Saisonbereinigte PM_{10}-Mittelwerte der Winterhalbjahre 2003/2004–2019/2020

Endbericht Dezember 2020

Univ.-Prof. DI Dr. Ernst Stadlober
DI Luzia Burger-Ringer

Institut für Statistik
Technische Universität Graz
8010 Graz, Kopernikusgasse 24/III

Auftraggeber: Magistrat Graz, Umweltamt

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und Hinzufügen, veröffentlicht werden. Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden, so ist die schriftliche Genehmigung der Ersteller einzuholen.

Graz, 10. Dezember 2020

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen und Ausgangspunkt **1**

1.1 Datenmaterial 1

2 Explorative Analyse der Wintersaisonen 03/04 bis 19/20 **5**

2.1 Saisonale Mediane der Messparameter 5

2.2 Boxplotserien der Tagesmittelwerte 8

2.3 Boxplotserien nach Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion & Quartal . . 26

2.4 Boxplotserien nach Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion & Tagestyp . 32

3 Evaluierung des Grazer Prognosemodells **37**

3.1 Grundlagen und Ausgangspunkt 37

3.2 Datenmaterial 37

3.3 Prognosemodelle 37

4 Modelle für Wintermittelwerte PM_{10} **39**

4.1 Univariate Analyse der Daten auf Tagesebene 39

4.2 Zusammenhangsanalyse und Modellierung der Wintermittelwerte 55

4.3 Regressionsmodelle für PM_{10}-WMW 63

4.4 Modelle mit meteorologischen Parametern 66

4.5 Prognose für die Anzahl der Überschreitungstage 73

4.6 Modelle mit Meteorologie und Straßenstreuung (Splitt) 76

4.7 Vergleich und Beispiele beider Modelle für PM_{10}-WMW 80

5 Residuenanalyse für Modelle der Tagesmittelwerte PM_{10} in Don Bosco **87**

6 Zusammenfassung **92**

Anhang A Berechnung der Werte in Graz-Mitte 2009/2010 **97**

Anhang B Straßenstreuung in Graz **98**

Anhang C Zusammenfassung WMW (Farbtabellen) **99**

Literaturverzeichnis **105**

Tabellenverzeichnis

1.1 Basisdaten 2

2.1 Mediane in Graz-Don Bosco, Graz-Mitte, Graz-Mitte Gries, Graz-Süd . . 6
2.2 Mediane in Graz-Nord, alle 5 Messstellen 7

4.1 Korrelationen der PM_{10}-Wintermittelwerte und Arten der Straßenstreuung 64
4.2 Minima, Maxima & Mittelwerte für Wintersaison 2019/2020 71
4.3 Prognose durch Modell Meteorologie(2020) mit Werten aus WS 19/20 . . 71
4.4 Minima, Maxima & Mittelwerte für WS 03/04 - WS 19/20 81
4.5 Vergleich beider Modelle anhand von Durchschnittswerten aus Tab. 4.4 . 81

Abbildungsverzeichnis

2.1 Boxplotserie der PM_{10}-TMW 8
2.2 Boxplotserie der PM_{10}-TMW ≤ 155 µg/m^3 10
2.3 Boxplotserie der Lufttemperatur-TMW 11
2.4 Boxplotserie der Windgeschwindigkeits-TMW 12
2.5 Boxplotserie der Spitzenwind-Tageshöchstwerte 13
2.6 Boxplotserie der Spitzenwind-Tageshöchstwerte <20 m/s 14
2.7 Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Frosttage 16
2.8 Mosaic-Plot bzgl. Frosttage, Ort & Wintersaison 17
2.9 Mosaic-Plot bzgl. Inversion, Ort & Wintersaison 19
2.10 Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Inversion 20
2.11 Mosaic-Plot bzgl. Inversion, Ort & Wintersaison 22
2.12 Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Inversionstage 23
2.13 Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Niederschlag 25
2.14 Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Don Bosco 27
2.15 Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Mitte 28
2.16 Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Süd 30
2.17 Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Nord 31
2.18 Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-DB 33
2.19 Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-M 34

2.20 Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-S 35
2.21 Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-N 36

4.1 Histogramme von PM_{10} bzgl. Wintersaisonen und allen Messorte 40
4.2 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von PM_{10} bzgl. WS und Messort inkl. Trend (in grün) 41
4.3 Histogramme von Lufttemperatur bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten 42
4.4 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von Lufttemperatur bzgl. WS und Messort 43
4.5 Histogramme von Windgeschwindigkeit bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten 44
4.6 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von Windgeschwindigkeit bzgl. WS und Messort 45
4.7 Histogramme von Spitzenwindgeschwindigkeit bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten 46
4.8 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von Spitzenwind bzgl. WS und Messort 47
4.9 Histogramme von deltatemp bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten . 48
4.10 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von `deltatemp` bzgl. WS und Messort . 49
4.11 Anzahl der Frosttage bzgl. WS und Messorte 50
4.12 Anzahl der Niederschlagstage bzgl. WS und Messorte 51
4.13 Inversionstage ohne/mit Lufttemperatur `< 3 °C` bzgl. WS und Messorte . 53
4.14 Anzahl der Überschreitungstage bzgl. WS und Messorte 54
4.15 PM_{10} und Temperaturparameter 57
4.16 $\mathtt{PM_{10}}$, Wind, Spitzenwind und Niederschlagstage 58
4.17 PM_{10}, Inversionstage und Inversionstage (Temperatur $< 3\,°C$) 60
4.18 Korrelationsmatrix aller 4 Messorte 62
4.19 Korrelationsmatrix für G-DB, G-M und G-S 62
4.20 Korrelationsmatrix für G-DB und G-S 62
4.21 Korrelationsmatrix für G-M und G-N 62
4.22 Scatterplotmatrix von PM_{10} bzgl. Splitt, Salz und Gesamtstreuung . . . 65
4.23 $\mathtt{PM_{10}_WMW}$ gegen Splittstreuung bzgl. Saison und Ort 66
4.24 $\mathtt{PM_{10}_WMW}$ gegen gefittete Werte des **Modells Meteorologie (2019)**; rechts *inklusive* Vorhersage für aktuelle WS 19/20 (mit 95 %-PI) 67
4.25 Residuen- und Normal QQ Plot für **Modell Meteorologie (2020)** . . . 69

4.26 $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` gegen gefittete Werte des **Modells Meteorologie (2020)** . . 70
4.27 $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` gegen gefittete Werte der **Modelle Meteorologie (DB-S)** und **Modelle Meteorologie (M-N)** 72
4.28 Prognose und 95 % PI für Überschreitungstage, falls $\mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}}$ `= 34,14` . . 74
4.29 Prognosen von `Überschreitungstage` in Abhängigkeit von $\mathtt{PM}_{10}$ 75
4.30 $\mathtt{PM}_{10}$ in Abhängigkeit von Anzahl von `Überschreitungstage` 76
4.31 $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` gegen gefittete Werte des **Modells Splitt (2019)**; rechts *inklusive* Vorhersage für aktuelle WS 19/20 (mit 95 %-PI) 78
4.32 Residuen- und Normal QQ Plot für **Modell Splitt (2020)** 79
4.33 $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` gegen gefittete Werte des **Modells Splitt (2019)** 80
4.34 PM_{10}-Prognosen durch **Modell Splitt (2020)**, mit zugehörigen 95 % PI; jeweils vier Prädiktoren fixiert bzw. ein Prädiktor variabel 83
4.35 3D-Plots der PM_{10}-Prognosen durch **Modell Splitt (2020)**: jeweils drei Variablen fixiert und zwei variabel 84
4.36 Verschiedene Ansichten der 3D-Plots der PM_{10}-Prognosen durch das **Modell Splitt (2020)** 85

5.1 Boxplotserie der Residuen von TMW PM_{10} mit Modell basierend auf WS 03/04–05/06 88
5.2 Zeitreihe mit Trend der Residuen von TMW PM_{10} in der WS 19/20 . . . 89
5.3 Boxplotserie der Residuen von TMW PM_{10} mit Modell basierend auf WS 07/08–09/10 90
5.4 Zeitreihe mit Trend der Residuen von TMW PM_{10} in der WS 19/20 . . . 91

1 Grundlagen und Ausgangspunkt

Die folgenden Untersuchungen bauen auf die vom Institut für Statistik seit 2003 durchgeführten Feinstaubstudien auf (siehe Endberichte im Auftrag der Stadt Graz, 12/2003, 04/2004, 11/2004, 12/2004, Endbericht EU-Life Projekt KAPA-GS, 10/2007, Ermittlung von saisonbereinigten PM_{10}-Mittelwerten des Winterhalbjahres, 09/2008, 05/2009, 05/2010, 07/2011, 10/2012, 12/2013, 05/2015, 02/2016, 07/2016, 04/2018, 11/2018, 12/2019).

Im ersten Teil des Berichts ab Seite 5 wird zunächst eine Explorative Analyse der Daten vom 01.01.2003 bis 31.03.2020 durchgeführt. Es werden jeweils die sechs Wintermonate von Oktober bis März für die Messorte Graz-Don Bosco, Graz-Mitte (bzw. Graz-Mitte Gries), Graz-Süd und Graz-Nord herangezogen und dabei wird der PM_{10}-Verlauf in Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren wie Lufttemperatur, Temperaturinversion, Windgeschwindigkeit, Spitzenwindgeschwindigkeit und Niederschlag betrachtet. Des Weiteren werden auch Quartals- und Wochenendeffekte analysiert.

1.1 Datenmaterial

Die relevanten Daten wurden von der Website `http://www.umwelt.steiermark.at/cms/ziel/2060750/DE/` der Steiermärkischen Landesregierung des Landes-Umwelt-Informationssystems (**LUIS**) bezogen und beinhalten Messungen für Merkmale aus Tabelle 1.1 für den Zeitraum **01.01.2003 00:00 Uhr - 31.03.2020 24:00 Uhr**:

Anmerkungen zu den Basisdaten:

- Die Messstelle „Tiergartenweg“ in **Graz-Süd** wurde am 25.04.2003 errichtet und die Temperaturmessung begann am 05.04.2006 um 13:00 Uhr.

Tabelle 1.1: Basisdaten

Merkmal	Einheit	Graz-Don Bosco	Graz-Mitte	Graz-Nord	Graz-Ost	Graz-Süd	Graz-West	Oeversee	Kalkleiten
Feinstaub PM10 (STBK 10)	**µg/m³**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**		
Kohlenmonoxid (CO)	mg/m³	x	x			x			
Stickstoffmonoxid (NO)	µg/m³	x	x	x	x	x	x		
Stickstoffdioxid (NO2)	µg/m³	x	x	x	x	x	x		
Stickstoffoxide (NOx)	ppb	x	x	x	x	x	x		
Ozon (O3)	µg/m³			x		x			
Schwefeldioxid (SO2)	µg/m³	x		x		x	x ³)		
Lufttemperatur (LUTE)	°C	x	x	x		x	x		x ²)
Luftfeuchtigkeit (LUFE)	%	x	x	x		x	x		
Windgeschwindigkeit (WIGE)	m/s	. ¹)	. ¹)	x		x	x ¹)	x ¹)	
Spitzenwindgeschwindigkeit (SPG)	m/s	. ¹)	. ¹)	x		x	x ¹)	x ¹)	
Niederschlagsmenge (NIED)	l/m²			x					

¹) Die Windgeschwindigkeit aus Oeversee wird für Graz-Mitte, die von Graz-West für Graz-Don Bosco verwendet.
²) Die Lufttemperatur aus Kalkleiten wird für den Temperaturunterschied verwendet (Inversion).
³) Messzeitraum: 01.02.1987 - 03.03.2010

NOx: Sammelbezeichnung für die gasförmigen Oxide des Stickstoffs
ppb: parts per billion (Teile pro Milliarde) = 10^(-9)

≫ Die Messstelle **Graz-Mitte** in der Landhausgasse wurde am **11.12.2009** um 06:30 Uhr außer Betrieb und unter dem Namen „**Graz-Mitte Gries**“ in der Feuerbachgasse am **18.02.2010** um 00:00 Uhr neu in Betrieb genommen (68 Tage Messausfall).

≫ Die Werte für $\mathtt{PM}_{10}$, `Lufttemperatur`, `Überschreitungs-`, `Frost-` und `Inversionstage` der Wintersaison **09/10** in **Graz-Mitte** wurden für die Analysen ab Seite 55 mittels Durchschnittsbildungen und Kalibrierung der übrigen Messorte und Saisonen berechnet (siehe Excel-Tabelle im Anhang A ab Seite 97).

≫ Die Messungen von `Niederschlag` an der Messstelle **Graz-Nord** fiel vom **26.11.2010** bis **4.2.2011** (71 Tage) aus. Da die Messungen auch danach nicht plausibel erscheinen, wurde für die Saison 2010/2011 die Anzahl der Niederschlagstage von der Website der **ZAMG**[1], Messstelle Graz-Thalerhof, entnommen.

≫ In **Graz-Nord** liegen vom **20.12.2012** bis **30.01.2013** keine Messungen bzgl. $\mathtt{PM}_{10}$ vor. Zur Erstellung von Regressionsmodellen ab Seite 63 kann dieses Datenleck vernachlässigt werden, da hierfür nur die Orte Graz-Don Bosco, Graz-Mitte und Graz-Süd herangezogen werden.

≫ Die Messung von `Niederschlag` an der Messstelle **Graz-Nord** weist in der Wintersaison **12/13** eine äußerst hohe Anzahl an Tagen mit Niederschlag (107 Tage)

[1] `http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick/`

auf. Da diese Messung weder plausibel erscheint noch für die Erstellung eines Regressionsmodells geeignet ist, wurde auch für die Saison 2012/2013 die Anzahl der Niederschlagstage von der Website der **ZAMG**, Messstelle Graz-Thalerhof, entnommen (65 Tage).

≫ Für die aktuelle Wintersaison **01.10.2019 - 31.03.2020** (2019/2020) war für den Parameter $\texttt{PM}_{10}$ nur ein Messausfall zu verzeichnen, weiters gab es keine Messausfälle für die anderen Parameter `Luftfeuchtigkeit`, `Niederschlag`, `Windgeschwindigkeit` und `Spitzenwindgeschwindigkeit`.

2 Explorative Analyse der Wintersaisonen 03/04 bis 19/20

2.1 Saisonale Mediane der Messparameter

Im Überblick (Tabelle 2.1, Seite 6, 2.2, Seite 7) werden die **Mediane** von $\mathtt{PM}_{10}$ und der meteorologischen Parameter `Lufttemperatur`, `Windgeschwindigkeit` und `Spitzenwindgeschwindigkeit` für die 17 Wintersaisonen an den vier Grazer Messstellen angegeben:

- $\mathtt{PM}_{10}$ (alle Messstellen): Die höchste Belastung wurde in der Saison 05/06 mit einem Wert von 52,78 µg/m^3 registriert, gefolgt von den Saisonen 04/05 & 03/04. Die niedrigste Belastung weist die aktuelle Wintersaison 19/20 mit 22,65 µg/m^3 auf, gefolgt von den Saisonen 18/19 und 17/18. Die übrigen Saisonen liegen im Mittelfeld.

- `Lufttemperatur` (alle Messstellen): Der mildeste Winter, mit einem Median von +6,27 °C, war die Saison 06/07. In der strengsten Saison 05/06 sank der Median auf +1,34 °C. Die aktuelle Wintersaison 19/20 liegt mit +5,86 °C über dem langjährigen Mittel von +4,33 °C.

- `Wind-/Spitzenwindgeschwindigkeit`: Die Messorte weisen unterschiedliche Niveaus bzgl. dieser Wetterparameter auf. An der Messstelle Graz-Don Bosco herrscht das niedrigste, in Graz-Nord das höchste Niveau an Wind. Tendenziell wurde in den Saisonen 03/04 bis 08/09 mehr, in den Saisonen 09/10 bis 14/15 weniger Wind gemessen. Die aktuelle Wintersaison 19/20 gilt mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,58 m/s und einer mittleren Windspitze von 4,14 m/s als im Mittelfeld liegend.

Tabelle 2.1: Mediane in Graz-Don Bosco, Graz-Mitte, Graz-Mitte Gries, Graz-Süd

Ort	Saison (Winter)	PM10(µg/m³)	Lufttemperatur(°C)	Windgeschwindigkeit(m/s)	Spitzenwindgeschwindigkeit(m/s)
Graz-Don Bosco	2003/2004	55,75	2,62	0,45	3,97
	2004/2005	57,64	2,74	0,49	3,70
	2005/2006	58,47	1,07	0,47	3,70
	2006/2007	43,86	6,13	0,42	3,92
	2007/2008	43,40	4,21	0,47	4,14
	2008/2009	33,81	3,50	0,44	3,61
	2009/2010	42,61	3,38	0,44	3,39
	2010/2011	47,85	3,46	0,44	3,44
	2011/2012	39,81	3,07	0,46	3,97
	2012/2013	36,59	2,74	0,43	3,35
	2013/2014	36,06	5,71	0,42	3,61
	2014/2015	38,40	5,22	0,44	3,79
	2015/2016	34,46	5,51	0,38	3,26
	2016/2017	34,44	4,70	0,41	3,48
	2017/2018	32,00	3,00	0,41	3,53
	2018/2019	30,02	5,45	0,44	3,88
	2019/2020	**26,23**	**5,71**	**0,46**	**3,88**
	Insgesamt	39,56	4,10	0,44	3,61
Graz-Mitte	2003/2004	46,88	3,52	0,66	4,14
	2004/2005	48,34	3,79	0,63	4,06
	2005/2006	54,29	1,74	0,63	3,88
	2006/2007	41,64	6,88	0,67	4,23
	2007/2008	37,59	4,95	0,71	4,14
	2008/2009	34,21	4,27	0,69	4,14
	2009/2010	30,20	7,11	0,47	3,35
Graz-Mitte Gries	2010/2011	35,85	4,33	0,52	3,35
	2011/2012	35,69	4,27	0,54	3,61
	2012/2013	32,14	3,38	0,48	3,17
	2013/2014	26,27	6,51	0,52	3,35
	2014/2015	28,70	5,79	0,53	3,66
	2015/2016	28,27	6,37	0,49	3,44
	2016/2017	29,25	5,51	0,53	3,39
	2017/2018	26,96	4,31	0,33	2,91
	2018/2019	23,98	6,20	0,67	4,25
	2019/2020	**20,20**	**6,27**	**0,67**	**3,94**
	Insgesamt	33,14	5,16	0,57	3,70
Graz-Süd	2003/2004	49,17		0,55	3,80
	2004/2005	49,73		0,55	3,78
	2005/2006	55,11		0,47	3,70
	2006/2007	41,86	5,76	0,47	3,97
	2007/2008	45,59	3,87	0,52	3,78
	2008/2009	35,23	3,29	0,48	3,65
	2009/2010	44,11	2,98	0,45	3,55
	2010/2011	45,68	3,17	0,45	3,59
	2011/2012	42,99	2,92	0,51	3,81
	2012/2013	40,80	2,60	0,48	3,56
	2013/2014	34,70	5,60	0,49	3,73
	2014/2015	37,16	5,13	0,50	3,95
	2015/2016	38,62	5,13	0,42	3,44
	2016/2017	36,12	4,32	0,53	3,71
	2017/2018	32,44	2,72	0,40	3,50
	2018/2019	29,84	4,98	0,49	4,22
	2019/2020	**25,64**	**5,67**	**0,49**	**4,15**
	Insgesamt	39,36	4,25	0,49	3,75

Tabelle 2.2: Mediane in Graz-Nord, alle 5 Messstellen

Ort	Saison (Winter)	PM10(µg/m³)	Lufttemperatur(°C)	Windgeschwindigkeit(m/s)	Spitzenwindgeschwindigkeit(m/s)
Graz-Nord	2003/2004	34,19	2,74	0,80	4,77
	2004/2005	36,89	3,02	0,77	4,77
	2005/2006	40,37	1,17	0,71	4,52
	2006/2007	31,01	6,08	0,78	5,04
	2007/2008	29,79	4,11	0,72	4,55
	2008/2009	26,71	2,77	0,67	4,55
	2009/2010	30,42	3,47	0,66	4,53
	2010/2011	31,21	3,44	0,65	4,53
	2011/2012	29,68	3,19	0,59	4,55
	2012/2013	23,82	2,61	0,53	4,14
	2013/2014	22,63	5,99	0,70	4,55
	2014/2015	29,86	5,54	0,69	4,56
	2015/2016	26,34	5,77	0,72	4,55
	2016/2017	20,90	4,48	0,55	3,94
	2017/2018	19,45	3,84	0,52	3,75
	2018/2019	21,75	5,56	0,55	4,15
	2019/2020	**18,75**	**5,57**	**0,60**	**4,36**
	Insgesamt	27,12	4,21	0,65	4,53
Insgesamt	2003/2004	45,50	2,93	0,61	4,17
	2004/2005	46,61	3,10	0,63	4,16
	2005/2006	52,78	1,34	0,55	3,97
	2006/2007	39,71	6,27	0,59	4,32
	2007/2008	38,27	4,35	0,60	4,15
	2008/2009	32,69	3,50	0,57	3,97
	2009/2010	37,21	4,18	0,49	3,73
	2010/2011	40,36	3,51	0,50	3,70
	2011/2012	36,69	3,43	0,52	4,08
	2012/2013	33,56	2,83	0,48	3,53
	2013/2014	30,19	6,00	0,51	3,78
	2014/2015	32,76	5,47	0,52	3,99
	2015/2016	31,04	5,65	0,49	3,75
	2016/2017	30,23	4,72	0,51	3,70
	2017/2018	27,00	3,51	0,41	3,44
	2018/2019	26,12	5,54	0,53	4,15
	2019/2020	**22,65**	**5,86**	**0,58**	**4,14**
	Insgesamt	34,70	4,44	0,53	3,94

2.2 Boxplotserien der Tagesmittelwerte

Messparameter PM_{10}

Die **Mediane der TMW** aller 17 Wintersaisonen für die jeweiligen Orte sind wie folgt: Der Verkehrsspot Graz-Don Bosco (G-DB) weist mit 39,56 µg/m^3 nach wie vor den höchsten Wert auf. Das Gewerbegebiet Graz-Süd (G-S) weist fast denselben Median von 39,36 µg/m^3 auf. Im Zentrum Graz-Mitte (G-M) kann dieser mit 33,14 µg/m^3 angegeben werden. Im Wohngebiet Graz-Nord (G-N) fällt der langjährige Median von PM_{10} mit 27,12 µg/m^3 (68,6% von G-DB) sehr deutlich ab. In folgenden beiden Boxplotserien für PM_{10} kann für jeden Ort der langjährige Median (blaue Linien) mit jenen der einzelnen Wintersaisonen verglichen werden .

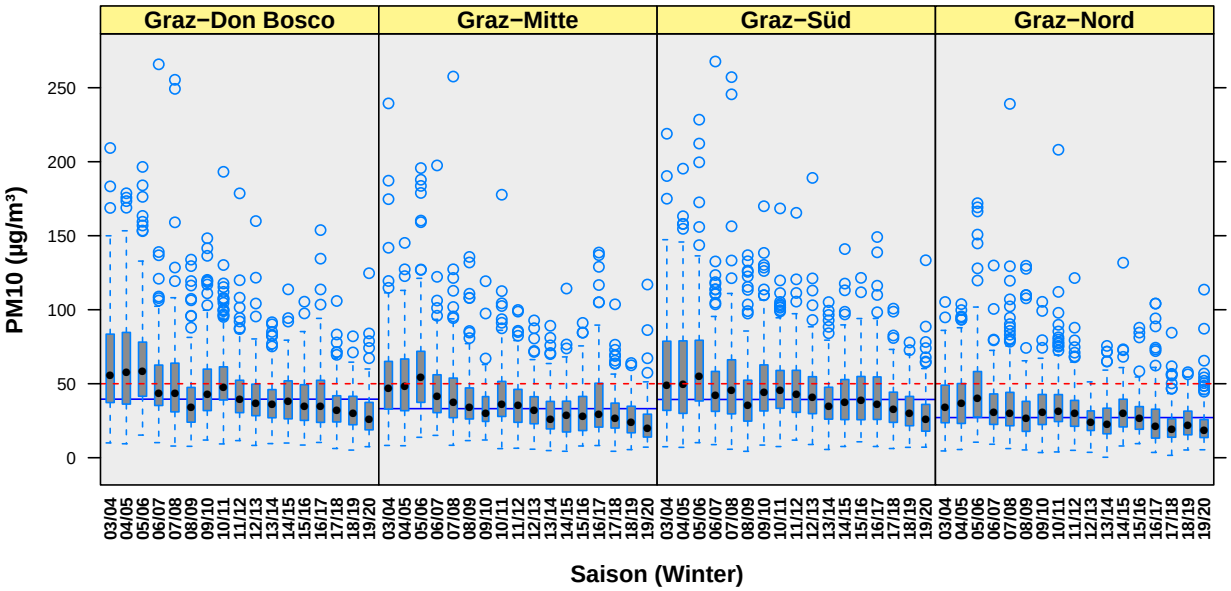


Abbildung 2.1: Boxplotserie der PM_{10}-TMW

Die Boxplots zeigen, dass an den Orten Graz-Don Bosco, Graz-Mitte und Graz-Süd in den ersten drei Saisonen 03/04 - 05/06 an ca. 50% oder mehr der Wintertage Grenzwertüberschreitungen (d.h. > 50 µg/m^3) vorliegen. In diesem Fall liegen die saisonalen Mediane (schwarze Punkte) auf bzw. über der rot-strichlierten Linie. In Graz-Nord ist dies nur etwa an ca. 10% der Wintertage der Fall (oberer Rand der Box ist über der Linie). In den Saisonen 06/07 - 18/19 ging der Anteil an TMW-Überschreitungen

an allen Messorten tendenziell stark zurück. Dieser erfreuliche Trend setzt sich in der Saison 19/20 fort. Sowohl der Schwankungsbereich (Vertikale Länge der Box) der Tagesmittelwerte (TMW) als auch die Anzahl an Ausreißern haben in allen 4 Messorten erfreulicherweise stark abgenommen.

Die aktuelle Saison 19/20 weist in der Messtelle Graz-Mitte das geringste PM_{10}-Niveau von 20,2 µg/m^3 auf. Genauso weist Graz-Süd mit 25,64 µg/m^3 das geringste Niveau aller Saisonen auf. Ebenso erzielte Graz-Don Bosco die niedrigsten Werte seit Beginn der Messungen. Graz-Nord hatte vergangene Saison ebenfalls das niedrigste PM_{10}-Niveau von 18,75 µg/m^3. Somit liegen die Mediane aller vier Messorte (schwarze Punkte) auch in der aktuellen Wintersaison 19/20 deutlich unter den blauen Linien, die die langjährigen Mediane markieren.

Extrem hohe Werte mit $PM_{10} > 155$ µg/m^3 werden in der zweiten Boxplotserie (Abbildung 2.2 auf Seite 10) nicht abgebildet. Ausreißer in dieser Höhe wurden in den letzten neun Saisonen 11/12 - 19/20 erfreulicherweise keine gemessen. Die Extrema können wie folgt zusammengefasst werden:

Graz-Süd:	03/04:	218,93 µg/m³
	05/06:	212,28 µg/m³
		228,41 µg/m³
	06/07:	267,73 µg/m³
	07/08:	245,56 µg/m³
		257,17 µg/m³
Graz-Mitte:	03/04:	239,42 µg/m³
	07/08:	257,55 µg/m³
Graz-Don Bosco:	03/04:	209,28 µg/m³
	06/07:	265,83 µg/m³
	07/08:	249,25 µg/m³
		255,37 µg/m³
Graz-Nord:	07/08:	239,08 µg/m³
	10/11:	208,10 µg/m³

Darüber hinaus wurde in der aktuellen Saison 19/20 nur an einem Tag (27.3.2020) die Schranke von 100 µg/m^3 überschritten. Dies war bedingt durch den Saharastaub. Um diese Grenze kennzuzeichnen, wurde in Abbildung 2.2 eine weitere Kennmarke bei 100 µg/m^3 gezogen (orange gepunktet). Weiters wurde der Trendverlauf als grüne Linie eingezeichnet. Man kann in allen Stationen einen deutlichen Abwärtstrend feststellen.

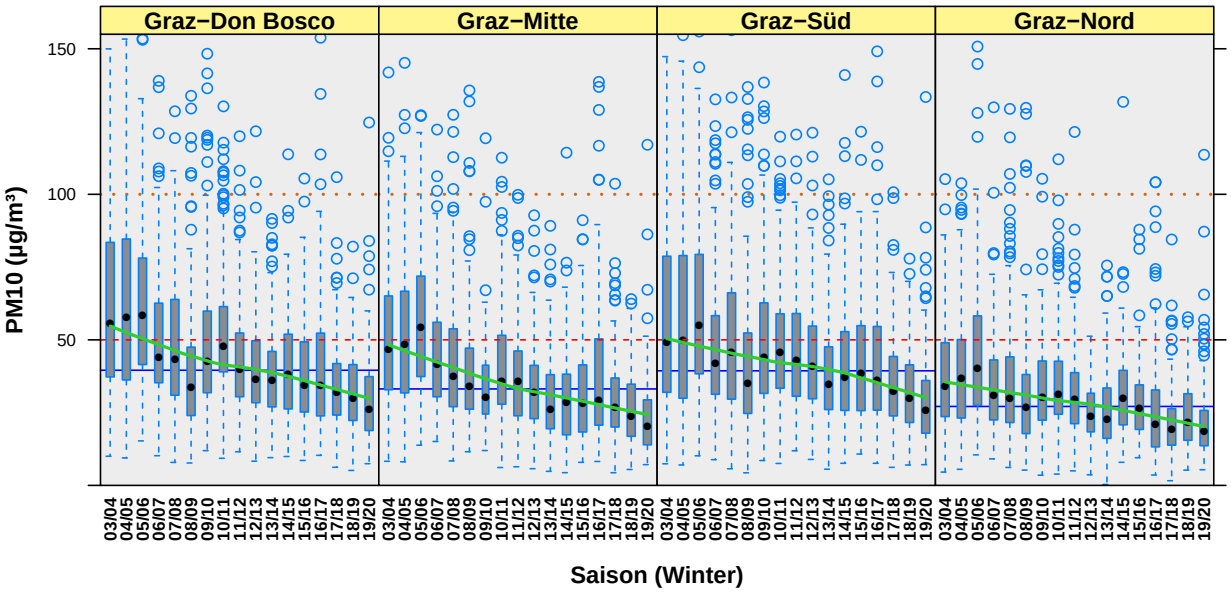


Abbildung 2.2: Boxplotserie der PM_{10}-TMW $\leq$ 155 µg/m^3

Messparameter Lufttemperatur

In Graz-Süd liegen Messungen erst ab dem **05.04.2006**, **13:00 Uhr**, vor. Aus diesem Grund sind die ersten drei Saisonen an diesem Ort nicht vorhanden. Die Wintersaisonen 07/08, 08/09, 09/10, 10/11 & 11/12 sind im Vergleich mit den langjährigen Medianen (blaue Linien) als Winter mit normalen und durchschnittlichen Temperaturen zu bezeichnen. Als strenger Winter ist vor allem die Saison 05/06 einzustufen, aber auch die Saisonen 03/04, 04/05 und 12/13, wogegen die Saisonen 06/07, 13/14 & 14/15 als eher mild gelten. Die vergangene Wintersaison 19/20 kann als sehr mild beurteilt werden, da die saisonalen Mediane des jeweiligen Ortes über den Medianen des gesamten Beobachtungshorizonts aller 17 Saisonen liegen. Die Schwankungsbreite ist im Vergleich zum Vorjahr in allen 4 Messstationen deutlich gesunken.

Diese **Mediane der TMW** über alle 17 Wintersaisonen sind wie folgt:

G-DB: +4,1 °C | G-M: +5,16 °C | G-S: +4,25 °C | G-N: +4,21 °C

Werden alle Beobachtungen herangezogen, dann erstreckt sich der Schwankungsbereich aller Wintertage von ca. -11,75 °C bis ca. +19,73 °C. Der niedrigste TMW in Saison 19/20 wurde bei -3,7 °C ermittelt, der höchste lag bei 18,36 °C.

Der **Interquartile Bereich** (entspricht der vertikalen Länge der Box und gibt die Spannweite der zentralen 50% aus den TMW aller 17 Saisonen an) umfasst eine Bandbreite von ca. 7,4 °C. Die aktuelle Wintersaison 19/20 weist einen IQR von ca. 6,75 °C auf. Das heißt, die Variabilität der zentralen TMW ist in 19/20 wiederum deutlich gesunken.

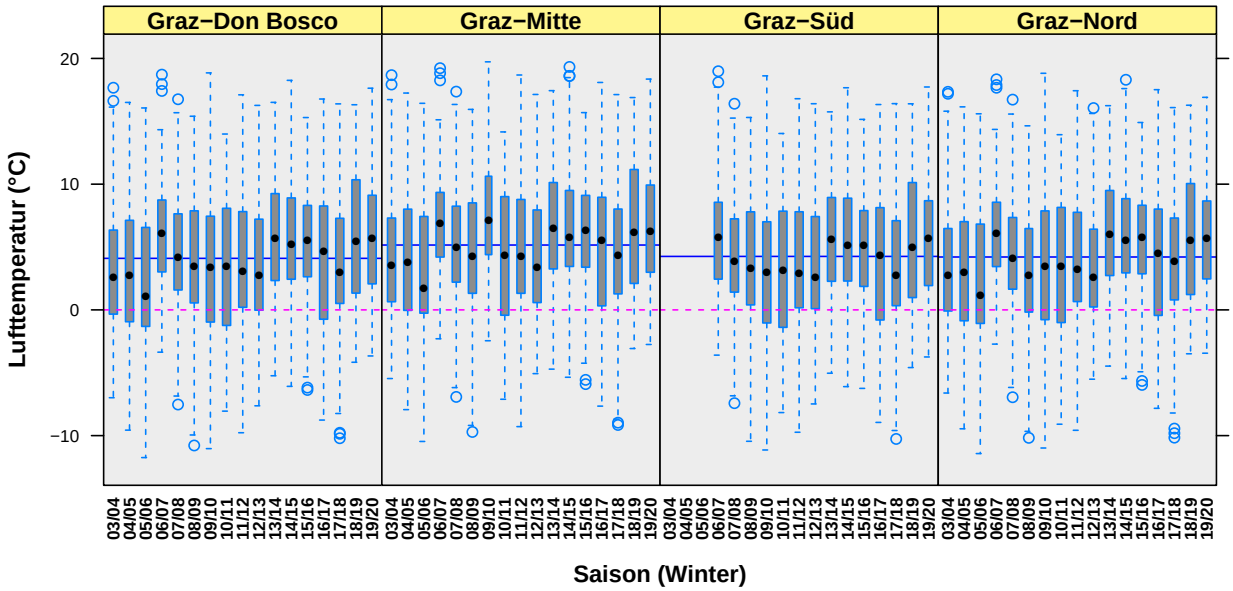


Abbildung 2.3: Boxplotserie der Lufttemperatur-TMW

Messparameter Mittlere Windgeschwindigkeit

Die saisonalen Mediane der Messstation Graz-Nord sind am höchsten, wodurch Graz-Nord im Vergleich zu den übrigen drei Messorten als windreichstes Gebiet gilt. Gefolgt wird Graz-Nord von den Orten Graz-Mitte, Graz-Süd und Graz-Don Bosco. Das wird auch von den lokalen (pro Ort) **Medianen** des gesamten Beobachtungshorizonts bestätigt:

G-DB: 0,44 m/s | G-M: 0,57 m/s | G-S: 0,49 m/s | G-N: 0,65 m/s

Trends und Verläufe möge der Leser der folgenden Abbildung 2.4 entnehmen. Sehr auffällig ist allerdings, dass die Verlegung der Messstelle Graz-Mitte (nach Graz-Mitte Gries) mit einem deutlichen Abfall an mittlerer Windgeschwindikeit verbunden war.

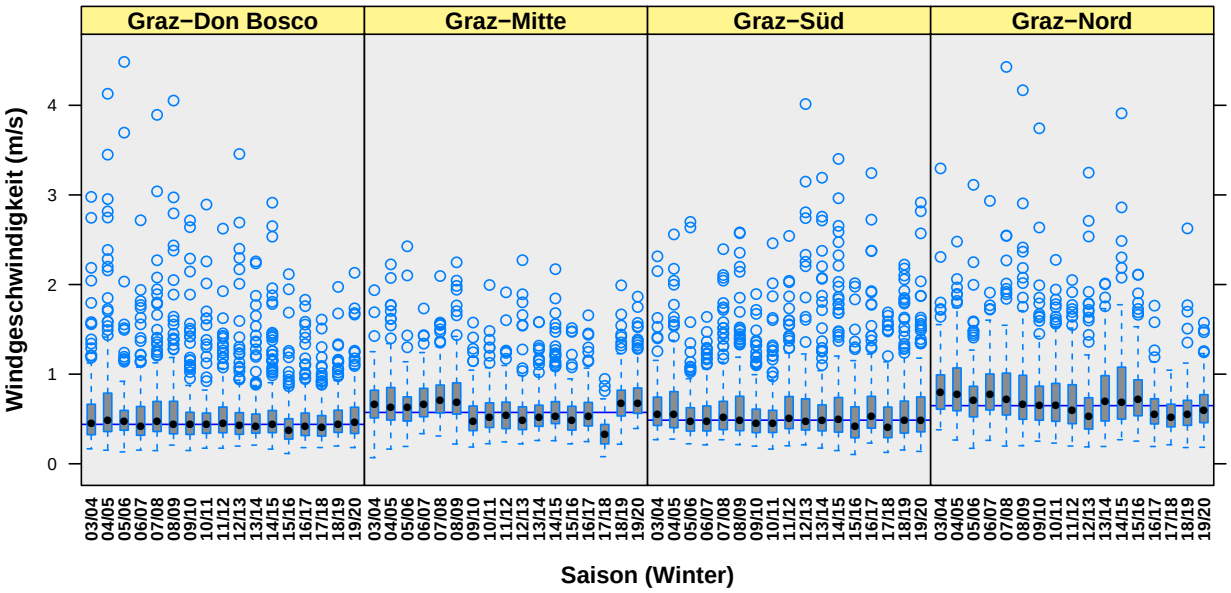


Abbildung 2.4: Boxplotserie der Windgeschwindigkeits-TMW

Im Vergleich mit den vorangegangenen Saisonen kann die letzte Saison 19/20 in allen Stationen einen minimalen Anstieg der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit (Median) verzeichnen. Alle aktuellen Mediane für Don Bosco und Graz-Süd schmiegen sich an die langjährigen Mediane an, während Graz-Nord schon das vierte Mal in Folge unter dem Median bleibt, während Graz-Mitte sich heuer wieder deutlich abhebt (ansteigt).

Messparameter Spitzenwindgeschwindigkeit

Die Variable Spitzenwindgeschwindigkeit errechnet sich aus dem Maximum der 48 Halbstundenmittelwerte innerhalb eines Tages. Die Mediane von Graz-Don Bosco, Graz-Mitte und Graz-Süd haben eine annähernd gleiche Größenordnung, wogegen Graz-Nord einen deutlich höheren Median aufweist (siehe Abbildungen 2.5 bzw. 2.6). Die berechneten **Mediane** über den gesamten Beobachtungshorizont sind wie folgt:

G-DB: 3,61 m/s | G-M: 3,70 m/s | G-S: 3,75 m/s | G-N: 4,53 m/s

Die Messstelle Graz-Nord hat den kleinsten Schwankungsbereich. Graz-Mitte, Don Bosco und Graz-Süd weisen heuer eine fast gleiche Spitzenwindcharakteristik auf. Die gemessenen Spitzenwindgeschwindigkeiten in Saison 19/20 können als leicht erhöht beurteilt werden.

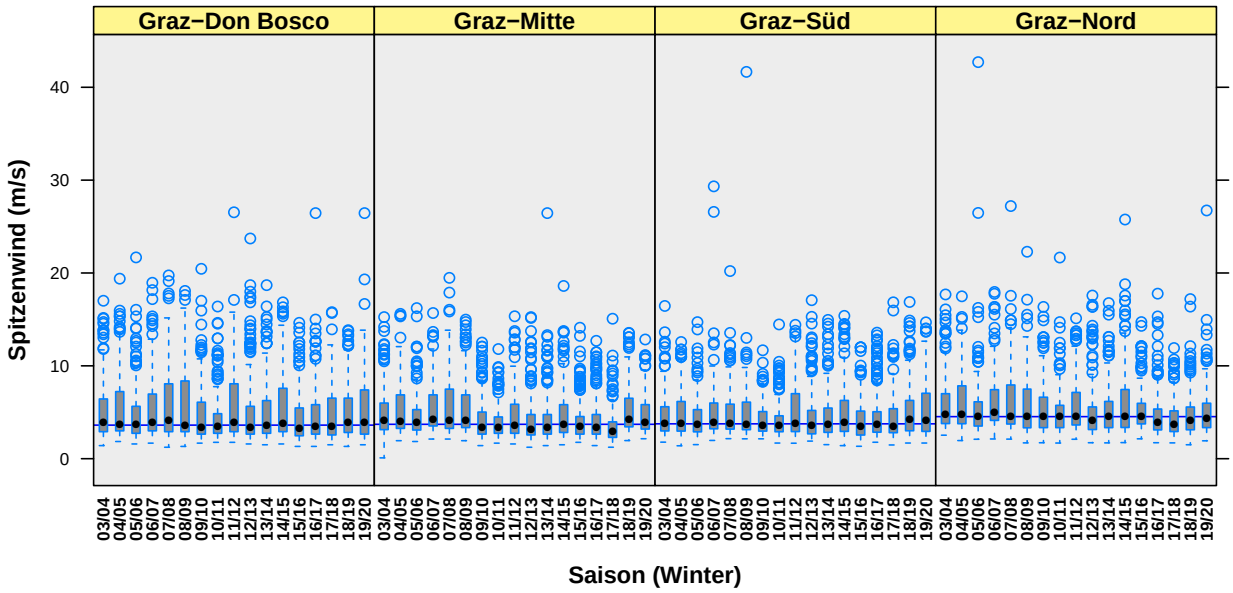


Abbildung 2.5: Boxplotserie der Spitzenwind-Tageshöchstwerte

Graz-Don Bosco:	05/06:	21,68 m/s
	09/10:	20,45 m/s
	11/12:	26,54 m/s
	12/13:	23,72 m/s
	16/17:	26,45 m/s
	19/20:	26,45 m/s
Graz-Süd:	06/07:	26,58 m/s
		29,33 m/s
	07/08:	20,21 m/s
	08/09:	41,66 m/s

Graz-Nord:	05/06:	26,47 m/s
		42,71 m/s
	07/08:	27,21 m/s
	08/09:	22,29 m/s
	10/11:	21,67 m/s
	14/15:	25,76 m/s
	19/20:	26,74 m/s
Graz-Mitte:	13/14:	26,45 m/s

In der zweiten Boxplotserie (s. Abbildung 2.6) sind die folgenden **Spitzenwind-Tageshöchstwerte $> 20\,\mathbf{m/s}$** nicht abgebildet: Zu bemerken ist, dass bei der mit 26,45 m/s erhöhten Windspitze in Graz-Mitte aus der Saison 13/14 (s. Abb. 2.5) von einem Messfehler auszugehen ist, da die Halbstundenmittelwerte vor und nach 16:00 Uhr (sowie auch die Werte des restlichen Tages) deutlich niedriger und nicht größer als 2,3 m/s sind. Die aktuelle Wintersaison 19/20 weist zwei Werte > 20 m/s auf (Graz-Don Bosco mit 26,45 m/s und Graz-Nord mit 26,74 m/s).

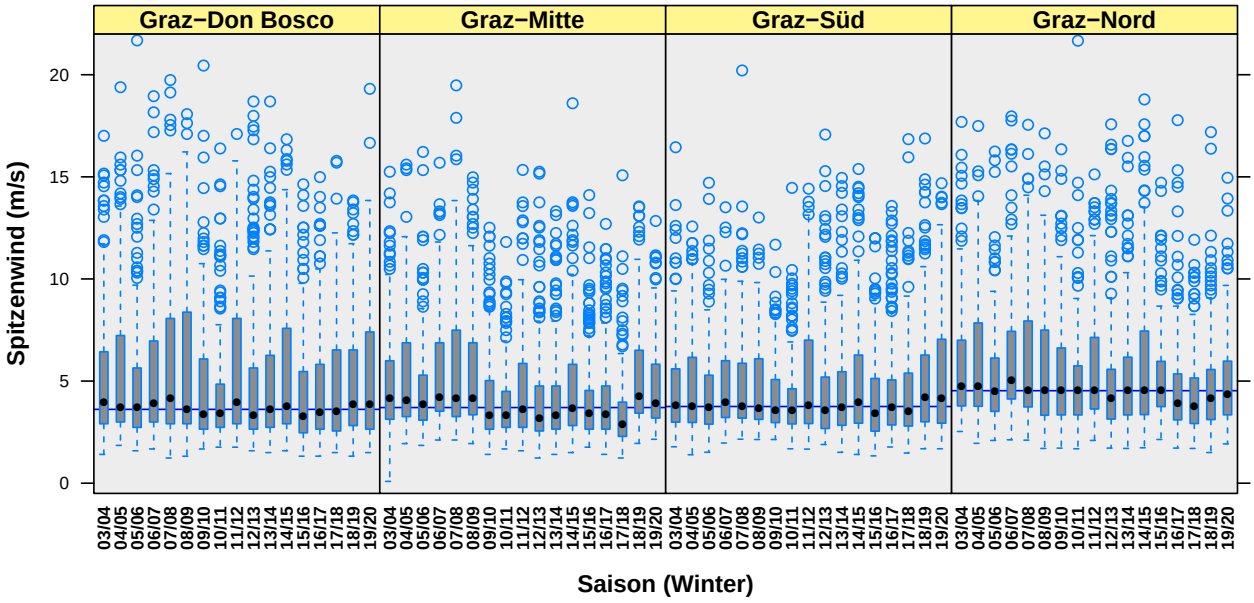


Abbildung 2.6: Boxplotserie der Spitzenwind-Tageshöchstwerte <20 m/s

Messparameter Frosttage

Über alle Saisonen und Messorte betrachtet sind ca. *20%* der Wintertage (Anfang Oktober bis Ende März) als *Frosttage* einzustufen. An einem Frosttag gilt die Bedingung, dass der **Lufttemperatur-TMW < 0 °C** ist.

Pro Ort errechneten sich über alle Saisonen aggregiert folgende Anteile von *kein Frost* zu *Frost*:

Ort	LuTe $\geq$ 0 °C	LuTe < 0 °C
G-DB	78%	22%
G-M	84%	16%
G-S	79%	21%
G-N	79%	21%

Wird über alle vier Messorte aggregiert und wird jede Saison einzeln betrachtet, dann gelten folgende Verhältnisse von Frosttagen zu Tagen mit TMW $\geq$ 0 °C :

Saison	LuTe $\geq 0\,°C$	LuTe $< 0\,°C$
03/04	75%	25%
04/05	71%	29%
05/06	66%	34%
06/07	92%	8%
07/08	82%	18%
08/09	78%	22%
09/10	72%	28%
10/11	68%	32%
11/12	79%	21%
12/13	78%	22%
13/14	88%	12%
14/15	90%	10%
15/16	89%	11%
16/17	73%	27%
17/18	84%	16%
18/19	84%	16%
19/20	89%	11%

In der milden Wintersaison 06/07 hat es nur an ca. 8% der Tage Frost gegeben, wohingegen es im strengsten Winter 05/06 an 34% der Tage im Mittel Frost gab. Die aktuelle Saison 19/20 kann als viertwärmste Wintersaison eingestuft werden.

Absolute und relative Häufigkeiten zu *Frosttage* können der Abbildung 2.8 (Seite 17) entnommen werden.

Die Boxplots in Abbildung 2.7 auf Seite 16 für PM_{10} zeigen an allen Orten eine deutlich höhere Belastung an Tagen an denen Frost herrscht als an Tagen mit einer Lufttemperatur $\geq 0\,°C$. Anzumerken ist, dass sich in der Saison 16/17 die Anzahl der Frosttage im Vergleich zu den drei milden Wintersaisonen 13/14-15/16 mehr als verdoppelt hat. Bzgl. Graz-Nord in Saison 12/13 möge der Leser das Datenleck bzgl. Temperatur berücksichtigen (siehe Seite 2), da aus diesem Grund der Anstieg in 13/14 stärker erscheint als er letztendlich ist. Die Separation dieser beiden Merkmalsausprägungen (Frost zu kein Frost) hat einen deutlichen Einfluss auf PM_{10}.

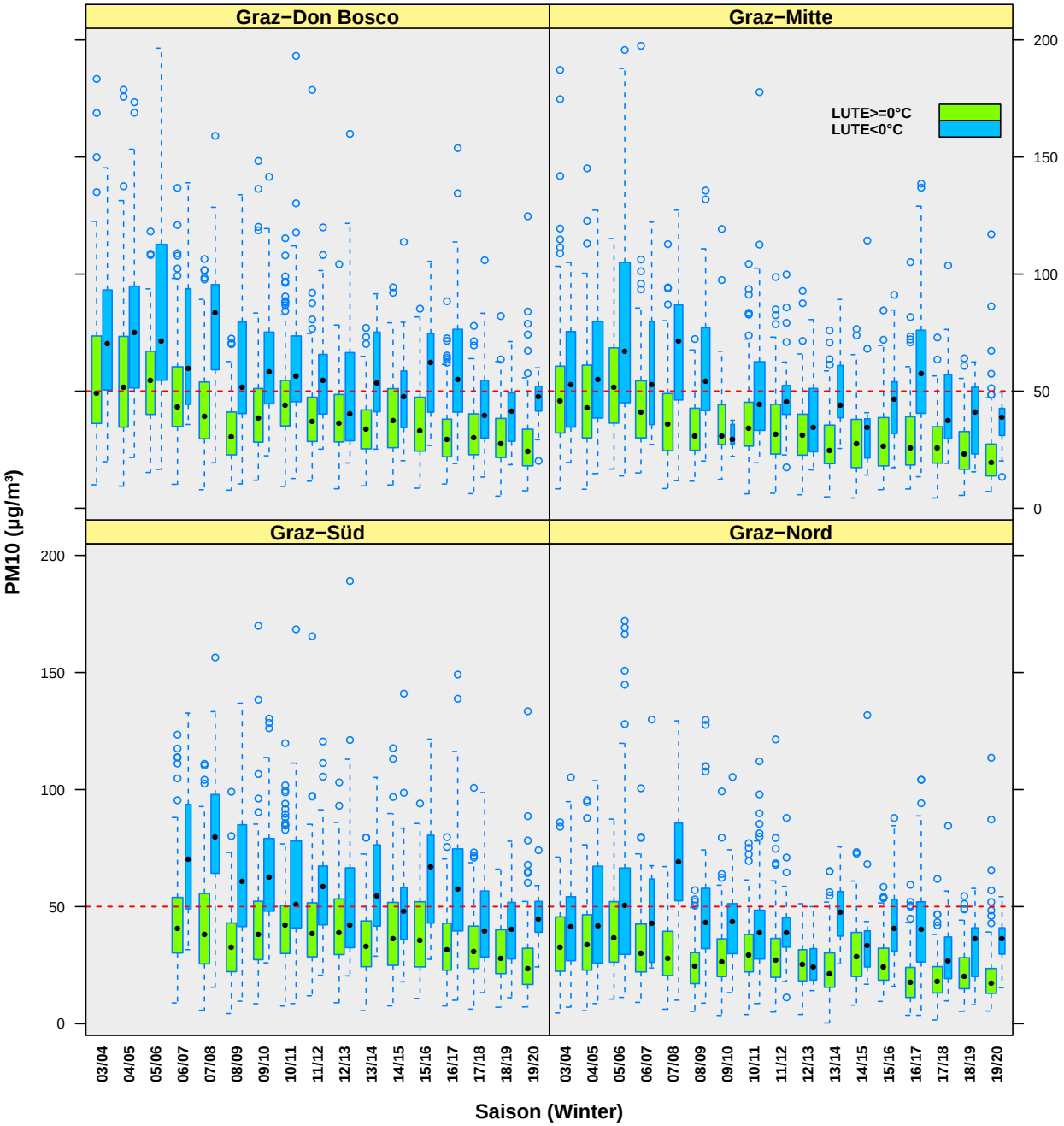


Abbildung 2.7: Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Frosttage

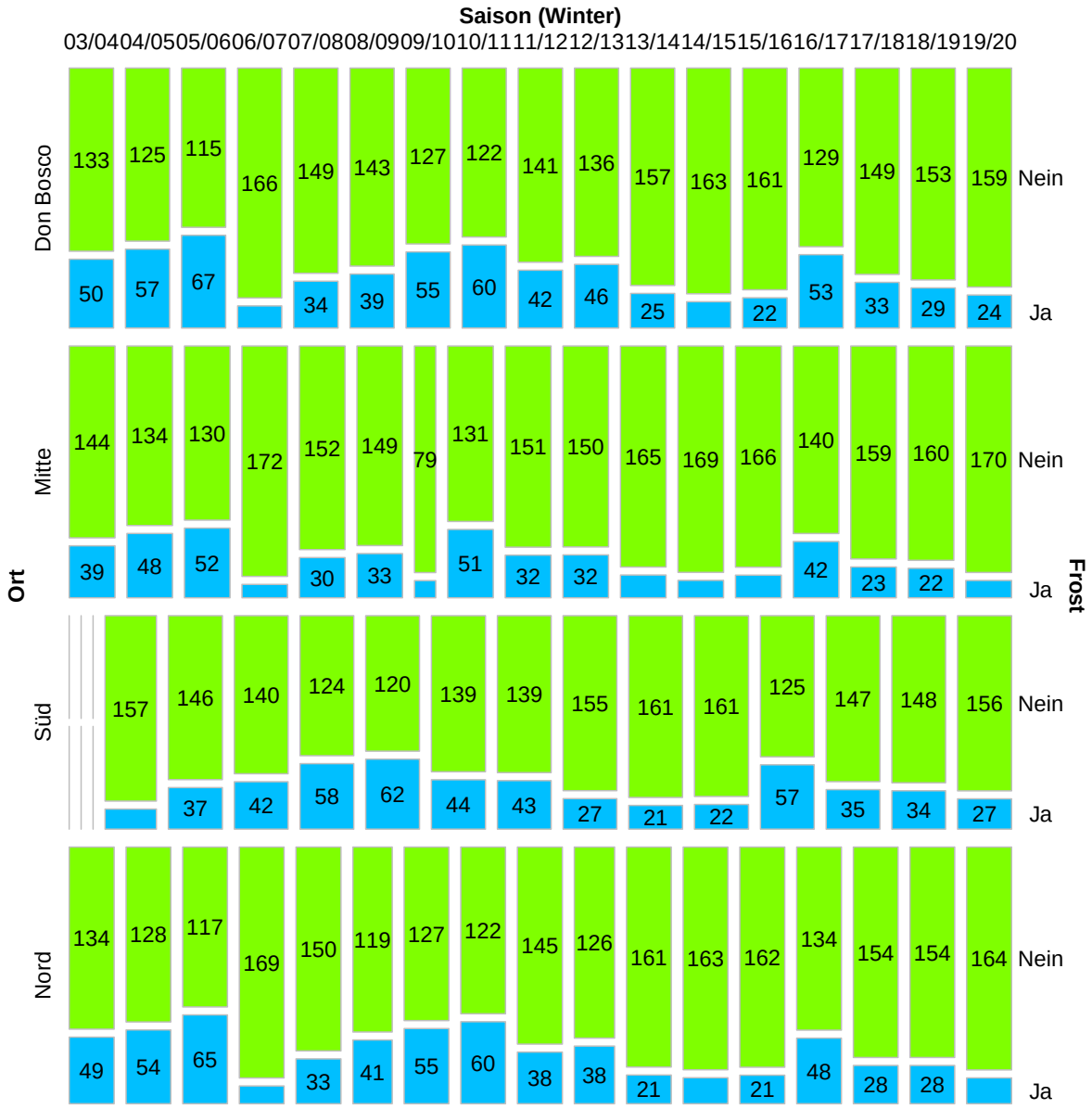


Abbildung 2.8: Mosaic-Plot bzgl. Frosttage, Ort & Wintersaison

Messparameter Inversion

Wird über alle Saisonen und Messorte aggregiert, dann sind *ca. 32,2%* aller Wintertage *Inversionstage*. Ein *Inversionstag* liegt vor, wenn **Temperatur(Grund) - Temperatur(Kalkleiten)** $<$ **0 °C** gilt. Zu beachten ist, dass dieser meteorologische Parameter nur eine Temperaturdifferenz misst und keine absolute Lufttemperatur. So wird ein Tag

auch als Inversionstag gezählt, an dem eine milde Lufttemperatur am Grund herrscht, die jedoch niedriger ist als jene Temperatur in der Höhe.

Pro Ort hat man aggregiert über alle Saisonen folgende Anteile von *Inversion* zu *keine Inversion*:

Ort	Inversion	keine Inversion
G-DB	35%	65%
G-M	22%	78%
G-S	39%	61%
G-N	34%	66%

Demnach hat Graz-Süd mit 39% die meisten Inversionswetterlagen aufzuweisen, gefolgt von Graz-Don Bosco und Graz-Nord. Mit Abstand am wenigsten Inversion herrscht mit nur 22% der Wintertage in Graz-Mitte vor. Absolute und relative Häufigkeiten bzgl. des Merkmals *Inversion* können der Abbildung 2.9 (Seite 19) entnommen werden.

Über alle Orte aggregiert und für jede Saison einzeln betrachtet gelten folgende Anteile:

Saison	Inversion	keine Inversion
03/04	41%	59%
04/05	42%	58%
05/06	25%	75%
06/07	41%	59%
07/08	29%	71%
08/09	25%	75%
09/10	32%	68%
10/11	37%	63%
11/12	37%	63%
12/13	28%	72%
13/14	31%	69%
14/15	20%	80%
15/16	39%	61%
16/17	33%	67%
17/18	30%	70%
18/19	28%	72%
19/20	34%	66%

Im strengen Winter 05/06 gab es nur 25% Inversionstage, wohingegen im milden Winter 06/07 an 41% der Tage eine Inversionswetterlage herrschte. Nach der relativ milden

Saison 14/15 mit nur 20% und somit der Saison mit den wenigsten Inversionstagen, liegt die aktuelle Saison 19/20 mit 34% im mittleren Bereich bzgl. Inversionswetterlage.

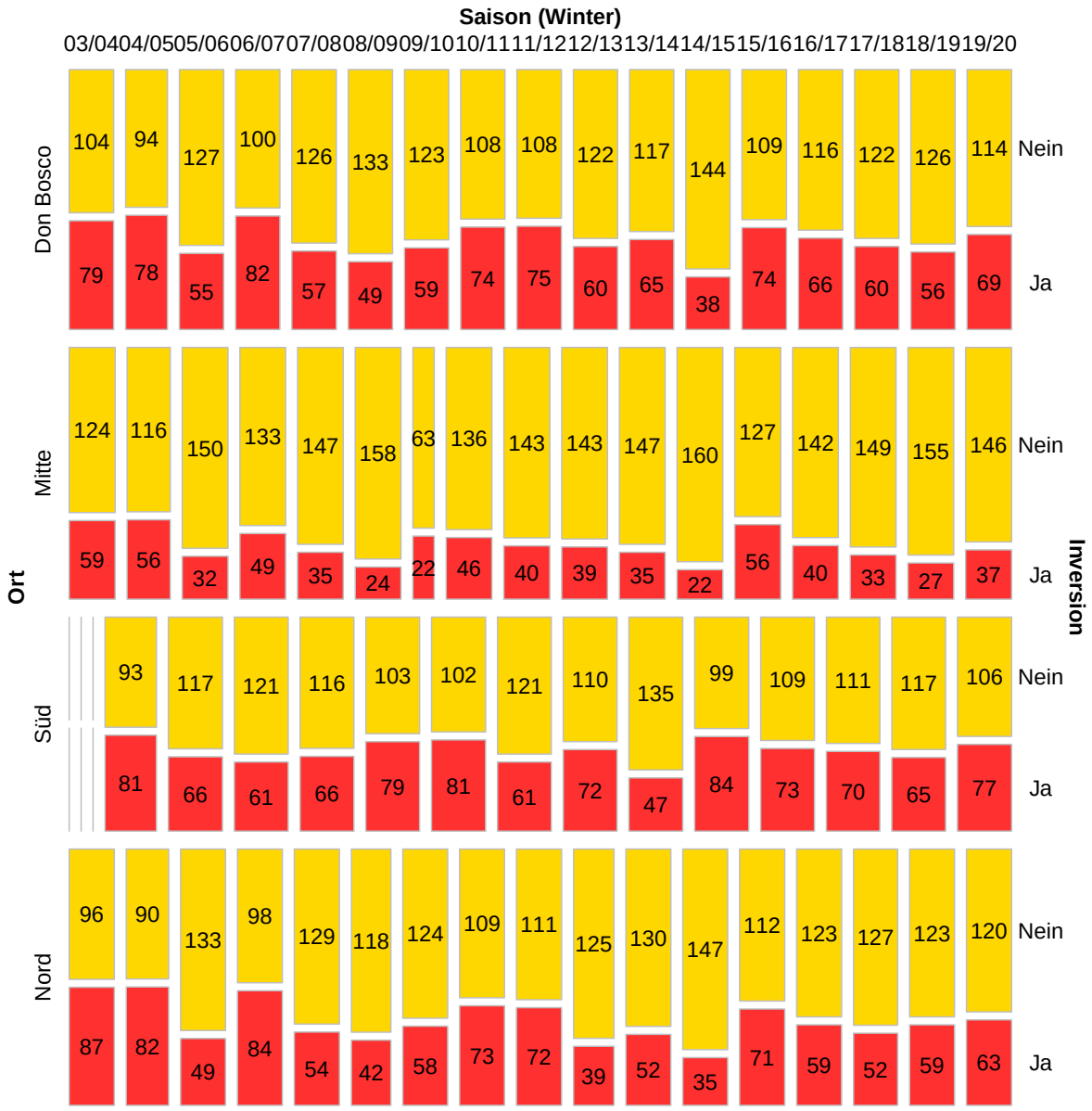


Abbildung 2.9: Mosaic-Plot bzgl. Inversion, Ort & Wintersaison

Mit Ausnahme der Saison 09/10 in Graz-Mitte (Standortwechsel bedingter Messausfall an 68 Tagen) und der inversionsärmsten Saison 14/15, schwankt die Absolutzahl der Inversionstage pro Wintersaison zwischen 24 (G-M 08/09) und 87 (G-N 03/04). Die aktuelle Saison 19/20 weist mit 37 Tagen (Graz-Mitte) bis 77 Tagen (Graz-Süd)

nicht allzu viele Inversionstage auf und liegt bzgl. der Inversionswetterlage im mittleren Bereich aller gemessenen Saisonen.

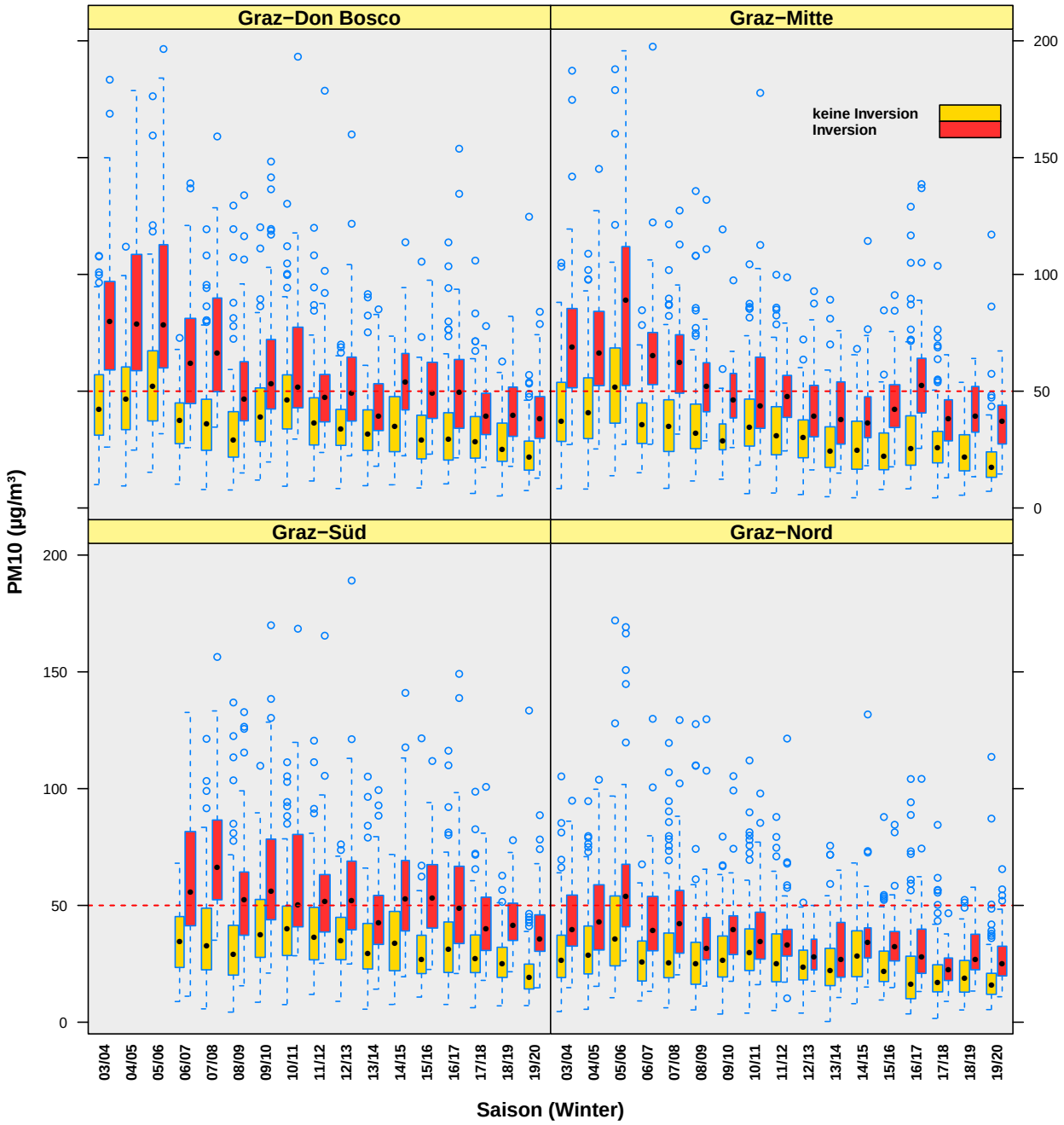


Abbildung 2.10: Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Inversion

Den Boxplotserien in Abb. 2.10 auf Seite 20 ist an allen Messstationen eine deutlich

höhere PM_{10} –Belastung an Tagen mit Inversion zu entnehmen. Dies ist in der heurigen Saison 19/20 auch deutlich zu sehen. An Inversionstagen waren mit Ausnahme der Saison 14/15 in Graz-Mitte an den Orten Graz-Don Bosco, Graz-Mitte & Graz-Süd immer mindestens 25% der Werte Überschreitungstage (oberer Rand der Box ist über der kritischen Marke von 50 µg/m^3). Diese Aussage gilt heuer für keine Station. In den ersten 3 Saisonen waren in Graz-Don Bosco und Graz-Mitte sogar an mehr als 75% der Inversionen Überschreitungen zu verzeichnen.

Messparameter Inversionstage mit `LuTe` < 3 °C

In diesem Abschnitt werden nur Tage mit **Inversionswetterlage** betrachtet. Wir beschränken uns also auf Tage, welche die Bedingung LuTe(Grund) - LuTe(Kalkleiten) < 0 °C erfüllen. Zusätzlich führen wir eine weitere Kategorisierung bzgl. dieser Inversionstage ein, mit den Kategorien LuTe < 3 °C und LuTe ≥ 3 °C.

Über alle 17 Saisonen und Messorte hinweg, herrschte an *ca. 44,5% der Inversionstage eine Lufttemperatur von < 3 °C*. Aggregiert über alle Messorte errechneten sich pro Saison die folgenden prozentualen Anteile bzgl. der LuTe-Unterteilung der Inversionstage:

Saison	LuTe < 3 °C	LuTe ≥ 3 °C
03/04	48%	52%
04/05	45%	55%
05/06	69%	31%
06/07	33%	67%
07/08	46%	54%
08/09	56%	44%
09/10	36%	64%
10/11	37%	63%
11/12	57%	43%
12/13	45%	55%
13/14	42%	58%
14/15	38%	62%
15/16	34%	66%
16/17	52%	48%
17/18	57%	43%
18/19	36%	64%
19/20	47%	53%

Aggregiert man über alle Saisonen bzgl. jeden der vier Messorte, dann ergeben sich hinsichtlich derselben Kategorisierung folgende prozentuale Splits der *Inversionstage*:

Ort	LuTe $< 3\,°C$	LuTe $\geq 3\,°C$
G-DB	48%	52%
G-M	38%	62%
G-S	47%	53%
G-N	42%	58%

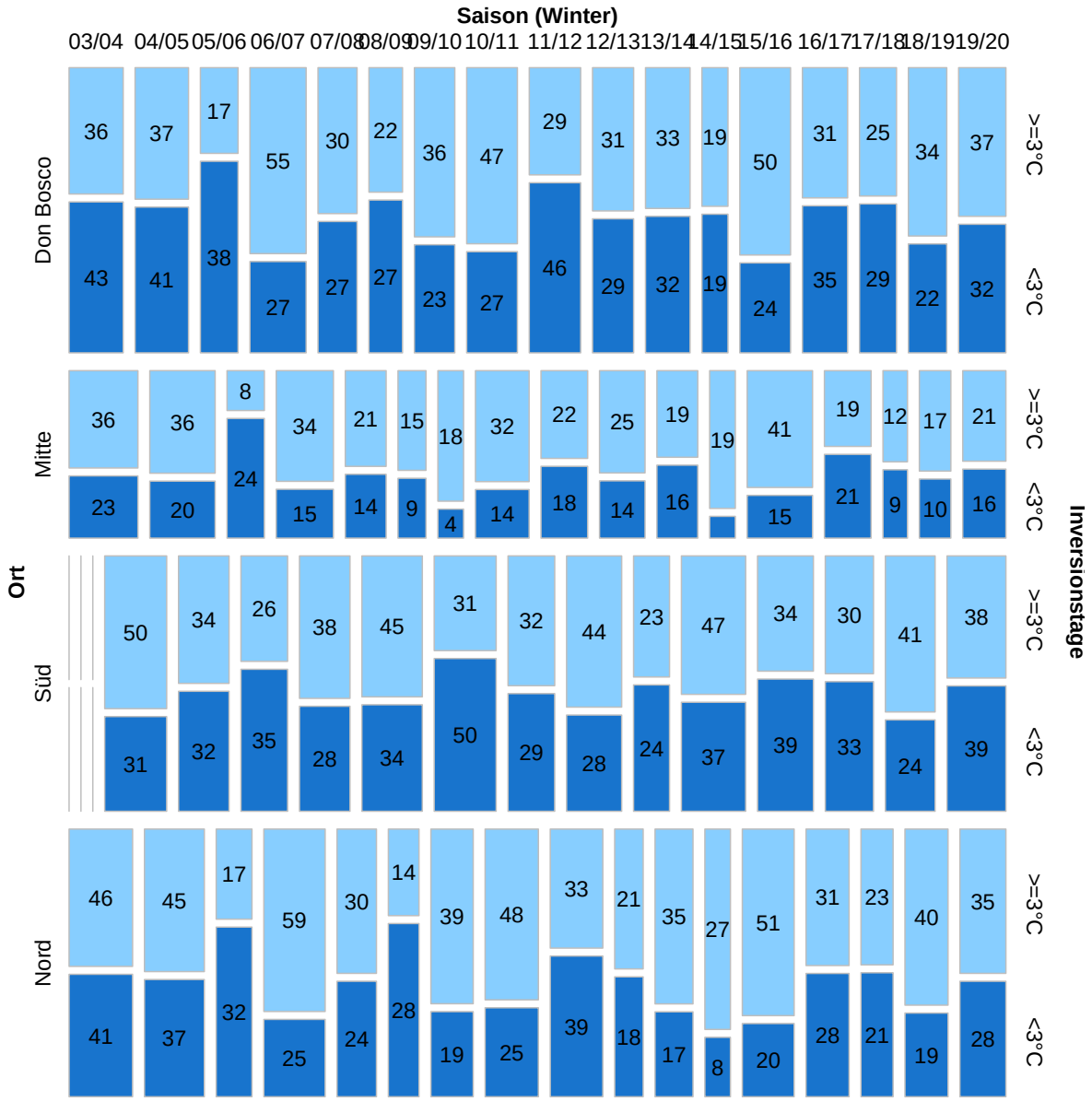


Abbildung 2.11: Mosaic-Plot bzgl. Inversion, Ort & Wintersaison

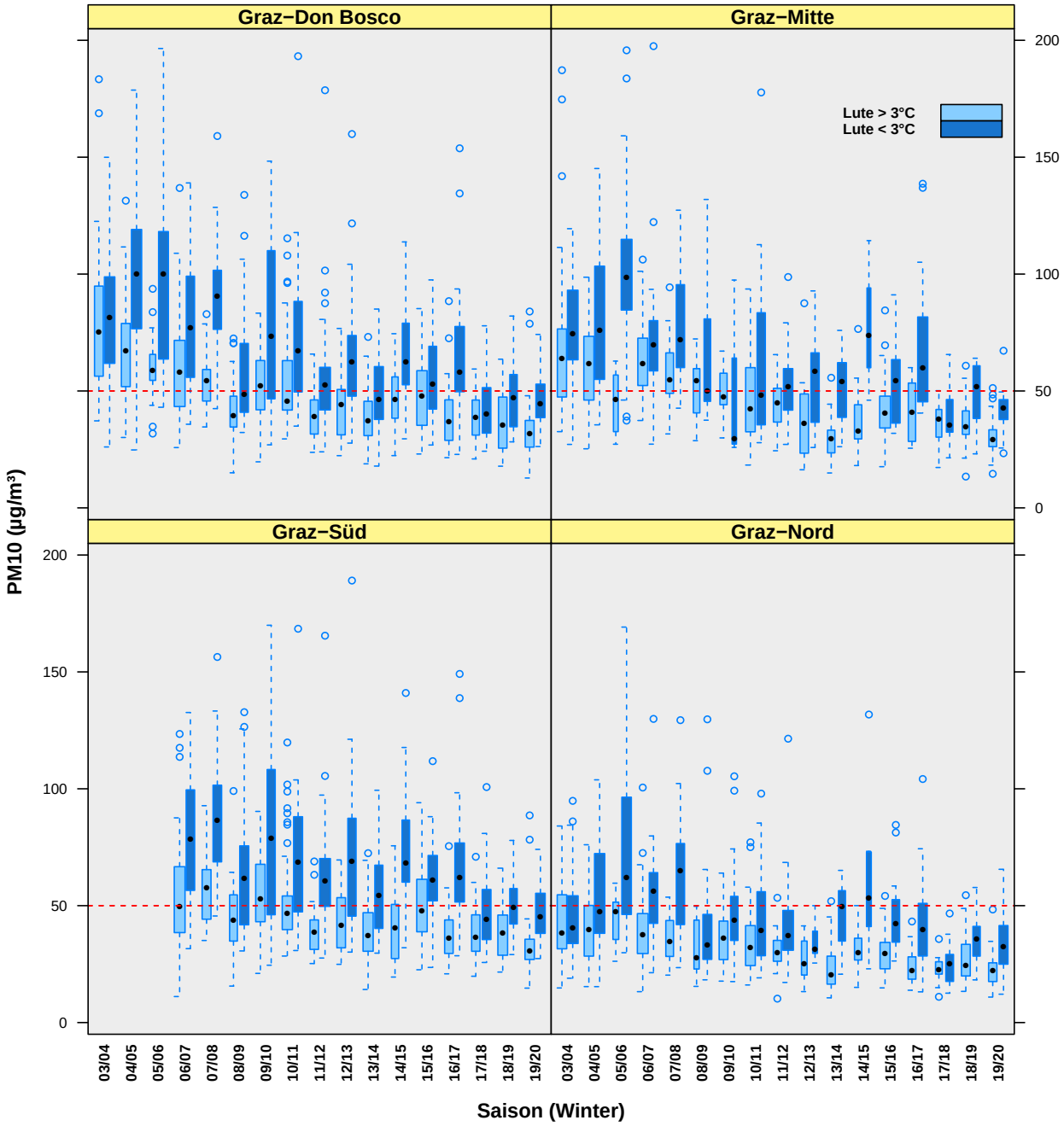


Abbildung 2.12: Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Inversionstage

Im milden Winter 06/07 hatten nur 33% der Inversionstage eine Lufttemperatur < 3 °C, 09/10 waren es 36%. Im strengen Winter 05/06 waren es hingegen sogar 69% Inversionstage, gefolgt von der Saison 11/12 mit 57%. Die aktuelle Wintersaison 19/20

weist an 47% der Inversionstage eine Lufttemperatur $< 3\,°C$ auf. Dies liegt im Mittelfeld aller Werte.

Absolute und relative Häufigkeiten bzgl. *Inversion [$< 3\,°C$, $\geq 3\,°C$]* können der Abbildung 2.11 (Seite 22) entnommen werden.

Die Boxplotserien in Abbildung 2.12 auf Seite 23 lassen eine Tendenz höherer PM_{10}-Belastungen erkennen, wenn diese spezielle Inversionswetterlage [$< 3\,°C$] vorliegt. In Graz-Don Bosco, Graz-Mitte und Graz-Süd befinden sich inklusive der Saison 16/17 die PM_{10}-Mediane (schwarze Punkte in Box) fast immer über der kritischen Grenze von 50 µg/m^3. Für Graz-Nord gilt dies meistens nicht. Die absolute Anzahl ist dort bei dieser speziellen Wetterlage niedriger. Heuer liegen die Mediane aller Stationen unter der kritischen Grenze von 50 µg/m^3.

Messparameter Niederschlag

Über alle Saisonen betrachtet, fällt an fast einem Drittel (∼ 32%) der Wintertage Niederschlag. Der Parameter *Niederschlag* wird nur in Graz-Nord gemessen. Pro Saison liegt für **Graz-Nord** folgender Anteil an Niederschlagstagen vor:

Saison	Niederschlag	kein Niederschlag
03/04	33%	67%
04/05	28%	72%
05/06	33%	67%
06/07	25%	75%
07/08	28%	72%
08/09	39%	61%
09/10	36%	64%
10/11	25%	75%
11/12	22%	78%
12/13	59% (35,7%)	41%
13/14	36%	64%
14/15	27%	73%
15/16	27%	73%
16/17	25%	75%
17/18	35%	65%
18/19	32%	68%
19/20	33%	67%

Die Saisonen 08/09 und 09/10 waren sehr reich an Niederschlag, wohingegen in den Saisonen 06/07, 10/11 & 11/12 wenig Niederschlag fiel (siehe auch Abbildung 4.12 auf Seite

51). Sehr auffällig war jedoch die Wintersaison 12/13 mit einer außergewöhnlich hohen Quote von 59% an Niederschlagstagen (107 Tage). Diese hohe Anzahl wird in Kapitel 4 für die Erstellung von Modellen auf *65 Tage* (35,7%) korrigiert (**ZAMG**, Messstelle Graz-Thalerhof), da diese hohe Anzahl nach intensiver Recherche und Datenüberprüfung nicht plausibel ist (siehe auch Anmerkung auf Seite 2).

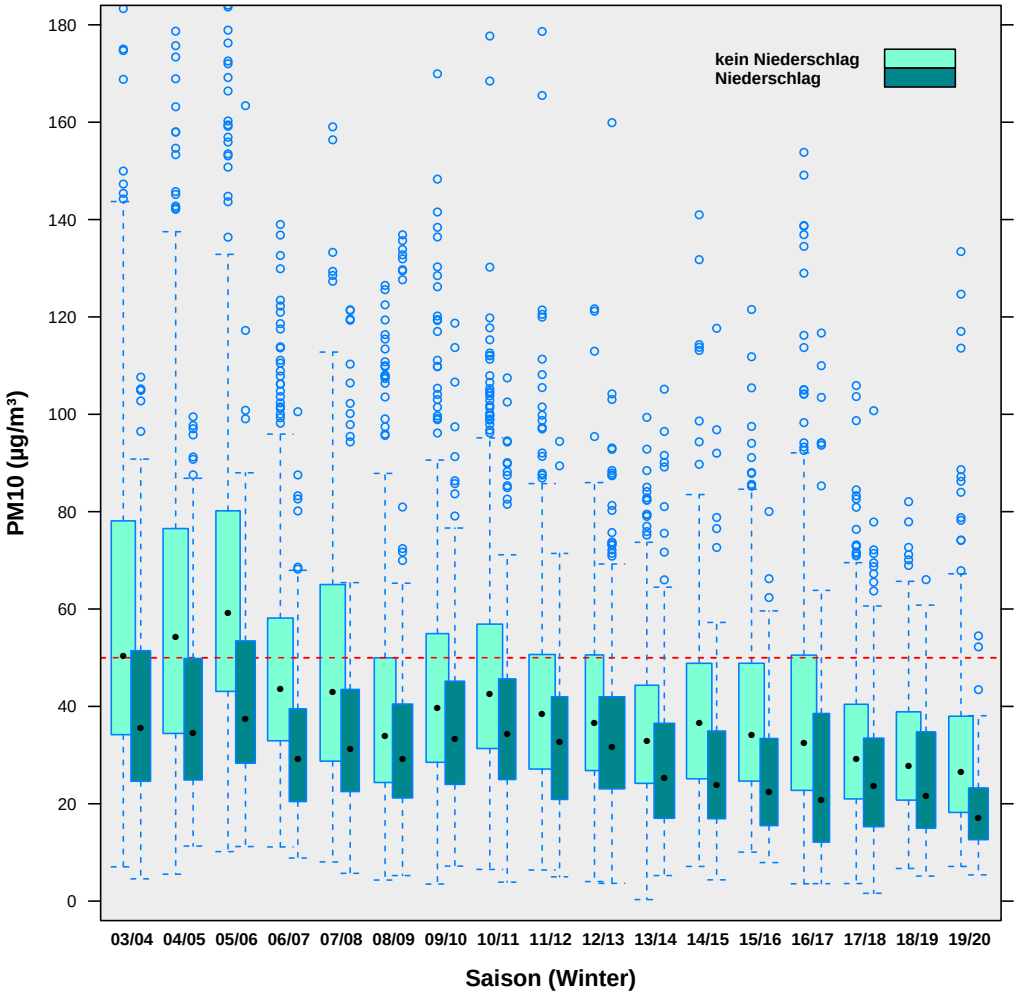


Abbildung 2.13: Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Niederschlag

Die aktuelle Saison 19/20 liefert mit 60 Niederschlagstagen (Anteil 32,8%) wieder einen durchaus plausiblen Wert. Er stellt den achthöchsten gemessenen Wert im gesamten Beobachtungszeitraum dar und liegt somit im Mittelfeld.

Der Box-Whisker-Plot der Abbildung 2.13 auf Seite 25 zeigt ganz klar eine Tendenz geringerer PM_{10}-Belastung an Tagen mit Niederschlag. Dieser Effekt gilt aufgrund mehr-

jähriger Beobachtung als unbestreitbar. Besonders ausgeprägt war dieser Effekt in den ersten vier Saisonen 03/04 - 06/07. Dieser Effekt zeigt sich auch heuer wieder. Das PM_{10}-Niveau ist im Vergleich zur Saison 18/19 wieder leicht gefallen (hierbei werden die restlichen meteorologischen Merkmale außer Acht gelassen).

2.3 Boxplotserien nach Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion & Quartal

Graz-Don Bosco

Die globale Betrachtung der Abbildung 2.14 bzgl. der letzten 17 Wintersaisonen zeigt die höchsten Werte in den ersten drei Saisonen 03/04 bis 05/06 für die Periode Jänner bis März (2. Zeile, ersten drei Graphiken). Der positive Einfluss von Wind (links|rechts) und der negative Einfluss von Inversion (gelb|rot) auf die PM_{10}-Belastung sind ebenfalls deutlich erkennbar. Bemerkenswert ist die sehr kleine Schwankungsbreite der letzten 12 Saisonen 08/09 bis 19/20 in der ersten Hälfte der Wintersaison, sowie der letzten 9 Saisonen 11/12 bis 19/20 in der zweiten Hälfte (erkennbar an der Höhe der Boxen).

Die Saisonen mit den niedrigsten bzw. höchsten PM_{10}-Belastungen sind:

- Milder Winter 06/07|Jän-Mär, Winter 07/08|Jän-Mär, Winter 08/09|Okt-Dez bis Winter 13/14|Okt-Dez & Jän-Mär. Der aktuelle Winter 19/20 weist ein ähnliches Niveau wie der letzte Winter auf: niedrigste PM_{10}-Belastungen mit kleiner Streuung.
- Strenger Winter 05/06|Jän-Mär, Winter 04/05|Jän-Mär und Winter 03/04|Jän-Mär: höchste PM_{10}-Belastung mit großer Streuung.

Mit Ausnahme des Winters 13/14|Jän-Mär, waren bei der meteorologischen Situation *wenig Wind* und *Inversionswetterlage*, in der zweiten Hälfte der Wintersaison fast immer mehr als 75% der Tage *Überschreitungstage* (d.h. unterer Rand der Box ist über dem rot strichlierten Grenzwert). Für die letzten Quartale Jän-Mär trifft dies allerdings nicht zu.

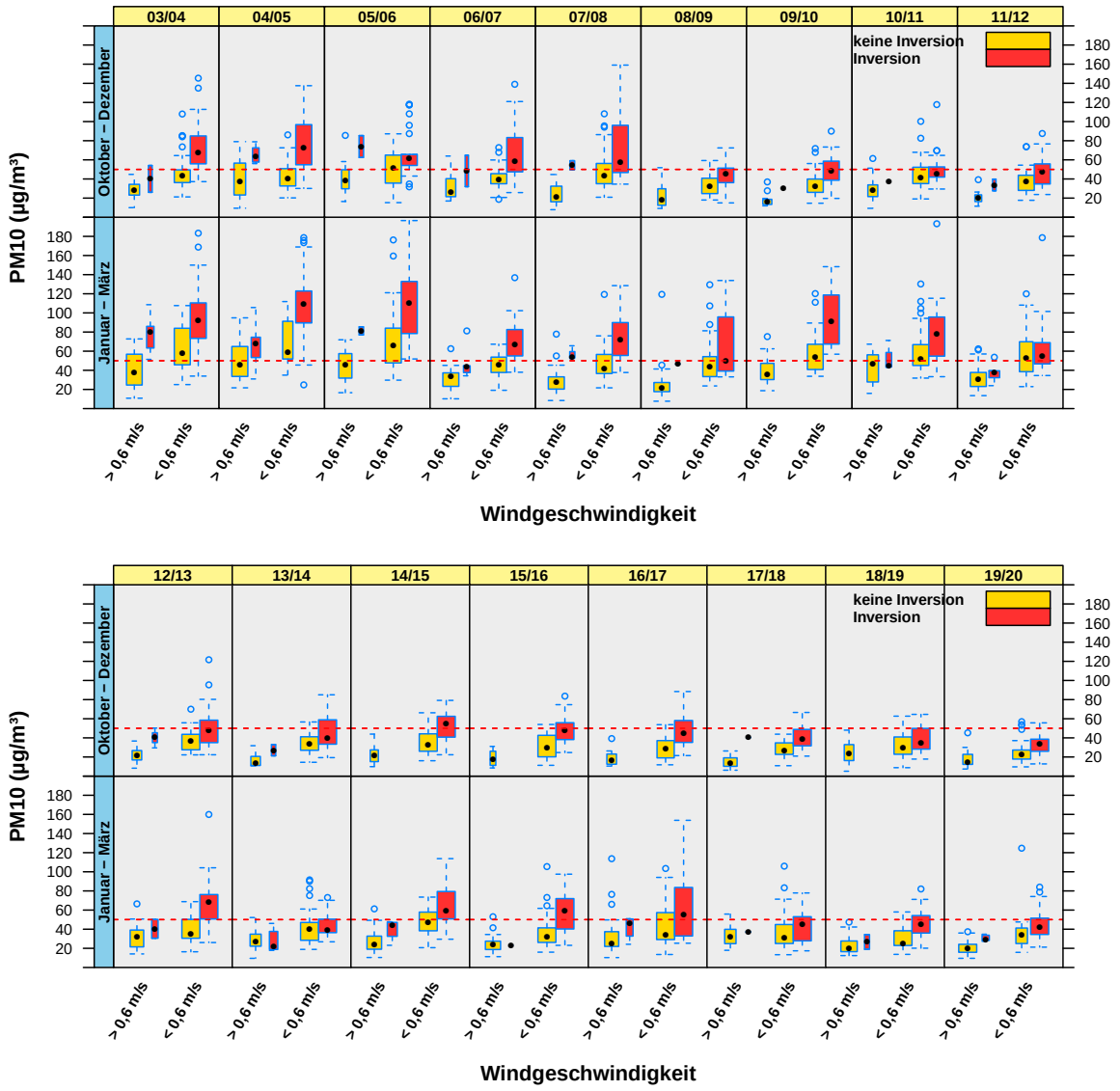


Abbildung 2.14: Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Don Bosco

Interessant ist die Beobachtung, dass das Verhältnis von *Inversion/keine Inversion* zurückgeht, wenn die mittlere Windgeschwindigkeit mehr als 0.6 m/s beträgt. Das ist mit der meteorologischen Sichtweise konsistent, denn stärkerer Wind bewirkt *Ausräumung der Inversion* bzw. schwächerer Wind begünstigt die Abkühlung in Bodennähe und somit wird eine Inversion wahrscheinlicher.

Graz-Mitte

Der Winter 09/10 ist aufgrund des **Messausfalls** vom **11.12.2009** bis **18.02.2010** (68 Tage) mit den anderen Wintersaisonen nicht vergleichbar. Die Daten ab der Wintersaison 2010/2011 wurden an der (neuen) Stelle „Graz-Mitte Gries“ gemessen.

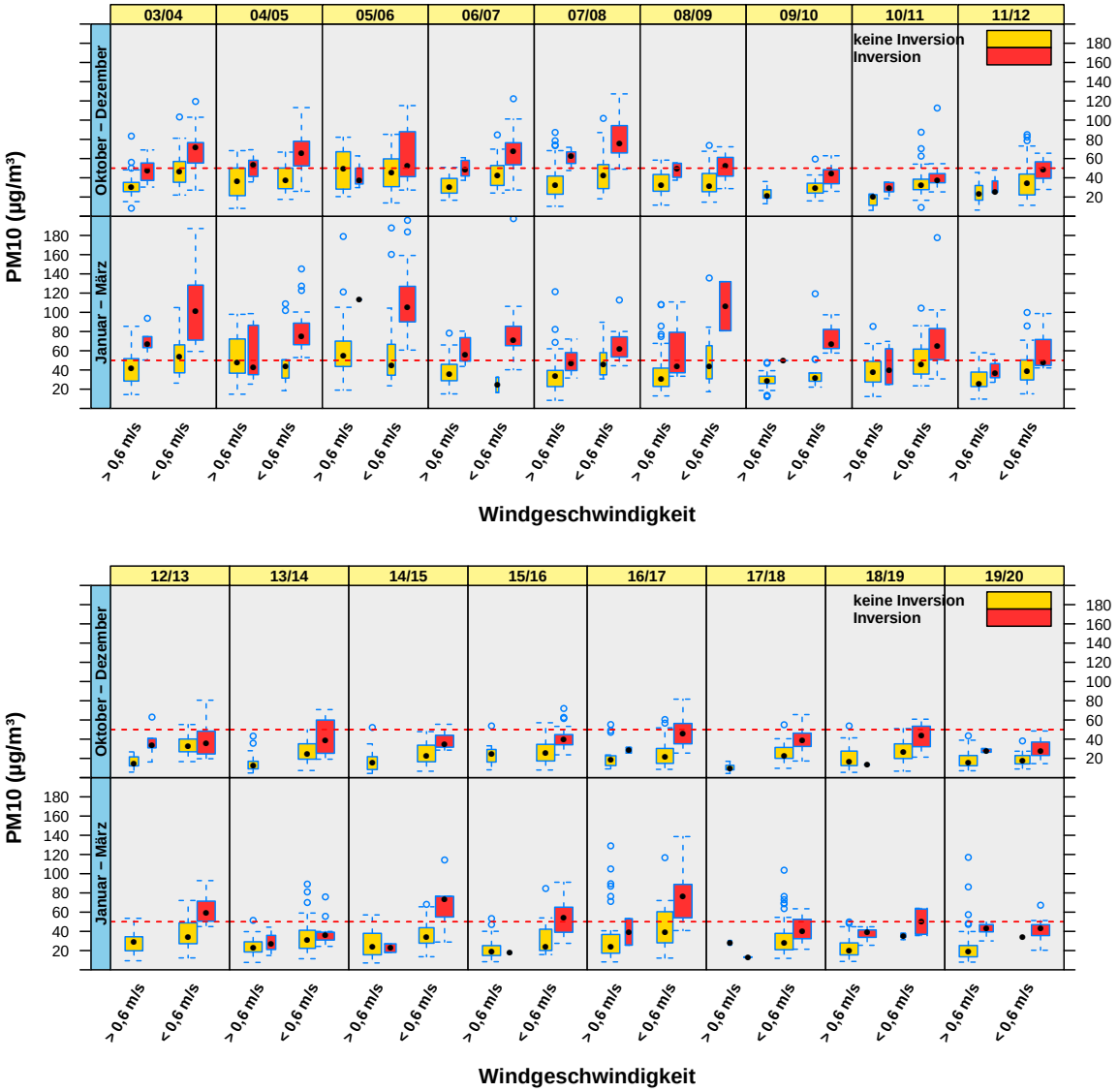


Abbildung 2.15: Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Mitte

Die globale Betrachtung der Abbildung 2.15 bzgl. der 17 Wintersaisonen zeigt die höchsten Werte in den ersten drei Saisonen 03/04 bis 05/06 für die Periode Jänner bis März

(2. Zeile, ersten drei Graphiken). Der positive Einfluss von Wind (links|rechts) und der negative Effekt von Inversion (gelb|rot) auf die PM_{10}-Belastung ist ebenfalls erkennbar; mit noch stärkeren Effekten in den zweiten Saisonhälften Jän-Mär.

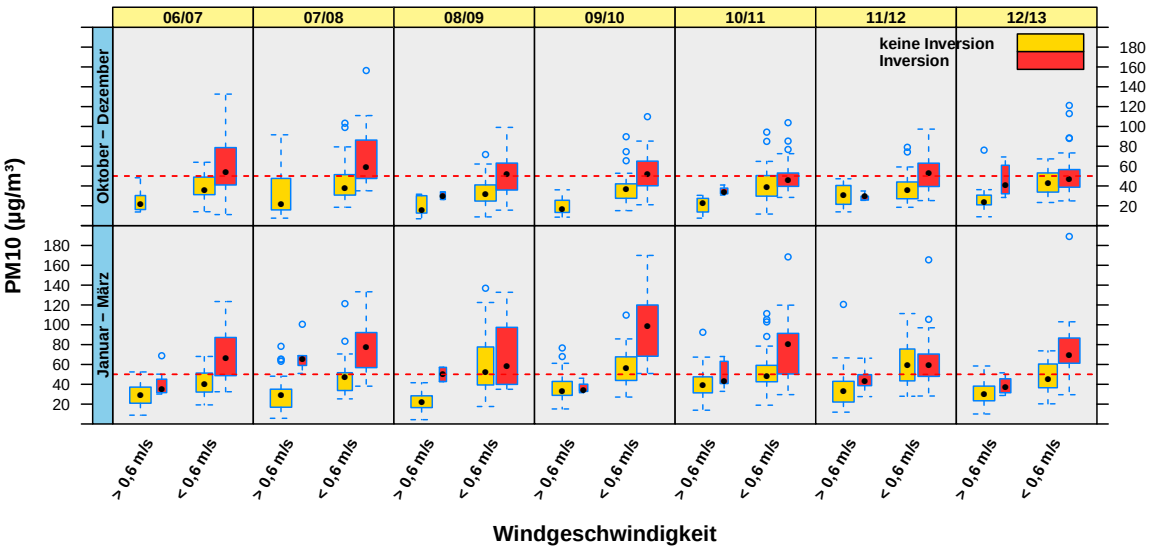
Auffällig ist 05/06|Okt-Dez, denn in dieser Periode sind kaum Unterschiede zwischen Tagen mit und ohne Inversion feststellbar. Bemerkenswert ist, dass ab Saison 06/07 die Schwankungsbreite tendenziell geringer wird, mit Ausnahme von Saison 08/09|Jän-Mär. Nach dem Quartal 13/14|Jän-Mär, in dem alle Mediane (schwarze Punkte) erstmals deutlich unter 50 µg/m^3 waren, liegt die aktuelle Saison 19/20 im gleichen Trend.

Die Saisonen mit den niedrigsten bzw. höchsten PM_{10}-Belastungen sind:

- Milder Winter 06/07, Winter 07/08|Jän-Mär, 08/09|Okt-Dez & Winter 17/18 bis Winter 19/20: niedrigste PM_{10}-Belastungen mit kleiner Streuung,
- Strenger Winter 05/06|Jän-Mär und Winter 03/04|Jän-Mär, gefolgt von den Wintern 04/05 und 08/09|Jän-Mär: höchste PM_{10}-Belastung mit großer Streuung.

Graz-Süd

Von Graz-Süd (G-S) liegen nur Daten der letzten vierzehn Saisonen (06/07 bis 19/20) vor, wie die Boxplotserie in Abbildung 2.16 zeigt.



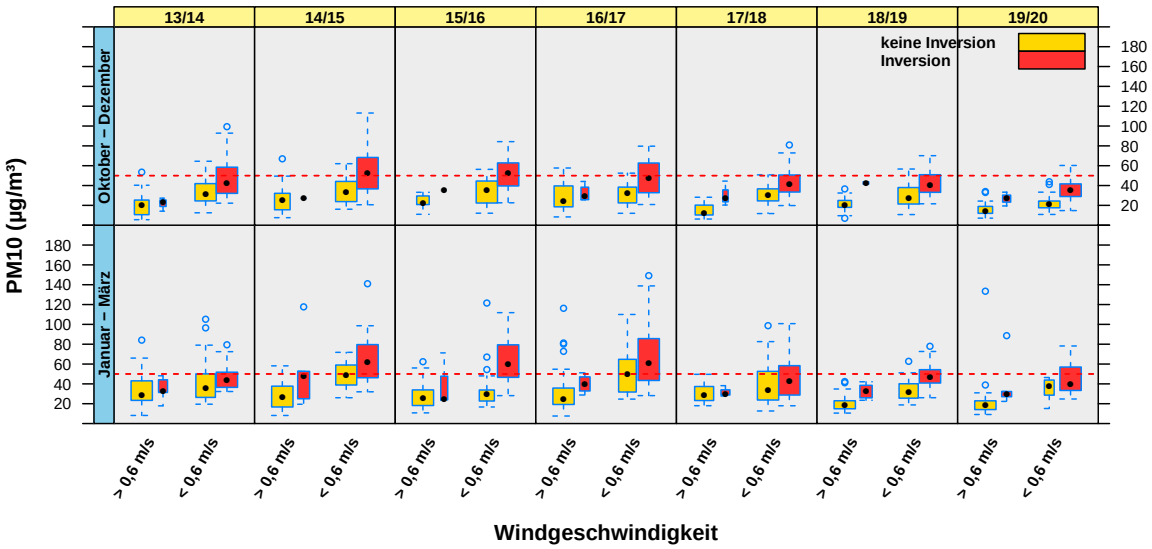


Abbildung 2.16: Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Süd

Die PM_{10}-Belastung in der aktuellen Saison 19/20 entspricht in etwa jener des Jahres 13/14 und kann als gering bezeichnet werden. Das relativ niedrige PM_{10}-Niveau der letzten Jahre am problematischen Ort Graz-Süd wurde auch in dieser Wintersaison 19/20, mit einer mittleren Lufttemperatur von ca. 5,6°C und ca. 14,8% = 27 Frosttagen, fortgesetzt. Ob diese Tendenz nur auf meteorologische Faktoren zurückzuführen ist oder mit einer tatsächlichen PM_{10}–Reduktion verbunden ist, kann letztendlich nur durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Graz-Nord

Die globale Betrachtung der Abbildung 2.17 bzgl. der letzen siebzehn Saisonen zeigt die höchsten Werte in den Saisonen 04/05, 05/06, 08/09, 09/10 & 14/15 für die Periode Jänner bis März (2. Zeile, Graphiken 2,3,6,7 & 12) sowie die Saison 07/08 für die Periode Oktober bis Dezember (1. Zeile, Graphik 5). Der positive Einfluss von Wind ($>$ 0,6 m/s | $<$ 0,6 m/s) und der negative Einfluss von Inversion (gelb|rot) auf die PM_{10}-Belastung werden wieder deutlich; mit jeweils stärkeren Unterschieden in den Quartalen Jän-Mär.

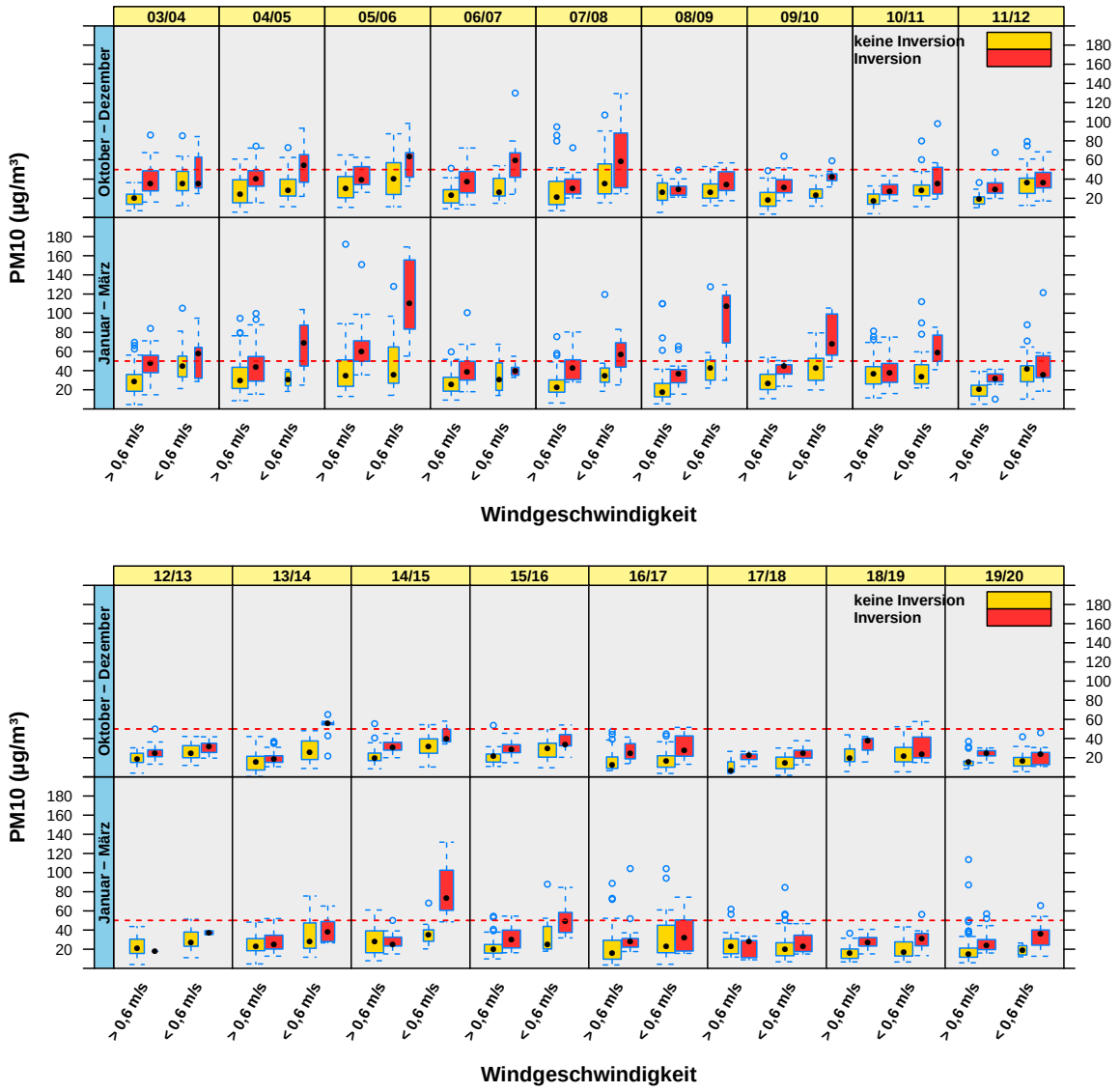


Abbildung 2.17: Boxplotserie der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Quartal in Graz-Nord

Bemerkenswert ist die geringe Schwankungsbreite in allen Saisonen – 07/08 für Jän-Mär und 04/05, 05/06, 08/09, 09/10 & 14/15 für Okt-Dez, sowie den gesamten Wintersaisonen 03/04, 06/07 & 10/11 bis 13/14. Für die aktuelle Saison 19/20 gilt dies ebenfalls für den gesamten Winter. Graz-Nord ist weiterhin jener Ort, der bzgl. PM_{10} am geringsten belastet ist und auch hier ist ein gleichbleibender bis fallender Trend zu erkennen.

Die Saisonen mit den niedrigsten bzw. höchsten PM_{10}-Belastungen sind:

- Milder Winter 06/07, Winter 08/09|Okt-Dez bis Winter 11/12|Okt-Dez & Jän-Mär, Winter 13/14, Winter 14/15|Okt-Dez sowie die aktuelle Wintersaison 19/20: niedrigste PM_{10}-Belastungen mit relativ geringer Streuung,
- Strenger Winter 05/06|Jän-Mär, Winter 08/09|Jän-Mär und Winter 14/15|Jän-Mär: höchste PM_{10}-Belastungen mit großer Streuung.

2.4 Boxplotserien nach Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion & Tagestyp

Die folgenden Boxplotserien kategorisieren für jeden Messort folgende vier Faktoren

- Saison (17 Ausprägungen: 03/04 | ... | 19/20),
- Windgeschwindigkeit (2 Ausprägungen: `> 0,6 m/s` | `< 0,6 m/s`),
- Inversion (2 Ausprägungen: `keine Inversion` | `Inversion`)
- Tagestyp (3 Ausprägungen: `Mo-Fr` | `Sa` | `So/Fe`)

Die Charakteristiken sind an allen Messorten sehr ähnlich und fassen die bereits oben erkannten Strukturen (Abschnitt 2.3, ab Seite 26) zusammen. An Werktagen (`Mo-Fr`) zeigt die PM_{10}-Belastung seit Saison 06/07 inklusive der aktuellen Saison 19/20 ein relativ ähnliches, eher niedriges Niveau. Grundsätzlich ist die PM_{10}-Belastung an Werktagen aber signifikant höher als an anderen Tagen (`Sa, So/Fe`). Das lässt auf eine eventuelle PM_{10}-Erhöhung schließen, die durch den erhöhten Straßenverkehr an Werktagen verursacht werden könnte.

Die Kategorien `Sa` und `So/Fe` zeigen generell geringere Belastungen an Wochenend- und Feiertagen. Die aktuelle Wintersaison 19/20 liegt auch an diesen Tagestypen im Trend der letzten Saisonen. Bemerkenswert ist, dass in den ersten drei Saisonen an Samstagen oft eine Übertretung von 50 µg/m^3 feststellbar ist. Generell ist die PM_{10}-Belastung bei erhöhter mittl. Windgeschwindigkeit (`> 0,6 m/s`) niedriger:

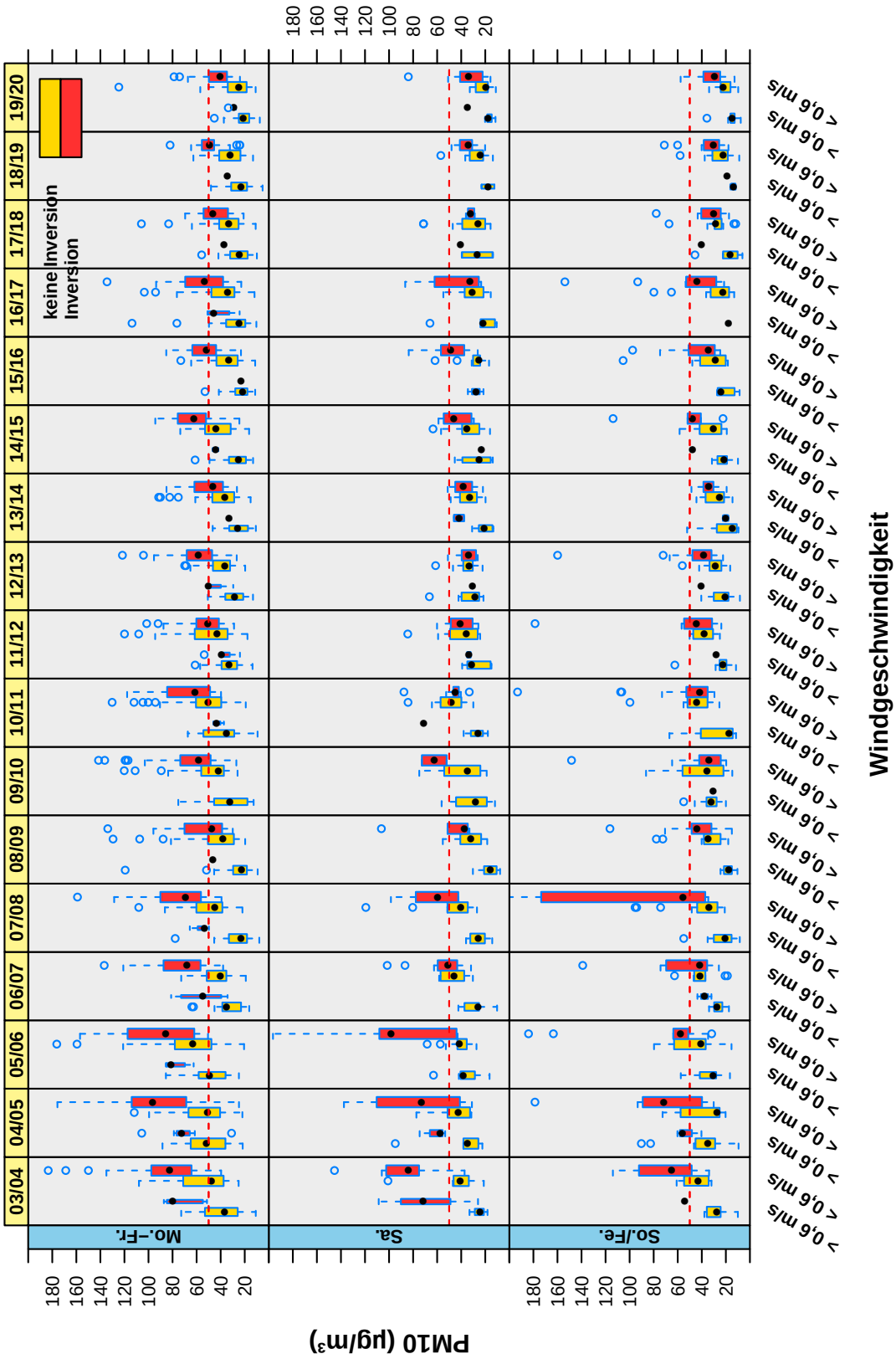


Abbildung 2.18: Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-DB

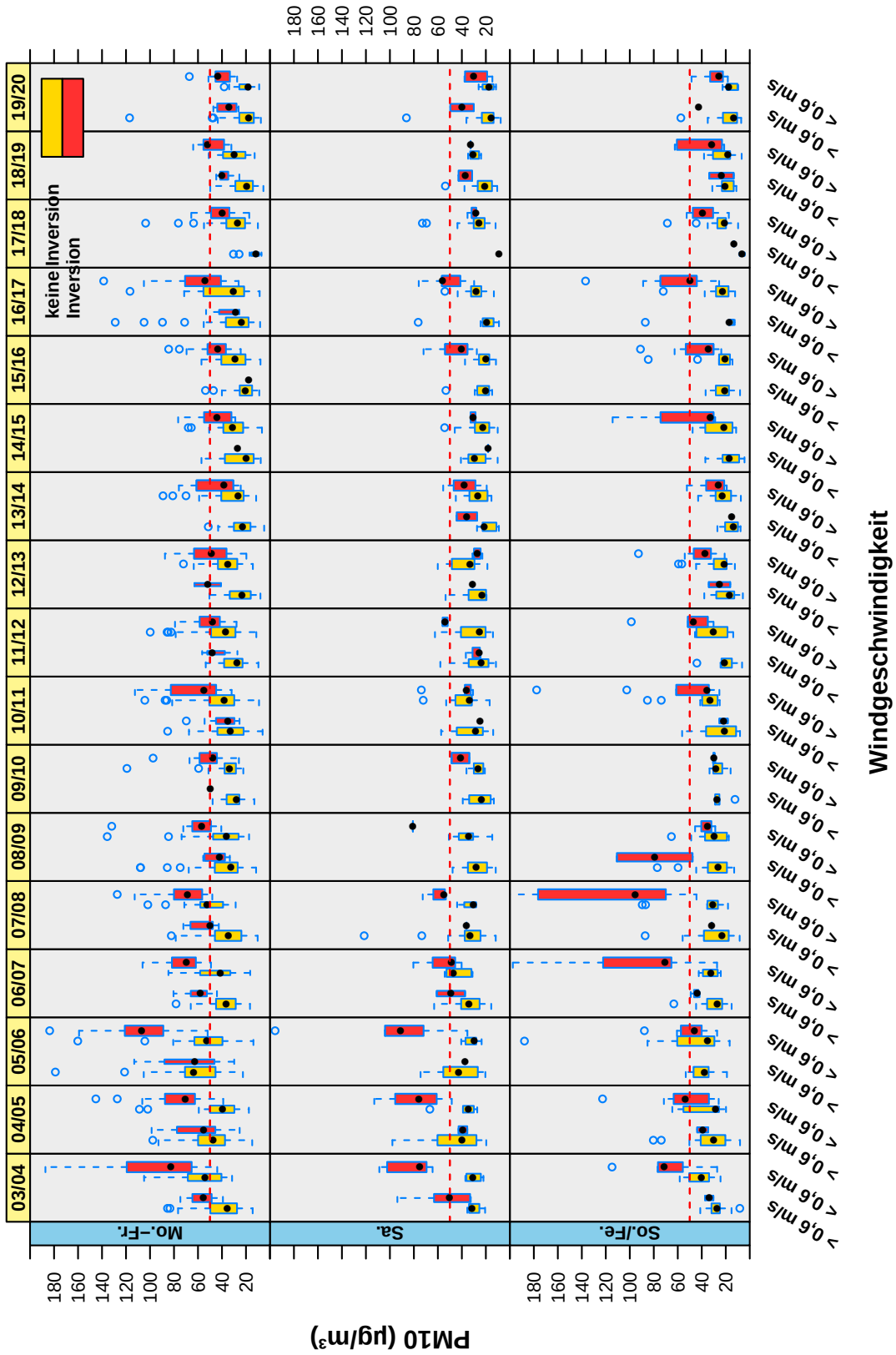


Abbildung 2.19: Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-M

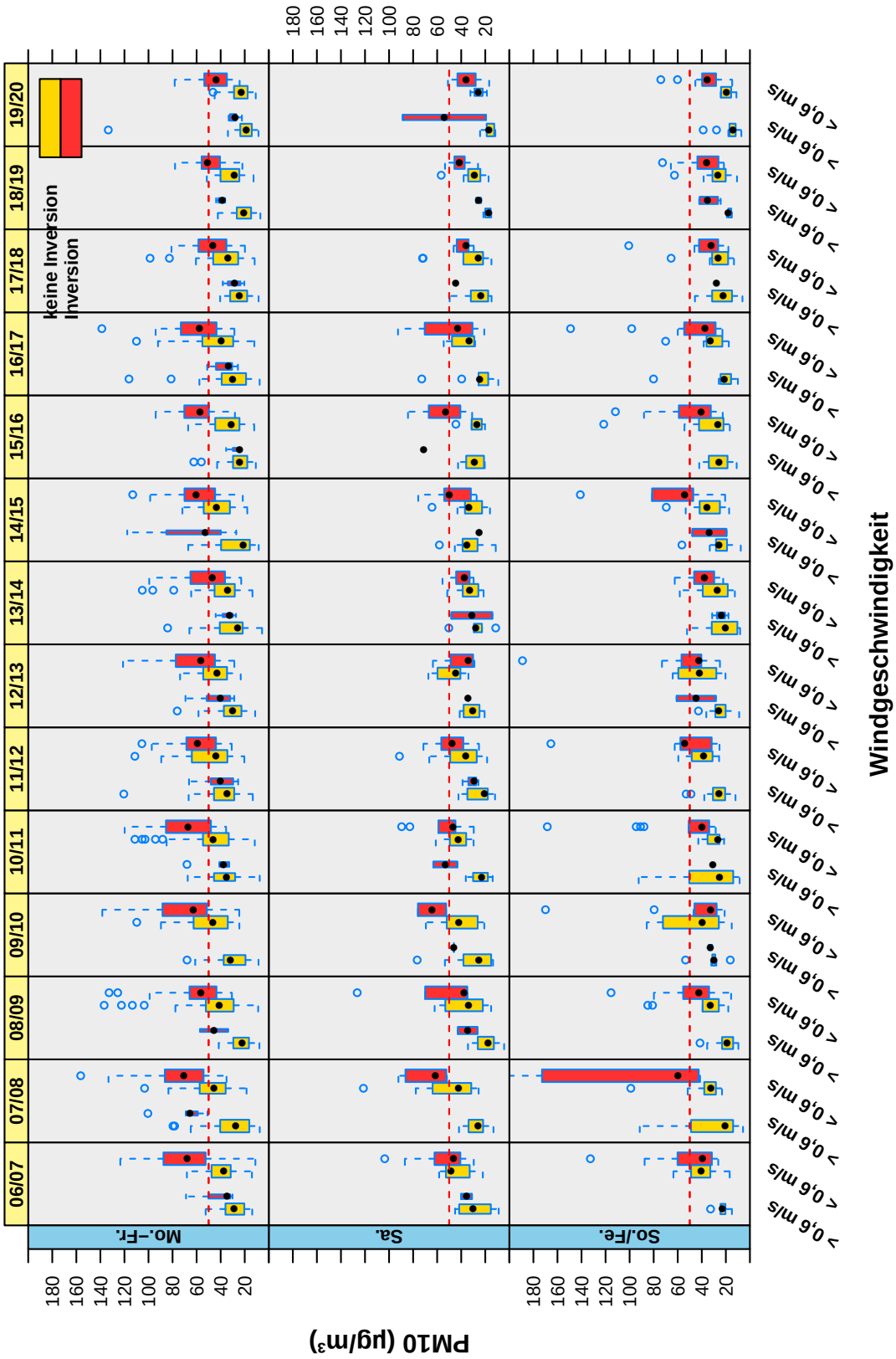


Abbildung 2.20: Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-S

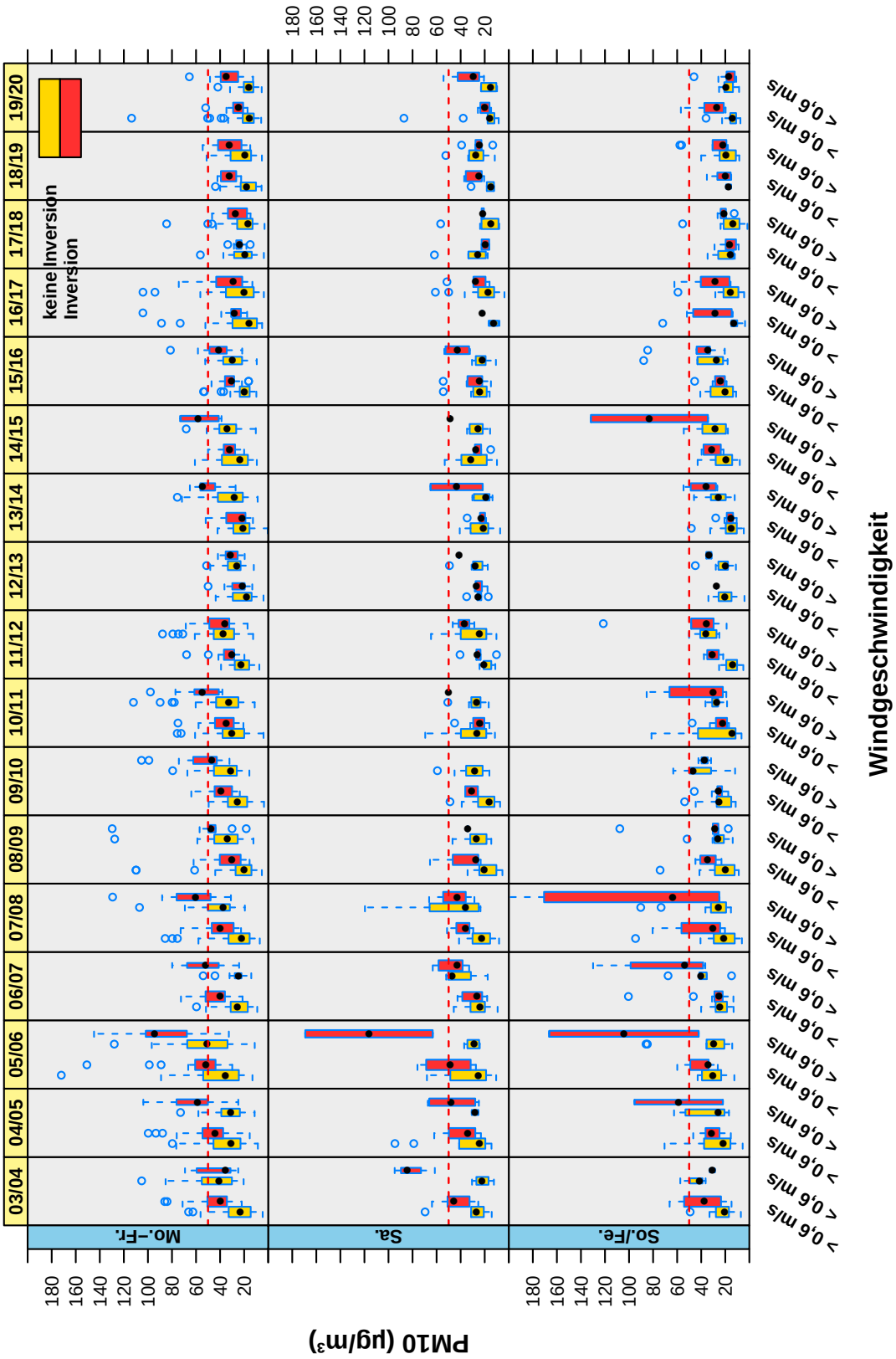


Abbildung 2.21: Boxplotserien der PM_{10}-TMW bzgl. Saison, Windgeschwindigkeit, Inversion und Tagestyp in G-N

3 Evaluierung des Grazer Prognosemodells

3.1 Grundlagen und Ausgangspunkt

3.2 Datenmaterial

3.3 Prognosemodelle

4 Modelle für Wintermittelwerte PM_{10}

Die explorativen Analysen in Kapitel 2 (ab Seite 5) zeigen deutliche Unterschiede der durchschnittlichen Werte von PM_{10} bzgl. dem Beobachtungshorizont aller siebzehn Wintersaisonen (03/04-19/20). Für die Modellierung ist es essentiell, Zusammenhänge und Strukturen in den verfügbaren Daten aufzudecken. Aus diesem Grund vertiefen wir einige Aspekte, die vor allem auf die meteorologischen Faktoren abzielen.

4.1 Univariate Analyse der Daten auf Tagesebene

Die folgenden Abbildungen sind *Histogramme* und *Fehlerbalkendiagramme* der Tagesmittelwerte (TMW) für die Merkmale `PM10`, Lufttemperatur (`LuTe`), Windgeschwindigkeit (`wige`), Spitzenwindgeschwindigkeit (`spg`) und Temperaturdifferenz der Grazer Messorte zu Kalkleiten (`deltatemp`). Jede Grafik lässt sich einer der siebzehn Wintersaisonen und einem der vier betrachteten Grazer Messorte (G-DB, G-M, G-S, G-N) zuordnen.

PM_{10}

Den folgenden **Histogrammen** (abgebildet werden nur TMW mit $PM_{10} \leq 150$ µg/m^3; der PM_{10}-Grenzwert = 50 µg/m^3 wird vertikal als rot-strichlierte Linie dargestellt, der Mittelwert über alle Saisonen und Orte bei ca. 40 µg/m^3 schwarz-strichliert) können Unterschiede in den empirischen Verteilungen bzgl. Ort und Wintersaison (WS) entnommen werden; auch in der aktuellen Wintersaison 19/20 ist wieder das sehr niedrige

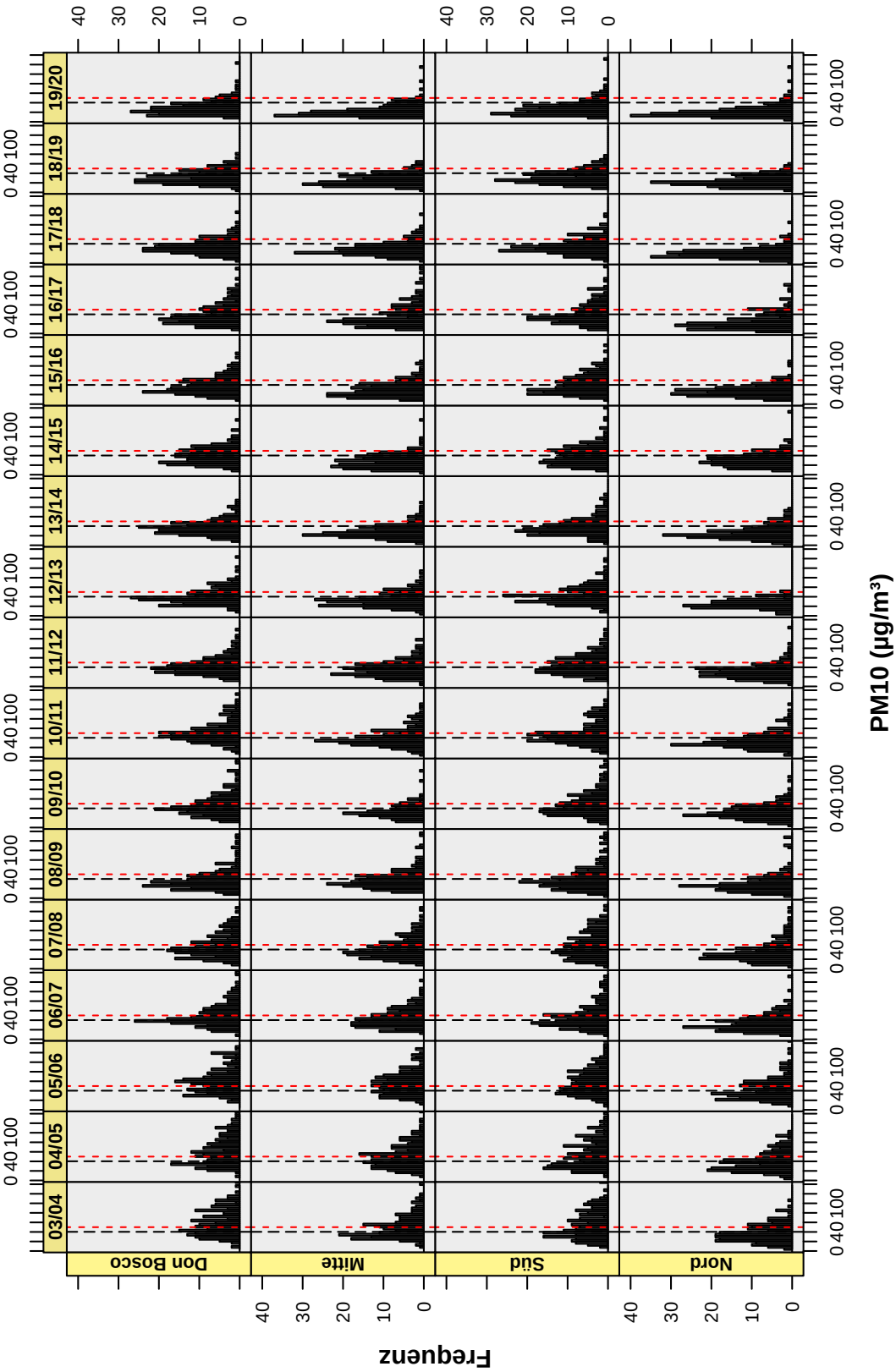


Abbildung 4.1: Histogramme von PM_{10} bzgl. Wintersaisonen und allen Messorte

Niveau der Messorte Graz-Mitte und Graz-Nord deutlich zu erkennen. Ab der Wintersaison 06/07 können etwas schlankere, nach links verschobene Verteilungen (rechtsschief) beobachtet werden.

Fehlerbalkendiagramme: An den höher belasteten Messorten Graz-Don Bosco und Graz-Süd wurden die niedrigsten PM_{10}-Niveaus bislang in der Saison 13/14 beobachtet, die als überdurchschnittlich warm und niederschlagsreich galt, was die niedrige PM_{10}-Belastung erklären könnte. Die aktuelle Wintersaison 19/20 zeigt in allen Messstationen außer Graz-Nord wiederum einen deutlichen Abfall. Sie kann als Saison mit den niedrigsten PM_{10}-Werten bezeichnet werden.

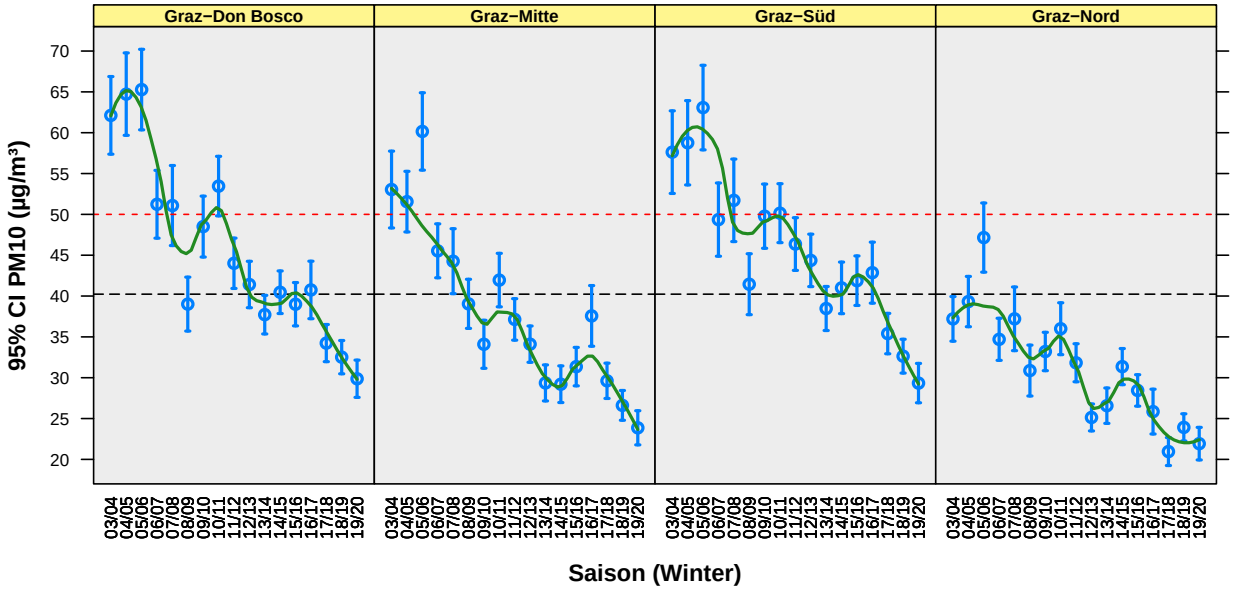


Abbildung 4.2: 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von PM_{10} bzgl. WS und Messort inkl. Trend (in grün)

Lufttemperatur

Die Verteilung der Lufttemperatur ist an allen Messorten ähnlich. In Graz-Süd wurde dieser Parameter erst ab WS 06/07 gemessen. Die 0°Celsius-Grenze wird vertikal als magentafarben-strichliert markiert.

Die ersten zwei Wintersaisonen 03/04 und 04/05 weisen ähnliche Temperaturverteilungen auf. Die kälteste Wintersaison war 05/06 mit mittleren Temperaturen unter 3 °C,

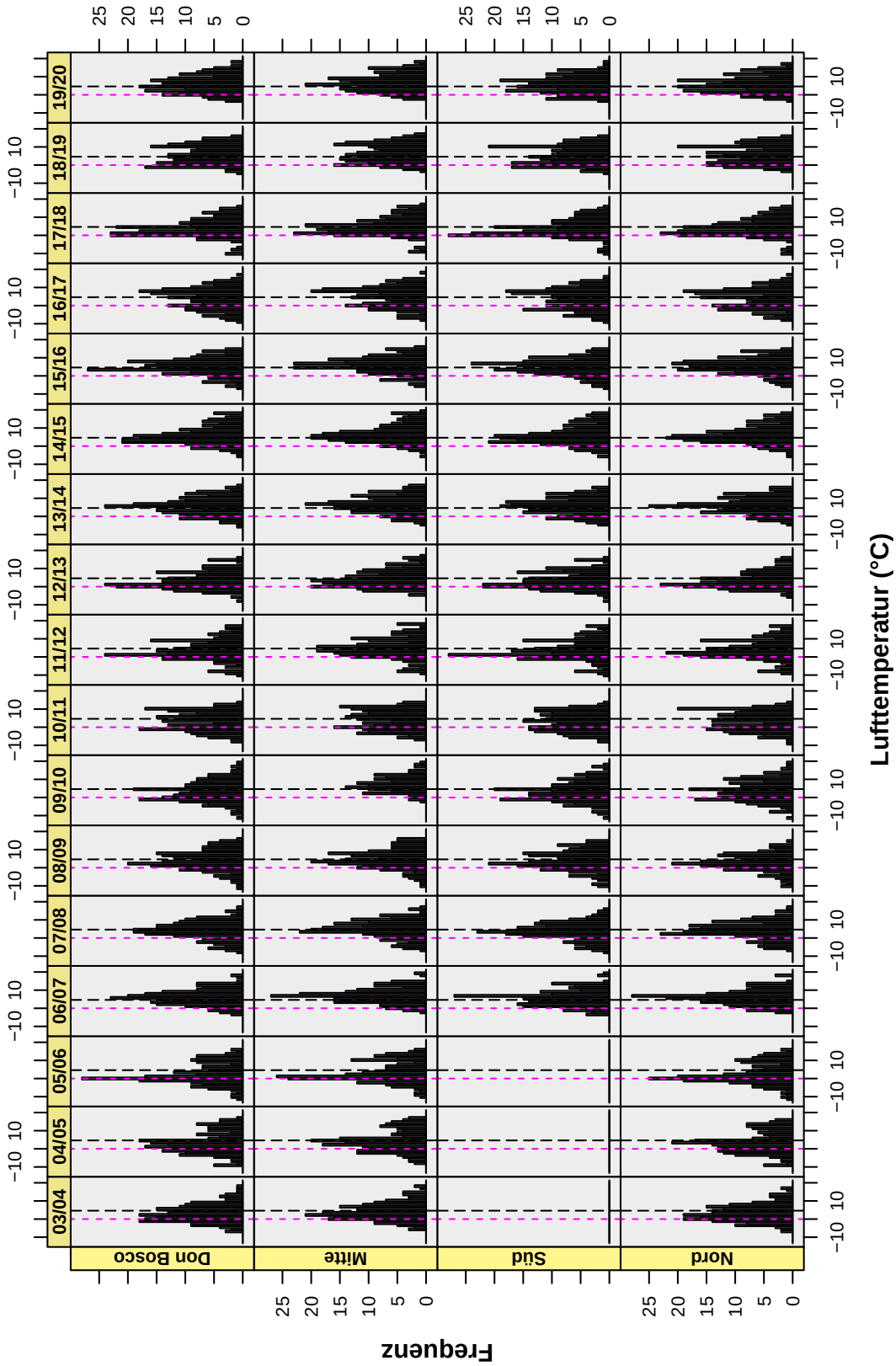


Abbildung 4.3: Histogramme von Lufttemperatur bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten

gefolgt von der warmen Wintersaison 06/07 mit einer Durchschnittstemperatur von über 6 °C (siehe Fehlerbalken). Die schwarz-strichlierten Linien in den Histogrammen und Fehlerbalkendiagrammen markieren den Wert 4,6 °C, was dem Mittel aller beobachteten TMW entspricht. Die mittlere Lufttemperatur der aktuellen Wintersaison 19/20 liegt für alle Messorte deutlich über dem Mittelfeld aller Saisonen. (Graz-Mitte in 09/10 ist verzerrt, da sehr kalte Wintertage aufgrund der Verlegung nach Graz-Mitte Gries nicht gemessen wurden.)

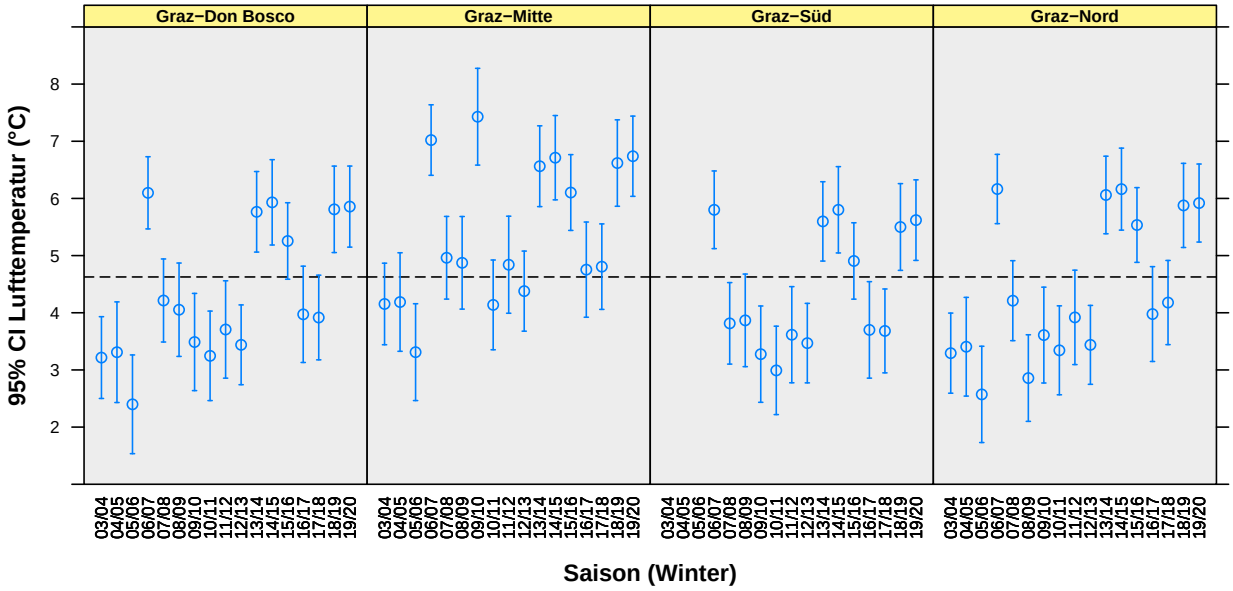


Abbildung 4.4: 95 %-CI Fehlerbalkendiagr. von Lufttemperatur bzgl. WS und Messort

Windgeschwindigkeit

Die Charakteristik der Verteilungen ist in Graz-Don Bosco, Graz-Mitte und Graz-Süd sehr ähnlich. Eine etwas stärkere mittlere Windgeschwindigkeit ist am Messort Graz-Nord zu verzeichnen.

Fehlerbalken: Die schwarz-strichlierten Linien in den folgenden beiden Abbildungen markieren den Wert 0,63 m/s, der dem Durchschnitt aller beobachteten Tagesmittelwerte (TMW) entspricht.

Die mittlere Windgeschwindigkeit der aktuellen Wintersaison 19/20 besitzt an der Messstelle Graz-Nord das viertniedrigste Niveau seit Aufzeichnungsbeginn. An der Station

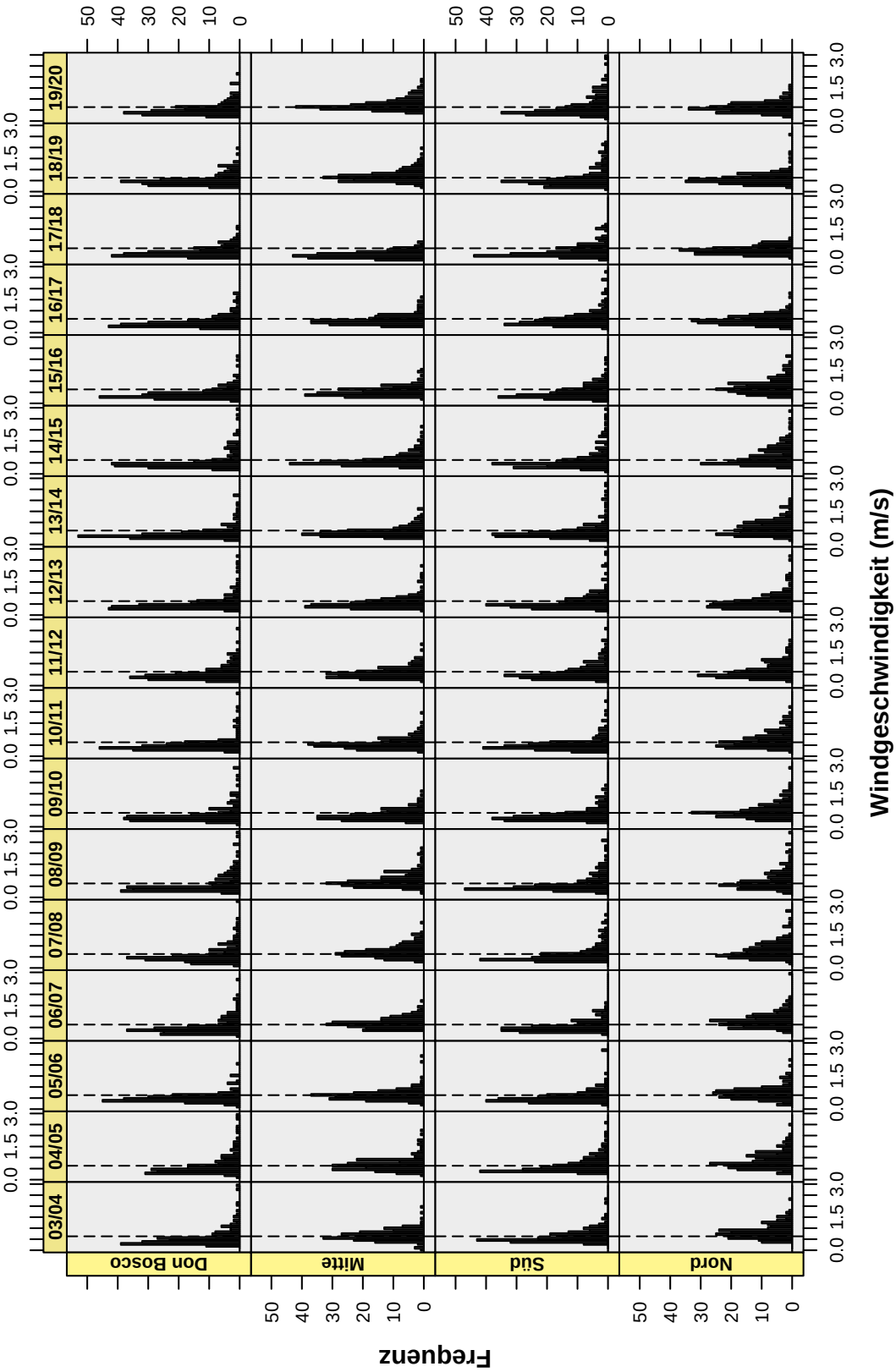


Abbildung 4.5: Histogramme von Windgeschwindigkeit bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten

Graz-Don-Bosco befindet sie sich im unteren Mittelfeld, während sie in Graz-Mitte und Graz-Süd im oberen Mittelfeld liegt. Bemerkenswert ist, dass Graz-Nord verglichen mit den anderen Orten, grundsätzlich eine andere Windcharakteristik aufzeigt (siehe auch anhand der Empirischen Verteilungen, Abb. 4.5).

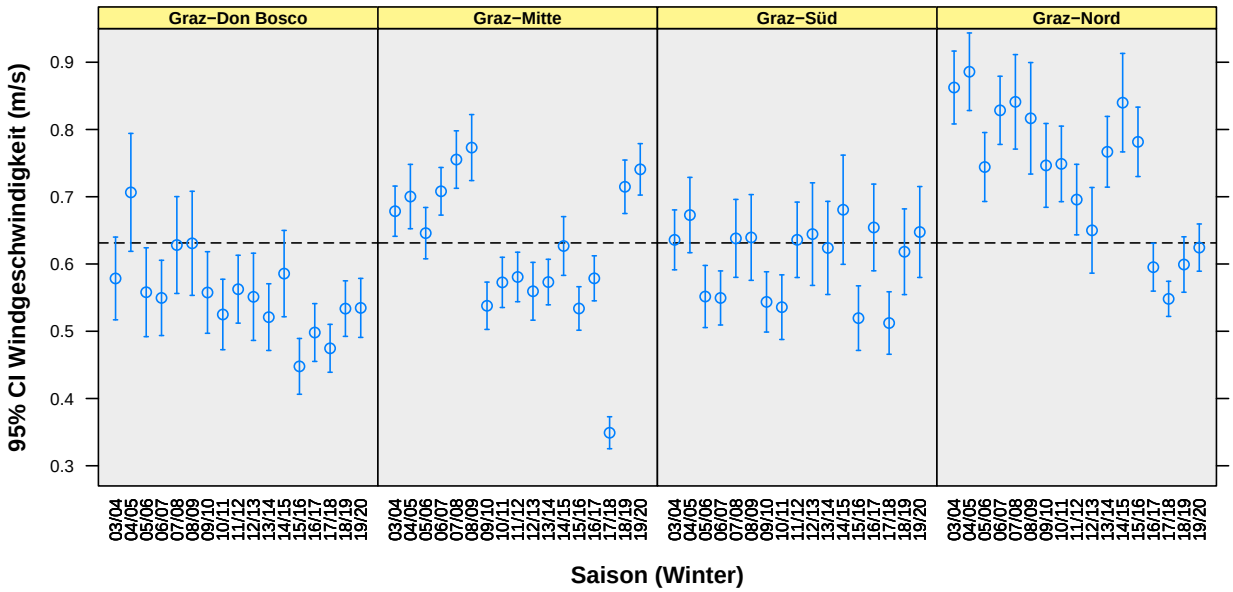


Abbildung 4.6: 95 %-CI Fehlerbalkendiagr. von Windgeschw. bzgl. WS und Messort

Spitzenwindgeschwindigkeit

Um in den Histogrammen (Abbildung 4.7, Seite 46) die empirischen Verteilungen besser erkennen zu können, werden die vereinzelten Ausreißer nicht abgebildet, und es werden nur Spitzenwindgeschwindigkeiten dargestellt, welche unter 30 m/s sind. Die schwarz-strichlierten Linien in den Abbildungen 4.7 und 4.8 markieren den Wert 4,99 m/s, der dem Durchschnitt aller beobachteten TMW entspricht.

In Abbildung 4.8 auf Seite 47 ist zu erkennen, dass die Wintersaisonen 06/07, 07/08 & 08/09 die höchsten Durchschnittswerte an Spitzenwind zu verzeichnen haben. In der heurigen Wintersaison 19/20 verzeichnet Graz-Nord den viertniedrigsten Wert seit Messbeginn (welcher sogar niedriger als in Graz-Don Bosco und Graz-Süd ist). Graz-Süd weist den höchsten Wert seit Messbeginn auf. Graz-Mitte und Graz-Don Bosco liegen im Mittelfeld.

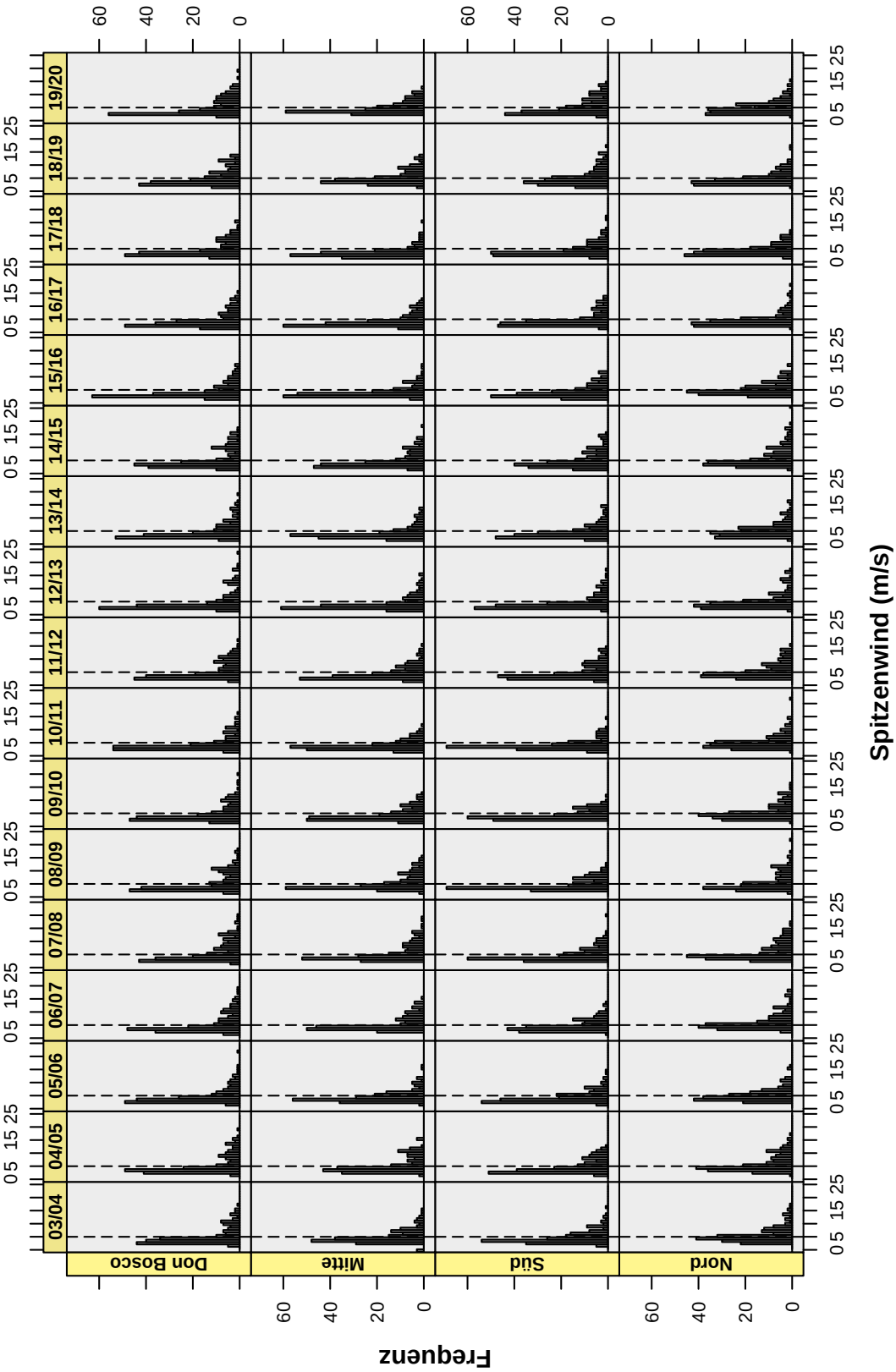


Abbildung 4.7: Histogramme von Spitzenwindgeschwindigkeit bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten

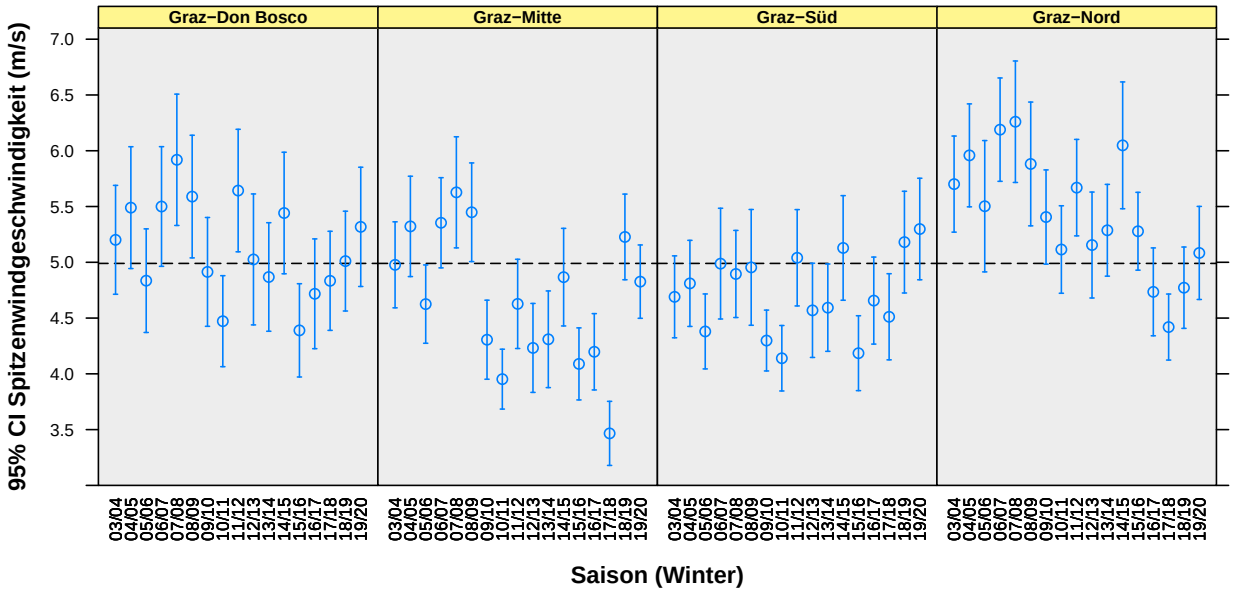


Abbildung 4.8: 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von Spitzenwind bzgl. WS und Messort

Temperaturdifferenz zwischen Graz und Kalkleiten

Wir sprechen von einer *Temperaturinversion*, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Graz und Kalkleiten $< 0\,°C$ beträgt (markiert durch die magenta-strichlierten Linien in den Abbildungen 4.9 und 4.10). Schwarz-strichliert wurde das Gesamtmittel aller TMW, das 0,59 °C beträgt. Die Saisonen 03/04, 04/05 & 06/07 waren Winter mit sehr vielen Inversionswetterlagen. Bemerkenswert ist, dass der strenge Winter in 05/06, über den gesamten Beobachtungshorizont gesehen, an eher wenigen Tagen eine Inversionswetterlage verursachte. Grundsätzlich deutet ein hoher Durchschnittswert auf eher wenig Inversionstage hin (WS 05/06, WS 07/08, WS 08/09, WS 09/10, WS 12/13, WS 13/14, sowie die WS 14/15). Die langjährigen Mittelwerte an den Messorten Graz-Don Bosco, Graz-Süd und Graz-Nord liegen etwas über 0 °C, nur in Graz-Mitte beträgt der Wert mehr als +1 °C.

Die durchschnittliche Temperaturdifferenz (`Graz-X − Kalkleiten`) in der aktuellen Wintersaison 19/20 liegt an allen Messstellen im Mittelfeld aller Saisonen, was mit den Beobachtungen bzgl. des Messparameters Inversion auf Seite 17 ff. übereinstimmt.

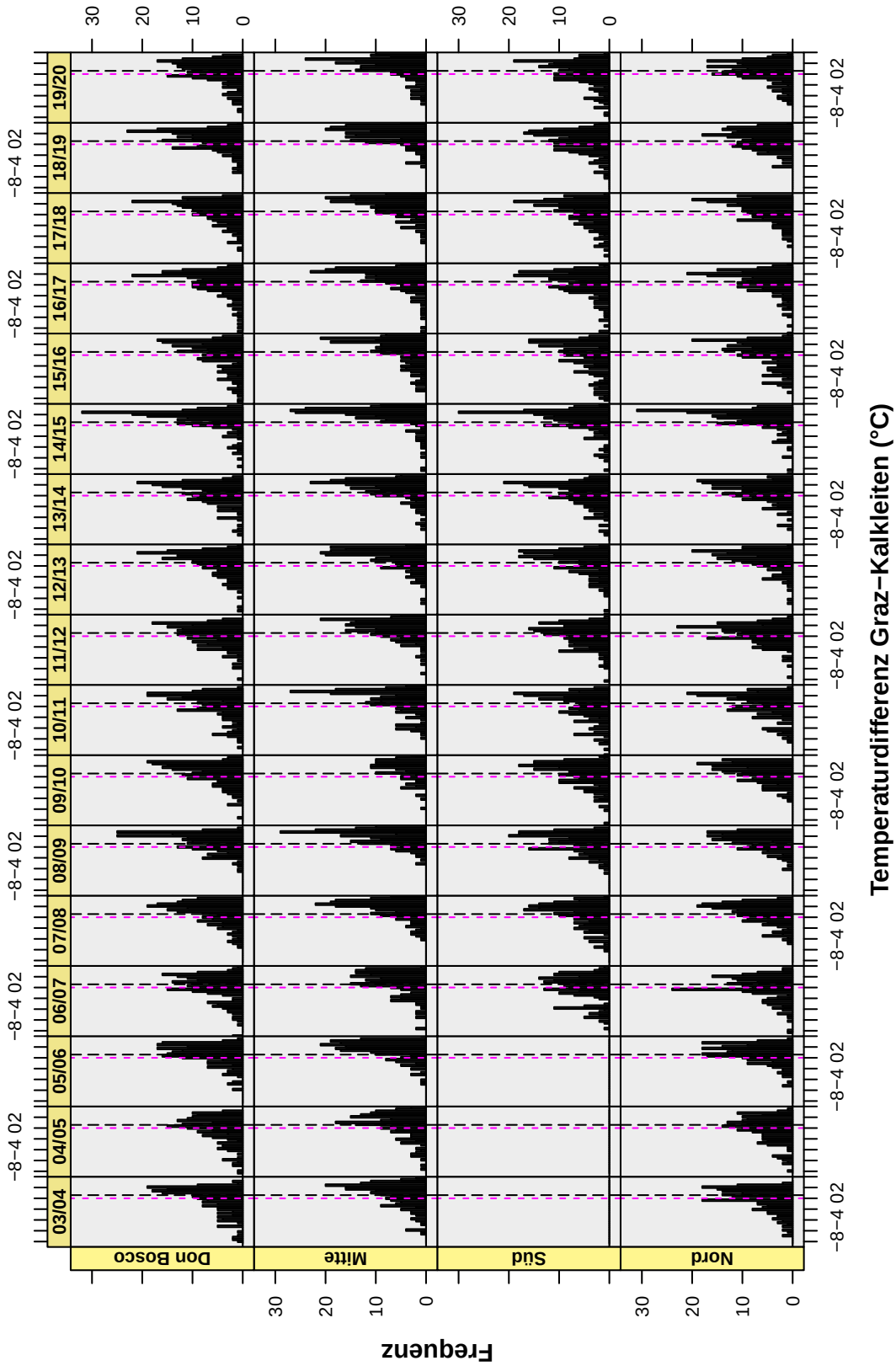


Abbildung 4.9: Histogramme von deltatemp bzgl. Wintersaisonen und allen Messorten

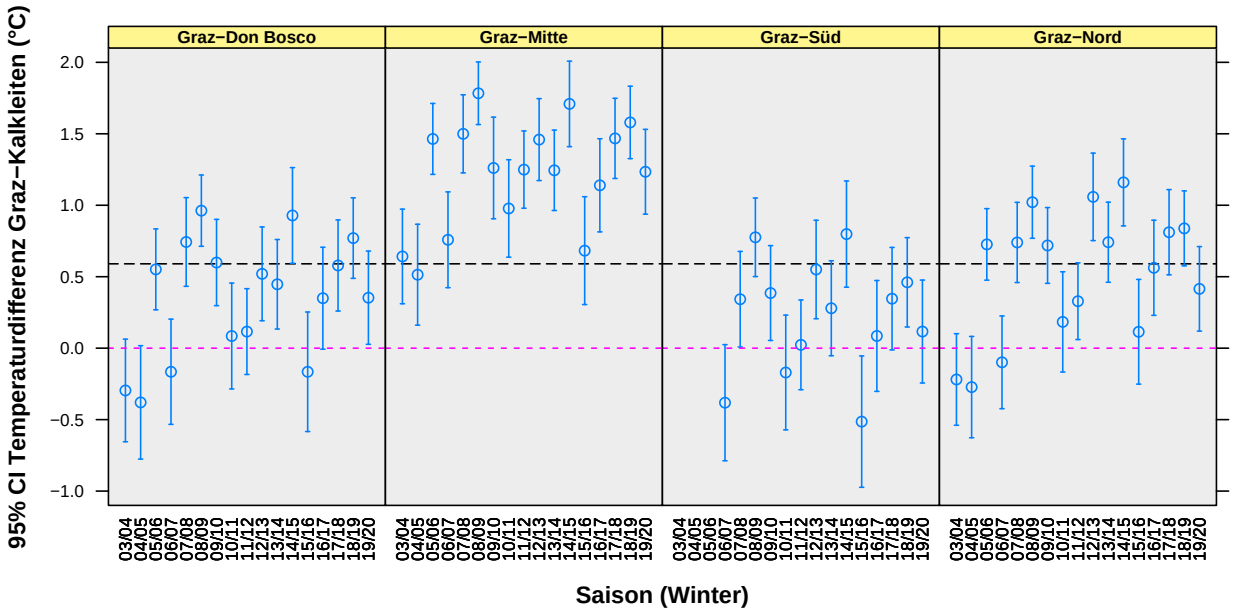


Abbildung 4.10: 95 %-CI Fehlerbalkendiagramme von `deltatemp` bzgl. WS und Messort

Wir betrachten nun einige weitere Merkmale, die gewisse Zusammenhänge zu $\mathtt{PM}_{10}$ stärker herausarbeiten und beleuchten sollen.

- `Frosttage` = Anzahl der Tage mit Lufttemperatur $< 0\,°\mathrm{C}$
- `Niederschlag` = Anzahl der Tage mit Niederschlag $> 0\,\mathrm{mm}$
- `Inversion` = Anzahl der Tage mit `deltatemp` $< 0\,°\mathrm{C}$
- `Inversion_luft3` = Anzahl der Tage mit `deltatemp` $< 0\,°\mathrm{C}$ & Lufttemperatur $< 3\,°\mathrm{C}$
- `Überschreitungstage` = Anzahl der Tage mit $\mathtt{PM}_{10} > 50\,\mu\mathrm{g/m}^3$

Aufgrund des veränderten Standortes von **Graz-Mitte** in der **WS 09/10** wurden die Werte mittels Durchschnittsbildungen und Kalibrierung der übrigen Messorte und Saisonen berechnet (siehe Tabelle auf Seite 97). Für Graz-Mitte stammen die Daten ab Wintersaison 2010/2011 von der (neuen) Messstelle „Graz-Mitte Gries“ ab. Des Weiteren wurde die Anzahl der Niederschlagstage auf 65 korrigiert, wie bereits auf Seite 3 unter den Anmerkungen erklärt wurde.

Frosttage

Die Balkendiagramme zeigen die extrem milde WS 06/07 (10-17 Frosttage), sowie drei milde Vorsaisonen 13/14 bis 15/16 (13-27 Frosttage). Die aktuelle WS 19/20 ist wiederum mit 13-27 Frosttagen im unteren Bereich. Als eher milde Winter gelten die Saisonen 07/08, 08/09, 11/12 & 12/13 (30-46 Frosttage), die strengeren Wintersaisonen waren in 03/04, 04/05, 09/10 & 10/11 (39-62 Frosttage) und der bislang strengste Winter war in WS 05/06 (52-67 Frosttage) zu beobachten.

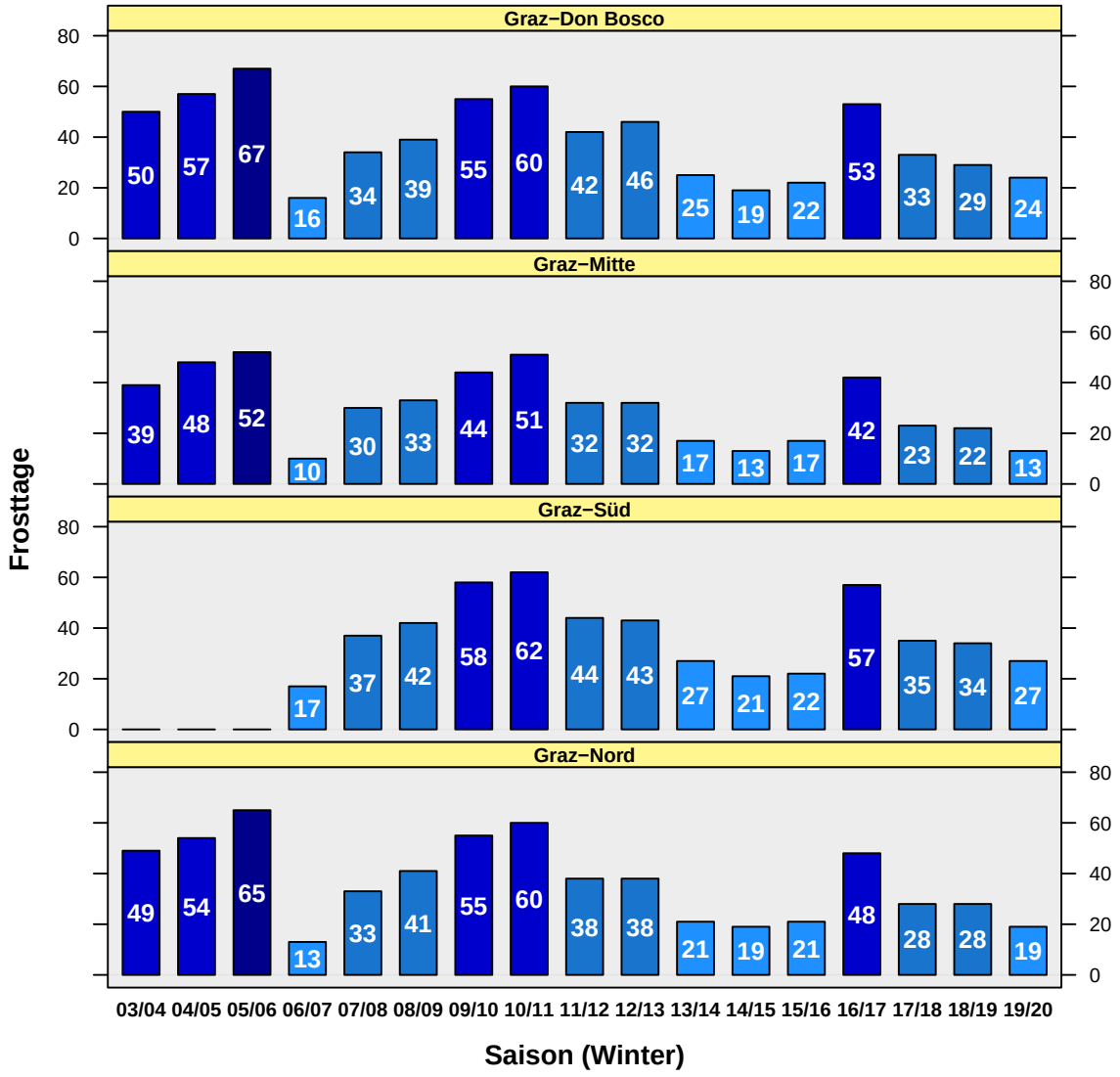


Abbildung 4.11: Anzahl der Frosttage bzgl. WS und Messorte

Niederschlagstage

Die Niederschlagsmenge wird nur in Graz-Nord gemessen. Die Anzahl der Tage mit Niederschlag reichte bislang von 41 (WS 11/12) bis 66 (WS 09/10 & WS 13/14). Saisonen mit hoher Anzahl an Niederschlag ($\geq$ 60 Tage) waren in den Wintersaisonen 03/04, 05/06, 08/09, 09/10, 12/13, 13/14 und 17/18. In der heurigen Saison waren 60 Niederschlagstage zu verzeichnen, was im oberen Mittelfeld liegt.

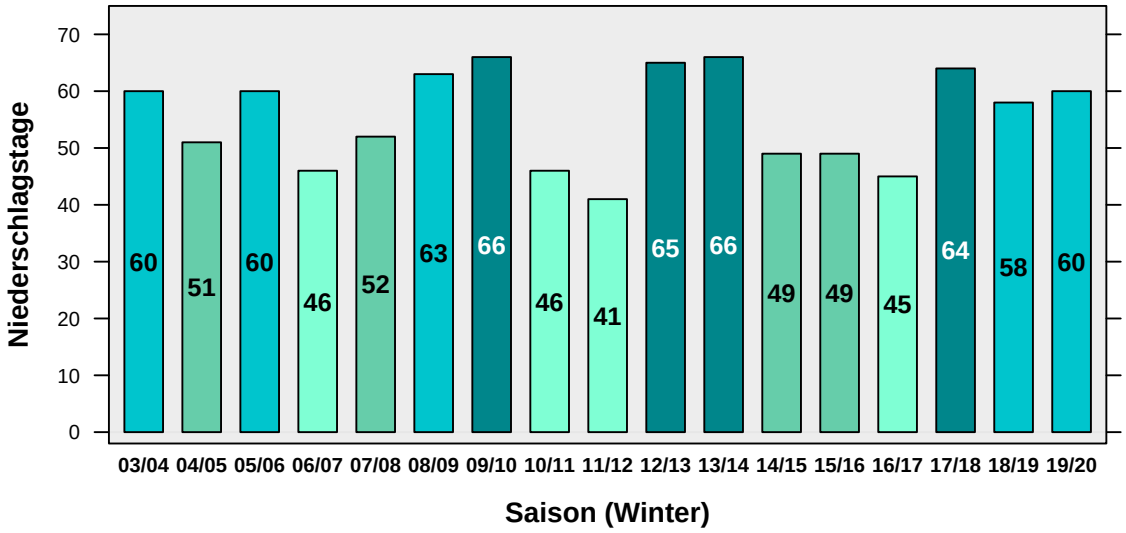


Abbildung 4.12: Anzahl der Niederschlagstage bzgl. WS und Messorte

Inversionstage

Die Anzahl der Inversionstage zeigt eine interessante Charakteristik, denn im verhältnismäßig strengen Winter 05/06 wurden wenige Inversionstage gezählt bzw. im milden Winter 06/07 sehr viele. Eher wenig Inversionstage wurden auch noch in den Wintersaisonen 07/08 bis 09/10 und 12/13 bis 14/15 gezählt bzw. eher viele Inversionen gab es noch in den Wintersaisonen 03/04, 04/05, 10/11 & 11/12. Die arithmetischen Mittel der vergangenen 16 Saisonen (03/04-18/19) für jeden Ort waren

G-Don Bosco: 64 d | G-Mitte: 38 d | G-Süd: 70 d | G-Nord: 61 d,

und somit liegen aktuell in der WS 19/20 die Inversionstage an allen Messstellen mit 37 bis 77 Tagen im langjährigen Durchschnitt.

Wird für jeden Inversionstag noch zusätzlich die Bedingung der Lufttemperatur < 3 °C berücksichtigt, dann sehen die Balkendiagramme im Vergleich zur linken Grafik in Abbildung 4.13 etwas geglätteter aus. Die Mittelwerte über alle sechzehn vergangenen Saisonen pro Ort für diese speziellen Inversionswetterlagen waren wie folgt

G-Don Bosco: 31 d | G-Mitte: 14 d | G-Süd: 33 d | G-Nord: 25 d.

Hier liegt die aktuelle WS 19/20 mit 16 Tagen für Graz-Mitte bis 39 Tagen für Graz-Süd im Mittelbereich. Während es in der strengen WS 05/06 an ca. 65-75 % der Inversionstage eine Lufttemperatur von < 3 °C hatte, sind in der aktuellen WS 19/20 überall nur knapp die Hälfte aller Inversionstage mit Lufttemperatur < 3 °C. Grundsätzlich tragen Inversionswetterlagen deutlich zur PM_{10}-Belastung bei, der Beitrag ist bei Inversionen mit einer Lufttemperatur von < 3 °C sogar intensiver (siehe bspw. Abbildung 2.11 auf Seite 22).

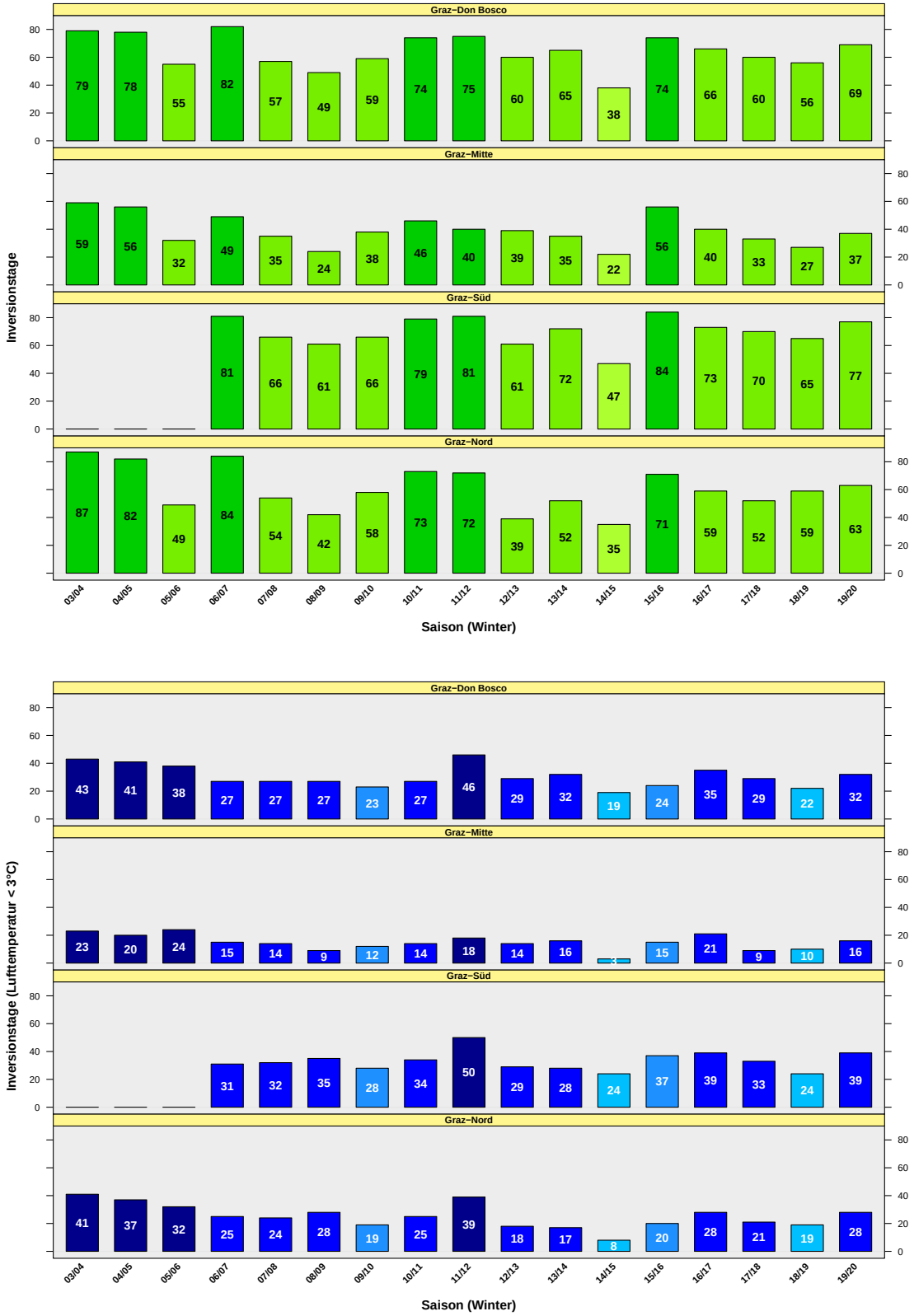


Abbildung 4.13: Inversionstage ohne/mit Lufttemperatur < 3 °C bzgl. WS und Messorte

Überschreitungstage

Hier betrachten wir die Anzahl der PM_{10}-Überschreitungstage je Wintersaison. Üblicherweise wird die Anzahl der Überschreitungstage pro Jahr gezählt, um zu überprüfen, ob mehr als 30 Überschreitungstage pro Jahr (**EU**-Norm: max. 35 Tage/Jahr; **Österreich**: max. 25 Tage/Jahr) vorliegen.

Man kann erkennen (siehe Abbildung 4.14), dass diese Größe in den ersten drei Saisonen etwas mit der Anzahl der Frosttage korrespondiert (vgl. Abb. 4.11), wogegen die anderen Saisonen eher Ähnlichkeiten zu den Inversionstagen aufweisen (vgl. Abb. 4.13). Diese Aspekte werden später bei der Modellierung noch einmal aufgegriffen.

Die aktuelle Wintersaison 19/20 ist mit 5 (Graz-Mitte)–18 (Graz-Süd) PM_{10}-Überschrei-

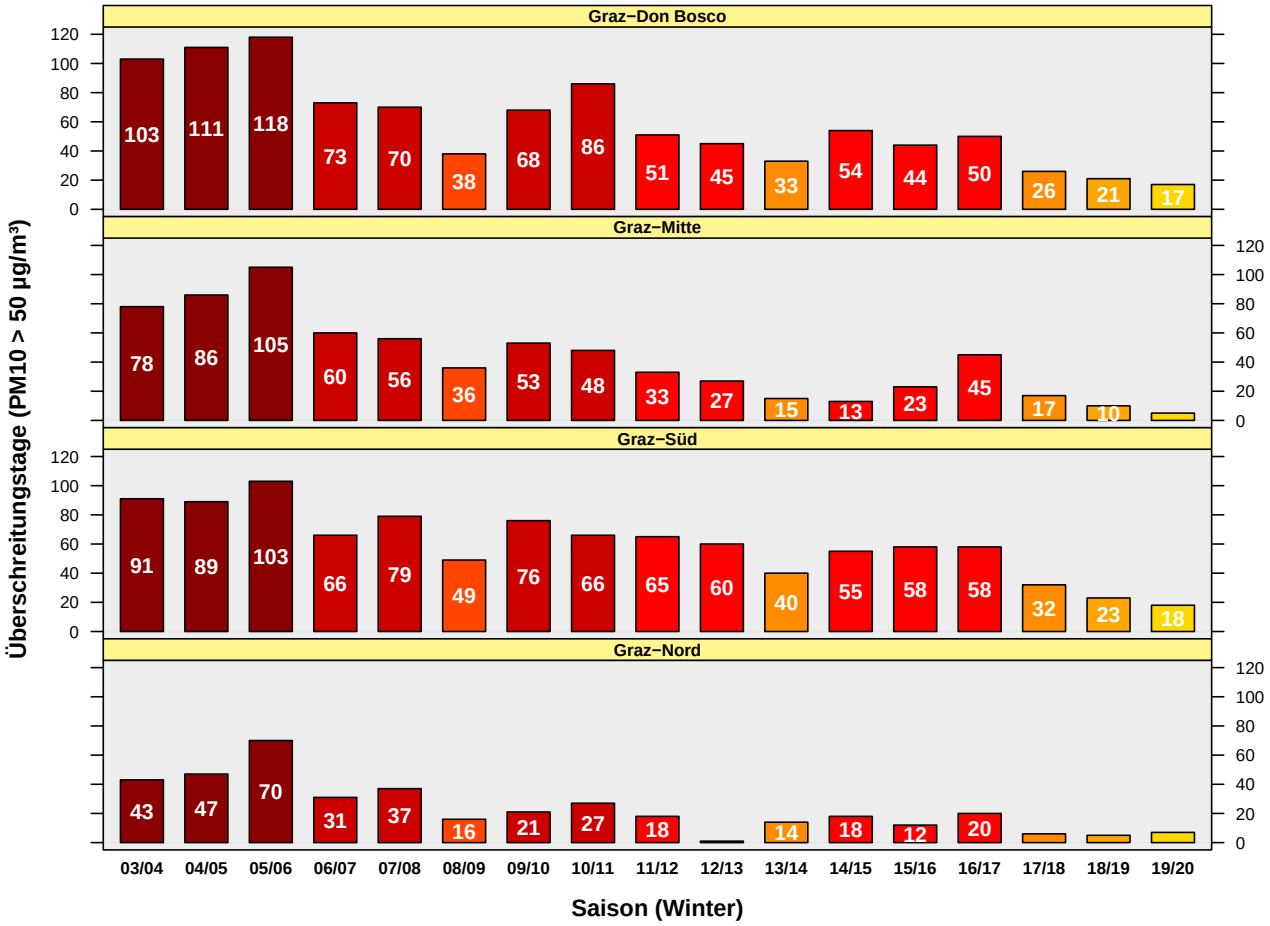


Abbildung 4.14: Anzahl der Überschreitungstage bzgl. WS und Messorte

tungstagen die staubärmste beobachtete Saison seit Auswertungsbeginn (mit Ausnahme von Graz-Nord, aber dort lag 12/13 ein Datenleck vor).

Bemerkenswert ist die immer noch geringe Anzahl am Ort Graz-Mitte, was aber sicherlich durch die Verlegung der Messstelle nach Mitte Gries begünstigt wurde. Auch die Anzahl der Überschreitungstage zeigt, dass die vier Messorte in die zwei Gruppen Graz-Don Bosco & Graz-Süd sowie Graz-Mitte & Graz-Nord geteilt sind.

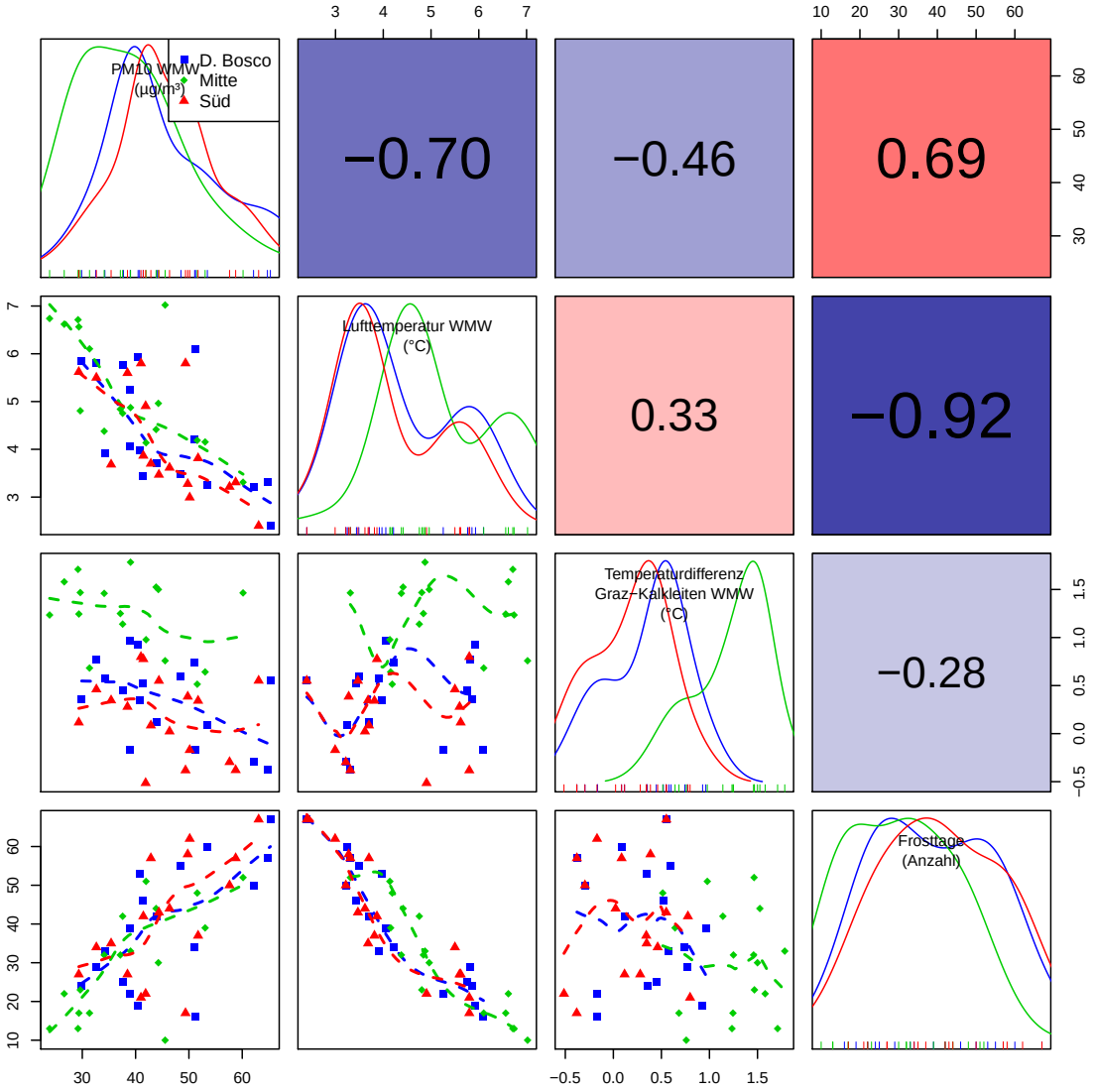
4.2 Zusammenhangsanalyse und Modellierung der Wintermittelwerte

Um eine Übersicht über die Zusammenhänge zwischen den PM_{10}-Wintermittelwerten und den meteorologischen Parametern zu erhalten, betrachten wir die nach den Orten und Wintersaisonen aggregierten Daten. Dabei wird PM_{10} in Abhängigkeit der relevanten Parameter durch Scatterplot-Matrizen und Scatterplots gezeigt. Für *Graz-Süd* wurden *alle fehlenden Werte* (WS 03/04 bis WS 05/06), welche *Lufttemperaturen* beinhalten, aus *Graz-Don Bosco* übernommen. Die Werte für die WS 09/10 in *Graz-Mitte* wurden mittels Durchschnittsbildungen und Kalibrierung der übrigen Messorte und Saisonen berechnet (Anhang A, Seite 97). Außerdem musste auch in der Saison 12/13 die Anzahl der Niederschlagstage mangels Plausibilität (siehe Anmerkung, Seite 3) auf 65 korrigiert werden.

PM_{10} und Temperaturparameter

Deutliche Zusammenhänge zu `PM10` zeigen hier `Frosttage` bzw. `LuTe` (1. Spalte, jeweils 2. bzw. 4. Zeile der Scatterplot-Matrix). Die Relation PM_{10} abhängig von Frosttagen ist an allen Messorten nahezu linear. Die milde WS 06/07 mit den wenigsten Frosttagen und höchsten Lufttemperaturen ist in allen Scatterplots gut sichtbar. Die aktuelle WS 19/20 hat das Gesamtbild der Scatterplots kaum verändert. In Zeile 4, Spalte 2 ist der starke Zusammenhang zwischen `Lufttemperatur` und Anzahl der `Frosttage` gut ersichtlich. Wir haben diesmal wieder die etwas andere Darstellungsform gewählt. In den Diagonalen sieht man zusätzlich die Verteilungen der Merkmale in Form von Dichteplots für die einzelnen Messorte. Oberhalb der Diagonalen werden jetzt die Pearson'schen

Korrelationskoeffizienten, farblich hinterlegt (negative Werte bläulich, positive Werte rötlich) und nach der Größenordnung skaliert, dargestellt. In Übereinstimmung mit dem Auftraggeber wurde die Station Graz-Nord nicht in diese Darstellung aufgenommen.



PM_{10}, Lufttemperatur, Temperaturdifferenz und Frosttage

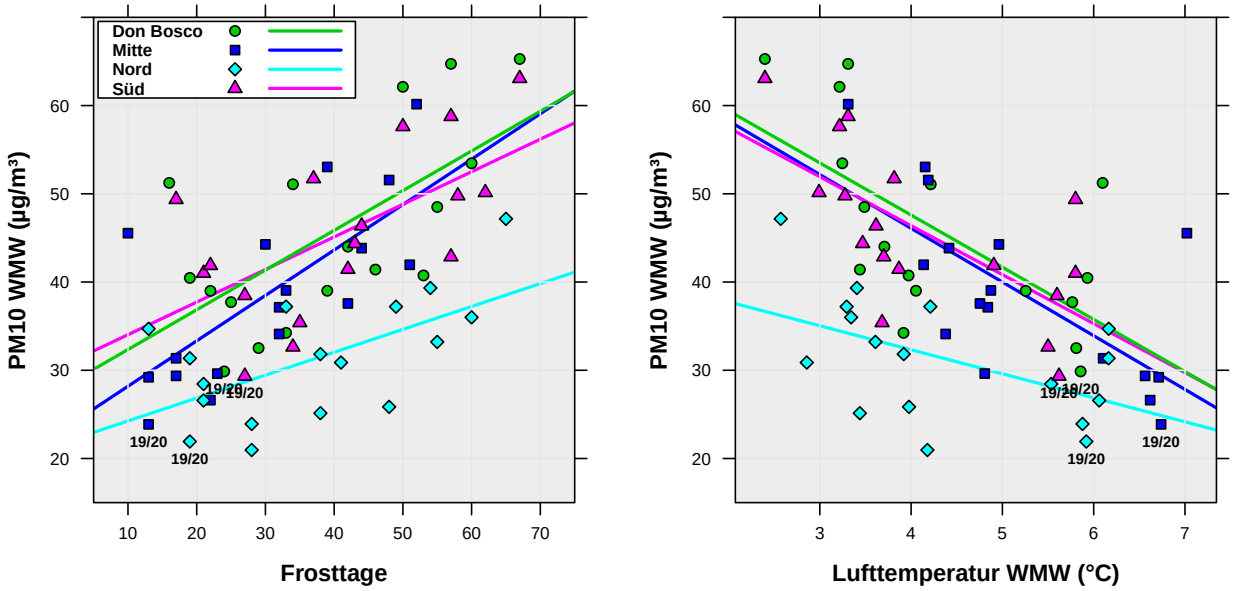
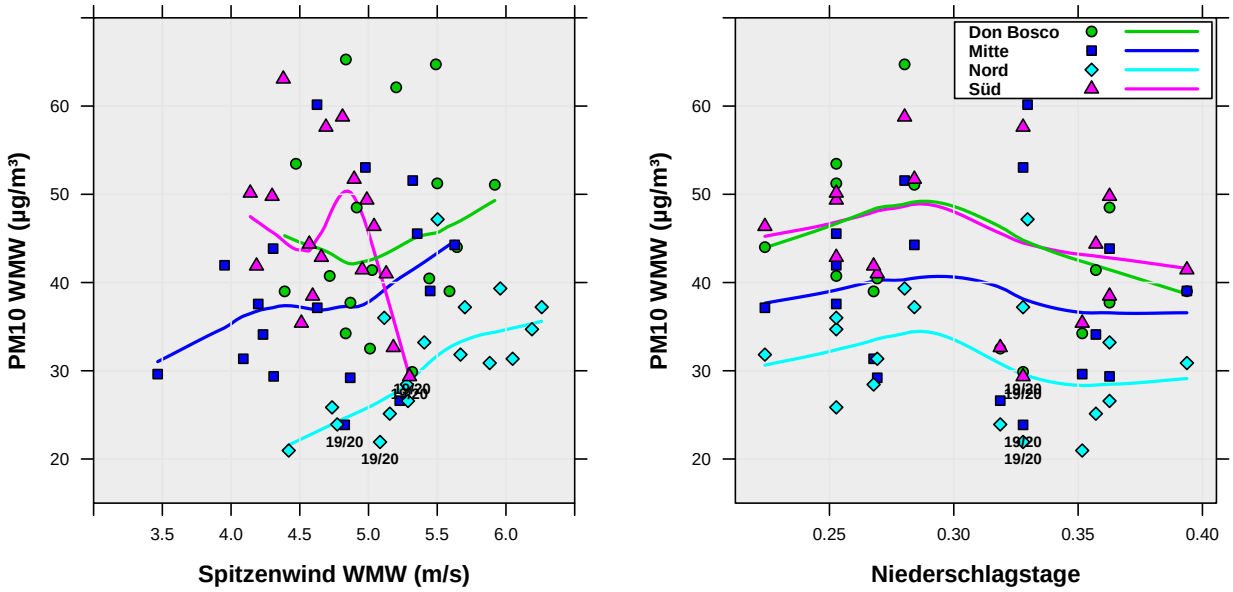


Abbildung 4.15: PM_{10} und Temperaturparameter

PM_{10}, Wind und Niederschlag

Es ist anzumerken, dass heuer in der WS 19/20 die Werte von Graz-Süd und Graz-Don-Bosco faktisch übereinstimmen (29,3 bzw. 29,9 µg/m^3) und sich daher überlappen, so dass fast nur ein Punkt sichtbar ist.

Auch in der heurigen Saison 19/20 ist der Spitzenwind im unteren Bereich angesiedelt.



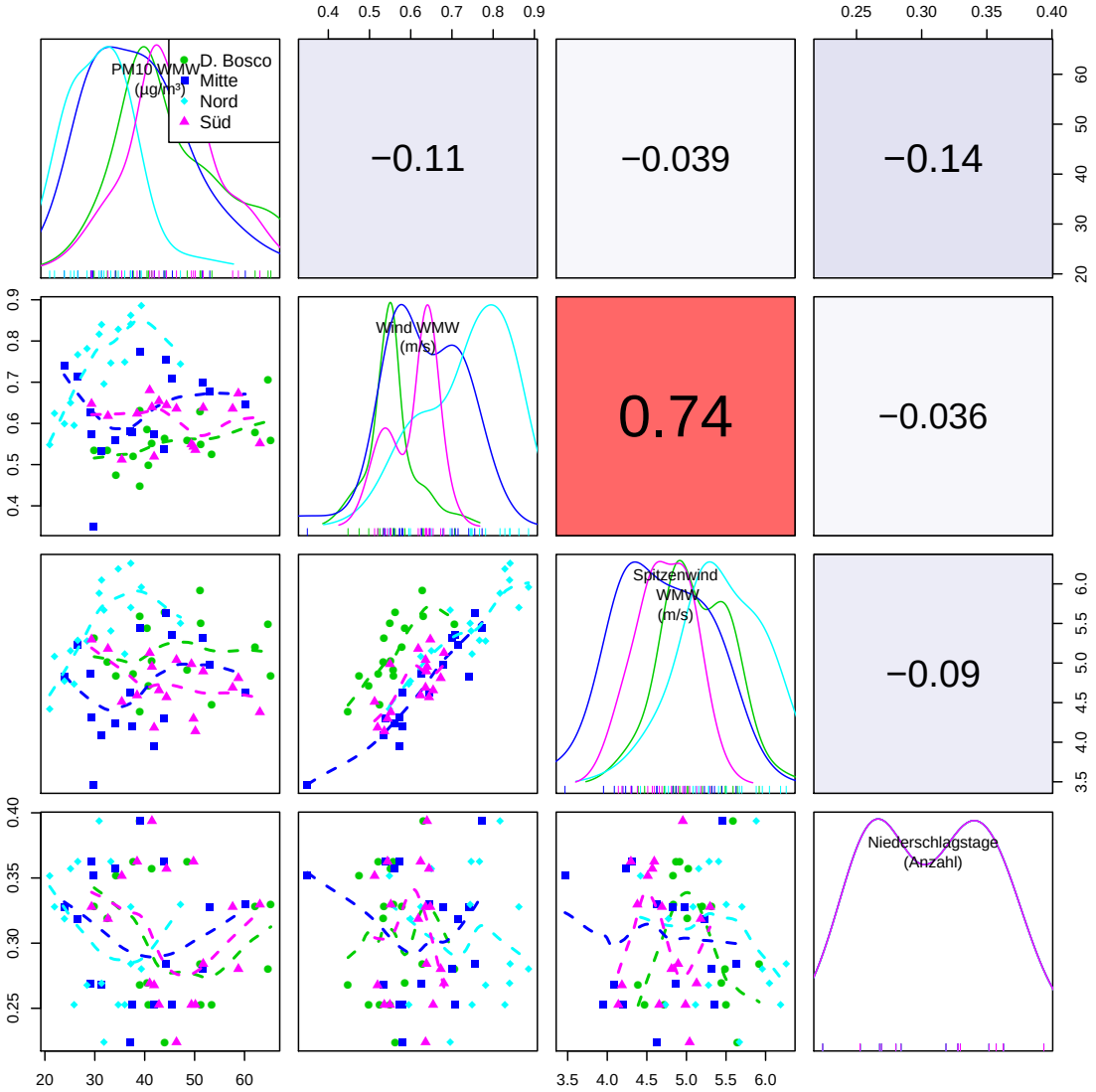


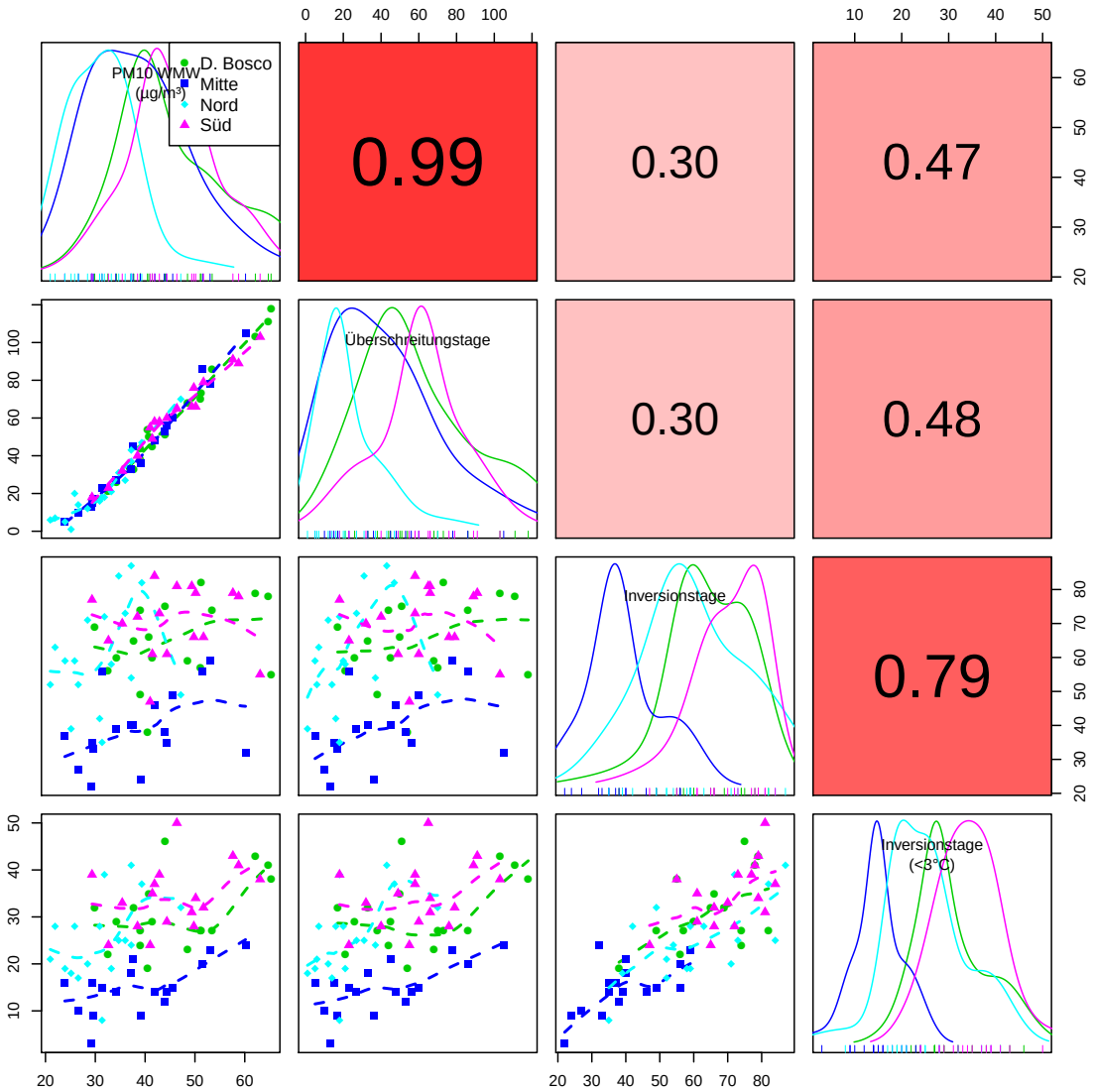
Abbildung 4.16: $\mathtt{PM}_{10}$, Wind, Spitzenwind und Niederschlagstage

Für Graz-Nord wurde der viertniedrigste Wert gemessen. Die Anzahl der Tage mit Niederschlag (rechte obere Grafik der Abbildung 4.16) scheint weniger Einfluss auf $\mathtt{PM}_{10}$ zu haben.

PM_{10}, Überschreitungs- und Inversionstage

Es ist klar, dass PM_{10} stark mit der Anzahl der `Überschreitungstage` (2. Zeile, 1. Spalte) korreliert. Etwas später werden wir ein modifiziertes Modell präsentieren, das von den PM_{10}-WMW auf die Anzahl an Überschreitungen schließen lässt (siehe Seite 73).

Einen gut ersichtlichen Einfluss auf PM_{10} übt jeweils die Anzahl der `Inversionstage`



PM_{10}, Überschreitungstage, Inversionstage und Inversionstage (Temp. $< 3\,°C$)

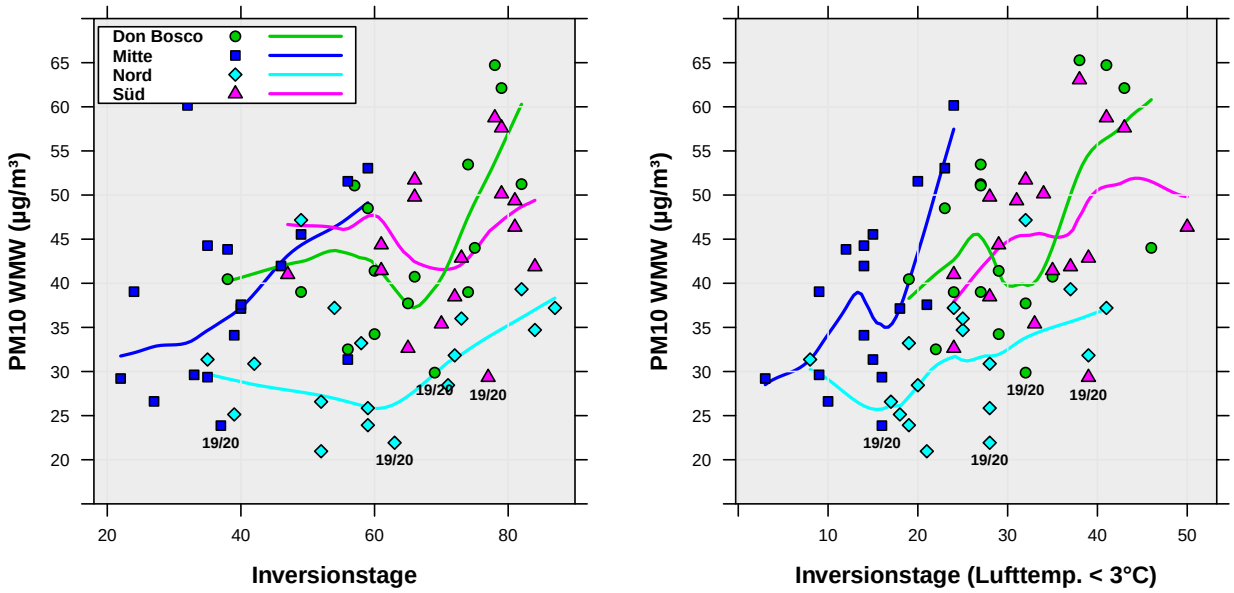


Abbildung 4.17: PM_{10} , Inversionstage und Inversionstage (Temperatur $< 3\,°C$)

bzw. die Anzahl der `Inversionstage(Lufttemperatur < 3 °C)` aus, mit niedrigeren $\mathtt{PM}_{10}$-Werten in Graz-Nord und höheren Werten in Graz-Don Bosco und Graz-Süd. Inversion ist somit ein möglicher Kandidat eines *signifikanten* Prädiktors in einem Regressionsmodell.

Korrelationen

Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnung der $\mathtt{PM}_{10}$`_WMW` in Graz-Don Bosco und Graz-Süd (hohe bis mittlere Werte), sowie Graz-Mitte und Graz-Nord (mittlere bis niedrige Werte), werden seit der Wintersaison 2018/19 zwei Beschreibungsmodelle für PM_{10} entwickelt, eines für *Graz-Don Bosco* und *Graz-Süd* sowie ein zweites für *Graz-Mitte* und *Graz-Nord*. Somit wird die Vorgangsweise der früheren Jahre modifiziert und den neuen Gegebenheiten durch die Messstellenverlegung nach Graz-Mitte Gries angepasst.

Alle meteorologischen Merkmale, welche einen möglichen Einfluss auf das $\mathtt{PM}_{10}$-Niveau haben können, möge der Leser den vier Korrelationsmatrizen aus den Abbildungen 4.18 bis 4.21 auf Seite 62 entnehmen.

Jede Korrelationsmatrix beinhaltet Pearson'sche Korrelationskoeffizienten, jeweils basierend auf Wintermittelwerten (WMW) verschiedener Messorte, zwischen den Variablen PM_{10}, `LuTe`, `Frosttage`, `Niederschlagstage`, `Inversionstage`, `Inversionstage (Lufttemperatur < 3 °C)`, `Windgeschwindigkeit (wige)` und `Spitzenwind (spg)`.

Mit dieser Vorgehensweise können verschiedene Gruppen von Messorten verglichen werden (z.B. alle Orte oder die problematischeren Orte G-DB & G-S oder die weniger PM_{10}-belasteten Orte G-M & G-N). Bemerkenswert sind die verschiedenen Intensitäten der meteorologischen Einflussfaktoren, wenn unterschiedliche Messorte zusammengefasst werden. Wenn beispielsweise *Graz-Nord* berücksichtigt wird (Abb. 4.18 & Abb. 4.21), dann gehen die Windeinflüsse (`wige` und `spg`) negativ oder schwach positiv ein, die Einflüsse `LuTe` und `Frost` nehmen hingegen wegen der sinkenden Korrelationen ab.

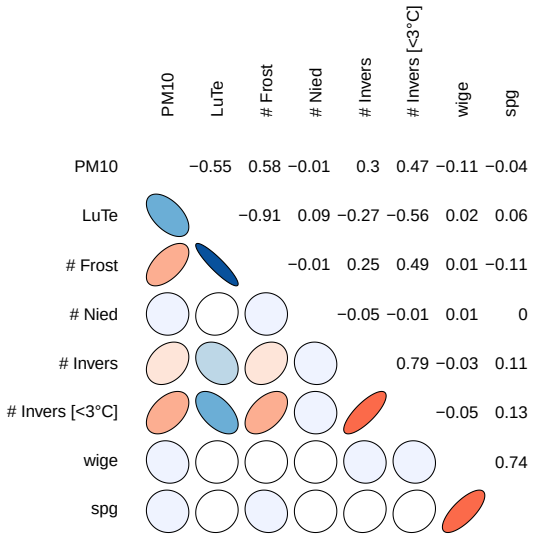


Abbildung 4.18: Korrelationsmatrix aller 4 Messorte

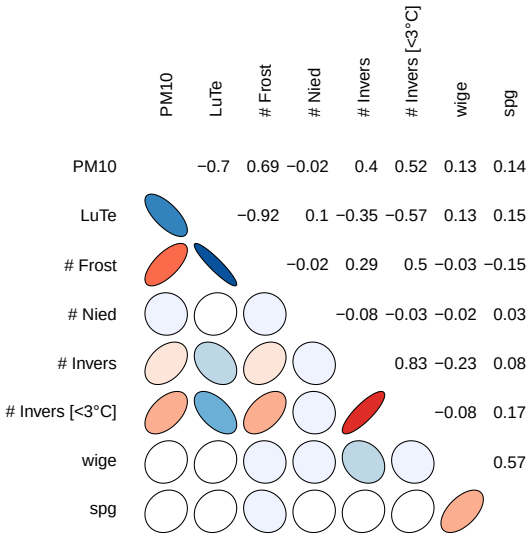


Abbildung 4.19: Korrelationsmatrix für G-DB, G-M und G-S

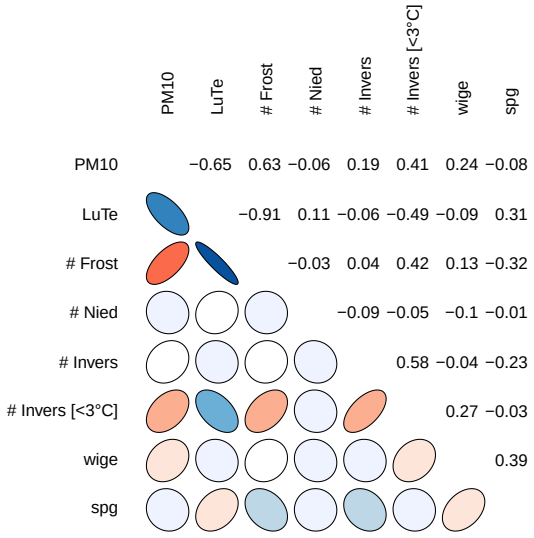


Abbildung 4.20: Korrelationsmatrix für G-DB und G-S

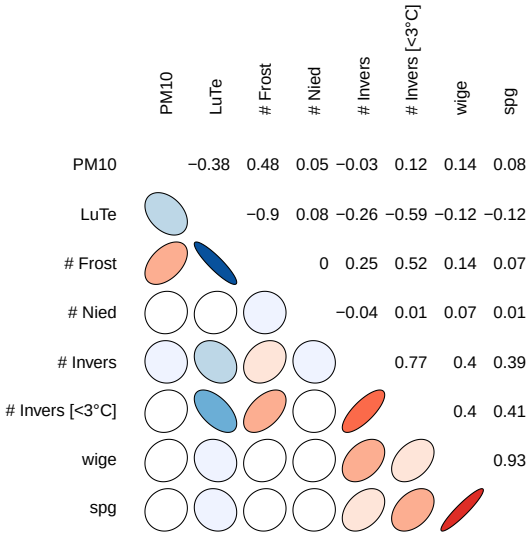


Abbildung 4.21: Korrelationsmatrix für G-M und G-N

4.3 Regressionsmodelle für PM_{10}-WMW

Dieses Kapitel widmet sich der Regressionsanalyse. Das heißt, wir wollen ein Modell für die Zielgröße `y = PM10_WMW` in Abhängigkeit von erklärenden Variablen (Prädiktoren) finden. Diese Prädiktoren sind meteorologische Parameter wie `Lufttemperatur`, `Frosttage`, `Niederschlagstage`, `Inversionstage`, `Inversionstage(LuTe < 3 °C)`, `Windgeschwindigkeit` und `Spitzenwind`. Aufgrund der auf Seite 60 angeführten Erklärung wurden für die letztjährigen Analysen nur die Messstellen **Graz-Don Bosco**, **Graz-Mitte** und **Graz-Süd** einbezogen.

Im PM_{10}-Bericht des Jahres 2012 (Stadlober/Pfeiler, [14]) wurde festgestellt, dass ein multiples Regressionsmodell nur auf Basis der meteorologischen Daten von 03/04-10/11 die PM_{10}_WMW nicht ausreichend erklärt, denn die Analysen ergaben, dass die Beobachtungen PM_{10}_WMW zu niedrig ausfielen, obwohl der Niederschlag niedrig und die Anzahl an Inversionen hoch war. Das heißt, es gibt weitere unbekannte Einflussgrößen, die eventuell zur Beschreibung von PM_{10} beitragen könnten.

Im Zuge der Ursachenforschung kam die Frage auf, ob die *Straßenstreuung* eine unbekannte Rolle spielen könnte. Um das überprüfen zu können, wurden uns damals von Herrn *Ing. Volkmer*, Leiter des Winterdienstes der Holding Graz, Daten über die Art (`Salz` oder `Splitt`) und Menge (in t) der Straßenstreuung der vergangenen Jahre bis 2015/16 zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle im Anhang B auf Seite 98).

Im vorigen Jahr und heuer wurden uns die Daten von Herrn *Dipl.-WI(FH) Nigitz* über Vermittlung von Herrn *Dipl.-Ing. Götzhaber*, Referatsleiter Luftreinhaltung und Chemie des Umweltamtes der Stadt Graz, freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Ob und wie relevant die Straßenstreuung in einem Modell für PM_{10}_WMW ist, hat eine Modellbildung zu klären. Da aber nach wie vor die Vermutung besteht, dass die meteorologischen Parameter die Hauptakteure bei der Beschreibung von PM_{10} sind, wollen wir je ein Regressionsmodell generieren, das als erklärende Variablen

(i) nur meteorologische Parameter (**Modell Meteorologie**),

(ii) zusätzlich zu den meteorolog. Faktoren die Straßenstreuung (**Modell Splitt**)

beinhaltet. Anschließend können die beiden Modelle verglichen werden. Aufgrund der Analysen der Berichte seit dem Jahr 2012 wurde festgestellt, dass die Streuung aus

statistischer Sicht einen gewissen signifikanten Einfluss bzgl. PM_{10} in einem Regressionsmodell besitzt. Eine wesentliche Rolle spielt sicherlich die starke Splittstreuung in den ersten drei Wintersaisonen 03/04-05/06, die im Modell mangels Beobachtungen mit viel Gewicht eingepreist ist. Zusätzlich wurden in diesen Saisonen bislang auch die höchsten $\texttt{PM}_{10}$-Belastungen beobachtet.

Die Splittstreuung wurde in den letzten Jahren allerdings stark reduziert (siehe Seite 98). Nicht erfasst werden können weitere Maßnahmen, welche neben der Splittreduktion eventuell auch zur PM_{10}-Reduktion der letzten 11 Saisonen beigetragen haben könnten. Mit anderen Worten ist es schwer abzugrenzen, wie viel die *Splittreduktion* bzw. wie sehr weitere *unbekannte Faktoren* mitwirkten (Verkehr, Hausbrand etc ...).

Aus mathematischer Sicht sollte noch mit Hilfe weiterer Wintersaisonen analysiert werden, ob die Splittstreuung in Zukunft an statistischem Gewicht verliert, um nur die vermuteten Haupteinflussfaktoren (meteorolog. Parameter) bestätigt zu wissen.

Für einen Überblick der Zusammenhänge zwischen $\texttt{PM}_{10}$ `_WMW` und der `Straßenstreuung` soll die folgende kurze Analyse für die 17 Saisonen 2003/04 bis 2019/20 dienen.

PM_{10} und Straßenstreuung

Das wichtigste Merkmal ist die `Splittstreuung`, welches einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten (nach Pearson) und sehr hohe Signifikanz bzgl. $\texttt{PM}_{10}$ `_WMW` zeigt. Das lässt vermuten, dass sich Splittstreuung ungünstig auf den Feinstaubgehalt auswirkt. In der Saison 2019/20 wurde das dritte Mal neben Splitt und Salz auch Sole aufgebracht.

Tabelle 4.1: Korrelationen der $\texttt{PM}_{10}$-Wintermittelwerte und Arten der Straßenstreuung

		`Salzstreuung [t]`	`Splittstreuung [t]`	`Straßenstreuung [t]`
	Korrelation	-0,09	**0,74**	**0,50**
$\texttt{PM}_{10}$ `_WMW`	p-Wert	0,5244	$< 10^{-4}$	0,0020
	N	51	51	51
	Korrelation	-0,12	1	**0,68**
`Splittstreuung [t]`	p-Wert	0,4114		$< 10^{-4}$
	N	51	51	51

Neben der `Splittstreuung` wird auch die `Straßenstreuung` als *signifikant angezeigt (p-Wert < 0,01)*. Aufgrund der hohen Korrelation zwischen Splitt- und Straßenstreuung

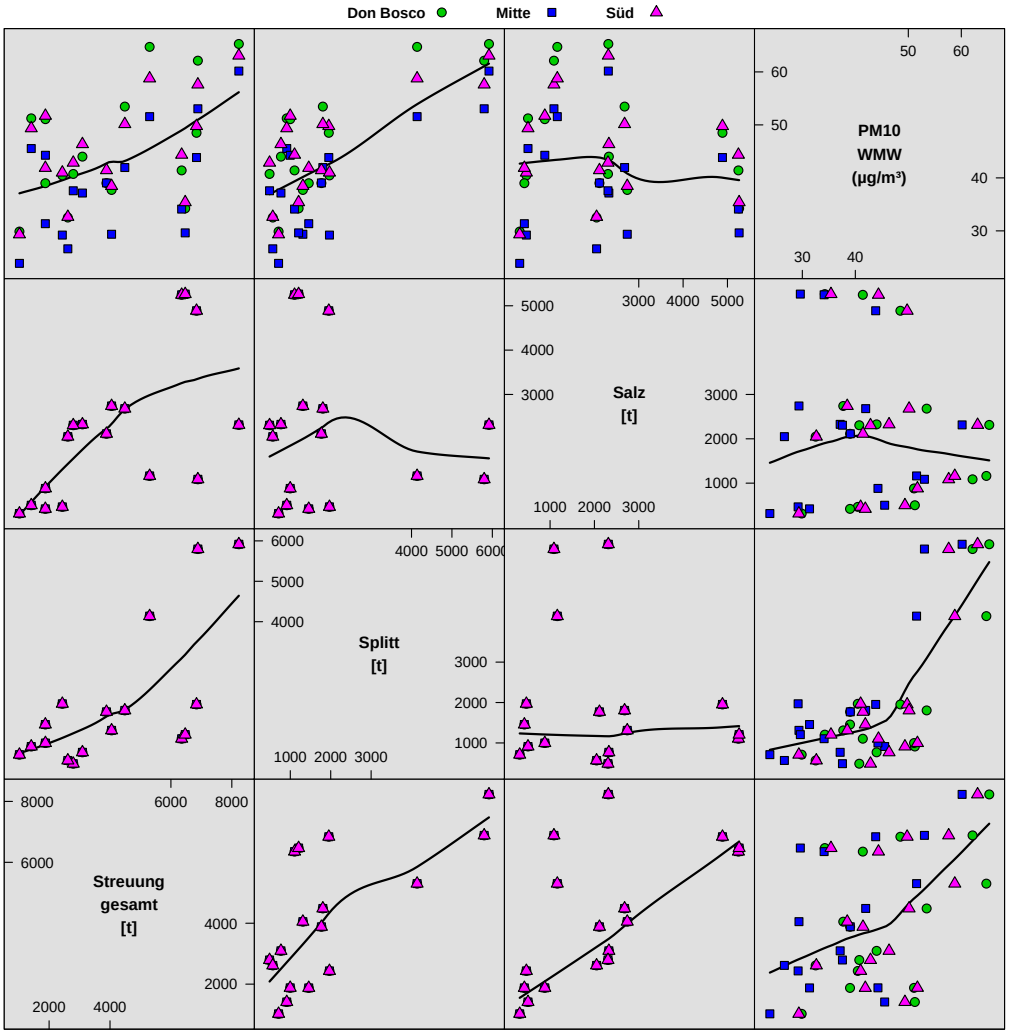


Abbildung 4.22: Scatterplotmatrix PM_{10} bzgl. Splitt, Salz und gesamte Streuung

(0,68) genügt es, für ein Modell nur eine der beiden Variablen als erklärende Größe einfließen zu lassen, da beide Variablen Informationsgehalt bzgl. $\mathtt{PM}_{10}$ besitzen.

In den Abbildungen 4.22 und 4.23 ist der Zusammenhang für jeden Ort gut zu erkennen. Aus *statistischer Sicht* zeigt sich, dass mit einer Erhöhung von Splitt auch eine Erhöhung von Feinstaub PM_{10} einhergeht. Der regressionsanalytische Einfluss wird später festgestellt werden. Diese statistische Tatsache lässt aber vermuten, dass sich die Splittstreuung in unbekanntem Maße ungünstig auf die $\mathtt{PM}_{10}$-Belastung auswirkt. Deswegen wurde auch im Laufe der Jahre die Splittstreuung auf das unbedingt nötige Mindestmaß reduziert und durch Salzstreuung ersetzt.

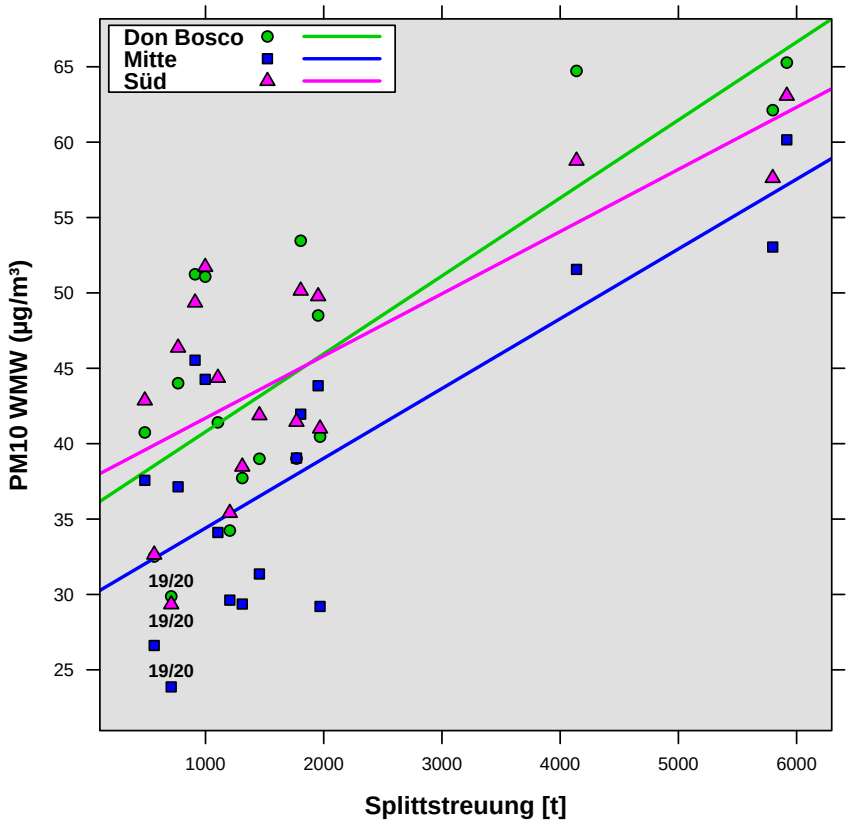


Abbildung 4.23: $\texttt{PM}_{10}$ `_WMW` gegen Splittstreuung bzgl. Saison und Ort

`Salzstreuung` hat eine negative Korrelation, die aber nicht signifikant ist (siehe Tabelle 4.1). Die Aussage, dass vermehrte Salzstreuung weniger PM_{10} bedeutet, macht keinen Sinn. Eher kann dies als Nebeneffekt und als Konsequenz der verhältnismäßig stark reduzierten Splitt- und gesteigerten Salzstreuung erklärt werden.

4.4 Modelle mit meteorologischen Parametern

Im letzten Jahr (Stadlober/Burger-Ringer [21, Seite 73]) ergab sich, basierend nur auf meteorologischen Daten (16 WS, von 03/04 bis 18/19), für die drei Messorte **Graz-Don Bosco**, **Graz-Mitte** und **Graz-Süd** das folgende Multiple Lineare Regressionsmodell für den Wintermittelwert von $\texttt{PM}_{10}$ (bei der Modellierung wurde stets darauf geachtet, dass das Modell möglichst einfach gehalten wird):

Modell Meteorologie (2019)

$$\mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}} = 65{,}48 - 1{,}17*\mathtt{Frosttage} - 2{,}16*\mathtt{Niederschlagstage[\%]} + 0{,}17*\mathtt{Inversionstage} + 30{,}61*\mathtt{Windgeschwindigkeit[m/s]} + 0{,}05*\mathtt{Frosttage}*\mathtt{Niederschlagstage[\%]};$$

$$\mathtt{se} = 5{,}8;\ r^2_{\mathtt{corr}} = 0{,}66;\ \mathtt{n} = 48$$

Der geschätzte *Standardfehler* `se` betrug `5,8` und der *Anpassungsgrad* (bzw. Bestimmtheitsmaß r^2_{corr}), der die Güte des Modells beschreibt, hatte einen Wert von 66 %. Die Sequenzplots in Abbildung 4.24 bilden die Vorhersagen des **Modells Meteorologie (2019)** gemeinsam mit den jeweiligen beobachteten Werten ab. Diese Liniendiagramme zeigen einen relativ akzeptablen Fit und wie in der rechten Grafik zu erkennen ist, liegen alle gefitteten Werte innerhalb der 95 %-Prädiktionsintervalle, wobei die Modelle die beobachtete Belastung 2019/20 tendenziell überschätzen. Die Prädiktionsintervalle sind eher breit. Dies ist aber eine Konsequenz aus der Einfachheit des Modells.

Kompliziertere Modelle fitten zwar die zur Verfügung stehenden Daten besser, die Rück-

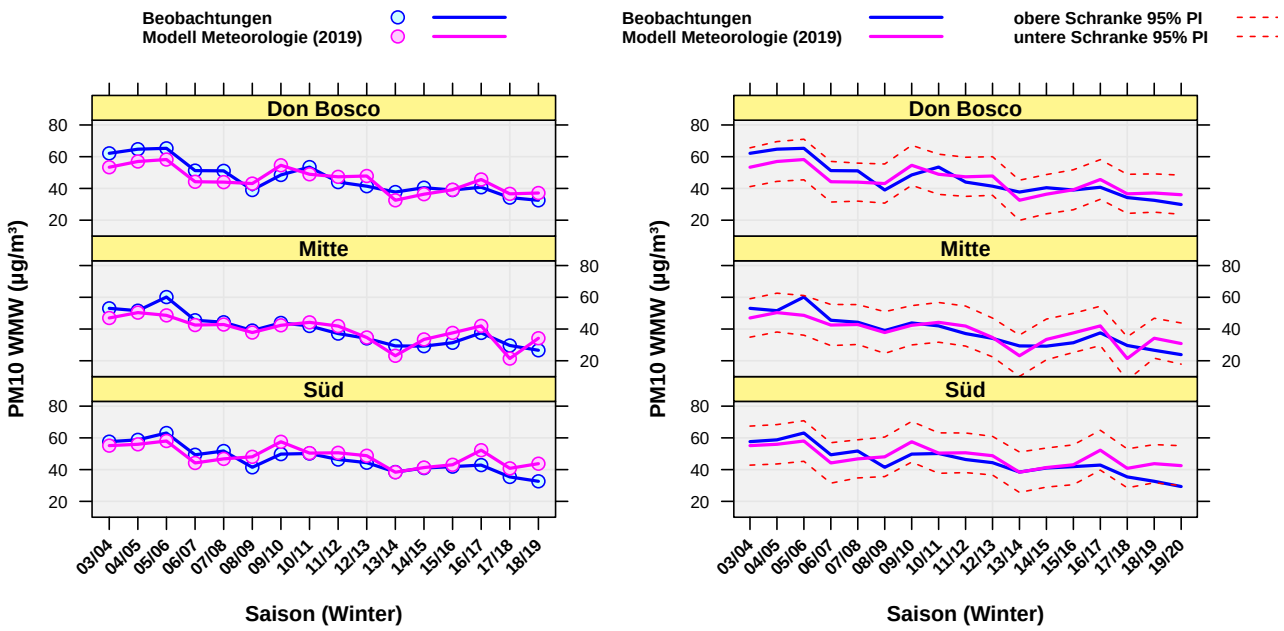


Abbildung 4.24: $\mathtt{PM}_{10}\mathtt{_WMW}$ gegen gefittete Werte des **Modells Meteorologie (2019)**; rechts *inklusive* Vorhersage für aktuelle WS 19/20 (mit 95 %-PI)

schlüsse auf die Grundgesamtheit und die Signifikanz der meteorologischen Einflussfaktoren ginge dabei aber verloren (Der Leser möge beachten, dass hier jeweils Wintermittelwerte, also grobe Glättungen, gebildet werden. Diese können einen Trend aufzeigen, aber für eine exakte Approximation sind die `WMW` kaum geeignet).

Rechts in Abbildung 4.24 wurde zusätzlich die aktuelle WS 19/20 (Saison Nr. `17`) aufgetragen. Diese Vorhersage ist bemerkenswert, da das **Modell Meteorologie (2019)** nur mittels der Daten aus den ersten 16 Wintersaisonen geschätzt wurde (03/04-18/19).

Werden die `WMW/Summen` der aktuellen Saison 2019/2020 (17. WS) zur Datenbasis, mit der das Modell erstellt wird, hinzugenommen und wird damit versucht, ein neues Modell zu berechnen, so gehen die gleichen Prädiktoren ins Modell ein, und man erhält folgendes aktualisiertes multiples lineares Regressionsmodell:

Modell Meteorologie (2020)

$$\texttt{PM10}_{\texttt{pr}} = 78{,}46 - 1{,}32*\texttt{Frosttage} - 2{,}49*\texttt{Niederschlagstage[\%]} + 0{,}14*\texttt{Inversionstage} + 25{,}21*\texttt{Windgeschwindigkeit[m/s]} + 0{,}06*\texttt{Frosttage}*\texttt{Niederschlagstage[\%]};$$

$$\texttt{se} = 6{,}0;\ r^2_{\texttt{corr}} = 0{,}67;\ \texttt{n} = 51$$

Der Anpassungsgrad des **Modells Meteorologie (2020)** beträgt nun `67 %` und der geschätzte Fehler lautet `se = 6,0`. In der Regressionsanalyse müssen Modelle auf Validität überprüft werden. Die beiden wichtigsten Diagnostik-Grafiken können der Abbildung 4.25 entnommen werden. Der *Residuenplot* spricht für Prognosen im Bereich von `30-60` $\mu g/m^3$ nicht gegen die mathematischen Voraussetzungen (*Konstante Varianz* und *Unabhängigkeit*). Der *Normal QQ-Plot* spricht ebenfalls nicht gegen die Normalverteilungsannahme (Bestätigung: *Shapiro-Wilk-Test* mit p = 0,1).

Die Liniendiagramme in Abbildung 4.26 auf Seite 70 zeigen die Glättung mit Hilfe der Prognosen (magenta) im Vergleich zu den Beobachtungen (blau). Die schlechtesten Prognosen finden an allen Messorten jeweils in den Wintersaisonen 05/06 & 11/12 statt. Bei der Ursachenforschung wurde festgestellt, dass die WS 05/06 die kälteste mit dem höchsten $\texttt{PM}_{\texttt{10}}$`_WMW` war und in der WS 11/12 die wenigsten `Niederschlagstage` im gesamten Beobachtungszeitraum 03/04-19/20 gezählt wurden.

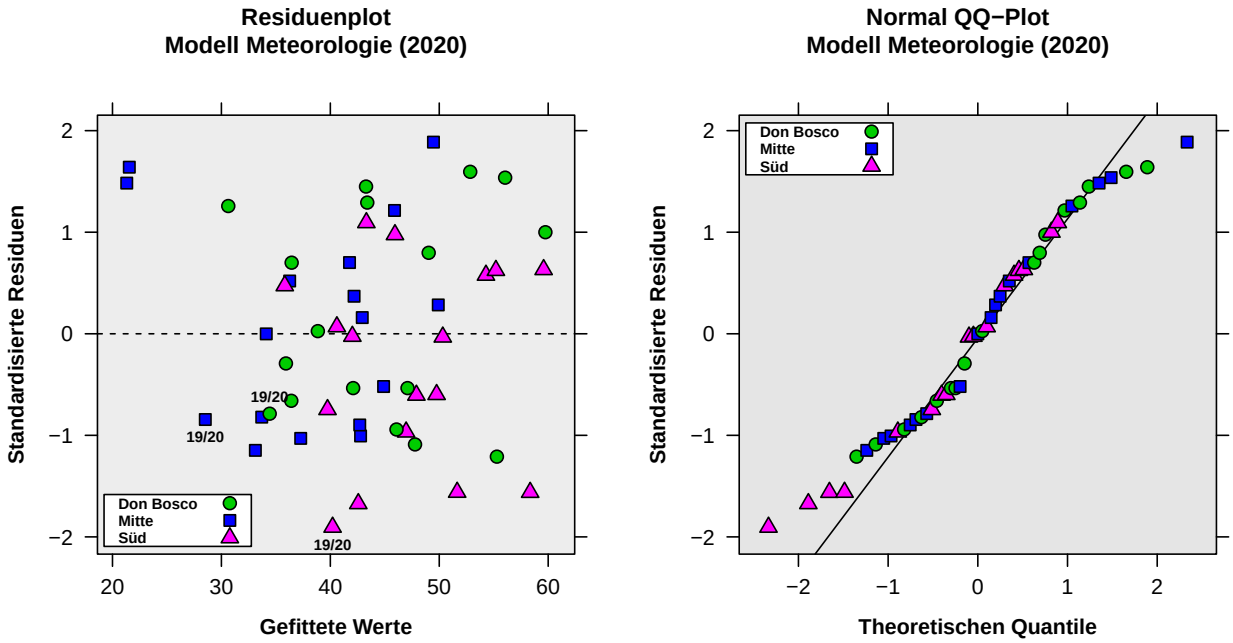


Abbildung 4.25: Residuen- und Normal QQ Plot für **Modell Meteorologie (2020)**

Anmerkungen

- Es wurden auch kompliziertere Modelle versucht, in denen polynomielle Prädiktoren eingehen. Diese modellieren die Beobachtungen $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` zwar besser und haben deutlich engere Prädiktionsintervalle, sind jedoch zum Prognostizieren im Nachteil, da sie zu sensibel auf Veränderungen reagieren und die Vorhersagen oft im Widerspruch zum Modell standen.

- Die meteorologischen Modelle haben alle eher breite Prädiktionsintervalle. Das bedeutet, dass es möglicherweise noch andere Ursachen und Einflussfaktoren mit wesentlichem Informationsgehalt gibt, die zur Beschreibung der $\mathtt{PM}_{10}$-Belastung beitragen. Natürlich gibt es in dieser komplexen Thematik eine große Fülle an weiteren Faktoren, die auf $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` einwirken. Einerseits sind die meisten aber unbekannt und andererseits kann die überwiegende Mehrheit wahrscheinlich gar nicht sinnvoll quantifiziert werden.

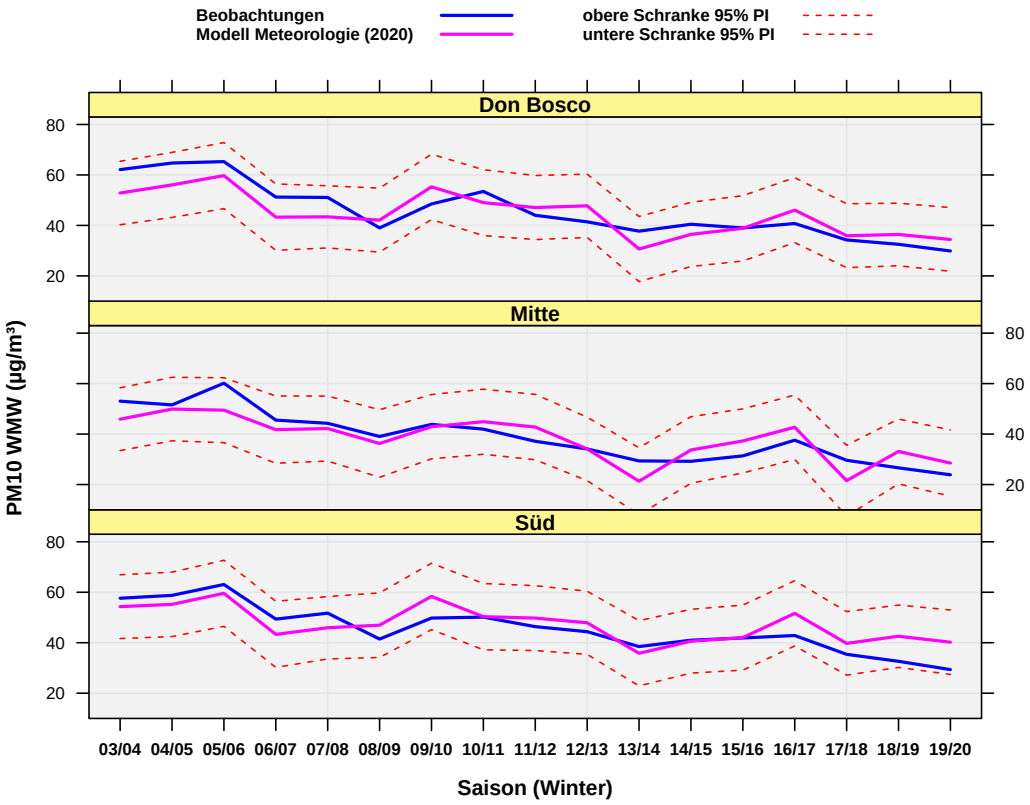


Abbildung 4.26: `PM10_WMW` gegen gefittete Werte des **Modells Meteorologie (2020)**

Beispiel für Graz-Don Bosco, Graz-Mitte & Graz-Süd mit den Wintermittelwerten 19/20

Unser **Modell Meteorologie (2020)** liefert für *gerundete* Prädiktorwerte der Spalte `Mittel` aus Tabelle 4.2 Prognosewerte, die in Tabelle 4.3 aufgelistet sind. Wenn sich in der kommenden Wintersaison 2020/2021 die Durchschnittswerte der Prädiktoren `Frosttage`, `Inversionstage` und `Windgeschwindigkeit` sowie die Anzahl der `Niederschlagstage` kaum verändern, kann ein mittlerer PM_{10}-Wert von ca. 34,14 µg/m^3 erwartet werden. Das 95 % PI hat eine Toleranz von ca. ± 12,1 µg/m^3.

Zwei Modelle: Don Bosco & Süd vs. Mitte & Nord

Im Folgenden wird versucht auf die Tatsache einzugehen, dass sich der PM_{10}-Wert in Graz Mitte, seit der Messstellenverlegung nach Graz-Mitte Gries in der Wintersaison

Tabelle 4.2: Minima, Maxima & Mittelwerte für Wintersaison 2019/2020

	N	Min	Max	Mittel	Std.-Abw. $\hat{\sigma}$
PM_{10}_WMW	3	23,9	29,9	27,7	3,32
Frosttage	3	13	27	21	7,37
Niederschlagstage[%]	3	-	-	32,8	0
Inversionstage	3	37	77	61	21,2
Windgeschwindigkeit(m/s)	3	0,53	0,74	0,64	0,10
710,03 Splitt[t]	3	-	-	???	-

Tabelle 4.3: Prognose durch Modell Meteorologie(2020) mit Werten aus WS 19/20

	Frost-tage	Nieder-schlags-tage	Inver-sions-tage	Wind-geschwindigkeit	Splitt	Prognose PM_{10}	95 % PI
Modell Meteorologie (2020)	21	32,8 %	61	0,64 m/s	–	34,14 µg/m^3	[22 ; 46]

09/10, immer mehr an jenen in Graz-Nord annähert. Daher werden zwei Modelle berechnet, eines für die höher belasteten Messorte Graz-Don Bosco & Graz-Süd und eines für die Messorte Graz-Mitte & Graz-Nord.

In das Modell für Graz-Don Bosco & Graz-Süd gehen die gleichen Prädiktoren wie in jenes auf Seite 68 ein und es ergibt sich folgendes Lineare Regressionsmodell:

Modell Meteorologie (Don Bosco & Süd)

$$PM10_{pr} = 99{,}45 - 1{,}8*Frosttage - 3{,}36*Niederschlagstage[\%] + 0{,}16*Inversionstage + 31{,}09*Windgeschwindigkeit[m/s] + 0{,}07*Frosttage*Niederschlagstage[\%];$$

$$se = 6{,}0;\ r^2_{corr} = 0{,}63;\ n = 34$$

Der Anpassungsgrad des **Modells Meteorologie (Don Bosco & Süd)** beträgt 63 % und der geschätzte Fehler lautet se = 6,0, was nur eine geringfügige Veränderung gegenüber dem **Modell Meteorologie (2019)** mit 62 % und se = 5,8 bedeutet.

Für das Modell in Graz-Mitte & Graz-Nord werden wegen der Messstellenverlegung

2009 nur die 10 Saisonen 10/11-19/20 verwendet, wodurch sich folgendes Lineare Regressionsmodell ergibt:

Modell Meteorologie (Mitte & Nord)

$$PM10_{pr} = 70{,}81 - 1{,}17*Lufttemperatur + 0{,}22*Frosttage - 0{,}53*Niederschlagstage[\%] - 0{,}13*Inversionstage + 32{,}76*Windgeschwindigkeit[m/s] - 7{,}44*Spitzenwindgeschwindigkeit[m/s] - 0{,}01*Frosttage*Niederschlagstage[\%];$$

$$se = 3{,}93;\ r^2_{corr} = 0{,}51;\ n = 20$$

Der Anpassungsgrad dieses **Modells Meteorologie (Mitte & Nord)** beträgt 51 % mit einem geschätzten Fehler von se = 3,93. Diese Werte ergeben keine Verbesserung gegenüber den vorherigen Modellen basierend auf Graz-Mitte und Graz-Nord. Allerdings ist die Anzahl der Saisonen mit je 10 eher gering.

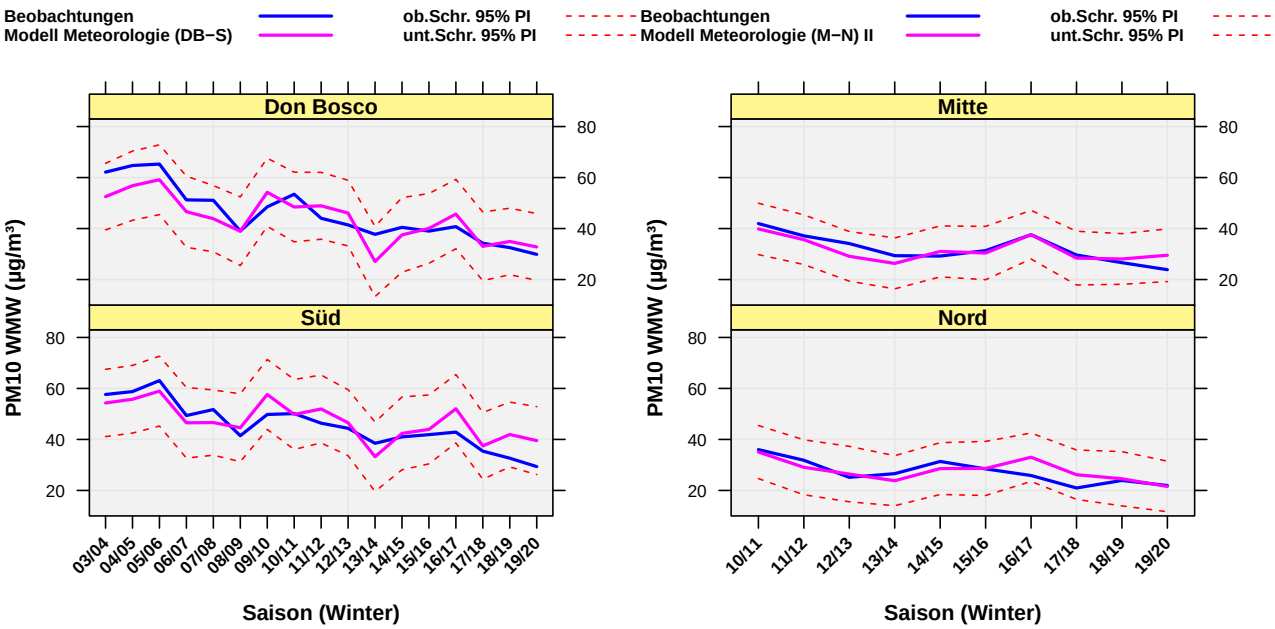


Abbildung 4.27: PM_{10} _WMW gegen gefittete Werte der **Modelle Meteorologie (DB-S)** und **Modelle Meteorologie (M-N)**

In Abbildung 4.27 sind in der rechten Graphik gute Anpassungen zu sehen, allerdings

bei nur 10 Wintersaisonen. Der Fit in der linken Graphik für 17 Wintersaisonen ist nicht ganz so gut, aber akzeptabel.

4.5 Prognose für die Anzahl der Überschreitungstage

Um von PM_{10} auf die *Überschreitungstage* schließen zu können, entwickeln wir ein Instrument, mit dem man die Anzahl der Überschreitungen prognostizieren kann.

Wir betrachten für alle vier Messstellen jeweils die `PM10_WMW` sowie die Summen der `Überschreitungstage`. Der (Pearson)-Korrelationskoeffizient zwischen diesen beiden Variablen ist äußerst nahe an der perfekten Abhängigkeit ($corr = 0,9865$). Grafisch verifizieren kann man diese Aussage mit Hilfe der Scatterplotmatrix [2. Zeile, 1. Spalte] in Abbildung 4.17 auf Seite 59.

Als Modell für die Überschreitungstage in Abhängigkeit der PM_{10}-Prognosen gilt

Modell Überschreitungstage (2020)

$$\texttt{Überschreitungstage}_{\texttt{pr}} = -60,46 + 2,65*\texttt{PM10_WMW}$$

$$\texttt{se=4,85;}\ r^2_{\texttt{corr}} = 0,97;\ \texttt{n} = 68.$$

Intercept und Steigungsparameter des Modells sind höchstsignifikant und der hohe Anpassungsgrad ist durch den starken linearen Zusammenhang erklärbar.

Berechnung der Überschreitungen anhand des Beispiels mit WMW 2019/20 (Seite 68)

Man setze die Prognose $\texttt{PM10}_{\texttt{pr}} = 34,14\ \mu g/m^3$, welche aus dem **Modell Meteorologie (2020)** auf Seite 68 berechnet wurde, in das **Modell Überschreitungstage (2020)** ein. Es resultiert eine Prognose für die Anzahl der `Überschreitungstage`:

$$\texttt{Überschreitungstage}_{\texttt{pr}} = -60,46 + 2,65*34,14 \approx 30\ \texttt{Tage;}$$

$$95\%\ \texttt{PI für die Überschreitungstage} \approx 21\ \texttt{Tage bis}\ 40\ \texttt{Tage}$$

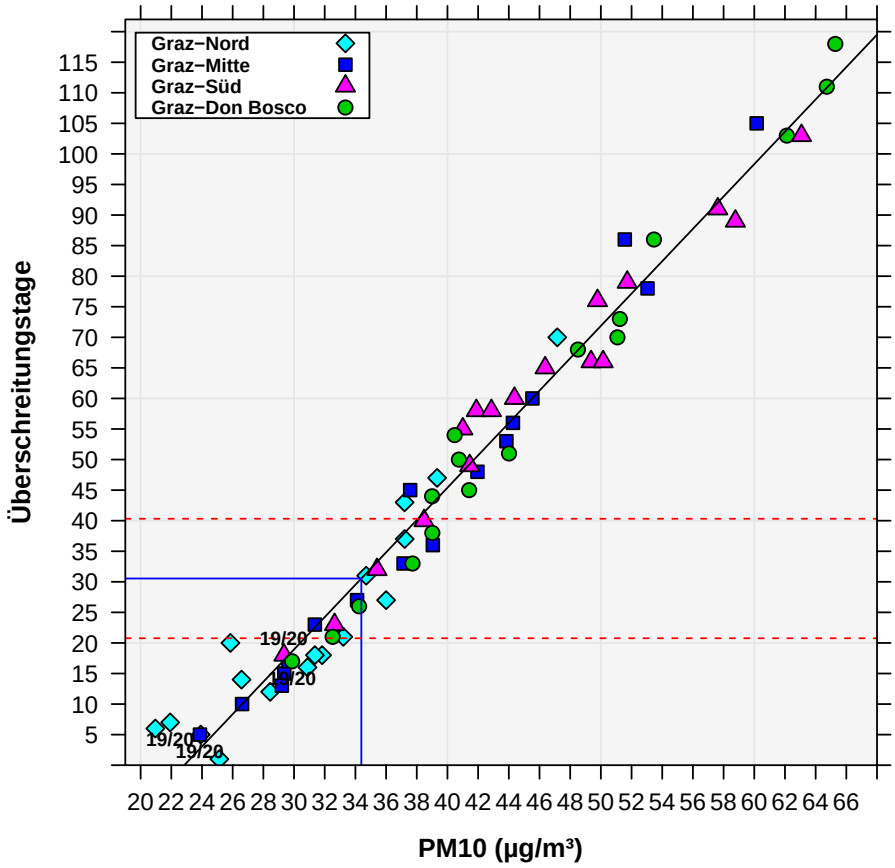


Abbildung 4.28: Prognose und 95 % PI für Überschreitungstage, falls $\texttt{PM10}_{\texttt{pr}}$ = 34,14

Die vertikale blaue Linie in Abbildung 4.28 gibt hier die PM_{10}-Prognose 34,14 durch unser **Modell Meteorologie (2020)** an. Die horizontale blaue Linie beschreibt die zu PM_{10} gehörige Prognose für die Überschreitungen durch **Modell Überschreitungstage (2020)**. Zusätzlich ist die untere bzw. obere Grenze des 95 % Prädiktionsintervalls für die Überschreitungstage angegeben (horizontal rot-strichlierte Linien).

Serie von Prognosen für Überschreitungstage bei bekanntem PM_{10}-Wert

Eine Sequenz von Beispielen zur Vorhersage von Überschreitungstage für vorgegebene PM_{10}–Werte bzw. Prognosen $\texttt{PM10}_{\texttt{pr}}$ mit 95 % Prädiktionsband können der folgenden Abbildung 4.29 entnommen werden. Das heißt, jede zukünftige Vorhersage wird vom 95 % Prädiktionsintervall mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % überdeckt.

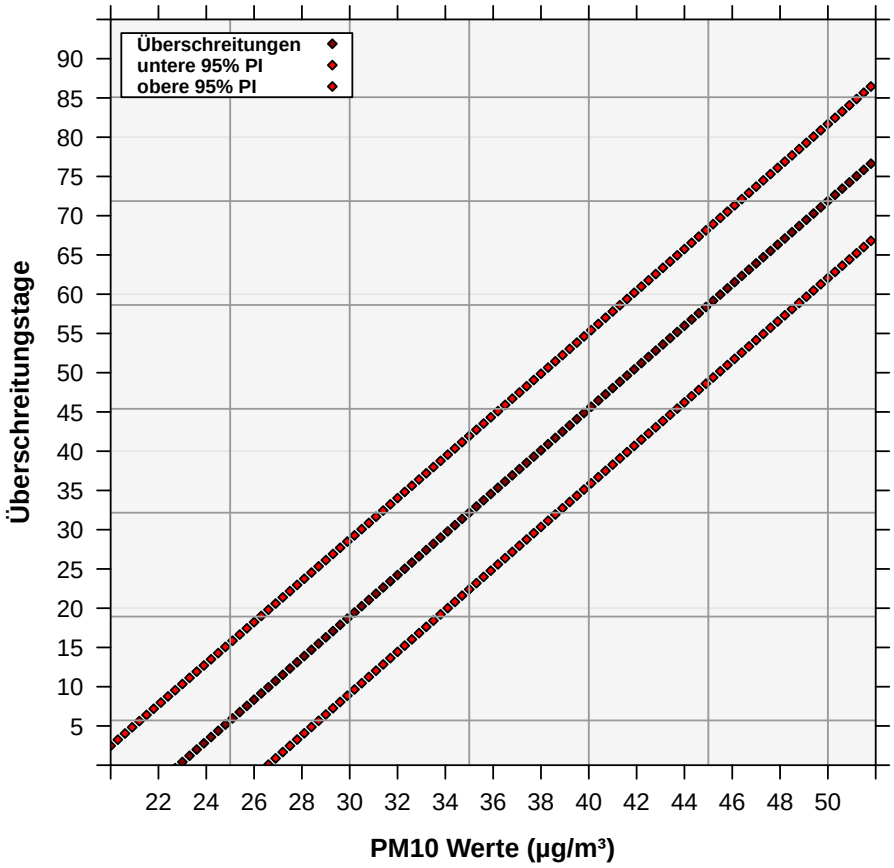


Abbildung 4.29: Prognosen von `Überschreitungstage` in Abhängigkeit von $\mathtt{PM}_{10}$

Anzahl der Überschreitungen in Abhängigkeit von $\mathtt{PM}_{10}$

In diesem Abschnitt steht noch die Frage im Raum, wie niedrig die $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` bzw. Prognosen von $\mathtt{PM}_{10}$ sein müssten, um vorgegebene Schranken an `Überschreitungstage` (z.B. `25` oder `30` Tage) nicht zu übersteigen. Deshalb wird ein aktualisiertes Modell (inkl. Daten aus WS 19/20) für die Zielgröße $\mathtt{PM}_{10}$ in Abhängigkeit des Prädiktors `Überschreitungstage` erzeugt:

$$\mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}} = 23{,}31 + 0{,}3678 * \mathtt{Überschreitungstage}$$

Dieses Modell erlaubt nun die Beantwortung dieser Frage (siehe hierfür Abbildung 4.30). Geben wir uns eine Schranke von maximal `30` Überschreitungstagen vor, dann sollte in

Folge dessen $\mathtt{PM}_{10}$ bzw. die Prognose davon, $\mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}}$, das `WMW`-Niveau von `34,34` µg/m^3 nicht übersteigen (wie es die durchgezogene rote, vertikale Linie anzeigt).

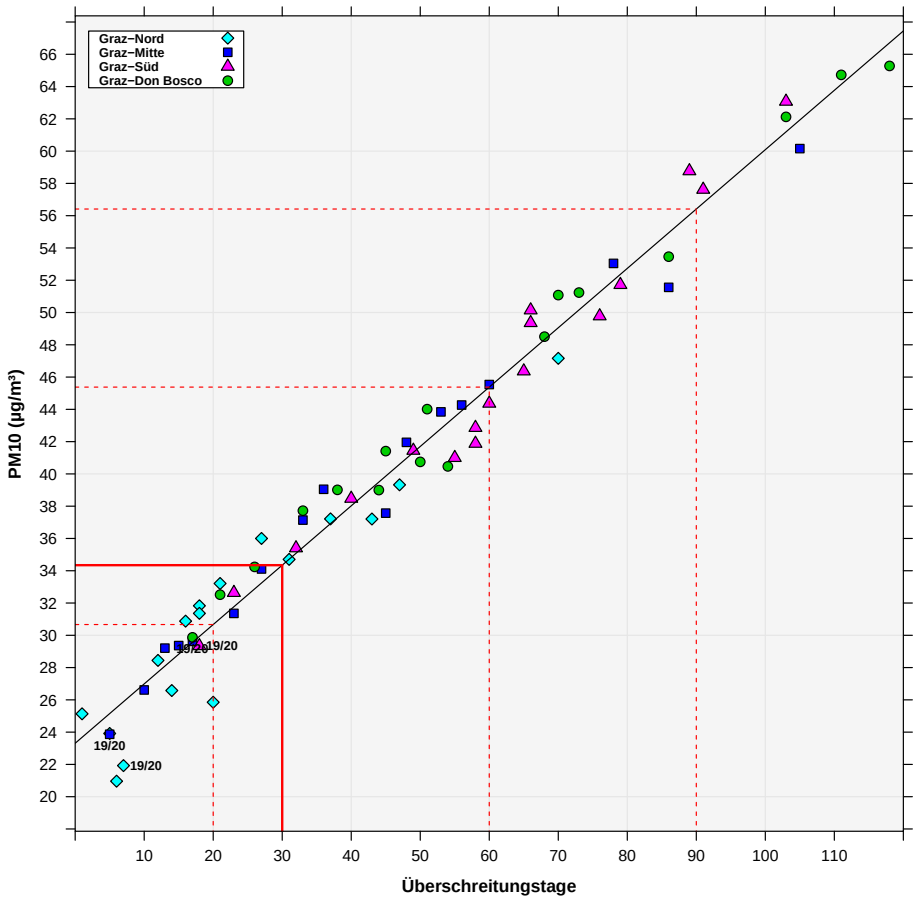


Abbildung 4.30: $\mathtt{PM}_{10}$ in Abhängigkeit von Anzahl von `Überschreitungstage`

4.6 Modelle mit Meteorologie und Straßenstreuung (Splitt)

Für Modelle mit Straßenstreuungsarten (Splitt, Salz, Gesamtstreuung) verwenden wir nur die Variable `Splitt` als zusätzlichen Prädiktor. Die Begründung hierfür findet der Leser auf Seite 66.

Auf der Datenbasis von sechzehn Wintersaisonen (03/04 bis 18/19) und wieder der **drei Messorte Graz-Don Bosco**, **Graz-Mitte** und **Graz-Süd** (Graz-Nord hat deutlich

niedrigeres PM_{10}-Niveau) ergab sich für das vergangene Jahr 2018/19 durch Hinzunahme der Variable `Splittstreuung` zur Beschreibung der Wintermittelwerte (`WMW`) von PM_{10} folgendes Lineares Regressionsmodell:

Modell Splitt (2019)

$PM10_{pr}$ = 41,99 - 0,5187*Frosttage - 1,3175*Niederschlagstage[%] + 0,0030*Splitt[t] + 0,1376*Inversionstage + 3,75*Spitzenwind[m/s] + 0,026*Frosttage*Niederschlagstage[%];

se = 4,1; r^2_{corr} = 0,828; n = 48

Die Liniendiagramme basierend auf dem **Modell Splitt (2019)** in Abbildung 4.31 auf Seite 78 zeigen für jeden Ort den Fit für PM_{10}_WMW. Alle Vorhersagen von Don-Bosco und Graz-Süd für die aktuelle Wintersaison 2019/2020 werden vom Modell überschätzt, denn die Prädiktionen (magenta) sind höher als die Beobachtungen (blau). Für Graz-Süd liegen erstmals die Beobachtungen nicht innerhalb des 95 % Prädiktionsintervalls von ca. ± 9,0 µg/m^3.

Analog zum **Modell Meteorologie (2019)** auf Seite 67 werden nun die `WMW`/Summen der aktuellen Saison 2019/2020 (17. WS) zur Datenbasis, mit der das Modell geschätzt wird, hinzugenommen. Der Anpassungsrad liegt bei r^2_{corr} = 82 % und der geschätzte Standardfehler erhöht sich von 4,1 auf se = 4,4.

Durch weitere Modellbildungen konnte auch in diesem Jahr kein alternatives Modell Splitt gefunden werden, das weitere bzw. veränderte Prädiktoren enthält.

Nimmt man also die Daten der aktuellen Saison 2019/2020 (17. Saison) hinzu, dann wird das aktualisierte **Modell Splitt** mit den gleichen Prädiktoren gefunden:

Modell Splitt (2020)

$PM10_{pr}$ = 54,00 - 0,6685*Frosttage - 1,6236*Niederschlagstage[%] + 0,0031*Splitt[t] + 0,1118*Inversionstage + 3,12*Spitzenwind[m/s] + 0,032*Frosttage*Niederschlagstage[%];

se = 4,4; r^2_{corr} = 0,82; n = 51

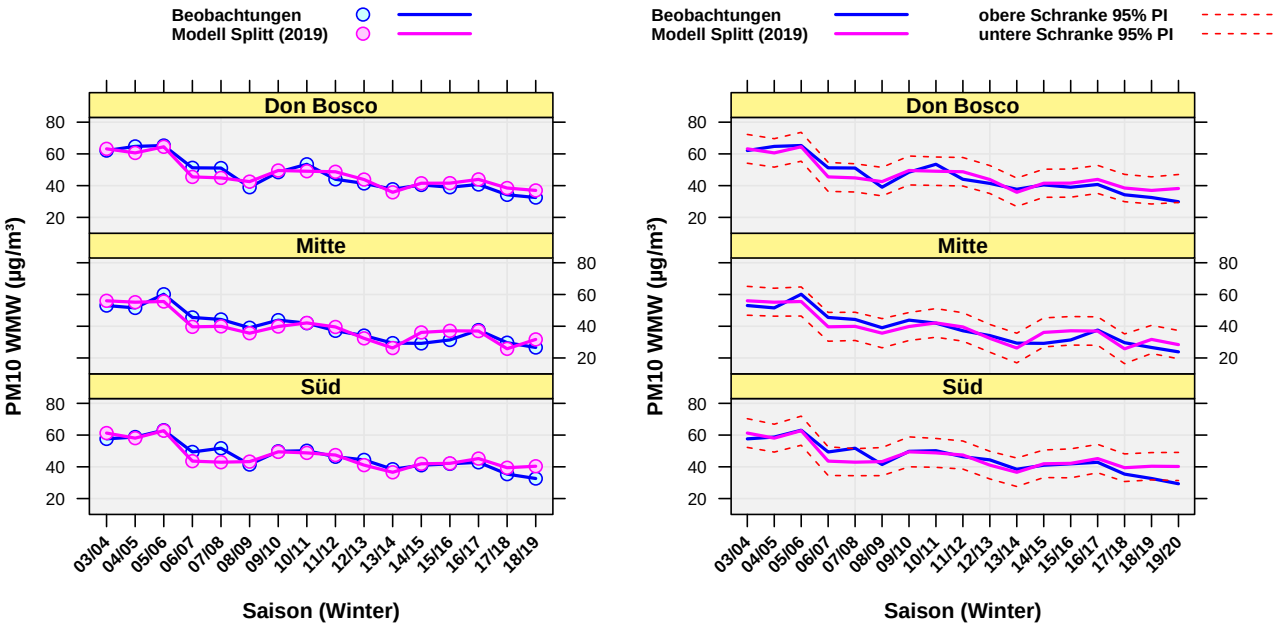


Abbildung 4.31: $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` gegen gefittete Werte des **Modells Splitt (2019)**; rechts *inklusive* Vorhersage für aktuelle WS 19/20 (mit 95 %-PI)

Die Prädiktoren sind alle statistisch signifikant, und dieses Modell enthält auch in diesem Jahr im Gegensatz zum **Modell Meteorologie (2020)** anstatt der `Windgeschwindigkeit` die Variable `Spitzenwind`. Die höchste Signifikanz in diesem Modell haben die Variablen `Splitt` und `Niederschlag`, gefolgt von `Inversion`. Der Anpassungsgrad (r^2_{corr}) bleibt, wie schon erwähnt, im Vergleich zum Vorjahresmodell **Modell Splitt (2019)** fast gleich und liegt bei `82 %` mit einem Standardfehler `se = 4,4`. Als Vergleich zum eben gefundenen **Modell Splitt (2020)** ist in der Zusammenfassung auf Seite 93 zusätzlich das meteorologische Modell plus Splittvariable abgebildet.

Zusätzlich diagnostizieren die Plots der folgenden Abbildung 4.32 dem **Modell Splitt (2020)** *Validität*. Die Standardisierten Residuen (links) streuen zufällig um Null (weisen also keinerlei Struktur auf) und der Normal QQ-Plot (rechts) spricht keinesfalls gegen die Normalverteilung. Diese Aussage wird auch durch den Shapiro-Wilk-Test (p = 0,28) klar gestützt. *Die Modellannahmen sind nicht verletzt!*

Den Liniendiagrammen in der Abbildung 4.33 ist zu entnehmen, dass die neue Version **Modell Splitt (2020)**, die Beobachtungen gut schätzt und auch alle 95 % Prädiktionsintervalle überdecken den Fit von $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW`. Diese 95 % PI haben alle eine Breite

von ca. ± 9,66 µg/m^3. Der Fit dieses Modells ist mit wenigen Ausnahmen (z.B. WS 11/12 in Don-Bosco) erstaunlich präzise (11/12 wurden äußerst wenige `Frost-` und `Niederschlagstage` beobachtet) und auch die problematischsten drei Wintersaisonen 03/04 bis 05/06 werden mit diesem Modell gut repräsentiert. Somit ist es uns erlaubt, Prognosen für $\mathtt{PM}_{10}$-Wintermittelwerte bei bekannten meteorologischen Prädiktorwerten von `Frost-`, `Niederschlags-`, `Inversionstagen`, `Spitzenwind` sowie der Streuungsart `Splitt` statistisch zu berechnen.

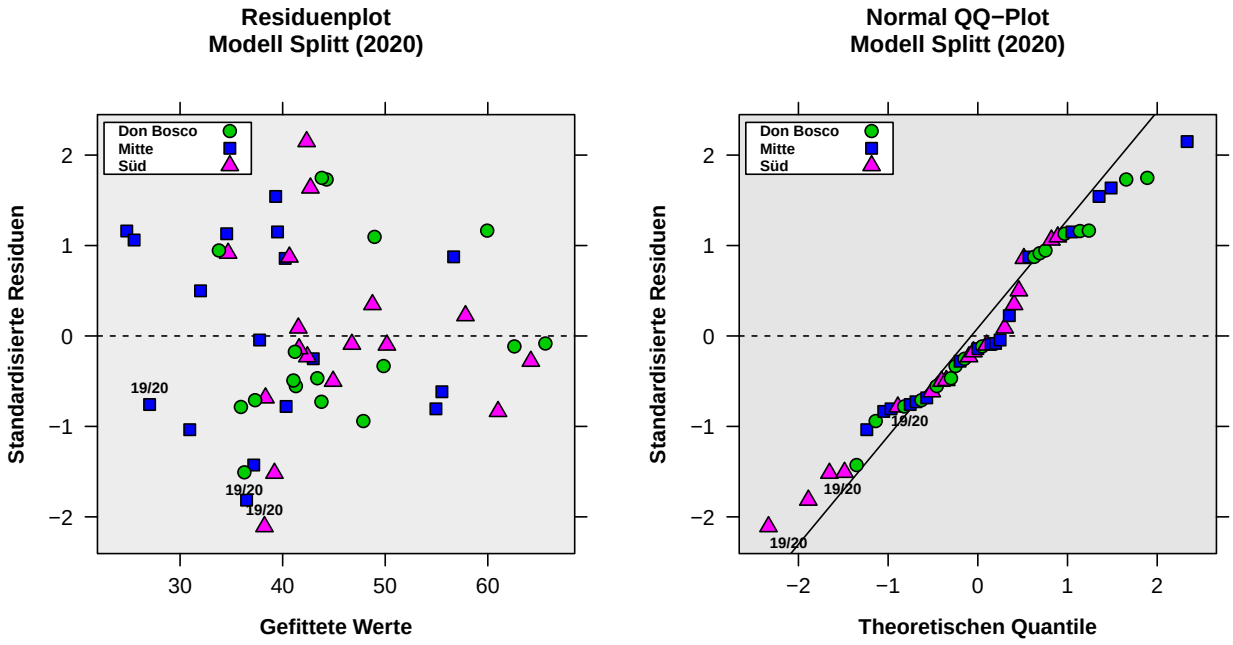


Abbildung 4.32: Residuen- und Normal QQ Plot für **Modell Splitt (2020)**

Anmerkungen

- Auch hier wurden kompliziertere Modelle mit höheren Potenzen der Prädiktoren getestet (bspw. quadratischer `Niederschlag`, etc.). Diese beschreiben die 17 beobachteten $\mathtt{PM}_{10}$ `_WMW` zwar noch besser und haben etwas engere Prädiktionsintervalle, sind hier aber zum Prognostizieren für unbekannte Prädiktorwerte ungeeignet und sie lassen auch so gut wie keine Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zu (Hinweis: *Overfitting*).

- Es wurde auch auf eine mögliche Box-Cox-Transformation getestet, was sich aber als nicht notwendig herausstellte.

- Im Vergleich zu den meteorologischen Modellen weist das **Modell Splitt (2020)** einen geringeren Standardfehler `se` und einen höheren Anpassungsgrad r^2_{corr} auf.

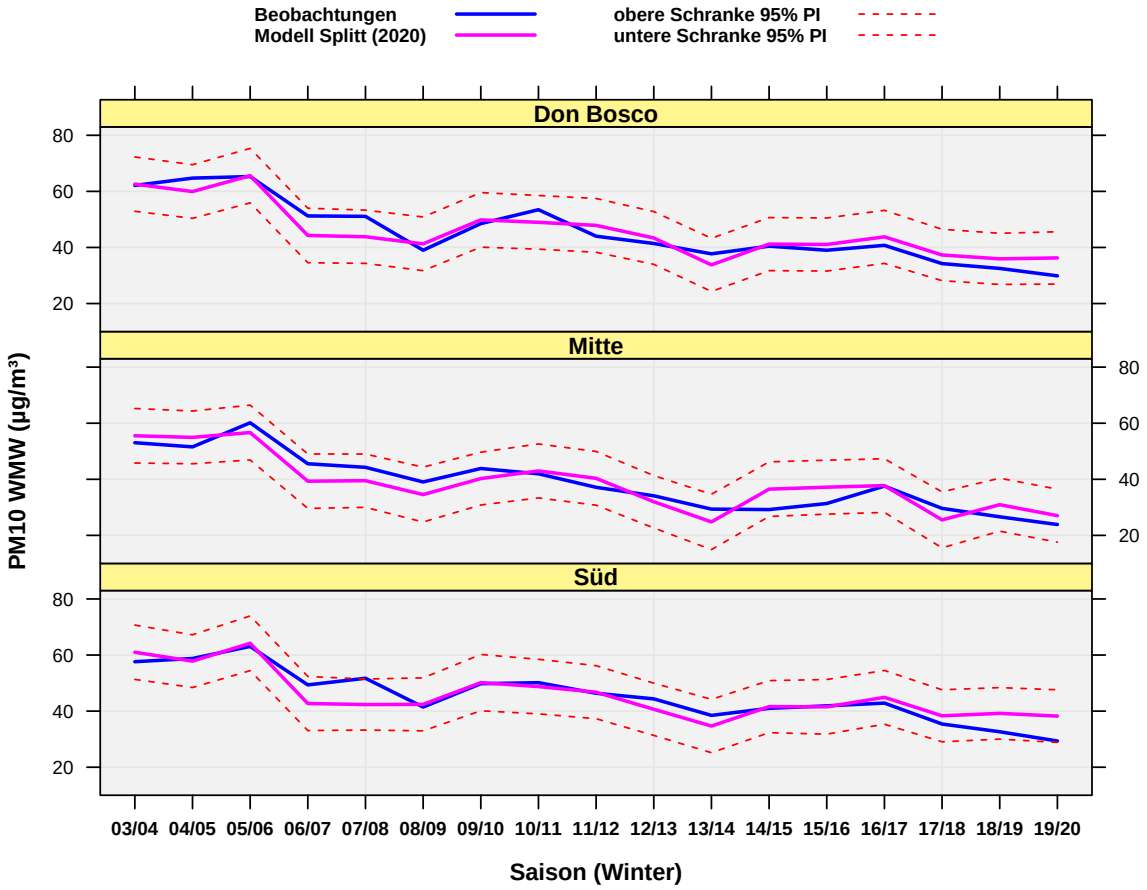


Abbildung 4.33: $\texttt{PM}_{10}\texttt{_WMW}$ gegen gefittete Werte des **Modells Splitt (2019)**

4.7 Vergleich und Beispiele beider Modelle für PM_{10}-WMW

Die folgende Tabelle 4.4 enthält die Variablen, deren Werte für Prognosen unserer beiden Modelle notwendig sind. Um ein mögliches realistisches Szenario für eine PM_{10} Prognose zu erstellen, genügt es beispielsweise die gerundeten Durchschnitte als Werte für die Prädiktoren zu verwenden:

Tabelle 4.4: Minima, Maxima & Mittelwerte für WS 03/04 - WS 19/20

	N	Min	Max	Mittel	Std.abw $\hat{\sigma}$
PM_{10} _WMW	51	23,90	65,28	43,30	10,46
Frosttage	51	10,00	67,00	37,00	15,53
Niederschlagstage[%]	51	22,40	39,38	30,68	4,88
Inversionstage	51	22,00	84,00	58,00	17,37
Windgeschwindigkeit [m/s]	51	0,35	0,77	0,60	0,08
Spitzenwind [m/s]	51	3,47	5,92	4,80	0,51
Splitt [t]	51	486,73	5.916,93	1.933,45	1.666,31

Mögliches Szenario

Betrachtet werden Messwerte (Mittelwerte) aus Tabelle 4.4. Wir wenden diese Daten auf die zwei aktualisierten *Modellversionen (2020)* an und vergleichen die beiden Prädiktionen. Das Mittel von Splitt wurde auf 1.215 Tonnen (≈ Mittelwert der Splittstreuung der Wintersaisonen 06/07 - 19/20) heruntergesetzt, da in den vergangenen Jahren die Splittstreuung deutlich reduziert wurde und der Mittelwert von ca. 2.000 Tonnen nicht mehr realistisch erscheint. Splitt in Mengen von 03/04 - 05/06 wird in zukünftigen Wintersaisonen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr eingesetzt werden. Darauf weisen zumindest die Wintersaisonen 08/09, 09/10, 12/13 & 13/14 hin, in denen der gestreute Splitt, trotz häufiger Straßenstreuung bedingt durch viele Niederschlagstage, bei weitem nicht an die Mengen von 03/04 bis 05/06 herankommt (als Ersatz für Splitt wurde überwiegend auf Salz umgestellt; siehe Tabelle auf Seite 98, Anhang B).

Tabelle 4.5: Vergleich beider Modelle anhand von Durchschnittswerten aus Tab. 4.4

	Frost-tage	Nieder-schlags-tage	Inver-sions-tage	Wind-geschw.	Spit-zen-wind	Splitt	Prognose PM_{10} _WMW	95 % PI
Modell Meteorologie (2020)	37 d	30,68 %	58 d	0,60 m/s			43,10 µg/m^3	[30,83 ; 55,38]
Modell Splitt (2020)	37 d	30,68 %	58 d		4,80 m/s	1.215 t	40,96 µg/m^3	[31,90 ; 50,02]

Das **Modell Meteorologie (2020)** prognostiziert 43,10 µg/m^3 für PM_{10}, mit zugehörigem 95 % PI von ± 12 µg/m^3. Im Vergleich dazu liefert das **Modell Splitt (2020)**

eine etwas niedrigere Prognose von 40,96 µg/m^3 und ein 95 % PI von ± 9,06 µg/m^3. Obwohl auch in diesem Jahr die Prognose des **Modells Meteorologie (2020)** den tatsächlichen `PM10_WMW` von 43,30 µg/m^3 exakt trifft, ist durch die Erfahrung der letzten Saisonen und durch das schmalere 95 % PI das **Modell Splitt (2020)** trotzdem zu bevorzugen. Der PM_{10}-Mittelwert der aktuellen Saison der drei Orte Graz-Don Bosco, Graz-Mitte & Graz-Süd von 27,7 µg/m^3 wird durch das Modell Splitt (2020) ebenfalls besser geschätzt (vgl. Tabelle 4.2 auf Seite 71).

In den Grafiken der Abbildung 4.34 auf Seite 83 sind jeweils PM_{10}-Vorhersagen inklusive der 95 % Prädiktionsintervalle zu sehen. Dabei werden jeweils immer vier Prädiktorvariablen an einem bestimmten fixen Wert (Mittelwerte von `Frosttage = 37`, `Niederschlagstage = 30,70 %`, `Inversionstage = 58`, `Splitt = 1.215 t` und `Spitzenwind = 4,80 m/s`) festgehalten und die fünfte Prädiktorvariable bleibt variabel. Beispielsweise werden in der linken oberen Grafik die Variablen `Niederschlagstage`, `Inversionstage`, `Splitt` und `Spitzenwind` fixiert und es kann für eine ganze Serie von `Frosttagen` die PM_{10}-Vorhersage und ihr Prädiktionsintervall abgelesen werden:

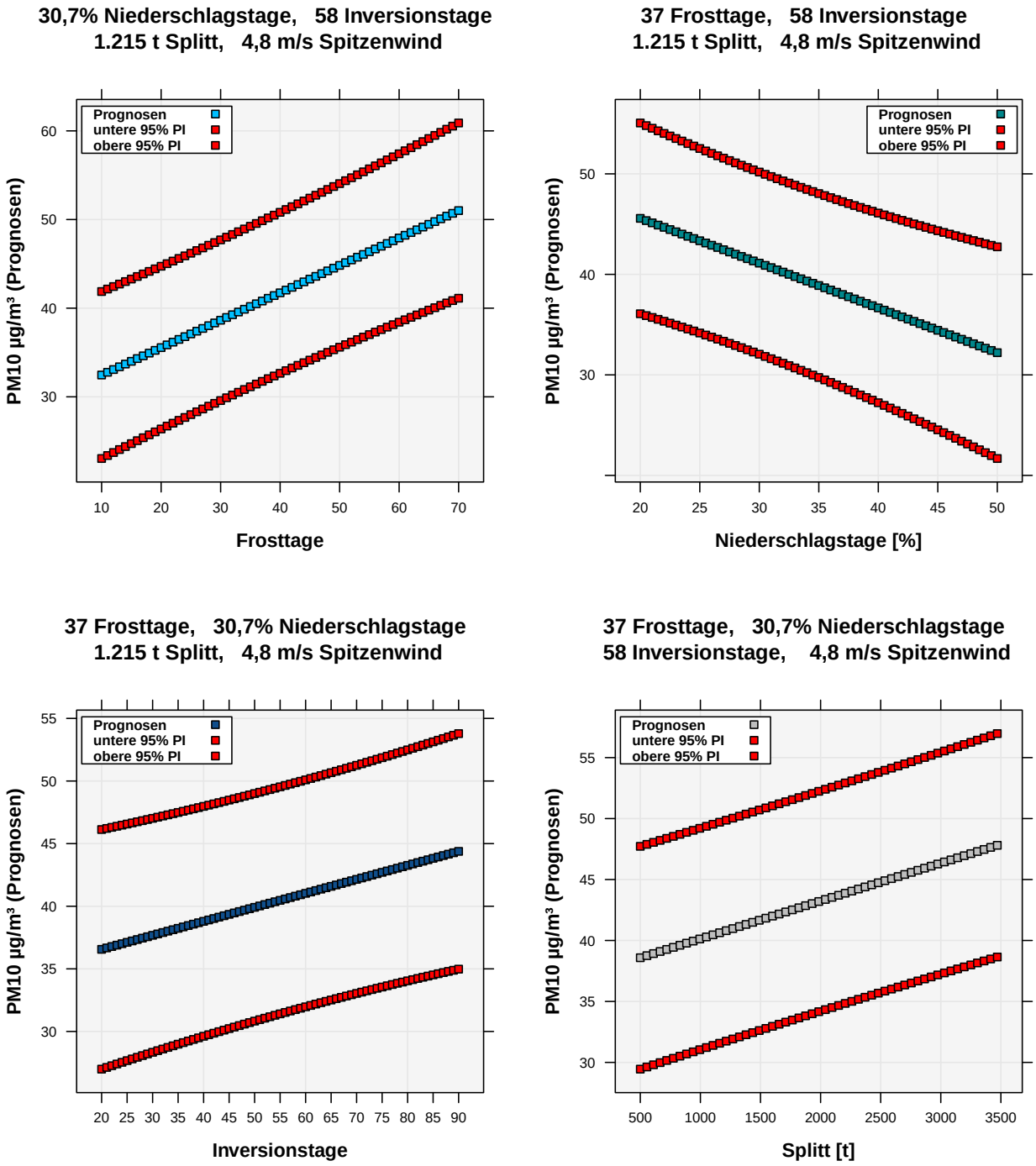


Abbildung 4.34: PM_{10}-Prognosen durch **Modell Splitt (2020)**, mit zugehörigen 95 % PI; jeweils vier Prädiktoren fixiert bzw. ein Prädiktor variabel

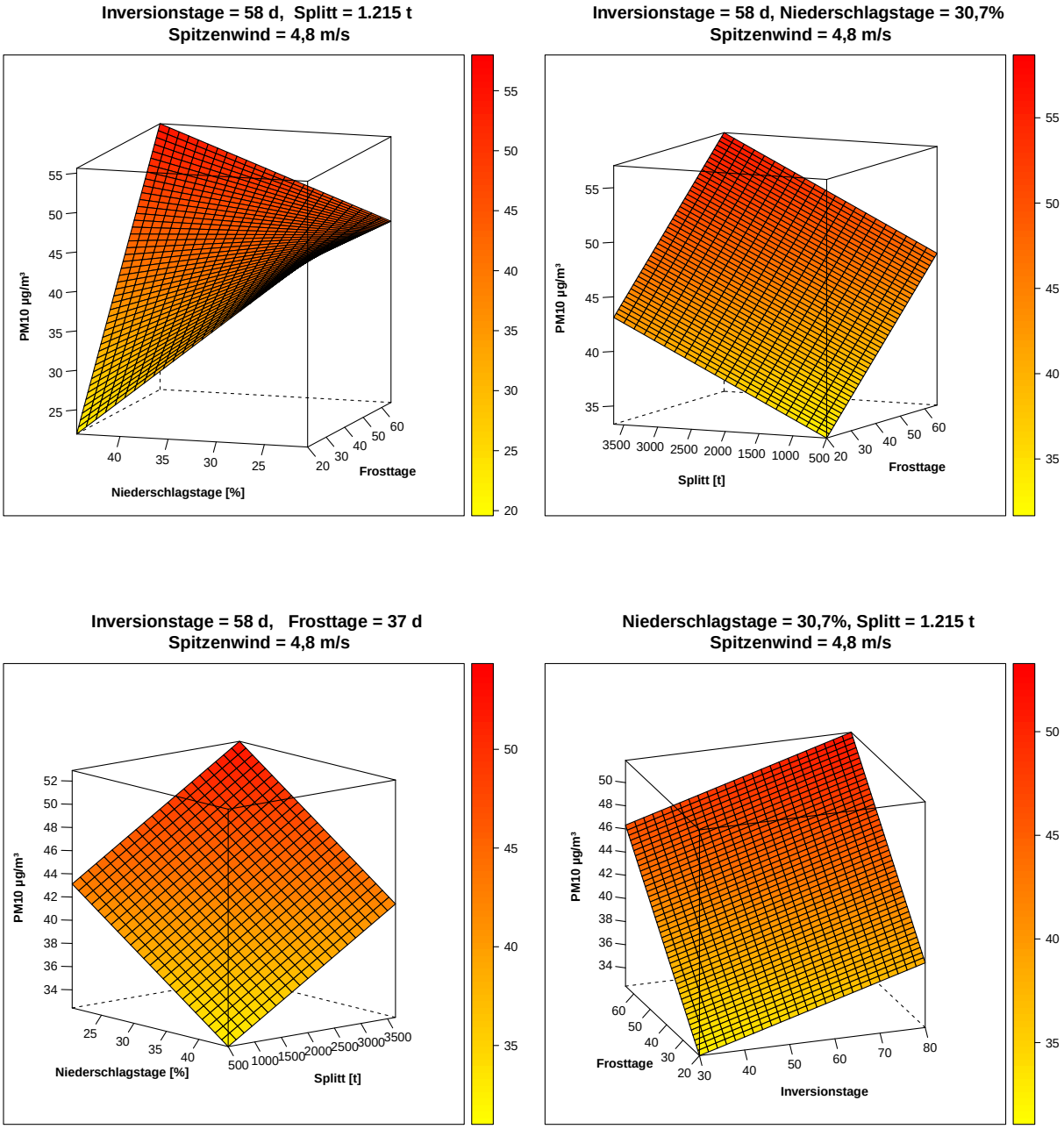


Abbildung 4.35: 3D-Plots der PM_{10}-Prognosen durch **Modell Splitt (2020)**: jeweils drei Variablen fixiert und zwei variabel

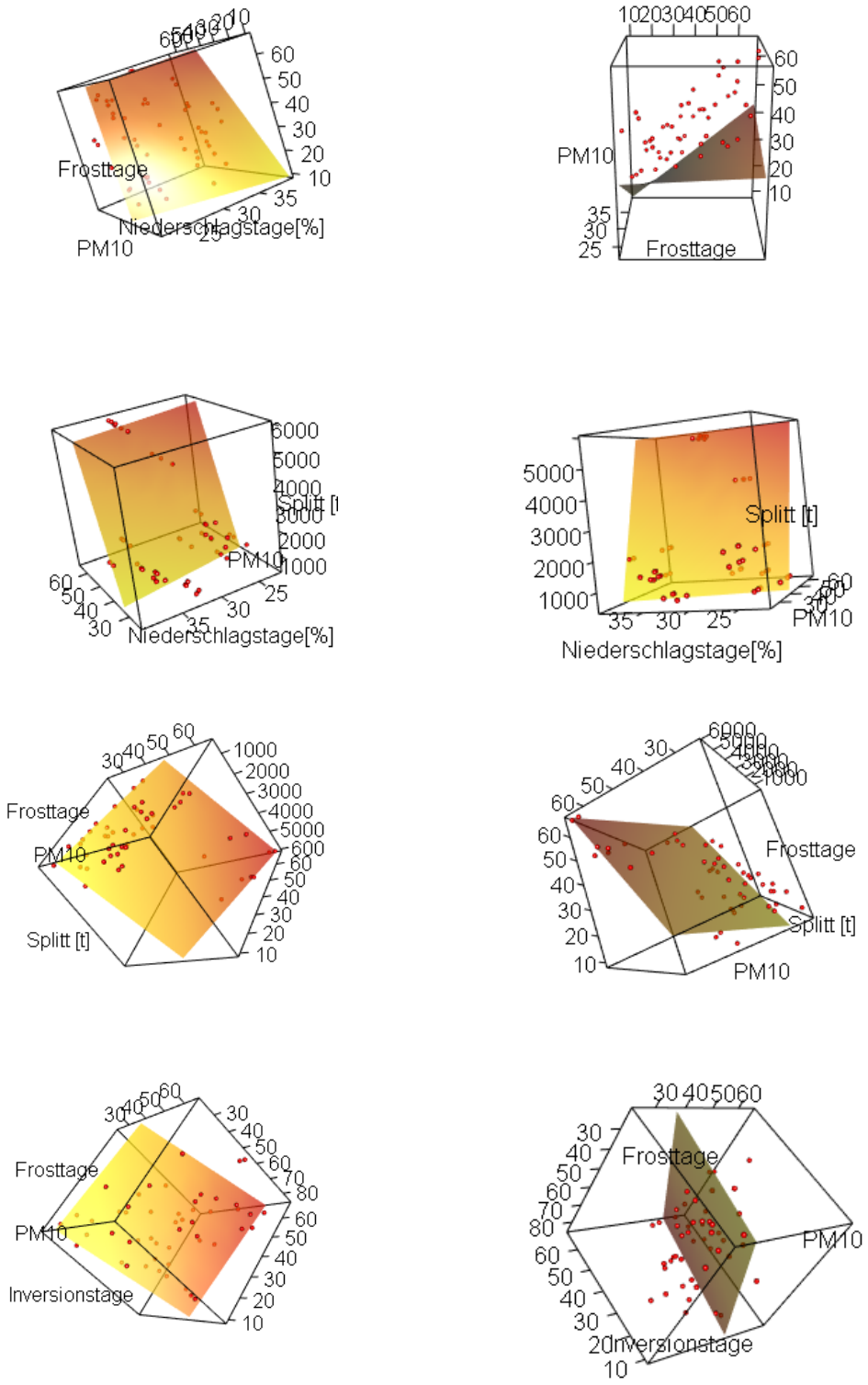


Abbildung 4.36: Verschiedene Ansichten der 3D-Plots der PM_{10}-Prognosen durch das **Modell Splitt (2020)**

Statistische Interpretation des Modells Splitt (2020)

Als Beispiel betrachten wir die Prognose bzw. das zugehörige Prädiktionsintervall aus Tabelle 4.5 von Seite 81: Liegt der gemessene bzw. der beobachtete `PM10_WMW` im 95 % Prädiktionsintervall `[31,90;50,02]`, dann kann die

$$\text{Hypothese } H_0\text{:} \quad \mathtt{PM}_{10}\mathtt{_WMW} \;=\; \mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}} \text{ (Vorhersage)}$$

nicht widerlegt werden.

Wenn für die Beobachtung $\mathtt{PM}_{10}\mathtt{_WMW} < 31{,}90\ \mu g/m^3$ oder $\mathtt{PM}_{10}\mathtt{_WMW} > 50{,}02\ \mu g/m^3$ gilt, dann liegt eine *signifikante* Abweichung zur Modellprognose $\mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}}$ (Vorhersage) vor. In diesem Fall kann die Hypothese H_0 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % verworfen werden. Eine Messung von $\mathtt{PM}_{10}\mathtt{_WMW} < 31{,}9$ kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf alternative Einflussfaktoren (genutzte Reduktionspotentiale) zurückgeführt werden, welche durch das Modell noch nicht erfasst wurden bzw. unbekannt sind.

Betrachten wir des Weiteren die rechten Liniendiagramme in Abbildung 4.31 auf Seite 78. Diese Grafik beinhaltet die Vorhersagen für die aktuelle WS 19/20, welche durch das letztjährige **Modell Splitt (2019)** prognostiziert wurden. Die Grafik für den Fit durch das **Modell Splitt (2020)** ist auf Seite 80 zu finden. Dieses Modell scheint auch heuer eine weitere Verbesserung zum Vorjahr darzustellen. Die Beobachtungen für alle 3 Messstationen Don-Bosco, Graz-Mitte und Graz-Süd sind niedriger als die Modellprognosen, sind aber noch im Prädiktionsintervall.

Jede weitere Wintersaison stellt einen statistischen Informationsgewinn dar und damit wird mit weiteren Beobachtungen die Modellstruktur deutlicher. Das heißt, die einflussreichen Variablen zur Modellbeschreibung der Zielgröße $\mathtt{PM}_{10}\mathtt{_WMW}$ werden statistisch herausgearbeitet und somit wird auch die Interpretation stets plausibler und gewinnt an Aussagekraft. Das **Modell Splitt (2020)** (Seite 77) zeigt, dass uns dadurch auch komplexere Modellstrukturen erlaubt sind, welche auch stets zu präziseren Vorhersagen führen. Dieses Modell beinhaltet lediglich signifikante Variablen, deren Einflüsse auf PM_{10} zwar vermutet werden (siehe *EDA* ab Seite 5), aber erst durch diese *inferenzstatistischen* Analysen als bestätigt zu verstehen sind.

5 Residuenanalyse für Modelle der Tagesmittelwerte PM_{10} in Don Bosco

Residuenanalyse mit Modell für TMW PM_{10} : Daten aus WS 03/04–05/06

Für die Analyse wurde im ersten Schritt ein Prognosemodell für die Quadratwurzel der Tagesmittelwerte PM_{10} , basierend auf den Daten der WS 03/04–05/06 (Trainingsdaten), berechnet. Das Modell beinhaltet den 24h-Mittelwert von PM_{10} und der Lufttemperatur bis 12h–Mittag des Vortages, den Niederschlag (als 0/1-Variable), die mittlere Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz des laufenden Tages, sowie sogenannte dummy-Variable für Samstag, Sonn-/Feiertag, Februar und März. Das Modell liefert einen passablen Anpassungsgrad von ca. 68%. Alle Variablen im Modell sind statistisch signifikant (p-Wert < 0.05). In der folgenden Darstellung findet man die Details dieses Modells.

Modell für TMW PM_{10} basierend auf WS 03/04–05/06

SQRT(PM10) = 8,3181 + 0,01*PM10_Mittag[µg/m^3] - 0,874*Niederschlag[0/1-Variable] -1,133*Windgeschwindigkeit[m/s] - 0,299*Temperaturdifferenz(Graz-Kalkleiten)[°C] - 0,0934*Lufttemperatur_Mittag[°C]-0,83*daySa[Samstag: 0/1] - 1,1431*daySuHo[Sonntag/Feiertag: 0/1] + 0,2514*Feb[Februar: 0/1] + 0,99*Mar[März: 0/1];

se = 1,005; r^2_{corr} = 0,6836; n = 402

Die Verteilung der Residuen dieses Modells (beobachtete Werte minus geschätzte Werte

für PM_{10}) wird in Form von Boxplots in Abbildung 5.1 dargestellt (Trainingsdaten: WS 03/04–05/06, Testdaten: WS 06/07–19/20). Wie zu erwarten war zeigt sich für die Residuen der Trainingsdaten eine symmetrische Verteilung mit einem Mittelwert (markiert als • in der Box) nahe 0. Dies bedeutet, dass eine gute Anpassung des Regressionsmodells gegeben ist. Bei den Testdaten (WS 06/07–19/20) hingegen fällt auf, dass die Verteilung zwar auch annähernd symmetrisch ist, aber die Mittelwerte der Residuen negativ werden und eine Abweichung von der Null (Bias) bis zu –20µg/m^3 aufweisen.

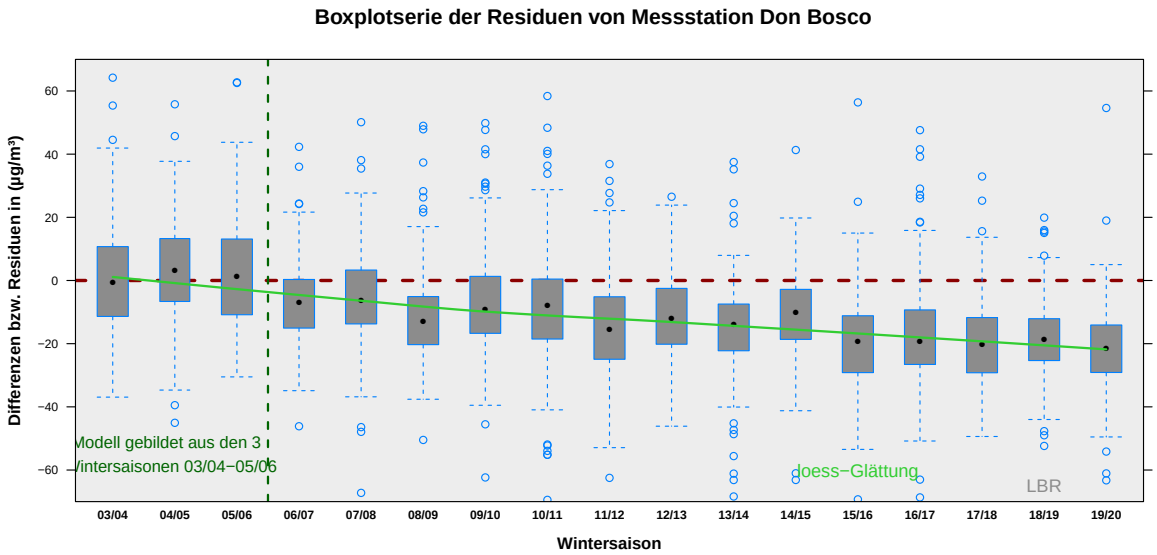


Abbildung 5.1: Boxplotserie der Residuen von TMW PM_{10} mit Modell basierend auf WS 03/04–05/06

Man beachte, dass in den Modellen die meteorologischen Einflüsse explizit abgebildet sind und implizit auch andere Einflussfaktoren wie der Verkehr, Hausbrand etc. inkludiert sind. Wenn man annimmt, dass sich die meteorologische Struktur im Laufe der Jahre nicht verändert hat, sollten die Residuen der Testdaten um Null schwanken, also keinen Bias aufweisen. Der dargestellte negative Bias deutet aber darauf hin, dass sich der Einfluss anderer Faktoren stark verändert hat. Es ist bekannt, dass von Seiten der Stadt Graz viele kleine Maßnahmen durchgeführt wurden wie Umstellung und Verbesserung von Hausbrandöfen, Erweiterung des Fernwärmenetzes, Reduzierung der Splittstreuung auf Kosten einer umfangreicheren Salzstreuung.

Um einen Eindruck über den Verlauf der Residuen in einer Wintersaison zu bekommen, wurden die Residuen der Tagesmittelwerte PM_{10} vom 1.11.2019 bis 31.3.2020 in Abbildung 5.2 als Zeitreihe zusammen mit einer Trendkurve dargestellt. Hier ist die

Charakteristik eines negativen Bias über die gesamte Wintersaison klar zu erkennen. Mit einem Mittelwert von ca. –21,7 µg/m^3 und einem Standardfehler des Mittelwertes von $13,53/\sqrt{152} = 1,1$ hat man eine hoch signifikante Abweichung von der Null. Die seit der WS 06/07 durchgeführten Maßnahmen scheinen also eine statistisch signifikante Verringerung der PM_{10} Belastung mit sich gebracht zu haben. Der Ausreißer Ende März ist durch eine extrem hohe Feinstaubbelastung auf Grund des Saharastaubs erklärbar.

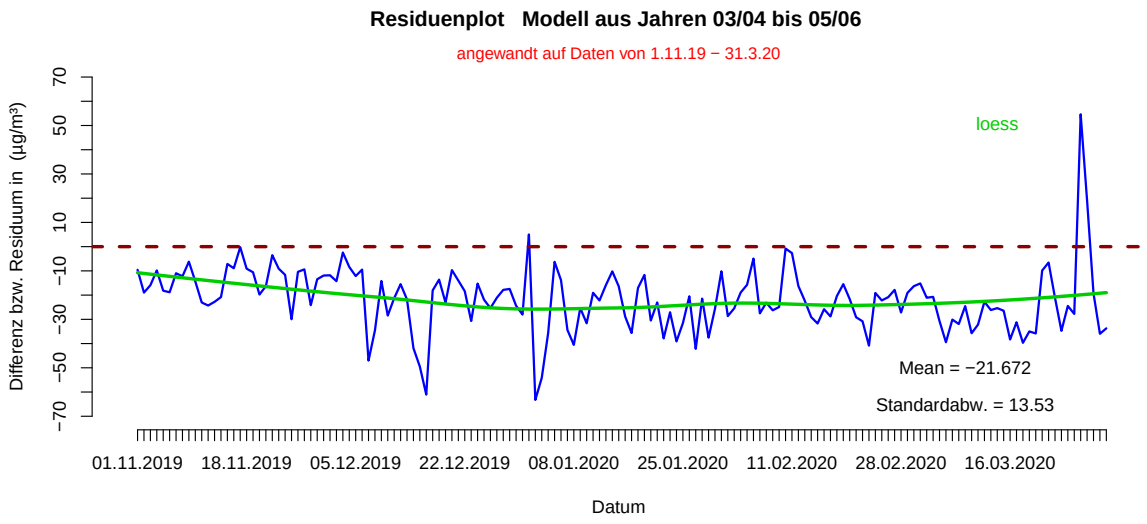


Abbildung 5.2: Zeitreihe mit Trend der Residuen von TMW PM_{10} in der WS 19/20

Residuenanalyse mit Modell für TMW PM_{10}: Daten aus WS 07/08–09/10

Da die Trainingsdaten im ersten Modell für TMW PM_{10} auf den strengen Wintersaisonen 03/04–05/06 basieren, wollen wir als zweite Variante ein Modell berechnen, das auf den eher milden WS 07/08-09/10 aufbaut. Dadurch ist ein adäquater Vergleich mit den darauffolgenden Wintersaisonen gewährleistet, die auch als eher mild zu bezeichnen sind. Das folgende Modell enthält dieselben Variablen wie das Modell mit den Trainingsdaten aus WS 03/04–05/06, natürlich jetzt mit anderen Modellkoeffizienten.

Modell für TMW PM_{10} basierend auf WS 07/08–09/10

`SQRT(PM10) = 7,3 + 0,0209*PM10_Mittag[µg/m³] -`
`0,502*Niederschlag[0/1-Variable] -1,39*Windgeschwindigkeit[m/s] -`
`0,23*Temperaturdifferenz(Graz-Kalkleiten)[°C] -`

```
0,131*Lufttemperatur_Mittag[°C]-0,658*daySa[Samstag: 0/1] -
0,704*daySuHo[Sonntag/Feiertag: 0/1] + 0,228*Feb[Februar: 0/1] +
0,363*Mar[März: 0/1-Var];
se = 0,902; r²corr = 0,7338; n = 429
```

Der Standardfehler dieses Modells ist mit $se = 0,902$ geringer und der Anpassungsgrad mit 73,4% höher als beim Modell mit Basis WS 03/04–05/06, das nur auf strengen Wintersaisonen basiert. Die Boxplotserie der Residuen zeigt dieselbe Charakteristik wie vorhin. Die Residuen der Trainingsdaten schwanken symmetrisch um Null, während die Residuen der Testdaten einen leicht negativen Bias aufweisen. Dies bestätigt die Vermutung, dass die im Laufe der Jahre getroffenen Maßnahmen eine Verringerung der PM_{10} Belastung mit sich gebracht haben, die nicht durch die Meteorologie zu Stande gekommen ist.

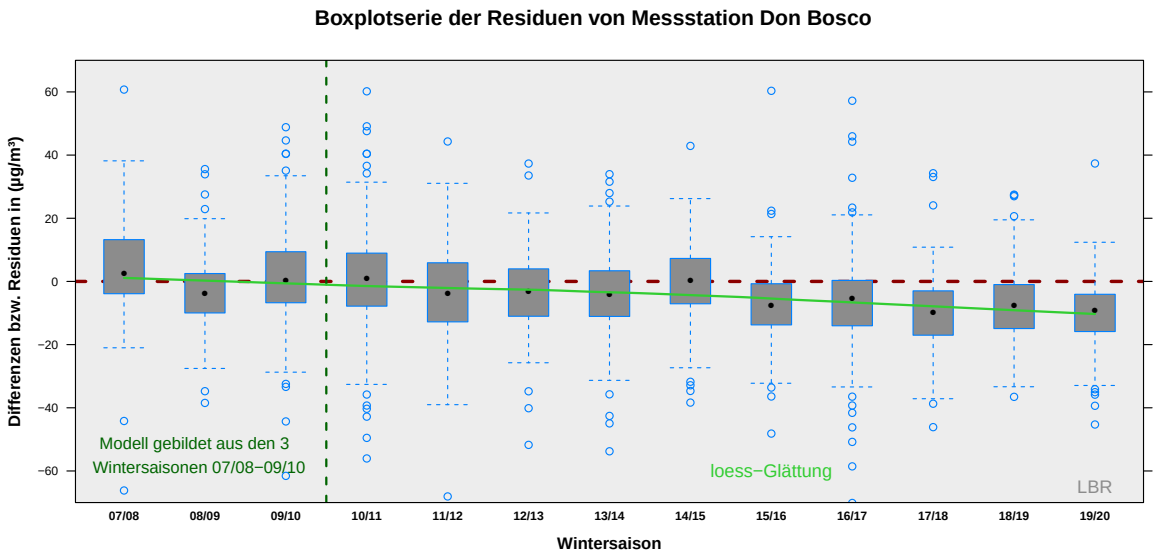


Abbildung 5.3: Boxplotserie der Residuen von TMW PM_{10} mit Modell basierend auf WS 07/08–09/10

In der folgenden Abbildung 5.4 werden die Residuen der Tagesmittelwerte PM_{10} vom 1.11.2019 bis 31.3.2020 als Zeitreihe zusammen mit einer Trendkurve dargestellt. Die Charakteristik eines negativen Bias über die gesamte Wintersaison ist klar zu erkennen. Mit einem Mittelwert von ca. –9,6 µg/m^3 und einem Standardfehler des Mittelwertes

von $12,65/\sqrt{152} = 1,03$ hat man eine signifikante Abweichung von der Null zu verzeichnen. Die seit der WS 10/11 durchgeführten Maßnahmen scheinen also eine signifikante Verringerung der PM_{10} Belastung mit sich gebracht zu haben. Der Ausreißer Ende März ist durch eine extrem hohe Feinstaubbelastung auf Grund des Saharastaubs erklärbar.

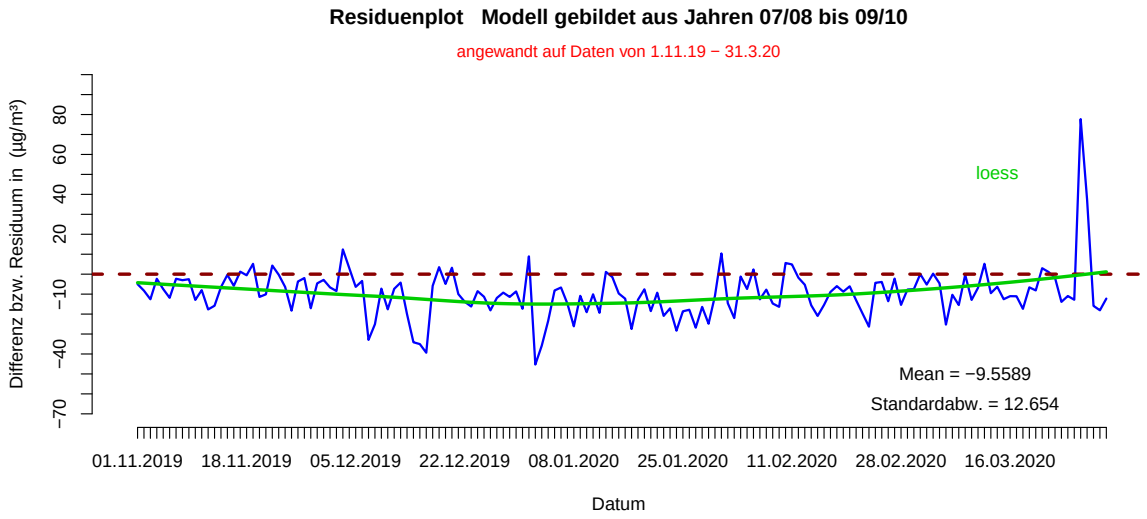


Abbildung 5.4: Zeitreihe mit Trend der Residuen von TMW PM_{10} in der WS 19/20

6 Zusammenfassung

Es wurde für die Wintermittelwerte der beobachteten siebzehn Wintersaisonen ein meteorologisches Modell beruhend nur auf meteorologischen Merkmalen (siehe Seite 68) generiert. Dieses hat folgende Darstellung für die Messorte **Graz-Don Bosco**, **Graz-Mitte** & **Graz-Süd**:

Modell Meteorologie (2020)

$$\mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}} = 78{,}46 - 1{,}32*\mathtt{Frosttage} - 2{,}49*\mathtt{Niederschlagstage[\%]} + 0{,}14*\mathtt{Inversionstage} + 25{,}21*\mathtt{Windgeschwindigkeit[m/s]} + 0{,}06*\mathtt{Frosttage}*\mathtt{Niederschlagstage[\%]};$$

$$\mathtt{se} = 6{,}0;\ r^2_{\mathtt{corr}} = 0{,}67;\ \mathtt{n} = 51$$

Dieses Modell hat einen Bestimmtheitskoeffizienten von $r^2_{\text{corr}} = 67\,\%$ und ist somit vergleichbar mit dem meteorologischen Modell des letzten Jahres.
Unter Verwendung der Kovariable `Splittstreuung` wurde ein alternatives Modell errechnet (siehe Seite 77), dessen erklärender Anteil der Regression (Modellgüte) sich sogar auf 83% im Vergleich zum rein meteorologischen Modell erhöhte. Das ist vor allem auf die komplexere Modellstruktur mit sechs Prädiktorvariablen zurückzuführen:

Modell Splitt (2020)

$$\mathtt{PM10}_{\mathtt{pr}} = 54{,}00 - 0{,}6685*\mathtt{Frosttage} - 1{,}6236*\mathtt{Niederschlagstage[\%]} + 0{,}0031*\mathtt{Splitt[t]} + 0{,}1118*\mathtt{Inversionstage} + 3{,}12*\mathtt{Spitzenwind[m/s]} + 0{,}032*\mathtt{Frosttage}*\mathtt{Niederschlagstage[\%]};$$

$$\mathtt{se} = 4{,}4;\ r^2_{\mathtt{corr}} = 0{,}82;\ \mathtt{n} = 51$$

Die nächsten drei Tabellen geben einen genaueren statistischen Einblick in die beiden verwendeten Modelle, sowie zusätzlich das meteorologische Modell plus Splittvariable an:

Modell Meteorologie (2020)

```
                                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)                    78.46249   18.04349   4.349 7.76e-05 ***
frost_m_s_d                    -1.32283    0.39734  -3.329  0.00174 **
niederschlag_m_s_d             -2.48961    0.53405  -4.662 2.81e-05 ***
wige_m_s_d                     25.20820   10.70991   2.354  0.02301 *
invers_m_s_d                    0.13625    0.05499   2.478  0.01703 *
frost_m_s_d:niederschlag_m_s_d  0.05905    0.01328   4.445 5.69e-05 ***
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
Residual standard error: 6.034 on 45 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7005,    Adjusted R-squared:  0.6672
F-statistic: 21.05 on 5 and 45 DF,  p-value: 8.676e-11
```

Modell Meteorologie (2020) inklusive Splitt

```
                                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)                    63.5495022 13.8270808   4.596 3.61e-05 ***
frost_m_s_d                    -0.8242046  0.3109824  -2.650 0.011132 *
niederschlag_m_s_d             -1.7842666  0.4196158  -4.252 0.000109 ***
splitt_m_s_d                    0.0029611  0.0004988   5.937 4.18e-07 ***
invers_m_s_d                    0.1415886  0.0414451   3.416 0.001376 **
wige_m_s_d                     15.7122081  8.2276207   1.910 0.062706 .
frost_m_s_d:niederschlag_m_s_d  0.0366056  0.0107006   3.421 0.001358 **
Residual standard error: 4.547 on 44 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8337,    Adjusted R-squared:  0.811
F-statistic: 36.77 on 6 and 44 DF,  p-value: 1.411e-15
```

Modell Splitt (2020)

```
                                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)                    54.0005327 14.8259297   3.642 0.000708 ***
frost_m_s_d                    -0.6685015  0.3073941  -2.175 0.035068 *
niederschlag_m_s_d             -1.6236317  0.4135573  -3.926 0.000300 ***
splitt_m_s_d                    0.0031055  0.0004781   6.496 6.29e-08 ***
invers_m_s_d                    0.1117619  0.0396461   2.819 0.007194 **
spg_m_s_d                       3.1161232  1.2758066   2.442 0.018673 *
frost_m_s_d:niederschlag_m_s_d  0.0318447  0.0105236   3.026 0.004129 **
Residual standard error: 4.44 on 44 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8414,    Adjusted R-squared:  0.8198
F-statistic: 38.91 on 6 and 44 DF,  p-value: 5.048e-16
```

- Mit Hilfe dieser Modelle können beobachtete $\mathtt{PM_{10}_WMW}$ von **Graz-Don Bosco**, **Graz-Mitte** oder **Graz-Süd** von zukünftigen Wintersaisonen danach **beurteilt** werden, ob sie **innerhalb** oder **außerhalb** der **bestimmten Bandbreite** (Prädiktionsintervall) liegen. Wäre ein gemessener Wert z.B. kleiner als die Bandbreite angibt, dann deutet das auf eine signifikante Reduktion der PM_{10}-Belastung hin, die durch andere Faktoren (z.B. Reduktionsmaßnahmen) verursacht sein kann.
- Die $\mathtt{PM_{10}_WMW}$ liegen bei beiden Modellen im jeweiligen erklärten Bereich.
- Bei gegebenen PM_{10}-Werten bzw. -Prognosen kann eine Prognose für die Anzahl der `Überschreitungstage` durch die folgende Formel errechnet werden (Seite 73):

$$\mathtt{Überschreitungstage_{pr}} = -60{,}46 + 2{,}65 * \mathtt{PM10_WMW}.$$

- Es wurde, wie erstmals in der WS 2015/16, wieder versucht zwei Regressionsmodelle für die im PM_{10}-Niveau unterschiedlichen Messorte Graz-Mitte Gries & Graz-Nord bzw. Graz-Don Bosco & Graz-Süd zu generieren.

Modell Meteorologie (Don Bosco & Süd)

$$\mathtt{PM10_{pr}} = 99{,}45 - 1{,}8*\mathtt{Frosttage} - 3{,}36*\mathtt{Niederschlagstage[\%]} + 0{,}16*\mathtt{Inversionstage} + 31{,}09*\mathtt{Windgeschwindigkeit[m/s]} + 0{,}07*\mathtt{Frosttage}*\mathtt{Niederschlagstage[\%]};$$

$$\mathtt{se} = 6{,}0;\ r^2_{\mathtt{corr}} = 0{,}63;\ \mathtt{n} = 34$$

Modell Meteorologie (Mitte & Nord)

$$\mathtt{PM10_{pr}} = 70{,}81 - 1{,}17*\mathtt{Lufttemperatur} + 0{,}22*\mathtt{Frosttage} - 0{,}53*\mathtt{Niederschlagstage[\%]} - 0{,}13*\mathtt{Inversionstage} + 32{,}76*\mathtt{Windgeschwindigkeit[m/s]} - 7{,}44*\mathtt{Spitzenwindgeschwindigkeit[m/s]} - 0{,}01*\mathtt{Frosttage}*\mathtt{Niederschlagstage[\%]};$$

$$\mathtt{se} = 3{,}93;\ r^2_{\mathtt{corr}} = 0{,}51;\ \mathtt{n} = 20$$

Für Graz-Don Bosco & Graz-Süd wurde ein brauchbares Beschreibungsmodell (Anpassungsgrad 0.63), basierend auf 17 Wintersaisonen, gefunden. Das Modell für Graz-Mitte & Graz-Nord, basierend auf 10 Wintersaisonen, ist hingegen ein Beschreibungsmodell mit einem etwas geringeren Anpassungsgrad von 0.51.

- Die Residuenanalyse basierend auf den folgenden Prognosemodellen für den TMW PM_{10} in Don Bosco sollte die Frage klären, ob Maßnahmen, unabhängig von der Metorologie, zu einer signifikanten Verbesserung der Feinstaubbelastung geführt haben.

Modell für TMW PM_{10} basierend auf WS 03/04–05/06

SQRT(PM10) = 8,3181 + 0,01*PM10_Mittag[µg/m^3] - 0,874*Niederschlag[0/1-Variable] -1,133*Windgeschwindigkeit[m/s] - 0,299*Temperaturdifferenz(Graz-Kalkleiten)[°C] - 0,0934*Lufttemperatur_Mittag[°C]-0,83*daySa[Samstag: 0/1] - 1,1431*daySuHo[Sonntag/Feiertag: 0/1] + 0,2514*Feb[Februar: 0/1] + 0,99*Mar[März: 0/1];

se = 1,005; r^2_{corr} = 0,6836; n = 402

Modell für TMW PM_{10} basierend auf WS 07/08–09/10

SQRT(PM10) = 7,3 + 0,0209*PM10_Mittag[µg/m^3] - 0,502*Niederschlag[0/1-Variable] -1,39*Windgeschwindigkeit[m/s] - 0,23*Temperaturdifferenz(Graz-Kalkleiten)[°C] - 0,131*Lufttemperatur_Mittag[°C]-0,658*daySa[Samstag: 0/1] - 0,704*daySuHo[Sonntag/Feiertag: 0/1] + 0,228*Feb[Februar: 0/1] + 0,363*Mar[März: 0/1-Var];

se = 0,902; r^2_{corr} = 0,7338; n = 429

- Sowohl beim ersten Modell, das auf drei strengen Wintersaisonen (03/04–05/06) basiert, als auch beim zweiten Modell auf Basis von drei milden Wintersaisonen (07/08–09/10) lässt sich eine statistisch signifikante Verringerung der Feinstaubbelastung erkennen, die unabhängig von der Meteorologie ist.

  Daher kann man vermuten, dass das im Laufe der Jahre umgesetzte Bündel an Maßnahmen, wie Modernisierung von Heizungsanlagen, Verrringerung des Hausbrandes, Erhöhung des Fernwärmeanteils, sowie Umstellung der Splittstreuung auf Salzstreuung, zu einer spürbaren Verringerung der Feinstaubbelastung geführt hat.

ANHANG A: Berechnung der Werte in Graz-Mitte 2009/2010

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	nr	ort_neu	saison _wi	pm10_mean	%	Berechnung	überschreitung_ sum	%	lute_ mean	%	frost_ sum	%	inversion_l uft3_sum	%	invers _sum	%	ltusg_k_ mean	Kalkleiten
2	1	Don Bosco	1	62,12342497	78%	D8/D2	103	66%	3,216	108%	50	110%	43	53%	79	75%	-0,2958	
3	2	Don Bosco	2	64,7256361	75%	D8/D3	111	61%	3,31	105%	57	96%	41	56%	78	76%	-0,3793	
4	3	Don Bosco	3	65,27881823	74%	D8/D4	118	58%	2,399	145%	67	82%	38	61%	55	107%	0,55144	
5	4	Don Bosco	4	51,23727785	95%	D8/D5	73	93%	6,098	57%	16	344%	27	85%	82	72%	-0,165	
6	5	Don Bosco	5	51,08060941	95%	D8/D6	70	97%	4,215	83%	34	162%	27	85%	57	104%	0,74312	
7	6	Don Bosco	6	39,01363135	124%	D8/D7	38	179%	4,053	86%	39	141%	27	85%	49	120%	0,96223	
8	**7**	**Don Bosco**	**7**	**48,50550941**			**68**		**3,488**		**55**		**23**		**59**		**0,59938**	2,888829211
9	8	Mitte	1	53,04239835	**85%**	**MITTELWERT(E2;E17;E24)**	78	**66%**	4,154	**107%**	39	**113%**	23	**55%**	59	**75%**	0,64187	
10	9	Mitte	2	51,55927346	**81%**	**MITTELWERT(E3;E18;E25)**	86	**64%**	4,188	**103%**	48	**100%**	20	**59%**	56	**77%**	0,51407	
11	10	Mitte	3	60,15594663	**75%**	**MITTELWERT(E4;E19;E26)**	105	**54%**	3,311	**141%**	52	**84%**	24	**65%**	32	**115%**	1,46414	
12	11	Mitte	4	45,53721734	**97%**	**MITTELWERT(E5;E20;E27)**	60	**92%**	7,021	**57%**	10	**369%**	15	**84%**	49	**74%**	0,75845	
13	12	Mitte	5	44,26738618	**93%**	**MITTELWERT(E6;E21;E28)**	56	**83%**	4,962	**85%**	30	**162%**	14	**84%**	35	**104%**	1,49966	
14	13	Mitte	6	39,04690447	**117%**	**MITTELWERT(E7;E22;E29)**	36	**155%**	4,874	**99%**	33	**138%**	9	**78%**	24	**122%**	1,78362	
15	14	Mitte	7	34,09549858			13		7,429		6		4		22		1,261	**2,889997936**
16	**14**	**Mitte**	**7**	**43,84312699**		**MITTELWERT(D9*E9;D10*E10;D11*E11;D12*E12;D13*E13;D14*E14)**	**53**		**4,415**		**44**		**12**		**38**		**1,52455**	
17	15	Süd	1	57,62102616	86%	D23/D17	91	84%	3,216	102%	50	116%	43	65%	79	84%	-0,2958	
18	16	Süd	2	58,76739792	85%	D23/D18	89	85%	3,31	99%	57	102%	41	68%	78	85%	-0,3793	
19	17	Süd	3	63,07643831	79%	D23/D19	103	74%	2,399	137%	67	87%	38	74%	55	120%	0,55144	
20	18	Süd	4	49,36088761	101%	D23/D20	66	115%	5,801	56%	17	341%	31	90%	81	81%	-0,3815	
21	19	Süd	5	51,7201255	96%	D23/D21	79	96%	3,815	86%	37	157%	32	88%	66	100%	0,34257	
22	20	Süd	6	41,44896028	120%	D23/D22	49	155%	3,867	85%	42	138%	35	80%	61	108%	0,77582	
23	**21**	**Süd**	**7**	**49,77921217**			**76**		**3,276**		**58**		**28**		**66**		**0,38578**	2,890187183
24	22	Nord	1	37,20597479	89%	D30/D24	43	49%	3,294	110%	49	112%	41	46%	87	67%	-0,219	
25	23	Nord	2	39,3244514	84%	D30/D25	47	45%	3,406	106%	54	102%	37	51%	82	71%	-0,2724	
26	24	Nord	3	47,16018225	70%	D30/D26	70	30%	2,572	140%	65	85%	32	59%	49	118%	0,72615	
27	25	Nord	4	34,7031859	96%	D30/D27	31	68%	6,165	59%	13	423%	25	76%	84	69%	-0,0989	
28	26	Nord	5	37,21289575	89%	D30/D28	37	57%	4,211	86%	33	167%	24	79%	54	107%	0,73985	
29	27	Nord	6	30,87669046	108%	D30/D29	16	131%	2,858	126%	41	134%	28	68%	42	138%	1,02141	
30	**28**	**Nord**	**7**	**33,21071322**			**21**		**3,61**		**55**		**19**		**58**		**0,71875**	2,890977416

ANHANG B: Straßenstreuung in Graz

	Saison	Jahr	Monat	Salz [t]	Splitt [t]	
Winter 2019/20	17	2019	Oktober	131,20	1,20	
	17	2019	November	0,00	0,05	
	17	2019	Dezember	117,56	399,75	
	17	2020	Jänner	55,90	260,62	
	17	2020	Februar	7,15	38,43	
	17	2020	März	3,08	9,98	
	17	**2019/2020**	**Gesamt**	**314,89**	**710,03**	**1 024,92**
Winter 2018/19	16	2018	Oktober	0,00	105,00	
	16	2018	November	61,20	49,01	
	16	2018	Dezember	529,34	146,82	
	16	2019	Jänner	1 429,95	263,88	
	16	2019	Februar	28,21	1,49	
	16	2019	März	0,00	0,00	
	16	**2018/2019**	**Gesamt**	**2 048,70**	**566,20**	**2 614,90**
Winter 2017/18	15	2017	Oktober	0,00	0,00	
	15	2017	November	175,96	120,35	
	15	2017	Dezember	485,23	145,03	
	15	2018	Jänner	749,03	179,40	
	15	2018	Februar	2 991,63	656,70	
	15	2018	März	861,59	104,35	
	15	**2017/2018**	**Gesamt**	**5 263,44**	**1 205,83**	**6 469,27**
Winter 2016/17	14	2016	Oktober	13,00	105,00	
	14	2016	November	2,46	4,58	
	14	2016	Dezember	332,02	100,22	
	14	2017	Jänner	1 449,67	216,16	
	14	2017	Februar	509,14	60,66	
	14	2017	März	0,04	0,11	
	14	**2016/2017**	**Gesamt**	**2 306,33**	**486,73**	**2 793,06**

	Saison	Jahr	Monat	Salz [t]	Splitt [t]	
Winter 2015/16	13	2015	Oktober	0,00	0,00	
	13	2015	November	32,45	123,60	
	13	2015	Dezember	46,70	153,00	
	13	2016	Jänner	278,53	911,52	
	13	2016	Februar	50,33	220,68	
	13	2016	März	12,05	47,30	
	13	**2015/2016**	**Gesamt**	**420,06**	**1 456,10**	**1 876,16**
Winter 2014/15	12	2014	Oktober	124,50	8,45	
	12	2014	November	4,50	4,00	
	12	2014	Dezember	129,76	650,00	
	12	2015	Jänner	127,83	857,67	
	12	2015	Februar	78,43	448,88	
	12	2015	März	0,00	0,05	
	12	**2014/2015**	**Gesamt**	**465,02**	**1 969,05**	**2 434,07**
Winter 2013/14	11	2013	Oktober	9,80	84,00	
	11	2013	November	10,31	10,08	
	11	2013	Dezember	169,20	46,69	
	11	2014	Jänner	1 102,29	255,15	
	11	2014	Februar	1 448,50	914,82	
	11	2014	März	0,33	0,40	
	11	**2013/2014**	**Gesamt**	**2 740,43**	**1 311,14**	**4 051,57**
Winter 2012/13	10	2012	Oktober	31,14	75,39	
	10	2012	November	34,00	6,80	
	10	2012	Dezember	1 002,29	319,85	
	10	2013	Jänner	1 374,24	342,22	
	10	2013	Februar	1 872,47	259,30	
	10	2013	März	933,48	101,31	
	10	**2012/2013**	**Gesamt**	**5 247,62**	**1 104,87**	**6 352,49**
Winter 2011/12	9	2011	Oktober	7,10	75,60	
	9	2011	November	45,37	74,58	
	9	2011	Dezember	65,15	25,60	
	9	2012	Jänner	668,74	246,23	
	9	2012	Februar	1 539,31	346,14	
	9	2012	März	0,04	0,07	
	9	**2011/2012**	**Gesamt**	**2 325,71**	**768,21**	**3 093,92**
Winter 2010/11	8	2010	Oktober	11,73	87,99	
	8	2010	November	394,92	127,53	
	8	2010	Dezember	1 407,13	949,27	
	8	2011	Jänner	270,12	395,12	
	8	2011	Februar	479,61	192,32	
	8	2011	März	116,81	53,07	
	8	**2010/2011**	**Gesamt**	**2 680,31**	**1 805,30**	**4 485,61**

	Saison	Jahr	Monat	Salz [t]	Splitt [t]	
Winter 2009/10	7	2009	Oktober	0,00	153,50	
	7	2009	November	15,50	15,42	
	7	2009	Dezember	972,28	465,39	
	7	2010	Jänner	2 526,38	834,66	
	7	2010	Februar	1 008,04	386,46	
	7	2010	März	365,44	97,36	
	7	**2009/2010**	**Gesamt**	**4 887,64**	**1 952,79**	**6 840,43**
Winter 2008/09	6	2008	Oktober	0,00	0,00	
	6	2008	November	347,63	337,73	
	6	2008	Dezember	357,20	388,64	
	6	2009	Jänner	795,64	653,37	
	6	2009	Februar	572,00	376,27	
	6	2009	März	40,96	13,73	
	6	**2008/2009**	**Gesamt**	**2 113,42**	**1 769,73**	**3 883,15**
Winter 2007/08	5	2007	Oktober	0,00	120,00	
	5	2007	November	71,16	42,50	
	5	2007	Dezember	549,32	522,97	
	5	2008	Jänner	222,62	264,07	
	5	2008	Februar	25,60	45,14	
	5	2008	März	12,30	3,00	
	5	**2007/2008**	**Gesamt**	**881,00**	**997,67**	**1 878,67**
Winter 2006/07	4	2006	Oktober	0,00	8,00	
	4	2006	November	59,25	82,50	
	4	2006	Dezember	92,76	131,62	
	4	2007	Jänner	334,37	630,57	
	4	2007	Februar	15,50	59,05	
	4	2007	März	0,00	0,00	
	4	**2006/2007**	**Gesamt**	**501,88**	**911,74**	**1 413,62**
Winter 2005/06	3	2005	Oktober	17,94	45,00	
	3	2005	November	623,12	1 327,07	
	3	2005	Dezember	827,37	1 543,54	
	3	2006	Jänner	323,32	1 566,48	
	3	2006	Februar	381,74	1 015,55	
	3	2006	März	140,17	419,30	
	3	**2005/2006**	**Gesamt**	**2 313,66**	**5 916,93**	**8 230,59**
Winter 2004/05	2	2004	Oktober	0,00	0,00	
	2	2004	November	4,20	224,50	
	2	2004	Dezember	139,60	551,02	
	2	2005	Jänner	28,65	257,25	
	2	2005	Februar	769,64	2 330,50	
	2	2005	März	220,85	775,00	
	2	**2004/2005**	**Gesamt**	**1 162,95**	**4 138,27**	**5 301,22**
	1	**2003/2004**	**Gesamt**	**1 087,00**	**5 798,00**	**6 885,00**

GRAZ - DON BOSCO

	Saison																	
	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	MW
gemessen																		
Frosttage_WS	50	57	67	16	34	39	55	60	42	46	25	19	22	53	33	29	24	39
Inv.tage_Graz-Kalkl_WS	79	78	55	82	57	49	59	74	75	60	65	38	74	66	60	56	69	64
Niederschlagstage_WS	60	51	60	46	52	63	66	46	41	65	66	49	49	45	64	58	60	55
Splitt [t]	5 798	4 138	5 917	912	998	1 770	1 953	1 805	768	1 105	1 311	1 969	1 456	487	1 206	566	710	1 933
Spitzenwind_WMW	5,20	5,49	4,84	5,50	5,92	5,59	4,91	4,47	5,64	5,03	4,87	5,40	4,39	4,72	4,83	5,01	5,32	5,13
PM10_WMW	**62,12**	**64,73**	**65,28**	**51,24**	**51,08**	**39,01**	**48,51**	**53,46**	**44,01**	**41,41**	**37,72**	**40,48**	**39,01**	**40,75**	**34,24**	**32,52**	**29,87**	45,61
Reihenfolge	3	2	1	5	6	12	7	4	8	9	14	11	13	10	15	16	17	
Ü.tage_PM10_WS	103	111	118	73	70	38	68	86	51	45	33	54	44	50	26	21	17	59
Standardisierung bzgl. Modelle																		
PM10 (Modell Splitt 2020)	**63,33**	**61,24**	**63,85**	**46,73**	**46,67**	**44,63**	**50,53**	**49,28**	**50,05**	**45,30**	**37,43**	**42,13**	**41,68**	**44,65**	**39,85**	**37,97**	**36,27**	47,15
Reihenfolge	2	3	1	7	8	11	4	6	5	9	16	12	13	10	14	15	17	
Ü.tage (Modell ÜT n+1)	105	113	114	75	75	42	68	82	55	48	38	46	42	47	30	25	19	60

Erster Block: gemessene Werte der Wintersaisonen

Zweiter Block: Modell Splitt (2019); Modell Überschreitungstage (n+1) mit PM10-beobachtet.

Höchste PM10 Belastung Winter 2005/06: WMW 65,28 µg/m³, 118 Überschreitungen

Niedrigste PM10-Belastung Winter 2019/2020: WMW 29,87 µg/m³, 17 Überschreitungen

GRAZ - MITTE

		Saison																	
		2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	MW
gemessen	Frosttage_WS	39	48	52	10	30	33	44	51	32	32	17	13	17	42	23	22	13	30
	Inv.tage_Graz-Kalkl_WS	59	56	32	49	35	24	38	46	40	39	35	22	56	40	33	27	37	39
	Niederschlagstage_WS	60	51	60	46	52	63	66	46	41	65	66	49	49	45	64	58	60	55
	Splitt [t]	5 798	4 138	5 917	912	998	1 770	1 953	1 805	768	1 105	1 311	1 969	1 456	487	1 206	566	710	1 933
	Spitzenwind_WMW	4,98	5,32	4,63	5,35	5,63	5,45	4,31	3,95	4,63	4,23	4,31	4,86	4,09	4,20	3,47	4,77	4,83	4,65
	PM10_WMW	**53,04**	**51,56**	**60,16**	**45,54**	**44,27**	**39,05**	**43,84**	**41,96**	**37,14**	**34,11**	**29,36**	**29,19**	**31,36**	**37,57**	**29,62**	**26,60**	**23,87**	38,72
	Reihenfolge	2	3	1	4	5	8	6	7	10	11	14	15	12	9	13	16	17	
	Ü.tage_PM10_WS	78	86	105	60	56	36	53	48	33	27	15	13	23	45	17	10	5	42
Standardi-sierung bzgl. Modelle	**PM10 (Modell Splitt 2020)**	**55,82**	**55,36**	**54,63**	**40,33**	**41,19**	**37,43**	**40,15**	**41,43**	**39,36**	**33,03**	**27,15**	**35,97**	**36,72**	**36,81**	**25,64**	**33,06**	**27,03**	38,89
	Reihenfolge	1	2	3	6	5	9	7	4	8	14	15	12	11	10	17	13	16	
	Ü.tage (Modell ÜT n+1)	80	76	100	60	56	42	55	50	36	28	15	14	20	38	17	9	3	41

Erster Block: gemessene Werte der Wintersaisonen

Zweiter Block: Modell Splitt (2019); Modell Überschreitungstage (n+1) mit PM10-beobachtet.

Höchste PM10 Belastung Winter 2005/06: WMW 60,16 µg/m³, 105 Überschreitungen

Niedrigste PM10-Belastung Winter 2019/20: WMW 23,87 µg/m³, 5 Überschreitungen

Bemerkung: Messstelle Graz-Mitte wurde am 11.12.2009 aufgelassen; für WS 2009/10 wurden interpolierte Werte verwendet;
ab WS 2010/11 die Werte der Messstelle Graz-Mitte Gries, die tendenziell niedrigere Werte aufweist im Vergleich zu Graz-Mitte.

GRAZ - SÜD

	Saison																	
	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	MW
gemessen																		
Frosttage_WS	50	57	67	17	37	42	58	62	44	43	27	21	22	57	35	34	27	41
Inv.tage_Graz-Kalkl_WS	79	78	55	81	66	61	66	79	81	61	72	47	84	73	70	65	77	70
Niederschlagstage_WS	60	51	60	46	52	63	66	46	41	65	66	49	49	45	64	58	60	55
Splitt [t]	5 798	4 138	5 917	912	998	1 770	1 953	1 805	768	1 105	1 311	1 969	1 456	487	1 206	566	710	1 933
Spitzenwind_WMW	4,69	4,81	4,38	4,99	4,90	4,95	4,30	4,14	5,04	4,57	4,59	5,12	4,19	4,66	4,51	5,18	5,30	4,72
PM10_WMW	**57,62**	**58,77**	**63,08**	**49,36**	**51,72**	**41,45**	**49,78**	**50,15**	**46,37**	**44,37**	**38,47**	**41,01**	**41,92**	**42,86**	**35,41**	**32,64**	**29,34**	45,55
Reihenfolge	3	2	1	7	4	12	6	5	8	9	14	13	11	10	15	16	17	
Ü.tage_PM10_WS	91	89	103	66	79	49	76	66	65	60	40	55	58	58	32	23	18	60
Standardisierung bzgl. Modelle																		
PM10 (Modell Splitt 2020)	**60,91**	**58,03**	**61,70**	**44,30**	**43,80**	**44,82**	**49,85**	**48,72**	**48,23**	**42,13**	**37,96**	**42,33**	**42,19**	**45,95**	**40,54**	**41,37**	**38,23**	46,53
Reihenfolge	2	3	1	9	10	8	4	5	6	13	17	11	12	7	15	14	16	
Ü.tage (Modell ÜT n+1)	93	96	108	70	77	48	71	72	62	56	40	47	50	52	33	25	17	60

Erster Block: gemessene Werte der Wintersaisonen

Zweiter Block: Für WS n/n+1: Modell Splitt (n) bis n=2016, Modell Meteorologie 2017 für n=2017; Modell Überschreitungstage (n+1) mit PM10-beobachtet.

Höchste PM10 Belastung Winter 2005/06: WMW 63,08 µg/m³, 103 Überschreitungen

Niedrigste PM10-Belastung Winter 2019/20: WMW 29,34 µg/m³, 18 Überschreitungen

GRAZ - NORD

	Saison																	
	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	MW
gemessen																		
Frosttage_WS	49	54	65	13	33	41	55	60	38	38	21	19	21	48	28	28	19	37
Inv.tage_Graz-Kalkl_WS	87	82	49	84	54	42	58	73	72	39	52	35	71	59	52	59	63	61
Niederschlagstage_WS	60	51	60	46	52	63	66	46	41	65	66	49	49	45	64	58	60	55
Splitt [t]	5 798	4 138	5 917	912	998	1 770	1 953	1 805	768	1 105	1 311	1 969	1 456	487	1 206	566	710	1 933
Spitzenwind_WMW	5,7	5,96	5,5	6,19	6,26	5,88	5,41	5,11	5,67	5,15	5,29	6,05	5,28	4,73	4,42	4,77	5,08	5,44
PM10_WMW	**37,21**	**39,32**	**47,16**	**34,70**	**37,21**	**30,88**	**33,21**	**36,00**	**31,83**	**25,13**	**26,58**	**31,35**	**28,47**	**25,85**	**20,96**	**23,92**	**21,93**	31,28
Reihenfolge	3	2	1	6	3	10	7	5	8	14	12	9	11	13	17	15	16	
Ü.tage_PM10_WS	43	47	70	31	37	16	21	27	18	1	14	18	12	20	6	5	7	23
Standardisierung bzgl. Modelle																		
PM10 (Modell Splitt 2020)	**44,27**	**44,50**	**43,45**	**32,03**	**33,23**	**29,97**	**32,22**	**33,87**	**31,91**	**26,57**	**21,73**	**28,48**	**29,24**	**32,85**	**18,32**	**26,14**	**27,30**	31,53
Reihenfolge	2	1	3	8	5	10	7	4	9	14	16	12	11	6	17	15	13	
Ü.tage (Modell ÜT n+1)	37	42	64	30	37	19	26	33	22	3	7	20	12	7	0	2	0	21

Erster Block: gemessene Werte der Wintersaisonen

Zweiter Block: Für WS n/n+1: Modell Splitt (n) bis n=2015, Modell Meteorologie 2017 für n=2017; Modell Überschreitungstage (n+1) mit PM10-beobachtet.

Höchste PM10 Belastung Winter 2005/06: WMW 47,16 µg/m³, 70 Überschreitungen

Niedrigste PM10-Belastung Winter 2017/18: WMW 20,96 µg/m³, 6 Überschreitungen

Mediane, Prozente & deren Ränge (über alle Orte)

	PM10 (µg/m³)			LUTE (°C)			WIND (m/s)			SPG (m/s)			FROSTTAGE			INVERSIONSTAGE			NIEDERSCHLAG			ÜBERSCHREITUNG		
		hoch	nieder		kalt	warm		wenig	viel		niedrig	hoch		viel	wenig		viel	wenig		wenig	viel		viel	wenig
2003/2004	45,50	3	15	2,93	3	15	0,61	16	2	4,17	16	2	25,1%	6	12	41,0%	3	15	32,8%	10	8	43,8%	3	15
2004/2005	46,61	2	16	3,10	4	14	0,63	17	1	4,16	15	3	29,1%	3	15	41,9%	1	17	28,0%	7	11	45,7%	2	16
2005/2006	52,78	1	17	1,34	1	17	0,55	11	7	3,97	8	10	33,7%	1	17	24,9%	16	2	33,0%	12	6	65,5%	1	17
2006/2007	39,71	5	13	6,27	17	1	0,59	14	4	4,32	17	1	7,8%	17	1	41,1%	2	16	25,3%	3	14	31,9%	5	13
2007/2008	38,27	6	12	4,35	10	8	0,60	15	3	4,15	13	5	18,3%	10	8	29,0%	12	6	28,4%	8	10	33,1%	4	14
2008/2009	32,69	11	7	3,50	6	12	0,57	12	6	3,97	9	9	22,0%	8	10	24,9%	15	3	39,4%	17	1	19,5%	10	8
2009/2010	37,21	7	11	4,18	9	9	0,49	3	15	3,73	5	13	27,6%	4	14	32,5%	9	9	36,3%	15	2	27,9%	7	11
2010/2011	40,36	4	14	3,51	7	11	0,50	5	13	3,70	4	14	32,0%	2	16	37,4%	5	13	25,3%	3	14	31,2%	6	12
2011/2012	36,69	8	10	3,43	5	13	0,52	9	9	4,08	11	7	21,3%	9	9	36,6%	6	12	22,4%	1	17	22,8%	9	9
2012/2013	33,56	9	9	2,83	2	16	0,48	2	16	3,53	2	16	22,4%	7	11	28,0%	14	4	35,7%	14	4	19,4%	11	7
2013/2014	30,19	14	4	6,00	16	2	0,51	6	12	3,78	7	11	12,4%	13	5	30,8%	10	8	36,3%	15	2	14,1%	14	4
2014/2015	32,76	10	8	5,47	12	6	0,52	8	10	3,99	10	8	9,9%	16	2	19,5%	17	1	26,9%	6	12	19,2%	12	6
2015/2016	31,04	12	6	5,65	14	4	0,49	4	14	3,75	6	12	11,2%	15	3	38,9%	4	14	26,8%	5	13	18,7%	13	5
2016/2017	30,23	13	5	4,72	11	7	0,51	7	11	3,70	3	15	27,5%	5	13	32,7%	8	10	25,3%	2	16	23,8%	8	10
2017/2018	27,00	15	3	3,51	8	10	0,41	1	17	3,44	1	17	16,4%	11	7	29,5%	11	7	35,2%	13	5	11,1%	15	3
2018/2019	26,12	16	2	5,54	13	5	0,53	10	8	4,15	14	4	15,5%	12	6	28,4%	13	5	31,9%	9	9	8,1%	16	2
2019/2020	22,65	17	1	5,86	15	3	0,58	13	5	4,14	12	6	11,3%	14	4	33,6%	7	11	32,8%	11	7	6,4%	17	1

Literaturverzeichnis

[1] **Hörmann S., Pfeiler B., Stadlober E. (2005):** *Analysis and prediction of particulate matter PM10 for the winter season in Graz.* Austrian Journal of Statistics, 34, 4, (2005) 307-326.

[2] **Hörmann S., Stadlober E. (2004):** *Modellierung und Prognose der Feinstaubkonzentration in Graz-Mitte für die Zeitperiode Herbst/Winter.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Dez. 2004.

[3] **Stadlober E. (2007):** *KAPA GS Life04 ENV/AT/000006: Technischer Endbericht.* Arbeitspaket 2: Statistische Prognosemodelle, Juli 2007.

[4] **Stadlober E., Pfeiler B. (2003a):** *Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen über ausgewählte Zeiträume.* Endbericht im Auftrag von Land Stmk. und Stadt Graz, Sept. 2003.

[5] **Stadlober E., Pfeiler B. (2003b):** *Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen von Mai 2003 - Oktober 2003.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Dez. 2003.

[6] **Stadlober E., Pfeiler B. (2004a):** *Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen von Mai 2003 - Dezember 2003.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, April 2004.

[7] **Stadlober E., Pfeiler B. (2004b):** *Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen von Oktober 2003 - März 2004.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Sept. 2004.

[8] **Stadlober E., Pfeiler B. (2004c):** *Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen von Oktober 2003 - März 2004.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Nov. 2004.

[9] **Stadlober E., Hörmann S., Pfeiler B. (2008):** *Quality and performance of a daily forecasting model.* Atmospheric Environment 43 (2008), 1098-1109.

[10] **Stadlober E., Pfeiler B. (2008):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Sep. 2008.

[11] **Stadlober E., Pfeiler B. (2009):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Mai 2009.

[12] **Stadlober E., Pfeiler B. (2010):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Mai 2010.

[13] **Stadlober E., Pfeiler B. (2011):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2010/2011.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Juli 2011.

[14] **Stadlober E., Pfeiler B. (2012):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2011/2012.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Dezember 2012.

[15] **Stadlober E., Moser F. (2013):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2012/2013.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Oktober 2013.

[16] **Stadlober E., Moser F. (2015):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2013/2014.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, März 2015.

[17] **Stadlober E., Pfeiler B. (2016):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2014/2015.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Februar 2016.

[18] **Stadlober E., Pfeiler B. (2016):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2015/2016.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Juli 2016.

[19] **Stadlober E., Burger-Ringer L. (2018a):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2016/2017.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, April 2018.

[20] **Stadlober E., Burger-Ringer L. (2018b):** *Ermittlung von saisonbereinigten PM10-Mittelwerten des Winterhalbjahres auf Basis der Daten 2003/2004-2017/2018.* Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, November 2018.

[21] **Stadlober E., Burger-Ringer L. (2019):** *Saisonbereinigte PM10-Mittelwerte des Winterhalbjahre 2003/2004-2018/2019*. Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Dezember 2019.