

# REPORT

---

## **Statistische Analyse der Luftqualität in Graz anhand von Feinstaub und Stickstoffdioxid**

Franz Moser

Ulrike Kleb

Hermann Katz



Im Auftrag der  
Wirtschaftskammer Österreich, Abteilung für Umwelt- und Energiepolitik,  
Wirtschaftskammer Österreich, Bundessparte Industrie und  
Wirtschaftskammer Steiermark, Institut für Wirtschafts- und Standortentwicklung

Graz, im April 2019

# Statistische Analyse der Luftqualität in Graz anhand von Feinstaub und Stickstoffdioxid

Franz Moser, Ulrike Kleb, Hermann Katz

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH  
Institut für Wirtschafts- und Innovationsforschung

## **Büro Graz**

Leonhardstraße 59  
8010 Graz, Austria  
Tel.: +43-316-876 1488  
E-Mail: [policies@joanneum.at](mailto:policies@joanneum.at)

## **Büro Wien**

Haus der Forschung, Sensengasse 1  
1090 Wien, Austria  
Tel.: +43-1-581 7520  
E-Mail: [policies@joanneum.at](mailto:policies@joanneum.at)

## **Büro Klagenfurt**

Lakeside B08a, EG  
9020 Klagenfurt am Wörthersee  
Tel.: +43-1-876 7553  
E-Mail: [policies@joanneum.at](mailto:policies@joanneum.at)

Graz, im April 2019

# Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG .....	2
1 EINLEITUNG .....	7
1.1 Zielsetzung .....	7
1.2 Grenzwerte und Vorgaben für PM <sub>10</sub> und NO <sub>2</sub> .....	7
1.3 Grenzwertüberschreitungen von PM <sub>10</sub> und NO <sub>2</sub> .....	8
1.3.1 PM <sub>10</sub> Überschreitungen .....	8
1.3.2 NO <sub>2</sub> -Überschreitungen .....	11
2 DATENGRUNDLAGE .....	14
2.1 Luftgütemessstellen in Graz .....	14
2.1.1 Anmerkungen zum Datenmaterial der Luftgütemessstationen .....	17
2.2 Meteorologische Messstationen .....	18
2.2.1 Anmerkungen zum Datenmaterial der meteorologischen Messstationen .....	19
2.3 Winterdienst .....	19
2.4 Datenaufbereitung .....	20
2.4.1 Phänomen Inversionswetterlage .....	20
2.4.2 Aggregation der Daten auf Tagesebene .....	21
2.4.3 Definition von Jahreszeiten .....	21
3 METHODIK .....	22
3.1 Deskriptive und explorative Methoden .....	22
3.2 Zusammenhangsanalysen und Statistische Modellierung .....	22
3.2.1 Korrelation .....	22
3.2.2 Statistische Modellierung .....	23
4 ANALYSE DER RAHMENBEDINGUNGEN .....	24
4.1 Bevölkerungsentwicklung .....	24
4.2 Wirtschaftliche Entwicklung und Aktivität .....	24
4.3 Verkehrssituation .....	25
4.4 Fahrzeugbestand und Flottenzusammensetzung .....	29
4.5 Emissionen .....	30
4.6 Aerosolquellenanalysen .....	32
5 ERGEBNISSE DER DESKRIPTIVEN UND EXPLORATIVEN ANALYSEN .....	33
5.1 Meteorologie und Klima .....	33
5.1.1 Temperaturentwicklung .....	33
5.1.2 Windsituation in Graz .....	36
5.1.3 Vergleich der Windsituation in Graz und Wien .....	40
5.1.4 Inversionswetterlagen in Graz .....	41
5.1.5 Luftfeuchtigkeit und Niederschlag .....	45
5.2 PM <sub>10</sub> und NO <sub>2</sub> .....	48
5.2.1 Belastung pro Messstation und Jahreszeit .....	48
5.2.2 Langfristige Trends .....	50
5.2.3 Tages- und Wochenverläufe .....	56

6	ERGEBNISSE DER ZUSAMMENHANGSANALYSEN UND STATISTISCHE MODELLIERUNG.....	59
6.1.1	Zusammenhang zwischen NO <sub>2</sub> und PM <sub>10</sub> .....	59
6.1.2	Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur, Inversion und Windgeschwindigkeit.....	61
6.1.3	Zusammenhang zwischen Luftschadstoffen und meteorologischen Parametern.....	63
6.1.4	Risikofaktoren für Grenzwertüberschreitungen bei PM <sub>10</sub> .....	73
7	DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....	83
7.1	Rahmenbedingungen .....	83
7.2	Meteorologie.....	83
7.3	Feinstaub PM <sub>10</sub> .....	85
7.4	Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> .....	88
7.5	Modellierung und Effekte .....	90
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	93
9	TABELLENVERZEICHNIS .....	96
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	97
11	ANHANG.....	98
11.1	Tabellen.....	98
11.2	Executive Summary (english).....	105

# Kurzfassung

## Zielsetzung

Diese Studie wurde im Vorfeld der Revision der Luftqualitätsrichtlinie auf europäischer Ebene und einer möglichen Diskussion über Grenzwerte und Flexibilitätsmechanismen im Auftrag der Wirtschaftskammer Österreich und der Wirtschaftskammer Steiermark erstellt. Die Auftraggeber wollten sich durch evidenzbasierte Analysen ein Bild über die derzeitige Situation der Luftgüte und deren Entwicklung über die letzten 10 bis 15 Jahre machen, wobei die Feinstaubbelastung (PM<sub>10</sub>) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) als vorrangig interessierende Luftschadstoffe ausgewählt wurden. Als Untersuchungsgebiet wurde die Stadt Graz herangezogen, da hier die Einhaltung der Grenzwerte aufgrund der speziellen Wetterbedingungen und Topographie seit Jahren eine große Herausforderung darstellt. Daten der Grazer Luftgütemessstellen und meteorologischen Messstationen von Oktober 2004 bis März 2018 wurden vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15, Referat Luftreinhaltung, zur Verfügung gestellt. Bei den Daten handelt es sich um qualitätsgesicherte Halbstundenmittelwerte (HMW).

Ein wesentliches Ziel der Analysen war die Einschätzung des Beitrags der speziellen topologischen Lage von Graz und der damit einhergehenden meteorologischen Rahmenbedingungen – wie ausgeprägte Inversionswetterlagen in den Wintermonaten und schwache Belüftung durch Wind – zur Feinstaub- und Stickstoffdioxidbelastung in Graz.

## Grenzwertüberschreitungen (Abschnitte 1.2 und 1.3)

Die derzeit gültigen und für eine eventuelle Verfügung von Maßnahmen relevanten Vorgaben für PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> sind in der EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG (engl. Ambient Air Quality Directive – AAQD) festgeschrieben.

Für den Tagesmittelwert (24-Stunden-Werte) von PM<sub>10</sub> gilt ein Grenzwert von 50 µg/m<sup>3</sup>, der nicht öfter als 35 Mal im Kalenderjahr überschritten werden darf. Die Anzahl der PM<sub>10</sub>-Überschreitungstage ist seit 2005 an allen Grazer Messstationen deutlich zurückgegangen. Jedoch waren im Jahr 2017 an den Messstellen Don Bosco und Graz Süd mehr als 35 Überschreitungstage zu verzeichnen. Die Zahl der Überschreitungstage ist an Sonntagen am geringsten, gefolgt von Samstagen und Montagen. Am häufigsten kommt es in der Wochenmitte (Mittwoch oder Donnerstag) zu Überschreitungen des PM<sub>10</sub>-Tagesgrenzwertes. An einem Wochenendtag (Samstag, Sonntag) traten in den Jahren seit 2005 durchschnittlich etwa halb so viele Überschreitungstage auf wie an einem Werktag.

Der PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwert darf 40 µg/m<sup>3</sup> nicht übersteigen. Die PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwerte zeigen seit dem Jahr 2005 einen Trend nach unten, seit 2011 gab es an den Grazer Messstationen keine Überschreitungen des Jahresmittelwertes. Zwischen 2005 und 2017 liegt der prozentuelle Rückgang bei allen Messstationen über 20%. Den stärksten Rückgang zeigt Graz Nord mit 45%, ausgehend vom Jahresmittel 2005. Der geringste Rückgang ist mit 23% bei Graz West zu beobachten (siehe Abschnitt 1.3.1).

Der Grenzwert für den NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert für die Außenluft beträgt 40 µg/m<sup>3</sup>. An der Messstelle Don Bosco lag der Jahresmittelwert in allen Jahren über diesem Grenzwert, an der Messstelle Graz Mitte wurde der Grenzwert bis 2009 überschritten. Die NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte sanken seit 2005 zwischen 11% (Graz West) und 21% (Graz Mitte), Don Bosco wies einen Rückgang von 15% auf.

Der  $\text{NO}_2$ -Grenzwert von  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für 1-Stunden-Mittelwerte, für den höchstens 18 Überschreitungen pro Jahr erlaubt sind, wurde an den Grazer Messstationen seit 2012 nicht mehr überschritten (siehe Abschnitt 1.3.2).

#### **Rahmenbedingungen (Abschnitt 4)**

Die Einwohnerzahl und Wohndichte in Graz weist von 2005 bis 2017 einen deutlichen und kontinuierlichen Anstieg um ca. 18% auf (Abschnitt 4.1). Die Wirtschaft hat sich in diesem Zeitraum positiv entwickelt. Das Bruttoregionalprodukt pro Einwohner stieg um knapp 22% (2005 bis 2016), das Bruttomedianeinkommen um 24,5% und die Anzahl der Nächtigungen um 58%. Insgesamt ist bei der wirtschaftlichen Entwicklung und Aktivität ein Trend nach oben erkennbar, wobei der Tourismus den größten Anstieg aufweist (Abschnitt 4.2).

Zur Verkehrssituation in Graz und deren Entwicklung über die letzten 10 bis 15 Jahre wurden aus Ressourcengründen Sekundärdaten bezogen auf Österreich bzw. die Steiermark in der Studie angeführt (Abschnitt 4.3). Die mittlere Wachstumsrate der Verkehrsstärken an den österreichischen automatisierten Zählstellen beträgt im Zeitraum 2005 bis 2016 im Mittel 1,1% pro Jahr, wobei das Wachstum an Werktagen stärker ausgeprägt ist, als an Wochenenden. In der gesamten Steiermark stieg die Zahl der Pendler/-innen zwischen 2009 und 2016 um knapp 6% (Einpendler/-innen) bzw. 7% (Auspendler/-innen). In der gesamten Steiermark stieg der Motorisierungsgrad (Kfz-Dichte = Kfz-Bestand pro 1000 Einwohner/-innen) von 2004 bis 2017 um knapp 15%, der Bestand an Kraftfahrzeugen um 18,7% (Abschnitt 4.4). Die Entwicklung des Anteils von Dieselfahrzeugen am Pkw-Bestand zeigte bis 2016 deutlich nach oben und stieg österreichweit, ausgehend von 2004, um 7,8 Prozentpunkte (49,2 auf 57%); 2017 war ein leichter Rückgang um 0,4 Prozentpunkte zu verzeichnen.

Im Bericht über den Emissionskataster Steiermark (Bezugsjahr 2014) werden Prozentsätze für die Verursachung von  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{NO}_x$  genannt: Demgemäß entfielen auf den Straßenverkehr 42% der  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen und 48% der  $\text{NO}_x$ -Emissionen, wobei bei  $\text{PM}_{10}$  Aufwirbelungsprozesse mit eingerechnet wurden. Die  $\text{PM}_{10}$ -Heizungsemissionen betragen 21%, die  $\text{NO}_x$ -Emissionen der Industrie 31% (siehe Abschnitt 4.5). Die Beurteilung der Auswirkung von verschiedenen Emissionsquellen auf eine lokale Immissionssituation ist hochkomplex und erfolgt in der Regel über anspruchsvolle Ausbreitungsmodelle, Massenbilanzen oder die Analyse von quellenspezifischen Schlüsselsubstanzen (Tracer). Es ist daher nicht möglich, ermittelte Emissionsmengen 1:1 auf die Immissionssituation umzulegen (vgl. dazu die Aquella-Studien von Bauer et al., 2007, und Kirchsteiger et al., 2017).

In der Stadt Graz kam es seit dem Jahr 2005 zu größeren Umstellungen beim Winterdienst, die sich im Mengenverhältnis von Splitt zu Streusalz widerspiegeln. Während im Winter 2004/2005 etwa vier Mal so viel Splitt wie Salz gestreut wurde, kehrte sich das Mengenverhältnis in den folgenden Jahren um und liegt ab dem Winter 2014/2015 bei einem Teil Splitt zu vier Teilen Streusalz (siehe Abschnitt 2.3).

## **Ergebnisse**

### Meteorologie

Während die Sommertemperaturen an den Grazer Messstationen seit 2005 einen sehr glatten Verlauf mit leicht steigender Tendenz aufweisen, ist bei den mittleren Wintertemperaturen ein deutliches Wellenverhalten sichtbar: Die Winter 2006/2007 sowie 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 waren verhältnismäßig warm, die Winter 2009/2010, 2010/2011 und 2016/2017 zeigten relativ niedrige mittlere Temperaturen (siehe Abschnitt 5.1.1).

Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten liegen an den Stationen des Grazer Stadtgebiets durchwegs unter 1 m/s und damit deutlich unter den in Wien aufgezeichneten Windstärken. Über alle Stationen betrachtet weht der Wind in Wien im Durchschnitt ca. 2 bis 3 Mal stärker als in Graz (siehe Abschnitt 5.1.3). Die Windsituation in Graz ist von der Jahres- und Tageszeit abhängig: Im Herbst und Winter sind die geringsten Windgeschwindigkeiten zu verzeichnen. Im Tagesverlauf sind in den frühen Morgenstunden die niedrigsten und am Nachmittag die höchsten Windstärken zu beobachten (siehe Abschnitt 6.1.2).

Die Zahl der Inversionstage in Graz schwankt deutlich von Jahr zu Jahr, zeigt aber keinen erkennbaren Trend nach oben oder unten. Im Mittel wurden an den Grazer Stationen 62 Inversionstage pro Jahr gezählt, wovon 37 auf die meteorologischen Wintermonate (Dezember bis Februar) fielen (siehe Abschnitt 5.1.4 und Tabellen im Anhang). Die Mehrheit der Inversionswetterlagen dauerte nur einen Tag. Jedoch kommen vor allem im Winter auch sehr häufig Inversionen mit einer Dauer von zwei Tagen vor, auch Inversionsdauern von sechs oder sieben Tagen sind im Winter keine Seltenheit. Die Häufigkeit von Inversionswetterlagen sinkt mit steigender Windgeschwindigkeit. Bei Windgeschwindigkeiten über 2 m/s treten praktisch keine Inversionslagen mehr auf (Abschnitt 6.1.2).

### PM<sub>10</sub>

Im Winter ist die Feinstaubbelastung in Graz am höchsten, wobei es deutliche Unterschiede zwischen den Messstellen gibt. Obwohl die Station Don Bosco bei den jährlichen Überschreitungstagen an erster Stelle liegt, ist der Wintermittelwert über alle Jahre in Graz Süd etwas höher als in Don Bosco.

Die Halbstundenmittelwerte der PM<sub>10</sub>-Belastung zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Lufttemperatur und von der Windgeschwindigkeit. Je stärker der Wind, desto geringer ist die PM<sub>10</sub>-Konzentration, wobei ab ca. 2 m/s kaum mehr eine Verringerung von PM<sub>10</sub> festzustellen ist (Abschnitt 6.1.3.2). Je niedriger die Lufttemperatur, desto höher ist die Feinstaubbelastung.

An Wintertagen mit Inversionswetterlagen ist die Feinstaubbelastung deutlich erhöht, je stärker die Inversion, desto höher ist tendenziell PM<sub>10</sub>. Im Mittel herrschte über alle Messstellen und Jahre im Winter an 59% aller PM<sub>10</sub>-Überschreitungstage eine Inversionswetterlage. An den Überschreitungstagen ohne Inversionswetterlage ist die mittlere Tagestemperatur deutlich niedriger (im Mittel deutlich unter 0 Grad) als an den Überschreitungstagen mit Inversion. Betrachtet man umgekehrt alle Inversionstage, so sind im Mittel über alle Stationen und Jahre 50% dieser Inversionstage auch PM<sub>10</sub>-Überschreitungstage (siehe Tabelle 13 und Tabellen im Anhang).

Bei der PM<sub>10</sub>-Belastung sind deutliche Tagesverläufe mit zwei Spitzen täglich zu sehen, die im Sommer und an den Wochenenden (Samstag und Sonntag) weniger stark ausgeprägt sind, als an den Werktagen. Die höchsten Peaks sind in der Wochenmitte (Mittwoch und Donnerstag) und im Winter zu sehen, wobei hier Unterschiede zwischen den Stationen zu erkennen sind. Diese sind durch die Lage der Messstelle bedingt, die auch unterschiedliche Anteile der Emissionsquellen impliziert (Abschnitt 5.2.3).

### NO<sub>2</sub>

Die NO<sub>2</sub>-Belastung ist im Winter am höchsten, gefolgt von Herbst und Frühling und im Sommer am niedrigsten. Die höchsten Belastungen weist die Station Don Bosco auf, gefolgt von Graz Mitte.

Auch bei NO<sub>2</sub> ist eine deutliche Abhängigkeit von der Lufttemperatur gegeben: Je kälter, desto höher ist die NO<sub>2</sub>-Konzentration. Die Schadstoffbelastung sinkt mit steigender

Windgeschwindigkeit, wobei ab ca. 2 m/s kaum mehr eine Verringerung der NO<sub>2</sub>-Belastung zu sehen ist.

Bei Vorliegen einer Inversion ist die NO<sub>2</sub>-Belastung im Mittel höher als ohne Inversion. Stärke und Dauer wirken sich jedoch kaum mehr aus: Für eine erhöhte NO<sub>2</sub>-Belastung reichen bereits schwache Inversionen mit geringen Temperaturunterschieden zu Kalkleiten und kurzer Dauer.

Wie bei PM<sub>10</sub> zeigt auch die NO<sub>2</sub>-Belastung einen deutlichen Tagesverlauf mit zwei Spitzen täglich, mit messstellenspezifischen bzw. lokalen Unterschieden. Die Spitzen sind an Werktagen stärker ausgeprägt, als an Wochenendtagen und liegen in Bezug auf die Tageszeit ähnlich wie jene von PM<sub>10</sub> (Abschnitt 5.2.3).

#### Risikofaktoren für eine PM<sub>10</sub>-Überschreitung

Um den Einfluss meteorologischer Risikofaktoren auf PM<sub>10</sub>-Grenzwertüberschreitungen quantifizieren zu können, wurden statistische Modelle für die Wahrscheinlichkeit einer Grenzwertüberschreitung von PM<sub>10</sub> auf Tagesebene gebildet (siehe Abschnitt 6.1.4). Für die Modellierung wurden nur die Wintermonate (1. Dezember bis Ende Februar) verwendet, da im Winter die Problematik der Grenzwertüberschreitungen am größten ist. Die Modelle liefern fundierte Aussagen über die Signifikanz der potenziellen Einflussfaktoren und sind deshalb zur Ursachenanalyse für PM<sub>10</sub>-Überschreitungen gut geeignet. Jedoch ist die Anpassungsgüte der Modelle aus statistischer Sicht nicht ausreichend, um als Prognosemodelle für Überschreitungstage zu dienen. Um diese zu verbessern, müssten bei künftigen Studien auf jeden Fall engmaschig – am besten auf Halbstundenebene – erhobene Daten der Verkehrsfrequenz und vollständige Daten des Winterdienstes (Splitt- und Salzstreumengen zumindest auf Tagesebene) in die Modelle eingebunden werden.

Die Modelle zeigen (siehe Abschnitt 6.1.4.2, Abbildung 68), dass die Wahrscheinlichkeit für einen Überschreitungstag mit sinkender Lufttemperatur deutlich zunimmt und bei steigender Temperatur abnimmt. Je höher die Windgeschwindigkeit desto geringer ist das Risiko für einen Überschreitungstag. Bei Windstille ist das Risiko deutlich erhöht, nimmt jedoch auch hier mit steigender Temperatur ab. Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten, ab etwa 2m/s, ist das Risiko für eine Grenzwertüberschreitung so gering, dass der Effekt der Temperatur kaum noch spürbar ist.

Das Risiko für eine Grenzwertüberschreitung ist für Tage mit Inversion höher als für Tage ohne Inversion. Wenn man beliebige, aber gleiche Temperaturen und Windgeschwindigkeiten betrachtet, ist das Risiko für eine Überschreitung des Grenzwertes für den Tagesmittelwert bei Vorhandensein einer Inversionslage immer höher als ohne Inversion. Mit steigender Niederschlagssumme nimmt das Risiko ab, jedoch ist der Effekt der Niederschlagssumme deutlich weniger stark ausgeprägt als der Effekt der Temperatur (Abbildung 69). Für Wochenendtage ist das Risiko niedriger als für die Werktage. Je höher der Anteil Splitt in Relation zur Salzmenge, desto höher ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit (Abbildung 70).

Ein weiteres Ergebnis der statistischen Modellierung sind Chancen (Odds), die als relative Veränderungen von Wahrscheinlichkeiten gegenüber einer Vergleichs- oder Referenzsituation interpretiert werden können (siehe Abschnitt 6.1.4.3). Am Beispiel der Station Graz Don Bosco können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Die Chance, in den Jahren 2005 – 2010 einen Überschreitungstag zu haben war ca. 1,6 Mal so groß, wie jene in der Periode 2011 – 2017. D.h. die Chance für einen Überschreitungstag hat sich mit fortschreitender Zeit deutlich verringert.

- An einem Werktag ist die Chance für eine PM<sub>10</sub>-Überschreitung etwa 3,6 Mal so groß wie jene, die an einem Wochenendtag besteht.
- Die Chance für eine PM<sub>10</sub>-Überschreitung ist an einem Inversionstag 2,5 Mal so groß wie an einem Tag ohne Inversionswetterlage.
- Bei einer mittleren Tagestemperatur von -10 Grad ist die Chance für einen Überschreitungstag ca. 15 Mal so groß wie bei einer Temperatur von 0 Grad. Umgekehrt verringert sich die Chance bei einer Temperatur von 10 Grad auf etwa 6% der Chance, die für eine Lufttemperatur von 0 Grad besteht, das bedeutet eine Verringerung der Chance um den Faktor 0,06 (also 6 Hundertstel der Chance für einen Überschreitungstag bei plus 10 Grad im Vergleich zur Chance bei 0 Grad).
- Auch eine hohe Windgeschwindigkeit wirkt sich äußerst stark auf die Chance für einen Überschreitungstag aus: Eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s verringert die Chance auf 2% (um den Faktor 0,02, also ein Fünfzigstel), verglichen mit totaler Windstille. In Graz sind Windgeschwindigkeiten von 1 m/s im Winter allerdings sehr unüblich, da die Mediane der Windgeschwindigkeiten an den Grazer Messstellen im Winter nur bei 0,4 bis 0,5 m/s liegen.
- 1 mm Niederschlag senkt die Chance für eine Überschreitung auf 75% (um den Faktor 0,75, d.h. die Chance verringert sich um ein Viertel), und 10 mm Niederschlag bereits auf 10% (Faktor 0,1 = 1/10) im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag.
- Die Steigerung des Splitt-Anteils erhöht die Chancen für einen Überschreitungstag. Bei einem Splitt-zu-Salz-Verhältnis von 5:1 ist die Chance etwa 3 Mal so hoch, wie die Chance beim 1:1 Mengenverhältnis.

## Resümee

Aus den Ergebnissen der statistischen Analysen kann man schließen, dass die vielfältigen Maßnahmen zur Feinstaubreduktion und Luftreinhaltung, die in der Steiermark auf Basis des Immissionsschutzgesetzes-Luft (IG-L) eingeleitet wurden und umgesetzt werden, zum Abwärtstrend der gemessenen Belastungen mit PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> beigetragen haben. Als Beispiele sind hier die Maßnahmen zur Verringerung der Belastung durch Hausbrand (Förderung der Fernwärme- und Erdgasanschlüsse sowie von Wärmepumpen, Kontrolle von Heizungsanlagen, Energieberatung für energetische Gebäude- und Heizungssanierung), die Umstellung des Winterdienstes (weitgehender Verzicht auf den Einsatz von Streusplitt, Umsetzung des differenzierten Winterdienstes, Qualitätssicherung) und Maßnahmen betreffend den Straßenverkehr (Fahrverbote für LKWs mit hohen Abgaswerten, IG-L Geschwindigkeitsbeschränkungen im Großraum Graz, Erneuerung der Busflotte der Holding Graz, Förderungen für den Umstieg auf emissionsarme Fahrzeugtechnologien) zu nennen.

Die Ausmaße der Überschreitungen und die Anzahl der Überschreitungstage sind im langfristigen Trend deutlich kleiner geworden, dies haben die Maßnahmenbündel des Luftreinhaltungsprogramms trotz erheblich gesteigener wirtschaftlicher Aktivität bewirkt.

Die verbliebenen Überschreitungen, insbesondere an einer verkehrsnahen Messstelle, finden zu einem großen Teil (mehr als die Hälfte) an Tagen mit austauscharmen Wetterlagen, vorzugsweise in der kalten Jahreszeit, statt. Gerade in der kalten Jahreszeit können Inversionswetterlagen über einen längeren Zeitraum bestehen.

# 1 Einleitung

## 1.1 ZIELSETZUNG

Im Vorfeld der Revision der Luftqualitätsrichtlinie auf europäischer Ebene und einer möglichen Diskussion über die Grenzwerte und Flexibilitätsmechanismen, möchten sich die Wirtschaftskammer Österreich und die Wirtschaftskammer Steiermark durch evidenzbasierte Analysen ein Bild über die derzeitige Situation der Luftgüte und deren Entwicklung über die letzten 10 bis 15 Jahre machen. Als vorrangig interessierende Luftschadstoffe wurden die Feinstaubbelastung (PM<sub>10</sub>) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) ausgewählt. Da die Stadt Graz innerhalb Österreichs die höchste Feinstaubbelastung aufweist und die Einhaltung der Grenzwerte seit Jahren eine große Herausforderung darstellt, erschien Graz als geeignetes Fallbeispiel für die Datenanalysen.

Neben einer Darstellung und Einschätzung der längerfristigen Trends der Belastungssituation von PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub>, sollten in erster Linie mögliche Zusammenhänge mit meteorologischen Größen analysiert und mögliche Effekte dieser Parameter auf die Schadstoffimmissionswerte quantifiziert werden.

Ein wesentliches Ziel der Analysen war die Einschätzung des Beitrags der speziellen topologischen Lage von Graz und der damit einhergehenden meteorologischen Rahmenbedingungen – wie ausgeprägte Inversionswetterlagen in den Wintermonaten und schwache Belüftung durch Wind – zur Feinstaubbelastung in Graz.

## 1.2 GRENZWERTE UND VORGABEN FÜR PM<sub>10</sub> UND NO<sub>2</sub>

Die derzeit gültigen und für eine eventuelle Verordnung von Maßnahmen relevanten Vorgaben für PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> sind in der EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG (engl. Ambient Air Quality Directive – AAQD) festgeschrieben. Die Umsetzung in österreichisches Recht erfolgte mit der Novelle zum Immissionsschutzgesetz-Luft in BGBl I 77/2010 (IG-L).

Der PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwert darf 40 µg/m<sup>3</sup> nicht übersteigen. Für Tagesmittelwerte (24-Stunden-Werte) von PM<sub>10</sub> gilt ein Grenzwert von 50 µg/m<sup>3</sup>, der nicht öfter als 35 Mal im Kalenderjahr überschritten werden darf.

Der gültige Grenzwert für den NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert für die Außenluft beträgt 40 µg/m<sup>3</sup>. Dieser wurde 1999 auf Vorschlag der EU-Kommission von den EU-Mitgliedstaaten beschlossen und 2008 von der EU bestätigt. Zusätzlich gilt der Grenzwert von 200 µg/m<sup>3</sup> für 1-Stunden-Mittelwerte, der höchstens 18 Mal pro Jahr überschritten werden darf. Für NO<sub>2</sub>-Tagesmittelwerte ist von Seiten der EU kein Grenzwert festgelegt.

Die festgelegten Immissionsgrenzwerte der EU unterscheiden sich zum Teil von jenen, die im österreichischen Recht verankert sind. Das IG-L sieht im Vergleich zu den EU-Richtlinien bei manchen Schadstoffen strengere Grenzwerte vor. Für PM<sub>10</sub> sind darin höchstens 25 Überschreitungstage des Grenzwertes von 50 µg/m<sup>3</sup> für das Tagesmittel erlaubt. Für den Jahresmittelwert von NO<sub>2</sub> ist im IG-L ein Grenzwert von 30 µg/m<sup>3</sup> festgeschrieben. Für den NO<sub>2</sub>-Tagesmittelwert gilt ein anzustrebender Zielwert von 80 µg/m<sup>3</sup>.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die österreichischen Grenzwerte eine Art „Warnfunktion“ übernehmen: bei Überschreitung dieser Werte werden gegebenenfalls Maßnahmen ergriffen um

eine drohende Überschreitung eines EU-Grenzwertes abzuwenden. Bei Definition von Ausmaß und Schärfe der Maßnahmen werden jedoch immer die EU-Grenzwerte als maßgeblich herangezogen.

### 1.3 GRENZWERTÜBERSCHREITUNGEN VON PM<sub>10</sub> UND NO<sub>2</sub>

Vom Referat Luftreinhaltung der Abteilung 15 des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung wird jährlich der Jahresbericht über Luftgütemessungen in der Steiermark herausgegeben (Pongratz et al., 2018). Dieser enthält neben einer Beschreibung aller Maßnahmen zur Luftreinhaltung und aktueller Messergebnisse auch Zeitreihen der jährlichen Anzahl an Grenzwertüberschreitungen von PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub>.

#### 1.3.1 PM<sub>10</sub> Überschreitungen

In der Abbildung 1 ist die Anzahl der Tage, bei denen es zu einer Überschreitung des PM<sub>10</sub>-Grenzwertes für den Tagesmittelwert kam, für alle Grazer Messstationen für die Jahre 2005 bis 2017 dargestellt. Die in dieser Grafik dargestellten Überschreitungstage beruhen auf den Daten des Jahresberichts 2017 der Luftgütemessungen in der Steiermark (Pongratz et al., 2018). Die Toleranzgrenze von jährlich 35 Überschreitungstagen, die nach EU-Richtlinie 2008/50/EG gilt, ist als horizontale rote Linie eingezeichnet. Es ist zu sehen, dass die Anzahl der Überschreitungstage seit 2005 an allen Messstationen deutlich zurückgegangen ist. Jedoch waren auch 2017 an den Messstellen Don Bosco und Graz Süd noch immer mehr als 35 Überschreitungstage zu verzeichnen.

Die Abbildung 2 zeigt die Summe der Überschreitungstage pro Messstation und Wochentag, wobei die Anteile der Perioden von 2005 bis 2010 und 2011 bis 2017 unterschiedlich eingefärbt sind<sup>1</sup>. Es ist zu sehen, dass die roten Teile der Balken, die der Periode von 2005 bis 2010 entsprechen, meist höher sind als jene der Periode 2011 bis 2017. Dies weist auf einen Rückgang der Anzahl von Überschreitungstagen im Zeitverlauf hin. An allen Messstationen ist die Zahl der Überschreitungstage an Sonntagen am geringsten, gefolgt von Samstagen und Montagen. Am häufigsten kommt es bei allen Messstationen in der Wochenmitte (Mittwoch oder Donnerstag) zu Überschreitungen des PM<sub>10</sub>-Tagesgrenzwertes. Die Abbildung zeigt, dass bei fünf Messstationen an Sonntagen die Häufigkeit der Überschreitungstage höchstens halb so groß ist, wie an einem Mittwoch bzw. Donnerstag. Lediglich für die Station Graz Süd sind auch an Samstagen und Sonntagen ca. 60% der Überschreitungstage eines Mittwochs zu beobachten.

In der Abbildung 3 sind die Zeitreihen der PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwerte aller Messstellen dargestellt. Der Grenzwert für den Jahresmittelwert von 40 µg/m<sup>3</sup> ist als horizontale unterbrochene Linie eingezeichnet. Die Grafik zeigt von 2005 bis 2017 einen mehr oder weniger kontinuierlichen Rückgang der Jahresmittelwerte und verdeutlicht, dass es seit 2011 an keiner der Grazer Messstationen zu Überschreitungen des Jahresmittelwertes kam. Der prozentuelle Rückgang des PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwertes zwischen 2005 und 2017 liegt bei allen Messstationen über 20%. Den stärksten Rückgang zeigt Graz Nord mit 45%, ausgehend vom Jahresmittel 2005. Bei Graz Mitte liegt der Rückgang bei 42%, wobei hier anzumerken ist, dass die Messstation im Jahr 2010 versetzt wurde (vgl. Abschnitt 2.1). Don Bosco, Graz Ost und Graz Süd weisen Rückgänge von 38%, 34% bzw. 32% auf. Der geringste Rückgang ist mit 23% bei Graz West zu beobachten.

---

<sup>1</sup> Diese Auswertung beruht auf den Daten der kontinuierlichen PM<sub>10</sub>-Messung der Grazer Luftgütemessstationen, die vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellt wurden. Geringfügige Abweichungen zu den im Jahresbericht 2017 publizierten Überschreitungstagen sind möglich, da eine vereinzelt Nachkalibration der kontinuierlichen Messergebnisse nicht nachvollziehbar war. Diese etwaigen Abweichungen haben jedoch keine Relevanz für die aus der Grafik abgeleiteten Aussagen.

**Überschreitungstage von PM<sub>10</sub> mit TMW > 50µg/m<sup>3</sup> für alle Messstellen ohne Berücksichtigung von Fernverfrachtung (Saharastaub) und Winterdienst**  
 Nach EU-Norm mit einer Toleranz von 35 Überschreitungen (rote horizontale Linie)

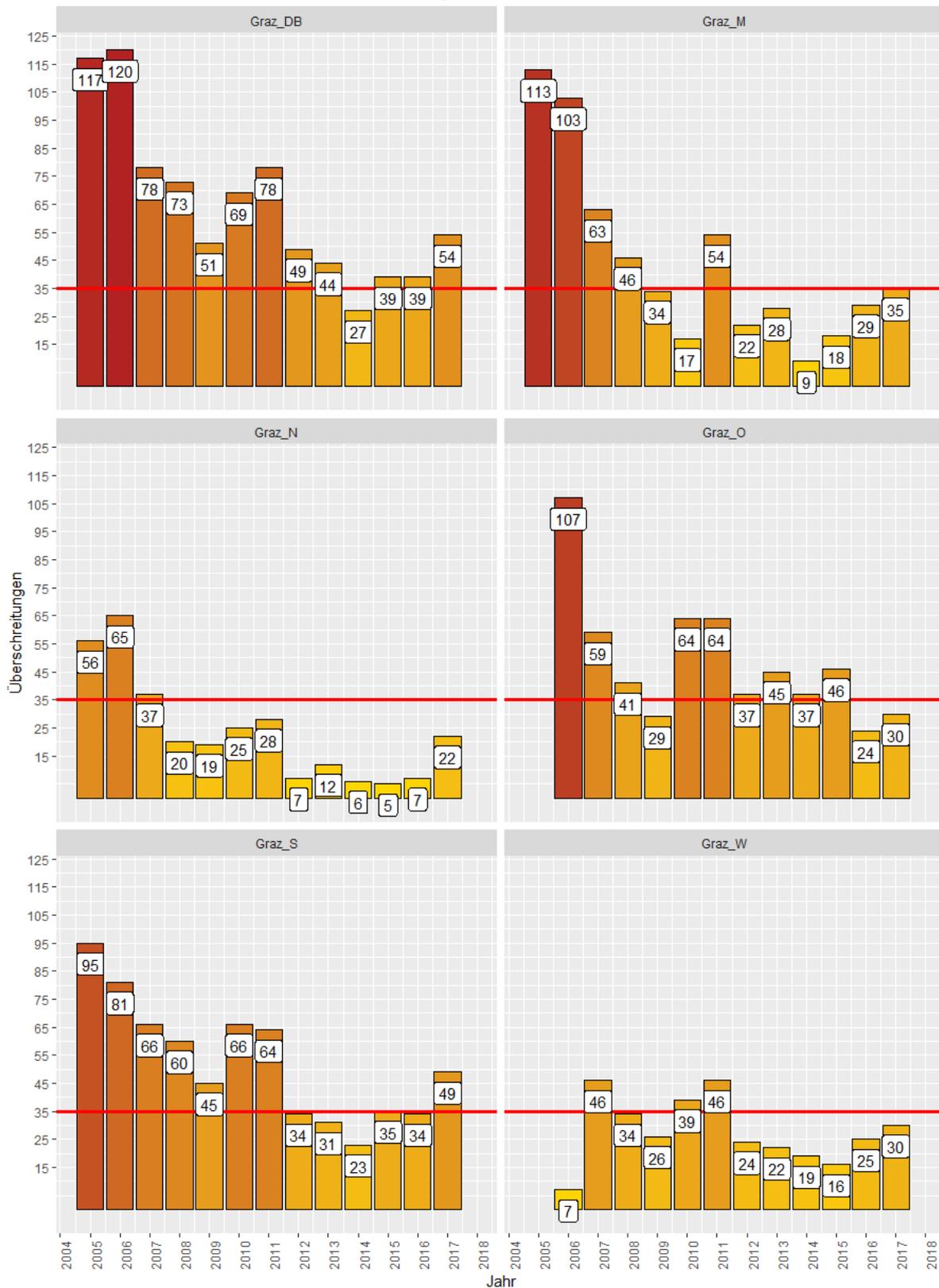


Abbildung 1: Anzahl der PM<sub>10</sub>-Überschreitungstage in Graz von 2005 bis 2017. Quelle: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15.

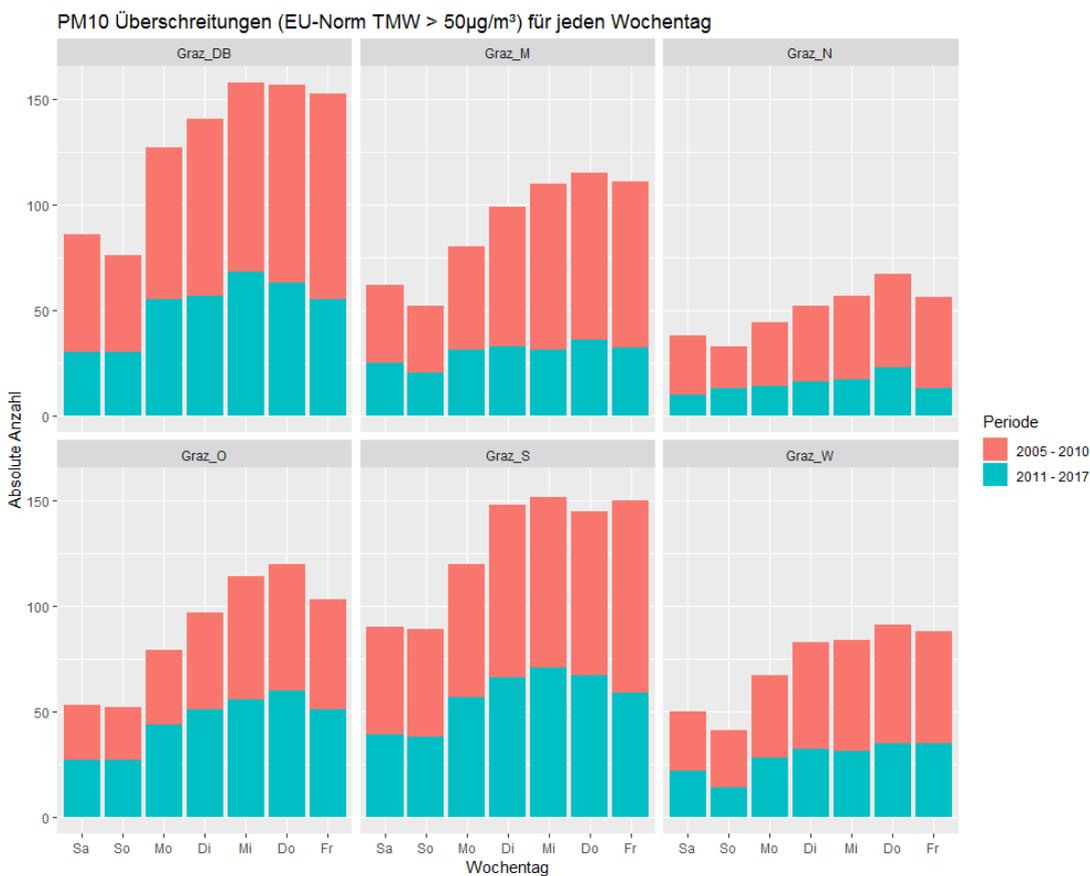


Abbildung 2: Anzahl der PM<sub>10</sub>-Tagesmittelüberschreitungen gegliedert nach Wochentag über alle Jahre (2005 – 2017)

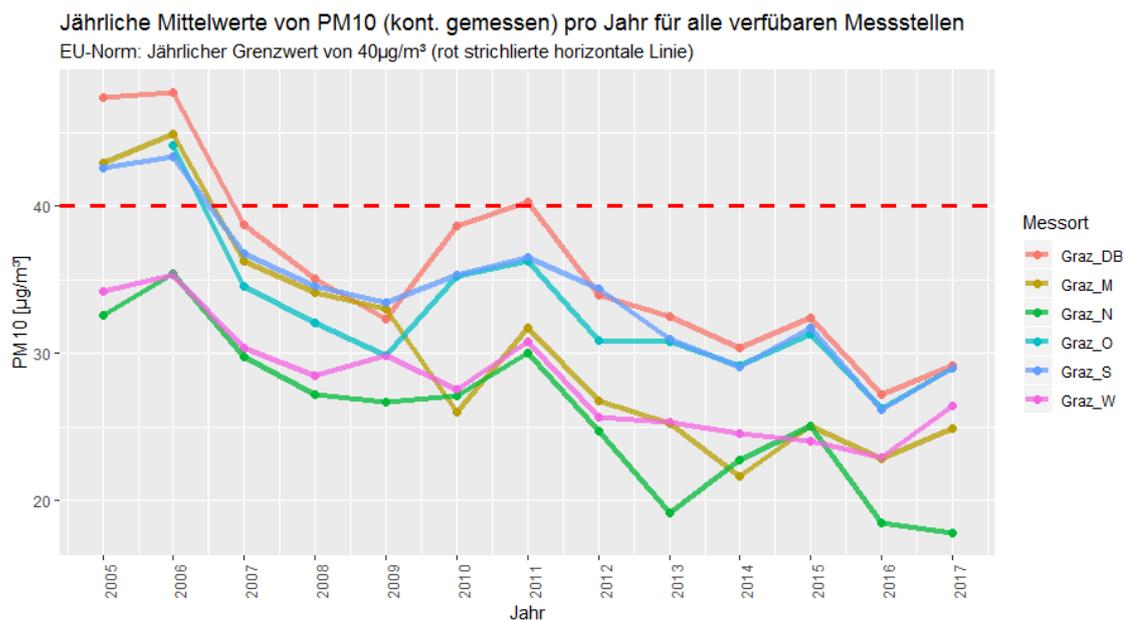


Abbildung 3: Jahresmittelwerte für PM<sub>10</sub> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017

### 1.3.2 NO<sub>2</sub>-Überschreitungen

Wie in Abschnitt 1.2 ausgeführt wird von Seiten der EU für Stickstoffdioxid ein Jahresmittelwert von 40 µg/m<sup>3</sup> als bindend vorgeschrieben und ein Stundenmittelwert von 200 µg/m<sup>3</sup>, für den nicht mehr als 18 Überschreitungen jährlich toleriert werden.

Die Abbildung 4 zeigt die Zeitreihe der NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte aller Grazer Messstationen, die wie bei PM<sub>10</sub> seit 2005 einen Trend nach unten zeigen. Der Grenzwert ist als horizontale unterbrochene rote Linie eingezeichnet. Es ist zu sehen, dass der Jahresmittelwert an der Messstelle Don Bosco in allen Jahren über diesem Grenzwert liegt. Der Jahresmittelwert der Messstelle Graz Mitte lag bis 2009 über dem Grenzwert<sup>2</sup>. Alle Zeitreihen, mit Ausnahme von Graz Mitte, zeigen bis 2009 einen deutlichen Rückgang, um danach (2010 bis 2011) wieder anzusteigen. Es folgt ein weiterer Rückgang bis 2016. Für 2017 ist bei allen Messstellen ein Anstieg zu sehen. In Prozent betrachtet ist der Rückgang von NO<sub>2</sub> in der Luft von 2005 bis 2017 weniger stark als jener von PM<sub>10</sub>: Die NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte sinken zwischen 11% (Graz West) und 21% (Graz Mitte). Don Bosco weist einen Rückgang von 15% auf, bei Graz Süd beträgt der Rückgang 17%, bei Graz Ost 12% und bei Graz Nord geht der NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert um 16% zurück.

Die Abbildung 5 zeigt die NO<sub>2</sub>-1-Stunden-Mittelwerte aller Grazer Messstationen von Anfang 2005 bis Ende 2017. Die rote strichlierte Linie stellt den Grenzwert von 200 µg/m<sup>3</sup> dar. Es ist zu sehen, dass dieser Grenzwert seit 2012 an keiner Messstation mehr überschritten wurde.

Für Österreich wurde ein Zielwert von 80 µg/m<sup>3</sup> für den NO<sub>2</sub>-Tagesmittelwert definiert, dessen Einhaltung anzustreben, jedoch gegenüber der EU nicht relevant ist<sup>3</sup>. In der Abbildung 6 sind die Anzahlen der Überschreitungstage hinsichtlich dieses Zielwertes dargestellt. Nur die Messstelle Graz Don Bosco wies in den letzten Jahren seit 2013 mehrere Überschreitungstage auf, bei Graz Süd gab es 2016 und 2017 jeweils einen Überschreitungstag.

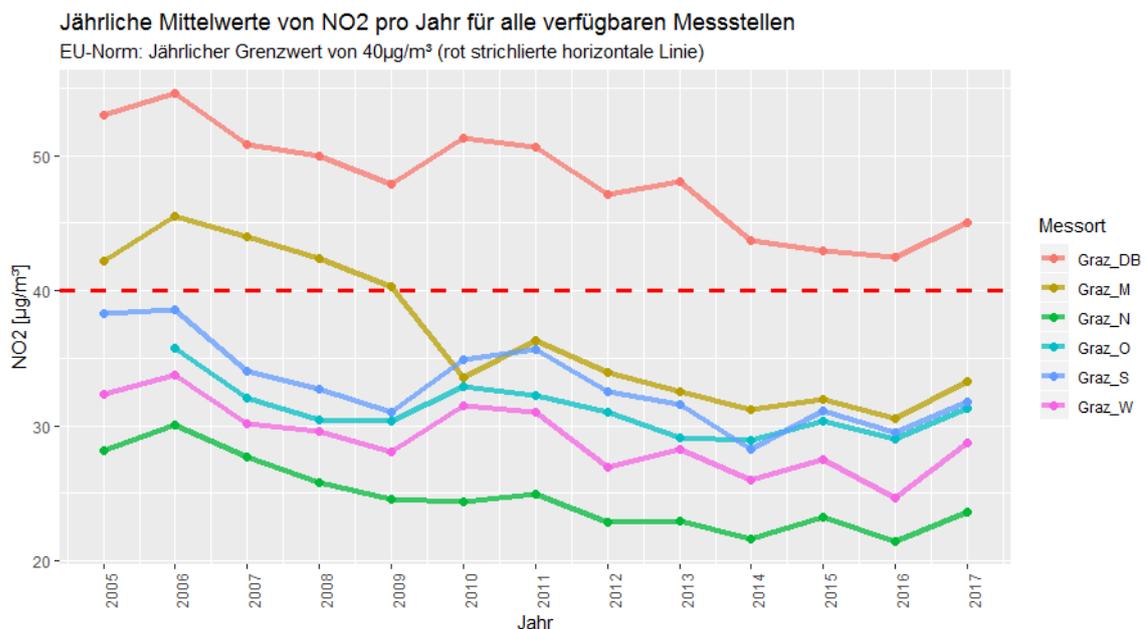


Abbildung 4: Jahresmittelwerte für NO<sub>2</sub> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017

<sup>2</sup> Messstation wurde Anfang 2010 versetzt.

<sup>3</sup> Österreich: Zielwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit, <http://www.umweltbundesamt.at/grenzwerte/>, abgerufen am 14.12.2018

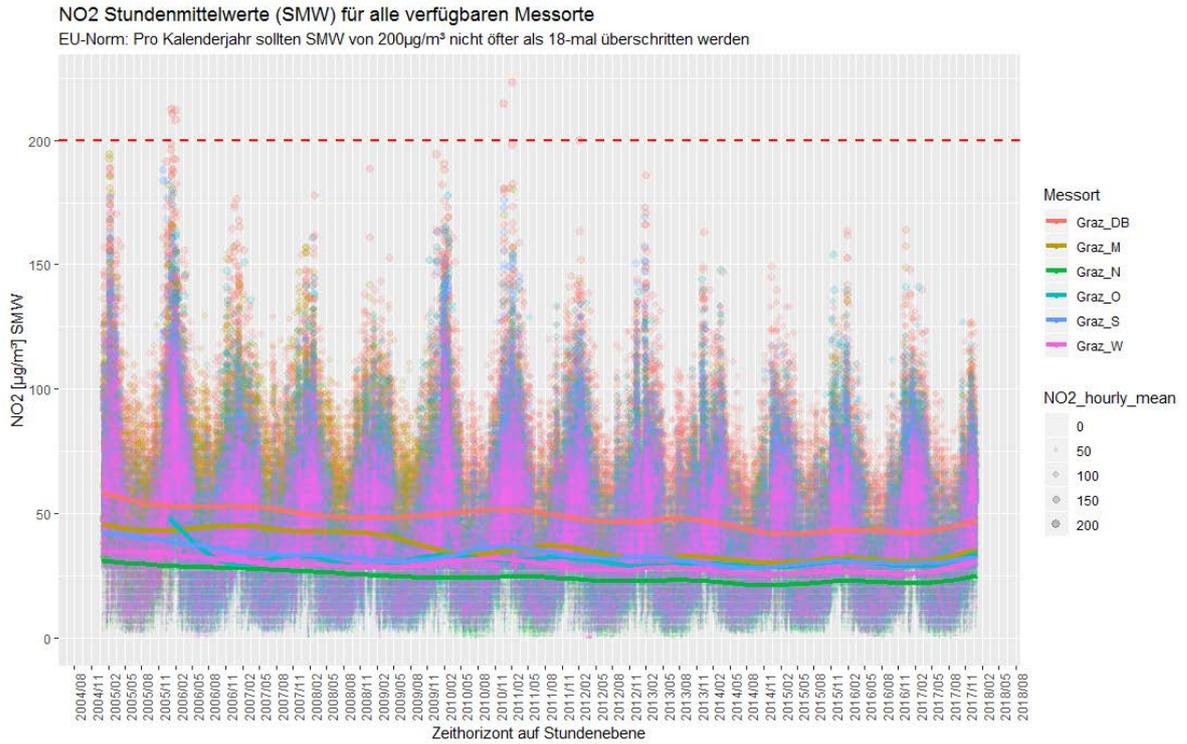


Abbildung 5: Stundenmittelwerte für NO<sub>2</sub> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017

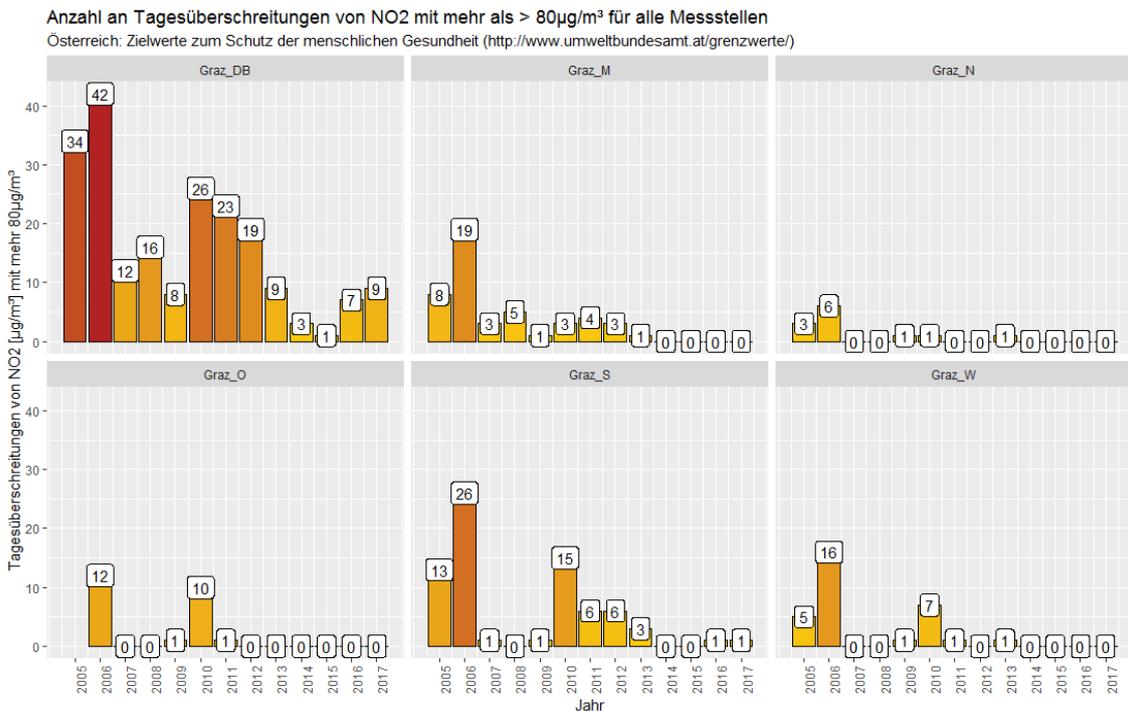


Abbildung 6: Anzahl von NO<sub>2</sub>-Überschreitungstagen für Zielwert 80 µg/m<sup>3</sup> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017

Die Abbildung 7 zeigt die Summen der NO<sub>2</sub>-Überschreitungstage hinsichtlich des Zielwertes von 80 µg/m<sup>3</sup> pro Messstation und Wochentag, wobei die Anteile der Perioden von 2005 bis 2010 und

2011 bis 2017 unterschiedlich eingefärbt sind<sup>4</sup>. An allen Messstationen ist die Zahl der Überschreitungstage an Sonntagen am geringsten, gefolgt von Samstagen. Die meisten Überschreitungstage treten mittwochs oder donnerstags auf, bei Graz Süd an Freitagen. Die Abbildung zeigt einen drastischen Unterschied zwischen Werktagen und Wochenenden, wobei sonntags praktische keine Überschreitungstage des Zielwertes vorkommen.



Abbildung 7: Anzahl an NO<sub>2</sub>-Tagesmittelüberschreitungen von mehr als 80 µg/m<sup>3</sup> gegliedert nach Wochentag über alle Jahre (2005 – 2017)

<sup>4</sup> Für NO<sub>2</sub> gibt es nur eine Messmethode, die Ergebnisse der Analysen im Rahmen dieser Studie stimmen mit exakt mit jenen aus den Luftgüte-Jahresberichten des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung überein.

## 2 Datengrundlage

Vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15, Referat Luftreinhaltung, wurden Daten der Grazer Luftgütemessstellen und meteorologischen Messstationen von Oktober 2004 bis März 2018 zur Verfügung gestellt. Bei den Daten handelt es sich um qualitätsgesicherte Halbstundenmittelwerte (HMW). Insgesamt liegen für alle sechs Messstellen und über die gesamte Zeitreihe hinweg ca. 1,4 Millionen Datenpunkte vor. Die Analysen wurden in erster Linie für Halbstundenmittelwerte durchgeführt. Um Untersuchungen und Modellbildungen in Bezug auf Überschreitungstage durchzuführen, war es notwendig die gesamte Datenbasis (48 HMW pro Tag) auf Tagesebene zu aggregieren.

### 2.1 LUFTGÜTEMESSTELLEN IN GRAZ

Im gesamten Grazer Stadtgebiet werden vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung sechs Luftgütemessstellen betrieben (siehe Abbildung 8 für Fotos der Stationen und Umgebung):

- **Graz Nord mit der Bezeichnung *Graz\_N*:** Liegt auf einer Grünfläche (Sportplatz) in gering verbautem Gebiet im Norden von Graz, in ca. 200 Meter Entfernung von der Mur. In der Nähe befinden sich mehrere Wohnanlagen und eine Heimgartensiedlung sowie Industrie und Gewerbe. Die nächste Hauptverkehrsroute (Wiener Straße) ist ca. 500 Meter entfernt.
- **Graz West mit der Bezeichnung *Graz\_W*:** Befindet sich in einem kleinen Garten an einer Nebenstraße, im Westen von Graz, die Umgebung ist stärker verbaut, mit vielen Supermärkten, und auch Industrie (Stahl- und Walzwerk Marienhütte ist ca. 1200 Meter entfernt).
- **Graz Mitte mit der Bezeichnung *Graz\_M*:** Liegt auf einem Platz in der Stadtmitte, in ca. 50 Meter Entfernung zur nächsten stärker befahrenen Straße, neben einem Hallenbad, ca. 200 Meter Entfernung zur Mur. Die Umgebung ist stark verbaut, in der Nähe befinden sich einige Schulen und viel Gastronomie.
- **Graz Ost mit der Bezeichnung *Graz\_O*:** Liegt direkt an einer stärker befahrenen Straße, in unmittelbarer Nähe des Schulzentrums St. Peter und des Campus Infeld der Technischen Universität Graz, es herrscht starker Pendlerverkehr. Die Verbauung ist weniger dicht als bei Graz Mitte und Graz West und besteht aus kleineren Wohnblöcken und auch Einfamilienhäusern.
- **Graz Don Bosco mit der Bezeichnung *Graz\_DB*:** Liegt direkt an einer sehr stark befahrenen Kreuzung, an der es relativ viel Durchzugsverkehr gibt. Das Stahl- und Walzwerk Marienhütte befindet sich in ca. 700 Meter Entfernung. Die Bebauung ist aufgelockert, kleinere Wohnanlagen, Einfamilienhäuser, Autohandel und eine Remise der Grazer Verkehrsbetriebe prägen die Umgebung.
- **Graz Süd mit der Bezeichnung *Graz\_S*:** Liegt an der Kreuzung Hergottwiesgasse / Tiergartenweg, die nächste Hauptverkehrsroute ist die Triesterstraße in ca. 260 Meter Entfernung. Die Marienhütte ist ca. 2,5 Kilometer entfernt. Weitere Industriebetriebe wie eine große Müllsammel- und verwertungsstelle, ein Fernheizwerk und eine große Bauunternehmung befinden sich im Umkreis von 800 Metern. Die Messstation liegt in einer größeren Siedlung von Einfamilienhäusern aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts.

Die geographische Lage innerhalb des Stadtgebiets kann aus den beiden Grafiken der folgenden Abbildung 9 abgelesen werden, wobei hier die aktuellen Standorte dargestellt sind. Genaue Adressen bzw. exakte Standortkoordinaten sind in der Tabelle 1 enthalten.



Abbildung 8: Fotos der Grazer Luftgütemessstellen im Stadtgebiet ©Amt der Steiermärkischen Landesregierung

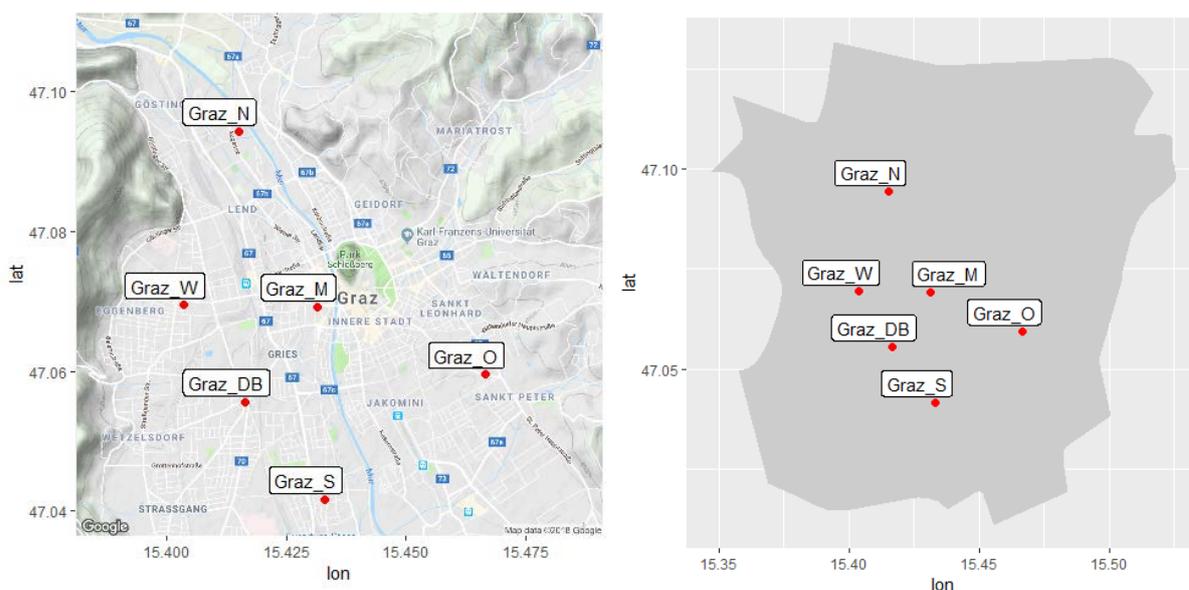


Abbildung 9: Lage der Grazer Luftgütemessstellen im Stadtgebiet

Graz		Nord	West	Süd	DB	Mitte	Ost
Adresse (aktuell)		Josef-Omig-Straße 16, PLZ 8051	Gaswerkstraße 7, PLZ 8020	Tiergartenweg 10, PLZ 8055	Kreuzung Don Bosco, PLZ 8020	Feuerbachgasse 13, PLZ 8020	Petersgasse 128, PLZ 8010
Longitude		15,415122	15,403728	15,433078	15,416539	15,431542	15,466634
Latitude		47,09437	47,069506	47,041692	47,055617	47,069231	47,059530
Höhe	[m]	355	370	340	358	350	362
NO <sub>2</sub>	[µg/m <sup>3</sup> ]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PM <sub>10K</sub>	[µg/m <sup>3</sup> ]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PM <sub>10G</sub>	[µg/m <sup>3</sup> ]			✓	✓		✓
NIED	[l/m <sup>2</sup> ]	✓					
LUTE	[°C]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LUFE	[%]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
WIRI	[grad]	✓	✓	✓			✓
WIGE	[m/s]	✓	✓	✓			✓

Tabelle 1: Luftgütemessstellen in Graz

Über die komplette Zeitreihe (ab Herbst 2007 bis Frühling 2018) hinweg gab es lokale Verschiebungen von Messstationen. Zudem ist anzumerken, dass nicht an jeder Messstation alle relevanten Parameter gemessen werden.

### 2.1.1 Anmerkungen zum Datenmaterial der Luftgütemessstationen

- Die Feinstaubmessung findet in Graz mit zwei unterschiedlichen Methoden statt. PM<sub>10</sub>K bezeichnet eine *kontinuierliche Messung* für jede Halbstunde. Dieser Parameter wird an allen sechs Stationen aufgezeichnet. Alternativ bezeichnet PM<sub>10</sub>G eine *gravimetrische Messung* und wird nur einmal täglich (Mitternacht) angegeben. Nur die drei südlichsten Stationen – Graz Don Bosco / Graz Süd / Graz Ost - messen auch gravimetrisch, wobei in Graz Ost diese Messmethode erst seit Oktober 2015 zur Anwendung kommt.
- Die Messstelle Graz Mitte wurde am 11.12.2009 in der Landhausgasse außer Betrieb und ab 18.2.2010 in Gries/Feuerbachgasse wieder in Betrieb genommen.
- Unter den Luftgüte-Stationen wird der Parameter für die Niederschlagsmenge NIED lediglich an der Station Graz Nord gemessen. Diese Messung wird für die Datenanalyse auch für die anderen Stationen verwendet. Leider liegen vom 25. November 2010 bis 31. August 2011 keine Niederschlagsmessungen vor. Dadurch entfällt für die Zusammenhangsanalysen zwischen Luftschadstoffen und Niederschlag die komplette Wintersaison von 2010/2011.
- **Wind:** In Graz Mitte werden weder Windgeschwindigkeit (WIGE) noch Windrichtung (WIRI) gemessen. Als Ersatz dienen die Windparameter von der meteorologischen Messstation Graz Oeversee. In Graz Don Bosco werden keine Windparameter gemessen. Die Messungen von Graz Süd dienen als Ersatz.
- Mit LUTE bzw. LUFÉ werden die Lufttemperatur bzw. Luftfeuchtigkeit abgekürzt.
- Für die beiden Luftschadstoffe PM<sub>10</sub> sowie für NO<sub>2</sub> kommt es gelegentlich – sofern nicht durch örtliche Verschiebungen der Messstelle – zu Messausfällen. Die Anteile an Ausfällen pro Messstelle und pro Jahr können Tabelle 2 und Tabelle 3 entnommen werden. Insgesamt sind die Messreihen sehr dicht und beinhalten wenige Ausfälle.

Messort	Graz DB	Graz M	Graz N	Graz O	Graz S	Graz W
2004	1%	0%	0%	Noch nicht in Betrieb	0%	1%
2005	1%	0%	1%		10%	4%
2006	2%	1%	1%	0%	4%	0%
2007	0%	0%	1%	0%	0%	0%
2008	1%	2%	5%	1%	0%	0%
2009	0%	6%	1%	1%	0%	6%
2010	5%	17%	1%	4%	0%	2%
2011	9%	2%	1%	0%	0%	4%
2012	0%	1%	4%	1%	0%	1%
2013	0%	0%	10%	1%	0%	0%
2014	1%	1%	0%	1%	0%	2%
2015	0%	0%	1%	0%	0%	0%
2016	1%	1%	2%	2%	6%	4%
2017	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2018	0%	0%	0%	1%	0%	0%

Tabelle 2: Jährlicher Prozentsatz an Fehlwerten (missing values) für PM<sub>10</sub>K pro Messstelle in Graz

Messort	Graz DB	Graz M	Graz N	Graz O	Graz S	Graz W
2004	3%	3%	2%		5%	3%
2005	3%	9%	2%		5%	2%
2006	2%	3%	4%	2%	5%	2%
2007	9%	2%	2%	2%	3%	2%
2008	7%	3%	7%	4%	3%	2%
2009	2%	11%	2%	2%	2%	3%
2010	3%	25%	2%	6%	2%	2%
2011	2%	2%	2%	2%	3%	3%
2012	2%	2%	2%	2%	2%	4%
2013	2%	4%	2%	2%	3%	2%
2014	3%	2%	2%	3%	2%	3%
2015	2%	2%	2%	2%	2%	4%
2016	2%	2%	3%	2%	2%	2%
2017	2%	2%	2%	2%	3%	5%
2018	2%	3%	2%	2%	2%	2%

Tabelle 3: Jährlicher Prozentsatz an Fehlwerten (missing values) für NO<sub>2</sub> pro Messstelle in Graz

- Die Zeitreihen der Luftgütemessstationen gelten, durch das Land Steiermark, Referat Luftreinhaltung, als validiert.

## 2.2 METEOROLOGISCHE MESSSTATIONEN

Das für dieses Projekt relevante Datenmaterial meteorologischer Messstationen und Parameter ist in Tabelle 4 zu finden.

Messort		Kalkleiten	Kärntner- straße	Plabutsch	Oeversee	Schloss- berg	Judendorf
Adresse (aktuell)		Kalkleiten- straße 25 8046 Stattegg	Kärntner- straße 212, PLZ 8053	Fürstenstand- weg 20, PLZ 8052	Oeversee- park	Schloß- berg 6a PLZ 8010	Ringsiedlung 90 PLZ 8111
Höhe	[m]	710	410	754	348	450	375
NIED	[l/m <sup>2</sup> ]						✓
LUTE	[°C]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LUFE	[%]	✓		✓	✓	✓	✓
WIRI	[grad]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
WIGE	[m/s]	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 4: Relevante meteorologische Messstellen

## 2.2.1 Anmerkungen zum Datenmaterial der meteorologischen Messstationen

- Die Meteo-Messstation Kalkleiten nimmt eine besondere Rolle zur Beschreibung von Inversionswetterlagen ein (siehe Abschnitt 2.4 Datenaufbereitung).
- Oeversee dient als Ersatzstation der Windparameter für die Luftgütemessstelle Graz Mitte, da dort keine Windmessungen vorgenommen werden.
- Die weiteren Stationen Kärntnerstraße, Plabutsch, Schlossberg und Judendorf wurden für Vergleiche von Windgeschwindigkeiten herangezogen.

## 2.3 WINTERDIENST

Im Zuge der Systemanalyse in diesem Projekt stellte sich heraus, dass der Winterdienst durch Streuung der Straße mit Splitt und Salz als mögliche Ursache für Feinstaub  $PM_{10}$  eine Rolle spielen könnte<sup>5</sup>. Aus diesem Grund wurde bei der  *Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH* um Streudaten mit größtmöglicher zeitlicher und örtlicher Auflösung angefragt. Es wurden monatlich kumulierte Gesamtstreuungen von Splitt, Salz und Sole zur Verfügung gestellt. Für einen Teil des Straßennetzes in Graz (alle Landesstraßen außerhalb des 3. Ringes, jedoch keine Nebenstraßen) wird der Winterdienst vom Land Steiermark durchgeführt. Streudaten des Landes Steiermark innerhalb des Grazer Stadtgebiets standen für dieses Projekt nicht zur Verfügung.

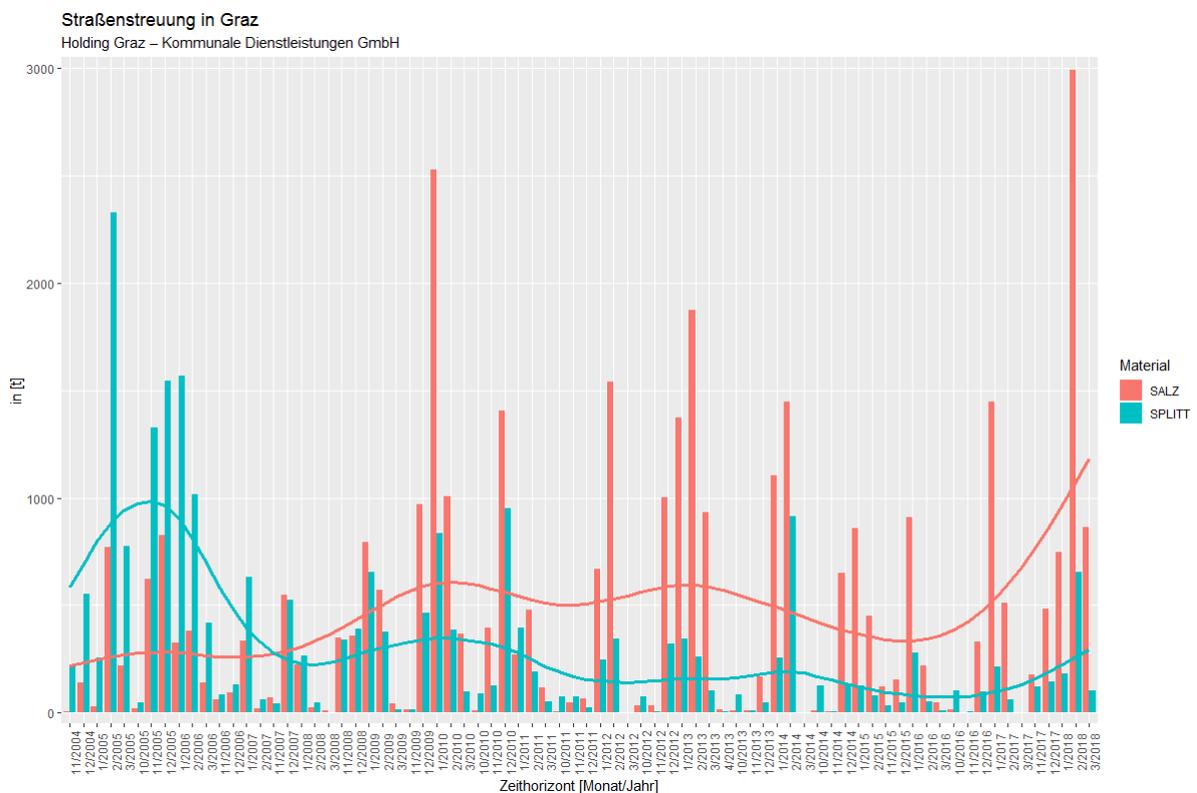


Abbildung 10: Barplot der Gesamt Mengen [in Tonnen] für Splitt und Salz pro Monat und Jahr

<sup>5</sup> Aussagen über mögliche Effekte des Winterdienstes auf die Feinstaubbelastung sind in Abschnitt 6.1.4 zu finden.

Die Abbildung 10 zeigt monatlichen Gesamtmengen der Splitt- und Salzstreuung in Graz seit November 2004. In der Grafik ist zu sehen, dass sich die Mengenverhältnisse von Splitt zu Salz deutlich geändert haben. Seit dem Winter 2005/2006 ist die Splittstreuung deutlich gesunken, während die Menge der Salzstreuung angestiegen ist. Die Mengenverhältnisse Salz zu Splitt bzw. Splitt zu Salz sind in der Abbildung 11 gegliedert nach Monat als Zeitreihe über die Jahre 2004 bis 2017 dargestellt. Zu Beginn der Zeitreihe wurde in den Monaten Dezember, Februar und März etwa 3 Mal so viel Splitt wie Salz gestreut, im Jahr 2017 lag das Verhältnis bei ca. fünf Teilen Salz zu einem Teil Splitt. Im Monat Jänner wurde in den Jahren 2005 und 2006 ca. acht bzw. fünf Mal so viel Split wie Salz gestreut.

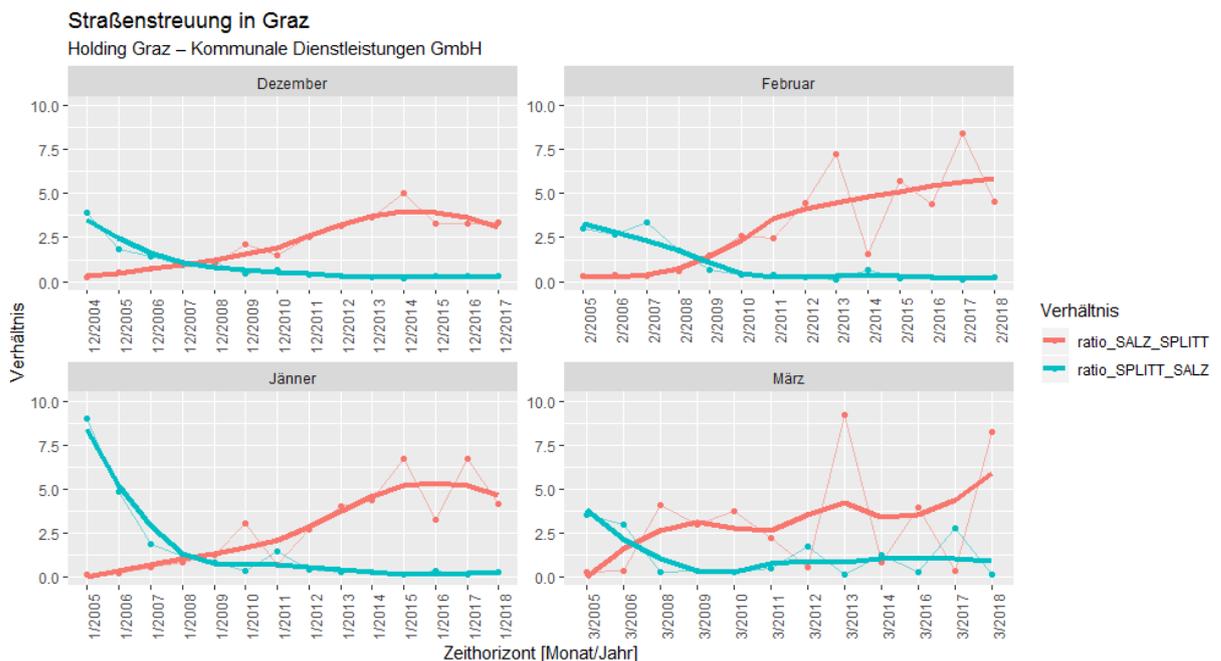


Abbildung 11: Mengenverhältnisse Splitt zu Salz und Salz zu Splitt für jeden Monat über die Jahre 2005 bis 2017

## 2.4 DATENAUFBEREITUNG

Im Rahmen der Datenaufbereitung wurden die Daten aller Messstationen in die Statistik Software R eingelesen und zusammengespielt, sowie die meteorologischen Daten zu jeder Luftgüte-Messstation zugeordnet.

Eine wesentliche Aufgabe war die Berechnung von Merkmalen, die Inversionswetterlagen charakterisieren.

Ein weiterer Punkt war die Aggregation sämtlicher Daten auf Tagesebene für die statistischen Analysen, die auf Tagesebene vorgenommen wurde.

### 2.4.1 Phänomen Inversionswetterlage

Der vertikale Temperaturgradient besagt vereinfachend, wie sehr die Lufttemperatur mit variierender Höhe zu- bzw. abnimmt. Jedoch geht eine zunehmende Meereshöhe nicht immer zwingend mit kühleren Temperaturen einher. Das heißt, in örtlichen Teilbereichen kann sich eine

Umkehr des Temperaturgradienten ergeben und somit herrschen in Höhenlagen wärmere Temperaturen als am Boden. Diese Temperaturumkehr nennt sich Inversionswetterlage und bewirkt, dass die bodennahe Luft am Aufsteigen gehindert wird, da sie schwerer ist, als die wärmere Luftschicht darüber. Um diese Wetterphänomene, von denen ein nachteiliger Effekt auf die Luftgüte ausgeht, identifizieren zu können, wird die Temperaturdifferenz aus Tal- und Höhenlagen berechnet. Im Falle von negativen Differenzen ist die Lufttemperatur im Tal kühler als in der Höhe. In diesem Projekt wurde für die Detektion von Inversionen die Temperatur von Graz *Kalkleiten* in 710 m Höhe herangezogen. Ist der Temperaturunterschied zwischen einer Grazer Luftgütemessstelle und Graz Kalkleiten negativ, dann liegt nach Definition im vorliegenden Projekt eine Inversionswetterlage vor. Da sich die Lufttemperatur an den Grazer Messstationen unterscheiden, muss nicht an allen Stationen gleichzeitig eine Inversion vorliegen. Bei der Station Graz Mitte beispielsweise ist die Lufttemperatur etwas höher als an den anderen Stationen, sodass an dieser Messstelle deutlich weniger Inversionstage zu verzeichnen sind.

#### **2.4.2 Aggregation der Daten auf Tagesebene**

Für die Berechnung von Überschreitungstagen von Feinstaub  $PM_{10}$  ist die Aggregation der halbstündlichen Datenbasis notwendig. In weiterer Folge und in Bezug auf die Ursachenanalyse für Überschreitungstage wurden von verschiedenen numerischen Variablen Statistiken auf Tagesebene sowie Faktorvariablen benötigt. Hierfür wurden statistische Maße/Kennzahlen wie arithmetische Mittelwerte, Mediane, Maxima oder Summen für Parameter wie Temperatur, Temperaturdifferenz, Niederschlagsmenge, Luftfeuchtigkeit oder Windgeschwindigkeit sowie Kategorisierungen (Faktoren) für  $PM_{10}$ -Überschreitungen (ja/nein), Inversionswetterlagen (ja/nein), Wochentage (Mo-So) etc. auf Tagesebene gebildet.

#### **2.4.3 Definition von Jahreszeiten**

Bei etlichen Analysen der Daten wurde eine separate Betrachtung der Jahreszeiten vorgenommen bzw. ausschließlich die Wintermonate betrachtet. Für diese Studie wurde die meteorologische Definition der Jahreszeiten verwendet, da sie im Zusammenhang mit Luftgütedaten sinnvoller erscheint, als die astronomische:

- Winter: 1. Dezember bis 29. Februar
- Frühling: 1. März bis 30. Mai
- Sommer: 1. Juni bis 31. August
- Herbst: 1. September bis 30. November

## 3 Methodik

Kurze Beschreibung der verwendeten statistischen Methoden, soweit es für das Verständnis der nachfolgenden Ergebnisse erforderlich ist.

### 3.1 DESKRIPTIVE UND EXPLORATIVE METHODEN

Die deskriptive und explorative Analyse der Daten erfolgte in erster Linie mittels Zeitreihendarstellungen, wobei meist alle Beobachtungen als Punkte eingezeichnet wurden, mit geschätzten Trendkurven über die Zeit.

Eine weitere wesentliche Darstellungsform von Daten bzw. interessierenden Variablen (wie z.B. Lufttemperatur oder Windgeschwindigkeit), die dabei gleichzeitig zu statistischen Kennzahlen verdichtet werden, ist der Boxplot, der im Rahmen dieses Projekts vorwiegend zur Veranschaulichung zeitlicher Veränderungen und Gruppenunterschieden herangezogen wurde. Die Abbildung 12 zeigt eine exemplarische Darstellung eines Boxplots mit horizontaler Ausrichtung der Box und den Kennzahlen, die sich daraus ablesen lassen. Die Länge (bzw. Höhe der Box bei vertikaler Darstellung<sup>6</sup>) umfasst den Bereich in dem 50% der dargestellten Datenpunkte liegen und entspricht dem Interquartilsabstand (IQR, ein Maß für die Streubreite von Daten). Die untere Grenze der Box entspricht dem 1. Quartil, unter dem 25% der Datenpunkte liegen. Die obere Grenze der Box bezeichnet das 3. Quartil, darüber liegen die größten 25% der Datenpunkte. Die Linie in der Mitte der Box ist der Median (50% aller Datenpunkte kleiner und 50% größer). Die von den Boxen ausgehenden Linien verlaufen bis zu jenen Datenpunkten, die höchstens das 1,5-fache des IQR von den Boxgrenzen entfernt sind. Datenpunkte, die außerhalb der Bereiche (untere Boxgrenze -  $1,5 \cdot \text{IQR}$ ) bzw. (obere Boxgrenze +  $1,5 \cdot \text{IQR}$ ) liegen, werden als Ausreißer eingezeichnet.

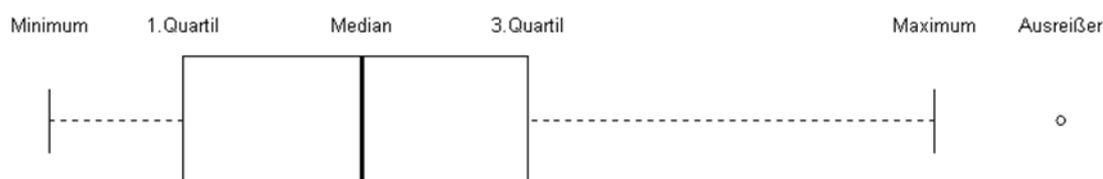


Abbildung 12: Exemplarischer Boxplot

### 3.2 ZUSAMMENHANGSANALYSEN UND STATISTISCHE MODELLIERUNG

#### 3.2.1 Korrelation

Bei der Zusammenhangsanalyse wurden Korrelationskoeffizienten berechnet, die das Ausmaß des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen beschreiben. Der Korrelationskoeffizient liegt zwischen -1 und +1. Ein stark negativer Wert nahe -1 bedeutet einen sehr hohen indirekten Zusammenhang, d.h. der Anstieg des einen Merkmals geht mit einem Rückgang des zweiten Merkmals einher. Ein Wert nahe 0 weist darauf hin, dass kein Zusammenhang zwischen den

beiden Merkmalen besteht. Hohe positive Werte deuten auf einen starken direkten Zusammenhang hin.

Mittels Scatterplots bzw. Scatterplot-Matrizen können Zusammenhänge zwischen zwei oder mehreren Merkmalen veranschaulicht werden. Je näher und besser die Punktwolke um die Diagonale der Zeichenfläche angeordnet ist, desto stärker ist der Zusammenhang. Anordnungen um die Diagonale von links unten nach rechts oben weisen auf eine positive Korrelation hin, während Anordnungen von links oben nach rechts unten eine negative Korrelation bedeuten.

### 3.2.2 Statistische Modellierung

Für die Modellierung der Wahrscheinlichkeit für einen  $PM_{10}$ -Überschreitungstag in Abhängigkeit von den erklärenden Größen wird ein logistisches Modell verwendet, das eine spezielle Form eines Generalisierten Linearen Modells (GLM) darstellt (siehe z.B. McCullagh and Nelder, 1989, oder Fahrmeier, Kneib und Lang, 2009). Das logistische Regressionsmodell zielt darauf ab, mithilfe der logistischen Verteilungsfunktion den Effekt der erklärenden Variablen  $X_{i1}, \dots, X_{ik}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) auf die Wahrscheinlichkeit für  $Y_i = 0$  bzw.  $Y_i = 1$  zu bestimmen, wobei  $Y$  die Zielgröße oder Response Variable darstellt. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit für  $Y = 1$  nicht direkt aus den erklärenden Variablen modelliert (wie bei der linearen Regression), sondern indirekt über das sogenannte Logit. Das Logit ist die logarithmierte Chance für das Auftreten von  $Y = 1$ .

Die Chance

$$\pi_i / (1 - \pi_i) = P(Y_i=1) / P(Y_i=0)$$

wird auch als Odds bezeichnet.

Der **Unterschied zwischen einer Chance und einer Wahrscheinlichkeit** liegt darin, dass bei der Wahrscheinlichkeit die Anzahl der günstigen Fälle durch die Anzahl der möglichen Fälle dividiert wird. D.h. im Falle von Überschreitungstagen wird die Anzahl der Überschreitungstage durch die Gesamtanzahl von Tagen dividiert.

Die Chance eines Überschreitungstages hingegen ist das Verhältnis der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Überschreitungstages zur Gegenwahrscheinlichkeit (kein Überschreitungstag).

Nähere Ausführungen zur angewandten Methodik und der Interpretation von Chancen in Zusammenhang mit dieser Studie sind in Abschnitt 6.1.4 zu finden.

---

<sup>6</sup> Üblicherweise werden die Boxen vertikal dargestellt, wie es auch im vorliegenden Bericht in weiterer Folge der Fall ist.

## 4 Analyse der Rahmenbedingungen

In den folgenden Abschnitten werden wesentliche Rahmenbedingungen in Graz und deren Veränderungen in den letzten Jahren in unterschiedlichem Detaillierungsgrad dargestellt. Je nach Verfügbarkeit entsprechender Daten erfolgt die Darstellung anhand von Zeitreihen oder Vergleichen von punktuellen Ergebnissen bestimmter Jahre bzw. Zeitperioden.

### 4.1 BEVÖLKERUNGSENTWICKLUNG

Bevölkerungsentwicklung in Graz weist von 2002 bis 2018 einen deutlichen und kontinuierlichen Anstieg auf. In der Abbildung 13 sind die jährlichen Einwohnerzahlen der Stadt Graz und der NUTS-3-Region Graz, welche die Bezirke Graz und Graz-Umgebung umfasst, dargestellt. Die Einwohnerzahl der Stadt Graz stieg zwischen 1.1.2005 und 1.1.2018 um 18,7% während die Einwohnerzahl der NUTS-3-Region um 16,3% zunahm.

Im nahezu selben Ausmaß stieg auch die Bevölkerungsdichte von 2297 Einwohnern je km<sup>2</sup> Dauersiedlungsraum im Jahr 2005 auf 2702 Personen je km<sup>2</sup> im Jahr 2017. Das entspricht einer Steigerung von 17,6%.

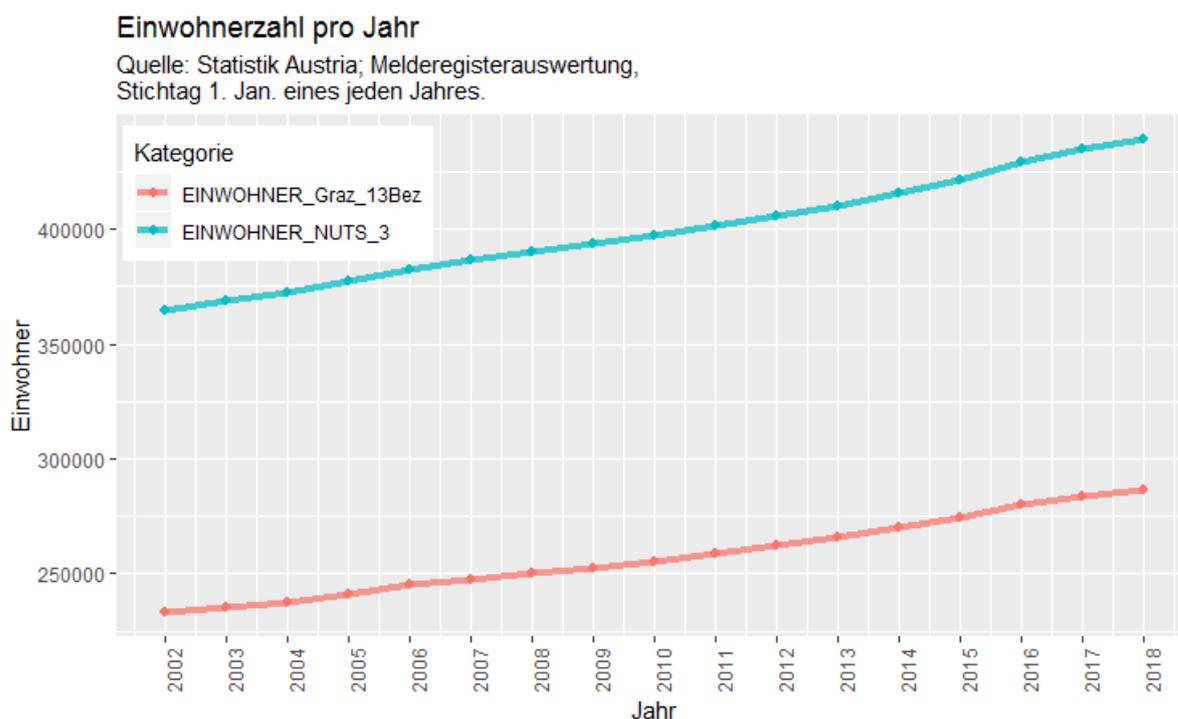


Abbildung 13: Bevölkerungsentwicklung für Graz und NUTS-3-Region Graz

### 4.2 WIRTSCHAFTLICHE ENTWICKLUNG UND AKTIVITÄT

Als Indikatoren für die wirtschaftliche Entwicklung der Region Graz und die Aktivität in der Stadt Graz wurden das Bruttoregionalprodukt, die Anzahl der Aktivbeschäftigten, die Anzahl der Arbeitgeberbetriebe, das Bruttomedianeinkommen sowie die Anzahl der Nächtigungen in Beherbergungsbetrieben betrachtet. Als Datenquelle diente das Wirtschaftspolitische Berichts- und

Informationssystem (WIBIS) Steiermark<sup>7</sup>, das im Auftrag des Landes Steiermark, der Arbeiterkammer Steiermark, des Arbeitsmarktservice Steiermark, der Industriellenvereinigung Steiermark, der Stadt Graz und der Wirtschaftskammer Steiermark von JOANNEUM RESEARCH POLICIES erstellt wurde und betrieben wird.

Das Bruttoregionalprodukt für die NUTS-3-Region Graz stieg von 2005 auf 2016 um 38,7% von 14574 Mio. Euro auf 20217 Mio. Euro. Je Einwohner stieg das Bruttoregionalprodukt von 38400 Euro im Jahr 2005 auf 46800 Euro im Jahr 2016, das entspricht einer Steigerung von knapp 22%.

Die Anzahl der in der Stadt Graz unselbstständig beschäftigten Personen<sup>8</sup> steht als Zeitreihe von Jahresdurchschnittswerten seit 2006 zur Verfügung. Im Zeitraum 2006 bis 2017 stieg die Beschäftigtenzahl in Graz um 15,8% während die Zahl der in Graz ansässigen Arbeitgeberbetriebe um 5,8% sank. Das Bruttomedianeinkommen stieg von 2100 Euro im Jahr 2006 auf 2548 Euro im Jahr 2017, das entspricht einer Steigerung um 21,3%.

Als weiterer Indikator für die wirtschaftliche Entwicklung, der gleichzeitig als Indikator für Aktivität in der Stadt Graz betrachtet werden kann, dient die Anzahl der Nächtigungen in Beherbergungsbetrieben. Diese stieg von etwa 633000 im Jahr 2005 auf 1 Million im Jahr 2017, das entspricht einer Steigerung um 58%.

Insgesamt ist bei der wirtschaftlichen Entwicklung und Aktivität ein Trend nach oben erkennbar, wobei der Tourismus den größten Anstieg aufweist.

### 4.3 VERKEHRSSITUATION

Der Straßenverkehr ist ein wesentlicher Faktor, der bei der Analyse von Daten zur Luftqualität nicht außer Acht gelassen werden darf. Wünschenswert – und aus statistischer Sicht korrekt – wäre es, zeitlich sehr fein aufgelöste Daten der in unmittelbarer Nähe der Luftgütemessstellen aufgezeichneten Verkehrsfrequenzen in die statistische Auswertemethodik zu integrieren. Da derartige Daten jedoch derzeit nicht zur Verfügung stehen, wird der Faktor Verkehr im Rahmen dieser Studie lediglich als Rahmeninformation dargestellt und eine quantitative Einschätzung der Verkehrs- und Mobilitätstrends in Graz über die letzten Jahre vorgenommen.

Für den Raum Graz und insbesondere die unmittelbare Umgebung der Luftgütemessstationen liegen nur punktuelle Daten über Verkehrsfrequenzen vor. Für die Bereiche Kämtnerstraße/Don Bosco (Don Bosco), Triesterstraße/Zentralfriedhof (Graz Süd) sowie Petersgasse/Petrifelderstraße (Graz Ost) ist der durchschnittliche tägliche Verkehr der Jahre 2006 und 2010 aus den ECE (Economic Commission for Europe) Straßenverkehrserhebungen, denen Daten aus dem Netz von Zählstellen des Landes Steiermark zugrunde liegen, verfügbar<sup>9</sup>. Das höchste Verkehrsaufkommen wurde im Bereich der Messstation Don Bosco (Zählstelle B70) beobachtet, die Zählstellen B67a (Nähe Messstation Graz Ost) und B67 (Nähe Messstation Graz Süd) weisen vergleichbar hohe Verkehrsfrequenzen auf, wobei jedoch der Schwerverkehrsanteil im Bereich B67/Karlauergürtel – Zentralfriedhof deutlich höher ist. Die Steigerungen des durchschnittlichen täglichen Verkehrs liegen im Bereich von 1,5 bis 2%. Da jedoch die Tage, an denen die Zählungen vorgenommen wurden, nicht nachvollziehbar sind, ist die Repräsentativität dieser Zahlen nicht gesichert und die Werte müssen als grobe Schätzwerte betrachtet werden.

---

<sup>7</sup> <https://wibis-steiermark.at/> , abgerufen am 13.12.2018

<sup>8</sup> Da Beschäftigungsverhältnisse gezählt werden, scheint eine Person mit zwei Beschäftigungsverhältnissen auch zweimal auf.

<sup>9</sup> Aus der ECE Erhebung 2015 sind keine detaillierten Zählergebnisse für Graz verfügbar.

Straße	Abschnitt	Kfz pro 24h		Schwerverkehrsanteil	
		2006	2010	2006	2010
<b>B70</b>	Gürtelturmplatz - Don Bosco	38500	39200	7%	8%
<b>B 67a</b>	Petersgasse - Petrifelderstraße	27800	28200	3%	4%
<b>B 67</b>	Karlauergürtel - Zentralfriedhof	29700	30200	7%	9%

Tabelle 5: Durchschnittlicher täglicher Verkehr und Schwerverkehrsanteil an ausgewählten Abschnitten in Graz, 2006 und 2010

Da für die Zählstellen nahe den Luftgütemessstationen im Rahmen dieser Studie keine Daten über Wochenverläufe von Verkehrsfrequenzen verfügbar waren, werden an dieser Stelle Wochenverläufe der ASFINAG Zählstellen<sup>10</sup> nahe Graz dargestellt. Die Abbildung 14 zeigt die Wochenverläufe des durchschnittlichen täglichen Verkehrs des Jahres 2017 für jene 5 Zählstellen, die am ehesten den Grazer Stadtverkehr abbilden. Mit Ausnahme des Abschnitts Plabutschunnel Richtung Norden sind an Freitagen die höchsten Verkehrsfrequenzen zu verzeichnen. An Samstagen und Sonntagen sind die Frequenzen am geringsten, die Wochentage Montag bis Donnerstag zeigen ein ähnliches Verkehrsaufkommen. Nimmt man den durchschnittlichen Tagesverkehr von Montag bis Donnerstag als Basis, so weisen Freitage im Mittel um 10% höhere Frequenzen auf, während an Samstagen um 27% und an Sonn- und Feiertagen um 41% weniger Kfz Verkehr beobachtet wurde.

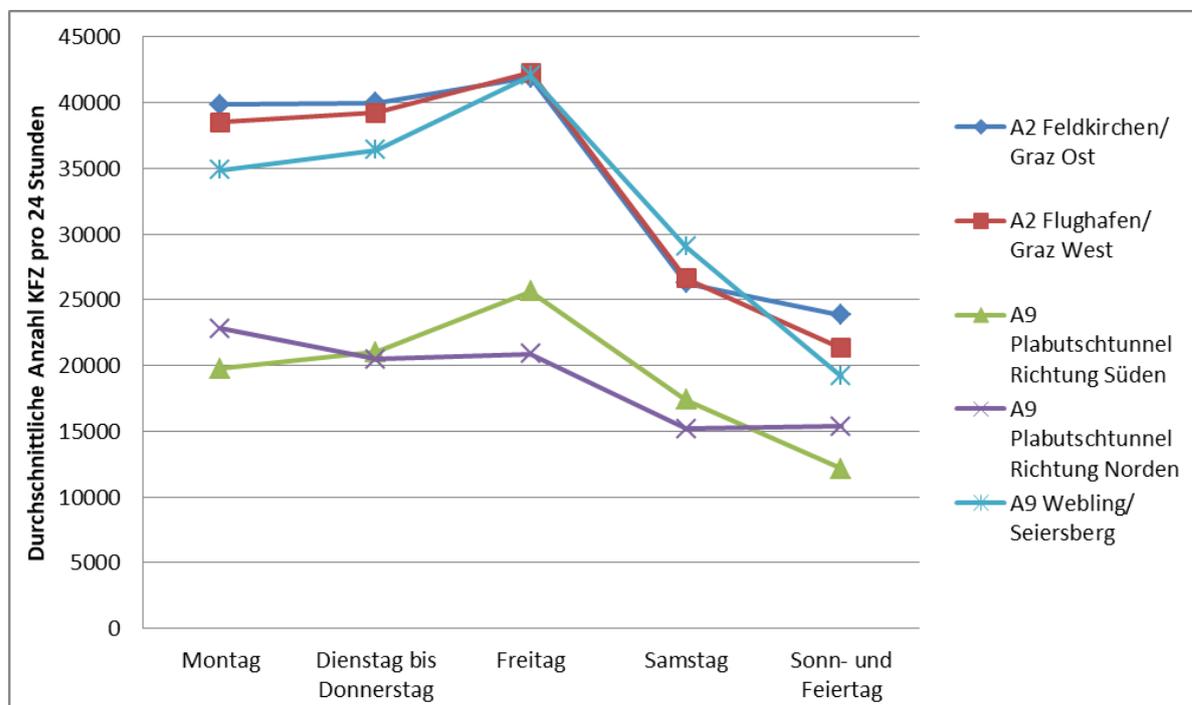


Abbildung 14: Wochenverlauf des durchschnittlichen täglichen Verkehrs für ausgewählte ASFINAG Zählstellen nahe Graz, 2017

<sup>10</sup> <https://www.asfinag.at/verkehr/verkehrszaehlung/>, abgerufen am 14.12.2018

Ein weiterer Indikator für den Anstieg der Mobilität in Graz ist die Anzahl der Pendler/-innen. In der Steiermark stieg die Anzahl der Einpendler/-innen<sup>11</sup> zwischen 2009 und 2016 um 5,9% und die Anzahl der Auspendler/-innen<sup>12</sup>, die ihren Wohnort zum Zweck der Erwerbstätigkeit verlassen, um 7,1%.

Eine Gegenüberstellung der Entwicklungen der Verkehrsstärken in Österreich und des Treibstoffverbrauchs wird in der Tabelle 6 vorgenommen. In der Tabelle 6 sind die aus der automatischen Straßenverkehrszählung errechneten durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten der Verkehrsstärke aller österreichischen Zählstellen zusammengefasst (Quelle: Schwillinsky und Weiss, 2017). Die jährliche Wachstumsrate der Verkehrsstärke seit 2005 beträgt im Mittel 1,11%. Nach Wachstumsraten von ca. 1,5% in den Jahren 2006 und 2007 kam es mit der Wirtschaftskrise 2008 und 2009 zu Rückgängen. Nachdem in den Jahren 2014 und 2015 bereits sehr hohe Wachstumsraten von 2,6% zu verzeichnen waren, zeigte das Jahr 2016 mit 2,9% einen neuen Höchstwert. Im Mittel waren die Wachstumsraten an Werktagen größer als an Sonntagen. Auch wächst die Verkehrsstärke auf Autobahnen und Schnellstraßen im Durchschnitt stärker als auf Landesstraßen B<sup>13</sup>. Der Treibstoffverbrauch<sup>14</sup> dagegen sinkt seit 2005 im Mittel jährlich um 0,44%, wobei auch hier in den Jahren 2015 und 2016 Zuwächse von jeweils 1,9% zu beobachten waren (Tabelle 6).

Jahr	Verkehrsstärken	Treibstoffverbrauch
2005 / 2006	1,50%	-2,30%
2006 / 2007	1,60%	-1,30%
2007 / 2008	-2,60%	-3,20%
2008 / 2009	-0,50%	-3,00%
2009 / 2010	1,40%	2,00%
2010 / 2011	1,60%	-2,80%
2011 / 2012	-0,10%	-0,20%
2012 / 2013	1,20%	3,90%
2013 / 2014	2,60%	-1,70%
2014 / 2015	2,60%	1,90%
2015 / 2016	2,90%	1,90%
<b>Mittlere Wachstumsraten 2005 bis 2016</b>		
2005 / 2016	<b>1,11%</b>	<b>-0,44%</b>

Tabelle 6: Jährliche Wachstumsraten von Verkehrsstärke und Treibstoffverbrauch in Österreich, 2005 bis 2016

Die Entwicklungen von Verkehrsaufkommen auf Straßen und Treibstoffverbrauch, ausgedrückt als Treibhausgasemissionen, werden auch durch EU-weit verfügbare Zahlen verdeutlicht (European Union, 2018). Die Tabelle 7 enthält jährliche Zahlen für Fracht- und Personenverkehrsaufkommen

<sup>11</sup> In der Steiermark erwerbstätige Personen, deren Wohnsitz außerhalb der Gemeinde liegt, in der sie ihre Erwerbstätigkeit verrichten.

<sup>12</sup> Personen mit Wohnort Steiermark, die ihrer Erwerbstätigkeit außerhalb des Wohnorts nachgehen, dies umfasst andere Gemeinden, Bezirke, Bundesländer oder Staaten.

<sup>13</sup> Früher Bundesstraßen B. Übergang der Kompetenz für die Bundesstraßen B vom Bund an die Länder im Jahr 2002.

<sup>14</sup> Verbrauch ist der in Österreich abgesetzte Treibstoff, laut Branchenreport Mineralöl des Fachverbands der Österreichischen Mineralölindustrie, <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/mineraloelbericht-2017.pdf>, abgerufen am 11.1.2019

auf europäischen Straßen und berechnete Treibhausgasemissionen aus dem Straßenverkehr als CO<sub>2</sub>-Äquivalent für die Jahre 2005 und 2010 bis 2016. In der Abbildung 15 sind diese Zahlen als Veränderungen gegenüber 2005 als Grafik veranschaulicht. Während der Personenverkehr auf Straßen seit 2005, nach einem Einbruch um das Jahr 2012, um mehr als 6% zugenommen hat, wird beim Güterverkehr das Niveau von 2005 erst im Jahr 2016 wieder erreicht und um 2,8% überschritten. Die Treibhausgasemissionen aus dem gesamten Straßenverkehr sinken dagegen bis 2013 kontinuierlich auf weniger als 92% des Ausgangswertes von 2005, um danach wieder knapp 97% des Wertes von 2005 zu erreichen.

Jahr	Güter auf Straße in Milliarden Tonnenkilometer	Personen auf Straße in Milliarden Personenkilometer	Treibhausgasemissionen aus Straßenverkehr in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äquivalent
2005	1755	5178	912,2
2010	1710	5289	877,9
2011	1699	5264	868,2
2012	1645	5167	842
2013	1671	5215	837,8
2014	1677	5280	847,9
2015	1714	5387	863,6
2016	1804	5507	883,2

Tabelle 7: Verkehrs-, Transportaufkommen und Treibhausgasemissionen für EU-28, 2005 bis 2016

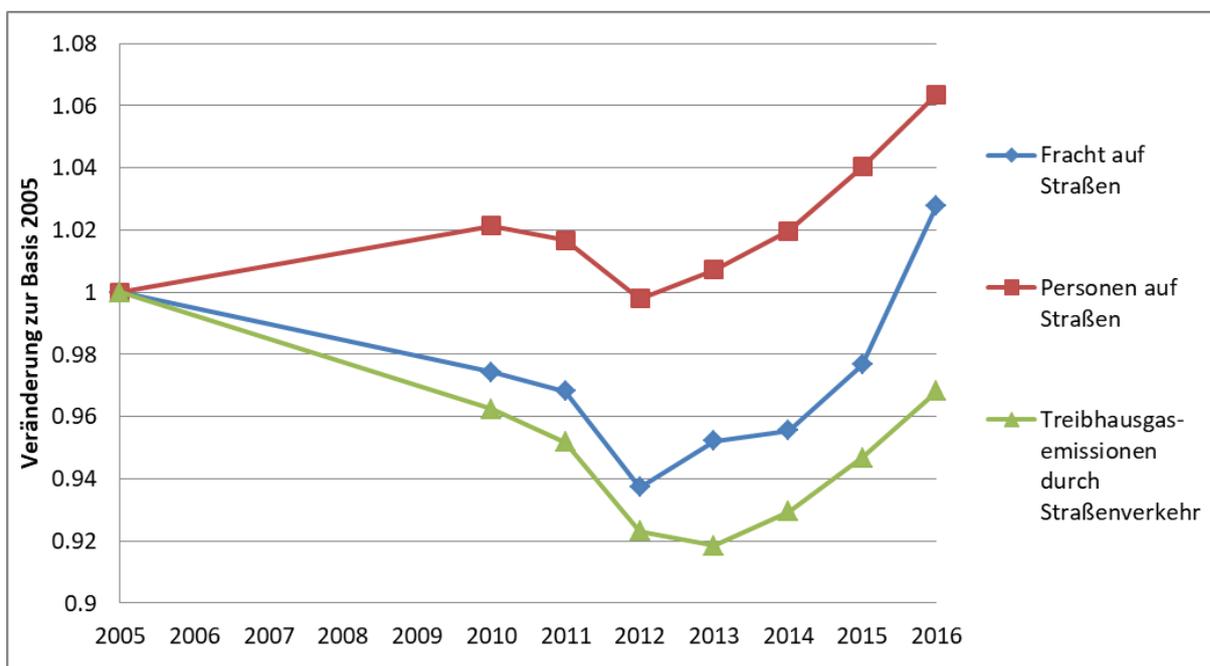


Abbildung 15: Verkehrs-, Transportaufkommen und Treibhausgasemissionen für EU-28, Veränderung gegenüber 2005

#### 4.4 FAHRZEUGBESTAND UND FLOTTENZUSAMMENSETZUNG

Da im Zeitraum, für den die Luftgütesituation in Graz im Rahmen der vorliegenden Studie analysiert wurde, auch Änderungen des Bestandes von Kraftfahrzeugen zu verzeichnen sind, werden in diesem Abschnitt relevante Daten von Kraftfahrzeug Neuzulassungen und Bestand dargestellt.

Die Entwicklung des Bestands an Kraftfahrzeugen (Kfz) insgesamt und des Bestands an Personenkraftwagen (PKW) in der Steiermark seit 2004 ist in der Abbildung 16 dargestellt (Quelle: Steirische Statistiken, Heft 4/2017). Zudem ist in der Grafik die Kraftfahrzeugdichte als Anzahl Kfz pro 1000 Einwohner als rote Kurve enthalten und auf der Sekundärachse (rechts) abzulesen. Während die Kfz Dichte pro 1000 Einwohner von 2004 bis Ende 2016 eine Steigerung um 14,8% aufweist, stieg der Kfz Bestand in der Steiermark im gleichen Zeitraum um 18,7%. Für den Bestand an PKW in der Steiermark ist von 2004 bis Ende 2016 ein Anstieg um 16% zu verzeichnen.

Die jährliche Anzahl von Kfz Neuzulassungen in der Steiermark war im Jahr 2016 mit rund 56500 Fahrzeugen nahezu identisch mit der Zahl von 2004 (56200). Die Zahl der PKW Neuzulassungen lag mit knapp 42000 im Jahr 2016 ebenfalls geringfügig unter dem Wert von 2004 (42600). Anzumerken ist dabei, dass sowohl die Kfz als auch die PKW Neuzulassungen im Jahr 2011 mit 63200 bzw. 48000 den Höchstwert in der Periode seit 2004 erreichten.

Die Abbildung 17 zeigt die Entwicklung des Anteils an Dieselfahrzeugen am PKW Bestand und an PKW Neuzulassungen in Österreich seit 2004. Beim Bestand stieg der Anteil Diesel PKW kontinuierlich von 2004 bis 2016 von 49,2% auf 57%, erst 2017 war mit einem Anteil von 56,6% ein leichter Rückgang zu verzeichnen. Der Anteil Diesel PKW an den jährlichen PKW Neuzulassungen sank von 2004 bis 2010 von 70,8% auf 50,9% und stieg bis 2015 wieder auf 58,3% an. Im Jahr 2017 gab es einen deutlichen Rückgang des Anteils Diesel-Neuzulassungen auf 49,7%.

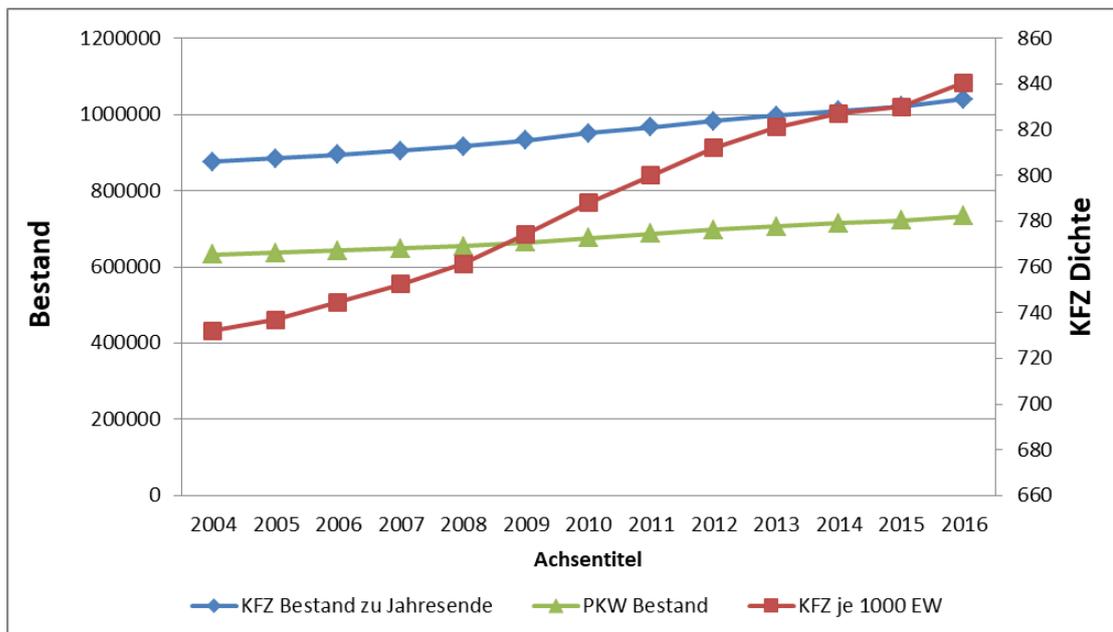


Abbildung 16: Entwicklung von Kfz bzw. PKW Bestand und Kfz Dichte in der Steiermark

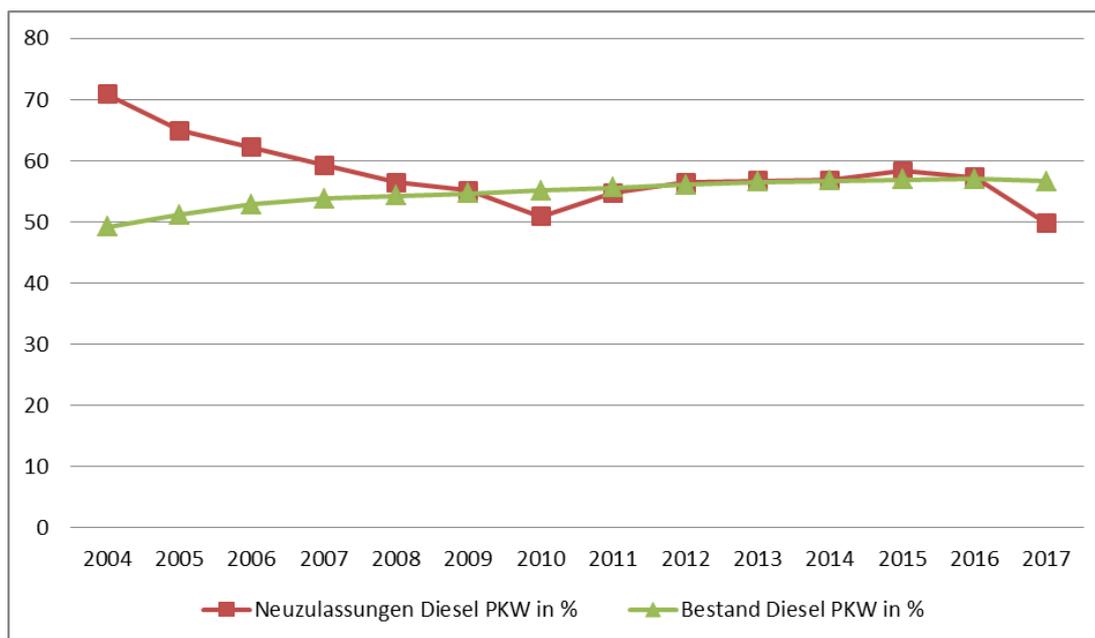


Abbildung 17: Entwicklung des Anteils Diesel PKW an Neuzulassungen und Bestand in Österreich

#### 4.5 EMISSIONEN

Mit der Einführung der Abgasnormen Euro 4, gültig für Neufahrzeuge ab 2006, bis Euro 6, gültig für Erstzulassungen ab 2015, wurden die Emissionsgrenzwerte (inklusive  $\text{NO}_2$  und PM) für Personenkraftwagen mit Otto- und Dieselmotoren seit 2005 mehrfach gesenkt<sup>15</sup>. Laut Daten der Europäischen Umweltagentur (European Environment Agency, 2018) sind die Emissionen von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) im Verkehrssektor seit 1990 EU-weit um 41% gesunken. Die durch den Verkehr in Europa verursachten Feinstaubemissionen von  $\text{PM}_{10}$  haben sich seit dem Jahr 2000 um 34% verringert. Diese Reduktionen sind jedoch geringer als vor etwa zwei Jahrzehnten erwartet, da einerseits der Anteil der Dieselfahrzeuge, die deutlich mehr  $\text{NO}_x$ -Emissionen verursachen als Benzinfahrzeuge, stärker gewachsen ist als angenommen, andererseits liegt die Ursache in einer stärkeren Zunahme des Verkehrs insgesamt. Speziell im Jahr 2016 kam es im Vergleich zum Jahr 2015 zu einem Rückgang der  $\text{NO}_x$ -Emissionen um 0,2%, allerdings stiegen die durch Verkehr verursachten Feinstaubemissionen von sowohl  $\text{PM}_{10}$  als auch  $\text{PM}_{2,5}$  um je 2%. Insgesamt sind etwa 57% aller in Europa verursachten  $\text{NO}_x$ -Emissionen auf den Verkehrssektor zurückzuführen. Deutlich geringer ist der Anteil des Verkehrssektors an den  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen, der nur ca. 13% beträgt. Der Straßenverkehr ist für knapp 29% aller  $\text{NO}_x$ -Emissionen und knapp 8% der  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen verantwortlich. Die im Report (European Environment Agency, 2018) dargestellten Daten zeigen auch, dass nur ca. 40% der durch Verkehr verursachten  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen auf Auspuffgase zurückzuführen sind, die restlichen 60% entstehen beispielsweise durch Reifen- und Bremsabrieb.

<sup>15</sup>Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32007R0715>, abgerufen am 7.1.2019

In Österreich wurde am 1. Juli 2005 eine Förderung für den Kauf eines neuen Diesel-Pkw mit Partikelfilter eingeführt, in der Steiermark wurde auch das Nachrüsten von Gebrauchtfahrzeugen mit Partikelfiltern ab 2005 gefördert und in der Wintersaison 2006/2007 ein anlassbezogenes Fahrverbot für Diesel-Pkw ohne Partikelfilter ausgesprochen.

Der Report über das Emissionskataster Steiermark Bezugsjahr 2014 (siehe Öttl, Payer, Pongratz, 2014) dokumentiert die Berechnungsmethoden und Ergebnisse für die einzelnen Verursacherguppen, wobei anzumerken ist, dass manche Informationen nur zum Zwecke der internen Dokumentation wiedergegeben wurden. Die im Folgenden angeführten Prozentsätze sind in der Tabelle 8 zusammengefasst. Die Heizungsemissionen privater Haushalte machen gemäß der im Emissionskataster-Report dargestellten Daten etwa 10% aller  $\text{NO}_x$  und 21% aller  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen aus, dabei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Datenbasis für die Emissionsberechnungen aus der Gebäude- und Wohnungszählung (GWZ) der Statistik Austria aus dem Jahr 2001 stammt. Im Jahr 2014 waren in der Datenbank für den Emissionskataster Steiermark ca. 500 Betriebe erfasst, die für etwa 31% aller  $\text{NO}_x$ -Emissionen und ca. 15% der  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen verantwortlich sind. Aufgrund der großen Anzahl an nicht erfassten Klein- und Mittelbetrieben werden die Emissionen aus Industrie und Gewerbe im steirischen Emissionskataster jedoch unterschätzt. Der Straßenverkehr ist – nach dem Erhebungsstand von 2014 – der größte Verursacher für  $\text{NO}_x$ - (Anteil knapp 48%) und  $\text{PM}_{10}$ - (Anteil 42%) Emissionen in der Steiermark. In Bezug auf  $\text{PM}_{10}$  sind die Berechnungen jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden, da es sich hier vorwiegend um schwer bestimmbare Aufwirbelungsemissionen handelt. Ein Vergleich mit den Emissionsberechnungen der Bundesländer-Luftschadstoffinventur (BLI) des Umweltbundesamtes (UBA, 2014) zeigt aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsmethoden teilweise andere Ergebnisse. Die deutlichsten Unterschiede ergeben sich bei Feinstaub  $\text{PM}_{10}$ , für den im Emissionskataster Steiermark wegen der Verwendung eines Emissionsmodells für Aufwirbelung deutlich höhere Anteile ermittelt wurden.

Die Beurteilung der Auswirkung von verschiedenen Emissionsquellen auf eine lokale Immissionssituation ist hochkomplex und erfolgt in der Regel über anspruchsvolle Ausbreitungsmodelle, Massenbilanzen oder die Analyse von quellenspezifischen Schlüsselsubstanzen (Tracer). Es ist daher nicht möglich, ermittelte Emissionsmengen 1:1 auf die Immissionssituation umzulegen (vgl. dazu Kirchsteiger et al., 2018).

	Anteil an $\text{PM}_{10}$ -Emissionen	Anteil an $\text{NO}_x$ -Emissionen
<b>Heizungen / Hausbrand</b>	21%	10%
<b>Betriebe / Industrie</b>	15%	31%
<b>Straßenverkehr</b>	42%	48%

Tabelle 8: Anteil der Verursacherguppen Heizung, Industrie und Straßenverkehr an  $\text{PM}_{10}$ - und  $\text{NO}_2$ -Emissionen, gemäß Emissionskataster Steiermark

## 4.6 AEROSOLQUELLENANALYSEN

Im Projekt „Aerosolquellenanalyse- Winter Graz“ (siehe Kirchsteiger et al., 2018) wurden Filter des Immissionsmessnetzes der Steiermark, die von Anfang Jänner bis Ende März 2017 in Graz beprobt wurden, analysiert und ausgewertet. Um die Situation für das gesamte Stadtgebiet von Graz darzustellen, wurden ebenso Probenpools der Messstationen Graz Süd und Graz Ost quantifiziert. Für die Stationen Graz Don Bosco und Graz Süd wurden Filter der PM<sub>2.5</sub> Fraktion analysiert. Die Analysen der Messstation Graz Ost erfolgten von der Fraktion. Um die Quellen unterschiedlicher Belastungen zuzuordnen, wurden die Proben in Pools eingeteilt, die Perioden mit hoher, mittlerer und verhältnismäßig geringer Staubbelastung in den Monaten Jänner und Februar 2017 darstellen. Durch die Analysen wurden die Feinstaubquellen anorganisches Sekundäraerosol, Holzrauch, Kfz-Verkehr, organisches Sekundäraerosol, Mineralstaub und Auftausalz bestimmt. Die bedeutendsten Feinstaubquellen, die während der Belastungsperiode in Graz festgestellt wurden, sind sekundär anorganisches Aerosol<sup>16</sup>, Holzrauch und Kfz-Emissionen, wobei allerdings Unterschiede zwischen den Messstationen erkennbar sind.

Im Probenpool mit hoher Feinstaubbelastung werden die größten Anteile der Staubbelastung dem sekundär anorganischen Aerosol (SIA) und dem Holzrauch zugeordnet. In der mittleren Belastungsperiode ist ein abnehmender Trend des Holzrauchanteils (30% bis 15%) zu erkennen. Das sekundäre anorganische Aerosol ist die wichtigste Feinstaubquelle. Im Zeitverlauf wird auch der Beitrag des Kfz-Verkehrs immer deutlicher. Für die Tage mit geringer Feinstaubbelastung werden unter 30% des Gesamt-PM dem Holzrauch zugeordnet. Im Gegensatz zu den Pools höherer Belastungen wird der Anteil, welcher dem Verkehr (Dieselemissionen und Brems- bzw. Reifenabrieb) zugeordnet wird mit 9 bis 17% merkbar, 21 bis 36% des Gesamt-PM werden dem sekundär anorganischen Aerosol zugeordnet.

---

<sup>16</sup>Das anorganische Sekundäraerosol wird in der Atmosphäre aus den Spurengasen Stickstoffoxide, Schwefeldioxid und Ammoniak gebildet. Die Umwandlung der Spurengase in Staubpartikel kann mehrere Stunden dauern. Sowohl die Spurengase als auch die gebildeten Partikel werden überregional verfrachtet.

## 5 Ergebnisse der deskriptiven und explorativen Analysen

### 5.1 METEOROLOGIE UND KLIMA

#### 5.1.1 Temperaturentwicklung

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 18 bis Abbildung 20) zeigen Boxplotserien zur Visualisierung der Entwicklung der Lufttemperatur über die Zeit an den Grazer Messstationen. In der Abbildung 18 sind die Temperaturverläufe von 2005 bis 2017 pro Messstation als Boxplotserie dargestellt, wobei die Boxplots nach Jahreszeit eingefärbt sind (F = Frühling, S = Sommer, H = Herbst, W = Winter) und für jede Jahreszeit eine Trendkurve berechnet wurde. Das Temperaturverhalten ist an allen Messstationen nahezu identisch. Die Sommertemperaturen weisen einen sehr glatten Verlauf mit leicht steigender Tendenz auf. Frühling und Herbst zeigen zwischen den Jahren etwas höhere Schwankungen, während bei den mittleren Wintertemperaturen ein deutliches Wellenverhalten sichtbar ist. Während die Winter 2006/2007 sowie 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 verhältnismäßig warm waren, zeigen die Temperaturen in den Wintern 2009/2010, 2010/2011 und 2016/2017 relative niedrige Mediane. In der Abbildung 19 ist der zeitliche Temperaturverlauf pro Jahreszeit für die Station Graz Nord zur Verdeutlichung herausgegriffen, die Abbildung 20 zeigt die Temperaturentwicklung für Graz Don Bosco.

Die Abbildung 21 zeigt den mittleren Wochenverlauf der Lufttemperatur auf Basis aller Halbstundenmesswerte, gegliedert nach Jahreszeit. Für jede Messstelle ist eine Trendkurve eingezeichnet. Diese Grafik verdeutlicht, dass der mittlere Temperaturverlauf an jedem Wochentag gleich ist.

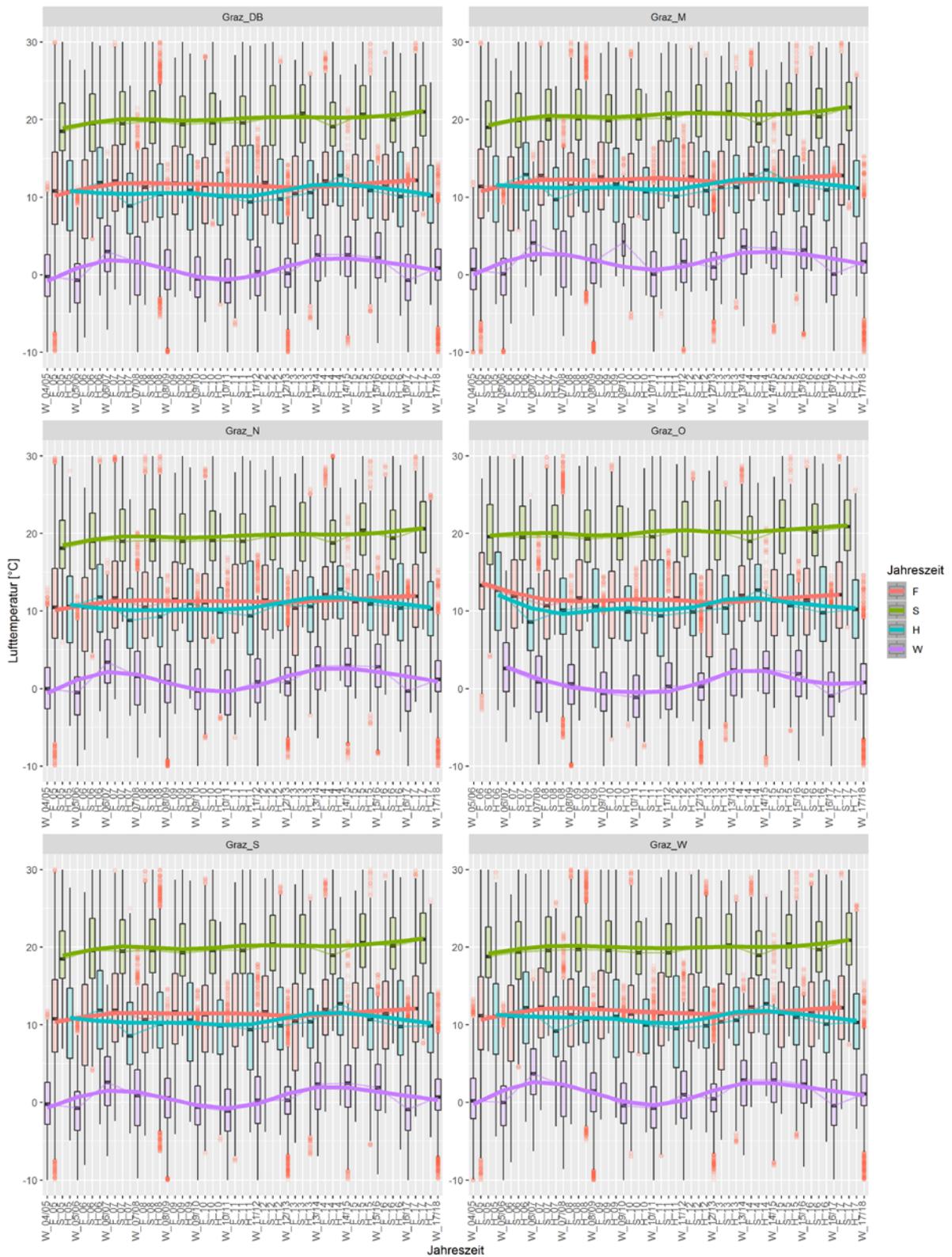


Abbildung 18: Entwicklung der Temperatur im Zeitverlauf für jeden Messort und pro Jahreszeit

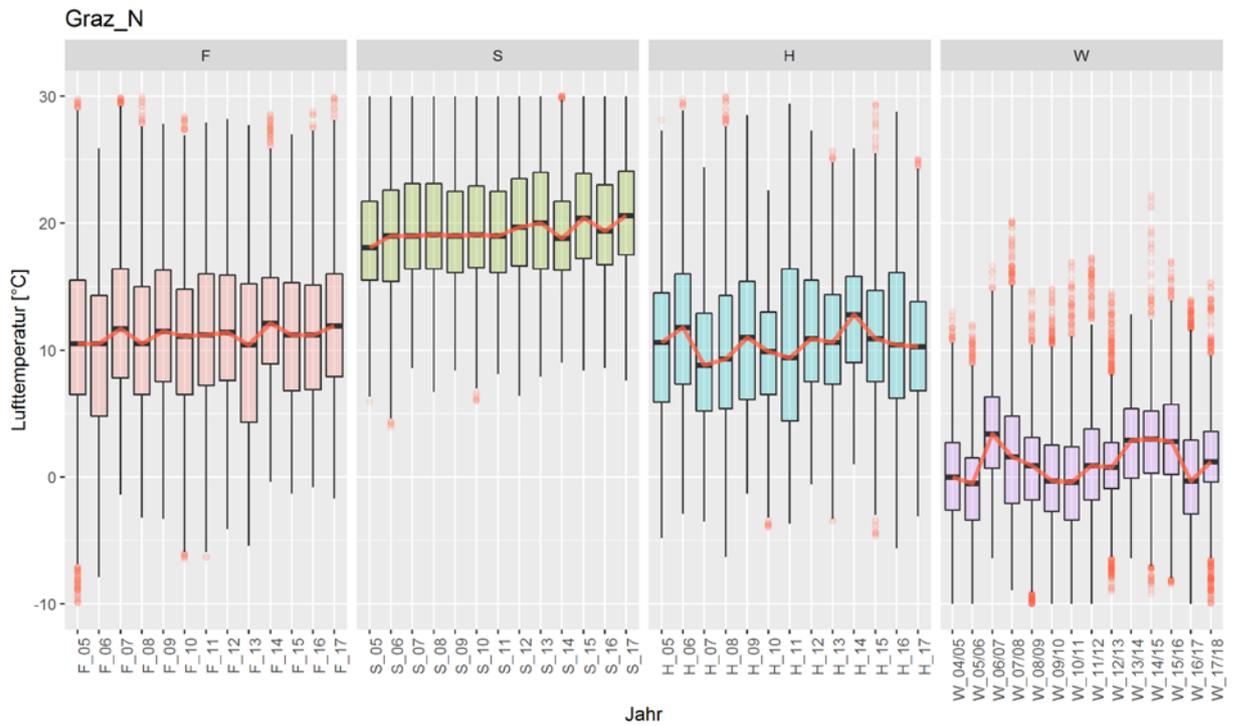


Abbildung 19: Entwicklung der Temperatur im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Nord

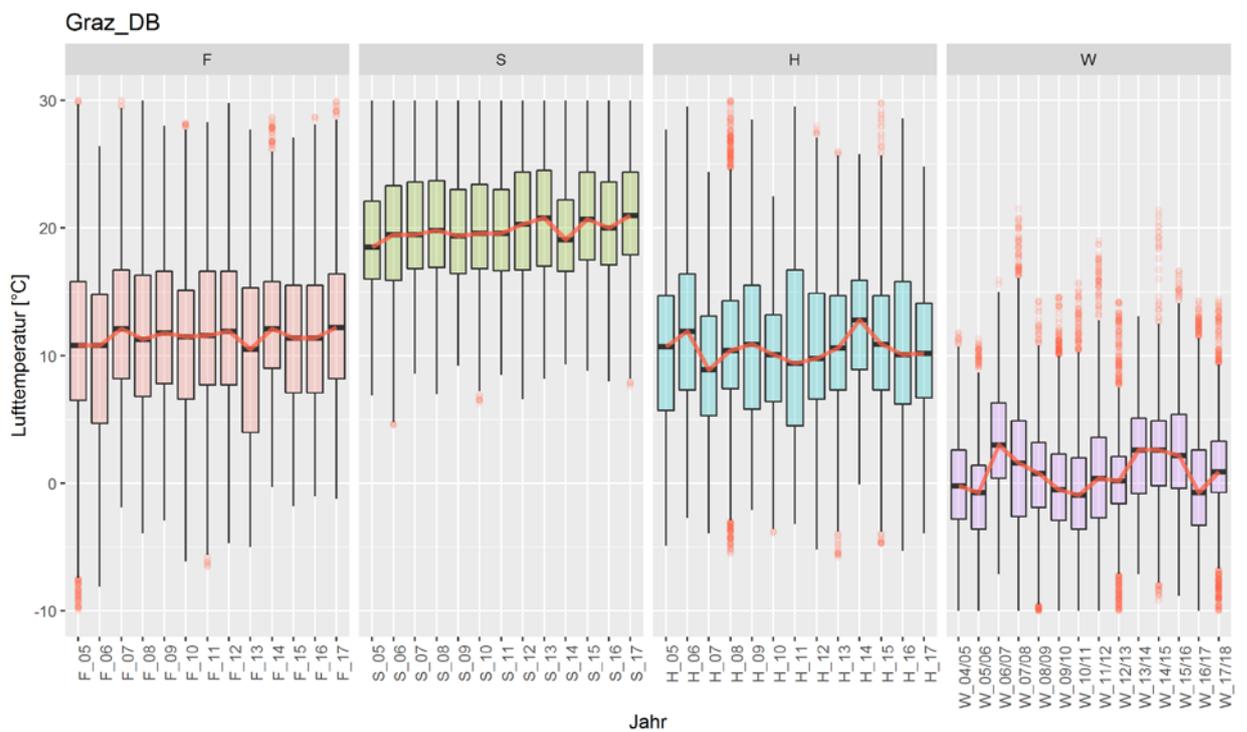


Abbildung 20: Entwicklung der Temperatur im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Don Bosco

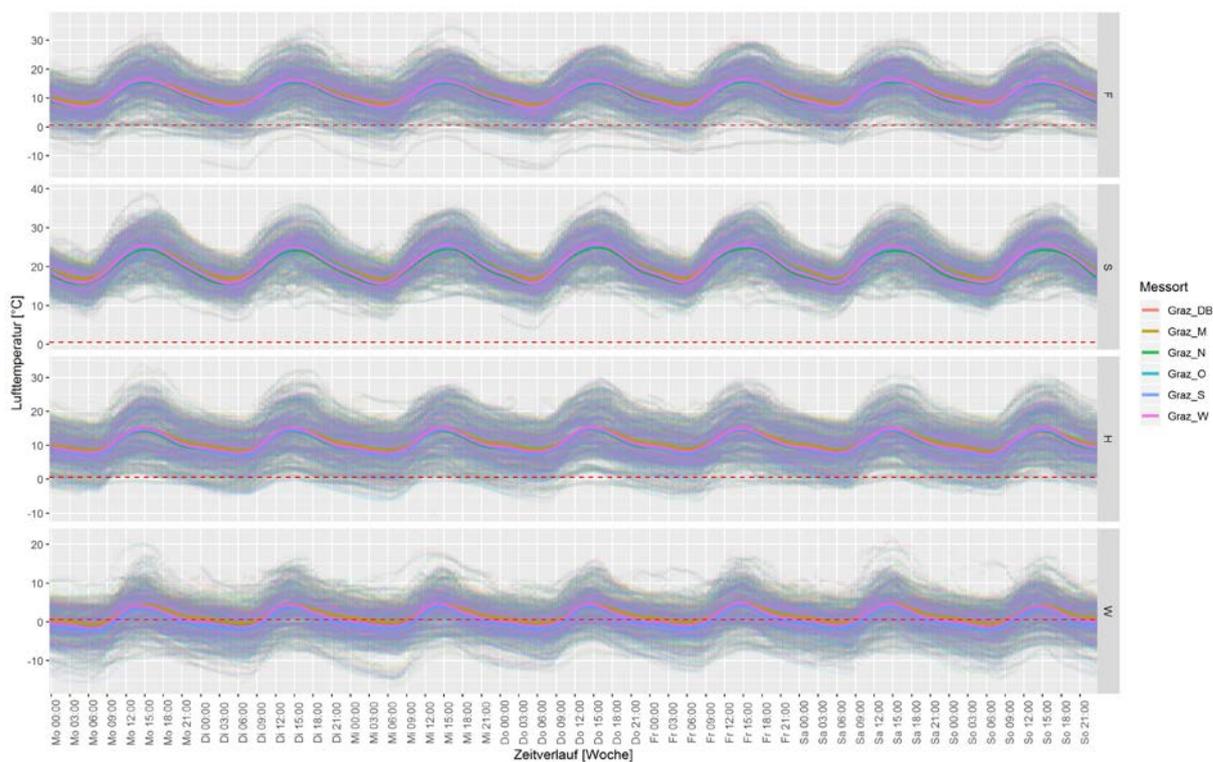


Abbildung 21: Lufttemperatur im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen

## 5.1.2 Windsituation in Graz

### 5.1.2.1 Windrichtung

Die Abbildung 22 zeigt Häufigkeitsdarstellungen für die an den Grazer Messstellen beobachteten Windrichtungen nach Sektoren (N = Nord, NE = Nord-Ost, E = Ost, SE = Süd-Ost, S = Süd, SW = Süd-West, W = West und NW = Nord-West). Die Abbildung 23 zeigt die Verteilung der Windrichtungen nach Jahreszeit für alle Messstationen mit einer Färbung nach Messstation. Die Windrichtung von ca. 150 bis 180 Grad entspricht dem Wind aus Süd-Osten und Süden, die Richtungen um 0 Grad entsprechen Wind aus Norden. In Graz Nord, Graz Mitte und Graz West treten meist Winde aus Nord und Nord-West auf, in Graz Don Bosco, Süd und Ost zeigt sich keine klare Präferenz, jedoch zeigen die Windrichtungen Süd-Ost und Süd höhere Häufigkeiten. Auch bezüglich der präferierten Windrichtung sind Unterschiede zwischen den Jahreszeiten zu sehen.

### 5.1.2.2 Windgeschwindigkeit

Der zeitliche Verlauf der Windgeschwindigkeiten pro Jahreszeit ist für alle Messorte in der Abbildung 24 dargestellt. An den Trendkurven für die Jahreszeiten ist zu erkennen, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten im Herbst und Winter deutlich niedriger sind, als im Frühling und Sommer. An einigen Messstationen scheinen die Windstärken in den Frühlings- und Sommermonaten über die Jahre zuzunehmen, während im Herbst und Winter tendenziell geringere Windgeschwindigkeiten zu verzeichnen sind. Die Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die zeitlichen Entwicklungen der Windgeschwindigkeiten pro Jahreszeit nur für die Messorte Graz Nord

und Don Bosco. Im Mittel sind die Windstärken in Graz Nord in allen Jahreszeiten höher als an der Station Don Bosco.

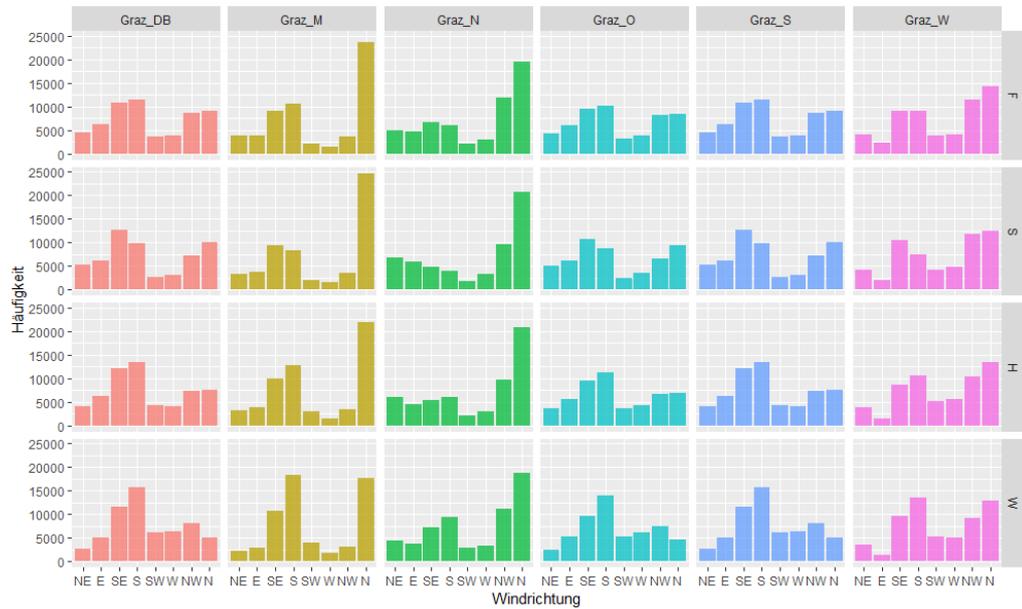


Abbildung 22: Verteilung der Windrichtung nach Sektoren für jede Messstelle und Jahreszeit

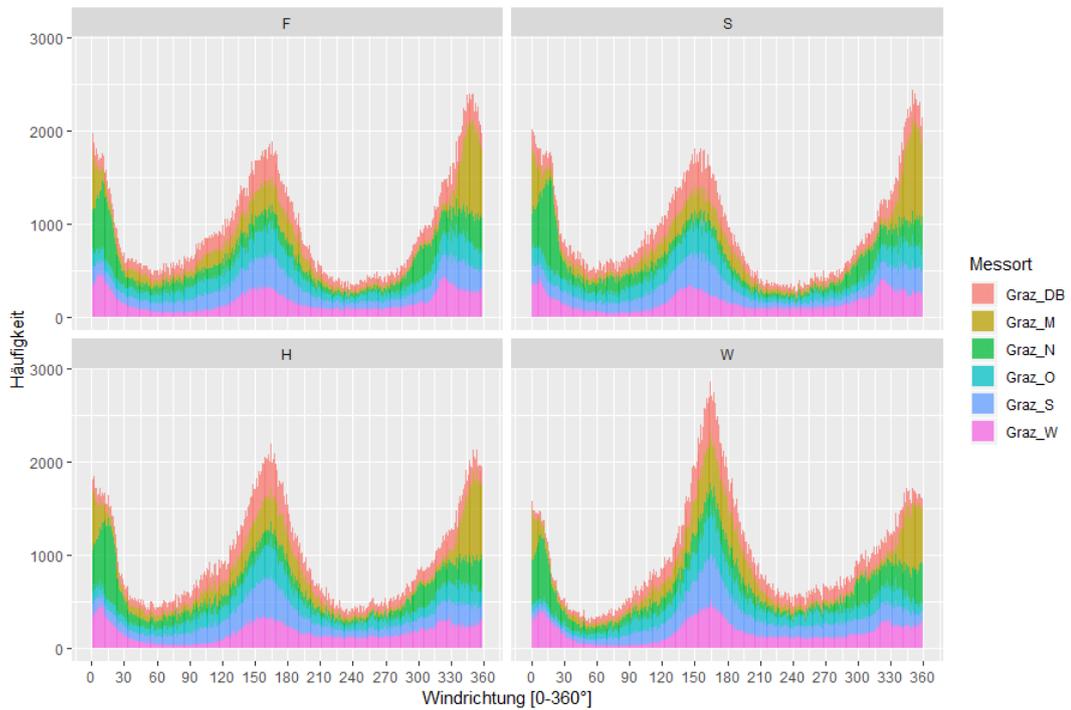


Abbildung 23: Verteilung der Windrichtung [0-360°] für jede Messstelle und Jahreszeit

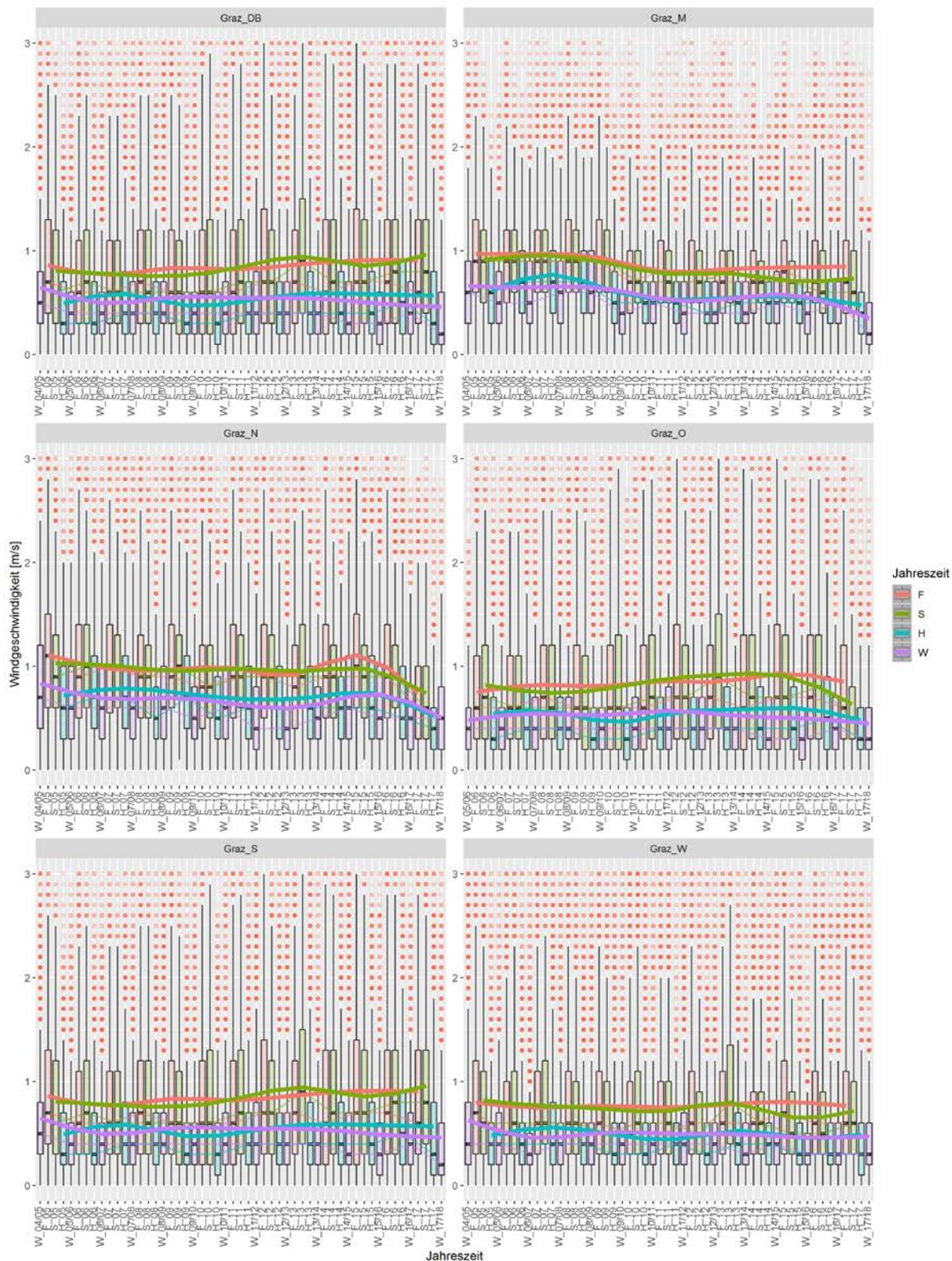


Abbildung 24: Entwicklung der Windgeschwindigkeit im Zeitverlauf für jeden Messort und pro Jahreszeit

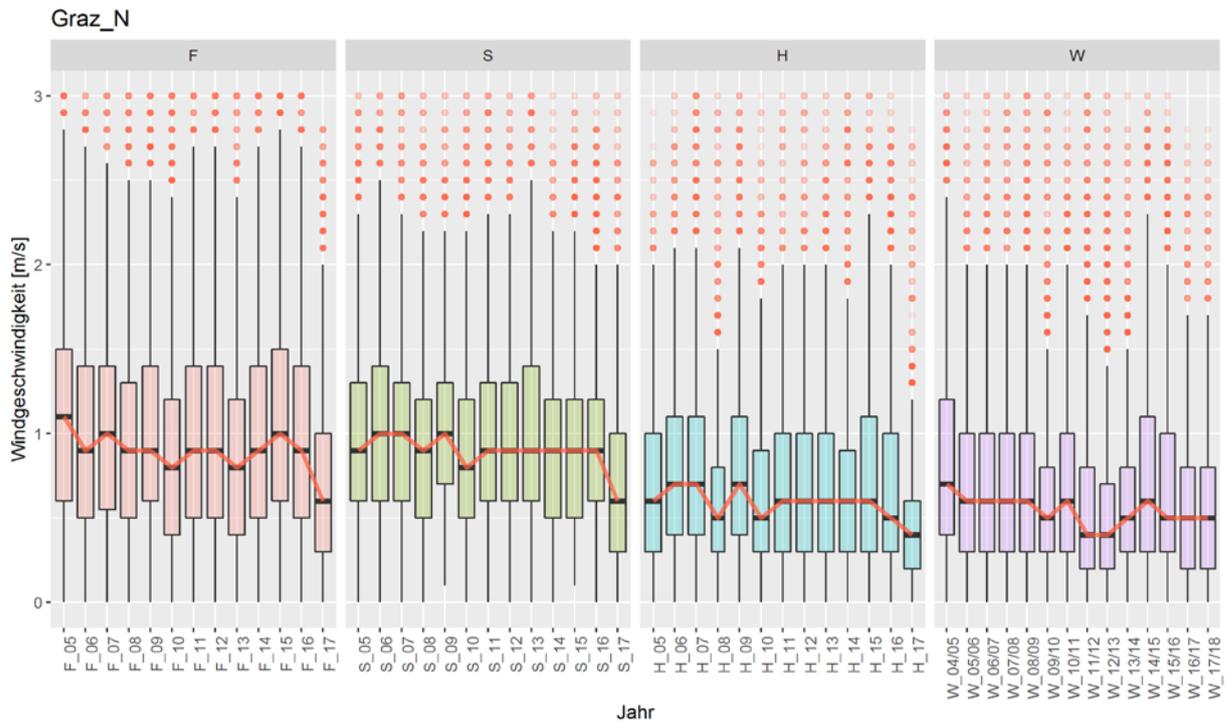


Abbildung 25: Entwicklung der Windgeschwindigkeit im Zeitverlauf pro Jahreszeit nur für Graz Nord

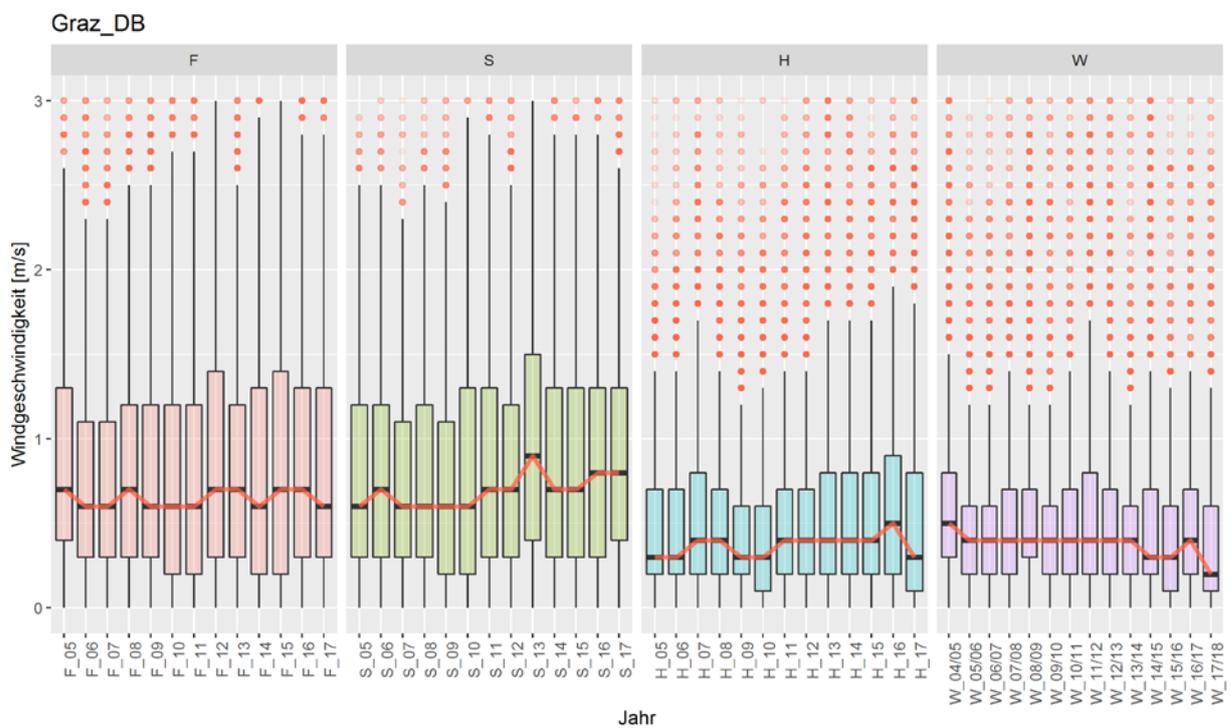


Abbildung 26: Entwicklung der Windgeschwindigkeit im Zeitverlauf pro Jahreszeit nur für Graz Don Bosco

Die mittleren Windgeschwindigkeiten im Wochenverlauf sind nach Jahreszeit gegliedert in der Abbildung 27 dargestellt. Im Hintergrund sind die einzelnen Messwerte als transparente Punkte eingezeichnet, im Vordergrund die Trendkurven der Wochenverläufe für alle Messstellen in unterschiedlichen Farben. Die Wochenverläufe unterscheiden sich zwischen den Jahreszeiten, der mittlere Tageszyklus ist jedoch an jedem Wochentag gleich. Es ist zu sehen, dass die grünen Kurven für die Station Graz Nord, und teilweise auch Graz Mitte, in den Nachtstunden höher liegen, als die übrigen Messstationen. Dies zeigt, dass an der Station Graz Nord im Mittel stärkerer Wind herrscht, als an den anderen Stationen.

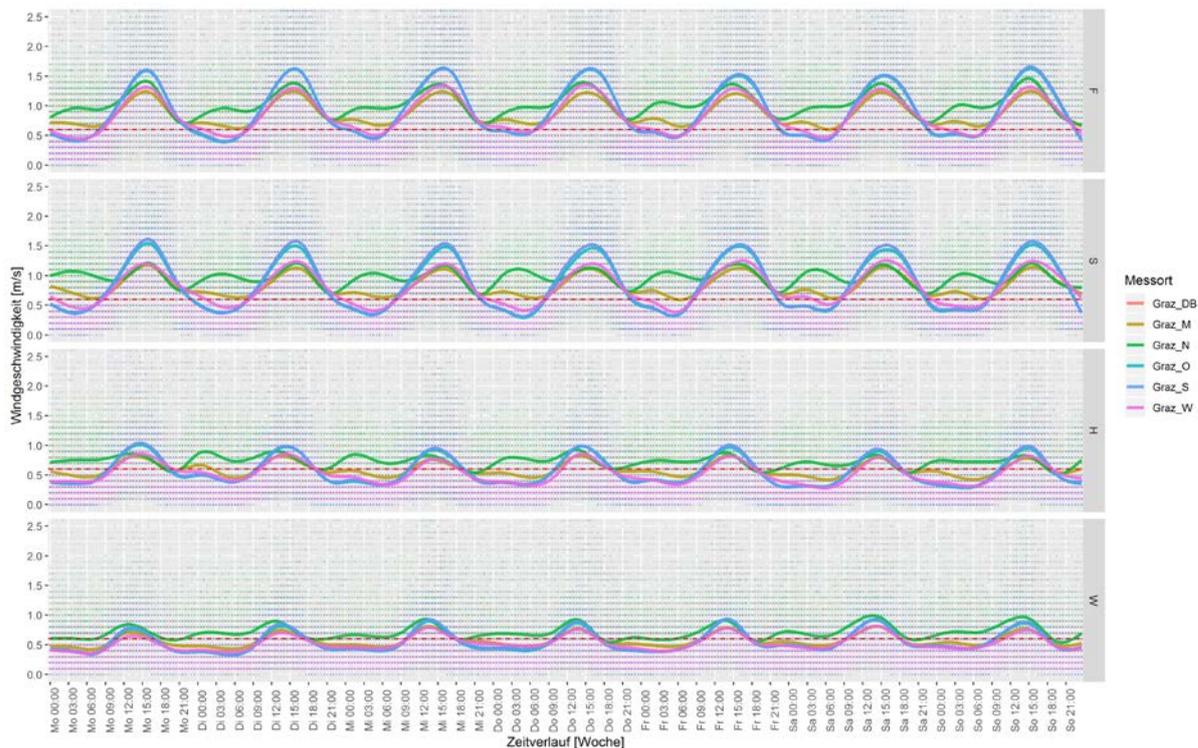


Abbildung 27: Windgeschwindigkeit im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen

### 5.1.3 Vergleich der Windsituation in Graz und Wien

Um die Windgeschwindigkeiten von Graz im Vergleich zur Situation in Wien darzustellen, wurden Daten der Wiener Messstationen Hohe Warte und Wien Schwechat der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) analysiert. Diese Daten liegen auf Basis von Stundenmittelwerten seit Sommer 2014 vor und wurden mit den Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeiten der Grazer Messstationen verglichen.

Die Abbildung 28 zeigt die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten pro Jahreszeit in einer Histogrammdarstellung für die Grazer Stationen und die Stationen Wien Hohe Warte und Schwechat in den untersten beiden Reihen, sowie Innsbruck in der siebenten Zeile von unten. Der Median der Windgeschwindigkeit für jede Jahreszeit und Station ist als vertikale strichlierte Linie eingezeichnet. Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten liegen an den Grazer Stadt-Stationen

durchwegs unter 1 m/s. Für die Stationen Schlossberg<sup>17</sup> und Plabutsch<sup>18</sup>, die deutlich über dem Grazer Stadtniveau liegen, sind die Mediane der Windgeschwindigkeiten bei 2 bis 3 m/s. Die Station Graz Kärntnerstraße, die sich auf dem Dach eines ca. 50 Meter hohen Gebäudes befindet, hat im Herbst und Winter eine mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 1,5 m/s, im Frühling und Sommer um 2,5 m/s. In Wien auf der Hohen Warte<sup>19</sup> beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit im Winter ca. 3,5 m/s, das ist deutlich höher als am Grazer Schlossberg und Plabutsch und etwa 2,5 Mal so hoch wie der mittlere Wert der Station Graz Kärntnerstraße. Sehr deutlich ist auch der Unterschied zwischen den Windgeschwindigkeiten am Grazer Flughafen (erste Reihe) und Wien Schwechat (letzte Reihe). Während Wien Schwechat im Frühling nur ca. doppelt so hohe Windgeschwindigkeiten zeigt wie Graz Flughafen, ist die Windstärke in Wien Schwechat im Winter ca. 4 Mal so groß.

#### 5.1.4 Inversionswetterlagen in Graz

Für die Darstellung Anzahl Tage mit Inversionswetterlage in Graz wurden die Temperaturdifferenzen zwischen der jeweiligen Grazer Messstation und Kalkleiten herangezogen. Wenn das Tagesmaximum der Temperaturdifferenz unter 0 Grad lag, wurde die Inversion als stark („strong“) bezeichnet, bei einem Tagesmittelwert der Temperaturdifferenz unter 0 Grad wird die Inversion als schwach („weak“) bezeichnet.

In der Abbildung 29 ist die Anzahl von Tagen mit Inversionswetterlage an den Grazer Stationen für die Wintermonate dargestellt. Es ist zu sehen, dass die schwachen Inversionen (blau) deutlich häufiger auftreten, als die starken Inversionen (rot). Die Zahl der Inversionstage schwankt deutlich von Jahr zu Jahr, zeigt aber keinen erkennbaren Trend nach oben oder unten. Graz Mitte und Graz West weisen etwas weniger Inversionstage auf, als die anderen Stationen. Auch in Graz Nord ist die Zahl der Inversionstage etwas geringer, als bei Don Bosco, Süd und Ost.

Die Abbildung 30 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Inversionslänge in Tagen für alle Messstationen gegliedert nach Jahreszeit. Über jeder Inversionslänge (1 bis 11 aufeinanderfolgenden Tage mit Inversion) ist die Anzahl der Inversionen mit der jeweiligen Länge als Balken aufgetragen. Der Median der Inversionsdauern ist als rote vertikale Linie eingezeichnet. Es ist zu sehen, dass im Frühling und vor allem im Sommer kaum Inversionslagen, die über mehrere Tage dauern, auftreten. Die häufigste Inversionsdauer im Herbst und Winter ist ein Tag, jedoch kommen vor allem im Winter auch sehr häufig Inversionen mit zwei Tagen Dauer vor. Während im Herbst kaum Inversionen zu beobachten sind, die länger als 5 Tage dauern, ist im Winter auch eine Inversionsdauer von sechs oder sieben Tagen keine Seltenheit. Nähere Ausführungen über die Auswirkungen der Inversionsdauer auf die PM<sub>10</sub>-Konzentration sind in Abschnitt 6.1.3.1 zu finden und in Abbildung 58 visualisiert.

---

<sup>17</sup> Die Station Schlossberg liegt auf 450m, ca. 100 Meter über dem Grazer Stadtniveau.

<sup>18</sup> Die Station Plabutsch liegt auf ca. 740m, knapp 300 Meter über Graz.

<sup>19</sup> Die Hohe Warte liegt auf einem verbauten Hügel, auf einer Seehöhe von 220m, das ist ca. 50m über dem Stephansplatz.



Abbildung 28: Histogramme der Verteilungen der Windgeschwindigkeiten für die Grazer Luftgütemessstellen und ausgewählte Wetterstationen der ZAMG seit Juli 2014

### Inversionstage

Schwach: Tage an denen der Tagesdurchschnitt der Temperaturdifferenz (Graz - Kalkleiten) unter 0 war  
 Stark: Tage an denen das Tagesmaximum der Temperaturdifferenz (Graz - Kalkleiten) unter 0 war

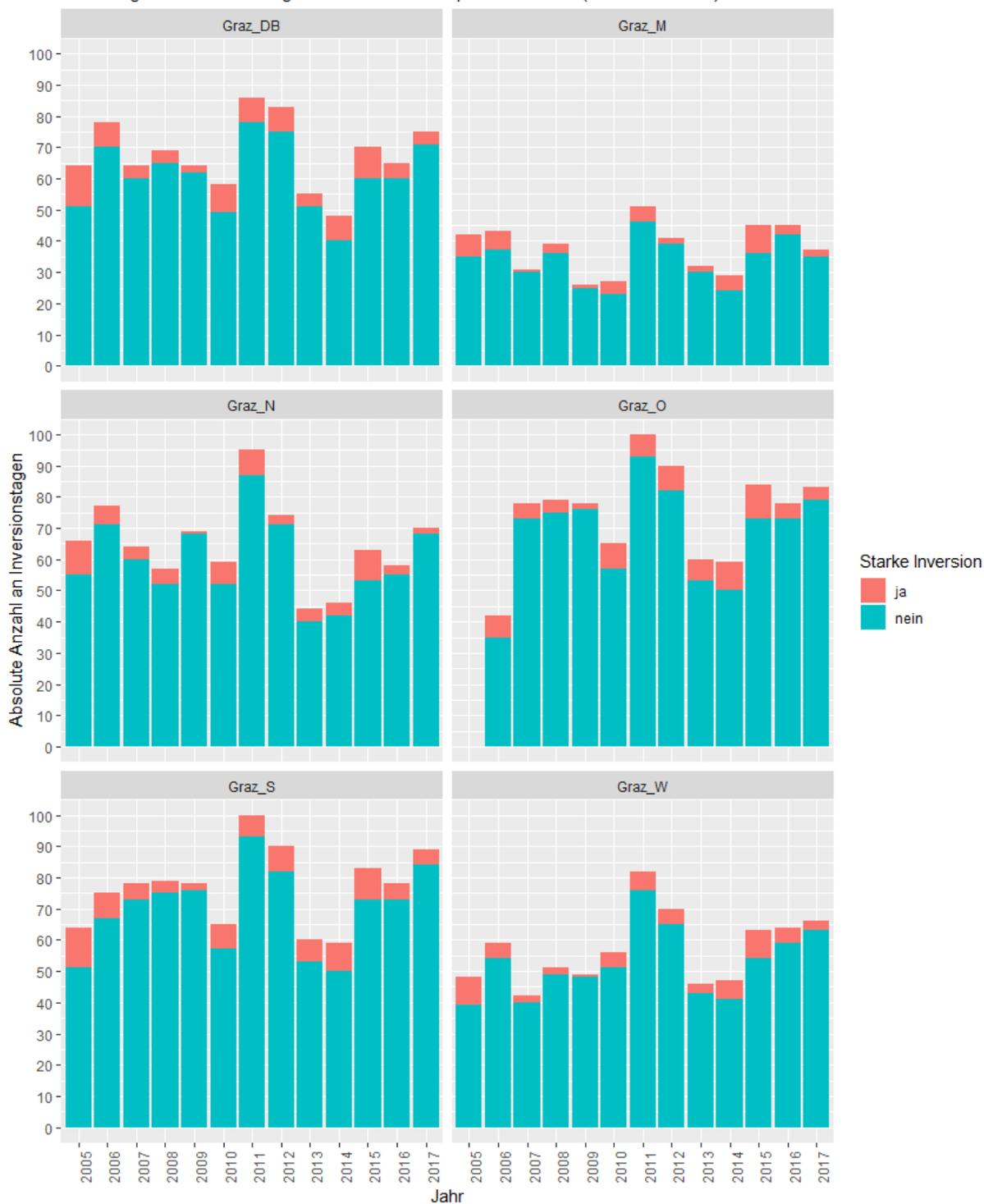


Abbildung 29: Entwicklung der Inversionswetterlagen pro Messstelle für Winter von 2004 bis 2018

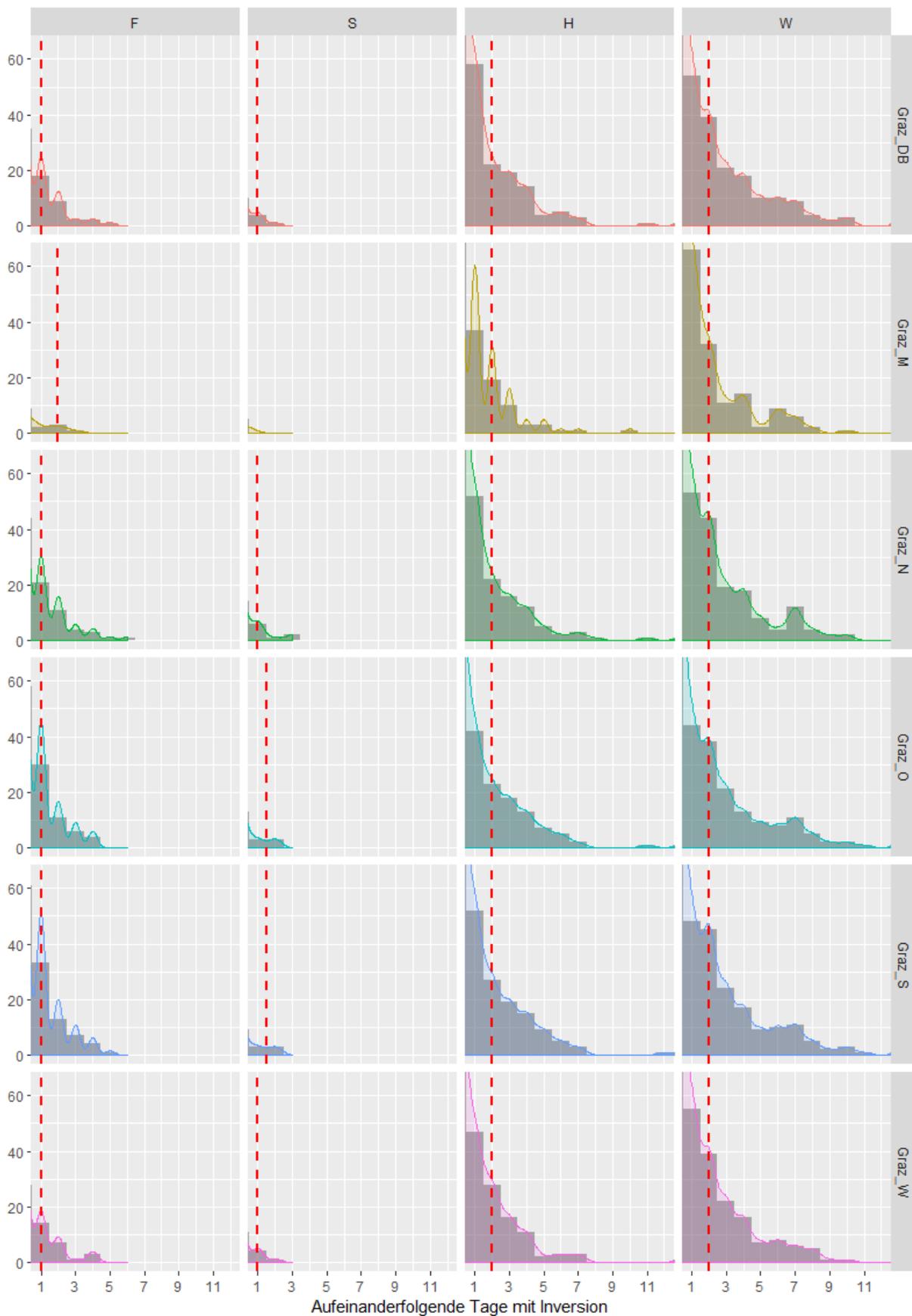


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Inversionslängen in Tagen, pro Jahreszeit und Messstation

Die Abbildung 31 zeigt den Wochenverlauf der Temperaturdifferenz zwischen der jeweiligen Grazer Station und Kalkleiten, gegliedert nach Jahreszeit. Die einzelnen Halbstundenwerte sind als transparente Punkte im Hintergrund eingezeichnet, im Vordergrund sind die Trendkurven als farbige Linien, gefärbt nach Messstation, zu sehen. Die Nulllinie ist als rote strichlierte Linie dargestellt. Es ist kein Unterschied zwischen den Wochentagen zu erkennen, sehr wohl jedoch unterscheiden sich die Jahreszeiten. In den frühen Morgenstunden (3:00 bis 6:00) ist die mittlere Temperaturdifferenz zu Kalkleiten in allen Jahreszeiten zumindest leicht negativ, im Winter erstreckt sich die Phase der negativen Temperaturdifferenz im Mittel von den Abendstunden (ca. 21:00) bis in den späten Vormittag. Die geringste Inversion wird zu allen Jahreszeiten nachmittags um ca. 14:00 bis 15:00 erreicht.

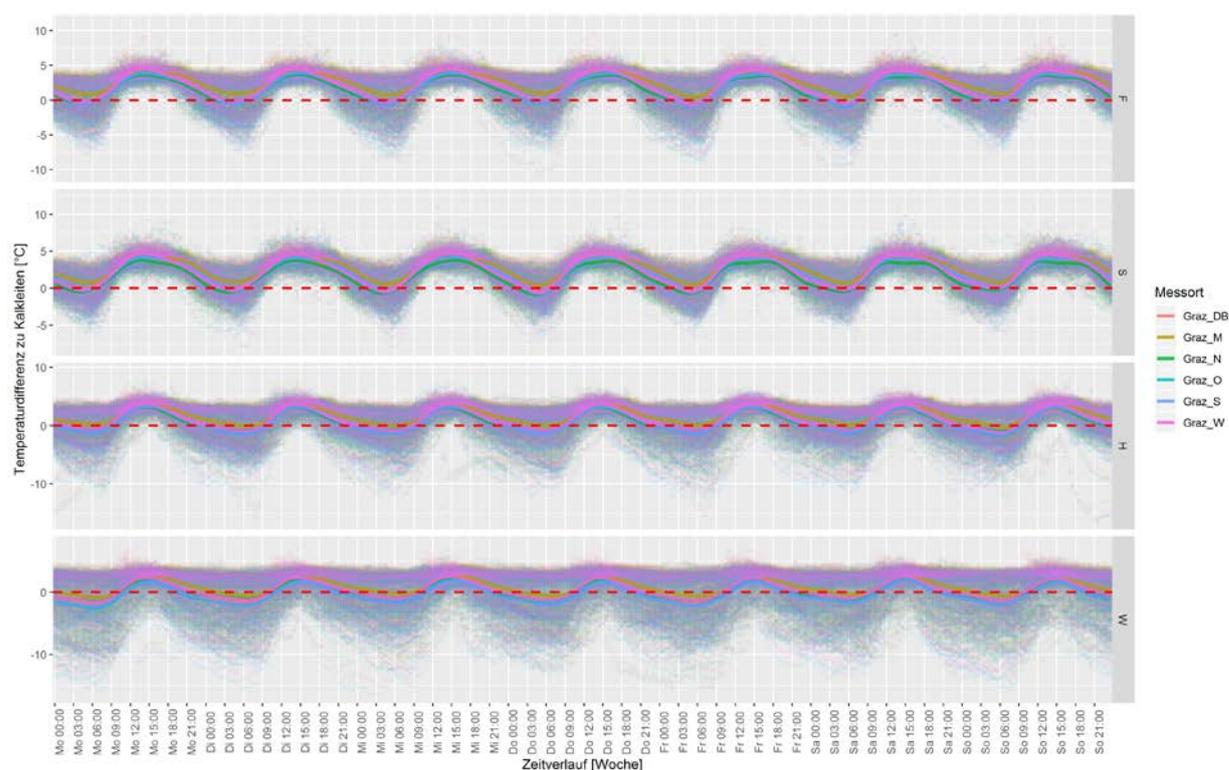


Abbildung 31: Temperaturdifferenz zwischen den Grazer Messstationen und zu Kalkleiten im Wochenverlauf

### 5.1.5 Luftfeuchtigkeit und Niederschlag

Messwerte des Niederschlags lagen für dieses Projekt nur von der Station Graz Nord vor. Von Dezember 2010 bis August 2011 liegen keine Niederschlagsdaten vor.

Die Abbildung 32 zeigt die Entwicklung der Niederschlagssummen in den Wintermonaten für Graz Nord von 2004 bis 2018. In den Wintermonaten 2008/2009 waren die meisten Niederschläge zu verzeichnen, gefolgt von den Wintersaisons 2012/2013 bzw. 2013/2014. In der Abbildung 33 sind die Niederschlagssummen von Graz Nord für alle Jahreszeiten dargestellt. Im Winter sind gegenüber den anderen Jahreszeiten deutlich geringere Niederschlagssummen zu beobachten.

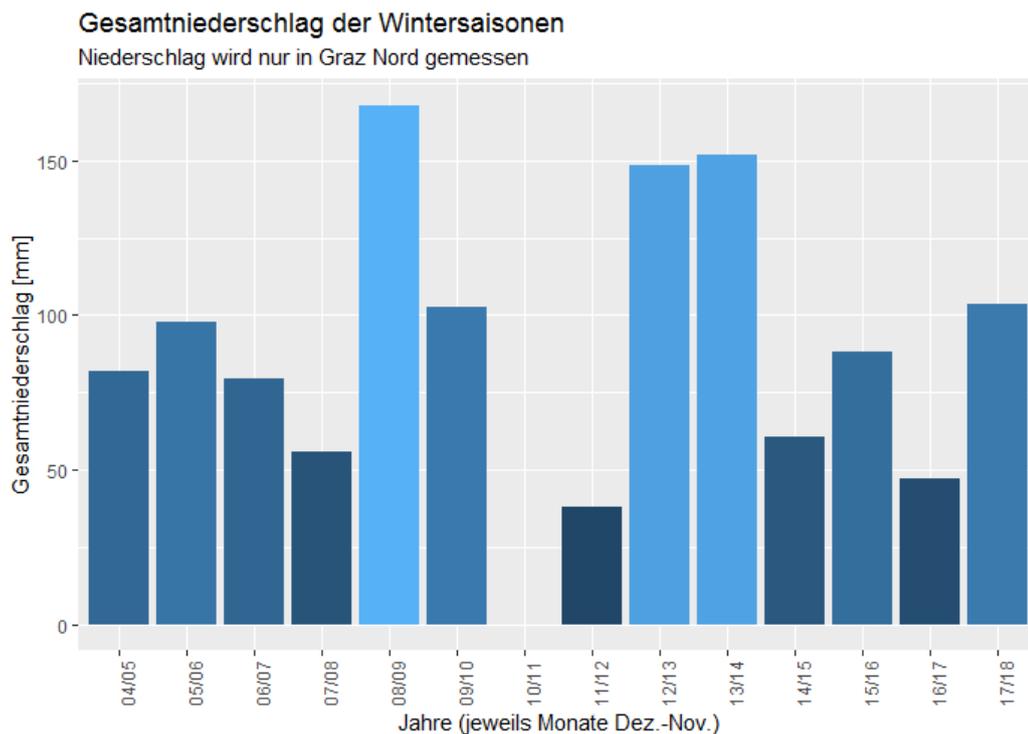


Abbildung 32: Entwicklung des Gesamtniederschlags in den Wintermonaten für Graz Nord über alle Jahre

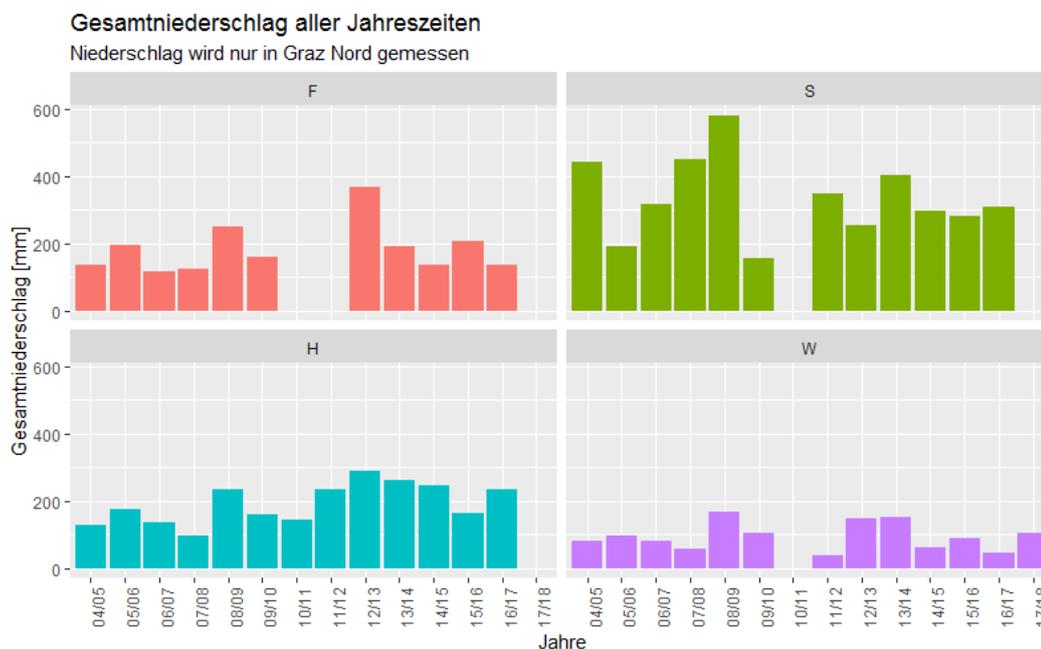


Abbildung 33: Entwicklung des Gesamtniederschlags für Graz Nord über alle Jahre

Die Abbildung 34 zeigt die Boxplotserien der Verläufe der an den sechs Messstationen gemessenen Luftfeuchtigkeit über die Jahre 2004 bis 2018. Die mittlere Luftfeuchtigkeit im Herbst und Winter liegt über jener im Frühling und Sommer. Es sind keine Trends nach oben oder unten erkennbar. In der Abbildung 35 ist der Wochenverlauf der Luftfeuchtigkeit gegliedert nach

Messtation dargestellt. Auch hier ist ein ausgeprägter Tageszyklus erkennbar, die Wochentage unterscheiden sich jedoch nicht voneinander.

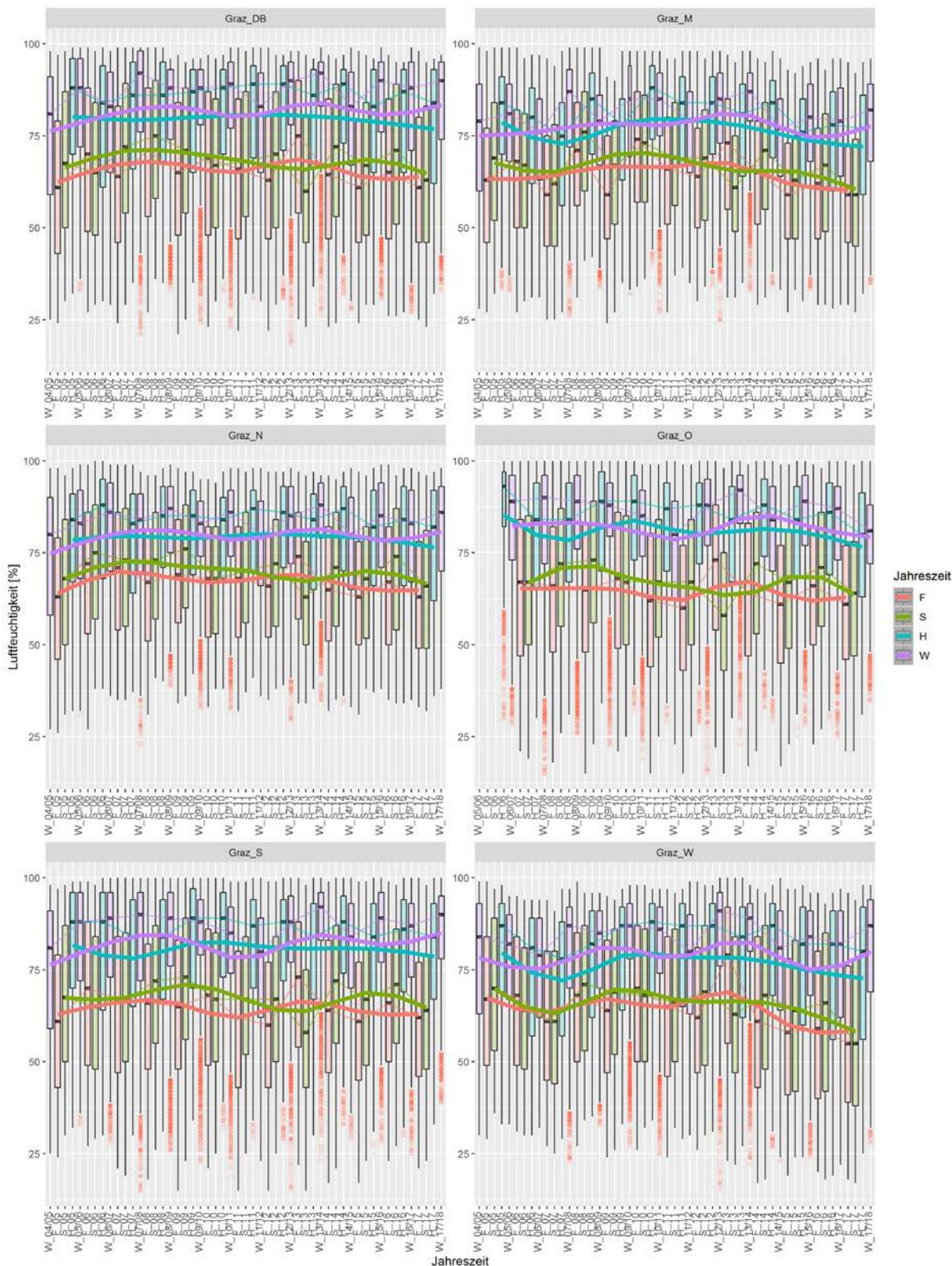


Abbildung 34: Entwicklung der Luftfeuchtigkeit über alle Jahre hinweg pro Jahreszeit

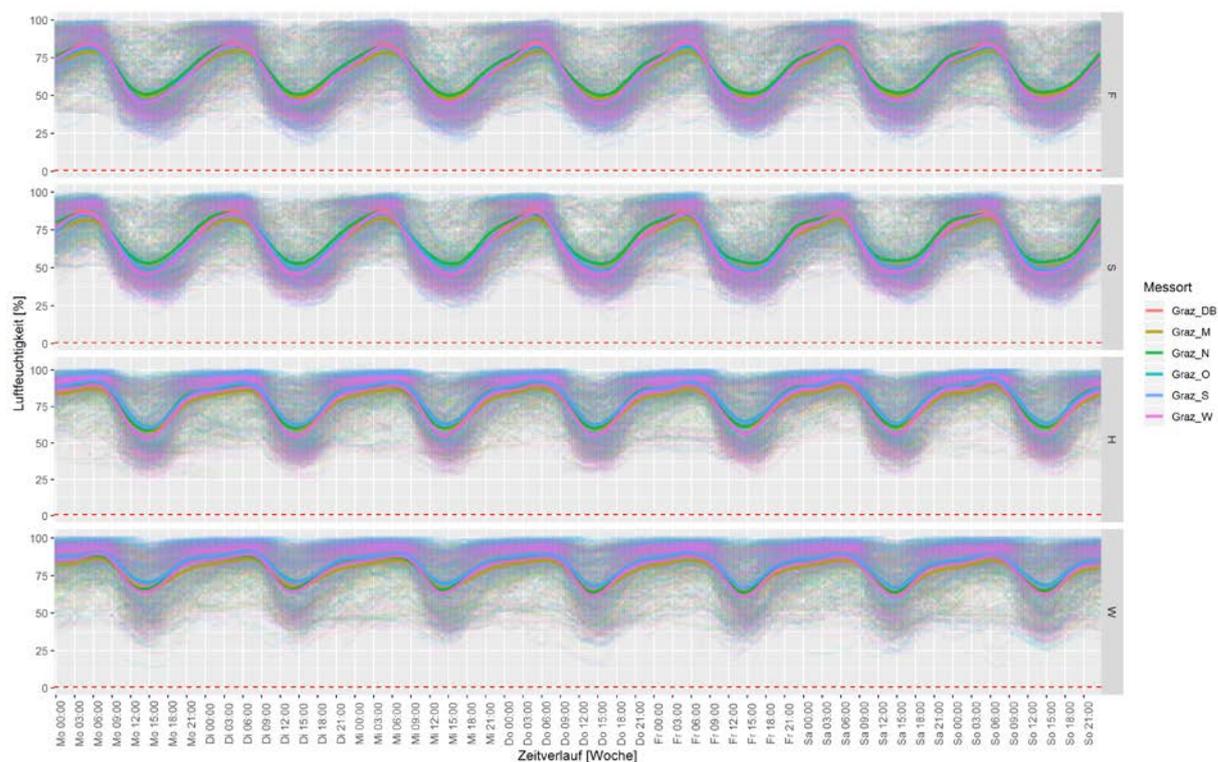


Abbildung 35: Luftfeuchtigkeit im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen

## 5.2 PM<sub>10</sub> UND NO<sub>2</sub>

### 5.2.1 Belastung pro Messstation und Jahreszeit

In der Tabelle 9 sind die Feinstaub PM<sub>10</sub>-Mittelwerte (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) über den analysierten Beobachtungszeitraum 2005 bis 2017 für alle sechs Messstationen pro Jahreszeit zusammengefasst. Wie schon aus der Abbildung 3 in Abschnitt 1.3.1 zu sehen, weisen die Stationen Don Bosco (DB) und Graz Süd die höchsten PM<sub>10</sub>-Belastungen auf. Obwohl Don Bosco bei den jährlichen Überschreitungstagen an erster Stelle liegt, ist der Winter-Mittelwert über alle Jahre in Graz Süd mit  $55,5\mu\text{g}/\text{m}^3$  etwas höher, als in Don Bosco ( $54,7\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Im Herbst liegt der Mittelwert in Don Bosco schon etwas höher als in Graz Süd, im Frühling und Sommer liegt Graz Don Bosco deutlich höher. Im Sommer gibt es neben Don Bosco sogar zwei weitere Stationen, deren mittlere PM<sub>10</sub>-Belastung über der von Graz Süd liegt. Wie zu erwarten, sind die Belastungen im Winter am höchsten, gefolgt von Herbst und Frühling, im Sommer sind die PM<sub>10</sub>-Mittelwerte nur knapp halb so hoch wie im Winter. Zur Veranschaulichung der Werte siehe Abbildung 36.

In der Tabelle 10 sind die Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) Mittelwerte (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) über den analysierten Beobachtungszeitraum 2005 bis 2017 für alle sechs Messstationen pro Jahreszeit zusammengefasst und in der Abbildung 37 grafisch dargestellt. Die höchsten Belastungen weist die Station Don Bosco auf, gefolgt von Graz Mitte. Graz Süd kommt nur im Winter nahe an Graz Mitte heran und liegt in den anderen Jahreszeiten etwa auf dem Niveau von Graz Ost. Graz Nord hat ganzjährig die niedrigsten NO<sub>2</sub>-Mittelwerte. Auch bei NO<sub>2</sub> ist ein deutlicher Anstieg in der kälteren Jahreszeit zu sehen, Frühling und Herbst verhalten sich ähnlich.

Station	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Mittelwert pro Station
Graz_DB	31,3	23,7	33,5	54,7	<b>35,8</b>
Graz_Mitte	27,4	20,7	29,2	45,6	<b>30,4</b>
Graz_Nord	23,2	19,3	24,9	36,9	<b>25,9</b>
Graz_Ost	28,6	21,8	31,8	47,7	<b>32,4</b>
Graz_Süd	28,4	19,9	33,0	55,5	<b>34,1</b>
Graz_West	25,2	18,1	27,0	42,3	<b>28,1</b>
Mittelwert pro Jahreszeit	<b>27,3</b>	<b>20,6</b>	<b>29,8</b>	<b>47,2</b>	<b>31,1</b>

Tabelle 9: PM<sub>10</sub>-Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation

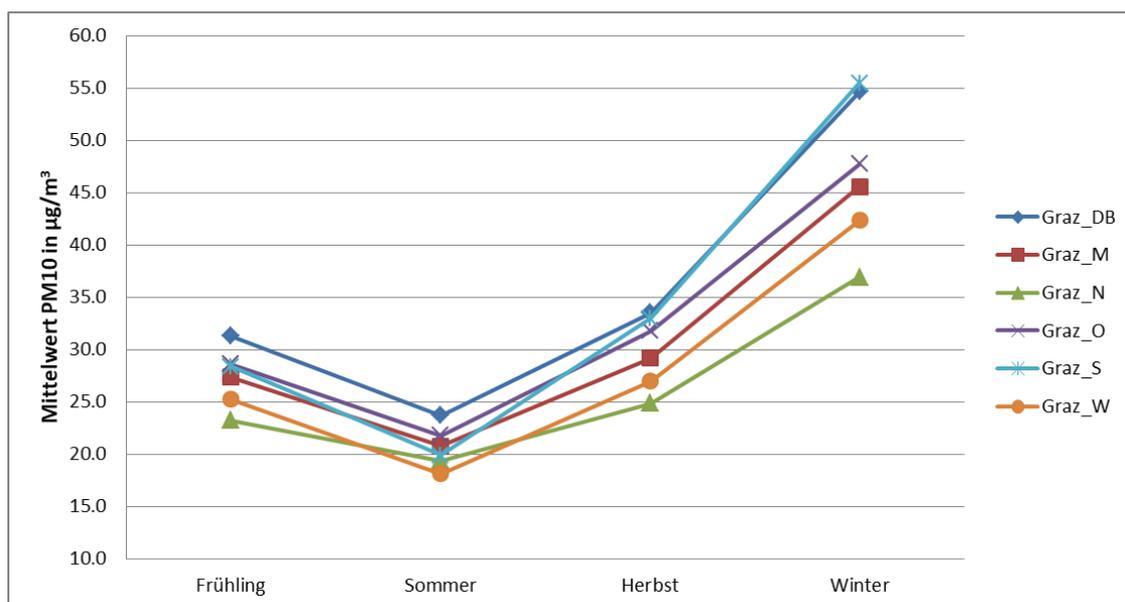


Abbildung 36: PM<sub>10</sub>-Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation

Station	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Mittelwert pro Station
Graz_DB	46,9	38,8	46,5	61,3	<b>48,4</b>
Graz_Mitte	33,2	27,5	36,9	50,2	<b>36,8</b>
Graz_Nord	20,7	14,5	24,6	39,6	<b>24,6</b>
Graz_Ost	27,6	20,7	31,0	45,4	<b>31,1</b>
Graz_Süd	29,9	21,4	32,0	49,1	<b>33,1</b>
Graz_West	26,2	18,1	29,3	43,3	<b>29,2</b>
Mittelwert pro Jahreszeit	<b>30,7</b>	<b>23,5</b>	<b>33,5</b>	<b>48,2</b>	<b>33,9</b>

Tabelle 10: NO<sub>2</sub>-Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation

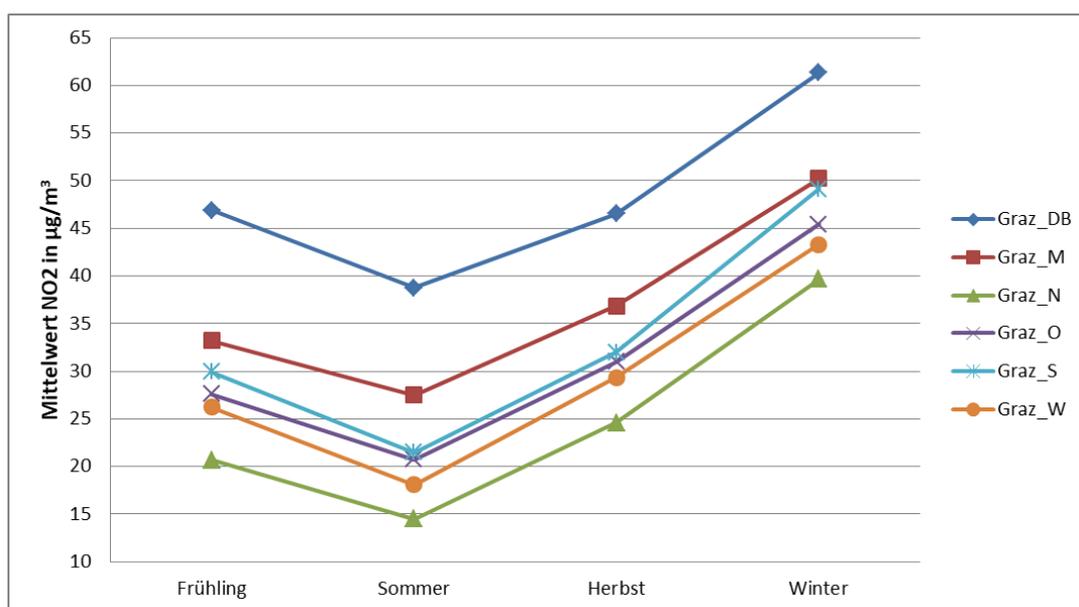


Abbildung 37: NO<sub>2</sub>-Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation

## 5.2.2 Langfristige Trends

In diesem Abschnitt sind die Halbstundenmittelwerte mit langfristigen Trendkurven von PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> für aller Grazer Messstationen in Form von Boxplotserien dargestellt.

### 5.2.2.1 PM<sub>10</sub>

In der folgenden Abbildung 38 sind die Trendverläufe aller Grazer Messstellen über die Jahre 2005 bis 2017 dargestellt. Die Halbstundenmittelwerte pro Jahr und Jahreszeit sind mittels Boxplot aggregiert, pro Jahreszeit wurde eine Trendkurve berechnet. Wie schon in Abschnitt 1.3.1 bei der Darstellung der Jahresmittelwerte ausgeführt, weist der Trend der PM<sub>10</sub>-Belastung über die Jahre

2005 bis 2017 leicht nach unten. Der stärkere Rückgang bei der Station Graz Mitte ist teilweise auch durch eine Verlegung der Station im Winter 2009/2010 bedingt. Die Belastung ist im Winter am höchsten, im Sommer am geringsten und im Frühling etwas geringer als im Herbst. Auch die Variabilität (Schwankungsbreite) der  $PM_{10}$ -Werte ist im Winter am höchsten.

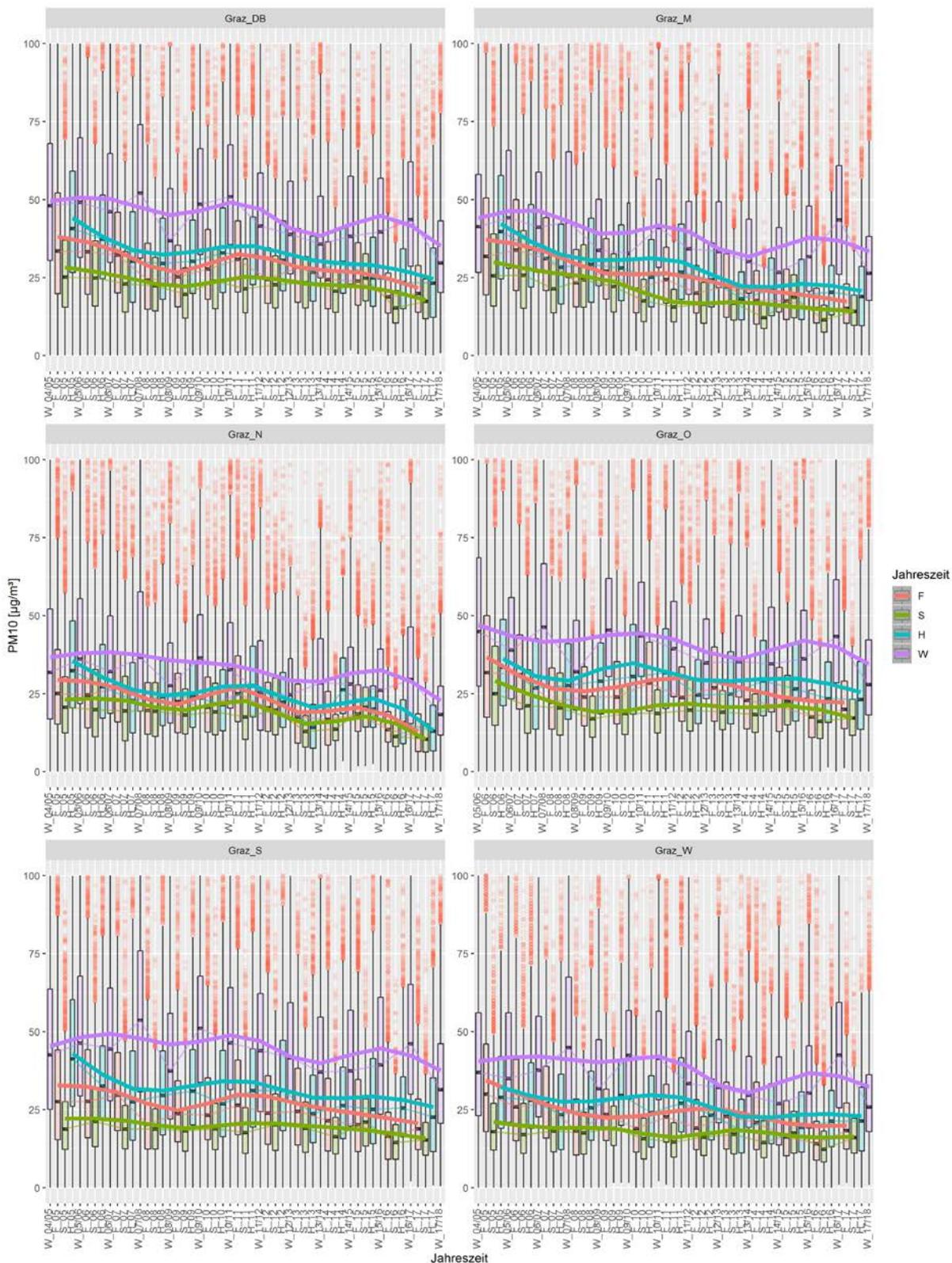


Abbildung 38: Entwicklung von  $PM_{10}$  für jede Luftgütemessstelle pro Jahreszeit

Die folgenden Abbildungen zeigen die Trenddarstellungen der Stationen Don Bosco (Abbildung 39), Graz Süd (Abbildung 40) und Graz Mitte (Abbildung 41). Im Winter 2017/2018 weisen alle drei betrachteten Stationen die niedrigste PM<sub>10</sub>-Belastung der gesamten Winter-Zeitreihe auf.

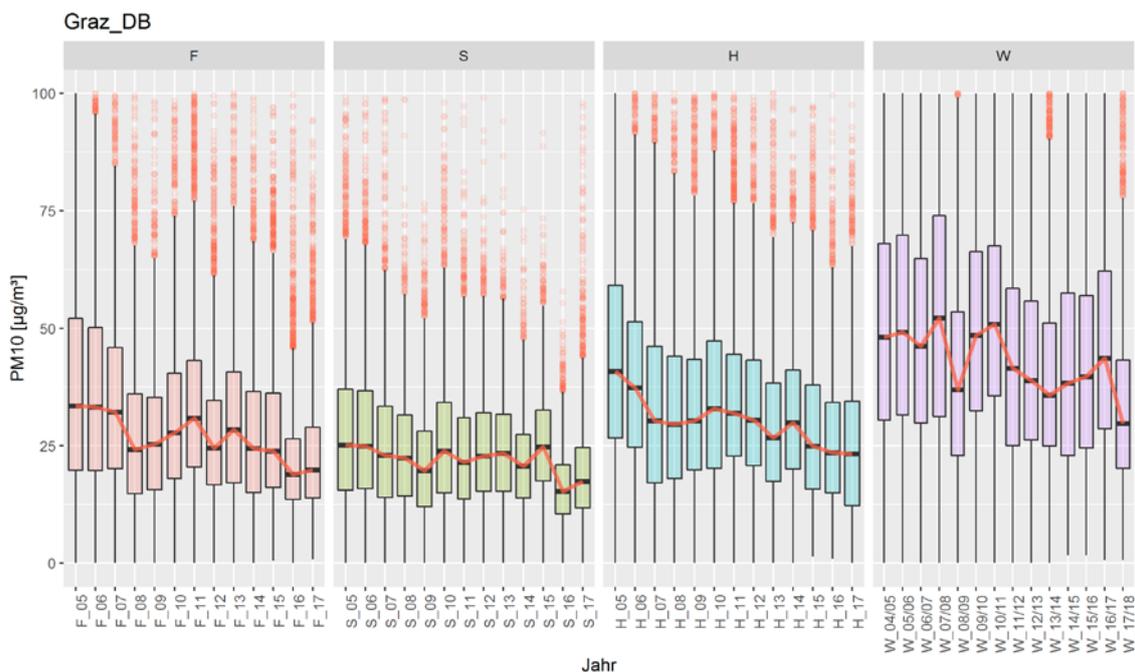


Abbildung 39: Entwicklung von Feinstaub PM<sub>10</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Don Bosco

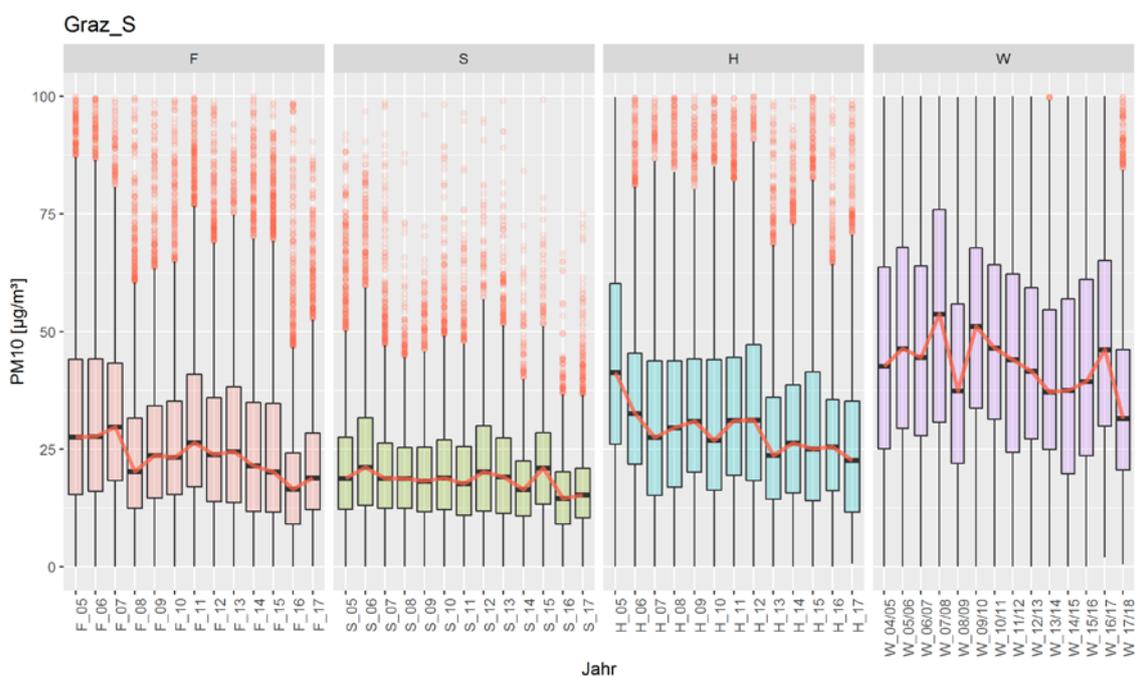


Abbildung 40: Entwicklung von Feinstaub PM<sub>10</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Süd

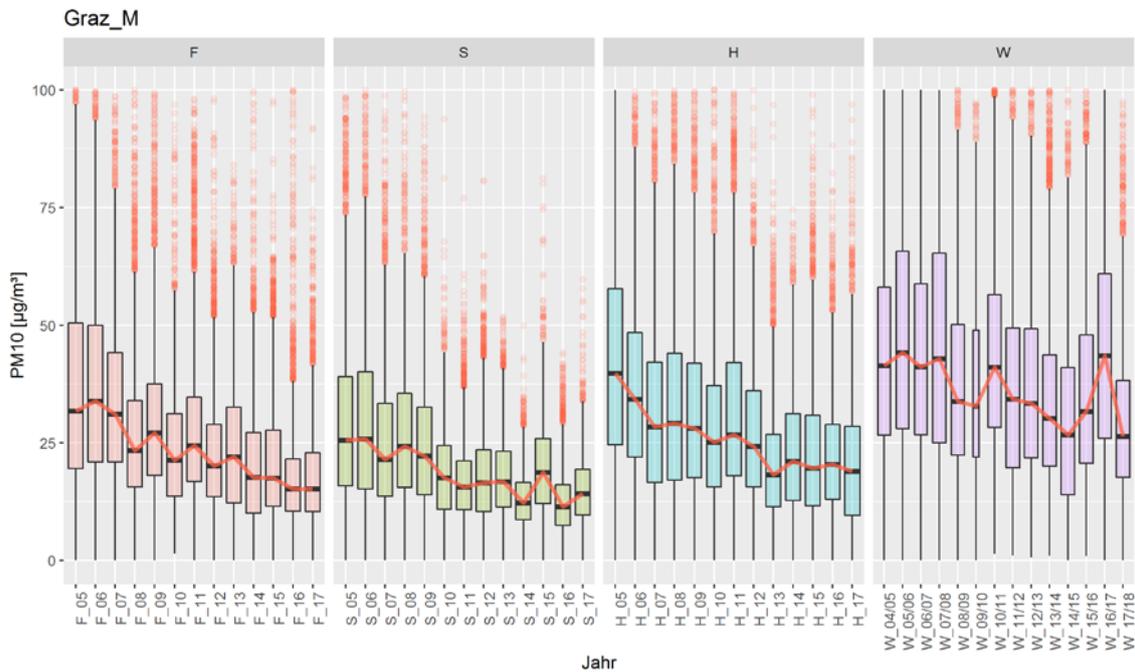


Abbildung 41: Entwicklung von Feinstaub PM<sub>10</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Mitte

### 5.2.2.2 NO<sub>2</sub>

Die folgende Abbildung 42 zeigt die Trendverläufe aller Grazer Messstellen über die Jahre 2005 bis 2017. Die Halbstundenmittelwerte pro Jahr und Jahreszeit sind mittels Boxplot aggregiert, pro Jahreszeit ist wurde eine Trendkurve berechnet. Wie schon in Abschnitt 1.3.2 bei der Darstellung der Jahresmittelwerte ausgeführt, weist der Trend der NO<sub>2</sub>-Belastung über die Jahre 2005 bis 2017 leicht nach unten. Der stärkere Rückgang bei der Station Graz Mitte ist teilweise auch durch eine Verlegung der Station im Winter 2009/2010 bedingt. Die Belastung ist im Winter am höchsten, im Sommer am geringsten und im Frühling etwas geringer als im Herbst. Nur bei der Station Don Bosco liegen Herbst und Frühling in etwa auf dem gleichen Niveau. Auch die Variabilität (Schwankungsbreite) der NO<sub>2</sub>-Werte ist im Winter etwas höher als in den anderen Jahreszeiten, allerdings nicht so deutlich wie bei PM<sub>10</sub>.

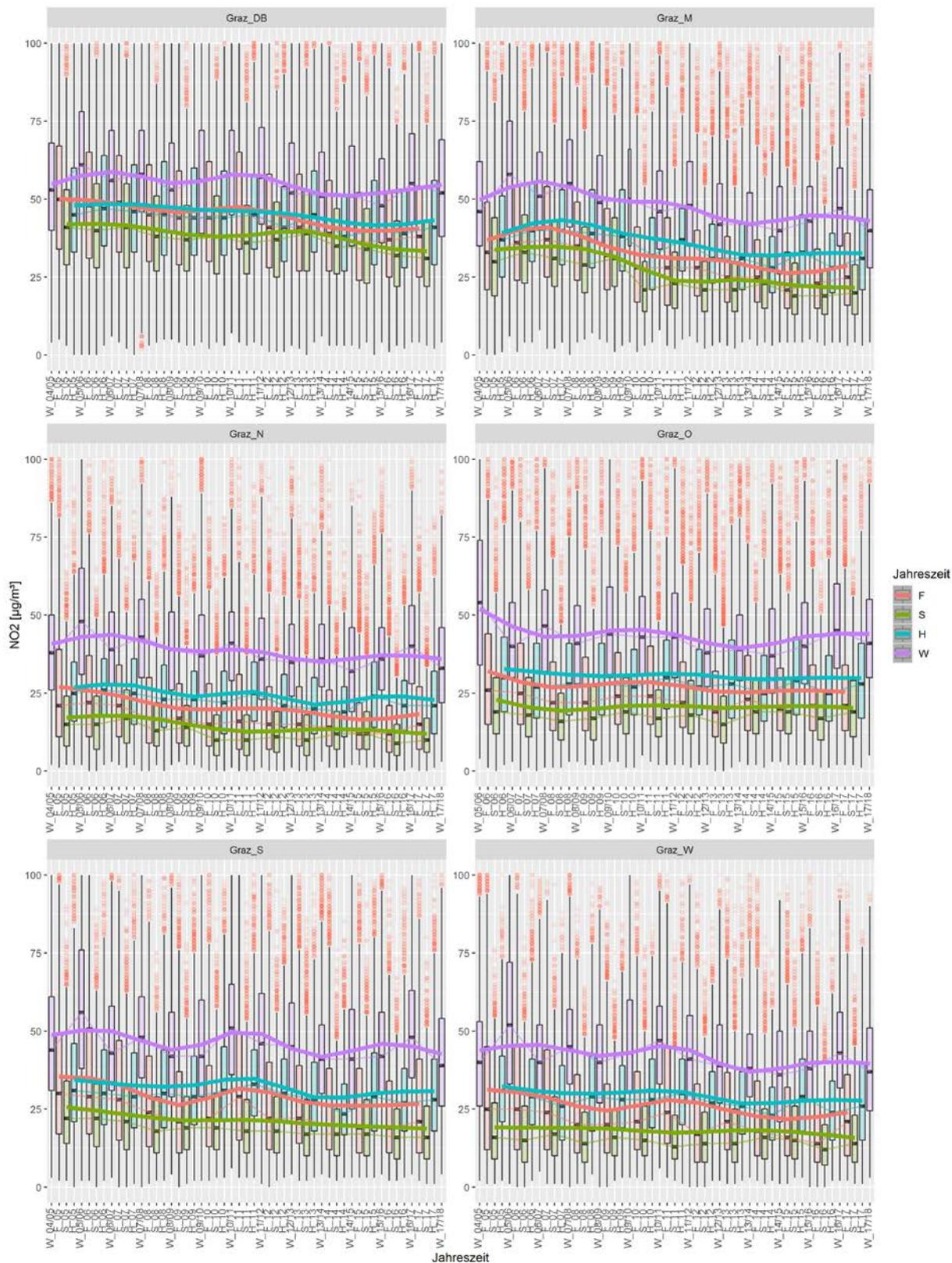


Abbildung 42: Entwicklung von NO<sub>2</sub> für jede Luftgütemessstelle pro Jahreszeit

Die folgenden Abbildungen zeigen die Trenddarstellungen der Stationen Don Bosco (Abbildung 43), Graz Süd (Abbildung 44) und Graz Mitte (Abbildung 45).

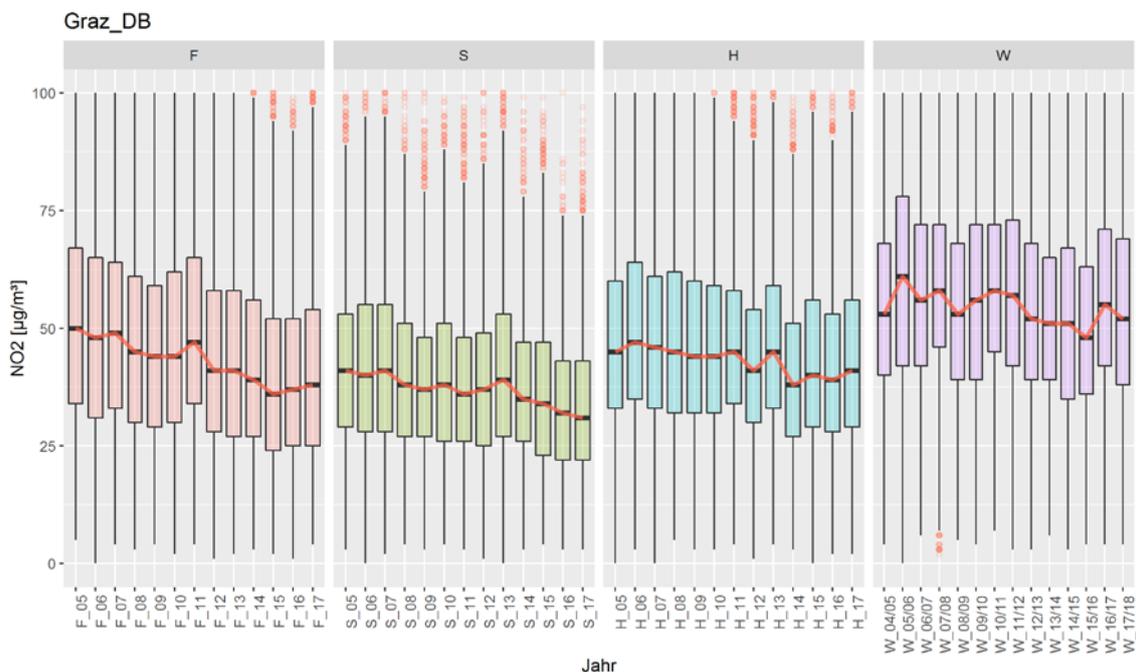


Abbildung 43: Entwicklung von NO<sub>2</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Don Bosco

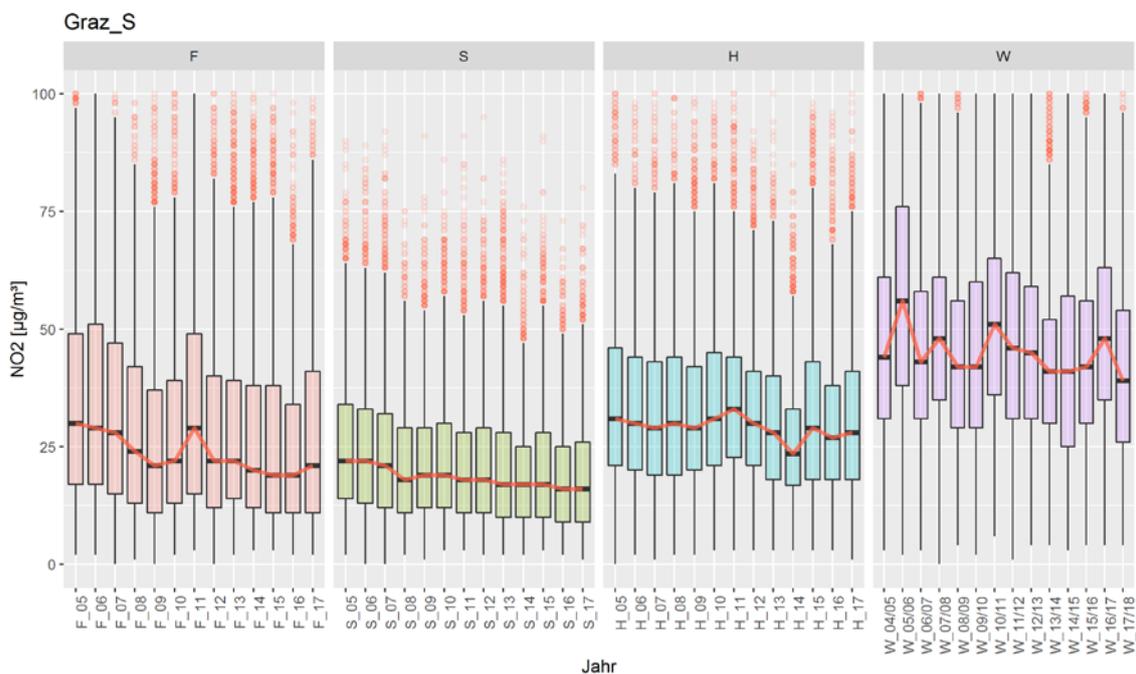


Abbildung 44: Entwicklung von NO<sub>2</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Süd

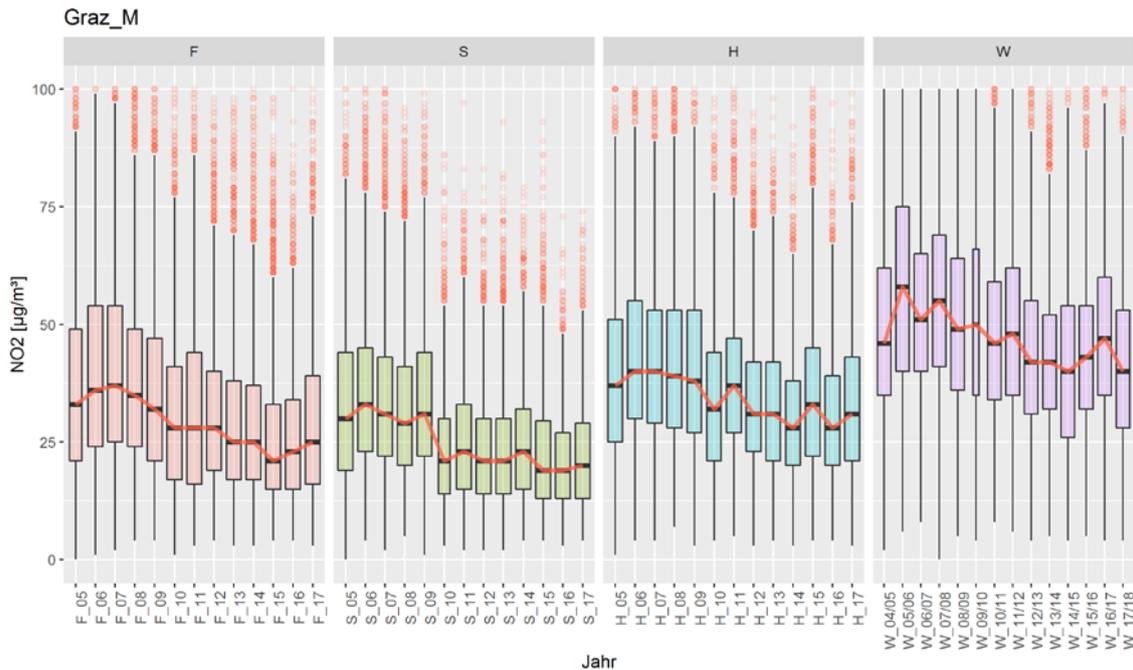


Abbildung 45: Entwicklung von  $\text{NO}_2$  im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Mitte

### 5.2.3 Tages- und Wochenverläufe

Die mittleren Wochenverläufe der  $\text{PM}_{10}$ -Halbstundenwerte sind in der Abbildung 46 dargestellt. Die Verläufe sind nach Jahreszeit gegliedert, für jede Jahreszeit sind die Trendkurven aller Stationen übereinandergelagert. Auf der horizontalen Achse sind die Wochentage und Tageszeiten von Montag 0:00 Uhr bis Sonntag 24:00 Uhr aufgetragen. Zur besseren Orientierung ist eine horizontale Referenzlinie bei  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in rot eingezeichnet.

An den Trendkurven sind deutliche Tagesverläufe mit zwei Spitzen täglich abzulesen, die im Sommer und an den Wochenenden (Samstag und Sonntag) weniger stark ausgeprägt sind, als an den Werktagen. Die höchsten Peaks sind in der Wochenmitte (Mittwoch und Donnerstag) und im Winter zu sehen, wobei hier Unterschiede zwischen den Stationen zu erkennen sind. Am Vormittag liegt der Peak zwischen 7:00 und 10:00 Uhr und am Abend zwischen 17:00 und 21:00 Uhr. Die niedrigsten Werte des Tages sind an Werktagen in den frühen Morgenstunden (ca. 3:00 bis 6:00) zu verzeichnen, während sie an den Wochenenden, vor allem sonntags, am Nachmittag zwischen 14:00 und 15:00 zu beobachten sind.

Auch die  $\text{NO}_2$ -Belastung (Abbildung 47) zeigt einen deutlichen Tagesverlauf mit 2 Spitzen täglich, mit messstellenspezifischen bzw. lokalen Unterschieden, hauptsächlich bedingt durch den Straßenverkehr. Die Spitzen sind an Werktagen stärker ausgeprägt, als an Wochenendtagen. Die Vormittagsspitzen liegen an Werktagen von 7:00 bis 10:00 Uhr, am Wochenende finden sie etwas später statt und sind deutlich schwächer ausgeprägt. Die Abendspitzen finden im Herbst und Winter von ca. 17:00 bis 21:00 Uhr statt und sind stärker ausgeprägt als im Sommer. Im Frühling und vor allem Sommer sind die Abendspitzen deutlich abgeschwächt und nach hinten verschoben (ca. 19 bis 22 bzw. 23 Uhr). Die geringste  $\text{NO}_2$ -Belastung eines Tages ist an den Werktagen in der Nacht um etwa 3:00 zu sehen, an den Wochenenden ist die Belastung am frühen Nachmittag (ca. 14:00) am geringsten.

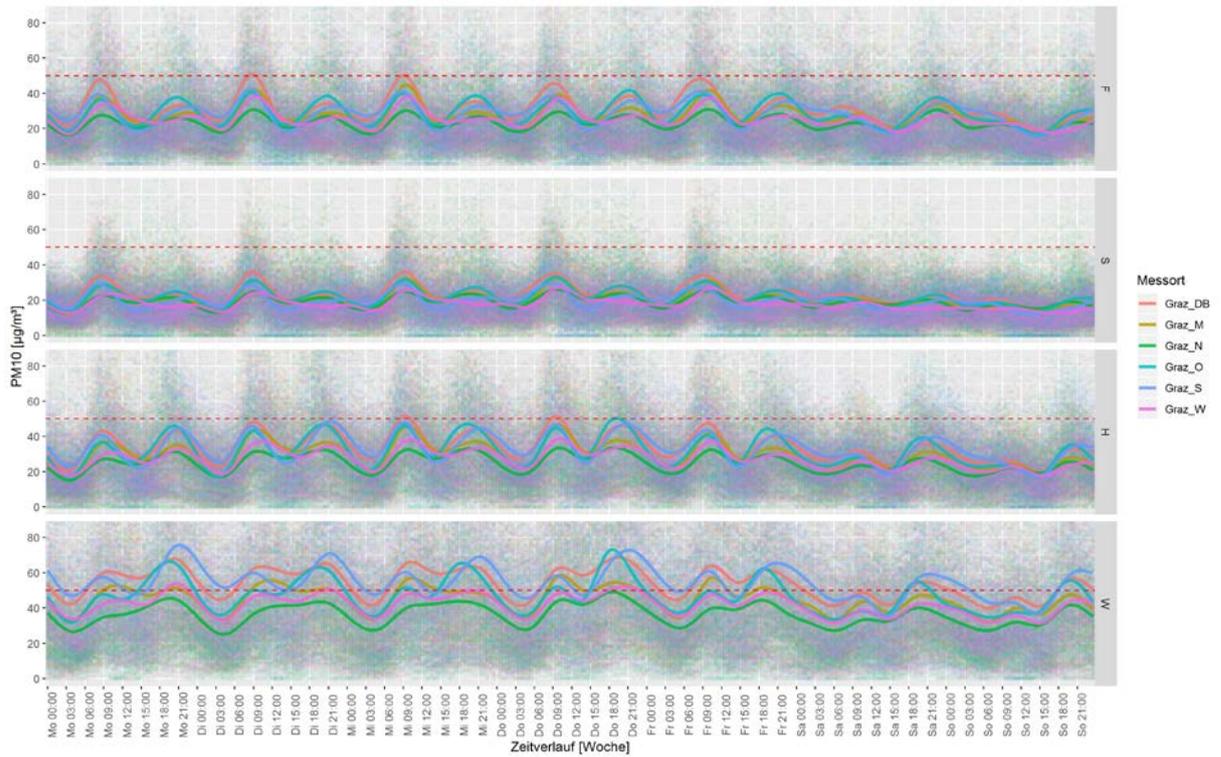


Abbildung 46: PM<sub>10</sub> im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen

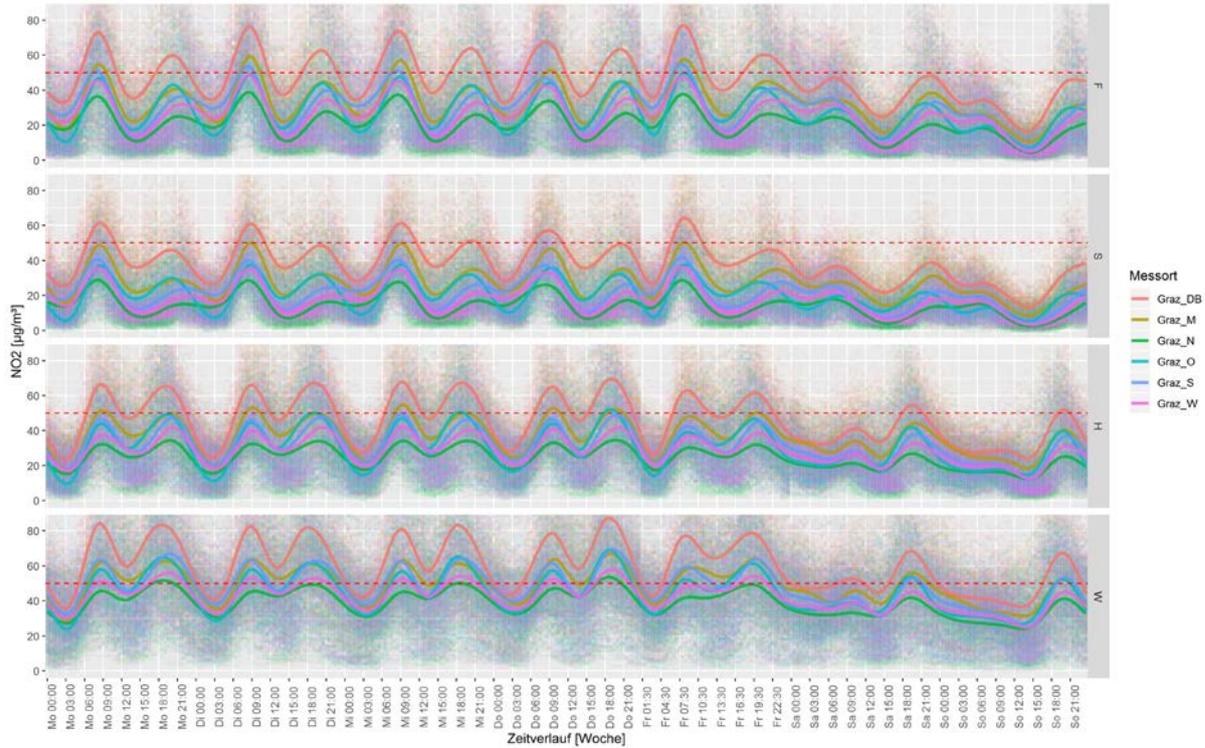


Abbildung 47: NO<sub>2</sub> im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen

Die Abbildung 48 zeigt den mittleren Tagesverlauf von PM<sub>10</sub> gegliedert nach Jahreszeit und Wochentagskategorie, wobei Samstage, Sonntage und Werktage (Montag bis Freitag) unterschieden werden. Auch hier ist die deutliche Abflachung der Spitzen im Sommer und an Wochenenden, auch im Winter, zu sehen. Ähnliches gilt für die Tagesverläufe von NO<sub>2</sub> in der Abbildung 49.

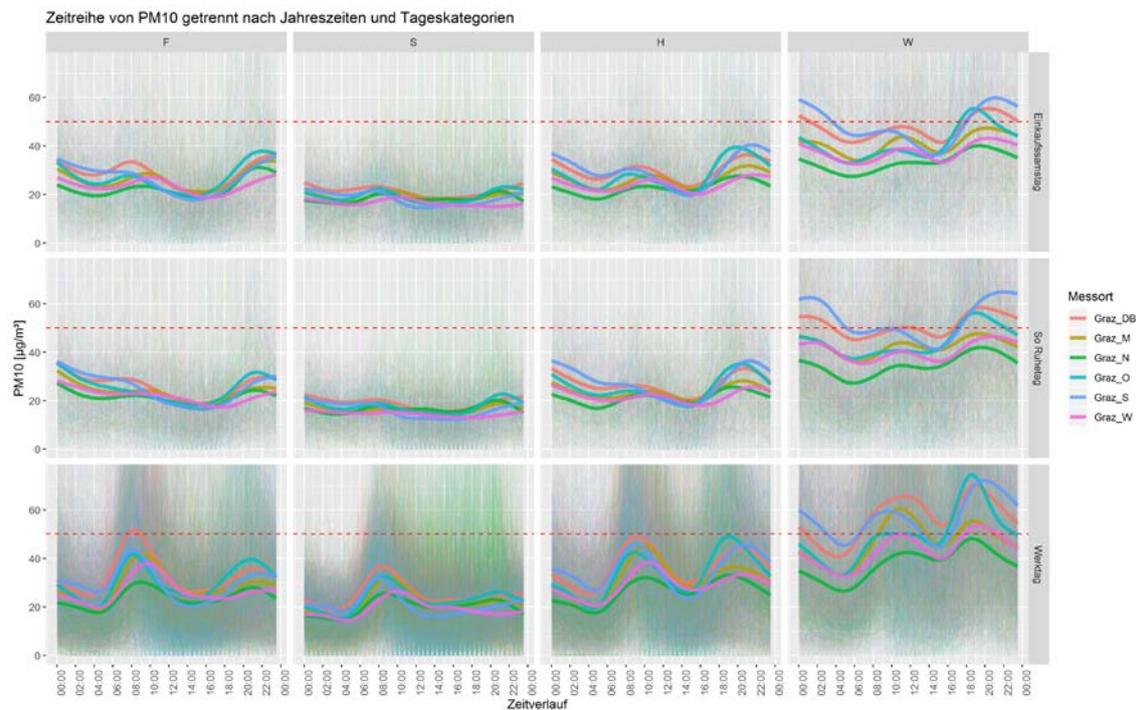


Abbildung 48: PM<sub>10</sub> im Tagesverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen

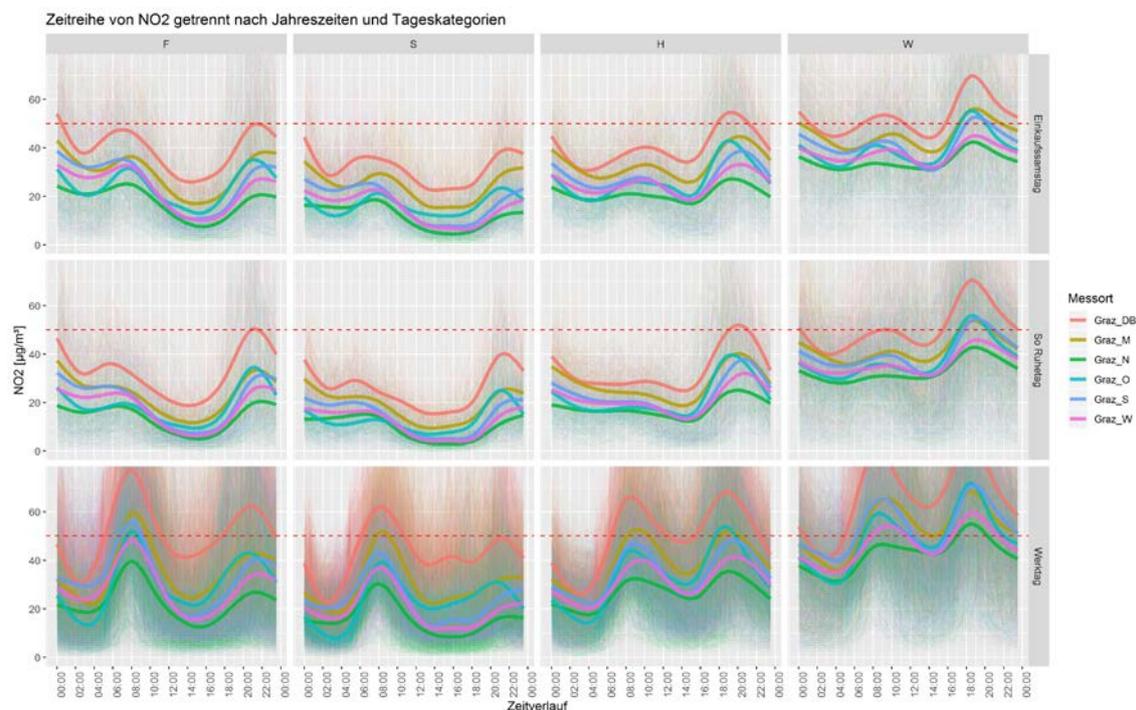


Abbildung 49: NO<sub>2</sub> im Tagesverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen

## 6 Ergebnisse der Zusammenhangsanalysen und statistische Modellierung

### 6.1.1 Zusammenhang zwischen NO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub>

Der folgenden Abbildung 50 können paarweise Korrelationen zwischen Luftschadstoffen und meteorologischen Parametern entnommen werden. Für PM<sub>10</sub> (STBK\_10K) und NO<sub>2</sub> ist die Korrelation über alle Messstationen bei über 60% (Cor 0,637). Somit geht ein Anstieg von NO<sub>2</sub> mit einem Anstieg von PM<sub>10</sub> einher. Diese hohe Korrelation kann auch in der Abbildung 51 im Tagesverlauf beobachtet werden.

Signifikant negative Korrelationen mit den Luftschadstoffen weisen vor allem Lufttemperatur (LUTE), Windgeschwindigkeit (WIGE) sowie der Temperaturunterschied zwischen Graz und Kalkleiten (LUTE\_diff.kalkleiten) auf. Die Luftfeuchtigkeit (LUFU) steht in einem negativen Zusammenhang mit der Lufttemperatur (LUTE) und der Windgeschwindigkeit (WIGE) sowie der Temperaturdifferenz zu Kalkleiten (LUTE\_diff.kalkleiten).

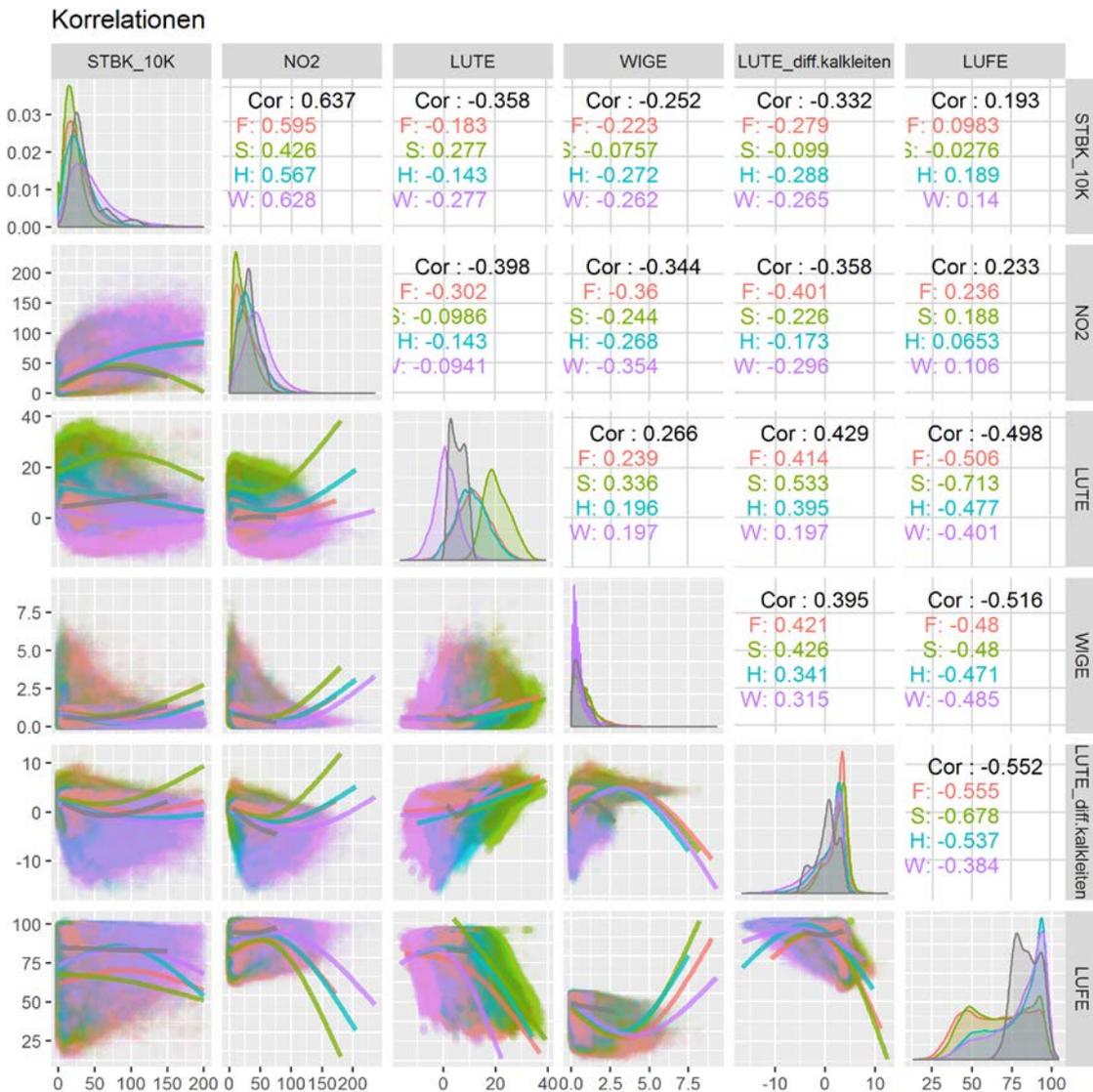


Abbildung 50: Korrelationsmatrix zwischen Luftschadstoffen und meteorologischen Parametern pro Jahreszeit für alle Messstationen

Aufgrund der hohen Korrelation zwischen  $PM_{10}$  und  $NO_2$  ist es naheliegend, diese beiden Luftschadstoffe simultan im Tagesverlauf zu betrachten. In der Abbildung 51 sind die Halbstundenmittelwerte als transparente farbige Punkte im Hintergrund und die Trendkurven für  $PM_{10}$  (strichlierte Linien) und  $NO_2$  (durchgezogene Linien), die einen mittleren Tagesverlauf repräsentieren, über der Tageszeit (0:00 bis 23:30) aufgetragen. Wie zu erwarten ist, steigen die Konzentrationen im Tageszyklus relativ zeitgleich an, wobei  $PM_{10}$  etwas träge reagiert und die Peaks vor allem im Winter ca. eine Stunde nach den  $NO_2$ -Spitzen auftreten.

Da  $NO_2$  (durchgezogene Linien) und  $PM_{10}$  (strichlierte Linien) auf der gleichen Skala aufgetragen sind, ist aus der Grafik auch ein direkter Vergleich der beiden Parameter abzulesen. Für die Station Don Bosco ist zu sehen, dass die Trendkurve der  $NO_2$ -Konzentration deutlich über der Kurve der  $PM_{10}$ -Konzentration liegt und die  $NO_2$ -Spitzen im Winter höher sind. Bei allen anderen Stationen sind  $PM_{10}$  und  $NO_2$  auf etwa dem gleichen Niveau, wobei teilweise die  $PM_{10}$ -Kurve höher liegt, als die  $NO_2$ -Kurve. Interessant sind die hohen Werte der  $PM_{10}$ -Kurve der Station Graz Süd in den Nachtstunden im Winter, die auf den Effekt von Emissionen durch Hausbrand hindeuten. An der Station Graz Mitte liegt die  $NO_2$ -Konzentration beim Vormittagspeak etwa gleich hoch wie  $PM_{10}$ , bei der Abendspitze ist jedoch  $NO_2$  deutlich höher als  $PM_{10}$ .

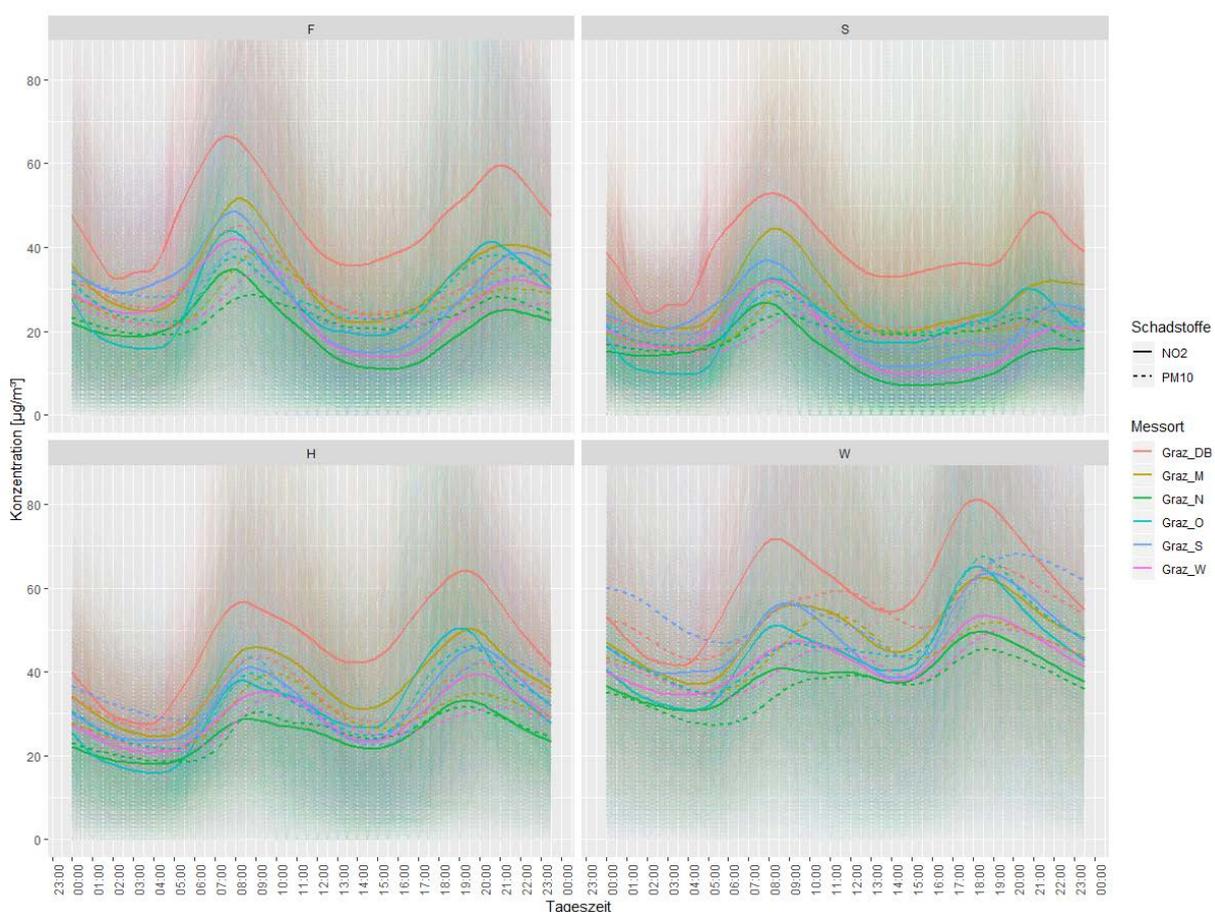


Abbildung 51:  $PM_{10}$  und bzw.  $NO_2$  im Tagesverlauf pro Jahreszeit, für alle Messstationen

### 6.1.2 Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur, Inversion und Windgeschwindigkeit

In der Abbildung 52 sind die Halbstundenmittelwerte der Lufttemperatur als transparente farbige Linien im Hintergrund und die Trendkurven für Lufttemperatur (durchgezogene Linien) und Windgeschwindigkeit (strichlierte Linien), die einen mittleren Tagesverlauf repräsentieren, über der Tageszeit (0:00 bis 23:30) aufgetragen. Temperatur und Windgeschwindigkeit zeigen bei fast allen Stationen einen ähnlichen Tagesverlauf mit Maximalwerten am frühen Nachmittag (14:00 bis 15:00) in Frühling, Herbst und Winter bzw. etwas später (ca. 16:00) im Sommer<sup>20</sup>. Die Kurven der Lufttemperatur sind bei allen Stationen nahezu gleich, bis auf leicht höhere Temperaturen bei der Station Graz Mitte. Bemerkenswert sind die deutlich flacheren Trendkurven der Windgeschwindigkeit für die Station Graz Nord (grüne strichlierte Linie), wo auch in den Nacht- und frühen Morgenstunden größere Windgeschwindigkeiten herrschen. In abgeschwächter Form trifft das auch auf die Station Graz Mitte zu<sup>21</sup>.

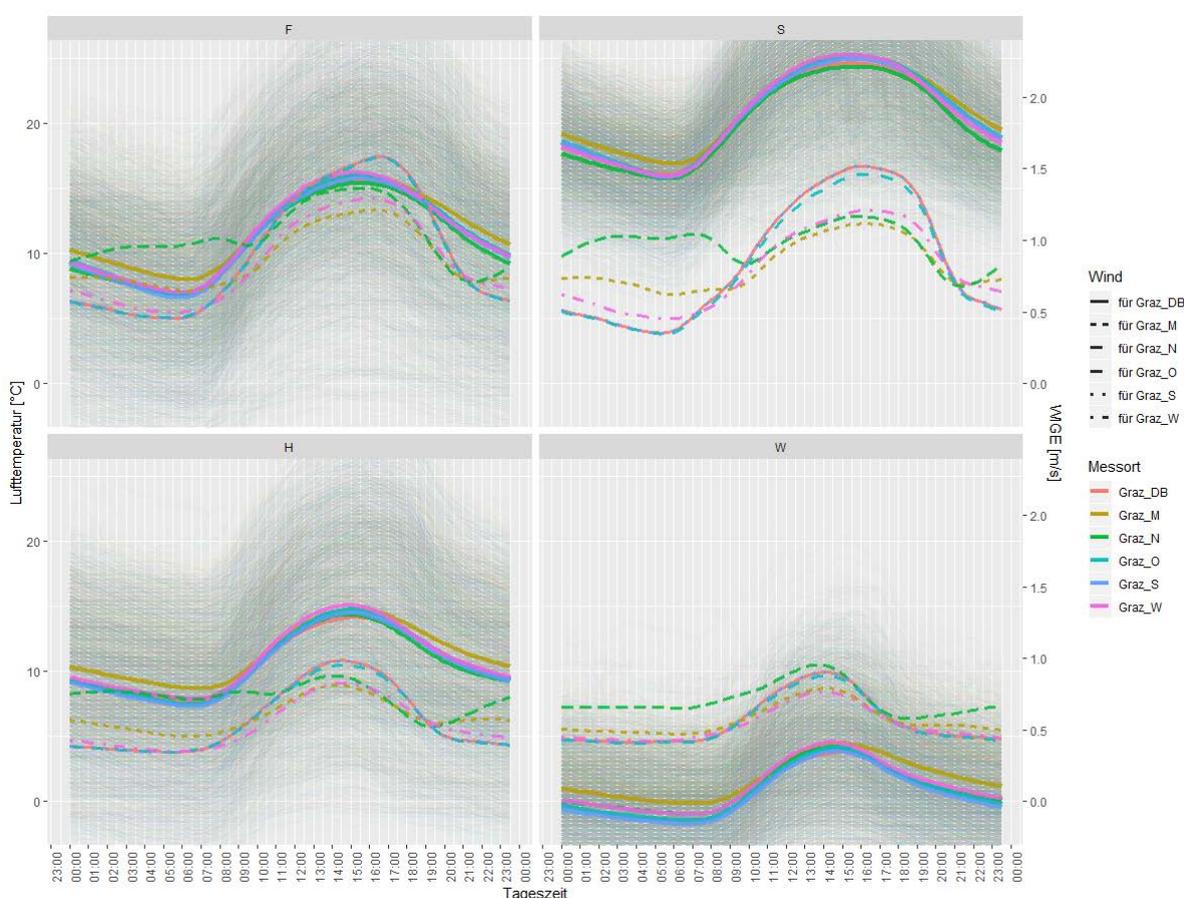


Abbildung 52: Lufttemperatur (y-Achse links) bzw. Windgeschwindigkeit (y-Achse rechts) im Tagesverlauf pro Jahreszeit, für alle Messstationen

Auch die Darstellung der Trendkurven für den Tagesverlauf der Lufttemperaturdifferenz zwischen Graz und Kalkleiten (abzulesen auf der linken vertikalen Achse) und der Windgeschwindigkeit

<sup>20</sup> In erster Linie aufgrund der mitteleuropäischen Sommerzeit, die in den Sommermonaten auf der horizontalen Achse dargestellt ist, ist das Tagesmaximum nach hinten verschoben.

<sup>21</sup> Mögliche Ursache ist die Nähe zum Mur-Fluss: Graz Nord liegt auf freiem Gelände etwa 200m entfernt, Graz Mitte liegt ca. 250m von der Mur entfernt, allerdings in stark verbautem Gebiet.

(rechte vertikale Achse) in Abbildung 53 zeigt ein ähnliches Bild. Es ist zu sehen, dass die Temperaturdifferenz zu Kalkleiten auch im Sommer in den frühen Morgenstunden (5:00 bis 6:00) oft unter 0 Grad sinkt, diese Inversionslagen dauern in den Sommermonaten allerdings meist nur kurz an. Im Winter befindet sich die mittlere Temperaturdifferenz zu Kalkleiten für ca. zwei Drittel des Tages unter 0 Grad, nur am Nachmittag befindet sich die Trendkurve über der 0-Grad-Linie.

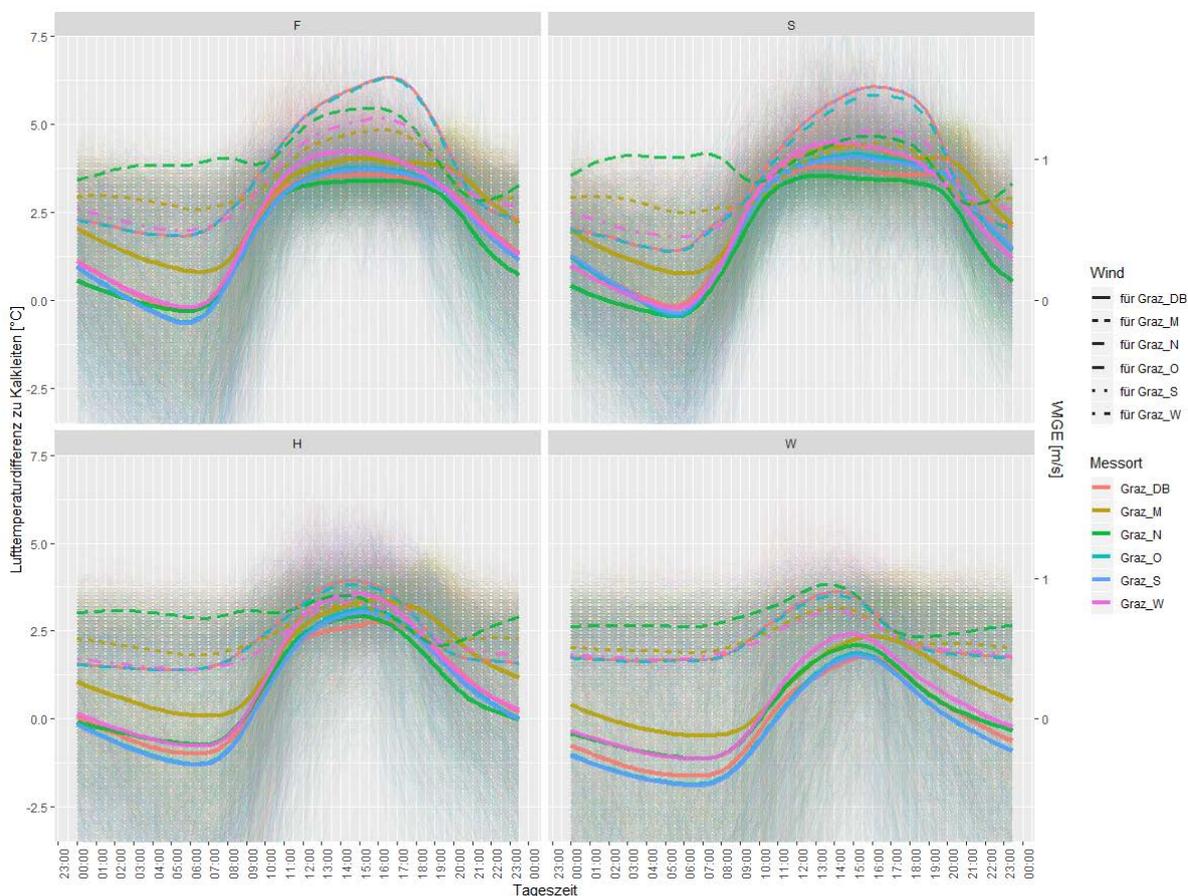


Abbildung 53: Temperaturdifferenz zwischen Graz und Kalkleiten (y-Achse links) bzw. Windgeschwindigkeit (y-Achse rechts) im Tagesverlauf pro Jahreszeit, für alle Messstationen

Die Abbildung 54 beleuchtet den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz Graz zu Kalkleiten und der Windgeschwindigkeit in Form von Scatterplots für die Wintersaisonen der Jahre 2012/2013 bis 2017/2018. In der Grafik sind alle Stationen dargestellt, die Einfärbung der Punkte erfolgte nach der Lufttemperatur (Minusgrade, keine Minusgrade). Die Plots zeigen eine positive Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten. Außerdem ist zu sehen, dass bei Windgeschwindigkeiten über 2 m/s praktisch keine Inversionslagen mehr auftreten. Eine Ausnahme bildet Graz Nord, wo auch bei höheren Windgeschwindigkeiten die Temperaturdifferenz zu Kalkleiten unter 0 Grad liegen kann.

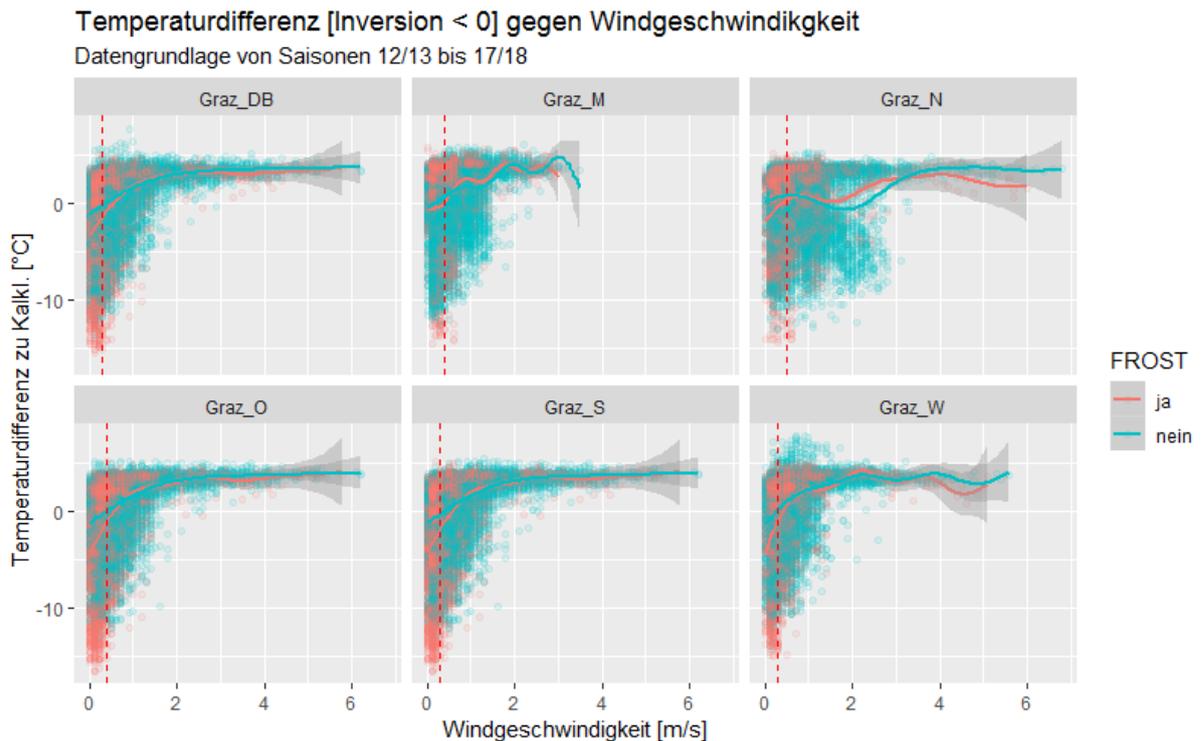


Abbildung 54: Temperaturdifferenz gegen Windgeschwindigkeit pro Messstation, nur Winter

### 6.1.3 Zusammenhang zwischen Luftschadstoffen und meteorologischen Parametern

In den folgenden Abschnitten wird der Zusammenhang zwischen der Belastung mit Luftschadstoffen und meteorologischen Parametern untersucht.

#### 6.1.3.1 Einfluss von Lufttemperatur und Temperaturdifferenz/Inversion

In den folgenden beiden Grafiken (Abbildung 55 und Abbildung 56) sind Scatterplots zu sehen, die den Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und  $PM_{10}$  bzw.  $NO_2$  illustrieren. Die dargestellten Halbstundenmesswerte wurden in drei Klassen für das „Alter“ des Messergebnisses eingeteilt und dem entsprechend eingefärbt (rot für Messungen bis 2008, grün für Messungen im Zeitraum 2009 bis 2013 und blau für Messungen ab 2014).

Sowohl die Trendkurven von  $NO_2$  als auch von  $PM_{10}$  zeigen einen negativen Zusammenhang mit der Lufttemperatur, der bei  $NO_2$  (Abbildung 56) nahezu linear erscheint, für  $PM_{10}$  (Abbildung 55) jedoch eine leichte Wannenform aufweist und bei sehr hohen Lufttemperaturen wieder etwas höhere Feinstaubwerte liefert<sup>22</sup>. Hinzuweisen ist auch auf die etwas steilere bzw. im Fall von  $PM_{10}$  stärker gekrümmte Form der Trendkurve für die Daten vor 2009 (rote Kurven). Dies und die Tatsache, dass die roten Kurven sowohl bei  $PM_{10}$  als auch bei  $NO_2$  höher liegen als jene der späteren Perioden, lässt sich durch die verschiedenen Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität (Umstellung Winterdienst, Geschwindigkeitsbeschränkungen, effizientere Abgasreinigung, ...) erklären.

<sup>22</sup> Mögliche Ursachen sind vermehrte Staubbildung durch große Trockenheit in heißen Sommerperioden. Aber auch ein Effekt der automatischen Abschaltung von Abgasreinigungsanlagen bei hohen Außentemperaturen kann nicht ausgeschlossen werden.

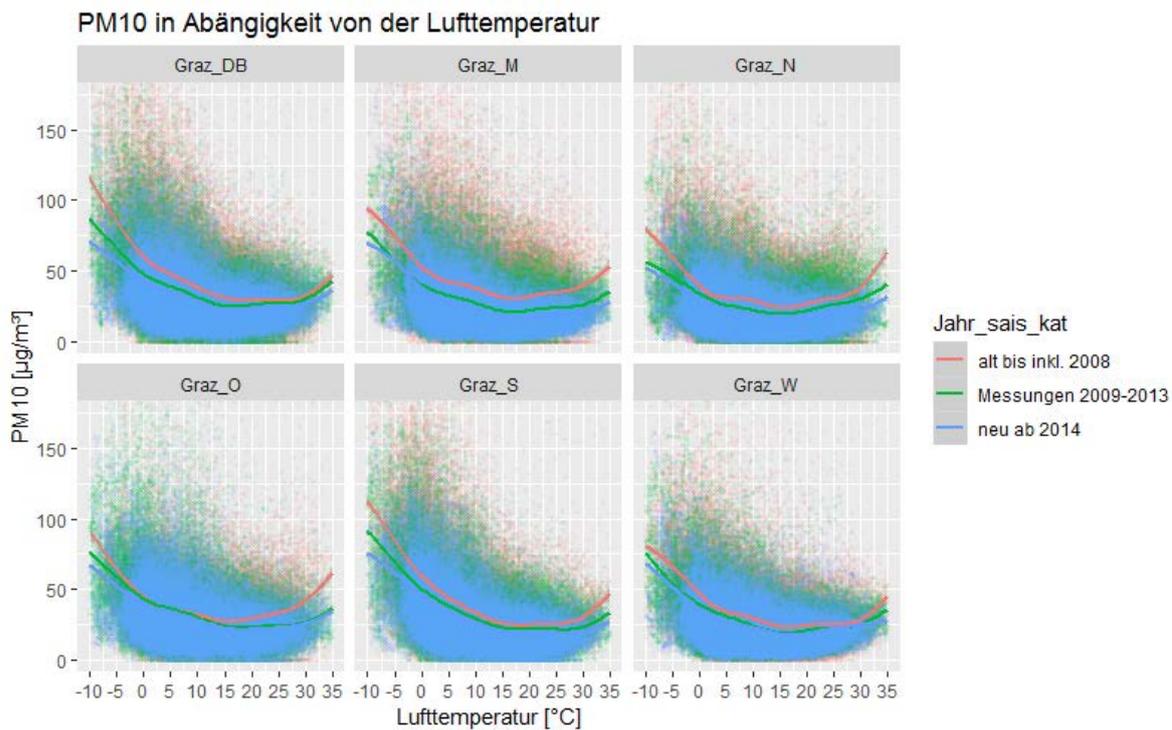


Abbildung 55:  $PM_{10}$  gegen Lufttemperatur pro Messstation

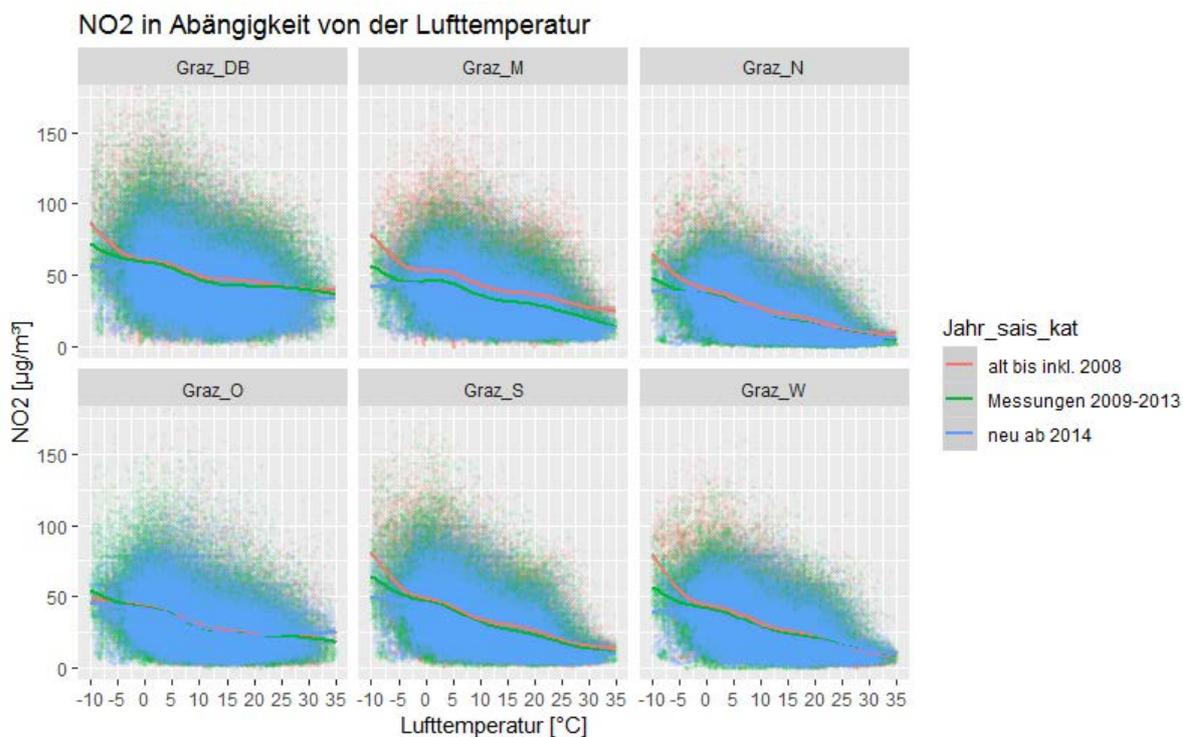


Abbildung 56:  $NO_2$  gegen Lufttemperatur pro Messstation

Der Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz von Graz zu Kalkleiten, die als „Stärke“ der Inversion angesehen werden kann, und  $PM_{10}$  bzw.  $NO_2$  ist in Abbildung 57 bzw. Abbildung 59

dargestellt. In den Grafiken sind nur Daten aus den Wintersaisons enthalten, die Punkte sind nach Vorherrschen von Minusgraden in Graz eingefärbt und dem entsprechend sind auch zwei Trendkurven dargestellt. Der Zusammenhang ist sowohl für  $PM_{10}$  als auch für  $NO_2$  negativ. Je stärker die Inversion, also negativer die Temperaturdifferenz, desto höher ist tendenziell  $PM_{10}$  bzw.  $NO_2$ . Die Trendkurven unterscheiden sich allerdings vor allem bei  $PM_{10}$  zwischen den Messstationen beträchtlich. Bei der Station Graz Süd steigt die  $PM_{10}$ -Belastung mehr oder weniger kontinuierlich mit sinkender Temperaturdifferenz, d.h. stärker werdender Inversion. Bei den Stationen Don Bosco und Graz Mitte ist der Zusammenhang schwächer ausgeprägt, die Kurve ist also weniger steil, aber auch hier kann bei Vorliegen einer Inversion (d.h. negativer Temperaturdifferenz) ein weiterer Anstieg vom  $PM_{10}$  beobachtet werden. Bei den Stationen Graz Nord, Ost und West ist bei Temperaturdifferenzen unter null Grad, d.h. mit stärker werdender Inversion, kein weiterer Anstieg der Feinstaubkonzentration zu sehen, lediglich bei positiven Temperaturdifferenzen (also keine Inversion) sinken die  $PM_{10}$ -Werte.

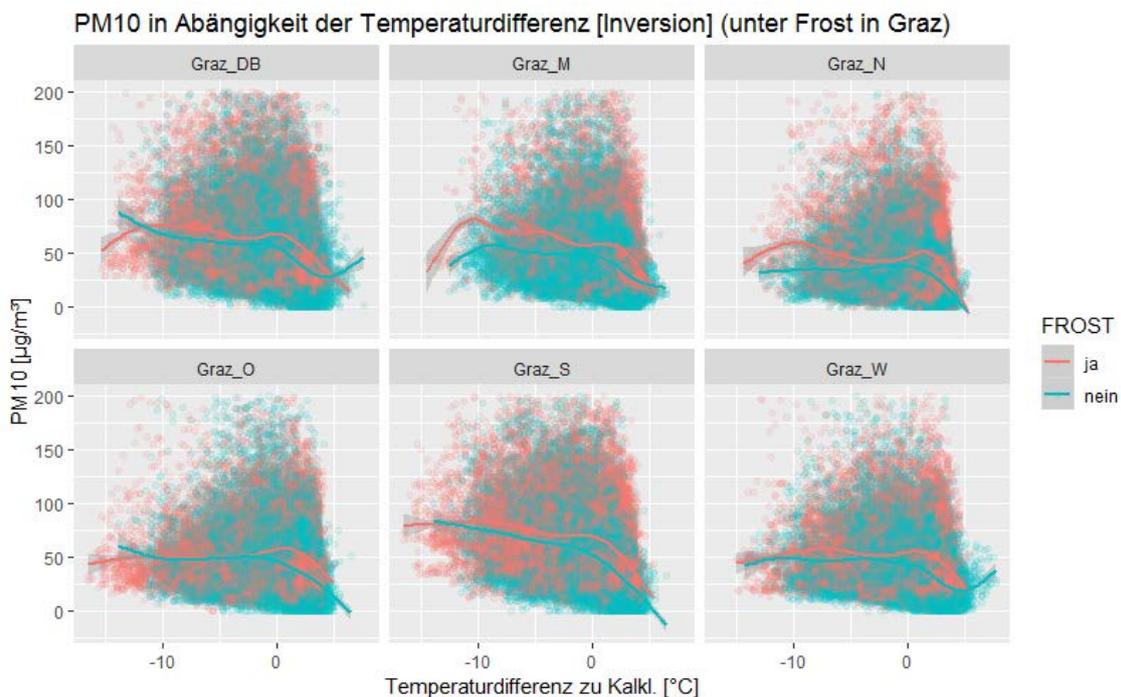


Abbildung 57:  $PM_{10}$  gegen Temperaturdifferenz zu Kalkleiten pro Messstation, nur Wintersaisons

Die Abbildung 58 zeigt den Zusammenhang zwischen der Dauer einer Inversion und dem Tagesmittelwert der  $PM_{10}$ -Belastung. Die Inversionsdauer ist dabei die Anzahl der aufeinanderfolgenden Inversionstage inklusive dem aktuell betrachteten Tag. Wenn der aktuell betrachtete Tag kein Inversionstag ist, so ist die Dauer Null, wenn nur am aktuellen Tag eine Inversion vorliegt, am Vortag jedoch nicht, so ist die Dauer Eins, etc. Die  $PM_{10}$ -Konzentration steigt leicht mit der Dauer der Inversion, wobei jedoch der Unterschied zwischen keinem und einem Inversionstag (also zwischen 0 und 1) am stärksten ist. Bis zu einer Dauer von ca. 5 aufeinanderfolgenden Inversionstagen ist ein leichter  $PM_{10}$ -Anstieg zu sehen, ab 5 Tagen ist jedoch keine weitere Erhöhung der  $PM_{10}$ -Belastung mehr zu erkennen.

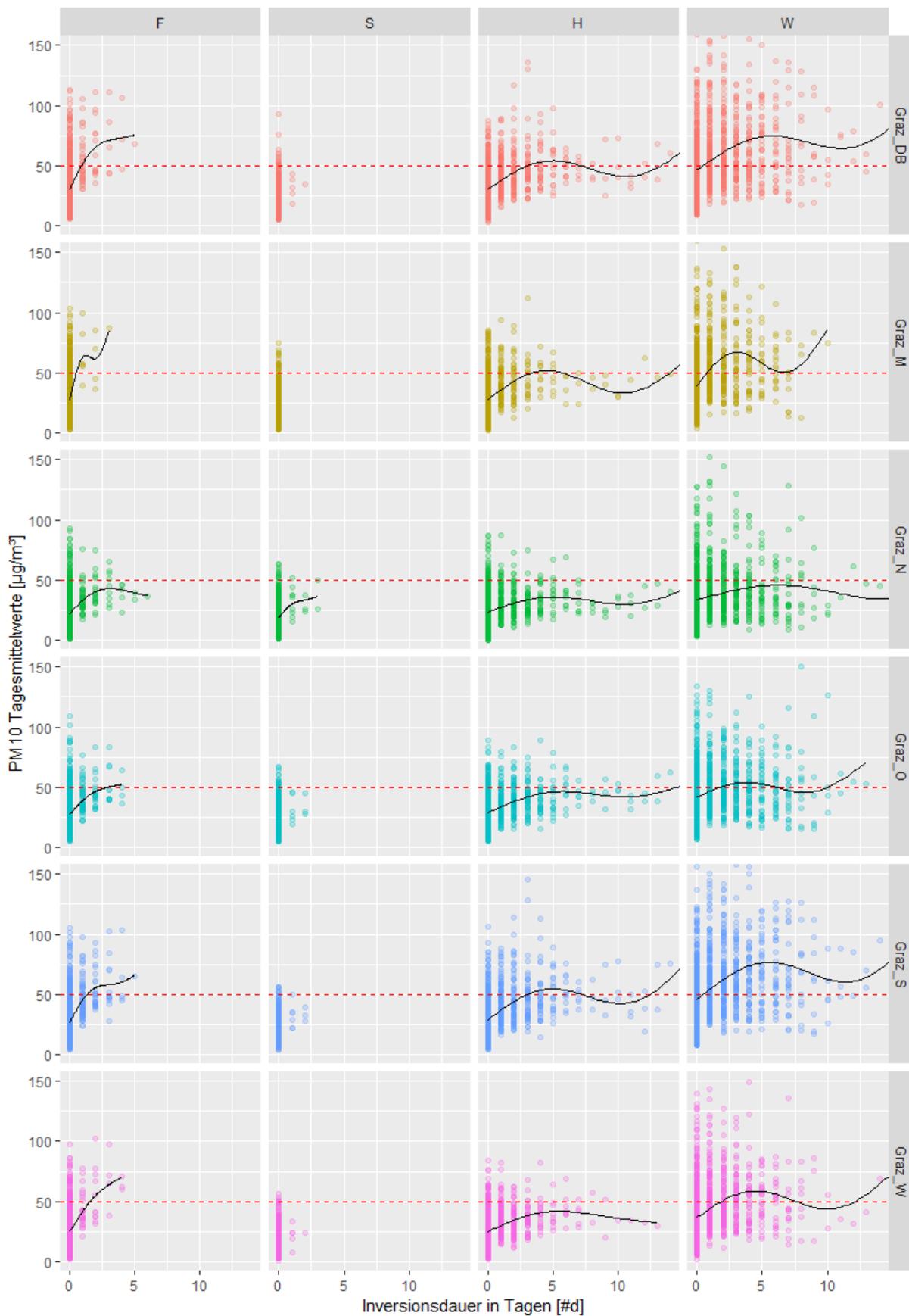


Abbildung 58: PM<sub>10</sub> gegen die Inversionsdauer in Tagen pro Messstation und Jahreszeit

Bei der Darstellung von  $\text{NO}_2$  in Abhängigkeit von der Inversionsstärke (Abbildung 59) fällt auf, dass sich die mittlere  $\text{NO}_2$ -Belastung bei Vorhandensein einer Inversion (d.h. Temperaturdifferenz kleiner 0) kaum verändert, das Niveau ist vor allem bei Frost (rote Linie) gleichbleibend bis zu einer Temperaturdifferenz von 0 Grad. Das bedeutet, dass eine Inversion von 1 Grad den gleichen Effekt hat, wie eine Inversion von 10 Grad. Steigt die Temperaturdifferenz über 0 an (Inversion löst sich auf), so sinkt die  $\text{NO}_2$ -Konzentration der Luft steil ab. Dieses Verhalten ist bei allen Messstationen zu beobachten und weist darauf hin, dass für eine erhöhte  $\text{NO}_2$ -Belastung schon schwache Inversionen, mit geringen Temperaturunterschieden zu Kalkleiten und kurzer Dauer, ausreichen.

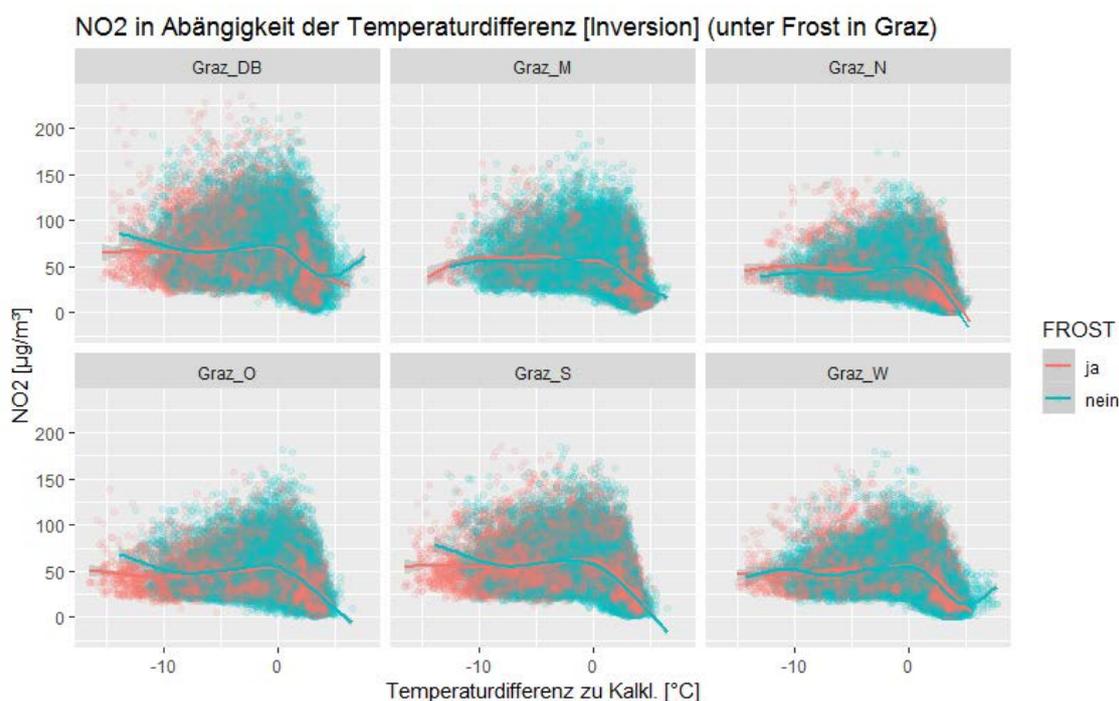


Abbildung 59:  $\text{NO}_2$  gegen Temperaturdifferenz zu Kalkleiten pro Messstation, nur Wintersaisonen

### 6.1.3.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit

Der Zusammenhang zwischen  $\text{PM}_{10}$ - bzw.  $\text{NO}_2$ -Belastung und Windgeschwindigkeit ist in der Abbildung 60 bzw. der Abbildung 61 dargestellt. Die beobachteten Halbstundenmittelwerte sind entsprechend dem Vorliegen von Frost in Graz rot oder blau eingefärbt. Die Abbildungen zeigen, dass die Schadstoffbelastung mit steigender Windgeschwindigkeit sinkt, wobei ab ca. 2 m/s kaum mehr eine Verringerung der  $\text{PM}_{10}$ - bzw.  $\text{NO}_2$ -Belastung zu sehen ist. Von Windstille bis zu einer Windgeschwindigkeit von ca. 2 m/s ist jedoch, mit kleinen messstellenspezifischen Unterschieden, ein deutlicher Abfall der  $\text{PM}_{10}$ - bzw.  $\text{NO}_2$ -Konzentration zu sehen<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Der Median der Windgeschwindigkeit in Graz liegt bei 0,5 bis 0,6 m/s, siehe Abbildung 28.

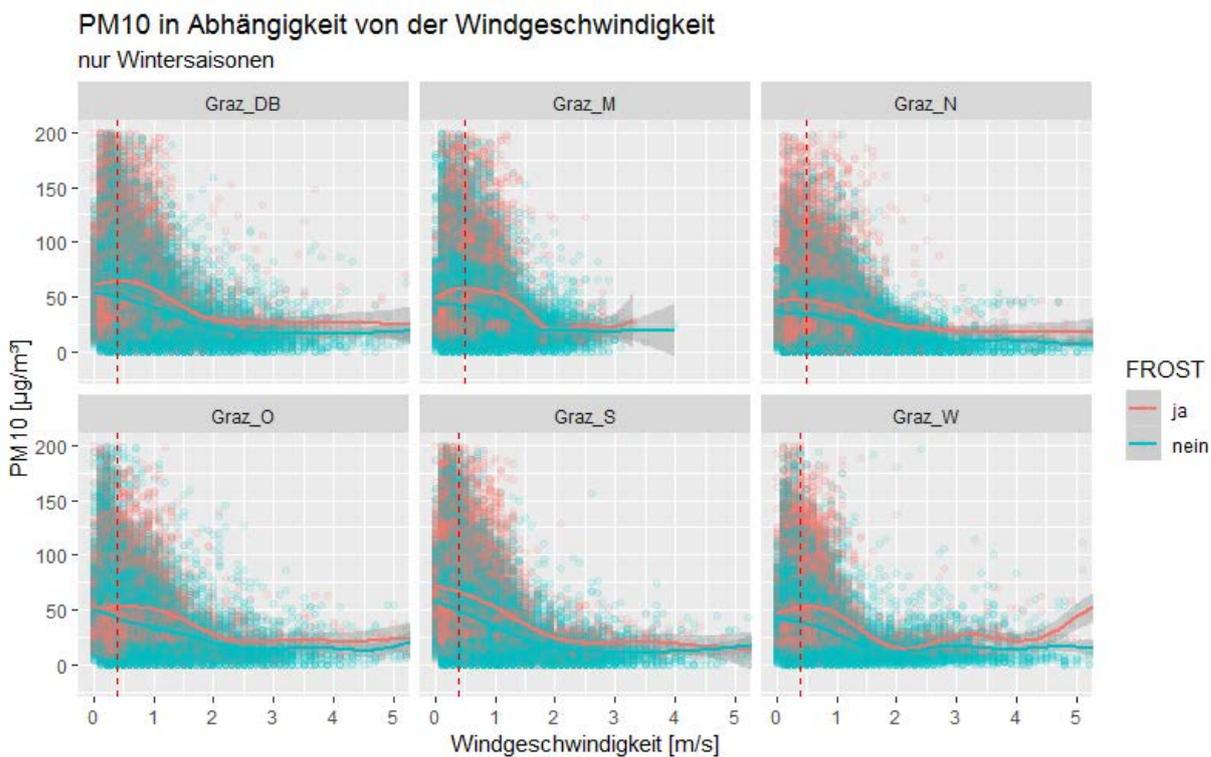


Abbildung 60:  $\text{PM}_{10}$  gegen Windgeschwindigkeit pro Messstation, nur Wintersaisonen

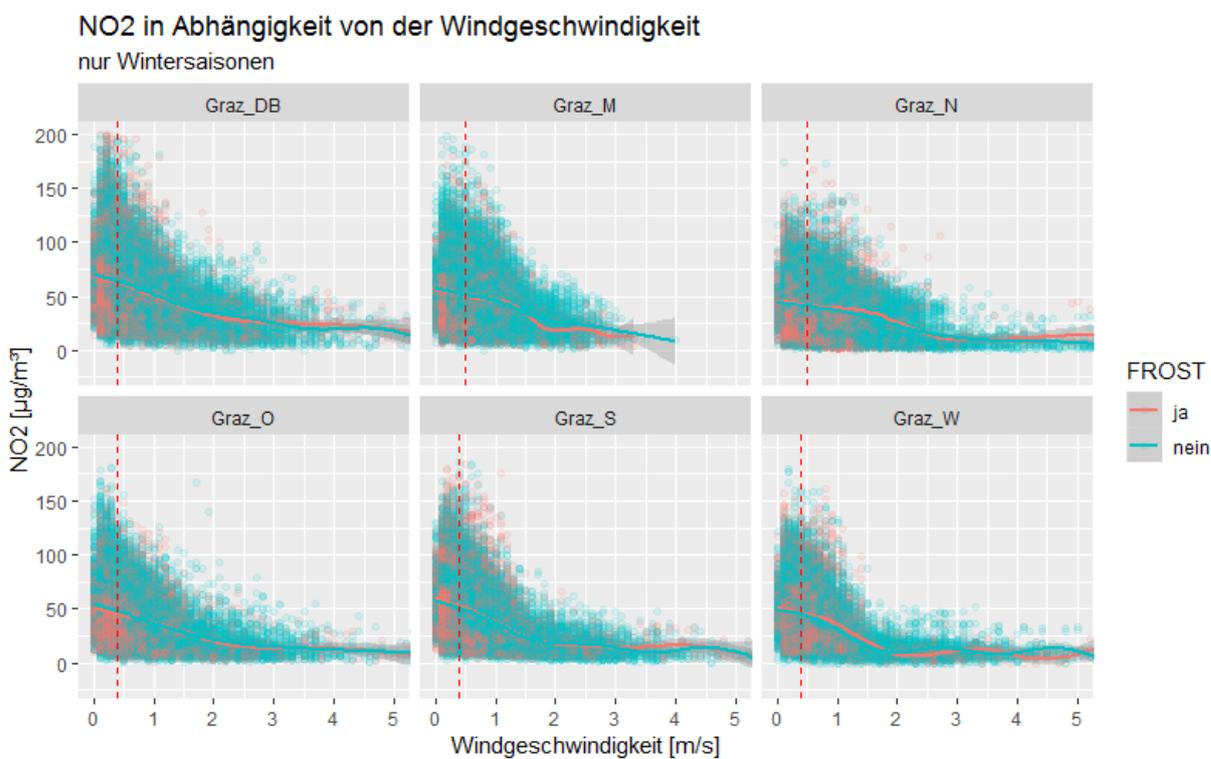


Abbildung 61:  $\text{NO}_2$  gegen Windgeschwindigkeit pro Messstation, nur Wintersaisonen

### 6.1.3.3 Einfluss der Windrichtung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Windrichtung auf die PM<sub>10</sub>- bzw. NO<sub>2</sub>-Belastung untersucht. Da es sich bei den Grafiken um komplexe Darstellungen handelt, sind die wesentlichen aus den Grafiken ableitbaren Aussagen im folgenden Textfeld zusammengefasst. Die Grafiken und deren Beschreibung sind in den nachfolgenden Absätzen zu finden, ein genaues Studium ist jedoch für die Interpretation der Ergebnisse dieser Studie nicht erforderlich.

Bei Windstärken über 0,6 m/s und Windrichtung Nord-West kommt es zu einer Verringerung der PM<sub>10</sub>-Belastung, wobei dieser Rückgang im Herbst und Winter stärker ausgeprägt ist und alle Stationen ein ähnliches Verhalten zeigen.

Bei höherer Windgeschwindigkeit (über 0,6 m/s) führt, je nach Lage der Messstation, Wind aus Nord-Westen und/der Süd-Osten zu einer Verringerung der NO<sub>2</sub>-Konzentration. Bei der Station Don Bosco ist dieser Rückgang am schwächsten ausgeprägt.

Bei Vorliegen einer Inversion wirkt sich die Windrichtung nicht auf die Belastung mit PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> aus, da der Wind bei Inversionslagen meist zu schwach ist.

Die folgenden Grafiken (Abbildung 62 bis Abbildung 65) zeigen den Einfluss der Windrichtung auf die PM<sub>10</sub>- (STBK\_10K) und NO<sub>2</sub>-Belastung. Die Grafiken sind eine spezielle Form von Scatterplots, bei der die horizontale Achse auf einem Kreis dargestellt ist und die Schadstoffkonzentrationen von innen nach außen aufgetragen werden. Punkte nahe der Kreismitte entsprechen niedrigen Konzentrationen und Punkte nahe am Außenradius bedeuten hohe PM<sub>10</sub>- bzw. NO<sub>2</sub>-Werte. Die rote strichlierte Kreislinie entspricht einer Konzentration von 50 µg/m<sup>3</sup>. Die Trendkurven für PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> sind hier als mehr oder weniger kreisförmige Linien dargestellt, je kleiner die dargestellten Kreise oder kreisähnlichen Formen, desto geringer ist die Belastung in der jeweiligen Jahreszeit und Gruppe.

In Abbildung 62 sind die Feinstaubwerte in Abhängigkeit von der Windrichtung, gegliedert nach Jahreszeit und Windgeschwindigkeitsklasse (über bzw. unter 0,6 m/s) dargestellt. Bei Windstärken unter 0,6 m/s sind die Trendlinien nahezu kreisförmig, über 0,6 m/s Windgeschwindigkeit ist eine Einbuchtung des Kreises (d.h. eine Verringerung der Belastung) bei ca. 315 Grad zu sehen, was der Windrichtung Nord-West entspricht.

Die Abbildung 63 zeigt eine vergleichbare Grafik für NO<sub>2</sub>, wobei hier die Trendlinie bei höheren Windgeschwindigkeiten deutlich von der Kreisform abweichen. Je nach Lage der Messstation führt Wind aus Nord-Westen und/der Süd-Osten zu einer Verringerung der NO<sub>2</sub>-Konzentration.

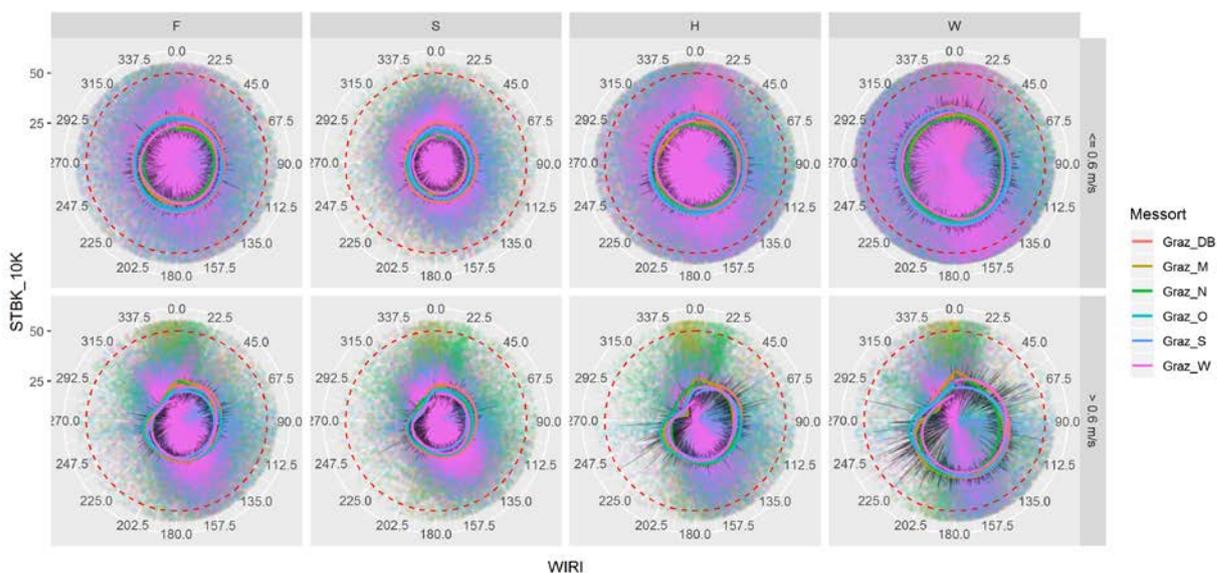


Abbildung 62:  $PM_{10}$  gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Windstärkenklasse

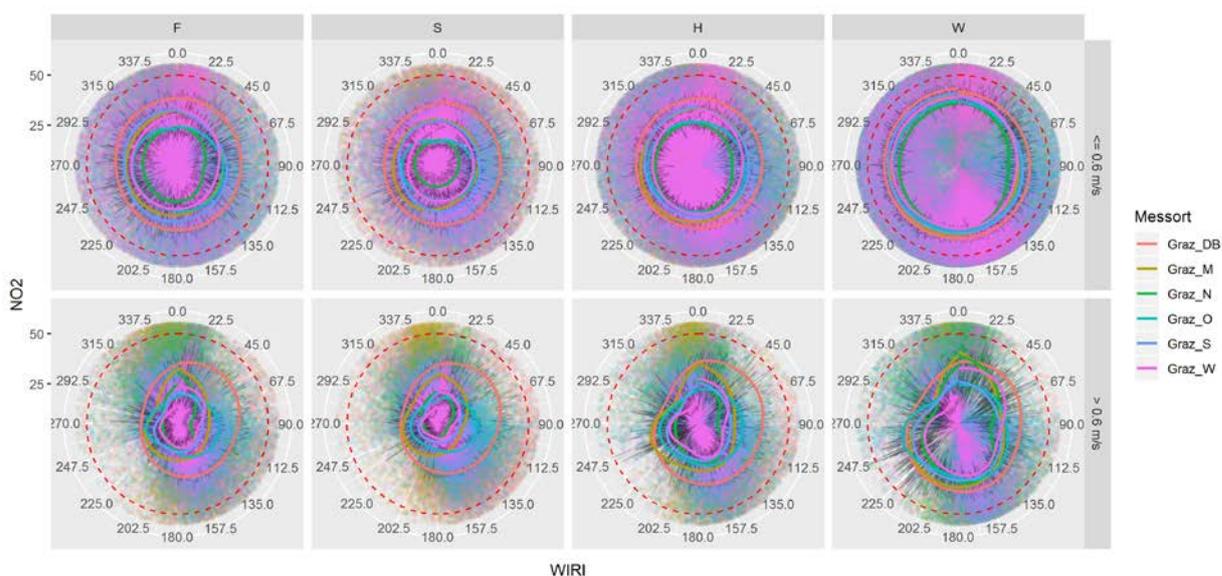


Abbildung 63:  $NO_2$  gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Windstärkenklasse

Ähnlich wie die beiden vorigen sind die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 64 und Abbildung 65) zu sehen. Hier findet die Gliederung danach statt, ob eine Inversionslage vorliegt oder nicht. Auch dabei sind die Trendkurven bei Vorliegen einer Inversion deutlich kreisförmiger und haben größere Radien. Wenn keine Inversion vorliegt wirken Winde aus Nord-West bzw. Süd-Ost reduzierend auf die Schadstoffbelastung.

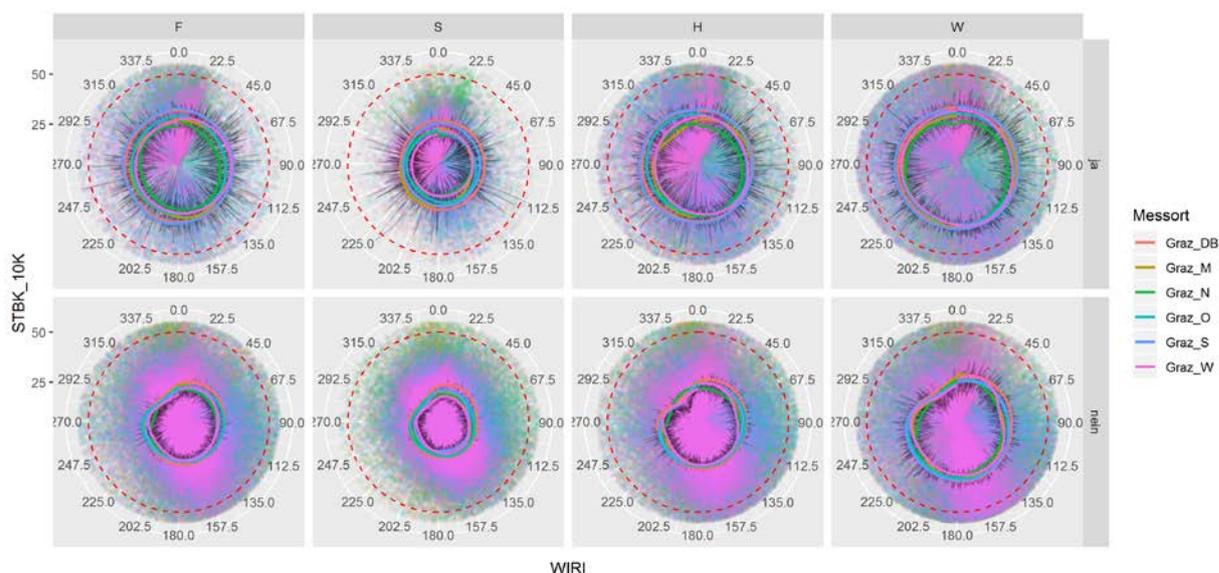


Abbildung 64: PM<sub>10</sub> gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Inversion (ja/nein)

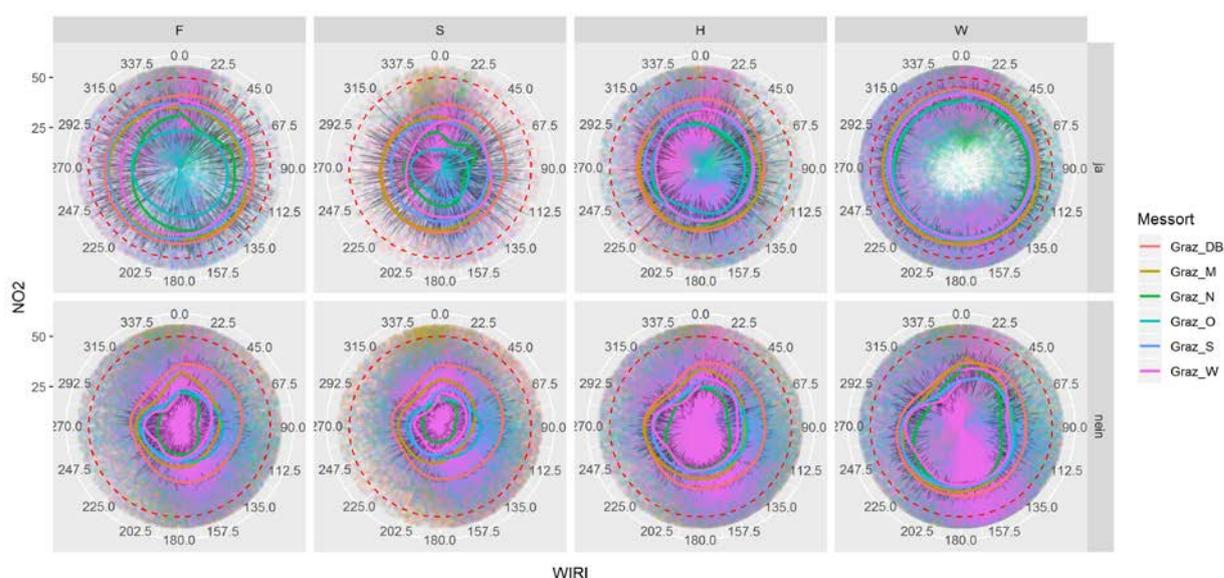


Abbildung 65: NO<sub>2</sub> gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Inversion (ja/nein)

### 6.1.3.4 Einfluss der Sonnenscheindauer

Da es vor allem bei der NO<sub>2</sub>-Konzentration starke Zusammenhänge mit der Sonneneinstrahlung gibt,<sup>24</sup> wurden Daten über die Sonnenscheindauer von der ZAMG Station Graz Thalerhof analysiert. Die Daten liegen auf Stundenebene vor und repräsentieren den durchschnittlichen Anteil Sonnenschein in der jeweiligen Stunde. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen den

<sup>24</sup> Siehe z.B. [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/112199/E79097.pdf](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf), abgerufen am 14.12.2018

Tagesverlauf des mittleren Sonnenscheinanteils pro Stunde, überlagert mit der PM<sub>10</sub>- bzw. NO<sub>2</sub>-Konzentration. Dargestellt sind die Daten seit Juli 2014. Während bei PM<sub>10</sub> (Abbildung 66) kein klarer Zusammenhang zwischen Sonnenschein und Belastung zu sehen ist, treten die NO<sub>2</sub>-Rückgänge in den Nachmittagsstunden nahezu zeitgleich mit den Spitzenwerten der Sonneneinstrahlung auf.

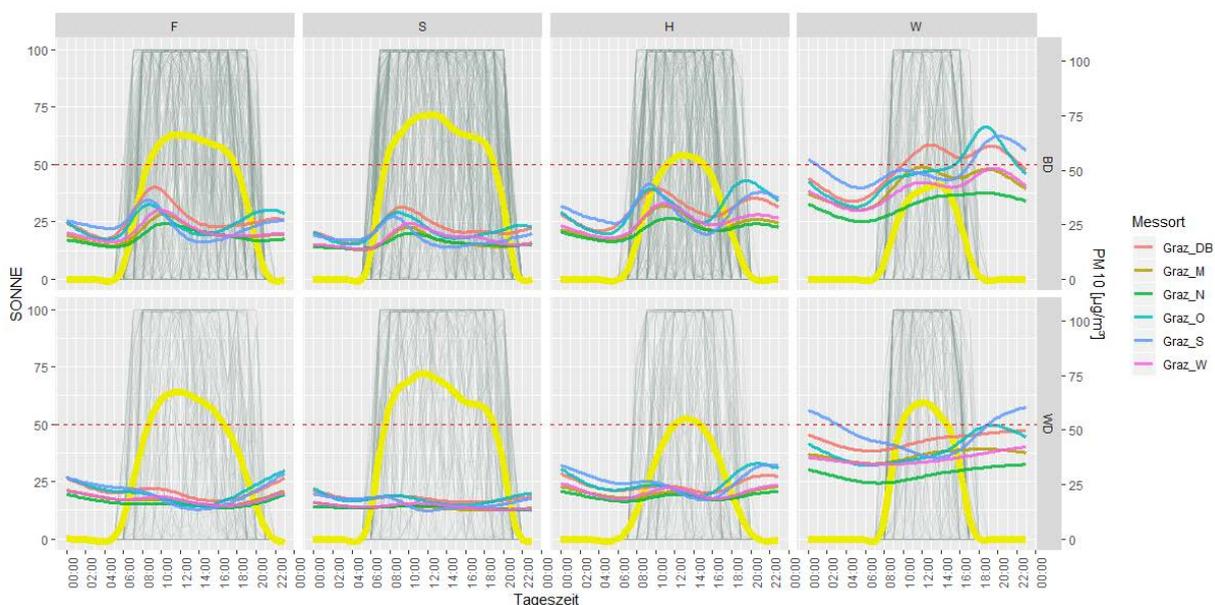


Abbildung 66: Mittlerer Sonnenscheinanteil (in %) pro Stunde (y-Achse links, gelbe Kurve) und PM<sub>10</sub> (y-Achse rechts) im Tagesverlauf

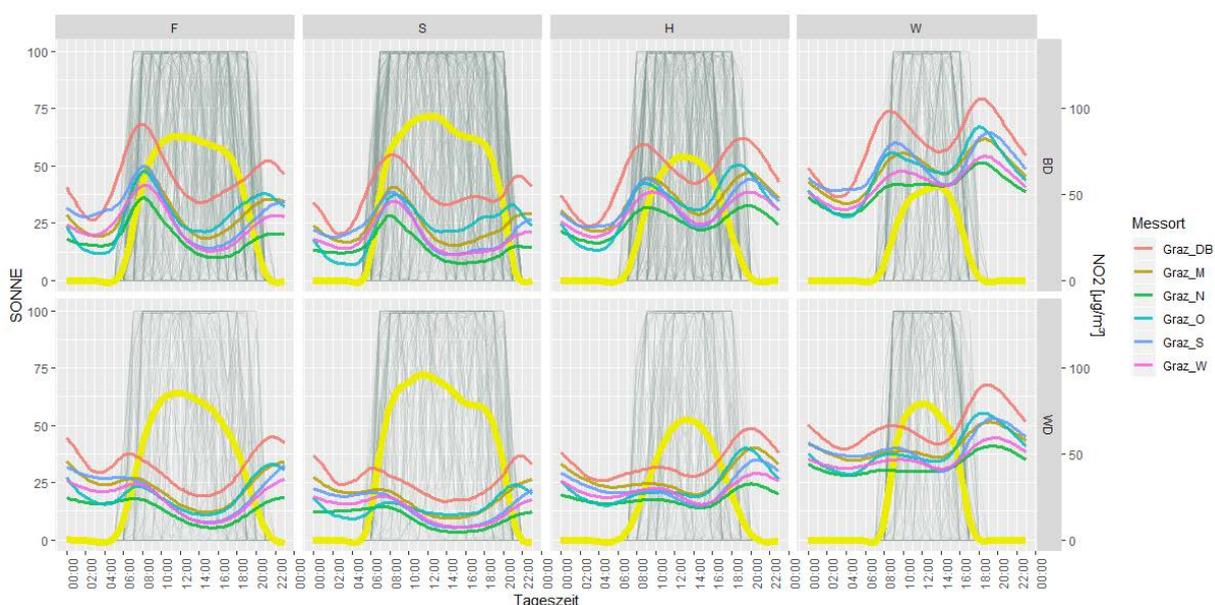


Abbildung 67: Mittlerer Sonnenscheinanteil (in %) pro Stunde (y-Achse links, gelbe Kurve) und NO<sub>2</sub> (y-Achse rechts) im Tagesverlauf

#### 6.1.4 Risikofaktoren für Grenzwertüberschreitungen bei PM<sub>10</sub>

Mittels eines logistischen Modells können Wahrscheinlichkeiten und Chancen für binäre Zielgrößen geschätzt werden (siehe Abschnitt 3.2.2). Im vorliegenden Fall soll eine Grenzwertüberschreitung (ja = 1, nein = 0) auf Tagesebene in Abhängigkeit von meteorologischen Parametern und Kalendereffekten modelliert werden. Hierfür werden die auf Tagesebene aggregierten Daten herangezogen. Die PM<sub>10</sub>-Grenzwertüberschreitung entspricht aus statistischer Sicht einer Bernoulli- bzw. Binomial-verteilten Zielgröße (Response). Die unabhängigen Prädiktorvariablen stellen die potenziellen Einflussgrößen auf die Zielgröße dar. Das Modell liefert geschätzte Wahrscheinlichkeiten für eine PM<sub>10</sub>-Grenzwertüberschreitung unter Vorliegen bestimmter Ausprägungen der im Modell enthaltenen Einflussgrößen.

##### 6.1.4.1 Modellschätzung

Für die Modellierung werden sowohl Kalendereffekte als auch meteorologische Parameter und die monatlichen Mengen von Streusalz bzw. Splitt untersucht.

Kalendereffekte:

- Periode: Untersuchungszeitraum gegliedert in die beiden Klassen 2005-2010 und 2011-2017.
- Tag: *Werktag* (Mo, Di, Mi, Do, Fr) oder *Wochenendtag* (Sa, So).

Meteorologische Parameter:

- Lufttemperatur: Mittlere Tagestemperatur an der betreffenden Messstelle.
- Vorhandensein einer Inversionswetterlage als binäre Größe: Klasseneinteilung aller Tage in Tage mit Temperaturinversion und ohne Temperaturinversion.
- Temperaturinversion: Differenz zwischen Tagesmitteltemperatur an Messstelle in Graz und Tagesmitteltemperatur der Station Kalkleiten.
- Windgeschwindigkeit: Mittlere Windgeschwindigkeit eines Tages.
- Niederschlag: Niederschlagssumme des Tages.

Winterdienst:

- Monatliche Streumenge von Splitt
- Monatliche Streumenge von Salz
- Mengenverhältnis Splitt/Salz

Für die Modellierung werden nur die Wintermonate (1. Dezember bis Ende Februar) verwendet, da für die anderen Jahreszeiten sehr wenige Überschreitungstage auftreten.

Zur Verfügung stehen die Datenreihen von den sechs Grazer Luftgütemessstationen. Aufgrund der individuellen Eigenschaften der Messstationen macht es Sinn, die Messorte einzeln zu betrachten und jeden Ort für sich zu modellieren.

Zur Beurteilung der Modellqualität ist in der Tabelle 11 der Erklärungsgrad (Güte der Anpassung des Modells an die Daten) der Modelle für alle sechs Stationen dargestellt. Je höher der

Erklärungsgrad, desto mehr der in den Daten vorhandenen Variabilität (Schwankungen) wird durch das Modell erklärt.

Messort	Graz_DB	Graz_M	Graz_N	Graz_O	Graz_S	Graz_W
$R^2_{adj}$	38,0 %	34,5 %	33,8 %	27,1 %	40,1 %	35,6 %

Tabelle 11: Modellqualität der logistischen Regression für jeden Messort

Die Modelle für Graz Bosco und Graz Süd haben mit 38% bzw. 40,1% den höchsten Erklärungsgrad. Der geringste Erklärungsgrad ist für Station Graz Ost zu verzeichnen. Die Modelle liefern fundierte Aussagen über die Signifikanz der potenziellen Einflussfaktoren und sind deshalb zur Ursachenanalyse für PM<sub>10</sub>-Überschreitungen gut geeignet. Jedoch ist die Anpassungsgüte der Modelle für die Zielgröße „PM<sub>10</sub>-Überschreitung“ aus statistischer Sicht nicht ausreichend, um als Prognosemodelle für Überschreitungstage zu dienen. Dies hat mehrere Ursachen die im Folgenden skizziert sind.

- Die Aggregation der Daten auf Tagesebene bringt einen Verlust an Information mit sich. Auswirkungen hat dies vor allem auf die Zielgröße (*Überschreitungstag*). Durch den Vergleich des Tagesmittelwertes von PM<sub>10</sub> mit dem Grenzwert wird ein Schnitt vorgenommen, der keine weitere Unterscheidung hinsichtlich des Ausmaßes der Überschreitung erlaubt. D.h. dass z.B. ein Tagesmittelwert von 51 µg/m<sup>3</sup> genauso als Überschreitungstag zählt, wie ein Tagesmittelwert von 80 µg/m<sup>3</sup>. Umgekehrt bedeutet ein Tagesmittelwert von 49,5 µg/m<sup>3</sup> genauso keine Überschreitung wie 10 µg/m<sup>3</sup>.
- Im Modell wurden nur lineare Effekte der Einflussfaktoren geschätzt, um eine gute Interpretierbarkeit zu gewährleisten. Durch die Hinzunahme von nichtlinearen Effekten und Interaktionen zwischen den Faktoren könnte die Modellanpassung noch verbessert werden, darauf wurde jedoch aus Gründen der Interpretierbarkeit verzichtet.
- Die Streumengen des Winterdienstes liegen nur auf Monate kumuliert vor. Diese Gesamtmengen sind für die Modellierung zu wenig detailliert. Je granularer bzw. informativer die Streudaten hinsichtlich Zeit und Ort sind, desto eher können plausible Aussagen zum Effekt der Streuung getätigt werden.
- Einflussfaktoren wie Verkehrsfrequenzen, Hausbrand oder Industrieemissionen liegen nicht vor, würden aber die Modellqualität erheblich steigern.
- Aufgrund der hochkomplexen Thematik ist davon auszugehen, dass es noch weitere Einflussfaktoren gibt, für die keine Daten vorhanden sind und welche den Erklärungsgrad verbessern könnten.

#### 6.1.4.2 Risikoanalyse

Mit Hilfe der logistischen Regression und ihrer Link-Funktion (Logit) ist es möglich auf die ursprüngliche Skala („0“ keine Überschreitung bzw. „1“ für Überschreitung) zu schließen und Wahrscheinlichkeiten für eine Grenzwertüberschreitung für beliebige Wertekombinationen der im Modell berücksichtigten Einflussfaktoren zu schätzen.

Um das Risiko für eine Grenzwertüberschreitung, das von einem bestimmten Einflussfaktor ausgeht, zu schätzen und darzustellen, wurde eine Datenmatrix mit einer sehr großen Anzahl von Kombinationen der im Modell enthaltenen Einflussgrößen gebildet und mittels der Modelle die Überschreitungswahrscheinlichkeit für jede dieser Wertekombinationen geschätzt. Die geschätzten Wahrscheinlichkeiten wurden in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren grafisch dargestellt, wobei Gruppierungen nach den kategorialen Größen (z.B. Werktag = BD und Wochenende = WD, Inversion ja/nein) vorgenommen wurden. Die folgenden Abbildungen enthalten die geschätzten Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Lufttemperatur (Abbildung 68), Niederschlagsmenge (Abbildung 69) und Mengenverhältnis Splitt zu Salz (Abbildung 70).

Die Abbildung 68 zeigt die  $PM_{10}$ -Überschreitungswahrscheinlichkeit für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Inversion ja/nein in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, gegliedert nach Werktag und Wochenende für jede Station. Es ist zu sehen, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Überschreitungstag mit sinkender Lufttemperatur deutlich zunimmt und bei steigender Temperatur abnimmt. Je höher die Windgeschwindigkeit desto tiefer sind die Kurven, die das Risiko für eine Überschreitung darstellen. Bei Windstille (rote Kurven) ist das Risiko deutlich erhöht, nimmt jedoch auch mit steigender Temperatur ab. Die strichlierten Kurven, die jeweils das Überschreitungsrisiko bei Vorhandensein einer Inversion darstellen, liegen immer höher als die entsprechenden durchgezogenen Linien ohne Inversion.

In der Abbildung 69 sind die  $PM_{10}$ -Überschreitungswahrscheinlichkeiten für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Inversion ja/nein in Abhängigkeit von der täglichen Niederschlagssumme gegliedert nach Werktag und Wochenende für jede Messstation zu sehen. Mit steigender Niederschlagssumme nimmt das Risiko ab, wieder sind die Kurven für Tage mit Inversion (hier blaue Linien) höher als jenes für die Tage ohne Inversion (rot). Es ist auch zu sehen, dass die Kurven für Wochenendtage (WD) niedriger liegen, als für die Werkstage (BD). Man sieht jedoch, dass die Verläufe der Kurven linearer sind, als jene der Lufttemperatur. Das heißt, dass der Effekt der Niederschlagssumme weniger stark ausgeprägt ist, als der Effekt der Temperatur.

In Abbildung 70 sind die  $PM_{10}$ -Überschreitungswahrscheinlichkeiten für verschiedene Lufttemperaturen und für Inversion ja/nein in Abhängigkeit vom Splitt-zu-Salz Verhältnis gegliedert nach Werktag/Wochenende für alle Stationen dargestellt. Je höher der Anteil Splitt in Relation zur Salzmenge, desto höher ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit. Der Effekt ist der Station Graz Ost am stärksten, bei Graz Süd am geringsten.

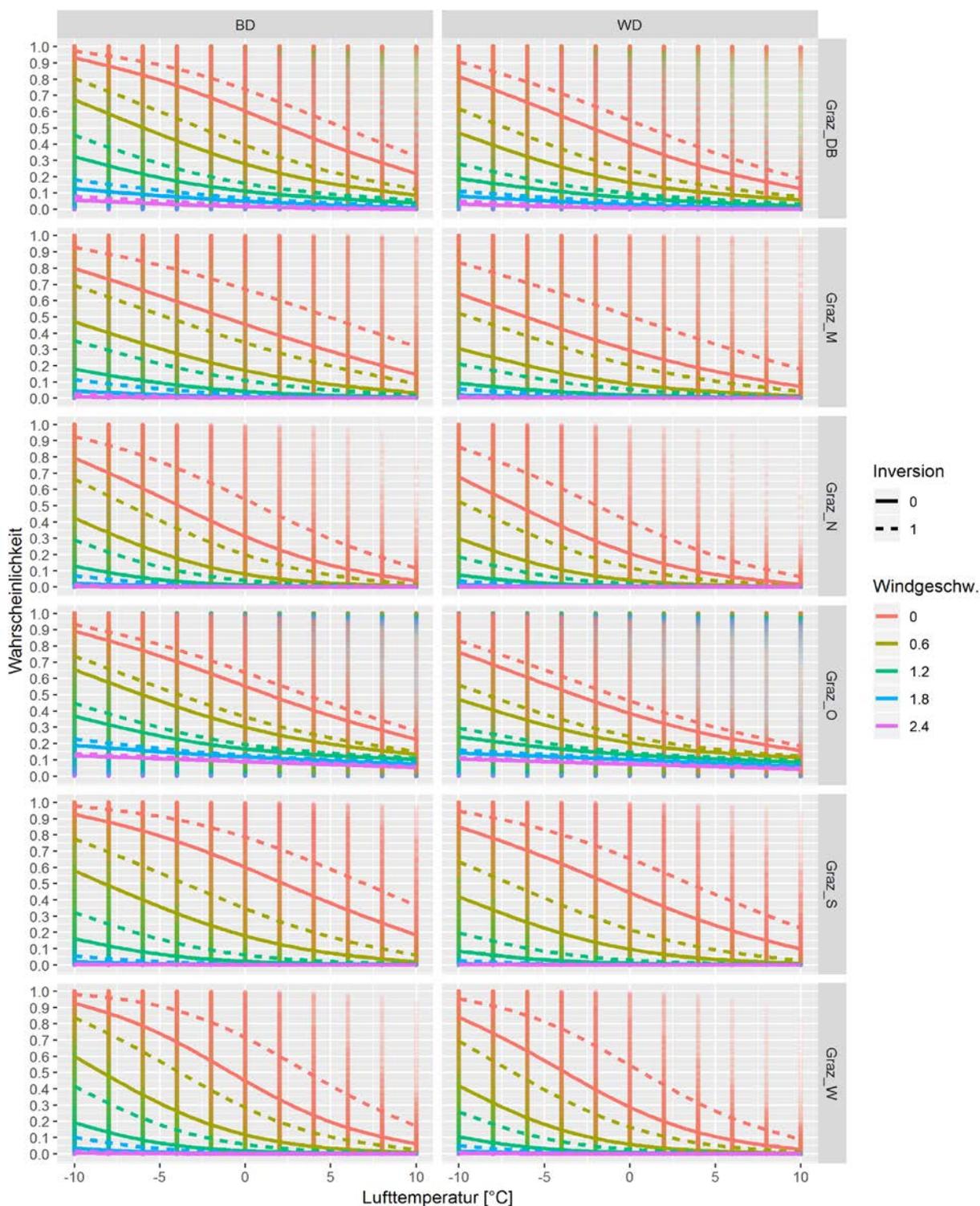


Abbildung 68:  $PM_{10}$ -Überschreitungswahrscheinlichkeit für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Inversion ja/nein in Abhängigkeit von der Temperatur, gegliedert nach Werktag/Wochenende

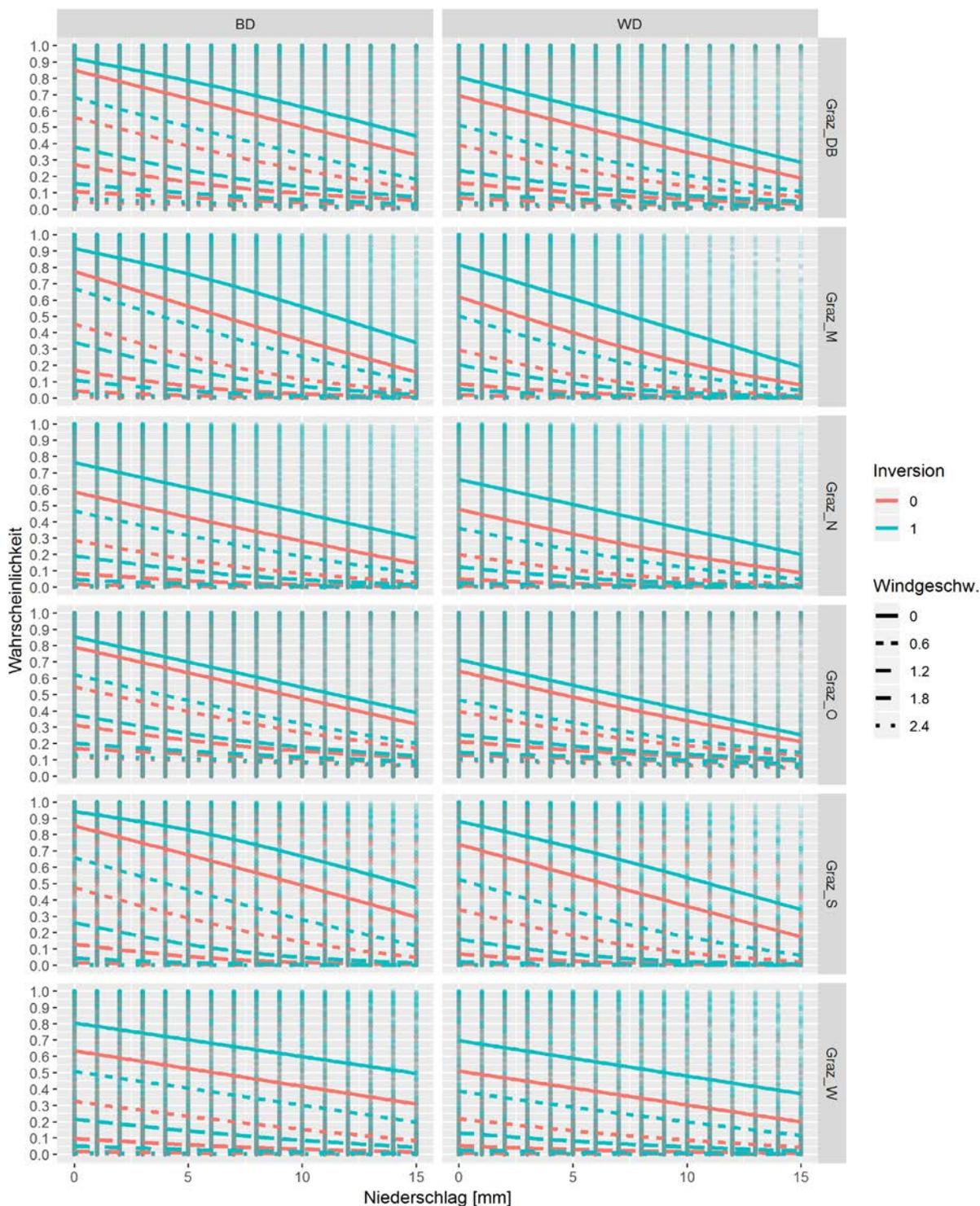


Abbildung 69:  $PM_{10}$ -Überschreitungswahrscheinlichkeit für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Inversion ja/nein in Abhängigkeit vom Niederschlag gegliedert nach Werktag/Wochenende

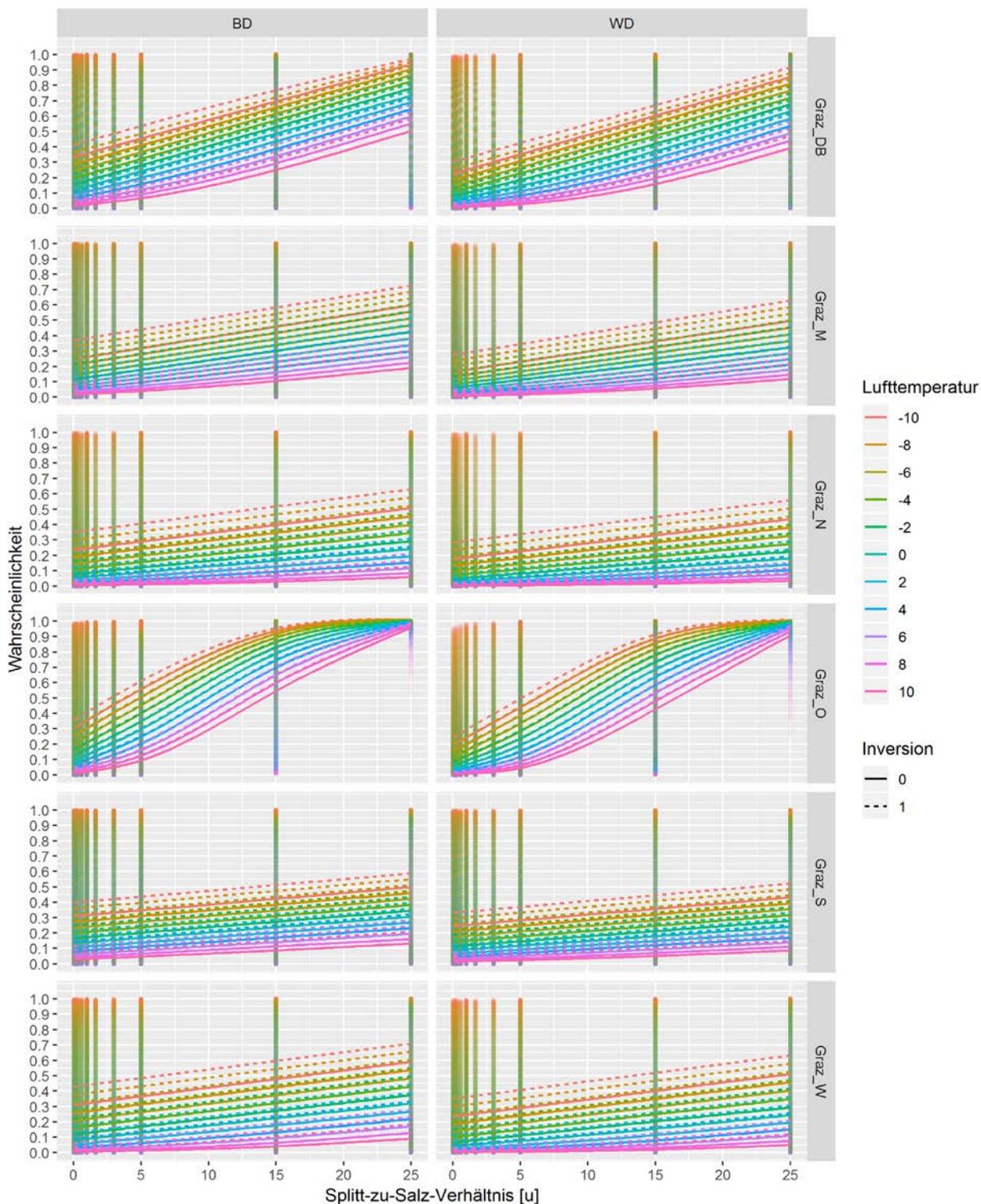


Abbildung 70:  $PM_{10}$ -Überschreitungswahrscheinlichkeit für verschiedene Lufttemperaturen und Inversion ja/nein in Abhängigkeit vom Splitt-zu-Salz Verhältnis gegliedert nach Werktag/Wochenende

### 6.1.4.3 Chancen

Die Klasse der logistischen Regression lässt aufgrund ihrer statistischen Eigenschaften die Berechnungen von *Chancen* (Odds) für die Zielgröße zu<sup>25</sup>. Mit Hilfe der geschätzten Modellparameter können die Odds berechnet, und dadurch Vergleiche der Effekte verschiedener Einflussfaktoren angestellt werden. Es kann jedoch keine quantitative Aussage über das Risiko bzw. die Wahrscheinlichkeit für eine Grenzwertüberschreitung unter den gegebenen Bedingungen abgeleitet werden, Odds können nur als relative Veränderungen von Wahrscheinlichkeiten gegenüber einer Vergleichs- oder Referenzsituation interpretiert werden.

- Zwischen verschiedenen Kategorien einer kategorialen Einflussgröße gilt: Um welchen Faktor erhöht/verringert sich die Chance für einen Überschreitungstag, wenn man von einer Kategorie in die andere wechselt. Z. B.: Wie verändert sich die Chance für einen Überschreitungstag wenn man Werktag und Wochenende vergleicht.
- Für numerische Einflussgrößen gilt: Um welchen Faktor erhöht/verringert sich die Chance für einen Überschreitungstag, wenn die numerische Variable (z.B. Windgeschwindigkeit) um den Wert X erhöht wird (inkrementiert), wobei X bei der Lufttemperatur auch negativ sein kann. Z.B.: Wie verändert sich die Chance eines Überschreitungstags, wenn die Lufttemperatur um X Grad verändert wird, wobei X beispielsweise +5 Grad aber auch -5 Grad betragen kann.

Für die Modelle der Messorte Graz Don Bosco und Graz Süd sind in Tabelle 12 die Chancenverhältnisse dargestellt.

Chance für Überschreitungstag ...		Station	
Einflussgröße	... bei Veränderung ...	Graz_DB	Graz_S
<b>Periode</b>	von (2005–2010) auf (2011–2017)	0,61	0,55
<b>Wochentag</b>	von Wochenende (WD) auf Werktag (BD)	3,57	2,44
<b>Inversion</b>	von keine Inversion (nein) auf Inversion (ja)	2,51	3,32
<b>Lufttemperatur</b>	um X °C	0,76 <sup>X</sup>	0,77 <sup>X</sup>
<b>Windgeschwindigkeit</b>	um X m/s	0,02 <sup>X</sup>	0,01 <sup>X</sup>
<b>Niederschlagssumme</b>	um X mm	0,76 <sup>X</sup>	0,77 <sup>X</sup>
<b>Verhältnis Splitt zu Salz</b>	um X	1,35 <sup>X</sup>	1,11 <sup>X</sup>

Tabelle 12: Chancen für Überschreitungstage aus der logistischen Regression

<sup>25</sup> Chancen sind nicht mit Wahrscheinlichkeiten oder Risiken gleichzusetzen und können nur im Vergleich zu einem Referenzwert/Referenzkategorie interpretiert werden, siehe Abschnitt 3.2.2.

Folgende Aussagen und Veränderungen zu den Chancen können für die Faktoren *Periode*, *Tag* und *Inversion* am Beispiel der Station Graz Don Bosco abgeleitet werden:

- Bei einem Vergleich der Perioden (2005 – 2010) und (2011 – 2017) zeigt sich eine Chance von 1 zu 0,61. Umgekehrt gilt die Aussage, dass die Chance einen Überschreitungstag in den Jahren 2005 – 2010 zu haben das 1,64-fache im Vergleich mit den Jahrgängen 2011 – 2017 beträgt. D.h. die Chance für einen Überschreitungstag hat sich mit fortschreitender Zeit deutlich verringert.
- Die Chance für eine PM<sub>10</sub>-Überschreitung an einem Werktag beträgt das 3,57-fache der Chance, die an einem Wochenendtag besteht.
- Die Chance für eine PM<sub>10</sub>-Überschreitung an einem Inversionstag beträgt das 2,51-fache der Chance, die an einem Tag ohne Inversionswetterlage herrschte (d.h. bei geringerer Tagesmitteltemperatur in Graz als in Kalkleiten).

Für numerische Einflussgrößen können die Chancen und deren Veränderungen am besten in Grafiken (siehe Abbildung 71 bis Abbildung 74) veranschaulicht werden.

Die Auswirkungen einer Erhöhung/Verringerung der Lufttemperatur auf die Chance für einen Überschreitungstag sind in der Abbildung 71 für alle Messstationen zu sehen.

Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Chance für einen Überschreitungstag bei einer Temperatur von -10 Grad, je nach Messstation, ca. das 10- bis 15-fache der Chance, die bei einer Temperatur von 0 Grad besteht, beträgt. Umgekehrt verringert sich die Chance bei einem Temperaturanstieg von 0 auf 10 Grad sehr deutlich (bei 10 Grad beträgt die Chance nur mehr 6 bis 7 Hundertstel der Chance, die für eine Lufttemperatur von 0 Grad besteht<sup>26</sup>).

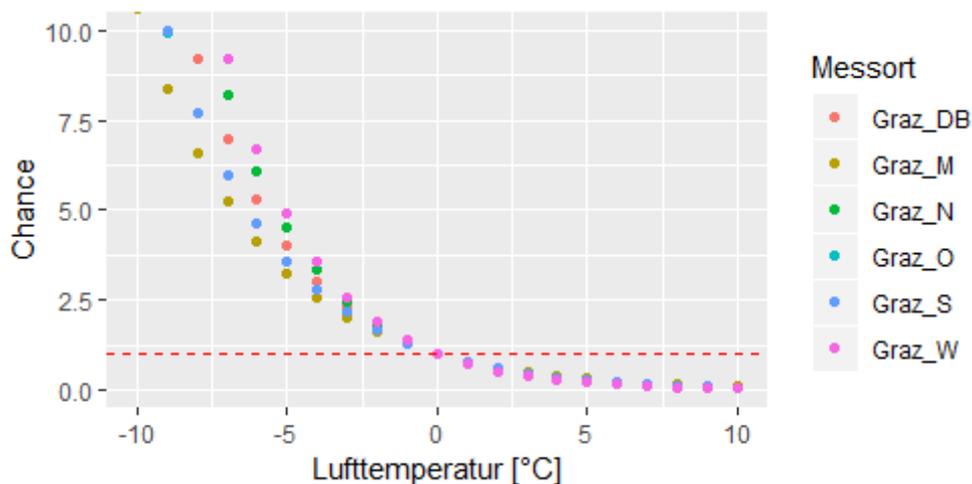


Abbildung 71: Chance für einen PM<sub>10</sub>-Überschreitungstag in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

Die Auswirkungen einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit auf die Chance für einen Überschreitungstag sind in der Abbildung 72 für alle Messstationen zu sehen.

<sup>26</sup> Diese Chancen werden wie folgt aus den in der Tabelle 11 dargestellten Formeln berechnet. Für einen Temperaturanstieg von 0 auf 10 Grad:  $0,76^{10} = 0,064$  (entspricht 6,4%). Für einen Temperaturrückgang von 0 auf -10 Grad:  $0,76^{(-10)} = 13,6$ .

Die Erhöhung der Windgeschwindigkeit wirkt sich äußerst stark auf die Chance aus: Eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s verringert die Chance auf das 0,02-fache (ein Fünfzigstel) verglichen mit totaler Windstille (d.h. Luftstillstand). In Graz sind Windgeschwindigkeiten von 1 m/s im Winter allerdings sehr unüblich, da die Mediane der Windgeschwindigkeiten an den Grazer Messstellen im Winter nur bei 0,4 bis 0,5 m/s liegen.

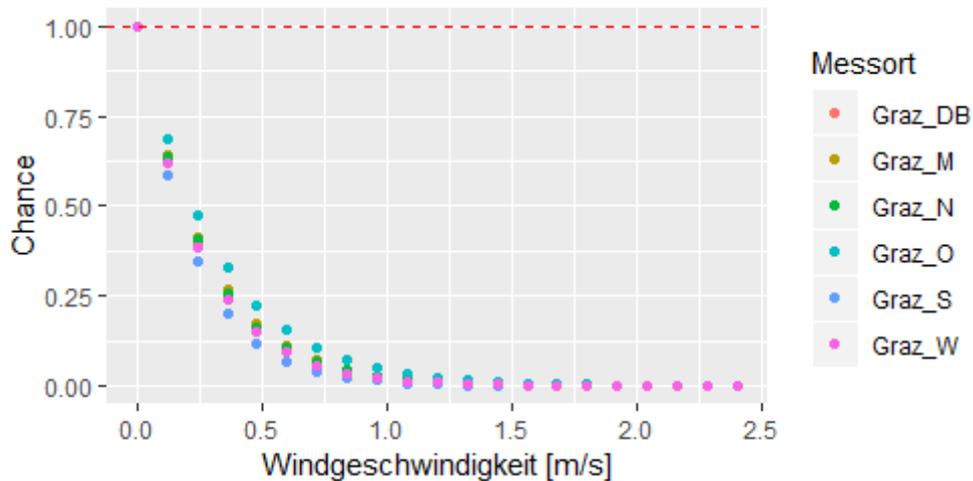


Abbildung 72: Chance für einen  $PM_{10}$ -Überschreitungstag in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Die Auswirkungen einer Erhöhung der Niederschlagssumme auf die Chance für einen Überschreitungstag sind in der Abbildung 73 für alle Messstationen zu sehen. 1 mm Niederschlag senkt die mittlere Chance für eine Überschreitung auf das 0,75-fache (d.h. Verringerung der Chance um ein Viertel) und 10 mm Niederschlag bereits auf 10% (ein Zehntel) im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag.

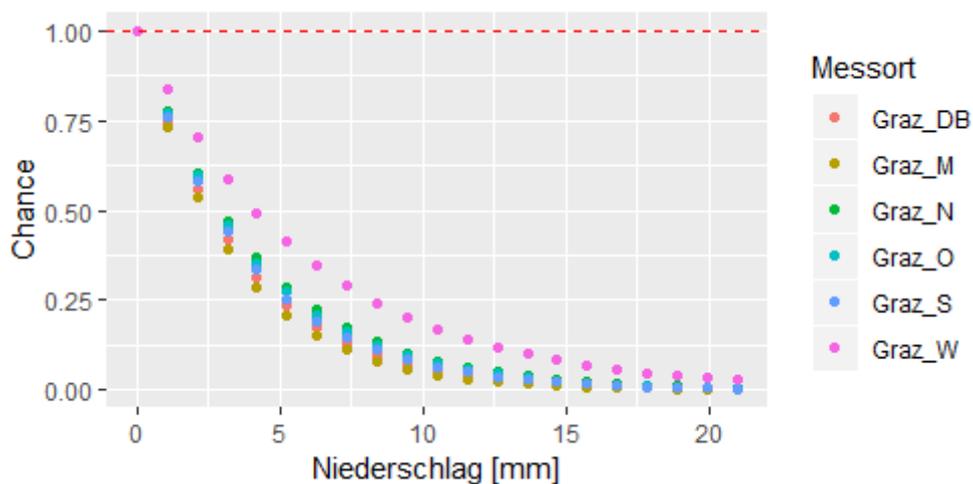


Abbildung 73: Chance für einen  $PM_{10}$ -Überschreitungstag in Abhängigkeit von der Niederschlagssumme

Die Auswirkungen einer Veränderung des Mengenverhältnisses Splitt-zu-Salz auf die Chance für einen Überschreitungstag sind in der Abbildung 74 für alle Messstationen zu sehen. Eine Erhöhung des Splitt-zu-Salz-Verhältnisses (d.h. Steigerung des Splitt-Anteils) erhöht die Chancen für einen Überschreitungstag, wobei diese Einflussgröße bei der Station Graz Ost den höchsten Effekt hat, während sich bei Graz Süd kaum eine Auswirkung zeigt. Ausgehend von einem Splitt-zu-Salz Verhältnis von 1:1 verringert sich z.B. bei Don Bosco die Chance auf ca. 75% (d.h. um ein Viertel), wenn das Verhältnis auf 1:10 (1 Teil Splitt, 10 Teile Salz) verkleinert wird. Das Chancenverhältnis bei einem Splitt-zu-Salz Verhältnis von 5:1 beträgt bei Don Bosco 3, d.h. die Chance für einen Überschreitungstag ist etwa 3-Mal so hoch, wie die Chance beim 1:1 Mengenverhältnis.

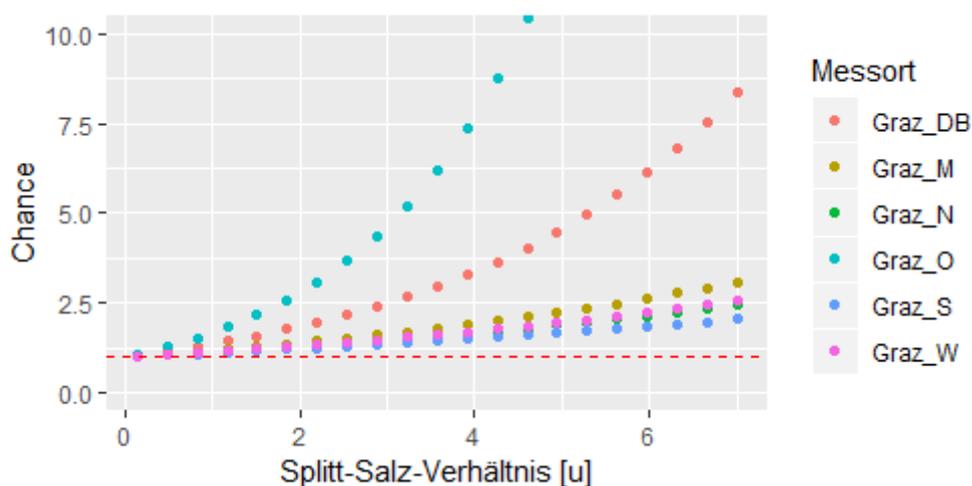


Abbildung 74: Chance für einen  $PM_{10}$ -Überschreitungstag in Abhängigkeit vom Splitt-zu-Salz-Verhältnis

## 7 Diskussion der Ergebnisse

### 7.1 RAHMENBEDINGUNGEN

Die Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte in Graz weist von 2005 bis 2017 einen deutlichen und kontinuierlichen Anstieg um ca. 18% auf (Abschnitt 4.1). Die Wirtschaft hat sich in diesem Zeitraum positiv entwickelt. Das Bruttoregionalprodukt pro Einwohner stieg um knapp 22%, das Bruttomedianeinkommen um 24,5% und die Anzahl der Nächtigungen um 58%. Insgesamt ist bei der wirtschaftlichen Entwicklung und Aktivität ein Trend nach oben erkennbar, wobei der Tourismus den größten Anstieg aufweist (Abschnitt 4.2). In der Abbildung 75 sind die Veränderungen gegenüber dem Jahr 2005 (entspricht 100%) den Jahresmittelwerten von PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub> an der Messstation Don Bosco gegenübergestellt, die beide eine sinkende Tendenz zeigen.

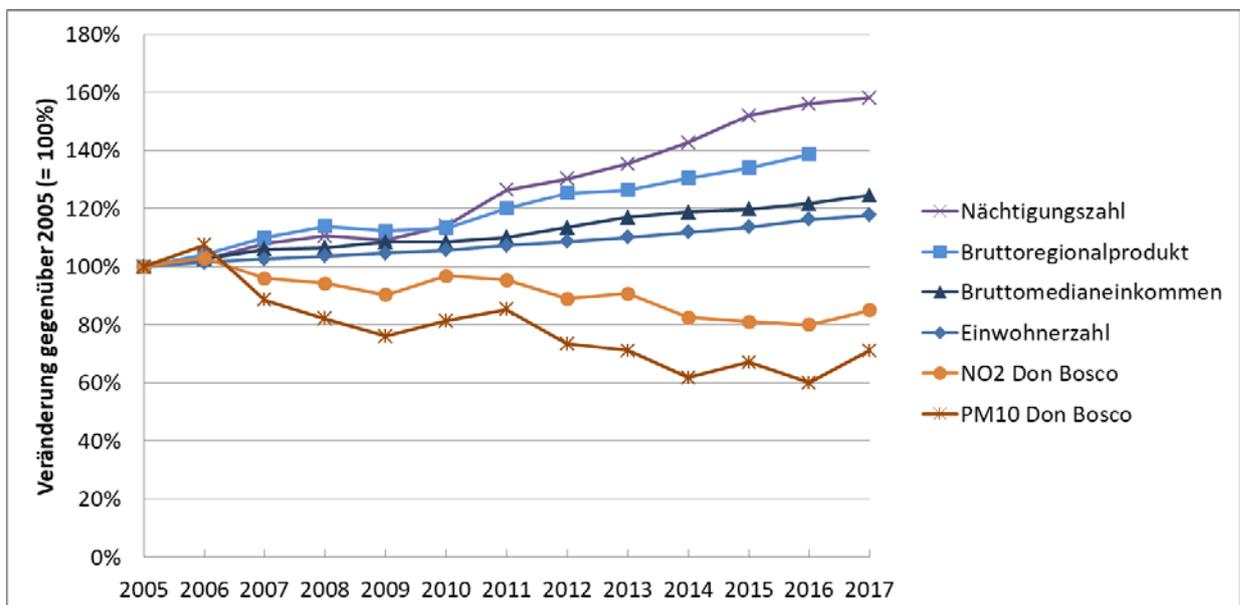


Abbildung 75: Wirtschaftliche Entwicklung und Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid und Feinstaub im Vergleich: Darstellung der Veränderungen gegenüber dem Jahr 2005

### 7.2 METEOROLOGIE

Die Lufttemperatur verhält sich in Graz seit 2005 an allen Messstationen nahezu gleich. Die Sommertemperaturen weisen einen sehr glatten Verlauf mit leicht steigender Tendenz auf. Frühling und Herbst zeigen zwischen den Jahren etwas höhere Schwankungen, während bei den mittleren Wintertemperaturen ein deutliches Wellenverhalten sichtbar ist. Während die Winter 2006/2007 sowie 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 verhältnismäßig warm waren, zeigen die Temperaturen in den Wintern 2009/2010, 2010/2011 und 2016/2017 relativ niedrige Mittelwerte (siehe Abschnitt 5.1.1).

Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind im Herbst und Winter deutlich niedriger, als im Frühling und Sommer. An einigen Messstationen scheinen die Windstärken in den Frühlings- und Sommermonaten über die Jahre zuzunehmen, während im Herbst und Winter tendenziell geringere Windgeschwindigkeiten zu verzeichnen sind. Die Windstärken sind an der Station Graz Nord in allen Jahreszeiten deutlich höher als an der Station Don Bosco (siehe Abschnitt 5.1.2), da diese

Station im Norden von Graz sehr nahe an der Mur und im Einzugsbereich der Luftströmungen aus dem Murtal liegt. An den Stationen südlich des Schlossbergs und mit starker Verbauung in der Umgebung werden deutlich geringere Windgeschwindigkeiten gemessen.

Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten liegen an den Grazer Stadt-Stationen durchwegs unter 1 m/s. Für die Stationen Schlossberg<sup>27</sup> und Plabutsch<sup>28</sup>, die sich deutlich über dem Grazer Stadtniveau befinden, liegen die Mediane der Windgeschwindigkeiten zwischen 2 und 3 m/s. Die Station Graz Kärntnerstraße, die sich auf dem Dach eines ca. 50 Meter hohen Gebäudes befindet, hat im Herbst und Winter eine mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 1,5 m/s, im Frühling und Sommer um 2,5 m/s. In Wien auf der Hohen Warte<sup>29</sup> beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit im Winter ca. 3,5 m/s, das ist deutlich höher als am Grazer Schlossberg und Plabutsch und etwa 2,5 Mal so hoch wie der mittlere Wert der Station Graz Kärntnerstraße. Sehr deutlich ist auch der Unterschied zwischen den Windgeschwindigkeit am Grazer Flughafen und Wien Schwechat. Während Wien Schwechat im Frühling nur ca. doppelt so hohe Windgeschwindigkeiten zeigt wie Graz Flughafen, ist die Windstärke in Wien Schwechat im Winter ca. 4 Mal so groß. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Wind in Wien im Durchschnitt ca. 2 bis 3 Mal stärker weht als in Graz (siehe Abschnitt 5.1.3).

Temperatur und Windgeschwindigkeit zeigen bei fast allen Stationen einen ähnlichen Tagesverlauf mit Maximalwerten am frühen Nachmittag (14:00 bis 15:00) in Frühling, Herbst und Winter bzw. etwas später (ca. 16:00) im Sommer. Die geringsten Windgeschwindigkeiten sind in den frühen Morgenstunden zwischen 4:00 und 6:00 Uhr zu beobachten (siehe Abschnitt 6.1.2).

Die Zahl der Inversionstage in Graz schwankt deutlich von Jahr zu Jahr, zeigt aber keinen erkennbaren Trend nach oben oder unten. Graz Mitte und Graz West weisen etwas weniger Inversionstage – gemessen am Temperaturunterschied zur Station Kalkleiten auf ca. 700 m Seehöhe – auf, als die anderen Stationen. Auch in Graz Nord ist die Zahl der Inversionstage etwas geringer, als bei Don Bosco, Süd und Ost. In den frühen Morgenstunden (3:00 bis 6:00) ist die mittlere Temperaturdifferenz zu Kalkleiten in allen Jahreszeiten zumindest leicht negativ, im Winter erstreckt sich die Phase der negativen Temperaturdifferenz im Mittel von den Abendstunden (18:00 bis 19:00) bis in den späten Vormittag. Die geringste Inversion, wird zu allen Jahreszeiten nachmittags um ca. 14:00 bis 15:00 erreicht (siehe Abschnitt 5.1.4).

Die Häufigkeit von Inversionswetterlagen sinkt mit steigender Windgeschwindigkeit. Bei Windgeschwindigkeiten über 2 m/s treten praktisch keine Inversionslagen mehr auf. Eine Ausnahme bildet Graz Nord, wo auch bei höheren Windgeschwindigkeiten die Temperaturdifferenz zu Kalkleiten unter 0 Grad liegen kann.

Die Entwicklung der Niederschlagssummen in Graz in den Wintermonaten von 2004 bis 2018 zeigt größere Schwankungen. In den Wintermonaten 2008/2009 waren die meisten Niederschläge zu verzeichnen, gefolgt von den Wintersaisons 2012/2013 bzw. 2013/2014. Im Winter sind gegenüber den anderen Jahreszeiten deutlich geringere Niederschlagssummen zu beobachten (siehe Abschnitt 5.1.5).

---

<sup>27</sup> Die Station Schlossberg liegt auf 450m, ca. 100 Meter über dem Grazer Stadtniveau.

<sup>28</sup> Die Station Plabutsch liegt auf ca. 740m, knapp 300 Meter über Graz.

<sup>29</sup> Die Hohe Warte liegt auf einem verbauten Hügel, auf einer Seehöhe von 220m, das ist ca. 50m über dem Stephansplatz.

### 7.3 FEINSTAUB PM<sub>10</sub>

Die Anzahl der PM<sub>10</sub>-Überschreitungstage (gemessen am Grenzwert 50 µg/m<sup>3</sup>) ist seit 2005 an allen Grazer Messstationen deutlich zurückgegangen. Jedoch waren auch 2017 an den Messstellen Don Bosco und Graz Süd noch immer mehr als 35 Überschreitungstage zu verzeichnen (siehe Abschnitt 1.3.1). Die Messstelle Don Bosco, im verkehrsnahen Bereich, hat die meisten Überschreitungstage, die Messstelle Graz Nord ist nahezu immer unter dem Grenzwert.

An allen Messstationen ist die Zahl der Überschreitungstage an Sonntagen am geringsten, gefolgt von Samstagen und Montagen. Am häufigsten kommt es bei allen Messstationen in der Wochenmitte (Mittwoch oder Donnerstag) zu Überschreitungen des PM<sub>10</sub>-Tagesgrenzwertes. Für die Station Graz Süd ist der Belastungsunterschied zwischen Werktagen und Wochenenden am geringsten. Die Ursache dafür könnte darin liegen, dass sich die Station in einem Wohngebiet mit großer Anzahl von älteren Einfamilienhäusern befindet, deren Hausbrand Emissionen möglicherweise für einen größeren Anteil der PM<sub>10</sub>-Menge verantwortlich sind.

Die Zeitreihen der PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwerte zeigen von 2005 bis 2017 einen mehr oder weniger kontinuierlichen Rückgang und verdeutlichen, dass es seit 2011 an keiner der Grazer Messstationen zu Überschreitungen des Jahresmittelwertes kam. Der prozentuelle Rückgang des PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwertes zwischen 2005 und 2017 liegt bei allen Messstationen über 20%. Den stärksten Rückgang zeigt Graz Nord mit 45%, ausgehend vom Jahresmittel 2005. Bei Graz Mitte liegt der Rückgang bei 42%, wobei hier anzumerken ist, dass die Messstation im Jahr 2010 versetzt wurde. Don Bosco, Graz Ost und Graz Süd weisen Rückgänge von 38%, 34% bzw. 32% auf. Der geringste Rückgang ist mit 23% bei Graz West zu beobachten.

Im Winter ist die Feinstaubbelastung in Graz am höchsten, wobei es deutliche Unterschiede zwischen den Messstellen gibt. Obwohl Don Bosco bei den jährlichen Überschreitungstagen an erster Stelle liegt, ist der Winter-Mittelwert über alle Jahre in Graz Süd etwas höher, als in Don Bosco. Im Herbst liegt der Mittelwert in Don Bosco schon etwas höher als in Graz Süd, im Frühling und Sommer liegt Graz Don Bosco deutlich höher. Im Sommer gibt es neben Don Bosco sogar zwei weitere Stationen, deren mittlere PM<sub>10</sub>-Belastung über der von Graz Süd liegt (siehe Abschnitt 5.2.1). Auch dies deutet darauf hin, dass der Einfluss von Hausbrand bei Graz Süd stärker ist, als bei Don Bosco, Graz Ost und Graz Mitte, d.h. dass der Feinstaub PM<sub>10</sub> bei dieser Station aus einem höheren Anteil an Hausbrand-Emissionen besteht.

Die PM<sub>10</sub>-Konzentration hat einen negativen Zusammenhang mit der Lufttemperatur. Dieser weist eine leichte Wannenförmigkeit auf, die bei sehr niedriger Lufttemperatur hohe PM<sub>10</sub>-Werte aber auch bei sehr hohen Lufttemperaturen wieder etwas höhere Feinstaubwerte liefert. Mögliche Ursachen dafür sind vermehrte Staubbildung durch große Trockenheit in heißen Sommerperioden, aber auch ein Effekt der automatischen Abschaltung von Abgasreinigungsanlagen bei hohen Außentemperaturen kann nicht ausgeschlossen werden. In den Jahren vor 2009 war dieser Effekt der Wannenförmigkeit am stärksten ausgeprägt. Dies und die Tatsache, dass die PM<sub>10</sub>-Konzentration in den Jahren vor 2009 insgesamt höher liegt als jene der späteren Perioden, lässt sich durch die verschiedenen Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität (Umstellung Winterdienst, Geschwindigkeitsbeschränkungen, effizientere Abgasreinigung, ...) erklären (Abschnitt 6.1.3.1).

Die Halbstundenmittelwerte der PM<sub>10</sub>-Belastung zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Je stärker der Wind, desto geringer ist die PM<sub>10</sub>-Konzentration, wobei ab ca. 2 m/s kaum mehr eine Verringerung der PM<sub>10</sub> zu sehen ist (Abschnitt 6.1.3.2). Bezüglich der Windrichtung ist zu sagen, dass vor allem der Wind aus Nord und Nord-West eine reduzierende Wirkung auf die Feinstaubbelastung hat.

An Wintertagen mit Inversionswetterlagen ist die Feinstaubbelastung deutlich erhöht. Der Zusammenhang zwischen  $PM_{10}$  und der Temperaturdifferenz Graz zu Kalkleiten ist negativ, d.h. je stärker die Inversion, also negativer die Temperaturdifferenz, desto höher ist tendenziell  $PM_{10}$ .

Im Mittel über alle Messstellen und Jahre herrschte im Winter<sup>30</sup> an 59% aller  $PM_{10}$ -Überschreitungstage eine Inversionswetterlage, wobei dieser Anteil bei der Station Graz Süd mit 67% am höchsten und bei Graz Mitte mit 49% am niedrigsten ist (siehe Tabelle 13). Betrachtet man umgekehrt alle Inversionstage, so sind im Mittel über alle Stationen und Jahre 50% dieser Inversionstage auch  $PM_{10}$ -Überschreitungstage. Bei Graz Nord führen nur 25% der Inversionstage zu einer Überschreitung, bei Graz Süd sind es 67% der Inversionstage, die zu einer Grenzwertüberschreitung führen. Die mittlere jährliche Anzahl von Inversionstagen im Winter liegt bei 37, wobei bei Graz Mitte mit 25<sup>31</sup> die wenigsten und bei Graz Süd mit jährlich ca. 43 die meisten Inversionstage gezählt werden. Bei der mittleren Anzahl von Überschreitungstagen pro Winter liegen Graz Süd mit 44 und Don Bosco mit 42 deutlich höher, als Graz Nord mit 17 Überschreitungstagen im Mittel pro Winter. Über alle Messstationen betrachtet sind im Mittel 31 Überschreitungstage pro Winter zu beobachten.

Eine Aufstellung der Anzahlen von Überschreitungstagen<sup>32</sup> und Inversionstagen, sowie der Anzahl von Überschreitungstagen mit und ohne Inversion für alle Messstationen und Jahre ist im Anhang in der Tabelle 15 zu finden. In der Tabelle 16 im Anhang ist die gleiche Aufstellung nur für die Wintermonate zu finden.

An den Überschreitungstagen ohne Inversionswetterlage ist die mittlere Tagestemperatur deutlich niedriger (im Mittel deutlich unter 0 Grad) als an den Überschreitungstagen mit Inversion. Die Abbildung 76, die dies illustriert, zeigt Boxplots für die Lufttemperatur an der Station Graz Süd gruppiert nach  $PM_{10}$ -Überschreitung, Wochentag, Inversion und Periode (2005 bis 2010 bzw. 2011 bis 2017) nur für die Wintersaisonen. Die Höhe der Boxen repräsentiert, wie in Abschnitt 3.1 erläutert, den Interquartilsabstand (IQR), ein Maß für die Streubreite der Temperaturwerte in der jeweiligen Gruppe. Dies bedeutet, dass die mittleren 50% aller Temperaturwerte der Gruppe innerhalb der Box liegen. Prinzipiell ist die Lufttemperatur an Überschreitungstagen deutlich geringer, als an Tagen ohne  $PM_{10}$ -Überschreitung. Betrachtet man die Tage ohne  $PM_{10}$ -Überschreitung (Überschreitung „nein“), so ist die Lufttemperatur an Inversionstagen und inversionsfreien Tagen nahezu gleich. Betrachtet man nun die  $PM_{10}$ -Überschreitungstage (Überschreitung „ja“), so ist bei den Tagen ohne Inversion eine deutlich niedrigere Lufttemperatur zu sehen. Dies gilt sowohl für Werktage als auch für Wochenenden, jedoch ist der Effekt in der Periode von 2005 bis 2010 etwas stärker ausgeprägt. An diesen Tagen – Überschreitungstage ohne Inversionslage und mit sehr frostigen Temperaturen – könnten temperaturbedingt höhere Emissionen aus verschiedenen Quellen für eine  $PM_{10}$ -Überschreitung verantwortlich sein.

Eine vergleichbare Grafik für die Windgeschwindigkeit ist in Abbildung 77 zu sehen. Die Windgeschwindigkeit ist an den Überschreitungstagen geringer als an Nicht-Überschreitungstagen und auch an Inversionstagen kleiner als an Nicht-Inversionstagen. Der mittlere Unterschied der Windgeschwindigkeit zwischen Überschreitungstagen und nicht Überschreitungstagen ist jedoch

---

<sup>30</sup> Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, wird in vorliegendem Projekt die meteorologische Definition des Winters verwendet: 1. Dezember bis 29. Februar.

<sup>31</sup> Graz Mitte hat die höchsten Lufttemperaturen von allen Grazer Stationen, aus diesem Grund ist die mittlere Tagestemperatur an vielen Tagen, an denen an anderen Grazer Stationen Inversion herrscht, höher als in Kalkleiten.

<sup>32</sup> Diese Auswertung beruht auf den Daten der kontinuierlichen  $PM_{10}$  Messung der Grazer Luftgütemessstationen, die vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellt wurden. Geringfügige Abweichungen zu den im Jahresbericht 2017 publizierten Überschreitungstagen sind möglich, da eine vereinzelte Nachkalibration der kontinuierlichen Messergebnisse nicht nachvollziehbar war.

unabhängig von der Inversion, d.h. er ist etwa gleich groß, ungeachtet dessen, ob eine Inversion vorliegt oder nicht.

Messstation	Mittlerer Anteil (alle Winter)		Mittlere Anzahl	
	Überschreitungs- tage bei Inversion	Inversionstage bei PM <sub>10</sub> - Überschreitung	Inversionstage pro Winter	Überschreitungs- tage pro Winter
Graz_DB	62%	60%	40	42
Graz_M	54%	49%	25	28
Graz_N	25%	59%	37	17
Graz_O	45%	57%	41	32
Graz_S	67%	67%	43	44
Graz_W	46%	61%	34	25
Mittelwert	50%	59%	37	31

Tabelle 13: Mittlere jährliche Anzahl Überschreitungs- bzw. Inversionstage und mittlerer Anteil Überschreitungstage bei Inversion bzw. Inversionstage mit PM<sub>10</sub>-Überschreitung pro Messstation nur für die Wintermonate

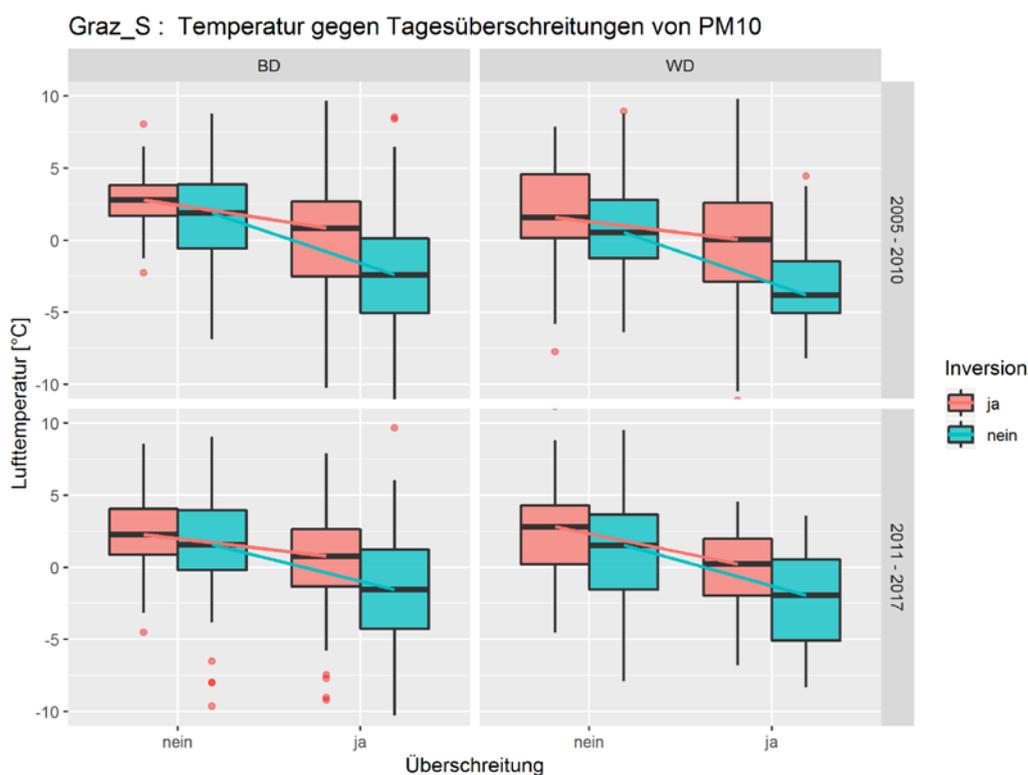


Abbildung 76: Lufttemperatur in Abhängigkeit von PM<sub>10</sub>-Überschreitung, Inversion und Wochentag für Wintermonate

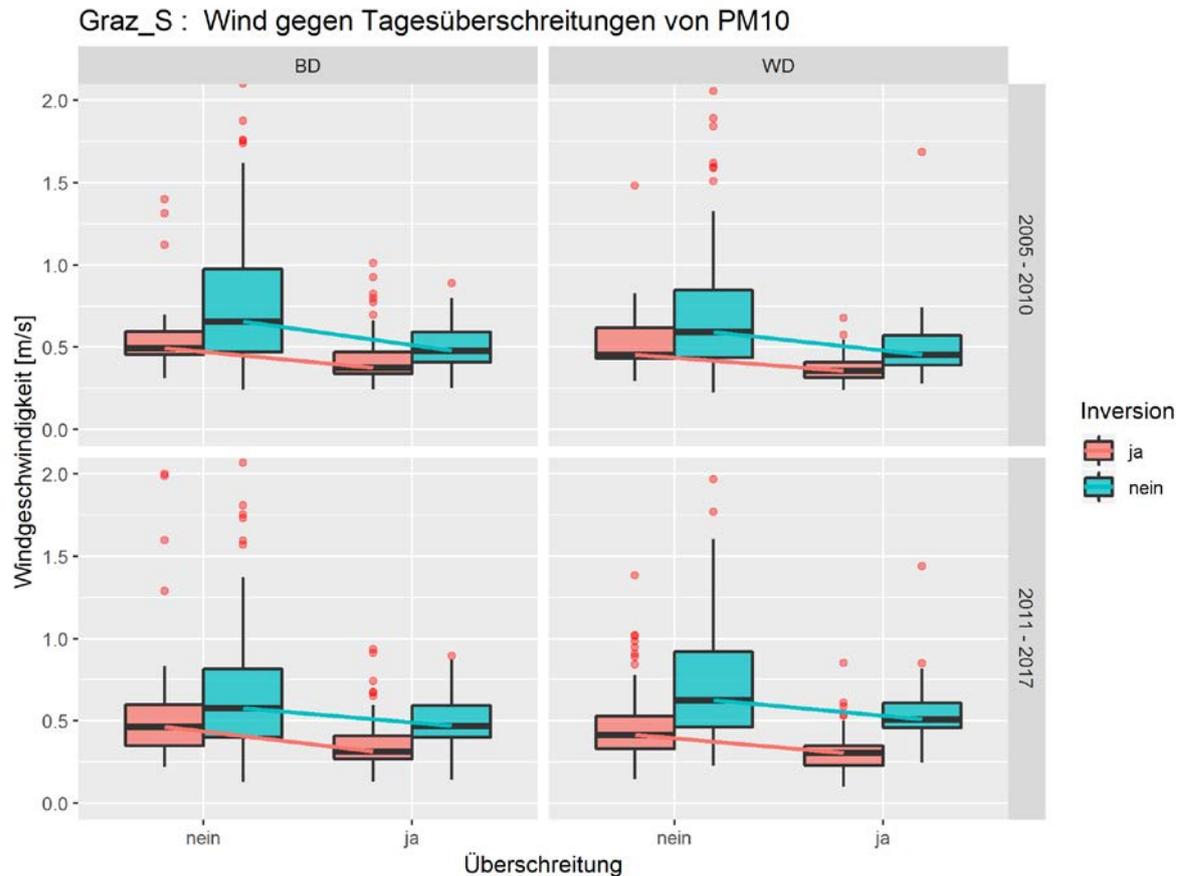


Abbildung 77: Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von  $PM_{10}$ -Überschreitung, Inversion und Wochentag für Wintermonate

Bei der  $PM_{10}$ -Belastung sind deutliche Tagesverläufe mit zwei Spitzen täglich abzulesen, die im Sommer und an den Wochenenden (Samstag und Sonntag) weniger stark ausgeprägt sind, als an den Werktagen. Die höchsten Peaks sind in der Wochenmitte (Mittwoch und Donnerstag) und im Winter zu sehen, wobei hier Unterschiede zwischen den Stationen zu erkennen sind. Am Vormittag liegt der Peak zwischen 7:00 und 10:00 Uhr und am Abend zwischen 17:00 und 21:00 Uhr. Die niedrigsten Werte des Tages sind an Werktagen in den frühen Morgenstunden (ca. 3:00 bis 6:00) zu verzeichnen, während sie an den Wochenenden, vor allem sonntags, am Nachmittag zwischen 14:00 und 15:00 zu beobachten sind. Unterschiede zwischen den Messstationen sind durch die Lage der Messstelle bedingt, die unterschiedliche Anteile der Emissionen von Verkehr, Hausbrand bzw. Industrie impliziert (Abschnitt 5.2.3).

#### 7.4 STICKSTOFFDIOXID $NO_2$

Von Seiten der EU wird für Stickstoffdioxid ein Jahresmittelwert von  $40 \mu g/m^3$  als bindend vorgeschrieben und ein Stundenmittelwert von  $200 \mu g/m^3$ , für den nicht mehr als 18 Überschreitungen jährlich toleriert werden.

Die Zeitreihen der  $NO_2$ -Jahresmittelwerte aller Grazer Messstationen zeigen, die wie bei  $PM_{10}$ , seit 2005 einen Trend nach unten. An der Messstelle Don Bosco liegt der Jahresmittelwert in allen

Jahren über dem Grenzwert. Der Jahresmittelwert der Messstelle Graz Mitte lag bis 2009 über dem Grenzwert<sup>33</sup>. Alle Zeitreihen, mit Ausnahme von Graz Mitte, zeigen bis 2009 einen deutlichen Rückgang, um danach (2010 bis 2011) wieder anzusteigen. Es folgt ein weiterer Rückgang bis 2016. Für 2017 ist bei allen Messstellen ein Anstieg zu sehen. In Prozent betrachtet ist der Rückgang von NO<sub>2</sub> in der Luft von 2005 bis 2017 weniger stark als jener von PM<sub>10</sub>: Die NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte sinken zwischen 11% (Graz West) und 21% (Graz Mitte). Don Bosco weist einen Rückgang von 15% auf, bei Graz Süd beträgt der Rückgang 17%, bei Graz Ost 12% und bei Graz Nord geht der NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert um 16% zurück.

Bei den NO<sub>2</sub>-1-Stunden-Mittelwerten aller Grazer Messstationen von Anfang 2005 bis Ende 2017 wird der Grenzwert seit 2012 an keiner Messstation mehr überschritten.

Die NO<sub>2</sub>-Belastung ist im Winter am höchsten, gefolgt von Herbst und Frühling und im Sommer am niedrigsten. Die höchsten Belastungen weist die Station Don Bosco auf, gefolgt von Graz Mitte. Graz Süd kommt nur im Winter nahe an Graz Mitte heran und liegt in den anderen Jahreszeiten etwa auf dem Niveau von Graz Ost. Graz Nord hat ganzjährig die niedrigsten NO<sub>2</sub>-Mittelwerte.

Auch bei NO<sub>2</sub> ist eine deutliche Abhängigkeit von der Lufttemperatur gegeben: Je kälter, desto höher ist die NO<sub>2</sub>-Konzentration.

Die Schadstoffbelastung sinkt mit steigender Windgeschwindigkeit, wobei ab ca. 2 m/s kaum mehr eine Verringerung der NO<sub>2</sub>-Belastung zu sehen ist. Von Windstille bis zu einer Windgeschwindigkeit von ca. 2 m/s ist jedoch, mit kleinen messstellenspezifischen Unterschieden, ein deutlicher Abfall der NO<sub>2</sub>-Konzentration zu sehen.

Die mittlere NO<sub>2</sub>-Belastung ändert sich bei Vorhandensein einer Inversion (d.h. Temperaturdifferenz kleiner 0) kaum, das Belastungsniveau ist vor allem bei Frost gleichbleibend bis zu einer Temperaturdifferenz von 0 Grad. Steigt die Temperaturdifferenz über 0 an (Inversion löst sich auf), so sinkt die NO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft steil ab. Dieses Verhalten ist bei allen Messstationen zu beobachten und weist darauf hin, dass für eine erhöhte NO<sub>2</sub>-Belastung schon schwache Inversionen, mit geringen Temperaturunterschieden zu Kalkleiten und kurzer Dauer, ausreichen.

Auch die NO<sub>2</sub>-Belastung zeigt einen deutlichen Tagesverlauf mit 2 Spitzen täglich, mit messstellenspezifischen bzw. lokalen Unterschieden, hauptsächlich bedingt durch den Straßenverkehr. Die Spitzen sind an Werktagen stärker ausgeprägt, als an Wochenendtagen. Die Vormittagsspitzen liegen an Werktagen von 7:00 bis 10:00 Uhr, am Wochenende finden sie etwas später statt und sind deutlich schwächer ausgeprägt. Die Abendspitzen finden im Herbst und Winter von ca. 17:00 bis 21:00 Uhr statt und sind stärker ausgeprägt als im Sommer. Im Frühling und vor allem Sommer sind die Abendspitzen deutlich abgeschwächt und nach hinten verschoben (ca. 19 bis 22 bzw. 23 Uhr). Die geringste NO<sub>2</sub>-Belastung eines Tages ist an den Werktagen in der Nacht um etwa 3:00 zu sehen, an den Wochenenden ist die Belastung am frühen Nachmittag (ca. 14:00) am geringsten (Abschnitt 5.2.3).

---

<sup>33</sup> Messstation wurde Anfang 2010 versetzt.

## 7.5 MODELLIERUNG UND EFFEKTE

Um die meteorologischen Risikofaktoren für  $PM_{10}$ -Grenzwertüberschreitungen quantifizieren zu können, wurden statistische Modelle für die Wahrscheinlichkeit einer Grenzwertüberschreitung von  $PM_{10}$  auf Tagesebene gebildet (siehe Abschnitt 6.1.4). Für die Modellierung wurden nur die Wintermonate (1. Dezember bis Ende Februar) verwendet, da für die anderen Jahreszeiten sehr wenige Überschreitungstage auftreten. Die Modelle liefern fundierte Aussagen über die Signifikanz der potenziellen Einflussfaktoren und sind deshalb zur Ursachenanalyse für  $PM_{10}$ -Überschreitungen gut geeignet. Jedoch ist die Anpassungsgüte der Modelle für die Zielgröße „ $PM_{10}$ -Überschreitungstag ja/nein“ aus statistischer Sicht nicht ausreichend, um als Prognosemodelle für Überschreitungstage zu dienen. Um ein brauchbares Prognosemodell zu erhalten sollte der Erklärungsgrad deutlich über 50% liegen, je nach Anwendungsbereich bewähren sich in der Praxis meist nur Modelle mit Erklärungsgraden von mehr als 70%. Um diese zu erreichen müssten auf jeden Fall engmaschig – am besten auf Halbstundenebene – erhobene Daten der Verkehrsfrequenz in die Modelle eingebunden werden. Zudem wären vollständige Daten des Winterdiensts (Splitt- und Salzstreuung) zumindest auf Tagesebene hilfreich, um die Modellqualität zu verbessern.

- Die Modelle zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Überschreitungstag mit sinkender Lufttemperatur deutlich zunimmt und bei steigender Temperatur abnimmt. Je höher die Windgeschwindigkeit desto niedriger ist das Risiko für eine Überschreitung. Bei Windstille ist das Risiko deutlich erhöht, nimmt jedoch auch mit steigender Temperatur ab.
- Mit steigender Niederschlagssumme nimmt das Risiko ab, jedoch ist der Effekt der Niederschlagssumme weniger stark ausgeprägt ist, als der Effekt der Temperatur.
- Das Risiko für eine Grenzwertüberschreitung ist für Tage mit Inversion höher als für die Tage ohne Inversion. Für Wochenendtage ist das Risiko niedriger, als für die Werktage.
- Je höher der Anteil Splitt in Relation zur Salzmenge, desto höher ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit. Der Effekt ist der Station Graz Ost am stärksten, bei Graz Süd am geringsten.

In der Tabelle 14 sind die untersuchten Einflussfaktoren<sup>34</sup> nach der Stärke ihrer Auswirkung auf eine  $PM_{10}$ -Grenzwertüberschreitung gereiht. Die roten Felder jeder Zeile weisen auf den höchsten Effekt bei der jeweiligen Messstation hin, die grünen und blauen Felder auf den geringsten Effekt des Faktors, der in der betreffenden Spaltenüberschrift genannt ist. Die in den Feldern angeführten Zahlen entsprechen der Reihung der Einflussfaktoren für die jeweilige Station (1 bedeutet den stärksten Effekt, 8 ist der geringste Effekt). Es ist zu sehen, dass die Lufttemperatur bei allen Stationen den stärksten Einfluss auf eine  $PM_{10}$ -Überschreitung hat, wobei der Effekt der Windgeschwindigkeit an den Stationen Don Bosco und Graz Süd als gleich stark einzuschätzen ist. An der zweiten Stelle befindet sich, je nach Messstation, die Windgeschwindigkeit oder die Inversionslage, lediglich bei der Station Graz Ost hat der Unterschied zwischen Wochenende und Werktag („Tag“) den zweitgrößten Effekt. Das Vorliegen einer Inversion hat bei Don Bosco und Graz Ost den geringsten Einfluss, bei Graz Mitte und Graz West den höchsten. Die absolute Streumenge („Splitt+Salz“) ist, mit Ausnahme von Graz Ost, am wenigsten relevant. Das Mengenverhältnis von Splitt zu Salz („Splitt / Salz“) hat einen etwas stärkeren Effekt und liegt an

---

<sup>34</sup> Über die nicht untersuchten Einflussfaktoren, wie Verkehrsstärke oder Emissionen durch Industrie, kann an dieser Stelle keine Aussage gemacht werden. Lediglich die Unterschiede zwischen Werktagen und Wochenende lassen grobe Rückschlüsse auf den Einfluss der Verkehrsstärke auf die Feinstaubbelastung zu.

der sechsten bzw. siebenten Position. Der Unterschied zwischen den beiden Zeiträumen (2005 – 2010) und (2011 – 2017) („Periode“) ist bei Graz Ost am geringsten, gefolgt von Don Bosco und bei Graz Mitte, und bei Graz Nord am stärksten.

	Periode	Tag	Inversion	Temperatur	Wind- geschwindig- keit	Nieder- schlag	Splitt + Salz	Splitt / Salz
Don Bosco	7	3	5	1	1	4	8	6
Graz Mitte	4	5	2	1	3	6	8	7
Graz Nord	4	5	3	1	2	6	8	7
Graz Ost	8	2	5	1	3	4	7	6
Graz Süd	6	4	3	1	1	5	8	7
Graz West	5	4	2	1	3	6	8	7

Tabelle 14: Reihung der untersuchten Einflussfaktoren pro Messstation

Mit Hilfe der geschätzten Modellparameter können Chancen (Odds) berechnet, und dadurch Vergleiche der Effekte verschiedener Einflussfaktoren angestellt werden. Es kann jedoch keine quantitative Aussage über das Risiko bzw. die Wahrscheinlichkeit für eine Grenzwertüberschreitung unter den gegebenen Bedingungen abgeleitet werden, Odds können hingegen als relative Veränderungen von Wahrscheinlichkeiten gegenüber einer Vergleichs- oder Referenzsituation interpretiert werden.

Folgende Aussagen zu den Chancen und deren Veränderungen können für die Faktoren *Periode*, *Tag* und *Inversion* am Beispiel der Station Graz Don Bosco abgeleitet werden:

- Bei einem Vergleich der Perioden (2005 – 2010) und (2011 – 2017) zeigt sich eine Chance von 1 zu 0,61. Die Chance in den Jahren 2005 – 2010 einen Überschreitungstag zu haben, war 1,64 Mal so groß, wie jene in der Periode 2011 – 2017. D.h. die Chance für einen Überschreitungstag hat sich mit fortschreitender Zeit deutlich verringert.
- Die Chance für eine PM<sub>10</sub>-Überschreitung an einem Werktag beträgt das 3,57-fache der Chance, die an einem Wochenendtag besteht.
- Die Chance für eine PM<sub>10</sub>-Überschreitung an einem Inversionstag beträgt das 2,51-fache der Chance, die an einem Tag ohne Inversionswetterlage herrschte (d.h. bei geringerer Tagesmitteltemperatur in Graz als in Kalkleiten).
- Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Chance für einen Überschreitungstag bei einer Temperatur von -10 Grad, je nach Messstation, ca. das 10- bis 15-fache der Chance bei einer Temperatur von 0 Grad beträgt. Umgekehrt verringert sich die Chance bei einer Temperatur von 10 Grad auf 6% bis 7% (6 bis 7 Hundertstel) der Chance, die für eine Lufttemperatur von 0 Grad besteht.

- Die Erhöhung der Windgeschwindigkeit wirkt sich äußerst stark auf die Chance aus: Eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s verringert die Chance auf das 0,02-fache (ein Fünfzigstel) verglichen mit totaler Windstille (d.h. Luftstillstand). In Graz sind Windgeschwindigkeiten von 1 m/s im Winter allerdings sehr unüblich, da die Mediane der Windgeschwindigkeiten an den Grazer Messstellen im Winter nur bei 0,4 bis 0,5 m/s liegen.
- 1 mm Niederschlag senkt die mittlere Chance für eine Überschreitung auf das 0,75-fache (75% bzw. Verringerung der Chance um ein Viertel) und 10 mm Niederschlag bereits auf ein Zehntel (10%) im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag.
- Eine Erhöhung des Splitt-zu-Salz-Verhältnis (d.h. Steigerung des Splitt Anteils) erhöht die Chancen für einen Überschreitungstag, wobei diese Einflussgröße bei der Station Graz Ost den höchsten Effekt hat, während sich bei Graz Süd kaum eine Auswirkung zeigt. Ausgehend von einem Splitt-zu-Salz Verhältnis von 1:1 verringert sich z.B. bei Don Bosco die Chance auf ca. 75% (Faktor 0,75), wenn das Verhältnis auf 1:10 (1 Teil Splitt, 10 Teile Salz) verkleinert wird. Das Chancenverhältnis bei einem Splitt-zu-Salz Verhältnis von 5:1 beträgt bei Don Bosco 3, d.h. die Chance für einen Überschreitungstag ist etwa 3-Mal so hoch, wie die Chance beim 1:1 Mengenverhältnis.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzahl der PM <sub>10</sub> -Überschreitungstage in Graz von 2005 bis 2017. Quelle: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15.....	9
Abbildung 2: Anzahl der PM <sub>10</sub> -Tagesmittelüberschreitungen gegliedert nach Wochentag über alle Jahre (2005 – 2017) .....	10
Abbildung 3: Jahresmittelwerte für PM <sub>10</sub> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017.....	10
Abbildung 4: Jahresmittelwerte für NO <sub>2</sub> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017 .....	11
Abbildung 5: Stundenmittelwerte für NO <sub>2</sub> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017.....	12
Abbildung 6: Anzahl von NO <sub>2</sub> -Überschreitungstagen für Zielwert 80 µg/m <sup>3</sup> an den Grazer Messstellen von 2005 bis 2017.....	12
Abbildung 7: Anzahl an NO <sub>2</sub> -Tagesmittelüberschreitungen von mehr als 80 µg/m <sup>3</sup> gegliedert nach Wochentag über alle Jahre (2005 – 2017) .....	13
Abbildung 8: Fotos der Grazer Luftgütemessstellen im Stadtgebiet ©Amt der Steiermärkischen Landesregierung.....	15
Abbildung 9: Lage der Grazer Luftgütemessstellen im Stadtgebiet.....	16
Abbildung 10: Barplot der Gesamtmengen [in Tonnen] für Splitt und Salz pro Monat und Jahr .....	19
Abbildung 11: Mengenverhältnisse Splitt zu Salz und Salz zu Splitt für jeden Monat über die Jahre 2005 bis 2017 .....	20
Abbildung 12: Exemplarischer Boxplot.....	22
Abbildung 13: Bevölkerungsentwicklung für Graz und NUTS-3-Region Graz .....	24
Abbildung 14: Wochenverlauf des durchschnittlichen täglichen Verkehrs für ausgewählte ASFINAG Zählstellen nahe Graz, 2017 .....	26
Abbildung 15: Verkehrs-, Transportaufkommen und Treibhausgasemissionen für EU-28, Veränderung gegenüber 2005.....	28
Abbildung 16: Entwicklung von Kfz bzw. PKW Bestand und Kfz Dichte in der Steiermark.....	29
Abbildung 17: Entwicklung des Anteils Diesel PKW an Neuzulassungen und Bestand in Österreich	30
Abbildung 18: Entwicklung der Temperatur im Zeitverlauf für jeden Messort und pro Jahreszeit .....	34
Abbildung 19: Entwicklung der Temperatur im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Nord.....	35
Abbildung 20: Entwicklung der Temperatur im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Don Bosco.....	35
Abbildung 21: Lufttemperatur im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen.....	36
Abbildung 22: Verteilung der Windrichtung nach Sektoren für jede Messstelle und Jahreszeit.....	37
Abbildung 23: Verteilung der Windrichtung [0-360°] für jede Messstelle und Jahreszeit .....	37
Abbildung 24: Entwicklung der Windgeschwindigkeit im Zeitverlauf für jeden Messort und pro Jahreszeit.....	38
Abbildung 25: Entwicklung der Windgeschwindigkeit im Zeitverlauf pro Jahreszeit nur für Graz Nord .....	39
Abbildung 26: Entwicklung der Windgeschwindigkeit im Zeitverlauf pro Jahreszeit nur für Graz Don Bosco .....	39
Abbildung 27: Windgeschwindigkeit im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen ...	40
Abbildung 28: Histogramme der Verteilungen der Windgeschwindigkeiten für die Grazer Luftgütemessstellen und ausgewählte Wetterstationen der ZAMG seit Juli 2014 .....	42
Abbildung 29: Entwicklung der Inversionswetterlagen pro Messstelle für Winter von 2004 bis 2018.	43
Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Inversionslängen in Tagen, pro Jahreszeit und Messstation .....	44

Abbildung 31: Temperaturdifferenz zwischen den Grazer Messstationen und zu Kalkleiten im Wochenverlauf.....	45
Abbildung 32: Entwicklung des Gesamtniederschlags in den Wintermonaten für Graz Nord über alle Jahre .....	46
Abbildung 33: Entwicklung des Gesamtniederschlags für Graz Nord über alle Jahre.....	46
Abbildung 34: Entwicklung der Luftfeuchtigkeit über alle Jahre hinweg pro Jahreszeit.....	47
Abbildung 35: Luftfeuchtigkeit im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen .....	48
Abbildung 36: PM <sub>10</sub> -Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation .....	49
Abbildung 37: NO <sub>2</sub> -Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation.....	50
Abbildung 38: Entwicklung von PM <sub>10</sub> für jede Luftgütemessstelle pro Jahreszeit.....	51
Abbildung 39: Entwicklung von Feinstaub PM <sub>10</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Don Bosco...	52
Abbildung 40: Entwicklung von Feinstaub PM <sub>10</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Süd .....	52
Abbildung 41: Entwicklung von Feinstaub PM <sub>10</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Mitte .....	53
Abbildung 42: Entwicklung von NO <sub>2</sub> für jede Luftgütemessstelle pro Jahreszeit .....	54
Abbildung 43: Entwicklung von NO <sub>2</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Don Bosco .....	55
Abbildung 44: Entwicklung von NO <sub>2</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Süd .....	55
Abbildung 45: Entwicklung von NO <sub>2</sub> im Zeitverlauf pro Jahreszeit für Graz Mitte.....	56
Abbildung 46: PM <sub>10</sub> im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen.....	57
Abbildung 47: NO <sub>2</sub> im Wochenverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen .....	57
Abbildung 48: PM <sub>10</sub> im Tagesverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen .....	58
Abbildung 49: NO <sub>2</sub> im Tagesverlauf pro Jahreszeit und für alle Messstationen .....	58
Abbildung 50: Korrelationsmatrix zwischen Luftschadstoffen und meteorologischen Parametern pro Jahreszeit für alle Messstationen.....	59
Abbildung 51: PM <sub>10</sub> und bzw. NO <sub>2</sub> im Tagesverlauf pro Jahreszeit, für alle Messstationen .....	60
Abbildung 52: Lufttemperatur (y-Achse links) bzw. Windgeschwindigkeit (y-Achse rechts) im Tagesverlauf pro Jahreszeit, für alle Messstationen .....	61
Abbildung 53: Temperaturdifferenz zwischen Graz und Kalkleiten (y-Achse links) bzw. Windgeschwindigkeit (y-Achse rechts) im Tagesverlauf pro Jahreszeit, für alle Messstationen.....	62
Abbildung 54: Temperaturdifferenz gegen Windgeschwindigkeit pro Messstation, nur Winter .....	63
Abbildung 55: PM <sub>10</sub> gegen Lufttemperatur pro Messstation.....	64
Abbildung 56: NO <sub>2</sub> gegen Lufttemperatur pro Messstation .....	64
Abbildung 57: PM <sub>10</sub> gegen Temperaturdifferenz zu Kalkleiten pro Messstation, nur Wintersaisonen	65
Abbildung 58: PM <sub>10</sub> gegen die Inversionsdauer in Tagen pro Messstation und Jahreszeit .....	66
Abbildung 59: NO <sub>2</sub> gegen Temperaturdifferenz zu Kalkleiten pro Messstation, nur Wintersaisonen .	67
Abbildung 60: PM <sub>10</sub> gegen Windgeschwindigkeit pro Messstation, nur Wintersaisonen.....	68
Abbildung 61: NO <sub>2</sub> gegen Windgeschwindigkeit pro Messstation, nur Wintersaisonen .....	68
Abbildung 62: PM <sub>10</sub> gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Windstärkenklasse .....	70
Abbildung 63: NO <sub>2</sub> gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Windstärkenklasse .....	70
Abbildung 64: PM <sub>10</sub> gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Inversion (ja/nein) .....	71
Abbildung 65: NO <sub>2</sub> gegen Windrichtung für alle Messstationen, pro Jahreszeit und Inversion (ja/nein) .....	71
Abbildung 66: Mittlerer Sonnenscheinanteil (in %) pro Stunde (y-Achse links, gelbe Kurve) und PM <sub>10</sub> (y-Achse rechts) im Tagesverlauf .....	72

Abbildung 67: Mittlerer Sonnenscheinanteil (in %) pro Stunde (y-Achse links, gelbe Kurve) und NO <sub>2</sub> (y-Achse rechts) im Tagesverlauf .....	72
Abbildung 68: PM <sub>10</sub> -Überschreitungswahrscheinlichkeit für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Inversion ja/nein in Abhängigkeit von der Temperatur, gegliedert nach Werktag/Wochenende .....	76
Abbildung 69: PM <sub>10</sub> -Überschreitungswahrscheinlichkeit für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Inversion ja/nein in Abhängigkeit vom Niederschlag gegliedert nach Werktag/Wochenende .....	77
Abbildung 70: PM <sub>10</sub> -Überschreitungswahrscheinlichkeit für verschiedene Lufttemperaturen und Inversion ja/nein in Abhängigkeit vom Splitt-zu-Salz Verhältnis gegliedert nach Werktag/Wochenende .....	78
Abbildung 71: Chance für einen PM <sub>10</sub> -Überschreitungstag in Abhängigkeit von der Lufttemperatur .....	80
Abbildung 72: Chance für einen PM <sub>10</sub> -Überschreitungstag in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit .....	81
Abbildung 73: Chance für einen PM <sub>10</sub> -Überschreitungstag in Abhängigkeit von der Niederschlagssumme .....	81
Abbildung 74: Chance für einen PM <sub>10</sub> -Überschreitungstag in Abhängigkeit vom Splitt-zu-Salz-Verhältnis .....	82
Abbildung 75: Wirtschaftliche Entwicklung und Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid und Feinstaub im Vergleich: Darstellung der Veränderungen gegenüber dem Jahr 2005 .....	83
Abbildung 76: Lufttemperatur in Abhängigkeit von PM <sub>10</sub> -Überschreitung, Inversion und Wochentag für Wintermonate .....	87
Abbildung 77: Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von PM <sub>10</sub> -Überschreitung, Inversion und Wochentag für Wintermonate .....	88

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Luftgütemessstellen in Graz .....	16
Tabelle 2: Jährlicher Prozentsatz an Fehlwerten (missing values) für PM <sub>10</sub> K pro Messstelle in Graz	17
Tabelle 3: Jährlicher Prozentsatz an Fehlwerten (missing values) für NO <sub>2</sub> pro Messstelle in Graz ...	18
Tabelle 4: Relevante meteorologische Messstellen .....	18
Tabelle 5: Durchschnittlicher täglicher Verkehr und Schwerverkehrsanteil an ausgewählten Abschnitten in Graz, 2006 und 2010 .....	26
Tabelle 6: Jährliche Wachstumsraten von Verkehrsstärke und Treibstoffverbrauch in Österreich, 2005 bis 2016 .....	27
Tabelle 7: Verkehrs-, Transportaufkommen und Treibhausgasemissionen für EU-28 , 2005 bis 2016 .....	28
Tabelle 8: Anteil der Verursachergruppen Heizung, Industrie und Straßenverkehr an PM <sub>10</sub> - und NO <sub>2</sub> -Emissionen, gemäß Emissionskataster Steiermark .....	31
Tabelle 9: PM <sub>10</sub> -Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation .....	49
Tabelle 10: NO <sub>2</sub> -Mittelwerte über die Jahre 2005 bis 2017 pro Jahreszeit und Messstation .....	50
Tabelle 11: Modellqualität der logistischen Regression für jeden Messort.....	74
Tabelle 12: Chancen für Überschreitungstage aus der logistischen Regression.....	79
Tabelle 13: Mittlere jährliche Anzahl Überschreitungs- bzw. Inversionstage und mittlerer Anteil Überschreitungstage bei Inversion bzw. Inversionstage mit PM <sub>10</sub> -Überschreitung pro Messstation nur für die Wintermonate .....	87
Tabelle 14: Reihung der untersuchten Einflussfaktoren pro Messstation.....	91
Tabelle 15: Anzahl der Überschreitungstage, Inversionstage, Inversionstage mit PM <sub>10</sub> Überschreitung, Überschreitungstage ohne Inversion pro Messstation und Jahr, alle Jahreszeiten..	99
Tabelle 16: Anzahl der Überschreitungstage, Inversionstage, Inversionstage mit PM <sub>10</sub> -Überschreitung, Überschreitungstage ohne Inversion pro Messstation und Jahr, nur für Winter .....	102

## 10 Literaturverzeichnis

- Bauer, H., Marr, I., Kasper-Giebl, A., Limbeck, A., Caseiro, A., Handler, M., Jankowski, N., Klatzer, B., Kotianova, P., Pouresmaeil, P., Schmidl, Ch., Sageder, M., Puxbaum, H., 2007: Endbericht für das Projekt "AQUELLA" Steiermark Bestimmung von Immissionsbeiträgen in Feinstaubproben. Bericht der Technischen Universität Wien, Institut für Chemische Technologien und Analytik, im Auftrag des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 17C – Technische Umweltkontrolle, Referat Luftgüteüberwachung. [http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10085838\\_2221544/620a410c/Endbericht\\_Graz.pdf](http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10085838_2221544/620a410c/Endbericht_Graz.pdf)
- Dippold, M., Fellendorf, M., Flucher, S., Haberl, M., Hausberger, S., Heinfellner, H., Hofer, K., Lichtblau, G., Nagl, C. (2018): Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität in Graz, Quantifizierung und Beurteilung. Studie im Auftrag vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abteilung 15 – Referat Luftreinhaltung.
- EU – Europäische Union (2008): Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe.
- European Environment Agency (2018): Emissions of air pollutants from transport. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-6>
- European Union (2018): EU Transport in figures. Statistical Pocketbook 2018. ISBN 978-92-79-73952-1, ISSN 2363-2739, doi:10.2832/05477, MI-AA-17-001-EN-N.
- Fahrmeier, L. und Kneib T. und Lang S. (2009): Regression, Modelle, Methoden und Anwendungen, zweite Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kirchsteiger, B., Kasper-Giebl, A., Kistler, M., 2018: Aerosolquellenanalyse für Graz, Winter 2017. Bericht der Technischen Universität Wien, Institut für Chemische Technologien und Analytik, im Auftrag des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 17C – Technische Umweltkontrolle, Referat Luftgüteüberwachung. Berichtsnummer: CTA-EAC-01/18.
- McCullagh, P. and Nelder, J. A. (1989): Generalized Linear Models, Second Edition, Chapman & Hall, Monographs on Statistics and Applied Probability 37
- Öttl, D., Payer, I., Pongratz, T., (2014): Emissionskataster Steiermark, Methoden – Auswertungen, Bearbeitungsstand 2014. Bericht Nr. Lu-13-2014. Herausgeber: Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abteilung 15 – Energie, Wohnbau, Technik.
- Pongratz, Th. (2018): Luftgütemessungen in der Steiermark, Jahresbericht 2017. Bericht Nr. Lu-07-2018. Herausgeber: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15 – Energie, Wohnbau, Technik, Referat Luftreinhaltung.
- Schwillinsky, S., Weiss, L. (2017): Automatische Straßenverkehrszählung 2016 – Bundesweite Auswertung. AustriaTech – Gesellschaft des Bundes für technologiepolitische Maßnahmen GmbH. Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Steirische Statistiken, Heft 4/2017: Steiermark Straßenverkehr 2016 Kfz-Bestand, Neuzulassungen und Unfallgeschehen. Abteilung 1, 7 Landes- und Regionalentwicklung, Referat Statistik und Geoinformation. [www.landesstatistik.steiermark.at](http://www.landesstatistik.steiermark.at).

Straßenverkehrszählung 2010: Auswertung der Straßenverkehrszählung 2010 auf Autobahnen, Schnellstraßen und Landesstraßen B. Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - Abteilung IV/ST1 und II/Infra5.

UBA (Anderl, M., Gangl, M., Haider, S., et al.), 2014: Bundesländer-Luftschadstoffinventur 1990-2013. Umweltbundesamt – Wien.

## 11 Anhang

### 11.1 TABELLEN

Tabelle 15: Anzahl der Überschreitungstage, Inversionstage, Inversionstage mit PM<sub>10</sub> Überschreitung, Überschreitungstage ohne Inversion pro Messstation<sup>35</sup> und Jahr, alle Jahreszeiten

		Anzahl PM <sub>10</sub> - Überschreitungs- tage	Anzahl Inversions- tage	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung und Inversion	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung <b>ohne</b> Inversion
<b>Summe Don Bosco</b>		<b>834</b>	<b>880</b>	<b>437</b>	<b>396</b>
<b>Mittelwert pro Jahr</b>		<b>64</b>	<b>68</b>	<b>34</b>	<b>30</b>
<b>Graz Don Bosco</b>	2005	129	64	54	74
	2006	115	78	58	57
	2007	74	64	40	34
	2008	56	69	34	22
	2009	43	64	25	18
	2010	76	58	31	45
	2011	74	87	40	34
	2012	51	83	29	22
	2013	46	55	25	21
	2014	40	48	19	21
	2015	50	70	28	22
2016	39	65	29	10	
2017	41	75	25	16	
<b>Summe Graz Mitte</b>		<b>580</b>	<b>489</b>	<b>231</b>	<b>348</b>
<b>Mittelwert pro Jahr</b>		<b>45</b>	<b>38</b>	<b>18</b>	<b>27</b>
<b>Graz Mitte</b>	2005	113	42	30	82
	2006	108	43	37	71
	2007	65	31	25	40
	2008	47	40	24	23
	2009	34	26	8	26
	2010	16	27	7	9
	2011	55	51	28	27
	2012	22	41	9	13
	2013	27	32	16	11
	2014	11	29	3	8
	2015	18	45	9	9
2016	29	45	20	9	
2017	35	37	15	20	

<sup>35</sup> Die Summe der Überschreitungstage mit und ohne Inversion kann von der in der Tabelle angegebenen Anzahl der Überschreitungstage abweichen, da für manche Tage keine Temperaturmessungen zur Verfügung standen und diese Tage als Missing Values bei der Beurteilung der Inversion geführt werden. Wenn es an einem solchen Tag zu einer PM<sub>10</sub>-Überschreitung kam, so fehlt dieser Tag und die Summe aus der 3. und 4. Spalte der Tabelle ist kleiner, als die Werte in der ersten Spalte. Es handelt sich jedoch meist um Abweichungen von einigen wenigen Tagen.

		Anzahl PM <sub>10</sub> - Überschreitungs- tage	Anzahl Inversions- tage	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung und Inversion	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung <b>ohne</b> Inversion
	<b>Summe Graz Nord</b>	<b>322</b>	<b>826</b>	<b>152</b>	<b>170</b>
	<b>Mittelwert pro Jahr</b>	<b>25</b>	<b>64</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Graz Nord</b>	2005	56	66	26	30
	2006	67	77	36	31
	2007	37	64	16	21
	2008	21	57	13	8
	2009	18	69	8	10
	2010	23	59	8	15
	2011	27	95	14	13
	2012	13	67	4	9
	2013	8	36	7	1
	2014	14	46	3	11
	2015	14	63	6	8
	2016	7	57	4	3
	2017	17	70	7	10
	<b>Summe Graz Ost</b>	<b>598</b>	<b>896</b>	<b>290</b>	<b>249</b>
	<b>Mittelwert pro Jahr</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>24</b>	<b>21</b>
<b>Graz Ost</b>	2006	107	42	21	27
	2007	60	78	35	25
	2008	43	79	33	10
	2009	27	78	15	12
	2010	65	65	30	35
	2011	64	100	37	27
	2012	39	90	16	23
	2013	47	60	24	23
	2014	36	59	16	20
	2015	44	84	20	24
		2016	29	78	22
	2017	37	83	21	16

		Anzahl PM <sub>10</sub> - Überschreitungs- tage	Anzahl Inversions- tage	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung und Inversion	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung <b>ohne</b> Inversion
<b>Summe Graz Süd</b>		<b>837</b>	<b>984</b>	<b>510</b>	<b>326</b>
<b>Mittelwert pro Jahr</b>		<b>64</b>	<b>76</b>	<b>39</b>	<b>25</b>
<b>Graz Süd</b>	2005	98	62	49	48
	2006	97	70	55	42
	2007	73	78	47	26
	2008	66	79	51	15
	2009	56	78	36	20
	2010	68	65	31	37
	2011	68	100	52	16
	2012	68	90	36	32
	2013	48	60	26	22
	2014	46	59	23	23
	2015	64	83	43	21
	2016	36	71	29	7
2017	49	89	32	17	
<b>Summe Graz_W</b>		<b>467</b>	<b>731</b>	<b>248</b>	<b>219</b>
<b>Mittelwert pro Jahr</b>		<b>36</b>	<b>56</b>	<b>19</b>	<b>17</b>
<b>Graz West</b>	2005	62	48	27	35
	2006	70	59	38	32
	2007	46	42	25	21
	2008	35	51	24	11
	2009	28	40	15	13
	2010	40	56	17	23
	2011	46	82	30	16
	2012	25	70	12	13
	2013	22	45	14	8
	2014	22	47	8	14
	2015	16	63	8	8
	2016	25	62	16	9
2017	30	66	14	16	
<b>Summe gesamt</b>		<b>3638</b>	<b>4806</b>	<b>1868</b>	<b>1708</b>

Tabelle 16: Anzahl der Überschreitungstage, Inversionstage, Inversionstage mit PM<sub>10</sub>-Überschreitung, Überschreitungstage ohne Inversion<sup>36</sup> pro Messstation und Jahr, nur für Winter

		Anzahl PM <sub>10</sub> - Überschreitungs- tage	Anzahl Inversions- tage	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung und Inversion	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung <b>ohne</b> Inversion
<b>Summe Don Bosco</b>		542	520	323	218
<b>Mittelwert pro Jahr</b>		42	40	25	17
<b>Graz Don Bosco</b>	<b>2005</b>	56	43	37	18
	<b>2006</b>	65	41	38	27
	<b>2007</b>	48	42	32	16
	<b>2008</b>	42	45	28	14
	<b>2009</b>	29	31	13	16
	<b>2010</b>	52	30	21	31
	<b>2011</b>	51	49	28	23
	<b>2012</b>	37	44	21	16
	<b>2013</b>	30	34	21	9
	<b>2014</b>	26	34	15	11
	<b>2015</b>	36	38	21	15
<b>2016</b>	33	43	26	7	
<b>2017</b>	37	46	22	15	
<b>Summe Graz Mitte</b>		360	328	186	173
<b>Mittelwert pro Jahr</b>		28	25	14	13
<b>Graz Mitte</b>	<b>2005</b>	40	32	24	15
	<b>2006</b>	59	31	29	30
	<b>2007</b>	42	25	22	20
	<b>2008</b>	31	27	17	14
	<b>2009</b>	20	9	4	16
	<b>2010</b>	10	15	4	6
	<b>2011</b>	32	34	18	14
	<b>2012</b>	18	23	7	11
	<b>2013</b>	25	23	16	9
	<b>2014</b>	8	25	2	6
	<b>2015</b>	15	25	9	6
<b>2016</b>	25	32	19	6	
<b>2017</b>	35	27	15	20	

<sup>36</sup> Die Summe der Überschreitungstage mit und ohne Inversion kann von der in der Tabelle angegebenen Anzahl der Überschreitungstage abweichen, da für manche Tage keine Temperaturmessungen zur Verfügung standen und diese Tage als Missing Values bei der Beurteilung der Inversion geführt werden. Wenn es an einem solchen Tag zu einer PM<sub>10</sub>-Überschreitung kam, so fehlt dieser Tag und die Summe aus der 3. und 4. Spalte der Tabelle ist kleiner, als die Werte in der ersten Spalte. Es handelt sich jedoch meist um Abweichungen von einigen wenigen Tagen.

		Anzahl PM <sub>10</sub> - Überschreitungs- tage	Anzahl Inversions- tage	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung und Inversion	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung <b>ohne</b> Inversion
	<b>Summe Graz Nord</b>	<b>215</b>	<b>467</b>	<b>126</b>	<b>89</b>
	<b>Mittelwert pro Jahr</b>	<b>17</b>	<b>36</b>	<b>10</b>	<b>7</b>
<b>Graz Nord</b>	2005	20	45	18	2
	2006	47	40	30	17
	2007	27	42	14	13
	2008	17	44	12	5
	2009	16	32	7	9
	2010	20	31	7	13
	2011	13	46	8	5
	2012	8	26	4	4
	2013	8	19	7	1
	2014	7	30	2	5
	2015	10	31	6	4
	2016	5	41	4	1
	2017	17	40	7	10
	<b>Summe Graz Ost</b>	<b>389</b>	<b>491</b>	<b>216</b>	<b>135</b>
	<b>Mittelwert pro Jahr</b>	<b>32</b>	<b>41</b>	<b>18</b>	<b>11</b>
<b>Graz Ost</b>	2005	53	20	14	1
	2006	39	45	27	12
	2007	33	50	27	6
	2008	21	36	9	12
	2009	38	34	17	21
	2010	36	51	22	14
	2011	32	45	15	17
	2012	31	35	21	10
	2013	18	35	9	9
	2014	27	44	15	12
	2015	27	49	22	5
	2016	34	47	18	16

		Anzahl PM <sub>10</sub> - Überschreitungs- tage	Anzahl Inversions- tage	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung und Inversion	Anzahl Tage mit PM <sub>10</sub> - Überschreitung <b>ohne</b> Inversion
	<b>Summe Graz Süd</b>	<b>569</b>	<b>558</b>	<b>377</b>	<b>191</b>
	<b>Mittelwert pro Jahr</b>	<b>44</b>	<b>43</b>	<b>29</b>	<b>15</b>
<b>Graz Süd</b>	2005	46	43	35	10
	2006	61	41	37	24
	2007	46	45	33	13
	2008	49	50	39	10
	2009	39	36	21	18
	2010	54	34	22	32
	2011	46	51	36	10
	2012	46	45	27	19
	2013	37	35	25	12
	2014	30	35	18	12
	2015	40	44	30	10
2016	33	49	28	5	
2017	42	50	26	16	
	<b>Summe Graz_W</b>	<b>326</b>	<b>434</b>	<b>201</b>	<b>125</b>
	<b>Mittelwert pro Jahr</b>	<b>25</b>	<b>33</b>	<b>15</b>	<b>10</b>
<b>Graz West</b>	2005	27	35	21	6
	2006	41	36	29	12
	2007	37	29	24	13
	2008	26	35	19	7
	2009	19	22	8	11
	2010	36	28	14	22
	2011	29	45	20	9
	2012	19	33	10	9
	2013	19	29	14	5
	2014	9	30	4	5
	2015	12	32	8	4
2016	22	40	16	6	
2017	30	40	14	16	
	<b>Summe gesamt</b>	<b>2401</b>	<b>2798</b>	<b>1429</b>	<b>931</b>

## 11.2 EXECUTIVE SUMMARY (ENGLISH)

### Objective

This study was prepared on behalf of the WKO (Austrian Federal Economic Chamber and the Styrian Federal Economic Chamber) with a view to a future revision of the Ambient Air Quality Directive ("AAQD") at European level and a possible discussion on limit values and flexibility mechanisms. WKO wanted to get an idea of the current situation of air quality and its development over the last 10 to 15 years by means of evidence-based analyses, with particulate matter pollution (PM<sub>10</sub>) and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) being the air pollutants of primary interest. In the city of Graz compliance with the limit values has been a major challenge for years. Due to the special weather conditions and topography, Graz was chosen as the adequate study area. The Styrian Provincial Government, Department 15, Air Pollution Control Division, provided data of the air quality sampling points and meteorological measuring stations in Graz from October 2004 to March 2018. The data are quality-assured half-hour averages.

A major objective of the analyses was to assess the contribution of the special topological location of Graz and the meteorological conditions associated with it - such as significant inversion weather conditions in the winter months and weak ventilation by wind - to particulate matter and nitrogen dioxide pollution in Graz.

### Limit value exceedances (sections 1.2 and 1.3)

The currently relevant provisions for PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> determining the framework for possible measures, are laid down in the EU Ambient Air Quality Directive (AAQD) 2008/50/EC.

For the daily mean value (24-hour values) of PM<sub>10</sub>, a limit value of 50 µg/m<sup>3</sup> applies, which may not be exceeded more than 35 times in one year. The number of PM<sub>10</sub> exceedance days in Graz has decreased significantly since 2005 at all measuring stations. However, in 2017 more than 35 exceedance days were recorded at the sampling points Don Bosco and Graz Süd. The number of exceedances is lowest on Sundays, followed by Saturdays and Mondays. The PM<sub>10</sub> daily limit is most frequently exceeded in the middle of the week (Wednesday or Thursday). On an average weekend day (Saturday, Sunday) since 2005, about half as many exceedances as on a working day were observed.

The PM<sub>10</sub> annual mean shall not exceed 40 µg/m<sup>3</sup>. The PM<sub>10</sub> annual mean values have shown a downward trend since 2005, and since 2011 there has been no exceedance of the annual mean value at any of the sampling points in Graz. Between 2005 and 2017, the percentage decline for all sampling points is higher than 20%. Graz Nord shows the strongest decline with 45%, compared to the annual average for 2005. The smallest decline of 23% can be observed in Graz West (see section 1.3.1).

The limit value for the annual NO<sub>2</sub> average for ambient air is 40 µg/m<sup>3</sup>. At the sampling point Don Bosco the annual mean value was above this limit in all years, at the sampling point Graz Mitte the limit value was exceeded until 2009. The annual NO<sub>2</sub> means have decreased between 11% (Graz West) and 21% (Graz Mitte) since the year 2005. Don Bosco showed a decline of 15%.

The NO<sub>2</sub> limit value of 200 µg/m<sup>3</sup> for 1-hour averages, for which a maximum of 18 exceedances per year are permitted, has not been exceeded any more at the Graz monitoring stations since 2012 (see section 1.3.2).

## Framework Conditions (section 4)

From 2005 to 2017, the number of inhabitants and population density in Graz show a clear and continuous increase of approximately 18% (section 4.1). The economy has developed positively over this period. The gross regional product per inhabitant increased by almost 22% (from 2005 to 2016), the gross median income by 24.5% and the number of overnight stays by 58%. Overall, there is an upward trend in economic development and activity, with tourism showing the largest increase (section 4.2).

For illustrating the traffic situation in Graz and its development over the last 10 to 15 years, secondary data for Austria and Styria were applied in this study (section 4.3). The average growth rate of traffic volumes at the Austrian automated counting points in the period 2005 to 2016 is 1.1% per year on average, with growth being more significant on working days than on weekends. In Styria as a whole, the number of commuters rose by almost 6% (incoming commuters) and 7% (outgoing commuters) between 2009 and 2016. Referring to Styria, the degree of motorisation (vehicle density = number of motor vehicles per 1000 inhabitants) increased by almost 15% between 2004 and 2017, and the number of motor vehicles by 18.7% (section 4.4). The development of the share of diesel vehicles in the passenger car fleet showed a clear upward trend until 2016, rising Austrian-wide by 7.8 percentage points from 2004 (49.2 to 57%); in 2017, there was a slight decline of 0.4 percentage points.

In the report on the “emission register Styria” (reference year 2014) the shares of emission sources of PM<sub>10</sub> and NO<sub>x</sub> are given by percentage: Accordingly, road transport accounted for 42% of PM<sub>10</sub> emissions and 48% of NO<sub>x</sub> emissions, including re-suspension processes for PM<sub>10</sub>. PM<sub>10</sub> heating emissions are specified to be 21% and NO<sub>x</sub> emissions from industry amount to 31% (see section 4.5). The assessment of the impact of different emission sources on a local air quality situation is highly complex and is usually carried out using sophisticated dispersion models, mass balances or the analysis of source-specific key substances (tracers). It is therefore not possible to allocate emissions 1:1 to the pollution situation (cf. the Aquella studies by Bauer et al., 2007, and Kirchsteiger et al., 2017).

In the city of Graz there have been major changes in winter-sanding and -salting since 2005, which are reflected in the ratio of winter-sanding to road salting. While in winter 2004/2005 the ratio winter-sanding vs. salting was 4:1, the situation reversed in the following years: Since winter 2014/2015 the proportion has reversed to one part of winter-sanding and four parts of salting (see section 2.3).

## Outcomes

### Meteorology

While the summer temperatures at the Graz observation stations have been developing very smoothly since 2005 with a slightly increasing trend, the mean winter temperatures have clearly shown ups and downs and no continuous trend: The winters 2006/2007 as well as 2013/2014, 2014/2015 and 2015/2016 were relatively warm, the winters 2009/2010, 2010/2011 and 2016/2017 show relatively low mean temperatures (see section 5.1.1).

The average wind speeds at the stations in the urban area of Graz are constantly below 1 m/s and thus clearly below the wind speeds recorded in the city of Vienna. Across all stations, the wind blows on average about 2 to 3 times stronger in Vienna than in Graz (see section 5.1.3). The wind situation in Graz depends on the season and the time of day: Lowest wind speeds are recorded in autumn

and winter. In the course of the day, the lowest wind speeds can be observed in the early morning hours and the highest in the afternoon (see section 6.1.2).

The number of inversion days in Graz varies significantly from year to year, but shows no visible trend upwards or downwards. On average, 62 inversion days per year were counted at the observation stations, 37 occurred during the meteorological winter months (December to February; see section 5.1.4 and tables in the appendix). The majority of inversion weather conditions lasted only one day. However, inversions with durations of two days occur very frequently, especially in winter, and inversion durations of six or seven days are quite common in winter. The frequency of inversion weather conditions decreases with increasing wind speed. At wind speeds above 2 m/s almost no inversions can be observed (section 6.1.2).

### PM<sub>10</sub>

In winter, the particulate matter pollution in Graz is the highest, showing clear differences between the sampling points. Although the Don Bosco sampling point shows the highest number of annual exceedance days, the winter average over all years is somewhat higher in Graz Süd than in Don Bosco.

The half-hourly means of the PM<sub>10</sub> concentration show a clear dependence on ambient air temperature and wind speed. The stronger the wind, the lower is the PM<sub>10</sub> concentration, showing no further reduction of PM<sub>10</sub> above wind speeds of approximately 2 m/s (section 6.1.3.2). The lower the air temperature, the higher is the particulate matter concentration.

On winter days with inversion weather conditions, particulate matter pollution is significantly increased: the stronger the inversion, the higher is PM<sub>10</sub>. On average over all sampling points and years, on 59% of all PM<sub>10</sub> exceedance days an inversion occurred. On exceedance days without inversion the average day temperature is significantly lower (mean temperature significantly below 0 degrees Celsius) than on exceedance days with inversion. Conversely considering all inversion days, on average over all stations and years, 50% of these inversion days are also PM<sub>10</sub> exceedance days (see table 13 in the report and tables in the annex).

The PM<sub>10</sub> pollution shows clear daily patterns with two peaks per day, which are less significant in summer and at weekends (Saturday and Sunday) than on working days. The highest peaks can be seen in the middle of the week (Wednesday and Thursday) and in winter. Due to the location of the sampling points, the proportions of the most relevant emission sources are naturally differing (section 5.2.3).

### NO<sub>2</sub>

NO<sub>2</sub> levels are highest in winter, followed by autumn and spring and lowest in summer. The Don Bosco station has the highest pollution, followed by Graz Mitte.

Even NO<sub>2</sub> shows a clear dependence on the air temperature: The colder, the higher the NO<sub>2</sub> concentration. The pollutant load decreases with increasing wind speed, showing no further reduction of NO<sub>2</sub> above wind speeds of approximately 2 m/s.

In the case of inversion, the average NO<sub>2</sub> load is higher than without inversion. Strength and duration of the inversion, however, have little effect: To cause an increased NO<sub>2</sub> concentration, even weak inversions with short duration and small temperature differences to the Kalkleiten weather station are sufficient.

As with PM<sub>10</sub>, the NO<sub>2</sub> concentration in ambient air has a clear daily course with two peaks per day, showing sampling point-specific and local differences. The peaks are more significant on weekdays than on weekends and are similar to those of PM<sub>10</sub> regarding time of day (section 5.2.3).

#### Risk factors for PM<sub>10</sub> exceedance

In order to quantify the influence of meteorological risk factors, statistical models for the probability of PM<sub>10</sub> limit value exceedances at daily level were developed (see section 6.1.4). Since the risk of exceedance days is highest in winter, only the winter months (first of December to the end of February) were used for the modelling. The models provide evidence on the significance of the potential influencing factors and are therefore well suited for analysing the reasons for PM<sub>10</sub> exceedance days. However, from a statistical point of view, the goodness-of-fit of the models is not sufficient to forecast exceedance days. To improve predictability, future studies would have to integrate transport frequency data, preferably at half-hour level, and winter-sanding and -salting data, at least at daily level, into the models.

The models show (see section 6.1.4.2, figure 68) that the probability of an exceedance day increases significantly with decreasing air temperature and decreases with increasing temperature. The higher the average wind speed, the lower the risk of an exceedance day. On windless days, the risk is significantly increased, but decreases with rising temperature. At very high wind speeds, beyond about 2 m/s, the risk of exceeding the daily limit value is so low that the effect of the temperature is hardly noticeable.

The risk of exceeding the limit value is higher for days with inversion than for days without inversion. Even considering any scenario of temperatures and wind speeds, PM<sub>10</sub> exceedance risk is always higher with inversion days than without. The PM<sub>10</sub> exceedance risk drops with increasing precipitation, however, the effect of precipitation is much less significant than the effect of the temperature (figure 69). For weekend days the risk is lower than for working days. The higher the proportion of grit (winter-sanding) in relation to winter-salting, the higher is the probability of exceeding the limit (figure 70).

Further results of statistical modelling are odds, which can be interpreted as relative changes in exceedance probabilities compared to a reference situation (see section 6.1.4.3). The following statements can be derived, exemplified for the Graz Don Bosco sampling point:

- The odds to have an exceedance day in the years 2005 to 2010 were about 1.6 times as high as in the period 2011 to 2017, i.e. the odds for an exceedance day have decreased significantly with proceeding time.
- On a working day, the odds for a PM<sub>10</sub> exceedance are about 3.6 times higher than that on a weekend day.
- The odds for a PM<sub>10</sub> exceedance on an inversion day are 2.5 times higher than that on a day without inversion.
- For a daily mean temperature of minus 10 degrees, the odds of an exceedance day are 15 times higher than at a mean temperature of 0 degrees. Conversely, at a temperature of plus 10 degrees, the odds decrease to about 6% of the odds that exist for an ambient air temperature of 0 degrees. That means a reduction of the odds by a factor of 0.06 (i.e. 6 hundredths of the chance for an exceedance day at plus 10 degrees compared to the odds at 0 degrees).

- A high wind speed has a strong effect on the odds for an exceedance day, too: A wind speed of 1 m/s reduces the odds to 2% (by a factor of 0.02, i.e. one fiftieth), compared to zero wind speed. In Graz, however, wind speeds of 1 m/s are very unusual in winter, since the observed winter medians of wind speed at the measurement stations are around 0.4 to 0.5 m/s.
- Regarding precipitation, 1 mm reduces the odds of exceedance to 75% (by a factor 0.75, i.e. the odds decrease by a quarter) and 10 mm precipitation to 10% (factor 0.1 = 1/10), compared to days without precipitation.
- An increase in the proportion of grit raises the odds for an exceedance day. With a grit-to-salt ratio of 5:1, the odds are about 3 times as high as the odds with a 1:1 ratio.

## Conclusions

From the results of the statistical analyses it can be concluded that the various measures for particulate matter reduction and air pollution control, which were introduced and implemented in Styria based on the Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L), have contributed to the downward trend of the measured loads of PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub>. Examples include measures to reduce the impact of domestic heating (promotion of district heating and natural gas connections as well as heat pumps, examination of heating systems, energy consulting for energetic building and heating renovation), the conversion of winter gritting and clearance services (almost no use of winter-sanding, differentiated winter clearance services, quality assurance) and measures relating to road traffic (driving bans for trucks with high exhaust emission values, IG-L speed restrictions in the greater area of Graz, renewal of the bus fleet of the Holding Graz, subsidies for the switch to low-emission vehicle technologies).

The extent of the exceedances as well as the number of PM<sub>10</sub> exceedance days has become significantly smaller in the long-term trend. This has been achieved by the packages of measures of the air pollution control programme, despite a considerable increase in economic activity.

The remaining exceedances, in particular at a sampling point close to traffic, often (more than half) occur on days with temperature inversion, mainly in the cold season. Especially in the cold season inversions can exist over a longer period of time.

Für Fragen wenden Sie sich bitte an [policies@joanneum.at](mailto:policies@joanneum.at).

© 2019, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH – Alle Rechte vorbehalten.

JOANNEUM RESEARCH  
Forschungsgesellschaft mbH

POLICIES  
Institut für Wirtschafts- und Innovationsforschung

Leonhardstrasse 59  
8010 Graz

Tel: +43 316 1488  
Fax +43 316 1480

[policies@joanneum.at](mailto:policies@joanneum.at)  
[www.joanneum.at/policies](http://www.joanneum.at/policies)

JOANNEUM RESEARCH  
Forschungsgesellschaft mbH

POLICIES  
Institut für Wirtschafts- und Innovationsforschung

Haus der Forschung  
Sensengasse 1

Tel: +43 1 581 7520  
Fax +43 1 581 75 20-28 20

[policies@joanneum.at](mailto:policies@joanneum.at)  
[www.joanneum.at/policies](http://www.joanneum.at/policies)

JOANNEUM RESEARCH  
Forschungsgesellschaft mbH

POLICIES  
Institut für Wirtschafts- und Innovationsforschung

Lakeside Science & Technology Park  
Lakeside B08a, EG  
A-9020 Klagenfurt am Wörthersee

Tel.: +43 316 876-7553  
Fax: +43 316 8769-7553

[policies@joanneum.at](mailto:policies@joanneum.at)  
[www.joanneum.at/policies](http://www.joanneum.at/policies)