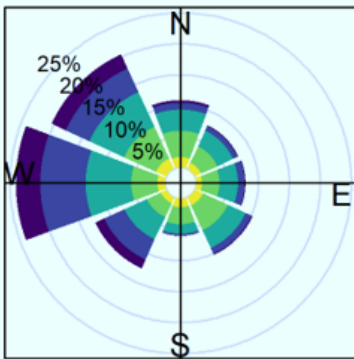


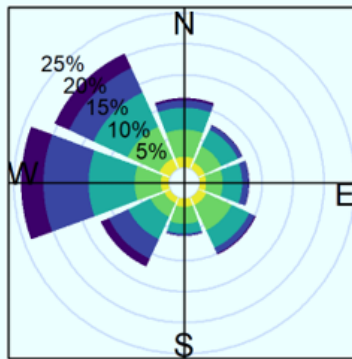
Atmosphärische Austausch- bedingungen in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 18/2025

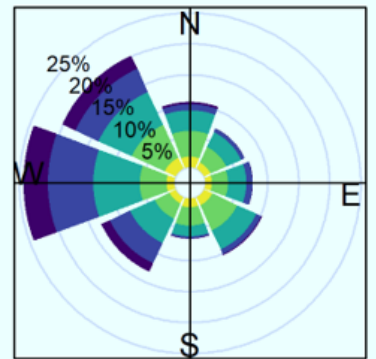
1961-1990



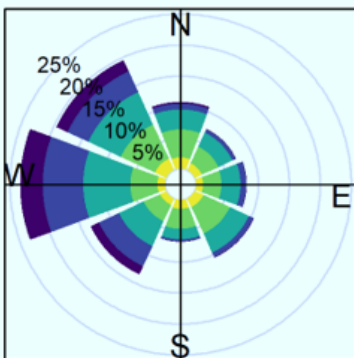
1971-2000



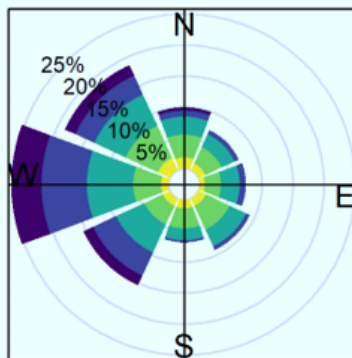
1981-2010



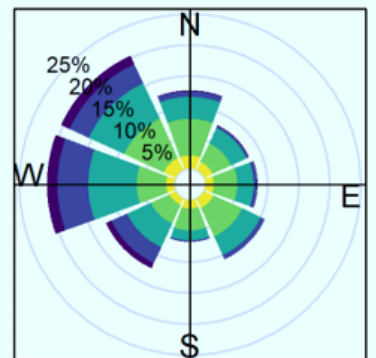
1991-2020



2003-2012



2013-2022



Analyse und Bewertung der atmosphärischen Austauschbedingungen als Einfluss auf die Entwicklung der Luftqualität in Sachsen

Dr. Philipp Körner, Dr. Uta Moderow, iamk GmbH,
Institut für angewandte Meteorologie und Klimatologie

Die detaillierte Auswertung Windrichtungsänderungen können Sie in der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen unter folgendem Link abrufen:

[Atmosphärische Austauschbedingungen in Sachsen - Publikationen - sachsen.de](https://publikationen.sachsen.de)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	10
2	Analyse der atmosphärischen Austauschbedingungen.....	11
2.1	ERA5.....	11
2.1.1	Datengrundlage	11
2.1.2	Analyse der Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in 10 m und 100 m über Grund	14
2.1.3	Vertiefte Untersuchung einzelner Zeitscheiben	31
2.2	Wetterlagen	47
2.3	Radiosondenaufstiege.....	51
3	Modellierung Feinstaub und Stickstoff-konzentrationen.....	55
3.2	Ergebnisse und Auswertung	57
3.2.1	Stickoxide	57
3.2.2	Feinstaub	67
3.3	Zusammenfassung Konzentrationen.....	70
4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	73
	Literaturverzeichnis.....	76
A 1	Anhang.....	78
A 2	Anhang.....	81
A 2.1	Stickstoffmonoxid	81
A 2.2	Stickstoffdioxid	82
A 2.3	Stickoxide	83
A 2.4	Feinstaub PM ₁₀	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des gewählten ERA5-Gebietes mit Darstellung des bodennahen Luftdrucks.	12
Abbildung 2: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde) in 10 m Höhe (links) und 100 m Höhe (rechts) für verschiedene Zeitscheiben.	14
Abbildung 3: Differenz der Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur ganzen Stunde) zwischen 100 m Höhe und 10 m Höhe.....	15
Abbildung 4: Räumliche Darstellung der Änderungen der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund für den Monat Dezember.....	17
Abbildung 5: Räumliche Darstellung der Änderungen der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund für den Monat August.....	18
Abbildung 6: Boxplots für die Windrichtungen (Momentanwerte zur vollen Stunde) in 10 m Höhe (linke Abbildung) und 100 m Höhe (rechte Abbildung) für verschiedene Zeitscheiben.	19
Abbildung 7: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde) in 10 m Höhe (links) und 100 m Höhe (rechts) für verschiedene Zeitscheiben auf Basis der Rasterzellen.....	22
Abbildung 8: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde, nur Monate Juni, Juli, August) in 10 m Höhe für verschiedene Zeitscheiben auf Basis der Rasterzellen für Sachsen, Tagesbedingungen (links) und nächtliche Bedingungen (rechts).....	22
Abbildung 9: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde, nur Monate Dezember, Januar, Februar) in 10 m Höhe für verschiedene Zeitscheiben auf Basis der Rasterzellen für Sachsen, Tagesbedingungen (links) und nächtliche Bedingungen (rechts).....	23
Abbildung 10: Lage und Benennung der Rasterzellen für die 8-teilige Windrosen erstellt und ausgewertet wurden.	25
Abbildung 11: Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 10 m Höhe für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Monate Dezember, Januar und Februar, Rasterzelle Bärenstein.....	26
Abbildung 12: Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 10 m Höhe für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Sommermonate Juni, Juli und August, Rasterzelle Eilenburg.....	27

Abbildung 13:Zusammenfassende Darstellung der Auswertung der Windrosen für die Windverhältnisse 100 m über Grund für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) und die Sommermonate (Juni, Juli, und August).....	29
Abbildung 14:Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 100 m Höhe über Grund für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Monate Dezember, Januar und Februar, Rasterzelle Bärenstein.....	30
Abbildung 15:Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 100 m Höhe über Grund für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Sommermonate Juni, Juli und August, Rasterzelle Eilenburg.	31
Abbildung 16:Änderungen in der Häufigkeit von Windrichtungssektoren zwischen den Zeit- scheiben 2003–2012 und 2013–2022 für 10 m über Grund.....	33
Abbildung 17:Wie Abbildung 1 jedoch mit anderer Einteilung hinsichtlich der Farbkodierung.	34
Abbildung 18:Änderungen in der Häufigkeit von Windrichtungssektoren zwischen den Zeit- scheiben 2003–2012 und 2013–2022 für 100 m über Grund.....	37
Abbildung 19:Wie Abbildung 3 jedoch mit anderer Einteilung hinsichtlich der Farbkodierung.	38
Abbildung 20:Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Dezember, Januar, Februar.	40
Abbildung 21:Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Juni, Juli, August.	41
Abbildung 22:Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Dezember, Januar, Februar.	43
Abbildung 23:Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Juni, Juli, August.....	44
Abbildung 24:Entwicklung der Auftretenshäufigkeit von subjektiv klassifizierten GWL 1881 – 2022.....	49
Abbildung 25:Vergleich der Wetterlagenverteilungen für die Zeitscheiben 2003–2012 und 2013– 2022 ohne Unterscheidung in Sommer und Winter (Gesamtjahr).....	50
Abbildung 26:Taylordiagramme für den Vergleich von ERA5-Daten und Radiosondendaten für die Jahre 2003–2020 und für die Uhrzeiten 00:00 UTC und 12:00 UTC.....	53

Abbildung 27: Vergleich der Zeitreihen der Radiosondendaten mit der Zeitreihe der entsprechenden Rasterzelle der ERA5-Daten für die Station Lindenberg und das Jahr 2010 für das Druckniveau 850 hPa.	54
Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert (Anlernzeitraum 2003–2012).....	58
Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert (Anlernzeitraum 2003–2017).....	59
Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	60
Abbildung 31: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	61
Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO ₂ -Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert.	62
Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO ₂ -Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	63
Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO ₂ -Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	64
Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO _x -Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert.	65
Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO _x -Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	66
Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO _x -Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	67
Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM ₁₀ -Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert.	68
Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM ₁₀ -Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	69
Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM ₁₀ -Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.	70
Abbildung 41: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für verschiedene fünfjährige Zeitscheiben in Referenz zu 1988–1992 für die Sommermonate Juni, Juli und August sowie die Windrichtungen in 100 m Höhe.	78

Abbildung 42: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für verschiedene fünfjährige Zeitscheiben in Referenz zu 1988–1992 für die Sommermonate Dezember, Januar und Februar sowie die Windrichtungen in 100 m Höhe.	79
Abbildung 43: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für verschiedene fünfjährige Zeitscheiben in Referenz zu 1988–1992 für die Gesamtjahre sowie die Windrichtungen in 100 m Höhe.	80
Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	81
Abbildung 45: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	81
Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO ₂ -Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert.	82
Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO ₂ -Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	82
Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO ₂ -Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	83
Abbildung 49: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO _x -Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert.	83
Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO _x -Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	84
Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO _x -Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	84
Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM ₁₀ -Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert.	85
Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM ₁₀ -Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	85
Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM ₁₀ -Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick, über die gewählten ERA5-Daten.	13
Tabelle 2: Großwetterlagen (GWL) nach HESS und BREZOWSKY.....	48
Tabelle 3: Kennwerte aller Stationen aller Messgrößen mit Anlernzeit 2003–2012 und Modellierungszeit 2013–2022	71
Tabelle 4: Übersicht über gemessenen und modellierten Rückgang der Konzentrationen.....	72
Tabelle 5: Kennwerte als Stationsmittel für alle Größen	87
Tabelle 6: Kennwerte Stickstoffmonoxidkonzentration stationsweise (Modellierungszeit: 2013–2022).....	88
Tabelle 7: Kennwerte Stickstoffdioxidkonzentration stationsweise (Modellierungszeit: 2013–2022).....	89
Tabelle 8: Kennwerte Stickoxidkonzentration stationsweise (Modellierungszeit: 2013–2022)	90
Tabelle 9: Kennwerte Feinstaub Stationsweise (Modellierungszeit: 2013–2022)	91

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
DOY	Tag des Jahres (Day Of Year)
E	Ost
ERA	Europäische Reanalyse
GWL	Großwetterlage
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
N	Nord
NE	Nordost
NW	Nordwest
PM ₁₀	Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner 10 µm
S	Süd
SE	Südost
SW	Südwest
W	West
WD	Windrichtung
WS	Windgeschwindigkeit
UTC	Coordinated Universal Time (Koordinierte Weltzeit)

1 Einleitung

In den letzten ca. 10 Jahren wurde durch das LfULG ein abnehmender Trend der Luftschadstoffkonzentrationen festgestellt, der insbesondere für Feinstaub nur teilweise auf den Rückgang der Emissionen in Sachsen zurückgeführt werden kann. Seit einigen Jahren treten kaum noch ausgeprägte Feinstaubepisoden aufgrund von Inversionswetterlagen auf.

In diesem Bericht wurde untersucht, ob und inwieweit der gemessene Rückgang durch ein eventuell verändertes Windregime bzw. atmosphärische Änderungen verursacht wurde. Möglich ist zudem auch ein Rückgang der Emissionen in Tschechien und Polen, was sich ebenfalls positiv auf die Hintergrundbelastung in Deutschland bzw. Sachsen auswirkt. Hierbei wurde ein Modell basierend auf maschinellem Lernen genutzt, um die Ursachen des Rückgangs der Immissionen invers zu bestimmen. Dieses Modell ermöglicht Aussagen, ob und wie sich die Immissionen in Abhängigkeit von der Wetterlage und der Anströmrichtung verändert haben. Dadurch werden Rückschlüsse auf mögliche, veränderte Emissionen möglich.

2 Analyse der atmosphärischen Austauschbedingungen

Welche Schadstoffkonzentration sich an einem bestimmten Ort einstellt ist nicht nur von den Emissionen abhängig, sondern auch davon wie diese verfrachtet werden (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Volumen, in das Schadstoffe in der Luft eingemischt werden können). Je nachdem welche Bedingungen sich hier einstellen, können sich z. B. Senkenvorgänge (Entfernung von Schadstoffstoffen aus der Atmosphäre, z. B. durch Deposition) oder z. B. der Transport über weite Strecken ändern. Um hierzu Aussagen zu erlangen ist es daher notwendig das Windfeld zu analysieren. Für die Analyse dieser atmosphärischen Austauschbedingungen werden im Rahmen dieser Arbeit ERA5-Daten (HERSBACH et al. 2020) verwandt. Dies sind Modelldaten, die sich durch eine Assimilierung einer sehr hohen Anzahl von Messdaten auszeichnen und eine Betrachtung von Gesamtsachsen sowie angrenzenden Regionen und Staaten flächendeckend erlauben. Im Folgendem werden zunächst die Windbedingungen für ein Gebietsausschnitt, in das Sachsen eingebettet ist betrachtet und anschließend detaillierter für Sachsen selbst. Abschließend werden die ERA5-Daten mit Wetterlagen nach HESS und BREZOWSKY (HESS und BREZOWSKY 1952, GERSTENGARBE und WERNER 2005) in Beziehung gesetzt sowie mit ausgewählten Radiosondendaten verglichen, um die Ergebnisse auf Basis der ERA5-Daten zu plausibilisieren.

2.1 ERA5

2.1.1 Datengrundlage

Für die Betrachtung des Windfeldes werden ERA5-Daten (HERSBACH et al. 2020) genutzt, die als Rasterdaten vorliegen. Zunächst wurde das Gebiet definiert, welches in den folgenden Arbeiten betrachtet werden soll (Abbildung 1). Das Gebiet umfasst 20 Rasterzellen in der y- Richtung und 28 Rasterzellen in der x-Richtung (insgesamt 560 Rasterzellen). Die Kantenlänge der Rasterzellen beträgt in beiden Richtungen $0,25^\circ$ (ca. 30 km). In Abbildung 1 ist zusätzlich die Lage der Radiosondenstationen verzeichnet, deren Daten ergänzend genutzt wurden. Für die Darstellung wurde das Koordinatensystem WGS 84 (EPSG 4326) gewählt, da in diesem System die Daten bei Copernicus¹ entsprechend abgefragt werden müssen.

¹ <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>, zuletzt angesehen am 07.08.2023

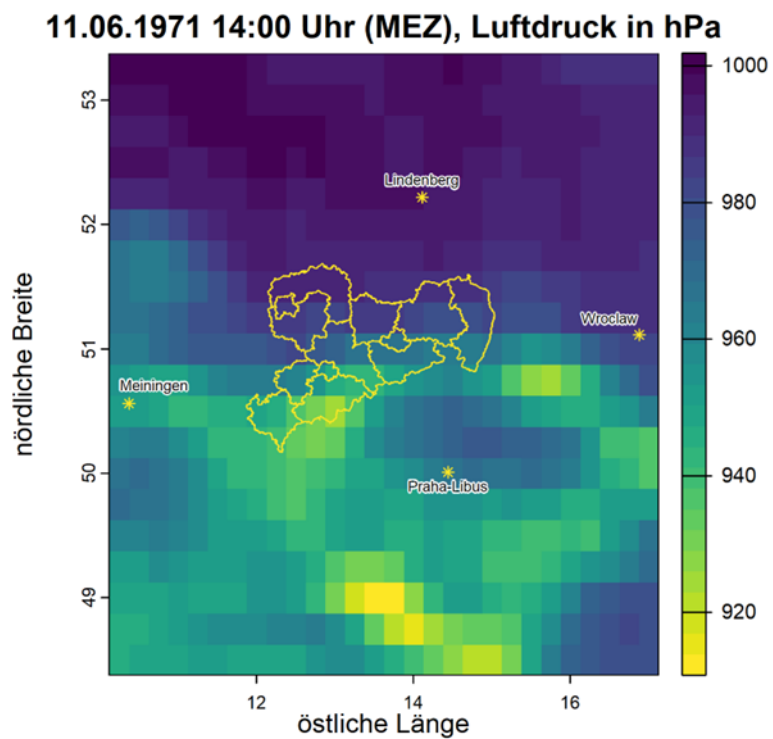


Abbildung 1: Darstellung des gewählten ERA5-Gebietes mit Darstellung des bodennahen Luftdrucks.

Die Namen bezeichnen die genutzten Radiosondenstationen.

Tabelle 1: Überblick, über die gewählten ERA5-Daten.

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit	Zweck/Ziel	Ab. 2	Ab. 3
<i>Daten in 10 m und 100 m Höhe</i>					
u	Ost-Komponente Wind	m s^{-1}	Analyse Windfeld	X	X
v	Nord-Komponente Wind	m s^{-1}	Analyse Windfeld	X	X
<i>Bodennahe Daten bzw. Daten in anderen Höhen</i>					
p	Bodennaher Luftdruck	Pa	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre		X
SW	Einfallende, kurzwellige Strahlung auf eine	J m^{-2}	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre	X	X
T_{air}	Lufttemperatur in 2 m Höhe	K	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre		X
T_{dew}	Taupunkttemperatur in 2 m Höhe	K	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre		x
P	Gesamtniederschlag	m	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre		X
CAPE	für Konvektion potentiell zur Verfügung	J kg^{-1}	Information zu Turbulenz bzw. Durchmischung Atmosphäre		X
NTSS	Nordwärts-gerichtete turbulente	N m^{-2}	Information zu Turbulenz bzw. Durchmischung Atmosphäre		X
ETSS	Ostwärts-gerichtete turbulente	N m^{-2}	Information zu Turbulenz bzw. Durchmischung Atmosphäre		X
u^*	Reibungswindgeschwindigkeit	m s^{-1}	Information zu Turbulenz bzw. Durchmischung Atmosphäre		X
z_{mix}	Mischungsschichthöhe	m	Information zu Turbulenz bzw. Durchmischung Atmosphäre		X
SW_{UV}	Einfallende, ultraviolette Strahlung auf eine	J m^{-2}	Information zur Luftchemie		X
<i>Daten in den Druckniveaus 1000 hPa, 975 hPa, 950 hPa, 925 hPa, 900 hPa, 875 hPa, 850 hPa, 825 hPa, 800 hPa, 775 hPa</i>					
u	Ost-Komponente Wind	m s^{-1}	Analyse Windfeld	X	X
v	Nord-Komponente Wind	m s^{-1}	Analyse Windfeld	X	X
RH	Relative Feuchte	%	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre		X
spH	Spezifische Feuchte	kg kg^{-1}	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre		X
T_{air}	Lufttemperatur	K	allg. Beschreibung Zustand Atmosphäre		X
O_3	Ozon- Mischungsverhältnis	kg kg^{-1}	Information zur Luftchemie		X
vort	Wirbelstärke	s^{-1}	Information zu Turbulenz bzw. Durchmischung Atmosphäre		X
vv	Vertikale Geschwindigkeit	Pa s^{-1}	Information zu Turbulenz bzw. Durchmischung Atmosphäre		X

AP steht für Arbeitspaket. Ab. 2 = Verwendung im Abschnitt 2; Ab. 3 = Verwendung im Abschnitt 3

Die aufgelisteten Daten erlauben grundsätzlich eine Beschreibung des Windfeldes und der Durchmischung der Atmosphäre in dem definierten Projektgebiet. Darüber hinaus können mittels der Variablen Ozon, ultraviolette Strahlung und Niederschlag potentiell Bildungs- bzw. Senkenbedingungen der zu untersuchenden luftgetragenen Schadstoffe mit in das, in Abschnitt 3 beschriebene, Modell integriert werden.

2.1.2 Analyse der Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in 10 m und 100 m über Grund

2.1.2.1 Gesamtes ERA5-Gebiet – Windgeschwindigkeiten

In einem ersten Schritt wurde die Windgeschwindigkeit (Momentanwerte zur vollen Stunde) für das gesamte gewählte ERA5-Gebiet betrachtet. Hierzu wurde die Windgeschwindigkeit (WS) aus der Windkomponente v (Nord-Süd-Komponente) und der Windkomponente u (Ost-West-Komponente) berechnet. Aus den Windkomponenten u und v wurde die Windrichtung errechnet. Es werden die Zeitscheiben 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 sowie die Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 betrachtet.

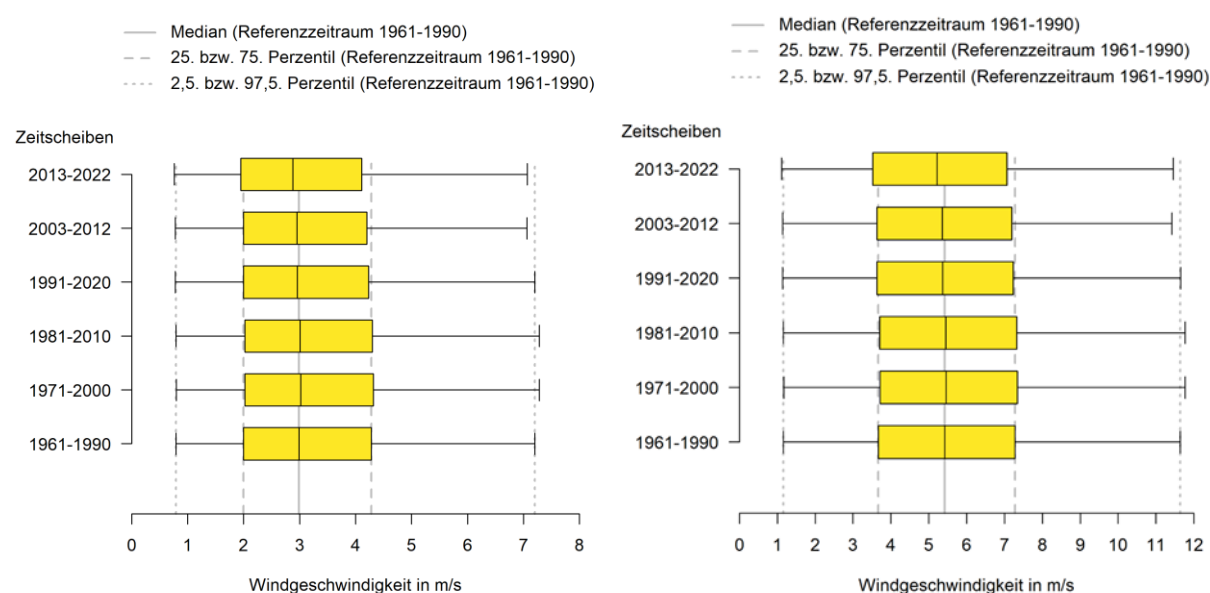


Abbildung 2: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde) in 10 m Höhe (links) und 100 m Höhe (rechts) für verschiedene Zeitscheiben.

Die grauen senkrechten Linien geben die entsprechenden Perzentile für die Zeitscheibe 1961–1990 an. Dargestellt ist der Median (senkrechter schwarzer Strich in den Boxen), das 25. und 75. Perzentil (Enden der gelben Boxen) sowie das 2,5. und 97,5.-Perzentil (Whisker). Es ist die unterschiedliche Einteilung der x-Achse zu beachten

Für die 30-jährigen Zeitscheiben zeigen sich nur sehr geringe Unterschiede in den Perzentilen der Windgeschwindigkeiten (Abbildung 2). Bei den zehnjährigen Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 zeigt

sich, dass die Windgeschwindigkeiten in der zweiten dieser beiden Zeitscheiben etwas geringer ausfallen. Diese beiden Zeitscheiben sind in der Zeitscheibe 1991–2020 ganz bzw. bis auf zwei Jahre enthalten. Ob die etwas geringeren Windgeschwindigkeiten der zehnjährigen Zeitscheiben nur eine mögliche Variabilität aufzeigen oder einen generellen Trend lässt sich abschließend hier nicht feststellen, da die Änderungen klein sind. Weiterhin handelt es sich um Modelldaten die mit typischen Unsicherheiten von Modelldaten einhergehen. Für die Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe ist die relative Entwicklung in den Perzentilen mit den verschiedenen Zeitscheiben sehr ähnlich zu den Ergebnissen der Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe. (Abbildung 3) Abbildung 3 zeigt die Differenzen in den Windgeschwindigkeiten zwischen 10 m und 100 m Höhe. Die Differenzen wurde jeweils gebildet als Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe minus Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe.

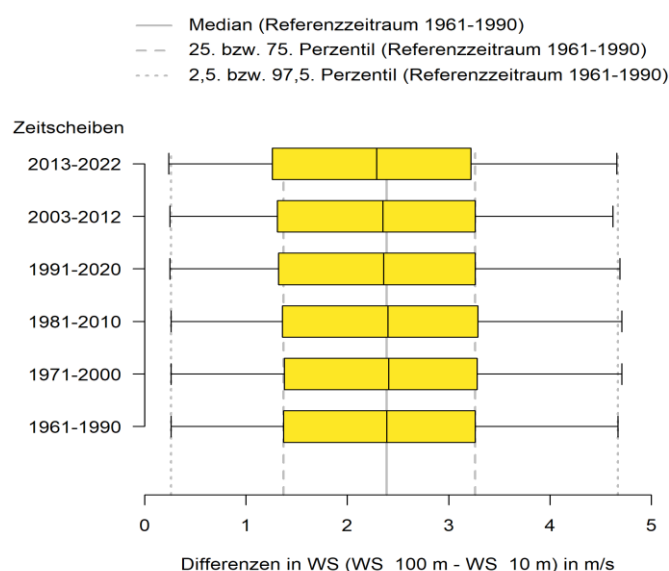


Abbildung 3: Differenz der Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur ganzen Stunde) zwischen 100 m Höhe und 10 m Höhe.

Die grauen senkrechten Linien geben die entsprechenden Perzentile für die Zeitscheibe 1961–1990 an. Dargestellt ist der Median (senkrechter schwarzer Strich in den Boxen), das 25. und 75. Perzentil (Enden der gelben Boxen) sowie das 2,5. und 97,5.-Perzentil (Whisker).

Wie für die getrennte Betrachtung der beiden Höhenniveaus zeigt sich, dass es nur sehr kleine Unterschiede in den Perzentilen zwischen den 30-jährigen Zeitscheiben gibt. Für die beiden zehnjährigen Zeitscheiben deutet sich an, dass die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe gegenüber der Windgeschwindigkeit in 100 m etwas größer geworden ist, was sich in einer Verschiebung der mittleren Perzentile zu kleineren Werten zeigt.

Eine weitere Frage ist, ob sich ein räumliches Muster bei den Änderungen der Windgeschwindigkeiten ergibt. Für diese Analyse wurden für jede Zeitscheibe mittlere Monatswerte für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) und die Sommermonate (Juni, Juli und August) gebildet. Es werden hierzu die Unterschiede als Änderung in Prozent gegenüber der Zeitscheibe 1961–1990 (Referenzzeitscheibe) genutzt. Diese sind berechnet worden als $\text{Zeitscheibe X minus Referenzzeitscheibe}$ geteilt durch die Referenzzeitscheibe multipliziert mit 100. Negative (positive) Werte bedeuten eine Abnahme (Zunahme) der Windgeschwindigkeiten gegenüber der Zeitscheibe 1961–1990. Die Auswertung hierfür beschränkt sich im Folgendem auf die Unterschiede zwischen den beiden Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022. Betrachtet man die genannten Monate getrennt, so zeigt sich eine innerjährliche Variabilität in den Unterschieden zwischen der Zeitscheibe 2003–2012 und der Zeitscheibe 2013–2022. In der Zeitscheibe 2013–2022 sind die Windgeschwindigkeiten in den Monaten Juni, Juli und August im Mittel kleiner, für die Monate Dezember, Januar und Februar im Mittel größer als in der Zeitscheibe 2003–2012. Dies trifft sowohl für das Niveau 10 m über Grund als auch das Niveau in 100 m über Grund zu. Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den Monat Dezember für die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über Grund. In der Zeitscheibe 2013–2022 sind die Windgeschwindigkeiten für Dezember im Mittel größer als in der Zeitscheibe 2003–2012. Von den betrachteten Wintermonaten zeigt der Februar die größten Zunahmen, während für den Januar im Mittel die Unterschiede zwischen beiden Zeitscheiben am geringsten ausfallen. Für die Monate Juni, Juli und August zeigt sich ein sehr einheitliches Bild. Für alle diese Monate sind geringere Windgeschwindigkeiten in der Zeitscheibe 2013–2012 im Vergleich zur Zeitscheibe 2003–2022 zu verzeichnen. Die Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den Monat August. Dies ist der Monat, der in der Zeitscheibe 2013–2022 im Mittel die geringsten Windgeschwindigkeiten aufweist. Da beide Zeiträume 2003–2012 und 2013–2022 auch von Sturmereignissen geprägt waren, wurde geprüft ob eventuell extreme Ereignisse die mittleren Unterschiede bestimmen. Hierzu wurden für jede Zeitscheibe jeweils die Windgeschwindigkeiten, die unter das 2,5.-Perzentil fielen bzw. die Windgeschwindigkeiten, die größer als das 97,5.-Perzentil waren, zusätzlich statistisch betrachtet. Für diese Gruppen wurden für jede Zeitscheibe das 2,5.-, 25.-, 50.-, 75.- und das 97,5. Perzentil bestimmt. Die Ergebnisse bestätigen insgesamt, dass für den Winter insgesamt gesehen (Monate Dezember, Januar, Februar) eher eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 zu verzeichnen ist. Eine Ausnahme stellt der Monat Januar dar, der jedoch durch die Änderungen in den beiden anderen Monaten überkompensiert wird. Die Untersuchungen der oberen 2,5 % und der unteren 2,5 % der Daten pro Zeitscheibe für den Sommer (Monate Juni, Juli, August) stützen die Aussage, dass im Mittel im Sommer die Windgeschwindigkeit in der Zeitscheibe 2013–2022 geringer ausfielen als in der Zeitscheibe 2003–2012. Für die Betrachtung der Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe über Grund können die Aussagen zu den mittleren Änderungen als auch aus der ergänzenden Analyse der oberen und unteren 2,5 %-Daten analog übernommen werden.

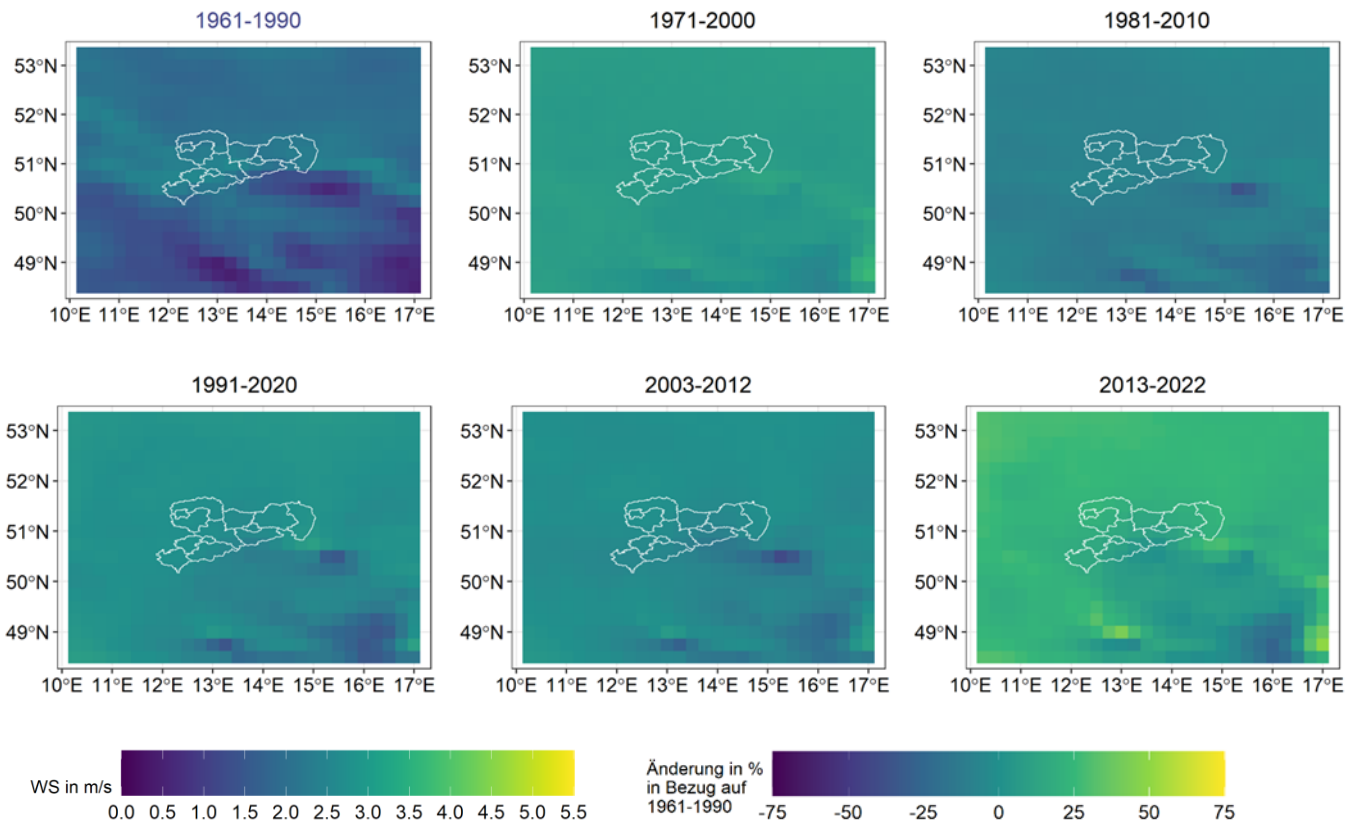


Abbildung 4: Räumliche Darstellung der Änderungen der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund für den Monat Dezember.

Für die Zeitscheibe 1961–1990 sind die Absolutwerte der Windgeschwindigkeit angegeben und es gilt die untere linke Legende. Für alle anderen Zeitscheiben sind die Änderungen in Prozent in Bezug auf die Zeitscheibe 1961–1990 angegeben und es gilt die untere rechte Legende.

Für die räumlichen Unterschiede ist zu verzeichnen, dass es nördlich von Sachsen keine bedeutenden Unterschiede in den Änderungen gibt. Hingegen fällt auf, dass die größten Änderungen zumeist südlich und südöstlich von Sachsen zu verzeichnen sind, was sowohl für die Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund als auch für die Windgeschwindigkeiten in 100 m über Grund zutrifft. Diese Bereiche mit räumlich variablen Unterschieden lassen sich mit der Lage von Gebirgszügen korrelieren. Gebirge stellen für Strömungen ein Hindernis dar, wodurch diese modifiziert werden. Wie die Strömung modifiziert wird hängt u. a. von der Höhe und Ausdehnung des Hindernisses (Gebirge), der Anströmrichtung, aber auch der atmosphärischen Stabilität ab (CARRUTHERS und HUNT 1990 zitiert in SCHOECKEL 2005). Daher hat eine Änderung eines Windfeldes insgesamt andere Ausprägungen im Bereich von Gebirgen als über flachem Gelände und findet daher auch Ausdruck in den Differenzen zwischen den Zeitscheiben. Darüber hinaus ist es grundsätzlich möglich, dass die Windgeschwindigkeit durch eine sich ändernde Vegetation beeinflusst wird. Zwar werden innerjährliche Variationen der Vegetation in ERA5 abgebildet, jedoch keine zwischenjährlichen Variationen (DUVEILLER et al. 2023). Dies bedeutet, dass die innerjährliche Variation der Vegetation für alle Jahre gleich ist und somit als Ursache für die hier festgestellten

Unterschiede in den räumlichen Änderungen wegfällt. Möglich ist jedoch, dass sich Messstandorte von Messdaten, die in ERA5 assimiliert werden, mit der Zeit sich in ihrer Charakteristik ändern, was potentiell die Messergebnisse beeinflussen kann. Ob und wie dies Einfluss auf die ERA5-Daten hat, lässt sich im Rahmen dieser Studie nicht klären.

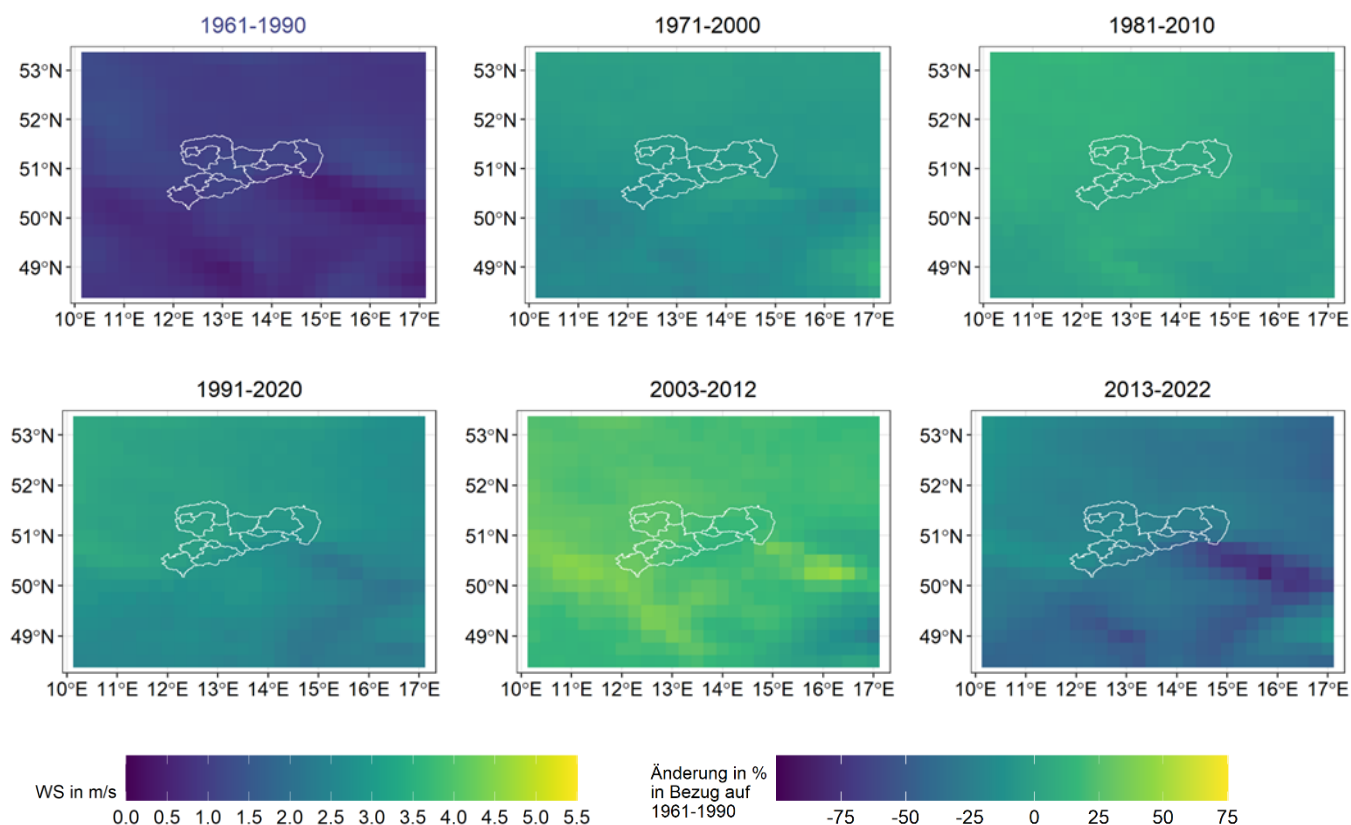


Abbildung 5: Räumliche Darstellung der Änderungen der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund für den Monat August.

Für die Zeitscheibe 1961–1990 sind die Absolutwerte der Windgeschwindigkeit angegeben und es gilt die untere linke Legende. Für alle anderen Zeitscheiben sind die Änderungen in Prozent in Bezug auf die Zeitscheibe 1961–1990 angegeben und es gilt die untere rechte Legende.

2.1.2.2 Gesamtes ERA5-Gebiet – Windrichtungen

Abbildung 6 zeigt Abbildungen für die Windrichtungen in 10 m und 100 m Höhe. Die Unterschiede zwischen den Zeitscheiben bezüglich ihrer Perzentile sind klein. Graphisch hebt sich nur eine Verschiebung des Medians Richtung 180° für die drei jüngsten betrachteten Zeitscheiben ab (1991–2020, 2003–2012, 2013–2022). Eine Analyse mit Histogrammen mit einer Klassenbreite von 5° ergibt eine zweigipflige Windrichtungsverteilung mit einem Maximum für westliche Richtungen und einem zweiten, kleineren Maximum für östliche Richtungen. Diese Verteilung ändert sich zwischen den Zeitscheiben grundsätzlich nicht. Für die Zeitscheibe 2003–2022 ergibt sich eine leichte Abnahme von westlichen und nördli-

chen Richtungen zugunsten von östlichen-Richtungen. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Windrichtungen in 100 m Höhe gegenüber den Windrichtungen in 10 m Höhe um wenige Grad im Uhrzeigersinn versetzt sind.

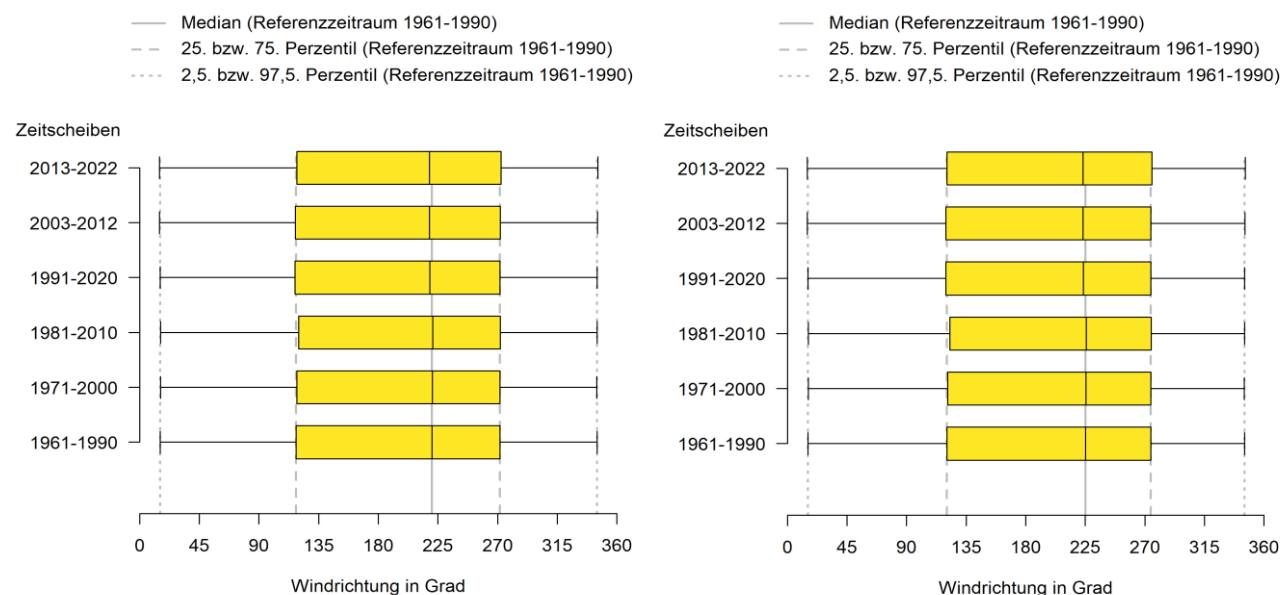


Abbildung 6: Boxplots für die Windrichtungen (Momentanwerte zur vollen Stunde) in 10 m Höhe (linke Abbildung) und 100 m Höhe (rechte Abbildung) für verschiedene Zeitscheiben.

Die grauen senkrechten Linien geben die entsprechenden Perzentile für die Zeitscheibe 1961–1990 an. Dargestellt ist der Median (senkrechter schwarzer Strich in den Boxen), das 25. und 75. Perzentil (Enden der gelben Boxen) sowie das 2,5. und 97,5.-Perzentil (Whisker).

2.1.2.3 Gesamtes ERA5-Gebiet – Grenzschichthöhe und Turbulenz

Für die Beurteilung des vertikalen Austausches und dessen Änderungen mit der Zeit, als eine mögliche Ursache für die festgestellten geringeren Immissionen in der letzten Dekade, wurden die Höhe der planetaren Grenzschicht (Mischungsschichthöhe) und die Reibungswindgeschwindigkeit betrachtet. Diese Daten wurden dem ERA5-Datensatz entnommen und wurden für die Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 analysiert. Für die Analyse wurden die Daten in Tag und Nacht unterteilt. Für den Tag wurden die Zeitpunkte ausgewählt, für die alle Rasterzellen des gesamten ERA5-Gebietes eine kurzweilige, einfallende Strahlung größer als 0 J m^{-2} aufwiesen. Für die Nacht wurden die Zeitpunkte ausgewählt, für die alle Rasterzellen des gesamten ERA5-Gebietes eine kurzweilige, einfallende Strahlung von 0 J m^{-2} aufwiesen. Diese Betrachtung wurde zum einen für die jeweilige Zeitscheibe durchgeführt und zusätzlich für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) und die Sommermonate (Juni, Juli, August).

Die Grenzschichthöhe bestimmt über welches Volumen Schadstoffe eingemischt werden können. Fällt eine bestimmte Schadstoffmenge mit einer großen (kleinen) Grenzschichthöhe zusammen, so können

sich Schadstoffe potentiell über ein größeres (kleineres) Volumen verteilen, was zu geringeren (höheren) Konzentrationen führen kann. Die Grenzschichthöhe selbst ändert über den Tag und ist typischerweise nachts kleiner als am Tag. Sie ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig (z. B. Einstrahlung, Feuchte, Ausprägung der Turbulenz). Für die Grenzschichthöhe ergibt sich kein eindeutiges Änderungssignal beim Vergleich beider Zeitscheiben. Für nächtliche Bedingungen zeigen die Wintermonate für das 2,5.-, 25.- und 50.- Perzentil leichte Abnahmen, während die oberen Perzentile (75.-Perzentil, 97,5.- Perzentil) leichte Zunahmen zeigen in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012. Für die Sommermonate sind die Grenzschichthöhen in der zweiten Zeitscheibe (2013–2022) für nächtliche Bedingungen kleiner. Möglicherweise spielen hier Bedingungen eine Rolle, die eine hohe Ausstrahlung (trockene Atmosphäre) und somit geringere Grenzschichthöhen bevorteilen. Für Tagesbedingungen zeigen sich sowohl in den Sommermonaten als auch in den Wintermonaten leichte Zunahmen für das 75 und 97,5 Perzentil und leichte Abnahmen bzw. fast unveränderte Werte bei den übrigen betrachteten Perzentilen in der Zeitscheibe 2013–2022 im Vergleich zur Zeitscheibe 2003–2012. Für die Problematik der Immissionen in diesen Zeiträumen bedeutet dies, dass in bestimmten Fällen eine geänderte Grenzschichthöhe eine höhere bzw. geringe Schadstoffkonzentration mit verursacht haben kann, jedoch kann dies nicht als generelle Ursache angenommen werden. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die absolute Grenzschichthöhe in den ERA5-Daten die Grenzschichthöhe im Vergleich zu Messungen unterschätzt (MADONNA et al. 2021, GUO et al. 2021).

Über die Reibungswindgeschwindigkeit kann die Ausprägung der Turbulenz beurteilt werden. Ist die Reibungswindgeschwindigkeit höher, ist die Turbulenz ausgeprägter und Schadstoffe werden in der Atmosphäre effektiver verteilt was potentiell zu geringeren Schadstoffkonzentrationen führen kann (gut durchmischte Atmosphäre). In der Zeitscheibe 2013–2022 stellt sich für die Sommermonate eher eine Abnahme der Reibungswindgeschwindigkeit dar während diese für die Wintermonate eher zunimmt. Dies gilt für nächtliche Bedingungen als auch Bedingungen am Tag. Für die Schadstoffproblematik bedeutet dies, dass Schadstoffe im Sommer potentiell weniger weit transportiert wurden. Dies kann zum einen die Deposition von Schadstoffen bevorteilen aber auch eine Anreicherung von Schadstoffen in der Luft bewirken. Die Ergebnisse der Analyse der Reibungswindgeschwindigkeit zeigen, dass die Änderung der Turbulenz eine innerjährliche Charakteristik aufweist, die jedoch generell unterschiedliche Auswirkungen auf den Schadstofftransport, die Remobilisierung und die Deposition haben kann.

2.1.2.4 Sachsen – Windgeschwindigkeiten

Für die Betrachtung von Sachsen wurden alle Rasterzellen ausgewählt, die in die Grenzen von Sachsen fallen bzw. von diesen geschnitten werden (siehe Abbildung 1 bzw. Abbildung 10; insgesamt 62 Raster-

zellen). Die Betrachtung erfolgt mit den gleichen Zeitscheiben wie für das gesamte gewählte ERA5-Gebiet. Wie für das Gesamtgebiet zeigen sich größere Änderungen nur bei den 10-jährigen Zeitscheiben (Abbildung 7), kaum jedoch bei den 30-jährigen Zeitscheiben im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990. Insbesondere die Zeitscheibe 2013–2022 fällt durch geringere Windgeschwindigkeiten auf. Dies gilt sowohl für die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über Grund als auch für die Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe über Grund.

Betrachtet man für die einzelnen Zeitscheiben nur die Sommermonate Juni, Juli, August bzw. nur die Wintermonate Dezember, Januar und Februar, so zeigt sich eine innerjährliche Variabilität in den Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1962–1990. Zusätzlich wurden die Daten noch in Tag und Nacht eingeteilt. Für den Tag wurden die Zeitpunkte ausgewählt, für die alle Rasterzellen von Sachsen eine kurzwellige, einfallende Strahlung größer als 0 J m^{-2} aufwiesen. Für die Nacht wurden die Zeitpunkte ausgewählt, für die alle Rasterzellen von Sachsen eine kurzwellige, einfallende Strahlung von 0 J m^{-2} aufwiesen.

Für die Sommermonate Juni, Juli, August sind die Änderungen gegenüber der Zeitscheibe 1961–1990 für Tag und Nacht in ihrer grundsätzlichen Charakteristik sehr ähnlich (Abbildung 8). Für die 30-jährige Zeitscheibe 1991–2020 fallen das 25., 50. und 75.-Perzentil gegenüber der Referenz 1961–1990 geringer aus. Die größten Unterschiede im Vergleich zur Referenz ergeben sich wiederum für die 10-jährige Zeitscheibe 2013–2022. In dieser Zeitscheibe fallen die Windgeschwindigkeiten geringer aus und zwar im Vergleich zur Referenz als auch im Vergleich zum vorangehendem 10-jährigen Zeitraum (2003–2012). Dies zeigt sich bei allen dargestellten Perzentilen. Dies gilt auch für das 97,5. Perzentil, für das in der Zeitscheibe 2003–2012 noch eine Erhöhung gegenüber der Referenz zu verzeichnen war. Die Zeitscheibe 2013–2022 hebt sich somit als der Zeitraum mit den geringsten Windgeschwindigkeiten ab. Weiterhin zeigen die Ergebnisse für alle betrachteten Zeitscheiben an, dass die Windgeschwindigkeiten am Tage höher sind als in der Nacht, was grundsätzlich typischen Tagesgängen von Windgeschwindigkeiten entspricht.

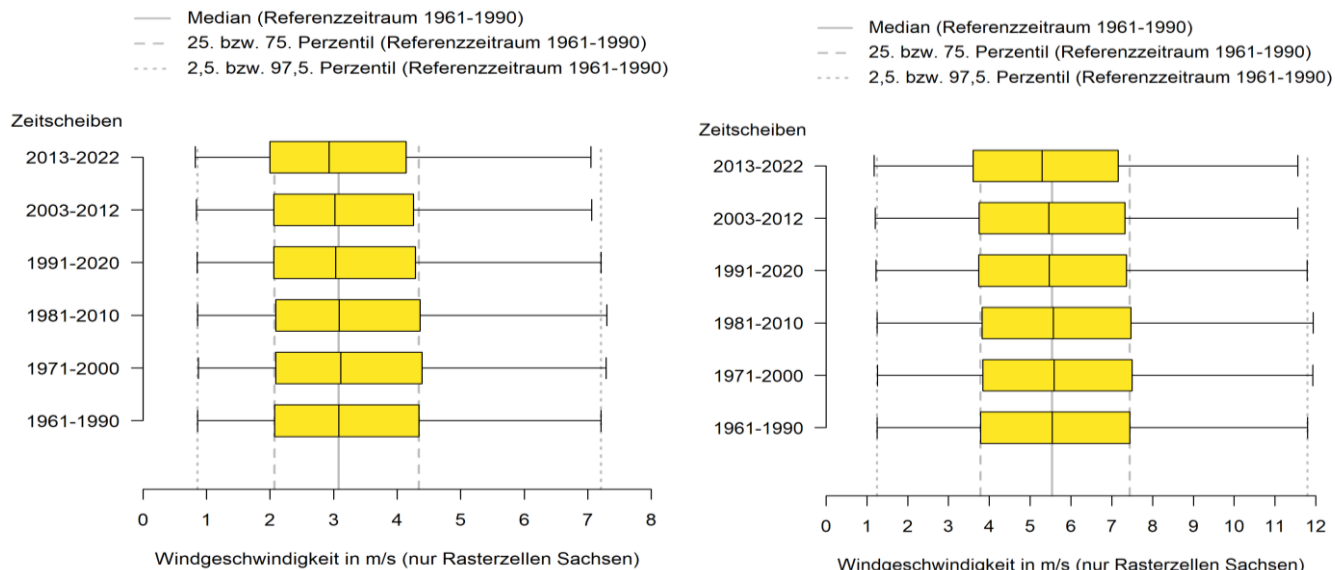


Abbildung 7: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde) in 10 m Höhe (links) und 100 m Höhe (rechts) für verschiedene Zeitscheiben auf Basis der Rasterzellen.

Die grauen senkrechten Linien geben die entsprechenden Perzentile für die Zeitscheibe 1961–1990 an. Dargestellt ist der Median (senkrechter schwarzer Strich in den Boxen), das 25. und 75. Perzentil (Enden der gelben Boxen) sowie das 2,5. und 97,5.-Perzentil (Whisker). Es ist die unterschiedliche Einteilung der x-Achse zu beachten.

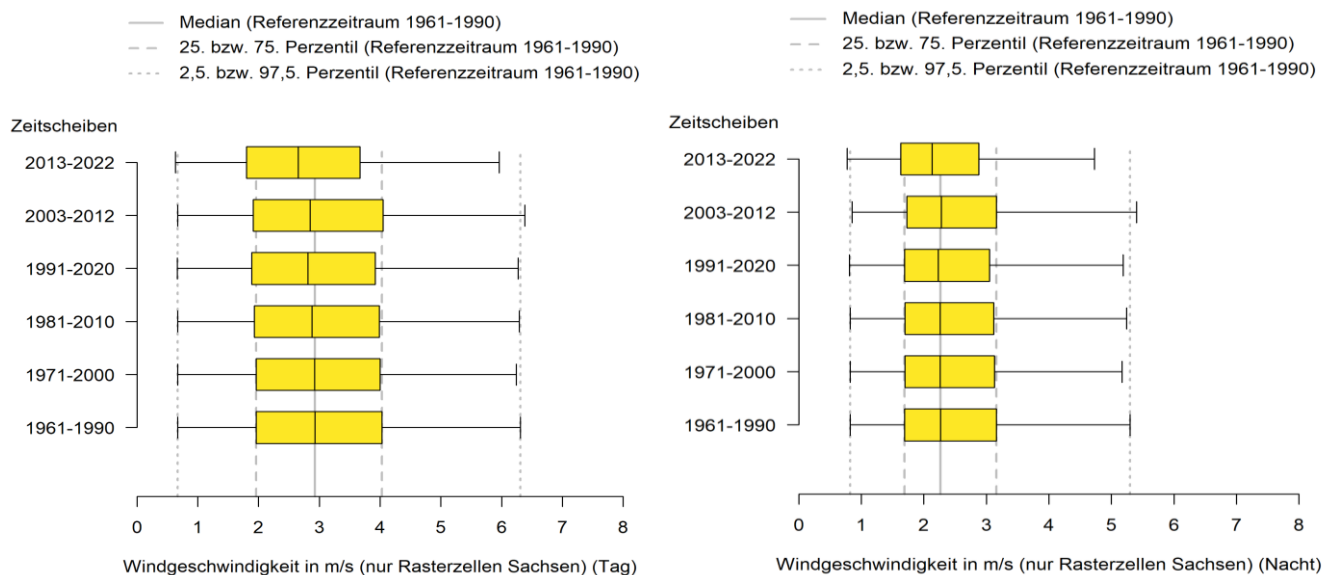


Abbildung 8: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde, nur Monate Juni, Juli, August) in 10 m Höhe für verschiedene Zeitscheiben auf Basis der Rasterzellen für Sachsen, Tagesbedingungen (links) und nächtliche Bedingungen (rechts).

Die grauen senkrechten Linien geben die entsprechenden Perzentile für die Zeitscheibe 1961–1990 an. Dargestellt ist der Median (senkrechter schwarzer Strich in den Boxen), das 25. und 75. Perzentil (Enden der gelben Boxen) sowie das 2,5. und 97,5.-Perzentil (Whisker). Es ist die unterschiedliche Einteilung der x-Achse zu beachten.

Für die Monate Dezember, Januar und Februar zeigen die Boxplots eine Tendenz zu höheren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 an (Abbildung 9). Dies ist für die Tagesbedingungen als auch für nächtliche Bedingungen ersichtlich. Lediglich, das 97,5.-Perzentil in der Zeitscheibe 2013–2022 ist gegenüber dem Referenzzeitraum verringert. Im Gegensatz zur Betrachtung der Sommermonate, hebt sich die Zeitscheibe 2013–2022 im Vergleich zur Referenz nicht deutlich als die Zeitscheibe mit den größten Änderungen hervor. Jedoch treten in dieser Zeitscheibe in den Wintermonaten tendenziell höhere Windgeschwindigkeiten auf als in der vorherigen 10-jährigen Zeitscheibe 2003–2012. Wie für die Sommermonate fallen die Änderungen in den verschiedenen Zeitscheiben gegenüber der Referenz für die Tages- und Nachtbedingungen sehr ähnlich aus.

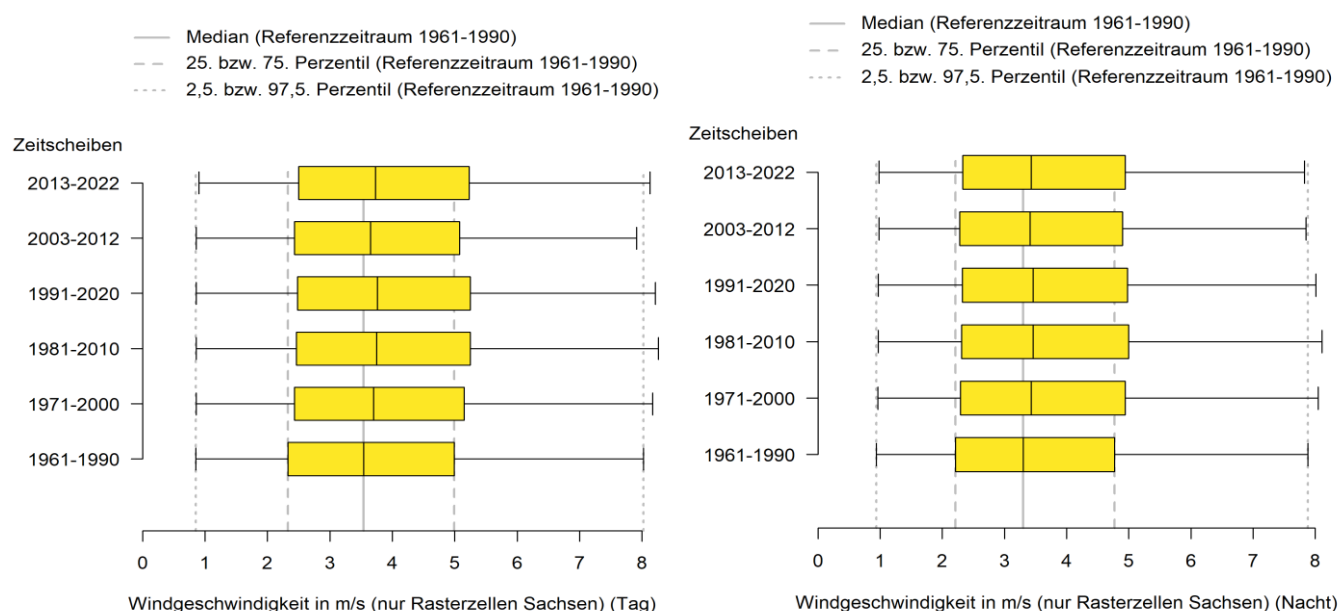


Abbildung 9: Boxplots für die Windgeschwindigkeiten (Momentanwerte zur vollen Stunde, nur Monate Dezember, Januar, Februar) in 10 m Höhe für verschiedene Zeitscheiben auf Basis der Rasterzellen für Sachsen, Tagesbedingungen (links) und nächtliche Bedingungen (recht

Die grauen senkrechten Linien geben die entsprechenden Perzentile für die Zeitscheibe 1961–1990 an. Dargestellt ist der Median (senkrechter schwarzer Strich in den Boxen), das 25. und 75. Perzentil (Enden der gelben Boxen) sowie das 2,5. und 97,5.-Perzentil (Whisker). Es ist die unterschiedliche Einteilung der x-Achse zu beachten.

Für die Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe wurden die gleichen Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse unterscheiden sich in ihren grundsätzlichen Charakteristiken nicht von den Ergebnissen, wie diese hier für die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe beschrieben sind.

2.1.2.5 Sachsen – Windrichtungen

Für die Analyse der Windrichtungen werden 8-teilige Windrosen mit den Sektoren Nord (N), Nordost (NE), Ost (E), Südost (SE), Süd (S) Südwest (SW), West (W) und Nordwest (NW) genutzt, die für verschiedene Rasterzellen erstellt wurden. Hierbei wurde sich auf die Rasterzellen beschränkt, in die Messstationen der PM₁₀-Belastung fallen. Dies ergab insgesamt 30 auszuwertende Rasterzellen. Hierbei ist zu beachten, dass in eine Rasterzelle mehrere Messstationen fallen können und daher die Gesamtzahl der ausgewerteten Rasterzellen kleiner als die Gesamtzahl der Messstationen ist. Für eine bessere Lesbarkeit und bessere Vorstellung wo in etwa die aktuell betrachtete Rasterzelle liegt, wurden für die Rasterzellen Ortsnamen vergeben (Abbildung 10). Diese stellen jeweils einen ausgewählten Ortsnamen der Messstationen dar, die in die jeweilige Rasterzelle fallen. Die Auswertungen wurden für den Wind in 10 m Höhe und in 100 m Höhe vorgenommen. Die Windrosen werden für die Zeitscheiben 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 sowie 2003–2012 und 2013–2022 dargestellt. Die Auswertung selbst konzentriert sich auf die Zeitscheiben 2003–2012 sowie 2013–2022. Alle erstellten Windrosen als auch eine Übersicht dazu welche Messstation in welche Rasterzelle fällt, sind im digitalen Anhang zu finden.

Bei der Betrachtung der gesamten Zeitscheiben ohne weitere saisonale Unterscheidung ergeben sich in der grundsätzlichen Charakteristik der Windrosen für den Wind in 10 m Höhe über Grund kaum Unterschiede. Zumeist sind leichte Zugewinne für S, NW und SW und Abnahmen für NE, SE und W in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 zu verzeichnen. Für N und E sind auf Basis der Windrosen häufig kaum Änderungen festzustellen (Abbildung 11). Die Hauptwindrichtung ändert sich hierbei im Allgemeinen nicht. Eine Ausnahme stellt hier Klingenthal dar, wo die Sektoren W und SW nahezu gleich stark vertreten sind und die Windrose dominieren. Für diese Rasterzelle ist in der ersten Zeitscheibe (2003–2012) der Windsektor W minimal ausgeprägter als der Windsektor SW. In der zweiten Zeitscheibe (2013–2022) ist dies umgekehrt.

11.06.1971 14:00 Uhr (MEZ), Luftdruck in hPa

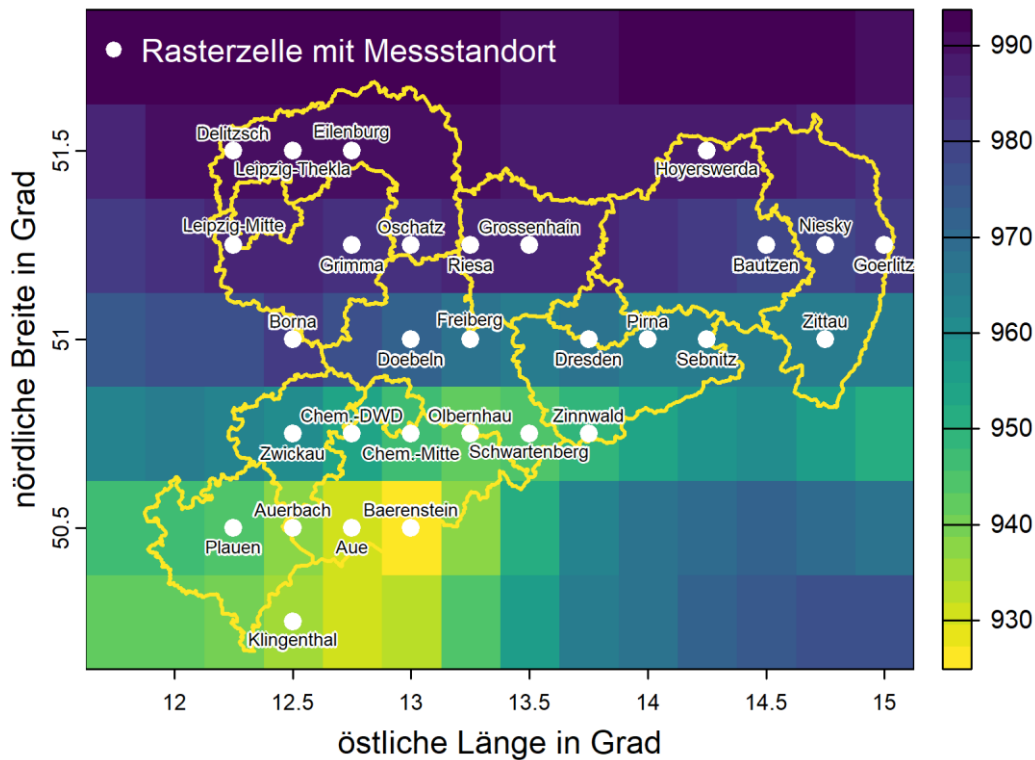


Abbildung 10: Lage und Benennung der Rasterzellen für die 8-teilige Windrosen erstellt und ausgewertet wurden.

Die Unterschiede zwischen den Windrosen für die Zeitscheiben 2003–2012 sowie 2013–2022 sind auffälliger, wenn man nur die Monate Dezember, Januar und Februar bzw. nur die Monate Juni, Juli, August betrachtet. Es zeigt sich eine innerjährliche Variabilität der Änderungen.

Für die Monate Dezember, Januar und Februar ist festzuhalten (Abbildung 11), dass sich die grundsätzliche Charakteristik der Windrosen wie für das Gesamtjahr im Allgemeinen nicht ändert. Die Hauptwindrichtung ändert nur dort, wo zwei dominante Windsektoren in etwa gleich stark vertreten sind. Dies trifft auf die Rasterzelle Großenhain zu. Hier wechselt die Hauptwindrichtung von W auf SW für die Zeitscheibe 2013–2022. Die Windsektoren W, SW, S sind in der Zeitscheibe 2013–2022 stärker vertreten als in der Windscheibe 2003–2012 während die Windsektoren NW, NE, N weniger vertreten sind. Keine eindeutige Aussage lässt sich für den Windsektor SE treffen. Der Windsektor E fällt durch wechselnde Charakteristiken auf (zumeist kaum Änderung, wenn Änderung dann zumeist leichte Abnahme der Häufigkeit, seltener Zunahmen der Häufigkeit).

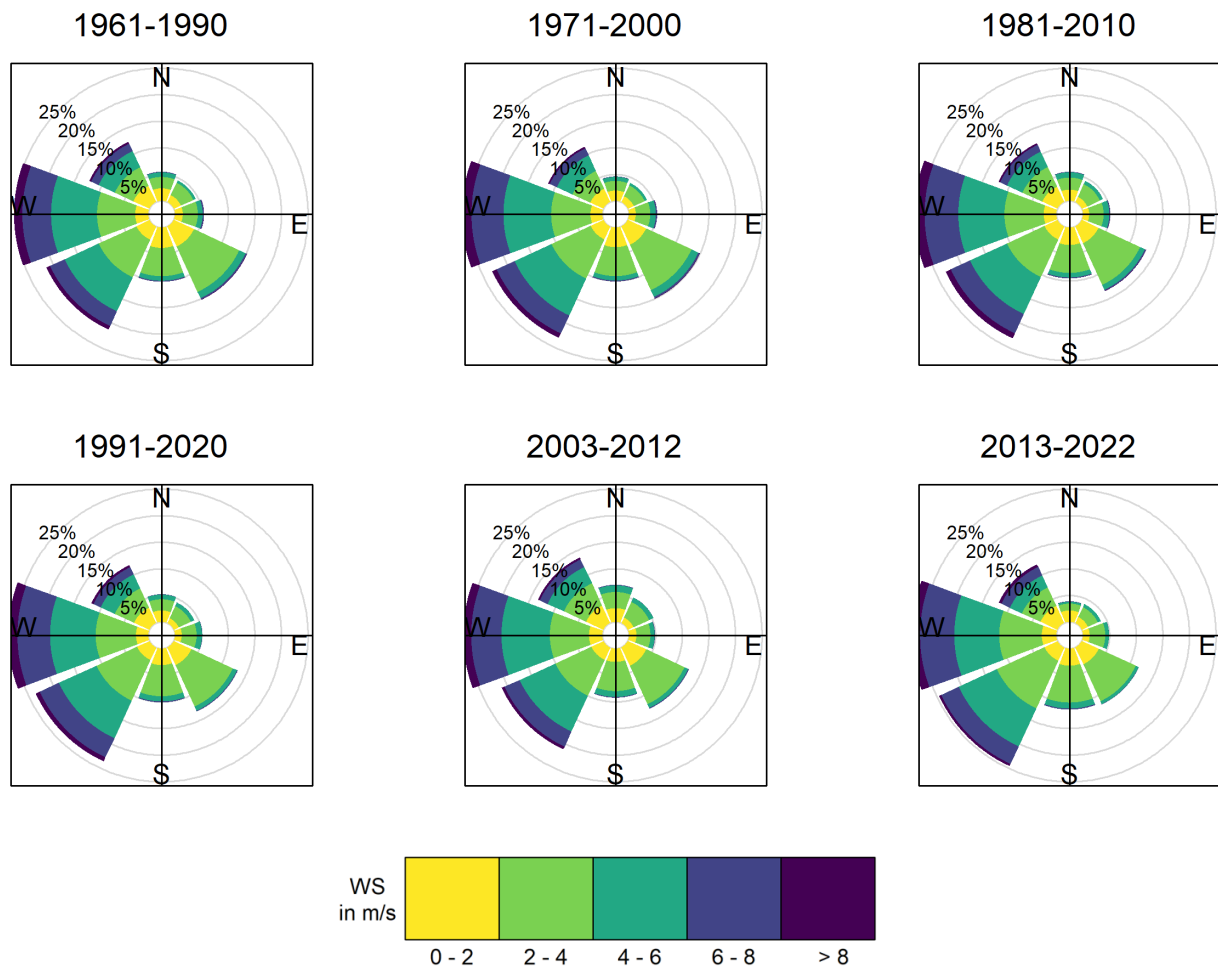


Abbildung 11: Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 10 m Höhe für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Monate Dezember, Januar und Februar, Rasterzelle Bärenstein.

Die Ausführungen im Text beziehen sich auf die Unterschiede zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 sowie 2013–2022.

Während in den Monaten Dezember, Januar, Februar die Häufigkeit für die Sektoren W und SW in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 im Allgemeinen zugenommen hat, zeigt sich in den Monaten Juni, Juli, August hingegen stets eine (deutliche) Abnahme in den Häufigkeiten für diese beiden Windsektoren (Abbildung 12). Der Windsektor NW hebt sich als der Windsektor ab, der in der Zeitscheibe 2013–2022 stets häufiger auftritt. Oft nimmt dieser Windsektor in seiner Häufigkeit am stärksten zu, sodass es teilweise zu einer Änderung der Hauptwindrichtung von W auf NW kommt (Deltitzsch, Sebnitz, Schwartenberg, Bärenstein) bzw. von W auf NW kommt (Zittau). Wenn ein Wechsel der Hauptwindrichtung auf NW in der Zeitscheibe 2013–2022 erfolgt, dann sind die Unterschiede in der Häufigkeit zum dem Windsektor, der in der Zeitscheibe 2003–2012 die Hauptwindrichtung darstellte, im Allgemeinen klein. Weiterhin ersetzt der Windsektor NW für 9 Rasterzellen den Windsektor SW als zweithäufigsten Windsektor in der Zeitscheibe 2013–2022 im Vergleich 2003–2012. Für einige Rasterzellen (Plauen, Auerbach, Klingenthal) sind die stärksten Zunahmen nicht für den Sektor NW zu verzeichnen,

sondern für den Sektor N. Für alle anderen Rasterzellen zeichnen sich die Sektoren, N, NE, E, SE zumeist durch leichte Zunahmen aus. Der Windsektor Süd zeichnet sich durch wechselnde Charakteristiken in der Änderung seiner Häufigkeit aus.

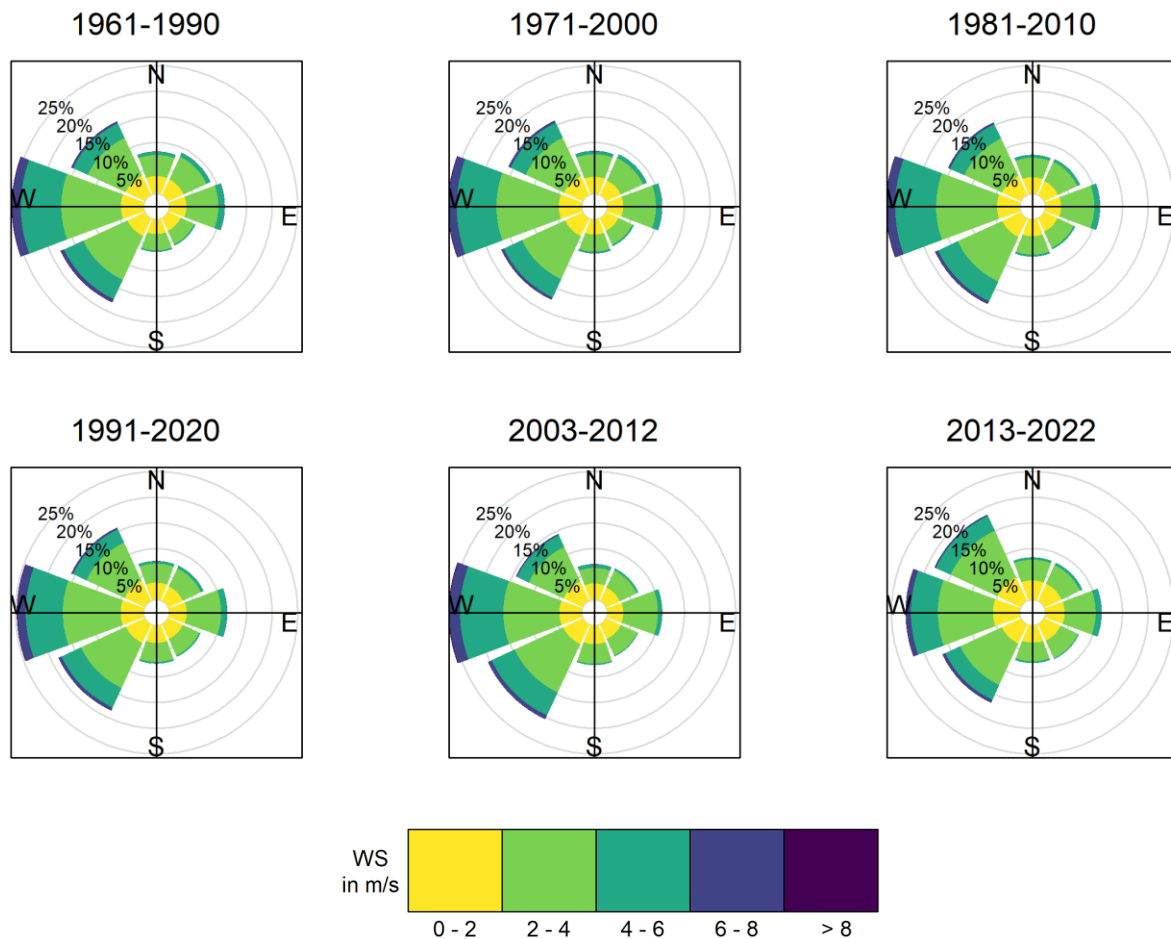


Abbildung 12: Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 10 m Höhe für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Sommermonate Juni, Juli und August, Rasterzelle Eilenburg.

Die Ausführungen im Text beziehen sich auf die Unterschiede zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 sowie 2013–2022.

Für die Verteilung der Windrichtungen in 100 m über Grund ist generell ein einheitlicheres Bild für alle Rasterzellen zu erwarten, da das Windfeld durch die Rauigkeit des Untergrundes (Vegetation, Topographie) weniger beeinflusst wird.

Bei Betrachtung der Windrosen auf Basis des Windes in 100 m Höhe über Grund für die gesamten Zeitscheiben ohne saisonale Unterteilung ändert sich die Charakteristik der jeweiligen Windrosen zwischen den beiden Zeitscheiben 2003–2012 (Zeitscheibe 1) und 2013–2022 (Zeitscheibe 2) kaum. Fast alle Windrosen zeigen eine Abnahme von W und Zunahme NW, ebenso gewinnen die Windsektoren SW und

S in der Zeitscheibe 2 im Vergleich zur Zeitscheibe 1. Die Windsektoren NE, SE sind in der zweiten Zeitscheibe tendenziell weniger vertreten, während für die Windsektoren E und N keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können. Die Änderungen der Windrichtungen in 10 m Höhe über Grund sind somit vergleichbar mit den Änderungen in 100 m über Grund in Bezug auf die grundlegende Charakteristik. Für Rasterzellen im Bereich des Vogtlandes (Aue, Auerbach, Plauen, Klingenthal) sind leichte Zunahmen für den Windsektor N zu verzeichnen, die sich z. T. auch in den Windrosen für 10 m über Grund wiederfinden lassen. Ein Wechsel der Hauptwindrichtung in 100 m über Grund war nur für eine Rasterzelle (Oschatz) zu verzeichnen, wo die dominierenden Windsektoren in etwa die gleichen Häufigkeiten aufweisen.

Betrachtet man nur die Monate Dezember, Januar und Februar bzw. nur die Monate Juni, Juli, August so stellt sich in den Änderungen der Windsektorenhäufigkeiten ein nahezu komplementäres Bild zwischen diesen zwei saisonalen Abschnitten dar (Abbildung 13). In den Monaten Dezember, Januar, Februar nehmen die Windsektoren W, SW und S in ihren Häufigkeiten in der zweiten Zeitscheibe, im Vergleich zur ersten Zeitscheibe, stets zu, während die übrigen Windsektoren (SE, E, NE, N, NW) in ihren Häufigkeiten zumeist abnehmen (Abbildung 14). Ausnahmen stellen hier die Rasterzellen Dresden, Pirna, Sebnitz, Olbernhau, Zinnwald und Schwartenberg dar mit Zunahme der Häufigkeit für den Windsektor E in der zweiten Zeitscheibe (2013–2022). Der Windsektor E lässt, auf Basis der Windrose, keine Änderung für die Rasterzelle Freiberg erkennen. Für drei Rasterzellen (Klingenthal, Chemnitz-Mitte, Görlitz) kommt es in der zweiten Zeitscheibe zum Wechsel in der Hauptwindrichtung (Wechsel von W auf SW). Jedoch ist der Unterschied in der Häufigkeit zwischen SW und W in der zweiten Zeitscheibe nur gering. Beide Windrichtungssektoren sind in den jeweiligen Windrosen dominante Sektoren. Die Rasterzellen für die ein Wechsel in der Hauptwindrichtung zu verzeichnen ist, fallen nur teilweise mit denen zusammen für die dies für die Windverhältnisse in 10 m über Grund zutrifft.

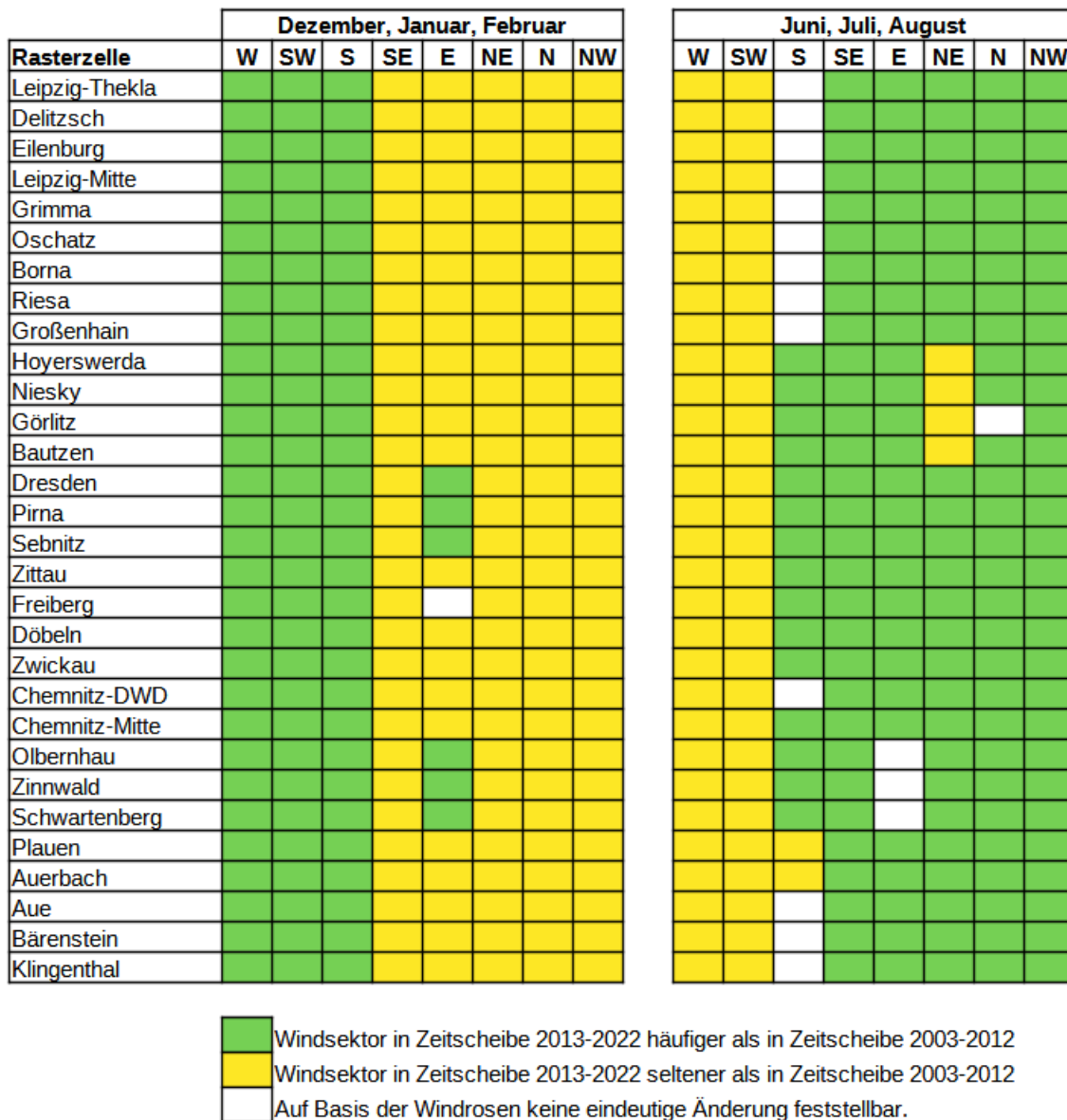


Abbildung 13: Zusammenfassende Darstellung der Auswertung der Windrosen für die Windverhältnisse 100 m über Grund für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) und die Sommermonate (Juni, Juli, und August).

Während in den Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) die Windsektoren W, SW in ihrer Häufigkeit zunehmen, ist in der zweiten Zeitscheibe eine Abnahme der Häufigkeit für diese Sektoren in den Sommermonaten (Juni, Juli, August) festzustellen (gelbe Kodierung). Die größte Zunahme in der Häufigkeit weist im Allgemeinen der Windsektor NW auf. Dies führt dazu, dass für 14 Rasterzellen der zweithäufigste Windsektor NW in der zweiten Zeitscheibe ist (Wechsel von SW auf NW), d.h. der Windsektor SW an Bedeutung verliert. Weiterhin wechselt für 4 Rasterzellen die Hauptwindrichtung für die zweite Zeitscheibe von W auf NW. Im Gegensatz zu den Wintermonaten stellt sich das Änderungssignal für den Sektor S in den Sommermonaten variabler dar. Für die Sektoren SE, E, NE, N ist zumeist eine leichte Zunahme in den Häufigkeiten zu verzeichnen. Eine prominente Ausnahme stellen hier die Rasterzellen

Bautzen, Görlitz, Niesky und Hoyerswerda dar, die für NE eine Abnahme der Häufigkeit verzeichnen. Jedoch fallen die Abnahmen klein aus.

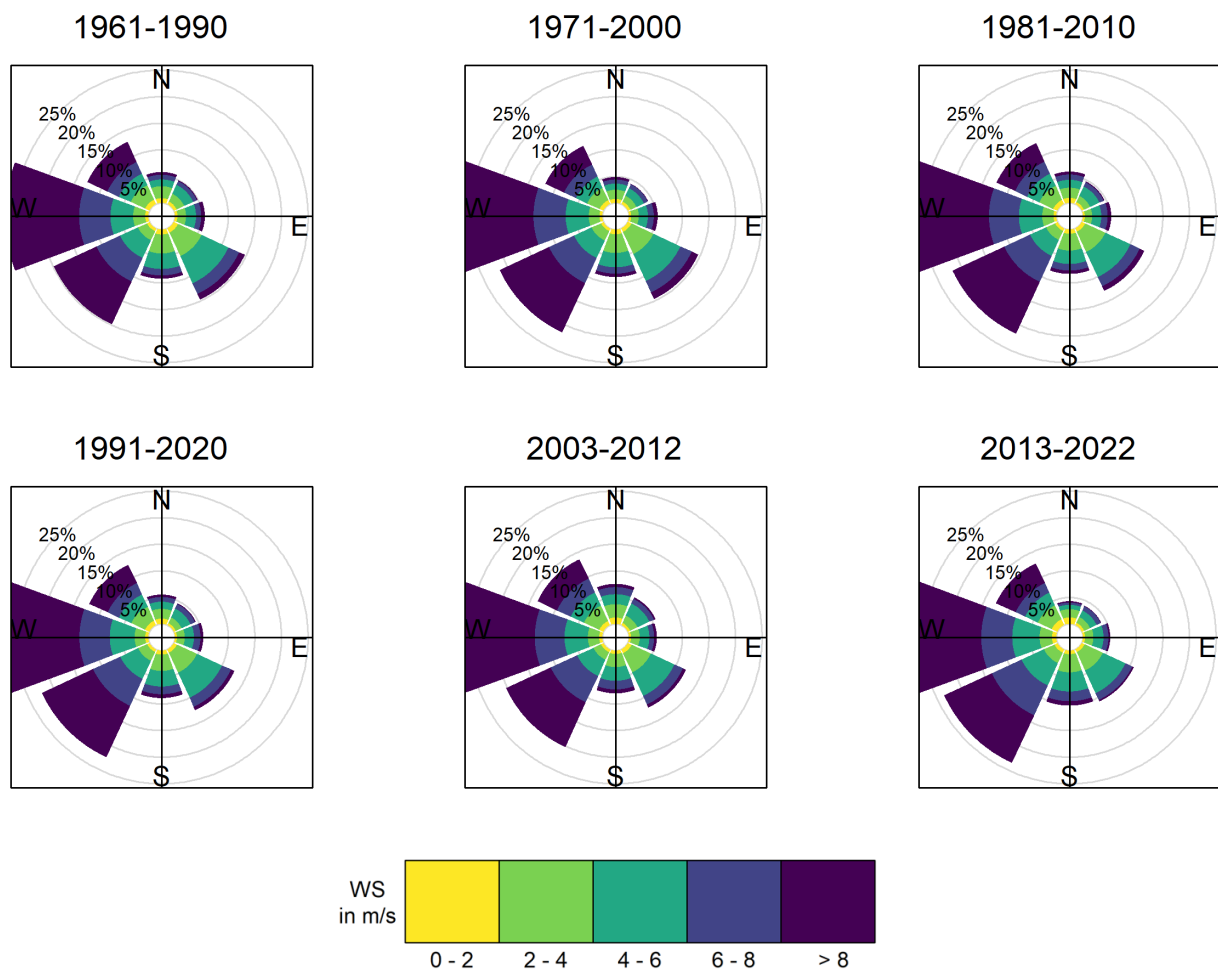


Abbildung 14: Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 100 m Höhe über Grund für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Monate Dezember, Januar und Februar, Rasterzelle Bärenstein.

Die Ausführungen im Text beziehen sich auf die Unterschiede zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 sowie 2013–2022.

Wie für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar lassen sich Gemeinsamkeiten zwischen den Änderungen in den Windrosen für die Windverhältnisse in 10 m über Grund und den Windverhältnissen in 100 m über Grund finden. In beiden Höhen nimmt die Häufigkeit für die Windsektoren W und SW in der Zeitscheibe 2 (2013–2022) gegenüber der Zeitscheibe 1 (2003–2012) ab, während der Sektor NW sich durch Zunahme in der Häufigkeit auszeichnet (Abbildung 15).

Für die Interpretation der Windrosen ist zu beachten, dass es sich um Modelldaten handelt, denen eine vereinfachte Topographie und Vegetationsdarstellung zugrunde liegt. Dies bedeutet, dass z. B. Windkanalisierungen aufgrund lokaler realer Gegebenheiten in der Natur (Elbtal!) nur begrenzt abgebildet werden können.

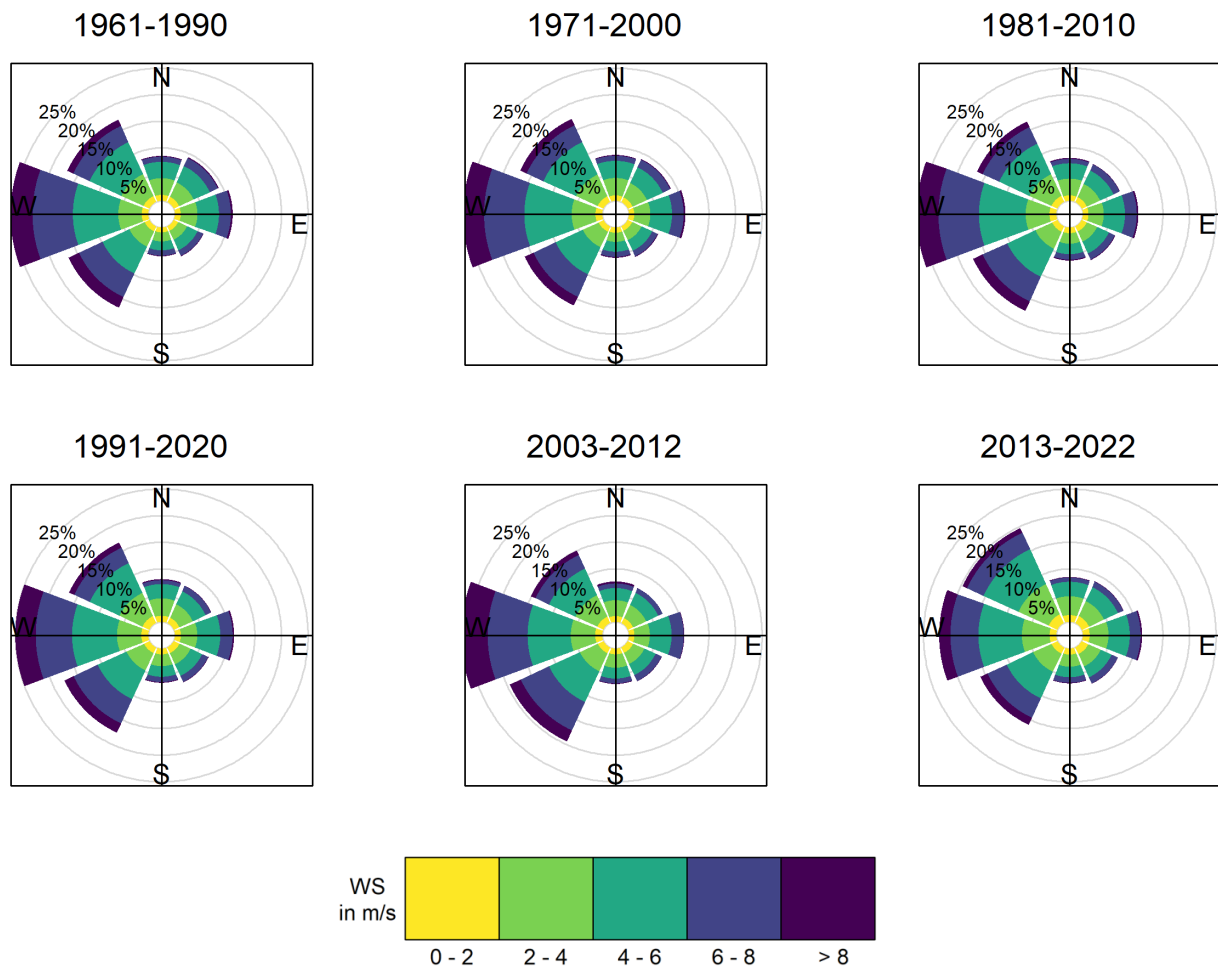


Abbildung 15: Darstellung der Windrosen auf Basis des Windes in 100 m Höhe über Grund für die verschiedenen Zeitscheiben, jedoch nur für die Sommermonate Juni, Juli und August, Rasterzelle Eilenburg.

Die Ausführungen im Text beziehen sich auf die Unterschiede zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 sowie 2013–2022.

2.1.3 Vertiefte Untersuchung einzelner Zeitscheiben

Ergänzend zu der rein visuellen Auswertung der Windrosen wurden die Windrichtungen und deren zeitliche Änderung auf Basis eines R-Programms ausgewertet.

Grundlage für die Auswertung sind ERA5-Daten für die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe und 100 m Höhe über Grund (Stundenwerte). Weitere Informationen zu den ERA5-Daten als solche und dem gewählten Gebietsausschnitt sind in den vorherigen Kapiteln zu finden. Die Analyse der Windrosen erfolgt für alle Rasterzellen in die Messstationen für die PM_{10} -Belastung fallen (insgesamt 30 Rasterzellen). Um die geographische Zuordnung zu erleichtern, wurden den ausgewerteten Rasterzellen Ortsnamen zugeordnet (siehe Abbildung 10).

Die Windrichtungen wurden in 8 Sektoren unterteilt mit den Sektoren Nord (N), Nordost (NE), Ost (E), Südost (SE), Süd (S), Südwest (SW), West (W) sowie Nordwest (NW). Die konkrete Einteilung wird im

Kapitel 2.1.2.5 erläutert. Die Auswertungen wurden für die Zeitscheiben, 2003–2012, 2013–2022 (zehnjährige Zeitscheiben) sowie die Zeitscheiben 2008–2012, 2013–2017 sowie 2018–2022 (fünfjährige Zeitscheiben) vorgenommen. Betrachtet wird das Gesamtjahr (alle Werte der Zeitscheiben), die zentralen Sommermonate (nur Werte der Monate Juni, Juli und August der Zeitscheiben) sowie die zentralen Wintermonate (nur Werte der Monate Dezember, Januar und Februar der Zeitscheiben).

Um die Änderungen in der Windrichtung beurteilen zu können, werden Differenzen betrachtet, d.h. die Häufigkeit eines Windrichtungssektors in Prozent für eine bestimmte Zeitscheibe abzüglich der Häufigkeit eines Windrichtungssektors in Prozent für die Referenzzeitscheibe. Positive Differenzen bedeuten dabei, dass der betreffende Windsektor in der aktuell betrachteten Zeitscheibe häufiger aufgetreten ist als in der Referenzzeitscheibe. Negative Differenzen bedeuten dabei, dass der betreffende Windsektor in der aktuell betrachteten Zeitscheibe seltener aufgetreten ist als in der Referenzzeitscheibe.

2.1.3.1 Windrichtungsänderungen – zehnjährige Zeitscheiben

Im Folgenden wird die Änderung der Windrichtung zwischen den zehnjährigen Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 betrachtet. Dabei dient die Zeitscheibe 2003–2012 als Referenz.

2.1.3.1.1 Windrichtung in 10 m Höhe über Grund

Zuerst werden die Windrichtungen in unterschiedlicher Höhe allgemein verglichen, bevor ein qualitativ detaillierter Vergleich folgt.

Um einen einfacheren Vergleich mit den vorhergehenden Kapiteln zu ermöglichen, wurde eine Einteilung der Farbskala gewählt, die nur in Abnahme der Häufigkeit ($< -0,25\%$), Zunahme der Häufigkeit ($> +0,25\%$) bzw. keine/kaum Änderungen in der Häufigkeit eines Windsektors unterscheidet.

WD in 10 m	Zeitscheibe 2013-2022 minus Zeitscheibe 2003-2012 (Dez/Jan/Feb)							
Rasterzelle	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Leipzig-Thekla								
Delitzsch								
Eilenburg								
Leipzig-Mitte								
Grimma								
Oschatz								
Borna								
Riesa								
Großenhain								
Hoyerswerda								
Niesky								
Görlitz								
Bautzen								
Dresden								
Pirna								
Sebnitz								
Zittau								
Freiberg								
Döbeln								
Zwickau								
Chemnitz-DWD								
Chemnitz-Mitte								
Olbernhau								
Zinnwald								
Schwarzenberg								
Plauen								
Auerbach								
Aue								
Bärenstein								
Klingenthal								

WD in 10 m	Zeitscheibe 2013-2022 minus Zeitscheibe 2003-2012 (Jun/Jul/Aug)							
Rasterzelle	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Leipzig-Thekla								
Delitzsch								
Eilenburg								
Leipzig-Mitte								
Grimma								
Oschatz								
Borna								
Riesa								
Großenhain								
Hoyerswerda								
Niesky								
Görlitz								
Bautzen								
Dresden								
Pirna								
Sebnitz								
Zittau								
Freiberg								
Döbeln								
Zwickau								
Chemnitz-DWD								
Chemnitz-Mitte								
Olbernhau								
Zinnwald								
Schwarzenberg								
Plauen								
Auerbach								
Aue								
Bärenstein								
Klingenthal								

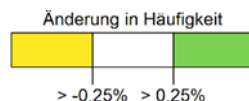


Abbildung 16: Änderungen in der Häufigkeit von Windrichtungssektoren zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 für 10 m über Grund.

Gelb bedeutet, dass der betreffende Windrichtungssektor in der Zeitscheibe 2013–2022 seltener aufgetreten ist als in der Zeitscheibe 2003–2012. Grün bedeutet, dass der betreffende Windrichtungssektor in der Zeitscheibe 2013–2022 häufiger aufgetreten ist als in der Zeitscheibe 2003–2012. Die linke Abbildung zeigt die Ergebnisse für die zentralen Wintermonate Dezember, Januar und Februar. Die rechte Abbildung zeigt die Ergebnisse für die zentralen Sommermonate Juni, Juli und August.

Die Änderungen in der Windrichtung für die Gesamtjahre fallen klein aus. Die Windsektoren unterscheiden sich in ihrer Häufigkeit zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 um maximal 1 %. Dies gilt für alle betrachteten Rasterzelle.

Betrachtet man nur die Wintermonate und nur die Sommermonate, so zeigt sich eine innerjährliche Variabilität (Abbildung 16). Für die Wintermonate zeigt sich, dass die Windrichtungssektoren S und SW für alle Rasterzellen häufiger in der Zeitscheibe 2013–2022 auftreten als in der Zeitscheibe 2003–2012. Dies trifft auch für fast alle betrachteten Rasterzellen in Bezug auf den Windrichtungssektor W zu. Die Windrichtungssektoren NE, NW und N treten in der Zeitscheibe 2013–2022 in den Wintermonaten

weniger häufiger auf als in der vorangehenden zehnjährigen Zeitscheibe. Die Windsektoren E und SE fallen durch wechselnde Charakteristik bezüglich ihrer Änderungen auf.

Im Gegensatz zu den Wintermonaten zeigt sich den Sommermonaten (Abbildung 16, rechte Abbildung) für die Windsektoren SW und W stets eine Abnahme (gelbe Kodierung) der Häufigkeit in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012. Der Windsektoren NW und SE heben sich als die Windsektoren ab, die in der Zeitscheibe 2013–2022 stets häufiger auftreten. Der Windsektor Süd zeichnet sich durch wechselnde Charakteristiken in der Änderung seiner Häufigkeit aus. Auffällig ist auf den ersten Blick das abweichende Verhalten der Rasterzelle Hoyerswerda für den Windrichtungssektor NE. Jedoch ist hier die Verringerung in der Häufigkeit letztlich klein, d. h. nicht größer als 1 % (Abbildung 17).

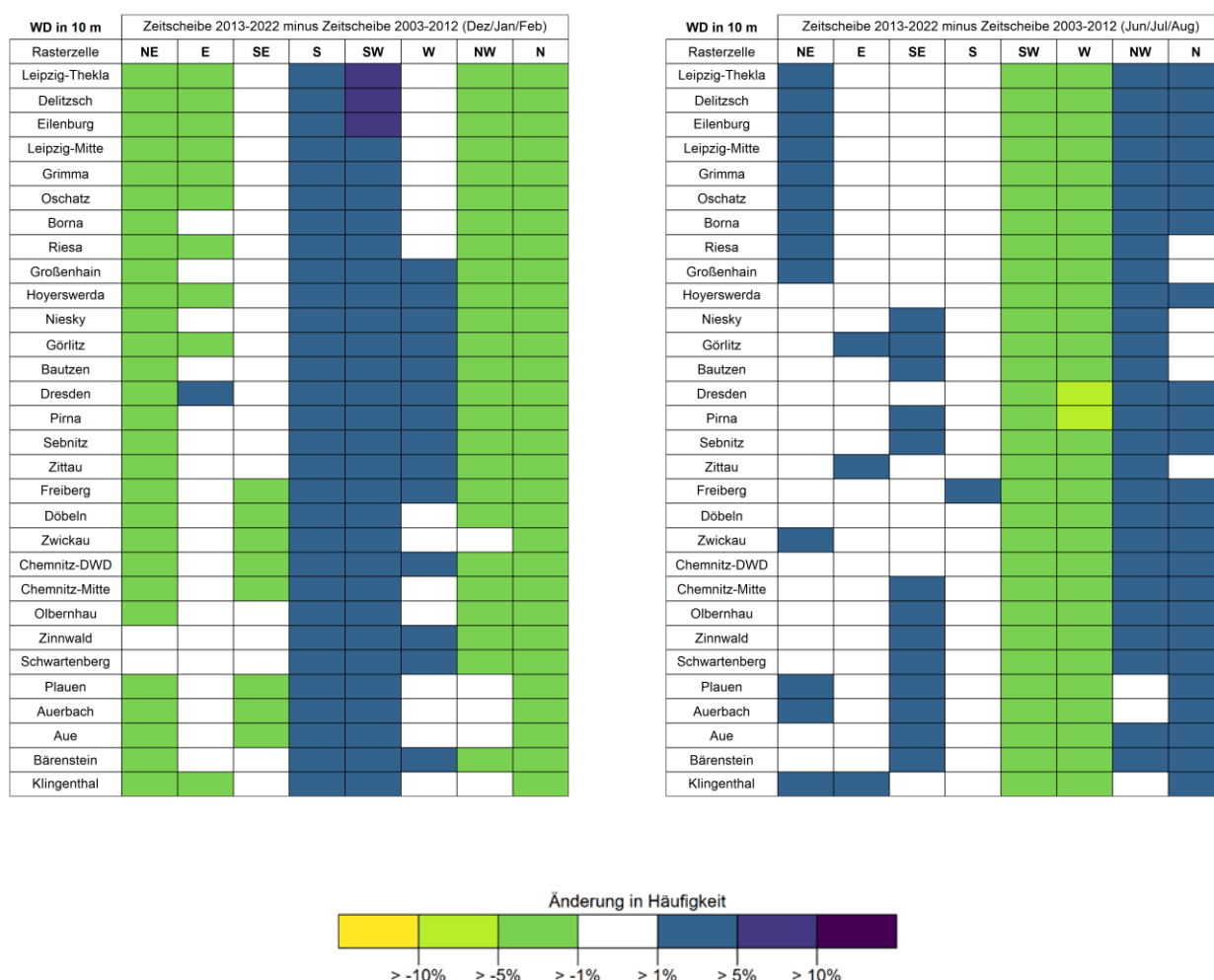


Abbildung 17: Wie Abbildung 1 jedoch mit anderer Einteilung hinsichtlich der Farbkodierung.

Es ist zu beachten, dass gelbe und grüne Töne Abnahmen in der Häufigkeit bedeuten und blaue Töne Zunahmen in den Häufigkeiten.

Nachfolgend wird beim quantitativ detaillierten Vergleich kurz betrachtet, welche Windsektoren die größten Änderungen in ihrer Häufigkeit zwischen den beiden Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022

aufweisen. Für die Betrachtung der Gesamtjahre wird auf den allgemeinen Vergleich im Kapitel 2.1.3.1.1 auf der vorherigen Seite verwiesen. Im Gegensatz zu der vorangegangenen graphischen Darstellung in Abbildung 16 werden Änderungen in der Häufigkeit von -1 % bis +1 % als marginale Änderung betrachtet und erscheinen in der Abbildung 17 demzufolge als weiß.

Für die Wintermonate zeigt sich, dass die Windsektoren S und SW in ihrer Häufigkeit in der Zeitscheibe 2013–2022 um 1 %-5 % zunehmen (blaue Kodierung). Für die Rasterzellen Leipzig-Thekla, Delitzsch und Eilenburg fallen die Zunahmen für SW größer als 5 % aus (dunkleres Blau). Für die Sektoren N, NE und NW liegen die Abnahmen in der Häufigkeit zumeist zwischen 5 % und 1 % (grüne Kodierung).

Die Windsektoren SW und W zeigen in den Sommermonaten in der Zeitscheibe 2013–2022 die größten Abnahmen in ihren Häufigkeiten gegenüber 2003–2022 (grüne Kodierung). Die Abnahmen liegen zumeist zwischen -1 % und -5 %. Für die Rasterzellen Dresden und Pirna liegen die Abnahmen höher, zwischen -5 % und -10 %. Die häufigsten Zugewinne in den Häufigkeiten liegen stets zwischen +1 % und +5 % (blaue Kodierung). Hier heben sich insbesondere die Sektoren NW und N hervor.

Vergleicht man den linken Teil der Abbildung 17 mit dem rechten Teil der Abbildung 17, so fällt auf, dass es im Sommer mehr Windsektoren pro Rasterzelle gibt, für die die Änderung in der Häufigkeit maximal 1 % beträgt (weiße Kodierung) als im Winter.

2.1.3.1.2 Windrichtung in 100 m Höhe über dem Grund

Zuerst werden die Windrichtungen in unterschiedlicher Höhe allgemein verglichen, bevor ein qualitativ detaillierter Vergleich folgt.

Um einen einfacheren Vergleich mit den vorhergehenden Kapiteln zu ermöglichen, wurde eine Einteilung der Farbskala gewählt, die nur in Abnahme der Häufigkeit ($< -0.25\%$), Zunahme der Häufigkeit ($> +0.25\%$) bzw. keine/kaum Änderungen in der Häufigkeit eines Windsektors unterscheidet.

Die Änderungen in der Windrichtung für die Gesamtjahre fallen klein aus. Die Windsektoren unterscheiden sich in ihrer Häufigkeit zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 um maximal 1 %. Eine Ausnahme stellt der Windrichtungssektor W für die Rasterzellen Zinnwald, Auerbach und Klingenthal dar. Dieser Windrichtungssektor nimmt für diese Rasterzellen in seiner Häufigkeit um mehr als 1 % jedoch nicht um mehr als 5 % zu.

In den Monaten Dezember, Januar, Februar (Abbildung 18) nehmen die Windsektoren S, SW und W in ihren Häufigkeiten in der zweiten Zeitscheibe (2013–2022), im Vergleich zur ersten Zeitscheibe (2003–2012), stets zu (grüne Kodierung). Die Windsektoren NW, N, NE nehmen in ihrer Häufigkeit stets ab. Der Windsektor SE nimmt in seiner Häufigkeit zumeist ab oder weist kaum/keine Änderungen auf. Der

Windsektor E stellt sich am variabelsten dar. Der Windsektor E tritt in meisten, betrachteten Rasterzellen in der Zeitscheibe 2013–2022 seltener auf als in der Zeitscheibe 2003–2012 oder zeigt in seiner Häufigkeit kaum/keine Änderungen. Ausnahmen stellen hier die Rasterzellen Dresden, Pirna, Sebnitz, Olbernhau, Zinnwald und Schwartenberg dar. Hier ist der Windsektor E in der Zeitscheibe 2013–2022 häufiger aufgetreten als in der Zeitscheibe 2003–2012 (grüne Kodierung).

Während in den Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) die Windsektoren SW und W in ihrer Häufigkeit in der zweiten Zeitscheibe (2013–2022) zunehmen, ist in den Sommermonaten stets eine Abnahme der Häufigkeit für diese Sektoren festzustellen (gelbe Kodierung). Die Windsektoren N, NW und SE nehmen in ihrer Häufigkeit gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 stets zu. Im Gegensatz zu den Wintermonaten stellt sich das Änderungssignal für den Windsektor S in den Sommermonaten variabler dar. Je nach Rasterzelle tritt dieser Windsektor in der zweiten Zeitscheibe, häufiger oder seltener auf oder es sind keine/kaum Änderungen zu verzeichnen. Für die Sektoren NE und E sind zumeist leichte Zunahme in den Häufigkeiten zu verzeichnen. Eine prominente Ausnahme stellen hier die Rasterzellen Görlitz, Niesky dar, die für NE eine Abnahme der Häufigkeit verzeichnen. Jedoch fallen die Abnahmen klein aus, d. h. der Windrichtungssektor nimmt in seiner Häufigkeit um nicht mehr als 1 % ab.

Nachfolgend wird beim quantitativ detaillierten Vergleich kurz betrachtet, welche Windsektoren die größten Änderungen in ihrer Häufigkeit zwischen den beiden Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 aufweisen. Für die Betrachtung der Gesamtjahre wird auf den allgemeinen Vergleich im Abschnitt 2.1.3.1.2 auf der vorherigen Seite verwiesen. Im Gegensatz zu der vorangegangenen graphischen Darstellung in Abbildung 18 werden Änderungen in der Häufigkeit von -1 % bis +1 % als marginale Änderung betrachtet und erscheinen in der Abbildung 19 demzufolge als weiß.

WD in 100 m	Zeitscheibe 2013-2022 minus Zeitscheibe 2003-2012 (Dez/Jan/Feb)							
Rasterzelle	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Leipzig-Thekla								
Delitzsch								
Eilenburg								
Leipzig-Mitte								
Grimma								
Oschatz								
Borna								
Riesa								
Großenhain								
Hoyerswerda								
Niesky								
Görlitz								
Bautzen								
Dresden								
Pirna								
Sebnitz								
Zittau								
Freiberg								
Döbeln								
Zwickau								
Chemnitz-DWD								
Chemnitz-Mitte								
Olbernhau								
Zinnwald								
Schwartenberg								
Plauen								
Auerbach								
Aue								
Bärenstein								
Klingenthal								

WD in 100 m	Zeitscheibe 2013-2022 minus Zeitscheibe 2003-2012 (Jun/Jul/Aug)							
Rasterzelle	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Leipzig-Thekla								
Delitzsch								
Eilenburg								
Leipzig-Mitte								
Grimma								
Oschatz								
Borna								
Riesa								
Großenhain								
Hoyerswerda								
Niesky								
Görlitz								
Bautzen								
Dresden								
Pirna								
Sebnitz								
Zittau								
Freiberg								
Döbeln								
Zwickau								
Chemnitz-DWD								
Chemnitz-Mitte								
Olbernhau								
Zinnwald								
Schwartenberg								
Plauen								
Auerbach								
Aue								
Bärenstein								
Klingenthal								

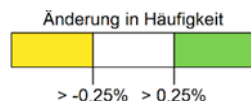


Abbildung 18: Änderungen in der Häufigkeit von Windrichtungssektoren zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 für 100 m über Grund.

Gelb bedeutet, dass der betreffende Windrichtungssektor in der Zeitscheibe 2013–2022 seltener aufgetreten ist als in der Zeitscheibe 2003–2012. Grün bedeutet, dass der betreffende Windrichtungssektor in der Zeitscheibe 2013–2022 häufiger aufgetreten ist als in der Zeitscheibe 2003–2012. Die linke Abbildung zeigt die Ergebnisse für die zentralen Wintermonate Dezember, Januar und Februar. Die rechte Abbildung zeigt die Ergebnisse für die zentralen Sommermonate Juni, Juli und August.

Für die Wintermonate (Abbildung 19, links) ergibt sich, dass die Windsektoren S und SW in ihrer Häufigkeit in der Zeitscheibe 2013–2022 stets um 1 % bis 5 % zunehmen (blaue Kodierung). Für die Sektoren N, NE und NW liegen zumeist Abnahmen in der Häufigkeit zwischen 5 % und 1 % (grüne Kodierung).

Die Windsektoren SW und W zeigen in den Sommermonaten (Abbildung 19, rechts) in der Zeitscheibe 2013–2022 die größten Abnahmen in ihren Häufigkeiten gegenüber 2003–2022 (grüne Kodierung). Die Abnahmen liegen zumeist zwischen –1 % und –5 %. Für die Rasterzellen Niesky, Görlitz, Pirna, Sebnitz, Zittau, Zinnwald und Schwartenberg liegen die Abnahmen höher, zwischen –5 % und –10 %. Die größten

Zugewinne in den Häufigkeiten liegen stets zwischen +1 % und +5 % (blaue Kodierung). Hier heben sich insbesondere die Sektoren NW und N hervor.

Vergleicht man den linken Teil der Abbildung 19 mit dem rechten Teil der Abbildung 4, so fällt auf, dass es im Sommer mehr Windsektoren pro Rasterzelle gibt, für die die Änderung in der Häufigkeit nicht mehr als 1 % beträgt (weiße Kodierung) als im Winter.

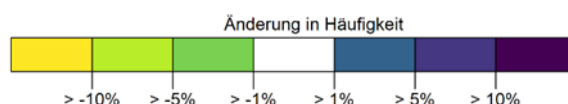
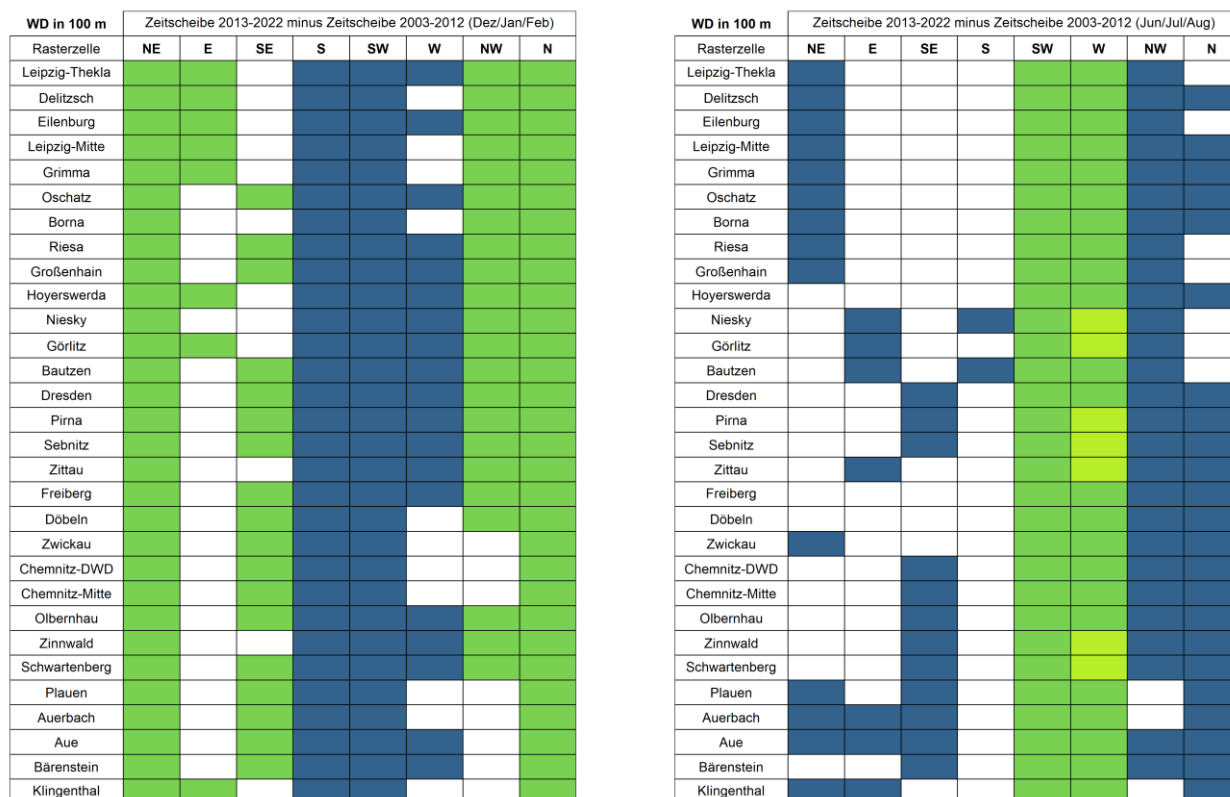


Abbildung 19: Wie Abbildung 3 jedoch mit anderer Einteilung hinsichtlich der Farbkodierung.

Es ist zu beachten, dass gelbe und grüne Töne Abnahmen in der Häufigkeit bedeuten und blaue Töne Zunahmen in den Häufigkeiten.

2.1.3.1.3 Zwischenfazit

Für die betrachteten Zeiträume zeigt sich, dass im Winter die Windsektoren S, SW und W in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 an Bedeutung gewonnen haben, während zumeist Abnahmen in den Windsektoren NW, N, NE zu verzeichnen sind. Die Zunahmen/Abnahmen in der Häufigkeit liegen zumeist bei maximal 5 %.

Im Sommer haben die Windsektoren SW und W in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 an Bedeutung verloren, während zumeist die meisten Zunahmen in der Häufigkeit für die Windsektoren NW, N, und – etwas weniger – NE zu verzeichnen sind. Die Zunahmen/Abnahmen in der Häufigkeit liegen zumeist bei maximal 5 %.

Die Änderungen in den Windrichtungen zw. 100 m und 10 m Höhe weisen viele Gemeinsamkeiten auf, sind jedoch nicht komplett identisch. Als wahrscheinlichste Ursache ist hier der größere Einfluss des Untergrundes in 10 m Höhe anzusehen.

Unterschiede zwischen den Zeitscheiben und den vorherigen Kapiteln ergeben sich vor allem aus der begrenzten Genauigkeit des optischen Vergleichs.

2.1.3.2 Windrichtungsänderungen – zehnjährige Zeitscheiben

Im Folgenden wird die Änderung der Windrichtung zwischen den zehnjährigen Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 betrachtet. Dabei dient die Zeitscheibe 2003–2012 als Referenz.

2.1.3.2.1 Windrichtung in 10 m Höhe über Grund

Als Referenzzeitscheibe für diese Betrachtung wurde der Zeitraum 2008–2012 gewählt.

Betrachtet man die Gesamtjahre so nehmen die Unterschiede zur Referenzzeitscheibe von 2013–2017 zu 2018–2022 zu. Während in der Zeitscheibe 2013–2022 sich nur für einzelne Rasterzellen Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen darstellen, zeigen sich in der darauffolgenden Zeitscheibe teilweise konsistentere Veränderungen. In der Zeitscheibe 2018–2022 weisen 22 der analysierten Rasterzellen Abnahmen in der Häufigkeit für den Sektor NE zwischen 1 % und 5 % auf. Dies gilt ebenfalls für den Windsektor W, wo 16 von 30 Rasterzellen eine Abnahme der Häufigkeit dieses Windsektors zwischen 1 % und 5 % erkennen lassen. Der Windsektor N zeigt für 11 Rasterzellen eine Zunahme in der Häufigkeit zwischen 1 % und 5 % gegenüber der Referenz (2008–2022). Die Veränderungen in der Windrichtungsverteilung stellen sich jedoch nicht so rasterzellenübergreifend in Bezug auf einzelne Windsektoren dar wie bspw. in Abbildung 17 zu sehen.

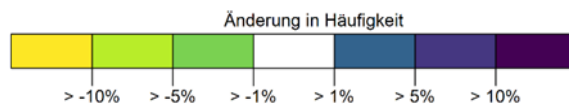
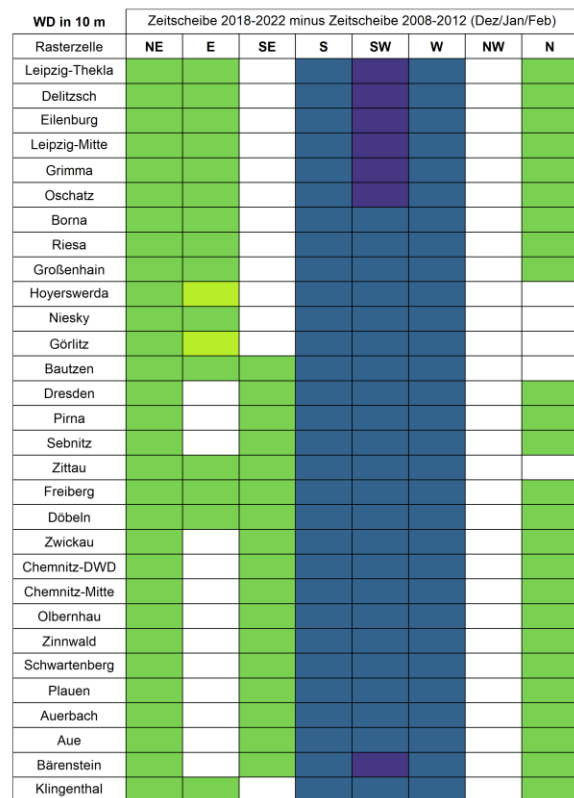
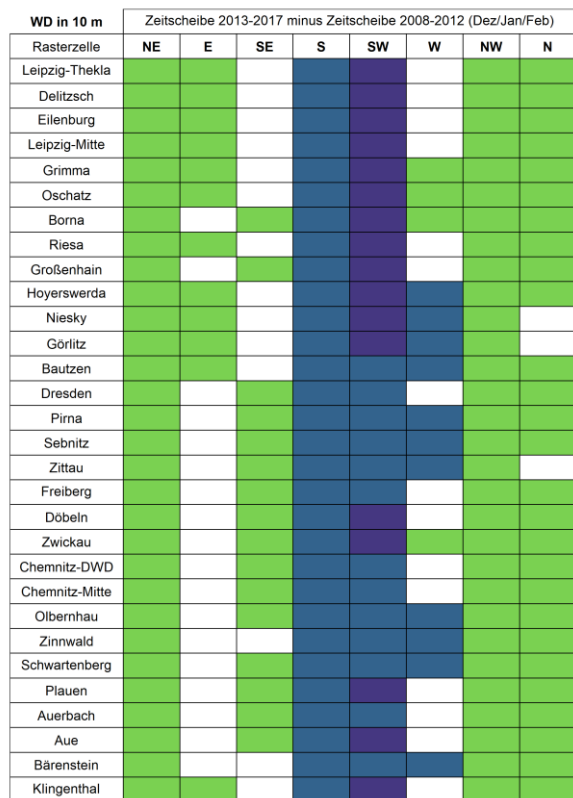


Abbildung 20: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Dezember, Januar, Februar.

Es ist zu beachten, dass gelbe und grüne Töne Abnahmen in der Häufigkeit bedeuten und blaue Töne Zunahmen in den Häufigkeiten. Die Abbildung bezieht sich auf den Wind in 10 m Höhe über Grund.

Im Folgendem wird zunächst auf die Wintermonate Dezember, Januar, Februar eingegangen und anschließend auf die Sommermonate Juni, Juli und August.

Konsistente Unterschiede für beide Zeitscheiben (Abbildung 20, Wintermonate) in Bezug auf die Referenzzeitscheibe 2008–2012 zeigen sich im Windsektor NE (Abnahme Häufigkeit) sowie S und SW (jeweils Zunahmen in der Häufigkeit). In der Zeitscheibe 2018–2022 weist Windsektor W für alle Rasterzellen eine höhere Häufigkeit auf als in der Referenzzeitscheibe. Der Windsektor W zeichnet sich in der Zeitscheibe 2013–2017 hingegen durch eine wechselnde Charakteristik bezüglich seiner Häufigkeitsveränderung aus (keine/kaum Änderungen, Zunahme, Abnahme). In der Zeitscheibe 2018–2022 sind die Abnahmen in der Häufigkeit für E und SE nochmal etwas ausgeprägter als in der Zeitscheibe 2013–2017 (Anzahl betroffener Rasterzellen, Betrag der Änderungen).

Insgesamt lässt sich für die Wintermonate feststellen, dass die Sektoren S, SW und W in Bezug auf die Referenz (2008–2012) zunehmend an Bedeutung über die beiden Zeitscheiben 2013–2017 sowie 2018–2022 gewinnen. Für die Sektoren E und SE gilt die gegensätzliche Aussage. Für den Sektor NW lässt keine solche Aussage treffen.

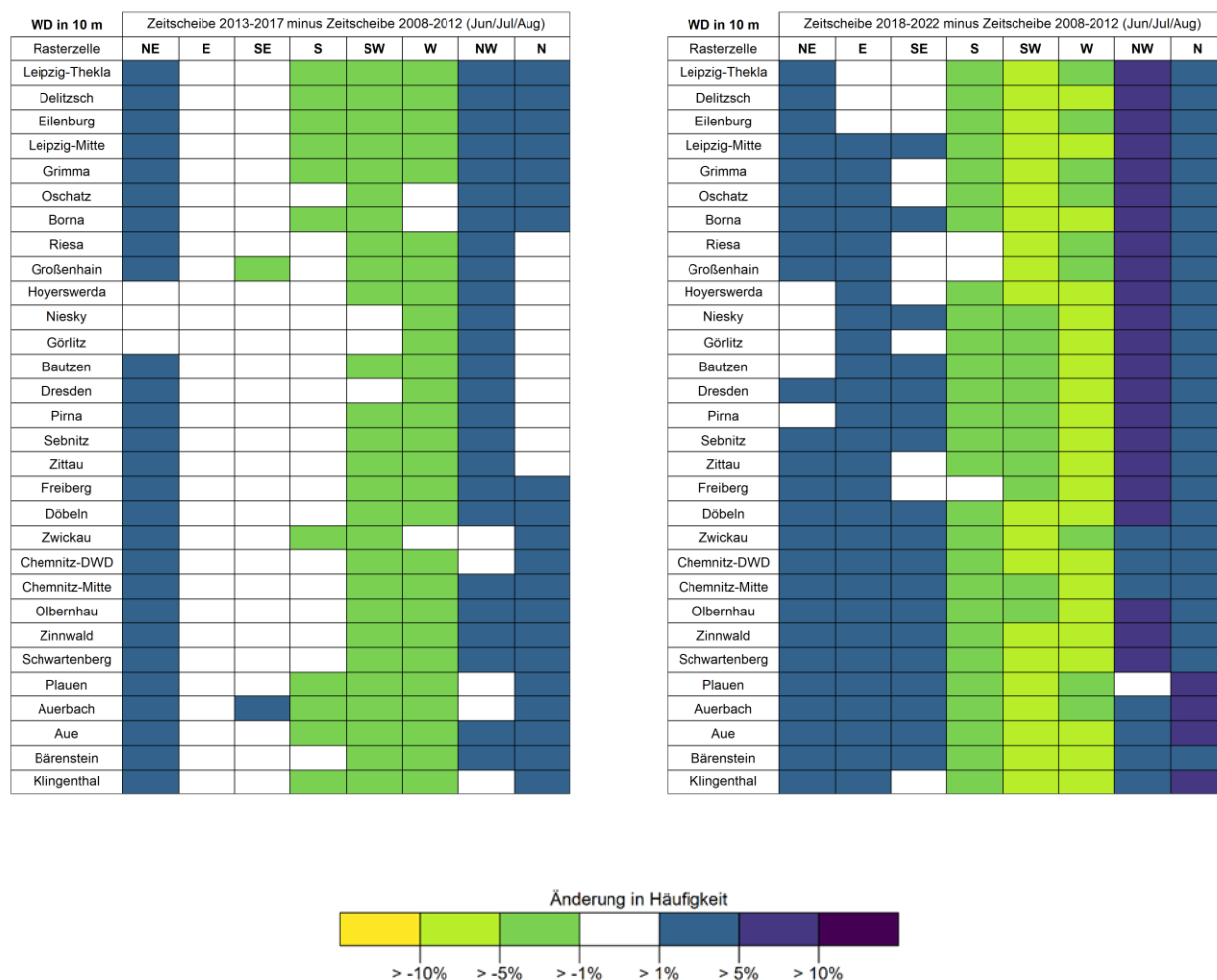


Abbildung 21: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Juni, Juli, August.

Es ist zu beachten, dass gelbe und grüne Töne Abnahmen in der Häufigkeit bedeuten und blaue Töne Zunahmen in den Häufigkeiten. Die Abbildung bezieht sich auf den Wind in 10 m Höhe über Grund.

Abbildung 21 zeigt die Veränderungen in den Windrichtungsverteilungen für die Monate Juni, Juli und August. Betrachtet man diese Abbildung, so ist zu sehen, dass in der Zeitscheibe 2013–2017 die Sektoren SW und W durch Abnahmen in ihrer Häufigkeit gegen über der Referenzzeitscheibe 2008–2012 auffallen. Dies stellt sich für nahezu alle betrachteten Rasterzellen dar. Abnahmen in der Häufigkeit sind auch für den Windvektor S zu finden, jedoch für nur etwas mehr als ein Drittel der Rasterzellen. Die

Sektoren NE, NW und N zeigen für jeweils mehr als zwei Drittel der Rasterzellen Zunahmen in den Häufigkeiten. Die Sektoren E und SE zeigen kaum/keine Veränderung in ihrer Häufigkeit bzw. nur für einzelne Rasterzellen. In der Zeitscheibe 2018–2022 sind die Abnahmen in der Häufigkeit für S, SW und W noch ausgeprägter als in der Zeitscheibe 2013–2017 (Anzahl betroffener Rasterzellen, Betrag der Änderungen). Das gleiche gilt für die Zunahmen in den Häufigkeiten für die Sektoren NW und N. Die Sektoren E und SE gewinnen in der Zeitscheibe 2018–2022 gegenüber der Referenzzeitscheibe für viele Rasterzellen an Bedeutung.

Insgesamt lässt sich für die Sommermonate feststellen, dass die Sektoren S, SW und W in Bezug auf die Referenz (2008–2012) zunehmend an Bedeutung über die beiden Zeitscheiben 2013–2017 sowie 2018–2022 verlieren während die Sektoren NW, N, E und SE zunehmend an Bedeutung gewinnen. Für den Sektor NE lässt sich keine solche Aussage treffen.

2.1.3.2.2 Windrichtung in 100 m über Grund

Als Referenzzeitscheibe für diese Betrachtung wurde der Zeitraum 2008–2012 gewählt.

Betrachtet man die Gesamtjahre so nehmen die Unterschiede zur Referenzzeitscheibe von 2013–2017 zu 2018–2022 zu. In der Zeitscheibe 2013–2022 zeigen sich nur für einzelne Rasterzellen Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen. Eine Ausnahme stellt der Sektor W dar, der in seiner Häufigkeit für knapp ein Drittel der Rasterzellen zunimmt. In der darauffolgenden Zeitscheibe sind teilweise konsistentere Veränderungen sichtbar. In der Zeitscheibe 2018–2022 weisen 20 der analysierten Rasterzellen Abnahmen in der Häufigkeit für den Sektor NE zwischen 1 % und 5 % auf. Dies gilt ebenfalls für den Windsektor W, wo 23 von 30 Rasterzellen eine.

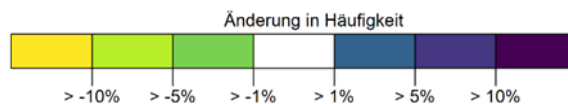
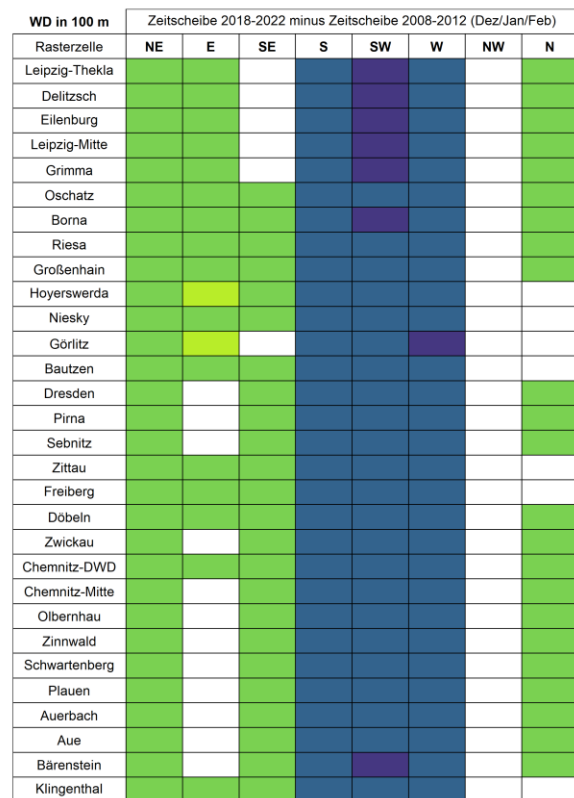
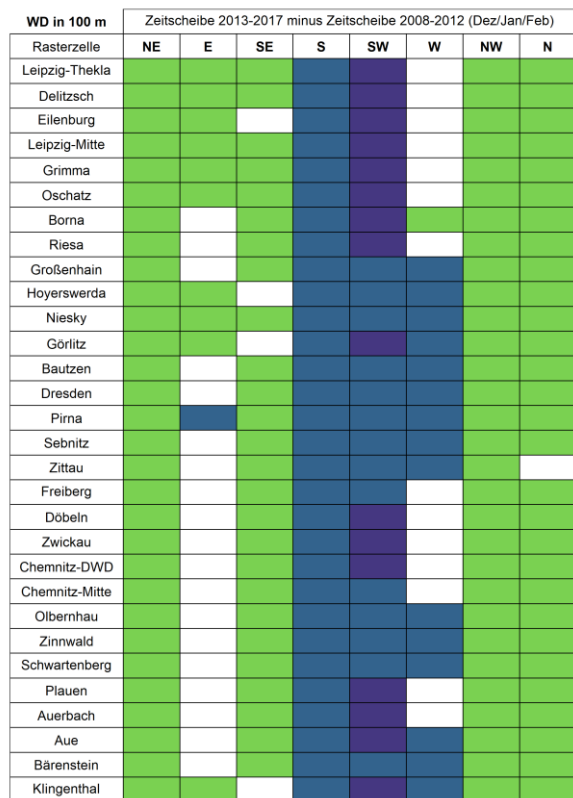


Abbildung 22: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Dezember, Januar, Februar.

Es ist zu beachten, dass gelbe und grüne Töne Abnahmen in der Häufigkeit bedeuten und blaue Töne Zunahmen in den Häufigkeiten. Die Abbildung bezieht sich auf den Wind in 100 m Höhe über Grund.

Abnahme der Häufigkeit dieses Windsektors zwischen 1 % und 5 % erkennen lassen. Dies stellt auch einen deutlichen Unterschied im Vergleich zur Zeitscheibe 2013–2017 dar, wo teilweise Zunahmen für den Windsektor W zu verzeichnen waren. Der Windsektor N zeigt für 17 Rasterzellen eine Zunahme in der Häufigkeit zwischen 1 % und 5 % gegenüber der Referenz (2008–2022). Die Veränderungen in der Windrichtungsverteilung stellen sich jedoch nicht so rasterzellenübergreifend in Bezug auf einzelne Windsektoren dar wie bspw. in Abbildung 19 zu sehen. Die Änderungen in den Windrichtungsverteilungen für das Gesamtjahr sind für die Windrichtungen in 100 m etwas ausgeprägter als in 10 m Höhe über Grund.

Im Folgendem wird zunächst auf die Wintermonate Dezember, Januar, Februar eingegangen und anschließend auf die Sommermonate Juni, Juli und August.

Abbildung 22 zeigt die Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen für die Zeitscheiben 2013–2017 und 2018–2022 in Referenz zur Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Dezember, Januar und Februar. Konsistente Unterschiede für beide Zeitscheiben in Bezug auf die Referenzzeitscheibe 2008–2012 zeigen sich im Windsektor NE (Abnahme Häufigkeit) sowie S und SW (jeweils Zunahmen in der Häufigkeit). In der Zeitscheibe 2018–2022 weist der Windsektor W für alle Rasterzellen eine höhere Häufigkeit auf als in der Referenzzeitscheibe. Der Windsektor W zeichnet sich in der Zeitscheibe 2013–2017 hingegen durch eine wechselnde Charakteristik bezüglich seiner Häufigkeitsveränderung aus (keine/kaum Änderungen, Zunahme, Abnahme). In der Zeitscheibe 2018–2022 sind die Abnahmen in der Häufigkeit für E und SE nochmal etwas ausgeprägter als in der Zeitscheibe 2013–2017 (Anzahl betroffener Rasterzellen, Betrag der Änderungen).

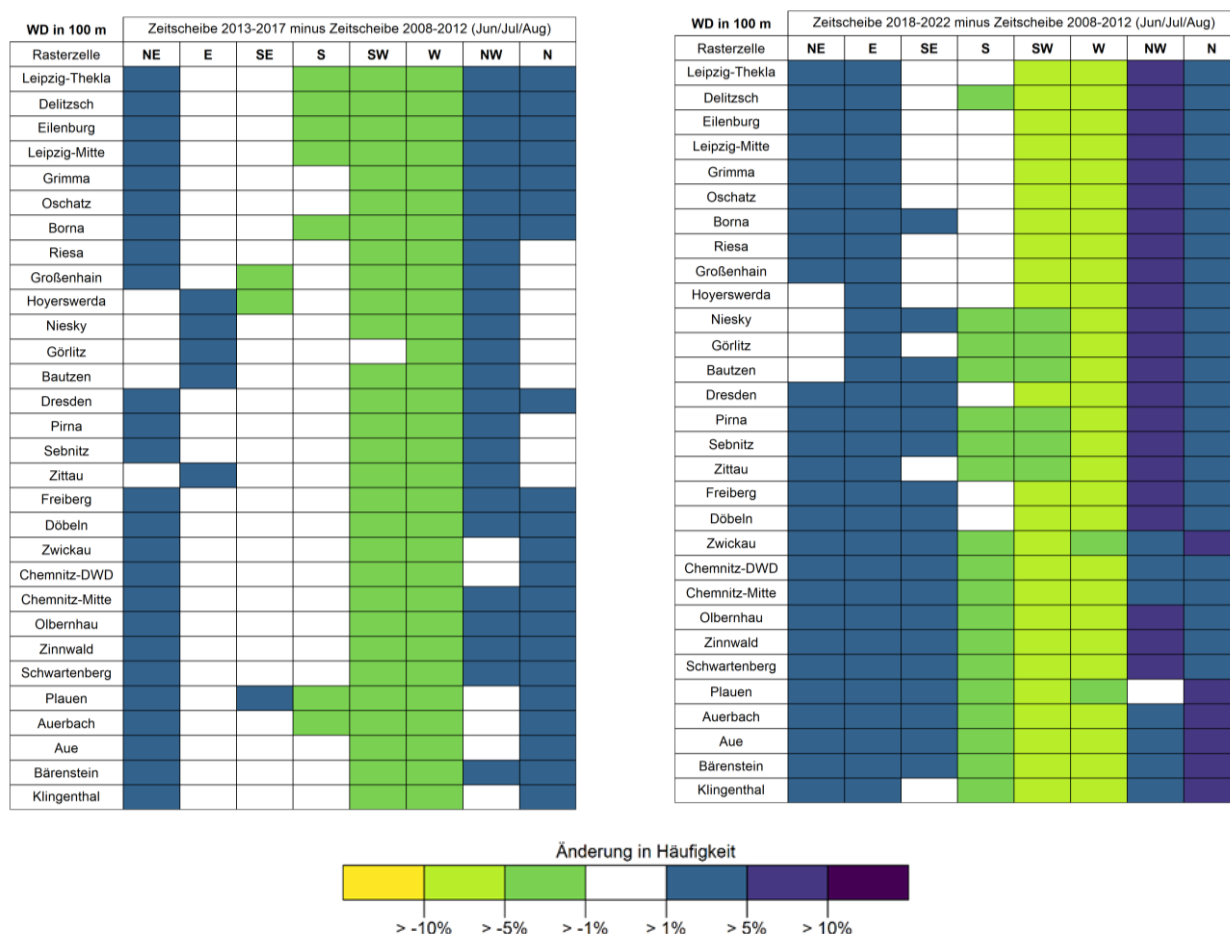


Abbildung 23: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für die Zeitscheibe 2013–2017 (links) sowie 2018–2022 (rechts) in Bezug auf die Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Juni, Juli, August.

Es ist zu beachten, dass gelbe und grüne Töne Abnahmen in der Häufigkeit bedeuten und blaue Töne Zunahmen in den Häufigkeiten. Die Abbildung bezieht sich auf den Wind in 100 m Höhe über Grund.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Sektoren S, SW und W in Bezug auf die Referenz (2008–2012) zunehmend an Bedeutung über die beiden Zeitscheiben 2013–2017 sowie 2018–2022 gewinnen. Für die

Sektoren E und SE gilt die gegensätzliche Aussage. Für den Sektor NW lässt keine solche Aussage treffen. Diese grundsätzlichen Aussagen stimmen mit den Aussagen für die Windrichtungen in 10 m über Grund überein.

Abbildung 23 zeigt die Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen für die Zeitscheiben 2013–2017 und 2018–2022 in Referenz zur Zeitscheibe 2008–2012, jeweils für die Monate Juni, Juli, August. Betrachtet man diese Abbildung, so ist zu sehen, dass in der Zeitscheibe 2013–2017 die Sektoren SW und W durch Abnahmen in ihrer Häufigkeit gegen über der Referenzzeitscheibe 2008–2012 auffallen. Dies stellt sich für nahezu alle betrachteten Rasterzellen dar. Vereinzelte Abnahmen in der Häufigkeit sind auch für den Windvektor S zu finden (7 Rasterzellen). Die Sektoren NE, NW und N zeigen Zunahmen in den Häufigkeiten für mehr als zwei Drittel der Rasterzellen. Die Sektoren E und SE zeigen kaum/keine Veränderung in ihrer Häufigkeit bzw. nur für einzelne Rasterzellen. In der Zeitscheibe 2018–2022 sind die Abnahmen in der Häufigkeit für S, SW und W noch ausgeprägter als in der Zeitscheibe 2013–2017 (Anzahl betroffener Rasterzellen, Betrag der Änderungen). Das gleiche gilt für die Zunahmen in den Häufigkeiten für die Sektoren NW und N. Die Sektoren E und SE gewinnen in der Zeitscheibe 2018–2022 gegenüber der Referenzzeitscheibe für viele Rasterzellen an Bedeutung.

Insgesamt lässt sich für die Sommermonate feststellen, dass die Sektoren S, SW und W in Bezug auf die Referenz (2008–2012) zunehmend an Bedeutung über die beiden Zeitscheiben 2013–2017 sowie 2018–2022 verlieren, während die Sektoren NW, N, E und SE zunehmend an Bedeutung gewinnen. Für den Sektor NE lässt sich keine solche Aussage treffen. Diese grundsätzlichen Aussagen stimmen mit den Aussagen für die Windrichtungen in 10 m über Grund überein.

2.1.3.3 Änderungen der Windrichtungsverteilungen vor einem längerfristigen Hintergrund

Die Frage, ob die festgestellten (moderaten) Änderungen in den Windrichtungsverteilungen als eher ungewöhnlich zu anzusehen sind, liegt nahe. Um diesen Aspekt etwas näher zu betrachten, wurden fünfjährige Zeitscheiben beginnend mit 1993 betrachtet. Als Referenz wurde die Zeitscheibe 1988–1992 gewählt.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den Wind in 100 m Höhe über Grund. Die zugehörigen Abbildungen finden für den Wind in 100 m Höhe finden sich im Anhang A 1.

Für die Sommermonate zeigt sich, dass die Zeitscheibe 2018–2022 im Vergleich zu 1988–1992 die markantesten Abnahmen für die Sektoren S, SW und W seit 1993 zeigt. Ein vergleichbares Muster der Änderungen findet sich für die Zeitscheibe 1993–1997, jedoch nicht so ausgeprägt. Über die fünfjährigen Zeitscheiben beginnend mit 1993 lässt sich kein eindeutiger Trend in den Änderungen der Windrichtungsverteilungen feststellen.

Für die Wintermonate zeigt sich, dass die festgestellten Zunahmen für die Windsektoren S, SW und W daraus resultieren, dass in der Zeitscheibe 2008–2012 diese Windrichtungssektoren seltener auftraten. Die Abnahmen gegenüber der Zeitscheibe 1988–1992 sind hier am deutlichsten ausgeprägt. In den beiden fünfjährigen Zeitscheiben, die auf die Zeitscheibe 2008–2012 folgen, treten die Windrichtungssektoren S, SW und W ebenfalls seltener auf als 1988–1992, jedoch nicht so ausgeprägt wie in der Zeitscheibe 2008–2012. In der Zeitscheibe 2018–2022 tritt nur noch der Windsektor SW konsistent seltener auf als in der Zeitscheibe 2008–2012.

Bei Betrachtung der gesamten Jahre heben sich Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen im Vergleich zu 1988–1992 für die beiden Zeitscheiben 2013–2017 und 2018–2022 nicht wesentlich von denen der anderen betrachteten fünfjährigen Zeitscheiben ab.

Für den Wind in 10 m Höhe über Grund lassen sich grundsätzlich die gleichen Aussagen treffen.

2.1.3.4 Zusammenfassung Zeitscheiben

Die bereits festgestellten Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen zwischen den beiden zehnjährigen Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 werden durch die detaillierteren Analysen grundsätzlich bestätigt. In der Zeitscheibe 2013–2022 haben, gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012, im Winter die Windrichtungssektoren S, SW und W an Bedeutung gewonnen, während die Windsektoren SW und W im Sommer an Bedeutung verloren haben. Die Zunahmen/Abnahmen in den Häufigkeiten der Windsektoren liegt dabei nicht über 5 %. Bei Betrachtung der Gesamtjahre ohne saisonale Unterscheidungen zeigen sich kaum Unterschiede im Vergleich zum Referenzzeitraum (2003–2012).

Bei Betrachtung der fünfjährigen Zeitscheiben 2013–2017 und 2018–2022 jeweils in Referenz zu 2008–2012 lässt sich für die Wintermonate feststellen, dass die Sektoren S, SW und W in Bezug auf die Referenz (2008–2012) zunehmend an Bedeutung über die beiden Zeitscheiben 2013–2017 und 2018–2022 gewinnen. Für die Sommermonate hingegen verlieren die Sektoren S, SW und W in Bezug auf die Referenz (2008–2012) zunehmend an Bedeutung über diese beiden Zeitscheiben. Die Unterschiede im Bezug zur Referenz liegen maximal zwischen 5 % und 10 % und fallen damit teilweise etwas größer aus als für die zehnjährige Betrachtungsweise. Dementsprechend sind die festgestellten Unterschiede bei Betrachtung der Gesamtjahre ebenfalls etwas größer, zeigen aber kein solch konsistentes Bild wie für die Winter- oder Sommermonate.

Bei Betrachtung der festgestellten Änderungen vor einem längerfristigen Hintergrund auf Basis von fünfjährigen Zeitscheiben (Referenz 1988–1992) zeigt sich, dass die, für den Sommer, festgestellten Abnahmen in den Häufigkeiten der Sektoren, S, SW und W für die Zeitscheibe 2018–2022 im Vergleich zur Referenz 1988–1992 am ausgeprägtesten waren. Die festgestellten Zunahmen für die Windrichtungssektoren im Winter sind eher darauf zurückzuführen, dass diese Windsektoren in der Zeitscheibe 2008–

2012 im Vergleich zur Referenz 1988–1992 am wenigsten auftraten. Weder für die betrachteten Sommermonate noch die Wintermonate lässt sich eine Tendenz feststellen in dem Sinne, dass bestimmte Windsektoren stetig an Bedeutung gewinnen bzw. verlieren. Diese Aussage trifft auch auf die Betrachtung der Gesamtjahre zu. Weiterhin zeigt diese Analyse, dass die Ergebnisse von der Wahl des Referenzzeitraums abhängig sind.

Grundsätzlich ist, unabhängig von der Länge der gewählten Zeitscheiben festzustellen, dass die Änderungen in den Windrichtungen zw. 100 m und 10 m Höhe viele Gemeinsamkeiten aufweisen, jedoch nicht komplett identisch sind. Als wahrscheinlichste Ursache ist hier der größere Einfluss des Untergrundes in 10 m Höhe anzusehen.

Für die Ergebnisse ist zu beachten, dass Modellergebnisse analysiert wurden. Obwohl in ERA5 eine Vielzahl von Messdaten assimiliert werden, liegen den Berechnungen vereinfachende Annahmen zugrunde. Beispielsweise haben die analysierten Rasterzellen eine horizontale Ausdehnung von ca. 30 km x 30 km. Räumliche Gegebenheiten die kleiner sind und einen Einfluss auf die Windrichtungsverteilung an einem konkreten Ort haben, können so nicht aufgelöst werden. Die von ihnen ausgehenden Effekte können somit auch nicht in den Modellergebnissen enthalten sein. Um die Ergebnisse besser abzusichern, ist es empfehlenswert die vorgefundenen Windrichtungsverteilungen anhand von Messdaten überprüfen. Hierzu eignen sich Windrichtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Windrichtungen in ca. 10 m Höhe über Grund) oder Radiosondendaten, die über verschiedene Datenportale verfügbar sind (u. a. DWD).

2.2 Wetterlagen

Die Wetterlagen werden auf Basis der subjektiven Wetterlagen nach HESS und BREZOWSKY (Hess und BREZOWSKY 1952, GERSTENGARBE und WERNER 1993) untersucht. Einen grundsätzlichen Überblick über die Bezeichnung der unterschiedlichen Wetterlagen gibt Tabelle 2. Für eine grundsätzliche Beschreibung der Wetterlagen wird auf GERSTENGARBE und WERNER (1993) verwiesen.

Die hier genutzten Daten wurden zunächst einer ersten Sichtung unterzogen. Wie in Hausmann et al. (2020) zeigt sich, dass auch in den letzten Jahren der jüngeren Vergangenheit im Vergleich zum Zeitraum 1961–1990 weiterhin vermehrt meridionale Wetterlagen auftreten und weniger zonale Wetterlagen. In der Zeitscheibe 2013–2022 zeigt sich gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 eine weitere Zunahme der meridionalen Wetterlagen, während sich für die zonalen und gemischten Wetterlagen keine klare Aussage auf Basis von Abbildung 24 ableiten lassen.

Tabelle 2: Großwetterlagen (GWL) nach HESS und BREZOWSKY

	Bezeichnung	Abkürzung
<i>A. Großwetterlagen der zonalen Zirkulationsform</i>		
1	Westlage, antizyklonal	WA
2	Westlage, zyklonal	WZ
3	Südliche Westlage	WS
4	Winkelförmige Westlage	WW
<i>B. Großwetterlagen der gemischten Zirkulationsform</i>		
5	Südwestlage, antizyklonal	SWA
6	Südwestlage, zyklonal	SWZ
7	Nordwestlage, antizyklonal	NWA
8	Nordwestlage, zyklonal	NWZ
9	Hoch Mitteleuropa	HM
10	Hochdruckbrücke (Rücken) Mitteleuropa	BM
11	Tief Mitteleuropa	TM
<i>C. Großwetterlagen der meridionalen Zirkulationsform</i>		
12	Nordlage, antizyklonal	NA
13	Nordlage, zyklonal	NZ
14	Hoch Nordmeer-Inland, antizyklonal	HNA
15	Hoch Nordmeer Island, zyklonal	HNZ
16	Hoch Britische Inseln	HB
17	Trog Mitteleuropa	TRM
18	Nordostlage, antizyklonal	NEA
19	Nordostlage, zyklonal	NEZ
20	Hoch Fennoskandien, antizyklonal	HFA
21	Hoch Fennoskandien, zyklonal	HFZ
22	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal	HNFA
23	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, zyklonal	HNFZ
24	Südostlage, antizyklonal	SEA
25	Südostlage, zyklonal	SEZ
26	Südlage, antizyklonal	SA
27	Südlage, zyklonal	SZ
28	Tief Britische Inseln	TB
29	Trog Westeuropas	TRW
	Übergang/unbestimmt	U

Eine anschließende Analyse zeigt für welche Wetterlagen sich die Häufigkeiten am meisten änderten (Abbildung 25). In der Zeitscheibe 2003 – 2012 waren insbesondere folgende drei Wetterlagen häufiger vertreten:

- Westlage, zyklonal (WZ)
- Hochdruckbrücke (Rücken) Mitteleuropa (BM)
- Südwestlage,zyklonal (SWZ)

Verschiedene Wetterlagen treten in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 häufiger auf. Gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 sind für folgende drei Wetterlagen die größten Zunahmen in der Häufigkeit zu verzeichnen.

- Westlage, antizyklonal (WA)
- Hoch Fennoskandien, zyklonal (HFZ)
- Nordwestlage, antizyklonal (NWA)

Insbesondere die Wetterlage Hoch Fennoskandien zeichnet sich durch geringe Windgeschwindigkeiten in Sachsen aus, wodurch eine Schadstoffanreicherung in der Luft bevorteilt wird (WOLF et al. 2012), aber auch potentiell Depositionsvorgänge. Diese Zunahme der Häufigkeit in dieser Wetterlage steht im Einklang mit den leichten Veränderungen der Windrichtungsverteilungen für die Zeitscheibe 2013–2022.

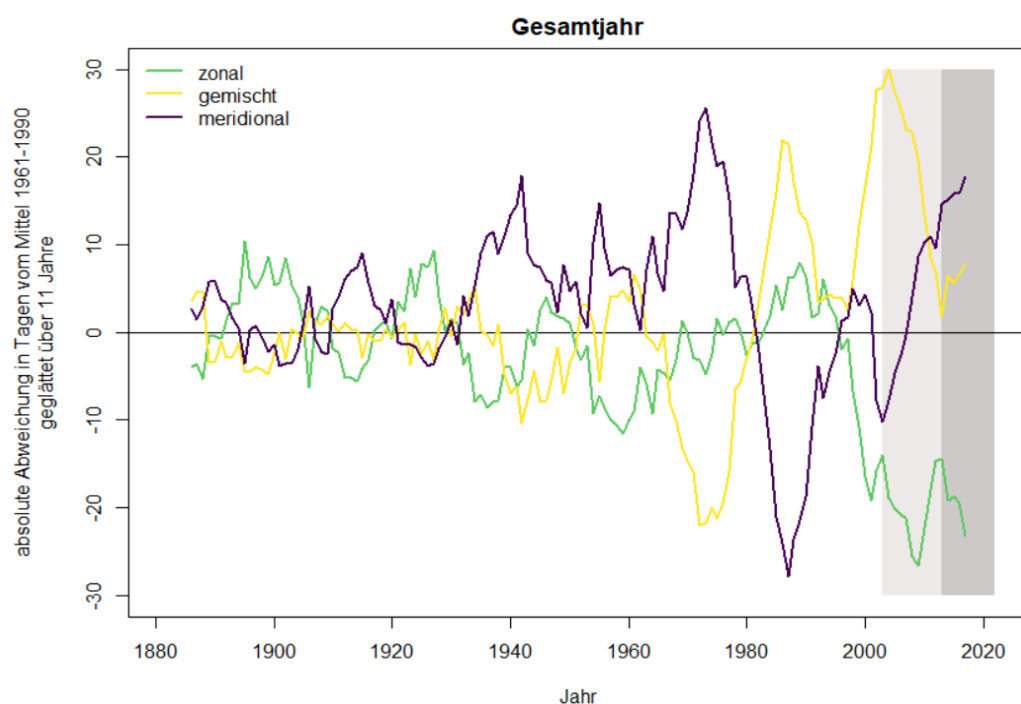


Abbildung 24: Entwicklung der Auftretenshäufigkeit von subjektiv klassifizierten GWL 1881 – 2022.

Die grau hinterlegten Zeiträume kennzeichnen die Zeitscheiben 2003–2012 (hellgrau) und 2013–2022 (dunkles Grau). Es ist zu beachten, dass aufgrund der Verwendung eines gleitenden 11-jährigen Mittel die Datenkurve vor dem Ende des verwandten Zeitraums endet

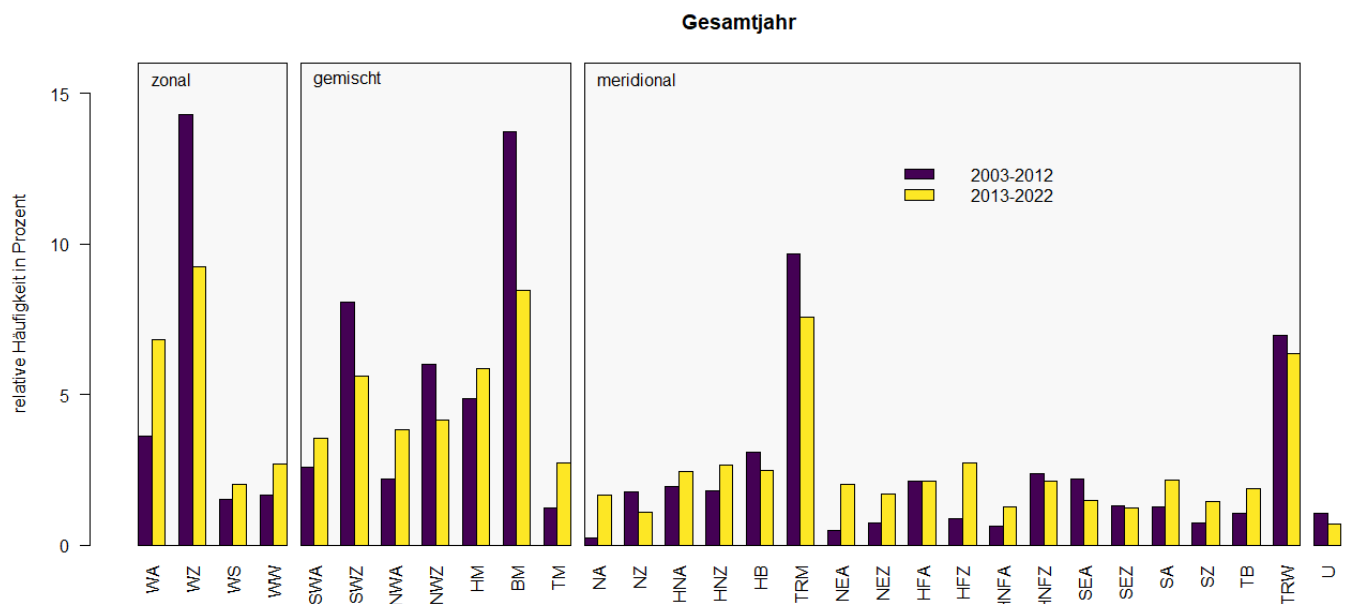


Abbildung 25: Vergleich der Wetterlagenverteilungen für die Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022 ohne Unterscheidung in Sommer und Winter (Gesamtjahr)

Einen Schlüssel für die verwandten Abkürzungen gibt Tabelle 2

Betrachtet man für diese Zeitscheiben nur die Wetterlagen der Monate Dezember, Januar, Februar bzw. nur die Monate Juni, Juli, August, so finden sich teilweise Übereinstimmungen zu den Ergebnissen der Windrichtungsanalysen auf Basis der ERA5-Daten. Dies betrifft die auffällige Abnahme der Wetterlage „Westlage, zyklonal“ (WZ) und der Wetterlage „Südwestlage, zyklonal“ (SWZ) für die Sommermonate Juni, Juli, August in der Zeitscheibe 2013–2022. Beide Wetterlagen bringen eher westliche bis südwestliche Winde mit sich. Die Wetterlage „Hoch Fennoskandien, zyklonal“ nimmt am stärksten zu. Dies ist eine Wetterlage mit eher nördlichen bis östlichen Windrichtungen und geringeren Windgeschwindigkeiten. Für die Wintermonate Dezember, Januar, Februar nehmen die Wetterlagen „Westlage, antizyklonal“ und „Südwestlage, zyklonal“ am stärksten zu, Wetterlagen, die eher mit westlichen mit südwestlichen Windrichtungen verbunden sind. Diese Ergebnisse stützen die Ergebnisse basierend auf den ERA5-Daten.

Es zeigt sich jedoch, dass die Änderungen im Windregime sich aus einer Vielzahl von Änderungen über alle Wetterlagen ergeben, sowohl im Sommer als auch im Winter (siehe hierzu auch Abbildung 25). Es ist zu beachten, dass die konkrete bodennahe Windrichtung an einem Ort stark durch lokale Gegebenheiten beeinflusst (Topographie, Landnutzung) sein kann. Daher können für ein und dieselbe Wetterlage an verschiedenen Orten sehr unterschiedliche Windrichtungen auftreten. Darüber hinaus kann sich die Windrichtung danach unterscheiden, wo der konkrete Ort sich im Verhältnis zum bestimmten Druckgebilde einer Wetterlage befindet. Auch ist es nicht gegeben, dass alle Großwetterlagen sich

zu allen Jahreszeiten ähnlich verhalten, d.h. die Witterung ähnlich beeinflussen (Gerstengarbe und WERNER 2005).

Ergänzend zu den Häufigkeiten von Wetterlagen (An wie vielen Tagen eines Zeitraumes trat eine Wetterlage auf?), wurden die Andauern der Wetterlagen betrachtet (Wie lange hält eine Wetterlage an?). Für die, für die Schadstoffproblematik interessierenden, 10-jährigen Zeitabschnitte, wurden die Mediane der Andauern pro Zeitscheibe für jede Wetterlage betrachtet. Es ergibt sich, dass fast alle Wetterlagen in der Zeitscheibe 2003–2012 um 0,5 bis 2 Tage länger andauerten als in der Zeitscheibe 2013–2022. Die Wetterlagen TM (Tief Mitteleuropa), HNA (Hoch Nordmeer-Island, antizyklonal), SZ (Südlage zyklonal), TB (Tief Britische Inseln) änderten in ihren Andauern nicht. Einzig die Wetterlage SEZ (Südostlage, zyklonal) nimmt in ihrer Andauer um einen Tag zu. Über ihre Andauer kann eine Wetterlage unterschiedliche Auswirkungen auf die Feinstaubbelastung haben. Beginnt eine Wetterlage, die eher windarm und trocken ist, so ist es möglich, dass initial weniger Schadstoffe mobilisiert bzw. mehr Schadstoffe deponiert werden aufgrund des geringeren Windes. Hält diese Wetterlage an, so kann aufgrund der allgemeinen Austrocknung jedoch die Mobilisierbarkeit des Feinstaubes wieder zunehmen, was sich wiederum negativ auf die Feinstaubbelastung auswirken kann. Vor dieser Überlegung ist es möglich, dass die höheren Andauern insbesondere bei trockenen Wetterlagen, die Feinstaubbelastung negativ beeinflusst haben könnten. Jedoch lässt sich daraus nicht folgern, dass dies immer und für alle Wetterlagen zutrifft.

2.3 Radiosondenaufstiege

Als Quelle für Radiosondendaten der Stationen Lindenberg (Deutschland), Meiningen (Deutschland), Praha-Libus (Tschechien) und Wroclaw (Polen) wurde die Datenbank der University Wyoming² genutzt und die entsprechend verfügbaren Zeiträume heruntergeladen. Es wurden alle verfügbaren Daten im Zeitraum von 1974 bis 2020 dem Archiv entnommen und zwar für die Zeitpunkte 00:00 UTC und 12:00 UTC. Eine Prüfung der Datenverfügbarkeit zeigte, dass Daten aller vier Stationen erst ab dem Jahr 1993 für die Zeitpunkte 00:00 UTC und 12:00 UTC über längere Zeiträume zur Verfügung stehen. Weiterhin wurde sich ein Überblick über mögliche Gerätewechsel an den jeweiligen Stationen verschafft. Hierzu wurden Daten des Deutschen Wetterdienstes (Stationen Lindenberg und Meiningen) genutzt. Für die Stationen Praha-Libus und Wroclaw sind Informationen aus dem International Global Radiosounding

² <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, zuletzt eingesehen am 07.08.2023

Archive (IGRA³) verfügbar. Diese lassen jedoch für die relevanten Zeiträume nur Aussagen zu, wann zu einem bestimmten Tag welches Radiosondenmodell genutzt wurde, jedoch nicht darüber an welchem Datum genau ein Wechsel des Radiosondentyps stattfand und somit auch nicht wie lange ein bestimmter Radiosondentyp genutzt wurde. Daher können mögliche Einflüsse von Gerätewechsels sowie Messgeräte bedingte Unterschiede zwischen den Stationen nicht betrachtet werden. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

Abbildung 26 zeigt den Vergleich der Radiosondendaten für 00:00 Uhr (UTC) und 12:00 Uhr (UTC) mit den entsprechenden ERA5-Daten für die Standarddruckniveaus 1000 hPa, 925 hPa und 850 hPa. Für die Stationen Meiningen und Praha-Libus wird das Druckniveau 1000 hPa nicht dargestellt, da aufgrund deren Höhenlage (453 m bzw. 303 m ü. NN) nur sehr wenige Daten für dieses Druckniveau vorliegen. Da das 1000 hPa – Niveau für die Stationen Lindenberg und Wroclaw ebenfalls Datenlücken aufweist, ist die Gesamtanzahl der ausgewerteten Wertepaare für diese Stationen geringer. Für eine Station gehen immer die gleichen Zeitpunkte in die Auswertung ein. Als Zeitraum wurden die Jahre 2003–2020 gewählt, was in etwa dem Zeitraum entspricht in dem sich größere Änderungen in den gemessenen Immissionen von Sachsen ergaben.

³ <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>, zuletzt eingesehen am 07.08.2023

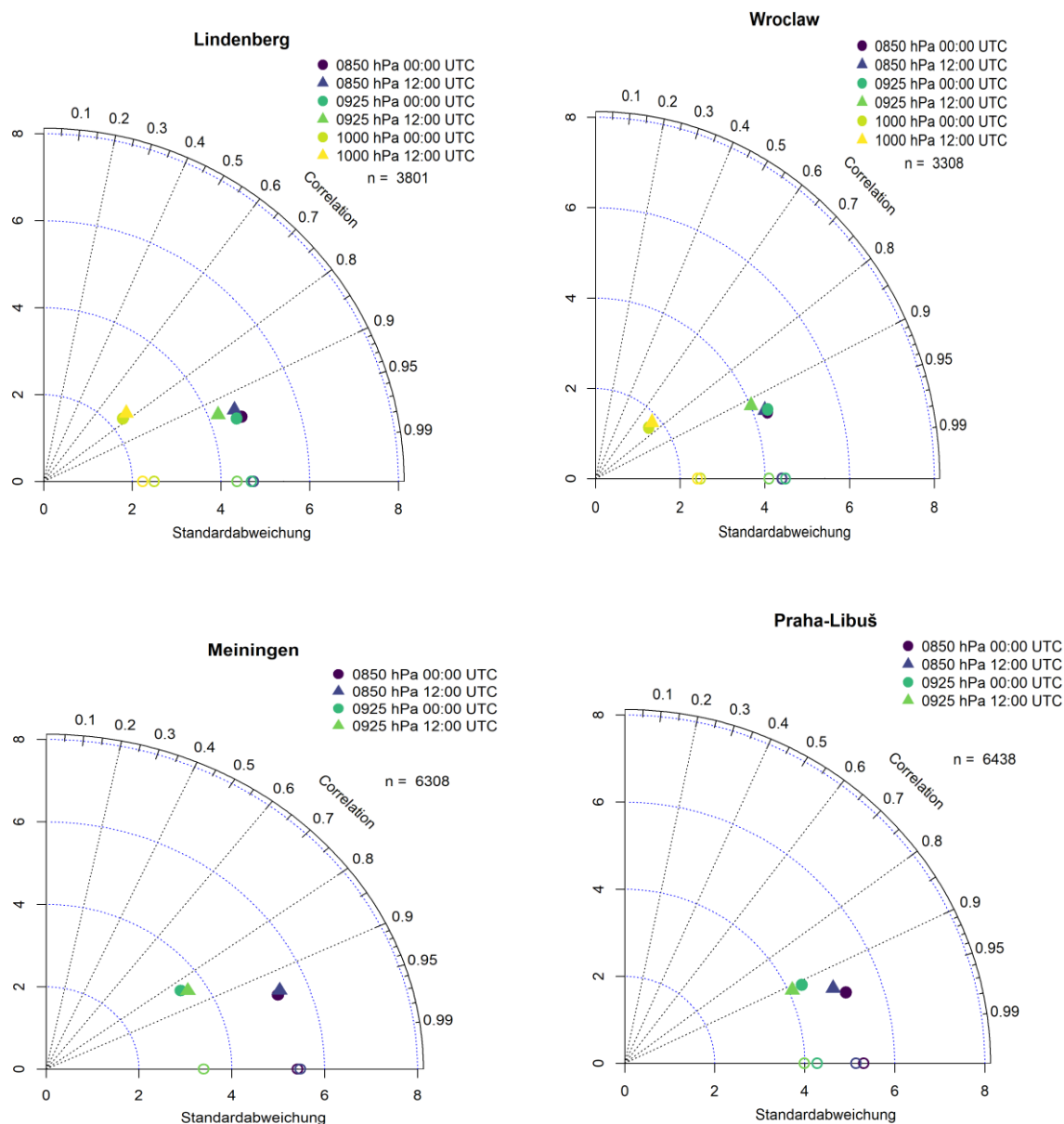


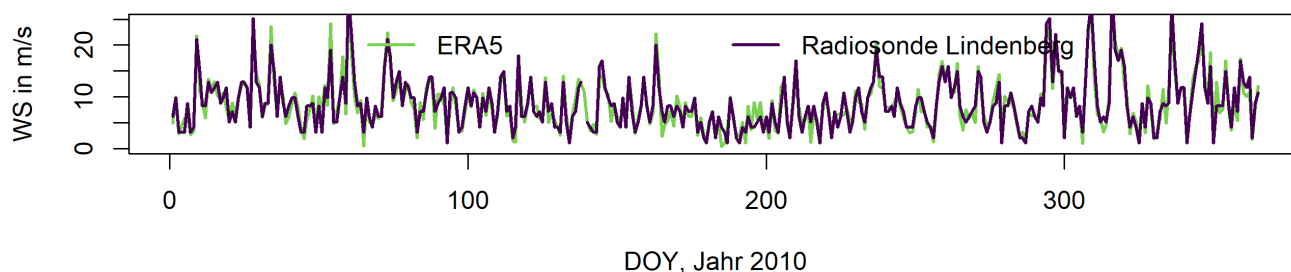
Abbildung 26: Taylordiagramme für den Vergleich von ERA5-Daten und Radiosondendaten für die Jahre 2003–2020 und für die Uhrzeiten 00:00 UTC und 12:00 UTC.

Die offenen Symbole geben die Standardabweichungen der Radiosondendaten selbst an. n bezeichnet die Anzahl der jeweils ausgewerteten Wertepaare.

Die Übereinstimmung der Radiosondendaten mit den ERA5-Daten ändert mit der Uhrzeit für alle Stationen kaum, d. h. die Uhrzeiten sind eher von untergeordneter Bedeutung für die Unterschiede zwischen Modell (ERA5) und Messung (Radiosonden). Grundsätzlich zeigt sich, dass die Druckniveaus 850 hPa und 925 hPa eine höhere Korrelation zwischen den ERA5-Daten und den Radiosondendaten aufweisen als im 1000 hPa-Niveau. Ebenso zeigt sich, dass sich die Korrelationen zwischen dem 925 hPa-Niveau und dem 850 hPa-Niveau für die Station Meiningen mehr unterscheiden als für die anderen be-

trachteten Stationen. Dies ist sehr wahrscheinlich auf das in ERA5 genutzte Oberflächenmodell zurückzuführen, welches die realen Bedingungen nur vereinfacht wiedergeben kann. Der Einfluss der Oberfläche nimmt mit zunehmendem Abstand zur Erdoberfläche ab und führt zu einer besseren Übereinstimmung zwischen ERA5-Daten und Radiosondendaten im Druckniveau 850 hPa als auch im Druckniveau 925 hPa im Vergleich zum Druckniveau 1000 hPa. Die Standardabweichungen in den Taylordiagrammen weisen auf größere Differenzen zwischen Modell und Messdaten für die höheren Druckniveaus hin. Zeitreihendarstellungen (Abbildung 27) zeigen, dass der relative Verlauf der Windgeschwindigkeiten insgesamt gut getroffen wird, was die Ergebnisse der Taylordiagramme bestätigt. Jedoch sind größere Unterschiede in den absoluten Werten zu verzeichnen. Hier sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Variabilität der Messdaten aus der Datenbank in Wyoming durch die Angabe der Windgeschwindigkeit in ganzen Knoten reduziert wiedergegeben wird. Für den Vergleich ist weiterhin anzumerken, dass bei der Berechnung der ERA5-Daten auch die hier verwandten Radiosondendaten assimiliert wurden (Auskunft des Copernicus Support Centers vom 27.10.2023 per E-Mail) und daher eine grundsätzliche Korrelation zwischen Modell und Messung nicht unerwartet ist.

Druckebene 850 hPa, 00:00:00 UTC



Druckebene 850 hPa, 12:00:00 UTC

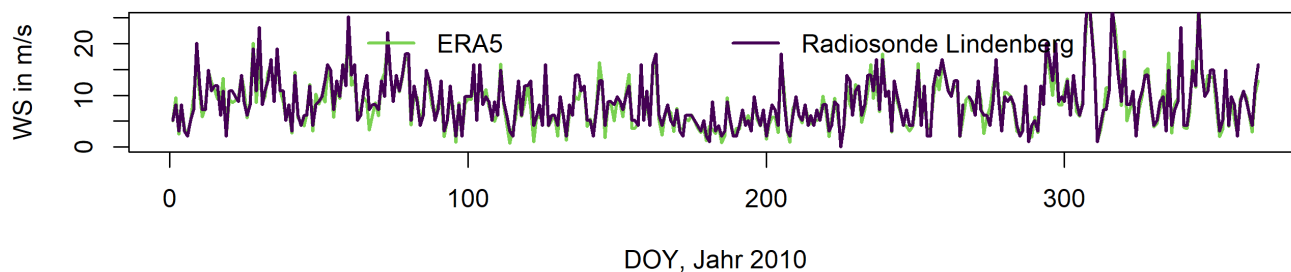


Abbildung 27: Vergleich der Zeitreihen der Radiosondendaten mit der Zeitreihe der entsprechenden Rasterzelle der ERA5-Daten für die Station Lindenberg und das Jahr 2010 für das Druckniveau 850 hPa.

3 Modellierung Feinstaub und Stickstoff-konzentrationen

In diesem Abschnitt soll sich der Antwort auf die Frage genähert werden, auf welche Ursachen der gemessene Rückgang der Konzentrationen des Feinstaubs PM_{10} und des Stickstoffs NO , NO_2 und NO_x zurückzuführen sind. Mögliche Ursachen sind ein verändertes Windregime, so dass die Schadstoffe an andere Orte als bisher verfrachtet oder deponiert werden. Dies kann bei sonst insgesamt unveränderten Emissionen zu Änderungen in den lokal, gemessenen Immissionen führen. Eine weitere Möglichkeit sind reduzierte Emissionen. Daten hierzu liegen allerdings nur unzureichend vor, so dass durch die im Folgenden beschriebene und durchgeführte Modellierung invers Rückschluss auf die Entwicklung der Schadstoffemissionen gezogen werden kann. Auch ist eine Kombination aus einem veränderten Windregime und veränderten Emissionen möglich. Für die Untersuchungen stehen insgesamt 21 Datenreihen für die Feinstaubkonzentration PM_{10} von Stationen der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) zur Verfügung. Zur Analyse der Stickstoffentwicklung stehen 23 Zeitreihen der Konzentrationen für NO , NO_x und NO_2 zur Verfügung.

3.1 Methodik

Die Modellierung der Immissionen basiert auf der Hypothese, dass die Immissionen von Feinstaub- und Stickstoffkonzentration von drei Einflussgrößen abhängig sind: Den Bedingungen vor Ort, also dem Standort der Messungen. Hier spielen Dinge wie der Verkehr, tageszeitliche Unterschiede, Baustellen oder Windabschirmungen eine große Rolle. Zum zweiten spielen die Emissionen eine entscheidende Rolle. Also wieviel Stickoxide und Feinstaub wird beispielsweise durch Verkehr, Industrie oder Landwirtschaft emittiert. Die dritte große Einflussgröße sind die meteorologischen Bedingungen und hier insbesondere die atmosphärischen Austauschbedingungen. Diese entscheiden über die großräumige Verbringung des Feinstaubes und der Stickoxide sowie über deren Senken (Deponierung bzw. Abbau).

Daten zu lokalen Bedingungen und die Immissionsmessung beeinflussende Ereignisse sind nur in sehr begrenztem Umfang in Form von Baustelleninformationen für einige Standorte verfügbar. Informationen zu Emissionen, die damit verbunden sind, liegen nicht vor. Der Ansatz dieser Modellierung ist daher der folgende: Es werden deterministische Modelle mittels Gradient Boosting (CHEN und GUESTRIN, 2016) erstellt. Diese Modelle haben als Zielgröße die jeweilige PM_{10} - bzw. Stickoxidkonzentration. Als unabhängige Größen dienen großräumige Daten der atmosphärischen Bedingungen. Hierfür werden Reanalysedaten in stündlicher Auflösung aus ERA5 verwendet (siehe Abschnitt 2.1). Diese decken den gesamten Bearbeitungszeitraum ab. Hierfür werden die Größen aus Tabelle 1 verwendet. Immissionsdaten liegen für den Zeitraum 2003–2022 vor. Die Modellierung erfolgt in stündlicher Auflösung. Es werden zwei Varianten modelliert: In Variante 1 werden die Jahre 2002 bis 2012 zum Modelltraining verwendet, für die Jahre 2013–2022 werden die Modelle angewendet. In Variante 2 werden die Jahre 2003 bis 2017 zum Modelltraining verwendet und die Immissionen für die Jahre 2018 bis 2022 berechnet.

Wie wird nun der Einfluss der verschiedenen Faktoren auf den Rückgang der gemessenen Immissionen bestimmt? Zunächst wird der lokale Einfluss eliminiert oder zumindest reduziert, indem die Ergebnisse zeitlich und räumlich akkumuliert werden. Absolut lässt sich der lokale Einfluss sicher nicht ausschließen, doch durch insgesamt 21 (Feinstaub) bzw. 23 (Stickoxide) Stationen mit Daten im Untersuchungszeitraum werden die Einflüsse lokaler Besonderheiten und unterschiedlicher Tagesgänge auf ein Minimum reduziert. Infolgedessen kann in guter Näherung angenommen werden, dass die Immissionen im wesentlichen noch von der Emission und den atmosphärischen Bedingungen abhängig sind. Für die Zeiträume 2013–2022 und 2018–2022 liegen somit neben den Messwerten der Stationen auch modellierte Werte in Stundenauflösung vor. Diese Modellierten Werte sind nur abhängig von den Atmosphärischen Bedingungen, da nur diese als Prädiktoren in die Gradient Boosting Modelle einfließen. Die gemessenen und modellierten Daten können so direkt miteinander verglichen werden.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Modellierung mit tatsächlichen Messdaten kann das Bestimmtheitsmaß ermittelt werden. Diese Kennzahl hilft zu verstehen, wie gut die Modellierungen die Schwankungen in den Daten erklären können. Bei einem Bestimmtheitsmaß von beispielsweise 0,4 in täglicher Auflösung wären 40 % der Streuung durch atmosphärische Einflussgrößen erklärbar, 60 % wären durch lokale Bedingungen, die Emissionen und sonstige Einflussgrößen zu erklären. Bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,3 in stündlicher Auflösung wären entsprechend 30 % durch atmosphärische Einflussgrößen, 70 % durch lokale Bedingungen, Emissionen und sonstige Einflussgrößen zu erklären.

Die deterministischen Modelle mittels Gradient Boosting sind in der Lage, den atmosphärischen Einfluss auf den Rückgang der Immissionen abzuschätzen. Sie sind nicht mit einer numerischen Modellierung zu vergleichen, können keine Aussage zu Immissionen an anderen Orten als den modellierten treffen und können auch keine Emissionspfade modellieren. Insgesamt werden etwa 100 Einflussgrößen aus der jeweiligen ERA5-Rasterzelle verwendet, in der die betreffende Station liegt. Durch zusätzliche Verwendung der Werte der nächstgelegenen Rasterzelle sowie der Werte aus dem vorhergehenden und nachfolgenden Zeitschritt, werden insgesamt ca. 600 atmosphärische Prädiktoren verwendet.

Die Modellierung selbst und deren Ergebnisse sind durch verschiedene Fehler beeinflusst und sollten als Gesamtbild betrachtet werden. Die Größe der ERA5-Rasterzellen ($0,25^\circ$), die Genauigkeit der Messungen der Konzentrationen selbst (ca. 25 % Abweichungen vom Messwert) oder auch die Unmöglichkeit, alle Einflussgrößen, lokal oder großräumig zu erfassen, beschränken die Qualität der Modellierungen. Mittlere Stationsdaten und langjährige Trends haben eine große Aussagekraft, wohingegen beispielsweise Stundenwerte einzelner Stationen deutlich fehleranfälliger sind und auch vereinzelt durch lokal verringerte oder erhöhte Emissionen (Straßensperrung, Baustelle) dominiert sein können und somit nicht überinterpretiert werden sollten.

3.2 Ergebnisse und Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt getrennt nach Messgröße und Modellierungszeitraum. Angegeben ist immer der Zeitraum, in dem die Modelle angewendet wurden. Die Angabe des Zeitraumes 2013 bis 2022 bedeutet ein Anlernen im Zeitraum 2003–2012 und eine Modellierung im Zeitraum 2013–2022. Der Zeitraum 2018–2022 impliziert entsprechend ein Anlernen im Zeitraum 2003–2017 und ein Modellieren im Zeitraum 2018–2022. Die Zeiträume sind durch eine beobachtete starke Abnahme der Immissionen ab 2013, insbesondere aber ab 2018 motiviert. Die Auswertung in diesem Abschnitt konzentriert sich auf den Anlernzeitraum 2003–2012 mit dem zugehörigem Modellierungszeitraum 2013–2022. Für die detaillierte Auswertung des Anlernzeitraumes 2003–2017 wird auf den Anhang verwiesen.

3.2.1 Stickoxide

Es wird zwischen den Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂) und der integralen Größe Stickoxide (NO_x) unterschieden. Für jede der Größen erfolgen separate Berechnungen und Auswertungen. Für alle diese Messgrößen liegen für insgesamt 23 Stationen in Sachsen ausreichend Messwerte sowohl für die Anlernzeiträume als auch für die Modellierungszeiträume vor. Die Auswertung erfolgt für den mittleren Verlauf aller 23 Stationen in Monatsauflösung. Zusätzlich sind die Stationen als Hintergrund- oder Verkehrsstationen klassifiziert. Für den mittleren Verlauf aller Verkehrsstationen und aller Hintergrundstationen erfolgt jeweils eine separate Auswertung. Dabei sind 14 Stationen der Hintergrundmessung, 9 Stationen der Verkehrsmessung zugeordnet. In diesem Abschnitt werden mittlere Werte für alle Stationen, Verkehrsstationen und Hintergrundstationen dargestellt und ausgewertet. Daten zu den einzelnen Stationen finden sich im Anhang.

3.2.1.1 Stickstoffmonoxid (NO)

■ Alle Stationen

Abbildung 28 zeigt den mittleren zeitlichen Verlauf der Monatswerte der NO-Konzentration aller 23 Vergleichsstationen. In den Jahren 2013 bis 2017 treffen die modellierten Werte die gemessenen Werte relativ gut, wobei es zu größeren Abweichungen bei den Minima und Maxima gibt. Ab etwa 2018 kommt es zu einem deutlichen Rückgang der gemessenen Werte, wobei die modellierten Daten einen moderaten Anstieg verzeichnen. Insgesamt liegen sowohl die gemessenen als auch die modellierten Werte im Modellierungszeitraum deutlich unterhalb der gemessenen Werte im Anlernzeitraum. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die atmosphärischen Bedingungen insgesamt zu einem Rückgang der Immissionen beigetragen haben. Ab 2018 werden die Unterschiede zwischen den modellierten und gemessenen Konzentrationen größer. Dies legt die Hypothese nahe, dass dies durch verringerte Emissionen verursacht sein kann, was jedoch mit dieser Studie nicht bewiesen werden kann.

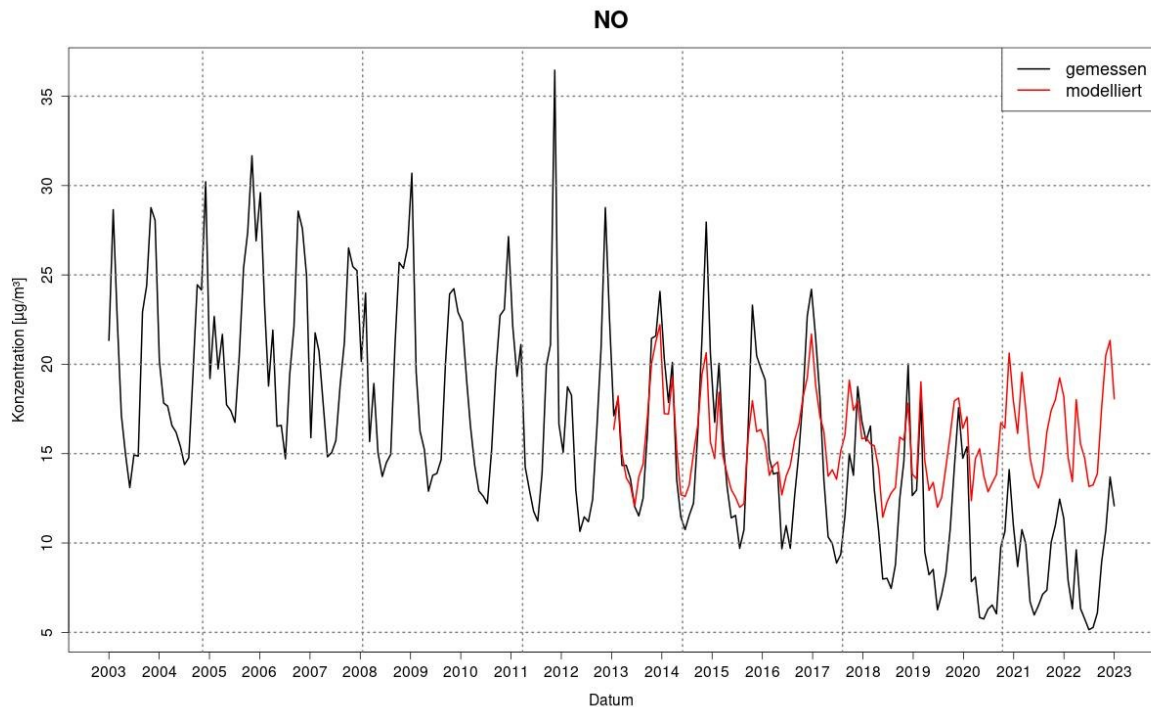


Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert (Anlernzeitraum 2003–2012).

Der Vergleich mit Abbildung 29 zeigt ebenfalls eine geringere NO-Konzentration der modellierten Werte 2018–2022 (im Mittel $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) als im Anlernzeitraum 2003–2017 (im Mittel $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Gleichzeitig nimmt die modellierte Konzentration im Modellierungszeitraum 2018–2022 zu, während die gemessene Konzentration abnimmt. Die ablesbaren Aussagen sind somit gleich denen aus Abbildung 28, gleichzeitig lassen sich aufgrund des kürzeren Modellierungszeitraumes weniger Aussagen aus dieser Abbildung ablesen. Es wird darum im Folgenden auf eine Darstellung und Auswertung der Daten mit dem Anlernzeitraum 2003–2017 verzichtet und auf den Anhang verwiesen.

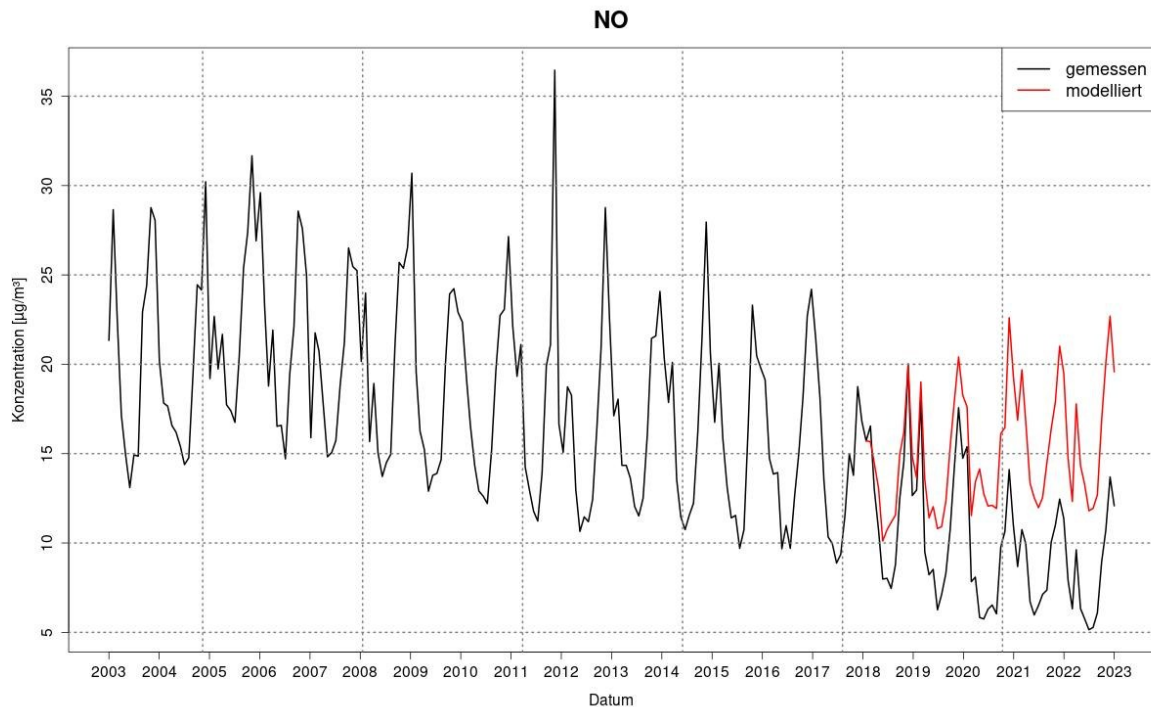


Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert (Anlernzeitraum 2003–2017).

■ Verkehrsstationen

Abbildung 30 zeigt den mittleren zeitlichen Verlauf der Monatswerte der NO-Konzentration aller 9 Verkehrsstationen. Die Ergebnisse decken sich in großen Teilen mit den Ergebnissen für alle Stationen aus Abbildung 28. Allerdings ist der absolute Unterschied zwischen Modellierung und Messung im Zeitraum 2018–2022 deutlich größer ausgeprägt. Das spricht dafür, dass der Rückgang der Immissionen bei den Verkehrsstationen deutlich höher ist als im Mittel aller Stationen und somit die Emissionen im Verkehr im Vergleich zur Hintergrundbelastung überdurchschnittlich zurückgegangen ist.

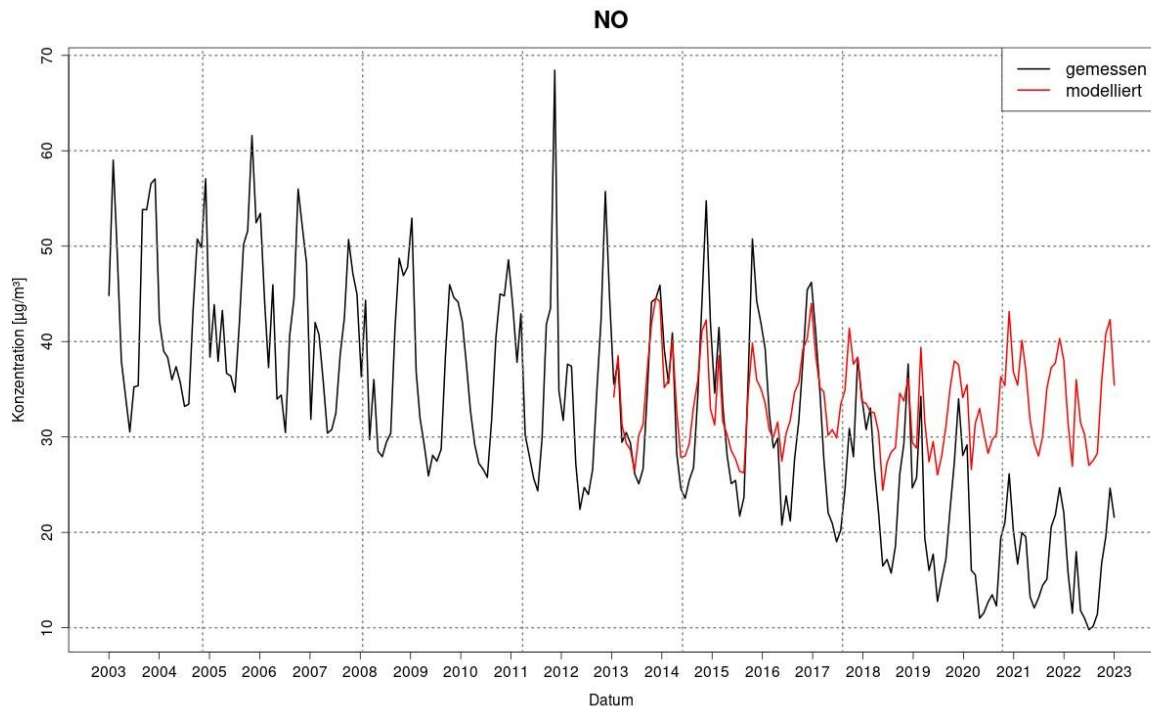


Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

Man beachte die abweichende Skalierung der y-Achse im Vergleich zu den vorangegangenen Abbildungen.

■ Hintergrundstationen

Abbildung 31 bestätigt die Vermutung aus Abbildung 30. Während bei den Verkehrsstationen eine sehr deutliche Differenz zwischen Modell und Messung auftritt, ist die Differenz bei den Hintergrundstationen sehr viel geringer. Im Zeitraum ab Mitte des Jahres 2020 liegen die Modellierungen etwas oberhalb der Messungen, was für einen leichten Rückgang des Hintergrundsignals der Emissionen spricht. Der deutliche Unterschied zwischen den Stationsarten Verkehr und Hintergrund erhärtet die Hypothese -, dass der Rückgang der NO-Konzentration an den Verkehrsstationen durch den Rückgang der Emissionen des Verkehrs verursacht wurde.

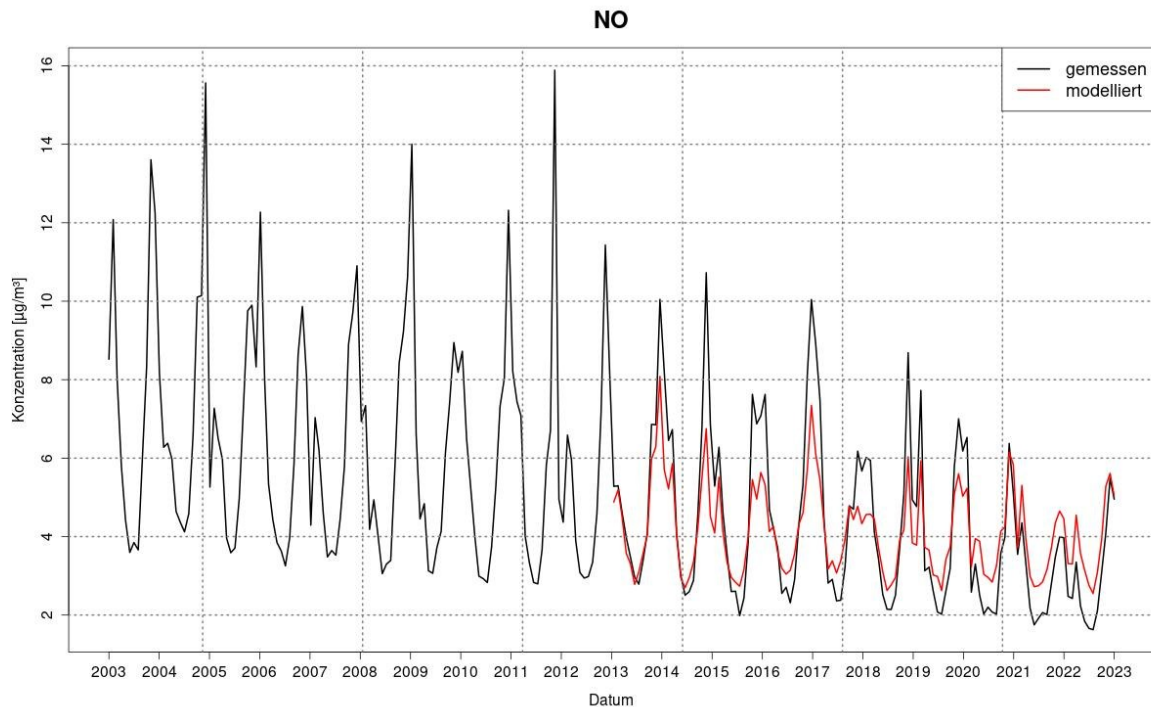


Abbildung 31: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

3.2.1.2 Stickstoffdioxid (NO_2)

■ Alle Stationen

Abbildung 32 zeigt den zeitlichen Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_2 -Konzentration aller 23 Stationen. Die Modellierung kann den grundsätzlichen Verlauf gut abbilden. Es werden allerdings bereits ab 2013 und insbesondere ab 2019 die gemessenen NO_2 -Konzentrationen deutlich überschätzt. Jedoch ist auch festzustellen, dass die modellierten Konzentrationen 2013–2022 deutlich unterhalb der gemessenen Werte im Anlernzeitraum 2003–2012 liegen. Das lässt den Schluss zu, dass es durch Änderungen der atmosphärischen Bedingungen zu einem Rückgang der gemessenen Immissionen kam. Dieser Rückgang wird jedoch überlagert bzw. verstärkt durch Änderungen anderer Randbedingungen, hier vermutlich dem Rückgang der Emissionen.

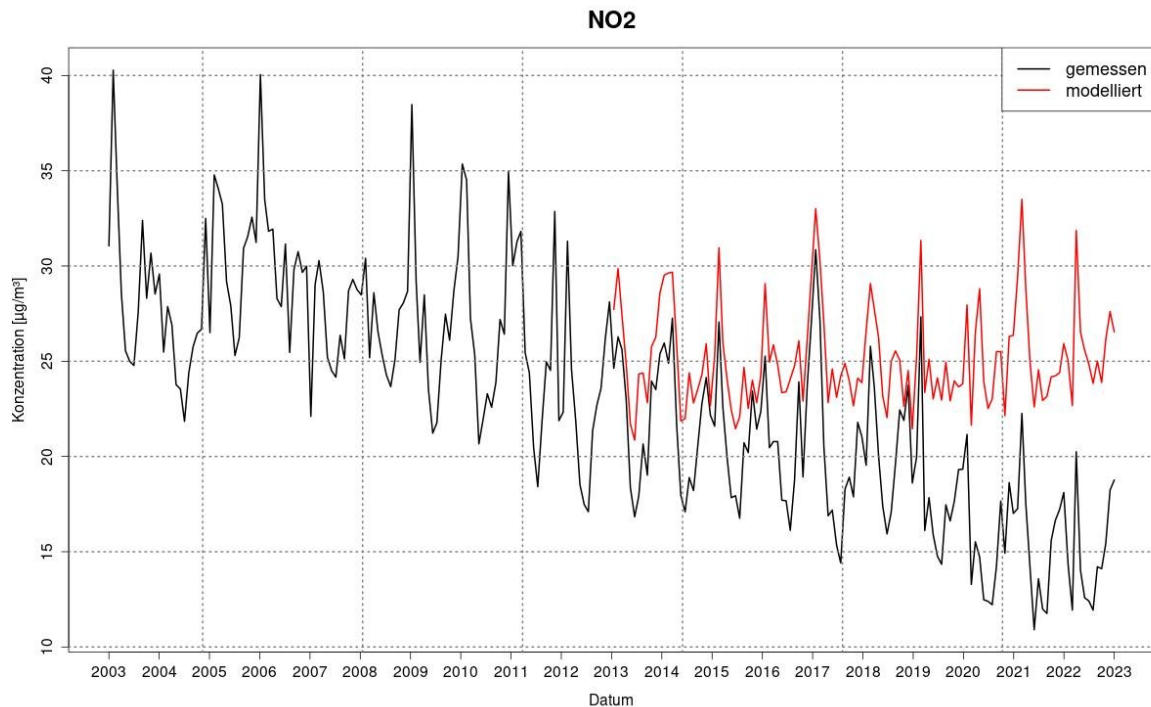


Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_2 -Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert.

Verkehrsstationen

Der Vergleich zu Abbildung 33 erhärtet die Hypothese vom großen Einfluss des Verkehrs bzw. des Rückgangs der Emissionen des Verkehrs auf die gemessenen Immissionen. Im Vergleich zu Abbildung 32 ist die absolute Differenz zwischen modellierter und gemessener Konzentration deutlich größer, der relative Anteil der atmosphärischen Bedingungen am Rückgang ist an den Verkehrsstationen geringer.

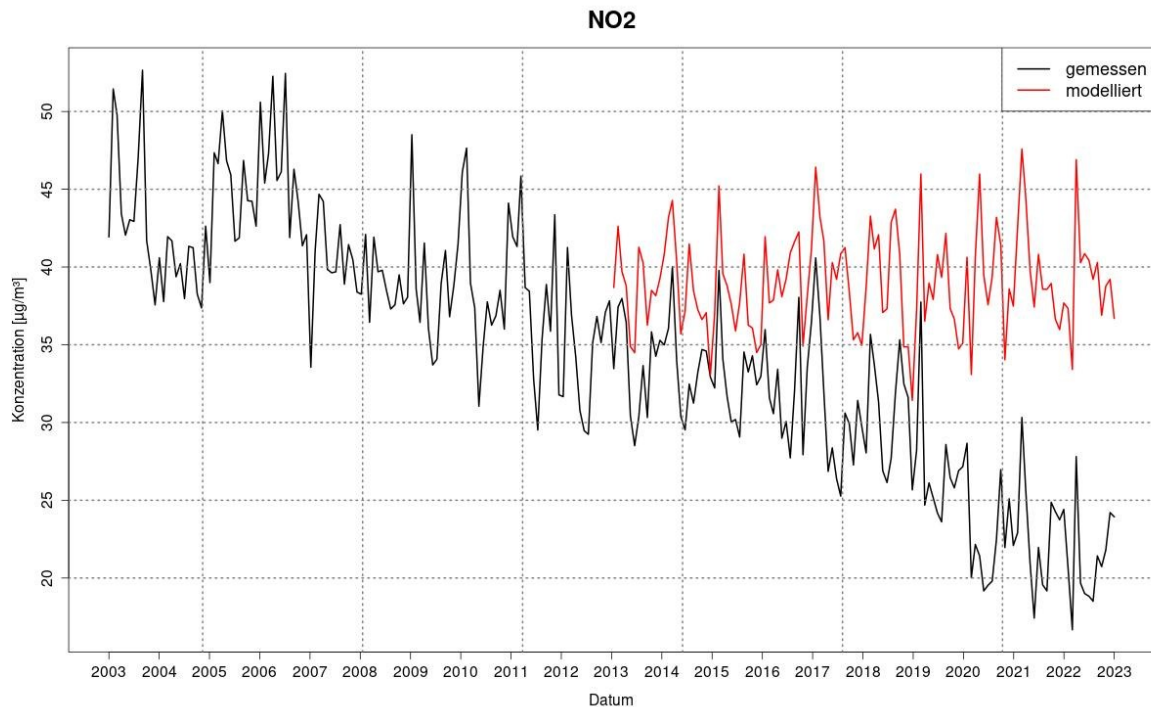


Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO₂-Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

■ Hintergrundstationen

Abbildung 34 zeigt den Vergleich der Modellierung und der Messung der NO₂-Konzentrationen der Hintergrundstationen. Neben einem generellen Rückgang sowohl der Messungen als auch der Modellierungen im Zeitraum 2013–2022 im Vergleich zum Zeitraum 2003–2012, der vermutlich mit den Änderungen der atmosphärischen Bedingungen zu begründen ist, zeigt sich auch hier ein verstärkter Rückgang der Messungen gegenüber den Modellierungen. Diese Differenz ist größer als die Differenz der NO-Konzentrationen, was für einen deutlicheren Rückgang der Hintergrundkonzentration von Stickstoffdioxid gegenüber von Stickstoffmonoxid spricht.

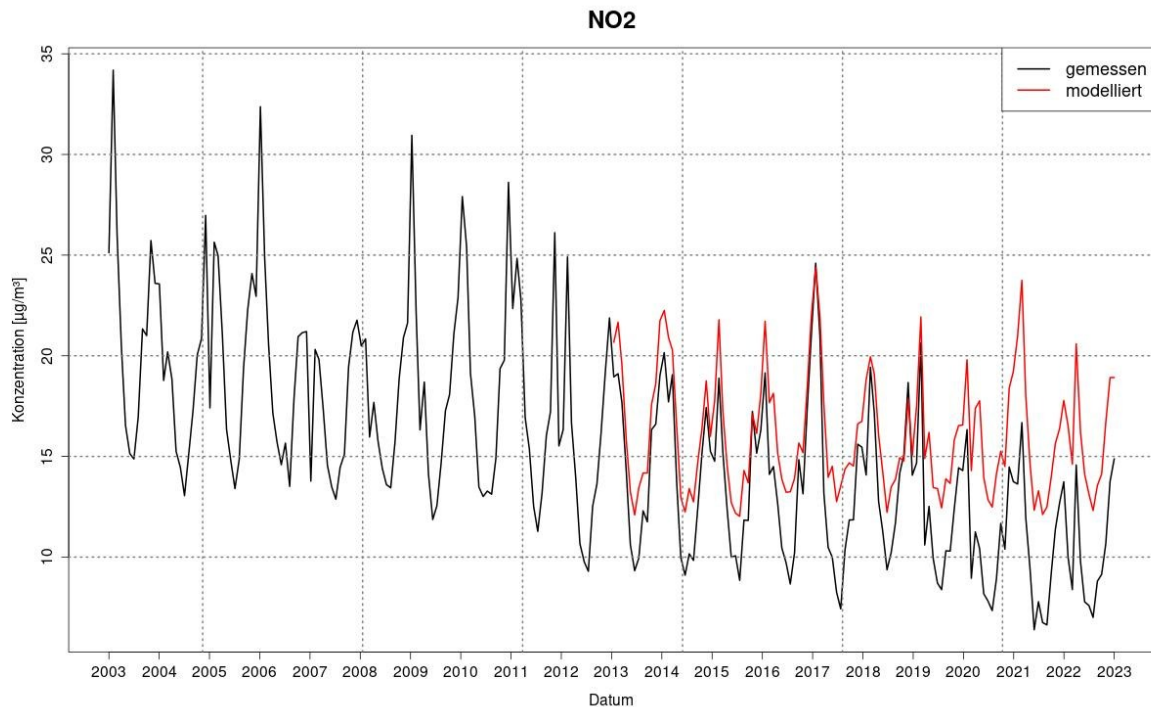


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO₂-Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

3.2.1.3 Stickoxide (NO_x)

■ Alle Stationen

Abbildung 35 zeigt den mittleren zeitlichen Verlauf der Monatswerte der Stickoxidkonzentration aller 23 Vergleichsstationen. Im Zeitraum 2013–2016 (2017) werden die gemessenen Monatswerte von den Modelldaten relativ gut getroffen. Ab 2017 (2018) zeigen die Modelle deutlich höhere Werte als die gemessenen Werte an. Als integrale Größe gelten hier wieder die Aussagen wie für Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid aus den obigen Auswertungen: Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die atmosphärischen Bedingungen insgesamt zu einem Rückgang der Immissionen beigetragen haben. Ab 2018 werden diese Effekte durch einen vermutlichen Rückgang der Emissionen, überlagert.

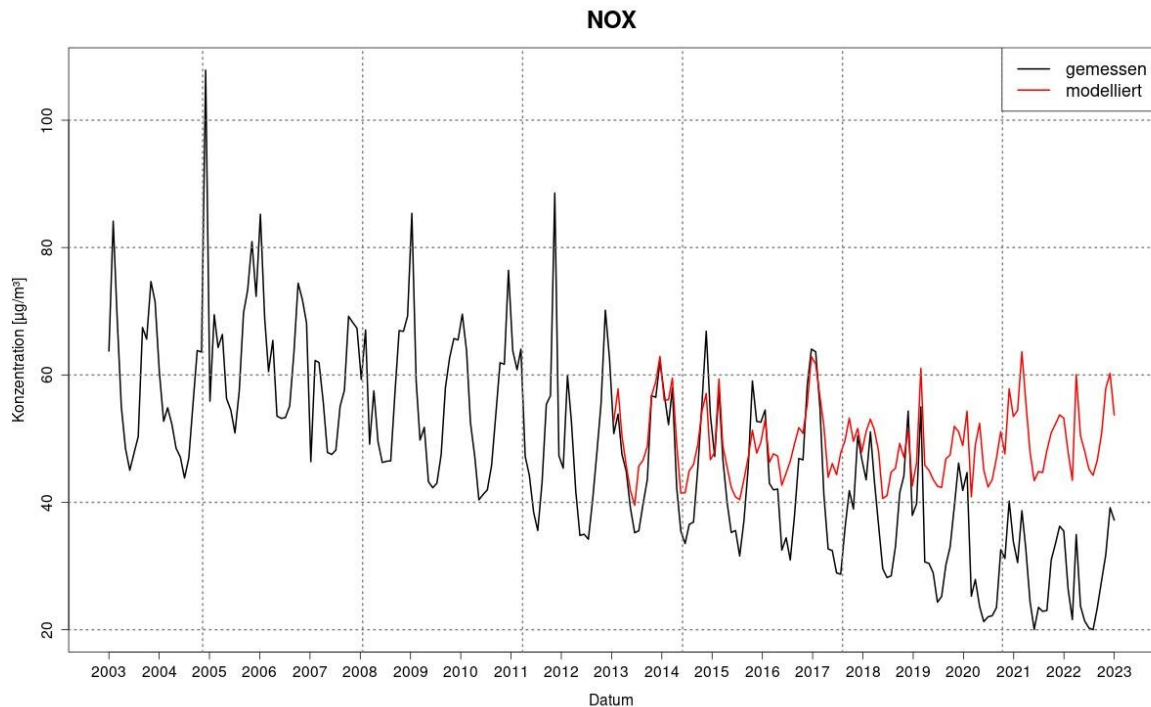


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_x -Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert.

■ Verkehrsstationen

Abbildung 36 zeigt den zeitlichen Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten Werte der NO_x -Konzentration der Verkehrsstationen. Ähnlich wie in Abbildung 35 ist der gemessene Rückgang deutlich größer als der modellierte Rückgang, wobei die gemessenen Werte ab etwa 2017 deutlich stärker abnehmen. Grund hierfür sind vermutlich wieder die rückläufigen Emissionen aus dem Verkehrssektor.

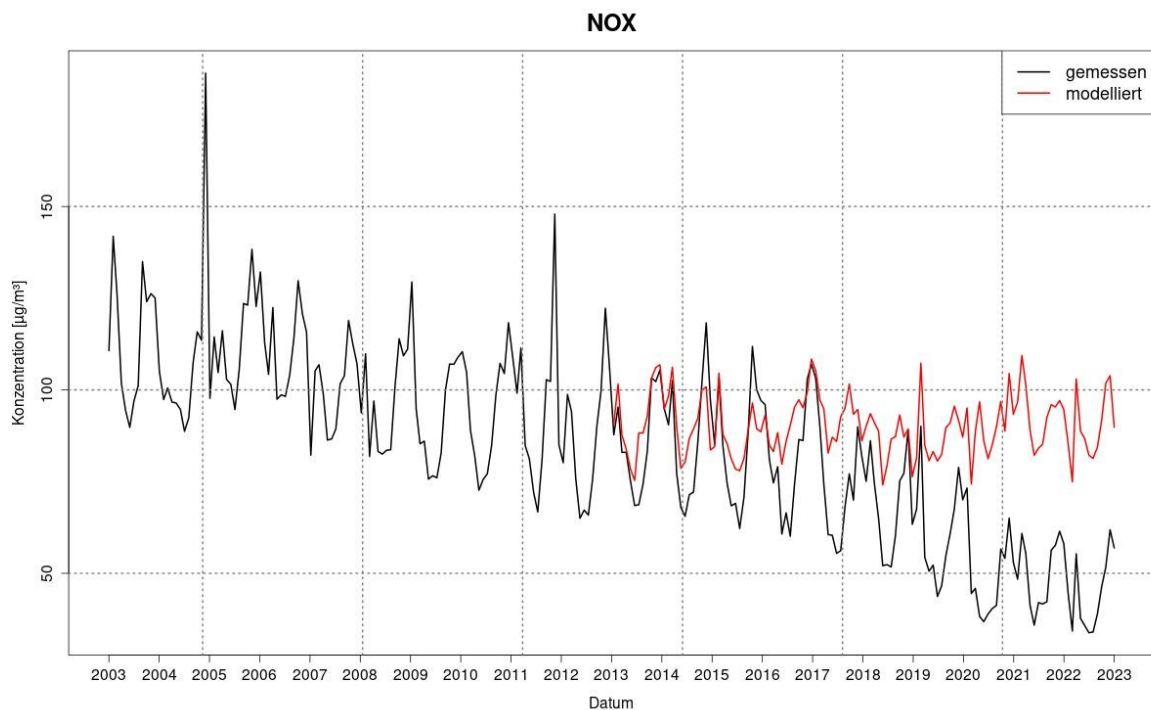


Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_x -Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

■ Hintergrundstationen

Abbildung 37 zeigt den zeitlichen Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten Werte der NO_x -Konzentration der Hintergrundstationen. Die Modellergebnisse treffen die gemessenen Werte deutlich besser als bei den Verkehrsstationen. Das deutet wieder darauf hin, dass die große Differenz bei den Verkehrsstationen auf den Rückgang der Emission im Verkehr zurückzuführen ist. Allerdings ist der gemessene Rückgang bei den Hintergrundstationen größer als der modellierte Rückgang. Das lässt darauf schließen, dass auch die Hintergrundbelastung der Stickoxide im Vergleichszeitraum rückläufig ist.

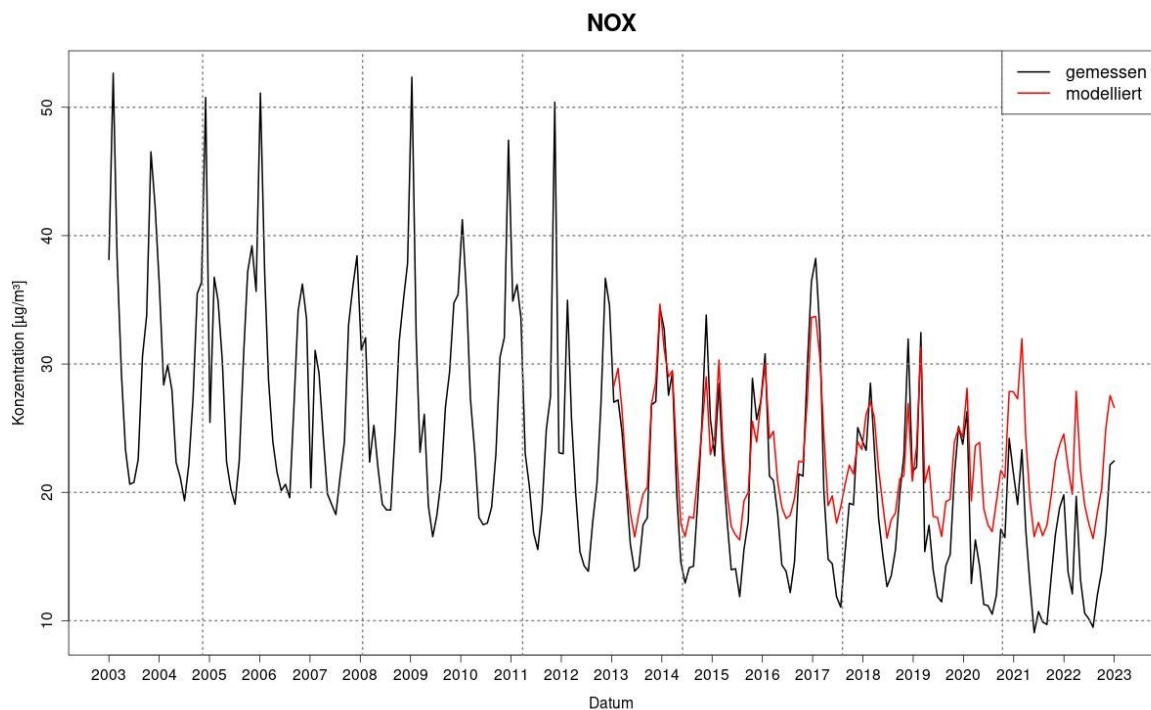


Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_x-Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

3.2.2 Feinstaub

Gemessen und modelliert wird der Feinstaub, dessen aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 µm ist (PM₁₀). Insgesamt wurden 21 Stationen ausgewertet. Hiervon werden 8 als Verkehrsstationen und 13 als Hintergrundstationen klassifiziert.

3.2.2.1.1 2013 bis 2022

■ Alle Stationen

Abbildung 38 zeigt die mittlere monatliche Feinstaubkonzentration von 21 Stationen mit dem Anlernzeitraum 2003 bis 2012 und dem Vergleichszeitraum 2013 bis 2022. Die modellierten Werte im Vergleichszeitraum liegen unterhalb der gemessenen Werte im Anlernzeitraum. Das spricht dafür, dass Änderungen der atmosphärischen Bedingungen (als Antrieb der Modelle) einen entscheidenden Einfluss auf den Rückgang der Konzentration haben. Die gemessenen Werte liegen allerdings nochmals deutlich unterhalb der modellierten Werte und legt einen zusätzlichen Rückgang der Konzentration durch reduzierte Emissionen nahe. Auffällig: Anders als bei den Stickstoffkonzentrationen ist kein Sprung in den Konzentrationsdifferenzen um das Jahr 2018 festzustellen. Vielmehr geht die gemessene Konzentration mehr oder weniger gleichmäßig zurück. Ebenso gleichmäßig steigt die Differenz zwischen modellierten und gemessenen Werten.

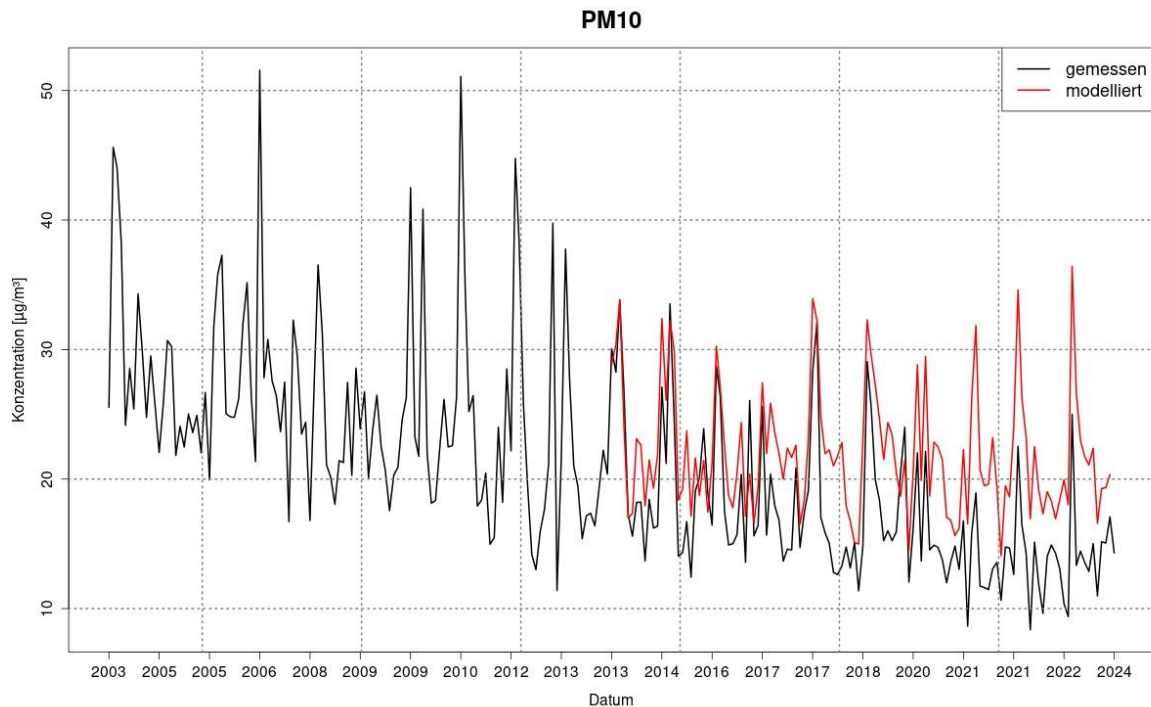


Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM₁₀-Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert.

■ Verkehrsstationen

Abbildung 39 zeigt den zeitlichen Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten Werte der Feinstaubkonzentration der Verkehrsstationen. Die Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Werten sind höher als beim Vergleich aller Stationen, allerdings ist der Unterschied kleiner als bei den drei Messgrößen der Stickoxide. Das spricht für einen Rückgang sowohl der Verkehrsemissionen als auch der Hintergrundkonzentrationen.

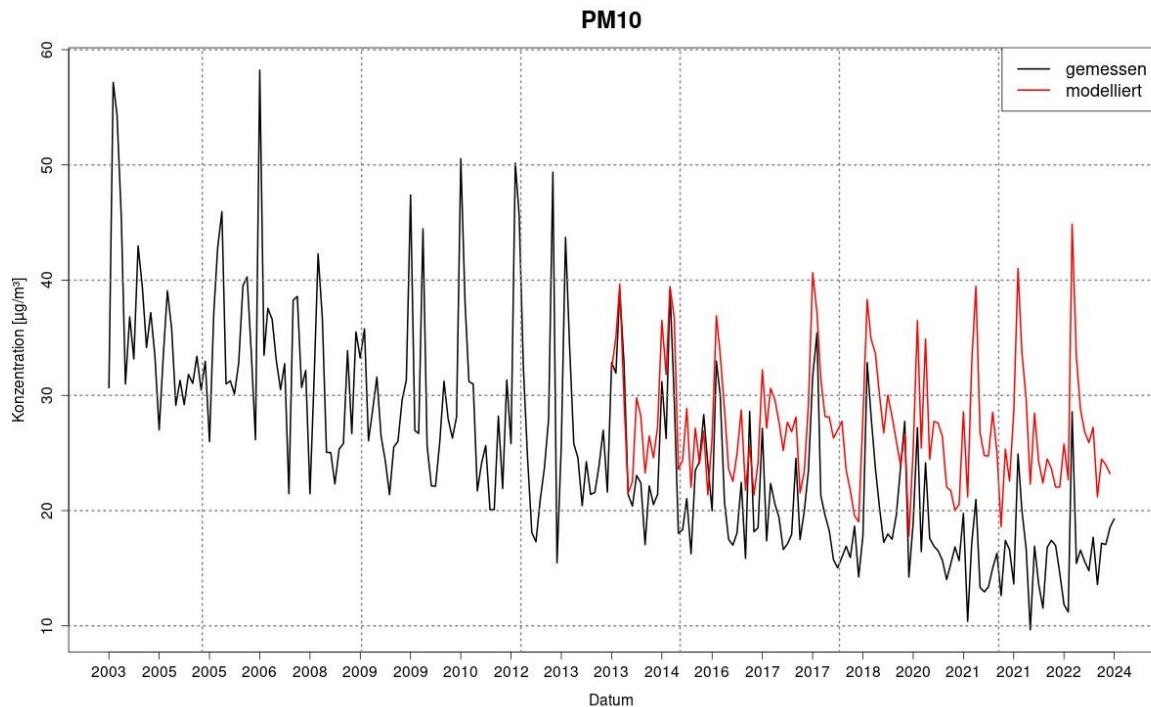


Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM₁₀-Konzentration der Verkehrsstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

■ Hintergrundstationen

Abbildung 40 zeigt den zeitlichen Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten Werte der Feinstaubkonzentration der Hintergrundstationen. Die modellierten Werte liegen oberhalb der gemessenen Werte im Vergleichszeitraum, aber unterhalb der gemessenen Werte im Anlernzeitraum. Dies deutet auf einen Einfluss des atmosphärischen Antriebs auf den Rückgang ebenso wie auf einen Einfluss der Hintergrundbelastung auf die Immissionen hin.

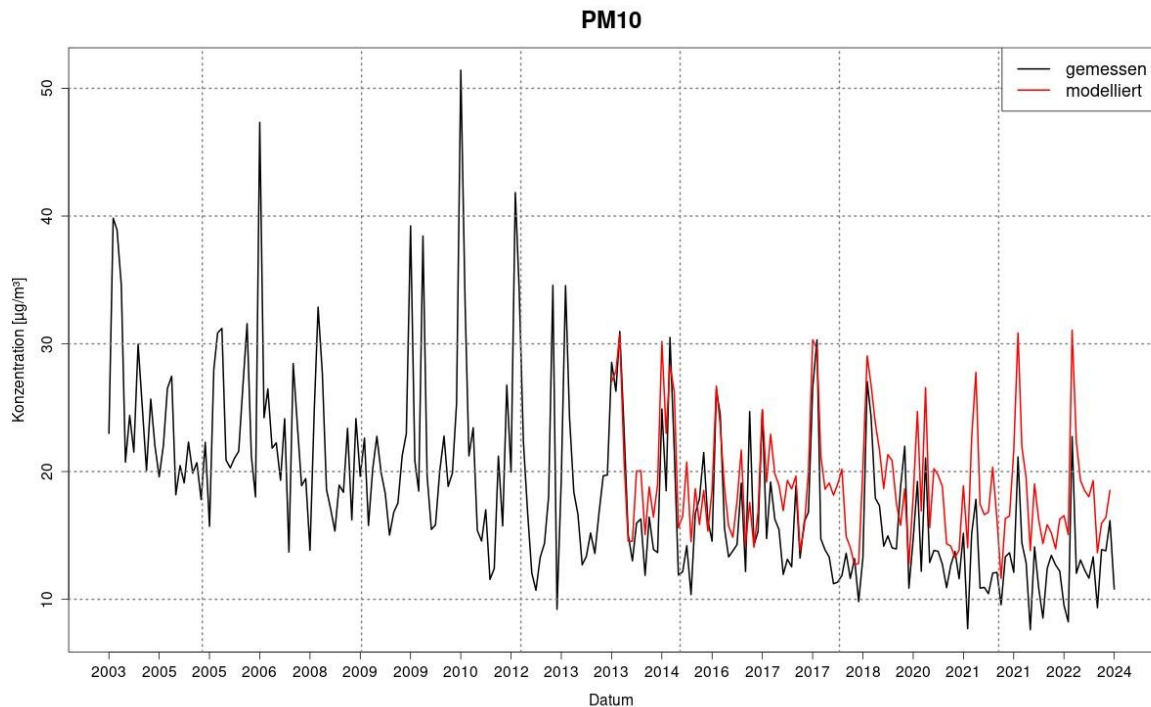


Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM₁₀-Konzentration der Hintergrundstationen, 2013 bis 2022 modelliert.

3.3 Zusammenfassung Konzentrationen

Tabelle 3 zeigt die Zusammenfassung der Messungen und Modellierungen aller untersuchten Größen für alle Stationen gemittelt für den Anlernzeitraum 2003 bis 2012 und den Modellierungszeitraum, unterteilt in die beiden 5-Jahresscheiben 2013–2017 und 2018–2022. Die Tabelle bestätigt die Aussagen zu Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration aller Stationen, 2013 bis 2022 modelliert (Anlernzeitraum 2003–2012). Abbildung 28 bis Abbildung 40 und fasst diese zusammen. Es zeigt sich, dass die modellierten Werte im Mittel in beiden Zeiträumen 2013 bis 2017 und 2018 bis 2022 kaum verändert sind, sich die atmosphärischen Einflüsse in beiden Zeiträumen somit kaum geändert haben. Allerdings ist ein deutlicher Rückgang der modellierten atmosphärisch bedingten Immissionen im Gesamtzeitraum 2013–2022 gegenüber 2003–2012 zu verzeichnen. Der gleichmäßigere Rückgang der Feinstaubkonzentration ist ebenso zu sehen wieder große Sprung in den Konzentrationen der Stickstoffverbindungen um das Jahr 2018. Hier sind die Ergebnisse der Stickstoffmonoxidkonzentration besonders eindrücklich: Während im Zeitraum 2013–2017 der Rückgang der Konzentrationen sich zu 93 % auf die atmosphärischen Änderungen zurückführen lässt, ist der Rückgang 2018–2022 im Vergleich zu 2003–2012 nur noch zu 41 % atmosphärisch begründet. Dieses Ergebnis legt ebenfalls nahe, dass die Emissionen in der Zeitscheibe 2018–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2013–2017 vermutlich abgenommen haben, was mit der vorliegenden Arbeit jedoch nicht nachgewiesen werden kann. Zu beachten sind auch die geringeren Bestimmtheitsmaße R^2 im Zeitraum

2018–2022 gegenüber 2013–2017: Während die Erklärbarkeit der Werte durch die atmosphärischen Einflussgrößen sinkt, steigt der Einfluss der anderen Faktoren, hier vermutlich der zurückgehenden Emissionen, an.

Tabelle 3: Kennwerte aller Stationen aller Messgrößen mit Anlernzeit 2003–2012 und Modellierungszeit 2013–2022

Größe	Jahr	R ² (Stunde)	R ² (Tag)	R ² (Monat)	RMSE Tag (µg/m ³)	Mittelwert Anlernzeit gemessen (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeit- raum modelliert (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeit- raum gemessen (µg/m ³)	Anteil Atmosphäre an Rück- gang (%)
PM ₁₀	2013– 2017	0,37	0,53	0,63	9,1	25,2	22,4	19,0	45
PM ₁₀	2018– 2022	0,34	0,49	0,59	9,4	25,2	21,6	15,1	35
NO	2013– 2017	0,34	0,4	0,62	9,1	19,4	15,9	15,7	93
NO	2018– 2022	0,33	0,37	0,55	9,1	19,4	15,6	10,0	41
NO _x	2013– 2017	0,46	0,54	0,69	19,2	56,6	49,6	45,1	61
NO _x	2018– 2022	0,44	0,51	0,6	20,9	56,6	49,1	32,2	31
NO ₂	2013– 2017	0,51	0,58	0,65	7,2	27,0	25,1	21,1	33
NO ₂	2018– 2022	0,48	0,54	0,55	8,6	27,0	25,2	16,9	18

Tabelle 4 zeigt den in µg/m³ gemessenen Rückgang der Schadstoffkonzentrationen, differenziert nach Messstationstyp (alle, Verkehrs- und Hintergrundstationen) und den Zeiträumen 2013–2022 und 2018–2022. Zusätzlich sind die modellierten Rückgänge dargestellt, die ausschließlich auf meteorologische Einflüsse zurückzuführen sind (Emissionen wurden in dieser Modellierung, wie bereits erläutert, nicht berücksichtigt).

Im Mittel weisen alle betrachteten Schadstoffe in den genannten Zeiträumen einen Konzentrationsrückgang auf. Dabei ist der absolute Rückgang an Verkehrsstationen jeweils höher als an Hintergrundstationen. Umgekehrt ist der relative Anteil des meteorologischen Einflusses am Gesamtrückgang an Hintergrundstationen deutlich größer als an Verkehrsstationen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der gemessene Rückgang der Schadstoffkonzentrationen sowohl von der Art (Verkehrs- oder Hintergrundstation) als auch von der Größe der jeweiligen Station abhängt und in allen Fällen signifikant durch die meteorologischen Randbedingungen beeinflusst wird.

Tabelle 4: Übersicht über gemessenen und modellierten Rückgang der Konzentrationen

		Alle Stationen		Verkehrsstationen		Hintergrundstationen	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rückgang gemessen	Rückgang durch meteo Einfluss	Rückgang gemessen	Rückgang durch meteo Einfluss	Rückgang gemessen	Rückgang durch meteo Einfluss
2013–2022	PM ₁₀	8,4	3,4	11,2	3,8	6,6	3
	NO	6,7	3,7	13,3	6	2,1	2,2
	NO _x	18,4	7,6	32,2	10,4	8,9	5,5
	NO ₂	8,2	2	11,7	1,3	5,7	2,4
2018–2022	PM ₁₀	8,1	3,8	10,8	4,7	6,5	3,2
	NO	8,3	3,1	17,7	5,5	2,3	1,9
	NO _x	21	6,9	40,1	10,4	8,8	5,5
	NO ₂	8,3	2,3	13	2,2	5,4	2,7

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für den gesamten betrachteten Zeitraum (1961–2022) ohne saisonale Unterscheidung und für das gesamte gewählte ERA5-Gebiet zeigt sich eine sehr kleine Abnahme in den Windgeschwindigkeiten sowohl in 10 m und 100 m Höhe zum Ende des Betrachtungszeitraumes hin. Da beide Höhenniveaus davon betroffen sind, bedeutet dies auch eine Verringerung der Windgeschwindigkeiten über die Höhe. Weiterhin zeigt sich eine sehr leichte Abnahme des Höhengradienten in der Windgeschwindigkeit. Alle diese Änderungen sind jedoch als klein einzustufen und sollten nicht überinterpretiert werden.

Betrachtet man nur die Rasterzellen von Sachsen ohne saisonale Unterscheidung so unterscheiden sich die Ergebnisse von denen des gesamten ERA5-Gebietes kaum. Deutliche Unterschiede ergeben sich bei saisonaler Betrachtung insbesondere zwischen den beiden Zeitscheiben 2003–2012 sowie 2013 und 2022. Hier zeigt sich, dass in den Wintermonaten eher eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten in der Zeitscheibe 2013–2022 gegenüber der Zeitscheibe 2003–2012 zu verzeichnen ist, während in den Sommermonaten eher eine Abnahme der Windgeschwindigkeiten zu verzeichnen ist. Für die Schadstoffproblematik bedeutet dies, dass Schadstoffe im Winter potenziell über weitere Strecken in der Zeitscheibe 2013–2022 und somit größere Räume verfrachtet werden. In den Sommermonaten dieser Zeitscheibe werden potentiell Depositionsvorgänge durch die insgesamt geringeren Windgeschwindigkeiten bevorteilt.

Die Änderungen in den Perzentilen der Windrichtungen in 10 m und 100 m Höhe über Grund lassen nicht auf eine grundsätzliche Veränderung der Windrichtungsverteilungen, weder für das gesamte betrachtete Gebiet noch für die Rasterzellen von Sachsen in dem gesamten betrachteten Zeitraum, schließen. Dies wird durch die Auswertung von Windrosen für ausgewählte Rasterzellen bestätigt. Jedoch zeigt sich auch hier eine innerjährliche Variabilität in den Änderungen zwischen den Zeitscheiben 2003–2012 und 2013–2022. In der zweiten dieser beiden Zeitscheiben nehmen die Anteile der Windrichtungssektoren W, SW im Winter (Monate Dezember, Januar, Februar) zu, während deren Anteile sich im Sommer hingegen verringern. Für die Schadstoffproblematik bedeutet dies, dass in der zweiten Zeitscheibe teilweise andere Räume durch geänderte Windrichtungen erschlossen wurden als in der Zeitscheibe 2003–2012, was potentiell zu anderen gemessenen Immissionen führen kann.

Die Analyse der vertikalen Durchmischung auf Grundlage der Grenzschichthöhe und der Reibungswindgeschwindigkeit ergeben keine grundsätzliche Zunahme dieser beiden Variablen in der Zeitscheibe 2013–2022 im Vergleich zur Zeitscheibe 2003–2012.

Die Analyse der Wetterlagen bestätigt zum einen bereits bestehende Analysen zum anderen zeigen sich aber auch deutliche Unterschiede in den Wetterlagenverteilungen zwischen der Zeitscheibe 2003–2012

und 2013–2022. Diese Ergebnisse bestätigen tendenziell die Ergebnisse die auf Basis der ERA-Daten erzielt wurden.

Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den ERA5-Daten und den zum Vergleich genutzten Radiosondendaten hinsichtlich des relativen Verlaufs. Größere Unterschiede ergeben sich in den absoluten Werten. Für den Vergleich ist anzumerken, dass Daten aller genutzten Radiosondenstandorte in den ERA5-Datensatz assimiliert wurden und daher eine grundsätzliche Übereinstimmung zu erwarten ist.

Zusammengefasst zeigt die Auswertung der ERA5-Daten geänderte Windgeschwindigkeiten und Windrichtungsverteilungen bei Betrachtung der innerjährlichen Variabilität für die Zeitscheibe 2013–2022 im Vergleich zu der Zeitscheibe 2003–2012. Ein Vergleich der ERA5-Daten mit Radiosondendaten und eine Auswertung der Wetterlagen nach HESS-BREZSOWKSY widersprechen diesen Ergebnissen nicht.

Die deterministischen Modelle basierend auf Gradient Boosting zeigen zusammengefasst für alle vier Größen NO , NO_2 , NO_x und PM_{10} ein eindeutiges Bild:

- Die absoluten Konzentrationen der Verkehrsstationen sind deutlich höher als die der Hintergrundstationen.
- Die gemessenen Immissionen sind deutlich rückläufig.
- Die relativen und absoluten Rückgänge der Konzentrationen der Verkehrsstationen sind deutlich ausgeprägter als die der Hintergrundstationen.
- Für alle Größen und beide Stationsarten sind im Mittel Konzentrationen gemessen worden, die geringer sind als die modellierten Konzentrationen. Der Unterschied ist hierbei bei den Verkehrsstationen deutlich größer.
- Insgesamt liegen die modellierten Konzentrationen unterhalb der gemessenen Konzentrationen im Anlernzeitraum des deterministischen Modells.
- Die Konzentrationen des Feinstaubes gehen relativ gleichmäßig zurück.
- Die Konzentrationen der Stickoxide, insbesondere Stickstoffmonoxid weisen einen Bruch um das Jahr 2018 auf.
- Daraus lässt sich für die mittleren Werte das Folgende schlussfolgern:
- Die veränderten meteorologischen Bedingungen haben zumindest zu einem Teil zur Reduzierung der Konzentration beigetragen.
- Der deutliche Rückgang der Konzentration an den Verkehrsstationen ist auf eine Reduzierung der Emissionen, vermutlich überwiegend aus dem Verkehr, zurückzuführen.
- Der Rückgang der Konzentrationen an den Hintergrundstationen ist auf eine Reduzierung der Emissionen, u. a. großflächiger Emission wie Industrieemissionen, zurückzuführen.

- Das veränderte Windregime und Änderungen weiterer meteorologischer Parameter können den großen Konzentrationsrückgang alleine nicht erklären.
- Die Feinstaubkonzentrationen gehen stetig zurück und sind nicht auf ein Einzelereignis zurückzuführen.
- Die Stickoxide, insbesondere Stickstoffmonoxid gehen zusätzlich um das Jahr 2018 aufgrund eines Einzelereignisses sehr deutlich zurück.

Die vorliegende Studie zeigt deutlich, dass die gemessenen geringeren Immissionen von NO_x, NO₂, NO und PM₁₀ der jüngeren Vergangenheit nicht allein durch ein geändertes Windregime erklärbar sind. Aus der Arbeit ergibt sich die Hypothese, dass verringerte Emissionen zu den geringeren Immissionen der jüngeren Vergangenheit geführt haben.

Jedoch unterliegt auch diese Studie Limitationen, aus denen sich mögliche weitere Arbeiten ergeben. Eine Limitation dieser Studie besteht darin, dass die Ergebnisse zur Rolle der Emissionen nicht anhand von Messungen überprüft werden konnten, da notwendige Emissionsdaten nicht in ausreichendem Umfang vorliegen. Hierzu müsste in zukünftigen Arbeiten eine entsprechende Datengrundlage erarbeitet werden.

Für die Ergebnisse der Windfeldanalysen ist anzumerken, dass die genutzten ERA5-Daten in einem Raster mit einer horizontalen Auflösung von 0.25° (ca. 30 km) vorliegen, d.h. kleinräumige Windunterschiede werden nicht aufgelöst wie sich diese z. B. durch Häuserschluchten ergeben können. Weiterhin ist zu beachten, dass in den ERA5-Daten eine vereinfachte Topographie verwandt wird und die überjährige Vegetationsentwicklung (z. B. mögliches Aufwachsen von Bäumen) nicht abgebildet wird. Dies bedeutet, dass die tatsächlichen Windverhältnisse an einer Messstation von den Ergebnissen von ERA5 abweichen können. Hier wäre es möglich, messbasierte Informationen zu den lokalen Windverhältnissen umfangreicher auszuwerten.

Bei der Anwendung von deterministischen Modellen ist zu beachten, dass diese nur Zustände abbilden können, die in dem Anlernzeitraum aufgetreten sind. Dies muss nicht grundsätzlich ein Nachteil sein, da somit, wenn es Unterschiede zwischen dem Modellergebnis und den Vergleichsdaten gibt, durch eine entsprechende Kombination von Prädiktoren gezeigt werden kann, was mögliche Ursachen für die Unterschiede zwischen Modell und Messung sind.

Literaturverzeichnis

- CARRUTHERS, D. J. AND HUNT, J. C. R.: Fluid Mechanics of Airflow over Hills: Turbulence, Fluxes, and Waves in the Boundary Layer, in: Atmospheric Processes over Complex Terrain, edited by: BANTA, R. M., BERRI, G., BLUMEN, W., CARRUTHERS, D. J., DALU, G. A., DURRAN, D. R., EGGER, J., GARRATT, J. R., HANNA, S. R., HUNT, J. C. R., MERONEY, R. N., MILLER, W., NEFF, W. D., NICOLINI, M., PAEGLE, J., PIELKE, R. A., SMITH, R. B., STRIMAITIS, D. G., VUKICEVIC, T., WHITEMAN, C. D., AND BLUMEN, W., American Meteorological Society, Boston, MA, 83–107, https://doi.org/10.1007/978-1-935704-25-6_5, 1990.
- CHEN, TIANQI, UND CARLOS GUESTRIN. „XGBoost: A Scalable Tree Boosting System“. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785–94, 2016. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- DUVEILLER, G., PICKERING, M., MUÑOZ-SABATER, J., CAPORASO, L., BOUSSETTA, S., BALSAMO, G., AND CESCATTI, A.: Getting the leaves right matters for estimating temperature extremes, Geoscientific Model Development, 16, 7357–2073, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7357-2023>, 2023.
- GERSTENGARBE, F.-W. UND WERNER, P. C.: Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmut Brezowski 1881-1992., Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 1993.
- GERSTENGARBE, F.-W. UND WERNER, P. C.: Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezsowsky, Potsdam Institute für Klimafolgenforschung, Potsdam, 2005.
- GUO, J., ZHANG, J., YANG, K., LIAO, H., ZHANG, S., HUANG, K., LV, Y., SHAO, J., YU, T., TONG, B., LI, J., SU, T., YIM, S. H. L., STOFFELEN, A., ZHAI, P., AND XU, X.: Investigation of near-global daytime boundary layer height using high-resolution radiosondes: first results and comparison with ERA5, MERRA-2, JRA-55, and NCEP-2 reanalyses, Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 17079–17097, <https://doi.org/10.5194/acp-21-17079-2021>, 2021.
- HAUSMANN, A., FRANKE, J., KERL, F., RUMPF, D., VON RECHENBERG, I., SCHREIBER, U., AND SOMMER, W.: Kompendium Klima Sachsen im Klimawandel, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 2020.
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., ABDALLA, S., ABELLAN, X., BALSAMO, G., BECHTOLD, P., BIAVATI, G., BIDLOT, J., BONAVIDA, M., DE CHIARA, G., DAHLGREN, P., DEE, D., DIAMANTAKIS, M., DRAGANI, R., FLEMMING, J., FORBES, R., FUENTES, M., GEER, A., HAIMBERGER, L., HEALY, S., HOGAN, R. J., HÓLM, E., JANISKOVÁ, M., KEELEY, S., LALOYAUX, P., LOPEZ, P., LUPU, C., RADNOTI, G., DE ROSNAY, P., ROZUM, I., VAMBORG, F., VILLAUME, S., AND THÉPAUT, J.-N.: The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 1999–2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, 2020.
- HESS, P. UND BREZOWSKY, H.: Katalog der Großwetterlagen Europas, 1952.

- MADONNA, F., SUMMA, D., DI GIROLAMO, P., MARRA, F., WANG, Y., AND ROSOLDI, M.: Assessment of Trends and Uncertainties in the Atmospheric Boundary Layer Height Estimated Using Radiosounding Observations over Europe, *Atmosphere*, 12, 301, <https://doi.org/10.3390/atmos12030301>, 2021.
- SCHMOECKEL, J.: Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans "Lothar," Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 137 S., 2005.
- WOLF, U., SCHERTEL, C., KÜCHLER, W., AND MELLENTIN, U.: Klassifikation der PM₁₀ - Überschreitungstage für Zittau 2010, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 2012.

A 1 Anhang

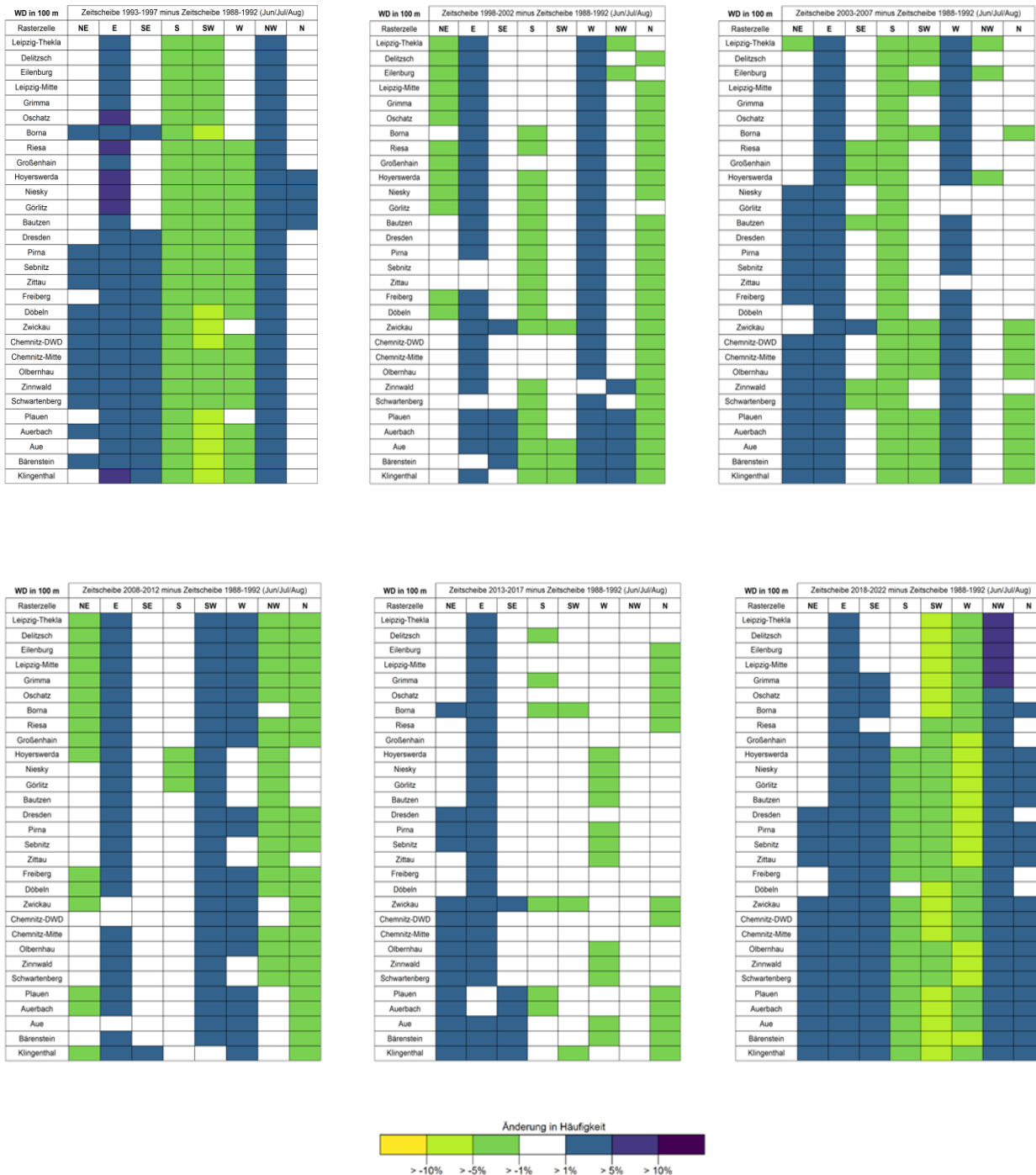


Abbildung 41: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für verschiedene fünfjährige Zeitscheiben in Referenz zu 1988–1992 für die Sommermonate Juni, Juli und August sowie die Windrichtungen in 100 m Höhe.

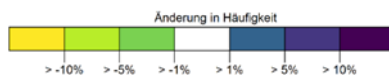
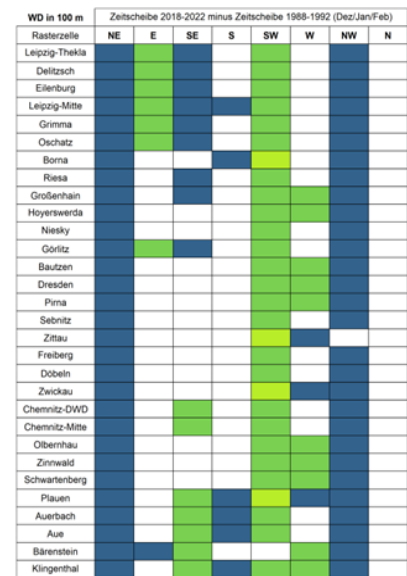
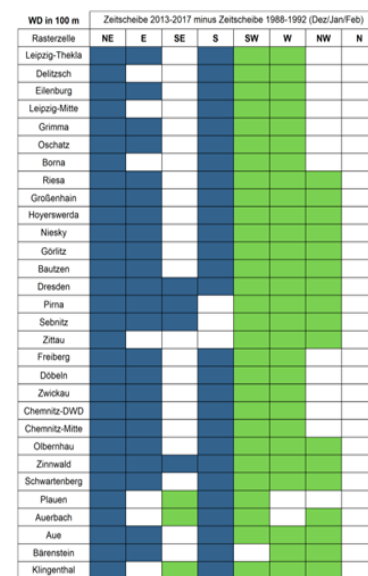
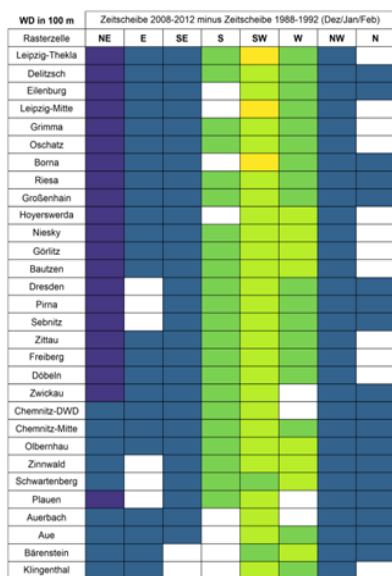
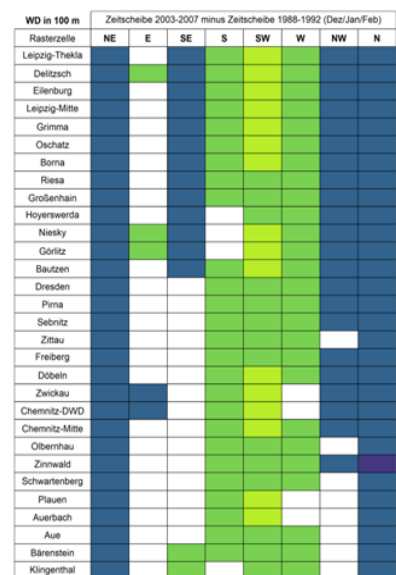
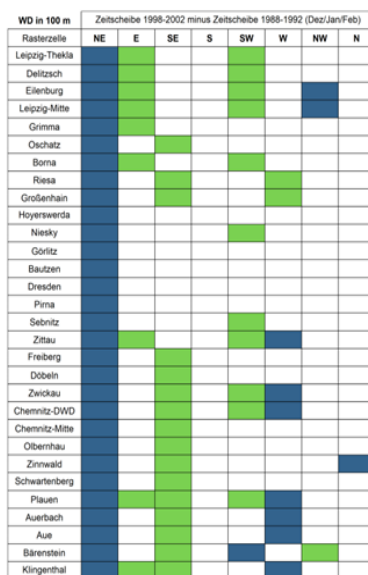
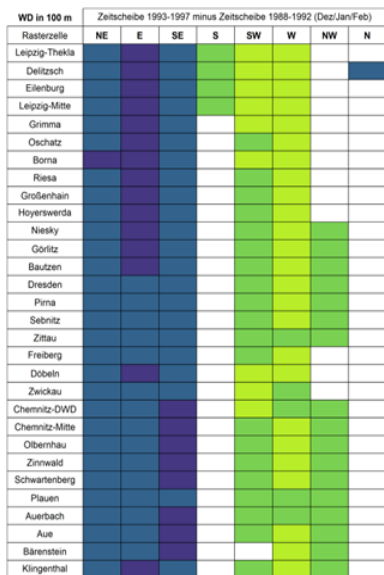


Abbildung 42: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für verschiedene fünfjährige Zeitscheiben in Referenz zu 1988–1992 für die Sommermonate Dezember, Januar und Februar sowie die Windrichtungen in 100 m Höhe.

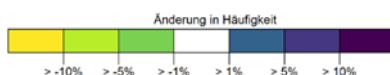
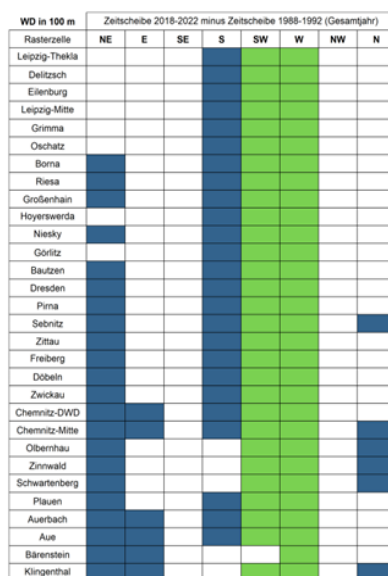
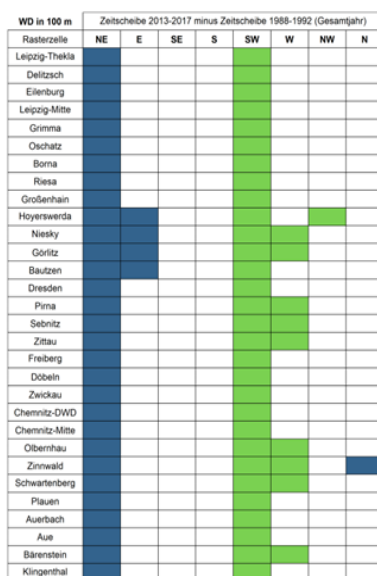
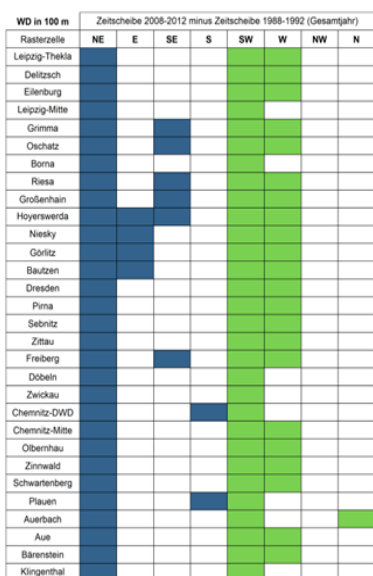
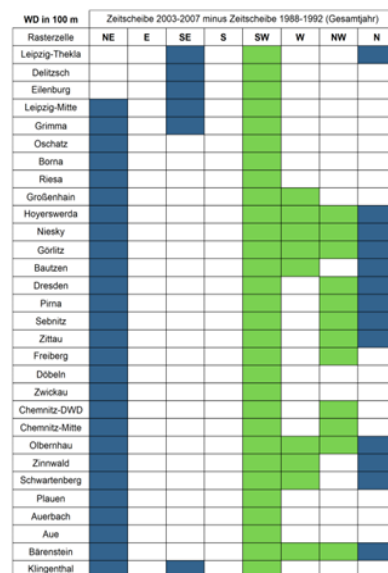
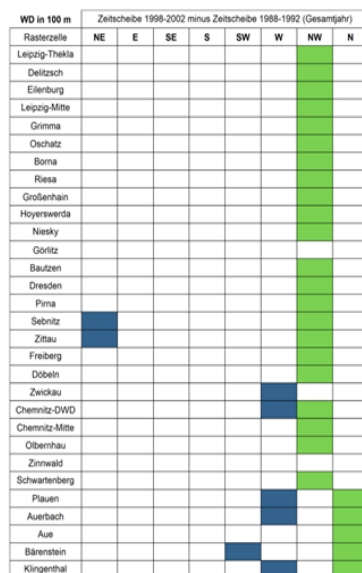
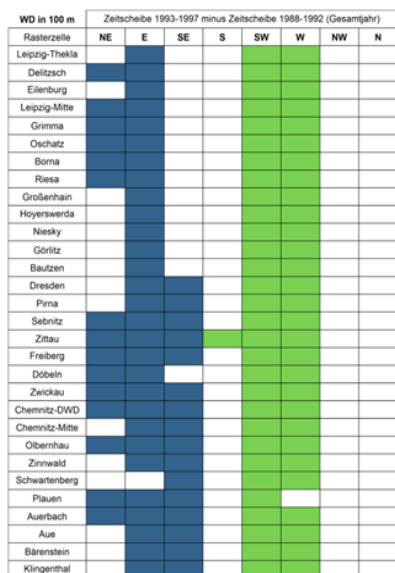


Abbildung 43: Unterschiede in der Windrichtungsverteilung für verschiedene fünfjährige Zeitscheiben in Referenz zu 1988–1992 für die Gesamtjahre sowie die Windrichtungen in 100 m Höhe.

A 2 Anhang

A 2.1 Stickstoffmonoxid

Verkehrsstationen

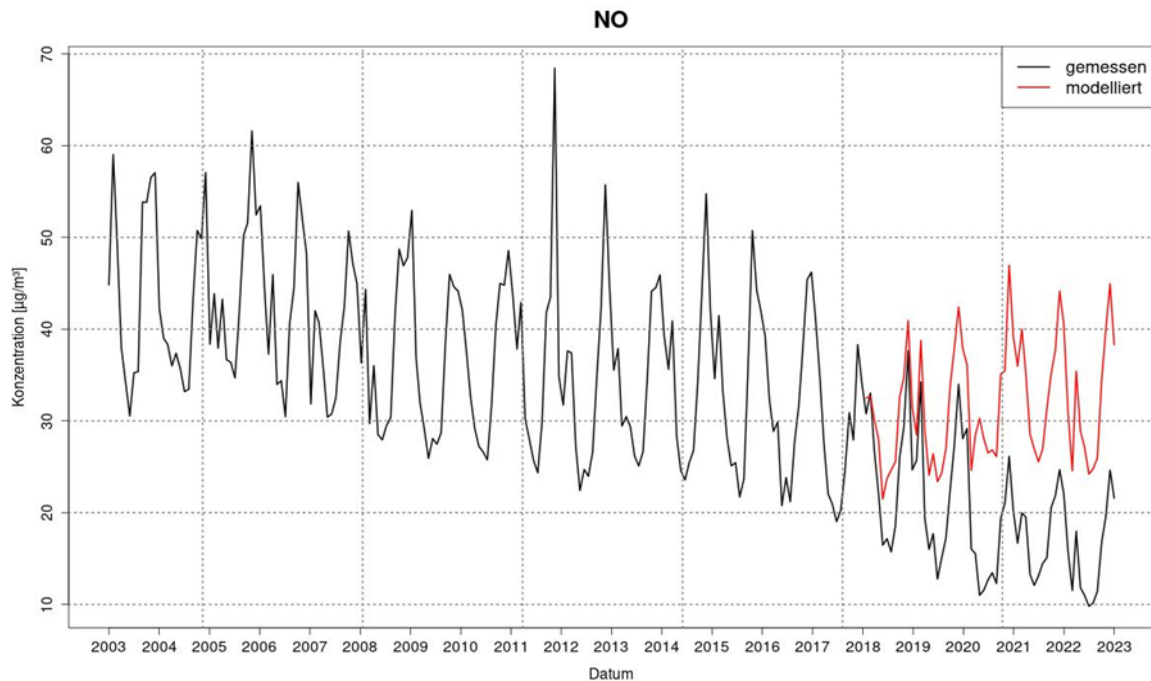


Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

Hintergrundstationen

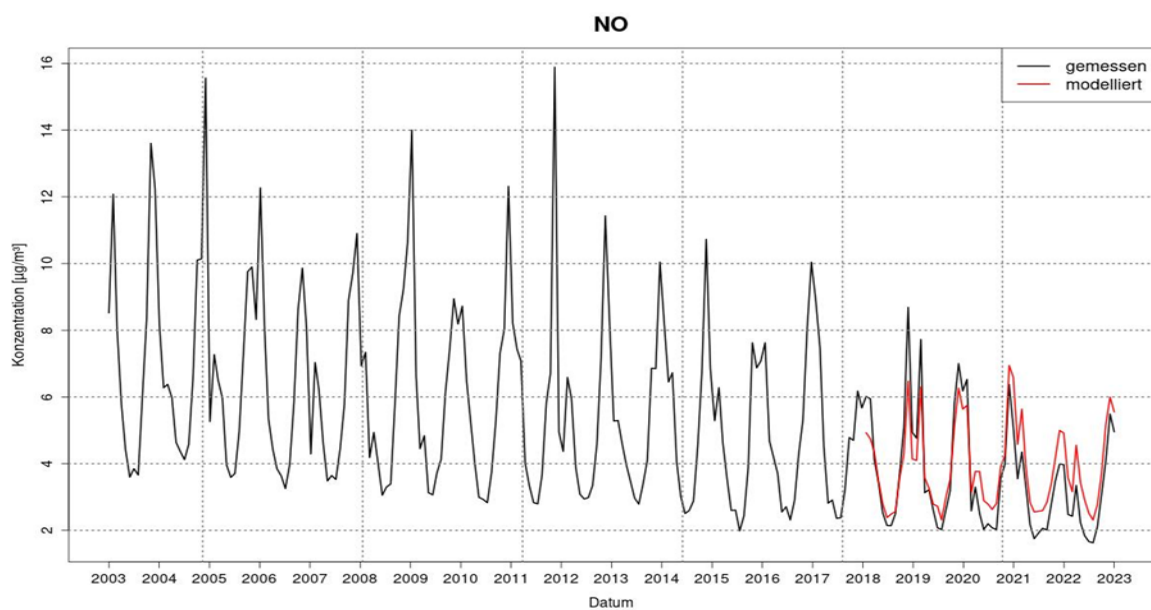


Abbildung 45: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO-Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

A 2.2 Stickstoffdioxid

■ Alle Stationen

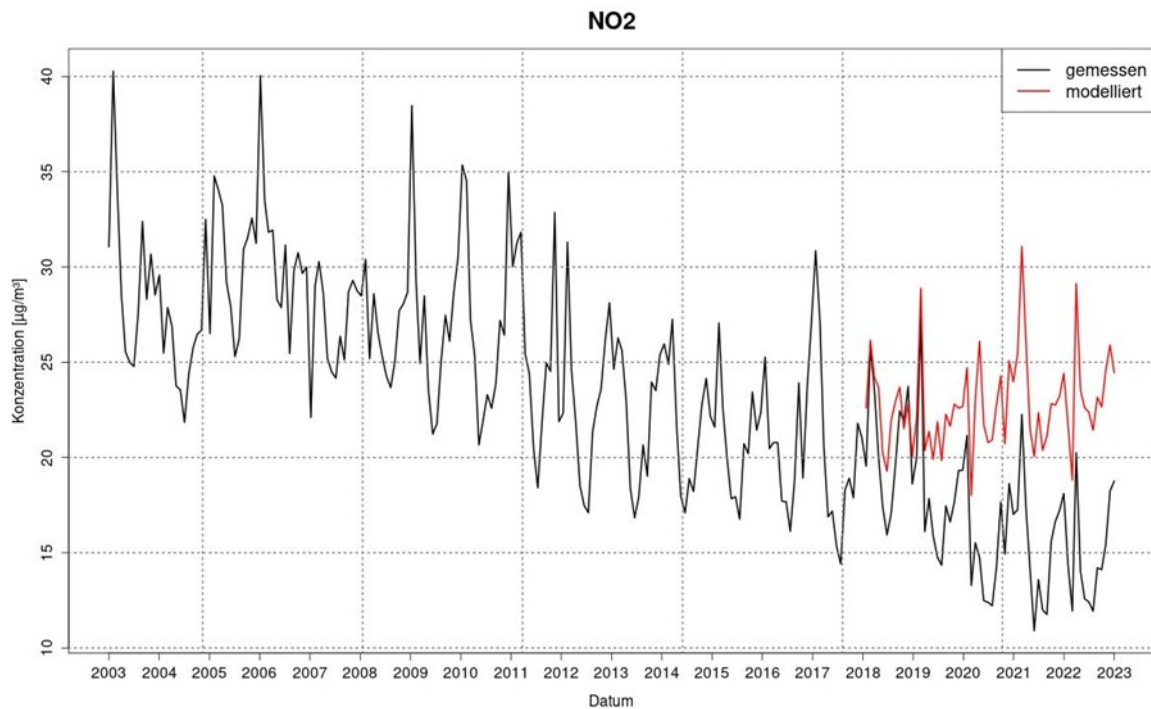


Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO₂-Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert.

■ Verkehrsstationen

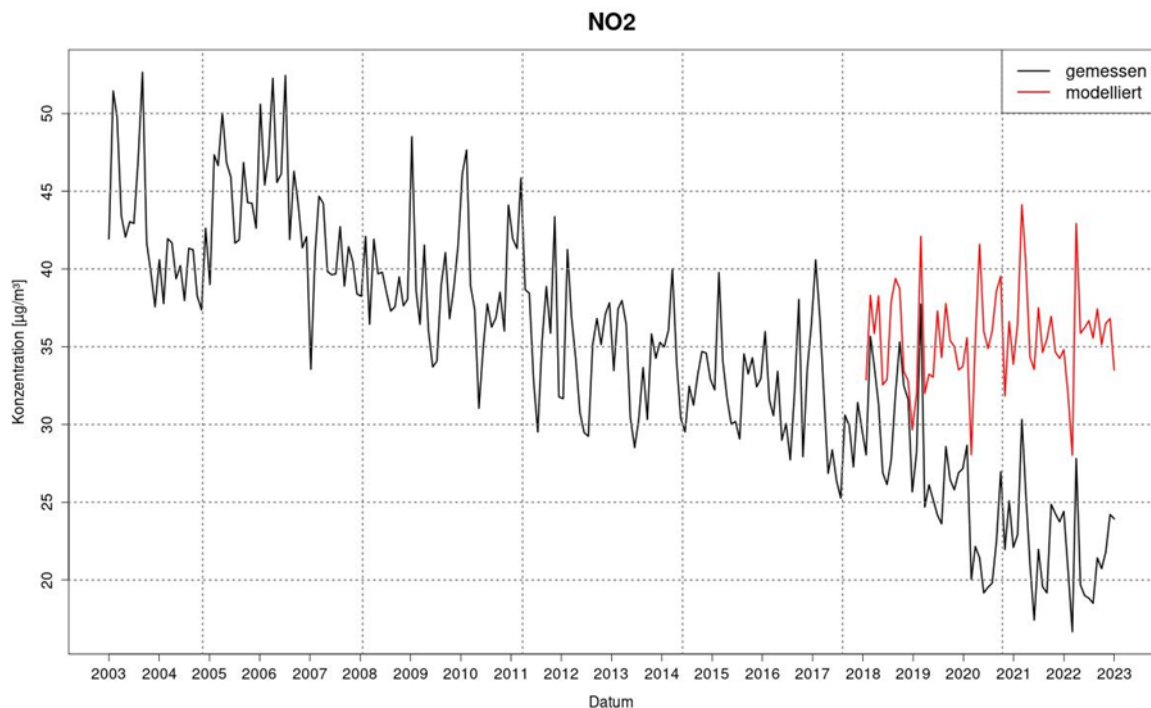


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO₂-Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

Hintergrundstationen

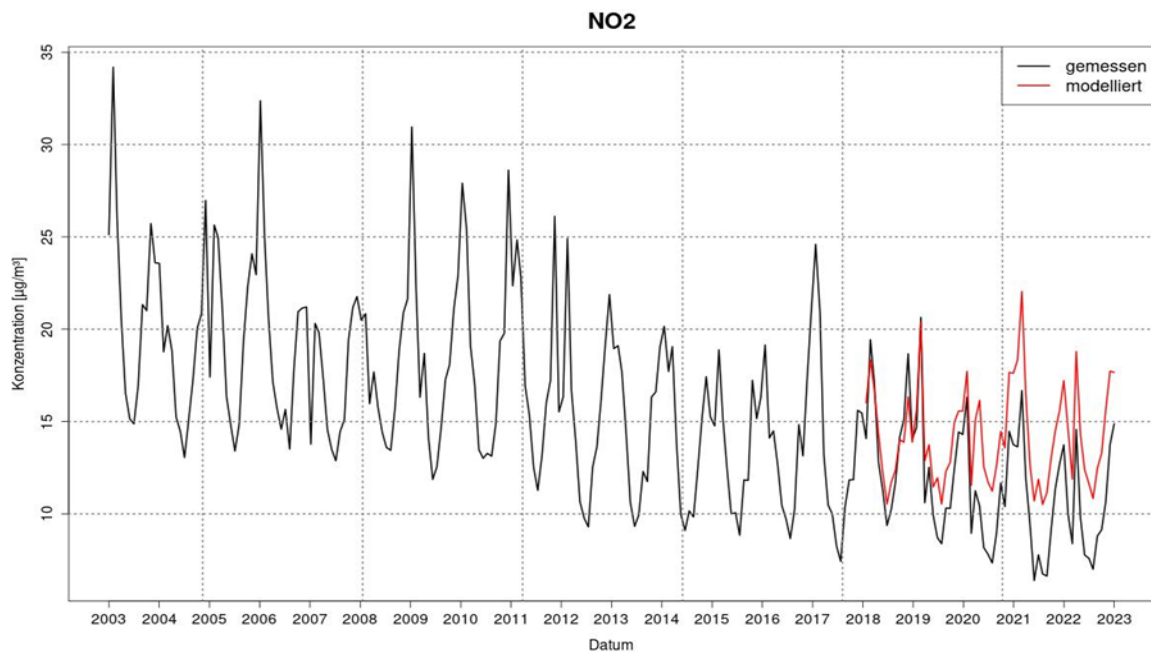


Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO₂-Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

A 2.3 Stickoxide

Alle Stationen

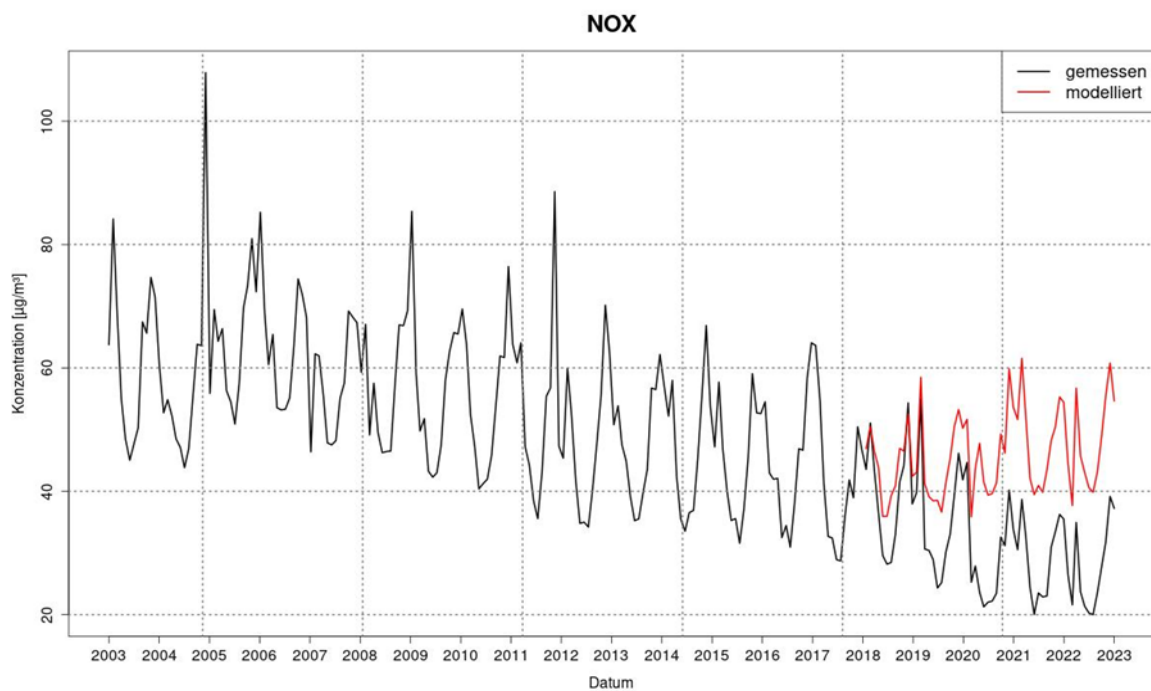


Abbildung 49: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_x-Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert.

Verkehrsstationen

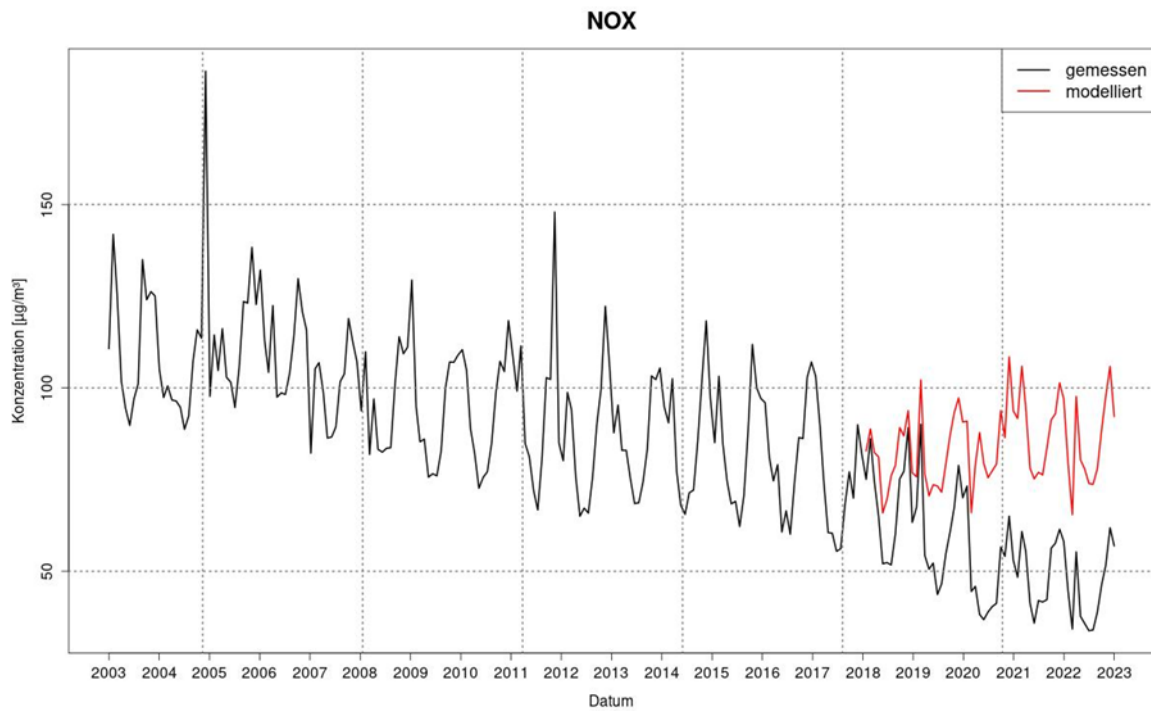


Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_x -Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

Hintergrundstationen

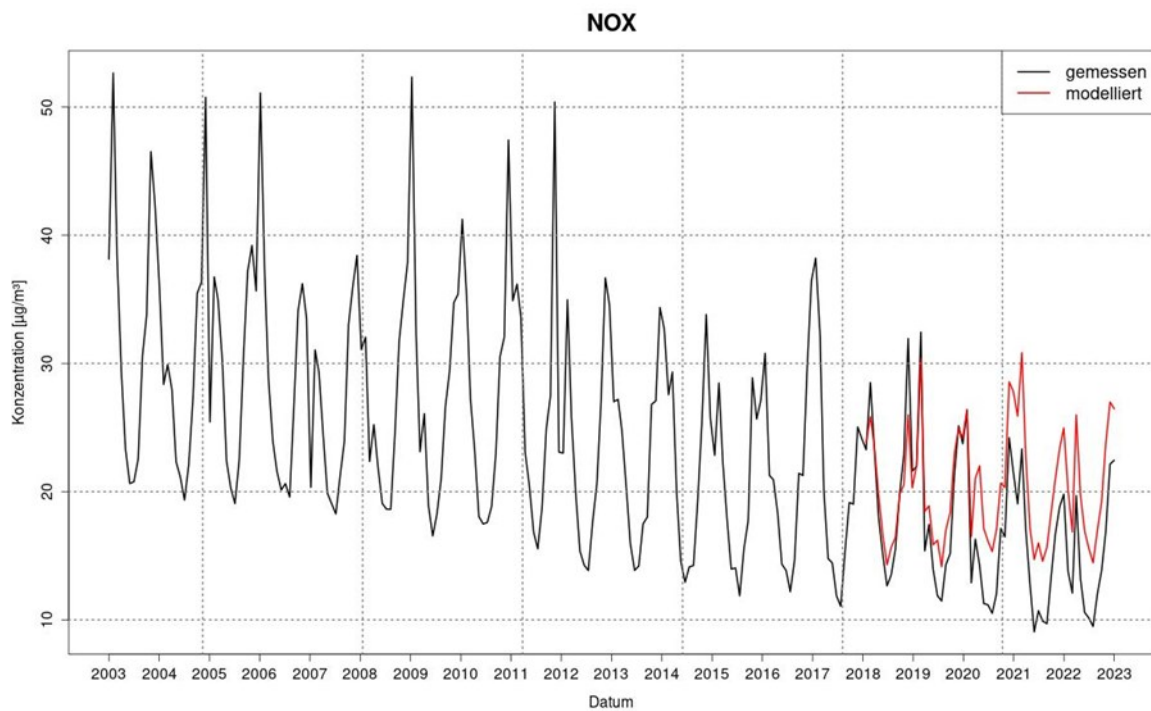


Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten NO_x -Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

A 2.4 Feinstaub PM₁₀

■ Alle Stationen

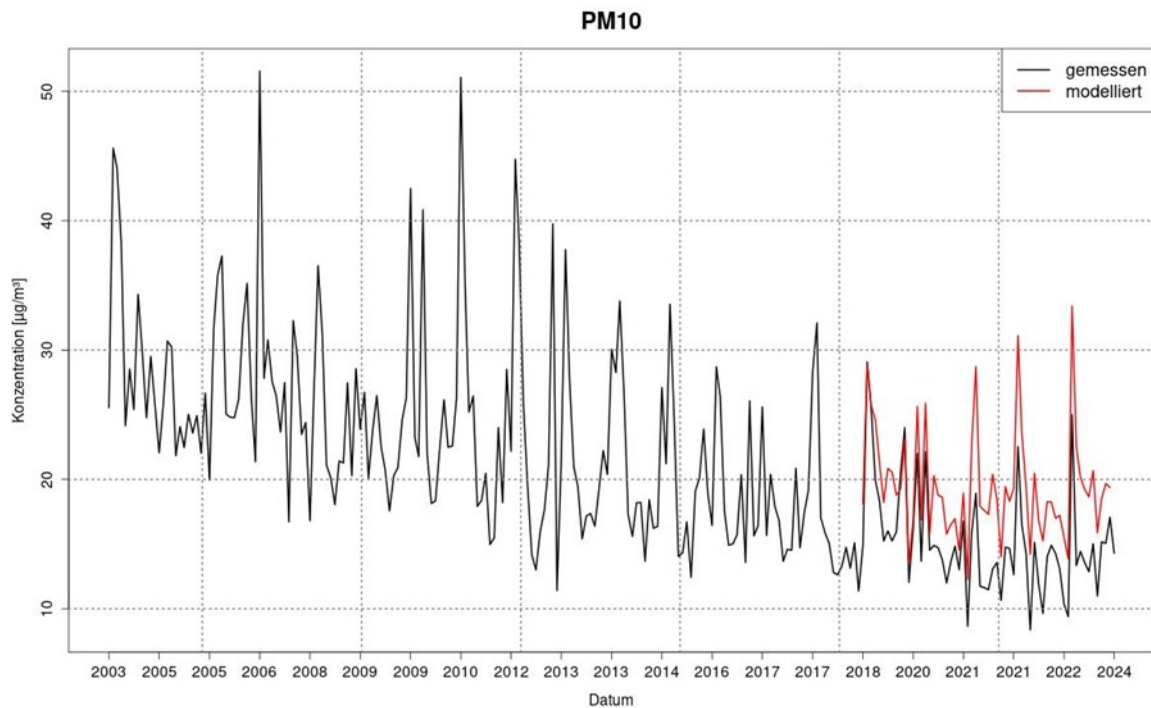


Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM₁₀-Konzentration aller Stationen, 2018 bis 2022 modelliert.

■ Verkehrsstationen

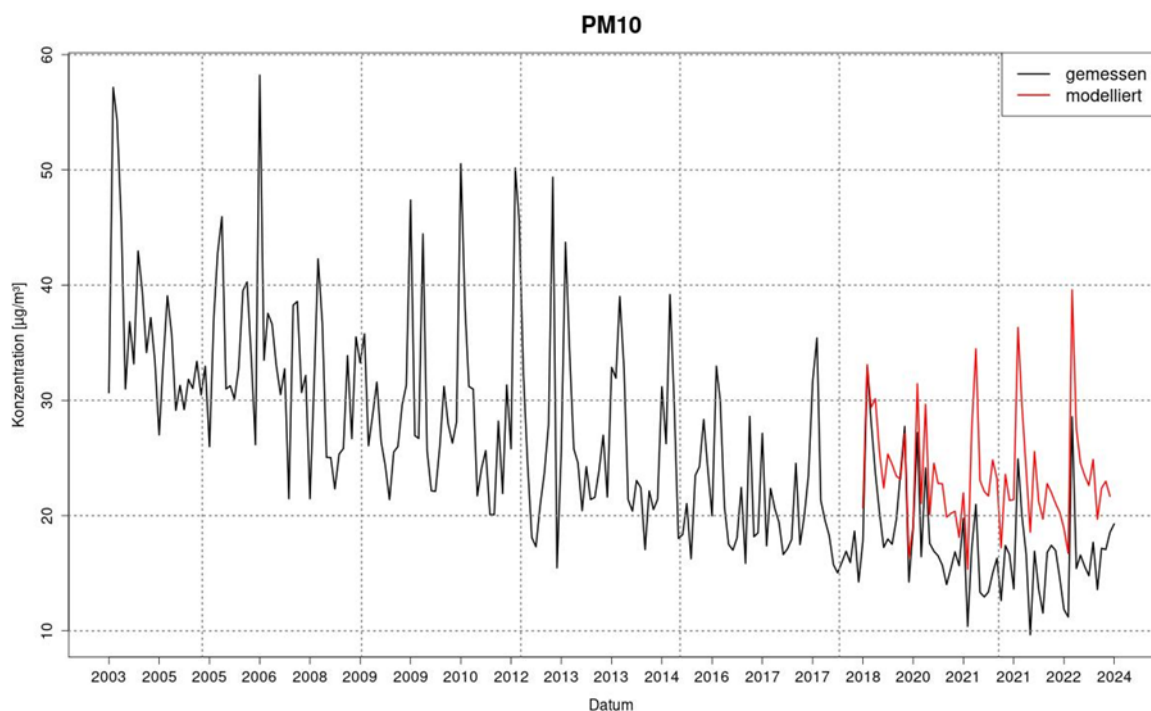


Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM₁₀-Konzentration der Verkehrsstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

Hintergrundstationen

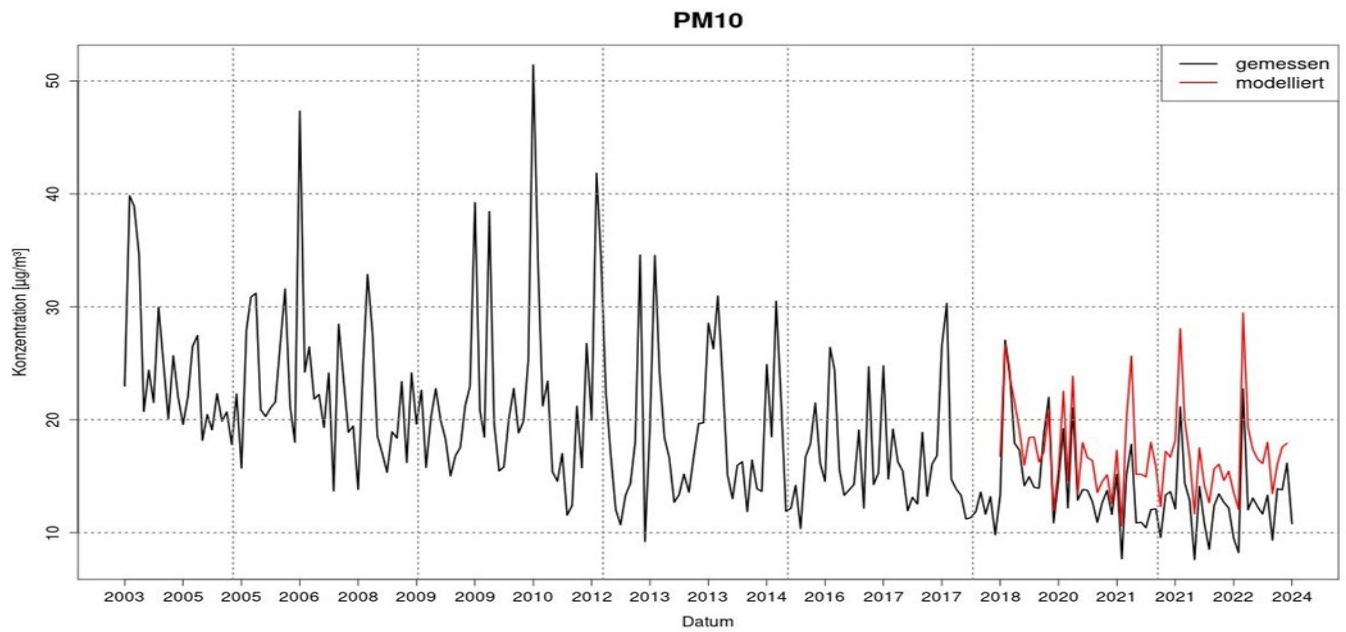


Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der Monatswerte der gemessenen und modellierten PM₁₀-Konzentration der Hintergrundstationen, 2018 bis 2022 modelliert.

Tabelle 5: Kennwerte als Stationsmittel für alle Größen

Größe	Jahr	R ² (Stunde)	R ² (Tag)	R ² (Monat)	RMSE Tag (µg/m ³)	Mittelwert Anlernzeit gemessen (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeitraum modelliert (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeitraum gemessen (µg/m ³)
PM ₁₀	2013–2022	0,34	0,48	0,55	9,5	25,2	22,0	17,1
PM ₁₀	2018–2022	0,39	0,53	0,69	7,6	23,0	19,4	15,1
NO	2013–2022	0,32	0,36	0,51	9,1	19,4	15,7	12,9
NO	2018–2022	0,36	0,42	0,56	8,4	18,0	15,1	10,0
NO _x	2013–2022	0,43	0,49	0,57	21,1	56,6	49,4	38,7
NO _x	2018–2022	0,46	0,52	0,56	19,9	52,4	46,1	32,2
NO ₂	2013–2022	0,47	0,52	0,51	8,7	27,0	25,1	19,0
NO ₂	2018–2022	0,49	0,54	0,49	7,9	24,9	22,8	16,9

Hintergrundstationen können atmosphärische Anteile am Rückgang von >100 % aufweisen. Zum einen ist bei kleinen absoluten Werten der relative Fehler bei der Messung höher, zum anderen spielen bei Hintergrundstationen Verkehrsemissionen kaum eine Rolle. Trotz großräumig stark abnehmendem Trend ist der Rückgang bei einzelnen Hintergrundstationen sehr gering. Wenn die modellierte Konzentration unterhalb der gemessenen Konzentration liegt, entstehen Werte von >100 %.

Tabelle 6: Kennwerte Stickstoffmonoxidkonzentration stationsweise (Modellierungszeit: 2013–2022).

Stations_ID	R ² (Stunde)	R ² (Tag)	R ² (Monat)	RMSE Tag (µg/m ³)	Mittelwert Anlernzeit gemessen (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeitraum modelliert (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeitraum gemessen (µg/m ³)	Anteil Atmosphäre an Rückgang (%)
DESN001	0,4	0,45	0,67	7,9	16,4	13,6	10,2	46
DESN004	0,37	0,44	0,58	3,8	7,8	5,8	4,8	69
DESN006	0,4	0,38	0,52	15,2	30,1	23,9	13,3	37
DESN017	0,44	0,51	0,79	7,7	14,4	11,2	12,0	131
DESN019	0,43	0,61	0,87	10,2	13,9	10,1	11,5	158
DESN020	0,44	0,46	0,51	12,2	30,7	27,3	21,1	35
DESN024	0,36	0,47	0,74	4,1	5,4	3,1	4,1	183
DESN025	0,34	0,24	0,13	22,6	49,0	42,7	39,1	63
DESN045	0,24	0,35	0,54	2,7	2,7	1,7	2,6	3083
DESN051	0,29	0,39	0,73	1,9	2,4	1,6	1,9	184
DESN052	0,18	0,23	0,29	0,7	1,7	1,2	1,4	149
DESN059	0,21	0,45	0,67	3,6	4,0	2,5	3,0	151
DESN061	0,38	0,37	0,38	12,8	30,7	24,8	16,7	42
DESN074	0,17	0,23	0,57	0,7	1,5	1,2	1,3	125
DESN075	0,38	0,34	0,43	14,3	32,2	27,1	22,1	50
DESN076	0,14	0,13	0,4	0,7	1,4	1,1	1,2	132
DESN077	0,43	0,45	0,4	16,0	36,5	28,7	28,1	93
DESN079	0,12	0,12	0,32	0,7	1,4	1,1	1,3	254
DESN083	0,46	0,42	0,42	24,9	52,3	47,0	31,0	25
DESN084	0,42	0,32	0,25	30,1	68,5	62,1	48,6	32
DESN091	0,38	0,5	0,69	11,3	22,1	18,6	14,5	46
DESN092	0,23	0,39	0,7	5,2	5,5	3,1	4,0	153
DESN093	0,16	0,12	0,23	1,08	2,01	1,61	1,5	82

Tabelle 7: Kennwerte Stickstoffdioxidkonzentration stationsweise (Modellierungszeit: 2013 – 2022)

Stations_ID	R ² (Stunde)	R ² (Tag)	R ² (Monat)	RMSE Tag (µg/m ³)	Mittelwert Anlernzeit gemessen (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeitraum modelliert (µg/m ³)	Mittelwert Zielzeitraum gemessen (µg/m ³)	Anteil Atmosphäre an Rückgang (%)
DESN001	0,53	0,58	0,61	8,5	25,6	24,4	18,1	16
DESN004	0,5	0,57	0,62	7,0	22,2	20,4	15,1	24
DESN006	0,39	0,42	0,38	12,3	30,8	28,6	18,5	18
DESN017	0,52	0,57	0,64	7,4	27,4	25,8	21,5	27
DESN019	0,55	0,64	0,71	6,6	25,0	23,4	19,7	29
DESN020	0,46	0,48	0,28	8,3	28,3	27,3	21,3	14
DESN024	0,53	0,67	0,83	4,5	15,6	13,6	10,7	42
DESN025	0,34	0,23	0,01	16,8	49,1	47,9	36,0	9
DESN045	0,46	0,6	0,71	3,8	14,9	13,4	11,7	48
DESN051	0,57	0,7	0,81	5,1	16,9	15,0	12,0	40
DESN052	0,42	0,62	0,78	4,1	11,4	9,7	6,7	35
DESN059	0,58	0,66	0,69	5,9	20,4	18,5	14,6	34
DESN061	0,41	0,33	0,07	14,6	42,2	40,3	28,1	14
DESN074	0,45	0,62	0,72	4,2	11,4	10,0	7,2	34
DESN075	0,41	0,33	0,22	9,9	30,5	28,6	21,4	20
DESN076	0,51	0,64	0,76	3,6	12,0	10,2	8,3	48
DESN077	0,49	0,46	0,2	12,7	44,7	43,2	35,3	15
DESN079	0,42	0,53	0,65	3,5	10,9	9,3	7,7	51
DESN083	0,44	0,38	0,1	20,8	51,7	51,5	34,9	1
DESN084	0,41	0,25	0,02	19,0	52,7	52,2	39,2	4
DESN091	0,46	0,5	0,47	11,3	32,6	32,3	23,4	4
DESN092	0,52	0,61	0,67	6,7	23,0	21,5	17,4	27
DESN093	0,45	0,56	0,74	3,9	11,8	10,5	8,8	43

Tabelle 8: Kennwerte Stickoxidkonzentration stationsweise (Modellierungszeit: 2013–2022)

Stations_ID	R² (Stunde)	R² (Tag)	R² (Monat)	RMSE Tag (µg/m³)	Mittelwert Anlernzeit gemessen (µg/m³)	Mittelwert Zielzeitraum modelliert (µg/m³)	Mittelwert Zielzeitraum gemessen (µg/m³)	Anteil Atmosphäre an Rückgang (%)
DESN001	0,45	0,5	0,64	19,3	50,7	45,2	33,7	33
DESN004	0,45	0,52	0,61	11,7	34,1	29,4	22,5	40
DESN006	0,41	0,4	0,49	34,8	76,7	65,2	38,8	30
DESN017	0,48	0,54	0,76	16,9	49,4	43,2	39,7	65
DESN019	0,49	0,64	0,86	19,2	46,2	38,8	37,2	82
DESN020	0,45	0,46	0,41	26,2	75,2	69,6	53,5	26
DESN024	0,48	0,62	0,83	8,0	23,8	18,7	17,0	76
DESN025	0,33	0,2	0,03	47,9	123,9	113,2	95,7	38
DESN045	0,37	0,53	0,67	6,4	19,0	16,1	15,7	89
DESN051	0,51	0,65	0,82	6,6	20,6	17,5	15,0	55
DESN052	0,38	0,6	0,8	4,5	13,9	11,8	8,8	43
DESN059	0,47	0,63	0,71	9,0	26,6	22,6	19,2	54
DESN061	0,39	0,34	0,22	33,3	89,1	78,5	53,6	30
DESN074	0,42	0,6	0,75	4,6	13,7	11,9	9,1	40
DESN075	0,38	0,32	0,3	30,0	79,7	70,0	55,1	40
DESN076	0,49	0,61	0,75	4,1	14,1	12,1	10,1	52
DESN077	0,45	0,44	0,26	33,7	100,4	87,0	78,2	60
DESN079	0,39	0,51	0,67	3,9	13,1	11,1	9,7	58
DESN083	0,46	0,41	0,33	57,7	131,7	124,0	82,3	16
DESN084	0,42	0,29	0,12	63,0	157,7	146,5	113,4	25
DESN091	0,4	0,5	0,6	26,5	66,4	60,9	45,6	26
DESN092	0,39	0,55	0,71	11,7	31,4	26,4	23,4	63
DESN093	0,37	0,49	0,72	5,0	14,8	13,1	11,1	47

Tabelle 9: Kennwerte Feinstaub Stationsweise (Modellierungszeit: 2013–2022)

Stations_ID	R² (Stunde)	R² (Tag)	R² (Monat)	RMSE Tag (µg/m³)	Mittelwert Anlernzeit gemessen (µg/m³)	Mittelwert Zielzeitraum modelliert (µg/m³)	Mittelwert Zielzeitraum gemessen (µg/m³)	Anteil Atmosphäre an Rückgang (%)
DESN004	0,35	0,49	0,56	9,7	24,6	21,8	17,2	38
DESN006	0,3	0,47	0,53	11,8	30,2	25,7	17,5	35
DESN019	0,33	0,51	0,59	9,6	25,8	22,7	18,9	45
DESN024	0,31	0,48	0,53	7,0	19,6	16,6	13,2	47
DESN025	0,34	0,45	0,36	13,4	34,9	31,5	21,8	26
DESN045	0,37	0,54	0,64	9,6	26,3	22,4	19,1	53
DESN049	0,32	0,45	0,6	5,3	13,1	12,1	10,0	33
DESN051	0,39	0,49	0,52	8,4	22,5	19,9	15,9	40
DESN059	0,34	0,48	0,53	8,8	22,4	19,9	15,7	37
DESN061	0,28	0,41	0,38	11,5	31,7	27,8	20,4	35
DESN074	0,36	0,46	0,53	7,1	17,3	15,7	12,2	31
DESN075	0,35	0,5	0,54	9,1	25,6	22,4	16,9	37
DESN076	0,37	0,47	0,54	7,6	18,7	16,5	13,3	41
DESN077	0,3	0,52	0,5	11,9	34,5	29,9	22,7	39
DESN079	0,45	0,56	0,74	7,7	20,3	18,6	15,7	37
DESN083	0,26	0,42	0,46	12,2	30,5	28,1	19,8	22
DESN084	0,36	0,48	0,48	11,4	30,7	28,4	20,4	22
DESN088	0,42	0,57	0,66	10,5	30,2	26,1	20,4	41
DESN091	0,34	0,46	0,61	10,3	26,5	23,6	17,7	33
DESN092	0,37	0,51	0,6	8,3	21,6	19,8	17,3	42
DESN093	0,3	0,45	0,59	7,7	17,9	16,5	13,4	31

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: Poststelle@lfulg.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autor:

Dr. Philipp Körner, Dr. Uta Moderow
Institut für Angewandte Meteorologie und Klimatologie (iamk GmbH)
Dr.-Wilhelm-Külz-Straße 70, 01896 Pulsnitz
Telefon: + 49 176 45747729
E-Mail: philipp.koerner@iamk-gmbh.de

Redaktion:

Dr. Johannes Franke, Dr. Susanne Bastian
Abteilung 5 - Klima, Luft, Lärm, Strahlen / Referat 55 bzw. 51
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-5500
E-Mail: johannes.franke@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis:

Titelbild: Dr. Philipp Körner, iamk GmbH

Redaktionsschluss:

14.05.2024

ISSN:

1867-2868

Bestellservice:

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

Hinweis:

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de