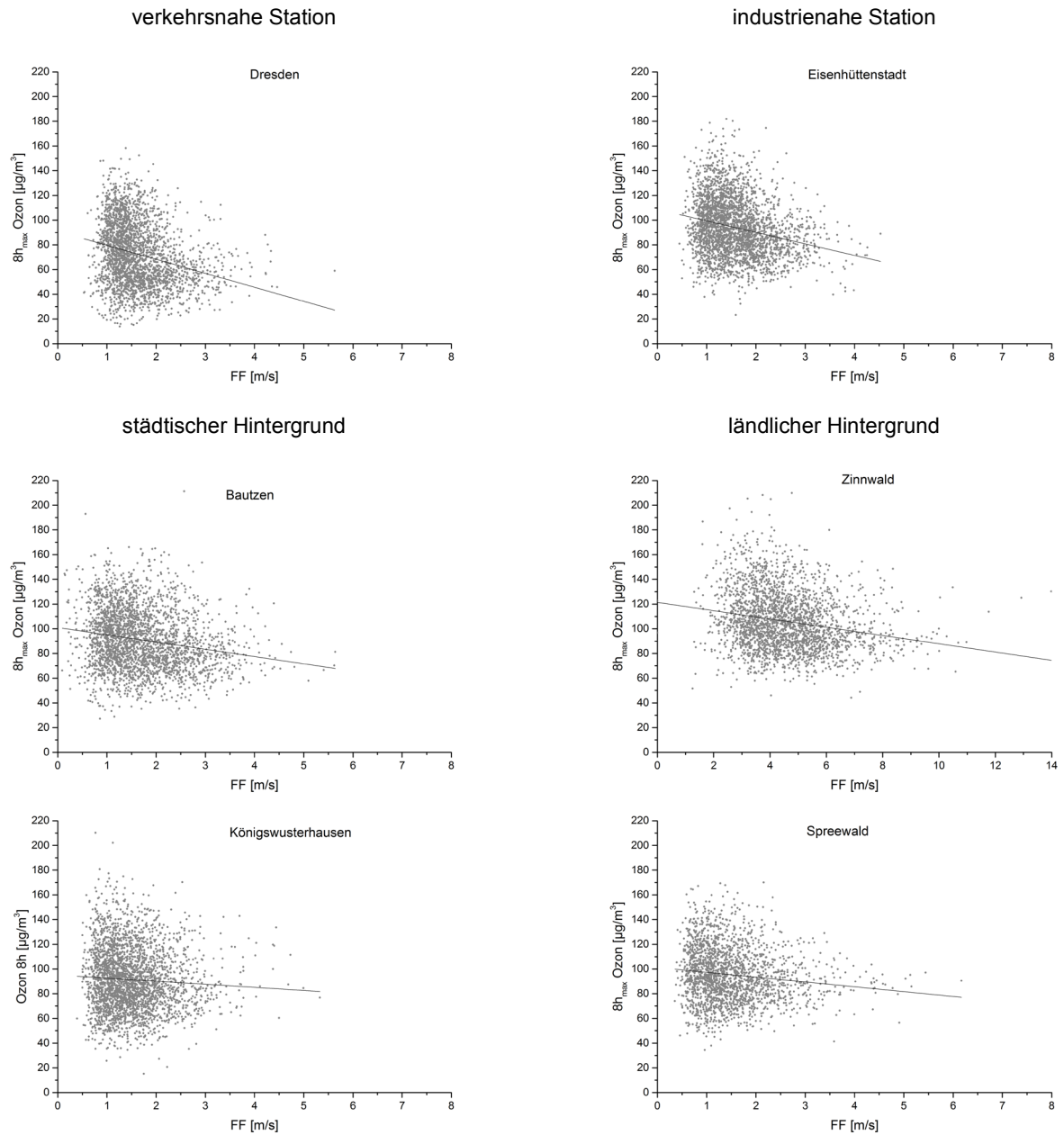


Abbildung 18: Korrelation zwischen dem Tagesmittel der Windgeschwindigkeit und dem Tagesmaximum der 8h-Mittel in den Monaten April bis August an ausgewählten Stationen

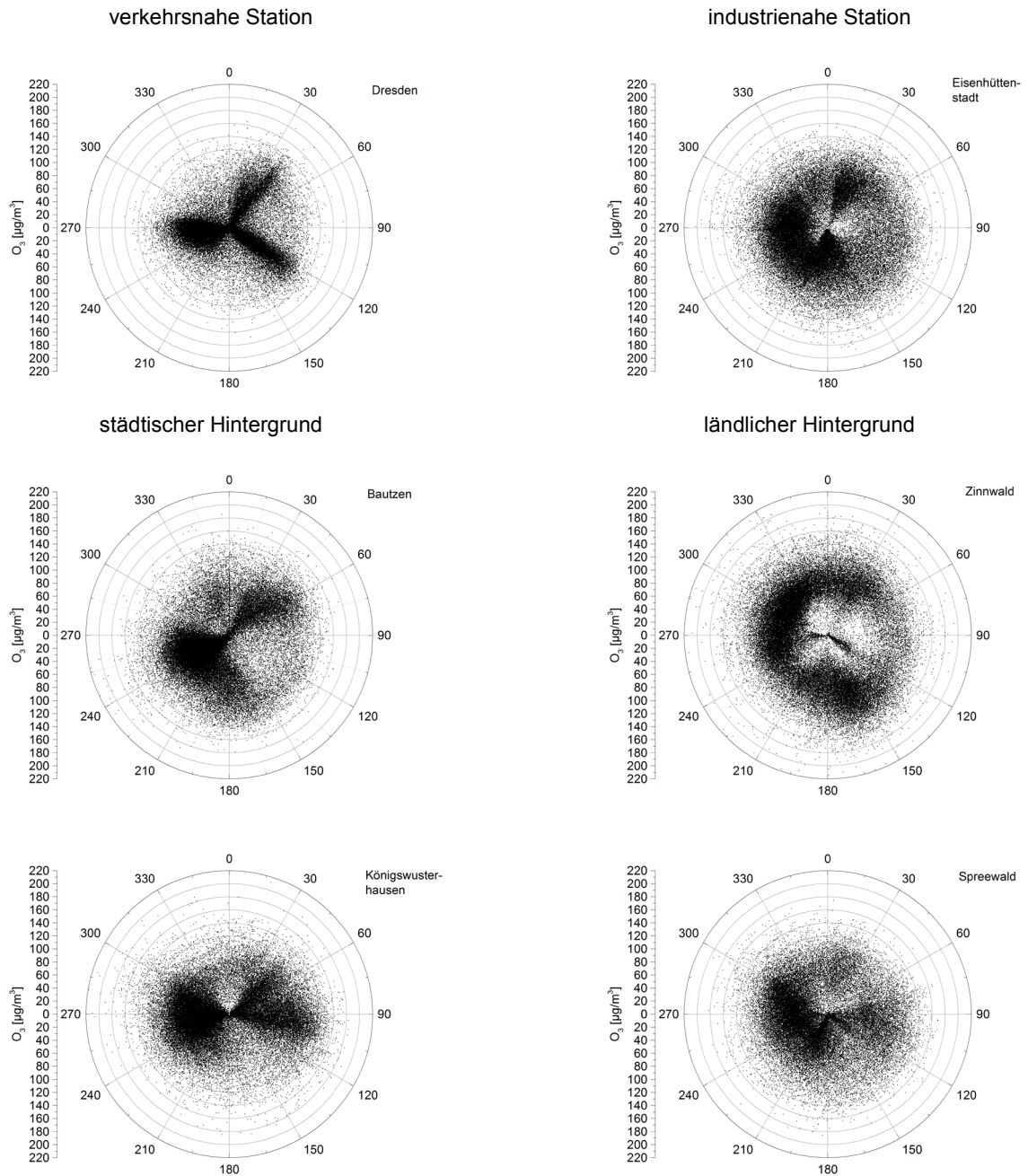


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Windrichtung und Ozonkonzentration für die Monate April bis August an ausgewählten Stationen (Stundendaten)

6.2 Ozonkonzentrationen mit Bezug auf Wetterlagenklassen

6.2.1 Mittlere Tagesgänge der Ozonkonzentration bezogen auf Wetterlagenklassen

Durch die kurzen Zeitreihen der polnischen Ozonstationen wurde neben der Korrelationsanalyse, zur Detektion eines statistischen Zusammenhangs zwischen Ozonüberschreitungseignissen und charakteristischen meteorologischen Situationen, der mittlere Tagesgang in Abhängigkeit bestimmter Wetterlagenindizes analysiert. Der Tagesgang der Ozonkonzentration entspricht in etwa einer Glockenkurve und weist ähnlich zum Verlauf der Lufttemperatur ein Minimum kurz vor Sonnenaufgang (ca. 05:00 Uhr) und ein Maximum um etwa 14:00 Uhr auf (Abbildung 20). Die Ursache dafür liegt in der (photochemischen) Entstehung von bodennahem Ozon, welche neben vorhandenen Vorläuferstoffen (NO_x , VOC) von der Intensität der Sonneneinstrahlung

abhängig ist und somit an deren Tagesverlauf gekoppelt ist. Die Stationen in den nachfolgenden Abbildungen, sowohl ländlich, als auch städtisch, verkehrs- und industrienah, zeigen alle ähnlich hohe Tagesmaxima der jeweiligen Ozonkonzentration. Grund dafür sind die städtischen Emissionsquellen. Die emittierten Vorläufer-substanzen tragen nicht nur zur städtischen Ozonbildung bei, sondern werden darüber hinaus in das Umland transportiert. Da der Bildungsprozess recht langsam verläuft (daher das zum Strahlungsmaximum um etwa 12:00 Uhr verschobene Konzentrationsmaximum um 14:00 Uhr) kann es weiträumig zu hohen Ozonkonzentrationen kommen. Unterschiede zwischen den Tagesgängen der einzelnen Stationsgruppen werden für den Zeitraum nach Sonnenuntergang bzw. vor Sonnenaufgang (18:00 bis 08:00 Uhr) deutlich. Für die verkehrsnah Station und jene des städtischen Hintergrunds sind die nächtlichen Ozonkonzentrationen deutlich geringer als im ländlichen Hintergrund. Hier spielt der Ozonabbau eine besondere Rolle, welcher bei fehlender Sonneneinstrahlung nur unter Vorhandensein von Stickstoffmonoxid möglich ist ($O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$). Im städtischen Raum ist diese Bedingung durch das Verkehrsaufkommen gegeben, vor allem in den Abendstunden, weshalb diese Stationen einen deutlichen Rückgang der Ozonkonzentration aufweisen. Im ländlichen Raum hingegen fehlt es an Quellen für Stickoxide, der Abbau des gebildeten Ozons ist nicht bzw. nur begrenzt möglich und die Konzentrationen bleiben hoch. Unter allen ländlichen Stationen heben sich besonders die Bergstationen Zinnwald und Czeniawa durch ihre sehr geringe Tagesamplitude ab und weisen infolgedessen im Tagesmittelwert die höchsten Ozonkonzentrationen auf. Nach Chevalier et al, 2007 spielt für Stationen in höheren Lagen die Hintergrundbelastung eine bedeutende Rolle für die mittleren Ozonkonzentrationen, da diese in den ersten Kilometern der Troposphäre fortlaufend mit der Höhe ansteigt. Die Quellen der Hintergrundbelastung können eine Kombination aus dem Abwärtstransport stratosphärischen Ozons, als auch photochemischer Reaktionen (durch Emissionen oder Transport von Vorläufersubstanzen) und dem großräumigem Transport entfernt gebildeten Ozons sein.

In Abbildung 20 und Abbildung 21 (weitere Tagesgänge befinden sich im Anhang III-6 bis Anhang III-11) soll des Weiteren auf den mittleren täglichen Verlauf gemessener Ozonkonzentrationen in Abhängigkeit verschiedener Wetterlagenklassen eingegangen werden. Es wird deutlich, dass für alle Stationen besonders die Luftmassen aus dem Süden (SW, SO) mit hohen Ozontagesmaxima einhergehen (Abbildung 20). Diese Luftmassen sind in den Monaten April bis August mit hohen Temperaturen verbunden, wobei besonders jene aus Südosten meist sehr trocken bzw. wolkenarm sind und somit photochemische Prozesse begünstigen. Obwohl die südwestliche Anströmung häufiger vorkommt (Abbildung 6) treten die höchsten Ozonkonzentrationen bei südöstlicher Anströmung auf, gefolgt von den Wetterlagen mit südwestlicher und unbestimmter Anströmung. Die kühleren Wetterlagen aus dem Norden sind charakteristisch für geringe Ozonmaxima, besonders solche mit westlicher Zugrichtung, da diese durch den Einfluss des atlantischen Ozeans meist eher feuchte Eigenschaften aufweisen.

In Abbildung 21 sind die mittleren Tagesgänge der Ozonkonzentration in Abhängigkeit der Zirkulationsform zu sehen, welche für zyklonale Strömung in 950 und antizyklonale Strömung in 500 hPa (ZA) die höchsten Werte aufweisen. In Beziehung mit der für das Untersuchungsgebiet am häufigsten auftretenden westlichen Anströmrichtung, tritt diese Zirkulationsform meist in Verbindung mit einem Tief im Westen und einem Hoch im Osten Europas auf (Objektive Wetterlagenklassen, Bissolli und Dittmann in Deutscher Wetterdienst, 2004).

Für den Osten Deutschlands bzw. das KLAPS-Projektgebiet gelangen diese Luftmassen meist unter Hochdruckeinfluss, sind somit niederschlags- bzw. wolkenarm und trocken, was wiederum zu einer Begünstigung der Ozonbildung führen kann. Ähnliche Verhältnisse treten bei antizyklonalen Strömungen in 500 und 950 hPa (AA) auf, welche in Abbildung 21 ebenfalls mit erhöhten Ozontagesmaxima einhergehen. Die vorherrschenden Hochdruckbedingungen dieses Zirkulationsmusters führen zu absinkenden Luftmassen, also auch wolkenarmen Bedingungen mit hochreichender Warmluft und bieten somit gute Voraussetzungen für die photochemische Bildung von Ozon.

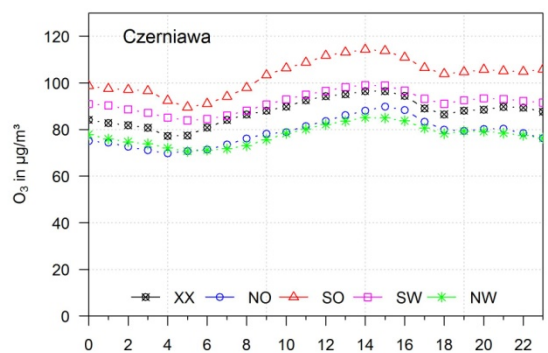
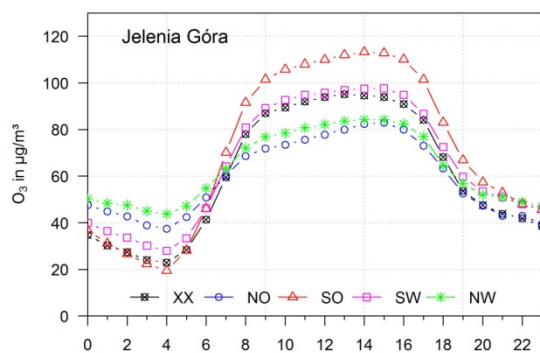
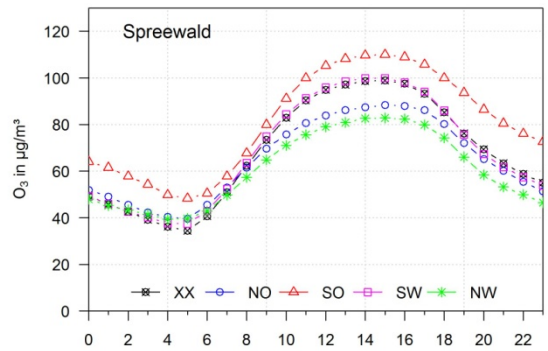
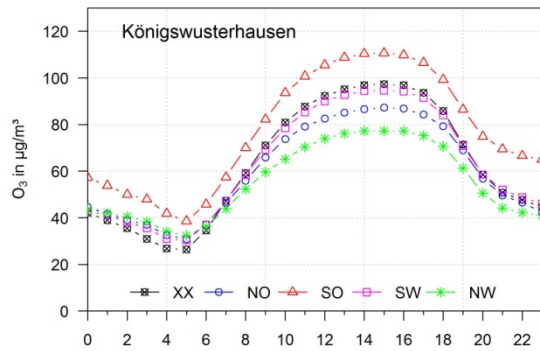
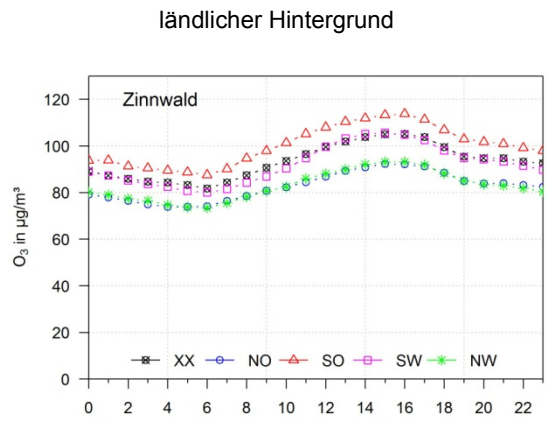
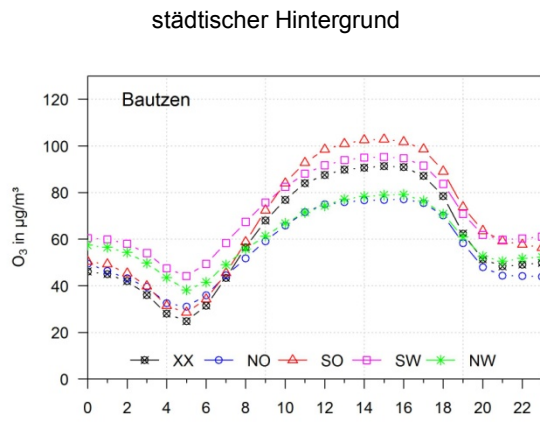
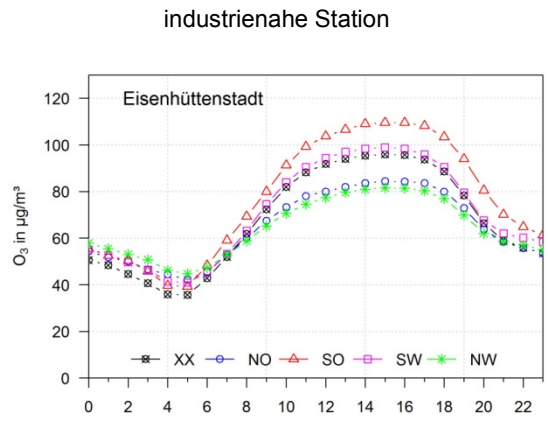
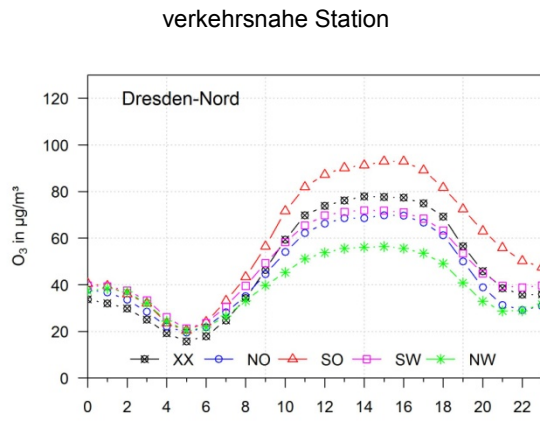


Abbildung 20: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Anströmrichtung der Luftmassen

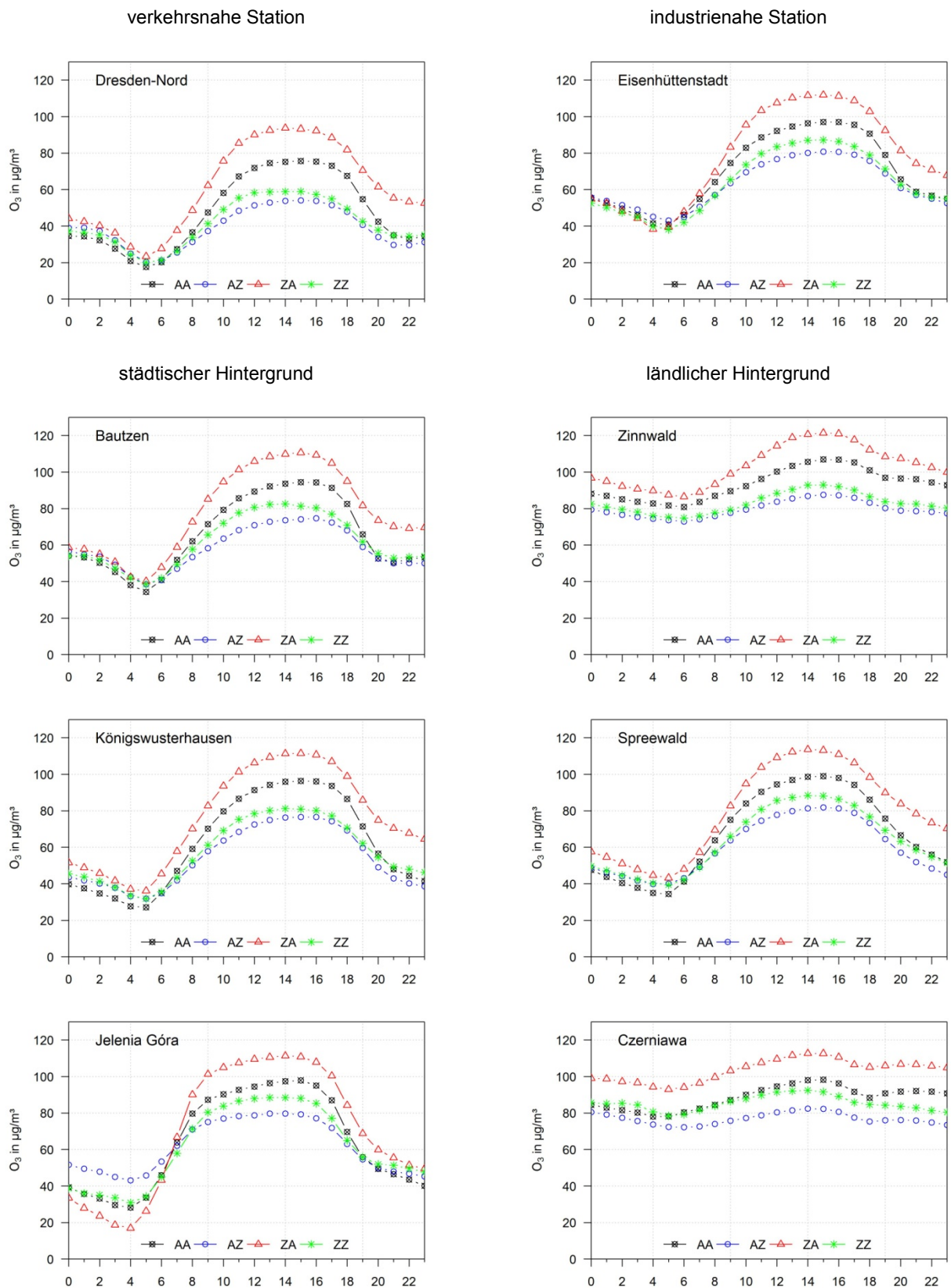


Abbildung 21: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Zyklonalität der Luftmassen

6.2.2 Wetterlagenklassen als Indikatoren für Ozonzielwertüberschreitungen

Für einen qualitativen Überblick bezüglich des Zusammenhangs zwischen synoptischen Mustern und dabei auftretenden Ozonzielwertüberschreitungen wurden zunächst die Auftretenshäufigkeiten der Wetterlagen im Messzeitraum der jeweiligen Station (an allen Tagen für die Monate April bis August) ermittelt. Dem gegenübergestellt wurden die Häufigkeiten von Wetterlagen ausschließlich an Ozonüberschreitungstagen (Tagesmaximum der 8h-Mittel $\geq 120 \text{ mg/m}^3$). Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 für die 10 dominierenden oWLK zusammengefasst. Die beiden vorherrschenden Wetterlagen an Ozonüberschreitungstagen von April bis August mit ca. 40% waren SWZAF (23,2 %) und SWAAF (18,2 %). Zusammen mit der dritthäufigsten Wetterlage SOZAF (7,7 %) treten diese drei Wetterlagen an 50% aller Überschreitungstage auf. Die beiden erstgenannten Wetterlagen sind auch im Gesamtzeitraum (alle Tage) die häufigsten – insgesamt 20% aller Tage. Die dritthäufigste „Überschreitungs“-Wetterlage SOZAF spielt jedoch im Gesamtzeitraum keine bedeutende Rolle. Generell ist für jede der 10 häufigsten Wetterlagen eine westliche Zugrichtung charakteristisch (Tabelle 12 links), was in Verbindung mit hohen Ozonkonzentrationen jedoch nicht mehr das entscheidende Merkmal ist. Hier dominieren feuchte Wetterlagen mit antizyklonalen Strömungen in 500 hPa, das heißt solche mit einem Klassifizierungsindex AA und ZA, während die Anströmrichtungen zwischen SW, XX und SO variieren (Tabelle 12 rechts). Eine Tabelle 12 entsprechende Zusammenfassung zu den zehn am häufigsten auftretenden Klassifizierungsindizes kann im Anhang III-12 eingesehen werden.

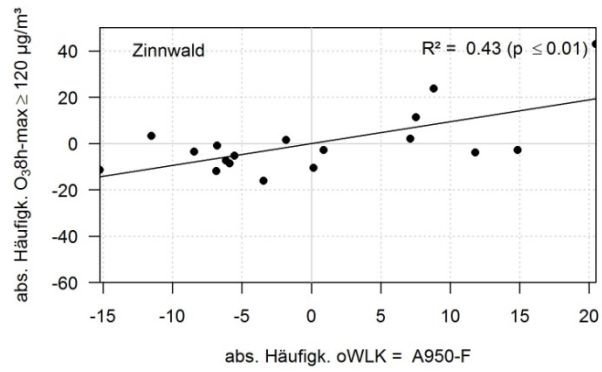
Mit Hilfe einer Korrelation sollte nun ein statistischer Zusammenhang zwischen Ozonzielwertüberschreitungen und dem Auftreten diverser Klassifizierungsindizes hergestellt werden, wobei u. a. die in Tabelle 7 gefundenen Wetterlagenmerkmale als Indikator herangezogen wurden. Insgesamt konnte für acht aus 14 Stationen ein signifikanter statistischer Zusammenhang zu mindestens einem Klassifikationsindex festgestellt werden, wie in Tabelle 13 zusammenfassend gezeigt wird. Die am häufigsten mit Ozonüberschreitungstagen korrelierenden Merkmale sind feuchte, antizyklische Luftmassen in 500 bzw. 950 hPa (A500-F, A950-F), feuchte Wetterlagen mit westlicher Zugrichtung (SWNW-F) und die SWAAF-Lage. Für einige Stationen sind die Korrelationen der jährlichen Ozonüberschreitungstage mit diesen Klassifikationsindizes exemplarisch in Abbildung 22 dargestellt. Wie bereits in den Tagesgängen und Tabelle 12 festgestellt wurde, gehen die antizyklischen Zirkulationsformen in 500 hPa (AA, ZA) sowie die SWAAF-Lage meist mit Schönwetter einher, was zu günstigen Bedingung für die Überschreitung des festgelegten Ozonzielwertes führen kann und durch ein positives Korrelationsergebnis bestätigt wird. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt im Mittel 0,46 bzw. 0,5 für den Index A500-F bzw. die Wetterlage SWAAF. Auch bodennahe Hochdrucksituationen korrelieren positiv mit erhöhten Ozonwerten, jedoch mit einem mittleren Bestimmtheitsmaß von 0,38 weniger stark als solche in der mittleren Troposphäre. Zwischen der dritthäufigsten „Überschreitungs“-Wetterlage SOZAF und der Überschreitungshäufigkeit konnte kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Daran wird jedoch die geringe Häufigkeit der Wetterlage einen entscheidenden Einfluss haben. Ein positiver Zusammenhang zwischen Ozonüberschreitungseignissen und feuchten Wetterlagen mit westlichen Zugrichtungen ($R^2=0,48$ für SWNW-F) resultiert wahrscheinlich aus den grundsätzlich dominierenden Südwestwetterlagen, welche zu 52,5 % an Ozonüberschreitungstagen vorkamen (davon SWZAF zu 23,2 % und SWAAF zu 18,2 %). Generell muss bei der Charakterisierung „feucht“ darauf geachtet werden, dass es sich hier nicht zwangsläufig um niederschlagsreiche Luftmassen handelt, sondern lediglich um im Vergleich zum Bezugszeitraum (1979 bis 1996) feuchtere Verhältnisse. In Anbetracht der zunehmenden Lufttemperaturen, welche im Sommer für den Zeitraum 1991–2005 um $1,0^\circ\text{C}$ höher waren als im Zeitraum 1961–1990 (Bernhofer et al., 2008), könnten also feuchte Luftmassen auch als wärmere Luftmassen charakterisiert werden, da diese unter höheren Temperaturen mehr Wasser aufnehmen bzw. enthalten können, ohne bspw. mehr Bewölkung zur Folge zu haben. Für zwei Stationen (Bautzen und Zinnwald) wurde eine negative Korrelation in Verbindung mit trockenen Wetterlagen detektiert, welche generell seltener als feuchte auftreten (im Mittel 47,4 % aller Wetterlagen) und im Mittel an 22,2 % aller Ozonüberschreitungseignisse beteiligt sind (Anhang III-13 bis Anhang III-20).

Tabelle 12: Die zehn häufigsten Wetterlagen für die Monate April bis August, links: sortiert nach Auftretenshäufigkeit im jeweiligen Messzeitraum aller Stationen, rechts: sortiert nach Auftretenshäufigkeit an Ozonüberschreitungstagen (Tagesmaximum der 8h-Mittel $\geq 120 \text{ mg/m}^3$) aller Stationen

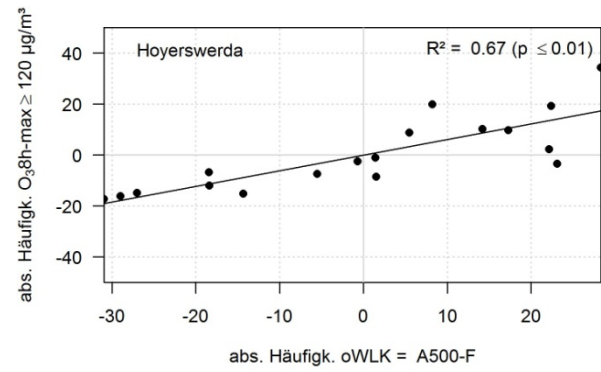
oWLK	rel. Hfk. in %	Alle Tage	O ₃ -Überschr. Tage
	Min	9,9	14,6
SWAAF	Mittel	10,5	18,2
	Max	11,4	21,7
	Min	8,5	18,1
SWZAF	Mittel	9,1	23,2
	Max	10,4	30,3
	Min	7,6	0,0
NWAZT	Mittel	9	0,2
	Max	9,5	1,2
	Min	5,9	0,0
NWAAT	Mittel	6,7	1,9
	Max	7,5	4,6
	Min	5	0,0
SWAZT	Mittel	6,2	0,8
	Max	8	5,4
	Min	4,8	0,0
SWZZF	Mittel	5,3	2,8
	Max	6,1	8,8
	Min	3,2	2,7
NWAAF	Mittel	5,2	4,0
	Max	5,9	6,1
	Min	4,5	0,0
SWAZF	Mittel	5,2	2,2
	Max	6,7	5,8
	Min	4,3	2,9
XXAAT	Mittel	5	4,6
	Max	6,8	6,9
	Min	4	0,0
SWAAT	Mittel	4,3	3,7
	Max	4,6	5,1

oWLK	rel. Hfk. in %	Alle Tage	O ₃ -Überschr. Tage
	Min	8,5	18,1
SWZAF	Mittel	9,1	23,2
	Max	10,4	30,3
	Min	9,9	14,6
SWAAF	Mittel	10,5	18,2
	Max	11,4	21,7
	Min	1,3	5,8
SOZAF	Mittel	2,3	7,7
	Max	2,7	10,8
	Min	2,8	4,9
XXAAF	Mittel	3,3	6,5
	Max	3,6	13,5
	Min	1,0	3,7
XXZAF	Mittel	2,3	5,9
	Max	2,9	7,9
	Min	4,3	2,9
XXAAT	Mittel	5,0	4,6
	Max	6,8	6,9
	Min	3,2	2,7
NWAAF	Mittel	5,2	4,0
	Max	5,9	6,1
	Min	4,0	0,0
SWAAT	Mittel	4,3	3,7
	Max	4,6	5,1
	Min	0,8	2,0
SOZAT	Mittel	1,0	3,2
	Max	1,4	6,7
	Min	4,8	0,0
SWZZF	Mittel	5,3	2,8
	Max	6,1	8,8

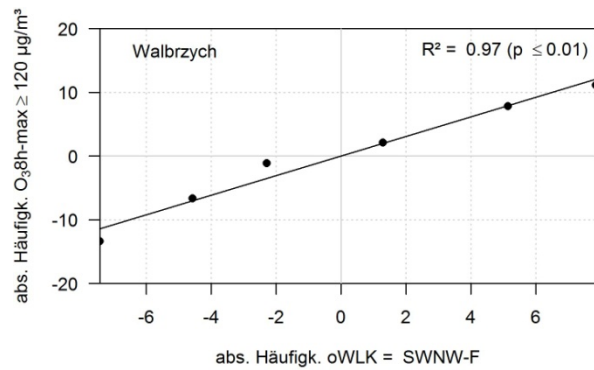
a



b



c



d

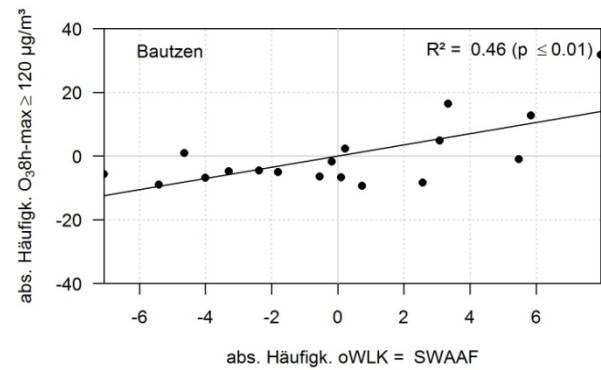


Abbildung 22: Exemplarische Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichem Auftreten bestimmter Klassifizierungsindizes (a bzw. b: antizyklische Strömungsbedingungen einer feuchten Luftmasse in 950 bzw. 500 hPa, c: feuchte (warme), westliche Luftmassen und d: Wetterlage Nummer 9, SWAAF)

Tabelle 13: Signifikante Korrelationen zwischen jährlichen Ozonüberschreitungstagen und jährlichem Auftreten bestimmter Klassifizierungsindizes (trendbereinigt). Positiv bedeutet günstige Bedingungen für Ozonzielwertüberschreitungen bei jeweiligem Merkmal, negative ungünstige.

Station	Regime	Index	Bezeichnung	R ²	Beziehung
Bautzen	städtischer Hintergrund	A500-F		0,42	positiv
		A950-F	Zyklonalität & Feuchte	0,41	positiv
		A950-T		0,36	negativ
		T	Feuchte	0,41	negativ
		F		0,4	positiv
		SWNW-F	feuchte Westwetterlage	0,39	positiv
		SWAAF	oWLK Nr. 9	0,46	positiv
Hoyerswerda	städtischer Hintergrund	A500		0,5	positiv
		A950		0,41	positiv
		Z950	Zyklonalität	0,4	positiv
		AA		0,45	positiv
		ZA		0,42	positiv
		Z500-F		0,39	positiv
		A500-F	Zyklonalität & Feuchte	0,67	positiv
		Z950-F		0,42	positiv
		A950-F		0,63	positiv
		F	Feuchte	0,67	positiv
		SW	Anströmrichtung	0,42	positiv
		XX		0,38	positiv
		SWNW-F	feuchte Westwetterlage	0,64	positiv
		SWAAF	oWLK Nr. 9	0,69	positiv
Jelenia-Góra	städtischer Hg.	SWZAF	oWLK Nr. 29	0,61	positiv
Spremberg	städtischer Hg.	NW	Anströmrichtung	0,94	negativ
Walbrzych	städtischer Hintergrund	SWAAF	oWLK Nr. 9	0,31	positiv
		F	Feuchte	0,98	positiv
Zittau-Ost	städtischer Hintergrund	SWNW-F	feuchte Westwetterlage	0,97	positiv
		A950-F	Zyklonalität & Feuchte	0,33	positiv
		AA	Zyklonalität	0,34	positiv
Radebeul-Wahnsdorf	ländlicher Hintergrund	A500-F	Zyklonalität & Feuchte	0,29	positiv
		A950-F		0,32	positiv
		F	Feuchte	0,32	positiv
		SWNW-F	feuchte Westwetterlage	0,37	positiv
		SWZAF	oWLK Nr. 29	0,28	positiv
		A500-F		0,49	positiv
		A950-F	Zyklonalität & Feuchte	0,43	positiv
Zinnwald	ländlicher Hintergrund	A950-T		0,44	negativ
		Z500-T		0,5	negativ
		F	Feuchte	0,5	positiv
		T		0,49	negativ
		SWNW-F	feuchte Westwetterlage	0,51	positiv
		SWNW-T	trockene Westwetterlage	0,46	negativ
		SWAAF	oWLK Nr. 9	0,55	positiv

6.2.3 Projektionen zukünftiger Wetterlagenklassen

Die im vorhergehenden Abschnitt gefundenen Klassifikationsindizes, welche einen signifikanten statistischen Zusammenhang zu Ozonüberschreitungseignissen aufweisen, sollen nun bezüglich ihrer möglichen Auftrenshäufigkeiten in der Zukunft ausgewertet werden. Bei der Bewertung der folgenden Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich allein um den klimatischen Einfluss handelt, der nur ein Aspekt bei der zukünftigen Entwicklung der Ozonkonzentrationen darstellt. Jedoch sind bei Anwesenheit von Vorläuferstoffen heiße, strahlungsreiche Hochdruckwetterlagen die Voraussetzung für die photochemische Ozonbildung. Abbildung 23 zeigt die mittleren Anomalien aus den absoluten Häufigkeiten für jeden Index in den Zeitscheiben der projizierten Zukunft und in der Referenzperiode. Die Anomalien fassen alle je nach Szenario vorhandenen Modellläufe und den Kontrolllauf eines jeden Modells zusammen (Tabelle 5, Datengrundlage). Die Fehlerbalken geben die Spannweite der Ergebnisse wieder, also die geringste detektierte Anomalie und die höchste. Eine Darstellung der einzelnen Anomalien aus jedem Modelllauf, für jedes Szenario kann im Anhang III-21 bis Anhang III-23 eingesehen werden.

Generell macht Abbildung 23 deutlich, dass sowohl in Periode 2021 bis 2050, als auch in Periode 2070 bis 2099 die Häufigkeit feuchter Wetterlagen auf Kosten der trockenen Wetterlagen zunimmt, wobei die Anomalien gegen Ende des 21. Jahrhunderts in ihrer Größenordnung deutlich stärker sind. Die mittlere Zunahme feuchter (F) bzw. die Abnahme trockener Luftmassen (T) liegt zwischen 20 bis 28 %. Wie erwartet werden für Szenario A2 die stärksten und für Szenario B1 die geringsten Änderungen projiziert. Der Index zur Charakterisierung der Feuchte ist wie bereits erwähnt nicht zwangsläufig ein Indikator für Wolken, Niederschlag, Schlecht- bzw. Schönwetter. Durch die Kopplung an den mittleren monatlichen Anteil niederschlagsfähigen Wassers im Zeitraum 1979 bis 1996 sowie durch die strenge Temperaturabhängigkeit des Feuchtegehalts, enthalten die Luftmassen bei einem projizierten Temperaturanstieg mehr Wasser, sind folglich feuchter als jene Luftmassen des Vergleichszeitraums. Allgemein begünstigt eine hohe Feuchtigkeit den Abbau von Ozon (siehe Kap. 6.1.2). Entscheidend ist jedoch, dass die sommerlichen Hochdruckwetterlagen, die feucht-warme Luft aus Süden herantransportieren, durch die hohen Temperaturen und Einstrahlungen effektiv zu überdurchschnittlichen Ozonkonzentrationen führen.

Auch werden häufiger auftretende Hochdruckbedingungen, also positiv mit Ozonüberschreitungen korrelierende Ereignisse, für die Zukunft projiziert. In Bodennähe (A950-F) nehmen diese für die Periode 2021 bis 2050 im Mittel um 46, 48 bzw. 35 % für Szenario A1B, A2 bzw. B1 zu. Für Periode 2070 bis 2099 beträgt die Zunahme 116, 133 bzw. 95 %. Für Antizyklonen in der mittleren Troposphäre (A500-F), also stärker mit Ozonüberschreitungen korrelierende Strömungsbedingungen als A950-F, ist die projizierte Zunahme geringer ausgeprägt (Periode 2021-2050: A1B=18 %, A2=21 %, B1=14 %, Periode 2070-2099: A1B=45 %, A2=53 %, B1=49 %).

Feuchte Westwetterlagen (SWNW-F) treten in beiden Projektionsperioden häufiger auf als in der Klimanormalperiode, wobei sich dies im Zeitraum 2021 bis 2050 mit der Abnahme trockener Lagen (SWNW-T) die Waage hält, was als keine bedeutende Änderung auftretender Westwetterlagen im jeweilig projizierten Szenario interpretiert werden kann. Die Anomalien zum Ende des 21. Jahrhunderts hingegen zeigen durchaus eine überwiegende Zunahme der feuchten bzw. wärmeren Westwetterlagen. Diese Anomalie beträgt im Mittel 70, 84 bzw. 61 % unter Szenario A1B, A2 und B1. Bezüglich des Index SWNW-F, welcher im vorigen Kapitel mit günstigen meteorologischen Ozonbildungsbedingungen in Zusammenhang gebracht wurde, kann jedoch nur eingeschränkt eine Aussage zu dessen Einfluss auf zukünftige Zielwertüberschreitungen getroffen werden. Im Zeitraum der Korrelationsanalyse war der Index SWNW eindeutig von den dominierenden Südwestlagen geprägt, welche sehr warm sind und mit Schönwetter einhergehen. Wie Abbildung 23 zeigt, hat sich das Verhältnis aus Nord- (NW) und Südwestlagen (SW) jedoch in den Projektionen umverteilt. Hier kommt es zu einer Zunahme der Nordwestlagen (Periode 2070–2099: A1B=16 %, A2=24 %, B1=10 %) und einer leichten Abnahme der Südwestwetterlagen (Periode 2070–2099: A1B=0 %, A2= -3 %, B1= -3 %).

Für die Wetterlage SWZAF ergibt sich durch die starke Spannweite der einzelnen Modellläufe kein eindeutiges Bild, wodurch keine Aussage bezüglich zukünftiger Ozonbildungsbedingungen getroffen werden kann. Die von allen betrachteten Indizes am stärksten mit erhöhten Ozonkonzentrationen korrelierende Wetterlage SWAAF hingegen, könnte durch ihre projizierte Zunahme durchaus zu häufiger auftretenden Ozonüberschreitungseignissen zwischen April bis August führen. Für die nahe Zukunft sind die Anomalien durch eine hohe Ergebnisspannweite weniger deutlich. Für Periode 2070 bis 2099 hingegen, zeigen die Anomalien eine eindeutige Richtung mit einer projizierten mittleren Zunahme der Auftretenshäufigkeiten um 40, 47 bzw. 27 % für Szenario A1B, A2 und B1.

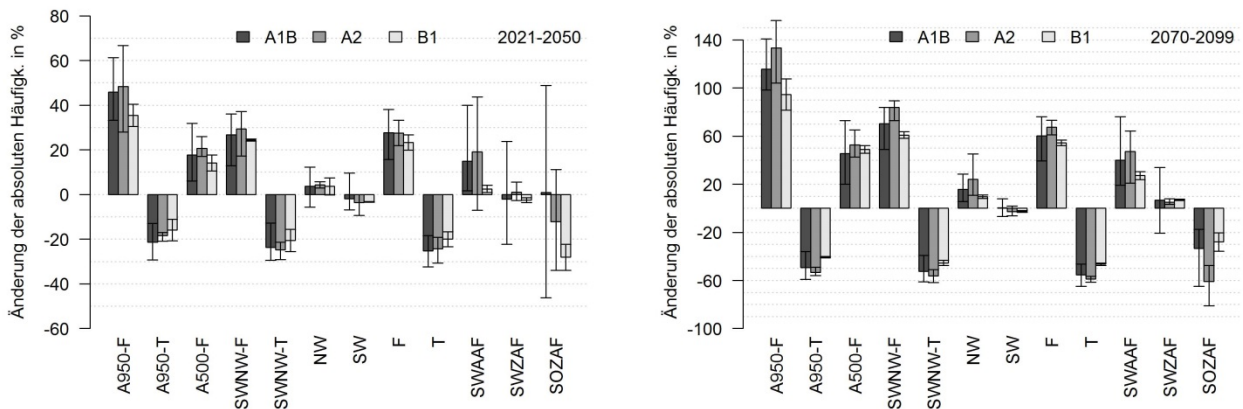


Abbildung 23: Mittlere Anomalie der Auftretenshäufigkeit von mit Ozonüberschreitungseignissen korrelierenden Klassifikationsindizes (außer NW, SW und SOZAF) für die SRES Szenarien A1B, A2 und B1, der Referenzzeitraum bezieht sich auf 1961–1990, Mittelwerte beziehen sich auf das Ensemble der vorhandenen Modellläufe (Tabelle 5, Datengrundlage), die Fehlerbalken decken die Ergebnisspannweite der einzelnen Modellläufe ab (links: Anomalie für 2021–2050, rechts: für 2070–2099, andere Achsen-einteilung beachten)

6.3 Mögliche Auswirkungen hoher Ozonkonzentrationen im KLAPS-Projektgebiet

6.3.1 Auswirkungen auf Gesundheit und Tourismus

Wenn im Sommer stabile Schönwetterperioden mit intensiver Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen auftreten, kann sich der sogenannte „Sommersmog“ bilden. Hohe Konzentrationen von Photooxidantien wie Ozon, Peroxide, Aldehyde und organische Stickstoffverbindungen werden durch komplexe photochemische Reaktionen in der Atmosphäre gebildet (Umweltbundesamt 2014). Besonders für ältere Menschen, Kinder und Menschen mit Atembeschwerden stellen hohe Ozonkonzentrationen ein gesundheitliches Risiko dar (Kapitel 2.1). Diese Wirkungen können sich bei körperlicher Anstrengung verstärken. Eine Einschränkung sportlicher Aktivität wird daher dringend empfohlen, vor allem in den Mittagsstunden. Mehrere europäische Studien zeigen, dass die Sterblichkeitsrate mit dem Anstieg der Ozonbelastung steigt (European Environment Agency, 2014; Gryparis et al., 2004; Jerrett et al., 2009; Umweltbundesamt, 2013; World Health Organization, 2014). Aus diesem Grund wird die Bevölkerung ab einer Ozonkonzentration von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Informationsschwelle) über die Medien gewarnt.

Hohe Konzentrationen haben negative Auswirkungen auf die Menschen, die in der Region leben, und auf den Tourismus, vor allem in Gebieten, die beispielsweise als Reinluft- und Erholungsgebiete gelten, wie das Erzgebirge, die Sächsische Schweiz, das Zittauer Gebirge, das Isergebirge und das Riesengebirge. Für das KLAPS-Projektgebiet liegen der Tourismus-Klimaindex und der Wetterereignisindex vor. Exzellente Bedin-

gungen nach dem Tourismus-Klimaindex werden vor allem im Sommer an den Stationen im Tiefland beobachtet. Diese Bedingungen sind auf hohe Temperaturen, eine niedrige relative Luftfeuchte und eine lange Sonnenscheindauer zurückzuführen (Mehler et al., 2014). Genau unter diesen Bedingungen ist aber auch die photochemische Ozonbildung erhöht, besonders in den stadtnahen Regionen. Aber auch in den höher gelegenen Regionen werden gerade in dieser Zeit die höchsten Ozonkonzentrationen gemessen.

Der Wetter-Eignungsindex gibt für das Projektgebiet die besten Bedingungen für Luftbäder und eine Klimaheilbehandlung von Mai bis September an, mit einem Maximum in der ersten Augushälfte. Für leichte Freizeitaktivitäten (z. B. Spaziergänge) herrschen im Tiefland in den Monaten April, Mai sowie September, Oktober die besten Bedingungen. In Bergregionen gelten die Sommermonate auch für intensive Freizeitaktivitäten wie Wandern oder Radfahren als geeigneter, da es dort kühler als im Tiefland ist (Mehler et al., 2014). Schaut man sich die Station Zinnwald als die Station mit der höchsten Belastung an, so wurde dort von 1996 bis 2012 zwischen April und August an 20 (2009) bis maximal 80 (2003) Tagen der Ozonzielwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten. Insgesamt verharren die Überschreitungen auf einem leicht erhöhten Niveau (im Mittel 37 Tage von April bis August⁶). Ausreißer nach oben (2003, 2006) wurden in den letzten Jahren durch Witterungsextreme hervorgerufen. An den anderen untersuchten Stationen im Tiefland gibt es weniger Überschreitungstage, zwischen 20 und 34 Tagen im Jahr mit einem abnehmenden Trend (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014b). Dresden-Nord als verkehrsnaher Station weist die wenigsten Überschreitungen des Ozon-Zielwertes von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf (Abbildung 15) jedoch mit einem ansteigenden Trend bei den 8h-Stundenmittelwerten (Abbildung 9) auf niedrigem Niveau. Jacob und Winner (2009) zitieren Studien, die zeigen, dass die Klimasensitivität von Ozon in urbanen Regionen am größten ist. Vergleiche von Projektionen mit Einfluss Klimawandel plus Emissionen sowie nur Emissionen legen jedoch nahe, dass die Schwankungen in den Ozonprojektionen von den Emissionsänderungen dominiert werden (Fiore et al., 2012). Diese Aussagen beziehen sich aber meist auf große Gebiete, die nur eingeschränkt Rückschlüsse auf lokale oder regionale Auswirkungen zulassen.

6.3.2 Wirkungen auf Ökosysteme und Nutzpflanzen

Ozon stellt nicht nur für den Menschen eine große Belastung dar. Hohe Ozonkonzentrationen können auch Pflanzen schädigen. Dadurch können Ernteerträge und das Waldwachstum beeinträchtigt werden. Sogar Gebäude und Denkmäler können beschädigt werden (European Environment Agency, 2014). Als ein hochtoxischer Luftschadstoff bedeutet Ozon Stress für viele Pflanzen. Die Ozon-Aufnahme erfolgt durch die Spaltöffnungen der Blätter oder Nadeln, vor allem tagsüber. Die nächtliche Ozon-Aufnahme ist vergleichsweise gering. Bei Überbelastung der Schutzsysteme in der Pflanze kommt es zu oxidativen Schäden und schließlich zum Zelltod. Die Folgen können sichtbare Blattschäden, Zuwachs- und Ertragsverluste und schließlich das Absterben ganzer Pflanzen sein. Der genaue Prozess ist beispielsweise bei (Smidt et al., 2007) beschrieben. Länger anhaltende Belastungen stellen ein Risiko für das Pflanzenwachstum, Ernteerträge und die Qualität land- und forstwirtschaftlicher Produkte dar (Smidt et al., 2007; Umweltbundesamt, 2013).

Die Schäden sind in ihrer Art je nach Pflanzengattung uneinheitlich, mitunter selbst in einer Art. Die Ozoneinwirkung kann die Samen- oder Körnerzahl von Nutzpflanzen negativ, teilweise aber auch positiv beeinflussen. Jungpflanzen und blühende Pflanzen reagieren meist empfindlich auf erhöhte Ozonkonzentrationen. Es resultieren oft nachteilige Entwicklungen an Samen und Früchten, die ja einerseits die Ernte, andererseits die Basis der nächsten Generation bilden. Nach der Blüte sind die Auswirkungen dagegen oft vernachlässigbar (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2007).

⁶ Für die Bewertung der Überschreitungen nach der EU-Richtlinie 2008/50/EG gilt ein Mittelungszeitraum von drei Jahren, um wetterbedingte Einflüsse zu berücksichtigen. Von 2010 bis 2012 wurde im Mittel an 34 Tagen der Zielwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit überschritten – erlaubt sind 25 Tage (siehe auch (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014b)).

Aber nicht immer hat Ozon in hohen Konzentrationen oder langfristig in erhöhter Konzentration einen negativen Einfluss auf Photosynthese, Wachstum, Vermehrung und Ertrag von Pflanzen. Manche Pflanzen zeigen sich resistent, andere reagieren mit Veränderungen in der einen oder der anderen Richtung. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass Ozon zu Ertragseinbußen führt, und dass es in der Natur zu einer Verschiebung des bislang gegebenen Gleichgewichtes führt. Wenig ist dabei über das Zusammenspiel mit anderen Umweltfaktoren bekannt (Umweltbundesamt, 2013).

Für Waldbestände gilt Ozon derzeit als wichtigster Luftschadstoff (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW, 2014; Smidt et al., 2007). Laubbäume verlieren durch die Ozoneinwirkung ihre Blätter schneller und die Herbstverfärbung setzt vier bis sechs Wochen früher als normal ein. Bei Kiefern werden die Nadeln von innen heraus gelb und fallen daraufhin relativ schnell ab. Diese Zeichen sind als Stresssignale zu verstehen. Wenn sie Jahr für Jahr auftreten, können sie die Lebenskraft der Bäume schwächen und so die Anfälligkeit gegenüber Krankheiten erhöhen. Daher müssen Ozoneinwirkungen nach wie vor als eine wesentliche Ursache der neuartigen Waldschäden angesehen werden (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2007; Smidt et al., 2007).

Zum Schutz der Vegetation im Zeitraum Mai bis Juli wurde der Ozonzielwert AOT40 festgelegt (Tabelle 1). Dieser sollte ab 2010 unter $18.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$, gemittelt über fünf Jahre, liegen. Das langfristige Ziel bis 2020 ist ein Wert von $6.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$. Für die Station Zinnwald als der Station mit der höchsten Belastung bewegte sich der AOT40 von 1996 bis 2012 zwischen ca. 10.000 (1996) und 38.441 (2006) $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$. Das Mittel der letzten fünf Jahre (2009–2013) beträgt $18.826 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$. In Sachsen werden die AOT40-Werte nur auf dem Erzgebirgskamm überschritten, mit einem leichten Trend zu niedrigeren AOT40-Werten, wenn auch noch immer über dem Zielwert von $18.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$ (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2013). Im Land Brandenburg wurde im Zeitraum 2008–2012 an keiner der 16 Messstellen der AOT40-Zielwert überschritten.

Laut den Berichten zur Luftqualität der Länder Brandenburg und Sachsen liegt mit den derzeitigen AOT40-Werten das langfristige Ziel bis 2020 von $6.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$ zum Schutz der Vegetation noch in weiter Ferne. Alle Messstationen Sachsens haben beispielsweise mindestens doppelt so hohe Werte (Mittel 2008–2012). Für die Stationen in Brandenburg liegt der AOT40-Wert im Mittel bei $14.695 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$. Zukünftig wird am ehesten mit einer Quasikonstanz der derzeitigen Belastung gerechnet. Einerseits sind hohe kurzzeitige Belastungen im Sommerhalbjahr rückläufig, andererseits wird die mittlere Ozonbelastung wahrscheinlich noch leicht zunehmen infolge einer Zunahme der nordhemisphärischen Ozonhintergrundkonzentration (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.), 2013; Parrish et al., 2012; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2013).

7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurden die zeitlichen Verläufe und der Einfluss meteorologischer Bedingungen auf die Ozonkonzentration im KLAPS-Projektgebiet untersucht. Dabei standen Daten von 14 Stationen in Stundenauflösung zur Verfügung: sechs Stationen in Sachsen, fünf Stationen in Brandenburg und drei Stationen in Polen, davon eine verkehrsnaher Station (Dresden-Nord), eine industrienaher Station (Eisenhüttenstadt), acht Stationen im städtischen Hintergrund und vier ländlich geprägte Stationen.

Grundsätzlich kann bei der Betrachtung der Ozonbelastung im KLAPS-Projektgebiet festgestellt werden, dass die Konzentrationen an der Station Zinnwald am höchsten und an der Station Dresden-Nord am geringsten ausfallen, alle anderen Stationen liegen im Bereich dazwischen. In den Monaten April, Mai, Juni, Juli und August sind deutlich höhere Belastungen erkennbar, während in den Wintermonaten geringere Mittelwerte und auch Spitzenkonzentrationen beobachtet werden. Daher erfolgte die weitere Auswertung für die Monate April bis August und für die Tagesmaxima der gleitenden 8h-Mittel.

Deutliche Tages- und Wochengänge zeigen sich an der Station Dresden-Nord als einer Verkehrsstation im städtischen Raum. Hier werden hohe Konzentrationen an Vorläufersubstanzen emittiert und durch photochemische Prozesse in Ozon umgesetzt. Je stadtnäher die einzelnen Stationen gelegen sind, desto niedriger sind die Ozonkonzentrationen, desto ausgeprägter der Tagesgang und der Unterschied zwischen Tagen mit hohem und geringem Verkehrsaufkommen (Wochenendeffekt). Mit zunehmender Entfernung der Messstation von der Emissionsquelle der Vorläufersubstanzen gehen die Unterschiede im Tagesgang und auch zwischen den einzelnen Wochentagen zurück.

Neben dem Vorhandensein von Vorläufersubstanzen gelten die meteorologischen Bedingungen als wichtige Einflussparameter auf die Ozonentwicklung. Meteorologische Faktoren beeinflussen die Schadstoffausbreitung, die photochemischen Reaktionen sowie den großräumigen Transport. Der Einfluss der Witterung auf die Ozonbildung ist an der Emissionsquelle der Vorläufersubstanzen am stärksten. Dort ist ein ausgeprägter Tagesgang das Zeichen intensiver Ozon-Bildungs- und Abbauprozesse. Im KLAPS-Projektgebiet ist die Ozonkonzentration am stärksten von den meteorologischen Variablen Globalstrahlung, Tagesmaximumtemperatur und relative Feuchte abhängig. Im Gegensatz zu Temperatur und Globalstrahlung wirkt die Feuchte vermindern auf die Ozonkonzentration. Der starke positive Zusammenhang zwischen Temperatur und Ozonkonzentration führt dazu, dass mit Ausnahme von Zinnwald an allen Stationen Zielwertüberschreitungen überwiegend an Sommertagen über 25 °C und insbesondere an heißen Tagen über 30 °C vorkommen. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit und Windrichtung war an keiner Station signifikant.

Zukünftige Änderungen des Klimas werden einen Einfluss auf die Ozonentwicklung haben. Im KLAPS-Projektgebiet wird bis Ende des 21. Jahrhunderts eine deutliche Temperaturzunahme sowie ein leichter Anstieg der Globalstrahlung erwartet. Steigende Temperaturen in Kombination mit einer steigenden Globalstrahlung als treibende Faktoren für die photochemische Ozonbildung werden die Ozonbelastung in den kommenden Jahren weiter verschärfen, vor allem in Gebieten mit hohen Konzentrationen an Vorläufersubstanzen. Klimaprojektionen für Sachsen bis 2100 zeigen weiterhin einen starken Anstieg der Sommertage und der heißen Tage. Da an vielen Stationen im KLAPS-Projektgebiet bereits in den letzten Jahren Überschreitungen des Ozonzielwertes von 120 µg/m³ beim Tagesmaximum der 8h-Mittel vor allem an diesen Tagen auftraten, würde aufgrund der klimatischen Entwicklung ein weiterer Anstieg der Zielwertüberschreitungen zu erwarten sein, dem jedoch der Rückgang der Stickoxidkonzentrationen entgegenwirkt.

Unsicher sind die Entwicklung der relativen Luftfeuchte und die Auswirkungen auf die Ozonentwicklung. Während Klimamodelle kaum eine Änderung der relativen Luftfeuchte bis Ende des 21. Jahrhunderts zeigen, wird der Wasserdampfgehalt der Luft (spezifische Feuchte) durch steigende Temperaturen weiter zunehmen und vor allem in Gebieten mit niedrigen NO_x-Konzentrationen zu einem verstärkten Ozonabbau führen. In diesen Regionen haben steigende Temperaturen und eine steigende Globalstrahlung geringere Auswirkungen auf die Ozonkonzentration, da dort die photochemische Ozonbildung kaum eine Rolle spielt. Infolgedessen sind gegenläufige Entwicklungen der Ozonkonzentration an Hintergrundstationen und in urbanen Gebieten möglich.

Da für die Zukunft nur geringe Änderungen der Windgeschwindigkeit erwartet werden und auch aus den vorliegenden Daten kaum ein Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Ozonkonzentration erkennbar war, wird dieser Zusammenhang für das KLAPS-Projektgebiet als relativ unbedeutend eingestuft.

Bei der Analyse der mittleren Tagesgänge in Abhängigkeit bestimmter Wetterlagenindizes zeigten sommerliche Luftmassen mit südlicher Anströmrichtung die höchsten Ozonkonzentrationen, da diese mit hohen Temperaturen einhergehen. Vor allem solche mit südöstlicher Anströmrichtung wiesen die höchsten Tagesmaxima auf, da diese durch besonders trockene bzw. wolkenarme Eigenschaften die photochemische Bildung von Ozon begünstigen (dies trifft in einer etwas geringeren Größenordnung auch auf die häufig auftretenden südwestlichen Luftmassen zu). Feuchte und kühle Wetterlagen aus Norden zeigten die geringsten Ozontagesma-

xima. Die Gegenüberstellung der Tagesgänge in Abhängigkeit verschiedener Zyklonalitätsindizes zeigte die höchsten Ozonkonzentrationen unter Hochdruck- bzw. Schönwettereinfluss, wobei dies vor allem für antizyklonale Bedingungen in der mittleren Troposphäre (Index AA und AZ) zutraf.

In der Häufigkeitsanalyse zeichneten sich die antizyklonalen Strömungsbedingungen in 500 hPa als das am häufigsten auftretende Kriterium für Ozonüberschreitungseignisse zwischen April bis August ab. Diese sind im Mittel mit 87 % an solchen Tagen beteiligt, an welchen das Maximum des 8h-Mittelwertes eine Ozonkonzentration von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht bzw. überschreitet. Bei der Betrachtung der Beteiligung einzelner Wetterlagen an Überschreitungseignissen, traten die Lagen SWZAF, SWAAF und SOZAF am häufigsten auf (ca. 50 %). Wobei die Wetterlagen SWZAF und SWAAF mit 20 % Anteil auch unabhängig von erhöhten Ozonkonzentrationen in den Monaten April bis August vorherrschend sind. Das heißt im Zusammenhang mit den Tagesgängen, dass bei südöstlicher Anströmung die höchsten Ozonkonzentrationen erreicht werden, die Südwestlagen durch ihre generelle Dominanz jedoch häufiger zu Überschreitungen der Ozonzielwerte führen. Die Korrelationsanalyse bestätigte den bereits in den Tagesgängen detektierten Zusammenhang zwischen Hochdrucklagen in der mittleren Troposphäre und der Überschreitung des festgelegten Ozonwerts mit einem positiven Bestimmtheitsmaß von 0,46. Des Weiteren korrelierten die SWAAF-Lage sowie feuchte Westwetterlagen (SWNW-F) mit Ozonüberschreitungseignissen ($R^2=0,5$ bzw. $R^2=0,48$), wobei südliche Anströmrichtungen in den Westwetterlagen dominieren.

Auf Grundlage von Klimaprojektionen werden die positiv mit Ozonüberschreitungseignissen korrelierenden Hochdruck-Wetterlagen (antizyklonal) A500-F und A950-F unter den Zukunftsszenarien A1B, A2, und B1 wahrscheinlich häufiger auftreten. Wie erwartet sind die Änderungssignale unter Szenario A2 am stärksten und unter Szenario B1 am geringsten ausgeprägt. Des Weiteren treten für alle Szenarien die stärksten Änderungen gegen Ende des 21. Jahrhunderts (2070 bis 2099) auf, während jene für die nahe Zukunft (2021-2050) eine kleinere Größenordnung aufweisen. Die projizierten Änderungen der feuchten Südwestwetterlagen SWNW-F konnten nicht weiter als Indikator für begünstigte Ozonbildungsverhältnisse herangezogen werden, da sich für die Projektionszeiträume das Verhältnis aus Süd- und Nordanteil deutlich geändert hat und somit andere Bedingungen vorlagen als für den Zeitraum der Korrelationsanalyse. Die von allen betrachteten Indizes am stärksten mit erhöhten Ozonkonzentrationen korrelierende Wetterlage SWAAF zeigte für alle Szenarien ein häufigeres Auftreten in der Zukunft, wobei sich für die Zeitscheibe 2070 bis 2099 ein eindeutigeres Bild ergab. Weniger eindeutig zeigte sich die Entwicklung der projizierten Auftretenshäufigkeit für die Wetterlage SWZAF. Die Häufigkeit der Wetterlage SOZAF mit südöstlicher Anströmung nimmt in der Zeitscheibe 2070 bis 2099 ab.

Wichtig ist die gemeinsame Betrachtung der Einflussgrößen Klimawandel und Emissionsänderungen, wobei letztere für die zukünftige Entwicklung der Ozonkonzentrationen entscheidender sind. In diesem Zusammenhang wächst auch die Bedeutung der Hintergrundbelastung, von der vor allem Bergstationen betroffen sind, und damit länderübergreifende Maßnahmen zur Emissionsminderung (NO_x und NM VOC sowie CH_4 und CO) im Vergleich zu regionalen und lokalen Maßnahmen. Ein weiterer Anstieg der globalen Methankonzentration und damit der Ozon-Hintergrundkonzentration kann die schon erzielten und projizierten Erfolge bei der Reduktion von Stickoxiden und flüchtigen organischen Substanzen minimieren. Gerade im KLAPS-Projektgebiet würden Land- und Forstwirtschaft von den steigenden Hintergrundkonzentrationen betroffen sein, da hier die Dosis (Konzentration + Dauer) die entscheidende Größe ist. Der Einfluss zunehmender biogener VOC-Emissionen infolge steigender Temperaturen kann außerdem zu einer Verschärfung der Situation bei der Einhaltung der Zielwerte zum Schutz der Vegetation führen. Außerdem könnten steigende Hintergrundkonzentrationen und ein wärmeres Klima zu einer Verlängerung der Ozon-Saison führen. Durch die abnehmenden Spitzenkonzentrationen und damit selteneren Überschreitungen des Zielwertes zum Schutz der menschlichen Gesundheit gehen die gesundheitlichen Risiken in den meisten Regionen zurück.

8 Ausblick

Um für das Untersuchungsgebiet diese Ergebnisse zu präzisieren und aufgekommene Fragen zu beantworten, sind weitere Analysen möglich. Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur kann beispielsweise mit Temperaturschwellen gearbeitet werden. Weiterhin können die Analysen mit Anomalien der meteorologischen Größen durchgeführt werden – Entfernung von Jahres- bzw. Tagesgängen. Durch die Nutzung von Ozonprofilen vom Hohenpeißenberg und aus Lindenberg sowie der Analyse des Verhältnisses von täglicher zu stündlicher Variabilität ist es möglich, den Einfluss der freien Troposphäre auf die Ozonkonzentrationen und die Höhenabhängigkeit der Ozonvariabilität der Bodenstationen genauer zu untersuchen. Interessant wäre auch eine Analyse der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Konzentrationsverhältnisse von NO zu NO₂ und NO_x zu NM VOC – getrennt nach anthropogenen und biogenen NM VOC. Gerade der projizierte Anstieg der biogenen NM VOC kann in Gebieten, die von der Land- und Forstwirtschaft dominiert sind, einen wachsenden Einfluss auf die Entwicklung der Ozonkonzentrationen haben. Hier besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

9 Abstract

The aim of the project was the analysis of the relationship between ground-level ozone concentration and climate variables for the KLAPS-project area. As a first step a correlation analysis between the daily maximum 8-hour mean of ozone and maximum temperature, solar radiation, relative humidity as well as wind speed was carried out. Secondly, the relation between exceedance of the 8-hour mean of ozone and the objective circulation types of the German Weather Service was analysed. Finally, the possible future development of ozone concentration under climate change was estimated. Because high ozone concentrations are observed during summer and spring, the analysed months were April to August.

The strongest correlations were found between ozone and maximum temperature as well as solar radiation. Both, high temperatures and intensive insolation are the prerequisites for the photochemical production of ozone. Also the correlation between ozone and relative humidity was in the same magnitude. But, high humidity levels lead to a decrease of ozone. The 8-hour ozone guideline value of 120 µg/m³ was exceeded mainly on “summer days” with maximum temperatures of more than 25 °C and on “hot days” with more than 30 °C. An influence of wind speed and wind direction on ozone concentrations was not found.

Regional climate projections until 2100 show increasing temperatures and insolation. For Saxony, it is very likely that the number of summer days will double and hot days will triple till the end of this century. Hence, the potential for photochemical ozone production will increase. At the presence of high NO_x concentration an ozone increase is expected. But, in regions with significant decreasing NO_x concentration the ozone production will reduce.

The analysis of circulation types on days with exceedance of the 8-hour ozone guideline value showed that the advection type Southeast leads to the highest ozone concentration, whereas the advection type Southwest as well as anticyclonic conditions in the middle troposphere lead most frequently to exceedance days. The three circulation types SWZAF, SWAAF and SOZAF account for 50 % of the exceedance days.

Based on climate projections, circulation types with anticyclonic conditions will occur more frequently for all emissions scenarios (A1B, A2 and B1). The strongest signal shows the Scenario A2 at the end of this century. The frequency of the circulation type SWZAF is likely to increase. Whereas the circulation types SWAAF and SOZAF show an indifferent or decreasing behavior.

The influence of climate change and variable emissions of precursor substances on ozone concentrations has to be investigated in conjunction. However, ground-level ozone concentrations are dominated by emission

changes. That's why measures of emission control are still important and effective. But, against the background of high or rising ozone baseline concentrations, emission reductions at an international level gains in importance in comparison to local or regional measures – especially of methane and carbon monoxide.

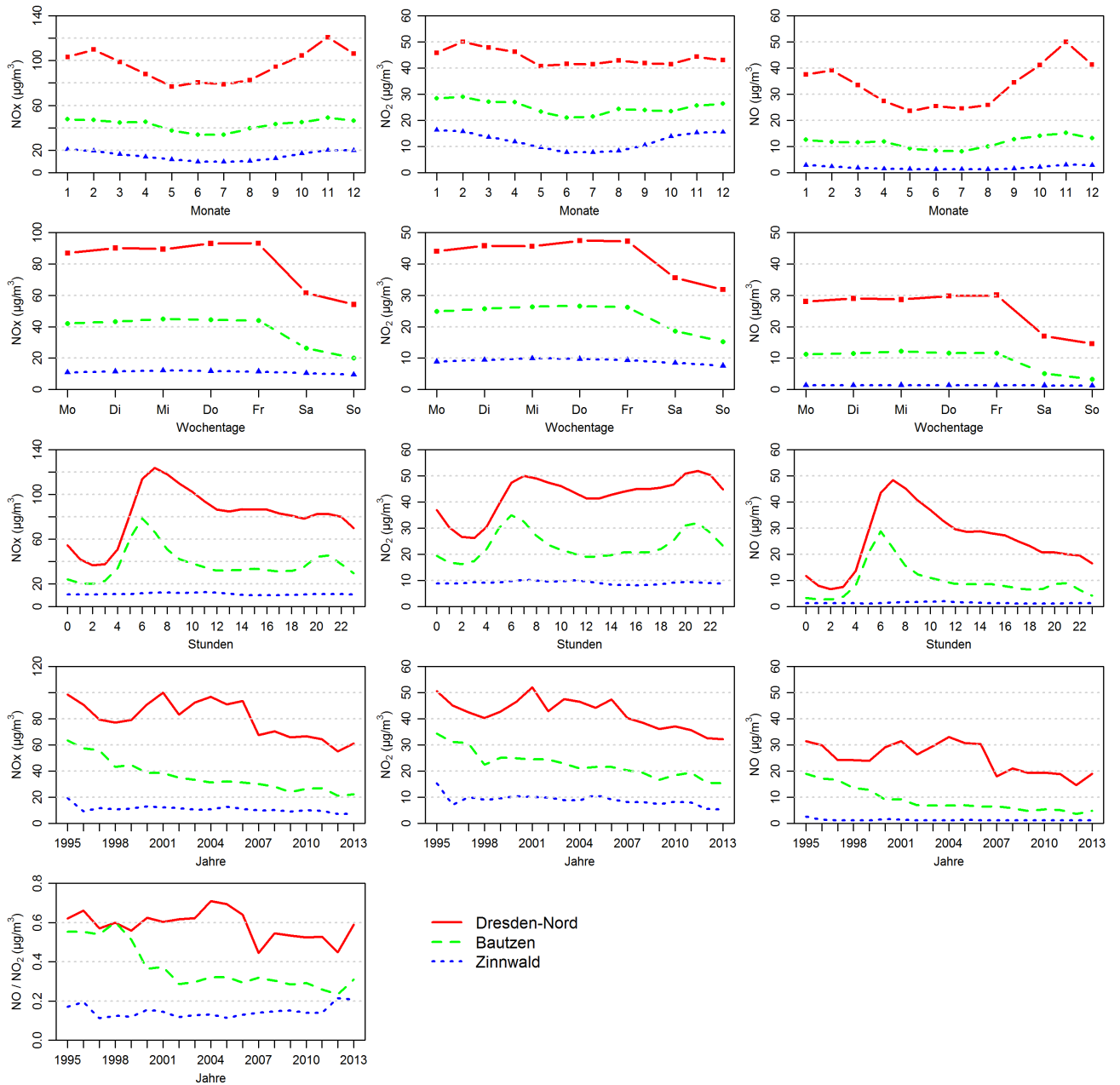
10 Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2004. Bodennahes Ozon [WWW Document]. URL http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_47_bodennahes_ozon.pdf (accessed 9.19.14).
- Bernhofer, C., Goldberg, V., Franke, J., Häntzschel, J., Harmansa, S., Pluntke, T., Geidel, K., Surke, M., Prasse, H., Freydank, E., Haensel, S., Mellentin, U., Kuechler, W., 2008. Sachsen im Klimawandel - Eine Analyse. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft.
- Bernhofer, C., Matschullat, J., Bobeth, A., 2011. Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden. Rhombos-Verlag, [S.l.].
- Bissolli, P., Dittmann, E., 2001. The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. *Meteorol. Z.* 10, 253–260. doi:10.1127/0941-2948/2001/0010-0253
- Bloomer, B.J., Stehr, J.W., Piety, C.A., Salawitch, R.J., Dickerson, R.R., 2009. Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions. *Geophys. Res. Lett.* 36, n/a–n/a. doi:10.1029/2009GL037308
- Camalier, L., Cox, W., Dolwick, P., 2007. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends. *Atmos. Environ.* 41, 7127–7137. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.04.061
- Chevalier, A., Gheusi, F., Delmas, R., Ordóñez, C., Sarrat, C., Zbinden, R., Thouret, V., Athier, G., Cousin, J.-M., 2007. Influence of altitude on ozone levels and variability in the lower troposphere: a ground-based study for western Europe over the period 2001–2004. *Atmospheric Chem. Phys.* 7, 4311–4326. doi:10.5194/acp-7-4311-2007
- Dawson, J.P., Racherla, P.N., Lynn, B.H., Adams, P.J., Pandis, S.N., 2009. Impacts of climate change on regional and urban air quality in the eastern United States: Role of meteorology. *J. Geophys. Res.* 114, D05308. doi:10.1029/2008JD009849
- Demuzere, M., Trigo, R.M., Vila-Guerau de Arellano, J., van Lipzig, N.P.M., 2009. The impact of weather and atmospheric circulation on O₃ and PM₁₀ levels at a rural mid-latitude site. *Atmos Chem Phys* 9, 2695–2714. doi:10.5194/acp-9-2695-2009
- Deutscher Wetterdienst, 2004. Klimastatusbericht 2003. Dt. Wetterdienst, Offenbach.
- Dittmann, E., Barth, S., Lang, J., Müller-Westermeier, G., 1995. Objektive Wetterlagenklassifikation (No. 197), Berichte des Deutschen Wetterdienstes.
- European Environment Agency, 2014. Avoiding harmful ozone pollution this summer [WWW Document]. URL <http://www.eea.europa.eu/highlights/avoiding-harmful-ozone-pollution-this-summer> (accessed 9.19.14).
- Fiore, A.M., Naik, V., Spracklen, D.V., Steiner, A., Unger, N., Prather, M., Bergmann, D., Cameron-Smith, P.J., Cionni, I., Collins, W.J., Dalsøren, S., Eyring, V., Folberth, G.A., Ginoux, P., Horowitz, L.W., Josse, B., Lamarque, J.-F., MacKenzie, I.A., Nagashima, T., O'Connor, F.M., Righi, M., Rumbold, S.T., Shindell, D.T., Skeie, R.B., Sudo, K., Szopa, S., Takemura, T., Zeng, G., 2012. Global air quality and climate. *Chem. Soc. Rev.* 41, 6663–6683. doi:10.1039/C2CS35095E
- Graedel, T.E., Crutzen, P.J., 1994. Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und Umwelt. Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg [u.a.].
- Gryparis, A., Forsberg, B., Katsouyanni, K., Analitis, A., Touloumi, G., Schwartz, J., Samoli, E., Medina, S., Anderson, H.R., Niciu, E.M., Wichmann, H.-E., Kriz, B., Kosnik, M., Skorkovsky, J., Vonk, J.M., Dörtbudak, Z., 2004. Acute Effects of Ozone on Mortality from the "Air Pollution and Health. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 170, 1080–1087. doi:10.1164/rccm.200403-333OC
- Häckel, H., 2008. Meteorologie. UTB, Stuttgart.
- IPCC, 2000. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- IPCC, 2007. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- Jacob, D.J., Winner, D.A., 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmos. Environ.* 43, 51–63. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051
- Jerrett, M., Burnett, R.T., Pope, C.A., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., Shi, Y., Calle, E., Thun, M., 2009. Long-Term Ozone Exposure and Mortality. *N. Engl. J. Med.* 360, 1085–1095. doi:10.1056/NEJMoa0803894
- Krahe, P., Nilson, E., Gelhardt, U., Lang, J., 2010. Auswertungen ausgewählter globaler Klimamodelle hinsichtlich atmosphärischer Zirkulationsbedingungen im nordatlantisch-mitteleuropäischen Sektor (No. BfG-1682). Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., Enke, W., 2013. Modellierung von Klimaprojektionen im polnisch-sächsischen Grenzraum im Rahmen des Projekts KLAPS, Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum. Dresden.
- Kuttler, W., Zmarsly, E., 1996. Bodennahes Ozon - Entstehung, Standortabhängige Tagesgänge und Minderungsmaßnahmen. *Entsorgungspraxis EP Tech.-Mag. Für Abfallwirtsch.* 14, S. 84–93.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2007. Untersuchungen zur Wirkung erhöhter Ozonkonzentrationen [WWW Document]. URL http://www.lanuv.nrw.de/luft/wirkungen/wirk_ozon.htm (accessed 9.19.14).
- Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.), 2013. Luftqualität in Brandenburg, Jahresbericht 2012. Potsdam.

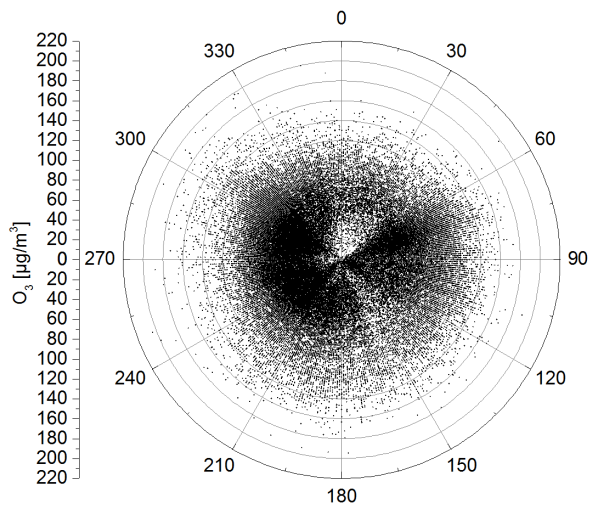
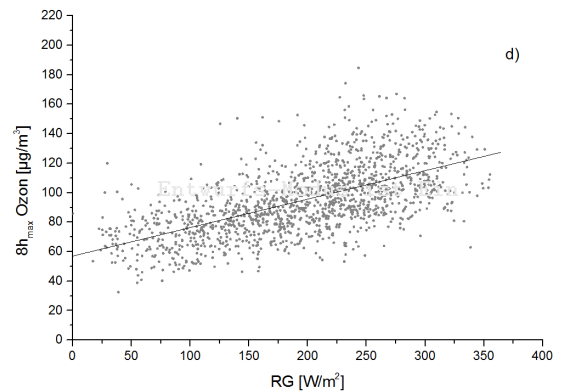
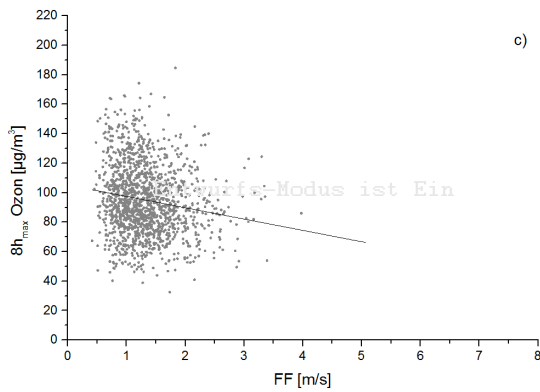
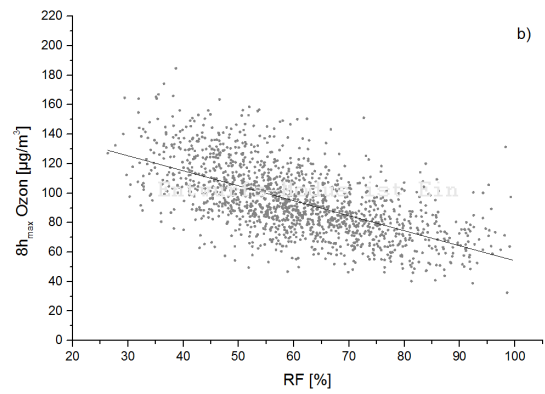
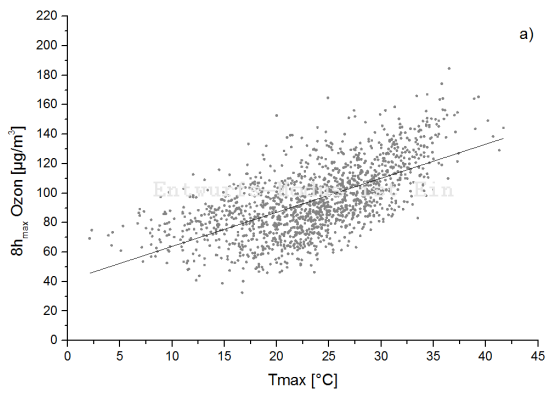
- Lünich, K., Pluntke, T., Niemand, C., Adynkiewicz-Piragas, M., Zdralewicz, I., Otop, I., Miszuk, B., Kryza, J., Lejcuś, I., Strońska, M., 2014. Lausitzer Neiße – Charakteristik und Klima der Region, Publikation der EU-Projektes Lausitzer Neiße/Nysa Łużycka - Klimatische und hydrologische Modellierung, Analyse und Prognose. Dresden.
- Mehler, S., Völlings, A., Flügel, I., Szymanowski, M., Błaś, M., Sobik, M., Migała, K., Małgorzata, W., Kryza, M., Miszuk, B., Otop, I., Kolanek, A., Strońska, M., 2014. Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum, Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum. Dresden.
- Melkonyan, A., Kuttler, W., 2012. Long-term analysis of NO, NO₂ and O₃ concentrations in North Rhine-Westphalia, Germany. *Atmos. Environ.* 60, 316–326. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.06.048
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW, 2014. Die Wirkung von Ozon [WWW Document]. URL <http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/luftqualitaet/ozon/wirkung.php> (accessed 9.19.14).
- Möller, D., 2000. Troposphärisches Ozon: Entstehung, Konzentrationsvariabilität und Wirkung unter dem Gesichtspunkt der Ozonminderung. *Umweltwissenschaften Schadst.-Forsch.* 12, 201–208. doi:10.1007/BF03038204
- Monks, P.S., 2000. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmos. Environ.* 34, 3545–3561. doi:10.1016/S1352-2310(00)00129-1
- Moss, R.H. et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- Ordóñez, C., Mathis, H., Furger, M., Henne, S., Hügli, C., Staehelin, J., Prévôt, A.S.H., 2005. Changes of daily surface ozone maxima in Switzerland in all seasons from 1992 to 2002 and discussion of summer 2003. *Atmos Chem Phys* 5, 1187–1203. doi:10.5194/acp-5-1187-2005
- Parrish, D.D., Law, K.S., Staehelin, J., Derwent, R., Cooper, O.R., Tanimoto, H., Volz-Thomas, A., Gilje, S., Scheel, H.-E., Steinbacher, M., Chan, E., 2012. Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations at northern mid-latitudes. *Atmos Chem Phys Discuss* 12, 13881–13931. doi:10.5194/acpd-12-13881-2012
- Racherla, P.N., Adams, P.J., 2008. The response of surface ozone to climate change over the Eastern United States. *Atmospheric Chem. Phys.* 8, 871–885.
- Regionale Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft, 2014. Regionalen Klimaatlas Deutschland [WWW Document]. URL <http://www.regionaler-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/spezifische-luftfeuchte/deutschland/mittlereanderung.html> (accessed 9.22.14).
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2013. Luftqualität in Sachsen, Jahresbericht 2012. Dresden.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014a. Luftmessnetz [WWW Document]. URL <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/luft/3649.htm> (accessed 9.22.14).
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014b. Luftqualität in Sachsen, Jahresbericht 2013. Dresden.
- Seinfeld, J.H., 2006. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, 2nd ed. ed. J. Wiley, Hoboken, N.J.
- Sillman, S., 1999. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmos. Environ.* 33, 1821–1845. doi:10.1016/S1352-2310(98)00345-8
- Smidt, S., Bolhár-Nordenkampf, H., Herman, F., 2007. Das Ozonrisiko für österreichische Fichtenwälder. *Austrian J. For. Sci.* 124, 3–35.
- Surke, M., Heidenreich, M., Goldberg, V., 2013. Erstellung von Windrosen im Rahmen von KLAPS, Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum. Dresden.
- Umweltbundesamt, 2009. Entwicklung der Luftqualität in Deutschland. Dessau.
- Umweltbundesamt, 2013. Ozon-Belastung [WWW Document]. Umweltbundesamt. URL <http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/ozon-belastung> (accessed 9.19.14).
- Umweltbundesamt, 2014a. Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien (No. 35/2014). Dessau.
- Umweltbundesamt, 2014b. Luftqualität 2013- vorläufige Auswertung -. Dessau.
- Vingarzan, R., 2004. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmos. Environ.* 38, 3431–3442. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.03.030
- Willett, K.M., Gillett, N.P., Jones, P.D., Thorne, P.W., 2007. Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature* 449, 710–712. doi:10.1038/nature06207
- World Health Organization, 2014. Ambient (outdoor) air quality and health, Fact sheet N°313. [WWW Document]. URL <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/> (accessed 9.19.14).
- World Meteorological Organization, 2003. Scientific assessment of ozone depletion 2002: pursuant to Article 6 of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer / World Meteorological Organization. WMO, Geneva, Switzerland.

11 Anhang I

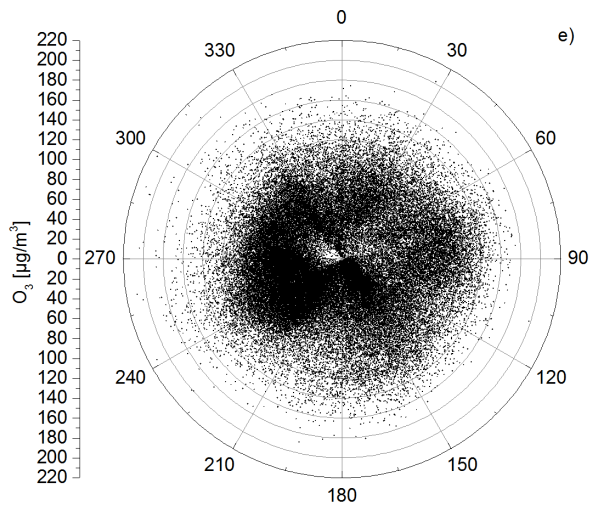
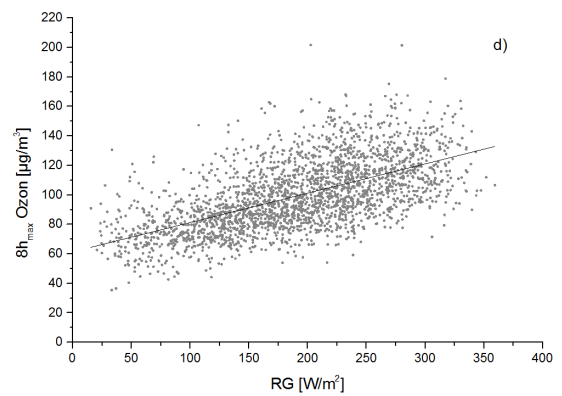
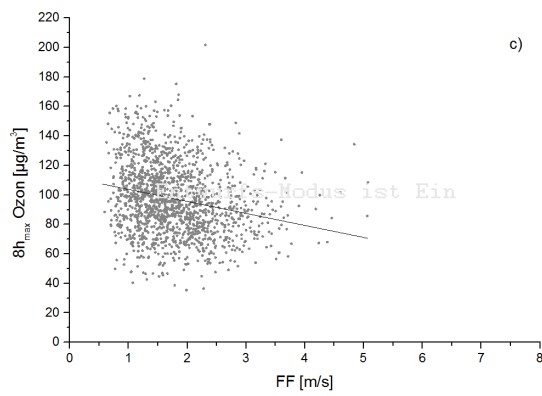
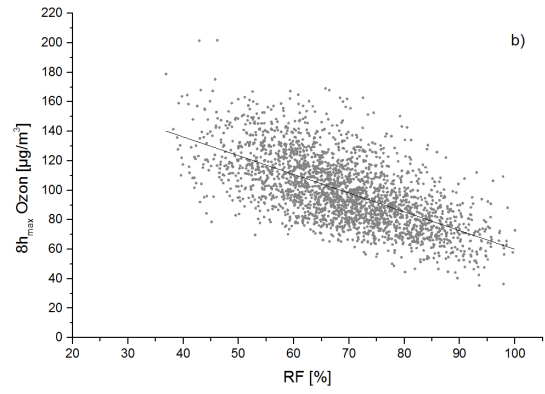
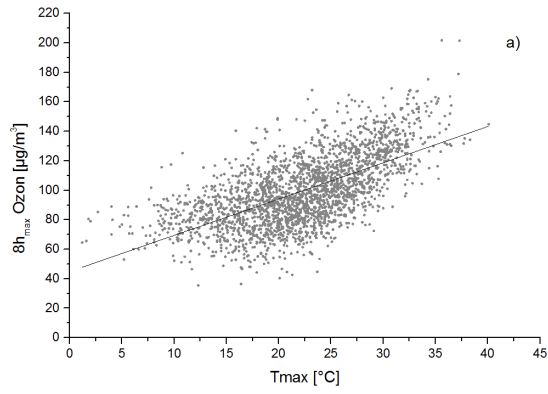
Anhang I-1: Konzentrationsverläufe von Stickoxid (NO_x , links), Stickstoffdioxid (NO_2 , Mitte) und Stickstoffmonoxid (NO , rechts) für die Stationen Dresden-Nord (verkehrsnahe), Bautzen (städtischer Hintergrund) und Zinnwald (ländlicher Hintergrund); Jahrgang sowie für die Monate April bis August 1995–2012 Wochengang, Tagesgang und Zeitreihe (von oben nach unten). Unten links ist das NO/NO_2 -Verhältnis von April bis August 1995–2012 dargestellt.



12 Anhang II



- e) Station Cottbus
- Zusammenhang zwischen dem Tagesmaximum der 8-Stunden-Mittel in den Monaten April bis August in Abhängigkeit von:
- a) Tagesmaximumtemperatur
 - b) relative Feuchte
 - c) Windgeschwindigkeit
 - d) Globalstrahlung
- Zusammenhang zwischen dem Windrichtung und Ozonkonzentration (Stundendaten) in den Monaten April bis August in Abhängigkeit von:
- e) Windrichtung



Station Spremberg

Zusammenhang zwischen dem Tagesmaximum der
8-Stunden-Mittel in den Monaten April bis August

in Abhängigkeit von:

a) Tagesmaximumtemperatur

b) relative Feuchte

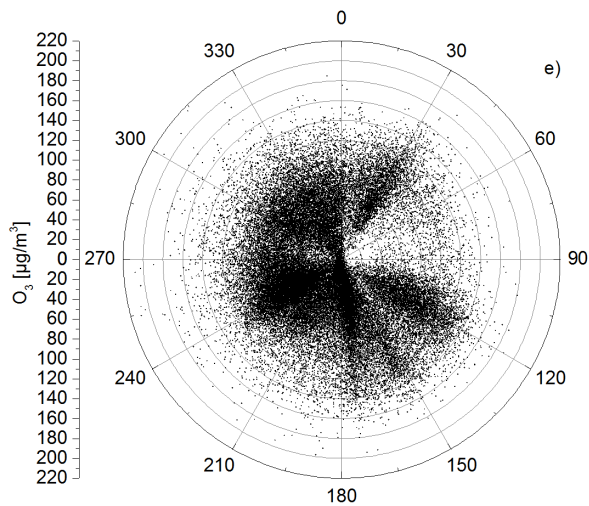
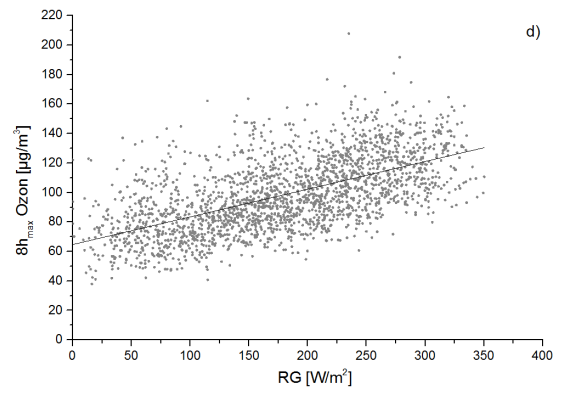
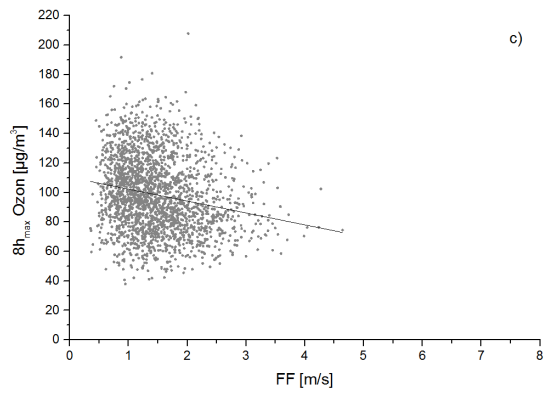
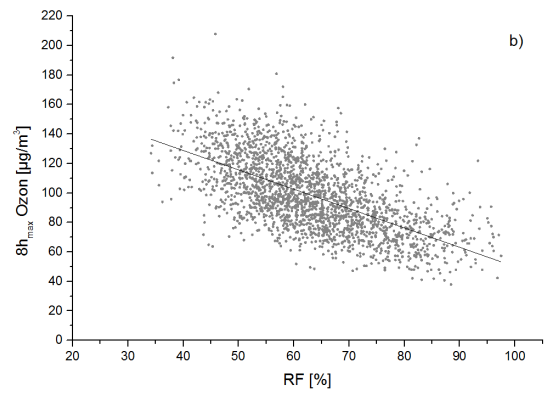
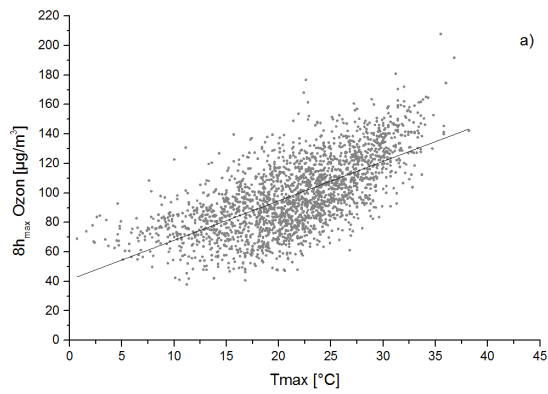
c) Windgeschwindigkeit

d) Globalstrahlung

Zusammenhang zwischen dem Windrichtung und Ozonkonzentration
(Stundendaten) in den Monaten April bis August

in Abhängigkeit von:

e) Windrichtung



Station Hoyerswerda

Zusammenhang zwischen dem Tagesmaximum der
8-Stunden-Mittel in den Monaten April bis August

in Abhängigkeit von:

a) Tagesmaximumtemperatur

b) relative Feuchte

c) Windgeschwindigkeit

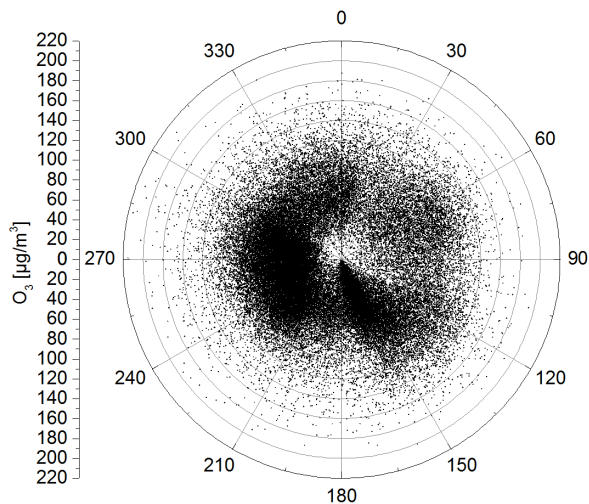
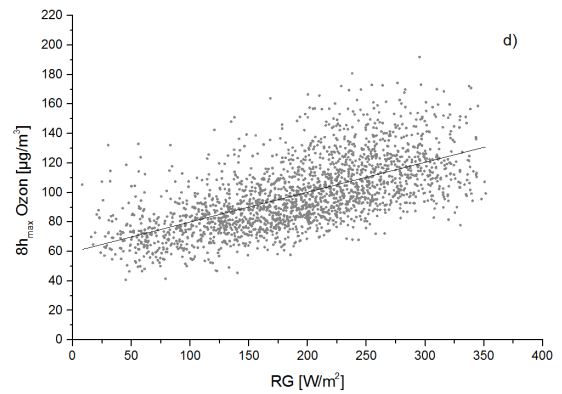
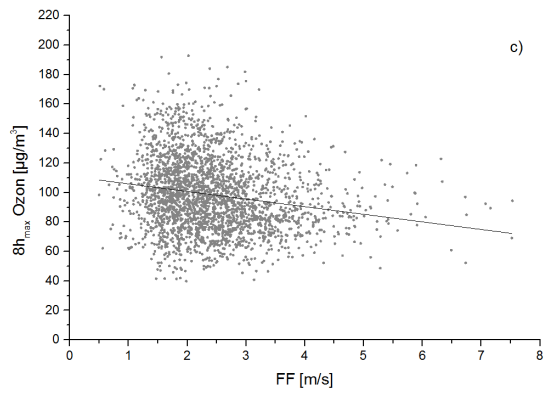
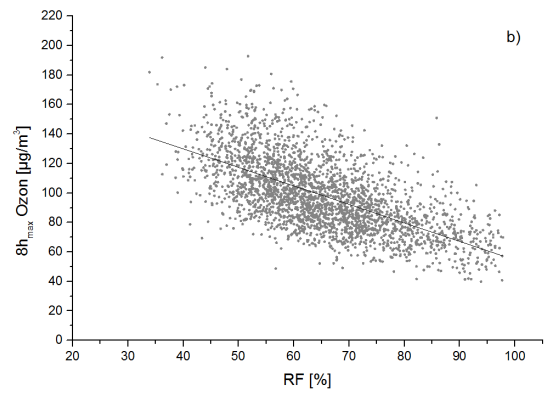
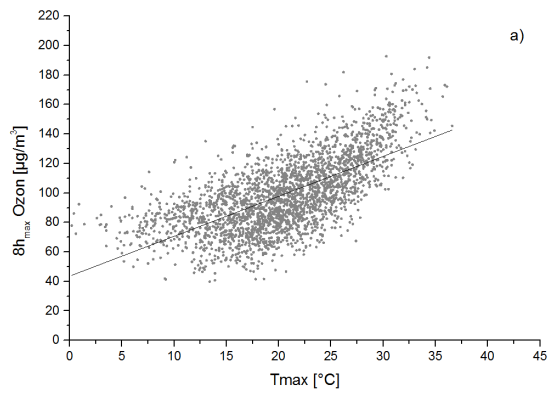
d) Globalstrahlung

Zusammenhang zwischen dem Windrichtung und Ozonkonzentration

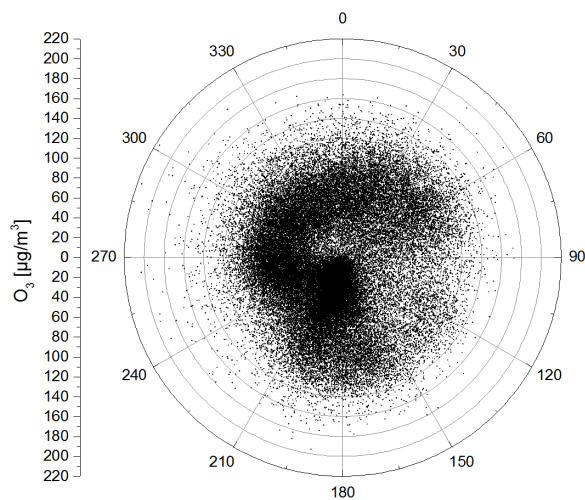
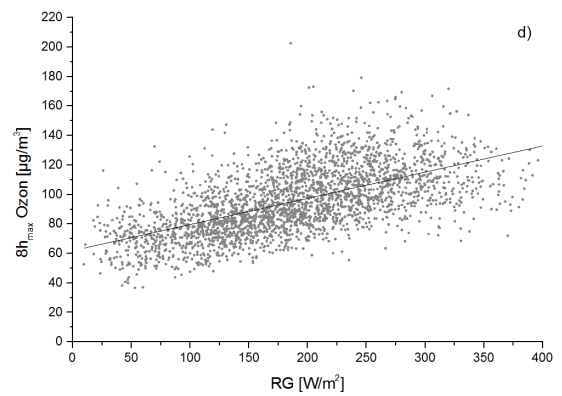
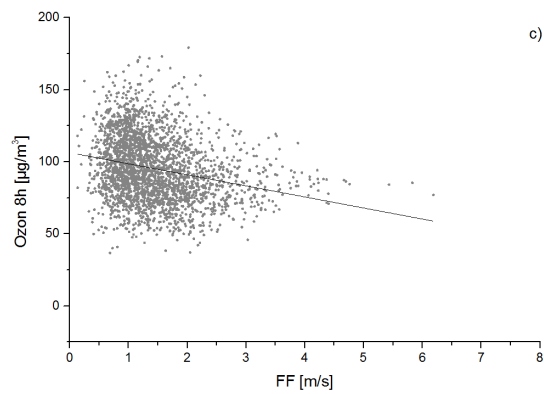
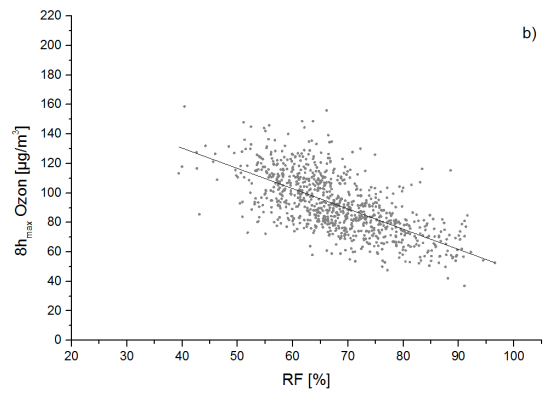
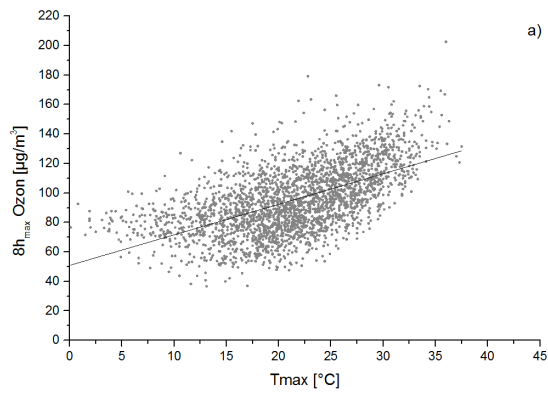
(Stundendaten) in den Monaten April bis August

in Abhängigkeit von:

e) Windrichtung



- e)
- Station Radebeul
- Zusammenhang zwischen dem Tagesmaximum der 8-Stunden-Mittel in den Monaten April bis August in Abhängigkeit von:
- a) Tagesmaximumtemperatur
 - b) relative Feuchte
 - c) Windgeschwindigkeit
 - d) Globalstrahlung
- Zusammenhang zwischen dem Windrichtung und Ozonkonzentration (Stundendaten) in den Monaten April bis August in Abhängigkeit von:
- e) Windrichtung



e)

Station Zittau

Zusammenhang zwischen dem Tagesmaximum der
8-Stunden-Mittel in den Monaten April bis August

in Abhängigkeit von:

a) Tagesmaximumtemperatur

b) relative Feuchte

c) Windgeschwindigkeit

d) Globalstrahlung

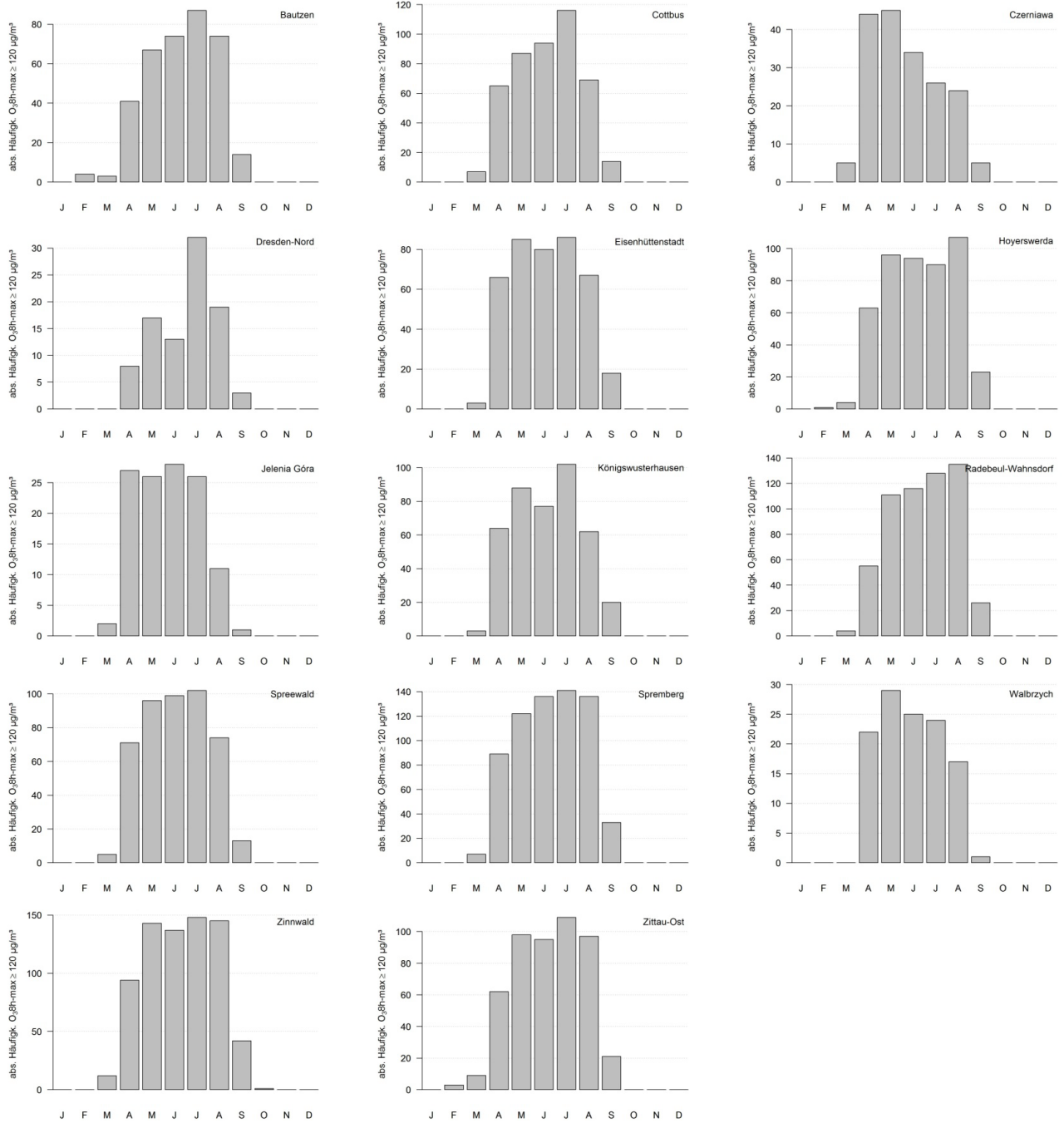
Zusammenhang zwischen dem Windrichtung und Ozonkonzentration
(Stundendaten) in den Monaten April bis August

in Abhängigkeit von:

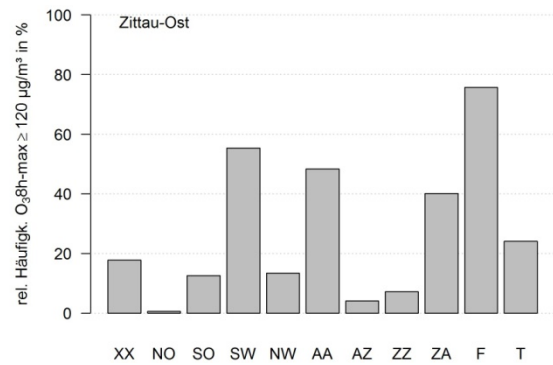
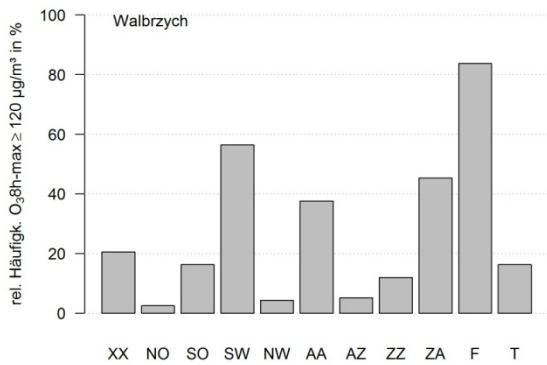
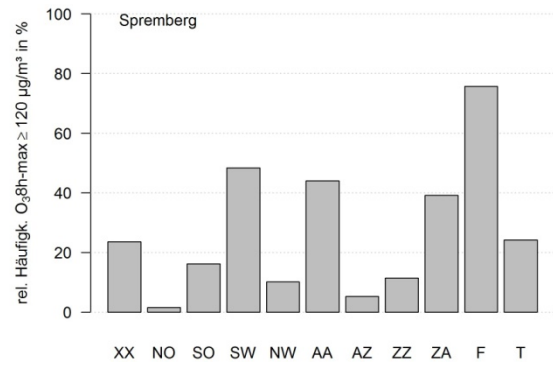
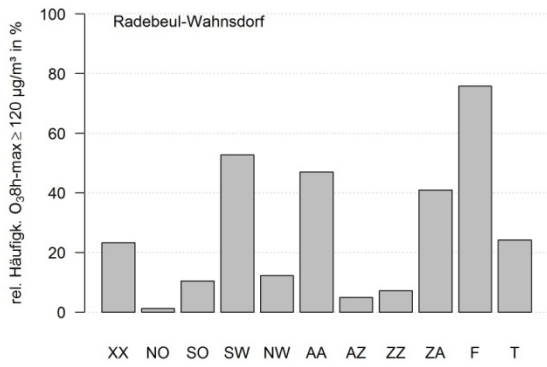
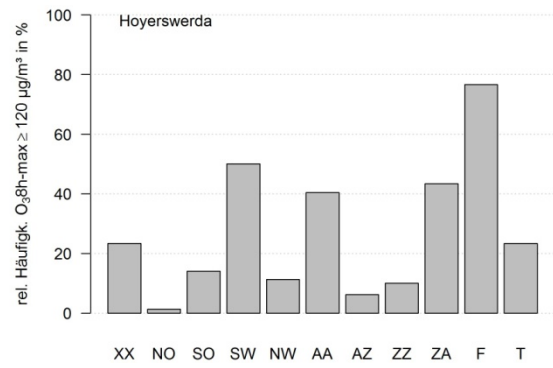
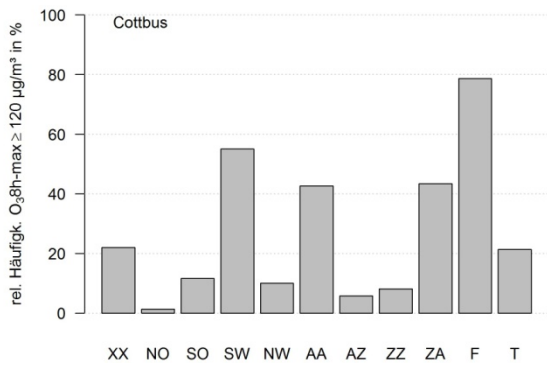
e) Windrichtung

13 Anhang III

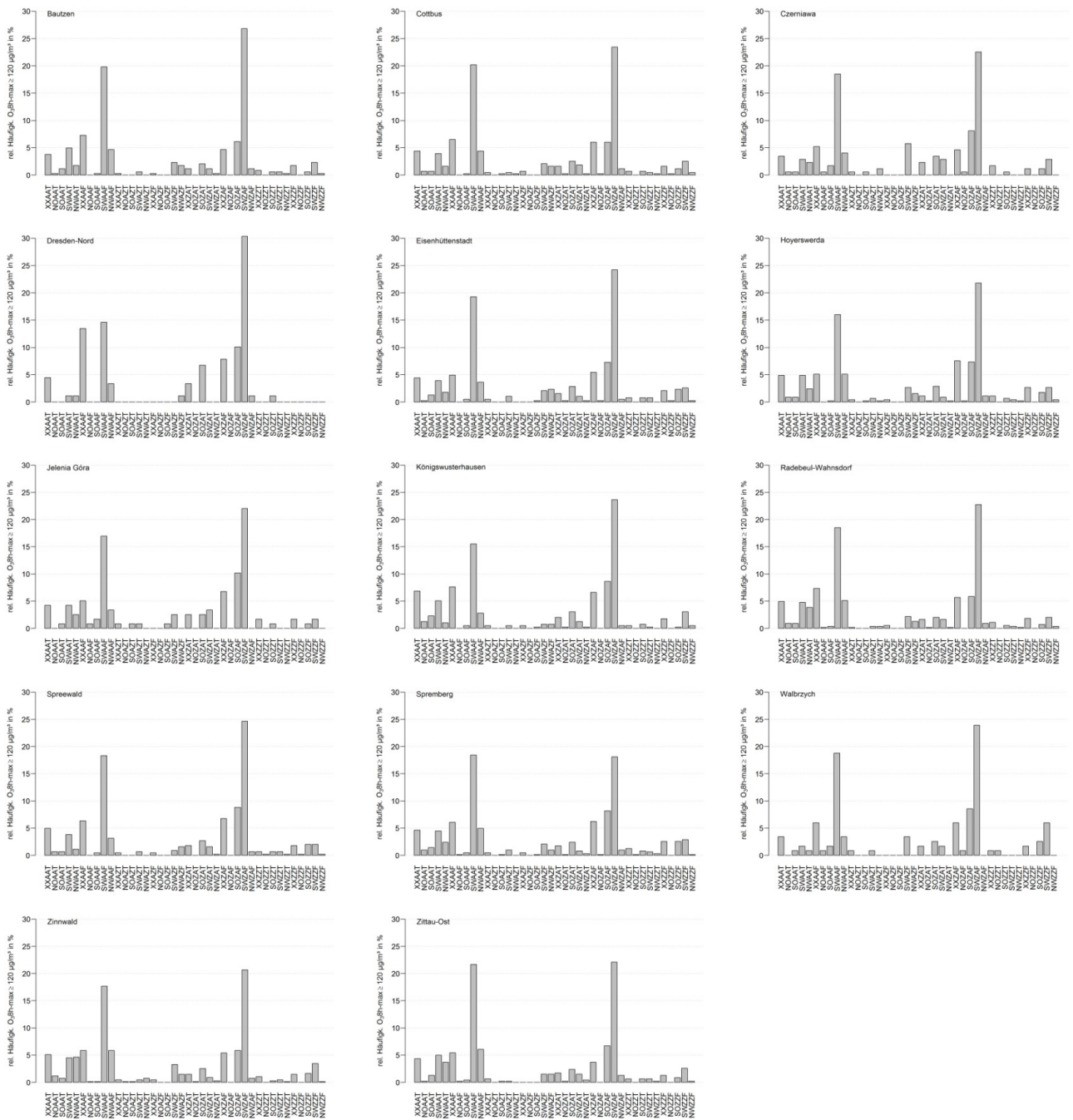
Anhang III-1: Jährliche Häufigkeitsverteilung des Tagesmaximums des 8h-Mittelwerts der Ozonkonzentration



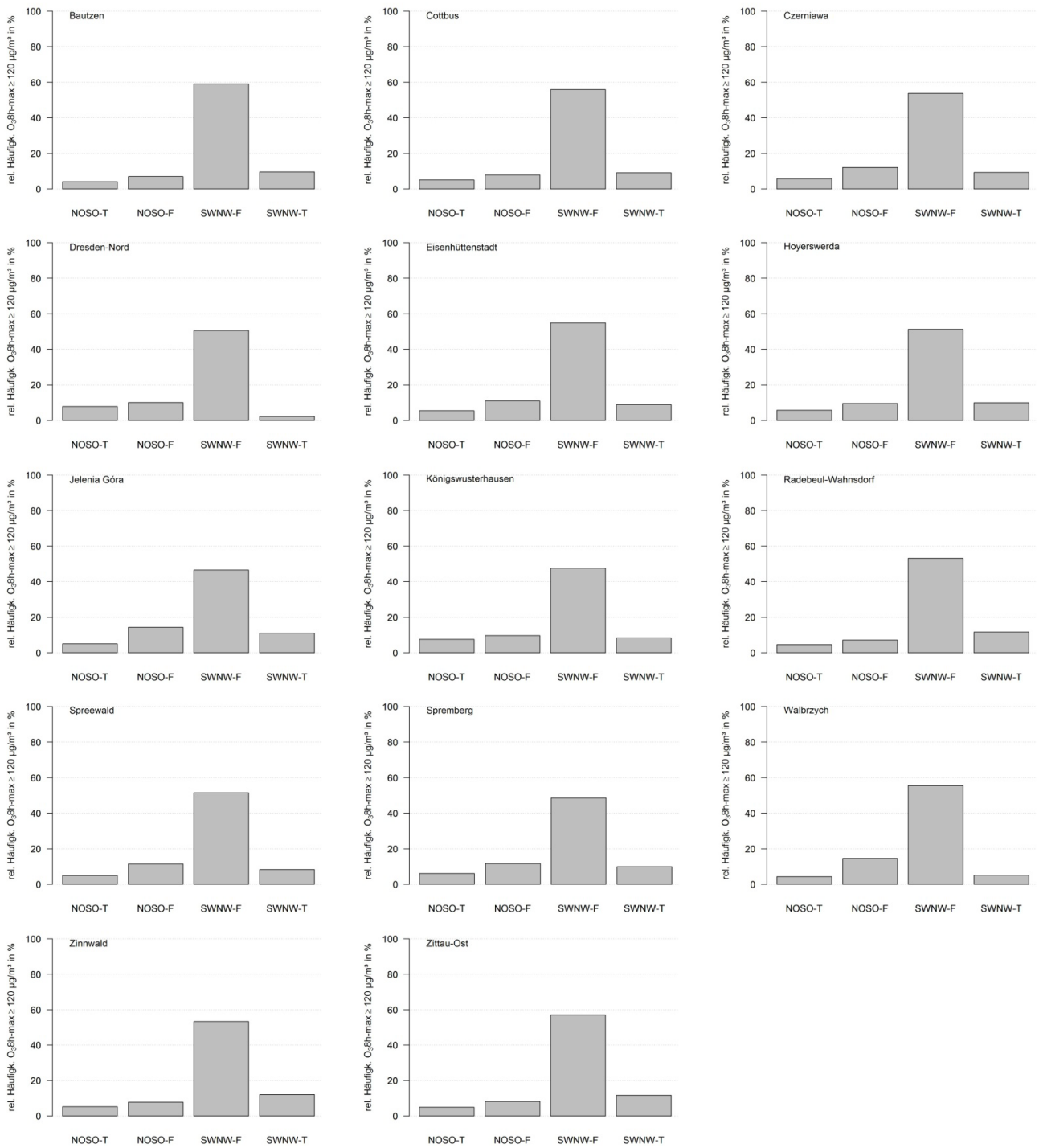
Anhang III-2: Relative Häufigkeiten bestimmter Klassifikationsindizes an Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Monate April bis August



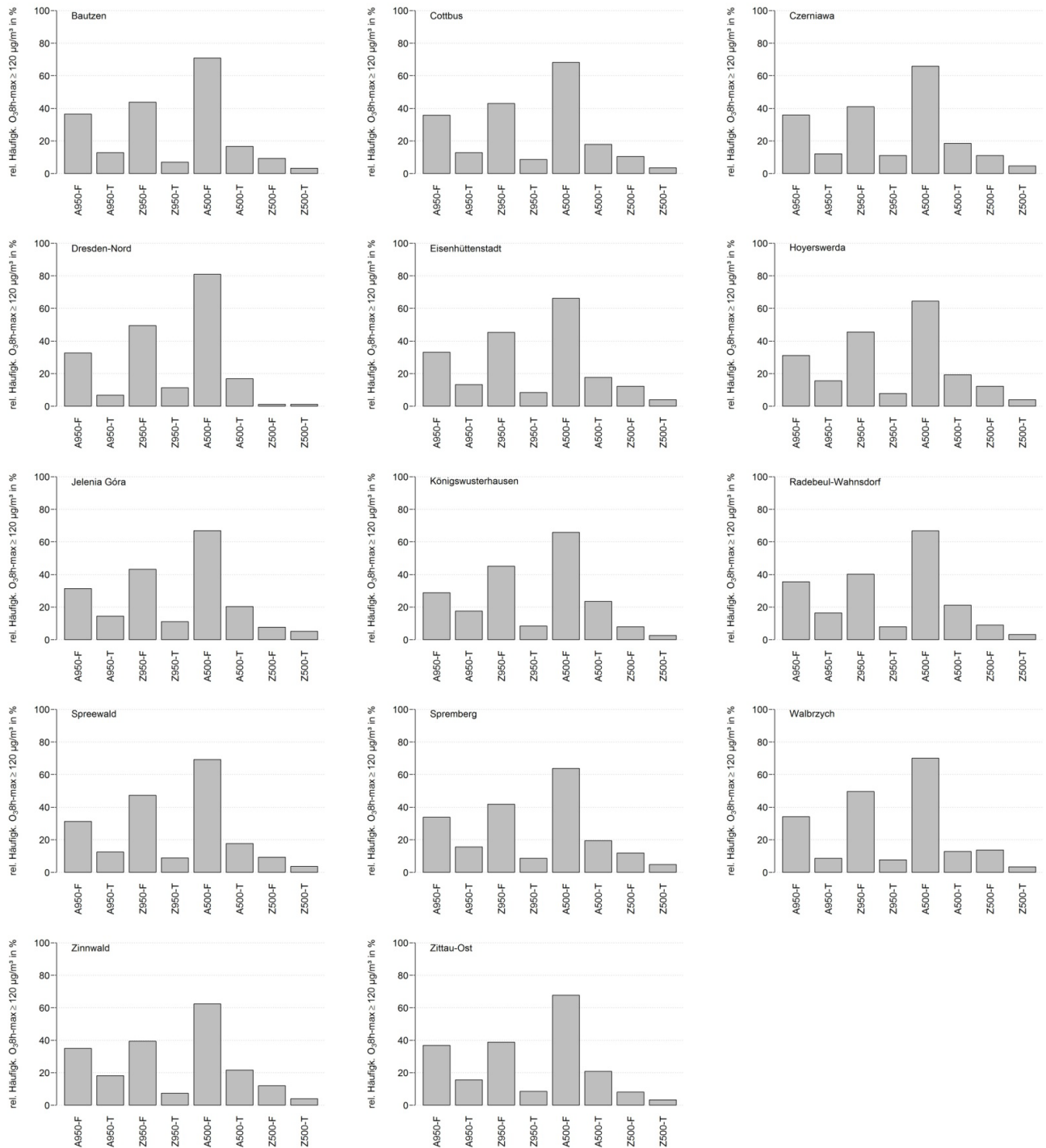
Anhang III-3: Relative Häufigkeiten aller objektiven Wetterlagen an Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Monate April bis August



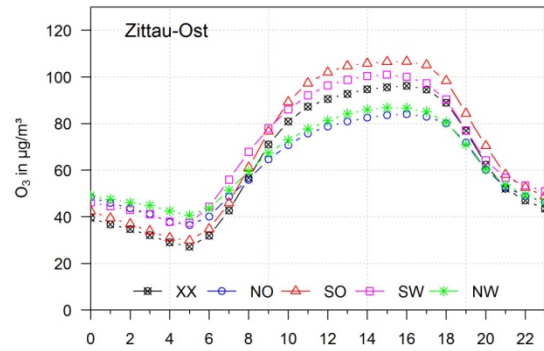
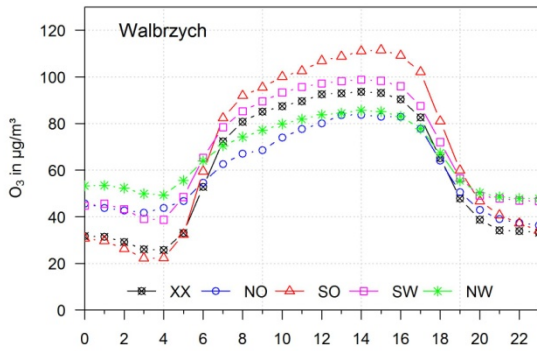
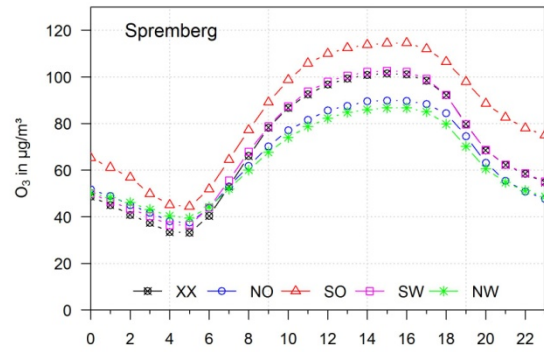
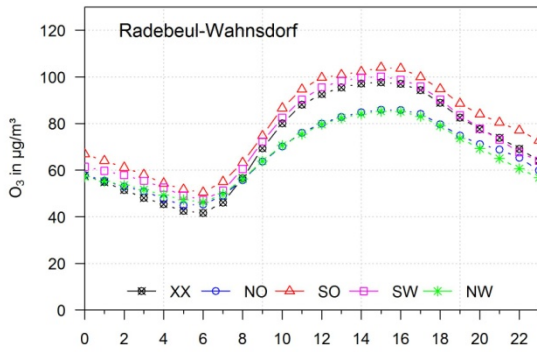
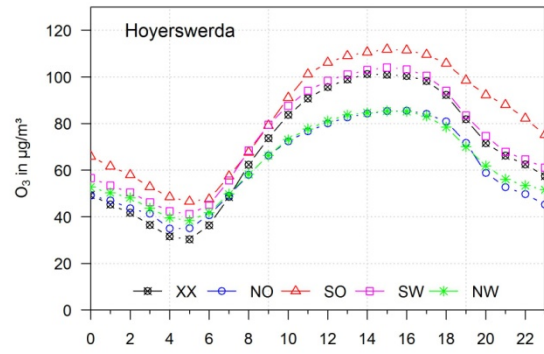
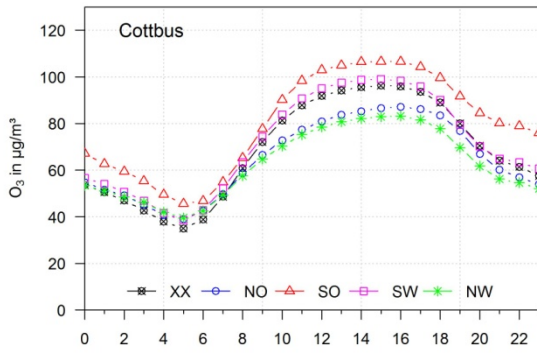
Anhang III-4: Relative Häufigkeiten bestimmter kombinierter Klassifikationsindizes an Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Monate April bis August



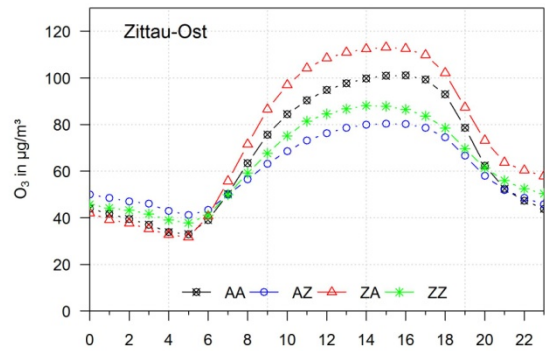
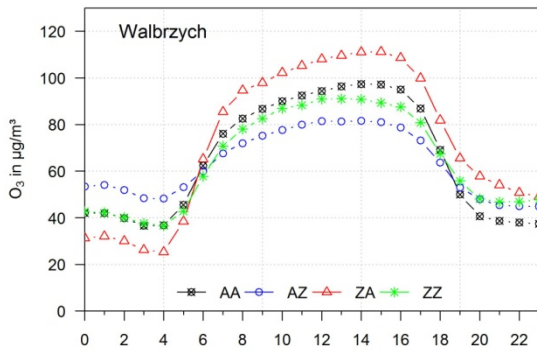
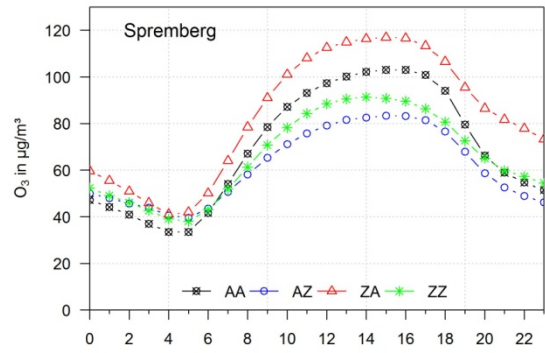
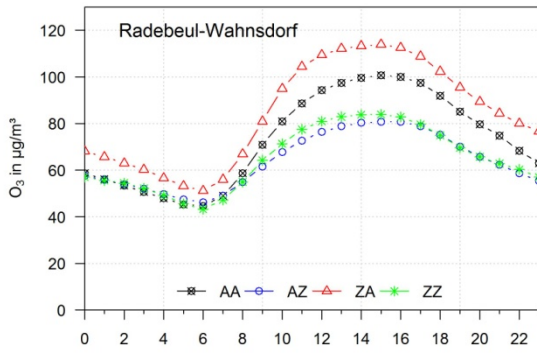
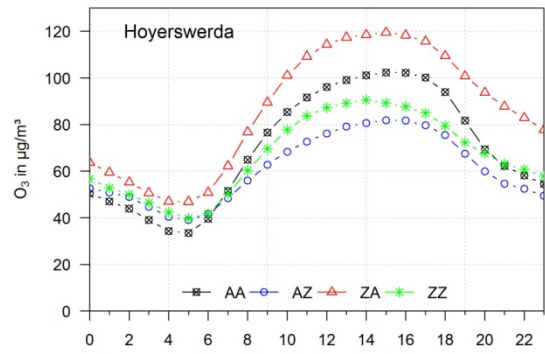
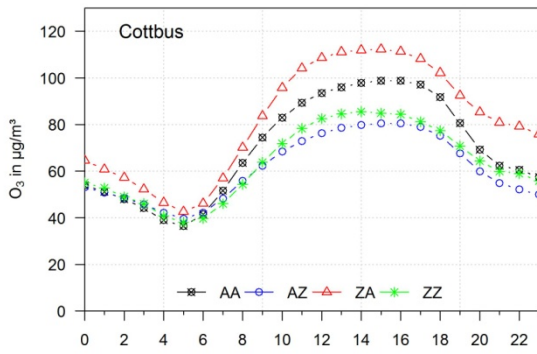
Anhang III-5: Relative Häufigkeiten bestimmter kombinierter Klassifikationsindizes an Tagen mit einem 8h-Mittelwert der gemessenen Ozonkonzentration $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Monate April bis August



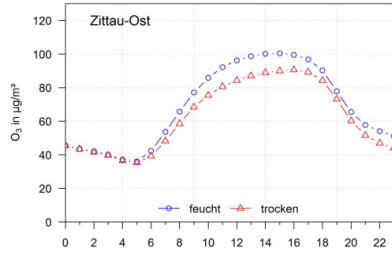
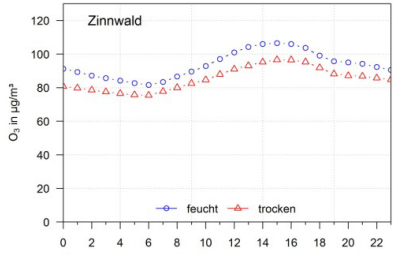
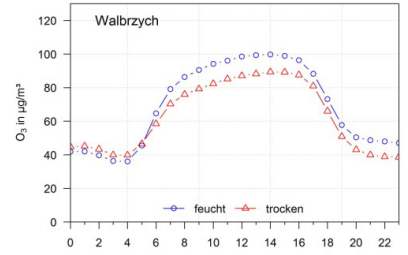
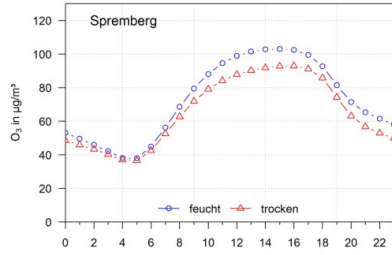
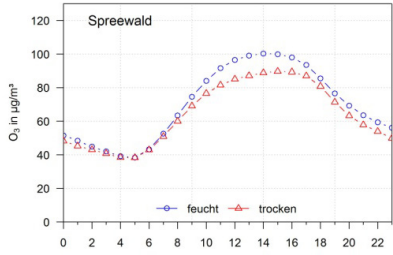
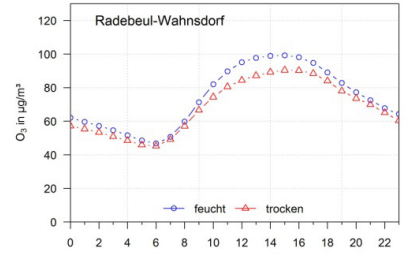
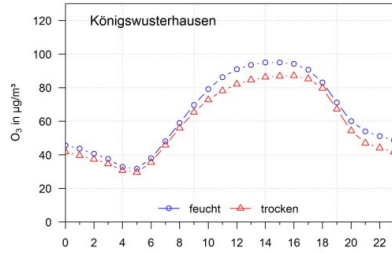
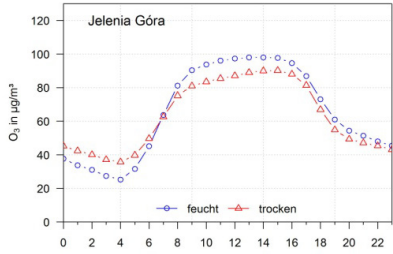
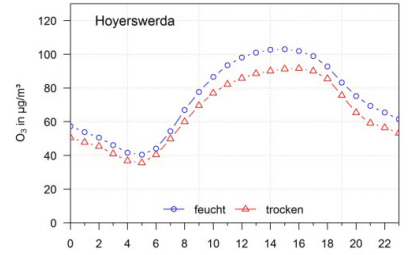
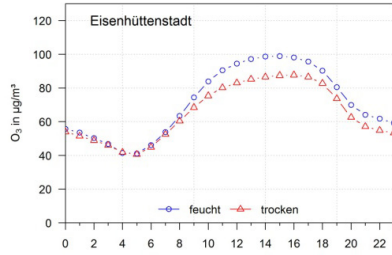
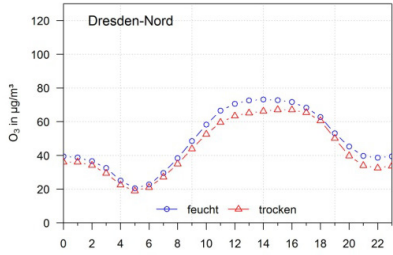
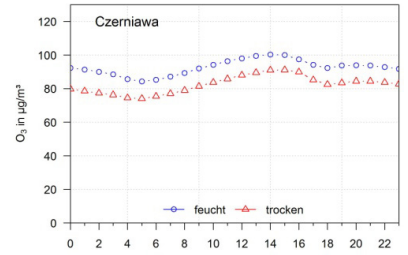
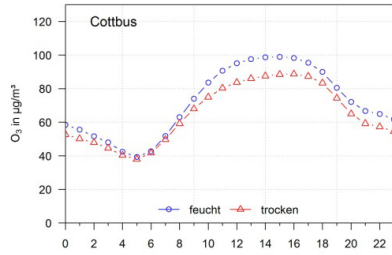
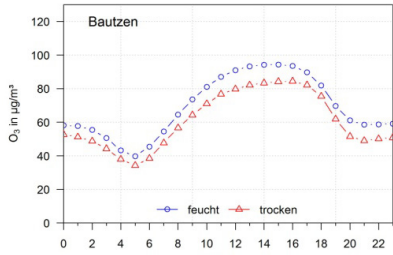
Anhang III-6: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Anströmrichtung der Luftmassen



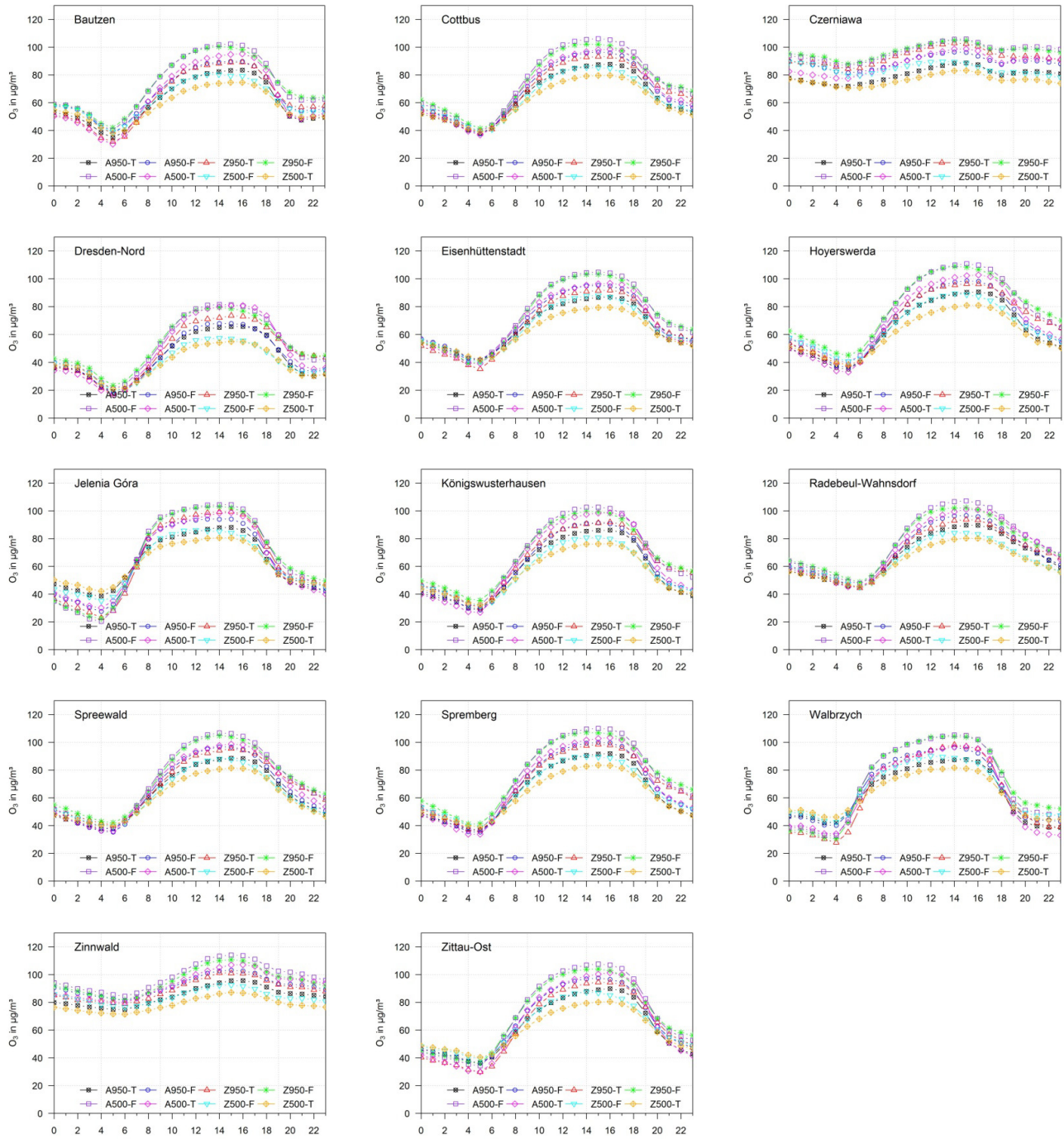
Anhang III-7: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Zyklonalität der Luftmassen



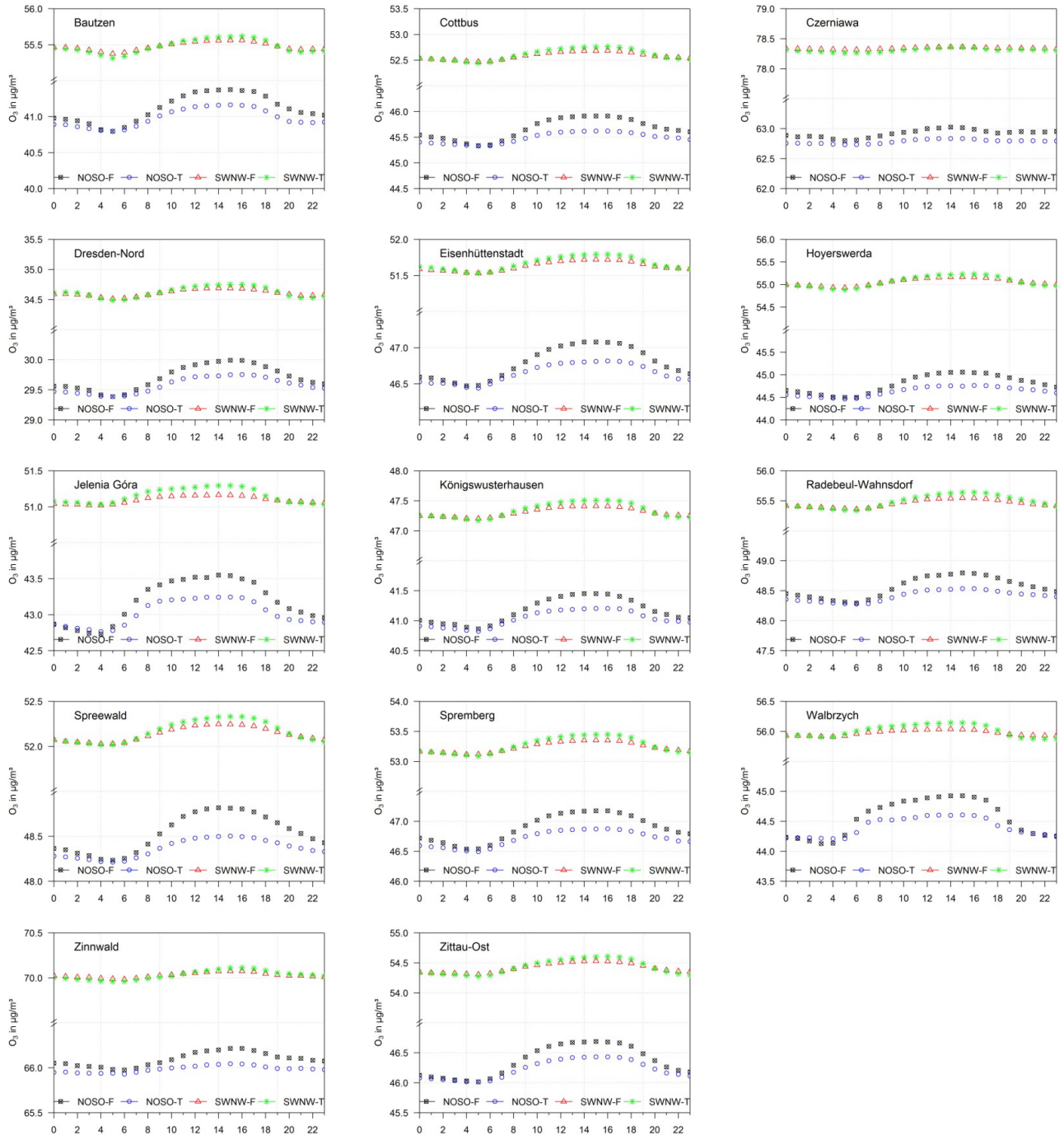
Anhang III-8: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Feuchtegehalt der Troposphäre



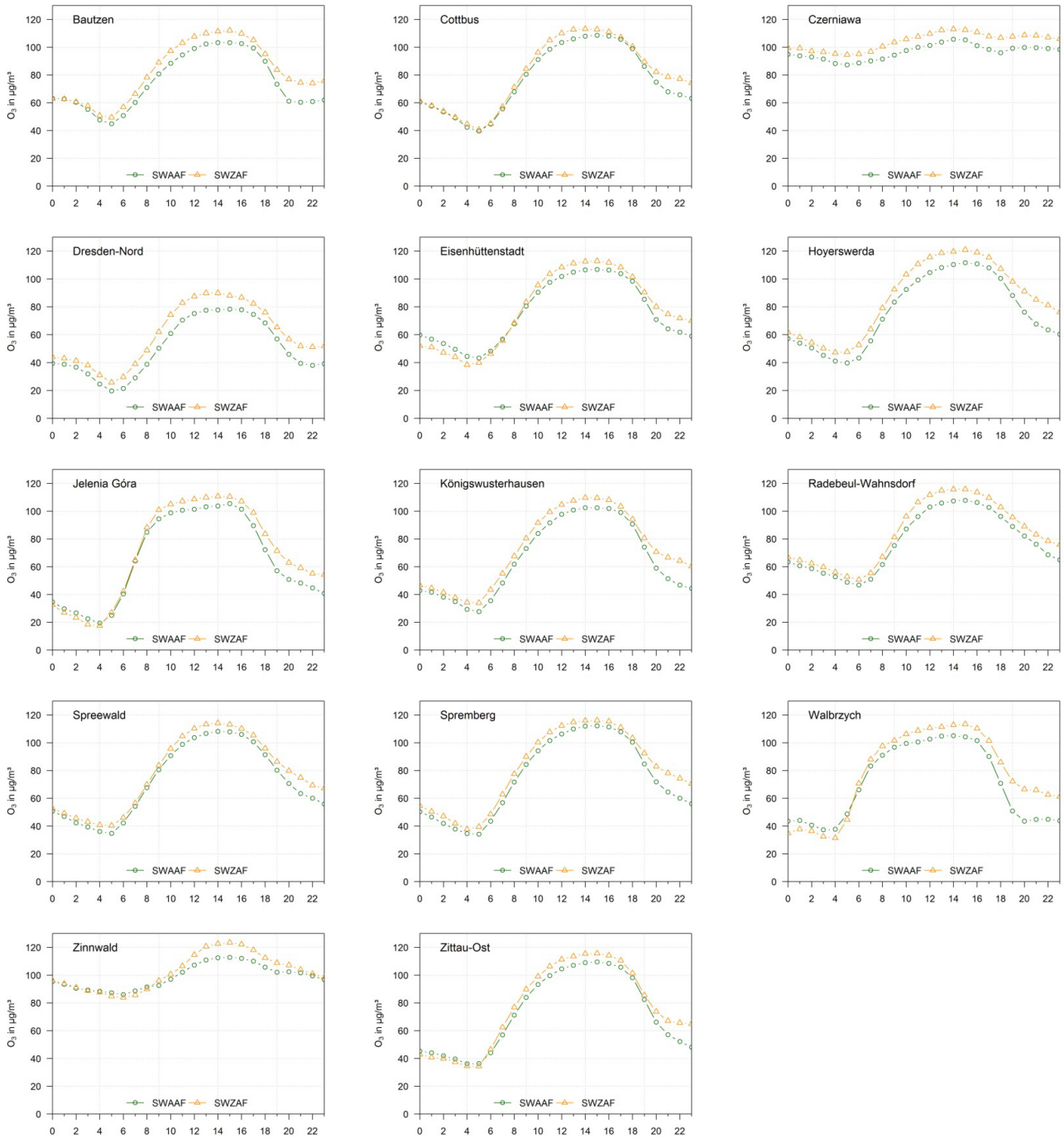
Anhang III-9: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach Zyklonalität und Feuchtegehalt



Anhang III-10: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, je nach westlicher bzw. östlicher Anströmrichtung und Feuchtegehalt der Troposphäre



Anhang III-11: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration von April bis August, für die am häufigsten auftretenden Wetterlagen SWAAF und SWZAF

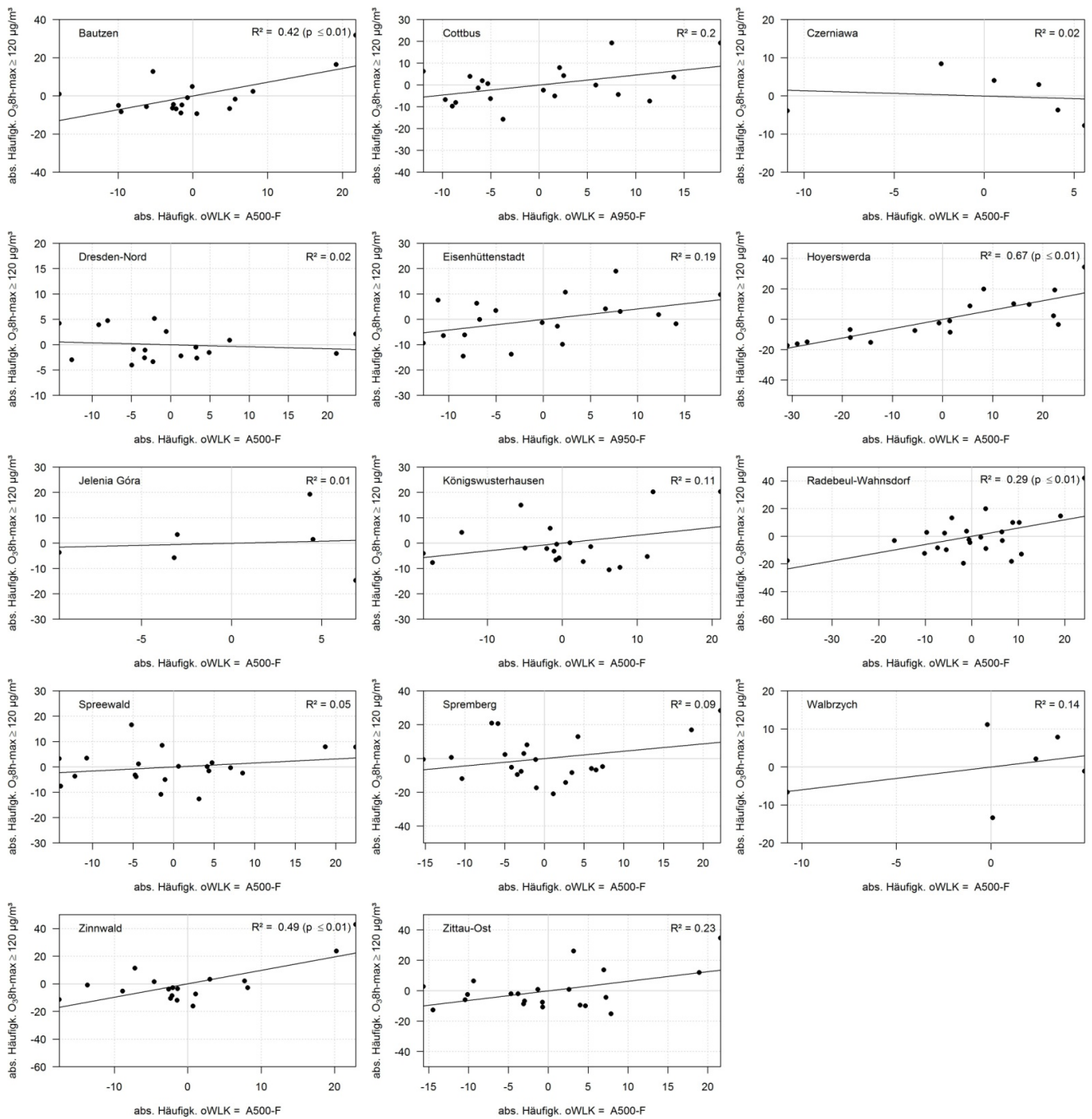


Anhang III-12: Die 10 am häufigsten auftretenden Wetterlagenindizes für die Monate April bis August, links: sortiert nach Auftretenshäufigkeit im jeweiligen Messzeitraum aller Stationen, rechts: sortiert nach Auftretenshäufigkeit an Ozonüberschreitungstagen (Tagesmaximum der 8h-Mittel $\geq 120 \text{ mg/m}^3$) aller Stationen

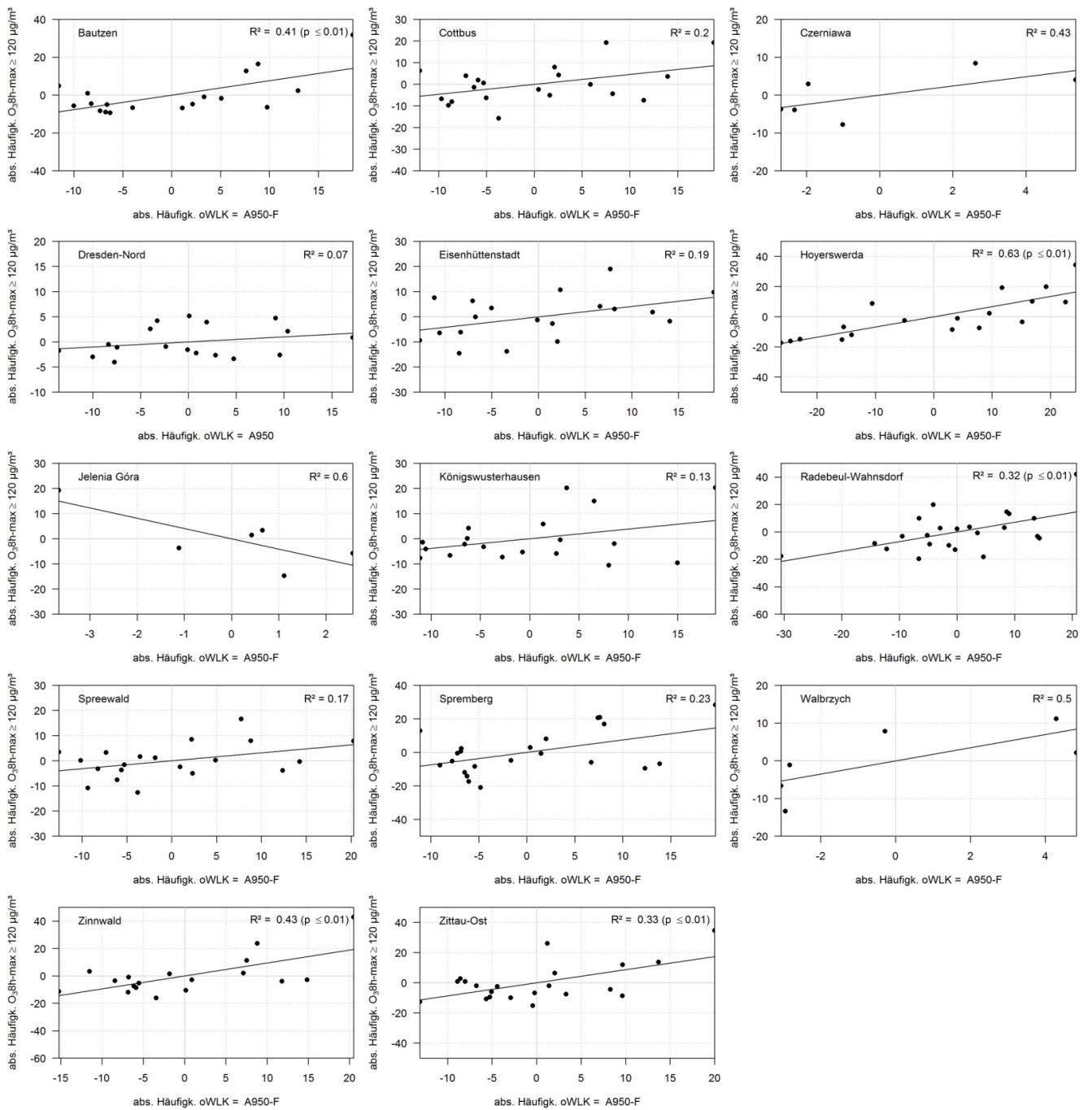
oWLK	rel. Hfk. (%)	Gesamtzeitraum	O3-Überschr.-Tage
	Min	66.8	39.3
A950	Mittel	67.6	47.1
	Max	68.7	53.1
	Min	55.0	82.9
A500	Mittel	57.4	86.6
	Max	60.0	97.8
	Min	49.5	73.8
F	Mittel	52.7	77.7
	Max	55.0	85.3
	Min	44.9	14.7
T	Mittel	47.3	22.2
	Max	50.5	26.0
	Min	40.7	45.9
SW	Mittel	43.5	52.6
	Max	49.5	58.8
	Min	40.0	2.2
Z500	Mittel	42.5	13.4
	Max	45.0	17.1
	Min	37.7	37.6
AA	Mittel	39.8	41.9
	Max	41.2	48.4
	Min	37.3	5.9
A950-T	Mittel	38.7	13.4
	Max	40.5	18.1
	Min	37.1	37.8
SWNW-F	Mittel	38.1	52.3
	Max	39.1	61.8
	Min	31.0	62.4
A500-F	Mittel	34.4	67.8
	Max	35.8	80.9

oWLK	rel. Hfk. (%)	Gesamtzeitraum	O3-Überschr.-Tage
	Min	55.0	82.9
A500	Mittel	57.4	86.6
	Max	60.0	97.8
	Min	49.5	73.8
F	Mittel	52.7	77.7
	Max	55.0	85.3
	Min	31.0	62.4
A500-F	Mittel	34.4	67.8
	Max	35.8	80.9
	Min	31.3	46.8
Z950	Mittel	32.3	52.8
	Max	33.1	60.7
	Min	40.7	45.9
SW	Mittel	43.5	52.6
	Max	49.5	58.8
	Min	37.1	37.8
SWNW-F	Mittel	38.1	52.3
	Max	39.1	61.8
	Min	66.8	39.3
A950	Mittel	67.6	47.1
	Max	68.7	53.1
	Min	17.0	38.1
ZA	Mittel	17.6	44.6
	Max	18.9	59.6
	Min	22.2	38.8
Z950-F	Mittel	23.8	44.1
	Max	24.9	50.0
	Min	37.7	37.6
AA	Mittel	39.8	41.9
	Max	41.2	48.4

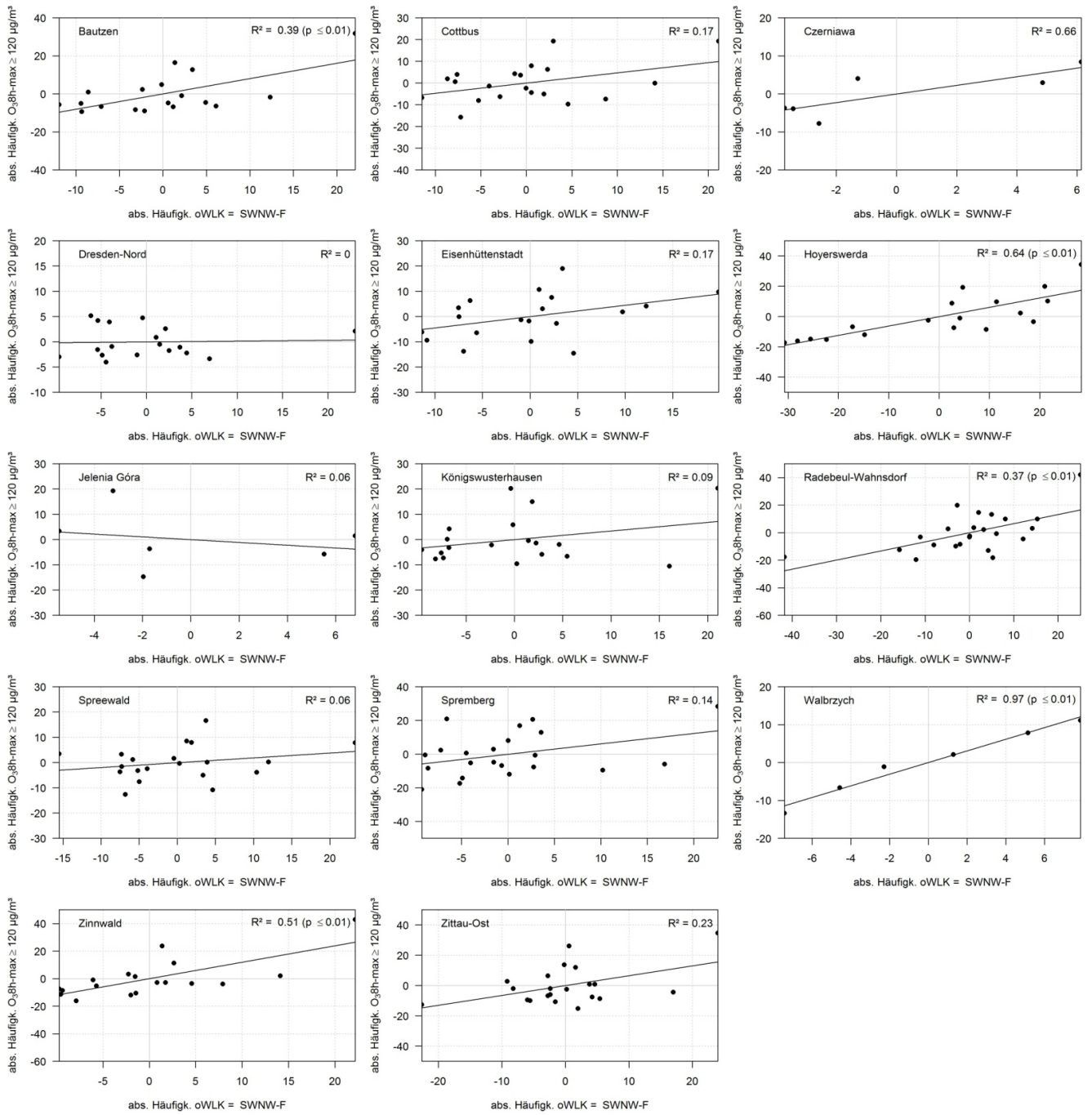
Anhang III-13: Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichem Auftreten von feuchten und in 500 hPa antizyklonalen Zirkulationsformen der Atmosphäre über dem KLAPS-Projektgebiet



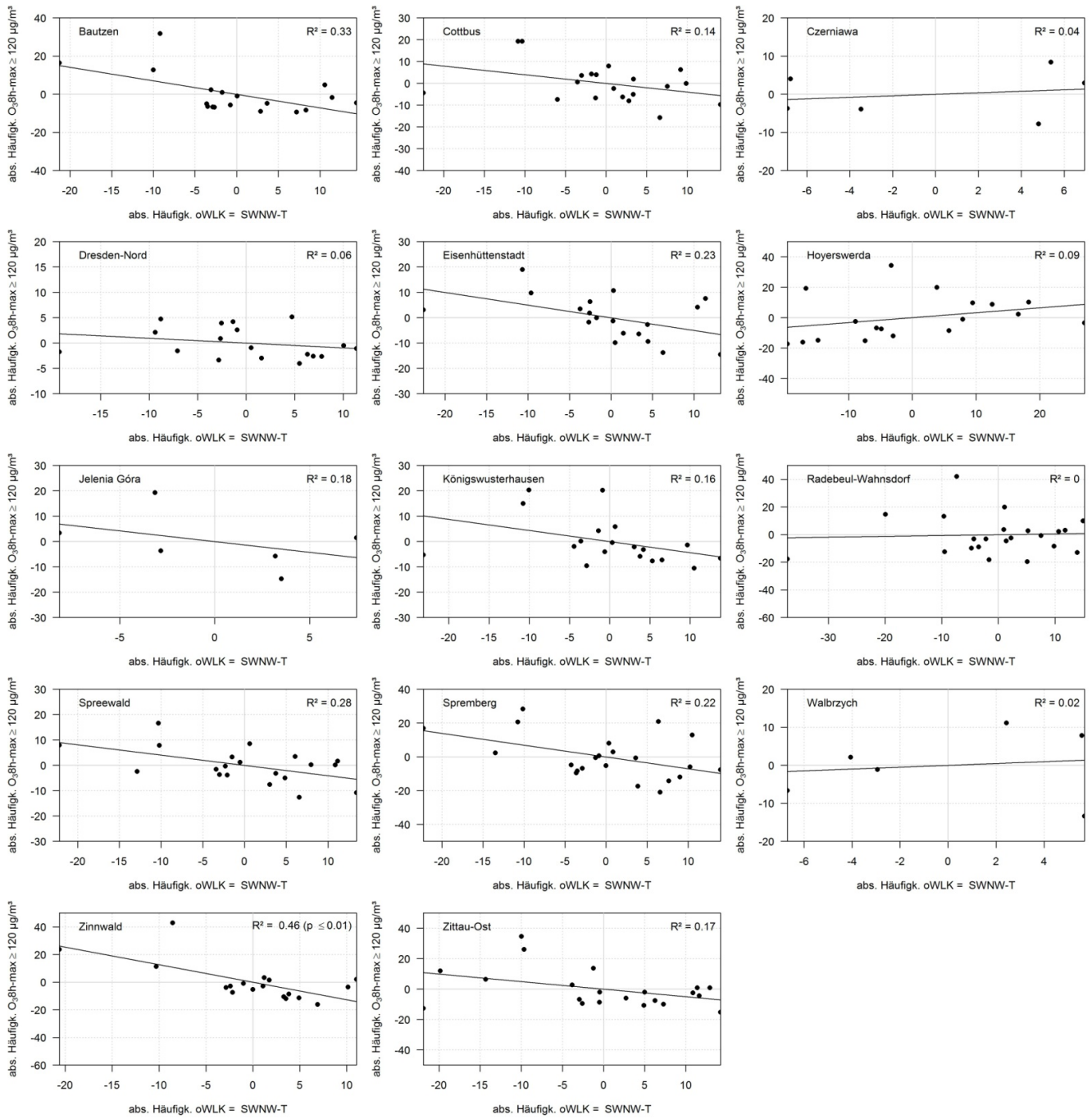
Anhang III-14: Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten von feuchten und in 950 hPa antizyklonalen Zirkulationsformen der Atmosphäre über dem KLAPS-Projektgebiet



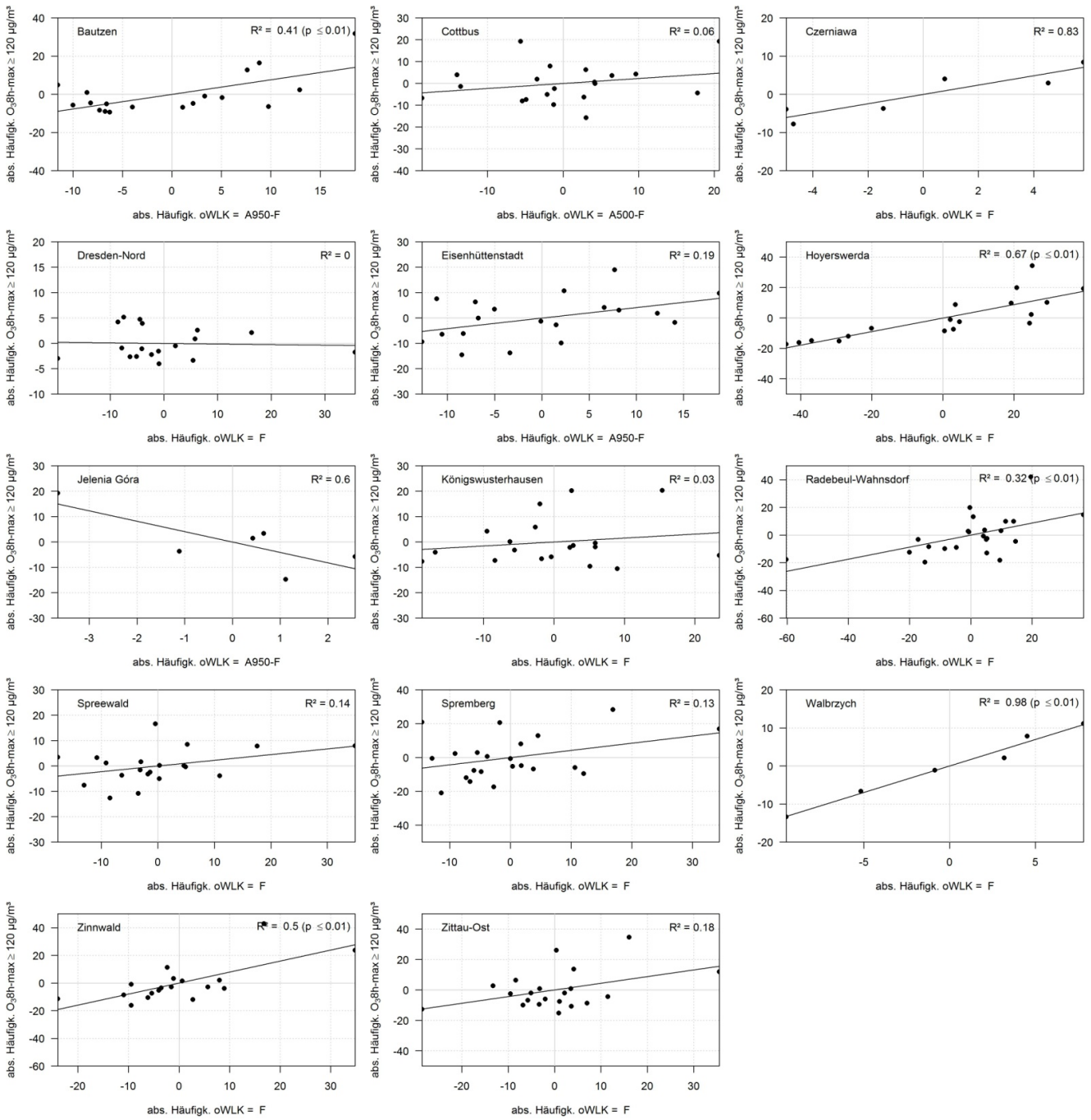
Anhang III-15: Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten von feuchten Westwetterlagen über dem KLAPS-Projektgebiet



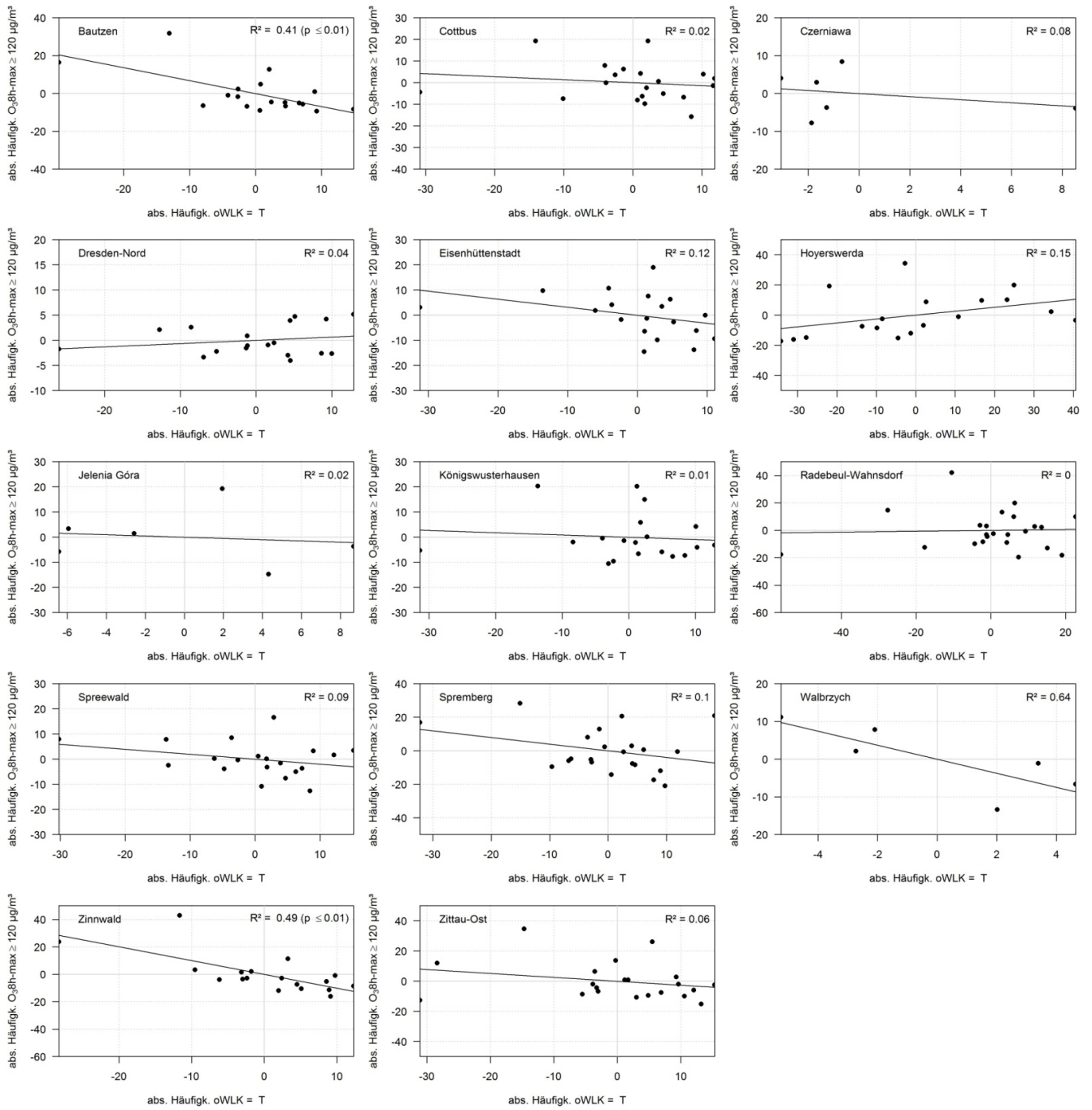
Anhang III-16: Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten von trockenen Westwetterlagen über dem KLAPS-Projektgebiet



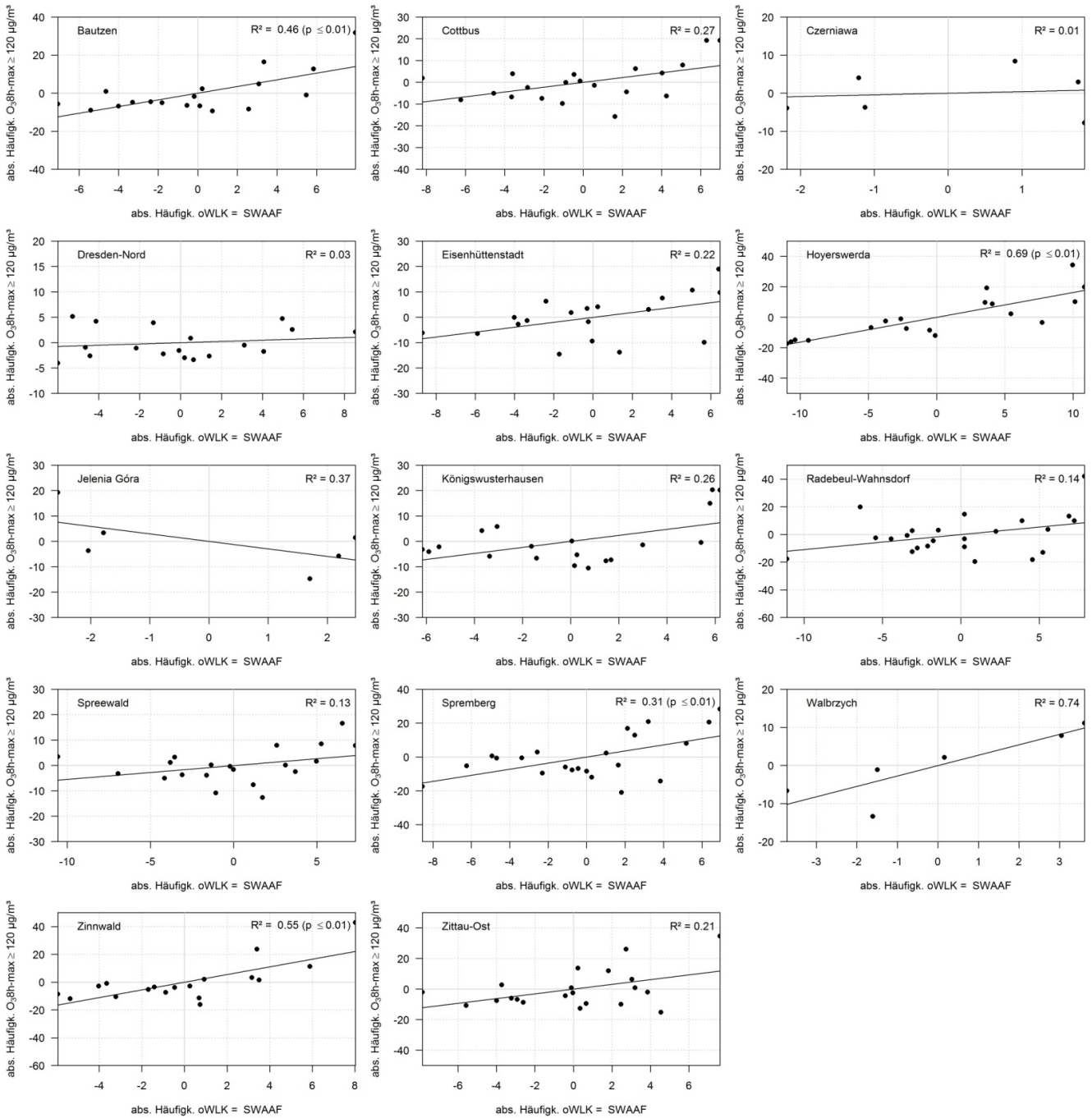
Anhang III-17: Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten von feuchten Wetterlagen über dem KLAPS-Projektgebiet



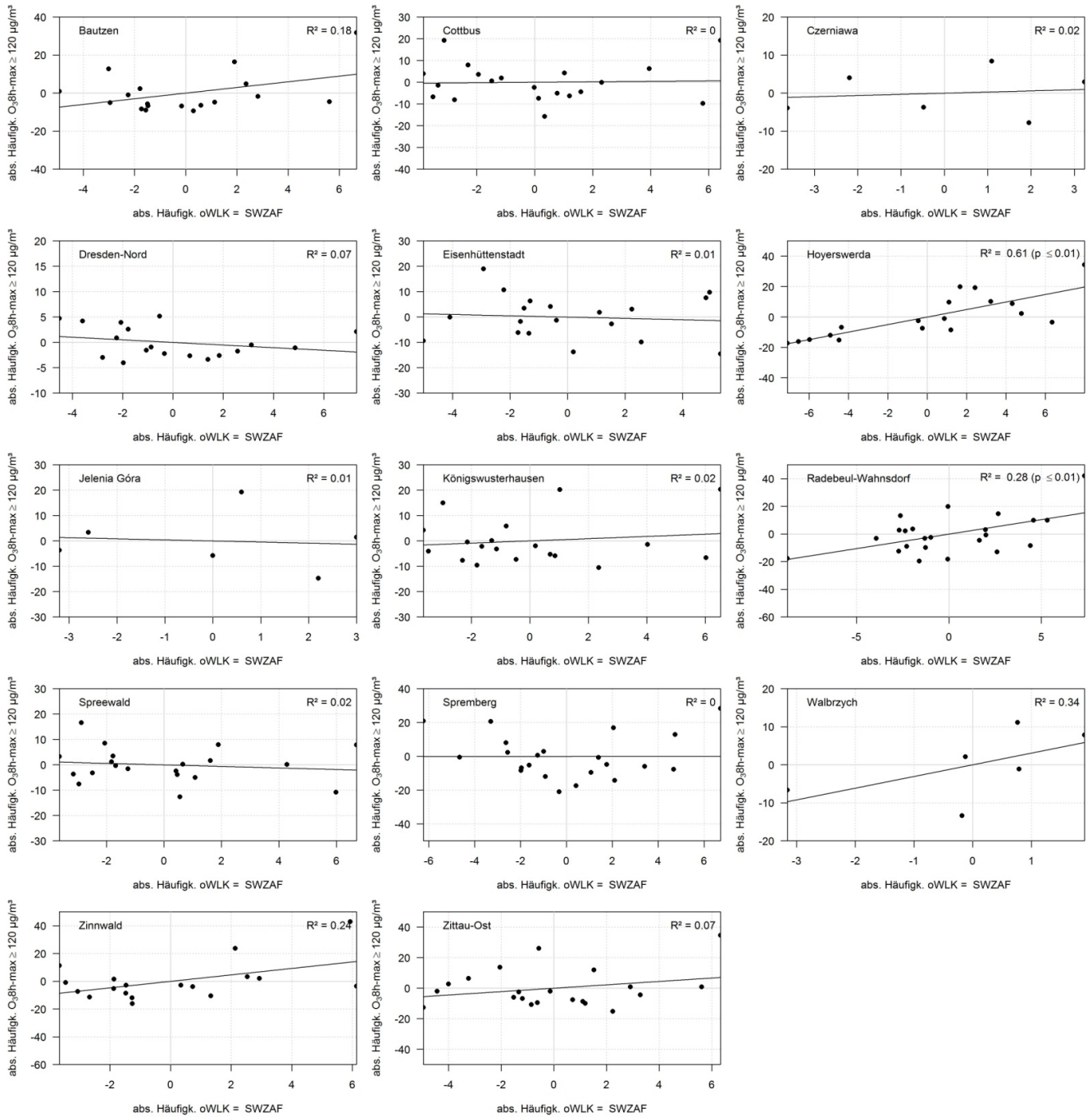
Anhang III-18:-Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten von trockenen Wetterlagen über dem KLAPS-Projektgebiet



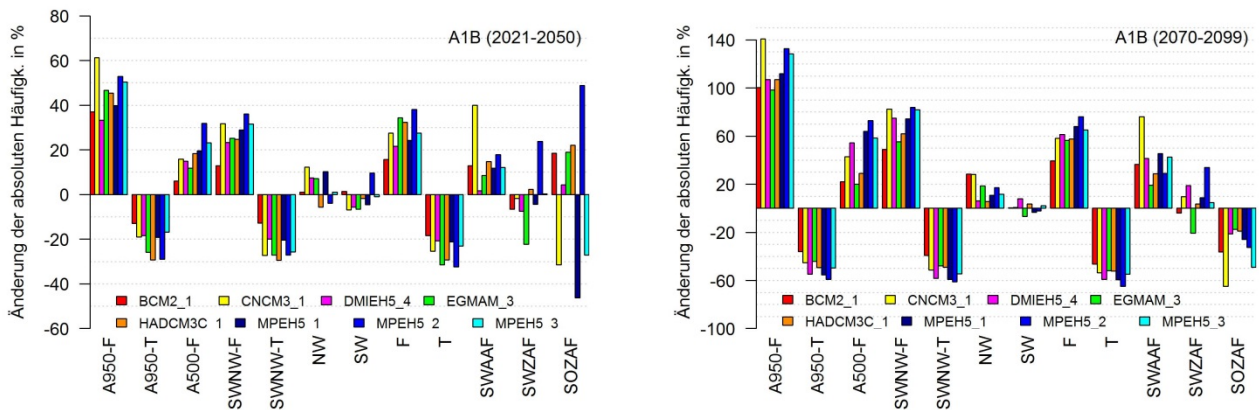
Anhang III-19: Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten der Wetterlage SWAAF (südwestliche Anströmrichtung mit antizyklonalen Strömungsbedingungen in 500 und 950 hPa, charakterisiert als feucht) über dem KLAPS-Projektgebiet



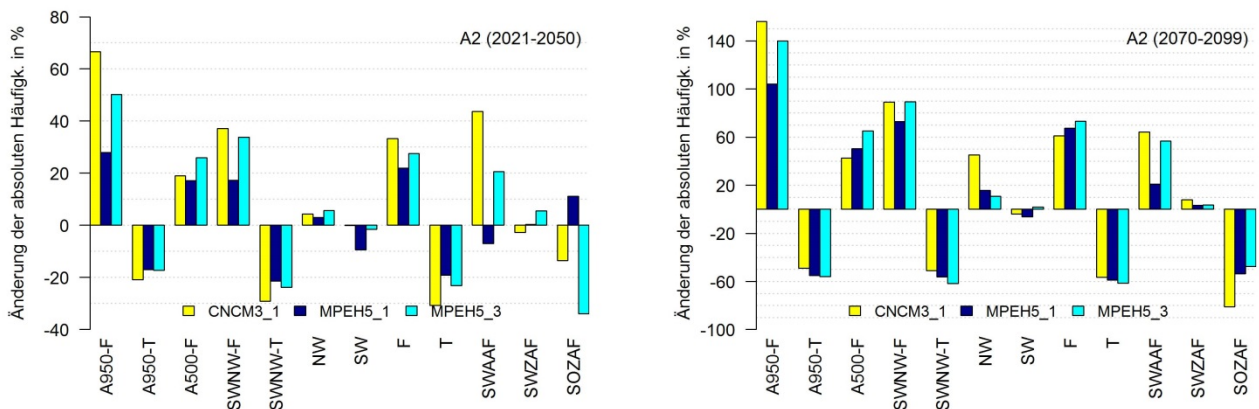
Anhang III-20: Korrelationsanalyse zwischen trendbereinigten jährlichen Ozonüberschreitungseignissen und trendbereinigtem jährlichen Auftreten der Wetterlage SWZAF (südwestliche Anströmrichtung mit zyklonalen Strömungsbedingungen in 950 und antizyklonalen in 500 hPa, charakterisiert als feucht) über dem KLAPS-Projektgebiet



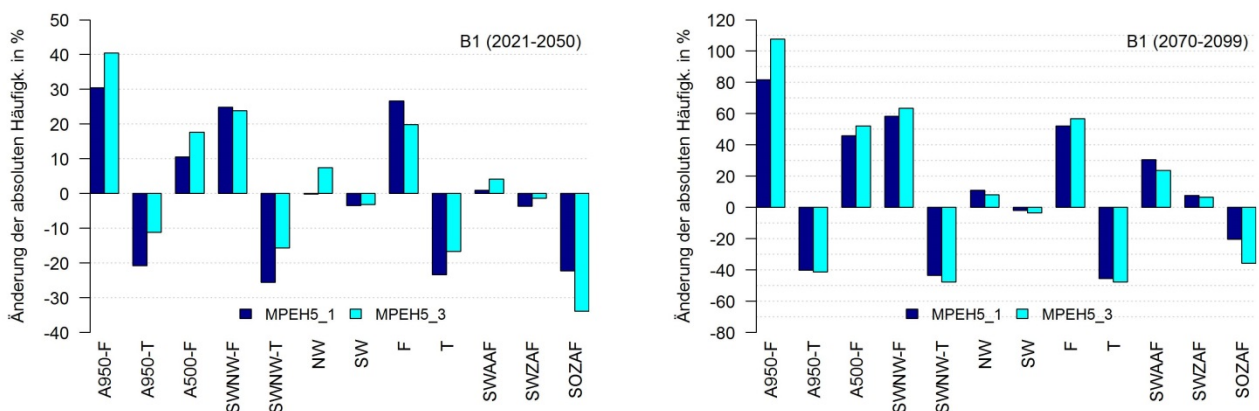
Anhang III-21: Anomalie der Auftretenshäufigkeit von mit Ozonüberschreitungseignissen korrelierenden Klassifikationsindizes unter SRES Szenario A1B für den Zeitraum 2021 bis 2050 (links) und 2050 bis 2099 (rechts). Der Referenzzeitraum bezieht sich auf 1961–1990.



Anhang III-22: Anomalie der Auftretenshäufigkeit von mit Ozonüberschreitungseignissen korrelierenden Klassifikationsindizes unter SRES Szenario A2 für den Zeitraum 2021 bis 2050 (links) und 2050 bis 2099 (rechts). Der Referenzzeitraum bezieht sich auf 1961–1990.



Anhang III-23: Anomalie der Auftretenshäufigkeit von mit Ozonüberschreitungseignissen korrelierenden Klassifikationsindizes unter SRES Szenario B1 für den Zeitraum 2021 bis 2050 (links) und 2050 bis 2099 (rechts). Der Referenzzeitraum bezieht sich auf 1961–1990.



Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Majana Heidenreich, Kathrin Riedel, Stefanie Fischer
Projektleitung: Prof. Dr. Christian Bernhofer
Technische Universität Dresden
Fakultät Umweltwissenschaften, Professur für Meteorologie
01062 Dresden
Telefon: + 49 351 463-31340
Telefax: + 49 351 463-31302
E-Mail: meteorologie@tu-dresden.de
tu-dresden.de/meteorologie

Redaktion:

Annette Pausch, Susann Schwarzak
Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-5103
Telefax: + 49 351 2612-5099
E-Mail: Annette.Pausch@smul.sachsen.de

Titelbild: Michaela Surke

Redaktionsschluss:

18.11.2014

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.