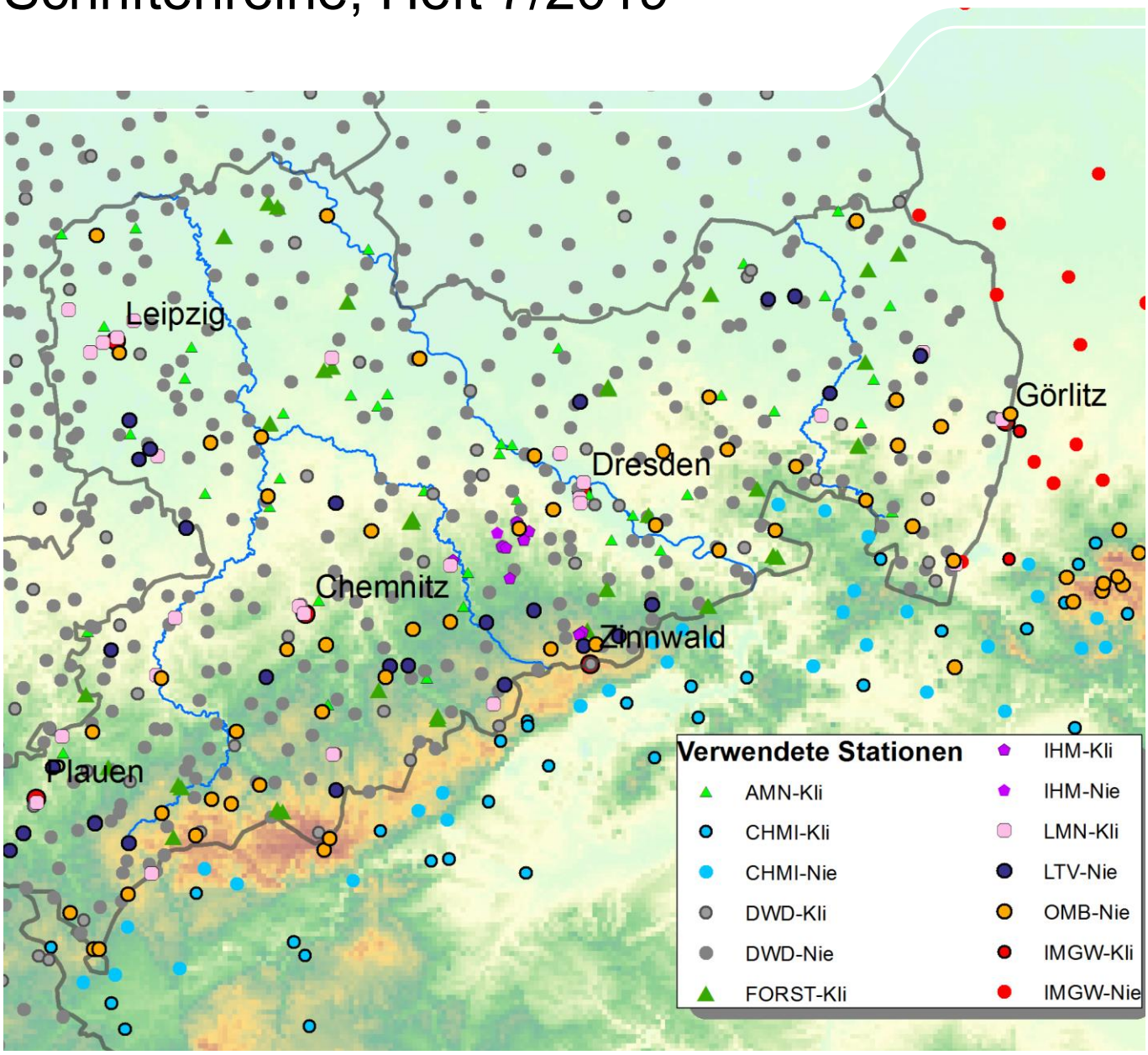
LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

Klima-Referenzdatensatz 1961-2015

Schriftenreihe, Heft 7/2019



Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes

Prof. Christian Bernhofer, Thomas Pluntke, Dr. Klemens Barfus, Majana Heidenreich,
Dr. Rico Kronenberg, Corina Hauffe, Dr. Michael Wagner, Dr. Robert Schwarze, Benjamin Gutzmann

Inhalt

1 Einleitung 11
2 Daten 13
2.1 Klimadaten 14
2.1.1 Daten des Deutschen Wetterdienstes 14
2.1.2 Tschechische Daten 16
2.1.3 Polnische Daten 16
2.1.4 Landeseigene Messnetze 17
2.1.5 Vergleich der verwendeten Messgeräte 18
2.2 Gebietsuntergliederung 23
3 Methoden 28
3.1 Plausibilitätsprüfungen 28
3.1.1 Ausreißertests 28
3.1.2 Weitere Tests 33
3.2 Datenverfügbarkeit 35
3.3 Vergleich der verwendeten Messnetze 37
3.4 Analyse der resultierenden Messrealität 37
3.5 Lückenfüllungen 40
3.5.1 Lückenfüllungen durch Berechnungen 40
3.5.2 Lückenfüllung mittels Multipler Regression 40
3.6 Berechnungen von abgeleiteten Größen 49
3.6.1 Niederschlagskorrektur 49
3.6.2 Potentielle Verdunstung 49
3.7 Homogenitätsprüfung 50
3.7.1 Allgemeines 50
3.7.2 Metadaten 50
3.7.3 Verwendete Methode 51
3.7.4 Homogenisierung 58
3.7.5 Homogenitätsprüfung der Agrarmeteorologischen Stationen 58
3.8 Qualitätsflagging 59
3.9 Validierung des Referenzdatensatzes 60
3.9.1 Meteorologische Validierung 60
3.9.2 Hydrologische Validierung 61
4 Ergebnisse 64
4.1 Datenverfügbarkeit 64
4.2 Datenvollständigkeit 72
4.3 Reihenverlängerung der Station Zinnwald-Georgenfeld 74
4.4 Vergleich der Messnetze 76
4.4.1 Höhengradienten der Messnetze der nationalen Wetterdienste 76
4.4.2 Höhengradienten des DWD und der Landesmessnetze 83
4.4.3 Vergleich der Jahresgänge 87
4.4.4 Vergleich der Boxplots der Messnetze 94
4.5 Analyse der resultierenden Messrealität 105
4.6 Erzeugung des Referenzdatensatzes 112
4.6.1 Ergebnisse der Ausreißer-/ Plausibilitätsprüfungen 112
4.6.2 Ergebnisse der Lückenfüllung 119

4.6.3 Homogenitätsprüfungen 120
4.6.4 Resultierende Datensätze 124
4.7 Validierung des Referenzdatensatzes 127
4.7.1 Meteorologische Validierung 127
4.7.2 Hydrologische Validierung 133
4.8 Benutzeroberfläche 142
5 Bewertung, Empfehlung und Ausblick 146
5.1 Bewertung 146
5.2 Ausblick 148
6 Zusammenfassung 149
Literaturverzeichnis 150
Anhang 153

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet und vorhandene Messnetze 15
Abbildung 2: Klimaräume Sachsens 24
Abbildung 3: Gebietsuntergliederung aus hydrologischer Sicht 25
Abbildung 4: Gebietsuntergliederung aus landwirtschaftlicher Sicht 26
Abbildung 5: Gebietsuntergliederung aus naturräumlicher Sicht 26
Abbildung 6: Gebietsuntergliederung aus forstlicher Sicht 27
Abbildung 7: Monatsspezifische Schwellenwerte für die Stationen Dresden und Fichtelberg 29
Abbildung 8: Anteil an Ausreißern am Gesamtdatensatz des Untersuchungsgebietes in Abhängigkeit vom gewählten Faktor des Perzentilansatzes 30
Abbildung 9: Vergleich beobachteter Niederschläge und Windgeschwindigkeiten mit den aus Nachbarstationen ermittelten Referenzwerten für Dresden und Zinnwald 32
Abbildung 10: Auswahl von Monaten mit hoher bzw. niedriger räumlicher Variabilität des Niederschlags: Interpolierter Niederschlag, Semivariogramm und Krigevarianz 39
Abbildung 11: Validierung der Lückenfüllungsmethode für den Niederschlag RR und die Minimumtemperatur TN für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg 42
Abbildung 12: Vorhersageintervalle aller lückengefüllten DWD-Tageswerte im Untersuchungsgebiet 45
Abbildung 13: Häufigkeit des relativen Vorhersagefehlers aller Lückenfüllungen des täglichen Niederschlags im DWD-Netz für drei Niederschlagsklassen. Statistische Kennwerte des Vorhersagefehlers sind unter jedem Plot tabelliert 47
Abbildung 14: Angepasste Potenzfunktionen an die Beziehung des relativen Vorhersagefehlers in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe 48
Abbildung 15: Ergebnisse des Homogenitätstests für die Sonnenscheindauer der Station Jena im Winter. 56
Abbildung 16: Ergebnisse des Homogenitätstests für die Niederschlag der Station Artern im Winter. 57
Abbildung 17: Doppelsummenanalyse des Niederschlags zwischen der Testreihe Baruth und der Referenzreihe Jonsdorf 59
Abbildung 18: Verfügbarkeit täglicher Daten der Temperatur für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet 65
Abbildung 19: Verfügbarkeit täglicher Daten des Niederschlags RR und der Schneehöhe SN für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet 67
Abbildung 20: Verfügbarkeit täglicher Daten der Windgeschwindigkeit FF und der Relativen Luftfeuchte für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet 68
Abbildung 21: Verfügbarkeit täglicher Daten des Dampfdrucks und Luftdrucks für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet 69
Abbildung 22: Verfügbarkeit täglicher Daten des Bedeckungsgrads und der Sonnenscheindauer für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet 71
Abbildung 23: Verfügbarkeit monatlicher Daten aller Klimaelemente des DWD-Messnetzes im Untersuchungsgebiet 72
Abbildung 24: Datenvollständigkeit für den Niederschlag in einem Klimaraum Sachsens; Daten des DWD 73
Abbildung 25: Q-Q-Plot zwischen beobachteter und simulierter Reihe für die Validierung der Methode 75
Abbildung 26: Lückengefüllte Niederschläge der Reihe Zinnwald 75
Abbildung 27: Vergleich der Höhengradienten für Mittel- und Maximumtemperatur für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz 77
Abbildung 28: Vergleich der Höhengradienten für Minimumtemperatur für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz 78

Abbildung 29: Vergleich der Höhengradienten für Niederschlag und relative Feuchte für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz 79
Abbildung 30: Vergleich der Höhengradienten für Sonnenscheindauer und Schneehöhe für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz 81
Abbildung 31: Vergleich der Höhengradienten für Windgeschwindigkeit und Dampfdruck für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz 82
Abbildung 32: Vergleich der Höhengradienten der Mittel- und Maximumtemperatur für DWD- und sächsische Landesmessnetzdaten 84
Abbildung 33: Vergleich der Höhengradienten der Minimumtemperatur und Windgeschwindigkeit für DWD- und sächsische Landesmessnetzdaten 85
Abbildung 34: Vergleich der Höhengradienten des Niederschlags und der relativen Feuchte für DWD- und sächsische Landesmessnetzdaten 86
Abbildung 35: Jahresgänge der Mitteltemperatur verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 87
Abbildung 36: Jahresgänge der Minimumtemperatur verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern) 88
Abbildung 37: Jahresgänge der Maximumtemperatur verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 89
Abbildung 38: Jahresgänge des Niederschlags verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 90
Abbildung 39: Jahresgänge der Relativen Feuchte verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 91
Abbildung 40: Jahresgänge der Windgeschwindigkeit verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 92
Abbildung 41: Jahresgänge der Globalstrahlung verschiedener Messnetze 93
Abbildung 42: Boxplot der Mitteltemperatur aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 95
Abbildung 43: Boxplots der Minimumtemperatur aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 96
Abbildung 44: Boxplots der Maximumtemperatur aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 97
Abbildung 45: Boxplots des Niederschlags aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 99
Abbildung 46: Boxplots der relativen Feuchte aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 100
Abbildung 47: Boxplots der Windgeschwindigkeit aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 102
Abbildung 48: Boxplots der Globalstrahlung aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume 104
Abbildung 49: Zeitliche Variabilität der Krigevarianz des Niederschlags für Bedingungen mit niedriger und hoher räumlicher Variabilität zu unterschiedlichen Zeitpunkten 106
Abbildung 50: Krigefehler des Niederschlags für Teilräume Sachsen für normale und stark variable Witterungsverhältnisse 108
Abbildung 51: Krigefehler für ein Niederschlagsereignis mit hoher räumlicher Varianz bei der Stationsverteilung von 2012 für verschiedene räumliche Untergliederungen Sachsens 110
Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der Krigefehler der Mitteltemperatur, der Sonnenscheindauer und der relativen Feuchte für Teilgebiete Sachsens. 111
Abbildung 53: Krigefehler der Mitteltemperatur, der Sonnenscheindauer und der relativen Feuchte für Witterungen mit hoher räumlicher Varianz bei der Stationsverteilung von 2012 112
Abbildung 54: Gemessene Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe an der tschechischen Station As im Vergleich zu der sehr hoch gelegenen DWD Station Fichtelberg. 117
Abbildung 55: Anzahl der Instrumentenwechsel bei den Niederschlagsstationen, Anzahl der Ortswechsel und Anzahl der signifikanten Bruchpunkte für den Niederschlag 122
Abbildung 56: Identifizierte signifikante Bruchpunkte in den Niederschlagsreihen 123
Abbildung 57: Doppelsummenanalyse und Alexanderson-Test der Maximumtemperatur für die Testreihe Pillnitz und die homogene Referenzreihe Doberlug-Kirchhain 124

Abbildung 58: Bivariate Konsistenz (Mitteltemperatur und Niederschlag) der Stationen Dresden und Zinnwald für die Originalreihe sowie die korrigierte und Lücken gefüllte Reihe.....128
Abbildung 59: Bivariate Konsistenz (Mitteltemperatur und relative Luftfeuchte) der Stationen Dresden und Zinnwald für die Originalreihe sowie die korrigierte und Lücken gefüllte Reihe.....129
Abbildung 60: Abhängigkeit des NRMSD von der Distanz der Stationen untereinander als Maß für die multivariate Konsistenz der DWD Stationen; Originalreihen sowie korrigierte und Lücken gefüllte Reihen.....130
Abbildung 61: Vergleich einer beobachteten Periode mit einer für eine Station lückengefüllten Periode für die Temperatur, den Niederschlag und die Windgeschwindigkeit in 10 m. Stationen: Görlitz: 1684, Leipzig/Halle: 2932, Fichtelberg: 1358, Carlsfeld: 840. 132
Abbildung 62: Vergleich der täglichen, korrigierten Niederschläge aus dem Referenzdatensatz und der mit mittleren monatlichen Korrekturfaktoren korrigierten Niederschläge 133
Abbildung 63: Ganglinien verschiedener Wasserhaushaltsgrößen und Zeiträume für das Pegeleinzugsgebiet Oehlisch 138
Abbildung 64: Dauerlinien verschiedener Wasserhaushaltsgrößen für das Pegeleinzugsgebiet Dohna 139
Abbildung 65: Histogramme für verschiedene Wasserhaushaltsgrößen und Zeiträume für das Pegeleinzugsgebiet Aue 1.....140
Abbildung 66: Monatsmittel des Durchflusses am Pegel Dohna im Zeitraum Nov. 1967 bis Okt. 2004 141
Abbildung 67: Screenshot der Benutzeroberfläche für den Referenzdatensatz 142
Abbildung 68: Krigefehler von Monatsdaten des Niederschlags bei hoher räumlicher Variabilität für das Jahr 2012 basierend auf DWD-Daten 147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spektrum der Klimaelemente und abgeleiteter Größen 13
Tabelle 2: Koordinaten des Untersuchungsgebietes 13
Tabelle 3: Übersicht der Messnetzbetreiber und Abkürzungen 14
Tabelle 4: Gegenüberstellung von Monats- und Tageswerten (MW, TW) 16
Tabelle 5: Messgeräte und -prinzipien der verschiedenen Messnetze 19
Tabelle 6: Charakteristika der Klimaräume (KRONENBERG et al., 2015) 24
Tabelle 7: Übersicht über angewendete Plausibilitätstest (MAD-Test Absolute Abweichung vom Median, MC-Test für „schiefe“ Daten). 35
Tabelle 8: Anzahl an erlaubten Fehlwerten in Prozent für verschiedene Fragstellungen 36
Tabelle 9: Ergebnisse der Validierung der Lückenfüllung von Tages- und Monatswerten verschiedener Klimaelemente für die Stationen Dresden und Fichtelberg 43
Tabelle 10: Festlegung der Schwellenwerte für die Klassifizierung der Vorhersageintervalle auf Basis der Signifikanz der Regressionsgeraden und des Vorhersageintervalls (* bei Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % = signifikant; n. s.= nicht signifikant) 48
Tabelle 11: Mittelwerte der Niederschlagskorrektur für tägliche und monatliche Datenreihen 49
Tabelle 12: Metadaten der Niederschlagsmessungen der Station Cottbus, Abruf an zwei aufeinanderfolgenden Jahren 52
Tabelle 13: In der Projekt-Datenbank aufgeführte Niederschlagsmessgeräte des DWD und deren Unterteilung 54
Tabelle 14: Ausgewählte sächsische Modellgebiete für Wasserhaushaltsberechnungen 62
Tabelle 15: Zur Lückenfüllung der Station Zinnwald verwendeten Stationen. 74
Tabelle 16: Ergebnisse der Validierung der Lückenfüllung der Station Zinnwald 75
Tabelle 17: Auffällige Werte der Temperatur 98
Tabelle 18: Auffällige Werte des Niederschlags 99
Tabelle 19: Auffällige Werte der relativen Feuchte 101
Tabelle 20: Auffällige Werte der Windgeschwindigkeit 103
Tabelle 21: Auffällige Werte der Globalstrahlung 104
Tabelle 22: Einschätzung der Plausibilität der als Ausreißer markierten Niederschläge 113
Tabelle 23: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen aus dem DWD-Netz 115
Tabelle 24: Ergebnisse des Tests der Reihung TN-TM-TX 115
Tabelle 25: Ergebnisse des Tests der Reihung TN-TM-TX 116
Tabelle 26: Windgeschwindigkeiten an der Station Fichtelberg z. Z. des Wintersturms Kyrill, sowie zwei Ausreißer der Station Halle-Kröllwitz 116
Tabelle 27: Ergebnisse des Plausibilitätstestes der Sonnenscheindauer; Abgleich mit der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer, dem Referenzwert aus den umgebenden Stationen und der aus dem Bedeckungsgrad berechneten Sonnenscheindauer 119
Tabelle 28: Übersicht über die Anzahl von Lückenfüllungen und klimatologischen Mittelwerten der Periode 1961-2015 für die Rohdaten und prozessierten Daten des DWD 120
Tabelle 29: Ergebnisse der Homogenitätsprüfung für die Stationen des deutschen, tschechischen und polnischen Wetterdienstes 121
Tabelle 30: Agrarmeteorologische Stationen, an denen Klimawandelversuche durchgeführt werden 126
Tabelle 31: Mittelwerte der potentiellen Verdunstung für zwei Agrarstandorte und die DWD-Station Dresden-Klotzsche 127
Tabelle 32: Angaben zu Stationen zum Vergleich der unterschiedlichen Korrekturverfahren 134

Tabelle 33: Vergleich der mittleren Jahresniederschläge (1967-2005) für die verschiedenen meteorologischen Eingangsdatensätze in den ausgewählten Modelleinzugsgebieten 135
Tabelle 34: Prozentuale Abweichungen der vier Optimierungsparameter der Variante RDS von KNK für sieben ausgewählte Einzugsgebiete 136
Tabelle 35: Vergleich der simulierten langjährigen mittleren Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Grundwasserzufluss im Zeitraum 1967-2005 für die ausgewählten Untersuchungsgebiete 137
Tabelle 36: Mittlerer, flächenhafter Krigefehler von Monatsdaten bei geringer und hoher räumlicher Variabilität für das Jahr 2012 147

Abkürzungsverzeichnis

AMN	Agrarmeteorologisches Netz
BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Sachsen
CHMI	Tschechischer Wetterdienst
DD	Dampfdruck
DWD	Deutscher Wetterdienst
ET	Potentielle Verdunstung
FF	Windgeschwindigkeit
FOR	Forstmessnetz
FTP	File Transfer Protocol (dt. Dateiübertragungsprotokoll)
GS	Globalstrahlung
GUI	graphical user interface (dt. grafische Benutzeroberfläche)
IHM	Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden
IMGE	Polnischer Wetterdienst
KNK	KliWES Neukalibrierung
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LHWZ	Landeshochwasserzentrum, Sachsen
LMN	Luftmessnetz
LTV	Landestalsperrenverwaltung Sachsen
MW	Monatswert
NN	Bedeckungsgrad
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRMSD	Normalisierte Root Mean Square Differenz
OMB	Ombrometer
PP	Luftdruck
RF	Relative Feuchte
RK	Niederschlag, korrigiert
RDS	Referenzdatensatz
RR	Niederschlag
SD	Sonnenscheindauer
SN	Schneehöhe
SO	Sommer
TM	Mitteltemperatur
TN	Minimumtemperatur
TM	Maximumtemperatur
TW	Tageswert
WEREX	Statistisches Downscaling Klimamodell
WI	Winter
WMO	World Meteorological Organization (dt. Weltorganisation für Meteorologie)
YY	Jahr

1 Einleitung

Das Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2012 führt den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel zusammen. Es enthält eine mittelfristige strategische Planung für die Energie- und Klimapolitik der Sächsischen Staatsregierung bis 2020. Folgende Strategien werden hierbei verfolgt:

- Beobachtung der Klimaentwicklung und Bereitstellung von Klimawissen,
- Ermittlung von Betroffenheit, Abschätzung von Klimafolgen und Entwicklung von Anpassungsstrategien,
- Minderung von Treibhausgasemissionen sowie
- Forschungsförderung, Erweiterung von Bildung und Kooperationsausbau.

Das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) ist mit für die Umsetzung dieses Programms zuständig. Für diese Facharbeiten ist eine verlässliche meteorologische Datengrundlage unabdingbar. Umfassend geprüfte und möglichst lange, vollständige Datenreihen von Temperatur, Niederschlag, Feuchte, Strahlung, Wind etc. werden benötigt, um

- Klimaanalysen (z. B. Trends) und Energiebedarfsanalysen durchzuführen,
- Risiken zu bewerten (z. B. Sturm, Hitze, Dürre, Starkregen),
- Projektionsdaten zu generieren (WEREX; Trendfortschreibung mittels Wettergeneratoren) und zu validieren (REMO, CCLM, STAR, WEREX) sowie
- Daten für die Impaktmodellierung (z. B. Wasserhaushalt, landwirtschaftliche Ertragsmodelle, Waldwachstumsmodelle) zur Verfügung zu stellen.

Insbesondere die Analyse von witterungsbedingten Extremen stellt – wie aktuelle Untersuchungen (z. B. BERNHOFER et al. 2016) zeigen – hohe Anforderungen an die Länge und Qualität der Datenreihen. Daher gibt es umfangreiche Bestrebungen auf allen Ebenen lange, konsistente und gut dokumentierte Datensätze zu erstellen (für Sachsen z. B. BFUL 2016, FREYDANK 2014a, b) und verfügbar zu machen (für Europa z. B. das Europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus, https://climate.copernicus.eu/).

Die Verfügbarkeit klimatologisch belastbarer Beobachtungsdaten wird durch die Neuausrichtung des Messnetzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) auf eine harte Probe gestellt. Wie der DWD bereits angekündigt hat, werden bis zum Jahr 2021 alle hauptamtlichen Messstationen auf den automatischen Betrieb umgestellt (DWD 2015). Ebenso erfolgt im Rahmen der Neuausrichtung eine Ausdünnung der Messnetze. Dies stellt das Klimamonitoring vor die Herausforderung, die klimatologische Konsistenz der Zeitreihen zu erhalten bzw. zu bewerten, um diese Zeitreihen sinnvoll auswerten zu können. Das Klimanetzwerk Sachsen fordert daher alle Messnetzbetreiber auf, sich für den Erhalt qualitativ hochwertiger Messreihen einzusetzen und sich bei Veränderungen der Beobachtungsnetze untereinander abzustimmen, um Synergien optimal zu nutzen (KLINES 2009, KLINES 2011). Doch nicht nur das Klimamonitoring, auch die Klimafolgenabschätzung gründet auf Beobachtungsdaten. Deshalb fordert das Deutsche Klima Konsortium belastbare Daten und Beobachtungsmethoden, welche einen wesentlichen Pfeiler der modellgestützten Klimafolgenabschätzung durch modellbasierte Projektionen darstellen (DKK 2015). Bei den geplanten Änderungen der Messnetze und Beobachtungsroutinen ist von einem quantitativen und qualitativen Informationsverlust auszugehen, der nicht vollständig durch andere Verfahren (etwa durch vermehrte Nutzung von Fernerkundung, z. B. Niederschlag aus RADAR-Daten) ausgeglichen werden kann. Um diesen abschätzen zu können, müssen die Datenreihen im regionalen Maßstab bewertet werden. Zur Veranschaulichung der Bedeutung der Datenqualität seien zwei konkrete Beispiele erwähnt:

- Probleme mit der Homogenität von Datenreihen können klimatologische Trends verschleiern oder falsche Trends vortäuschen.
- Die korrekte Einstufung von extremen Niederschlägen als Ausreißer oder realer Wert ist von immenser Bedeutung für Hochwasseruntersuchungen und die Ableitung witterungsbedingter Extreme.

Das LFULG zielt mit dem in diesem Rahmen bearbeiteten FuE-Projekt auf die Bewertung der derzeitigen und geplanten meteorologischen Datengrundlagen ab, um die Bedingungen eines langfristigen, qualitativ hochwertigen Klima- und Klimafolgenmonitoring für den Freistaat Sachsen zu dokumentieren. Des Weiteren soll ein Klimareferenzdatensatz (RDS) zur weiteren Verwendung in der regionalen Klima- und Klimafolgenanalyse sowie für die Erzeugung sächsischer Klimaprojektionen mit dem favorisierten Regionalisierungsverfahren WEREX erstellt und validiert werden.

Datennutzer bedienen sich unterschiedlicher Methoden, um Datenlücken zu füllen, die Plausibilität und Homogenität von Zeitreihen zu testen bzw. Klimagrößen abzuleiten (z. B. korrigierter Niederschlag). Fehlende Zeit und ein eingeschränktes Verständnis der Daten und Methoden können dazu führen, dass die Qualität der resultierenden Datensätze oft nicht dem Stand des Wissens entspricht. Der Anspruch dieses Projektes ist es, einen qualitativ hochwertigen Datensatz für die Periode 1961-2015 zu generieren, der eine Vielzahl von Nutzeranforderungen erfüllt und so eine direkte Nutzung erlaubt.

Erstmals soll dabei durch eine systematische Analyse von Daten aus Messnetzen des Geschäftsbereichs des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft sowie Daten der Nachbarstaaten getestet werden, ob die Daten des DWD mit Hilfe dieser Daten sinnvoll ergänzt werden können. Die sich daraus ergebende Datendichte soll für die Vergangenheit und für die nahe Zukunft bewertet werden.

Durch ein Datenflagging[1] soll eine höchst mögliche Transparenz der Qualität des Datensatzes gewährleistet werden. Das bildet gleichzeitig die Grundlage für einen nutzerspezifischen Zugriff auf den RDS. Es wird angestrebt, dass dabei z. B. zwischen guter flächenhafter Abdeckung (etwa für Wasserhaushaltsuntersuchungen) und hoher zeitlicher Homogenität (etwa bei Trenduntersuchungen) unterschieden werden kann. Eine unabhängige Überprüfung des RDS erfolgt durch exemplarische Modellierungen des Wasserhaushaltes an ausgewählten sächsischen Einzugsgebieten. Folgende Anforderungen soll der Referenzdatensatz erfüllen:

- LANGE REIHEN (maximale Ausnutzung der digital vorliegenden, instrumentell gemessenen Klimadaten),
- QUALITÄTSGEPRÜFT (Entfernung unplausibler Werte (u. a. nicht klimatologische Ausreißer), homogenitätsgeprüft),
- LÜCKEN GESCHLOSSEN (möglichst Schließung der Reihe 1961-2015),
- NACHVOLLZIEHBAR (durch Flags werden Prozessierungsschritte nachvollziehbar und spezifische Datenabfragen möglich),
- MULTIPLE ANWENDUNGEN (spezifische Abfragen der Datenbank ermöglichen Nutzung mit unterschiedlichen Anforderungen an Datenqualität),
- BENUTZERFREUNDLICH (einfacher Standard bzw. „Experten“-Zugriff ermöglicht, gut verständliche Dokumentation, Daten in unterschiedlichen Formaten erhältlich).

[1] Kennzeichnung der Daten (engl. to flag: kennzeichnen)

2 Daten

Für die in diesem Projekt beabsichtigten Datenanwendungen (Klimaanalyse, hydrologische Modellierung und Input für das Regionale Klimamodell WEREX) werden die in Tabelle 1 erwähnten Klimaelemente in eine MySQL-Datenbank integriert und nachfolgend bearbeitet.

Tabelle 1: Spektrum der Klimaelemente und abgeleiteter Größen

Kürzel	Klimaelement	Einheit	Einheit für WHH-Modell (ArcEgmo)
TX	Tagesmaximumtemperatur in 2 m	°C	°C
TM	Tagesmitteltemperatur in 2 m	°C	°C
TN	Tagesminimumtemperatur in 2 m	°C	°C
RR	Niederschlagshöhe	mm	mm/d
RK	Niederschlagshöhe korrigiert	mm	mm/d
RF	Relative Luftfeuchtigkeit	%	%
SD	Sonnenscheindauer	h	h
GS	Globalstrahlung	W/m²	J/cm²d
FF	Windgeschwindigkeit in m	m/s in 10 m Höhe	m/s in 2 m Höhe
PP	Luftdruck	hPa	-
DD	Dampfdruck	hPa	-
NN	Wolkenbedeckung	Achtel	-
SN	Schneehöhe	cm	-
ET	Potentielle Verdunstung	mm	-
KWB	Klimatische Wasserbilanz	mm	-

Das Untersuchungsgebiet umfasst Sachsen und angrenzende Regionen von Tschechien, Polen, Bayern, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg. Tabelle 2 enthält die Koordinaten des Untersuchungsgebietes und Abbildung 1 visualisiert es.

Tabelle 2: Koordinaten des Untersuchungsgebietes

	Breite in GMS	Länge in GMS	Breite in DD	Länge in DD
links oben	52° 4‘ 4“	11° 12‘ 50“	52,0678	11,2139
links unten	50° 0‘ 30“	11° 12‘ 50“	50,0083	11,2139
rechts oben	52° 4‘ 4“	15° 33‘ 55“	52,0678	15,5653
rechts unten	50° 0‘ 30“	15° 33‘ 55“	50,0083	15,5653

2.1 Klimadaten

Es werden Klimadaten aus neun verschiedenen Messnetzen verwendet, deren Namen und Kurzbezeichnung in Tabelle 3 aufgeführt sind.

Tabelle 3: Übersicht der Messnetzbetreiber und Abkürzungen

Name	Abkürzung
Deutscher Wetterdienst (DWD)	DWD-MN
Tschechischer Wetterdienst (CHMI)	CZ-MN
Polnischer Wetterdienst (IMGW)	POL-MN
Agrarmeteorologisches Messnetz, Sachsen	Agrar-MN
Forstmessnetz, Sachsen	Forst-MN
Messnetz der Landestalsperrenverwaltung, Sachsen	LTV-MN
Messnetz der TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie	IHM-MN
Luftgütemessnetz, Sachsen	Luft-MN
Ombrometermessnetz	OMB-MN

Eine Stationsliste ist dem digitalen Anhang zu entnehmen.

2.1.1 Daten des Deutschen Wetterdienstes

Die Daten wurden zum einen über den frei zugänglichen FTP-Server für Deutschland (https://cdc.dwd.de/portal/) und zum anderen über einen spezifischen FTP-Server für Sachsen heruntergeladen. Nach Auskunft des DWD sind mehr Daten auf dem sächsischen Server zu erwarten. Dort liegen für fast alle Stationen mehrere Datenreihen vor. Zur Unterscheidung der Datenreihen wurde neben der vom DWD vergebenen Stationsidentifikationsnummer (STATION_ID; kurz: Stat_ID) eine Datensatzidentifikationsnummer Dat_ID eingeführt, die in der MySQL-Datenbank zusammen den Primärschlüssel bilden. Die Vergabe der Dat_ID erfolgte folgendermaßen:

- FTP-Sachsen, Klimadaten: Dat_ID 1-152
- FTP- Sachsen, Niederschlagsdaten: Dat_ID 200-2256
- FTP-Deutschland, Niederschlagsdaten: Dat_ID 2300-3100
- FTP- Deutschland, Klimadaten: Dat_ID 3200-…

Im Untersuchungsgebiet liegen 819 Stationen vor. Nur von 803 Stationen konnten Daten heruntergeladen werden- Für folgende Stationen gibt es keine Daten: 5475-Werda (Talsperre Geigenbach), 4972-Oelsnitz/Vogtl. (Talsperre Pirk), 4796-Quitzdorf am See – Sproitz (Talsperre), 4128-Lengefeld-Reifland (Saidenbach TS), 4000-Presseck, 2979-Lichtenberg/Erzgeb. (Talsperre), 2853-Langenhessen (Koberbachtalsperre), 141-Altmörbitz, Talsperre Schömbach, 833-Neuhausen/Erzgeb.-Rauschenbach (Talsp.), 1710-Gottleuba, Bad (Talsperre), 1854-Großröhrsdorf-Kleinröhrsdorf, 2037-Hartmannsdorf-Reichenau, 2119-Helmbrechts, 2457-Pöhl-Jocketa (Talsperre), 4892-Stollberg/Erzg. (Talsperre).

Auch für 1516-Fürstenwalde war keine Datenreihe zu beziehen, obwohl der DWD die Station bis zum 31.12.2006 geführt hat. Ab dem 26.4.2005 übernahm die BfUL den Standort. Die Reihe wird in der Projektdatenbank als tägliche DWD Reihe (1516) geführt. Ab 2007 wurde sie mit den Daten der BfUL ergänzt.

Auf dem sächsischen Server gibt es Stationen außerhalb des Untersuchungsgebietes, die ebenfalls in die MySQL-Datenbank integriert wurden. Damit enthält die Datenbank insgesamt 1258 Stationen.

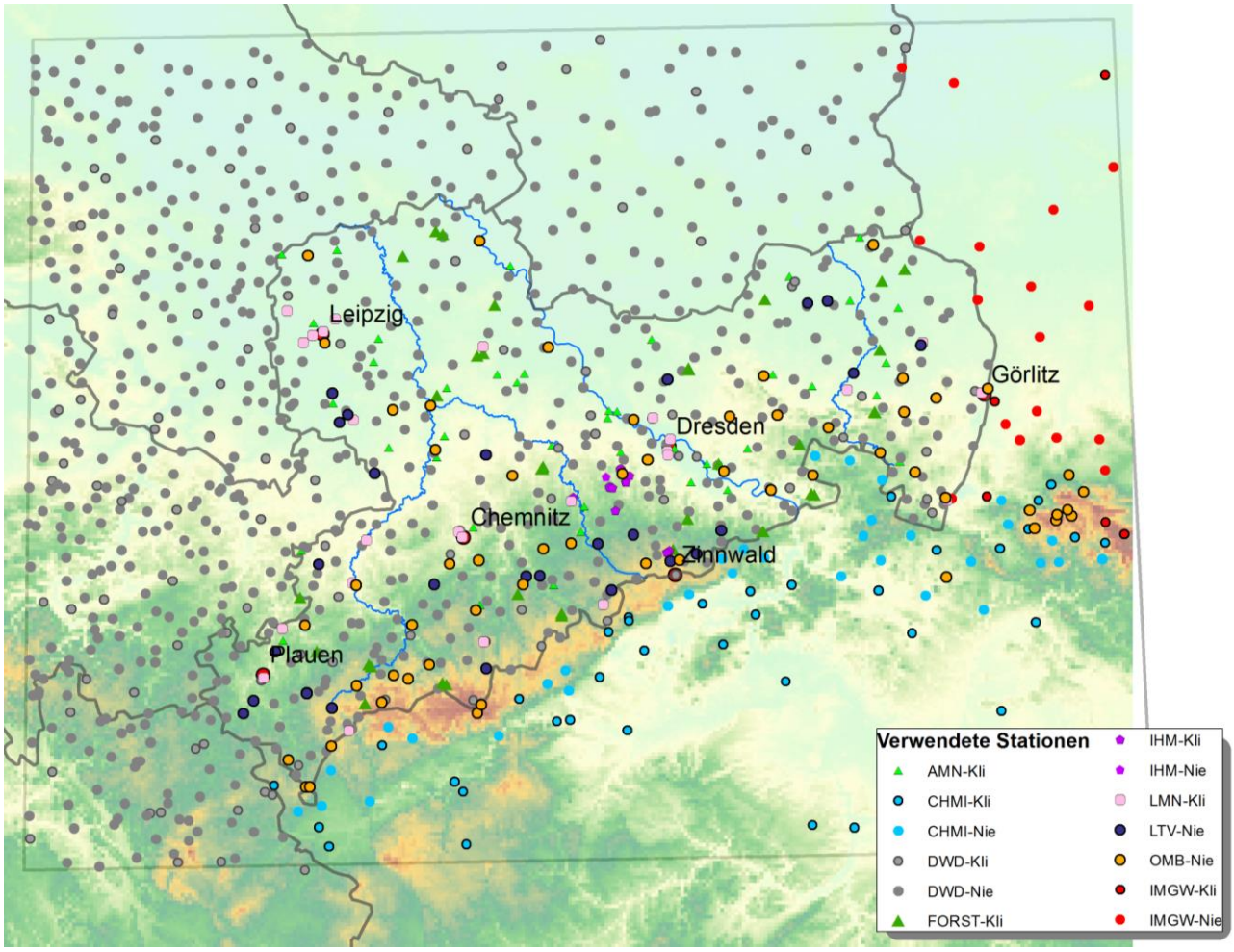


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet und vorhandene Messnetze (Abkürzungen siehe Tabelle 3)

Festgestellte Fehler

Die Station Zinnwald-Georgenfeld (5779) wurde 1971 in Betrieb genommen. Am 2.1.1971 ist für einige Elemente (DD, TM …) eine 0 verzeichnet. Plausibilitätstests weisen darauf hin, dass es ein Fehlwert (-999) ist.

In Leipzig-Holzhausen (2928) stehen in zwei heruntergeladenen Zeitreihen der Mitteltemperatur im Mai 2015 zeitweise Minimumwerte drin. Daher wurde die Reihe der Dat_ID=73 verwendet und die Lücke vom 1.8.62-31.12.66 mit Daten der Reihe der Dat_ID=74 gefüllt.

Tagesdaten versus Monatsdaten (TW, MW)

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt in diesem Projekt auf den Tagesdaten, da viele Klimaanalysen (z. B. trockene Tage, tägliche Starkniederschläge) und Impaktanalysen (Wasserhaushaltsberechnungen) auf Tagesdaten basieren. Monatsdaten werden teilweise für Klimaanalysen verwendet, da die Reihen u. U. länger sind. Um zu identifizieren, für welche Elemente eine Analyse der Monatswerte zusätzliche Erkenntnisse bringt, wurden die Datensätze miteinander verglichen (Tabelle 4), mit folgendem Ergebnis:

- Nur für die Windgeschwindigkeit liegen mehr Stationen mit MW als TW vor.
- Nur für die Windgeschwindigkeit und den Niederschlag gibt es Stationen mit mehr MW als TW. Sonst haben die beiden Datensätze mehr oder gleichviele Tagesdaten.
- Die Übereinstimmung zwischen TW und MW (Korrelation) ist in der Regel sehr gut. Auffällig sind nur einige Reihen der Windgeschwindigkeit und der Mitteltemperatur, die Korrelationskoeffizienten <0,95 aufweisen.

Eine Analyse der MW erbringt demzufolge für die Windgeschwindigkeit und den Niederschlag einen Erkenntnisgewinn, da mehr MW vorhanden sind. Für viele Stationen unterscheiden sich die MW und TW der Mitteltemperatur. Das kann an der Auswahl der besten Datenreihe aus den zur Verfügung stehen Datenreihen liegen (Es wurde die längste Reihe ausgewählt.). Beim Vergleich zwischen MW und TW könnten bei dieser Vorgehensweise also Daten unterschiedlicher Messgeräte verglichen worden sein, was die Unterschiede erklären würde. Es lagen keine Informationen vor, auf welcher Grundlage die DWD-Monatswerte berechnet werden. Es wird daher empfohlen, die umfangreich geprüften TW zu verwenden und diese bei Bedarf zu MW zu aggregieren. Werden vom Nutzer Monatswerte angefordert, werden für die Windgeschwindigkeit und den Niederschlag die in diesem Rahmen geprüften und aufgefüllten MW verwendet. Für die weiteren Elemente werden die prozessierten TW zu MW aggregiert.

Tabelle 4: Gegenüberstellung von Monats- und Tageswerten (MW, TW)

Element	Anzahl Stationen mit MW	Anzahl Stationen mit TW	Anzahl Stationen, die mehr MW als TW haben	Anzahl Stationen, die weniger MW als TW haben	Anzahl Stationen mit einer Korrelation zwischen TW und MW <0.95
FF10	97	35	88	3	5
NN	96	96	0	15	0
RR	801	801	360	62	23
SD	60	60	0	5	1
SN	794	794	0	359	3
TM	102	102	0	6	19
TN	102	102	0	7	5
TX	102	102	0	7	3

2.1.2 Tschechische Daten

Die Daten von 70 Stationen des Tschechischen Hydrometeorologischen Dienstes (CHMI) liegen dem Institut für Hydrologie und Meteorologie für den Zeitraum 1961-2010 vor. Aus dem Bestand des Landeshochwasserzentrums Sachsen wurden acht zusätzliche Stationen sowie zusätzliche Daten übergeben (Ombrometerdaten). Wenn möglich, wurden die Tagesdaten der tschechischen Stationen ab dem 1.1.2011 mit diesen Daten ergänzt. Zwischen 1961 und 1967 fehlt aus unbekanntem Grund für fast jede Station der erste Wert des Monats. Da die Winddaten des CHMI größtenteils unplausibel sind (durch CHMI bestätigt), wurden Daten von neun Stationen vom National Climatic Data Centre der NOAA (https://www.noaa.gov/) heruntergeladen. Dabei handelt es sich um Cheb, Doksany, Karlovy Vary-Letiste, Liberec, Milesovka, Praha-Ruzyne, Tusimice, Usti nad Labem-Kockov, Praha-Kbely.

2.1.3 Polnische Daten

Vom LfULG wurden Daten von 22 Stationen des polnischen Hydrometeorologischen Instituts (IMGW) für den Zeitraum 1971-2010 zur Verfügung gestellt. Auch hierfür waren Datenergänzungen mit Ombrometerdaten des Lan-

deshochwasserzentrums Sachsen möglich. Es wurden keine Informationen zu Messgeräten übergeben. Daher wurden Standardhöhen für die Sensoren angenommen (10 m).

2.1.4 Landeseigene Messnetze

Seit 2008 werden einige Landesmessnetze Sachsens von der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) betrieben. Dazu gehören das Ombrometermessnetz, das Luftmessnetz sowie das Agrarmeteorologische Netz. Weitere Messnetze werden von der Landestalsperrenverwaltung, dem Staatsbetrieb Sachsenforst und der TU Dresden unterhalten.

Ombrometermessnetz

Nach dem Hochwasser 2002 hat der Freistaat Sachsen 22 Ombrometer (automatische Niederschlagsmesser) installiert, um das DWD-Messnetz zu verdichten und somit eine bessere Hochwasservorhersage zu ermöglichen. Die Ombrometer wurden zum Teil an bestehenden Stationsorten errichtet (z. B. Talsperren der LTV). Als Messgeräte werden Pluviometer des Typs OTT Pluvio DWD (Version 1) und Pluvio L200 RH (OTT Pluvio DWD Version 2) verwendet. Einige sind mit einem Windschutz ausgerüstet.
Obwohl die Reihen der Ombrometer-Stationen noch relativ kurz sind, konnten deren Daten zum Verdichten und Verlängern der Niederschlagsreihen anderer Messnetze verwendet werden. Eine eigenständige Auswertung der Ombrometerdaten erfolgt nicht.

Messnetz der Landestalsperrenverwaltung (LTV)

Von der LTV wurden Daten von 26 Niederschlagsstationen zur Verfügung gestellt. Daten von neun Stationen wurden zum Füllen von Ombrometerreihen verwendet. Daher werden lediglich 17 Stationen in der Datenbank als LTV-Netz geführt, wovon die Station TS Kriebstein (99018) derzeit privat ist.

Die ersten Stationen messen schon seit den 50er Jahren. Bis in die 2000er Jahre fanden die Messungen mit einem Niederschlagsmessgerät nach Hellmann ohne Windschutzring in 1 m Höhe statt. An Trinkwassertalsperren fand die Ablesung von Montag bis Sonntag durch den Staumeister statt, meist um 7:00 Uhr morgens. An Brauchwassertalsperren wurde nur wochentags abgelesen. Daten für das Wochenende wurden mit Hilfe von automatischen Messungen ergänzt (Anhang 1). Ab 1.4.2015 wurde das Beobachtungsregime aus finanziellen Gründen prinzipiell auf die Werktage gekürzt.

Ab ca. 2005 rüstete das Land Sachsen 22 Standorte mit Pluvios der Firma OTT aus, um hochaufgelösten Daten für die Hochwasservorhersage zu gewinnen. Die LTV hatte schon vorher Niederschlagsautomaten, größtenteils Kippwaagen, aber auch Pluvios. Genaue Metadaten lagen hierzu nicht vor.

Ab 1991 wurden die Daten durch die LTV geprüft; es gibt keine Lücken durch Nichtbeobachtung. Die vorgefundenen Lücken in der Datenreihe sind hydrologisch irrelevante Niederschläge (< 0,1mm) oder noch nicht digitalisierte Perioden. Pragmatisch wurden daher kürzere Lücken durch 0 ersetzt und längere durch -999 (→ Flag vergeben: 0 = original; 1 = vermutlich <0.1mm; 2 = vermutlich noch nicht digitalisierte Perioden; 3 = -unplausibel), vergleiche Anhang 1.

Forstmessnetz

Vom Staatsbetrieb Sachsenforst wurden Metadaten und Stundenwerte von 21 Stationen, die auf Freiflächen aufgestellt wurden, übergeben. Folgende Elemente werden seit Mitte der 90er Jahre gemessen: FF, GS, RF, RR und TM.

Luftmessnetz

Eine flächendeckende Immissionsüberwachung im Freistaat Sachsen wird durch ein landesweit ausgerichtetes Luftmessnetz mit kontinuierlich arbeitenden Immissionsmessstationen abgesichert. Dabei sind die Standorte ent-

sprechend den Kriterien der EG-Richtlinien gewählt, hauptsächlich in Gebieten mit hohen Luftschadstoffbelastungen (Ballungsräume und größere Städte) aber auch in ländlichen Gebieten, die die Hintergrundkonzentrationen messen. Vom LfULG wurden meteorologische Daten der 25 aktuell registrierenden Stationen des Luftmessnetzes zur Verfügung gestellt. Folgende Elemente werden gemessen: FF, GS, PP, RF, RR und TM.

Agrarmeteorologisches Messnetz

Das Agrarmeteorologische Messnetz (AMN) und das Wetternetz für den obstbaulichen Pflanzenschutzwarndienst sowie den Weinbau in Sachsen wurde ab 1992 aufgebaut. Für eine umweltgerechte Landbewirtschaftung stehen neben der Ertragsmaximierung die Minimierung der negativen Auswirkungen der Landbewirtschaftung auf Mensch, Tier, Boden, Wasser und Luft im Fokus. Das Wettergeschehen besitzt eine zentrale Rolle für Pflanzenwachstum, Ertrag sowie der Entwicklung von Schädlingen und Krankheiten, weshalb das DWD-Netz verdichtet wurde. Es werden Prognosemodelle zum Verhalten von Schaderregern betrieben, die Entscheidungshilfen für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln darstellen.

Die Stationen wurden basierend auf der VDI-Richtlinie Nr. 3786 (VDI 1993) und der DIN 19685 (DIN 1997) errichtet. Es werden 14 Lamprecht-Stationen mit folgenden Charakteristika unterhalten:

- in 2 m Höhe: Temperatur (Pt-100), Feuchte (elektronischer. Feuchtefühler), Globalstrahlung (Pyranometer „Second class“);
- in 2,5 m Höhe: Windfahne und Schalenkreuzanemometer;
- in 1 m Höhe: Niederschlagswippe (Joss-Tognini);
- automatisch fernmeldende Datenerfassungsanlage vom Typ Synmet.

Des Weiteren gibt es 22 Toss-Stationen mit folgenden Charakteristika:

- Kleinmessstation (Mobile Mastanlage): Einsatz im Obst-, Wein- und Hopfenanbau;
- in 2 m Höhe: Temperatur- und Feuchte-Sensorkombination (LT1/RLF);
- in 2 m Höhe (gegenüber): Beleuchtungsstärkesensor (Pyranometer CMP3 oder Globalstrahlungssensor GBV);
- Datenerfassung mit Uniklima-Station (UK7 oder neuer UK vario).

Vom LfULG wurden geprüfte Tagesdaten übergeben, wovon 32 Stationen verwendbar sind. Für die Station Reichwalde sind von März 2007 bis November 2009 durchgängig Nullniederschläge verzeichnet. Diese Station wurde deshalb von der Analyse ausgeschlossen („Verwendung“ = 0). Weitere Stationen mit äußerst geringen Monatssummen sind: Göda (01-03/2012), Reichenbach (09/2012-02/2013), Niedergoseln (11/2008-02/2009).

Unplausible Werte treten bei der Windgeschwindigkeit auf. An einigen Stationen (z. B. 99203 und 99206) sind über mehrere Jahre 0 m/s abgespeichert worden. Auch sind die Anlaufgeschwindigkeiten des bis 2011 verwendeten Windmessers der Station Borthen zu hoch.

2.1.5 Vergleich der verwendeten Messgeräte

Um einzuschätzen, inwieweit eine Nutzung von Daten aus anderen Messnetzen als dem des DWD möglich ist, sind die Messgeräte in Tabelle 5 aufgelistet. Die Angaben hierzu stammen aus folgenden Quellen:

- DWD: Standardmäßig mitgelieferte Metadaten beim Datendownload; Veröffentlichung von FREYDANK (2014a, b),
- CZ-Messnetz: Metadaten des CHMU zur Datenlieferung; Veröffentlichung CHMU (2007),
- POL Messnetz: keine Metadaten,
- Sächsische Landesmessnetze: Metadatentabelle des LfULG aus dem Jahre 2013.

Tabelle 5: Messgeräte und -prinzipien der verschiedenen Messnetze

Element	Messnetz	Datum	Geräte/ Gebertyp	Messprinzip	Bemerkung
	DWD				
Rel. Feuchte			Assman- Aspirations-Pychrometer	Messung feuchter und trockener Temperatur	
			Hygrograph	Längenveränderung von Pferdehaar	
	AFMS1 und 2	1972-76 / ab 86	unbeheiztes elektr. Psychrometer EAP und LiCl-Taupunkthygrometer	Pt-100 Widerstandsthermometer	EAP nur bei positiven Temperaturen verwendbar; LiCl nur 6 Monate einsetzbar
	AMDA	ab 2006 - 2011	Vaisala HMP 45D	kapazitiver Feuchtesensor	
			HYGROMER der Fa. Rotronic AG	kapazitiver Polymer-Feuchtesensor	
Temperatur		bis Mitte 1980er	Quecksilber bzw. Alkoholtermometer	Ausdehnung	
	AFMS1	ab 1972-76	1041 Feutron Greiz	Pt-100 Widerstandsthermometer	
	AFMS2	ab 1987	1041 Feutron Greiz	Pt-100 Widerstandsthermometer	
	AMDA	ab 1995	Feutron Greiz	Pt-100 Widerstandsthermometer	
Niederschlag		bis 1965	Hellmann mit Schneekreuz	Volumenmessung	Gebirgsmesser nur auf Fichtelberg (500cm³) mit Nipherring, auf 3-Bein
	AFMS-1	ab Ende 1980er	RG 68 NG 1 NG 200	Volumen in 0.1mm Teilmengen entleert, Impulszählung	für Regen, Schnee und Nied.dauer; beheizte Niederschlagsgeber
	AMDA	ab 2006 - 2011	Pluvio der Fa. Ott	Waage	Auflösung 0.01 mm
		ab 2006	Gebirgsregenmesser	Volumenmessung	auf Einzelpfahl, 2 m, ohne Windschutz; Fichtelberg
Wind			Wildsche Windfahne		
			Anemometer nach Schreiber	Staudüse	
		ab 1950	WMG Fuess 82a	Staudüse, Rotatiosschalenkreuz	
		ca. 1960	Perthen, elektrisches MG		nur auf Geisingberg

Fortsetzung Tabelle 5: Messgeräte und -prinzipien der verschiedenen Messnetze

Element	Messnetz	Datum	Geräte/ Gebertyp	Messprinzip	Bemerkung
	DWD				
Wind	AFMS-1	ab 1972-76	Junkalor, mechanisches UMG		für Böenschreiber
			Junkalor, elektrisches MG		
		1982	WMG 200		
	AMDA	ab 2006 - 2011	Ultraschallanemometer der Fa. Thiess	Laufzeitmessung von Schallwellen	detaillierte Aufstellung in Frey-dank,T.2, S. 190
		ab 2006 - 2011	Schalensternanemometer der Fa. Thiess	optoelektrischer Impulsgeber	
Sonnenscheindauer		bis Anfang 1990er	Campbell-Stokes Sonnenscheinautograph	Brennstreifen	
		seit Anfang 1990er	Pyrheliometer SONIe der Fa. Thies	periodisch beschattetet und besonnte Siliziumzelle	Umstellungstermine in Freydank, T.2
Luftdruck		ab 1987	Absolutdruckmesswandler (PTB220 der Fa. Vaisa-la?)	piezoresistiv	
Schneehöhe			Schneepegel		
		aktuell	SR50 der Fa. Campell		
	Luftmessnetz				
Feuchte		aktuell	Hygro-Thermogeber Compact der Fa. Thies (1.1005.54.000)	Elektrisch-kapazitiv	
Temperatur		aktuell	Hygro-Thermogeber Compact der Fa. Thies (1.1005.54.000)	Pt-100 Widerstandsthermometer	
Wind		aktuell	kombinierter Windgeber der Fa. Thies (4.3324.21.000)	Windfahne und Schalensternanemometer	
Globalstrahlung		aktuell	Pyranometer CMP3 der Fa. Kipp&Zonen (7.1415.03.000)	Thermosäule (305...2800 nm)	
Luftdruck		aktuell	Barogeber der Fa. Thies (3.1150.10.015)	Druckdose	
	MeteoMedia				
Niederschlag		aktuell	Kippwaage der Fa. Thies	Impulszählung	

Fortsetzung Tabelle 5: Messgeräte und -prinzipien der verschiedenen Messnetze

Element		Messnetz	Datum	Geräte/ Gebertyp
Agrarmeteorologisches Messnetz / Bodendauerbeobachtung				
Feuchte	aktuell	kapazitiver Sensor und einige Haarhygrometer		
Temperatur	aktuell	Pt100	Widerstandsthermometer	
Niederschlag	aktuell	Kippwaage 0,1 bzw. 0,2	Impulszählung	kein Schneekreuz, kein WR
Wind	aktuell	Schalen-Anemometer und Windfahne		
	aktuell	Ultraschallwindanemometer	Laufzeitmessung von Schallwellen	an 2 Standorten
Globalstrahlung	aktuell	Globalstrahlungssensor Toss GBV		
	aktuell	Pyranometer CM3	Thermoelement	
Luftdruck	aktuell	kapazitiver Sensor		
Tschechisches Hydro- Meteorologisches Institut (CHMI)				
Feuchte		August Psychrometer		Berechnung aus 7:00, 14:00 und 21:00
		Haar- und Diffusionshygrometer		
	ab späten 1990er	automatische Sensoren		
Temperatur		Quecksilbertermometer für Tmax	Ausdehnung	
		Alkoholthermometer für Tmin	Ausdehnung	
		Meachnische Thermographen		
		Digitale Messung	vermutlich Pt100-Widerstandsthermometer	
Niederschlag		Metra 500 cm² ohne Windschutz	Volumetrisch	Aufstellhöhe 1 m, 7:00 für Vortag; einige Bergstationen mit Windschutz
	ab 1997	Wippe MR3H 500 cm²	0.1 mm Auflösung, Impulszählung	Einige wurden ersetzt
Wind		Schalen-Anemometer und Windfahne		normalerweise 10 m

Fortsetzung Tabelle 5: Messgeräte und -prinzipien der verschiedenen Messnetze

Element		Messnetz	Datum	Geräte/ Gebertyp
Tschechisches Hydro- Meteorologisches Institut (CHMI)				
Globalstrahlung		Pyrheliometer HF		Genauigkeit 0.5-1 %
		Pyranometer CM11		
Sonnenscheindauer		Campbell-Stokes-Sonnenscheinautograph	Brennstreifen	
Schneehöhe		Messlatte, Schneepegel		7:00 für Vortag
Luftdruck		Quecksilber-Barometer		bis 1979 in Torr (mm Quecksilbersäule)
		Digitale Barometer C4141 der Fa. Comet		
Waldklimastationen				
Feuchte	aktuell	Hygromer MP103A bzw. MP100H mit Fühler Hygro-clip HC1S3 der Fa. Rotronic Messgeräte GmbH		min. 2 Messungen, unbelüfteter Strahlungsschutz aus Kunststoff
Temperatur	aktuell	Hygromer MP103A bzw. MP100H mit Fühler Hygroclip HC1S3 der Fa. Rotronic Messgeräte GmbH		min. 2 Messungen, unbelüfteter Strahlungsschutz aus Kunststoff
Niederschlag	aktuell	im Bestand: 2 Kippwaagen TBRG der Fa. Casella	Impulszählung	
	aktuell	Freifläche: Pluvio/ Pluvio² der Fa. OTT Hydromet GmbH	Waage	bis 2001/2002 Kippwaage Casella, danach sukzessive Umstellung auf PLUVIO, Ring nicht beheizt, Beobachter entfernen Schnee
Wind	aktuell	Anemometer Heavy-Duty der Fa. Theodor Friedrichs		unbeheizt, Einfrieren im Winter möglich
Globalstrahlung	aktuell	Pyranometer CMP6 der Fa. Kipp & Zonen		nicht korrigiert

Vergleich von Messgeräten

Für die Klimareferenzstationen des DWD wurde von AUGTER (2013) ein Vergleich zwischen konventionell und automatisch aufgenommenen Daten durchgeführt. Die MIRIAM/AFMS2 Stationen sind wie die Referenzstationen in einer Englischen Hütte untergebracht, die AMDA-Stationen in einer davon abweichenden Hütte.

Für die Mitteltemperatur ergeben sich Abweichungen durch die Anwendung unterschiedlicher Algorithmen zur Tageswertermittlung [konventionell: Kämtzsches Mittel (Termine: 6:30,13:30 und 2x 20:30 Uhr) vs. Stundenmittel], insbesondere bei Stationen, wo häufig windarme Strahlungswetterlagen vorkommen. Auch bei der Minimumtemperatur kann es zu relevanten Abweichungen kommen. Da AMDA-Automaten keine englische Wetterhütte haben, ist die Abschirmung gegen Wind und Strahlung nicht optimal gewährleistet. Dadurch fallen Maximaltemperaturen im Winter an einigen Stationen etwas kleiner und im Sommer etwas größer aus.

Niederschlagsautomaten registrieren weniger Niederschlag als das Niederschlagsmessgerät nach Hellmann. Die Ursachen hierfür sind noch ungeklärt; da verminderte Verdunstungsverluste eigentlich eine Zunahme des registrierten Niederschlages bewirken sollten. Für einzelne Stationen können die Abweichungen klimatologisch relevant sein.

Bei der Luftfeuchte treten Abweichungen der AMDA-Messungen bei T<0.2 °C auf und weniger häufig Werte >95 % im Winter, was auf die andere Wetterhütte zurückgeführt wird. Die Ermittlung der Tageswerte aus Stundenwerten ist im Frühsommer am problematischsten.

Bei den Luftdruckmessungen gibt es keine signifikanten Abweichungen zu den konventionellen Messungen.

Bei der Ermittlung von Tageswerten der Sonnenscheindauer treten im AMDA-Netz negative Abweichungen von 15 min, im Sommer von bis zu 30 min auf. Die klimatologische Relevanz ist schwer einzuschätzen, aber es gibt Hinweise auf eine deutliche Unterschätzung von bis zu 100 Stunden pro Jahr.

Auswertungen von Daten der Klimastation Tharandt des Lehrstuhls für Meteorologie der TU Dresden zeigen eine Unterschätzung des Niederschlags durch den Pluvio-Ott im Vergleich zum verzinkten Hellmann-Niederschlagsmesser auf (RODRIGUEZ 2014). Für den Zeitraum Dezember 2006 bis Oktober 2013 wurden folgende Unterschätzungen festgestellt: Sommerregen -6 %, Winterregen -9 %, Mischniederschlag -11 % und Schnee -4 %.

Nach Erfahrungen der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen messen Kippwaagen weniger Niederschlag als Hellmann-Niederschlagsmesser, wohingegen Pluvio-Ott gut mit Hellmann-Niederschlagsmessern übereinstimmen (mdl. Mitteilung F. DREWLOW 2016).

FREYDANK (2014) verweist auf Probleme bei automatischen Messungen unter extremen Witterungsbedingungen. So müssen Reifanlagerungen an Wetterhütten händisch entfernt werden, um die Standardbedingungen wiederherzustellen.

2.2 Gebietsuntergliederung

Es wurde eine Untergliederung Sachsens in homogene Gebiete vorgenommen, um die meteorologische Datenverfügbarkeit in den Teilgebieten zu analysieren. Die Teilgebiete wurden unter dem Aspekt der Relevanz für verschiedene sozioökonomische Bereiche von den einzelnen Fachbereichen des SMUL zugearbeitet bzw. selbst ermittelt.

Die Klimaräume nach KRONENBERG et al. (2015) beruhen auf einer räumlichen Clusterung von Gebieten, die sich hinsichtlich des Niederschlags, der Temperatur und der klimatischen Wasserbilanz voneinander unterscheiden (Abbildung 2). Die Charakteristika und die in diesem Bericht verwendeten Bezeichnungen der vier Klimaräume sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Charakteristika der Klimaräume (KRONENBERG et al., 2015)

Gebiet	Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Niederschlag [mm]	Mitteltemperatur [°C]	Klimatische Wasserbilanz [mm]
0	Nordwestliches Tiefland	TiefL	575	9,3	-85
1	Gebirgsvorland	GebVorL	763	8,1	127
2	Bergland	BergL	936	6,6	331
3	Ost-Westliches Hügel- und Tieflandband	HügL	651	8,9	-5

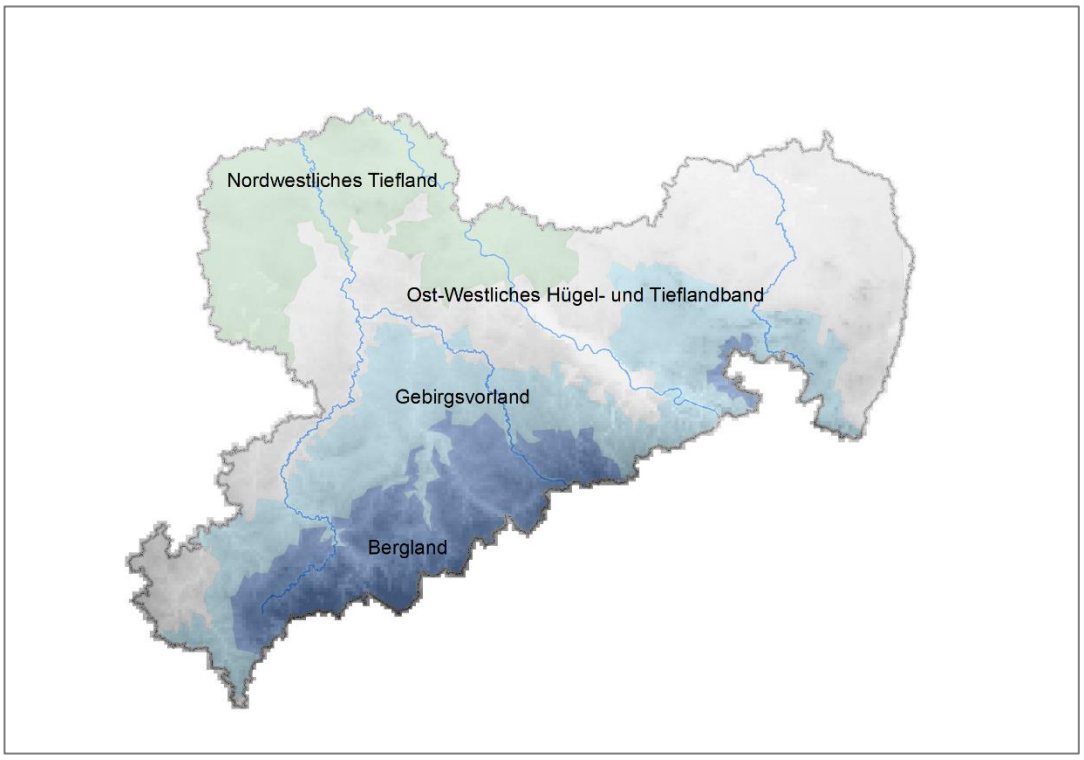


Abbildung 2: Klimaräume Sachsens

Aus hydrologischer Sicht ist eine Unterteilung in die Hauptflusseinzugsgebiete Sachsens sinnvoll (Abbildung 3). Das sind die Weiße Elster, die Mulde, die Elbe, die Schwarze Elster sowie – um kleine Teilgebiete zu vermeiden – Spree und Lausitzer Neiße zusammen.

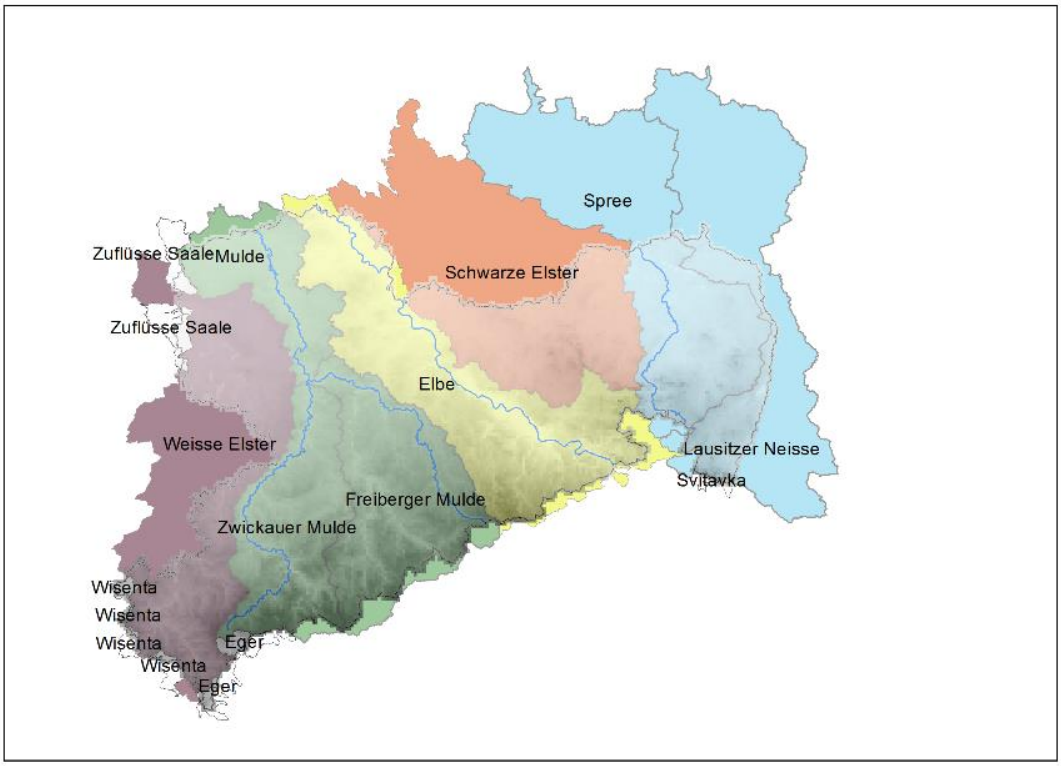


Abbildung 3: Gebietsuntergliederung aus hydrologischer Sicht

Eine Unterteilung des Untersuchungsgebietes in großräumige landwirtschaftliche Einheiten wurde mittels der Agrarstrukturgebiete vorgenommen (Abbildung 4). Agrarstrukturgebiete sind zusammengefasste Vergleichsgebiete. Die Einteilung Sachsens in zwölf landwirtschaftliche Vergleichsgebiete erfolgte in Anlehnung an die naturräumliche Gliederung Deutschlands. Des Weiteren wurden meteorologische Daten auf der Basis langjähriger Mittel und die Ergebnisse der Reichsbodenschätzung, sowie die Hangneigungsklassen, Untersuchungen zur verfügbaren Feldkapazität und phänologische Daten bei der Einteilung berücksichtigt. Damit können landwirtschaftliche Gebiete hinsichtlich ihrer Produktionsfaktoren und Ertragsfähigkeit beurteilt werden.

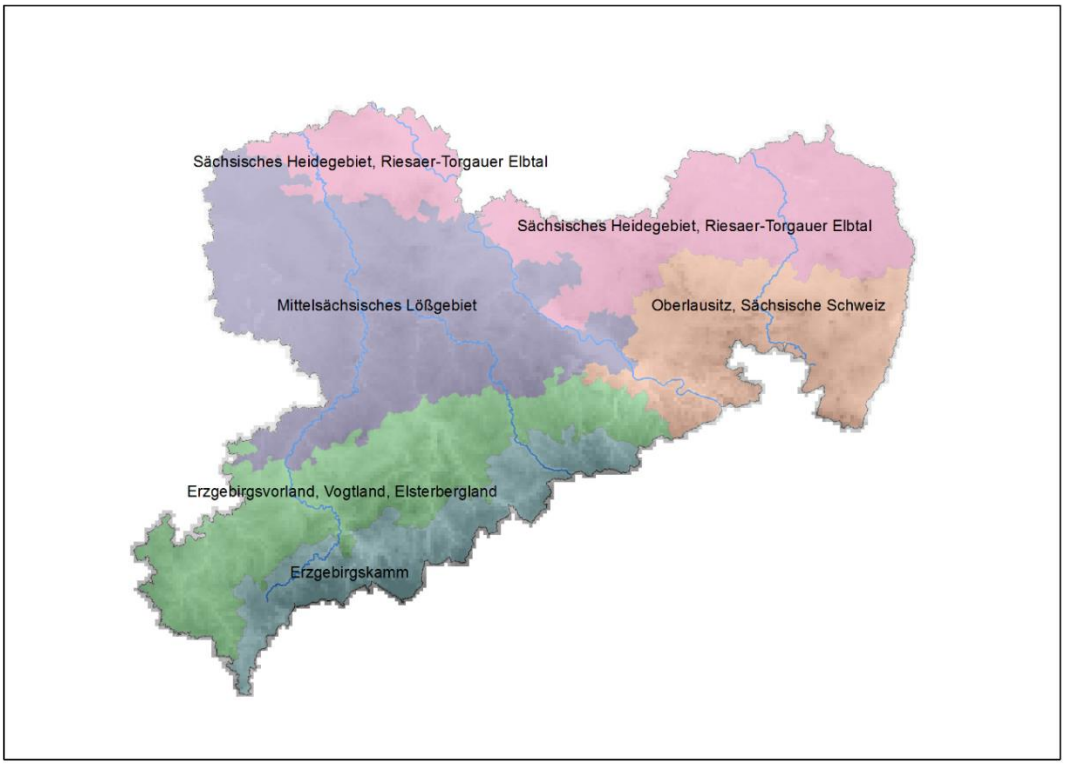


Abbildung 4: Gebietsuntergliederung aus landwirtschaftlicher Sicht

Eine **naturräumliche Untergliederung** erfolgte auf Basis der von HAASE und MANNSFELD (2002) ermittelten Makrochoren. Da die Unterteilung Sachsens in 37 Makrochoren zu kleinteilig für klimatologische Untersuchungen wäre, wurden Gebiete zusammengelegt und teilweise mit neuen Namen belegt (Abbildung 5).

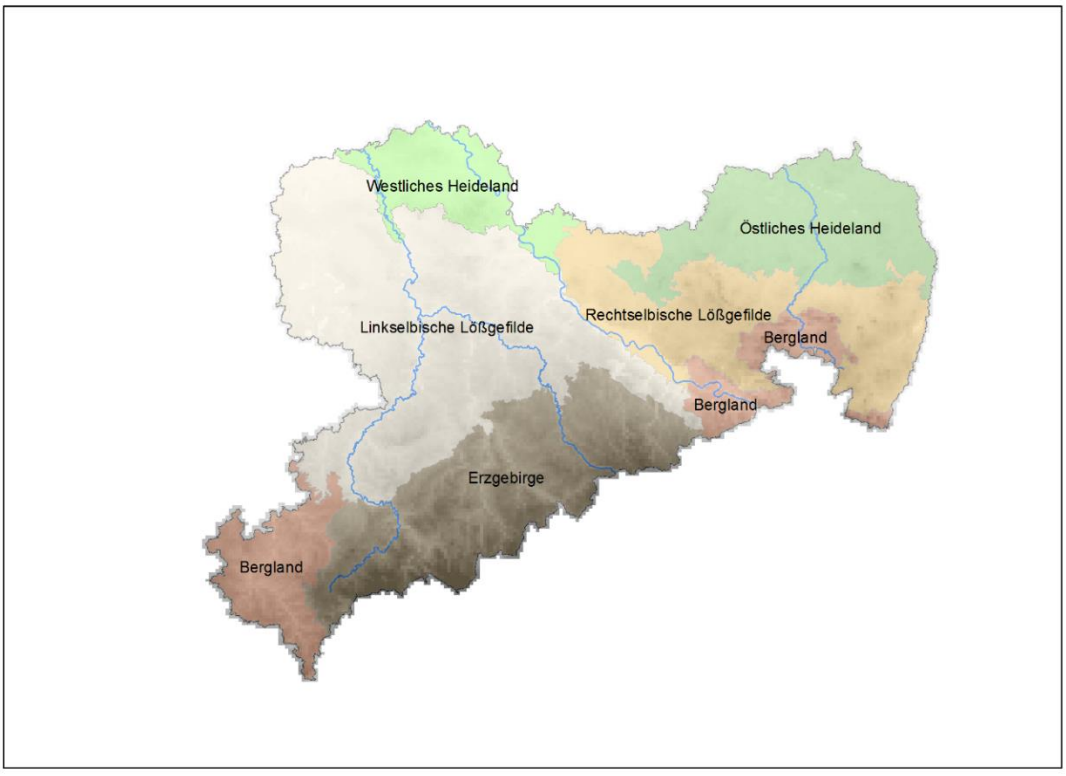


Abbildung 5: Gebietsuntergliederung aus naturräumlicher Sicht (verändert, nach HAASE und MANNSFELD 2002)

Auf Basis von forstlichen Wuchsbezirken wurden forstliche Klimaräume abgegrenzt (Abbildung 6). Neben einer ähnlichen Standortausstattung waren dabei vergleichbare Muster der dynamischen forstlichen Klimagliederung maßgeblich (Kombinationen von Tagen >10 °C – entspricht der forstlichen Vegetationszeit – und der Klimatischen Wasserbilanz innerhalb der forstlichen Vegetationszeit).

Forstliche Wuchsbezirke umfassen einheitliche Landschaften, die sich aus räumlich benachbarten, ökologisch ähnlichen oder miteinander vernetzten Standorts-Mosaikbereichen zusammensetzen. Aufgrund naturräumlich und ökologisch ähnlicher Boden-, Feuchte- und Reliefmosaike sollten sich eine bzw. auch mehrere charakteristische Vegetationsgesellschaften herausbilden. Das für einzelne Wuchsbezirke typische Großklima besitzt im Hügelland und im Mittelgebirge reliefbedingte und höhenstufenbedingte Differenzierungen.

Wuchsgebiete sind Zusammenfassungen räumlich benachbarter Wuchsbezirke einer Großlandschaft. Meist bilden ähnliche geologisch-geographische Strukturen die Grundlage für ein Wuchsgebiet. In den Standortsregionen Tiefland und Hügelland gibt es größere Unterschiede im Makroklima innerhalb der Wuchsgebiete. Im Mittelgebirge lehnt sich dagegen das Wuchsgebiet stärker an das geologisch bedingte Relief-Boden-Mosaik an. Der Klimaeinfluss wird in höhenstufenbedingten Differenzierungen zusätzlich wirksam. Das Wuchsgebiet kann i. d. R. vegetationsmäßig durch die großklimatisch bedingte bzw. regionale Verbreitung einzelner Hauptbaumarten, sogenannte Leitbaumarten, oder Leitwaldgesellschaften repräsentiert werden.

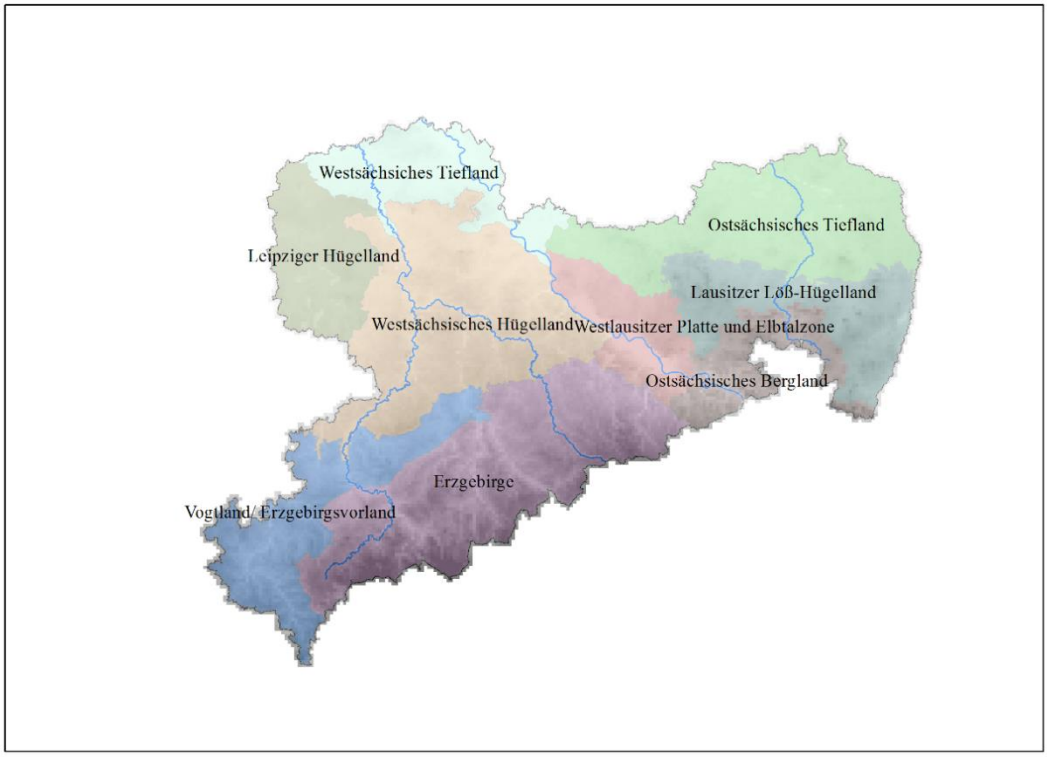


Abbildung 6: Gebietsuntergliederung aus forstlicher Sicht

3 Methoden

3.1 Plausibilitätsprüfungen

3.1.1 Ausreißertests

Ausreißer können zum einen falsche Messungen (Ausreißer erster Art) oder korrekte Extremwerte (Ausreißer zweiter Art) sein (GONZALES-ROUCO et al. 2001). Die Existenz von Ausreißern zweiter Art erschwert die Suche nach denen erster Art erheblich. Beispielhaft dafür ist der Extremwert von Zinnwald-Georgenfeld im August 2002, der mit 312 mm an einem Tag etwas mehr als ein Drittel des durchschnittlichen Jahresniederschlags von Deutschland bemisst und damit auf den ersten Blick als falsche Messung interpretiert werden könnte.

Ausreißer zweiter Art sollten nicht aus den Datenreihen entfernt werden. Sie können jedoch bei der Verwendung nicht robuster Tests problematisch sein.

Für Daten in täglicher Auflösung wird der Test der Absoluten Abweichung vom Median MAD verwendet (LEYS et al. 2013), sowie zusätzlich für den Niederschlag ein Test für Daten mit einer schiefen Verteilungsfunktion MC (HUBERT & VAN DER VEEKEN 2008). Zusätzlich erfolgt ein räumlicher Ausreißertest.

Für Daten in monatlicher Auflösung wird ein auf den Perzentilen der Verteilung beruhender Test (GONZALES-ROUCO et al. 2001) sowie ein räumlicher Ausreißertest angewendet.

Test der Absoluten Abweichung vom Median (MAD)

Der Median ist ein Zentralwert, der robust gegenüber Ausreißern ist (LEYS et al. 2013). Daher eignet sich dieser besser für Ausreißertests als der Mittelwert und Standardabweichungen. Der MAD ist definiert als der Median (M) der absoluten Abweichungen der Einzelwerte (x_i) vom Median aller Werte (M_i):

$$MAD = b \times M(|x_i - M_i(x_i)|)$$

Der Faktor b beträgt für normalverteilte Daten 1,4826. Liegt eine andere Verteilung vor, so berechnet sich b aus den Reziproken des 75. Perzentils. Da sich bei der Anwendung im Untersuchungsgebiet unerklärlich hohe Schwellenwerte ergaben, wurde b konstant gelassen. Für die Berechnung der Schwellenwerte für das Detektieren von Ausreißern ist ein weiterer Faktor festzulegen, der hier als *MF* bezeichnet wird. LEYS et al. (2013) empfehlen einen Wert von 2,5, wobei ein regionaler Abgleich stattfinden sollte. Die Berechnung der Schwellenwerte zur Erkennung von Ausreißern erfolgt mit folgenden Formeln:

unterer Schwellenwert: $M_i - MF \cdot MAD$
oberer Schwellenwert: $M_i + MF \cdot MAD.$

Test für „schiefe“ Daten (MC)

Ein robustes Maß für die Schiefe einer Verteilung ist der Quantilskoeffizient der Schiefe (engl.: medcouple MC). Er ist als die normierte Differenz zwischen der Entfernung des α und des (1 − α) Quantils zum Median (M) definiert.

$$MC(X_n) = M * \frac{(x_{1-\alpha} - M) - (M - x_\alpha)}{x_{1-\alpha} - x_\alpha}, \alpha \in (0{,}0.5)$$

Der Quantilskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen und existiert für beliebige Verteilungen. Rechtsschiefe Verteilungen (wie beim Niederschlag) haben i. d. R. positive und linksschiefe negative Quantilskoeffizienten. Die Berechnung der Schwellenwerte (unten, oben) erfolgt mit folgenden Formeln (HUBERT et al. 2008):

$$wenn\ MC > 0: Q_1 - MCF \cdot e^{-4MC} \cdot IQR\ und\ Q_3 + MCF \cdot e^{3MC} \cdot IQR$$
$$wenn\ MC < 0: Q_1 - MCF \cdot e^{-3MC} \cdot IQR\ und\ Q_3 + MCF \cdot e^{4MC} \cdot IQR$$

Wobei *Q1* das 1. und *Q3* das 3. Quartil sind (25. und 75. Perzentil). Der Faktor *MCF* wird von HUBERT et al. (2008) auf 1,5 gesetzt.

Regionalspezifische Festlegung der Faktoren für die Tests MAD und MC

Die Festlegung der Faktoren für das Untersuchungsgebiet wird exemplarisch für die Windgeschwindigkeit in Abbildung 7 verdeutlicht. Für eine gut beobachtete Flachland- und eine Gebirgsstation wird zum Vergleich das 99. Perzentil jeden Monats, also extrem hohe Windgeschwindigkeiten, geplottet. Die Faktoren der Verfahren MAD und MC wurden so gewählt, dass sich die ermittelten Ausreißer-Schwellenwerte für beide Stationen an das 99. Perzentil der Beobachtungsdaten annähern.

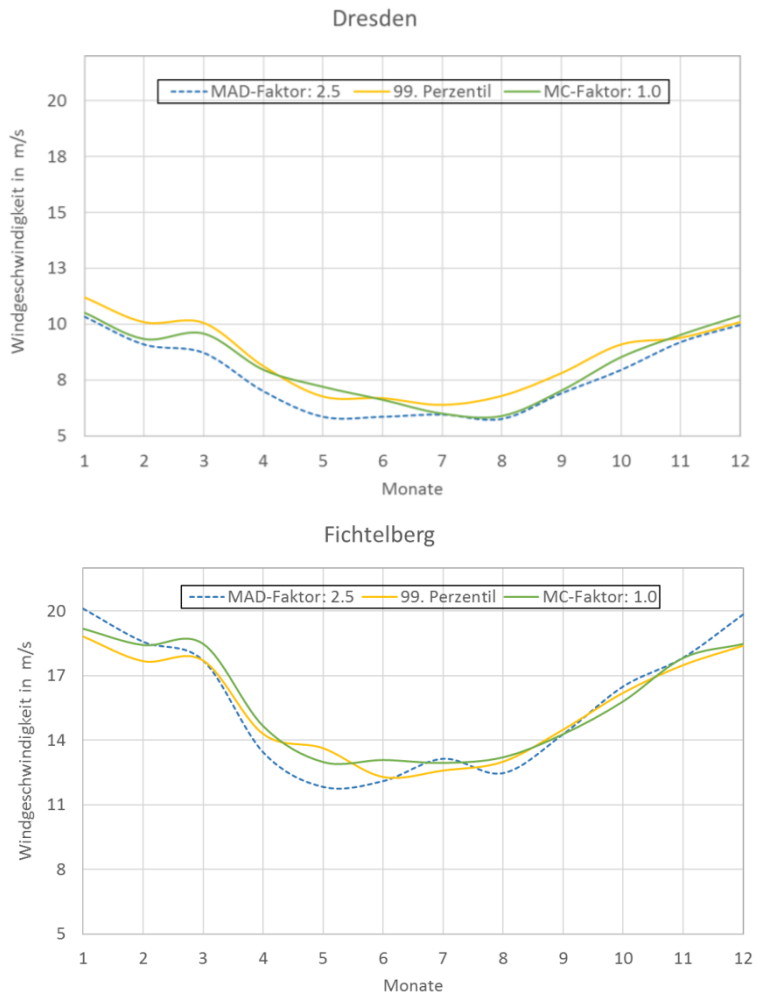


Abbildung 7: Monatsspezifische Schwellenwerte für die Stationen Dresden und Fichtelberg, die sich aus den Ausreißertests MAD und MC und den spezifischen Faktoren ergeben

Perzentilansatz nach Gonzales-Rouco et al. (2001)

Für Monatsdaten des Niederschlags und der Windgeschwindigkeit wird in Anlehnung an GONZALES-ROUCO et al. (2001) für die Jahreszeiten das 75. Perzentil (*Q3*) und der Interquartalsabstand *IQR* berechnet und daraus der Schwellenwert *Pout* berechnet:

$$Pout = Q3 + Faktor * IQR$$

Der *IQR*, also die Differenz zwischen dem oberen (0,75) und unteren (0,25) Quartil der empirischen Verteilung, wird bevorzugt verwendet, da er resistent gegen Ausreißer ist. Der *Faktor* wurde von GONZALES-ROUCO et al. 2001) auf 4 gesetzt. EISCHEID et al. (1995) analysierten den Anteil an Ausreißern am Gesamtdatensatz in Abhängigkeit vom gewählten *Faktor*. Sie verwendeten den Faktor, bei dem sich der Anstieg der Geraden an 0 annähert (2,7 für Temperatur und 4,0 für Niederschlag). Für das Untersuchungsgebiet wurde diese Analyse durchgeführt (Abbildung 8). Als Ergebnis wurde der *Faktor* für den Niederschlag und die Windgeschwindigkeit auf 4 fixiert.

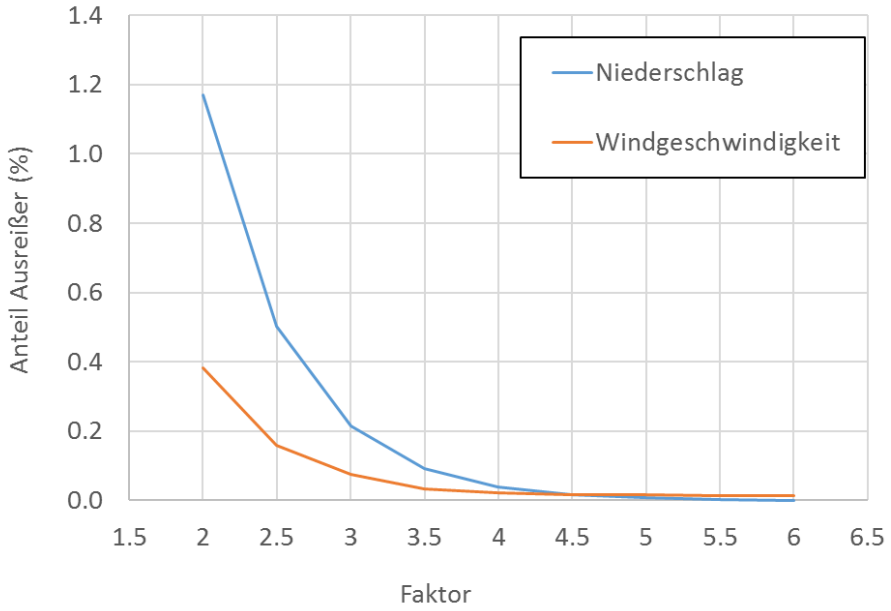


Abbildung 8: Anteil an Ausreißern am Gesamtdatensatz des Untersuchungsgebietes in Abhängigkeit vom gewählten Faktor des Perzentilansatzes

Räumlicher Ausreißertest

Die Ausreißertests für die täglichen Daten erwiesen sich als überkritisch, d. h. es wurden zu viele Werte als Ausreißer erster Art (Falschmessungen) eingestuft. Um die Plausibilität der Werte alternativ zu prüfen, wurde ein Abgleich mit einem Referenzwert *REF* durchgeführt, der sich aus den Werten der umgebenden Stationen berechnet. Für die Berechnung von *REF* wurden für jede Station die 30 nächsten Stationen ermittelt. Es wurde der Korrelationskoeffizient und die Anzahl an Wertepaaren mit jeder der 30 umgebenden Stationen berechnet. Die gemeinsame Mindestreihenlänge wurde auf vier Jahre festgelegt, damit die Stationen des Ombrometermessnetzes mitverwendet werden können. Für jeden Zeitpunkt (an dem ein Ausreißer geprüft werden sollte) wurde beginnend mit den best-korrelierenden Stationen geprüft, ob es einen Messwert gibt; solange bis fünf Messwerte vorlagen. Hieraus wurde mit der Normal Ratio Methode (YOUNG 1992) ein Referenzwert ermittelt. Die Normal Ratio Methode ähnelt der Inversen Distanzwichtung, nur das nicht die Entfernungen zu den Nachbarstationen, sondern die Korrelationskoeffizienten r_i und die Anzahl an vollständigen Wertepaaren n_i eingehen. Die Gewichte w_i der umgebenden Stationen berechnen sich nach:

$$W_i = \frac{r_i^2 \, (n_i - 2)}{1 - r_i^2}$$

Die Summe der Gewichte muss 1 ergeben.

Zum Test der Methode wurden für die kompletten Zeitreihen von Dresden und Zinnwald die Referenzwerte bestimmt. Der Vergleich der gemessenen und mittels dieser Methode ermittelten Referenzwerte ist in Abbildung 9 dargestellt. Im Optimalfall liegen alle Punkte auf der diagonalen Geraden. Es zeigt sich, dass der Referenzwert der Mitteltemperatur mit einer Genauigkeit von ±2 °C die Stationswerte von Dresden trifft, bei einem Bestimmtheitsmaß zwischen 0,98-0,99. Wie die Angaben zum Anstieg und zur Nullpunktverschiebung in den Grafiken zeigen, könnte der Referenzwert gut als Ausreißertest für Dresden verwendet werden. Für Zinnwald ist zu beachten, dass die Referenzwerte um 3.1 °C zu hoch sind. In Zinnwald können Unterschiede zwischen dem beobachteten und dem Referenzwert von bis zu 9 °C auftreten. Für Dresden können die Unterschiede 4 °C, für Chemnitz 6 °C und den Fichtelberg 12 °C betragen. Die hohen Unterschiede treten vor allem im Winter auf, vermutlich bei Inversionswetterlagen.

Die Windgeschwindigkeit des Referenzwertes liegt i. d. R. unterhalb des Messwertes (Abbildung 9). Auffällig ist die wesentlich stärkere Streuung, insbesondere in den Kammlagen. Für den Wind, als eine Klimavariable die lokal sehr stark schwankt, überrascht dieses Ergebnis nicht. Bei der Plausibilitätsprüfung ist die tendenzielle Unterschätzung zu beachten.

Eine ähnliche Unterschätzung ist beim Niederschlag und der Schneehöhe zu finden. Für die Elemente RF, DD, SD, und NN funktioniert die Bestimmung des Referenzwertes sehr sicher.

Wie der Referenzwert bei der Plausibilitätsprüfung eingeht, ist dem Kapitel 3.1.2 zu entnehmen.

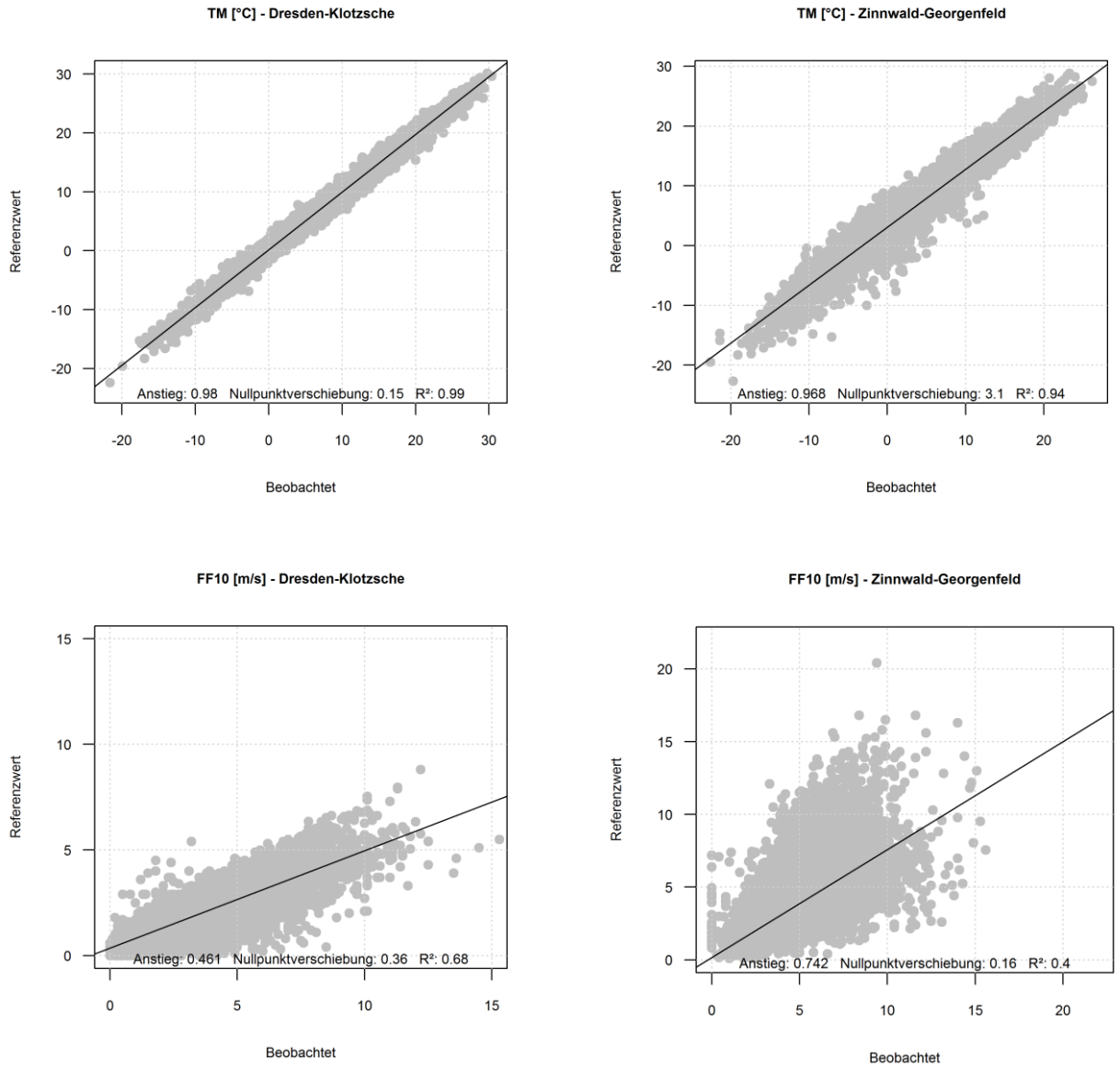


Abbildung 9: Vergleich beobachteter Niederschläge und Windgeschwindigkeiten mit den aus Nachbarstationen ermittelten Referenzwerten für Dresden und Zinnwald

Die relative Feuchte wird auf die Einhaltung der physikalisch möglichen Grenzen geprüft 0 % ≤ RF ≤ 100 %.

Der Bedeckungsgrad ist definiert zwischen 0 (unbedeckt) bis 8 (vollständig bedeckt). Werte außerhalb dieses Bereiches sind unplausibel.

Die Schwellenwerte für die maximale Schneehöhe wurden wie in ECA&D (2012) für zwei Höhenstufen definiert:

- für Stationen unterhalb von 400 m ü. NN: 300 cm
- für Stationen zwischen 400 und 2000 m ü. NN: 800 cm

Ausgehend von den extremsten in Deutschland aufgetretenen Luftdrücken auf Meeresniveau (DWD 2016) von 954,4 hPa und 1060,8 hPa, wurden über die barometrische Höhenformel diese Schwellenwerte auf die Höhe der jeweils zu prüfenden Station umgerechnet.

Als obere und untere Schwellenwerte der Identifizierung von Ausreißern beim Dampfdrucks wurden 0 und 30 hPa festgelegt.

3.1.2 Weitere Tests

Aufeinanderfolgende gleiche Werte

In Anlehnung an ECA&D (2012) sind aufeinanderfolgende gleiche Werte nur bis zu einer bestimmten Anzahl als plausibel zu werten. Es wurden folgende Elemente geprüft:

- Niederschlag >1 mm maximal 9 Tage; Niederschlag >5 mm maximal 4 Tage
- Temperatur maximal 4 Tage
- Windgeschwindigkeiten ≥ 2m/s maximal 5 Tage
- Luftdruck: maximal 4 Tage

Korrekte Reihung der Temperaturen TN, TM und TX

Bei diesem Test wird auf die Einhaltung der physikalisch korrekten Reihenfolge der Temperaturen geprüft: TN ≤ TM ≤ TX. Wird dieses Kriterium verletzt, erfolgt ein Abgleich mit dem *REF*. Der Messwert mit der größten Abweichung vom *REF* wird i. d. R. als Ausreißer gekennzeichnet.

Abgleich der gemessenen mit der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer

Die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer S_0 berechnet sich in Abhängigkeit vom Tag innerhalb des Jahres (DOY: 1-366) und der geografischen Breite des Standorts (LAT in Dezimalgrad):

$$\boldsymbol{S_0 = 12.3 + \sin(0.0172 * DOY - 1.39) \times \left(4.3 + \frac{LAT - 51.0}{6}\right).}$$

Sonnenscheindauern, die größer als die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer sind, sind vorerst als verdächtig einzustufen.

Abgleich der gemessenen mit der aus dem Bedeckungsgrad berechneten Sonnenscheindauer

Aus dem gemessenen Bedeckungsgrad lässt sich bei Kenntnis des Ortes und der Stationshöhe die Globalstrahlung berechnen (VDI 1994). Aus dieser kann mittels des Ansatzes von ÅNGSTRÖM (1924) die Sonnenscheindauer abgeleitet werden. In welcher Weise die berechnete Sonnenscheindauer bei der Prüfung eingeht ist dem Abschnitt Festlegungen zu Ausreißern (s. u.) zu entnehmen.

Luftdruck

Zur Prüfung des Luftdrucks wurden beobachtete Wetterrekorde verwendet (DWD 2016). Es werden die auf Meereshöhe umgerechneten Werte von 954,4 hPa und 1060,8 hPa als untere und obere Schwelle genutzt. Mittels der barometrischen Höhenformel wurden diese Schwellenwerte auf die jeweilige Stationshöhe umgerechnet, um so eine Prüfung des Luftdrucks in Stationshöhe zu ermöglichen.

Dampfdruck

Als Schwellen für die Plausibilität des Dampfdrucks wurden 0 und 30 hPa verwendet.

Festlegungen zu Ausreißern

Im Folgenden werden die Regeln zur Definition von Ausreißern beschrieben. Es sei darauf hingewiesen, dass es um die Identifikation von falschen und nicht von extremen Werten geht.

Niederschlag

- KLEINE NIEDERSCHLÄGE, DIE SEHR STARK VON DER REFERENZ ABWEICHEN: Ausreißer, wenn Identifikation durch beide Ausreißertests und *REF* < 2 mm und Quotient RR/ *REF* > 20 (gültig für alle Monate)
- GRÖSSERE WINTERNIEDERSCHLÄGE MIT MARKANTEN ABWEICHUNGEN VON DER REFERENZ: Ausreißer, wenn Identifikation durch einen der beiden Ausreißertests und *REF* ≥ 2 mm und Quotient RR/ *REF* > 8 (gültig für Dezember bis März; in allen anderen Monaten sind hohe Quotienten RR/ *REF* aufgrund konvektiver Bedingungen möglich)

Temperatur

Für TN, TM und TX wurden sehr viele Ausreißer mit dem MAD-Test identifiziert. Bei TN ist es nicht möglich, mit Hilfe des Referenzwertes die Plausibilität zu überprüfen, da TN sehr stark von den lokalen Bedingungen abhängt (z. B. Kaltluftsenken). Nach einer visuellen Kontrolle der verdächtigen Werte wurden letztendlich keine Werte als Ausreißer geflaggt. Da bei TM und TX nicht von einer solch großen Anzahl von Ausreißern auszugehen ist, wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Es wird ein Abgleich des Messwertes mit dem ermittelten Schwellenwert des Ausreißertests durchgeführt. Es gibt kein objektives Kriterium um festzustellen, wie gut die ermittelten Schwellenwerte die realen Grenzen für Ausreißer widerspiegeln. Daher die konservative Festlegung, dass ein Wert als verdächtig eingeschätzt wird, wenn er um mehr als 3 °C vom Schwellenwert abweicht.
- Wenn der Messwert um mehr als 4 °C vom Referenzwert REF abweicht, wird er als verdächtig eingeschätzt.
- Treten diese beiden Bedingungen gleichzeitig auf, so ist der Wert einerseits verdächtig aufgrund der stationsbezogenen Statistik und anderseits aufgrund des Abgleichs mit seiner unmittelbaren Umgebung. Er wird daher als Ausreißer identifiziert.
- Für sehr hoch gelegene Stationen (Zinnwald, Carlsfeld, Fichtelberg und Ochsenkopf) kann kein sinnvoller Referenzwert ermittelt werden, da die niedrig gelegenen Umgebungsstationen eine zu geringe Referenztemperatur verursachen. Auch Stationen in Tal- oder Muldenlagen (Aue, Dippoldiswalde-Reinberg, Marienberg) können unter bestimmten Bedingungen (klarer Himmel, kaum Wind, Schnee) extrem niedrige Tagesmitteltemperaturen aufweisen, die nicht adäquat von den Ausreißertests erfasst werden können. Für die genannten Stationen können mit diesem Verfahren daher keine Ausreißer identifiziert werden.

Wind

Als Ergebnis beider Ausreißertests wurden mehrere tausend Ausreißer erkannt. Die Festlegung der Faktoren für die Ausreißertests erfolgte auf der Grundlage der Stationen Dresden und Fichtelberg. Unter Umständen ist die Festlegung nicht optimal für andere Stationen, weshalb davon ausgegangen wird, dass die ermittelten Schwellenwerte zu niedrig sind. Des Weiteren ist der Wind eine extrem variable und von den lokalen Bedingungen abhängige Größe. Daher wurde ähnlich wie bei TM und TX ein Abgleich des Messwertes mit den ermittelten Schwellenwerten des Ausreißertests sowie mit den ermittelten Referenzwerten durchgeführt. Die höchsten Abweichungen wurden mittels Stundenwerten und Nachbarstationen geprüft und größtenteils als plausibel befunden. Eine Festlegung zu maximal möglichen Abweichungen war daher nicht möglich.

Wie bei der Temperatur ist die Nutzung des Referenzwertes für Bergstationen nicht möglich.

Sonnenscheindauer

Überschreitet die gemessene die astromisch mögliche Sonnenscheindauer S_0, wird der Messwert als verdächtig gekennzeichnet. Da oft nur geringfügige Überschreitungen von S_0 auftraten, ist hier nicht prinzipiell von Fehlmessungen auszugehen. Deshalb wurden folgende Festlegungen getroffen, um Ausreißer zu identifizieren:

- Beträgt die Abweichung von SD zu S0 mehr als 5 %, so sind die Werte unplausibel.
- Beträgt die Abweichung von SD zur berechneten SD mehr als 50 %, so sind die Werte unplausibel.
- Der Referenzwert hat sich als nicht geeignet herausgestellt, um die Überschreitungen von S0 zu plausibilisieren. Insbesondere Stationen im oberen Bergland wiesen Überschreitungen von S0 auf. Häufig lässt sich hier, z. B. aufgrund von Inversionswetterlagen, keine plausibler Referenzwert aus den umgebenden Stationen herleiten.

In Tabelle 7 sind die angewendeten Plausibilitätstests zusammengefasst.

Tabelle 7: Übersicht über angewendete Plausibilitätstest (MAD-Test Absolute Abweichung vom Median, MC-Test für „schiefe“ Daten), Werte in Klammern sind die verwendeten Faktoren.

Klimaelement	MAD-Test	MC-Test	Perzentil-Test	Räumlicher Ausreißertest	Aufeinanderfolge gleiche Werte	Temperaturreihung	Sonstige
TAGESWERTE							
TN	Ja	-	-	-	Ja	Ja	-
TM	Ja	-	-	Ja	Ja	Ja	-
TX	Ja		-	Ja	Ja	Ja	-
FF10	Ja	Ja	-	Ja	Ja	-	-
SD	-	-	-	-	-	-	Ja
PP	-	-	-	-	Ja	-	Ja
RR	Ja	Ja	-	Ja	-	-	-
SN	-	-	-	-	-	-	Ja
DD	-	-	-	-	-	-	Ja
RF	-	-	-	-	-	-	Ja
MONATSWERTE							
RR	Ja	-	Ja	-	-	-	-
FF10	-	-	Ja	-	-	-	-

3.2 Datenverfügbarkeit

Die Datenverfügbarkeit bzw. Stationsdichte wird getrennt nach Messnetzen und Klimavariablen mittels Liniengrafiken visualisiert. Für einen Zeitraum von maximal 65 Jahren (1951 bis 2015) werden pro Zeitschritt die Anzahl der für das Projekt verfügbaren Messwerte/Stationen gezählt. Für die tschechischen und polnischen Stationen liegen nur Daten bis 2010 vor. Die Daten für die Grafiken werden direkt von der MySQL-Projektdatenbank abgerufen. Die Datenverfügbarkeit wird für Monatsdaten des DWD sowie für Tagesdaten von acht Messnetzen dargestellt:

- Deutscher Wetterdienst (DWD)
- Polnischer Wetterdient (PL)

- Tschechischer Wetterdienst (CZ)
- Agrarmeteorologisches Messnetz Sachsen (AMN)
- Messnetz der Professur für Meteorologie der TU Dresden (IHM)
- Messnetz der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV)
- Messnetz des Staatsbetriebs Sachsenforst (FMN)
- Luftgütemessnetz des Freistaates Sachsen (LMN)

Die Daten des Forstmessnetzes liegen in stündlicher Auflösung vor, die des Luftgütemessnetzes zeitweise in halbstündlicher Auflösung. Für die Darstellung wurden diese zu Tagesdaten aggregiert. Hierfür sowie für statistisch belastbare Homogenitätsuntersuchungen, Trendanalysen etc. ist die Definition einer minimalen Datenverfügbarkeit wichtig. Nachfolgend eine exemplarische Übersicht der Handhabung der minimalen Datenverfügbarkeit:

- In ECA&D (2013) sind für die Ableitung von Monatswerten für alle Klimaelemente 5-6 Fehlwerte (ca. 17 %) pro Monat erlaubt. Für Jahreswerte ist die Schwelle mit 15 Tagen (4 %) und für Klimanormalperioden mit 30 % definiert.
- FRANKE (2009) nutzte für Homogenitäts- und Trenduntersuchungen folgende Schwellenwerte für die Anzahl an erlaubten Fehlwerten: Maximal 10 % der Jahre eines mindestens 30-jährigen Analysezeitraumes dürfen in den monatsbezogenen Zeitreihen jeweils maximal 10 % Fehltage haben.
- In BERNHOFER und FRANKE (2013) wurden für die Aggregierung zu Monatswerten 5 % Fehlwerte für Elemente mit summarischer Monatswertbildung und 10 % für Elemente für Monatswertbildung durch Mittelung zugelassen.
- Zur Berechnung von Klimanormalen empfiehlt die WMO (1989): Bei der Berechnung von Monatswerten sind maximal 5 Fehltage (maximal 3 aufeinanderfolgende) für Elemente erlaubt, die gemittelt werden („3 and 5 rule“). Für summarische zu bildende Monatswerte dürfen keine Fehltage vorliegen. Mindestens 25 von 30 Monaten müssen vorhanden sein, mit maximal 2 aufeinanderfolgen Fehljahren.

Für dieses Projekt wurden die in Tabelle 8 aufgelisteten Schwellenwerte als sinnvoll erachtet und angewendet. Die WMO-Empfehlung wird als überkritisch eingeschätzt, was zu einer drastischen Ausdünnung von zu aggregierenden Werten führen würde.

Tabelle 8: Anzahl an erlaubten Fehlwerten in Prozent für verschiedene Fragstellungen

Klimaelement	Tageswerte	Monatswerte	Jahreswerte	Kommentar
Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwind., Luftdruck, Schneehöhe	17 % 4 h	17 % 5 d	8 % 1 Mon	zusätzlich „3 and 5 rule“
Niederschlag Sonnscheindauer	7 % 2 h	7 % 2 d	4 %	

3.3 Vergleich der verwendeten Messnetze

Die Daten der Landesmessnetze werden in diesem Projekt für Plausibilitätsprüfungen und Lückenfüllungen genutzt. Um Aussagen zur Güte der Messwerte zu ermöglichen, wurden Vergleiche der verschiedenen Messnetze mittels der Höhenabhängigkeit, dem Jahresgang sowie mit Hilfe von Boxplots der Klimaelemente angestellt.

Für die Darstellung der Höhenabhängigkeit wurde pro Station der Mittelwert (Jahr, Winter und Sommer) jedes Klimaelements für einen Zeitraum von zehn Jahren berechnet und gegen die Stationshöhe aufgetragen. Grundlage waren zu Monatswerten aggregierte Tageswerte, wobei die Kriterien zur Datenvollständigkeit angewendet wurden (vgl. Tabelle 8). Die Windgeschwindigkeit bezieht sich auf eine Höhe von 10 Metern. Es mussten mindestens sechs Jahreswerte vorliegen, damit ein Mittelwert für den Gesamtzeitraum gebildet wurde. Die Mittelwert- bzw. Summenbildung der einzelnen Jahreswerte erfolgte entsprechend der Vorschriften aus Tabelle 11.

Infolge der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit wurden Vergleiche für zwei Zeiträume durchgeführt. Für den Zeitraum 1991 bis 2000 wurden die DWD-Daten mit den tschechischen und polnischen Daten verglichen. Ein Vergleich der Landesmessnetze mit DWD-Daten wurde für den Zeitraum 2006 bis 2015 durchgeführt. Für das Ombrometer-Messnetz lagen nicht genügend Werte für einen Vergleich vor. Die Auswertung und grafische Darstellung erfolgte nur für Messnetze mit mindestens fünf Stationen in den entsprechenden Zeiträumen. Eine Ausnahme ist das polnische Messnetz mit insgesamt nur vier Stationen. An die Höhengradienten wurden Ausgleichsgeraden angepasst. Diese sollten generell nicht überinterpretiert werden, da sie bei einigen Messnetzen auf nur wenigen Stützstellen beruhen. Auch die unterschiedliche Abdeckung des Höhenspektrums mit Stationen, insbesondere in höheren Lagen, erschwert die Interpretation. Daher sollte bei der Analyse mehr Gewicht auf die Lage der Punktwolken der Messnetze gelegt werden.

Zum Vergleich der Messnetze innerhalb der sächsischen Klimaräume (vergleiche Kapitel 2.2) dienen die mittleren Jahresgänge und Boxplots. Sie basieren auf Mittelwerten für den Zeitraum 2006-2015. Für die Jahresgänge wurden 12 Monatsmittelwerte aus allen Stationen des Klimaraums gebildet. Für die Boxplots wurden alle Jahreswerte aller Stationen des Klimaraums verwendet. Zusätzlich wurden auch für die Winter- und Sommermonate Boxplots erstellt. Nicht jedes Messnetz unterhält in allen Klimaräumen Stationen. Da im Falle der Winter- und Sommerboxplots für jeden der drei Monate Jahresmittelwerte vorliegen mussten, sind einige Messnetze bei den beiden Jahreszeiten weggefallen. Das betrifft vor allem das LMN- und das OMB-Messnetz.

3.4 Analyse der resultierenden Messrealität

Klimatologische Stationsmessungen dienen der Quantifizierung der Klimabedingungen unmittelbar vor Ort, aber auch als Stützstelle, um regionale (also flächenhafte) Abschätzungen zu ermöglichen. Bei der Standortwahl wird daher auf eine möglichst gute Verteilung im Raum und eine hohe Repräsentativität geachtet. Die nationalen Wetterdienste sehen sich aus Kostengründen zunehmend gezwungen, Stationen zu automatisieren, aber auch zu schließen. Die Abbildungen im Kapitel 4.1 verdeutlichen die Zunahme an Beobachtungen von gut zu automatisierende Klimagrößen wie die Temperatur und Feuchte, aber auch die gravierende Abnahme an Niederschlagsstationen ab dem Jahr 2000.

Als Maß für die Unsicherheit der regionalen Schätzung eines Klimaelements wird hier die Krigevarianz verwendet. In der nach KRIGE (1951) benannten geostatistischen Interpolationsmethode werden die Gewichte der in die Berechnung einfließenden Messwerte so bestimmt, dass die Schätzfehlervarianz minimiert wird. Faktoren, die die Unsicherheit von Schätzungen beeinflussen, sind die Anzahl und die Entfernung der Stichproben zum zu schät-

zenden Ort, die Messnetzkonfiguration und die Variabilität des zu schätzenden Prozesses (räumlicher Zusammenhang).

Für das Messnetz des DWD wird für die Elemente RR, TM, RF und SD die Krigevarianz des Interpolationsverfahrens *Ordinary Kriging* berechnet, visualisiert und für die gewählten Gebietsuntergliederungen (vgl. Kapitel 2.2) analysiert. Der räumliche Zusammenhang der Klimavariablen unterscheidet sich bei jedem Ereignis. Da klimatologische Aussagen zur Messnetzrealität gewonnen werden sollen, wurden nicht Tages- sondern Monatswerte analysiert. Nach Durchsicht vieler Variogramme wurden exemplarisch Variogramme von zwei Monaten ausgewählt: a) eine Witterungssituation mit normaler und b) eine Witterungssituation mit hoher räumlicher Variabilität. In Abbildung 10 wird für den Niederschlag die Auswahl dargestellt.

Im Juli 1984 wurden Monatsniederschläge von ca. 40 mm im Tiefland bis hin zu 170 mm im Erzgebirge gemessen. Die räumliche Variabilität ist gering, wie das relativ flach verlaufende Variogramm anzeigt. Das heißt, die Variabilität des Niederschlags hängt nur wenig von der Entfernung der Stationen untereinander ab. Demzufolge kann dieser Monat sehr sicher interpoliert werden, was sich in einer geringen Krigevarianz manifestiert.

Im März 2000 traten Niederschläge von ca. 70 mm in den flacheren Regionen und bis zu 280 mm in den Gebirgen auf. Das Variogramm weist auf eine ausgeprägte Abhängigkeit der Niederschlagsvariabilität von der Entfernung der Stationen untereinander hin. Mit zunehmender Entfernung unterscheiden sich die Niederschläge an den Stationen. Die Niederschläge von Orten, die weit von einer Station entfernt liegen, können daher nur mit einer größeren Unsicherheit geschätzt werden, was zu hohen Werten der Krigevarianz führt.

Da die Krigevarianz nicht mehr von den Beobachtungswerten an sich abhängt, sondern von der aktuellen Messnetzkonfiguration und der räumlichen Variabilität, werden die beiden ausgewählten Variogramme auf die Netzkonfiguration der Dekaden angewendet. Exemplarisch werden dazu die Netzkonfigurationen für den Monat Juli der Jahre 1965, 1975, 1985, 1995, 2005 und 2012 analysiert. Bei gleichem Variogramm sollte eine sich ändernde Dichte und Verteilung der Stationen auf die Sicherheit der flächenhaften Schätzung auswirken. Für die genannten sechs Zeitpunkte werden für die ausgewählten vier Elemente Karten der Krigevarianz erstellt.

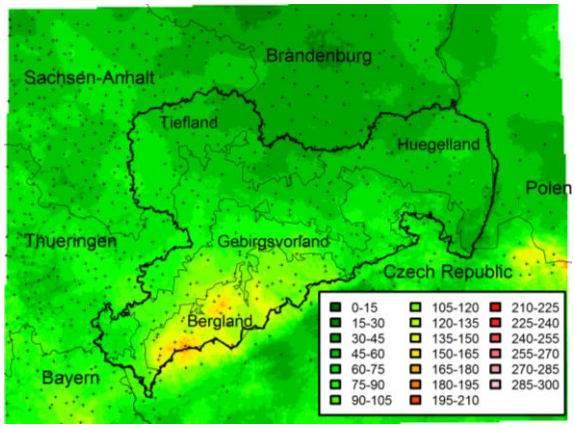
Zu einer noch eingängigeren Visualisierung der aktuellen Messnetzrealität (Juli 2012) wird für die Witterungssituation mit hoher räumlicher Variabilität (um maximal auftretende Fehler zu quantifizieren) der Krigefehler vereinfacht – in Form einer **Ampelkarte** – dargestellt. Der Krigefehler lässt sich aus der Wurzel der Krigevarianz berechnen. Die zu diesem Zeitpunkt berechneten Krigefehler im Gesamtgebiet werden bis zum 50. Perzentil (beim Niederschlag z. B. 17,6 mm) grün dargestellt. Sie stellen Flächen mit relativ sicherer flächenhafter Aussage dar. Der gelbe Bereich umfasst das 50. Perzentil plus einer Standardabweichung des Krigefehlers (z. B. 18,8 mm). Die unsichersten Aussagen treten bei Fehlern jenseits der Standardabweichung (z. B. ≥ 18,8 mm) auf und werden mit Rot dargestellt.

Die Analyse des Krigefehlers für die Gebietsuntergliederungen erfolgt durch eine grafische Darstellung des Medians des Krigefehlers im Teilgebiet zu den sechs o.g. Zeitpunkten.

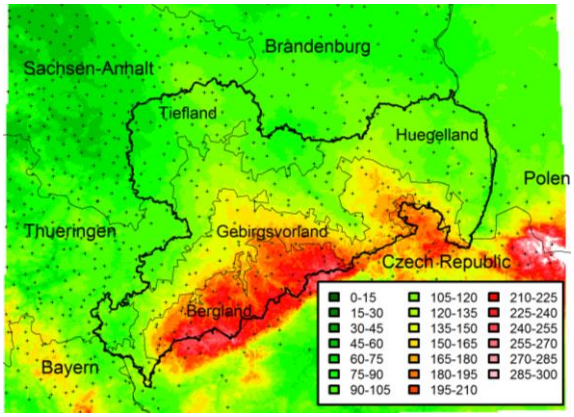
Witterungssituation mit normaler räumlicher Variabilität: Juli 1984

Witterungssituation mit hoher räumlicher Variabilität: März 2000

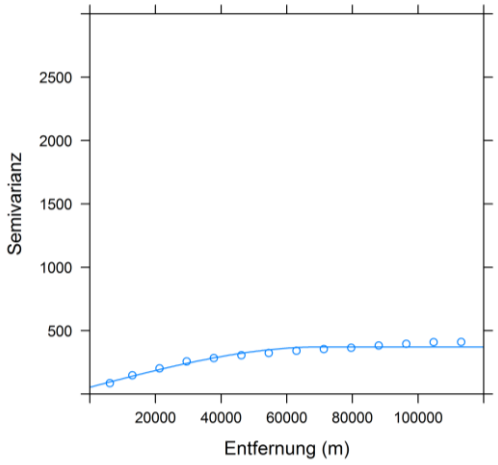
Niederschlagsverteilung (mm)



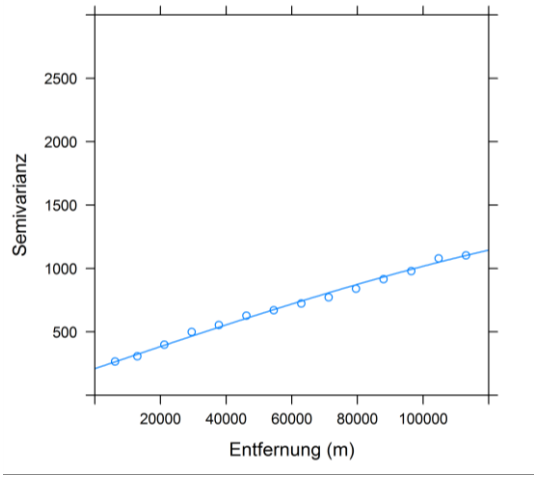
Niederschlagsverteilung (mm)



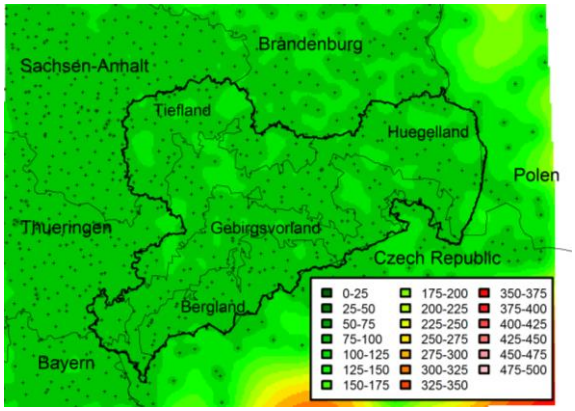
Semivariogramm der Residuen



Semivariogramm der Residuen



Krigevarianz (mm²)



Krigevarianz (mm²)

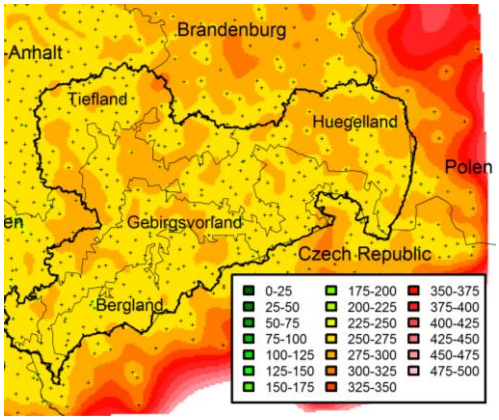


Abbildung 10: Auswahl von Monaten mit hoher bzw. niedriger räumlicher Variabilität des Niederschlags: Interpolierter Niederschlag, Semivariogramm und Krigevarianz

3.5 Lückenfüllungen

Der Ansatz für den Referenzdatensatz sieht vor, möglichst jede Lücke im Datensatz zu schließen, also auch vor Beginn und nach dem Ende der Messungen. Welcher Anteil an Lückenfüllungen sinnvoll ist, unterscheidet sich für die verschiedenen Anwendungen. So sollte der Anteil bei klimatologischen Untersuchungen (z. B. Trendanalysen) geringer sein als z. B. bei Wasserhaushaltsuntersuchungen. Für diese beiden Bereiche werden auf der Benutzeroberfläche (siehe Kapitel 4.8) Voreinstellungen bezüglich des zulässigen Anteils an Lückenfüllungen für den gewünschten Zeitraum umgesetzt. Im „Expertenmodus“ wird dem Nutzer ermöglicht, selbst die Grenzen festzulegen. Der Vorteil dieses Ansatzes ist eine maximale Nutzung der vorhandenen Daten. So würde z. B. eine fünfzehnjährige Reihe für Klimauntersuchungen zu kurz sein, aber für Wasserhaushaltsuntersuchungen durchaus in Betracht kommen. Insbesondere beim Niederschlag ist jede zusätzliche Stützstelle für die Regionalisierung, sei es auch nur für ein paar Jahre, wertvoll.

3.5.1 Lückenfüllungen durch Berechnungen

Mit der Magnus-Formel können Dampfdruck DD und relative Feuchte RF mit Hilfe der Temperatur TM ineinander umgerechnet werden. Zur Abschätzung der Güte dieser Berechnungen wurden exemplarisch alle möglichen Umrechnungen (DD aus RF und umgekehrt) für Dresden durchgeführt und den Beobachtungen gegenübergestellt. Die Berechnung des Dampfdrucks ist mit hoher Güte möglich ($R^2 = 0{,}99$). Bei der relativen Feuchte ergeben sich – trotz eines R^2 von 0,98 – Überschätzungen durch die Berechnungen, insbesondere ab 80 %. Dies ergibt sich methodenbedingt aus der Diskrepanz der Berechnung des Tageswertes RF_{obs} aus gemessenen Stundenwerten und der Berechnung von RF_{ber} aus Tagesmittelwerten von TM und DD.

Für DWD-Tagesdaten konnten 2100 Lücken des Dampfdrucks und 4921 Lücken der relativen Feuchte durch Berechnungen geschlossen werden.

3.5.2 Lückenfüllung mittels Multipler Regression

Eine weitere Lückenfüllung erfolgte mittels multipler Regressionsbeziehungen. Hierzu wurde zu jedem Zeitpunkt geprüft, welche der 30 nächstgelegenen Stationen über plausible Daten verfügt. Von diesen Stationen wurden alle Zeitpunkte mit Daten dahingehend analysiert, welche Kombination an Stationen am besten die Daten der Zielstation wiedergab.

Das R-Paket LEAPS (MILLER 2009) bietet die Möglichkeit, eine umfangreiche Suche nach der bestmöglichen Regression durchzuführen und verwendet zur Optimierung einen „Branch and Bound“ Algorithmus. Damit eine Station für die Regression berücksichtigt wird, muss sie sich um mindestens vier Jahre mit der Zielreihe überschneiden. Die Auswahl geeigneter Stationen erfolgt hierbei anhand des adjustierten Bestimmtheitsmaßes. Während i. d. R. das „normale“ Bestimmtheitsmaß mit dem Hinzufügen weiterer Stationen immer steigt, verbessert sich das adjustierte Bestimmtheitsmaß nur, wenn ein signifikanter Informationsgewinn erzielt wird.

Zur Aufstellung der Regressionsgleichungen wurde beim Niederschlag, der Sonnenscheindauer, der Windgeschwindigkeit, der Schneehöhe ein Interzept (Schnittpunkt mit der y-Achse) von 0 erzwungen, damit die vorhergesagte Reihe Null wird, wenn alle erklärenden Stationen Null sind. In seltenen Fällen werden negative Niederschläge berechnet, die dann auf 0 gesetzt werden.

Ein Problem der beschriebenen Methode ist die häufige Berechnung sehr kleiner Niederschläge. Hat nur eine der umgebenden Stationen Niederschlag, ergibt sich ein Wert >0. Damit werden die Anzahl an Niederschlagstagen und die Niederschlagssumme überschätzt. Daher wurden die Niederschlagsreihen neu kodiert mit: Niederschlag = 1 und kein Niederschlag = 0. Dann wurde eine lineare Regression (R-Paket GLM) mit allen in diesem Zeitschritt verwendeten Stationen gerechnet. Damit wird neben dem konkreten Wert (siehe oben) für den Zeit-

schritt auch eine Wahrscheinlichkeit generiert, ob Niederschlag an der Zielstation vorlag oder nicht. Wahrscheinlichkeiten kleiner als 0,5 wurden als kein Niederschlag definiert und die berechneten Niederschlagssummen durch Null ersetzt. Für die Sonnenscheindauer wurde dieses Verfahren ebenfalls angewendet.

Zur Validierung der Methode wurde für jeden Datensatz eine Lückenfüllung durchgeführt. Beobachtete Messwerte wurden dazu temporär auf Fehlwert -999 gesetzt. Durch einen Abgleich der gefüllten mit den beobachteten Werten ist eine Abschätzung der Güte möglich. Als Gütemaße dienten das Bestimmtheitsmaß R^2, der Root Mean Square Error RMSE, die Abweichung zwischen den Jahresmittelwerten bzw. -summen BIAS sowie weitere statistische Maße der Reihe (z. B. Tage mit 0 mm Niederschlag). Die Validierung wurde exemplarisch für alle Klimaelemente für eine Flachland- und eine Gebirgsstation durchgeführt (Dresden-Klotzsche und Fichtelberg). Der Abbildung 11 ist zu entnehmen, dass die Lückenfüllung prinzipiell sehr zuverlässig funktioniert. Unterschätzungen des Niederschlags treten insbesondere bei hohen Tagessummen auf. Die Sicherheit der Lückenfüllung für RR und TN ist bei der sehr exponiert gelegenen Station Fichtelberg geringer, was sich an der höheren Streuung um die Ausgleichgerade ablesen lässt.

Tabelle 9 verdeutlicht, dass die Temperaturen und der Dampfdruck sehr gut gefüllt werden können. Aber auch Elemente mit einer deutlich höheren räumlichen Variabilität, wie der Niederschlag und die Windgeschwindigkeit, weisen eine hohe Güte auf. Die Zuverlässigkeit nimmt bei der Lückenfüllung von Monatswerten zu.

Die Station Fichtelberg ist hinsichtlich der Lückenfüllung als ein Extrem zu betrachten. Die Witterungsbedingungen auf dem Kamm des Erzgebirges weichen oft von denen in tieferen Lagen ab (z. B. Temperaturinversionen und orografisch induzierte Niederschläge), was das Finden einer zu jedem Zeitpunkt geeigneten Regressionsbeziehung zu den Nachbarstationen erschwert. Die Güte der Lückenfüllung im Untersuchungsgebiet wird demzufolge eher der von Dresden ähneln.

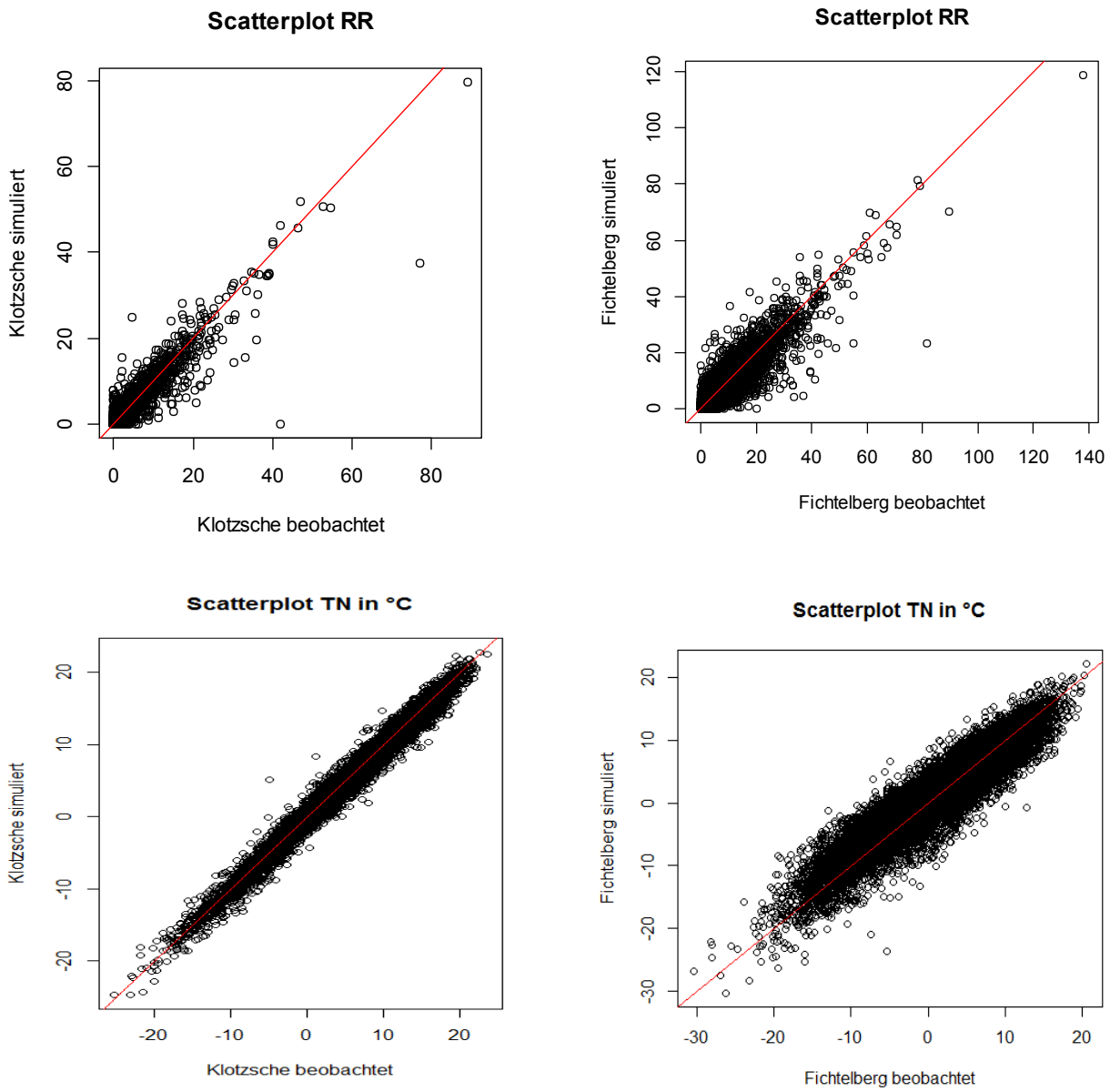


Abbildung 11: Validierung der Lückenfüllungsmethode für den Niederschlag RR und die Minimumtemperatur TN für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg

Tabelle 9: Ergebnisse der Validierung der Lückenfüllung von Tages- und Monatswerten verschiedener Klimaelemente für die Stationen Dresden und Fichtelberg

Element / Station	Bias der Tage	Bias der Summe/des Mittels	R^2	RMSE
TAGESWERTE				
RR - Dresden	-0,1 % *	1,4 %	0,88	1,37
RR - Fichtelberg	10,2 % *	-7,9 %	0,87	2,14
SD - Dresden	-1,2 % **	-7,9 %	0,82	1,86
SD - Fichtelberg	-2,5 % **	-1,2 %	0,85	1,68
RF - Dresden	-67 % ***	-0,4 %	0,91	3,96
RF - Fichtelberg	32 % ***	-0,3 %	0,61	9,77
TM - Dresden		0,16 K	0,99	0,68
TM - Fichtelberg		0,22 K	0,93	1,95
TN - Dresden		-0,14 K	0,98	0,91
TN - Fichtelberg		0,71 K	0,88	2,52
TX - Dresden		0,09 K	0,99	0,75
TX - Fichtelberg		1,5 K	0,89	3,15
FF10 - Dresden		8,0 %	0,69	1,24
FF10 - Fichtelberg		16 %	0,53	4,33
SN - Dresden		7 %	0,95	0,96
SN - Fichtelberg		-15 %	0,68	33,13
DD - Dresden		0 %	0,99	0,46
DD - Fichtelberg		0 %	0,97	0,55
NN - Dresden		0 %	0,87	0,82
NN - Fichtelberg		- 3 %	0,73	1,24
MONATSWERTE				
RR - Dresden		-0,3 %	0,95	7,60
RR - Fichtelberg		0,4 %	0,91	14,70
FF10 - Dresden		1,5 %	0,81	0,21
FF10 - Fichtelberg		-0,1 %	0,74	0,40

* ohne Niederschlag; ** ohne Sonnenschein; *** über 99,5 %

Festlegung der Güte der Lückenfüllung

Im Referenz-Datensatz wird neben der Plausibilität der Rohdaten auch die Güte der Lückenfüllung in Form eines Flags abgespeichert (siehe Kapitel 3.8).

Ob die mit der Regressionsanalyse ermittelte Steigung signifikant ist, wird mit Hilfe eines F-Tests ermittelt, der die erklärte Varianz zur Restvarianz in Beziehung setzt. Aufgrund der hohen Anzahl an Daten, die bei der Regressionsbeziehung einfließen (Tageswerte von mindestens vier Jahren), sind sämtliche Steigungen signifikant.

Aus der Summe der Abweichungsquadrate für die x-Werte und der Standardabweichung der geschätzten y-Werte kann unter Nutzung der entsprechenden Quantile der t-Verteilung ein Vorhersageintervall berechnet werden

(SACHS 1992). Bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von α = 0,05 wird berechnet, in welchem Bereich sich für ein gegebenes x der vorhergesagte Wert y befindet.

Im Gegensatz zum Konfidenzintervall, welches den mittleren Verlauf der Regressionsgeraden charakterisiert, liefert das Vorhersageintervall eine Angabe über die Einzelwerte: je kleiner das Vorhersageintervall desto sicherer der vorhergesagte Wert.

In der Abbildung 12 werden die mittleren Vorhersageintervalle, die sich für die Lückenfüllungen aller DWD-Stationen im Untersuchungsgebiet (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) für verschiedene Klimaelemente ergeben, dargestellt. So tritt bei der Mitteltemperatur ein Vorhersageintervall von ± 1.3 °C am häufigsten auf. Jedoch kommen auch Werte von bis zu 4 °C vor. Bei solch hohen Vorhersageintervallen ist die gefundene Regressionsbeziehung weniger gut zur Lückenfüllung geeignet. Hohe Vorhersageintervalle der Temperaturen kommen häufig an exponierten Stationen vor (Zinnwald TM = 3,0; TX = 3,5; TN = 2,6-4,6 °C) und an Stationen am Rande des Untersuchungsgebietes (z. B. Eisleben, Selb, Waldsassen, Wunsiedel, Bertsdorf, Lehesten). Hier gibt es tendenziell weniger erklärende Stationen aus der Umgebung.

Aus den Erfahrungen in der Wettervorhersage und den Histogrammen der Vorhersageintervalle (Abbildung 12) wurden Schwellenwerte abgeleitet, die eine Klassifizierung in „geringe“, „mittlere“ und „hohe“ Vorhersageintervalle ermöglicht (Tabelle 10):

- Der DWD schätzt in der Wetterprognose einen vorhergesagten Tageswert der Temperatur als getroffen ein, wenn er maximal ± 2,5 K vom Messwert abweicht[2]. Daher wurden die Schwellen auf 1,6 und 2,5 k festgelegt.
- Der DWD schätzt einen vorhergesagten Tageswert der Windgeschwindigkeit als getroffen ein, wenn er maximal ±2,5 m/s vom Messwert abweicht. Daher wurden die Schwellen auf 1,6 und 2,5 m/s festgelegt. Für die monatlichen Lückenfüllungen fallen die Vorhersageintervalle wesentlich geringer aus (max. 1,8 m/s), weshalb die Schwellen auf 0,4 und 0,7 m/s festgelegt wurden.
- Für die Sonnenscheindauer wurden keine Angaben beim DWD gefunden. Als Schwellen werden pragmatisch 1/8 und 2/8 des Bedeckungsgrades definiert. Das entspricht, bei einer mittleren astronomisch möglichen Sonnenscheindauer von 12 h, Schwellenwerten von 1,5 und 3 h.

Die Messgenauigkeit der relativen Luftfeuchte liegt bei 2-5 %, weshalb die Schwellenwerte für die Güte der Lückenfüllung auf Vorhersageintervalle von 5 % und 8 % gesetzt werden.

[2] http://www.dwd.de/DE/wetter/schon_gewusst/qualitaetvorhersage/qualitaetvorhersage_node.html

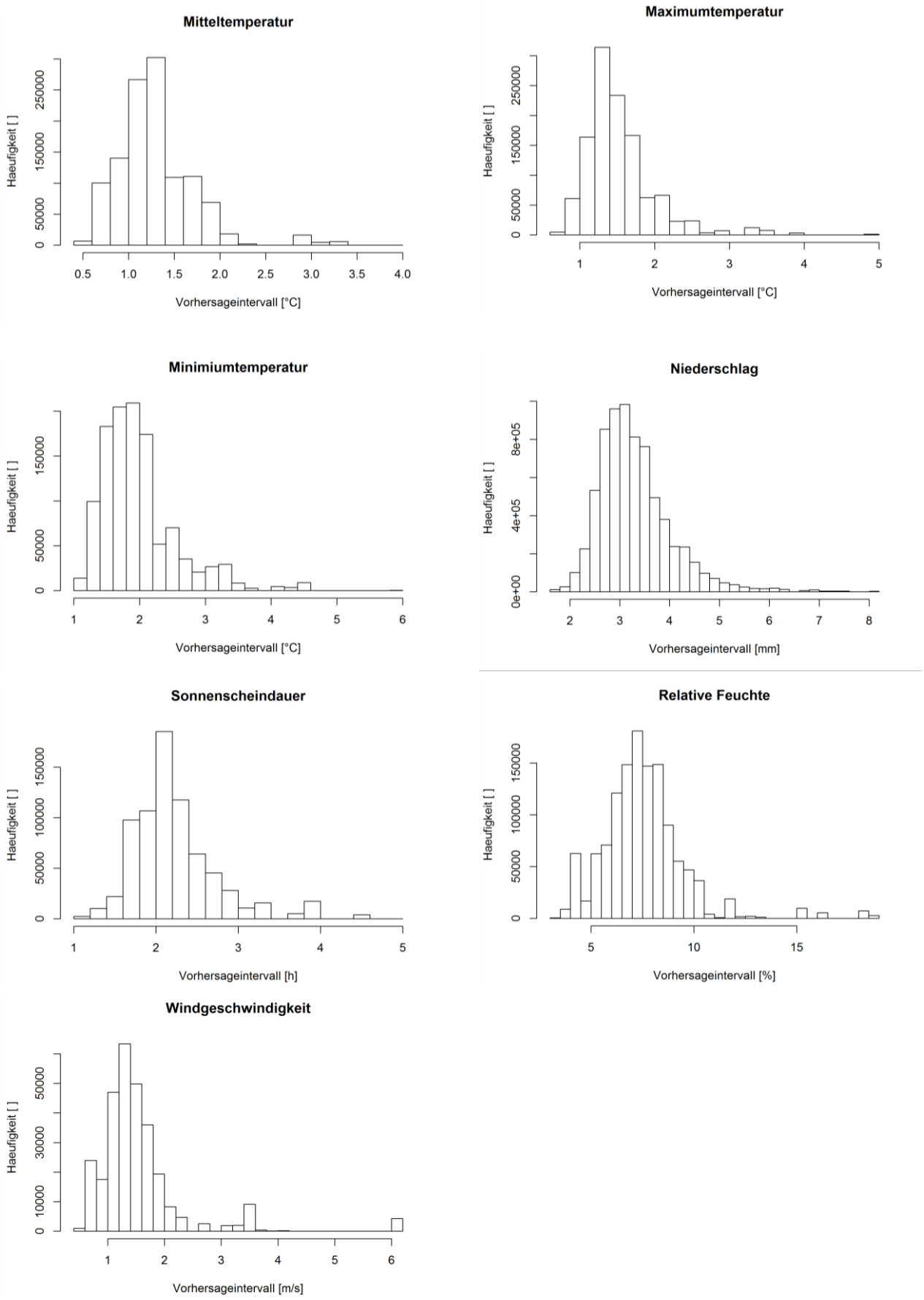
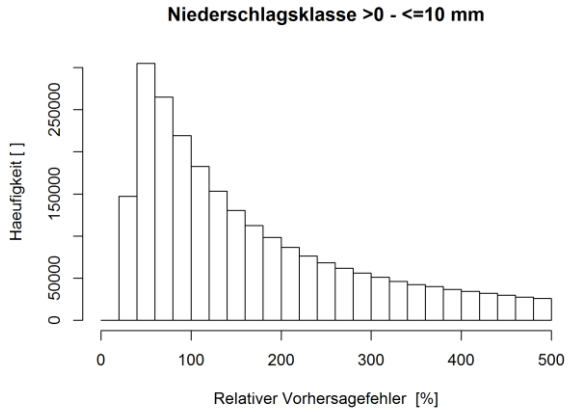
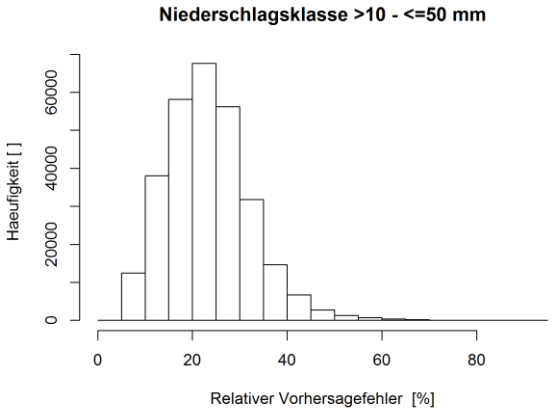


Abbildung 12: Vorhersageintervalle aller lückengefüllten DWD-Tageswerte im Untersuchungsgebiet

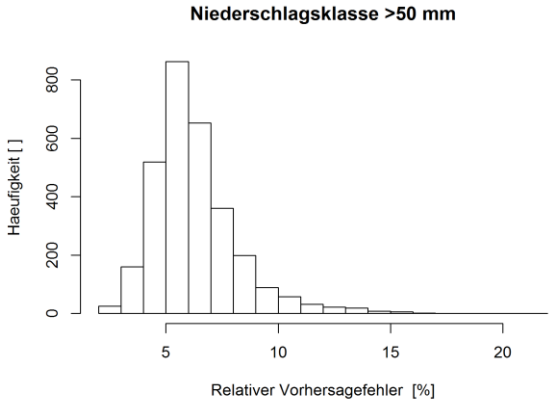
- Beim Niederschlag werden Vorhersageintervalle von größtenteils 2-8 mm berechnet. Die Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe ist dabei sehr gering, wie der Vergleich der Mittelwerte der Vorhersageintervalle für drei Niederschlagsklassen aufzeigt:
  - Niederschlagsklassen >0 und <= 10 mm: 3,2 mm Vorhersageintervall
  - Niederschlagsklassen >10 und <= 50 mm: 3,4 mm Vorhersageintervall
  - Niederschlagsklassen >50 mm: 3,8 mm Vorhersageintervall
  - Der absolute Wert des Vorhersageintervalls eignet sich somit nicht zur Klassifizierung der Vorhersageintervalle.
  - Daher wird ein relativer Vorhersagefehler berechnet (Vorhersageintervall/Niederschlag * 100%) und in Abbildung 13 für die drei Niederschlagsklassen dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass die absoluten Vorhersagefehler bei kleinen Niederschlägen zu großen relativen Vorhersagefehlern führen, und mit zunehmender Niederschlagshöhe der relative Fehler stark abnimmt. In Abbildung 13 ist eine erste statistische Auswertung der relativen Vorhersagefehler aufgeführt. Für die Niederschlagsklasse 0-10 mm, beispielsweise, haben 25 % (25. Perzentil) der Daten einen relativen Vorhersagefehler, der geringer als 84 % ist. Und 50 % der Daten haben einen relativen Vorhersagefehler, der geringer als 181 % ist. Diese Perzentile werden als geeignete Schwellenwerte für die Klassifizierung des Vorhersageintervalls angesehen. Demnach wird ein Vorhersageintervall von Lücken gefüllten Werten als „gering“ eingestuft, wenn das aus der Regression berechnete relative Vorhersageintervall geringer als das 25. Perzentil aller relativen Vorhersageintervalle der entsprechenden Niederschlagsklasse ist. Das Vorhersageintervall ist „groß“, wenn es größer als das 50. Perzentil ist. Dazwischen wird es als „mittleres“ Vorhersageintervall eingeschätzt (siehe Tabelle 10).
  - Um nun für jeden beliebigen Niederschlag und jedes auftretende Vorhersageintervall eine Einstufung vornehmen zu können, wurden für 3.000 Niederschlagsklassen der Klassenbreite 0,1 mm die relativen Vorhersageintervalle analysiert und jeweils das 25. und 50. Perzentil errechnet. An die Werte des 25. und 50. Perzentils wurden Potenzfunktionen angepasst, die somit die Grenzen für die Eingruppierung in „geringe“/“mittlere“/“hohe“ Vorhersageintervalle ermöglichen (Abbildung 14). Für jede Kombination von aufgefülltem Niederschlag und dessen Vorhersagintervall ist somit eine Güteabschätzung möglich. Die Vorgehensweise ist für Tages- und Monatswerte identisch.
  - Beispiel: Tagesniederschlag = 10 mm und berechnetes Vorhersagintervall = 2 mm (entspricht einem relativen Vorhersagintervall von 20 %). Der Wert liegt unterhalb der blauen Kurve (Abbildung 14) und würde als „geringes“ Vorhersageintervall eingestuft. Ab einem Vorhersageintervall von ca. 3 mm würde der Wert oberhalb der orangefarbenen Kurve liegen und als „hohes“ Vorhersageintervall eingeschätzt.



Min	25. Perz.	50. Perz.	75. Perz.	Max
17	84	181	461	2.3



Min	25. Perz.	50. Perz.	75. Perz.	Max
3.7	17.1	22.8	28.5	94



Min	25. Perz.	50. Perz.	75. Perz.	Max
2.2	5.1	5.9	7.1	21.7l

Abbildung 13: Häufigkeit des relativen Vorhersagefehlers aller Lückenfüllungen des täglichen Niederschlags (Klassen) im DWD-Netz für drei Niederschlagsklassen. Statistische Kennwerte des Vorhersagefehlers sind unter jedem Plot tabelliert

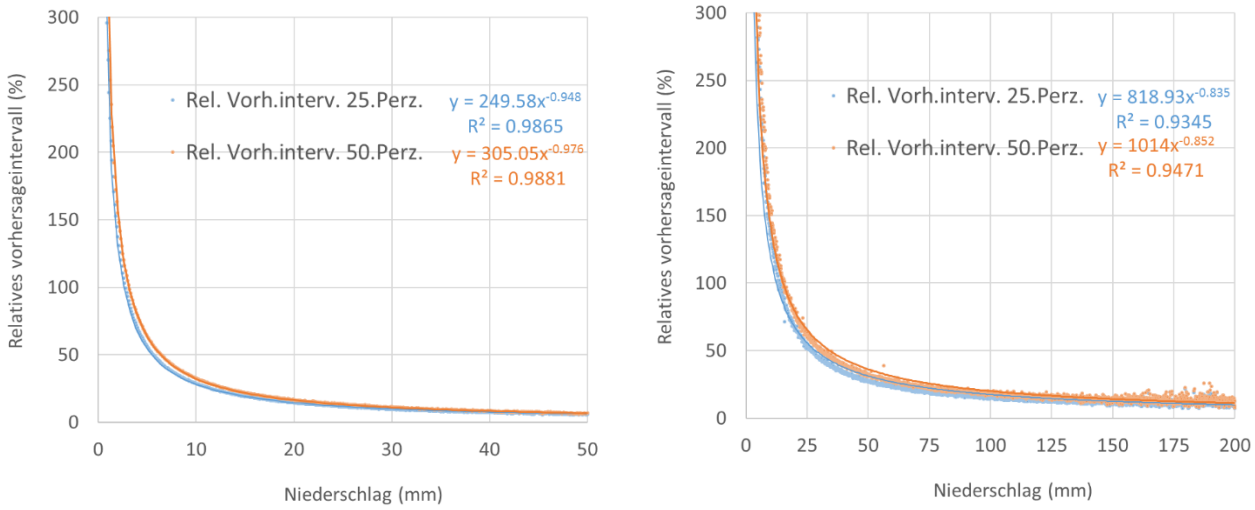


Abbildung 14: Angepasste Potenzfunktionen an die Beziehung des relativen Vorhersagefehlers in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe, links für Tageswerte und rechts für Monatswerte

Tabelle 10: Festlegung der Schwellenwerte für die Klassifizierung der Vorhersageintervalle auf Basis der Signifikanz der Regressionsgeraden und des Vorhersageintervalls (* bei Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % = signifikant; n. s.= nicht signifikant) – Beim Niederschlag handelt es sich um den relativen Vorhersagefehler (Vorhersageintervall / Niederschlagshöhe*100 %)

Vorhersageintervall Element	Gering	Mittel	Hoch
TAGESWERTE			
TM [°C]	<=1,6 *	>1,6 <2,5 *	>=2,5 * oder n. s.
TN [°C]	<=1,6 *	>1,6 <2,5 *	>=2,5 * oder n. s.
TX [°C]	<=1,6 *	>1,6 <2,5 *	>=2,5 * oder n. s.
FF10 [m/s]	<=1,6 *	>1,6 <2,5 *	>=2,5 * oder n. s.
SD [h]	<=1,5 *	>1,5 <3,0 *	>=3,0 * oder n. s.
RF [%]	<=5,0 *	>5,0 <8,0 *	>=8,0 * oder n. s.
RR [%]	< $249{,}58*RR^{-0{,}948}$	dazwischen	> $305{,}05*RR^{-0{,}976}$
MONATSWERTE			
FF10 [m/s]	<=0,4 *	>0,4 <0,7 *	>=0,7 * oder n. s.
RR [%]	< $818{,}93*RR^{-0{,}835}$	dazwischen	> $1014*RR^{-0{,}852}$

3.6 Berechnungen von abgeleiteten Größen

3.6.1 Niederschlagskorrektur

Die Niederschlagskorrektur wurde nach dem von RICHTER (1995) vorgeschlagenen Verfahren durchgeführt. Für Tageswerte wird in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur an der Station ermittelt, ob Regen, Schnee oder Mischniederschlag gefallen ist. Unter Hinzuziehung des Geschütztheitsgrades GG der Station (4 Grade: von „frei“ bis „sehr geschützt“) werden die Koeffizienten der Korrektur bestimmt. Liegen keine Temperaturwerte an der Station vor, wird ein Wert aus den benachbarten Temperaturstationen mittels Inverser Distanzwichtung ermittelt. Für Monatswerte werden die in RICHTER tabellierten mittleren Monatskorrekturfaktoren in Abhängigkeit vom Geschütztheitsgrad und der Zone in Deutschland verwendet.

Die Korrekturfaktoren unterliegen einem typischen Jahresgang mit hohen Werten in der kalten und niedrigeren Werten in der warmen Saison. In Tabelle 11 sind für einige Stationen die Mittelwerte der täglichen bzw. monatlichen Korrektur aufgeführt. Auffällig sind die unsystematischen Unterschiede zwischen monatlicher und täglicher Korrektur.

Tabelle 11: Mittelwerte der Niederschlagskorrektur für tägliche und monatliche Datenreihen

Station	Geschütztheitsgrad	Mittlere tägliche Korrektur (%)	Mittlere monatliche Korrektur (%)
Dresden	1	16	17,5
Fichtelberg	2	19	15
Chemnitz	2	14	15
Zielona Gora	1	20	
Bedrichov	3	13	-
Praha-Ruzyne	3	14	-

3.6.2 Potentielle Verdunstung

Die Berechnung der potentiellen Verdunstung wurde für 12 Standorte des Agrarmeteorologischen Netzes durchgeführt. Es wurde der Ansatz von WENDLING (DVWK 2002) gewählt, der als Eingangsgrößen die Globalstrahlung und die Lufttemperatur in 2 m Höhe benötigt. Die Lufttemperatur wird an den Agrarstandorten gemessen, eine Strahlungsgröße nicht. Die Globalstrahlung lässt sich aus der Sonnenscheindauer nach dem Ansatz von ÅNGSTRÖM (1924) berechnen. Daher wurde eine Interpolation der an DWD Stationen gemessenen Sonnenscheindauer auf die Agrarstandorte durchgeführt. Auf sächsischem Gebiet liegen 31 DWD Stationen mit Daten der Sonnenscheindauer vor. Gemäß den Erfahrungen bei der Lückenfüllung können die Lücken bei der Sonnenscheindauer mit einer Genauigkeit (Vorhersageintervall) von durchschnittlich ±2 h gefüllt werden. Bei einer mittleren Sonnenscheindauer von ca. 4,4 h pro Tag ist das eine relevante Fehlergröße. Für die Lückenfüllung von Lufttemperaturreihen stehen 41 sächsische Stationen zu Verfügung; die Genauigkeit der Vorhersage beträgt im Durchschnitt 1,3 °C.

3.7 Homogenitätsprüfung

3.7.1 Allgemeines

Eine homogene Klimazeitreihe ist definiert als diejenige, deren Variationen lediglich durch Variationen des Klimas und Wetters verursacht werden (VENEMA et al. 2012). Lange Beobachtungsreihen sind selten homogen. Die Inhomogenitäten haben oft die gleiche Größenordnung wie das Klimaänderungssignal des 20. Jahrhunderts (AUER et al. 2007) und verdecken Trends und die dekadische Variabilität. Typische Ursachen für Inhomogenitäten sind:

- Stationsverlegungen
- Veränderungen der Messbedingungen
  - Messgerätewechsel/Automatisierung
  - Veränderung der Aufstellbedingungen (Höhe, Schutz)
  - Verändertes Monitoring (z. B. Beobachtungszeit)
- Veränderungen der Umgebung (Stadtklima, Bewuchs …)
- Veränderte Berechnungsvorschriften

Die hohe Variabilität von Tagesdaten erschwert das Erkennen von Inhomogenitäten, deshalb werden in der Regel Jahresdaten untersucht. Um jahreszeitliche Diskontinuitäten zu entdecken, die sich evtl. auf Jahresbasis herausmitteln, werden zusätzlich Monatsdaten – in diesem Projekt Jahreszeitendaten – untersucht.

Man unterscheidet absolute und relative Homogenitätstests. Absolute Prüftests analysieren nur die interessierende Zeitreihe selbst. Sie sind geeignet für sehr geringe Datendichten, für Stationen, die nicht mit anderen korrelieren, oder auch bei gleichzeitig auftretenden Diskontinuitäten in der Region von gleicher Größe. In der Regel werden relative Tests durchgeführt, bei denen die Testreihe gegenüber einer Referenzreihe geprüft wird, die sich aus einer oder mehreren Stationen der Umgebung zusammensetzt.

3.7.2 Metadaten

Metadaten beschreiben Ort, Lage, Umgebung der Station, die verwendeten Messgeräte, das Beobachtungsregime und die Berechnungsvorschriften in ihrer zeitlichen Variabilität. Sämtliche Änderungen sollten Tag genau dokumentiert werden.

In der Realität sind die Metadaten oft nicht vollständig. Auch der Digitalisierungsgrad der Metadaten und deren Zugänglichkeit sind für die Datennutzer meist sehr eingeschränkt. Der DWD stellt inzwischen die digitalisierten Metadaten online zur Verfügung. Der Aufbau der Datenbank ist noch nicht abgeschlossen, sodass die Angaben nicht immer eindeutig sind. Wenn mehrere Messgeräte angegeben werden, ist unklar, von welchem die Messwerte der Datenreihe stammen.

Eine automatisierte Entscheidungsunterstützung, inwieweit eine Inhomogenität vorliegt, ist nur zum Teil möglich.

Ein Beispiel für die noch ungenügende Qualität der Metadaten ist die Dokumentation der Niederschlagsmessungen der Station Cottbus (Tabelle 12). Der Abruf der Metadaten im Jahr 2015 zeigt ab dem 8.4.1956 einen Niederschlagsmesser an, was gleichbedeutend mit einem Hellmann-Niederschlagsmesser ist. Ab dem 1.11.1966 ist für über 20 Jahre kein Standardmessgerät des Niederschlags mehr aufgelistet, sondern nur einen Niederschlagsschreiber. Ab dem 28.12.1988 wurden die Daten mit dem Ombrometer NG 200 erhoben und später durch den Pluvio-Ott abgelöst. Ergebnis des 2. Metadatenabrufs im Jahr 2017 waren veränderte Bezeichnungen und wesent-

lich weniger Messgeräte. Recherchen ergaben, dass es bis 2007 durchgehend Messungen mit dem Hellmann-Niederschlagsmesser in Cottbus gab. Mit Einführung des NG 200 lieferte dieser die Messwerte, und ab 2007 der Pluvio-Ott. Der Aufbau der Metdatenbank des DWD ist noch nicht abgeschlossen. Bei jedem Datenabruf sind die Angaben hierzu erneut auf Veränderungen und Plausibilität zu prüfen. Bei einer automatisierten Verarbeitung der Metadaten sind diese Unzulänglichkeiten zu beachten.

Auch Angaben zu den Berechnungsvorschriften liegen vor (z. B. ab ca. 2001 Berechnung Tageswerte aus Stundenwerten). Diese wurden nicht mit in die Projekt-Datenbank übernommen, werden aber im Einzelfall hinzugezogen.

Metadaten sind äußerst wichtig, um statistisch durchgeführte Homogenitätsuntersuchungen zu plausibilisieren. Unter den gegebenen Umständen sind die Metadaten jedoch keine 100-prozentige Referenz.

3.7.3 Verwendete Methode

Zur Analyse der Homogenität der Zeitreihen der Klimaelemente Temperatur (Mittel, Minimum und Maximum), Niederschlag, relative Feuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer wurde das Programm "Homer" (MESTRE et al. 2013) verwendet. "Homer" wurde im Rahmen einer COST-Aktion für monatliche Temperatur- und Niederschlagsdaten entwickelt, wird aber auch für andere Klimaelemente verwendet (z. B. LAAPAS und VENÄLÄINEN 2017). Die in dieser Studie verwendeten Module von "Homer" basieren auf einer Segmentierungsmethode die von Biostatistikern für DNA-Analysen entwickelt wurde. Diese unterteilt eine Datenreihe in eine optimale Anzahl an Segmenten, wobei die Zielgröße sich durch die maximierte externe Varianz und die minimierte interne Varianz ergibt (LINDAU und VENEMA 2013). Der Zeitpunkt des Wechsels von einem zum nächsten Segment (Bruchpunkt) stellt die mögliche Inhomogenität dar. Die externe und interne Varianz werden dabei berechnet als:

$$externe\ Varianz = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N} n_i\,(\bar{x}_i - \bar{x})^2,\ interne\ Varianz = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_j}\left(x_{ij} - \bar{x}_i\right)^2$$

mit n der Länge der Zeitreihe, N der Anzahl an Segmenten, n_i bzw. n_j der Länge des i-ten bzw. j-ten Segmentes, x_{ij} dem j-ten Wert des i-ten Segmentes, $\bar{x}_i$ dem Mittelwert des i-ten Segmentes und $\bar{x}$ dem Mittelwert der Gesamtzeitreihe.

Um die Anzahl der Segmente und der begrenzenden Bruchpunkte zu limitieren, wird als Zielgröße bei dem Verfahren ein Bayes'sches Informationskriterium (BIC) verwendet. Dieses enthält einen Strafterm, der mit der Anzahl der Segmente ansteigt.

Tabelle 12: Metadaten der Niederschlagsmessungen der Station Cottbus, Abruf an zwei aufeinanderfolgenden Jahren

Zeitpunkt des Messgerätewechsels	Messgerät 1	Messgerät 2	Messgerät 3	Messgerät 4	Messgerät 5
METADATENABRUF 2015					
08.04.1956	Niederschlagsmesser				
09.04.1956	Niederschlagsmesser	Niederschlagsschreiber			
01.11.1966	Niederschlagsschreiber				
28.12.1988	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200			
19.03.1995	Niederschlagsschreiber				
22.03.1995	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200			
08.06.1995	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200	Niederschlagsgeber Kroneis		
18.03.2000	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200			
28.03.2000	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200	Niederschlagsgeber Kroneis		
12.06.2000	Niederschlagsschreiber	Niederschlagsgeber Kroneis			
13.06.2000	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200	Niederschlagsgeber Kroneis		
16.08.2004	Niederschlagsschreiber				
18.08.2004	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200	Niederschlagsgeber Kroneis		
14.12.2007	Niederschlagsschreiber	Ombrometer NG 200	Niederschlagsgeber Kroneis	PLUVIO-OTT	Laser-Niederschlags-monitor
24.06.2008	Niederschlagsgeber Kroneis	PLUVIO-OTT	Laser-Niederschlagsmonitor		
02.10.2010	Niederschlagsgeber Kroneis	PLUVIO-OTT	Laser-Niederschlagsmonitor	Niederschlags-wächter	
METADATENABRUF 2017					
01.06.1946	Hellmann-Niederschlagsmesser				
01.11.1966	-				
28.12.1988	NG 200				
14.12.2007	Pluvio				
08.06.1995	Niederschlagsdetector				
02.10.2010	Niederschlagswächter				

Aufbereitung der Mess- und Metadaten

Die Daten und Metadaten des DWD, des IMGW und des CHMI wurden aus der Datenbank extrahiert und für Homer aufbereitet. Entsprechend der Klimagröße wurden monatliche Mittelwerte bzw. Monatssummen ermittelt, wenn eine vorgegebene Anzahl an Tagen mit Fehlwerten nicht überschritten wurde. Die zulässige Anzahl betrug zwei Tage für den Niederschlag und fünf Tage für alle anderen Klimaelemente.

Für die Homogenitätsprüfung müssen die Datenreihen eine (leider nicht dokumentierte) Mindestreihenlänge sowie einen (leider nicht dokumentierten) Überlappungszeitraum mit anderen Datenreihen aufweisen. Daher wurden alle Datenreihen aus dem zu untersuchenden Netzwerk entfernt, deren Mindestlänge 15 zusammenhängende Jahre unterschreitet.

Da die Anzahl der Niederschlagsstationen im Vergleich zu den Klimastationen sehr hoch ist, wurde das Untersuchungsgebiet in vier Quadranten mit Überlappungsbereichen zu den Nachbarquadranten unterteilt und die Analysen mit *Homer* für die Niederschlagsstationen in den einzelnen Quadranten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden für die im folgenden beschriebenen Analyseschritte dann wieder zusammengeführt.

Für jeden Messzeitpunkt liegen neben dem Messwert Informationen zum Messort (Koordinaten und Höhenlage) sowie zu den verwendeten Geräten und der Messhöhe über Grund vor. Diese wurden hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien ausgewertet. Es wurden beispielsweise alle vorkommenden Gerätebezeichnungen analysiert und unterschiedliche Bezeichnungen für dasselbe Messinstrument ermittelt. Um für die Homogenitätsprüfung zu ermitteln, ob es einen Messgerätewechsel gab, wurden sämtliche vom DWD verwendeten Messgeräte unterteilt in:

- Standarmesser: liefern die standardmäßig zur Verfügung gestellten Messwerte
- Automatische Messgeräte: lösen die Standardgeräte in dem meisten Fällen ab
- Geräte für begleitende, zusätzliche Messungen: z. B. Tröpfchenzähler, Schreiber
- Sonstige Einträge

Die Tabelle 13 zeigt die Zuordnung der Messgeräte zu den Gruppen exemplarisch für den Niederschlag. Änderungen von einem Standardmesser oder Niederschlagsautomaten können zu Inhomogenitäten führen. Begleitende Messungen, z. B. durch Niederschlagsschreiber, werden nur bei Messwertausfall verwendet.

Ein Instrumentenwechsel der zur Bestätigung eines Bruchpunktes beitragen kann, ergibt sich, wenn:

- sich die Anzahl der Standardinstrumente zwischen zwei Zeitpunkten unterscheidet,
- sich im Falle der gleichen Anzahl an Standardinstrumenten die Zusammensetzung der Instrumente zwischen zwei Zeitpunkten unterscheiden,
- nur Zusatzinstrumente aufgeführt werden und sich die Anzahl der Zusatzinstrumente zwischen zwei Zeitpunkten unterscheidet oder
- nur Zusatzinstrumente aufgeführt werden und im Falle der gleichen Anzahl an Zusatzinstrumenten sich die Zusammensetzung zwischen zwei Zeitpunkten unterscheidet.

Weiterhin tragen zu einem bestätigten Instrumentenwechsel die Veränderung der Messhöhe bei. Fehlwerte bei der Instrumentenbezeichnung sowie bei der Messhöhe gehen nicht in die Analyse ein. Veränderungen der geographischen Lagekoordinaten sowie der Stationshöhe werden als bestätigter Ortswechsel für die spätere Analyse registriert.

Tabelle 13: In der Projekt-Datenbank aufgeführte Niederschlagsmessgeräte des DWD und deren Unterteilung

Name	Alternativer Name 1	Alternativer Name 2
Standardmesser		
Gebirgsniederschlagsmesser (nach Hellmann)		
nach Hellmann	Niederschlagsmesser	
Automatisierte Messer- lösen Standardmesser ab		
Ombrometer Lambrecht 1518H3		
Ombrometer NG 200	NG 200	
Pluvio	PLUVIO	PLUVIO-OTT
Begleitende Messungen, die nur bei Ausfall der Standardmesser verwendet wurden		
Laser-Niederschlagsmonitor LNM		
Niederschlagsgeber Kroneis		
Niederschlagsgeber NG 1		
Niederschlagsmelder Thies		
Niederschlagssammler (automatisch)		
Niederschlagssammler		
Niederschlagsschreiber (beheizt)		
Niederschlagsschreiber (unbeheizt)		
Niederschlagsschreiber DG 200 (beheizt)		
Niederschlagsschreiber		
Niederschlagswächter		
Sonstige Einträge		
NULL		
Gerätetyp unbekannt		
-999%-999		
-999.0%-999.0		

Durchführung der Homogenitätsprüfung

Eine Analyse hinsichtlich möglicher Ausreißer wurde nicht durchgeführt. Jedoch wurden stark auffällig gewordene Zeitreihen nicht berücksichtigt, wie z. B. die Windgeschwindigkeitsreihen des CHMI, welche durch NOAA Daten ersetzt wurden.

Zunächst wurde mit Homer eine Homogenitätsprüfung namens "Pairwise Detection" durchgeführt. Diese basiert auf der Analyse von Differenzen (z. B. für die Temperatur und den Druck) oder von Quotienten (z. B. für den Niederschlag und die Sonnenscheindauer) der aggregierten Zeitreihen von zwei Stationen.

Die Zeitreihen der Differenzen bzw. Quotienten werden hinsichtlich möglicher Bruchpunkte analysiert. Bruchpunkte sind dabei Zeitpunkte die Einzelsequenzen trennen, welche unterschiedliche Mittelwerte aufweisen. Als Aggregierungsgrad wurden Jahressummen bzw. -mittelwerte sowie Summen bzw. Mittelwerte für die einzelnen Jahreszeiten berechnet. Differenzen bzw. Quotienten wurden für alle Stationen in einem Umkreis von 70 km zur Zielstation, mindestens jedoch 5 Referenzstationen, ermittelt.

Weiterhin wurde mit Homer eine zweite Homogenitätsprüfung namens "Joint Detection" durchgeführt. Diese wurde durch die Konfiguration des Stationsnetzes sowie die überlappenden Zeiträume der Einzelstationen programmintern in den meisten Fällen zu einer paarweisen Detektion reduziert.

Das Homer R-Script wurde so modifiziert, dass alle gefundenen möglichen Bruchpunkte in einer Datei ausgegeben werden. In einem weiteren Schritt wurden Bruchpunkte am Anfang bzw. Ende der Datenreihe entfernt, deren Anfangs- bzw. Endsequenz kürzer als fünf Jahre ist. Es wird davon ausgegangen, dass sich mit fünf Werten kein zuverlässiger Mittelwert für eine Sequenz ermitteln lässt, und damit der Bruchpunkt statistisch nicht gerechtfertigt ist.

Als Resultat ergeben sich Bruchpunkte, die einer der beiden Stationen, die zur Differenzen- bzw. Quotientenberechnung beigetragen haben, zugeordnet werden müssen. Beiden Stationen kann der Bruchpunkt nicht zugeordnet werden, da er in diesem Fall nicht als Bruchpunkt detektiert worden wäre. Die Zuordnung wurde gemacht, indem für jede Jahreszeit (sowie die Jahreswerte) eine dreidimensionale Matrix angelegt wurde. Die ersten beiden Dimensionen beinhalten die Stationsnummern, die Dritte die Zeitdimension. Wird nun für ein Jahr beispielsweise ein Bruchpunkt für die Stationen X und Y gefunden, so wird ermittelt, wieviele andere Stationen den Bruchpunkt mit den Stationen X und Y gemein haben. Ist die Anzahl der anderen Stationen kleiner 5, so wird der Bruchpunkt verworfen. Ist die Anzahl der Stationen >5, so wird der Bruchpunkt der Station zugeordnet, die den Bruchpunkt mit den meisten anderen Stationen gemein hat.

In einem weiteren Schritt wird die Anzahl der Bruchpunkte der individuellen Zeitreihen reduziert. Dazu werden nochmal Bruchpunkte verworfen, die weniger als 5 Jahre vom Anfang und Ende der Zeitreihe entfernt sind. Weiterhin werden Ansammlungen von Bruchpunkten, die durch Zeiträume kleiner 5 Jahre zwischen den einzelnen Bruchpunkten und Abgrenzungen zu anderen Bruchpunkten durch Zeiträume größer 5 Jahre ohne Bruchpunkte, analysiert. Diese Ansammlungen entstehen dadurch, dass die zeitliche Datierung von Bruchpunkten durch die unterschiedlichen Referenzstationen etwas variiert. Ziel ist es nun, diese Ansammlungen durch einen optimal gewählten Bruchpunkt zu ersetzen. Als mögliche Bruchpunktjahre kommen nur Zeitschritte in Betracht, für die in der Zeitreihe gültige Daten vorliegen. Gibt es in dem Zeitraum, der durch die Bruchpunktansammlung begrenzt wird, bestätigte Änderungen des Instruments und/oder des Messstandortes, so werden als mögliche Bruchpunktjahre nur das Jahr/die Jahre der Änderung/ der Änderungen ±2 Jahre zugelassen. Ist dies nicht der Fall, so kann der optimierte Bruchpunkt in jedem Jahr des Zeitraums der Bruchpunktansammlung liegen. Zur finalen Ermittlung des optimierten Bruchpunktes wird entsprechend LINDAU und VENEMA (2013) die externe Varianz zwischen den Sequenzen maximiert.

Im letzten Schritt werden für jede Zeitreihe mit Bruchpunkten Zusatzinformationen ermittelt, diese zusammen mit der Zeitreihe geplottet sowie in einer Ausgabedatei abgelegt. Die Zusatzinformationen umfassen dabei die Ergebnisse eines Trendtests, eines absoluten Homogenitätstests sowie eines Tests auf Mittelwertunterschiede zwischen den homogenen Sequenzen.

Der Trendtest geht auf den Umstand ein, dass der Sequenzierungsalgorithmus, der dem Homogenitätstest zugrunde liegt, fälschlicherweise eine trendbelastete Datenreihe in einzelne Zeitabschnitte mit homogenen Eigenschaften zerlegen könnte. Als Trendtest wird der Mann-Kendall-Test (SCHÖNWIESE 2006) angewendet, der als unempfindlich gegenüber Ausreißern und Datenlücken gilt. Eine Zeitreihe wird als trendbehaftet klassifiziert, wenn der p-Wert unter 5 % liegt. Ein Beispiel für diese Problematik zeigt Abbildung 15. In diesem Fall belegen keine Metadaten eine mögliche Inhomogenität, und der gefundene Bruchpunkt kann durch den signifikanten Trend hervorgerufen worden sein. Die Ergebnisse des Trendtests dienen als Zusatzinformation und gehen nicht in die auto-

matisierte Bewertung von gefundenen Inhomogenitäten ein. Auf dieser Grundlage können jedoch subjektive Entscheidungen hinsichtlich des Homogenitätsstatus durch den Nutzer getroffen werden.

Als zusätzlicher Test zur Detektion von Inhomogenitäten in den Zeitreihen wird das Abbe-Kriterium (SCHÖNWIESE 2006) ermittelt. Dabei handelt es sich um einen absoluten Homogenitätstest, der das Auftreten von Inhomogenitäten aus der Statistik der Einzelzeitreihe diagnostiziert und somit keine Referenzzeitreihe benötigt. Das Ergebnis beschränkt sich dabei auf die Information, ob die Zeitreihe homogen ist oder nicht. Es liefert jedoch keine Information über Anzahl oder Lage der Bruchpunkte. Im Allgemeinen gilt der Abbe-Test als überkritisch, detektiert demzufolge sehr viele Bruchpunkte. Auch das Abbe-Kriterium ist lediglich eine Zusatzinformation und wird nicht automatisiert mit den Ergebnissen der anderen Homogenitätsanalysen verschnitten.

Über einen T-Test (WILKS 2011) werden signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten einzelner Sequenzen ermittelt. Auch hier wird eine Mittelwertänderung als signifikant klassifiziert, wenn der p-Wert unter 5 % liegt. Die Ergebnisse des T-Tests werden verwendet, um die Gesamtzeitreihe als inhomogen zu charakterisieren, wenn der Mittelwertunterschied zwischen zwei Segmenten als signifikant charakterisiert wurde.

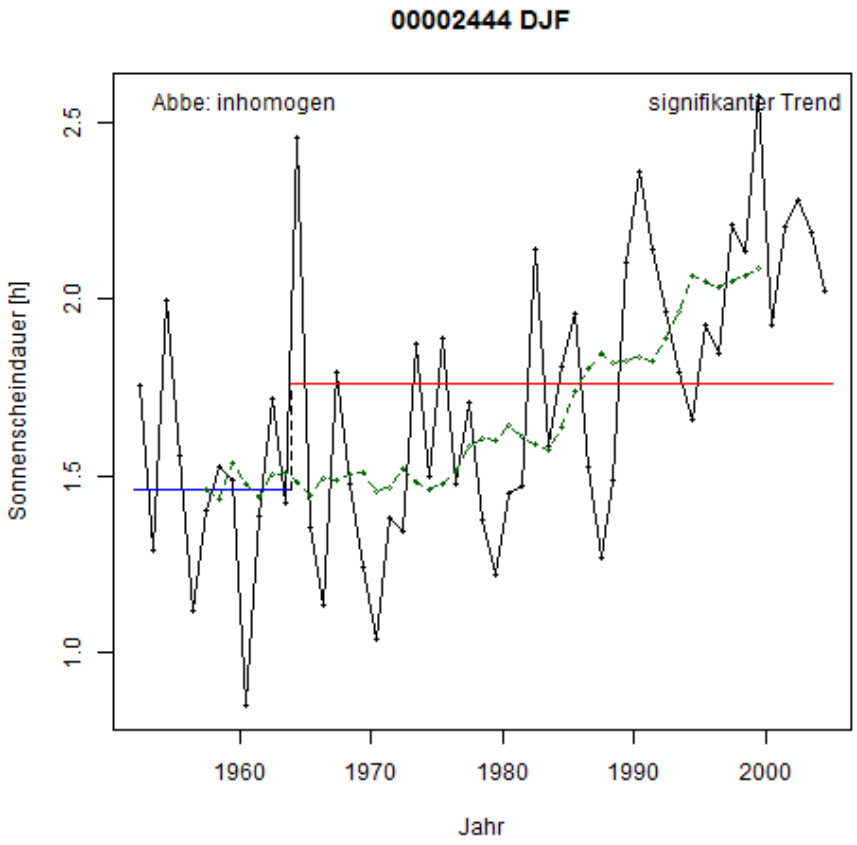


Abbildung 15: Ergebnisse des Homogenitätstests für die Sonnenscheindauer der Station Jena (Sternwarte) im Winter.

Die jeweiligen Zeitreihen der Stationen, inklusive der ermittelten Testergebnisse, werden in einem Plot (Abbildung 15) zusammengefasst. Es wurde ein Bruchpunkt Anfang der 60er Jahre identifiziert, der zu signifikant verschiedenen Mittelwerten in den beiden Sequenzen führt (unterschiedliche Linienfarbe). Das Abbesche Homogenitätskriterium zeigt eine Inhomogenität an. Es wird ein signifikanter Trend erkannt, der durch eine geglättete Kurve (11-jährig gleitendes Mittel) dargestellt wird (grüne Linie). Wenn der Trendtest einen signifikanten Trend diagnostiziert hat, wird zur Veranschaulichung des Trends ebenso ein 11-jähriges gleitendes Mittel an die Daten angepasst und

geplottet. Ebenso werden Informationen über Orts- oder Gerätewechsel im Zusammenhang mit auftretenden Inhomogenitäten dem Plot hinzugefügt (Abbildung 16). Hierbei kennzeichnen:

- rote Punkte Instrumentenwechsel entsprechend der oben definierten Kriterien,
- blaue Punkte Ortswechsel,
- blaurote Punkte Instrumenten- und Ortswechsel und
- unterschiedliche Farben der Mittelwertlinien einen signifikanten Unterschied.

Die Informationen werden in die Ausgabedatei geschrieben, wenn mindestens eine der Inhomogenitäten durch Sequenzen mit signifikant unterschiedlichen Mittelwerten charakterisiert ist.

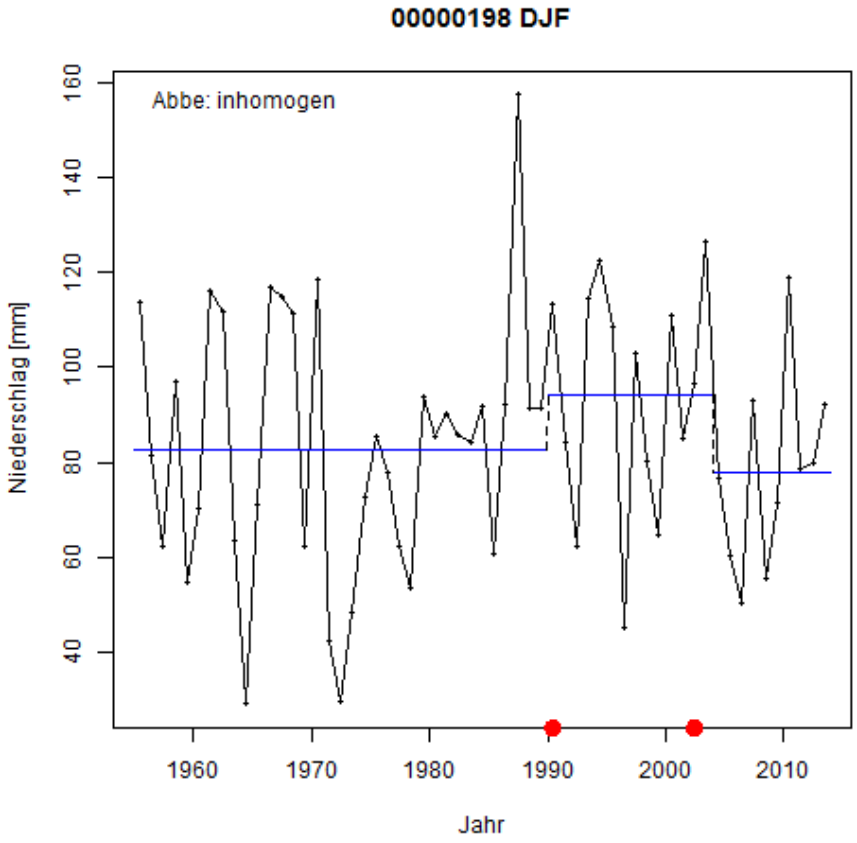


Abbildung 16: Ergebnisse des Homogenitätstests für die Niederschlag der Station Artern im Winter.
Es wurden zwei Bruchpunkte identifiziert. Die Mittelwerte in den Sequenzen sind nicht signifikant verschieden (gleiche Farbe). Das Abbesche Homogenitätskriterium zeigt eine Inhomogenität an. Es liegt kein Trend vor. Die roten Punkte verdeutlichen einen Instrumentenwechsel entsprechend der definierten Kriterien.

Ablage der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Prüfung werden in die Stationsliste der Datenbank geschrieben. Für den Niederschlag, beispielsweise, werden Beginn und Ende der Prüfung in den Spalten *RR_pruef_von* und *RR_ pruef _bis* gespeichert. Beginn und Ende beziehen sich auf die aggregierten Jahresdaten. In *RR_Hom* wird das Prüfergebnis folgendermaßen verschlüsselt:

- 0 – homogen (keine signifikanten Bruchpunkte identifiziert)
- 1 – nicht homogen (in mindestens einer Jahreszeit oder Jahr mindestens ein signifikanter Bruchpunkt identifiziert, der/die jedoch nicht durch Metadaten belegt ist/sind)

- 2 – nicht homogen (in mindestens einer Jahreszeit oder Jahr mindestens eine signifikanter Bruchpunkt identifiziert, der/die durch Metadaten belegt ist/sind)
- 9 – konnte nicht geprüft werden (keine durchgehende Reihenlänge von mindestens 15 Jahren)

Es liegen weitere Ergebnisdateien vor, die dem digitalen Anhang zu entnehmen sind. Eine Übersicht gibt Anhang 2.

3.7.4 Homogenisierung

Eine Homogenisierung der Datenreihen wird in diesem Projekt nicht durchgeführt, da die damit zusammenhängenden Unsicherheiten als zu groß erachtet werden. AUER et al. (2005) führen an, dass eine getrennte Homogenisierung die physikalischen Gesetze verletzen könnte. Des Weiteren besteht die Gefahr der Übertragung des Klimasignals der Referenzstation auf die Zielstationen und damit einer Dämpfung der räumlichen Variabilität. Auch wird angeführt, dass die auftretenden Inhomogenitäten in einem Gebiet möglicherweise einen zufälligen Charakter aufweisen und demzufolge vernachlässigt werden können.

Auch bezüglich der Methodik der Homogenisierung ist z. B. unklar, wie damit umgegangen wird, wenn nur eine Jahreszeit betroffen ist: Wird die gesamte Reihe oder nur die Jahreszeit homogenisiert, wie wirkt sich das auf die elementübergreifende Konsistenz aus?

Es wird empfohlen für die Analysen auf zweifelhafte Reihen gegebenenfalls zu verzichten. Informationen zum Versatz der Mittelwerte können den Ergebnisdateien aus dem digitalen Anhang entnommen werden. Damit ist eine Homogenisierung bei Bedarf möglich.

3.7.5 Homogenitätsprüfung der Agrarmeteorologischen Stationen

Die Agrarmeteorologischen Stationen wurden einer gesonderten Homogentitätsprüfung unterzogen. Die Längen der gemessenen Reihen betragen bei 30 % weniger als 15 Jahre, was eine Anwendung von HOMER nicht ermöglicht. Daher wurde – abweichend von den bisherigen Prüfungen – der lückengefüllte Wert geprüft. Hierzu wurden eine Doppelsummenanalyse zu einer benachbarten homogenen DWD-Station sowie der Alexanderson-Test (ALEXANDERSON 1986) durchgeführt. Exemplarisch ist dies für die Station Baruth (99210) mit der Referenzstation Jonsdorf/Kurort (2436) in Abbildung 17 dargestellt. Bei ca. 11.000 mm kumuliertem Niederschlag von Baruth ist ein Wechsel des Anstiegs der Kurve ersichtlich, das entspricht dem Jahr 1984. Die Testgröße des Alexanderson-Tests T0 ist deutlich größer als die Schwellenwerte bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 bzw. 5 %, was für eine Inhomogenität in der Reihe spricht.

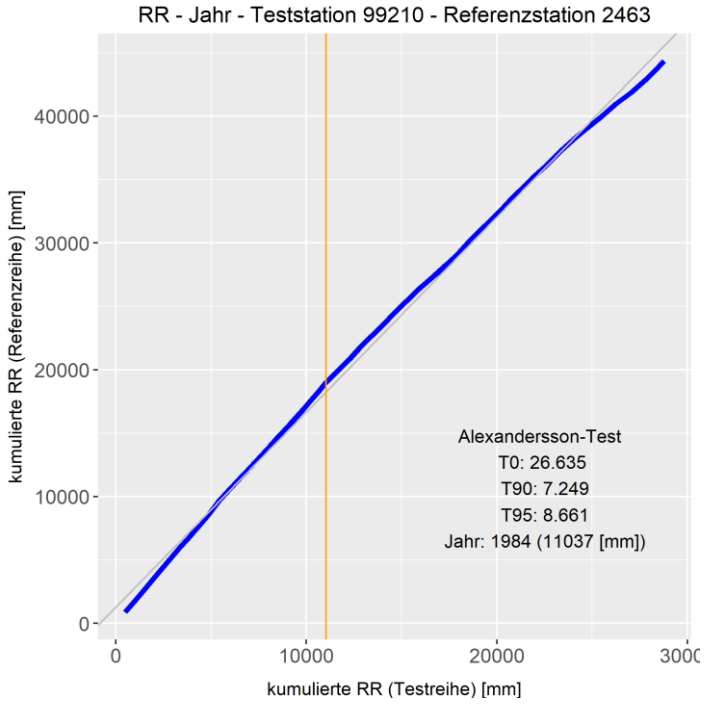


Abbildung 17: Doppelsummenanalyse des Niederschlags zwischen der Testreihe Baruth (99210) und der Referenzreihe Jonsdorf (Kurort) (2436) – Ergebnisse des Alexanderson-Tests

3.8 Qualitätsflagging

Es wird ein Flagging der Daten in der Datenbank umgesetzt, um den Anwender zu befähigen, sämtliche Prozessierungsschritte nachzuvollziehen und je nach Bedarf spezifische Datensätze abzufragen. Es werden Daten der nationalen Wetterdienste (D, PL, CZ) sowie der 12 Stationen des Agrarmeteorologischen Messnetzes geflaggt. Die Idee dieses Datensatzes ist es, sämtliche Reihen für den Zeitraum 1951-2015 aufzufüllen. Die Plausibilität, Güte der Lückenfüllung und Homogenität der Reihen werden mit drei Flaggs nachvollziehbar.

Als Ergebnis der Plausibilitätstests wird Flag 1 für jeden einzelnen Datensatz gesetzt und in die Datentabellen geschrieben:

- 0 = plausibel
- 1 = zweifelhaft: Ausreißer
- 2 = zweifelhaft: zu viele aufeinanderfolgende Tage mit gleichem Wert
- 3 = zweifelhaft: zu viele aufeinanderfolgende Tage mit Wert = 0 (z. B. bei RR)
- 4 = zweifelhaft: Reihung bei TN-TM-TX unlogisch
- 9 = Fehlwert

Flag 2 gibt Informationen zur Höhe des bei der Lückenfüllung ermittelten Vorhersageintervalls für jeden einzelnen Datensatz und steht in den Datentabellen:

- 0 = keine Lückenfüllung notwendig
- 1 = geringe Lückenfüllung
- 2 = mittlere Lückenfüllung

- 3 = starke Lückenfüllung
- 8 = gefüllt, durch Berechnungen
- 9 = keine Lückenfüllung möglich

Die Homogenität der beobachteten Messreihe wird in einen Flag (z. B. RR_Hom) der Stationsliste der Datenbank geschrieben. Zusätzlich werden Anfang und Ende der geprüften Reihe vermerkt (RR_Pruef_von, RR_Pruef_bis):

- 0 = homogen (keine signifikanten Bruchpunkte identifiziert)
- 1 = nicht homogen – ohne Metadatenbestätigung (in mindestens einer Jahreszeit oder einem Jahr mindestens einen signifikanten Bruchpunkt identifiziert, der/die jedoch nicht durch Metadaten belegt ist/sind)
- 2 = nicht homogen – mit Metadatenbestätigung (in mindestens einer Jahreszeit oder einem Jahr mindestens einen signifikanten Bruchpunkt identifiziert, der/die durch Metadaten belegt ist/sind)
- 9 = konnte nicht geprüft werden (keine durchgehende Reihenlänge von 15 Jahren)

3.9 Validierung des Referenzdatensatzes

3.9.1 Meteorologische Validierung

Die Klimavariablen sind natürlicherweise konsistent zueinander. Das bedeutet, dass z. B. an einem Sommertag, an dem ganztägig die Sonne schien, sich eine entsprechende Temperatur einstellen und kein Niederschlag fallen sollte. Werden die Zeitreihen elementweise und unabhängig voneinander korrigiert und lückengefüllt, so kann die Konsistenz verloren gehen. Für viele Anwendungen, z. B. Wasserhaushaltsmodelle, ist eine elementübergreifende Konsistenz für jeden Zeitschritt wichtig. Mittels einer bivariaten und multivariate Prüfung wird die elementübergreifende Konsistenz geprüft.

Bei der bivariaten Konsistenzprüfung wird der Zusammenhang von jeweils zwei Elementen beleuchtet. Dies geschieht exemplarisch anhand der Stationen Dresden-Klotzsche (227 m) und Zinnwald-Georgenfeld (877 m) für den Zeitraum 1951-2015. Zum Beispiel werden für die Niederschlagsklassen 0 bis 1 mm, 1 bis 5 mm, 5 bis 20 mm und 20 bis 200 mm die beobachteten, Ausreißer bereinigten Temperaturwerte in Form von Boxplots dargestellt. Dem gegenübergestellt werden die im Projekt korrigierten und Lücken gefüllten Reihen von Niederschlag und Temperatur. Gravierende Abweichungen der Boxplots weisen auf Veränderungen in der Konsistenz hin. Ähnliche Analysen werden für weitere Klimaelemente durchgeführt.

Die in BERNHOFER und FRANKE (2013) vorgestellte multivariate Konsistenzprüfung analysiert die Abhängigkeit eines Distanzmaßes mehrerer Klimaelemente von Stationspaaren von der Entfernung zwischen den Stationspaaren. Bei Stationen, die dichter beieinanderliegen, sollten die Differenzen zwischen den Elementen geringer sein als bei weiter entfernten Stationen. Des Weiteren sollte bei gestörter Konsistenz der Elemente untereinander das Distanzmaß größer werden. Als Distanzmaß wird die Normalisierte Root Mean Square Differenz (NRMSD) verwendet, das sich folgendermaßen berechnet:

$$NRMSD_{ij} = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^{n} \left(\sqrt{\frac{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} \left(x_{i,k}(t) - x_{j,k}(t) \right)^2}{x_{max} - x_{min}}} \right.$$

x_i Element der Zeitreihe *i* für das Element *k* am Tag *t* (standardisiert)
x_j Element der Zeitreihe *j* für das Element *k* am Tag *t* (standardisiert)

t 1…n Laufindex über Tage
k 1…m Laufindex über Elemente

Für die Berechnung werden alle Elemente (RR, TM, TN, TX, RF, FF10, SD) mittels Mittelwert und Standardabweichung normalisiert (Zeitraum 1951-2015), da die Wertebereiche der Elemente unterschiedliche Größenordnungen aufweisen (z. B. Sonnenscheindauer 0-16 h und Luftfeuchtigkeit 0-100 %). Jede Station wird nun mit allen Stationen kombiniert und der NRMSD über alle Elemente parallel berechnet.

Die Analyse des NRMSD in Abhängigkeit von der Entfernung, einmal für den beobachteten Datensatz und einmal für den Referenzdatensatz, deckt mögliche Inkonsistenzen auf.

3.9.2 Hydrologische Validierung

Ziel der hydrologischen Validierung ist die Bewertung der unmittelbaren Auswirkungen der Verwendung der überarbeiteten meteorologischen Daten (Referenzdatensatz RDS) auf die Berechnung des Wasserhaushalts in Sachsen. Diese Auswirkungen sollen mittels eines bestehenden Wasserhaushaltsmodells berechnet werden. Als Vergleichsgrundlage dienen die hydrologischen Ergebnisse der bereits vorliegenden Wasserhaushaltsberechnungen mit den bisherigen meteorologischen Eingangsdaten. Die hydrologische Validierung soll dabei die Frage beantworten, ob bei Verwendung des RDS der Gebietswasserhaushalt genauer abgebildet wird. Die Genauigkeit kann dabei einerseits an einer besseren und plausibleren Parametrisierung der Wasserhaushaltsmodelle und andererseits an einer exakteren Nachbildung der beobachteten Durchflüsse festgestellt werden.

Für die Validierung wird das Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO (PFÜTZNER et al. 2007) aus dem Projekt „Auswirkungen der prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten der sächsischen Gewässer“ KliWES (SCHWARZE et al. 2011) herangezogen. Im Rahmen des vom LfULG beauftragten Projekts, welches von 2008 bis 2015 am Lehrstuhl für Hydrologie der TU Dresden bearbeitet wurde, erfolgten Wasserhaushaltsberechnungen für den Zeitraum 1961-2010 mit Beobachtungsdaten sowie für 1961-2100 mit Daten regionaler Klimamodelle. Als meteorologische Eingangsdaten wurden in KliWES bisher folgende Datensätze genutzt:

- Ist-Zustand (Messwerte) von 1961 bis 2010
- Drei Realisierungen des regionalen Klimamodells WETTREG2010-Modells von 1961 bis 2100
- Zehn Realisierungen des regionalen Klimamodells WEREX V-Modells von 1961 bis 2100

Eine genaue Darstellung enthält SCHWARZE et al. (2016).

Im Projekt KliWES wurden 242 einzelne Wasserhaushaltsmodellen mittels ArcEGMO erstellt, die jeweils einen Teil Sachsens abdecken. Davon wurden für die Validierung des Referenzdatensatzes sieben Modellgebiete ausgewählt. Die Auswahl der Gebiete erfolgte nach ihrer topographischen Lage und ihrem geologischen Untergrund. Hinzu kommt die optimale Verfügbarkeit von Zielgrößen für die Kalibrierung, d.h. dass es sich bei den Einzugsgebieten um sogenannte DIFGA-Gebiete handeln soll. Mit Hilfe der Differenzenganglinienanalyse DIFGA (SCHWARZE, 1985) können anhand des beobachteten Niederschlags und Durchflusses verschiedene Wasserhaushaltsgrößen wie z.B. der Direktabfluss, der langsame und schnelle Grundwasserabfluss und die Verdunstung abgeleitet werden. Eine genaue Darstellung der Vorgehensweise gibt SCHWARZE et al. (2011).

Im Ergebnis fällt die Wahl auf sieben Modellgebiete, welche in Tabelle 14 aufgeführt sind.

Tabelle 14: Ausgewählte sächsische Modellgebiete für Wasserhaushaltsberechnungen

Pegeleinzugsgebiet	Topographische Lage	Geologischer Untergrund	Gewässer	Einzugsgebietsgröße (km²)
Johanngeorgenstadt 2	Westerzgebirge	Festgestein	Breitenbach	27
Markersbach 1	Westerzgebirge	Festgestein	Große Mittweida	30
Aue 1	Westerzgebirge	Festgestein	Schwarzwasser	362
Dohna	Osterzgebirge	Festgestein	Müglitz	198
Oehlisch	Oberlausitz	Lockergestein	Schwarzer Schöps	35
Jänkendorf	Oberlausitz	Lockergestein	Schwarzer Schöps	125
Merzdorf	Lommatzscher Pflege	Löss	Döllnitz	211

Für diese Modellgebiete erfolgt die Wasserhaushaltsberechnung einerseits mit den meteorologischen Eingangsdaten des KliWES-Projekts und andererseits mit dem Referenzdatensatz für den Zeitraum vom 01.01.1967 bis zum 31.12.2005.

Für beide Datensätze wurde eine Nebelkorrektur des Niederschlags durchgeführt. Die Berücksichtigung des Nebelniederschlags ist grundsätzlich erforderlich, da ansonsten vor allem in den höher gelegenen Regionen erhebliche Niederschlagsmengen fehlen, was sich bei den Wasserhaushaltsberechnungen deutlich bemerkbar macht. Da die Modelle hauptsächlich anhand der gemessenen Abflüsse kalibriert werden, wirkt sich die Nichtberücksichtigung des Wassergewinns aus Nebel insbesondere in den Gebieten oberhalb von 400 m primär auf die Höhe der berechneten Verdunstung aus. Es gibt mehrere Verfahren zur Ermittlung des Nebelniederschlags. In KliWES wurde eine Nebelkorrektur ausgehend vom Wasserhaushaltsbilanzdefizit (SCHWARZE et al. 2013) genutzt. Zwischenzeitlich erfolgte in BERNHOFER et al. (2017) eine genauere Berechnung des Nebelniederschlages über einen stärker prozessbezogenen Ansatz.

Da bei der Validierung des Referenzdatensatzes Inkonsistenzen vermieden werden sollen, müssen die Werte nach dem Verfahren von SCHWARZE et al. (2013) im KliWES-Eingangsdatensatz durch den Nebelniederschlag nach BERNHOFER et al. (2017) ersetzt werden. Der meteorologische Datensatz aus dem KliWES-Projekt wird nachfolgend mit „KLI“ abgekürzt.

Die erneute Kalibrierung der Modelle war notwendig, da sich der als Ergebnis einer Optimierung ermittelte Parametersatz eines Modells u. a. auch aus den meteorologischen Eingangsdaten ergibt. Ändern sich die Eingangsdaten, hat dies Auswirkungen auf den Parametersatz. Dementsprechend wurde jedes der sieben ausgewählten Modelle zweimal neu kalibriert – einmal mit dem überarbeiteten KliWES-Datensatz, nachfolgend als KNK bezeichnet, und einmal mit dem Referenzdatensatz RDS.

Die DIFGA-Analyse, deren Ergebnisse die Grundlage für die Optimierung sind, erfolgte einerseits für den KliWES-Datensatz ergänzt um den neuen Nebelniederschlag und andererseits für den Referenzdatensatz gleichfalls ergänzt um den neuen Nebelniederschlag. Die Ergebnisse der DIFGA-Analysen bildeten die Grundlage für die Kalibrierung der hydrologischen Modelle.

Im Rahmen der Kalibrierung werden vier Optimierungsparameter variiert, welche die Bezeichnungen B, C, D und E tragen. Sie wirken sich auf folgende Modellparameter aus:

- B beeinflusst die Makroporosität, in dem der Parameter eine gleichmäßige Veränderung der Makroporosität über alle Bodenarten und Bodenhorizonte eines Einzugsgebietes bewirkt. Die modellierte Versickerung wird hierbei an

die Summe der DIFGA-Ausgabegrößen der schnellen Grundwasserkomponente RG1 und der langsamen Grundwasserkomponente RG2 angepasst.

- C und D beeinflussen den Aufteilungsparameter $SG1_{Grenz}$ der Perkolation, welcher den Grundwasserzufluss in eine langsame und eine schnelle Komponente aufteilt. Die beiden Parameter haben keinen Einfluss auf die Bilanz. Sie wirken sich nur auf die zeitliche Verteilung der Grundwasserkomponenten aus, wodurch sich der modellierten Durchflussganglinie ein Jahresgang aufprägen lässt. Als Vergleichsgröße für die Simulation dient die DIFGA-Größe QG1 (schneller Grundwasserabfluss).
- Der Optimierungsparameter E bezieht sich auf die Verdunstungskorrektur und variiert den kc-Faktor der Grasreferenzverdunstung. Die prozentuale Veränderung des kc-Faktors führt zu einer gleichmäßigen Veränderung der Verdunstungskorrektur für alle Landnutzungsarten des Modellgebietes. Die Anpassung der simulierten Verdunstung erfolgt für das Restglied der DIFGA-Analyse, was der Summe aus Verdunstung und Bodenspeicherung entspricht.

Diese Optimierungsparameter liegen als Ergebnis einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO vor. Sie zeigten schon bei geringfügigen Änderungen große Auswirkungen auf die Wasserhaushaltskomponenten. Eine detaillierte Erläuterung der Sensitivitätsanalyse und eine Übersicht der untersuchten Modellparameter befindet sich in SCHWARZE et al. (2014) sowie dem dazugehörigen Anlagenband. Genauere Informationen bezüglich der einzelnen Optimierungsparameter sind SCHWARZE et al. (2016) zu entnehmen. Ausgangspunkt für beide Kalibrierungen sind jeweils die gleichen Werte für die Parameter B, C, D und E. Die Optimierung erfolgt im Tagesschritt für den Zeitraum 01.01.1990 bis 31.12.2001.

Die Auswertung der hydrologischen Ergebnisse und der Vergleich werden für den gesamten Zeitraum von 1967 bis 2005 durchgeführt. Verglichen werden die Ergebnisse hinsichtlich der Optimierungsparameter und der langjährigen Abflussbildungsbilanzen der beiden Berechnungsvarianten. Die Vergleiche erfolgen exemplarisch für verschiedene Modelle. Die Variante KNK stellt dabei die Bezugsgrundlage dar. Abweichungen der RDS-Variante von KNK werden im Allgemeinen prozentual angegeben. Die hydrologischen Ergebnisse und Unterschiede werden erläutert und interpretiert.

4 Ergebnisse

4.1 Datenverfügbarkeit

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 18 bisAbbildung 23) geben einen Überblick über den Umfang und die zeitliche Variabilität der vorhandenen Tages- und Monatsdaten von 1951 bis 2015. Die polnischen und tschechischen Messreihen beginnen 1971 bzw. 1961 und enden 2010. Bei den tschechischen Daten gibt es im Zeitraum 2000 bis 2005 eine größere Datenlücke.

Der Ausbau der landeseigenen Messnetze Agrarmeteorologie, Sachsenforst und Luftgüte begann Mitte der Neunziger Jahre. Ungefähr seit 2010 sind vom agrarmeteorologischen Messnetz die Daten von maximal 31 Stationen nutzbar, aus dem Forstmessnetz von 16 bis 19 Stationen und aus dem Luftgütemessnetz von 25 Stationen. Von der Sächsischen Landestalsperrenverwaltung (LTV) liegen Niederschlagsdaten seit den 50er Jahren vor, die Anzahl an Stationen stieg stetig an und beträgt derzeit 26 Stationen. Vom Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden (IHM) wurden 4-6 Stationen für die Analysen hinzugezogen. Erste Aufzeichnungen begannen 1950.

Tagesdaten der Temperatur (Mittel, Maximum, Minimum)

Seit 2010 betreibt der DWD 62 Klimastationen mit Temperaturmessungen. Die Stationsanzahl hat sich damit seit 1950 um rund 20 Stationen erhöht, mit deutlichen Schwankungen (Abbildung 18). Die markante Zunahme Anfang der 90iger Jahre entstand durch die zunehmende Automatisierung. Die Datenverfügbarkeit für Tagesmittel, Maximum und Minimum ist nahezu identisch.

Aus dem polnischen Messnetz stehen seit Anfang der 1970er Jahre durchgehend Daten von nur zwei Klimastationen zur Verfügung.

Von den tschechischen Klimastationen liegen seit den 60er Jahren nur von 1-2 Stationen die vollständigen Temperaturdaten (Mittel, Maximum, Minimum) vor. Für die restlichen Stationen liegen nur die Tagesmitteltemperaturen vor. Einen starken Einbruch der Datenverfügbarkeit gibt es zwischen 2000 und 2005. Nur in den letzten beiden Jahren (2009 und 2010) der vorliegenden Reihen stehen die vollständigen Temperaturdaten von 30 Klimastationen zur Verfügung.

Die Professur für Meteorologie misst meteorologische Größen seit Mitte der 50er Jahre. Ab 1960 existieren drei Messstationen, die durchgängig Daten liefern. Seit Mitte 2005 hat sich die Stationsanzahl auf sechs erhöht, wovon eine Station durch regelmäßige Datenlücken auffällt.

Die Landesmessnetze weisen seit 2010 eine gleichbleibende Datenverfügbarkeit auf.

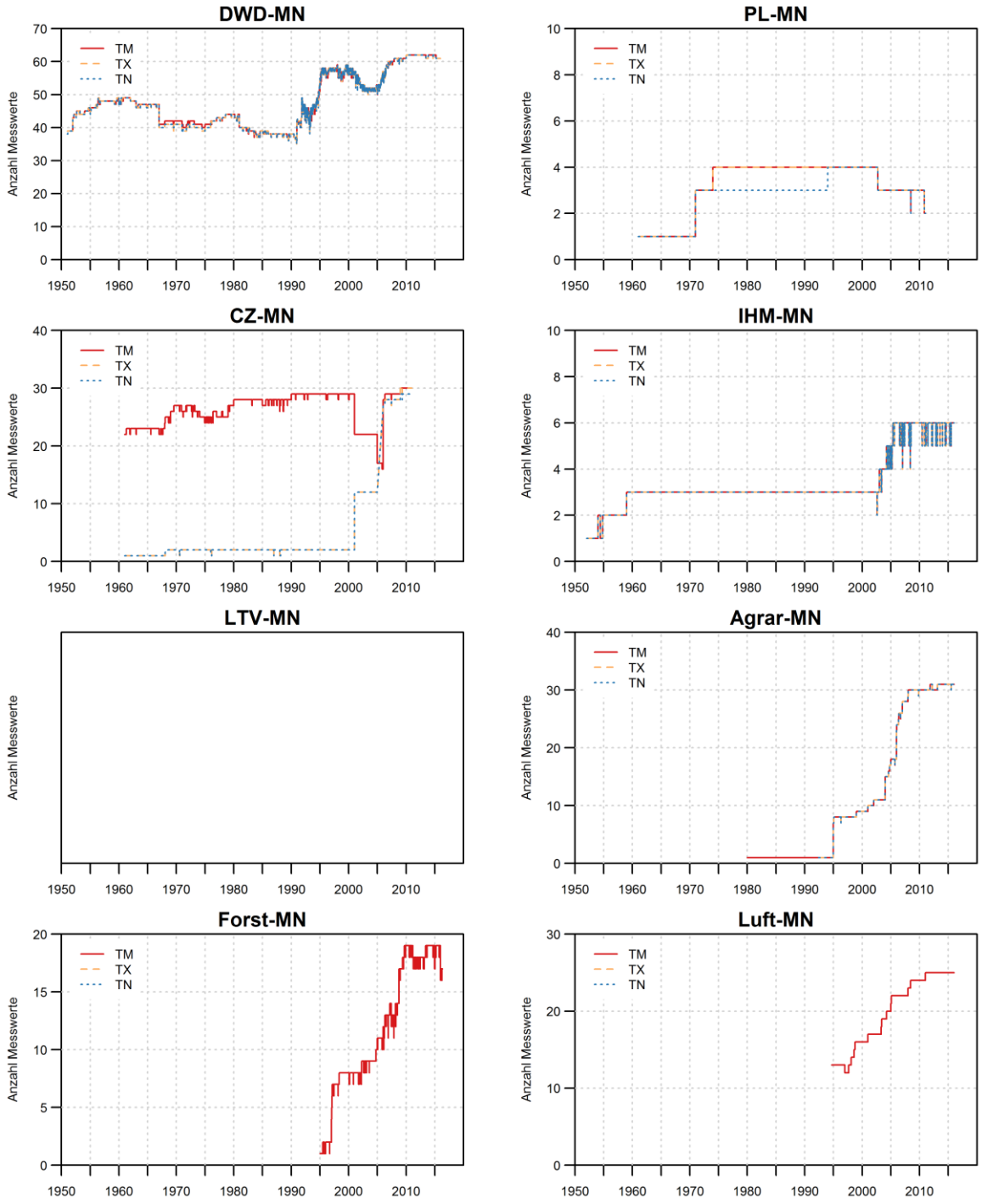


Abbildung 18: Verfügbarkeit täglicher Daten der Temperatur (TM, TX, TN) für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet

Tageswerte Niederschlag und Schneehöhe

Im Messnetz des DWD fällt der sprunghafte Anstieg von Niederschlagsstationen Ende der 60er Jahre und die schrittweise Reduzierung der Stationen ab den 90er Jahren auf (Abbildung 19). Ab 2005 ist in etwa wieder die Stationsdichte wie in den 50er und 60er Jahren erreicht. Grund hierfür ist die systematische Reduzierung von Niederschlagsstationen aus dem nebenamtlichen Messnetz. Seit 1980 ist die Verfügbarkeit von Daten zum Niederschlag und der Schneehöhe nahezu identisch. Bei der Schneehöhe treten jedoch größere Schwankungen auf.

Aus dem polnischen und tschechischen Messnetz liegen deutliche weniger Daten zur Schneehöhe vor als zum Niederschlag. Ab 2010 stammen die Daten ausschließlich aus den jeweiligen Ombrometermessnetzen.

Die Professur für Meteorologie misst seit 1968 kontinuierlich an drei Stationen den Niederschlag und an zwei Stationen die Schneehöhe.

Die LTV baute seit den 50er Jahren bis 2010 kontinuierlich ihr Niederschlagsmessnetz aus. Die Datenverfügbarkeit stieg – mit leichten Schwankungen – auf maximal 26 Stationen; aktuell sind es 24 Stationen.

Auch die drei weiteren landeseigenen Messnetze messen ausschließlich Niederschlag, im Luftgütemessnetz jedoch nur an zwei Stationen.

Tageswerte Windgeschwindigkeit und relative Feuchte

Die Windgeschwindigkeit und relative Feuchte werden außer bei der LTV in allen Messnetzen gemessen (Abbildung 20). Auffällig sind die ständigen Schwankungen der Datenverfügbarkeit bei der Windgeschwindigkeit in den Daten der TUD und des Forstmessnetzes. Es stellte sich bei der Prüfung der Windgeschwindigkeit an den tschechischen Stationen heraus, dass dem Projekt unplausible Beobachtungen vorliegen. Als Alternative wurden frei verfügbare Daten von neun Stationen der NOAA genutzt (vgl. Kapitel 2.1.2).

Tageswerte Dampfdruck und Luftdruck

Diese Größen liegen nur vom Deutschen Wetterdienst und einer polnischen Station kontinuierlich vor (Abbildung 21). Aus dem tschechischen Messnetz gibt es ausschließlich Dampfdruckdaten. Die TUD misst seit Ende 2008 an einer Station den Luftdruck.

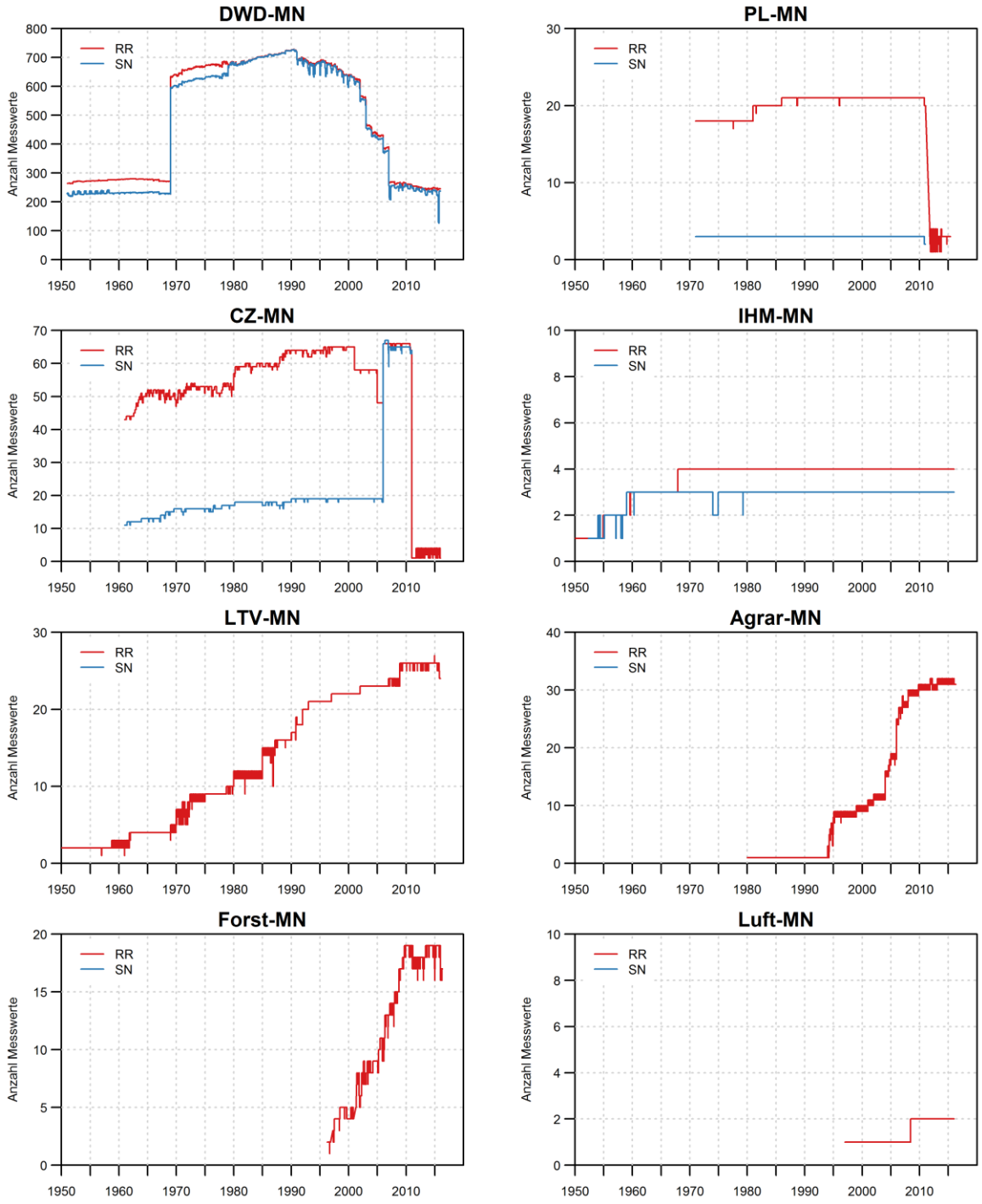


Abbildung 19: Verfügbarkeit täglicher Daten des Niederschlags RR und der Schneehöhe SN für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet

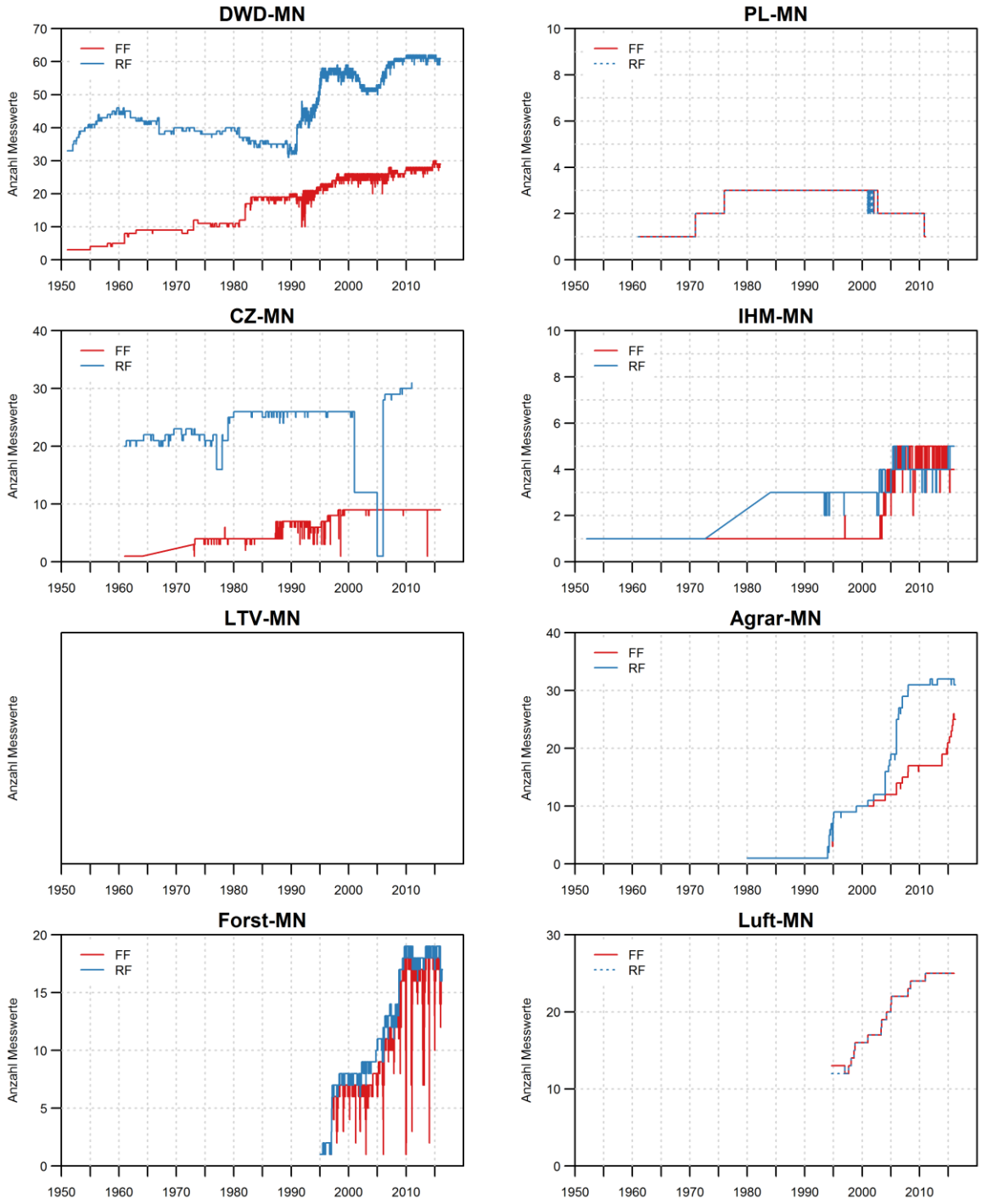


Abbildung 20: Verfügbarkeit täglicher Daten der Windgeschwindigkeit FF und der Relativen Luftfeuchte RF für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet

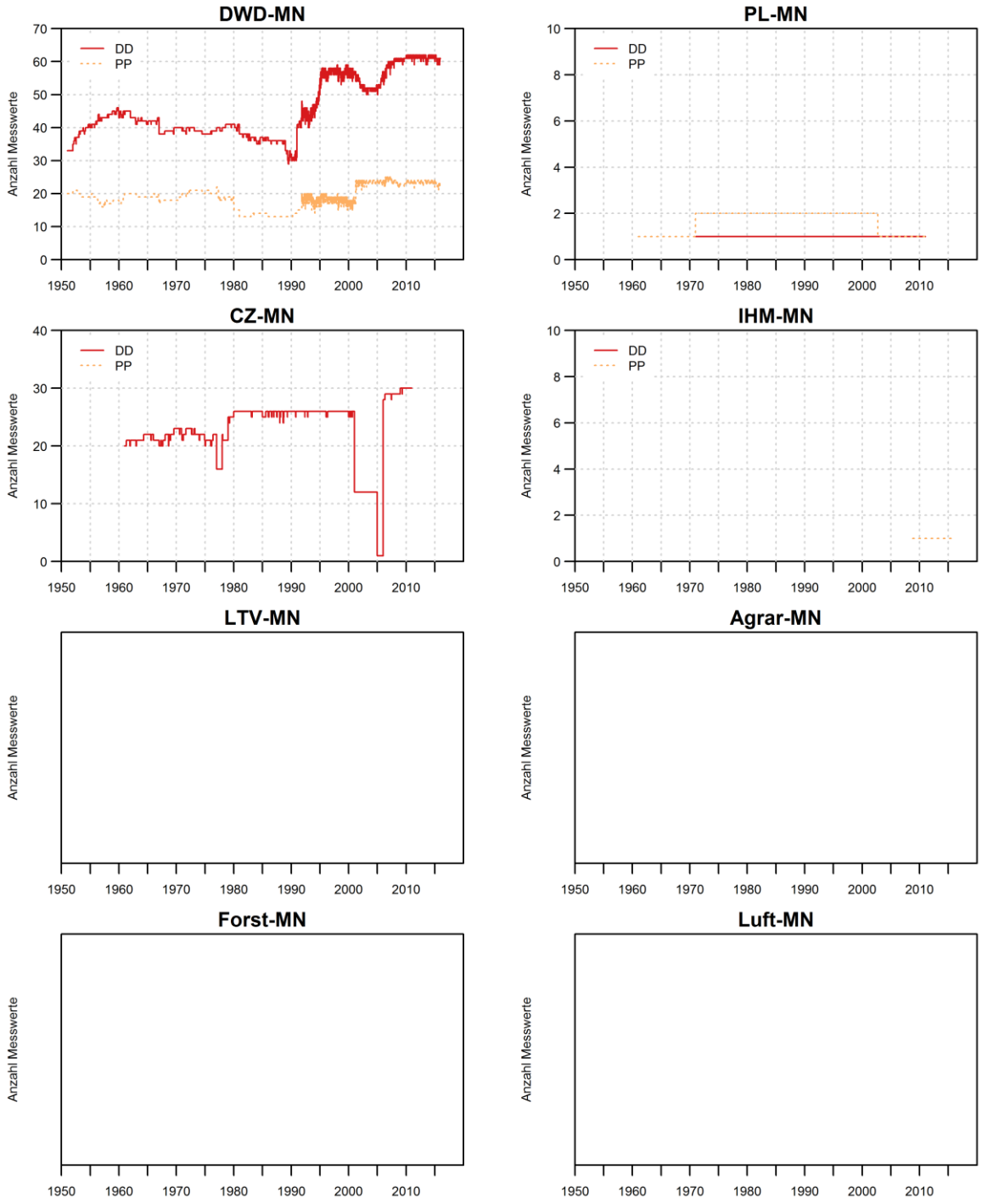


Abbildung 21: Verfügbarkeit täglicher Daten des Dampfdrucks DD und Luftdrucks PP für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet

Tageswerte Bedeckungsgrad, Sonnscheindauer und Globalstrahlung

Daten zum Bedeckungsgrad sind von Stationen des deutschen und polnischen Wetterdienstes vorhanden (Abbildung 22). Die DWD-Daten weisen starke Schwankungen in der Verfügbarkeit auf. Die maximale Anzahl von 60 Stationen wurde 2010 bis 2012 erreicht. Danach wird nur noch an ca. 20 Stationen der Bedeckungsgrad gemessen. Gründe hierfür sind die Reduzierung von „bemannten“ Stationen und die damit einhergehende Automatisierung der Messungen.

Die Sonnenscheindauer wird seit 2005 an 35 bis 36 Stationen gemessen. Der Abfall der Datenverfügbarkeit am Ende der Reihe betrifft nur einen Tag (22.08.2015).

Globalstrahlungswerte liegen von maximal sechs Stationen der TU Dresden sowie aus dem Forst- und Luftgütemessnetz vor. Die Datenreihen sind jedoch relativ kurz. Die Strahlungsdaten des DWD sind nicht Bestandteil der Datenbank.

Monatsdaten

Vom Deutschen Wetterdienst werden neben Tagesdaten auch Monatsdaten zur Verfügung gestellt. Abbildung 23 zeigt die Verfügbarkeit der Monatsdaten für die Klimavariablen Temperatur, Sonnenscheindauer, Bedeckungsgrad, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Schneehöhe von 1950 bis 2015. Bei der Temperatur, der Sonnenscheindauer, dem Bedeckungsgrad und der Schneehöhe sind keine oder nur geringen Unterschiede im Vergleich zur Verfügbarkeit der Tagesdaten erkennbar.

Bei der Windgeschwindigkeit gibt es von 1950 bis 2010 deutlich mehr Monats- als Tagesdaten. In den 90er und 2000er Jahren liegt die Verfügbarkeit an Monatsdaten zwischen 40 und 60 Stationen, bei den Tagesdaten sind es nur die Hälfte an Stationen. Der Anstieg der Monatsdaten in den 90ern ist wahrscheinlich auf Nachrüstungen der Klimastationen mit Windmessern in den neuen Bundesländern zurückzuführen. Vermutlich sind die täglichen Daten für die Windgeschwindigkeit noch nicht vollständig digitalisiert.

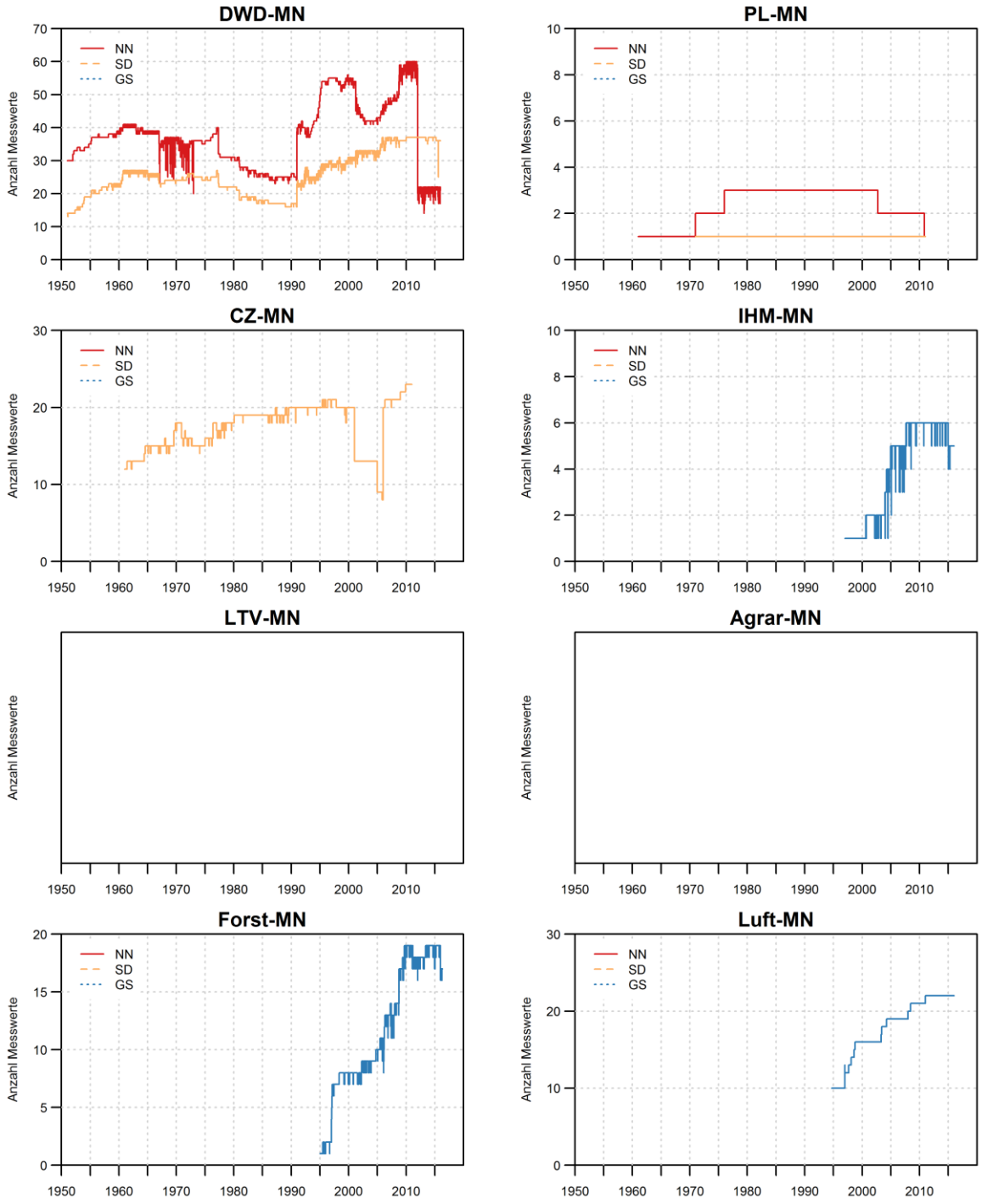


Abbildung 22: Verfügbarkeit täglicher Daten des Bedeckungsgrads NN und der Sonnenscheindauer SD für unterschiedliche Messnetze im Untersuchungsgebiet

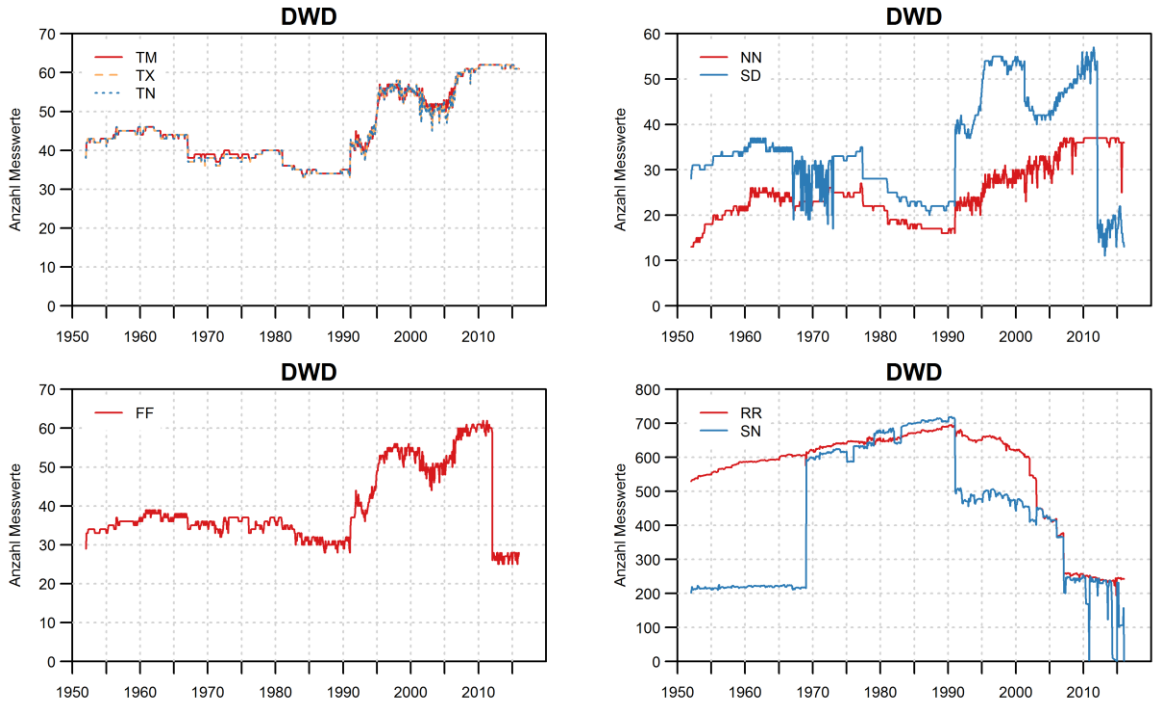


Abbildung 23: Verfügbarkeit monatlicher Daten aller Klimaelemente des DWD-Messnetzes im Untersuchungsgebiet

4.2 Datenvollständigkeit

Um einen räumlichen Eindruck der Datendichte und gleichzeitig ein Bild von der Datenvollständigkeit zu bekommen, wurde eine Analyse für die vier Klimaräume Sachsens (siehe Kapitel 2.2) durchgeführt. Aus den Tagesdaten wurden Monatsdaten unter Beachtung der Kriterien zur Monatswertaggregierung abgeleitet. Gibt es z. B. bei einer Station während eines Monats mehr als zwei Fehlwerte des Niederschlags, kann keine Monatssumme abgeleitet werden. Exemplarisch ist in

Abbildung 24 die Datenvollständigkeit für die Niederschlagsstationen des Ost-Westlichen Hügel- und Tieflandbandes dargestellt. Es wird ein Überblick ermöglicht, welche der Stationen für welche Periode Referenzstationen werden könnten, welche Stationen mehrjährige Datenausfälle aufweisen oder welche unvollständige Tageswerte haben, die zu sehr kurzen Unterbrechungen der monatlichen Reihe führen etc. Die hauptamtlichen Klimastationen verfügen über sehr vollständige Reihen, die zumeist ab 1961 vorliegen. Deutlich sichtbar wird die sprunghafte Zunahme an Stationen im Jahr 1969 und die graduelle Abnahme der Stationsdichte ab dem Jahr 2000. Ersichtlich werden auch lange Niederschlagsreihen, die schon 1951 aufgezeichnet und erst vor wenigen Jahren geschlossen wurden, wie z. B. Pirna, Obersteina und Neumark. Dass im Zuge der Reduzierung der Stationsdichte nicht auf die Reihenlänge geachtet wurde, ist aus klimatischer Sicht sehr ungünstig. Lange Reihen sind insbesondere für extremwertstatistische Auswertungen äußerst wichtig.

Weitere Abbildungen sind im Verzeichnis "4.2 Datenvollständigkeit" der mitgelieferten Daten-CD zu finden.

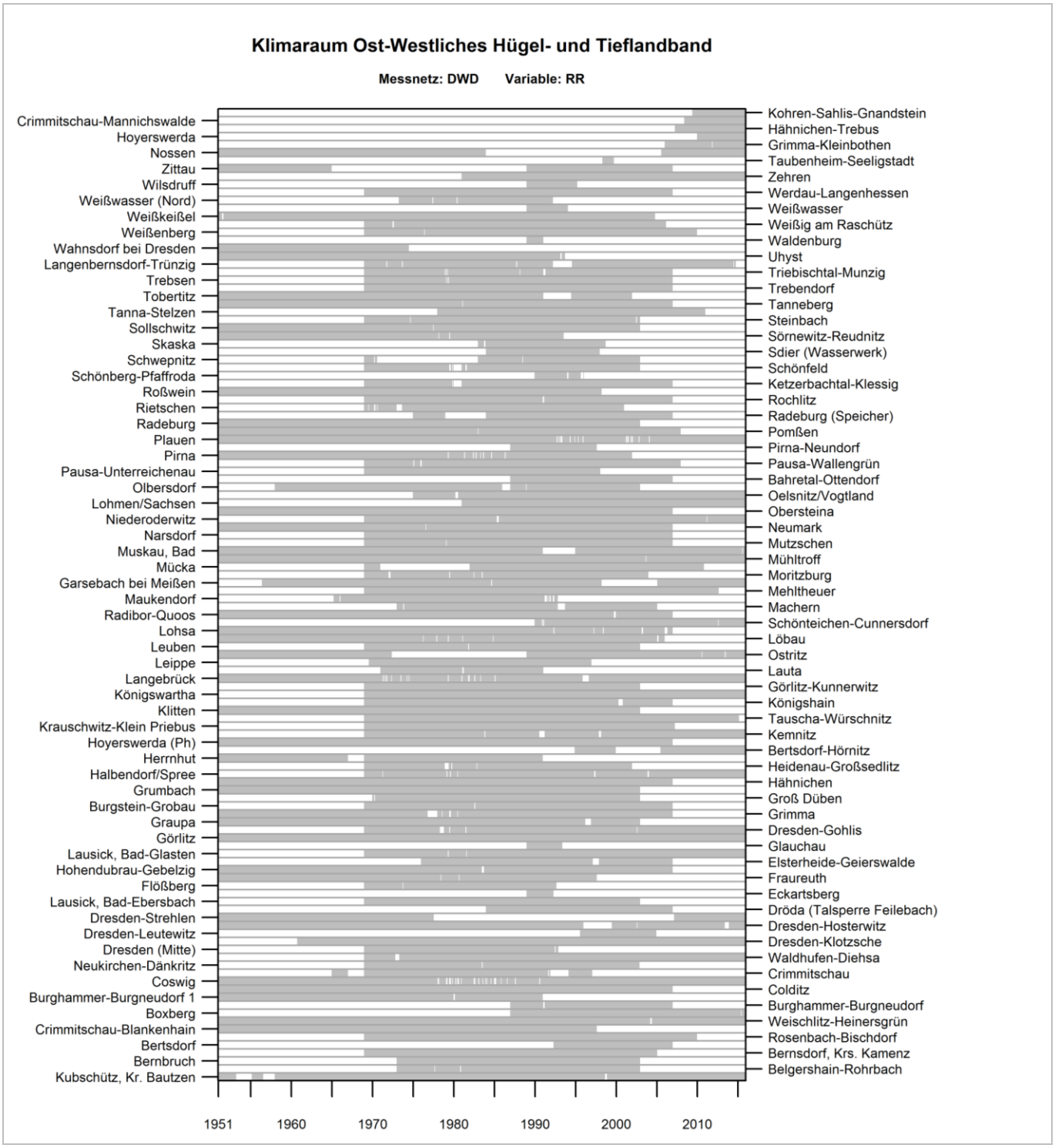


Abbildung 24: Datenvollständigkeit für den Niederschlag in einem Klimaraum Sachsens; Daten des DWD

4.3 Reihenverlängerung der Station Zinnwald-Georgenfeld

Aufgrund der enormen Bedeutung der Station Zinnwald-Georgenfeld (nachfolgend Zinnwald genannt) für die Abbildung der regionalen Klimagradienten besteht großes Interesse an einer Auffüllung der Periode 1961-1970. Für die Ergänzung der Niederschlagsreihe Zinnwald wurden 10 Nachbarstationen zur Aufstellung der Regressionsbeziehungen ausgewählt (Tabelle 15). Die Stationen Rechenberg-Bienenmühle, Holzhau und Usti nad Labem konnten, da sie zu kurze Reihen aufweisen, nicht mit in die Regressionen eingehen.

Tabelle 15: Zur Lückenfüllung der Station Zinnwald verwendeten Stationen.

Station	ID	Höhe	Jahre im Kalibrierungszeitraum	Jahre im Validierungszeitraum
Altenberg-Kipsdorf	2571	550	13,7	19,4
Altenberg Schellerhau	4432	780	13,9	28,9
Fürstenwalde	1516	679	13,9	22
Geising	1582	578	13,8	16,9
Glashütte	1651	368	13,8	18,4
Bad Gottleuba	1709	740	13,6	5,8
Lauenstein	2882	508	14	28,9
Oelsen	3763	555	14	18,2
Schmiedeberg	4495	460	13,8	15,8
Teplice	50080	236	14	25,3
Zinnwald	05779	877	14	29

Es wurden nur Datenreihen verwendet, die Daten über mindestens 20 Jahre zur Verfügung hatten. Der Gesamtzeitraum wurde wie folgt eingeteilt:

- Kalibrierungszeitraum: 01.01.1971 - 31.12.1984
- Validierungszeitrum: 01.01.1985 - 31.12.2013
- Vorhersagezeitraum: 01.01.1961 - 31.12.1970

Dabei wurde die Einteilung so vorgenommen, dass für den Kalibrierungszeitraum mindestens 8 Jahre zur Verfügung standen und für den Validierungszeitraum mindestens 5 Jahre (Tabelle 15).

Die Methodik der Lückenfüllung ist in Kapitel 3.5.2 erläutert.

Die Validierung zeigte, dass sowohl die Summe des Niederschlags (-0,5 % Unterschätzung) im Validierungszeitraum als auch die Anzahl der Regentage (+5,4 % Überschätzung) mit der Methode gut getroffen werden. Die Gütekriterien sind mit R^2 = 0,88 und RMSE = 2,29 mm für diese exponiert gelegene Station ebenfalls sehr zufriedenstellend. Lücken in der Niederschlagsreihe können nicht so sicher wie Lücken in Dresden, aber sicherer als am Fichtelberg gefüllt werden (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 16: Ergebnisse der Validierung der Lückenfüllung der Station Zinnwald

Element / Station	Bias der Niederschlagstage	Bias der Summe	R^2	RMSE
RR – Dresden	5,4 % *	-0,5 %	0,88	2,29

Der Quantile-Quantile-Plot (Q-Q-Plot, Abbildung 25) zeigt, dass die mittleren Niederschlagswerte gut getroffen wurden, es aber bei extremeren Ereignissen zu Unterschätzungen der realen Bedingungen kam. So wurde beispielsweise der Extremwert vom August 2002 weit unterschätzt.

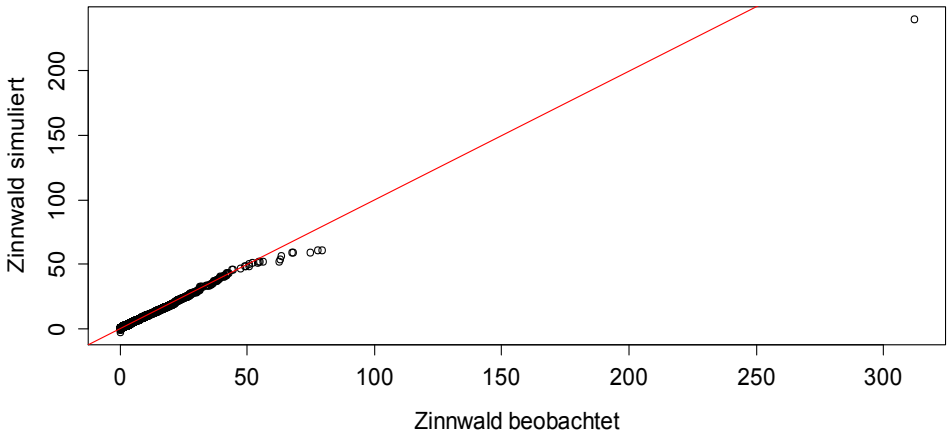


Abbildung 25: Q-Q-Plot zwischen beobachteter und simulierter Reihe für die Validierung der Methode

Für den Vorhersagezeitraum 1961 bis 1970 ergab sich für Zinnwald eine mittlere Jahressumme von 913 mm. Das entspricht einem Verhältnis von 0,94 zur mittleren Jahressumme von 1971 bis 2000 mit 971 mm. Vergleicht man dies mit den Mitteln aller Umgebungsstationen (mit nahezu vollständigen Reihen) (1961-1970: 798 mm; 1971-2000: 824 mm, Verhältnis: 0,97), so ist von einer leichten Unterschätzung der Jahressummen aber insgesamt einer sehr guten Performance auszugehen. Vermutlich tritt diese Unterschätzung bei den Starkniederschlägen auf.

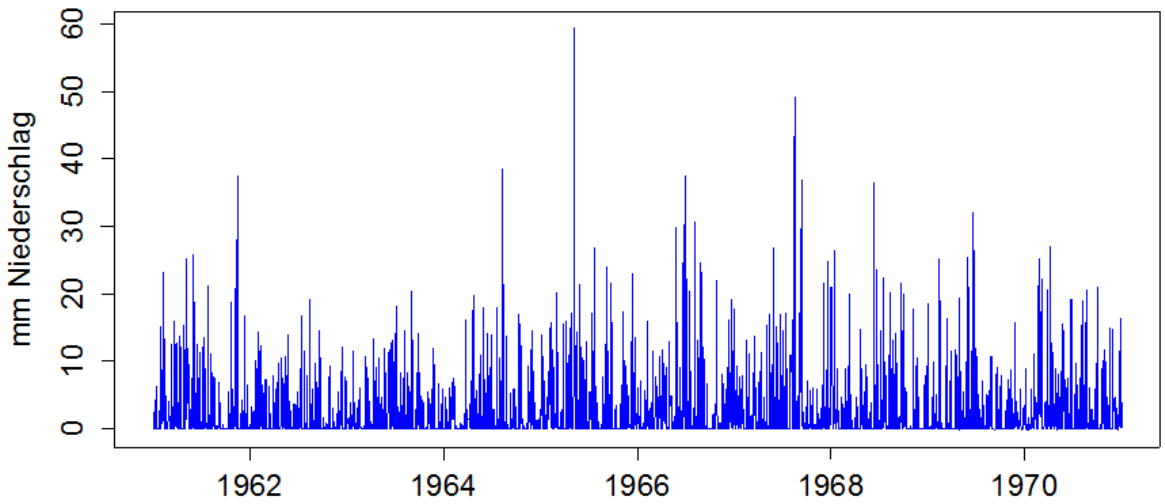


Abbildung 26: Lückengefüllte Niederschläge der Reihe Zinnwald

Zusammenfassend wird angemerkt, dass die Validierung durchgehend zufriedenstellende Ergebnisse zeigt. Die Methode stellt sich damit als geeignet heraus, um größere Datenlücken aufzufüllen. Mit der Kombination der Schätzung der Niederschlagshöhe und der nachträglichen Korrektur von sehr kleinen Niederschlägen wurde die anfängliche Überschätzung der Regentage stark vermindert. Die Methode hat vor allem in Bereichen mittlerer Niederschläge eine hohe Treffergenauigkeit. Extremwerte können weniger gut abgebildet werden, was in der exponierten Lage Zinnwalds gegenüber den Nachbarstationen begründet liegt. Bei der Nutzung der Ergebnisse sollte das berücksichtigt werden.

4.4 Vergleich der Messnetze

4.4.1 Höhengradienten der Messnetze der nationalen Wetterdienste

Die Verfügbarkeit von Klimaelementen ist bei den drei nationalen Messnetzen (Deutschland, Tschechien und Polen) sehr unterschiedlich. Vom polnischen Messnetz liegen zum Beispiel nur Temperatur- und Niederschlagsdaten vor. Für einen umfassenden Vergleich ist eine Nachführung und Vervollständigung der Daten empfehlenswert (siehe auch Kapitel 4.1 Datenverfügbarkeit). Der Vergleich der Mittelwerte wurde für das gesamte Jahr, den Sommer und den Winter durchgeführt. Es gibt teilweise starke Unterschiede zwischen Sommer und Winter, welche im Jahr gegebenenfalls weggemittelt werden.

Beim Höhengradienten der Mitteltemperatur zeigen die drei Messnetze (nur vier polnische Stationen!) eine sehr gute Übereinstimmung, sowohl für das Jahr, als auch Sommer und Winter (Abbildung 27). Die Temperaturabnahme der tschechischen Stationen fällt etwas geringer aus. Jedoch gibt es keine Station oberhalb 900 m, was den Anstieg der Geraden beeinflusst. Im Sommer werden an tschechischen Stationen höhere Tagesmitteltemperaturen gemessen. Der Effekt nimmt mit der Höhe ab.

Die polnischen Stationen weisen bei gleicher Höhenlage geringere Temperaturen auf. Eine Ursache könnten die strengeren Winter aufgrund zunehmender Kontinentalität nach Osten sein. Die tschechischen Stationen weisen wärmere Sommer und kühlere Winter auf, was ebenfalls auf die Kontinentalität zurückgeführt werden könnte. Auch bei der Maximum- und winterlichen Minimumtemperatur (keine tschechischen Daten) ist das zu beobachten (Abbildung 27, Abbildung 28).

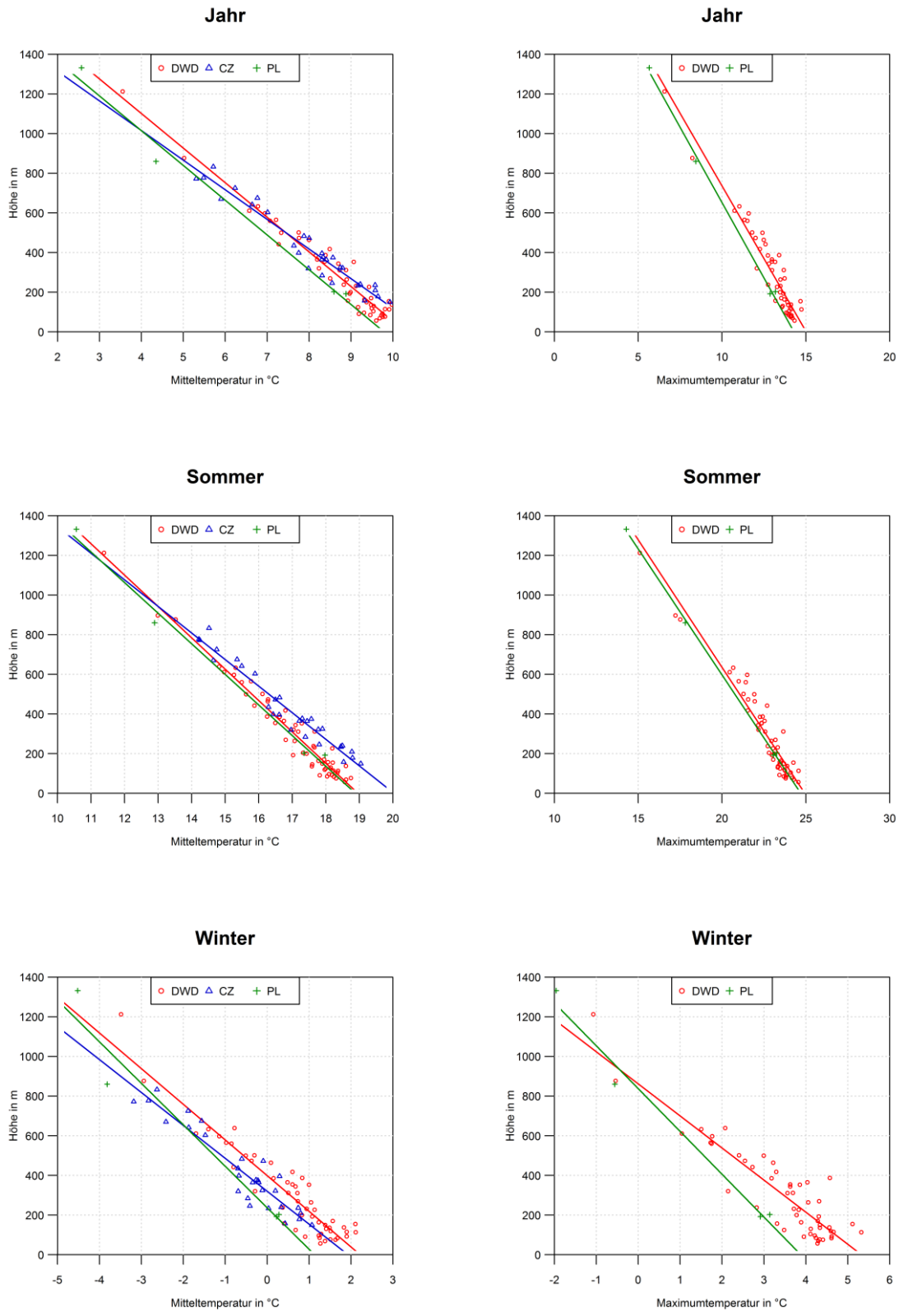


Abbildung 27: Vergleich der Höhengradienten für Mittel- und Maximumtemperatur für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz

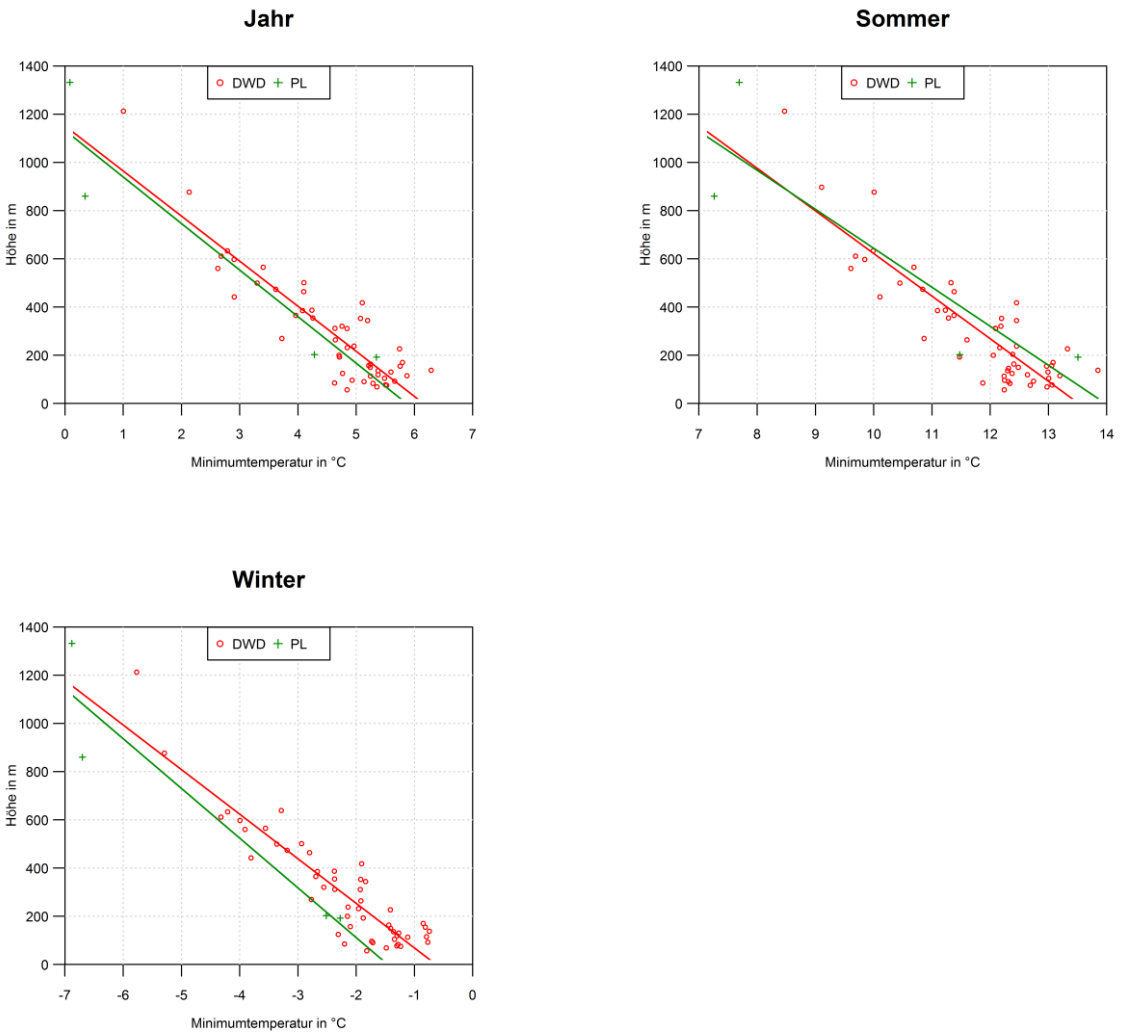


Abbildung 28: Vergleich der Höhengradienten für Minimumtemperatur für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz

Beim Niederschlag (unkorrigiert) fällt die große Streuung der Messwerte auf (Abbildung 29). Die Stationshöhe ist nur einer von mehreren Faktoren, die die Niederschlagsmenge beeinflussen. Während die Zunahme der Niederschlagsmenge mit der Höhe bei den sächsischen und polnischen Stationen fast gleich ist, weisen die tschechischen Stationen einen deutlich geringen Höhengradienten auf. Die geringeren Niederschlagshöhen an polnischen Stationen (insbesondere im Sommer) können wie bei der Temperatur ein Effekt der Kontinentalität sein. Der Höhengradient ist jedoch sehr ähnlich.

Die Zunahme der relativen Feuchte mit der Höhe ist beim deutschen und tschechischen Netz übers Jahr sehr ähnlich (Abbildung 29). Dabei heben sich die Unterschiede zwischen Sommer und Winter bei Betrachtung der Jahreswerte auf. Eine eindeutige Interpretation der jahreszeitlichen Unterschiede ist nicht möglich. Geringere relative Feuchten an tschechischen Stationen, z. B. im Sommer, sind konsistent mit den beobachteten höheren Temperaturen.

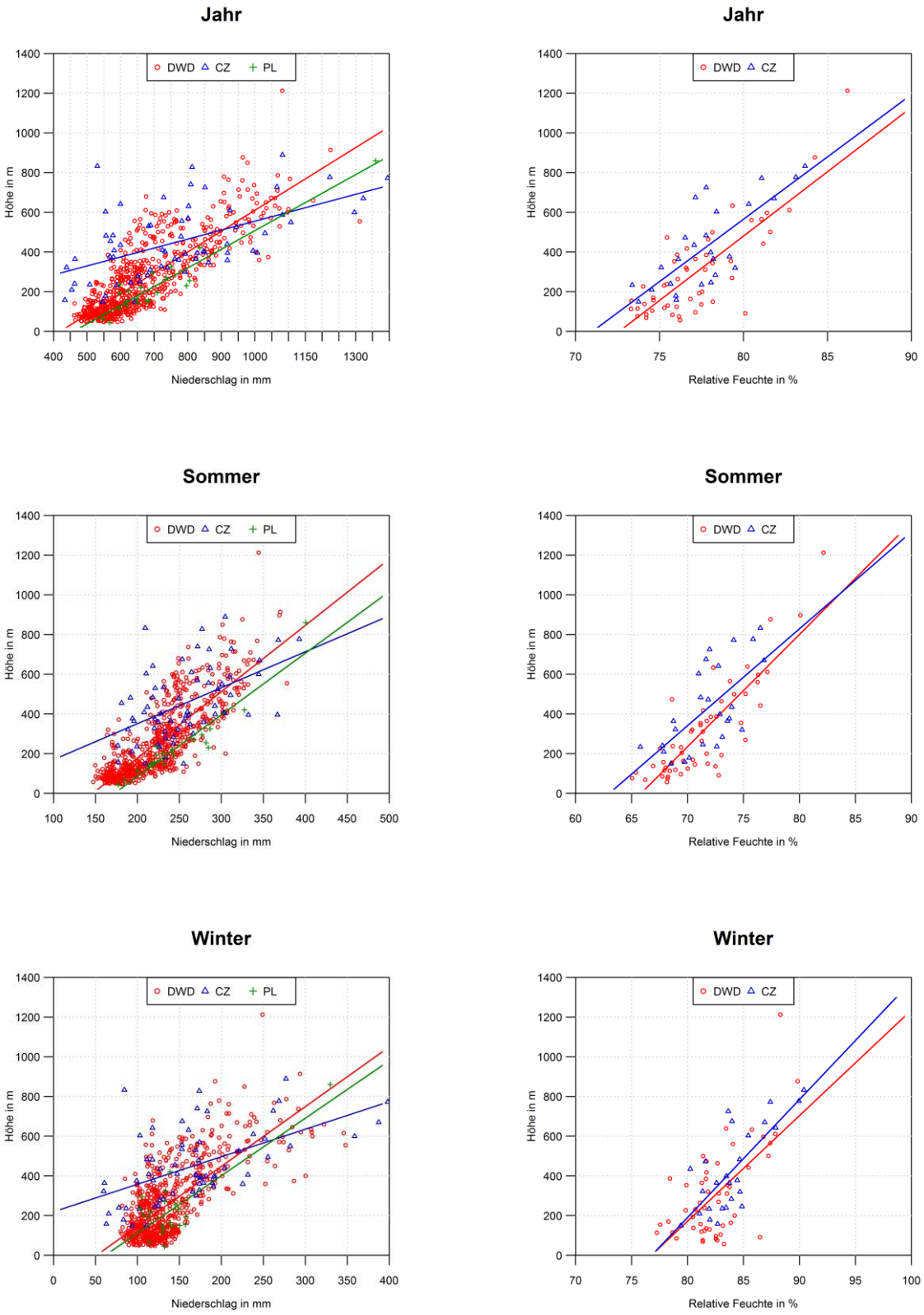


Abbildung 29: Vergleich der Höhengradienten für Niederschlag und relative Feuchte für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz

Messwerte der Schneehöhe liegen nur vom deutschen und tschechischen Netz vor (Abbildung 30). Eine Interpretation der geringeren Zunahme der Schneehöhe oberhalb 500 m ist schwierig, da es keine tschechische Station oberhalb 900 m gibt.

Die Messwerte der Sonnenscheindauer zeigen bei einer starken Streuung keine eindeutigen Höhengradienten (Abbildung 30). Das Verhalten an tschechischen und deutschen Stationen ist völlig verschieden. Bei den DWD-Daten kann man im Sommer eine Abnahme der Sonnenscheindauer mit der Höhe feststellen, sowie eine Zunahme des Bedeckungsgrades (Bedeckungsgrad ohne Abbildung, da nur DWD-Daten). Zwei tschechische Stationen (Teplice und Česká Lipa) zeigen eine auffällig niedrige Sonnenscheindauer, was vor allem auf die Sommerwerte zurückzuführen ist.

Beim Dampfdruck ist die Höhenabnahme auf tschechischer Seite geringer als an sächsischen Stationen (Abbildung 31). Im Winter werden an den tschechischen Stationen im Mittel geringere Dampfdrücke gemessen. Im Sommer sind die Dampfdrücke an niedrig gelegenen Stationen größer.

An den tschechischen Stationen werden im Mittel **geringere Windgeschwindigkeiten** gemessen (Abbildung 31). Das Jahresmittel von 12,4 m/s an der Station Milešovka auf 833 m Höhe ist zu hoch. Die Werte müssen überprüft werden. Aufgrund dieses Wertes ist der Vergleich der Ausgleichsgeraden nicht möglich.

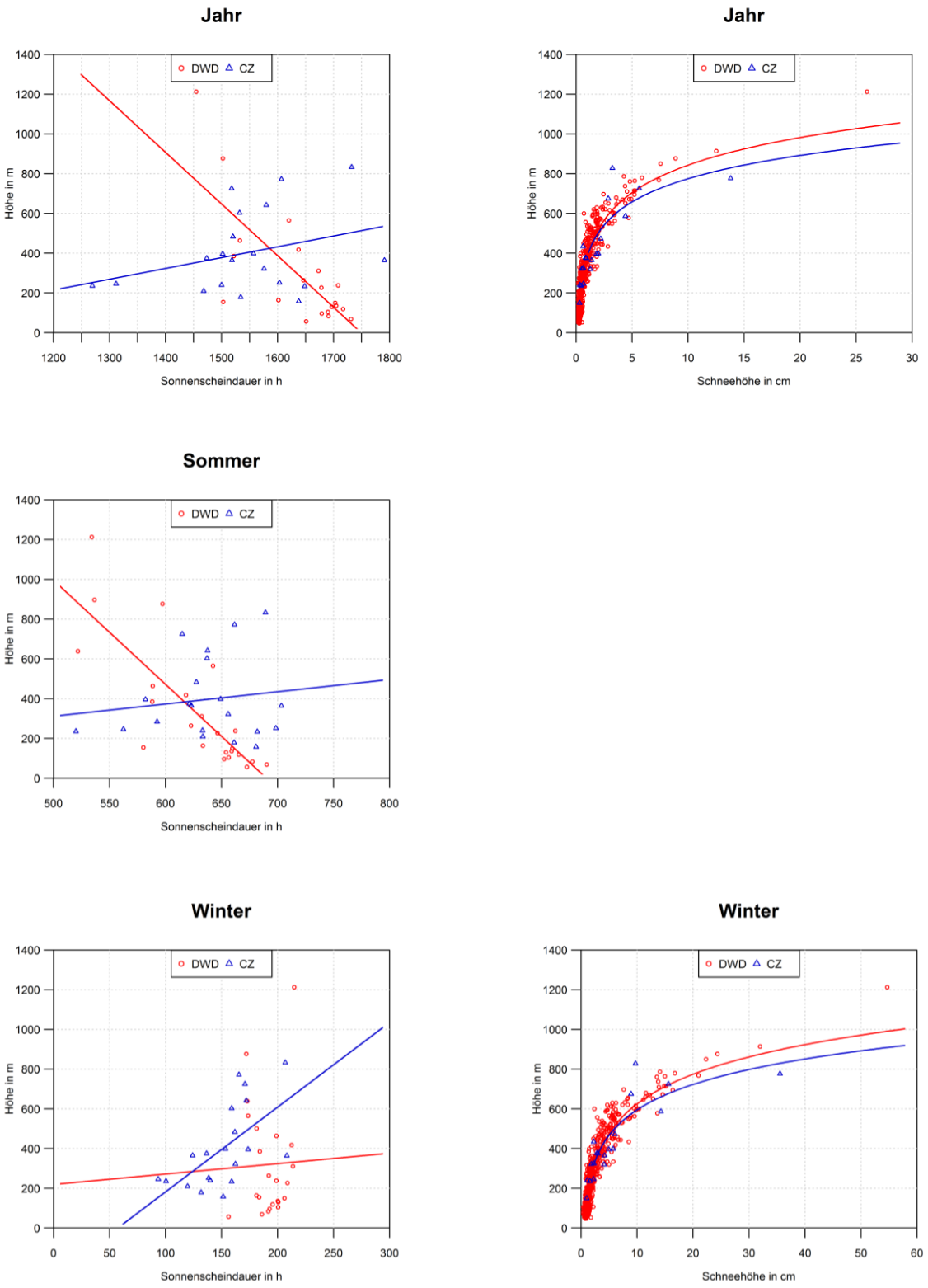


Abbildung 30: Vergleich der Höhengradienten für Sonnenscheindauer und Schneehöhe für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz

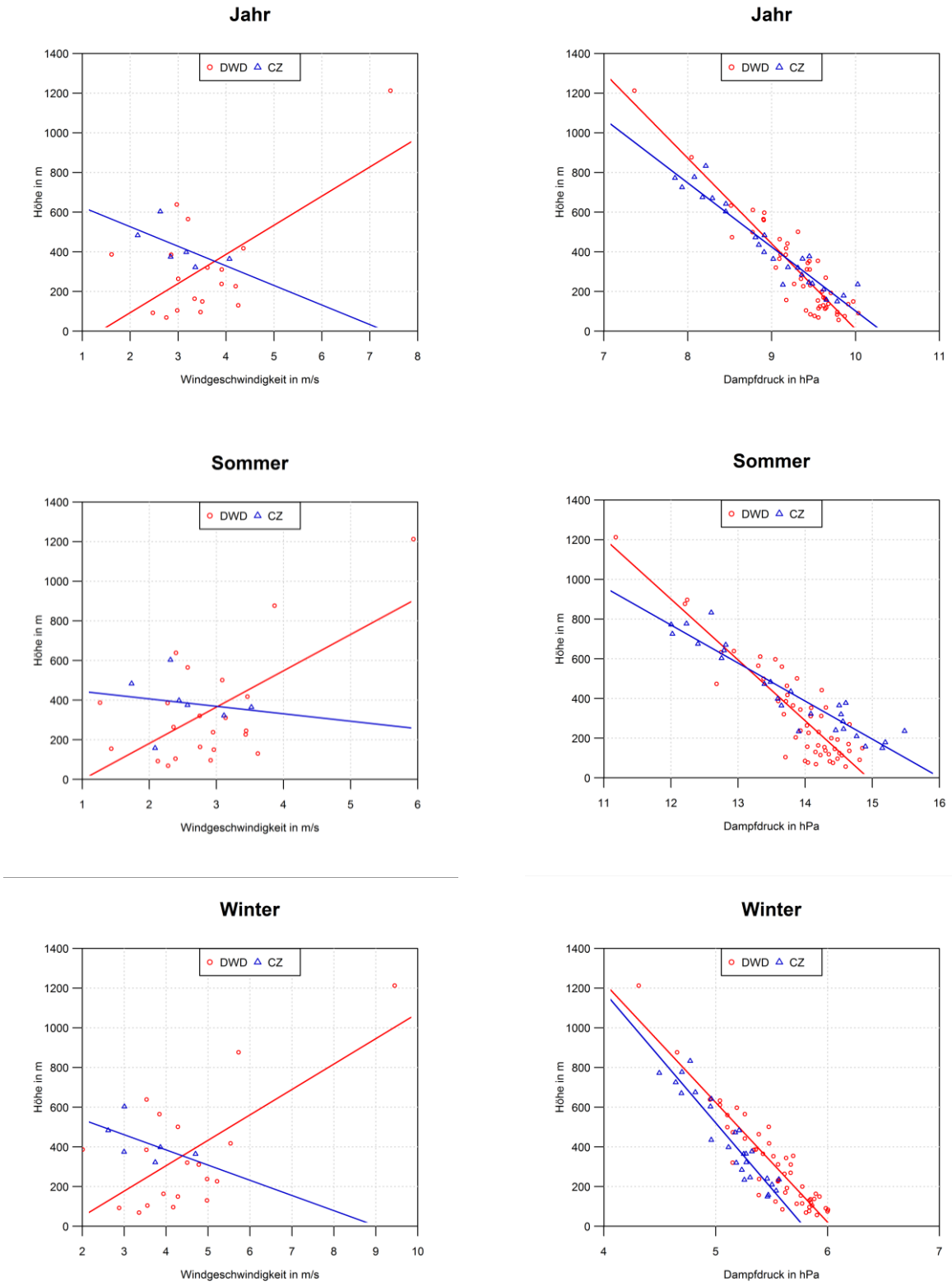


Abbildung 31: Vergleich der Höhengradienten für Windgeschwindigkeit und Dampfdruck für das deutsche, tschechische und polnische Messnetz

4.4.2 Höhengradienten des DWD und der Landesmessnetze

Im folgenden Abschnitt wird die Höhenabhängigkeit für die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit aus den Messnetzen des DWD, der TU Dresden (IHM) und aus den landeseigenen Messnetzen (Agrar-, Forst-, Luftmessnetz) verglichen. Einige Klimaelemente werden ausschließlich an DWD-Stationen gemessen. Dazu gehören Schneehöhe, Dampfdruck, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad. Auf die Darstellung des Luftdrucks wird ebenfalls verzichtet. Diese Größe wird an DWD- als auch an den Luftgütestationen gemessen. Jedoch wird der Luftdruck im Luftmessnetz auf Meeresniveau umgerechnet, so dass ein Vergleich bezüglich der Höhenabhängigkeit keine Aussagekraft hat.

Es zu beachten, dass die Stationen der Landesmessnetze nicht die gleichen Standortbedingungen erfüllen wie die DWD-Stationen. Das anschaulichste Beispiel sind die Stationen des Luftmessnetzes, die teilweise von dichter Bebauung umgeben sind. Außerdem dürfen die Trendgeraden nicht überinterpretiert werden, da die Landesmessnetze in höheren Lagen wenige bis keine Stationen haben und demzufolge die Höhenabhängigkeit nicht vollständig mit denen der DWD-Stationen vergleichbar ist. Auch die vier IHM-Stationen liegen in einem sehr engen Höhenbereich, sodass eine sinnvolle Bestimmung des Höhengradienten für dieses Messnetz nicht möglich ist. Analog zu den Messnetzen der nationalen Wetterdienste gibt es deutliche Unterscheide zwischen Sommer und Winter, welche im Jahr gegebenenfalls weggemittelt werden. Die Abbildungen für das Jahr befinden sich im digitalen Anhang.

Am auffälligsten ist im Vergleich zu den DWD-Stationen die höhere Temperatur (ca. 1,5 K) an den LMN-Stationen bis 400 m (Abbildung 32). Grund hierfür ist die Lage im städtischen Bereich. Städte stellen im Vergleich zum Umland sogenannte „Wärmeinseln“ dar. An höher gelegenen Stationen gibt es keine Unterschiede im Temperaturniveau. Auch an den AMN-Stationen werden in unteren Höhenlagen höhere Temperaturen (mittlere und maximale) gemessen. Die Ursache dafür ist unklar. Die Höhengradienten für die Minimumtemperatur lassen sich aufgrund des zunehmenden Einflusses lokaler Effekte und dem Fehlen von hochgelegenen Stationen im Agrar- und IHM-Messnetz nicht vergleichen. Abweichungen können evtl. auch auf Unterschiede in der Berechnung von Tagesmitteln zurückzuführen sein (vgl. AUGTER; Kämtzsches Mittel vs. 0:00-24:00).

Alle Landesmessnetze weisen deutlich geringere Windgeschwindigkeiten als die DWD-Stationen auf (Abbildung 33). Forststationen, Luftmessstationen und die Stationen des IHM sind gut geschützt aufgestellt (Waldlichtungen bzw. Stadt). Überraschend sind die geringeren Windgeschwindigkeiten des AMN, da diese Stationen lt. einer mündlichen Aussage von Dr. Kraatz (LFULG) eine ungeschützte Stationslage aufweisen.

Die Höhengradienten des Niederschlags von DWD, FMN und LTV sind sehr ähnlich (Abbildung 34). Im Sommer wird an LTV-Stationen im Durchschnitt etwas weniger, im Winter etwas mehr gemessen. Beim AMN gibt es ab 400 m nur noch 3 Stationen, weshalb die Trendgerade hier wenig Stützstellen hat. Insgesamt ist auch hier keine signifikante Abweichung von der DWD-Punktwolke ersichtlich.

Die Gradienten der relativen Feuchte unterschieden sich deutlich zwischen DWD-Messnetz und den Landesmessnetzen (Abbildung 34). Hauptursache sind die beobachteten Temperaturunterschiede, da die relative Feuchte temperaturabhängig ist.

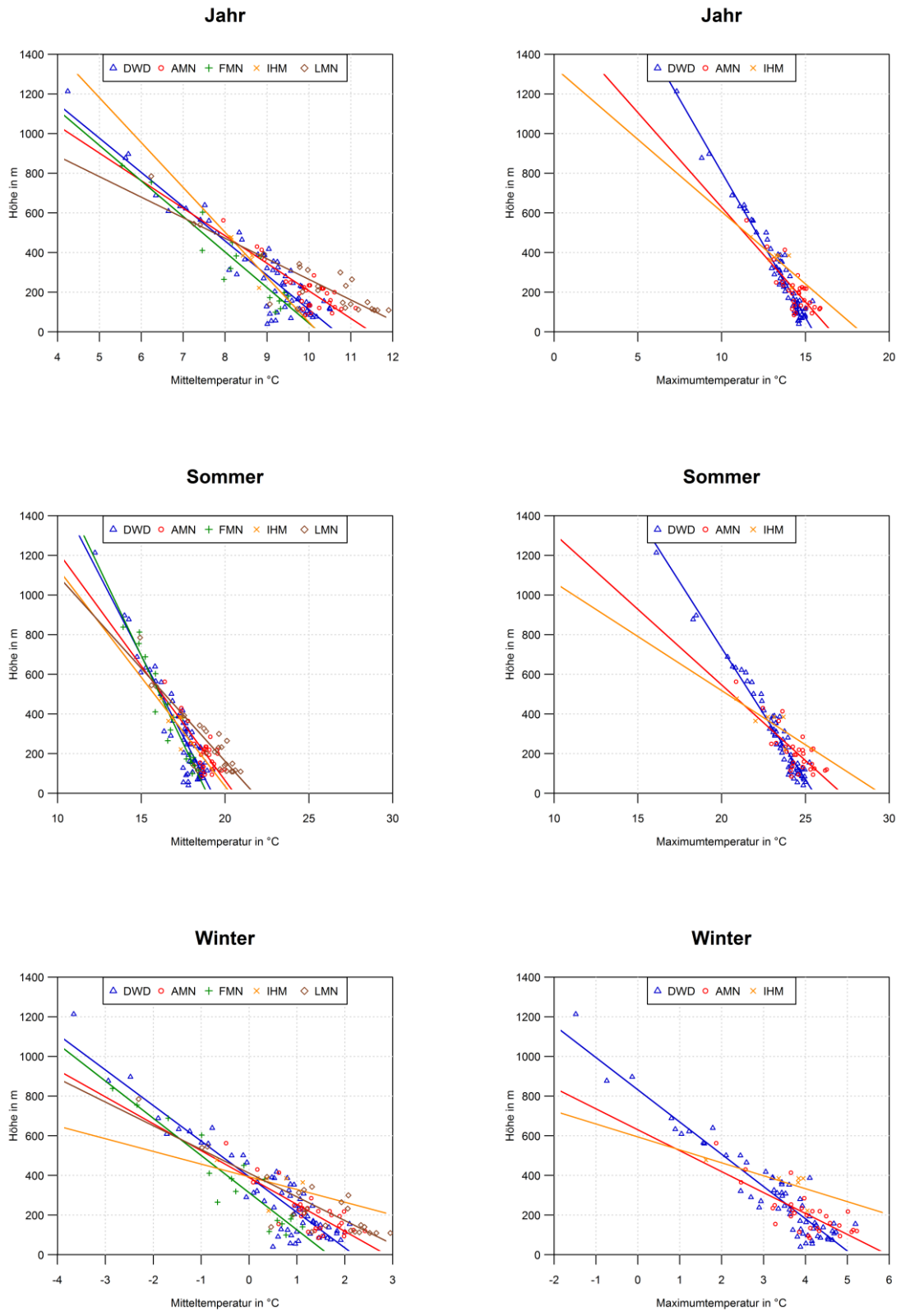


Abbildung 32: Vergleich der Höhengradienten der Mittel- und Maximumtemperatur für DWD- und sächsische Landesmessnetzdaten

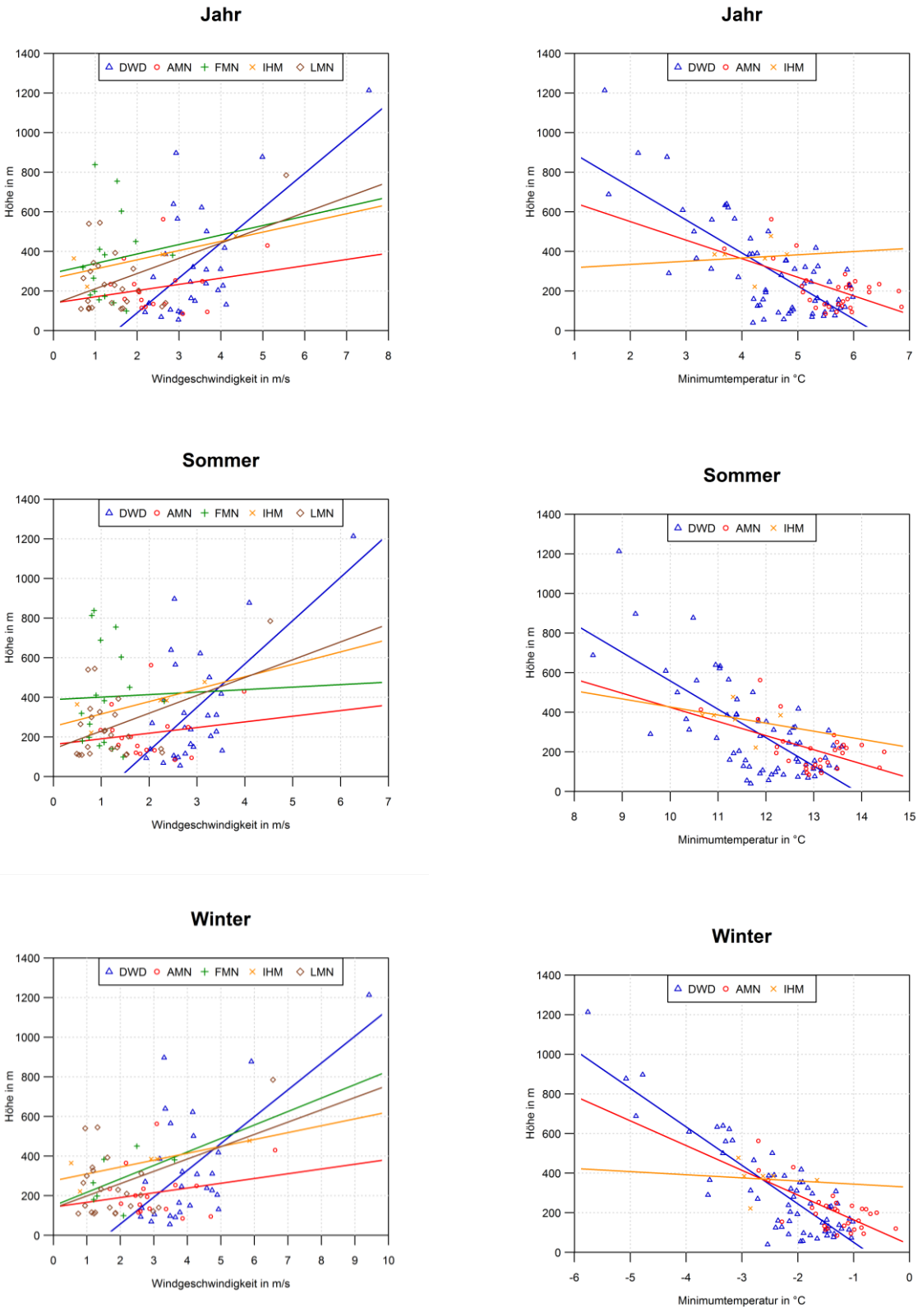


Abbildung 33: Vergleich der Höhengradienten der Minimumtemperatur und Windgeschwindigkeit für DWD- und sächsische Landesmessnetzdaten

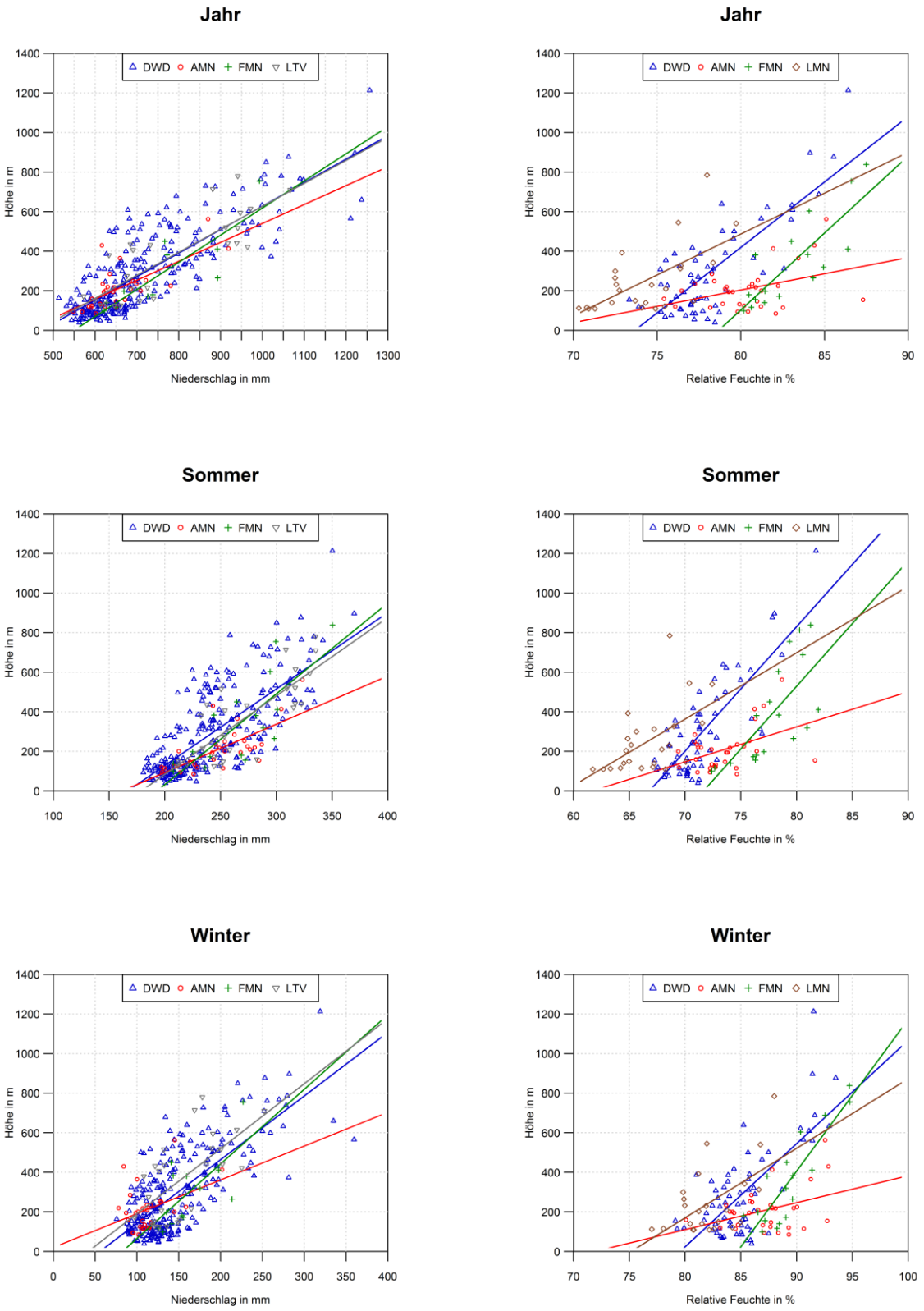


Abbildung 34: Vergleich der Höhengradienten des Niederschlags und der relativen Feuchte für DWD- und sächsische Landesmessnetzdaten

4.4.3 Vergleich der Jahresgänge

Die Verläufe der Jahresgänge der Mitteltemperatur stimmen für alle dargestellten Klimaräume und Messnetze sehr gut überein (Abbildung 35). An den AMN- und LMN-Stationen werden die höchsten Temperaturen gemessen. Die etwas größere Abweichung der zwei AMN-Stationen im Bergland ist auf deren niedrige Höhenlage von durchschnittlich 488 m zurückzuführen.

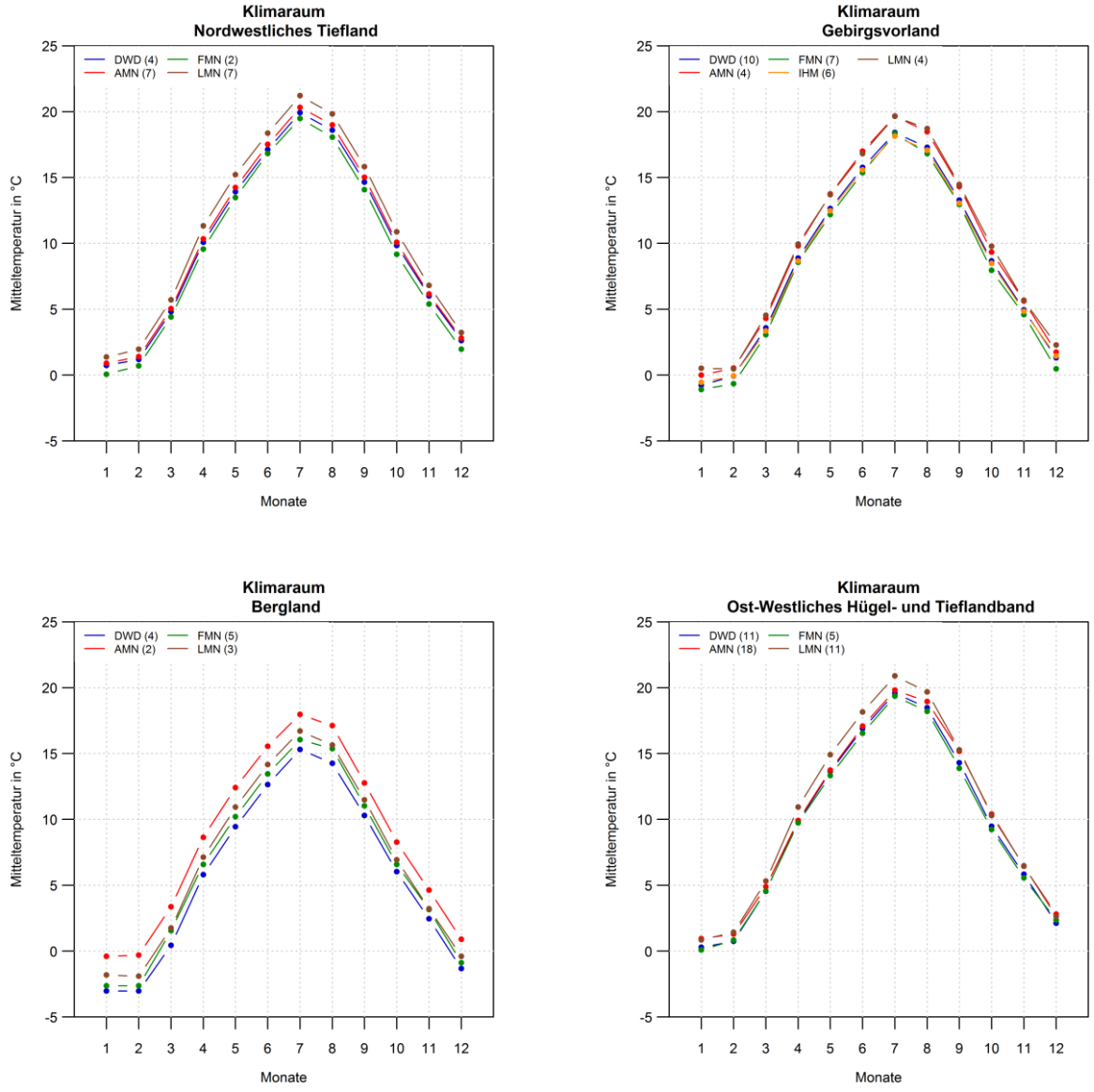


Abbildung 35: Jahresgänge der Mitteltemperatur verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern)

Bei der Maximum- und Minimumtemperatur konnte das DWD-Messnetz nur mit dem AMN-Messnetz und im Gebirgsvorland mit dem IHM-Messnetz verglichen werden (Abbildung 36 und Abbildung 37). Die Verläufe passen gut zusammen. Die Unterschiede im Temperaturniveau sind vor allem auf die Höhenlage zurückzuführen.

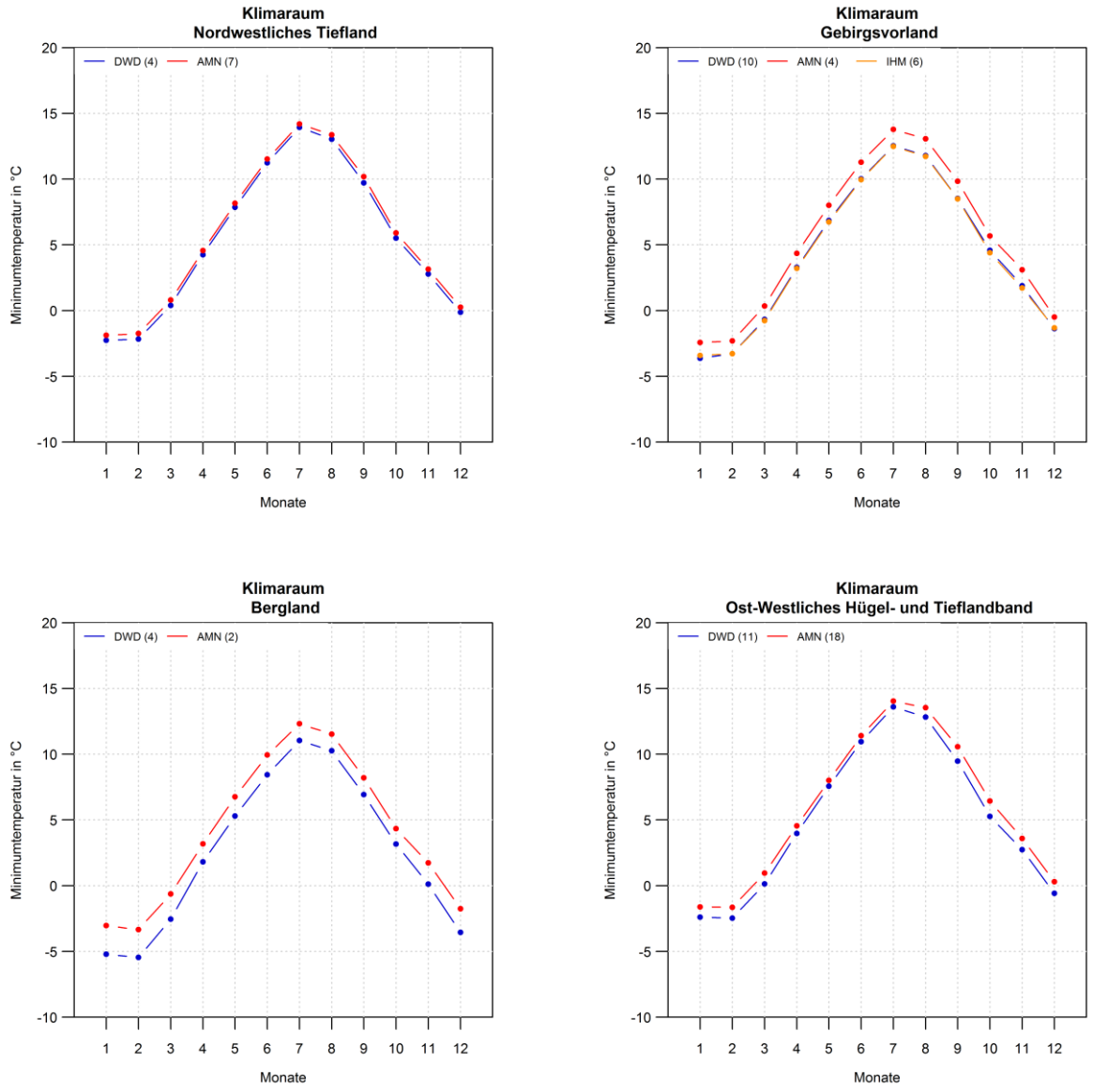


Abbildung 36: Jahresgänge der Minimumtemperatur verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern)

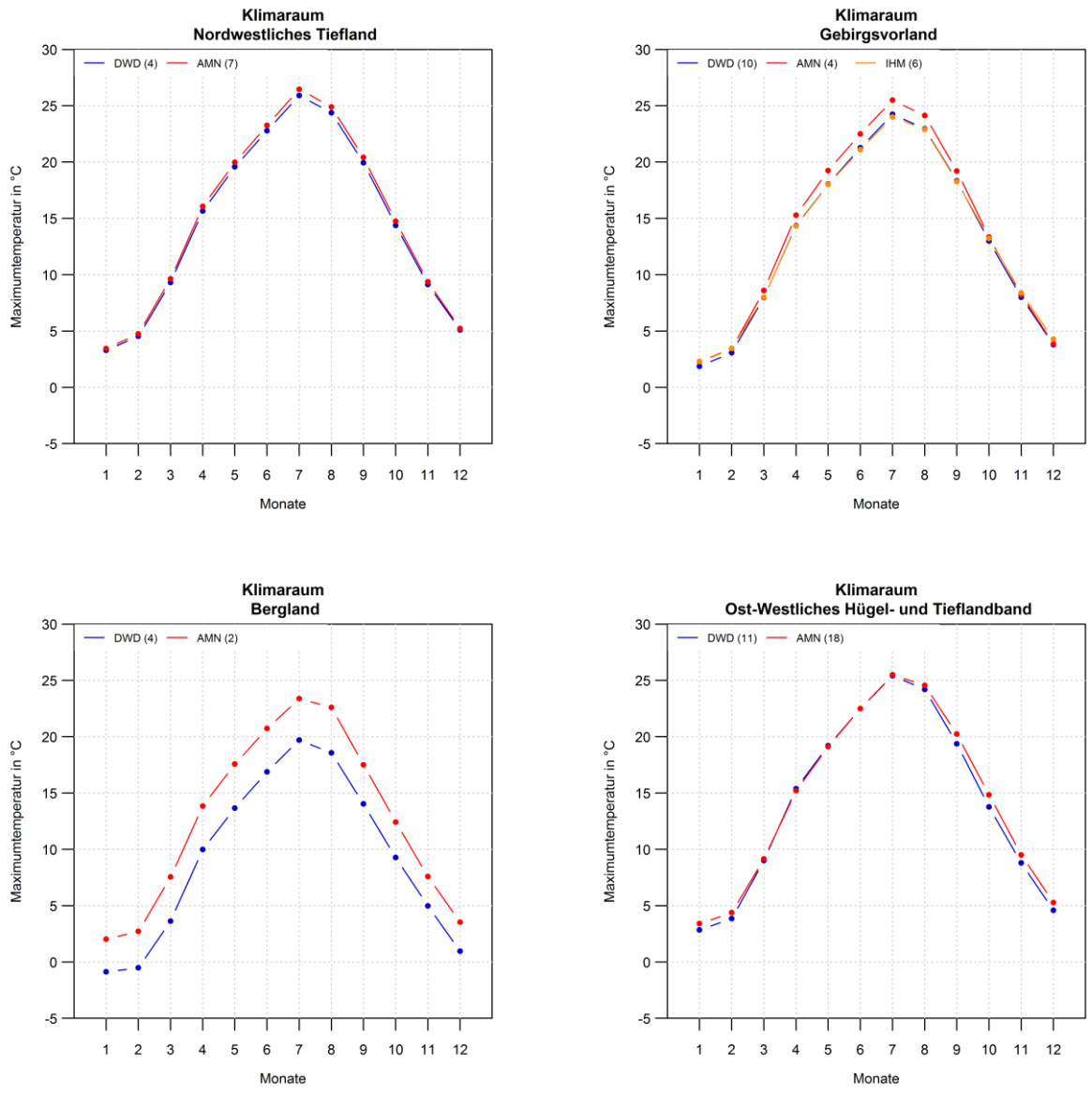


Abbildung 37: Jahresgänge der Maximumtemperatur verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern)

Die geringsten Unterschiede zwischen den Jahresgängen des Niederschlags gibt es im Nordwestlichen Tiefland (Abbildung 38). In den anderen drei Klimaräumen ist die Streuung stärker. Systematische Abweichungen sind nicht zu erkennen.

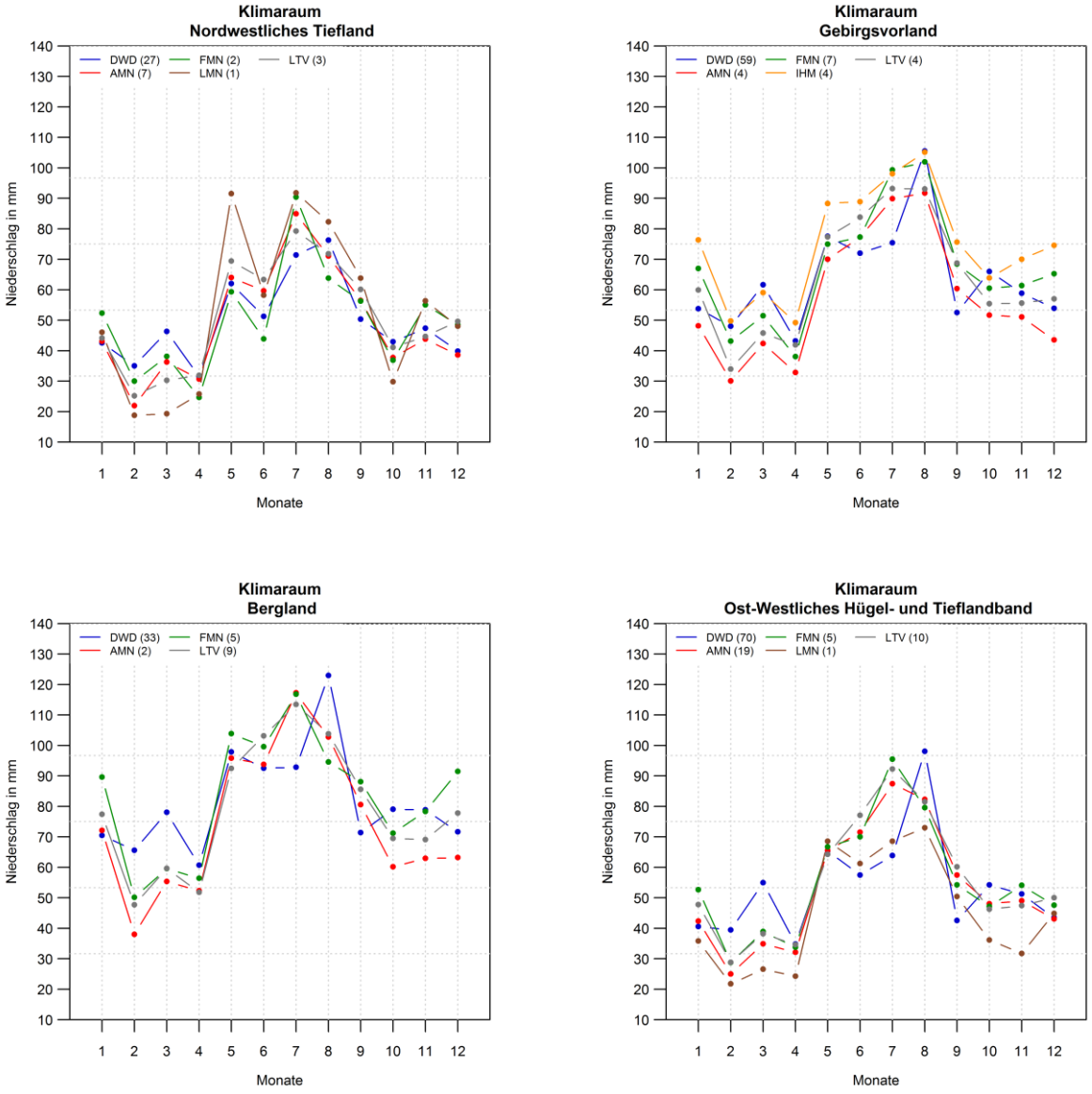


Abbildung 38: Jahresgänge des Niederschlags verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern)

Die Abweichung zwischen den Jahresgängen der relativen Feuchte (Abbildung 39) sind hauptsächlich auf die Temperaturunterschiede infolge der Stationslage zurückzuführen. Höhere Temperaturen führen zu geringeren Werten der relativen Feuchte. Die Verläufe zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

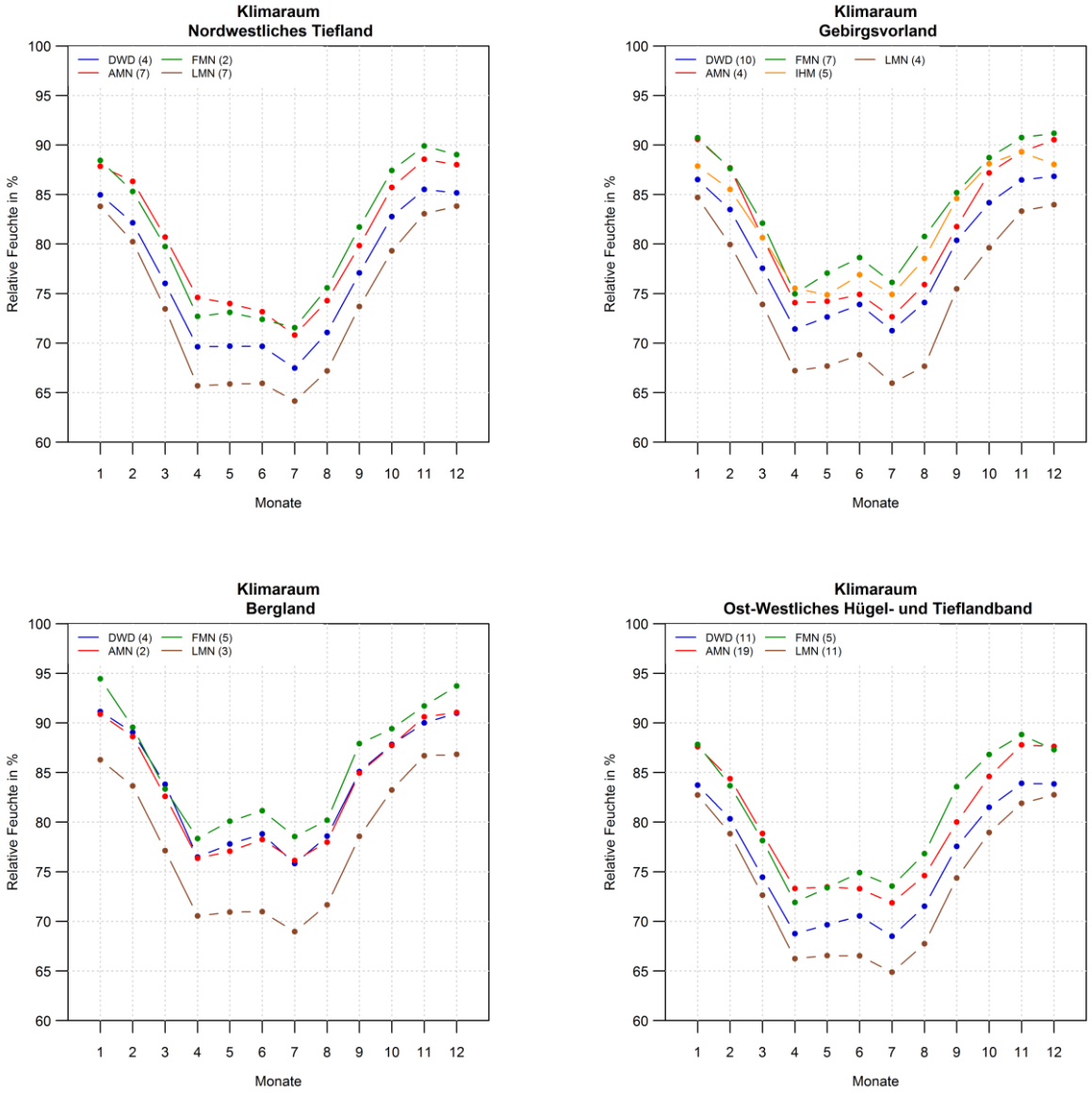


Abbildung 39: Jahresgänge der Relativen Feuchte verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern)

An den Stationen der landeseigenen Messnetze werden im Vergleich zu den DWD-Stationen durchgängig zu geringe Windgeschwindigkeiten gemessen (Abbildung 40). Auch die Variabilität im Verlauf des Jahres ist meistens geringer. Bei den Messnetzen FMN, LMN und IHM kann das auf die geschützte Lage zurückgeführt werden. Beim AMN-Messnetz könnte die Ursache in der Messung begründet liegen. Im Bergland ist der Unterschied zwischen DWD-Messnetz und Landesmessnetzen aufgrund der hochgelegenen DWD-Bergstationen so groß.

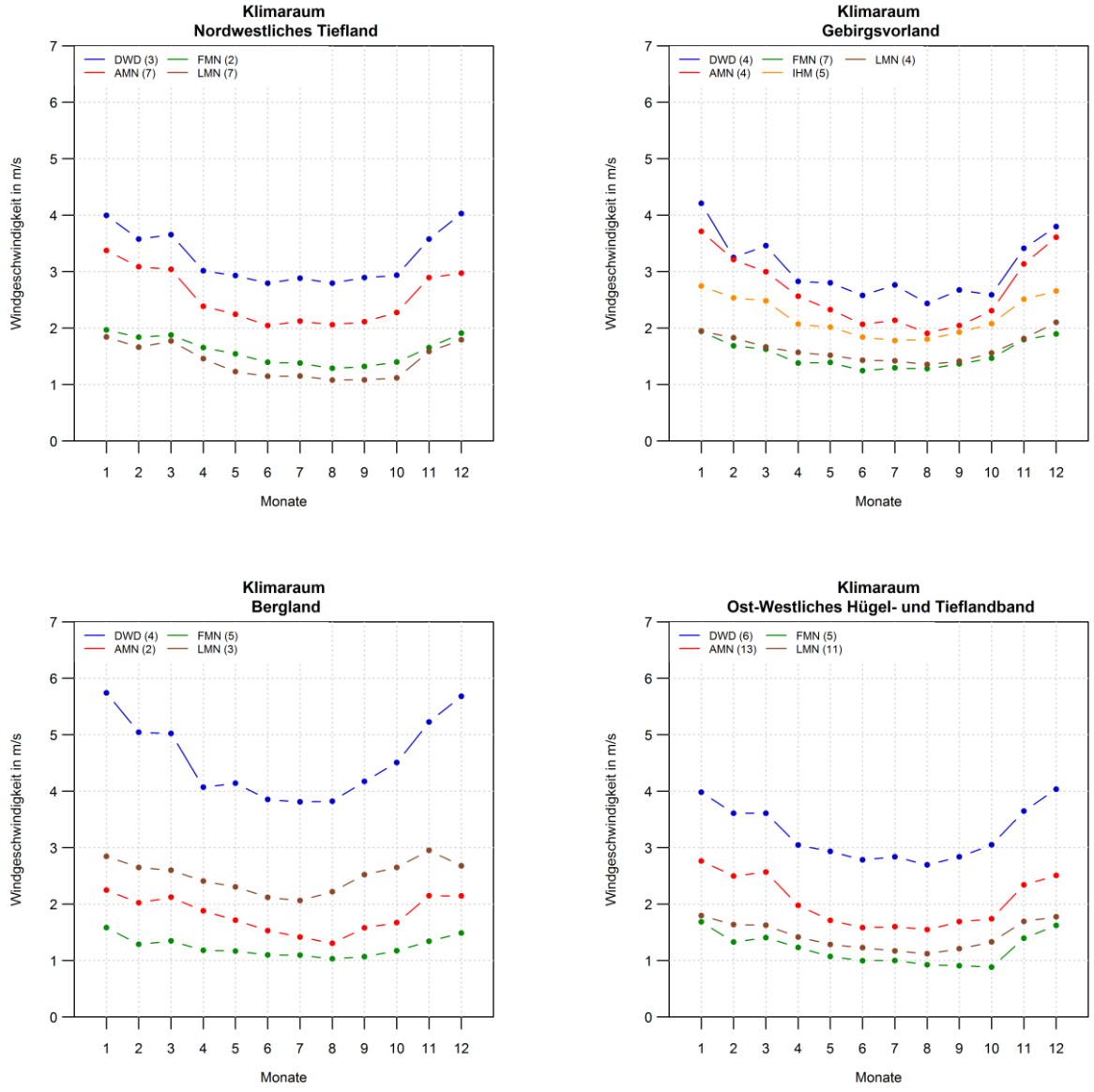


Abbildung 40: Jahresgänge der Windgeschwindigkeit verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern)

Daten der Globalstrahlung liegen von den FMN-, LMN- und IHM-Stationen vor (Abbildung 41). Alle Messnetze zeigen den typischen Verlauf der Globalstrahlung. Größere Unterschiede zwischen den Netzen gibt es im Nordwestlichen Tief- und Bergland, die sehr wahrscheinlich auf die Stationslage zurückzuführen sind. Zusätzlich sollte man überprüfen, ob Abschattungseffekte im Sommer bei den LMN-Stationen eine Rolle spielen.

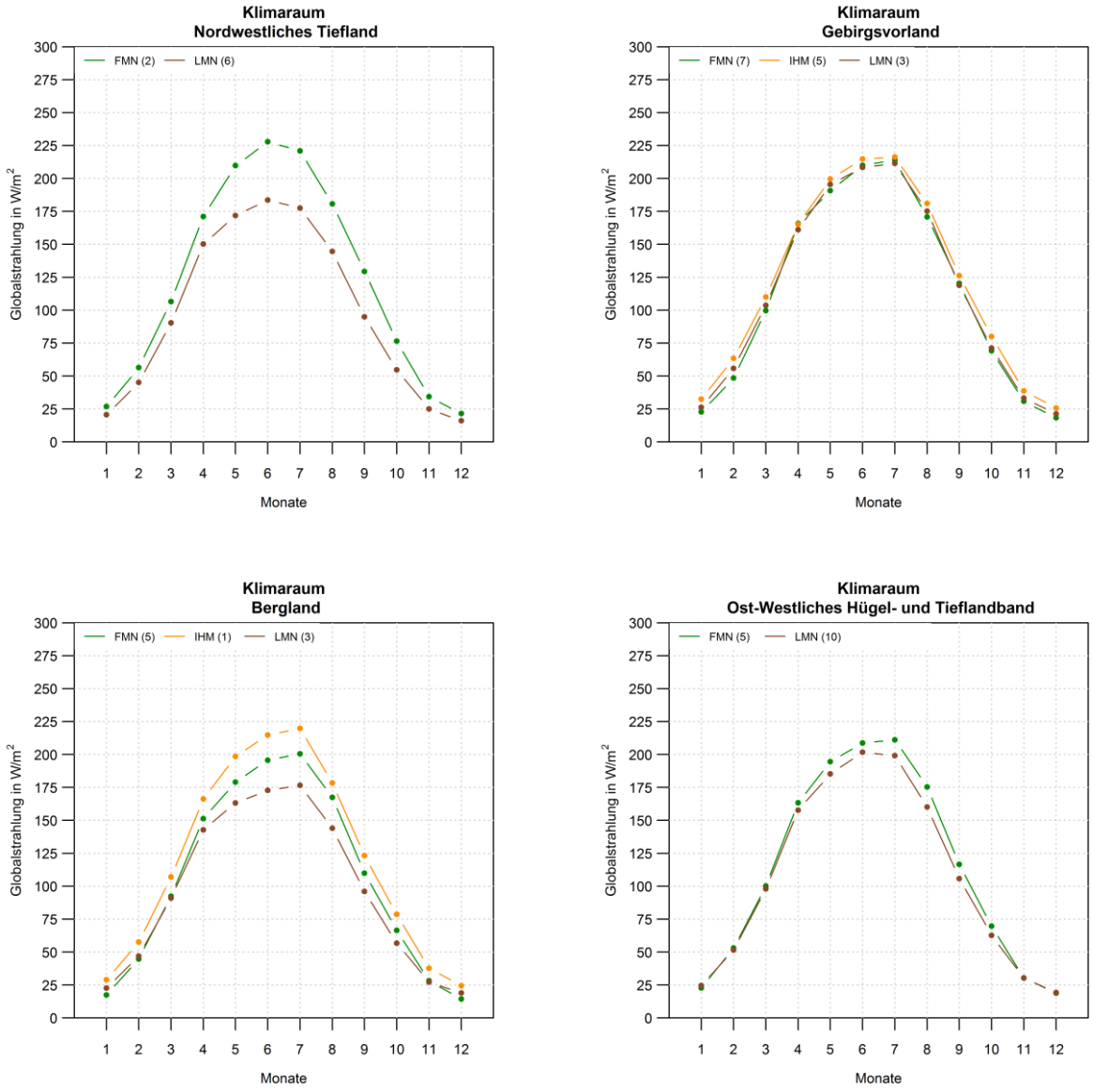


Abbildung 41: Jahresgänge der Globalstrahlung verschiedener Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (Stationsanzahl in Klammern)

4.4.4 Vergleich der Boxplots der Messnetze

Mit Hilfe der nachfolgenden Box-Whisker-Plots wird exemplarisch ein Vergleich der Verteilungen der Jahreswerte aller Stationen des DWD und der Landesmessnetze für die vier Klimaräume für die Periode 2006-2015 (beste Abdeckung durch Landesmessnetze) durchgeführt. Hiermit lässt sich schnell erkennen, inwieweit die statistischen Charakteristika der landeseigenen Messnetze denen des DWD-Messnetzes ähneln.

Die Boxgrenzen kennzeichnen das 25. und 75. Perzentil, der horizontale Balken in der Box den Median aller Werte. Die Länge der Antennen (Whisker) beträgt das 1,5-fache des Abstands zwischen dem 25. und 75. Perzentil. Außerhalb der Antennen liegen die sogenannten „Ausreißer“ (Kreise). Im Folgenden werden die Boxplots für jedes Klimaelement bewertet. Die Ausreißer und auffällige Werte werden tabellarisch erfasst und wenn möglich begründet. Die Boxplots für den Sommer und Winter sind dem digitalen Anhang zu entnehmen.

Temperatur (Mittel, Min, Max)

Unterschiede in den Temperaturboxplots (Abbildung 42, Abbildung 43, Abbildung 44) zwischen den Messnetzen sind zum einen durch die unterschiedliche Höhenlage der Stationen sowie durch den Stadteffekt (Wärmeinsel) erklärbar. Viele Stationen des Luftmessnetzes liegen im städtischen Bereich mit höheren Temperaturen als im Umland. Die geringeren Stationshöhen im Agrarmessnetz des Gebirgs- und Berglandes (ausgerichtet an der Lage der Agrarflächen) führen ebenfalls zu höheren Temperaturen als im DWD-Messnetz. Im Winter zeigen die Verteilungen durchweg eine größere Schwankungsbreite, aber geringere Unterschiede zwischen den Netzen. Die einzigen auffälligen Ausreißer sind die Sommerwerte an der Station Blankenhain im ost-westlichen Hügel- und Tieflandband (Tabelle 17). Die untere Grenze der Verteilungen wird für den dargestellten Zeitraum fast durchgängig durch den kalten Sommer in 2010 bestimmt. Minimum- und Maximumtemperatur werden nur im DWD-, Agrar- und IHM-Messnetz erfasst. Auch hier gilt, dass die höheren Temperaturen im Agrar-Messnetz auf die geringeren Stationshöhen zurückzuführen sind.

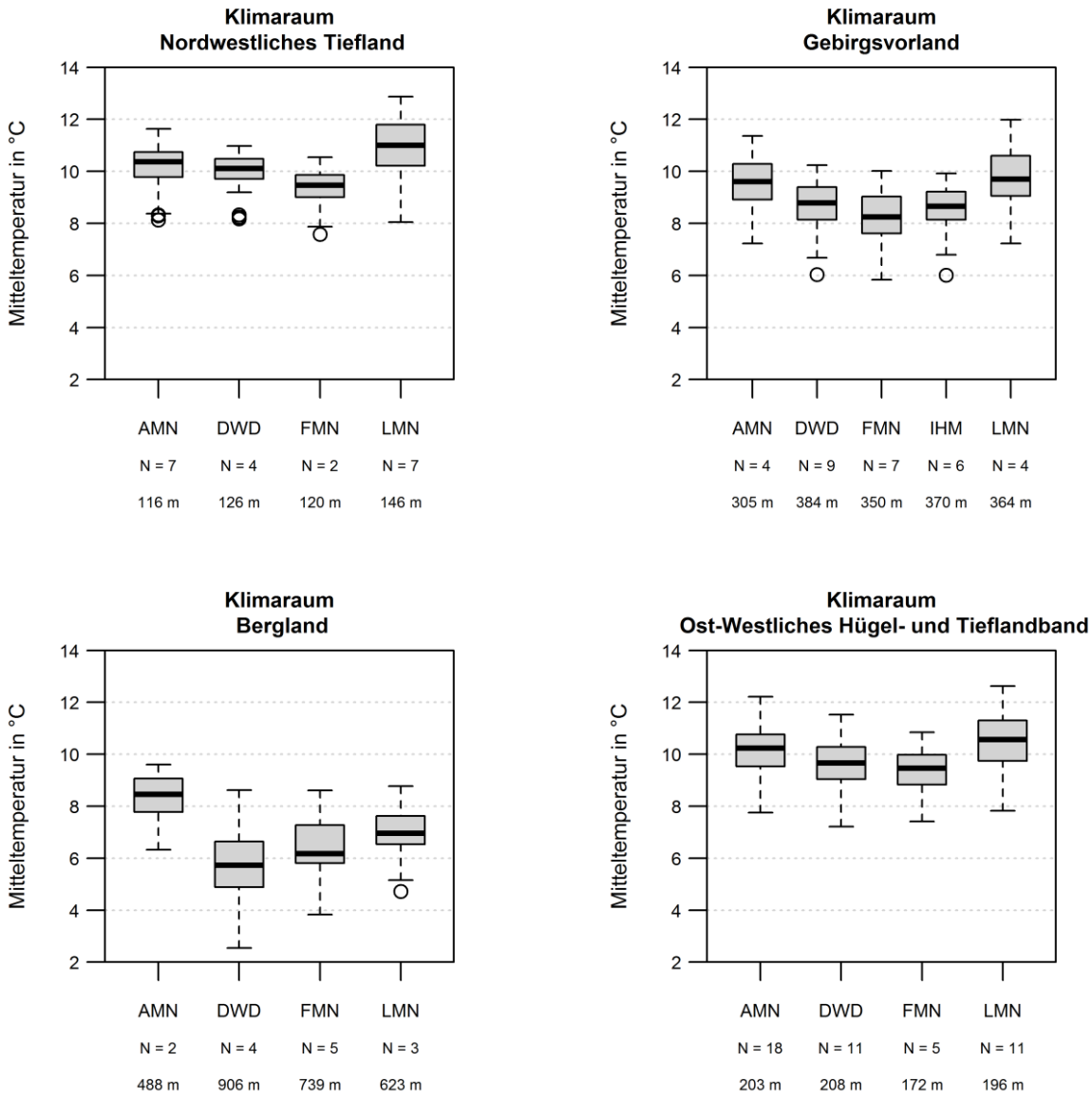


Abbildung 42: Boxplot der Mitteltemperatur aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (zusätzliche Angaben an der X-Achse: Stationsanzahl und mittlere Stationshöhe)

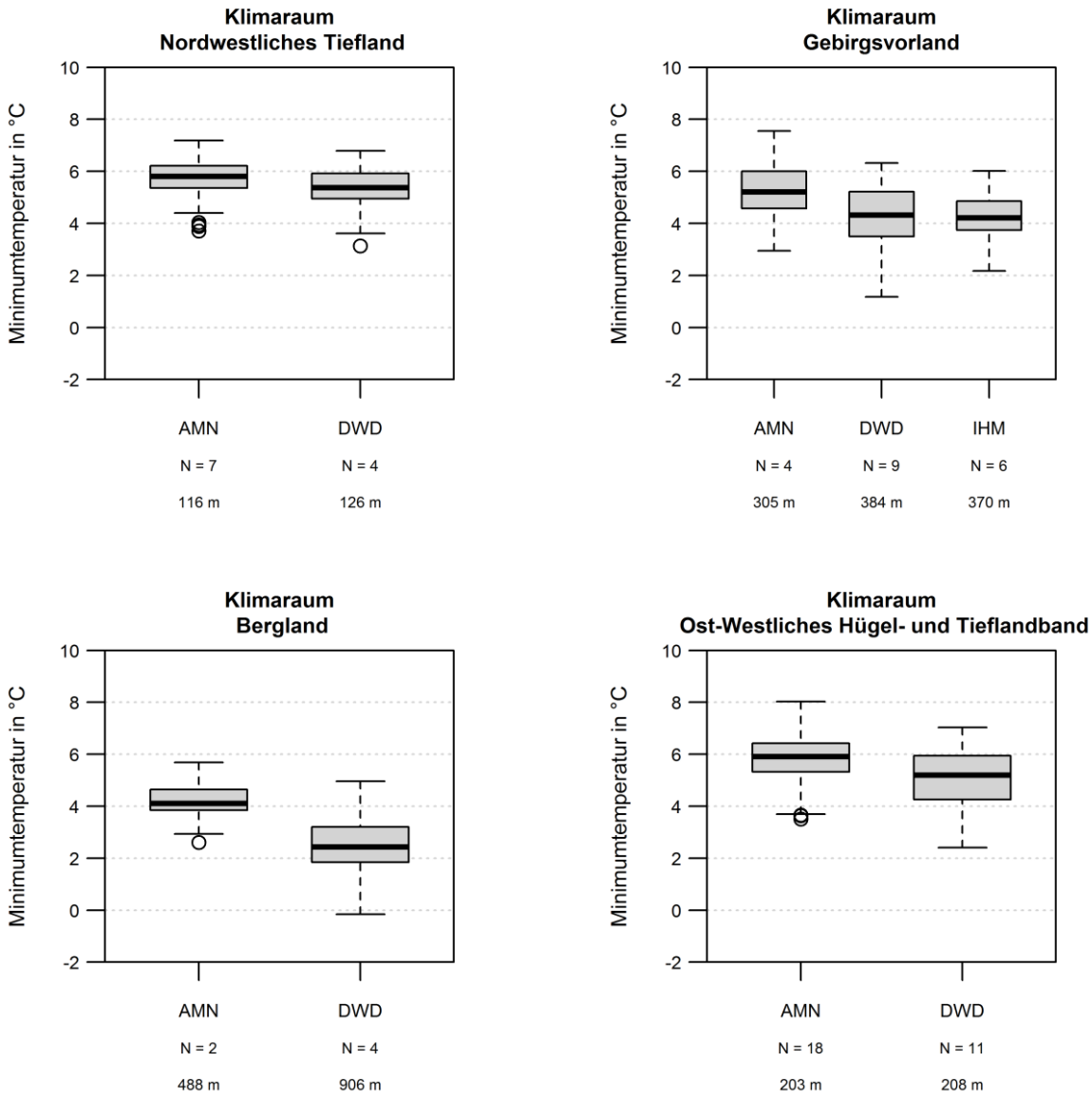


Abbildung 43: Boxplots der Minimumtemperatur aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (zusätzliche Angaben an der X-Achse: Stationsanzahl und mittlere Stationshöhe)

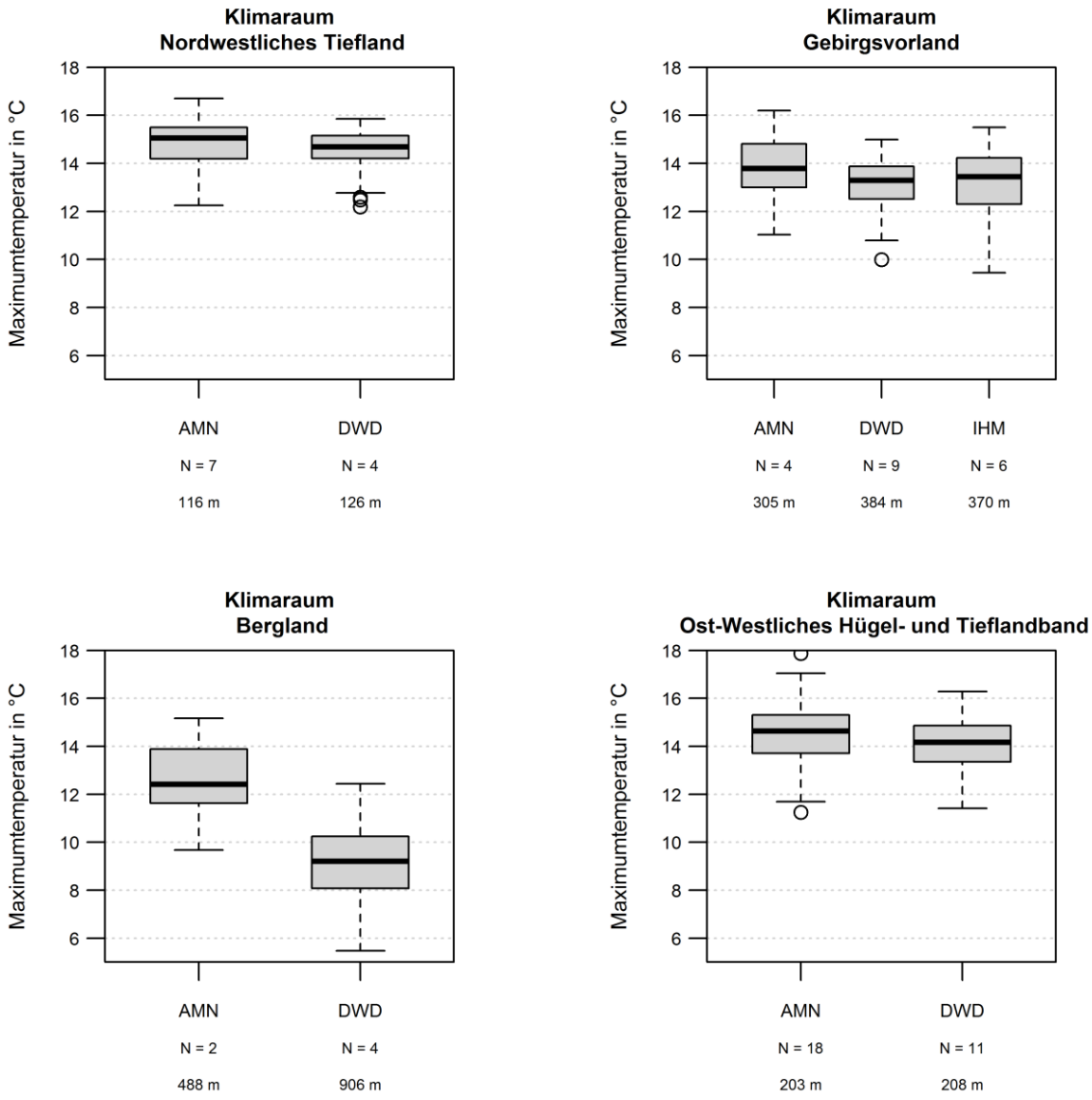


Abbildung 44: Boxplots der Maximumtemperatur aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (zusätzliche Angaben an der X-Achse: Stationsanzahl und mittlere Stationshöhe)

Tabelle 17: Auffällige Werte der Temperatur

Variable (Jahreszeit)	Station (Klimaraum, Messnetz, Stat_ID)	Beschreibung	Erklärung
TM (YY)	verschiedene Stationen vor allem im NW-Tiefland und Gebirgsvorland	Ausreißer nach unten	„Sachsen war im Jahr 2010 mit 7,2 °C das kälteste … Bundesland“ (DWD, Jahresrückblick 2010)
TM (SO)	Blankenhain (OW-Hügel- und Tieflandband, AMN, 99228)	Ausreißer nach unten	höchste Station im AMN-Netz (349 m), Extreme möglich
TN (SO)	Blankenhain (OW-Hügel- und Tieflandband, AMN, 99228)	Ausreißer nach unten	höchste Station im AMN-Netz (349 m), Extreme möglich
TX (SO)	Blankenhain (OW-Hügel- und Tieflandband, AMN, 99228)	Ausreißer nach unten	höchste Station im AMN-Netz (349 m), Extreme möglich
TM (YY)	verschiedene Stationen vor allem im NW-Tiefland und Gebirgsvorland	Ausreißer nach unten	„Sachsen war im Jahr 2010 mit 7,2 °C das kälteste … Bundesland“ (DWD, Jahresrückblick 2010)
TM (SO)	Blankenhain (OW-Hügel- und Tieflandband, AMN, 99228)	Ausreißer nach unten	höchste Station im AMN-Netz (349 m), Extreme möglich

Niederschlag (unkorrigiert)

Durch die Skalierung über einen weiten Bereich (aufgrund der hohen Variabilität) lassen sich die genauen Unterschiede zwischen den Netzten schwerer erkennen und beurteilen (Abbildung 45). Im nordwestlichen Tiefland betragen die Abweichungen vom Klimaraum-Mittel -5 bis 2% (ohne LMN). Im Gebirgsvorland weichen AMN nach unten (-10 %) und IHM (12 %) nach oben vom Klimaraum-Mittel ab. Die anderen Jahressummen unterscheiden sich nur um maximal 4 %. Im Bergland sind die Unterschiede aufgrund der Stationslage (Höhe) am größten. Sie bewegen sich zwischen -8 und 9 %. Das ost-westliche Tieflandband zeigt wieder geringe Unterschiede zwischen -3 und 2 % (ohne LMN).

Bei den sommerlichen Niederschlägen gibt es nur im Gebirgsvor- und Bergland Abweichungen über 4 %. Im Gebirgsvorland liegt das IHM-Netz 9 % über dem Klimaraum-Mittel und das AMN-Netz 9 % darunter. Die Unterschiede zwischen den Messnetzen sind im Winter am größten. Im Vergleich zum Klimaraum-Mittel weisen die Stationen des AMN ein Minus zwischen 15 und 29 % auf, die FMN-Stationen ein Plus von 7 bis 18 %. Die anderen Messnetze bewegen sich in einem Korridor zwischen -10 und 7 %. Ursache könnte der hohe Einfluss des Geschütztheitsgrades bei Schneeniederschlägen sein. Ausreißer sind beim Niederschlag schwer zu beurteilen, da eine hohe räumliche Variabilität möglich ist und lokale Extremereignisse erheblichen Einfluss auf die Statistik haben können (Tabelle 18).

]

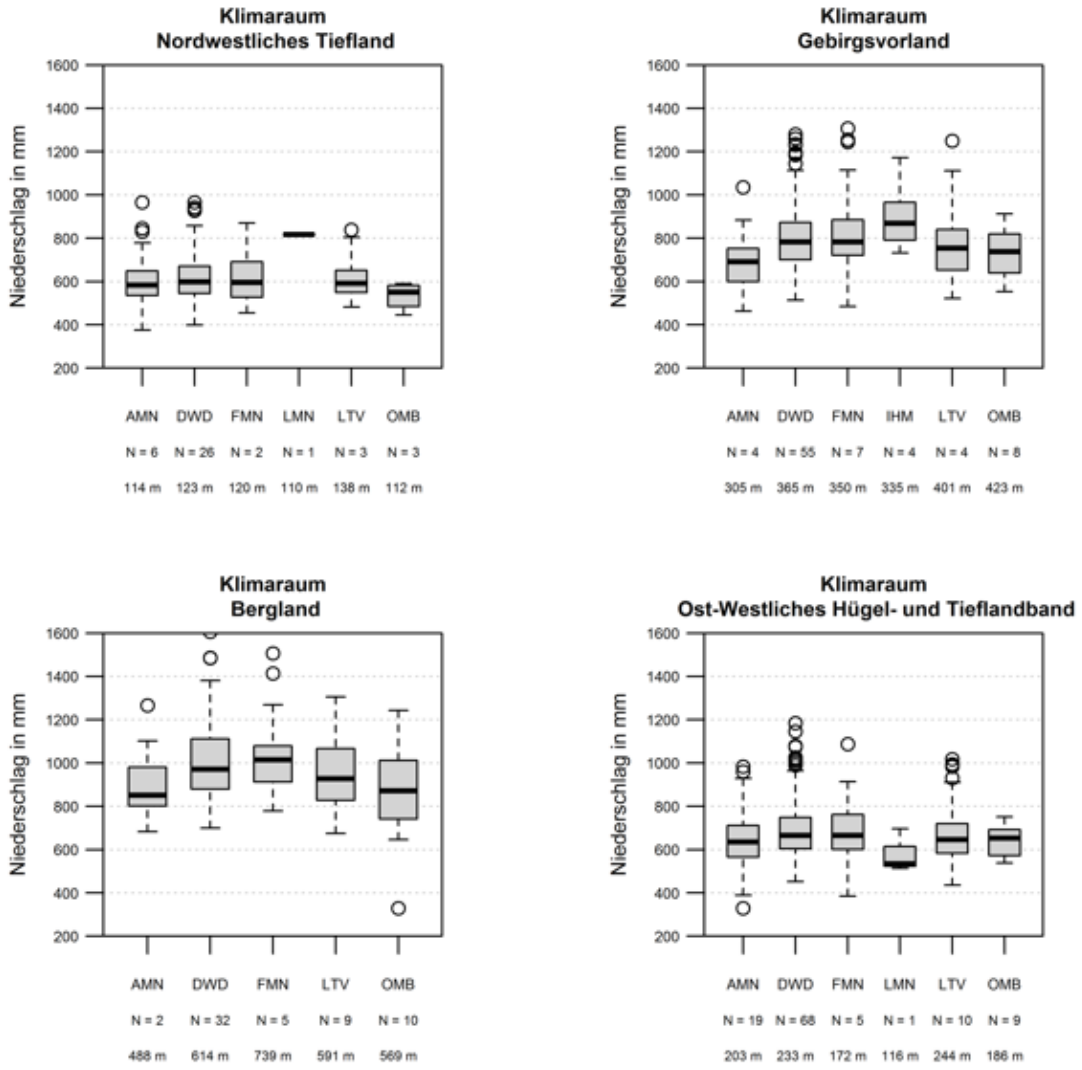


Abbildung 45: Boxplots des Niederschlags aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (zusätzliche Angaben an der X-Achse: Stationsanzahl und mittlere Stationshöhe)

Tabelle 18: Auffällige Werte des Niederschlags

Variable (Jahreszeit)	Station (Klimaraum, Messnetz, Stat_ID)	Beschreibung	Erklärung
RR (YY, SO, WI)	unterschiedliche Stationen in allen Netzen	Ausreißer nach oben	hohe räumliche Variabilität und großer Einfluss lokaler Extremereignisse
RR (SO)	Pohritzsch (NW-Tiefland, AMN, 99221)	Ausreißer nach oben, 2006: 526 mm	sehr wahrscheinlich Fehler in Datenreihe, vom 17. bis 21.06.2006 (41, 145, 53, 386, 80 mm)
RR (SO)	Reichenbach (OW-Hügel- und Tieflandband, AMN, 99212)	Ausreißer nach oben, 2012: 604 mm	Ende Juni bis Ende Juli, mehrere Tage mit extremen Niederschlägen bis zu 86 mm, keine vergleichbar starken Niederschläge in Umgebung
RR (YY, SO, WI)	unterschiedliche Stationen in allen Netzen	Ausreißer nach oben	hohe räumliche Variabilität und großer Einfluss lokaler Extremereignisse

Relative Feuchte

Die Breite der Verteilungen ist bei den Jahres- und Sommerwerten ohne Berücksichtigung der Ausreißer relativ ähnlich (Abbildung 46). Im Winter sind die Spannbreiten innerhalb der Messnetze deutlich erhöht und die Unterschiede zwischen den Messnetzen größer. Beim Agrarmessnetz gibt es auffallend viele Ausreißer, vor allem im Nordwestlichen Tiefland (Tabelle 19). Bei der relativen Feuchte paust sich auch der Einfluss der Temperatur durch. Am deutlichsten ist das an den geringen Werten des Luftmessnetzes zu erkennen.

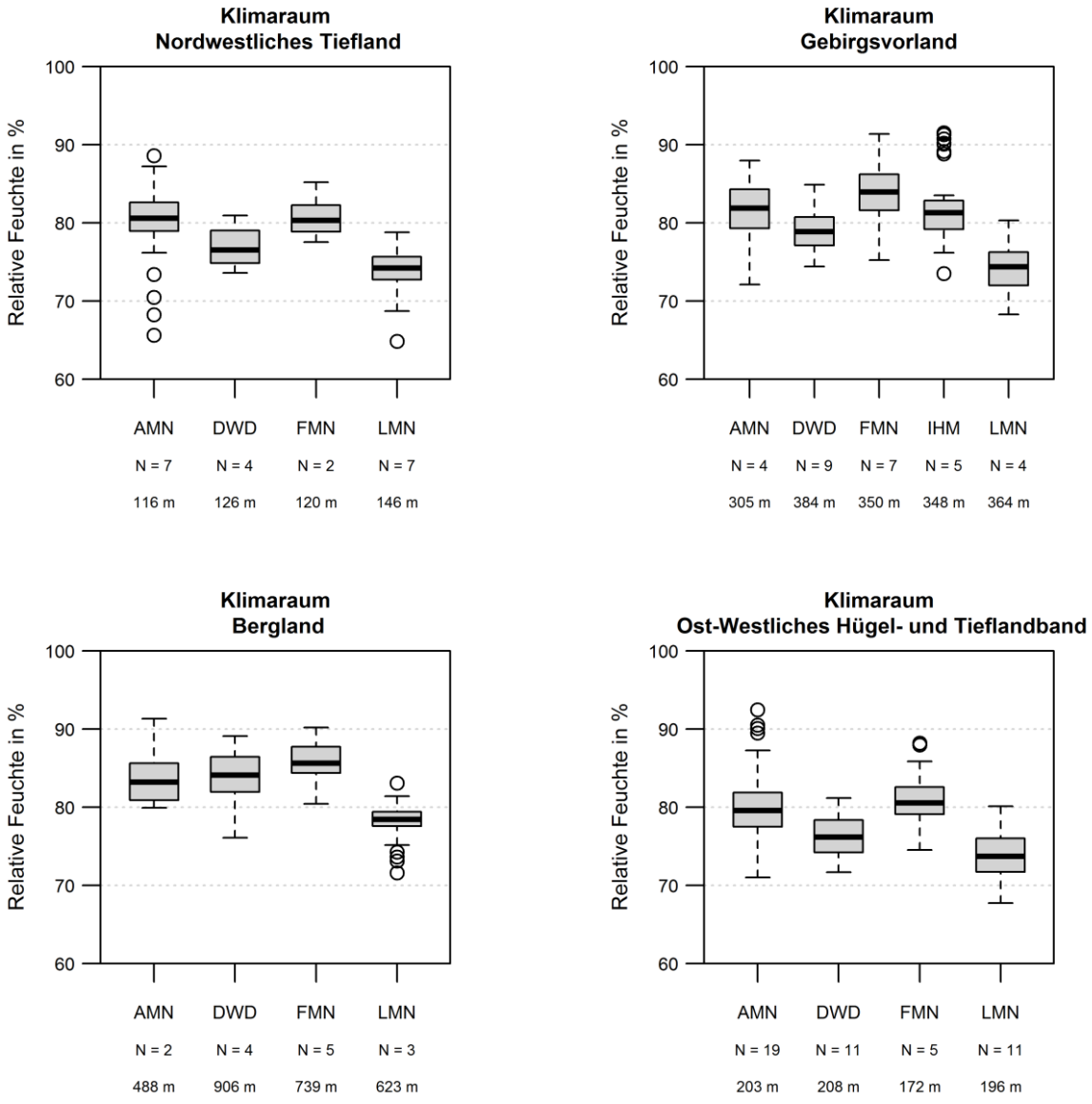


Abbildung 46: Boxplots der relativen Feuchte aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (zusätzliche Angaben an der X-Achse: Stationsanzahl und mittlere Stationshöhe)

Tabelle 19: Auffällige Werte der relativen Feuchte

Variable (Jahreszeit)	Station (Klimaraum, Messnetz, Stat_ID)	Beschreibung	Erklärung
RF (YY, SO)	NW-Tiefland, AMN	mehrere Ausreißer nach unten, unterschiedliche Stationen	unklar, evtl. höhere Mitteltemperaturen
RF (YY)	Phänologischer Garten (Gebirgsvorland, IHM, 99110)	Ausreißer mit sehr hohen Werten, nur bei Jahreswert sehr auffällig.	Stationslage
RF (YY)	Bergland, LMN	mehrere Ausreißer nach unten, unterschiedliche Stationen, insgesamt niedrige Werte	evtl. höhere Mitteltemperaturen?
RF (YY, SO)	unterschiedliche Stationen (v. a. Baruth, 99210) OW-Hügel- und Tieflandband, AMN	mehrere Ausreißer nach oben	unklar
RF (WI)	Salbitz (NW-Tiefland, AMN, 99226)	Ausreißer nach unten, 2010	unklar, Temperaturen unauffällig, kalter Winter
RF (WI)	Leipzig Lützner Str. (NW-Tiefland, LMN, 99416)	Ausreißer nach unten, 2015, 2014	unklar, hohe Temperaturen in den Jahren (zweit- und vierthöchste)

Windgeschwindigkeit

Die auffällig starke Variabilität innerhalb und zwischen den Messnetzen wird durch die Lage und lokalen Gegebenheiten bestimmt (Abbildung 47). An den FMN-Stationen werden durch die vom Wald geschützte Lage die geringsten Windgeschwindigkeiten gemessen. Auch die Variabilität ist am geringsten. Ähnliches gilt für das Luftmessnetz, dessen Stationen ebenfalls einen hohen Geschütztheitsgrad aufweisen. Im Gebirgsvorland haben die zwei hochgelegenen Stationen im DWD- und Luftmessnetz (Fichtelberg, Schwartenberg) einen großen Einfluss auf die Verteilung (Tabelle 20). Verwunderlich sind die etwas unterdurchschnittlichen Windgeschwindigkeiten im Agrarmessnetz. Wir empfehlen den Geschütztheitsgrad anzugeben bzw. festzulegen, um eine Bewertung zu ermöglichen.

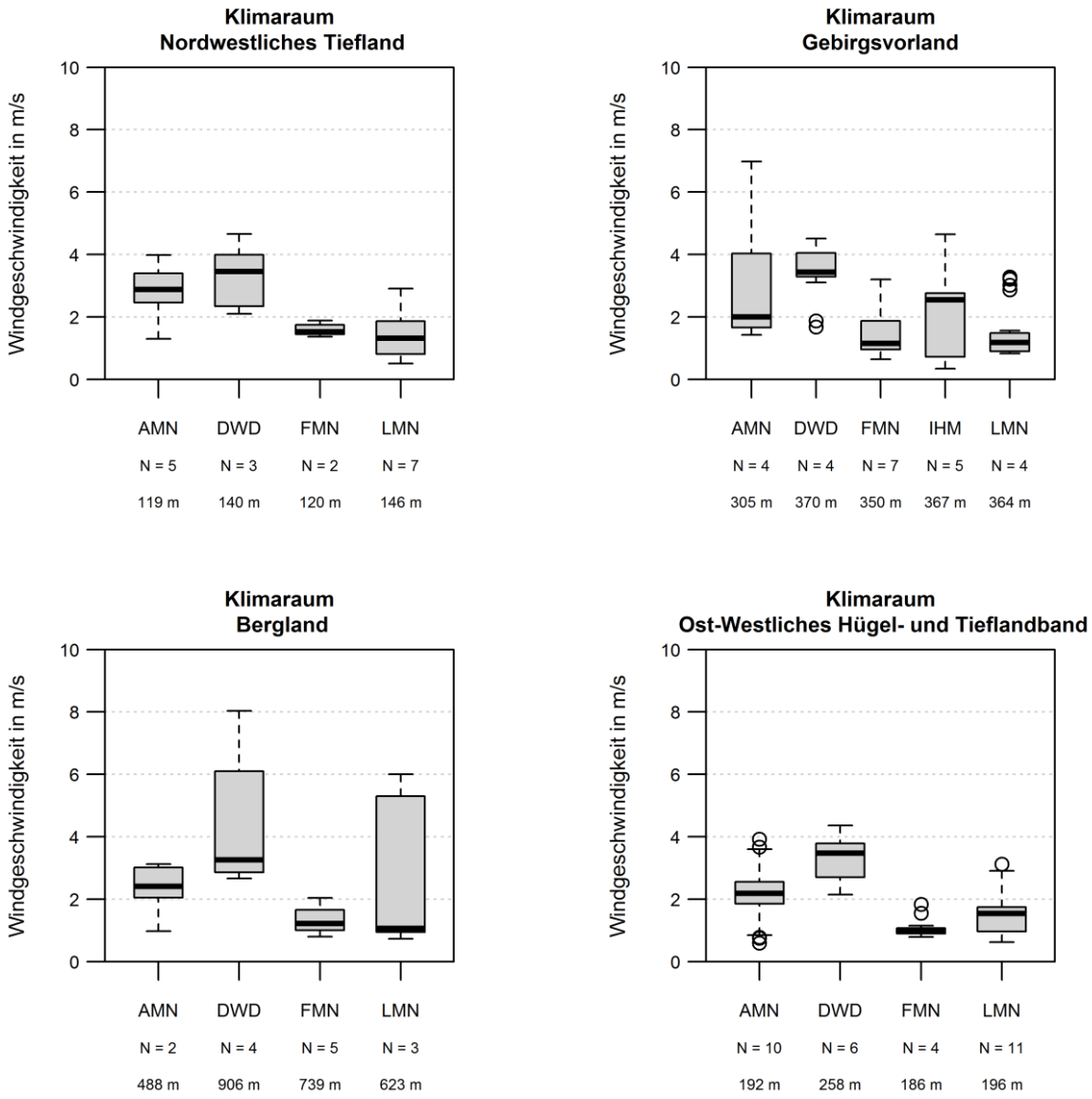


Abbildung 47: Boxplots der Windgeschwindigkeit aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (zusätzliche Angaben an der X-Achse: Stationsanzahl und mittlere Stationshöhe)

Tabelle 20: Auffällige Werte der Windgeschwindigkeit

Variable (Jahreszeit)	Station (Klimaraum, Messnetz, Stat_ID)	Beschreibung	Erklärung
FF (YY, SO, WI)	Borthen (Gebirgsvorland, AMN, 99230)	sehr hohe Windgeschwindigkeiten	Höchste AMN-Station im Gebirgsvorland (430 m)
FF (YY, SO)	Aue (Gebirgsvorland, DWD, 222)	sehr geringe Windgeschwindigkeit	windgeschützte Stationslage
FF (YY, SO, WI)	Brockau (Gebirgsvorland, LMN, 99404)	Ausreißer nach oben	Höchste LMN-Station im Gebirgsvorland (434 m), nur auffällig im Vergleich zu den anderen LMN-Stationen mit eher zu geringen Windgeschwindigkeiten
FF (YY, SO, WI)	Fichtelberg u.a. (Bergland, DWD, 1358)	überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeiten im Vergleich mit anderen Messnetzen	größte Stationshöhe
FF (YY, SO, WI)	Schwartenberg (Bergland, LMN, 99423)	sehr hohe Windgeschwindigkeiten	höchste LMN-Station im Bergland (785 m)

Globalstrahlung

Die Globalstrahlung wird nur im IHM-, Forst- und Luftmessnetz gemessen (Abbildung 48). Am ähnlichsten sind sich die Messnetze im Gebirgsvorland, gefolgt vom ost-westlichen Hügel-und Tieflandsband. Im nordwestlichen Tiefland beeinflusst die LMN-Station Leipzig-West die Verteilung (Tabelle 21). Die Unterschiede im Gebirgsvorland lassen sich vermutlich mit der Stationslage erklären. Eine genaue Begutachtung der FMN- und LMN-Stationen und detaillierte Analyse der Datenreihen wird empfohlen.

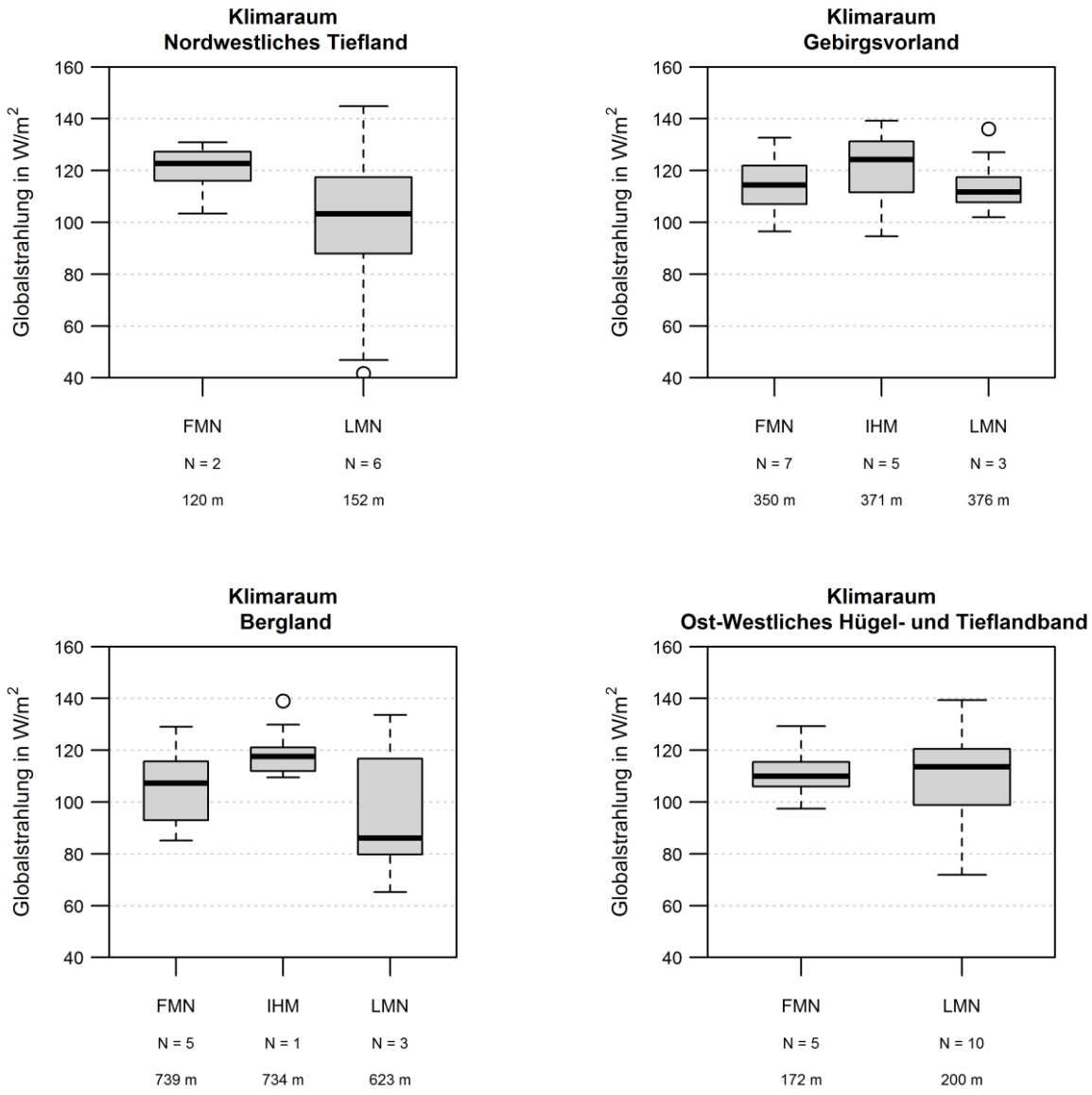


Abbildung 48: Boxplots der Globalstrahlung aller Messnetze, dargestellt für vier Klimaräume (zusätzliche Angaben an der X-Achse: Stationsanzahl und mittlere Stationshöhe)

Tabelle 21: Auffällige Werte der Globalstrahlung RG

Variable (Jahreszeit)	Station (Klimaraum, Messnetz, Stat_ID)	Beschreibung	Erklärung
RG (YY, SO, WI)	Leipzig-West (NW-Tiefland, LMN, 99418)	große Bandbreite v. a. durch sehr geringe Strahlungswerte in Leipzig-West	evtl. Beschattungseffekte infolge der Stationslage (Prüfung nötig)

4.5 Analyse der resultierenden Messrealität

Mit Hilfe der Krigevarianz wird auf die Unsicherheit bei der Schätzung der räumlichen Verteilung geschlossen. Maßgebend dafür sind der räumliche Zusammenhang der Variablen sowie die Messnetzkonfiguration (Dichte und räumliche Verteilung).

Niederschlag

Wie im Kapitel 3.4 vorgestellt, werden für eine Witterungssituation mit normaler und eine mit hoher räumlicher Variabilität die Krigevarianz über den Gesamtzeitraum 1961-2015 analysiert.

Eine flächenhafte Darstellung der sich über die Jahrzehnte verändernden Krigevarianz des Niederschlags ist Abbildung 49 zu entnehmen. Die Krigevarianz betrug Mitte der 60er Jahre in Sachsen 50 bis 125 mm² bei niedriger und 250 bis 400 mm² bei hoher räumlicher Variabilität. An den Rändern, an denen keine Stützstellen mehr liegen, treten stets hohe Varianzen auf. Die Krigevarianz nimmt in den folgenden Jahrzehnten ab, was deutlich an der sich ändernden Färbung zu erkennen ist. Es wird dunkelgrüner bzw. gelber bei niedriger bzw. hoher räumlicher Variabilität. Auch an der Anzahl der Stützstellen, die als Punkte in den Karten dargestellt sind, wird dies erkennbar. Ab den 2000er Jahren ist ein rückläufiger Trend erkennbar mit vermehrt hellgrünen und roten Tönen. Für den derzeitigen Zustand steht die Zeitscheibe 2012. Sie weist die höchsten Krigevarianzen während der gesamten Periode auf. Insbesondere die dunkelgrünen/gelben Inseln, die verringerte Krigevarianzen anzeigen, haben sich gegenüber den 60er Jahren verkleinert.

Für die fünf in diesem Bericht erstellten Teilgebietsuntergliederungen (siehe Kapitel 2.2) sind die Ergebnisse in Abbildung 50 dargestellt. Die bis 1969 und ab den 2000er Jahren zu verzeichnende geringere Stationsdichte manifestiert sich in einem höheren Krigefehler, der unter normalen Bedingungen zwischen 10 und 12 mm und unter stark variablen Bedingungen zwischen 15 und 22 mm beträgt. Der flächenhafte Niederschlag im Juli 2012 betrug in Sachsen 72 mm. Mit den o. g. Krigefehlern beträgt der Fehler bei der Regionalisierung des Niederschlages im Mittel 14 % unter normalen und 26 % bei stark variablen Verhältnissen. Bemerkenswert ist, dass in den Gebirgslagen der Fehler etwas geringer als in den tieferen Lagen ist. Einige Räume fallen durch hohe Krigefehler auf, wie z. B. der Forstraum Westlausitzer Platte. Um hier sicherere Aussagen bezüglich der flächenhaften Niederschläge zu erzielen, wäre eine Erhöhung der Stationsdichte nötig.

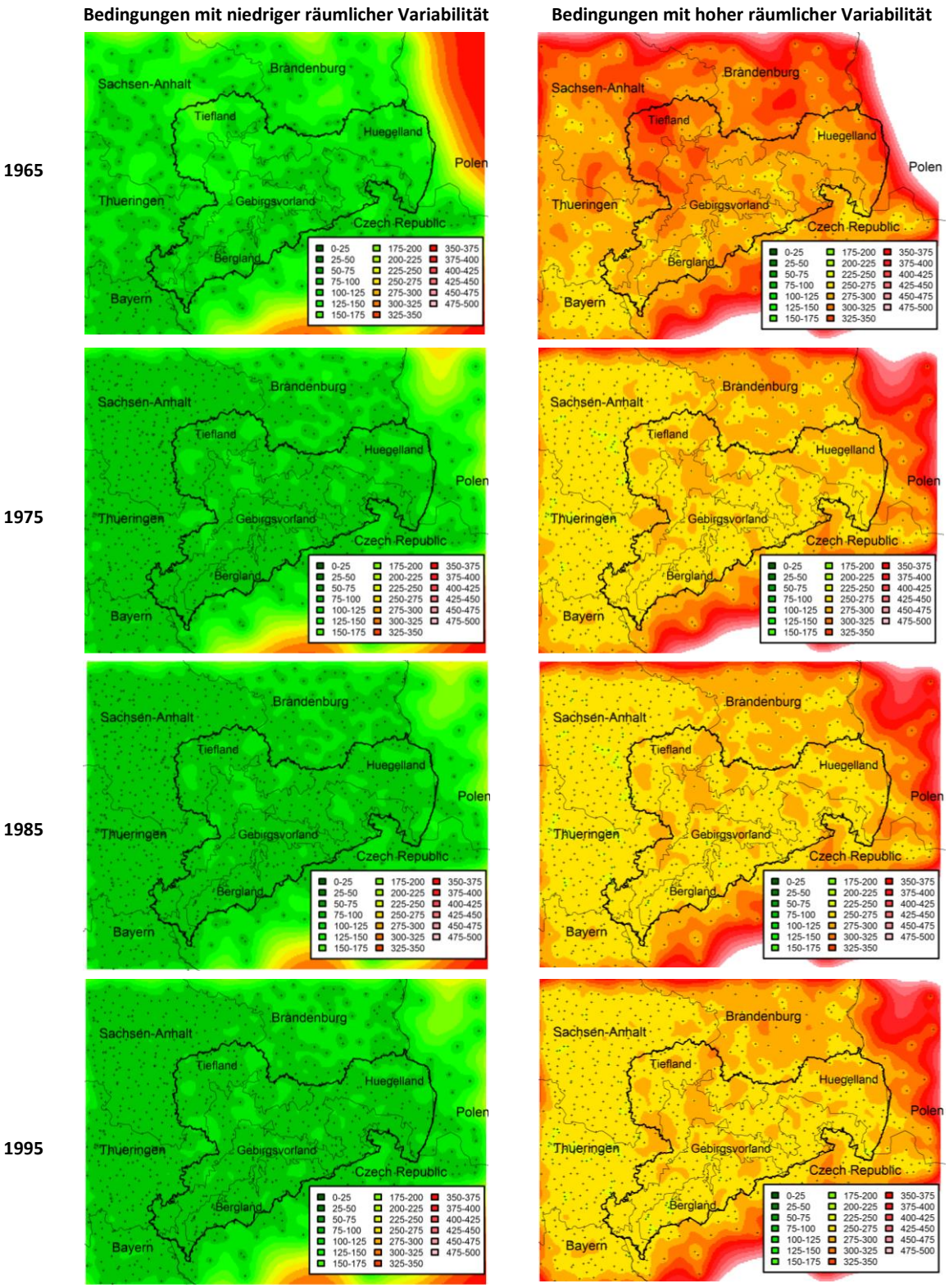
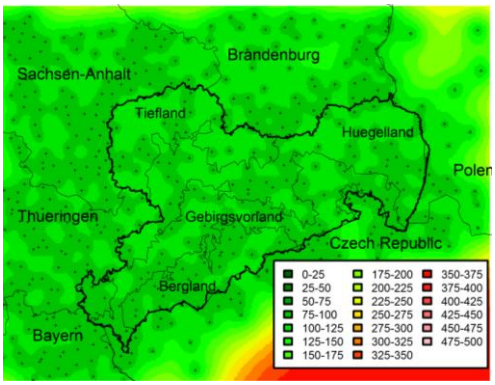
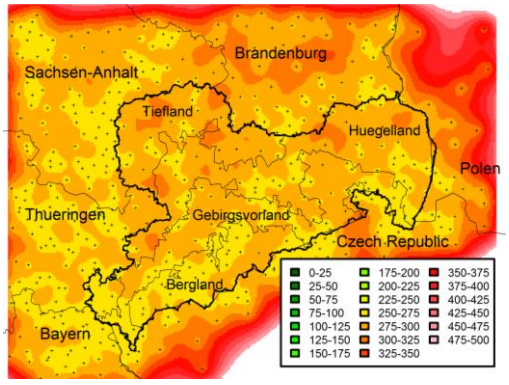


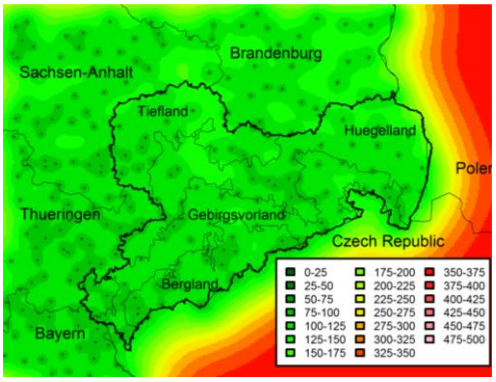
Abbildung 49: Zeitliche Variabilität der Krigevarianz des Niederschlags für Bedingungen mit niedriger (links) und hoher (rechts) räumlicher Variabilität zu unterschiedlichen Zeitpunkten

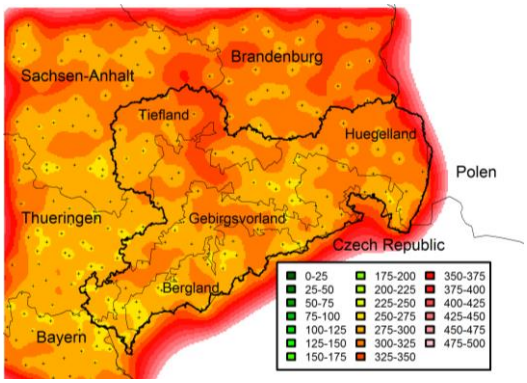
2005





2012





Fortsetzung Abbildung 49: Zeitliche Variabilität der Krigevarianz des Niederschlags für Bedingungen mit niedriger (links) und hoher (rechts) räumlicher Variabilität zu unterschiedlichen Zeitpunkten

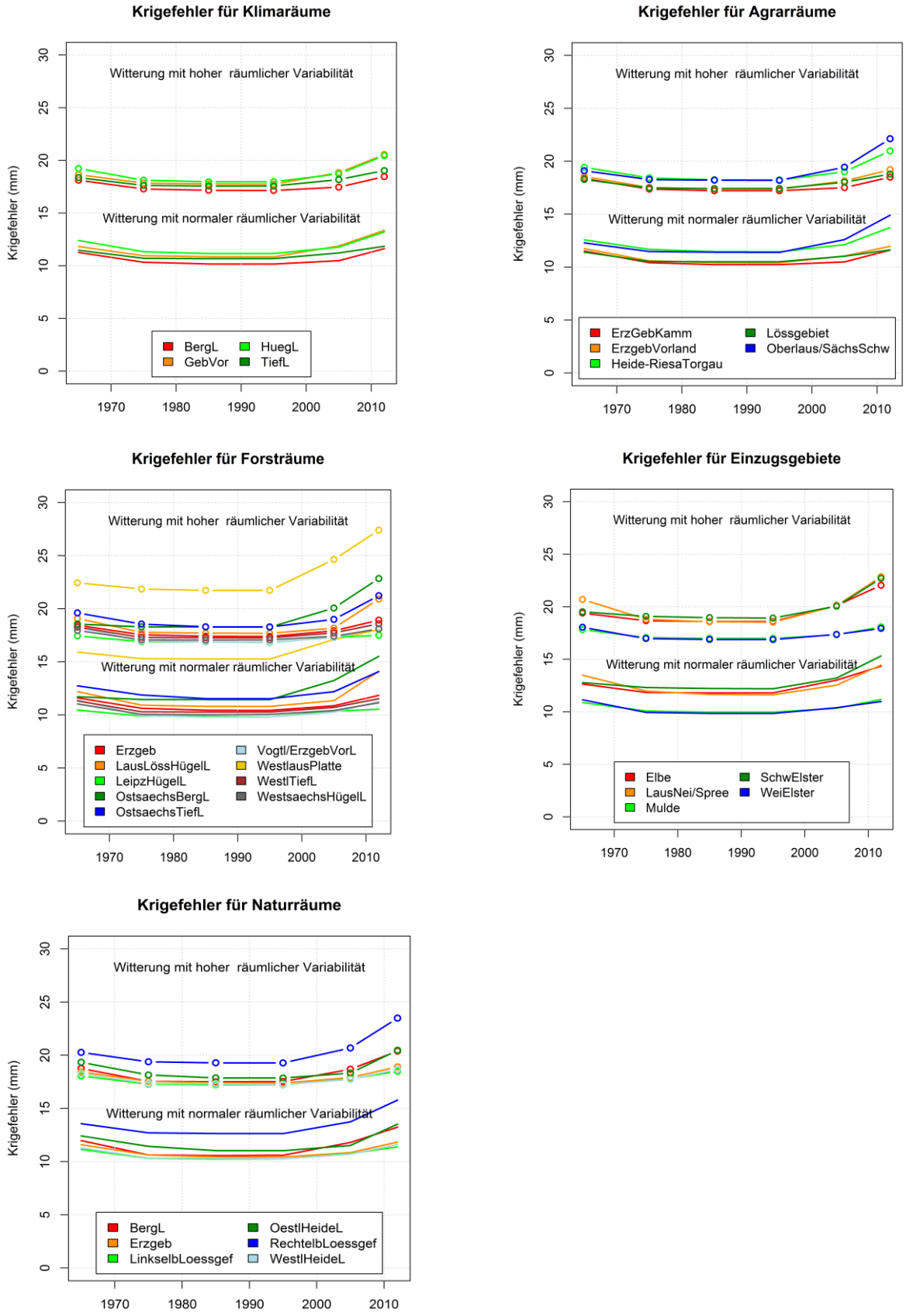
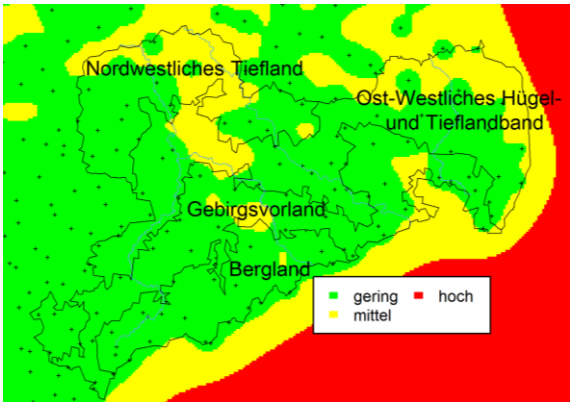


Abbildung 50: Krigefehler des Niederschlags für Teilräume Sachsen für normale und stark variable Witterungsverhältnisse

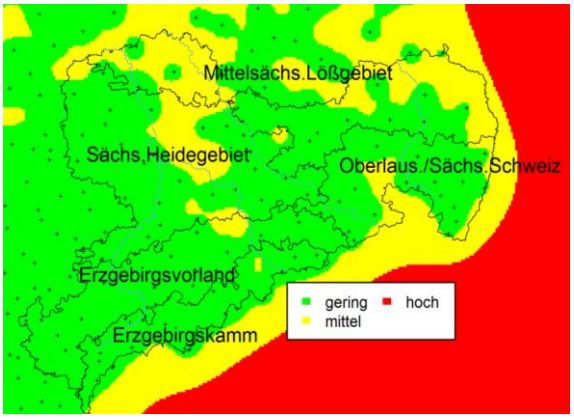
Im Anhang 3 werden der Mittelwert, das 25. und 75. Perzentil des Krigefehlers in den Teilräumen Sachsens für die derzeitige Messnetzkonfiguration (Juli 2012) aufgelistet.

Zur Visualisierung der aktuellen Messnetzrealität (Juni 2012) wurde für eine Witterungssituation mit hoher räumlicher Variabilität (um maximal auftretende Fehler zu quantifizieren) der Krigefehler vereinfacht dargestellt (Abbildung 51). Krigefehler bis zum 50. Perzentil (17.6 mm) werden grün dargestellt und stellen Flächen mit relativ sicherer flächenhafter Aussage dar. Der gelbe Bereich umfasst das 50. Perzentil plus einer Standardabweichung des Krigefehlers (18.8 mm). Die unsichersten Aussagen werden mit Fehlern größer als 18.8 mm mit rot dargestellt. Der so vereinfachte Krigefehler ist auf allen Abbildungen gleich, nur die Zuordnung zu den Teilgebieten unterscheidet sich. Fachspezifisch können nun Defizite in der Stationsdichte identifiziert werden, z. B. sind die räumlichen Aussagen für den Naturraum Östliches Heideland relativ unsicher, wohingegen sie für das Erzgebirge deutlich besser sind.

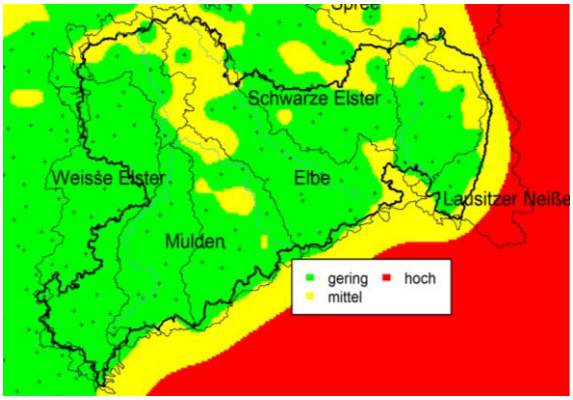
Klimaräume



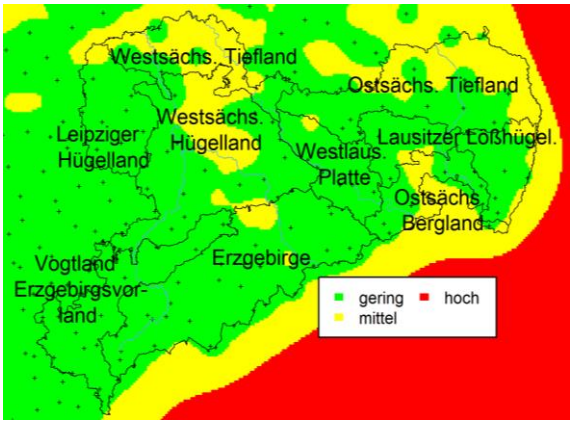
Agrarräume



Einzugsgebiete



Forsträume



Naturräume

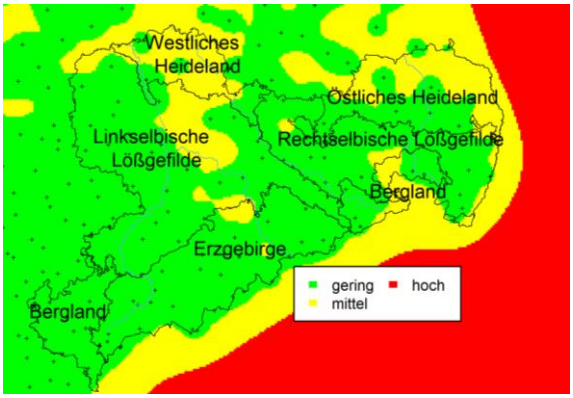


Abbildung 51: Krigefehler für ein Niederschlagsereignis mit hoher räumlicher Varianz bei der Stationsverteilung von 2012 für verschiedene räumliche Untergliederungen Sachsens

Mitteltemperatur, Sonnenscheindauer und relative Feuchte

Für die Analyse der Messrealität der weiteren Klimaelemente wurden – wie für den Niederschlag – jeweils ein Ereignis mit geringer und eins mit hoher räumlicher Variabilität ausgewählt. Der zeitliche Verlauf der Krigefehler ist in Abbildung 52 exemplarisch für die verschiedenen Teilräume Sachsens dargestellt (weitere Abbildungen sind dem digitalen Anhang zu entnehmen). Fehler, die bei Bedingungen mit geringer räumlicher Variabilität auftreten, betragen ca. 0,36 °C, ca. 7 h monatliche Sonnenscheindauer und 3,3 % relative Luftfeuchte. Bei stärker variablen Witte-

rungsbedingungen sind es ca. ein Zehntel Grad Celsius, 10 h bzw. 7 % Luftfeuchtigkeit mehr. Die Kurvenscharen liegen meist dicht beieinander, d. h. räumliche Unterschiede sind relativ gering. Lediglich der Naturraum Ostelbische Lößgefilde fällt durch aktuell sehr hohe Krigefehler der Lufttemperatur auf.

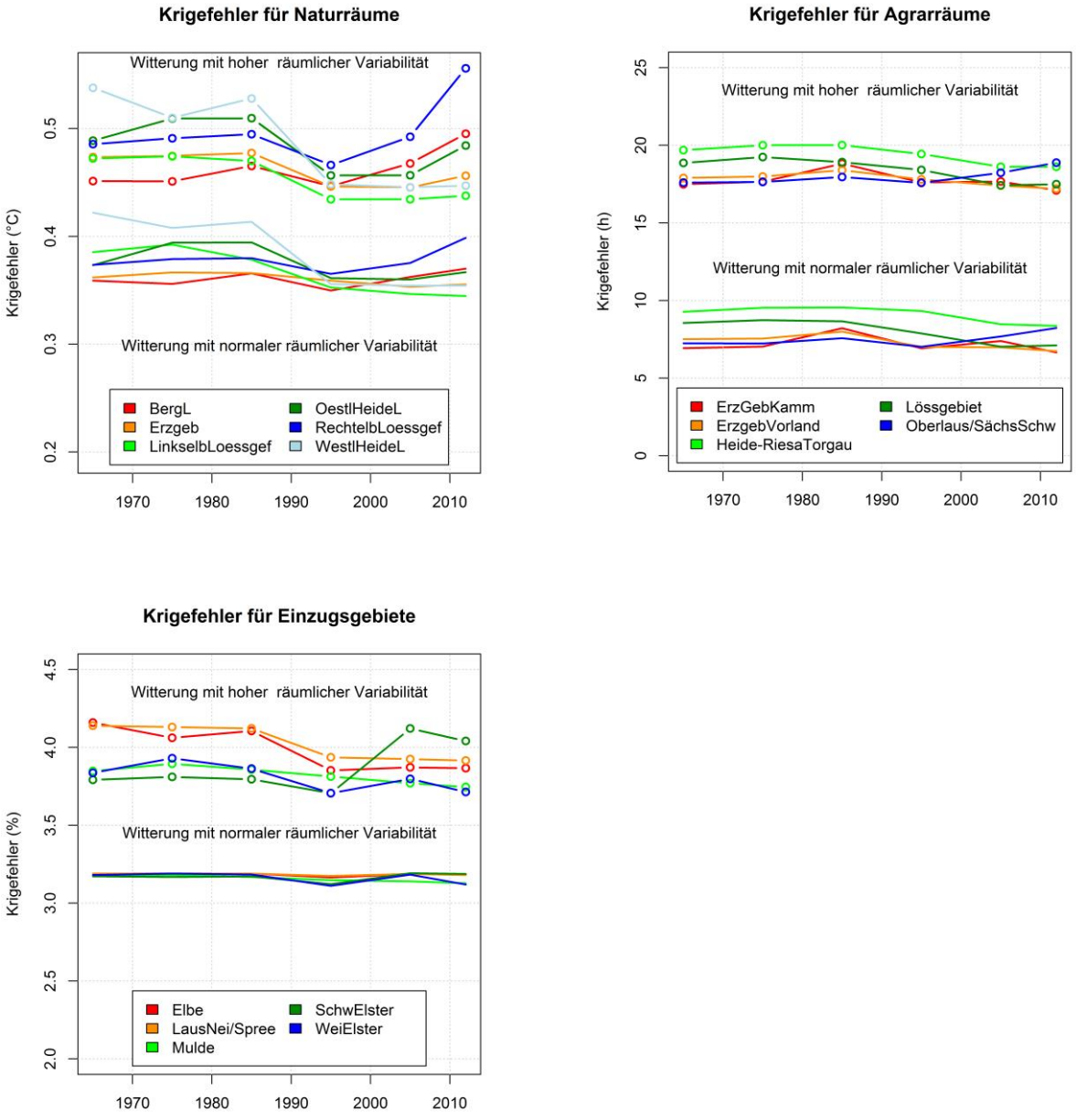
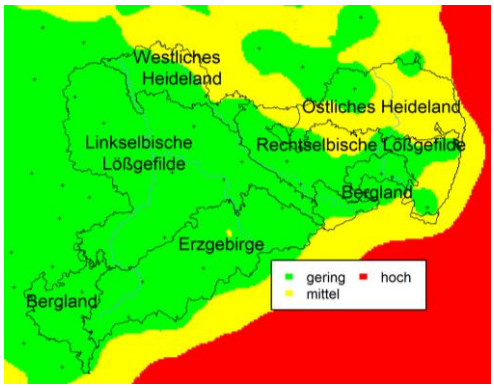


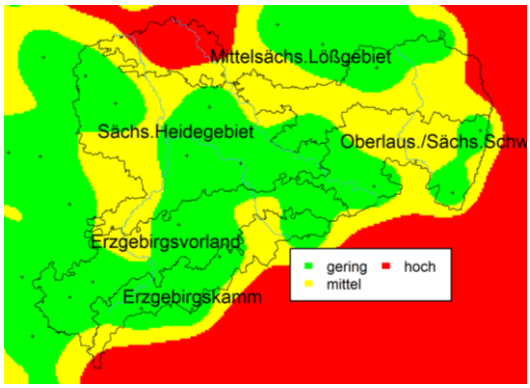
Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der Krigefehler der Mitteltemperatur, der Sonnenscheindauer und der relativen Feuchte für Teilgebiete Sachsens.

Die sogenannten „Ampelkarten“ des Krigefehlers (Abbildung 53) zeigen prinzipiell für die höheren und mittleren Lagen geringe Krigefehler an, flächenhafte Aussagen sind hier demzufolge sicher für alle drei Elemente zu gewinnen. In den niedereren Lagen sind die Fehler etwas höher. Problematische Regionen für die Sonnenscheindauer und der relativen Feuchte befinden sich in Teilen Nord- und Nordostsachsens. Da für Tschechien und Polen nur Daten bis 2010 vorliegen, sind für diese Berechnungen keine Stützstellen vorhanden. Die Krigefehler fallen in diesen Regionen deshalb hoch aus.

Mitteltemperatur



Sonnenscheindauer



Relative Feuchte

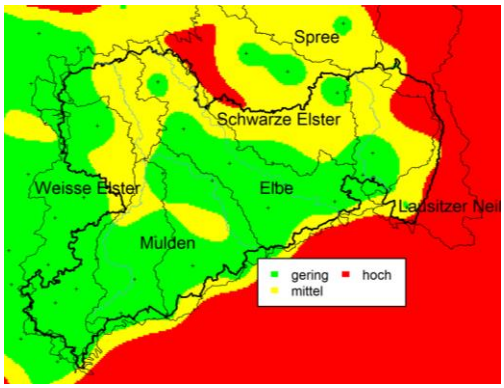


Abbildung 53: Krigefehler der Mitteltemperatur, der Sonnenscheindauer und der relativen Feuchte für Witterungen mit hoher räumlicher Varianz bei der Stationsverteilung von 2012

4.6 Erzeugung des Referenzdatensatzes

4.6.1 Ergebnisse der Ausreißer-/ Plausibilitätsprüfungen

Die in den beschriebenen Tests auffällig gewordenen Werte wurden entsprechend Kapitel 3.8 durch Flags gekennzeichnet (Flag1) und die prozessierte Variable *Wert_fill* mit der Fehlwertkennung -999 belegt. Ist im nächsten Schritt eine Lückenfüllung möglich, wird *Wert_fill* wieder überschrieben.

Niederschlag

DWD-Daten

In Tabelle 22 sind auffällig gewordene Niederschläge aufgelistet, deren Referenzwerte aus den Umgebungsstationen und den Quotienten Niederschlag zu Referenzniederschlag. Als Ausreißer wurden z. B. monatsspezifische Extremniederschläge gewertet, wenn in der Umgebung kein Niederschlag gefallen ist oder keine Schneehöhenänderung beobachtet wurde. Dies betraf Winterniederschläge. In den übrigen Jahreszeiten sind starke Niederschläge trotz nur geringer Referenzwerte als plausibel einzustufen. Der Niederschlag kann insbesondere bei konvektiven Ereignissen eine sehr hohe räumliche Variabilität aufweisen.

Tabelle 22: Einschätzung der Plausibilität der als Ausreißer markierten Niederschläge (RR). Die aus den Umgebungsstationen ermittelten Referenzwerte sind mit RR_Ref bezeichnet.

STATID	DATID	DATUM	RR	RR_Ref	RR:RR_Ref	Bemerkung zur Plausibilität
2836	1176	31.01.1995	59,6	0,0	NaN	unplausibel, da Umgebungsstationen 0 mm
2782	2654	07.02.1958	70,4	0,9	75,5	unplausibel, keine Schneehöhenänderung
5700	2105	01.02.2013	84	6,4	13,2	unplausibel, nur geringe Schneehöhenänderung
5769	2135	01.03.1955	200	0,0	NaN	unplausibel, da Umgebungsstationen 0 mm
5322	2985	19.03.1967	92,8	4,9	19,1	unplausibel, nur geringe Schneehöhenänderung
2726	1154	29.03.1958	90	6,4	14,0	unplausibel, nächster RR in 87 km Entfernung (30mm)
5322	2985	18.03.1967	66,7	7,4	9,0	unplausibel, nur geringe Schneehöhenänderung
1957	50	06.03.1992	47,3	5,6	8,5	unplausibel, nächster RR in 120 km Entfernung (<20 mm)
3977	1515	28.05.1968	84,3	6,0	14,1	plausibel, 22 mm in 40 km Entfernung
3279	1313	17.05.1953	68,7	6,3	10,9	plausibel, 26 mm in 100 km Entfernung
1697	2503	24.06.1975	57,4	2,7	21,4	plausibel, 60 mm in 70 km Entfernung
4381	1665	27.07.1989	78,5	3,8	20,9	plausibel, hohe Niederschläge in Umgebung
2195	954	11.09.1952	90	0,0	NaN	unplausibel, da Umgebungsstationen 0 mm

CZ und PL-Daten

In den tschechischen wurde kein und in den polnischen Daten lediglich ein Ausreißer identifiziert (Statid: 5001, 05.10.2014, 795.8 mm, Referenzwert= 0 mm).

Monatsdaten

Es wurden keine Ausreißer bei den Monatsdaten des DWD gefunden.

Temperatur

DWD-Daten

Die Ergebnisse der Ausreißertests für die Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen sind in Tabelle 23 exemplarisch und in Anhang 4 komplett aufgelistet. Bei den Tagesminimumtemperaturen wurden keine auffälligen Werte gefunden.

CZ-Daten

Bei den Mitteltemperaturen wurden 38 und für die Maximaltemperatur ein Ausreißer identifiziert. Für die Bergstationen Nova-Ves-v-Horach, Bedrichov, Medenec und Nove-Mesto-pod-Smrkem waren keine sinnvollen Prüfungen möglich. Eine tabellarische Zusammenstellung der Ausreißer ist dem Anhang 5 zu entnehmen.

PL-Daten

Bei den Mitteltemperaturen wurden 33 und für die Maximaltemperatur 16 Ausreißer identifiziert. Für die Bergstationen Szrenica und Jakuszice waren keine sinnvollen Prüfungen möglich. Eine tabellarische Zusammenstellung der Ausreißer ist dem

Anhang 6 zu entnehmen.

Tabelle 23: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen (TM, TX) aus dem DWD-Netz. Die aus dem Ausreißertest resultierenden Schwellenwerte, der Referenzwert sowie die Differenzen zu Schwellen- und Referenzwert sind aufgeführt.

STATID	DATID	DATUM	Wert	Schwellenwert unten	Schwellenwert oben	Referenzwert	Differenz zu Referenz	Differenz zu Schwellenwert
Tagesmitteltemperatur								
198	4	1969-12-22	-15,8	-9,5	12,7	-8,3	7,5	6,3
445	8	1971-01-05	-17,0	-10,7	13,1	-12,2	4,8	6,3
445	8	1997-01-02	-18,8	-10,7	13,1	-14,7	4,1	8,1
526	10	1963-12-24	-14,1	-9,7	12,5	-8,9	5,2	4,4
526	10	1954-02-05	-13,4	-10,0	12,2	-9,0	4,4	3,4
853	15	1969-12-29	-13,0	-9,4	11,4	-6,3	6,7	3,6
853	15	1957-12-16	-14,7	-9,4	11,4	-9,3	5,4	5,3
853	15	1978-12-31	-14,3	-9,4	11,4	-9,3	5,0	4,9

Ergebnisse des Tests der Temperaturreihung

DWD

Es wurden zahlreiche nicht plausible Temperaturwerte identifiziert (beispielhaft in Tabelle 24, komplett in Anhang 7). Am Beispiel des ersten Eintrags sei das Prinzip erläutert: Am 27.9.1954 ist TN mit 7,8 °C höher als TM (6,2 °C). Die Referenzwerte wurden mithilfe der umgebenden Stationen berechnet. Für TM und TX stimmen Messwert und Referenzwert gut überein. Lediglich bei TN gibt es eine größere Abweichung, was dafür spricht, dass TN ein unplausibler Wert ist. TN wurde demzufolge mit 4,2 °C ersetzt.

Tabelle 24: Ergebnisse des Tests der Reihung TN-TM-TX. Die fett und unterstrichen markierten Referenzwerte wurden genutzt, um den jeweiligen Wert zu ersetzen

STATID	DATID	STAT_NAME	DATUM	TN	TN_Ref	TM	TM_Ref	TX	TX_Ref
169	2	Annaberg-Buchholz	1954-09-27	7,8	**4,2**	6,2	6,3	10,2	10,5
169	2	Annaberg-Buchholz	1957-05-20	8,8	**6,9**	6,7	**7,3**	12,9	13,4
198	4	Artern	1978-12-29	8,6	**0,3**	8	5,2	10,5	10,7
445	8	Bernburg/Saale (Nord)	1983-01-23	3,8	**2,4**	3,6	3,7	5,8	6,0
445	8	Bernburg/Saale (Nord)	1987-03-01	-3,6	-3,9	-3,7	**-2,9**	1	1,6

CZ- und PL-Daten

Im tschechischen Datensatz wurden keine, im polnischen Datensatz an drei Tagen Probleme identifiziert (Tabelle 25).

Tabelle 25: Ergebnisse des Tests der Reihung TN-TM-TX

(Die fett und unterstrichen markierten Referenzwerte wurden genutzt, um den jeweiligen Wert zu ersetzen.)

STAID	Name	Datum	TN	TN_Ref	TM	TM_Ref	TX	TX_Ref
4106	Zgorzelec	1973-09-03	15,0	**11,7**	13,3	16,8	23,6	20,4
4106	Zgorzelec	1974-10-23	3,1	0,9	4,3	3,7	3,1	**4,5**
4106	Zgorzelec	1975-10-12	3,3	**-1,1**	2,6	3,5	7,5	7,9

Ergebnisse des Tests auf aufeinanderfolgende gleiche Temperaturwerte

- DWD: Der Test auf aufeinanderfolgende gleiche Werte brachte zwei Inplausibilitäten zu Tage:
  - Selb-Oberfranken-L. (STATID 4548, DATID 3275) TM= 3,5 °C vom 20.-24.11.2012
  - Lauchstädt, Bad (STATID 2878, DATID 70) TM= 0 °C vom 01.-05.12.1981
- CZ- und PL-Daten: Im tschechischen Datensatz wurde keine, im polnischen Datensatz ein Problem identifiziert:
  - Zgorzelec (STATID 4106) TX= 2,2 °C vom 27.-31.12.1999.

Relative Feuchte

Einige wenige Messwerte aus den Messnetzen Forst, LMN, IHM überschritten 100%. Sie wurden auf 100 % korrigiert.

Windgeschwindigkeit

DWD-Daten

Die Identifikation von unplausiblen Windgeschwindigkeiten ist aufgrund der großen räumlichen Variabilität dieses Elements sehr schwierig. Zwei Extremwerte wurden als Ausreißer deklariert (Tabelle 26), da sie nicht mit den Stundenwerten übereinstimmten. Zum Vergleich ist die während des Wintersturms Kyrill aufgetretene mittlere tägliche Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe aufgeführt, die einen plausiblen Extremwert darstellt.

Tabelle 26: Windgeschwindigkeiten an der Station Fichtelberg (1358) z. Z. des Wintersturms Kyrill, sowie zwei Ausreißer der Station Halle-Kröllwitz (1957) – Zum Vergleich sind die Schwellenwerte der Ausreißertests MAD und MC mit aufgelistet.

STATID	DATID	DATUM	WERT	Schwellenwert MAD	Schwellenwert MC	Plausibel
1358	38	18.01.2007	21	20,12	19,18	Ja, Sturm Kyrill
1957	50	24.01.1991	17,9	6,68	8,42	Nein, unplausible Stundenwerte
1957	50	21.01.1991	25,3	6,68	8,42	Nein, unplausible Stundenwerte

CZ-Daten

Viele tschechische Stationen haben sehr viele unplausible hohe Werte, z. B. 499 mal 25,2 m/s oder 438 mal 24,2 m/s. Die Reihen sehen optisch nicht plausibel aus, wobei die Station As (50002) besonders auffällt (Abbildung 54). Vom Datenprovider konnten Metadaten zu den Messhöhen gewonnen werden, so dass eine Umrechnung auf 10 m erfolgen konnte. Plausible Windgeschwindigkeiten können an fast alle Stationen ab ca. 2006 festgestellt werden. Anscheinend wurden die Messgeräte gewechselt.

Es wurde versucht, nur die aktuelle Periode (2006-2013) als Basis für eine komplette Lückenfüllung zu verwenden. Auf der Grundlage des Sturms Kyrill am 18.1.2007, bei dem auf dem Fichtelberg ein Tagesmittelwert von 21 m/s gemessen wurde, erfolgte die Festlegung eines Grenzwertes für Ausreißer: 22 m/s (1281 Ausreißer). Als weiteres Ausreißer-Kriterium wurde eine maximale Abweichung zum Referenzwert von 10 m/s definiert (529 Ausreißer). Die Lückenfüllung hat keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert, vermutlich, weil die Datenbasis damit zu gering war. Es wird empfohlen, diesen Datensatz nicht zu verwenden.

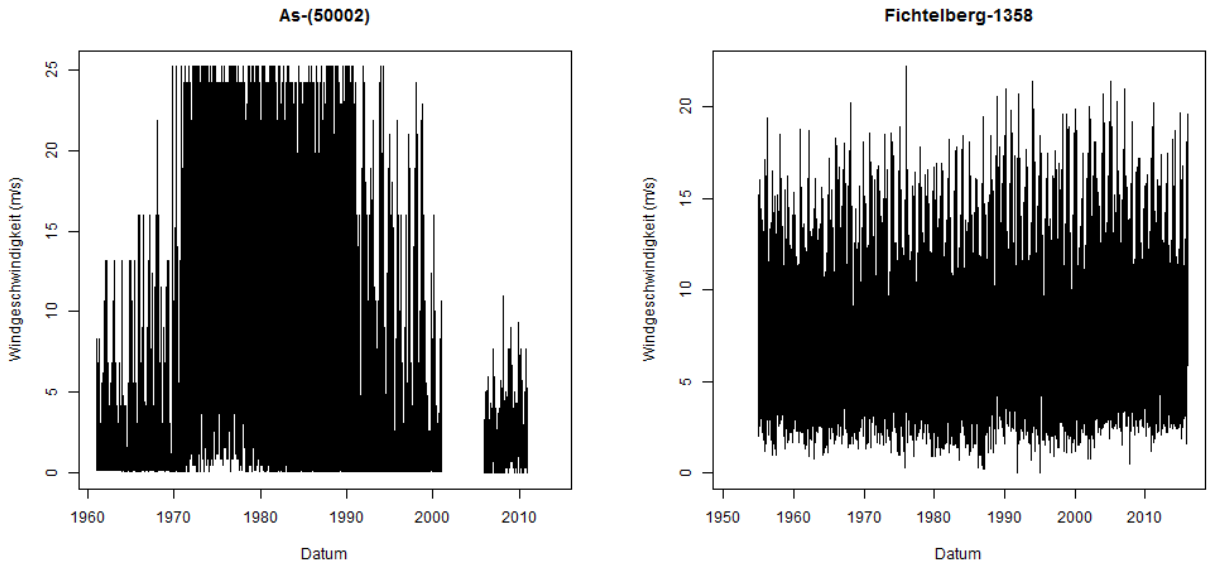


Abbildung 54: Gemessene Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe an der tschechischen Station As im Vergleich zu der sehr hoch gelegenen DWD Station Fichtelberg.

Wie im Kapitel 2.1.2 erwähnt, wurden ersatzweise Daten von neun tschechischen Station vom National Climatic Data Centre der NOAA heruntergeladen. Der Ausreißertest für diese Daten zeigte 16 unplausible Werte für die Station Milesovka an.

PL-Daten

Auffällig ist die Station Szrenica (99001), die sehr viele extreme Windgeschwindigkeiten aufweist (681 Werte größer als 22 m/s). Es wird empfohlen die Reihe nicht zu verwenden, da die Methode der Lückenfüllung bei vielen Ausreißern nur unzuverlässig funktioniert.

Luftdruck

DWD-Daten

Es wurden zwei unplausible Luftdruckwerte gefunden:

- Halle-Kröllwitz (STATID 1957, DATID 50): 04.04.2001, PP=781,5 hPa, Höhe=93 m
- Marienberg-Reitzenhain (STATID 4149, DATID 100): 12.11.1957, PP=811,5 hPa, Höhe=775 m

PL-Daten

Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Dampfdruck

Es wurden keine unplausiblen Daten in den Netzen von DWD, CZ und PL identifiziert.

Schneehöhe

Es wurden keine unplausiblen Daten in den Netzen des DWD, PL und CZ identifiziert.

Sonnenscheindauer

In Tabelle 27 wurden diejenigen Werte aufgelistet, die mehr als 5 % zur astronomisch möglichen Sonnenscheindauer abweichen. Die 21 nicht plausiblen SD-Werte wurden mit einem Ausreißerflag belegt und werden bei der Lückenfüllung wieder aufgefüllt.

Monatsdaten

Im DWD-Netzes wurden keine Ausreißer bei den Monatsdaten des Niederschlags und der Windgeschwindigkeit in 10 m identifiziert.

Tabelle 27: Ergebnisse des Plausibilitätstestes der Sonnenscheindauer (SD); Abgleich mit der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer (S0), dem Referenzwert aus den umgebenden Stationen und der aus dem Bedeckungsgrad berechneten Sonnenscheindauer

STATID	DATID	Stat-Name	DATUM	SD (h)	S0 (h)	Referenzwert (h)	SD berechnet (h)	Abweichung von SD zu S0 (%)	Plausibel
3821	93	Osterfeld	17.05.1997	22,8	15,9	12,3	-	**43**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	01.01.1956	10	8,2	0,2	0	**22**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	02.01.1956	10	8,2	0,1	0	**22**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	04.01.1956	10	8,3	0,2	0	**20**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	05.01.1956	10	8,3	2,2	0	**20**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	06.01.1956	10	8,3	0,1	0	**20**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	08.01.1956	10	8,3	3,0	0	**20**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	15.01.1956	10	8,5	0,1	0	**18**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	18.01.1956	10	8,6	0,1	0	**16**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	20.01.1956	10	8,7	0,3	0	**15**	Nein
2701	67	Kösen, Bad	05.11.1995	10,6	9,3	6,7	4	**14**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	22.01.1956	10	8,8	0,1	0	**14**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	23.01.1956	10	8,8	0,1	0	**14**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	27.01.1956	10	9	0,1	0	**11**	Nein
2932	75	Leipzig/Halle	17.12.1997	8,5	7,9	5,7	4	**8**	Nein
6314	141	Nossen	25.02.1964	11,1	10,5	9,3	9	**6**	Nein
1207	35	Elster,B.S.	25.01.1956	9,3	8,9	1,2	**0**	4	Nein
1358	37	Fichtelberg	05.12.1968	8,5	8,2	0,1	**6**	4	Nein
1358	37	Fichtelberg	18.11.1967	9	8,7	6,6	**6**	3	Nein
1358	37	Fichtelberg	02.11.2015	9,75	9,5	9,1	**6**	3	Nein
3166	82	Marienberg	29.09.1998	12	11,7	0,7	**1**	3	Nein

4.6.2 Ergebnisse der Lückenfüllung

Die Lückenfüllung aller Elemente erfolgte durch eine multiple Regression, die erfolgreich validiert wurde (Kapitel 3.5.2). Im Gegensatz zur Validierung wird die multiple Regression jetzt mit allen vorhandenen Werten durchgeführt. Um auch diesen Ansatz noch einmal exemplarisch zu überprüfen, wurden gemessene Schneehöhen von Dresden und Fichtelberg für die Periode 1961-1970 auf Fehlwert gesetzt und diese dann mit der beschriebenen Methodik wieder gefüllt. Die bei der Validierung der Methode ermittelte Güte für Dresden (R^2=0,95) und für Fichtelberg (R^2=0,68) werden durch diese Überprüfung bestätigt (R^2=0,94 und R^2=0,68).

Eine Übersicht über die Anzahl von Lückenfüllungen und die Mittelwerte der Klimaelemente für die Roh- und prozessierten Daten des DWD enthält Tabelle 28. Bei den prozessierten Daten handelt es sich zum einen um den für die hydrologische Modellierung zur Verfügung gestellten Datensatz RDS-WHH (unabhängig von der Größe des Vorhersageintervalls) und zum anderen um einen Datensatz mit „kleinem“ und mittlerem Vorhersageintervall (RDS*). Beispielsweise wurden 90 % der Lücken in den Niederschlagsreihen, aber nur 38 % in den Sonnenscheindauerreihen gefüllt. Vergleicht man die Mittelwerte der Klimaelemente der Rohdaten, mit RDS-WHH und

RDS* so sind nur marginale Unterschiede erkennbar. Ein höhenabhängiger Vergleich (Stationen bis 400 m Höhe und Stationen mit mehr als 400 m Höhe) verdeutlicht, dass sich die statistischen Eigenschaften im Gesamtgebiet durch die Prozessierung kaum geändert haben. Das ist ein Hinweis auf die Konsistenz der Daten.

Tabelle 28: Übersicht über die Anzahl von Lückenfüllungen und klimatologischen Mittelwerten der Periode 1961-2015 für die Rohdaten und prozessierten Daten des DWD – Bei Letzteren handelt es sich zum einen um den für die hydrologische Modellierung zur Verfügung gestellten Datensatz RDW-WHH (unabhängig von der Größe des Vorhersageintervalls) und zum anderen um einen Datensatz mit „kleinem“ und mittlerem Vorhersageintervall (RDS*).

Klima-element	Lücken in Rohdaten [Mill.]	Lücken im RDS-WHH [Mill.]	mittel Rohdaten	mittel RDS-WHH	mittel RDS*	mittel Rohdaten <=400m	mittel RDS-WHH <=400m	mittel Rohdaten >400m	mittel RDS-WHH >400m
TM [°C]	1,28	0,18	8,3	8,2	8,3	8,9	8,8	6,5	6,5
TN [°C]	0,9	0,16	4,3	4,1	4,3	4,8	4,7	2,8	2,7
TX [°C]	1,12	0,17	12,7	12,6	12,7	13,4	13,3	10,6	10,6
RR [mm]	2,99	0,30	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	2,3	2,3
FF10 [m/s]	4,97	1,44	3,8	3,7	3,7	3,3	3,3	4,8	4,6
RF [%]	0,93	0,17	78,5	78,6	78,5	77,2	77,3	81,5	81,7
SD [h]	1,53	0,95	4,4	4,4	4,4	4,5	4,4	4,2	4,2

4.6.3 Homogenitätsprüfungen

Die Ergebnisse der Homogenitätsprüfung sind für Stationen des deutschen, tschechischen und polnischen Wetterdienstes in Tabelle 29 zusammengefasst. Von den 830 analysierten Niederschlagszeitreihen sind etwas mehr als die Hälfte als homogen eingestuft worden. Bei 40 % der Reihen wurden signifikante Bruchpunkte in den Reihen gefunden, bei 7 % konnten die signifikanten Bruchpunkte durch Metadaten bestätigt werden, was die Homogenität sehr zweifelhaft erscheinen lässt. Ein großer Teil der nicht homogenen Zeitreihen (30 %) weist einen signifikanten Trend in mindestens einer Jahreszeit auf, der das Auffinden von Inhomogenitäten erschwert. Hier kann durch eine visuelle Kontrolle der Plots (siehe mitgelieferte Daten-CD) festgestellt werden, ob ein Trend zu den Bruchpunkten geführt hat. In den wenigsten Fällen liegt ein wirklicher Trend vor, der zu einer fehlerhaften Bruchpunktbestimmung geführt hat. Ein Beispiel ist in Abbildung 15 ersichtlich.

Es zeigt sich, dass nur wenige Bruchpunkte durch Metadaten begründet sind.

Auffällig ist die geringe Rate an homogenen Zeitreihen der relativen Luftfeuchte (24 %). Besonders gehäuft treten die Bruchpunkte Mitte der 90er und in der 2.Hälfte der 2000er Jahre auf, was sich mit einer Häufung von Instrumenten- und Ortswechseln deckt (Abbildungen dazu in der beigelegten Daten-CD).

Tabelle 29: Ergebnisse der Homogenitätsprüfung für die Stationen des deutschen, tschechischen und polnischen Wetterdienstes

Element	Gesamt-stations-anzahl	Anzahl analysierter Stationen	Anteil „homogener“ Stationen	Anteil „nicht homogener“ Stationen (ohne Metadatenbestätigung)	Anteil „nicht homogener“ Stationen (mit Metadatenbestätigung)	Anteil „nicht homogener“ mit Trend in einer Jahreszeit
RR	893	830	53%	40%	7%	30%
TM	139	101	60%	37%	3%	98%
TX	128	76	70%	30%	0%	96%
TN	127	76	54%	39%	7%	66%
PP	41	26	69%	27%	4%	50%
RF	137	97	24%	61%	15%	70%
SD	90	61	85%	15%	0%	100%
FF10	47	37	65%	32%	3%	77%

Abbildung 55 (links oben) zeigt eine zeitliche Analyse der Instrumentenwechsel (entsprechend der oben definierten Kriterien) für das Element Niederschlag. Wie bei allen anderen Klimaelementen fanden die meisten Wechsel zwischen 2005 und 2010 statt, was vermutlich durch die Umstellung auf automatische Wetterstationen (AMDA) begründet ist. Bei den anderen Elementen ist oft ein sekundäres Maximum Mitte der 90er Jahre zu erkennen. Die Analyse der Ortswechsel der Niederschlagsstationen (Abbildung 55 rechts oben) zeigt drei Peaks: Ende der 60er, Mitte der 90er und Mitte der 2000er Jahre (ähnlich bei anderen Elementen). Das Maximum an Instrumentenwechseln spiegelt sich nicht in der Zeitreihe der als signifikant klassifizierten Bruchpunkte der Niederschlagsreihen wieder (Abbildung 55, unten links). In der Regel sind sie nicht für Inhomogenitäten verantwortlich. Jedoch können die gehäuften Ortswechsel Mitte der 90er Jahre die Ursache für den Bruchpunktpeak sein.

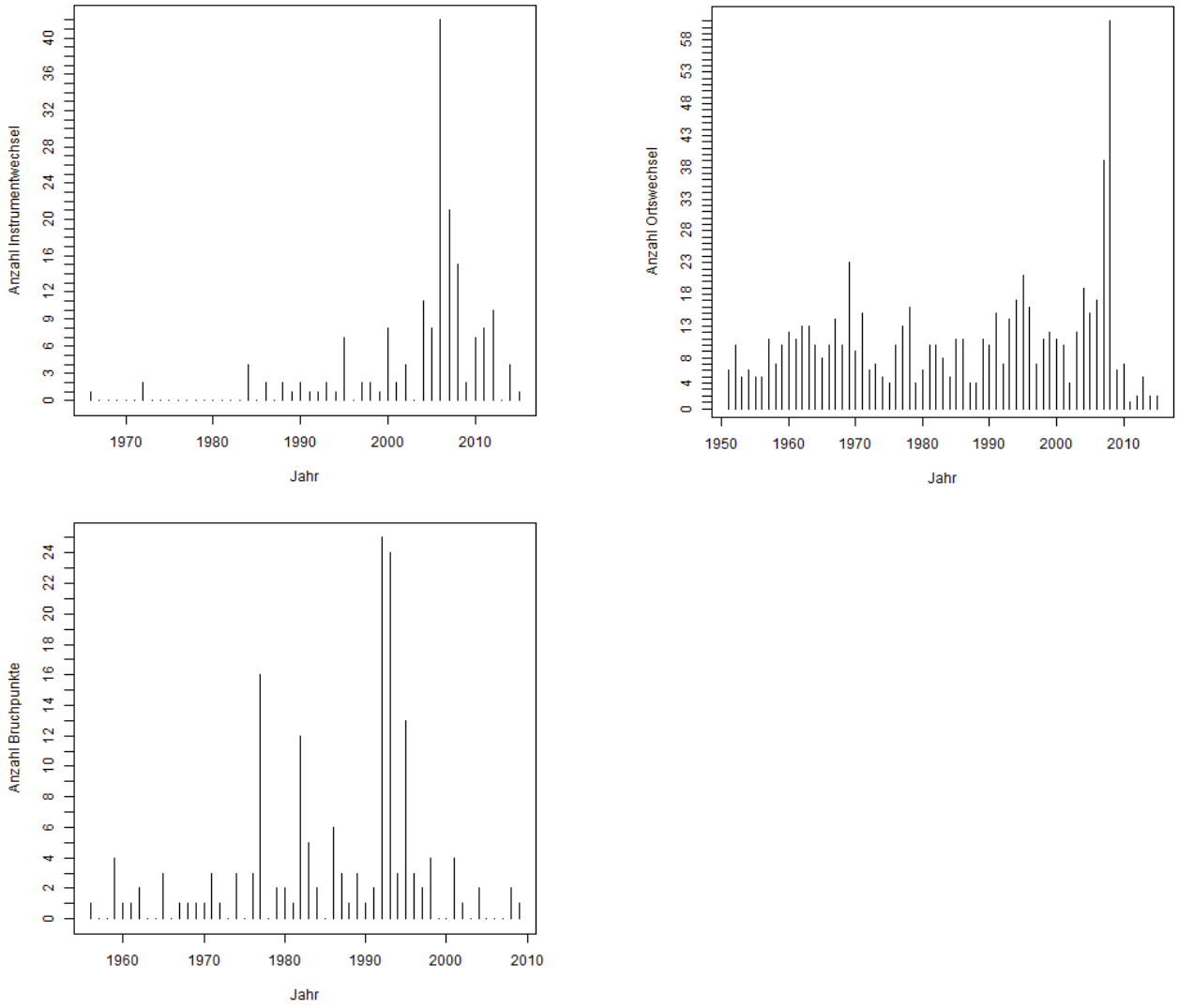


Abbildung 55: Anzahl der Instrumentenwechsel bei den Niederschlagsstationen (links oben), Anzahl der Ortswechsel (rechts oben) und Anzahl der signifikanten Bruchpunkte für den Niederschlag (links unten), basierend auf Jahresdaten

Ob es zu einer räumlichen Häufung von signifikanten Bruchpunkten kommt, ist beispielhaft für den Niederschlag der Abbildung 56 und für die weiteren Elemente der mitgelieferten Daten-CD zu entnehmen. Die Bruchpunktanalyse der Jahresniederschlagswerte zeigt keine eindeutige räumliche Häufung, dagegen wurden vermehrt Bruchpunkte im Südwesten des Untersuchungsgebietes für die Herbstwerte identifiziert. Bei der Sonnenscheindauer fällt eine Häufung in Tschechien auf. Bei der relativen Feuchte und der Temperatur sind weniger Bruchpunkte in Sachsen-Anhalt und Brandenburg erkenntlich.

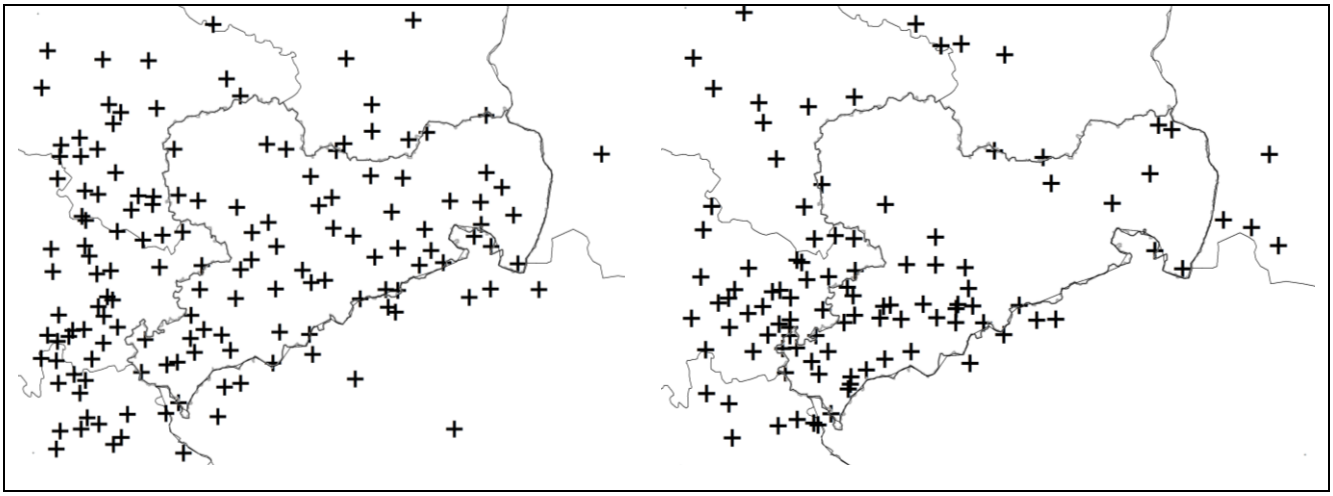


Abbildung 56: Identifizierte signifikante Bruchpunkte in den Niederschlagsreihen, links für die Jahres- und rechts für die Herbstwerte

Prüfung des Agrarmeteorologischen Messnetzes

Bei den 12 untersuchten Stationen weisen beim Niederschlag die Stationen Köllitzsch und Salbitz homogene Reihen auf. In Grumbach treten beim Übergang von Lückenfüllung zu Messwert Homogenitätsprobleme im Winter auf, in den anderen Jahreszeiten nicht. Bei den übrigen Stationen treten zahlreiche Inhomogenitäten auf, die mit den Lückenfüllungen verbunden sind. Aber auch innerhalb der Messreihen treten Bruchpunkte auf, die wahrscheinlich auf Instrumentenwechsel zurückzuführen sind.

Bei der Mittel- und Maximumtemperatur ist von einer weitestgehenden Homogenität auszugehen, obwohl die Prüfgrößen des Alexanderson-Tests oft leicht überschritten werden (Abbildung 57). Im Winter ist die Doppelsummenkurve wesentlich ‚bewegter' als in den übrigen Jahreszeiten. Hier wirken sich Unterschiede in der Messanordnung (Heizung, Windschutzring etc.) besonders stark aus. Aber auch hier sind keine gravierenden Wechsel im Anstieg der Kurve zu erkennen.

Auch bei der Minimumtemperatur sind die erzeugten Datensätze weitestgehend homogen. Lediglich in Baruth gibt es während der Zeit der Lückenfüllung eine Inhomogenität. Das ist auf eine wechselnde Konstellation an umgebenden Stationen zurückzuführen, die bei der Lückenfüllung verwendet wurden.

Da sowohl die Methodik auch als die Prüfgröße (es wurde der lückengefüllte Wert verwendet, da die Reihenlänge sonst oft zu kurz ist.) sehr verschieden von der Methodik für die nationalen Messnetze sind, wurden keine Homogenitätsflags für die AMN Stationen gesetzt. Im Verzeichnis "4.6.3 Homog.pruefungen" der mitgelieferten Daten-CD können die Ergebnisse entnommen werden.

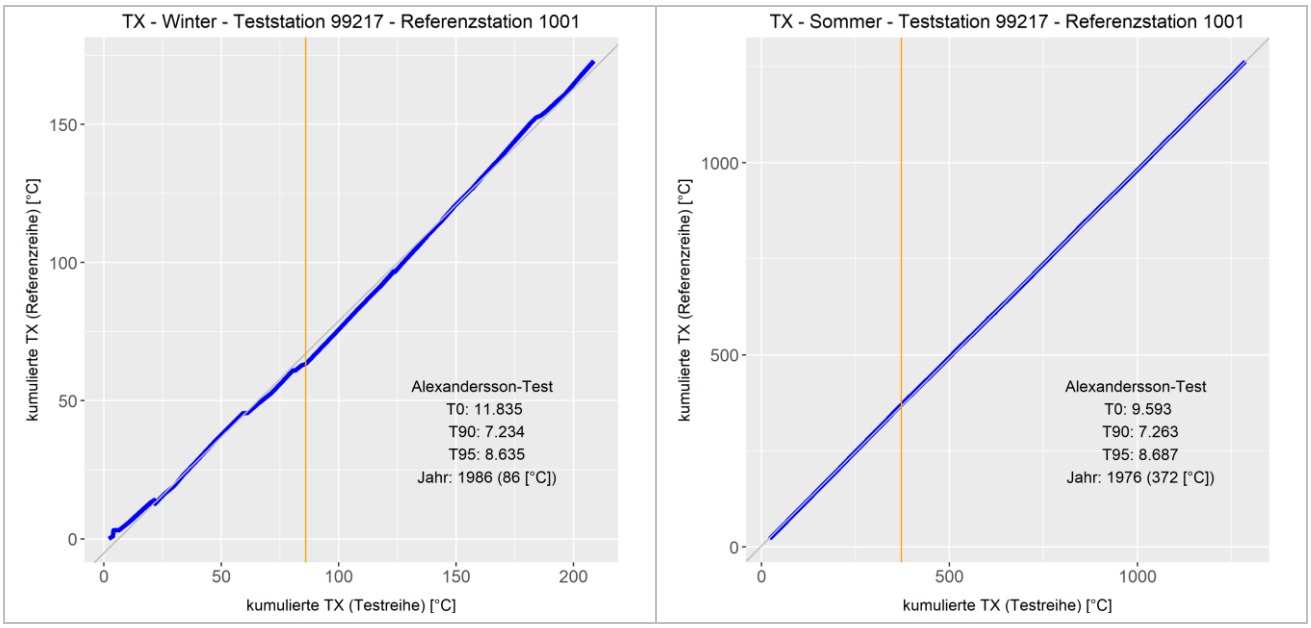


Abbildung 57: Doppelsummenanalyse und Alexanderson-Test der Maximumtemperatur für die Testreihe Pillnitz (99217) und die homogene Referenzreihe Doberlug-Kirchhain (1001); links: Winter und rechts Sommer

4.6.4 Resultierende Datensätze

Ziel des Projektes ist es, einen plausibilitäts-, konsistenz-, homogenitätsgeprüften sowie (soweit fachlich vertretbar) Lücken gefüllten Datensatz zu generieren. Das bedeutet, dass alle Klimazeitreihen, die über mindestens vier Jahre Beobachtungen verfügen, auf die komplette Zeitreihe von 1951 bis 2015 aufgefüllt werden. Nicht für jede Anwendung ist die Verwendung von überwiegend aufgefüllten Datenreihen zu empfehlen. So sollten klimatische Trendanalysen mit langjährigen, qualitätsgeprüften Beobachtungsreihen durchgeführt werden, um nicht einen regional vorliegenden Trend im Rahmen der Lückenfüllung auf die interessierende Station „aufzubügeln“.

Es werden daher zwei Referenzdatensätze erstellt: der „RDS mit hoher räumlicher Informationsdichte“ (z. B. für Wasserhaushaltsanalysen und der „RDS mit hoher punktförmiger Informationsdichte“ (z. B. für Klimaänderungsanalysen. Des Weiteren wird ein „Expertenzugang“ ermöglicht, der vielfältige Abfragen an die Datenbank zulässt.

Letztendlich werden einige Aspekte des speziell angefertigten Datensatzes für agrarmeteorologische Stationen beleuchtet.

RDS-hohe flächenhafte Informationsdichte

Dieser Datensatz steht für eine hohe flächenhafte Informationsdichte. Für Wasserhaushaltsuntersuchungen sind i. d. R. tägliche Klimadaten nötig, die möglichst vollständig und mit einer hohen Dichte vorliegen. Wasserhaushaltsmodelle arbeiten entweder mit Stationsdaten, wobei dem zu modellierenden Gebiet meist über sehr einfache Ansätze die klimatischen Bedingungen der nächstgelegenen Stationen zugewiesen werden. Alternativ nutzen einige Modelle einen gerasterten Klimainput. Dieser muss durch Regionalisierung auf der Grundlage von Stationsdaten erstellt werden.

Für beide Varianten wird es als günstig erachtet, Lücken mit guten Lückenfüllungsalgorithmen zu füllen und die Stationsdichte zu dieser Zeit zu erhöhen. Damit ist eine fundierte Zuweisung bzw. Interpolation in der Nähe der Bergstationen möglich. Die Alternative, die fehlende Klimainformation nur durch Interpolation zu füllen, wird als

weniger geeignet betrachtet, da die Interpolationsmethoden häufig unzureichend sind. Ein gutes Beispiel in der Vergangenheit war die Zeitreihe der Bergstation Zinnwald-Georgenfeld im Osterzgebirge, die erst 1971 mit den Messungen begann. Die klimatischen Gradienten, insbesondere vom Niederschlag, konnten vor 1971 nur äußerst unzureichend über die Interpolation abgebildet werden.

Die Homogenität von Klimazeitreihen wird als zweitrangig betrachtet, da keine signifikanten Auswirkungen auf die Modellierung erwartet werden.

Folgende Festlegungen wurden für den Datensatz getroffen:

- Datenvollständigkeit: Mindestens 4 Jahre mit plausiblen Messwerten müssen vorhanden sein.
- Keine Anforderungen an die Lückenfüllung: In den Bergregionen weisen die aufgefüllten Werte häufiger „hohe Vorhersageintervalle“ auf, was typisch ist für die exponierten Lagen. Gerade in den Bergregionen ist die Erhöhung der Datendichte besonders wichtig.
- Keine Anforderungen an die Homogenität.

RDS- hohe punktförmige Informationsdichte

Für Klimaanalysen werden i. d. R. qualitativ sehr hochwertige Beobachtungsreihen benötigt. Sie sollten lang, plausibel, konsistent, homogen und möglichst vollständig sein. Um nicht die statistischen Eigenschaften einer Region auf eine Station aufzuprägen, was durch die hier angewendete Lückenfüllung passieren kann, sollte der Anteil an Lückenfüllungen nur sehr gering sein. Eine flächenhaft hohe Informationsdichte ist bei Klimaanalysen zweitrangig.

Folgende Festlegungen wurden für den Datensatz getroffen:

- Länge des Datensatzes: mindestens 30 Jahre
- Datenvollständigkeit: Mindestens 95 % der Daten müssen plausible Beobachtungsdaten sein
- Keine Anforderungen an die Lückenfüllung: In den Bergregionen weisen die aufgefüllten Werte häufiger „hohe Vorhersageintervalle“ auf, was typisch für die exponierten Lagen ist. Würde man nur Lückenfüllungen zulassen, die eine „geringes“ oder „mittleres Vorhersageintervall“ aufweisen, würden zahlreiche Gebirgsstationen wegfallen.
- Anforderungen an Homogenität: homogen

RDS-Expertenzugang

Mittels dieses Zugangs soll eine große Vielfalt von Abfragen an die Datenbank ermöglicht werden (vgl. hierzu Kapitel 4.8). Nachfolgend einige Beispiele:

- Rohdaten, nicht qualitätsgeprüft
- Qualitätsgeprüfte Rohdaten, nicht Lücken gefüllt
- Qualitätsgeprüfte und Lücken gefüllte Daten, optional Vorgabe des Vorhersageintervalls
- Ausreißer
- Für Extremwertanalysen: lange, plausibilitätsgeprüfte, relativ vollständige Reihen; z. B. Niederschlag, 50 Jahre, 95 % plausibel

Datensatz für agrarmeteorologische Standorte

Für die zwölf in Tabelle 30 benannten Stationen wurde auf Wunsch des LFULG eine Plausibilitätsprüfung, Lückenfüllung und Homogenitätsprüfung durchgeführt.

Der Geschütztheitsgrad der Stationen, der für die Berechnung des korrigierten Niederschlags benötigt wird, wurde vom LFULG (Fachaufsicht Messnetz) mit „eins“ festgelegt.

Die Daten wurden auf Plausibilität geprüft sowie problematische Werte mit Flags gekennzeichnet und als Fehlwert markiert. Fehlende und unplausible Daten wurden lückengefüllt (Tabelle 30). Nicht für alle Stationen war eine Lückenfüllung mit der in Kapitel 3.5.2 angegebenen Methodik möglich.

Tabelle 30: Agrarmeteorologische Stationen, an denen Klimawandelversuche durchgeführt werden – im rechten Teil der Tabelle ist der Anteil an erfolgten Lückenfüllungen (%) aufgeführt

Stat ID	Name	Höhe (m)	Länge (DD)	Breite (DD)	Messbeginn	TX	TN	TM	RR
99205	Grumbach	285	13.5472	51.0378	2001	100	100	100	100
99210	Baruth	155	14.6044	51.2411	2008	100	100	100	100
99217	Pillnitz V.	160	13.8856	51.0033	2004	100	100	100	100
99218	Pommritz	235	14.5628	51.1606	1995	100	100	100	100
99222	Wurzen	125	12.7564	51.3725	2004	100	100	54	54
99225	Köllitsch	85	13.1217	51.5028	1995	100	100	0	0
99226	Salbitz	135	13.1711	51.2356	1995	100	100	10	10
99227	Spröda	95	12.4336	51.5475	1995	8	8	41	41
99230	Christgrün	430	12.2133	50.5783	1995	0	0	100	100
99231	Forchheim	563	13.2733	50.7097	1995	100	100	100	100
99232	Methau	250	12.8517	51.0828	1995	100	100	75	75
99233	Nossen	254	13.2744	51.0561	1999	100	100	100	100

Die potentielle Verdunstung wurde nach dem Ansatz von WENDLING (DVWK 2002) berechnet. Es werden die Globalstrahlung, die Mitteltemperatur und die Stationshöhe als Eingangsgrößen benötigt. Da kaum Globalstrahlungsdaten im Gebiet vorliegen, wurden sie nach dem Ansatz von ÅNGSTRÖM (1934) aus der Sonnenscheindauer ermittelt. Hierbei wurde die in BERNHOFER et al. (2008) verwendete Parametrisierung inklusive des Korrekturterms zur Berücksichtigung der Luftdichte und Trübung umgesetzt. Exemplarisch zeigen die Mittelwerte von zwei Agrarstandorten und der DWD-Station-Dresden-Klotzsche (Tabelle 31) die Plausibilität der Berechnungen und die Vergleichbarkeit zur Studie von BERNHOFER et al. (2008).

Tabelle 31: Mittelwerte der potentiellen Verdunstung (mm) für zwei Agrarstandorte und die DWD-Station-Dresden-Klotzsche

	Pillnitz-V. (160 m)	Forchheim (653 m)	Dresden-Kl. (227 m)
1961-90	646	548	641
1991-05	687	558	673

Die Niederschlagskorrektur ist aufgrund der angenommenen Stationslage von „eins“ (frei) an den AMN Stationen recht hoch (ca. 20 %).

4.7 Validierung des Referenzdatensatzes

4.7.1 Meteorologische Validierung

Die bivariate Konsistenz der Elemente Temperatur und Niederschlag hat sich während der Datenprozessierung kaum geändert (Abbildung 58). Lediglich in der Niederschlagsklasse <1 mm sind in der prozessierten Reihe einige sehr niedrige Temperaturen dazugekommen. Auch die Konsistenz zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit hat sich lediglich in den unteren beiden Temperaturklassen leicht verändert (Abbildung 59). Auch hier werden die dazugekommenen niedrigen Temperaturwerte, die i. d. R. mit hohen Luftfeuchten korrespondieren, zu den Änderungen geführt haben. Auf der mitgelieferten Daten-CD sind Abbildungen zur Konsistenzprüfung zwischen Niederschlag und relativer Luftfeuchtigkeit und zwischen Niederschlag und Sonnenscheindauer zu finden. Auch hier sind nur marginale Konsistenzveränderungen festzustellen.

Die multivariate Konsistenz aller sieben Klimaelemente (RR, TM, TN, TX, FF10, RF, SD) hat sich ebenfalls nicht verschlechtert (Abbildung 60). Für jede Distanzklasse 0 bis 50 km, 50 bis 100 km etc. werden die minimal berechnete, die mittlere und die maximale NRMSD dargestellt. Der prozessierte Datensatz weist sehr ähnliche, minimale und leicht schwankende, maximale NRMSD-Werte auf. Die Mittelwerte bis zu einer Entfernung von 250 km haben sich sogar verringert. Die stationsübergreifende Ähnlichkeit der Klimaelemente hat damit zugenommen. Erklärbar wird das mit dem angewandten Algorithmus zur Lückenfüllung (multiple Regression zu benachbarten Stationen), der den zu füllenden Einzelwert aus den aktuell vorliegenden Bedingungen in unmittelbarer Umgebung ableitet.

Damit kann der erstellte Datensatz als elementübergreifend konsistent erachtet werden.

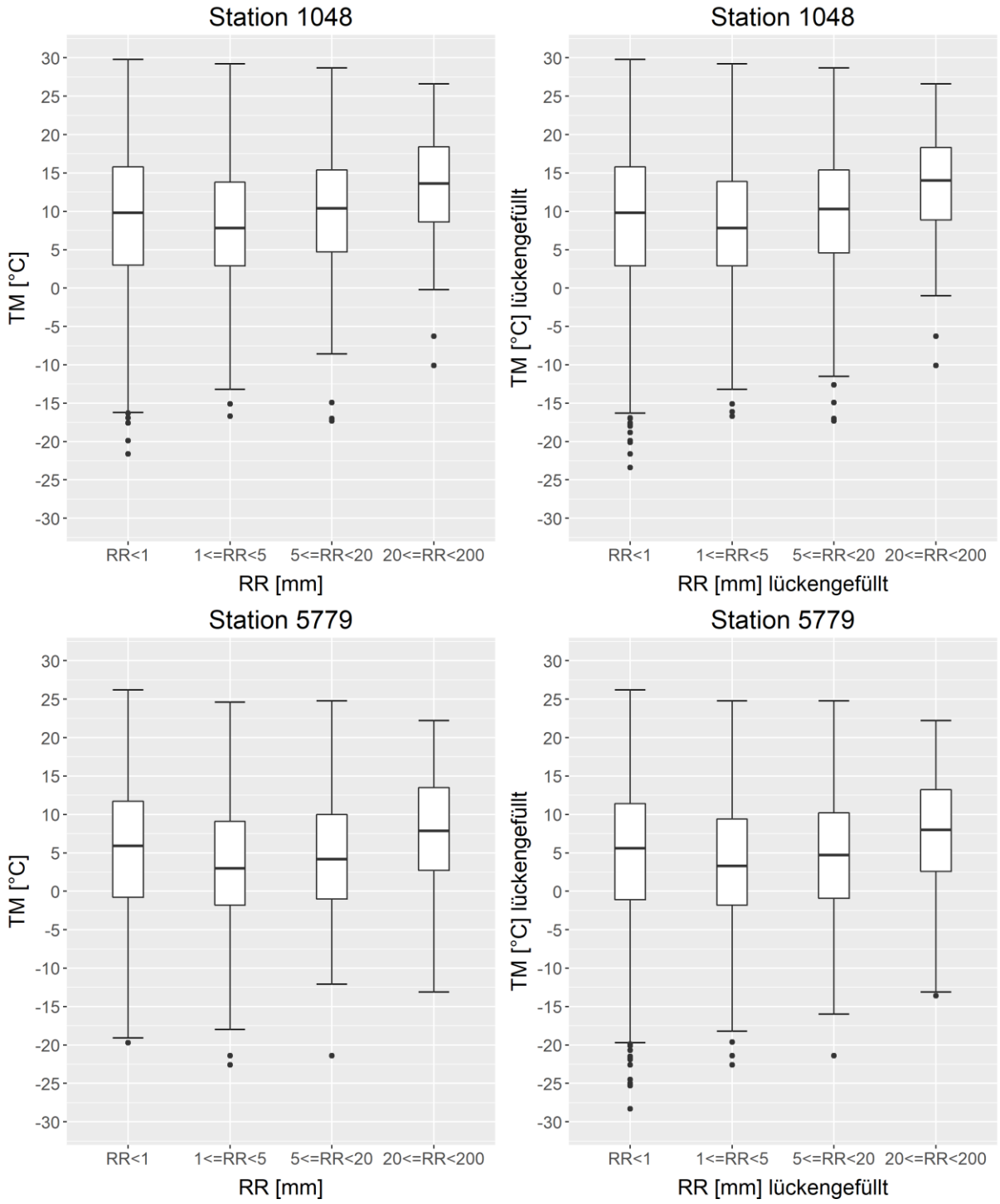


Abbildung 58: Bivariate Konsistenz (Mitteltemperatur und Niederschlag) der Stationen Dresden (oben) und Zinnwald (unten) für die Originalreihe (links) sowie die korrigierte und Lücken gefüllte Reihe (rechts)

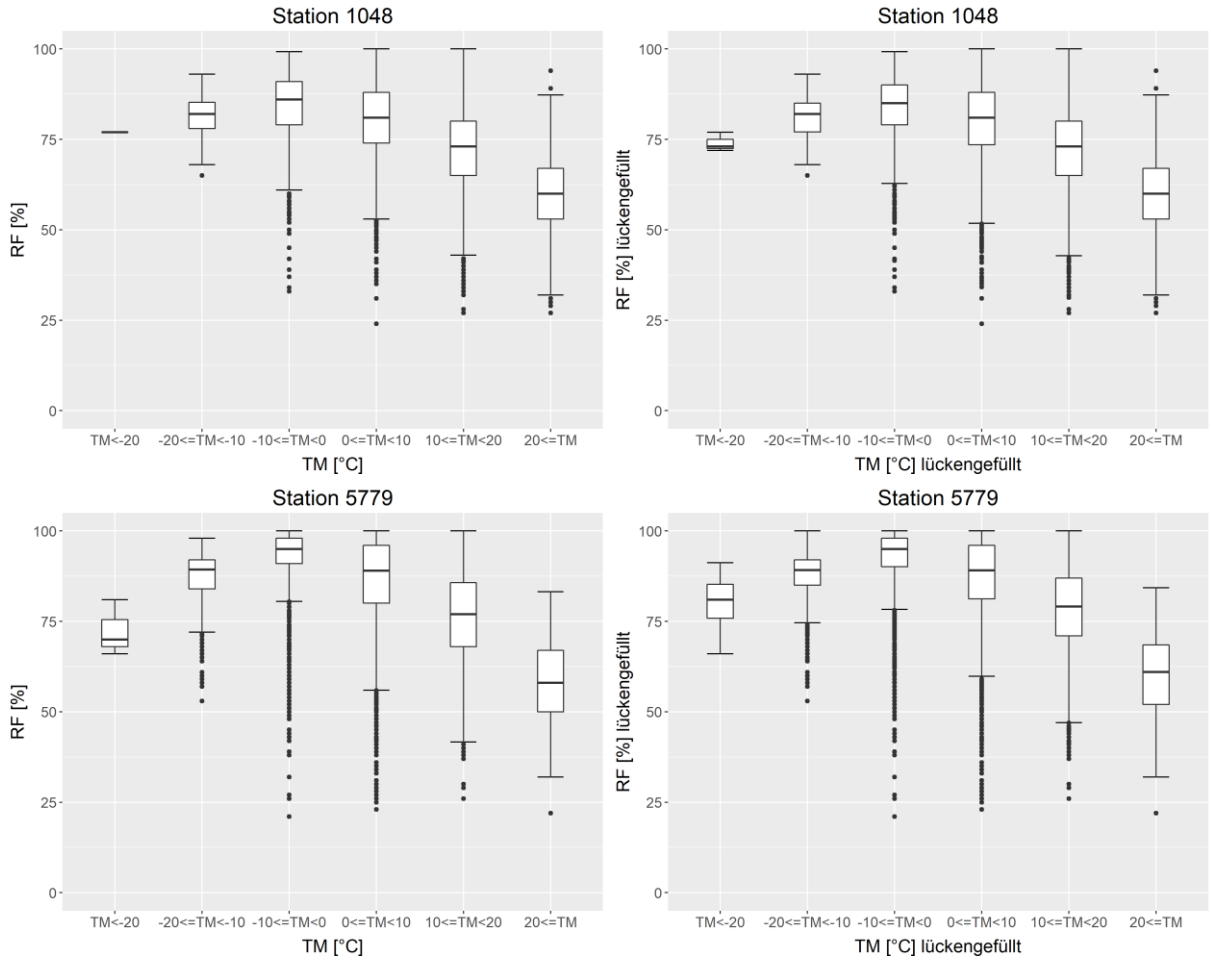


Abbildung 59: Bivariate Konsistenz (Mitteltemperatur und relative Luftfeuchte) der Stationen Dresden (oben) und Zinnwald (unten) für die Originalreihe (links) sowie die korrigierte und Lücken gefüllte Reihe (rechts)

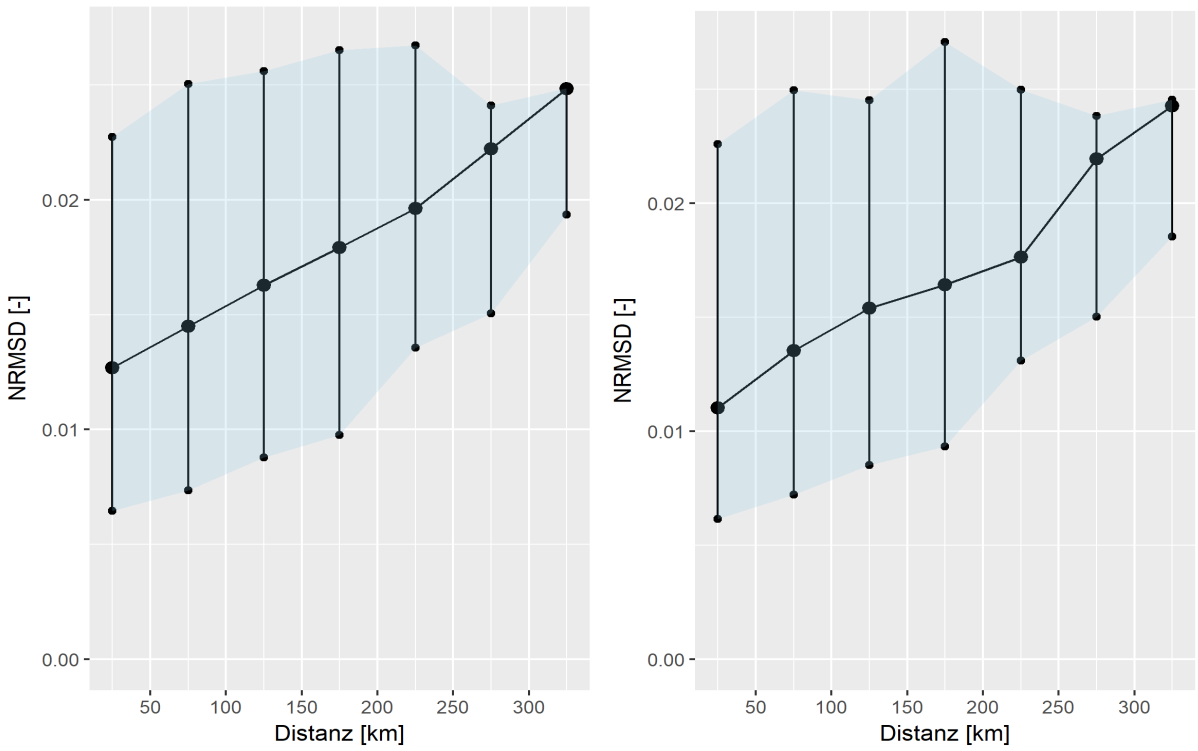


Abbildung 60: Abhängigkeit des NRMSD von der Distanz der Stationen untereinander als Maß für die multivariate Konsistenz der DWD Stationen; Originalreihen links sowie korrigierte und Lücken gefüllte Reihen rechts

Eine auf einzelne Elemente abzielende Validierung wird für den Niederschlag, die Mitteltemperatur und die Windgeschwindigkeit in 10 m für jeweils zwei Stationen im Flachland und im Bergland durchgeführt. Für das Bergland werden die Stationen Fichtelberg (Stat-ID: 1358, Messungen 1955-2015) mit Carlsfeld (Stat-ID: 840, Messungen 1995-2015) und für das Flachland die Stationen Görlitz (Stat-ID: 1684, Messungen: 1951-2015, FF ab 1963) mit Leipzig/Halle (Stat-ID: 2932, Messungen 1972-2015) verglichen. In Abbildung 61 stehen in jeder Grafik die roten Boxplots für eine gemeinsame beobachtete Periode. Sie zeigen die gegebenenfalls vorliegenden klimatischen Unterschiede zwischen den zwei Stationen. So ist Görlitz im Mittel etwas kühler als Leipzig/Halle (8,6 °C vs. 9,2 °C) in der Periode 1973-2000. Die blauen Boxplots zeigen für die komplett beobachteten Reihen (Görlitz und Fichtelberg) den beobachteten Wert für eine andere Periode an, z. B. betrug die mittlere Temperatur in Görlitz in der Periode 1963-1972 nur 8,0 °C. Nun lässt sich für die blaue Box der Station, die lückengefüllt wurde, ablesen, ob die Füllungen plausibel sind. Im Beispiel ist auch Leipzig/Halle im Mittel 0,6 °C kühler in der Periode 1963-1972. Auch die Form der Boxplots hat sich nicht gravierend geändert. Daher kann für dieses Flachlandbeispiel geschlussfolgert werden, dass die Lückenfüllung sehr plausible Werte geliefert hat. Auch im Bergland ist eine Abkühlung in der Periode 1961-1995 (blaue Boxen) zu erkennen. Für den Fichtelberg betrug sie 0,8 °C und für Carlsfeld 0,2 °C. Man erkennt, dass die Lückenfüllungen nicht ganz so sicher wie im Flachland funktioniert haben.

Der Vergleich für den Niederschlag (logarithmische Darstellung, Abbildung 61) zeigt, dass im Flachland die Lückenfüllung sicher funktioniert hat. Die etwas kleinere blaue Box für Leipzig/Halle (2932) deutet auf eine Reduzierung der Niederschlagsvariabilität bei der Lückenfüllung hin. Die Häufigkeit von sehr kleinen Niederschlägen hat zugenommen. Im Bergland ist ein sehr ähnliches Verhalten festzustellen.

Die Windgeschwindigkeit (Abbildung 61) nahm von Periode 1 (rote Boxen) zu Periode 2 (blauen Boxen) im Flachland zu, für Görlitz (1684) um 0,6 m/s und für Leipzig/Halle um 2,5 m/s. Diese Unterschiede verdeutlichen die Un-

sicherheit der Lückenfüllung der Windreihe in Leipzig/Halle. Im Bergland hat die Lückenfüllung dagegen perfekt geklappt.

Es kann zusammengefasst werden, dass diese Art der Validierung die prinzipielle Eignung des RDS bestätigt. Jedoch treten auch Element spezifische Probleme der Lückenfüllung zutage: leichte Abstriche bei der Temperatur im Bergland, etwas verringerte Varianz des Niederschlags und lokale Fehler bei der Windgeschwindigkeit. Gerade bei solch stark räumlich und zeitlich variablen Größen wie dem Niederschlag und der Windgeschwindigkeit war damit von vornherein zu rechnen.

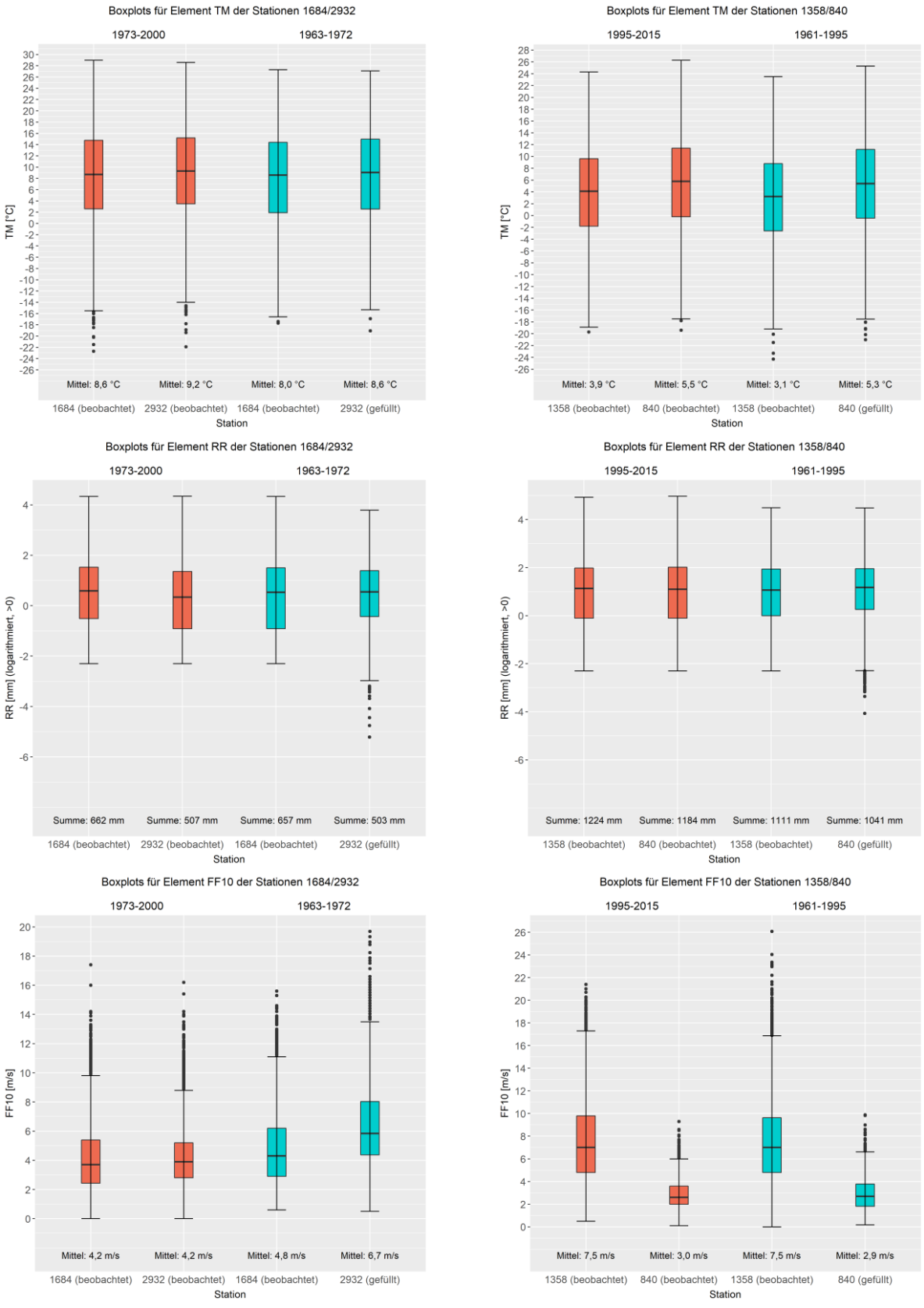


Abbildung 61: Vergleich einer beobachteten Periode (rote Boxplots) mit einer für eine Station lückengefüllten Periode für die Temperatur (oben), den Niederschlag (Mitte, beachte: logarithmiert) und die Windgeschwindigkeit in 10 m (unten). Stationen: Görlitz: 1684, Leipzig/Halle: 2932, Fichtelberg: 1358, Carlsfeld: 840.

4.7.2 Hydrologische Validierung

Vergleich unterschiedlich korrigierter Niederschlagsdaten

Für den Referenzdatensatz wurde eine tägliche Niederschlagskorrektur nach RICHTER (1995) eingesetzt. Diese basiert auf Angaben zum Geschütztheitsgrad der jeweiligen Station und zu Einzelkomponenten des Niederschlagsverlustes am und im Niederschlagsmessgerät je nach Niederschlagsart. Die bisher im Rahmen von KliWES verwendeten Niederschläge wurden ebenfalls korrigiert, allerdings nach dem simpleren Verfahren mittlerer monatlicher Korrekturfaktoren nach RICHTER. Die monatlichen Korrekturfaktoren beziehen ebenfalls den Geschütztheitsgrad ein. Der Einfluss des Korrekturverfahrens wurde quantifiziert, um eventuelle Auswirkungen auf die Validierung des RDS abschätzen zu können. Abbildung 62 zeigt einen Vergleich der täglichen, korrigierten Niederschlagswerte für sechs Stationen entlang eines Nord-Süd-Transekts mit einer Höhenentwicklung von 138 m NN in Dahlen-Großböhla bis 1213 m NN am Fichtelberg (Details in Tabelle 32). Es stehen sich auf Ordinatenachse und Abszissenachse die Niederschläge mit monatlichen Korrekturverfahren ($RK_{korr\ KliWES}$) und täglichen Korrekturen ($R_{Kkorr\ RDS}$) gegenüber. Beide Datenreihen basieren auf denselben unkorrigierten Niederschlagsreihen des Referenzdatensatzes von 1961 bis 2010. In den Grafiken der Abbildung 62 wird die Regressionsgerade in Rot dargestellt, welche durch den Koordinatenursprung verläuft. Daher ist der mittlere Anstieg der Regressionsgeraden der einzige freie Parameter und wird im Diagramm angegeben.

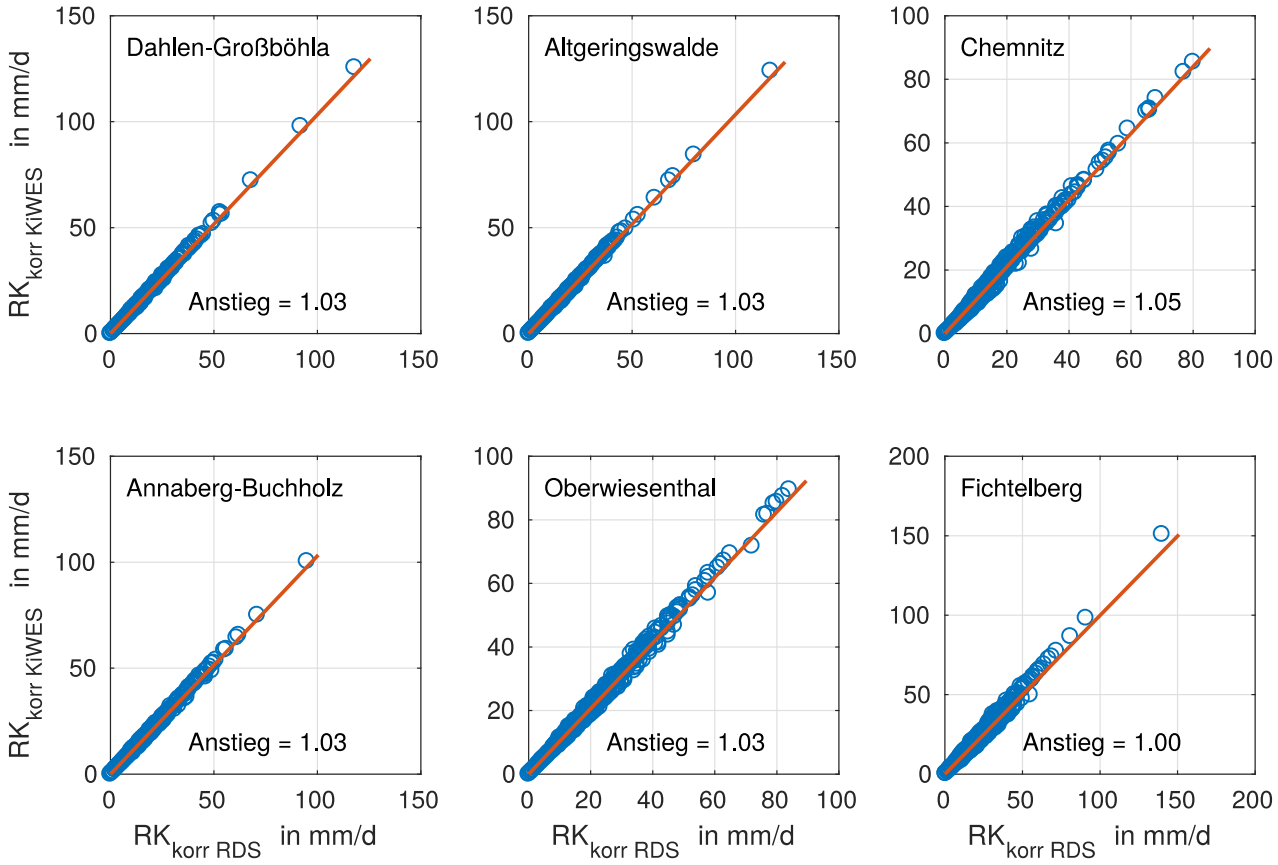


Abbildung 62: Vergleich der täglichen, korrigierten Niederschläge aus dem Referenzdatensatz und der mit mittleren monatlichen Korrekturfaktoren korrigierten Niederschläge (äquivalent zu KliWES).

Die Anstiege sind größer bzw. gleich 1 und resultieren aus den im Mittel kleineren, korrigierten Niederschlägen des Referenzdatensatzes im Vergleich zu den monatlich korrigierten Niederschlägen. Die relativen Unterschiede $RK_{korr\ KliWES}/RK_{korr\ RDS}$ sind in Tabelle 32 aufgeführt. Die relativen Unterschiede betragen zumeist weniger als 1 %. Eine Ausnahme stellt die Datenreihe am Fichtelberg dar. Durch die besondere Lage auf dem Erzgebirgskamm gibt es auf dem Fichtelberg wesentlich mehr Tage mit Schneeniederschlag als bei den anderen Stationen. Da der Nie-

derschlag bei Messungen mit Schnee stärker unterschätzt wird als mit flüssigem Niederschlag, gibt es eine Unterschätzung der Niederschlagsmenge am Fichtelberg um 4 %. Mit Ausnahme derart exponierter Regionen kann davon ausgegangen werden, dass der Unterschied zwischen den Korrekturverfahren tendenziell gering ausfällt.

Tabelle 32: Angaben zu Stationen zum Vergleich der unterschiedlichen Korrekturverfahren

Name	Höhe	Rechts-wert	Hochwert	Geschützt-heitsgrad	$RK_{korr\ KliWES}/RK_{korr\ RDS}$
Dahlen-Großböhla	138	4571919	5689721	4	1.00
Altgeringswalde	296	4565348	5661708	4	1.01
Chemnitz	418	4561479	5628654	2	1.01
Annaberg-Buchholz	630	4571206	5604492	4	1.00
Kurort Oberwiesenthal	850	4570098	5587669	3	1.00
Fichtelberg	1213	4567744	5588350	2	0.96

Trotz der geringen Unterschiede durch unterschiedliche Korrekturverfahren kann es zu größeren Abweichungen der Niederschlagsmengen zwischen dem Referenzdatensatz und dem in KliWES genutzten Datensatz kommen. Gründe dafür sind u. a.:

- Bei Erstellung des KliWES-Datensatzes lag keine Information über den Geschütztheitsgrad der einzelnen Stationen vor. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Geschütztheitsgraden können einige Prozent Unterschied verursachen.
- Die Temperaturdaten und die Annahme einer Temperatur, ab welcher Schnee fällt, beeinflussen die Korrektur auf Tagesbasis erheblich.
- Die Stationskoordinaten im KliWES-Datensatz wurden vom DWD übernommen. Diese sind in Dezimalgrad mit zwei Nachkommastellen angegeben. Dadurch kann die Station nur auf eine Fläche von ungefähr 1 km² genau verortet werden. Das ist für die Berechnung von Gebietsniederschlägen relevant.
- Unterschiedliche Methoden der Lückenfüllung bei Fehlwerten verändern die Datenreihe.

Die in der Aufzählung genannten Effekte haben zur Folge, dass der tatsächlich genutzte KliWES Datensatz höhere Abweichungen zeigt, als allein durch die Wahl des einfacheren Korrekturverfahrens begründet werden kann. Im tatsächlichen KliWES-Datensatzes kommt es zu Abweichungen des korrigierten Niederschlags an den sechs untersuchten Stationen von +3,6 %, +13,7 %, +5,5 %, +3,0 %, +4,0 % und +2,9 % (Reihenfolge äquivalent zu Tabelle 32).

Hydrologische Validierung des Referenzdatensatzes

Die nachfolgende Auswertung erfolgt jeweils exemplarisch für ein Pegeleinzugsgebiet, welches besondere Auffälligkeiten zeigt. Als meteorologischer Input für das ArcEGMO-Modell stehen einerseits der überarbeitete KliWES-Datensatz und andererseits der Referenzdatensatz zur Verfügung. Alle Ergebnisse bezogen auf den überarbeiteten KliWES-Datensatz erhalten die Kennzeichnung KNK (KliWES Neukalibrierung). Die Ergebnisse des Referenzdatensatzes sind mit der Abkürzung RDS bezeichnet.

Zur Einordnung der nachfolgenden Ergebnisse soll an dieser Stelle kurz auf den unterschiedlichen Niederschlagsinput eingegangen werden. Die Tabelle 33 zeigt für die sieben ausgewählten Modelleinzugsgebiete den mittleren Jahresniederschlag (1967-2005) des KLI-Datensatzes sowie für die Varianten KNK und RDS. Zusätzlich ist die relative Abweichung des Niederschlags von KNK gegenüber dem KLI sowie von RDS gegenüber KNK dargestellt.

Tabelle 33: Vergleich der mittleren Jahresniederschläge (1967-2005) für die verschiedenen meteorologischen Eingangsdatensätze (KLI, KNK, RDS) in den ausgewählten Modelleinzugsgebieten

Modellgebiet	P (KLI) (mm/a)	Abweichung (%) P (KNK) zu P (KLI)	P (KNK) (mm/a)	Abweichung (%) P (RDS) zu P (KNK)	P (RDS) (mm/a)
Johanngeorgenstadt 2	1153,7	22,1	1408,1	-2,4	1374,5
Markersbach 1	1163,4	28,2	1491,4	-3,0	1446,9
Aue 1	1117,1	12,1	1251,9	-5,2	1187,3
Dohna	936,1	4,1	974,3	-4,4	931,2
Merzdorf	681,2	0,1	682,1	-3,9	655,2
Oehlisch	801,8	0,3	804,5	-6,0	756,4
Jänkendorf	795,2	0,2	797,1	-4,2	763,3

Es zeigt sich, dass es zwischen dem KLI und KNK zu teilweise erheblichen Abweichungen von bis zu 28 % kommt, welche allein aus den unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung des Nebelniederschlags resultieren (s. Kapitel 3.9.2). Dabei liegen die mittleren Jahresniederschläge des KNK-Datensatzes in den Modelleinzugsgebieten in den Gebirgsregionen über den Werten des KliWES-Datensatzes. In den restlichen Gebieten spielt Nebelniederschlag eine untergeordnete Rolle, weswegen sich kaum Unterschiede ergeben. Demgegenüber liegen die Jahresniederschlagsmengen des RDS generell unterhalb der Werte von KNK, wobei die Abweichungen mit maximal 6 % aber deutlich geringer ausfallen.

Grundsätzlich sind alle in Tabelle 33 dargestellten Gebietsniederschläge aus Messdaten abgeleitet und interpoliert worden. Die Unterschiede in den Werten ergeben sich aus den verschiedenen Verfahren zur Korrektur der Messdaten, der Interpolation der Stationsdaten sowie der Nebelniederschlagswerte.

Da die gemessenen Abflussganglinien der Gebiete immer gleichbleiben und unter der Annahme, dass diese Werte korrekt sind, muss eine Erhöhung des Niederschlags entsprechend der langjährigen mittleren Wasserhaushaltsbilanz

$$\text{Niederschlag} = \text{Abfluss} + \text{Verdunstung}$$

zwangsläufig zu einer erhöhten Verdunstung führen. Daraus ist abzuleiten, dass Einzugsgebiete mit einer deutlich gesteigerten Niederschlagsmenge auch eine starke Anpassung des Verdunstungskorrekturparameters gegenüber den Ausgangswerten (KLI) erfahren. Dies betrifft laut Tabelle 33 vor allem die Modelleinzugsgebiete Markersbach 1 und Johanngeorgenstadt 2. Die Unterschiede zwischen KNK und RDS hinsichtlich der Verdunstungskorrektur werden für diese Gebiete dagegen deutlich geringer ausfallen.

Vergleich der Optimierungsparameter

Wie in Kapitel 3.9.2 erläutert, werden nachfolgend die Abweichungen der Optimierungsparameter B, C, D und E der Variante RDS von KNK untersucht. Zum Teil wird Bezug auf die Ausgangswerte, welche im Rahmen des KliWES-Projekts ermittelt wurden, genommen.

Eine inhaltliche Interpretation der Ergebnisse ist für den Verdunstungskorrekturfaktor und den damit verbundenen Optimierungsparameter E im Allgemeinen möglich. Die Standardwerte für die Korrekturfaktoren (kc-Faktoren) der Grasreferenzverdunstung sind für die unterschiedlichen Landnutzungstypen durch die ArcEGMO-Modellentwickler intensiv getestet worden und haben sich als realistisch bewährt. Im Allgemeinen liegen die Verdunstungskorrekturen in einem Wertebereich von 0,7 bis 1,5. Sie sind allerdings anhand von Niederschlagsdaten abgeleitet, welche

nicht „nebelkorrigiert“ wurden. Wie Tabelle 33 zeigt, spielt die Berücksichtigung des Nebelniederschlags eine erhebliche Rolle für die Niederschlagsmenge.

Um eine dementsprechend hohe Verdunstung in den Untersuchungsgebieten zu erreichen, müssen die Korrekturwerte der Grasreferenzverdunstung aus dem KliWES-Projekt mit Faktoren von 1,3 bis 2,0 multipliziert werden. Vor allem ein Faktor von 2,0 führt zu Verdunstungskorrekturwerten deutlich außerhalb des normalen Wertebereichs.

Es stellt sich daher die Frage, ob der Gebietsniederschlag möglicherweise zu hoch ist oder die Skala der Verdunstungskorrektur bei der Berücksichtigung abgesetzter/abgefangener Niederschläge einfach größer gefasst werden muss. Eine Validierung der Verdunstungswerte ist einerseits im Rahmen des Projekts nicht vorgesehen und andererseits auch nur mit entsprechenden Daten und Modellen möglich, was den Rahmen der hier vorgesehenen Untersuchungen sprengt.

Zwischen den beiden Varianten KNK und RDS gibt es eher geringe Abweichungen bezüglich der Verdunstungskorrektur (Tabelle 34). Da die mittleren Jahresniederschläge der beiden Varianten nicht so stark voneinander abweichen wie die Niederschlagswerte aus dem KliWES-Projekt (s. Tabelle 33), ergeben sich überwiegend nur kleinere Veränderungen für die Verdunstung. Die Gebiete mit einem stärkeren Niederschlagsrückgang zwischen RDS und KNK weisen auch die größeren prozentualen Abweichungen hinsichtlich des Optimierungsparameters E auf.

Tabelle 34: Prozentuale Abweichungen der vier Optimierungsparameter der Variante RDS von KNK für sieben ausgewählte Einzugsgebiete

Modellgebiet	E (Verdunstung)	B (Makroporosität)	C (GW-Aufteilung)	D (GW-Aufteilung)
Johanngeorgenstadt 2	-2,4	-3,8	-3,5	-0,3
Markersbach 1	-2,7	-3,0	-0,9	-0,6
Aue 1	-11,6	-4,0	-1,5	4,1
Dohna	-5,2	8,9	2,9	5,8
Merzdorf	-1,6	-1,5	1,5	-0,2
Oehlisch	-8,3	-4,2	43,8	16,4
Jänkendorf	-11,5	2,6	-9,2	-7,7

Die Makroporositätswerte bzw. der Optimierungsparameter B weisen für KNK und RDS recht ähnliche Werte auf, so dass die prozentualen Abweichungen eher gering ausfallen. Auch zu den Makroporositätswerten des KliWES-Projekts gibt es keine großen Unterschiede.

Die Absolutwerte der Makroporosität sind im Vergleich zur Verdunstungskorrektur weniger gut interpretierbar. Aufgrund der großen Heterogenität im Boden, welche im Modell nur bedingt abgebildet werden kann, sowie dem verwendeten Schätzverfahren zur Festlegung der Ausgangswerte, ergibt sich ein großer Unsicherheitsbereich für die Makroporositätswerte. Die große Spannweite für diese Werte lässt keine eindeutige Aussage zur „optimalen“ Makroporosität zu.

Die Optimierungsparameter C und D beeinflussen die Ganglinie der Grundwasserkomponenten von QG1 und QG2. Sie sind für jedes Gebiet individuell und hängen z. B. von Faktoren wie dem geologischen Untergrund und der Vorfeuchte im Gebiet ab. Sie sind nicht physikalisch interpretierbar, so dass eine Bewertung der Abweichungen nicht möglich ist. Die große prozentuale Abweichung der Parameter C und D (Tabelle 34) im Gebiet Oehlisch fällt zwar auf, führt aber in beiden Fällen zu plausiblen Ergebnissen.

Da es bei allen Parametern in jedem Modellgebiet Abweichungen gibt und sich die vier Modellparameter sensitiv verhalten, sind Veränderungen im Wasserhaushalt zu erwarten.

Vergleich der langjährigen Wasserhaushaltsbilanz

Neben den langjährigen mittleren Jahresniederschlägen (s. Tabelle 33) werden nachfolgend in Tabelle 35 die Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Grundwasserzufluss gegenübergestellt. Der Vergleich erfolgt für die drei Datensätze KLI, KNK und RDS und basiert auf dem Zeitraum 1967-2005.

Tabelle 35: Vergleich der simulierten langjährigen mittleren Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Grundwasserzufluss (mm/a) im Zeitraum 1967-2005 für die ausgewählten Untersuchungsgebiete

Modellgebiet	Verdunstung (mm/a)			Grundwasserzufluss (mm/a)		
	KLI	KNK	RDS	KLI	KNK	RDS
Johanngeorgenstadt 2	502,8	640,9	625,2	515,2	669,7	651,7
Markersbach 1	545,0	796,5	789,7	471,9	500,0	476,1
Aue 1	545,2	690,9	654,3	477,9	452,4	427,8
Dohna	529,2	557,6	549,2	270,4	338,2	317,4
Merzdorf	516,4	505,6	501,7	111,6	103,0	88,0
Oehlisch	606,4	601,1	570,4	152,6	159,1	155,2
Jänkendorf	598,2	622,7	579,3	128,0	135,5	147,1

Während in den Gebieten Johanngeorgenstadt 2, Markersbach 1, Aue 1 und Dohna die Verdunstung von KLI zu KNK erwartungsgemäß deutlich steigt, reduziert sie sich für alle Gebiete von KNK zu RDS. Die Veränderung der Grundwasserzuflüsse von KLI zu KNK ist recht unterschiedlich. Von KNK zu RDS findet in den Gebieten mit Ausnahme von Jänkendorf eine Reduzierung der Grundwasserzuflüsse statt.

Die einzelnen Abflussbildungsbilanzen mit den verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen sind dem Anhang zu entnehmen (Anhang 8 bis Anhang 14).

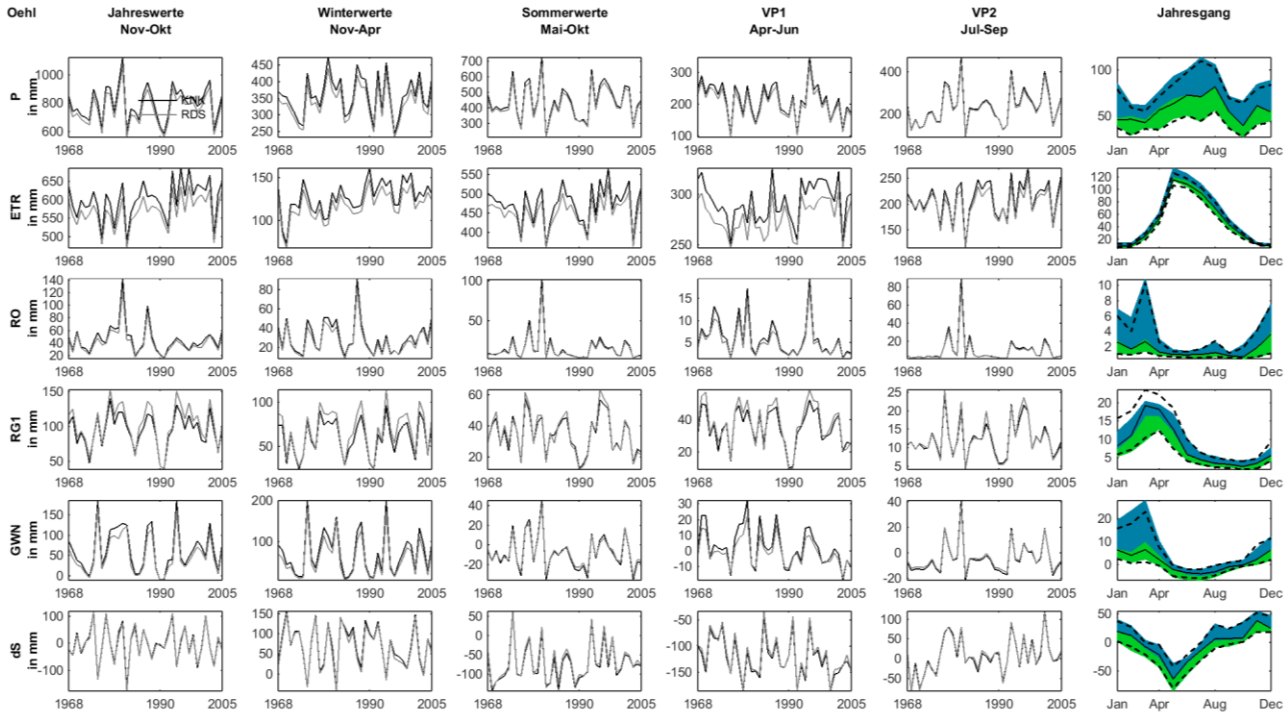


Abbildung 63: Ganglinien verschiedener Wasserhaushaltsgrößen und Zeiträume für das Pegeleinzugsgebiet Oehlisch

Zusätzlich zur allgemeinen Wasserhaushaltsbilanz zeigt Abbildung 63 die Verläufe der unterschiedlichen Wasserhaushaltsgrößen für die Varianten KNK und RDS im Modelleinzugsgebiet Oehlisch. Dargestellt sind die aktuellen Jahressummen der Größen

- Niederschlag P,
- Reale Verdunstung ETR,
- Landoberflächenabfluss RO (als Summe aus Landoberflächenabfluss, hypodermischer Abfluss, Drainageabfluss sowie Misch- und Trennkanalisation, falls vorhanden),
- Schneller Grundwasserabfluss RG1,
- Langsamer Grundwasserabfluss GWN (in DIFGA als RG2 bezeichnet) sowie
- Speicheränderung im Boden dS

für die hydrologischen Jahre von 1967-2005. Außerdem findet eine Betrachtung für unterschiedliche Zeitabschnitte statt. Aufgeführt sind neben den aktuellen Jahreswerten die Winter- und Sommerhalbjahre, die Vegetationsperioden 1 (von April bis Juni) und 2 (von Juli bis September) sowie der mittlere jährliche Verlauf für den Zeitraum 1967 bis 2005. Für die Bewertung der Verläufe bzw. Vergleiche der einzelnen Abbildungen sind die sich ändernden Wertebereiche der y-Achsen zu beachten.

In Abbildung 63 ist zu sehen, dass die Niederschlagswerte von KNK im Winterhalbjahr größer sind als bei RDS. Für das Sommerhalbjahr sind hingegen keine größeren Abweichungen erkennbar. Durch das geringe Niederschlagsdargebot reduziert sich auch die Verdunstung im Winterhalbjahr. In den Sommermonaten ist der Unterschied zwischen KNK und RDS für die Verdunstung am auffälligsten. Die Verdunstungswerte der Variante KNK sind gegenüber RDS deutlich erhöht, wobei es beim Niederschlag gleichzeitig relativ geringe Differenzen gibt. Die reduzierte Verdunstung von RDS resultiert aus der vergleichsweise starken Absenkung des Verdunstungskorrekturfaktors, wie Tabelle 34 zeigt.

In den Modelleinzugsgebieten Aue 1 und Jänkendorf zeigt sich ein vergleichbares Verhalten. In allen drei Gebieten ist der Unterschied beim Niederschlagsinput (s. Tabelle 33) sowie der Verdunstungskorrektur (s. Tabelle 35) zwischen KNK und RDS am größten. Dohna stellt hier eine Ausnahme dar. Obwohl die Niederschläge von RDS gegenüber KNK deutlich reduziert sind, führen sie nicht zu einer Verringerung der Verdunstung, sondern vornehmlich zu reduzierten Abflusskomponenten.

In den Gebieten Johanngeorgenstadt 2, Markersbach 1 und Merzdorf können keine wesentlichen Abweichungen der einzelnen Wasserhaushaltsgrößen festgestellt werden, da der Niederschlagsinput und folglich die Optimierungsparameter keine größeren Abweichungen aufweisen.

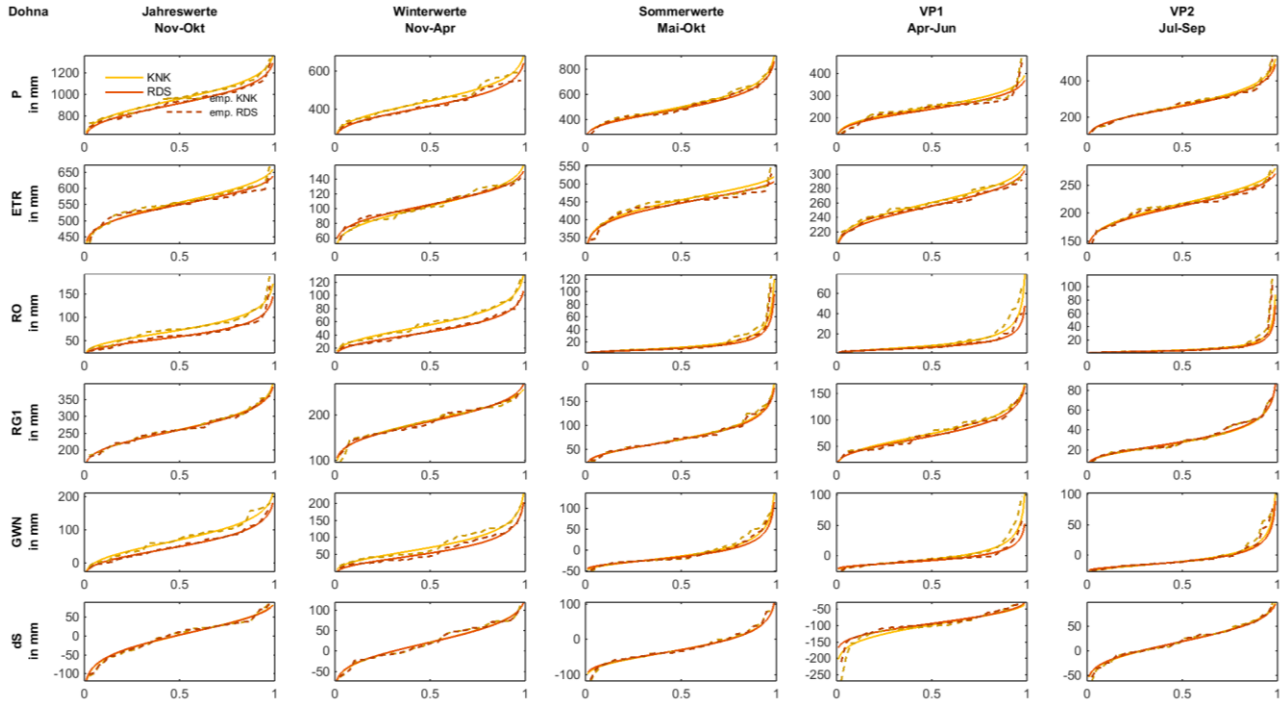


Abbildung 64: Dauerlinien verschiedener Wasserhaushaltsgrößen für das Pegeleinzugsgebiet Dohna

Abbildung 64 zeigt die Dauerlinien verschiedener Wasserhaushaltsgrößen für das Gebiet Dohna. Sie basieren ebenfalls auf dem Zeitraum von 1967 bis 2005. Neben den geringfügigen Abweichungen bei der Verdunstung, sind auch Differenzen für den langsamen Grundwasserabfluss GWN sowie den Oberflächenabfluss RO zu erkennen. Diese Unterschiede ergeben sich nur für das Modelleinzugsgebiet Dohna und resultieren aus den Makroporositätswerten, welche sich im Gegensatz zu den anderen Modellen von KNK zu RDS erhöhen.

Abbildung 65 zeigt verschiedene Histogramme für die zuvor erwähnten Wasserhaushaltsgrößen im Einzugsgebiet Aue 1. Es ist eine geringfügige Zunahme in der Häufigkeit kleinerer Niederschlagswerte in den Wintermonaten zu erkennen. Die Niederschlagsmengen in den Sommermonaten bleiben dagegen nahezu unverändert. Demgegenüber gibt es eine jahreszeitenunabhängige Abnahme der Verdunstungsmengen des RDS im Vergleich zu KNK, zu erkennen an der Linksverschiebung der Verteilungskurven. Auch für den langsamen Grundwasserabfluss GW zeigen sich leichte Veränderungen im Winterhalbjahr. Die absoluten Häufigkeitsverteilungen der weiteren Wasserhaushaltsgrößen RO, RG1 und dS verändern sich hingegen nur marginal.

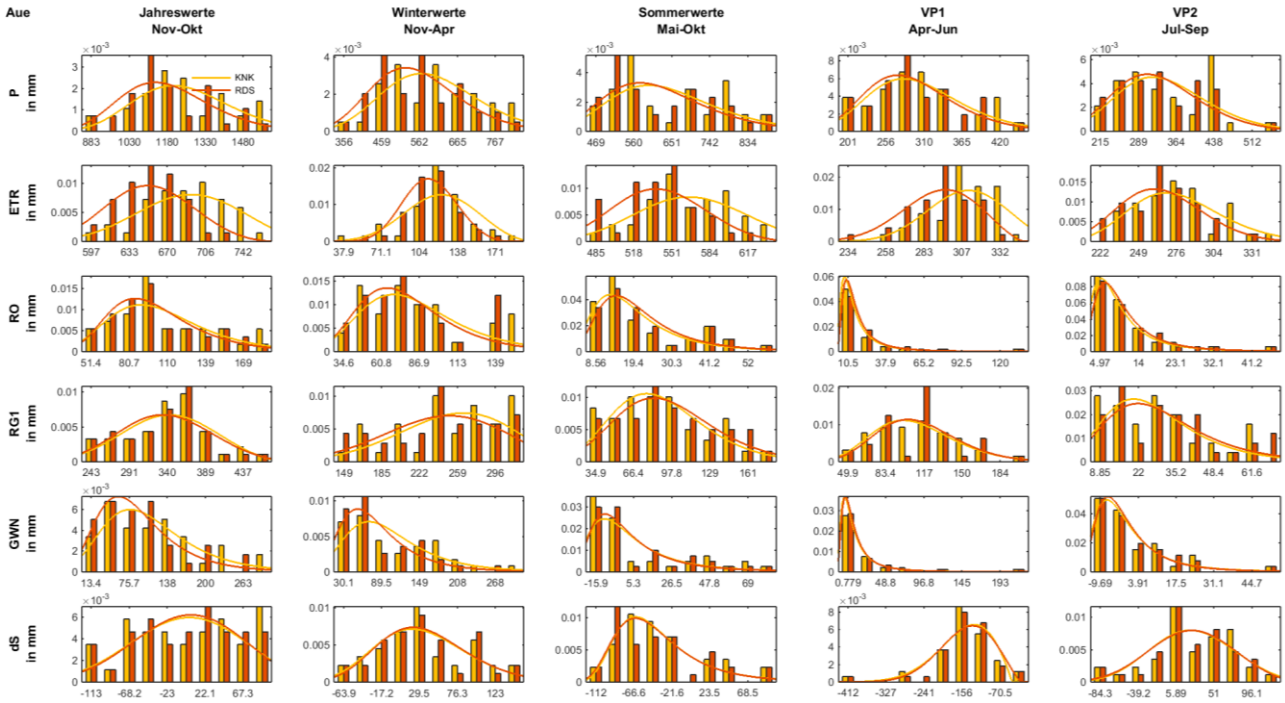


Abbildung 65: Histogramme für verschiedene Wasserhaushaltsgrößen und Zeiträume für das Pegeleinzugsgebiet Aue 1 (VP = Vegetationsperiode)

In den Histogrammen der Gebiete Johanngeorgenstadt 2 und Markersbach 1 treten fast keine Abweichungen zwischen den Häufigkeitsverteilungen auf. Im Einzugsgebiet Merzdorf gibt es nur geringfügige Unterschiede bei den Abflussgrößen.

Vergleich der Anpassung des Durchflusses für das Gebiet Dohna

Die Gegenüberstellung der Durchflussganglinien kann nur als untergeordnete Ergänzung zu den vorherigen Auswertungen angesehen werden (Abbildung 66). Die genaue Anpassung des Durchflusses war im Projekt KliWES nicht die Zielstellung. Das Hauptaugenmerk lag auf der Ermittlung des Wasserhaushalts bzw. auf der Aufteilung der verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen für die sächsischen Einzugsgebiete. Der gemessene Durchfluss wurde auch im Rahmen der Optimierung nicht als Vergleichsgröße genutzt. Da abgesehen vom Aufteilungsparameter $SG1_{grenz}$ keine weiteren Modellparameter verändert wurden, die die Dynamik des Durchflusses beeinflussen, können vor allem Hochwasserereignisse nur bedingt abgebildet werden.

Der beobachtete Durchfluss am Pegel Dohna wird den simulierten Durchflüssen der Varianten KNK und RDS gegenübergestellt. Grundlage sind die aktuellen Monatsmittel im Zeitraum von November 1967 bis Oktober 2005. Während der langjährige beobachtete Mittelwert bei 2,84 m³/s liegt, weist der simulierte Durchfluss der Variante KNK 3,12 m³/s und von RDS 2,95 m³/s auf. Für das Gütekriterium Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE können im Vergleich zum beobachteten Durchfluss Werte von 0,74 für KNK und 0,78 für RDS ermittelt werden. Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt jeweils bei 0,82.

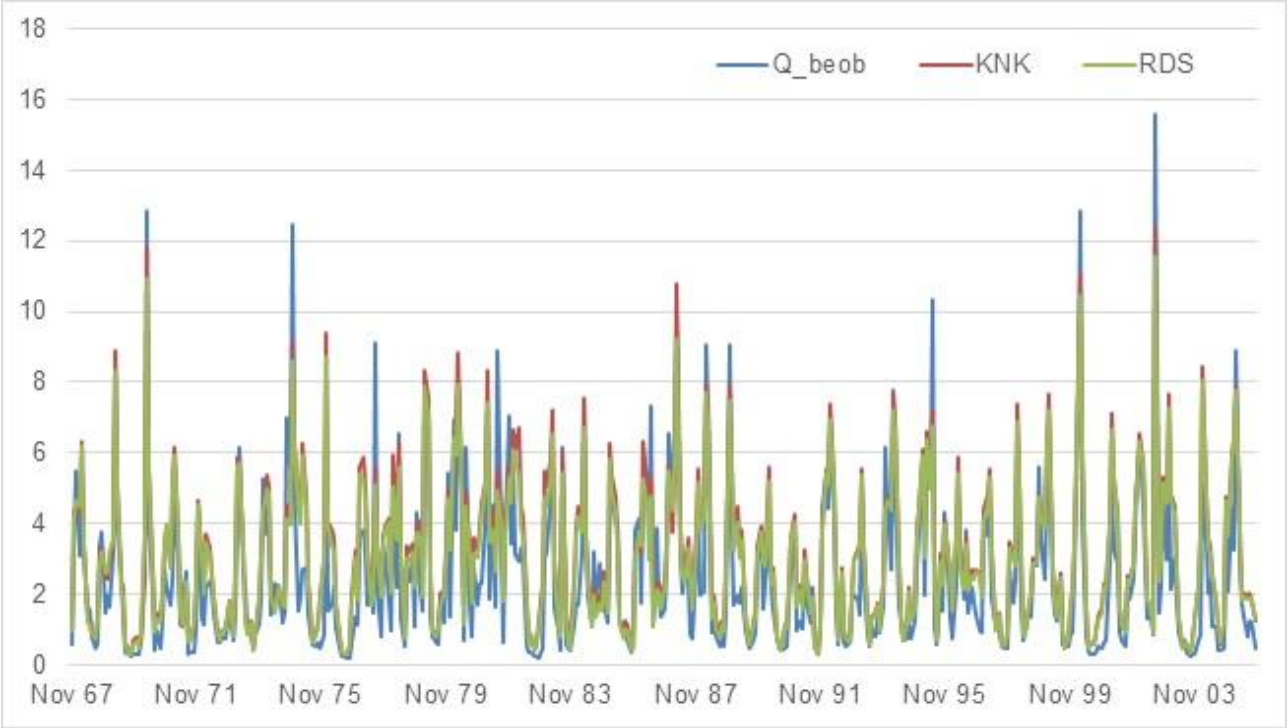


Abbildung 66: Monatsmittel des Durchflusses [m³/s] am Pegel Dohna im Zeitraum Nov. 1967 bis Okt. 2004

Fazit

Die meteorologischen Daten des RDS wirken sich unterschiedlich auf die untersuchten Einzugsgebiete aus. Maßgeblich hierfür ist die Differenz bei den jeweiligen Niederschlagsmengen von KNK und RDS. Sind die Abweichungen zwischen dem KNK und RDS Niederschlag groß, führt das zu spürbaren Veränderungen der Parameter im Rahmen der Optimierung, was sich wiederum auf die Wasserhaushaltsgrößen auswirkt. Dies betrifft die Modelleinzugsgebiete Aue 1, Oehlisch und Jänkendorf. Die Gebiete Merzdorf, Markersbach 1 und Johanngeorgenstadt 2 weisen geringe Unterschiede bei den langjährigen mittleren Niederschlagssummen auf, und dementsprechend zeigen die einzelnen Wasserhaushaltskomponenten im Vergleich von KNK und RDS ein ähnliches Verhalten. Das Gebiet Dohna stellt eine Ausnahme dar. Obwohl die Differenz beim Niederschlagsinput von KNK und RDS 4,4 % beträgt und damit vergleichbar mit den Gebieten Aue 1, Jänkendorf und Oehlisch ist, verhalten sich die Parameter im Rahmen der Optimierung anders. Die Makroporosität erhöht sich gegenüber KNK stark, was sich bei den Wasserhaushaltsergebnissen bemerkbar macht.

Bei ausschließlicher Betrachtung der Datensätze KNK und RDS kommt es in allen Gebieten zu einer Reduzierung des langjährigen mittleren Niederschlags, was jedoch keine nachteiligen Auswirkungen für die Wasserhaushaltsbilanzen hat. Wird zusätzlich der Datensatz KLI betrachtet, kommt es teilweise zu deutlichen Zunahmen der langjährigen mittleren Niederschlagsmengen gegenüber KLI. Diese ergeben sich aus der Berücksichtigung des Nebelniederschlags und haben die größten Veränderungen im Wasserhaushalt zur Folge. Die Niederschlagsmenge, welche durch den Nebel dem Gebietsniederschlag hinzugefügt wird, ist erheblich größer als die Unterschiede zwischen dem Referenzdatensatz und dem KliWES-Datensatz für die Neukalibrierung. Die höheren Niederschlagsmengen werden fast ausschließlich in Verdunstung umgesetzt. Hierfür ist eine starke Erhöhung der kc-Korrekturfaktoren über das übliche Maß hinaus erforderlich. Die sich ergebenden hohen Verdunstungsmengen werden im Rahmen des Projekts allerdings nicht validiert. Insgesamt stellt eine Erhöhung des Niederschlags allerdings kein Problem für die Wasserhaushaltsbilanz dar. Ob die ermittelten Verdunstungswerte realistisch sind, kann nicht abgeschätzt werden. Eine Validierung diesbezüglich durch die Anwendung meteorologischer Daten und Verfahren wird als

sinnvoll erachtet. Darüber hinaus liefern beide Datensätze hydrologisch sinnvolle Wasserhaushaltsergebnisse. Der Referenzdatensatz kann somit als validiert angesehen werden.

Abschließend soll kurz auf die Optimierung eingegangen werden. Bezüglich der Anzahl der Optimierungsläufe bis zur Konvergenz gibt es keine großen Unterschiede. Beide Varianten benötigen ungefähr dieselbe Anzahl von Durchläufen. Abgesehen von dem Optimierungsparameter der Verdunstung, welcher zum Teil erheblich außerhalb des üblichen Wertebereichs liegt, gibt es keine Auffälligkeiten. Der neue meteorologische Datensatz RDS führt im Ergebnis nicht zu einer einfacheren oder schnelleren Optimierung.

4.8 Benutzeroberfläche

Über die Benutzeroberfläche (GUI, Graphical User Interface) des REKIS-Viewers (http://141.30.160.224/fdm/rekisViewer.jsp#menu-3) kann auf die DWD-Daten des Projektes zugegriffen werden (Abbildung 67). In einem passwortgeschützten Bereich wird der Zugriff wahlweise ermöglicht auf:

- die Daten des CHMI
- die Daten des IMGW
- die Daten des Agrarmeteorologischen Dienstes (12 Stationen).

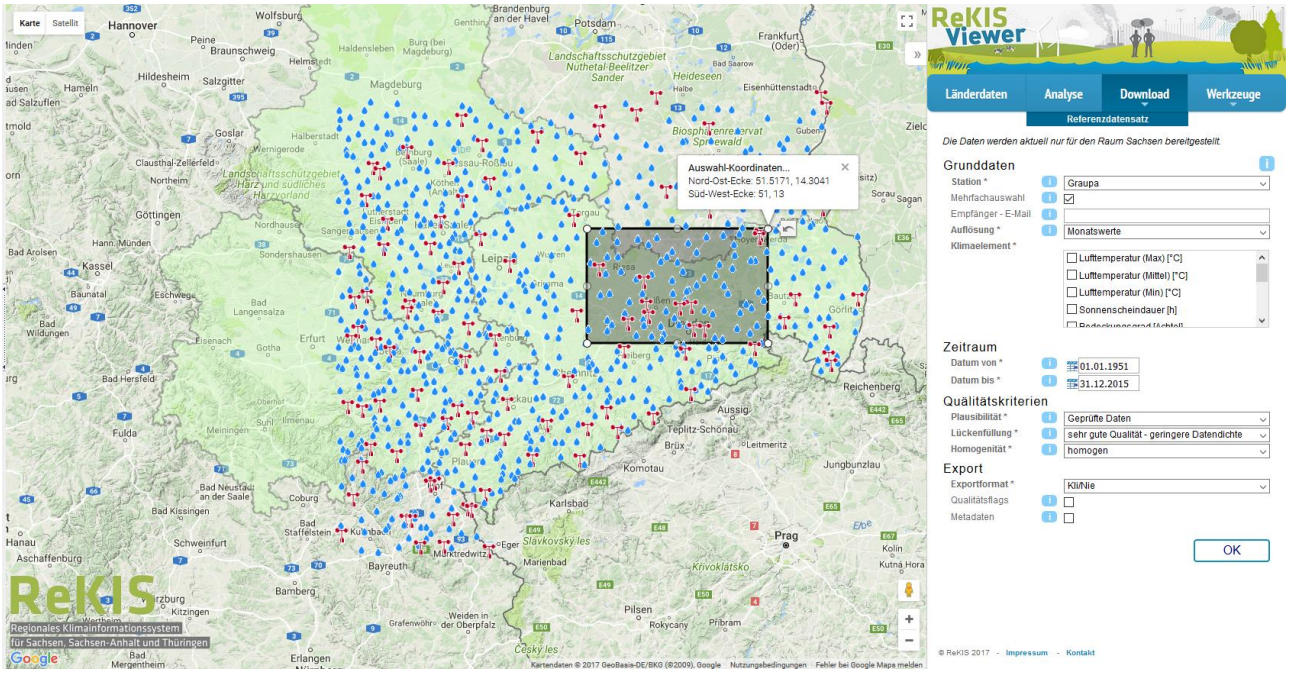


Abbildung 67: Screenshot der Benutzeroberfläche für den Referenzdatensatz

Im Tab "Download" kann der Referenzdatensatz angewählt werden. Hilfreiche Informationen werden an den blauen Informationsbuttons neben jeder Eingabemöglichkeit gegeben.

Zu Beginn sind ~~einige~~ Grunddaten anzugeben:

- Station: Über eine Dropdown-Liste kann eine Station ausgewählt werden. Die Daten werden sofort zum Download bereitgestellt. Wird bei Mehrfachauswahl ein Haken gesetzt, kann mit der Maus auf der Karte der gewünschte Ausschnitt aufgezogen werden. Die Koordinaten werden angezeigt. Sämtliche Stationen in dieser Box werden abgefragt. Da es sich um sehr große Datenmengen handeln kann, wird eine E-Mail-Adresse abgefragt, an die nach Bearbeitung des Auftrags die Datenpakete gesendet werden.
- Zeitliche Auflösung: Es kann zwischen monatlicher und täglicher Auflösung der Daten gewählt werden. In täglicher Auflösung stehen sämtliche, hier bearbeitete Klimaelemente zur Verfügung. Werden monatliche Daten abgefragt, werden nur der Niederschlag und die Windgeschwindigkeit aus den Monatstabellen der Datenbank abgefragt. Für die anderen Elemente erfolgt eine Aggregierung unter Angabe der Anzahl an Tageswerten. Hier muss der Nutzer entscheiden, ab wann eine Aggregierung zu einem Monatswert gerechtfertigt ist. Hinweise hierzu können dem Kapitel 3.2 entnommen werden.
- Klimaelemente: Es ist eine Mehrfachauswahl von Klimaelementen möglich

Der interessierende Zeitraum kann Tag genau innerhalb der verfügbaren Periode 1951-2015 eingegeben werden.

Beim Punkt Qualitätskriterien kann der Nutzer Einstellungen zum gewünschten Referenzdatensatz vornehmen.

Beim Unterpunkt Profil kann entschieden werden zwischen:

- Rohdaten
- Hohe punktförmige Informationsdichte (z. B. Klimaänderungsanalysen)
- Hohe flächenhafte Informationsdichte (z. B. Wasserhaushaltsanalysen)
- Expertenzugang (Abfragen selbst definierbar)

Nähere Informationen zu den voreingestellten Datensätzen sind dem Kapitel 4.6.4 zu entnehmen. Die Voreinstellungen sind in den nächsten Auswahlbereichen ersichtlich, jedoch nicht mehr veränderbar.

Wird der Expertenzugang gewählt, sind folgende Einstellmöglichkeiten freigeschaltet:

- Mindestanteil plausibler Werte:
  - Der Anteil an plausiblen Beobachtungsdaten kann in 5er Schritten von 100 bis 5 % eingestellt werden (Datenvollständigkeit).
- Lückenfüllung:
  - Keine Lückenfüllung
  - geringe Lückenfüllung (anspruchsvollstes Kriterium, was eine sehr sichere Lückenfüllung garantiert, aber zu einer geringeren Datendichte führt)
  - mittlere Lückenfüllung (anspruchsvolles Kriterium, was eine sichere Lückenfüllung garantiert und zu einer höheren Datendichte führt)
  - starke Lückenfüllung (anspruchsloses Kriterium, bei der die Qualität der Lückenfüllung zweitrangig ist, dafür aber zu einer maximalen Datendichte führt)
- Homogenität:

- Homogen (nur Zeitreihen, die in der gewünschten Periode homogen sind, werden abgerufen)
- Nicht homogen – nicht durch Metadaten belegt (diese und die homogenen Zeitreihen werden abgerufen)
- Nicht homogen – durch Metadaten belegt (Homogenitätsstatus ist irrelevant, also alle geprüften Reihen werden abgerufen)

Zum Abschluss wird das Exportformat definiert:

- Kli/Nie (Textformat)
- csv
- xls

Es erfolgt eine Ausgabe vollständiger Reihen, d. h. für jeden Tag gibt es einen Wert, gegebenenfalls den Fehlwert -999).

Auf Wunsch werden Qualitätsflags und Metadaten mit ausgegeben. Zu jedem Datenpunkt werden die Flags der Plausibilitätsprüfung (Flag1) und Lückenfüllung (Flag2) sowie Daten der Lage und Höhe der Station und des verwendeten Messgerätes ausgegeben. Das erhöht das Datenvolumen beträchtlich, ermöglich aber eine sehr detaillierte Analyse des Datensatzes.

Mit dem Datendownload wird eine Informationsdatei zur Verfügung gestellt. Diese enthält:

- Eine Zusammenfassung der vom Nutzer gewählten Voreinstellungen: Zeitraum, Profil, Datenvollständigkeit, Lückenfüllung, Homogenität.
- Detaillierte Angaben zu jeder gewünschten Station:
  - Stations-ID
  - Stations-Name
  - Klimaelement
  - Erfüllung aller Nutzerkriterien: ja/ nein (wenn nein, wird Zeile rot)
  - Datenvollständigkeit (%), plausible Rohdaten (Flag1=0)
  - Ausreißer (%)
  - Unplausibel (Sonstige) (%), z. B. falsche Reihung von TN, TM, TX
  - Fehlwert (%)
  - Lückenfüllung gering (%) – geringe Lückenfüllung (geringes Vorhersageintervall)
  - Lückenfüllung mittel (%) – mittlere Lückenfüllung (mittleres Vorhersageintervall)
  - Lückenfüllung stark (%) – starke Lückenfüllung (hohes Vorhersageintervall)
  - Lückenfüllung unmöglich (%) – Lückenfüllung war nicht möglich
  - Homogenität Beurteilung– homogen; nicht homogen (ohne MetaDat); inhomogen (mit MetaDat); konnte nicht geprüft werden
  - Homogenität Prüfzeitraum – z. B. 01.1961-12.2015

Das Format hdf5 ermöglicht das Management von extrem großen und komplexen Datensammlungen. Es ist jedoch nicht weit verbreitet, da der Umgang nicht unkompliziert ist. Einige Nutzer von hydrologischen Modellen nutzen hdf5 zum Management der Inputdaten. Daher wurde der komplette „hydrologische“ Referenzdatensatz in das hdf5 Format umgewandelt und steht über einen Link auf der GUI zur Verfügung. Eine Dynamisierung der Erstellung von hdf5-Formaten für beliebige Stationsanzahlen war in diesem Rahmen nicht möglich, da die notwendigen Bibliotheken zur Erstellung des Formates nicht auf den ReKIS-Servern installiert werden konnten. Ebenso problematisch ist die Dynamisierung der Erstellungsroutine. Das Format bietet zwar dem Nutzer einen schnellen Datenzugriff, weist jedoch Probleme bei der Erstellung auf. Um eine solche Datei zu erstellen, müssen vorher alle Speicherplätze definiert werden, dies bedeutet einen sehr großen Datenbankaufwand und ein zweimaliges Durchsuchen der Datenbank nach den Datensätzen. Einmal zur Erstellung der Datei und zum zweiten zur Füllung der Datei. Da für das Format eine Zerlegung der Zeitreihen notwendig ist, kann es bei komplizierten Abfragen (verschieden Zeiträume und/oder Stationen und/oder Gütekriterien) sehr leicht zu Fehlern bei der Dateierstellung kommen. Verschiedene Tests haben gezeigt, dass das Format schlecht für eine dynamische Befüllung geeignet ist. Eine hdf5-Formatierung kann daher nur auf speziellen Nutzerwunsch geschehen.

5 Bewertung, Empfehlung und Ausblick

5.1 Bewertung

Die Bestandsaufnahme der nationalen und landeseigenen Messnetze im Freistaat Sachsen zeigt deutlich den starken Rückgang von Niederschlagsmessungen des DWD seit dem Jahr 2000. Die Schließung von Stationen aus dem nebenamtlichen Messnetz führt zur Reduktion von teilweise langen (mehr als 60-jährigen) Reihen. Insbesondere für Extremwertanalysen sind lange und räumlich genügend dichte Niederschlagsreihen essentiell. Für die weiteren Klimaelemente verbessert sich durch die Automatisierung der Stationen die Datendichte. Zwischen 1990 und 2010 erfolgte ein kontinuierlicher Aufbau der Landesmessnetze in verschiedenen Bereichen (Forst, Landwirtschaft, Luftqualität, Wassermanagement).

Zwischen den Daten der deutschen, tschechischen und polnischen Messnetze wurde eine relativ gute Übereinstimmung der Höhengradienten der Temperatur festgestellt. Die nach Osten zunehmende Kontinentalität zeigt sich in leichten Unterschieden in Temperatur, Niederschlag und Schneehöhe. Die tschechischen Stationen fallen durch einen wesentlich geringeren Niederschlags-Höhengradienten und durch geringere Windgeschwindigkeiten auf.

Um die Frage nach einer Ergänzung nationaler Daten mit denen aus landeseigenen Messnetzen zu beantworten, wurden die Datensätze systematisch miteinander verglichen. Da die Standortbedingungen (Geschütztheit, Höhenlage, umgebende Landnutzung) nicht gänzlich mit denen der DWD-Stationen übereinstimmen, sind Unterschiede zu erwarten. Temperaturen sind im LMN um ca. 1,5 K höher, wofür das Stadtklima verantwortlich ist. In den unteren Lagen messen auch die AMN-Stationen höhere Temperaturen. Damit sind auch die Gradienten der relativen Feuchte unterschiedlich. Alle Landesmessnetze weisen deutlich geringere Windgeschwindigkeiten als die DWD-Stationen auf. Bei den Messnetzen FMN, LMN und IHM kann das auf die geschützte Lage zurückgeführt werden. Die Höhengradienten des Niederschlags von DWD, FMN, AMN und LTV sind sehr ähnlich.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass einige Messungen der Landemessnetze sehr gut geeignet sind, das DWD-Messnetz zu ergänzen, z. B. der Niederschlag. Systemtische Abweichungen gibt es bei den Temperaturen und der Luftfeuchte, die durch geeignete Methoden wahrscheinlich (Bias-) korrigiert werden können. Die Abweichungen der Windgeschwindigkeiten sind größtenteils auf die Standortbedingungen zurückzuführen. Korrekturen der Werte erscheinen schwierig. Prinzipiell sind die Standortbedingungen des LMN dem DWD-Standard am unähnlichsten, weshalb eine gleichberechtigte Nutzung kaum zu realisieren sein wird. Die Messungen des LMN haben ihre Berechtigung, um das Stadtklima zu erfassen, aber weniger, um repräsentative Werte für die Region zu liefern.

Zur Bewertung der Messnetzrealität, wie sie sich in der Vergangenheit und heute darstellt, wurde die Krigevarianz analysiert. Es war zu klären, wie sich die zeitliche Entwicklung der Stationsdichte und -verteilung auf die Ableitung flächenhafter Aussagen auswirkt. Beim Niederschlag erhöht sich seit Anfang der 2000er Jahre – parallel zur Reduzierung der Stationsdichte – die Unsicherheit bei der Regionalisierung. Mit der aktuellen Messnetzdichte und -konstellation sind bei hoher räumlicher Variabilität des Niederschlags mittlere Fehler von 23 mm im Monat zu erwarten (Tabelle 36). Für die Mitteltemperatur sind Fehler bis zu 0,5 °C, bei der Sonnenscheindauer bis zu 20 Stunden und der relativen Feuchte bis zu 4 % möglich. Das sind relevante Größenordnungen, in den Wintermonaten kann der Niederschlagsfehler ca. 30 % betragen. Besonders sind die tieferen und die Randlagen des Untersuchungsgebiets betroffen. Das unterstreicht die Bedeutung des kontinuierlichen Datenaustauschs mit den Nachbarländern. Die Landesmessnetze bieten durchaus das Potential, die flächenhaften Aussagen zu verbessern. Die Abbildung 68 verdeutlicht das exemplarisch für das Forstmessnetz. Liegen Stationen in roten oder gelben Bereichen, können die flächenhaften Aussagen in dieser Region verbessert werden. Für den Niederschlag wird ein-

geschätzt, dass das derzeitige DWD-Messnetz bei vielen Witterungssituationen nicht mehr geeignet ist, sichere flächenhafte Abschätzungen zu ermöglichen. Eine weitere Reduktion des Messnetzes ist unter diesem Gesichtspunkt zu vermeiden, vielmehr sollten gezielt Stationen in Regionen mit erhöhtem Krigefehler errichtet werden und/oder Stationen aus den Landesmessnetzen hinzugezogen werden.

Tabelle 36: Mittlerer, flächenhafter Krigefehler von Monatsdaten bei geringer und hoher räumlicher Variabilität für das Jahr 2012

Klimaelement	Krigefehler bei geringer räumlicher Variabilität	Krigefehler bei hoher räumlicher Variabilität
Niederschlag	10 mm	23 mm
Mitteltemperatur	0,34 °C	0,50 °C
Sonnenscheindauer	7 h	20 h
Relative Feuchte	3,2 %	4,0 %

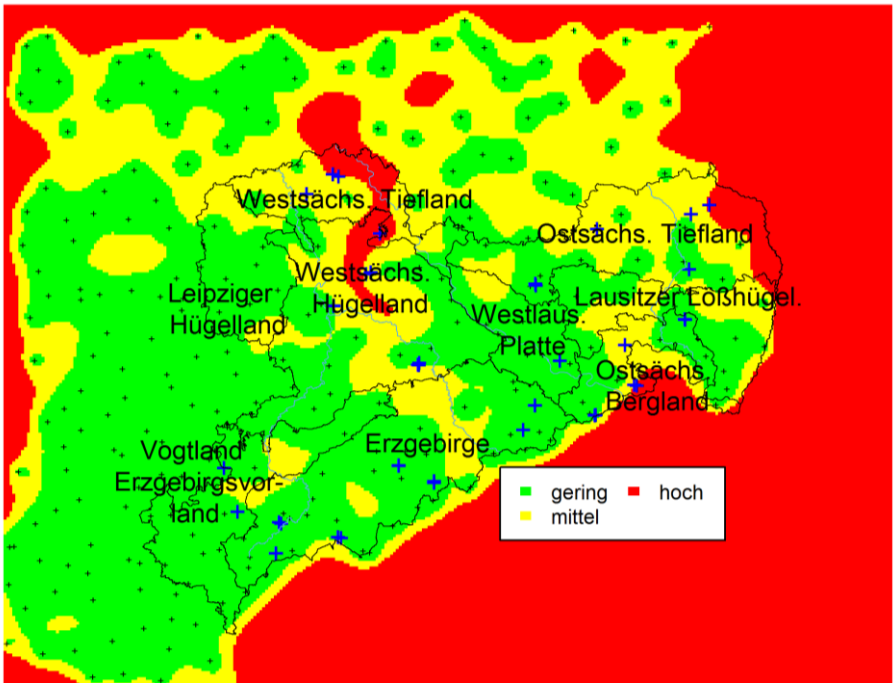


Abbildung 68: Krigefehler von Monatsdaten des Niederschlags bei hoher räumlicher Variabilität für das Jahr 2012 basierend auf DWD-Daten – Blaue Kreuze sind Stationen des Forstmessnetzes, die jedoch nicht zur Berechnung der Krigefehler herangezogen wurden.

Als anwendungsbereites Ergebnis dieses Projektes wurde ein nach zahlreichen Kriterien geprüfter Referenzdatensatz erzeugt, der für vielfältige Anwendungsbereiche konfiguriert werden kann. Insgesamt weist der DWD-Datensatz schon ein hohes Qualitätsniveau auf. Durch Erweiterung der reihenbezogenen Plausibilitätstests um einen räumlichen Abgleich wurden weitere unplausible Werte gefunden, die allein aufgrund ihrer Höhe keine Extremwerte darstellen (insgesamt 140 unplausible DWD-Werte, 39 in CZ und 167 in PL).

Für viele Anwendungen sind Lücken gefüllte Datenreihen nötig bzw. von Vorteil. Mit dem Algorithmus Multiple Regression konnten 76 % der vorhandenen Lücken sehr sicher gefüllt werden (Element übergreifender Durchschnitt). Etwas unsicherere Ergebnisse ergeben sich naturgemäß an räumlich exponierten Stationen. Das kann der Rand des Untersuchungsgebietes sein (weniger geeignete Stationen zur Lückenfüllung vorhanden) oder Bergstationen, deren Witterung sich oft schwer aus den umgebenden Stationen ableiten lässt.

Die Homogenitätsprüfungen ergaben, dass 35 % der Datenreihen (Element übergreifender Durchschnitt) mindestens einen signifikanten Bruchpunkt aufweisen, jedoch nur bei 5 % der Datenreihen diese statistisch festgestellte Inhomogenität durch Metadaten bestätigt werden konnte. Leider ist die Qualität der Metadaten noch unzureichend. Viele dieser Bruchpunkte treten Mitte der 90er und 2000er Jahre auf, Perioden in denen viele Stationen auf automatischen Betrieb umgestellt wurden.

Der erstellte RDS wurde aus meteorologischer Sicht verifiziert. So konnte eine sehr gute elementübergreifende Konsistenz des prozessierten Datensatzes festgestellt werden. Exemplarische Prüfungen für Flachland- und Bergstationen verifizieren den Datensatz generell, zeigen aber auch Schwächen, z. B. bei der Windgeschwindigkeit, auf. Auch aus hydrologischer Sicht konnte durch eine vergleichende Wasserhaushaltsmodellierung der Referenzdatensatz verifiziert werden. Die erstmalige Berücksichtigung eines flächenhaften Nebelniederschlags nach BERNHOFER et al. (2017) bewirkte einen signifikanten Niederschlagszugewinn und führte zu Anpassungen bei der Verdunstung.

5.2 Ausblick

Für zahlreiche Anwendungen ist eine hohe räumliche Abdeckung mit meteorologischen Informationen wichtig, wie z. B. für Wasserhaushaltsbetrachtungen. Eine qualitativ hochwertige Erweiterung der DWD-Datenbasis würde für solche Anwendungen in den meisten Fällen zu gesicherteren räumlichen Aussagen führen, als eine Regionalisierung nur auf Basis von DWD-Daten. Vorstellbar wäre es, ein Flagging (ähnlich dem hier verwendeten) einzuführen, um beobachtete Originaldaten eindeutig von prozessierten Daten anderer Messnetze zu unterscheiden.

Ob sich die Reihen auch für Langzeitanalysen (z. B. Trends, Klimaänderungsignale) eignen, müsste durch einen regionalen Abgleich mit DWD Stationen geprüft werden.

In einigen Datensätzen der Landesmessnetze gibt es scheinbar systematische Abweichungen von den DWD-Datensätzen, z. B. bei der Mitteltemperatur des Forstmessnetzes. Methoden der Bias-Korrektur, wie sie für Klimaprojektionen angewendet werden, sollten vergleichend getestet werden, um das Potential einer Annäherung an die DWD-Daten zu eruieren.

Fernerkundungsdaten spielen in der Klimatologie berechtigterweise eine immer größere Rolle. Das liegt daran, dass die Radar- und Satellitenprodukte immer besser und die Messreihen immer länger werden. Für das Radarprodukt RADOLAN liegen inzwischen mehr als 15 Jahre mit stündlichen Daten vor. Die Ableitung von klimatologischen Aussagen ist noch immer problematisch, aber Fortschritte werden erzielt. Äußerst relevant sind in diesem Zusammenhang die Dichte und Verteilung von Stationsdaten, die für die Aneichung der Radarprodukte benötigt werden. Für zukünftige klimatologische Untersuchungen, insbesondere von Extremwertanalysen, könnten Fernerkundungsdaten wertvolle, räumlich detaillierte Ergänzungen liefern. So sind auch räumliche Ausreißertests vorstellbar, ähnlich wie in diesem Bericht beschrieben. Auch in diesem Themenfeld sollte das Potential von Fernerkundungsdaten weiter vor dem Hintergrund der bekannten Probleme (keine Direktmessung, Punkt- vs. Flächenmessung etc.) untersucht werden.

Die Bedeutung von Daten an den Rändern Sachsens wurde auch in diesem Projekt verdeutlicht (erhöhte Krigefehler an den Rändern, unsichere Lückenfüllung). Deshalb sollte der Datenaustausch mit Tschechien und Polen weiter intensiv betrieben werden. Eine Aktualisierung, Vervollständigung und Nachführung der Datensätze ist sinnvoll und wünschenswert.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Energie- und Klimaprogramms des Freistaates Sachsen (Kabinettsbeschluss vom 12.03.2013, Fortschreibung in aktueller Legislaturperiode) ist das LfULG für die Beobachtung und Bewertung des Klimawandels und der Klimafolgen im Freistaat Sachsen zuständig. Es wirkt an der Ermittlung von Betroffenheit und Identifikation von Risiken durch den Klimawandel und der Entwicklung von Anpassungsstrategien mit. Für diese Facharbeiten ist eine verlässliche klimatologische Datengrundlage, insbesondere beim Niederschlag, unverzichtbar. Hierzu wurde das FuE-Projekt "Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes" durch das LfULG durchgeführt.

Ziel des FuE-Projektes war die Bewertung der meteorologischen Datengrundlage für den Erhalt eines qualitativ gesicherten Klima- und Klimafolgen-Monitoring im Freistaat Sachsen. Erreicht wurde dies über eine Bestandsaufnahme der nationalen und landeseigenen Messnetze im Freistaat Sachsen (plus umliegender Randstreifen, inkl. polnischer und tschechischer Daten) sowie einer fachlich fundierten Analyse und Bewertung der Messrealität. Die Analyse und Bewertung erfolgte hinsichtlich einer adäquaten flächenhaften und zeitlichen Datenverfügbarkeit für die Klima- und Impact-Modellierung, insbesondere für den Wasserhaushalt.

Eine Inventur der nationalen und landeseigenen Messnetze hinsichtlich meteorologischer Messungen zeigte einerseits den als problematisch erachteten starken Rückgang an Niederschlagsstationen des DWD. Andererseits nimmt die durch die sächsischen Landesmessnetze geschaffene Informationsdichte kontinuierlich zu. Vor diesem Hintergrund wurden die Möglichkeiten einer fachlich zulässigen Ergänzung unabhängiger Messnetze untersucht. Die Niederschlagsdaten der meisten Landesmessnetze können wahrscheinlich ohne weitere Bearbeitung genutzt werden. Bei anderen Klimaelementen gibt es systematische Abweichungen, da die Standards der Geräte und Aufstellbedingungen nicht komplett mit denen des DWD übereinstimmen. Diese Abweichungen können – unter Anwendung spezifischer Methoden – z. T. minimiert werden. Andere Elemente, wie z. B. die Windgeschwindigkeit, entziehen sich wahrscheinlich einer solchen Korrektur.

Die aus der Datenverfügbarkeit (Stationsdichte) resultierende Messrealität wurde analysiert. Die Verringerung von Niederschlagstationen in den letzten 15 Jahren wirkt sich auf die Qualität der Ableitung von gesicherten klimatischen Flächeninformationen negativ aus. Die damit einhergehenden Fehler können im Monat bis zu 30 % betragen. Von einer weiteren Reduktion des Niederschlagsmessnetzes wird daher dringend abgeraten. Auch die Nutzung von Fernerkundungsdaten hängt von der Qualität, Dichte und Verteilung von Bodenstationen ab.

Ein weiteres Produkt dieses Projektes ist ein Klima-Referenzdatensatz zur Verwendung in der regionalen Klima- und Klimafolgenanalyse sowie zur Erzeugung neuer sächsischer Klimaprojektionen mit dem Regionalisierungsverfahren WEREX. Dieser Referenzdatensatz besteht aus stationsbezogenen Zeitreihen mit Tages- und Monatswerten für die wichtigsten Klimaelemente sowie abgeleiteten Größen (z. B. korrigierter Niederschlag) für den Zeitraum von 1961 bis einschließlich 2015. Er ist umfassend plausibilitätsgeprüft, größtenteils lückengefüllt, konsistent und homogenitätsgeprüft. Der Datensatz wurde mittels meteorologischer und hydrologischer Ansätze verifiziert.
Der erstellte Datensatz wird über die Benutzeroberfläche des ReKIS-Viewers zur Verfügung gestellt. Die Daten des DWD sind frei verfügbar. Tschechische, polnische und agrarmeteorlogische Daten können nur auf Antrag in einem passwortgeschützten Bereich bezogen werden. Es werden zwei Datensätze für typische Anwendungen vorkonfiguriert. Zum einen ist das ein Datensatz, der eine hohe punktförmige Informationsdichte besitzt und z. B. für Klimafolgenanalysen verwendet werden kann. Zum anderen wird ein oft für hydrologische Anwendungen benötigter Datensatz konfiguriert, der eine hohe flächenhafte Informationsdichte aufweist. Über den sogenannten „Expertenzugang“ sind sämtliche Voreinstellungen zur Plausibilität, Lückenfüllung und Homogenität selbst definierbar, so dass sehr spezifische Abfragen möglich sind.

Literaturverzeichnis

ALEXANDERSON, H.A.: A homogeneity test applied to precipitation data. International Journal of Climatology 6 (1986), S. 661-675

ÅNGSTRÖM, A.: Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 50 (1924), S. 121-125

AUER, I., BÖHM, R., JURKOVIC, A., LIPA, W., ORLIK, A., POTZMANN, R., SCHÖNER, W., UNGERSBÖCK, M., MATULLA, C., BRIFFA, K., JONES, P., EFTHYMIADIS, D., BRUNETTI, M., NANNI, T., MAUGERI, M., MERCALLI, L., MESTRE, O., MOISSELIN, J.-M., BEGERT, M., MÜLLER-WESTERMEIER, G., KVETON, V., BOCHNICEK, O., STASTNY, P., LAPIN, M., SZALAI, S., SZENTIMREY, T., CEGNAR, T., DOLINAR, M., GAJIC-CAPKA, M., ZANINOVIC, K., MAJSTOROVICP, Z., AND NIEPLOVAQ, E.: HISTALP – Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27 (2007), S. 17-46, doi:10.1002/joc.1377

AUGTER, G. (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst): Vergleich der Referenzmessungen des Deutschen Wetterdienstes mit automatisch gewonnenen Messwerten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 238 (2013), ISBN 978-3-88148-455-8

BASTIAN, O., BIELER, J., RÖDER, M., SANDNER, E., SYRBE, R.-U.: Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde 250 (2002), CD-ROM

BERNHOFER, C., KÖRNER, P., SCHWARZE, R.: Modellierung abgesetzter Niederschläge. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2017), 9

BERNHOFER, C., SCHALLER, A., PLUNTKE, T.: Witterungsextreme im WEREX-V Ensemble. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2016), 9

BERNHOFER, C., FRANKE, J.: Aufbereitung meteorologischer Daten für die Verwendung im Klimamodell im Rahmen des Projektes NEYMO. Abschlussbericht eines F&E Projektes des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2013)

BERNHOFER, C., GOLDBERG, V., FRANKE, J., HÄNTZSCHEL, J., HARMANSA, S., PLUNTKE, T., GEIDEL, K., SURKE, M., PRASSE, H., FREYDANK, E., HÄNSEL, S., MELLENTIN, U., KÜCHLER, W. (Hrsg.: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft): Sachsen im Klimawandel – Eine Analyse. (2008)

BFUL (Hrsg.): Der Standort Wahnsdorf - 100 Jahre im Dienste von Natur und Umwelt. Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (2016)

CHMU (Hrsg.): Climate Atlas of Czechia, Praha, Olomouc (2007)

DKK (Hrsg.): Positionspapier des Deutschen Klima Konsortiums: Perspektiven für die Klimaforschung 2015 bis 2025. (2015)

DVWK(Hrsg.): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.(2002), Merkblatt M 504

DWD: Pressemitteilung vom 22.01.2015: Deutscher Wetterdienst setzt auf vollautomatisch arbeitende Messnetze. (2015), Pressestelle DWD

DWD: Wetterrekorde. Deutscher Wetterdienst(2016), https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/ DE/ presse/wetterrekorde.pdf?__blob=publicationFile&v=11, Zugriff: 30.08.2017

ECA&D: Algorithm Theoretical Basis Document. European Climate Assessment & Dataset (2012), http://eca.knmi.nl/documents/atbd.pdf, Zugriff: 05.10.2015

EISCHEID, J.K., BAKER, C., KARL, T., HENRY, F.: The Quality Control of Long-Term Climatological Data Using Objective Data Analysis. Journal of Applied Meteorology and Climatology 34 (1995), S. 2787-2795

EISCHEID, J.K., PASTERIS, P.A., DIAZ, H.F., PLANTICO, M.S., LOTT, N.J.: Creating a Serially Complete, National Daily Time Series of Temperature and Precipitation for the Western United States. Journal of Applied Meteorology and Climatology 39 (2000), S. 1580-1591

FREYDANK, E.: 150 Jahre staatliche Wetter- und Klimabeobachtungen in Sachsen, Teil 1. Tharandter Klimaprotokolle 21 (2014a)

FREYDANK, E.: 150 Jahre staatliche Wetter- und Klimabeobachtungen in Sachsen, Teil 2 Ergänzungs- und Sondernetze, Messungen in der freien Atmosphäre. Tharandter Klimaprotokolle 21 (2014b)

GONZÁLEZ-ROUCO, J.F., JIMÉNEZ, J.L., VALERO, F.: Quality Control and Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe. Journal of Climate 14(2001), S. 964-978

GROLEMUND, G., WICKHAM, H.: Dates and Times Made Easy with lubridate. Journal of Statistical Software 40 (2011),3, S. 1-25

HERZOG, J., MÜLLER-WESTERMEIER, G.: Homogenitätsprüfung und Homogenisierung klimatologischer Meßreihen im Deutschen Wetterdienst. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 202 (1998)

HUBERT, M., VAN DER VEEKEN, S.: Outlier detection for skewed data. Journal of Chemometrics 22(2008), 3-4, S. 235-246

KLINES: Stellungnahme zur abgestimmten Erhebung und Zusammenführung meteorologischer Daten. Klimanetzwerk Sachsen (2011)

KLINES: Stellungnahme zum Wert langjähriger Messreihen der Klimaelemente. Klimanetzwerk Sachsen (2009)

KRIGE, D.G.: A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa 52 (1951), 6, S. 119-139

KRONENBERG, R., FRANKE, J., BERNHOFER, C., KÖRNER, P.: Detection of potential transition areas of changing climatic conditions at a regional scale until 2100 for Saxony, Germany. Meteorology Hydrology and Water Management 3 (2015), 2, S. 17-26

LAAPAS, M., VENÄLÄINEN, A.: Homogenization and trend analysis of monthly mean and maximum wind speed time series in Finland, 1959–2015. International Journal of Climatology 37(2017),11, doi:10.1002/joc.5124

LEYS, C., LEY, C., KLEIN, O., BERNARD, P., LICATA, L.: Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. Journal of Experimental Social Psychology 49 (2013), S. 764-766

LINDAU, R., VENEMA, V.: On the multiple breakpoint problem and the number of significant breaks in homogenization of climate records. Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service 117 (2013), 1, S. 1-34

MESTRE, O., DOMONKOS, P., PICARD, F., AUER, I., STÉPHANE, R., LEBARBIER, E., BÖHM, R., AGUILAR, E., GUIJARRO, J., VERTACHNIK, G., KLANCAR, M., DUBUISSON, B., STEPANEK, P.: HOMER: a homogenization software – methods and applications. Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service 117 (2013), 1, S. 47-67

LUMLEY, T.: leaps: Regression Subset Selection. (2017), https://CRAN.R-project.org/package=leaps

PETERSON, T.C., EASTERLING, D.R.: Creation of homogeneous composite climatological reference series. International Journal of Climatology 14 (1994), S. 671-679

PFÜTZNER, B., KLÖCKING, B., BECKER, A. (Hrsg.: BAH): ArcEGMO GIS-gestützte hydrologische Modellierung. Büro für Angewandte Hydrologie (2007)

RICHTER, D.: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194 (1995)

RODRIGUEZ, P.: Vergleichende Untersuchung verschiedener Niederschlagsmessverfahren am Beispiel des Tharandter Messfeldes - Untersuchung systematischer und zufälliger Unterschiede. Diplomarbeit an der Fakultät Umweltwissenschaften, Technische Universität Dresden (2014)

SCHÖNWIESE, C.D.: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. (2006), 4

SCHWARZE, R.: Gegliederte Analyse und Synthese des Niederschlags-Abfluss-Verhaltens von Einzugsgebieten. Dissertation an der Fakultät für Bau-, Wasser-, Forstwesen, Technische Universität Dresden (1985)

SCHWARZE, R., DRÖGE, W., HOFMANN, J., MALESKA, V., LÜNICH, K., SCHÖNFELD, M., SPITZER, S.: KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer. Teil 1: Wasserhaushalt, Kernkomponente. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2011), 44

SCHWARZE, R., DRÖGE, W., HAUFFE, C., BALDY, A., WAGNER, M.: KliWES - Erarbeitung einer Nebelkorrektur für meteorologische Daten mit einem geeigneten Verfahren im Rahmen des FuE-Projekts KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt (Klimaprojektionen). Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2013),16

SCHWARZE, R., HAUFFE, C., BALDY, A., WINKLER, P., DRÖGE, W., WAGNER, M., RÖHM, P.: KliWES - Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen – Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist-Zustand und verschiedene Klima- bzw. Landnutzungsszenarien. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2014),32

SCHWARZE, R., DRÖGE, W., WAGNER, M., SPITZER, S., MALESKA, V., KUHN, K.: Untersuchung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Sachsen – Lösungsansatz, Analyse Ist-Zustand, Daten- und Parametermodell, Modelltest. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 60 (2016),1, S. 53-71, doi:10.5675/HyWa _2016,1_3

VDI (Hrsg.): Environmental Meteorology. Interactions between Atmosphere and Surfaces. Calculation of Short-wave and Long-wave Radiation. Verein Deutscher Ingenieure, VDI 3789 (1994)

WALSH, J.E.: Some Nonparametric Tests of whether the Largest Observations of a Set are too Large or too Small. Annals of Mathematical Statistics 21 (1950), 4, S. 583-592, doi:10.1214/aoms/1177729753

WICKHAM, H.: The Split-Apply-Combine Strategy for Data Analysis. Journal of Statistical Software 40(2011),1, S. 1-29

WILKS, D.S.: Statistical methods in the atmospheric sciences. Volume 100(2011),3

WMO (Hrsg.): Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. World Climate Data Programme 10(1989), WMO-TD/No. 341

YOUNG, K.C.: A three-way model for interpolating monthly precipitation values. Monthly Weather Review 120 (1992), 11, S. 2561-2569

ZAMBRANO-BIGIARINI, M.: hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. (2014), https://CRAN.R-project.org/package=hydroGOF

Anhang

Anhang 1: Beobachtungstermine der LTV Niederschlagsstationen und Plausbilitätsprobleme

Stauanlage	Beobachtung	Periode	Problem	Aktion
Altenberg	Mo bis Fr			
Bautzen	Mo bis Fr			
Borna	Mo bis Fr			
Cranzahl	Mo bis So			
Dröda	Mo bis So	01.07.-31.12.1971	Lücken	mit -999 ersetzt
Gottleuba	Mo bis So			
Knappenrode	Mo bis Fr			
Koberbach	Mo bis So			
Langenhessen	Mo bis Fr	1980-1986	viele kleine Lücken, z. B. 1982 336 mm (Vergleich: Pirk: 397 mm; in Dröda, Pöhl, Stollberg ca. 490 mm)	mit 0 ersetzt
Lauenstein	Mo bis Fr		zusätzlich 7:00 Uhr Werte drei negative Werte	gelöscht Vorzeichen geändert
Lehnmühle	Mo bis So	24.12.1962-08.01.1964 und 15.09.1965-31.12.1968 01.03.1987-31.12.1990	nur 0 mm Einträge Lücke	mit -999 ersetzt
Lichtenberg	Mo bis So			
Lohsa 1	Mo bis Fr			
Muldenberg	Mo bis So			
Neunzehnhain	Mo bis So			
Pirk	Mo bis So			
Pöhl	Mo bis So			
Quitzdorf	Mo bis Fr			
Radeburg 1	Mo bis Fr			
Rauschenbach	Mo bis So			
Rötha	Mo bis Fr			
Saidenbach	Mo bis So			
Schömbach	Mo bis Fr			
Stollberg	Mo bis So			
Werda	Mo bis So			
Witznitz	Mo bis Fr	01.01.1991-31.12.1991	Lücke	mit -999 ersetzt

Anhang 2: Ergebnisdateien der Homogenitätsprüfung

Name der Datei	Beschreibung des Inhalts
[Element]_location_changes.txt	Beschreibung der in den Metadaten dokumentierten Ortswechsel der Stationen
[Element]_instrument_changes.txt	Beschreibung der in den Metadaten dokumentierten Instrumentenwechsel (nicht nach den oben beschriebenen Kriterien (Standardgeräte, etc.) klassifiziert)
breakpoints_pairwise_[Element]_[Jahreszeit]_seq_gt_5y_final.txt	Liste der Stationen mit signifikanten Bruchpunkten (Format: Stationsnummer, Anzahl der Bruchpunkte, Jahre der Bruchpunkte, Mittelwerte der Einzelsegmente, optional: inhomogen (Ergebnis des Abbe-Kriteriums), optional: TREND (Ergebnis des Mann-Kendall-Trendtest))
[Element]_stations_all.txt	Stationsliste mit allen Stationen, die das entsprechende Element gemessen haben
[Element]_stations.txt	Stationsliste mit allen Stationen, für die aufgrund der Datenverfügbarkeit eine Homogenitätsprüfung durchgeführt wurde.
Ra[Element] m[Stationsnummer]d_[Jahreszeit].png	Zeitreihenplot mit Rohdaten und angepassten Mittelwerten der einzelnen Segmente. Zusätzliche Angaben über Signifikanz der Mittelwertunterschiede, Bestätigung der Bruchpunkte durch Metadaten, Abbe-Kriterium und Ergebnisse des Trendtests

Anhang 3: Krigefehler des monatlichen Niederschlags (mm) für Bedingungen mit normaler und extremer (grün bzw. rot hinterlegt) räumlicher Variabilität für die Messnetzdichte im Jahr 2012, betrachtet für Teilräume Sachsens

Agrarräume	ErzGebKamm	ErzgebVorland	Heide-Riesa Torgau	Lössgeb	Oberlaus/ SächsSchw
25. Perzentil	10.5	10.7	11.1	10.5	11.3
50. Perzentil	11.0	11.1	11.7	11.0	14.2
75. Perzentil	11.5	11.9	16.2	11.6	17.6
25. Perzentil	17.6	17.7	18.1	17.6	18.2
50. Perzentil	17.9	18.0	18.5	17.9	20.8
75. Perzentil	18.3	18.6	22.9	18.5	24.6

Einzugsgebiete	Elbe	LausNei/Spree	Mulde	SchwElster	WeiElster
25. Perzentil	11.4	11.0	10.5	11.6	10.3
50. Perzentil	12.1	12.4	11.0	15.2	10.8
75. Perzentil	17.7	17.6	11.4	18.3	11.2
25. Perzentil	18.3	18.0	17.6	18.4	17.4
50. Perzentil	18.8	19.4	17.9	21.8	17.8
75. Perzentil	24.6	25.0	18.2	25.9	18.1

Naturräume	BergL	Erzgeb	Linkselb Loessgef	OestlHeideL	Rechtelb Loessgef	WestlHeideL
25. Perzentil	10.7	10.6	10.5	11.1	11.9	10.9
50. Perzentil	11.3	11.1	11.0	11.7	16.0	11.3
75. Perzentil	14.0	11.7	11.6	15.8	18.8	11.8
25. Perzentil	17.8	17.7	17.5	18.0	18.9	18.0
50. Perzentil	18.1	17.9	17.9	18.7	22.6	18.3
75. Perzentil	20.5	18.4	18.5	22.3	26.8	18.6

Klimaräume	BergL	GebVorL	HuegL	TiefL	SachsAnhalt	Brandenb	Bayern	Thüringen
25. Perzentil	10.5	10.8	10.9	10.6	10.2	10.9	10.1	10.3
50. Perzentil	11.0	11.4	11.6	11.1	10.6	11.6	10.4	10.8
75. Perzentil	11.5	14.5	14.2	11.7	11.3	15.0	10.7	11.4
25. Perzentil	17.6	17.8	17.9	17.6	17.3	17.9	17.2	17.4
50. Perzentil	17.9	18.3	18.4	18.0	17.6	18.5	17.4	17.8
75. Perzentil	18.3	21.0	20.9	18.5	18.2	21.7	17.6	18.2

Forsträume	Erzgeb	LausLöss HügelL	LeipzHügelL	Ostsaechs BergL	Ostsaechs TiefL	Vogtl/ ErzgebVorL	Westlaus Platte	WestlTiefL	Westsaechs HügelL
25. Perzentil	10.6	11.3	10.1	11.3	11.1	10.5	18.6	10.8	10.6
50. Perzentil	11.1	13.6	10.6	15.8	12.1	11.0	19.4	11.2	11.1
75. Perzentil	11.7	16.3	11.0	18.5	16.7	11.6	19.6	11.7	11.7
25. Perzentil	17.7	18.3	17.2	18.1	18.1	17.6	26.3	17.9	17.7
50. Perzentil	17.9	20.3	17.5	22.3	19.1	18.0	28.9	18.2	18.1
75. Perzentil	18.4	22.9	17.8	26.1	23.5	18.5	30.2	18.5	18.5

Anhang 4: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen (TM, TX) aus dem DWD-Netz – Die aus dem Ausreißertest resultierenden Schwellenwerte, der Referenzwert sowie weitere Berechnungen sind aufgeführt.

STATID	DATID	DATUM	Wert	Schwellenwert unten	Schwellenwert oben	Referenzwert	Differenz zu Referenz	Differenz zu Schwellenwert
Tagesmitteltemperatur								
198	4	1969-12-22	-15,8	-9,5	12,7	-8,3	7,5	6,3
445	8	1971-01-05	-17,0	-10,7	13,1	-12,2	4,8	6,3
445	8	1997-01-02	-18,8	-10,7	13,1	-14,7	4,1	8,1
526	10	1963-12-24	-14,1	-9,7	12,5	-8,9	5,2	4,4
526	10	1954-02-05	-13,4	-10,0	12,2	-9,0	4,4	3,4
853	15	1969-12-29	-13,0	-9,4	11,4	-6,3	6,7	3,6
853	15	1957-12-16	-14,7	-9,4	11,4	-9,3	5,4	5,3
853	15	1978-12-31	-14,3	-9,4	11,4	-9,3	5,0	4,9
853	15	1969-12-21	-17,9	-9,4	11,4	-13,9	4,0	8,5
965	20	1963-02-23	-15,3	-10,0	12,2	-10,6	4,7	5,3
965	20	1956-02-16	-17,6	-10,0	12,2	-13,0	4,6	7,6
965	20	1963-03-01	-11,1	-6,4	15,1	-6,8	4,4	4,7
1050	27	1985-01-09	-15,3	-10,1	12,1	-11,0	4,3	5,2
1207	35	2001-12-23	-14,3	-9,5	9,1	-9,0	5,3	4,8
1207	35	2001-12-14	-16,0	-9,5	9,1	-10,7	5,3	6,5
1207	35	1960-01-15	-19,6	-12,2	9,3	-15,2	4,4	7,5
1207	35	2002-01-03	-16,1	-12,2	9,3	-12,0	4,1	4,0
1207	35	1956-02-25	-16,5	-11,1	9,7	-12,4	4,1	5,4
1207	35	1976-01-29	-15,1	-12,2	9,3	-11,0	4,1	3,0
1207	35	2002-01-05	-15,4	-12,2	9,3	-11,4	4,0	3,3
1612	46	1998-08-11	30,5	8,4	25,4	25,9	4,6	5,1
1762	49	1991-10-31	-4,0	-0,4	18,8	0,1	4,1	3,6
2252	58	1996-12-21	-15,6	-9,2	11,6	-10,4	5,2	6,4
2252	58	1996-12-27	-19,0	-9,2	11,6	-14,4	4,6	9,8
2252	58	1996-12-22	-15,6	-9,2	11,6	-11,1	4,5	6,4
2444	61	1966-01-17	-17,6	-10,4	13,4	-13,3	4,3	7,2
2878	70	1952-11-17	-8,0	-4,8	14,4	-3,5	4,5	3,2
3289	87	2001-12-23	-12,3	-9,3	12,2	-7,4	4,9	3,0
3811	92	1993-11-30	-10,9	-5,2	15,1	-6,8	4,1	5,7
3946	95	1979-01-19	-14,5	-11,5	10,7	-8,6	5,9	3,0
3946	95	1970-12-27	-13,0	-9,3	10,7	-8,7	4,3	3,7
4079	99	1962-11-24	-11,8	-4,7	13,1	-6,9	5,0	7,1

Fortsetzung Anhang 4: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen (TM, TX) aus dem DWD-Netz – Die aus dem Ausreißertest resultierenden Schwellenwerte, der Referenzwert sowie weitere Berechnungen sind aufgeführt.

STATID	DATID	DATUM	Wert	Schwellenwert unten	Schwellenwert oben	Referenzwert	Differenz zu Referenz	Differenz zu Schwellenwert
Tagesmaximaltemperatur								
169	2	1955-01-29	15,0	-11,3	12,0	10,3	4,7	3,0
314	7	1972-01-17	-12,4	-9,2	13,8	-6,7	5,7	3,2
314	7	1987-01-11	-18,6	-9,2	13,8	-13,5	5,1	9,4
526	10	1963-12-24	-10,4	-6,9	15,3	-5,0	5,4	3,5
853	15	1979-01-01	-14,6	-9,8	14,0	-8,3	6,3	4,8
853	15	1968-03-29	24,5	-7,2	21,0	19,2	5,3	3,5
853	15	1987-01-15	-13,8	-9,8	14,0	-9,2	4,6	4,0
853	15	1985-01-08	-13,4	-9,8	14,0	-9,2	4,2	3,6
991	22	1998-01-12	17,1	-9,3	14,5	8,3	8,9	2,6
3166	82	2005-08-23	0	8,6	31,6	14,6	14,6	6

Anhang 5: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen aus dem Tschechischen-Netz

STATID	Name	DATUM	Wert	Schwellenwert unten	Schwellenwert oben	Referenz-wert	Differenz zu Referenz	Differenz zu Schwellenwert
Mitteltemperatur								
50002	As	1969-12-21	-14,1	-11,0	7,5	-23,6	9,5	3,1
50007	Brandys-nad-L,	1985-01-07	-22,3	-11,7	11,3	-17,0	5,3	10,6
50009	Ceska Lipa	1965-11-24	-11,1	-5,7	12,9	-6,3	4,8	5,4
50009	Ceska Lipa	1969-12-22	-13,1	-9,4	9,8	-18,3	5,2	3,7
50009	Ceska Lipa	1969-12-21	-12,8	-9,4	9,8	-18,8	6,0	3,4
50019	Doksany	1969-12-05	-12,5	-8,9	10,3	-7,9	4,6	3,6
50020	Doksy	1985-01-09	-18,0	-12,1	10,1	-22,1	4,1	5,9
50020	Doksany	1979-02-10	-13,0	-9,3	9,9	-8,5	4,5	3,7
50022	Frantiskovy-L.	1963-01-13	-23,6	-11,5	9,3	-19,2	4,4	12,1
50022	Frantiskovy-L.	1963-01-17	-22,6	-11,5	9,3	-18,5	4,1	11,1
50022	Frantiskovy-L.	1985-02-11	-20,2	-9,8	9,4	-15,3	4,9	10,4
50022	Frantiskovy-L.	2002-01-05	-20,3	-11,5	9,3	-13,5	6,8	8,8
50022	Frantiskovy-L.	1976-12-29	-17,8	-9,6	9,0	-13,6	4,2	8,2
50022	Frantiskovy-L.	1971-01-01	-19,5	-11,5	9,3	-14,3	5,2	8,0
50022	Frantiskovy-L.	1963-02-04	-17,6	-9,8	9,4	-13,3	4,3	7,8
50022	Frantiskovy-L.	2002-01-04	-19,1	-11,5	9,3	-13,5	5,6	7,6
50022	Frantiskovy-L.	1973-12-01	-16,7	-9,6	9,0	-12,3	4,4	7,1
50022	Frantiskovy-L.	2002-01-03	-18,5	-11,5	9,3	-11,9	6,6	7,0
50022	Frantiskovy-L.	1963-01-15	-18,1	-11,5	9,3	-12,7	5,4	6,6
50022	Frantiskovy-L.	1963-02-06	-14,0	-9,8	9,4	-9,9	4,1	4,2
50022	Frantiskovy-L.	1986-02-20	-14,0	-9,8	9,4	-9,4	4,6	4,2
50024	Habartov	2010-12-29	-16,7	-12,6	8,2	-12,2	4,5	4,1
50026	Hazlov	1985-01-13	-17,0	-11,6	11,4	-12,2	4,8	5,4
50026	Hazlov	1993-01-03	-16,0	-11,6	11,4	-11,9	4,1	4,4
50029	Jablonne-v-P.	2004-01-24	-19,5	-12,2	10,0	-14,9	4,6	7,3
50029	Jablonne-v-P.	2004-01-23	-19,1	-12,2	10,0	-15,0	4,1	6,9
50029	Jablonne-v-P.	1971-01-06	-19,0	-12,2	10,0	-14,9	4,1	6,8
50029	Jablonne-v-P.	2002-01-04	-19,0	-12,2	10,0	-14,1	4,9	6,8
50029	Jablonne-v-P.	2002-01-05	-17,3	-12,2	10,0	-12,9	4,4	5,1

Fortsetzung Anhang 5: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen aus dem Tschechischen Netz

STATID	Name	DATUM	Wert	Schwellenwert unten	Schwellenwert oben	Referenz-wert	Differenz zu Referenz	Differenz zu Schwellenwert
50034	Karlovy-Vary_L.	1986-02-22	-14,8	-9,2	10,0	-9,7	5,1	5,6
50044	Liberec	1961-12-17	-17,6	-10,2	9,4	-13,2	4,4	7,4
50044	Liberec	1987-01-13	-18,3	-12,4	9,8	-22,4	4,1	5,9
50057	Nova-Ves-v-H.	1970-03-06	-13,5	-10,4	11,8	-8,7	4,8	3,1
50070	Semcice	1987-01-12	-19,5	-11,4	10,2	-15,5	4,0	8,2
50070	Semcice	1987-01-14	-15,3	-11,4	10,2	-20,0	4,7	4,0
50071	Sindelova	2010-11-27	-12,0	-6,9	13,1	-7,9	4,1	5,1
50086	Varnsdorf	1963-01-19	-18,7	-12,7	11,1	-14,5	4,2	6,0
50086	Varnsdorf	1996-02-07	-14,4	-11,4	11,6	-9,7	4,7	3,0
Maximumtemperatur								
50034	Karlovy-Vary_L.	2010-12-30	-13,8	-8,4	13,1	-9,6	4,2	5,4

Anhang 6: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen (TM, TX) aus dem polnischen Netz

STATID	Name	Datum	Wert	Schwellenwert unten	Schwellenwert oben	Referenz-wert	Differenz zu Referenz	Differenz zu Schwellenwert
Mitteltemperatur								
400	Zielona Gora	1978-12-30	-14,1	-9,9	10,9	-8,5	5,6	4,2
400	Zielona Gora	1978-12-31	-18,3	-9,9	10,9	-14,1	4,2	8,4
400	Zielona Gora	1996-12-28	-15,1	-9,9	10,9	-20,8	5,7	5,2
400	Zielona Gora	2006-01-22	-17,1	-12,4	11,8	-10,6	6,5	4,8
4106	Zgorzelec	1971-01-03	-19,9	-11,8	12,0	-10,2	9,7	8,1
4106	Zgorzelec	1971-01-04	-14,9	-11,8	12,0	-7,7	7,2	3,1
4106	Zgorzelec	1971-01-06	-16,8	-11,8	12,0	0,4	17,2	5,0
4106	Zgorzelec	1972-01-16	-16,9	-11,8	12,0	-6,4	10,5	5,1
4106	Zgorzelec	1972-01-17	-15,3	-11,8	12,0	-9,9	5,4	3,5
4106	Zgorzelec	1975-11-24	-10,8	-5,9	14,1	2,4	13,2	4,9
4106	Zgorzelec	1975-11-25	-9,6	-5,9	14,1	3,5	13,1	3,7
4106	Zgorzelec	1976-12-30	-13,2	-8,9	11,1	-3,2	10,0	4,3
4106	Zgorzelec	1978-12-31	-14,6	-8,9	11,1	0,3	14,9	5,7
4106	Zgorzelec	1981-12-21	-12,4	-8,9	11,1	-2,2	10,2	3,5
4106	Zgorzelec	1985-01-08	-19,6	-11,8	12,0	-15,6	4,0	7,8
4106	Zgorzelec	1985-02-12	-18,6	-10,1	11,5	-13,2	5,4	8,6
4106	Zgorzelec	1985-02-13	-15,3	-10,1	11,5	-9,9	5,4	5,3
4106	Zgorzelec	1986-02-09	-17,2	-10,1	11,5	-13,0	4,2	7,2
4106	Zgorzelec	1986-02-12	-14,0	-10,1	11,5	-5,0	9,0	4,0
4106	Zgorzelec	1987-01-13	-22,2	-11,8	12,0	-16,7	5,5	10,4
4106	Zgorzelec	1987-01-14	-23,4	-11,8	12,0	-10,8	12,6	11,6
4106	Zgorzelec	1987-01-15	-15,9	-11,8	12,0	-7,4	8,5	4,1
4106	Zgorzelec	1991-12-09	-13,2	-8,9	11,1	-3,7	9,5	4,3
4106	Zgorzelec	1996-02-08	-14,3	-10,1	11,5	-9,6	4,7	4,3
4106	Zgorzelec	1996-02-09	-15,2	-10,1	11,5	-9,1	6,1	5,2
4106	Zgorzelec	1996-02-10	-13,7	-10,1	11,5	-6,2	7,5	3,7
4106	Zgorzelec	1996-12-28	-20,4	-8,9	11,1	-12,5	7,9	11,5
4106	Zgorzelec	1996-12-29	-17,0	-8,9	11,1	-11,7	5,3	8,1
4106	Zgorzelec	1997-01-01	-17,6	-11,8	12,0	-10,5	7,1	5,8
4106	Zgorzelec	1998-12-10	-12,2	-8,9	11,1	-5,5	6,7	3,3
4106	Zgorzelec	1998-12-11	-16,3	-8,9	11,1	-8,6	7,7	7,4
4106	Zgorzelec	2003-01-09	-15,1	-11,8	12,0	-8,7	6,4	3,3
4106	Zgorzelec	2006-01-23	-17,9	-11,8	12,0	-11,7	6,2	6,1

Fortsetzung Anhang 6: Als Ausreißer identifizierte Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen (TM, TX) aus dem polnischen Netz

STATID	Name	Datum	Wert	Schwellenwert unten	Schwellenwert oben	Referenz-wert	Differenz zu Referenz	Differenz zu Schwellenwert
Maximumtemperatur								
400	Zielona Gora	1978-12-31	-14,9	-8,4	13,8	-10,4	4,5	6,5
4106	Zgorzelec	1971-01-03	-13,5	-9,6	13,7	-7,4	6,1	3,9
4106	Zgorzelec	1971-03-04	-10,4	-5,2	20,8	-14,8	4,4	5,2
4106	Zgorzelec	1978-12-31	-10,3	-7,1	13,7	7,6	17,9	3,2
4106	Zgorzelec	1985-02-11	-12,2	-8,5	15,3	-8,1	4,1	3,7
4106	Zgorzelec	1987-01-13	-20,3	-9,6	13,7	-15,1	5,2	10,7
4106	Zgorzelec	1987-01-14	-15,1	-9,6	13,7	-8,7	6,4	5,5
4106	Zgorzelec	1993-01-03	-13,0	-9,6	13,7	-1,6	11,4	3,4
4106	Zgorzelec	1996-12-28	-13,0	-7,1	13,7	-6,3	6,7	5,9
4106	Zgorzelec	2006-01-23	-13,0	-9,6	13,7	-4,4	8,6	3,4
4106	Zgorzelec	2009-12-19	-12,9	-7,1	13,7	-4,2	8,7	5,8
4106	Zgorzelec	2009-12-20	-11,5	-7,1	13,7	-7,3	4,2	4,4
5150	Jakuszyce	1987-01-15	-15,4	-10,7	8,5	-9,2	6,2	4,7
5150	Jakuszyce	1993-01-02	-15,8	-10,7	8,5	-10,2	5,6	5,1
5150	Jakuszyce	1996-01-25	-15,9	-10,7	8,5	-11,0	4,9	5,2
5150	Jakuszyce	1997-12-16	-13,4	-9,7	8,9	-7,6	5,8	3,7

Anhang 7: Ergebnisse des Tests der Reihung TN-TM-TX – Die fett und unterstrichen markierten Referenzwerte wurden genutzt, um den jeweiligen Wert zu ersetzen.

STATID	DATID	STAT_NAME	DATUM	TN	TN_Ref	TM	TM_Ref	TX	TX_Ref
169	2	Annaberg-Buchholz	1954-09-27	7,8	**4,2**	6,2	6,3	10,2	10,5
169	2	Annaberg-Buchholz	1957-05-20	8,8	**6,9**	6,7	**7,3**	12,9	13,4
198	4	Artern	1978-12-29	8,6	**0,3**	8	5,2	10,5	10,7
445	8	Bernburg/Saale (Nord)	1983-01-23	3,8	**2,4**	3,6	3,7	5,8	6,0
445	8	Bernburg/Saale (Nord)	1987-03-01	-3,6	-3,9	-3,7	**-2,9**	1	1,6
445	8	Bernburg/Saale (Nord)	1987-12-19	8	**6,9**	7,9	8,1	10,1	13,0
526	10	Bad Blankenburg	1954-09-27	9,8	**5,1**	8,4	8,7	13,9	13,3
526	10	Bad Blankenburg	1959-12-07	0,3	**-1,1**	-0,1	-0,1	2,7	2,5
526	10	Bad Blankenburg	1973-11-17	3,5	**1,5**	3,4	3,1	4,7	5,3
1050	27	Dresden-Hosterwitz	1957-02-21	4,1	**1,2**	3,1	2,6	5,6	5,9
1050	27	Dresden-Hosterwitz	1971-01-27	5,7	5,6	9	8,8	8,9	**13,1**
1441	41	Freiberg	1952-04-26	7,6	7,6	7,1	**7,7**	9	10,4
1441	41	Freiberg	1956-01-13	3,4	**0,9**	3,2	2,6	7,5	8,6
1441	41	Freiberg	1958-02-22	-3,2	**-5,8**	-4,5	-4,0	0	0,1
1441	41	Freiberg	1962-03-06	-3,7	-4,1	-3,9	**-3,4**	-0,7	-0,5
1441	41	Freiberg	1963-01-27	-4,5	-5,0	-4,6	**-4,2**	-2,7	-2,7
1612	46	Gera-Leumnitz	1958-12-23	2,1	2,3	4,1	**3,2**	4	3,9
1957	51	Halle-Kröllwitz	1996-12-31	-13,8	**-17,3**	-14	-14,8	-6	-11,9
1957	51	Halle-Kröllwitz	1999-03-16	1,4	1,4	0,4	**2,1**	3,8	4,3
1957	51	Halle-Kröllwitz	2001-03-24	1,5	2,8	5	5,2	4,8	**10,8**
1957	51	Halle-Kröllwitz	2001-03-25	1,5	**-0,5**	0,1	0,3	10,3	3,8
1957	51	Halle-Kröllwitz	2001-03-26	-0,7	**-3,1**	-1,6	-1,8	1,5	0,5
1957	51	Halle-Kröllwitz	2001-03-28	-4,8	-1,4	2,7	2,2	1,7	**5,5**
1957	51	Halle-Kröllwitz	2001-03-29	-1,1	1,2	6,8	6,5	5,9	**10,3**
2444	61	Jena (Sternwarte)	1971-01-26	5,7	4,5	7,9	7,4	4,8	**10,2**
2444	61	Jena (Sternwarte)	1987-12-07	-3,4	-3,4	-1,3	**-1,7**	-1,9	0,1
2444	61	Jena (Sternwarte)	1988-08-10	15,3	16,7	22,6	23,1	20,1	**29,9**
2878	70	Bad Lauchstädt	1951-07-25	16,5	**14,0**	16,4	16,6	18,9	19,6
2878	70	Bad Lauchstädt	1952-12-06	-1,3	**-3,8**	-2,1	-1,8	-1	0,5
2878	70	Bad Lauchstädt	1952-12-08	-1,8	**-3,7**	-2,9	-2,0	1	1,0
2878	70	Bad Lauchstädt	1954-12-25	0,8	**-0,9**	0,6	0,7	1,6	2,7
2878	70	Bad Lauchstädt	1955-01-01	-1,5	**-3,7**	-2,5	-2,0	0,7	0,2
2878	70	Bad Lauchstädt	1973-07-08	18,2	**15,7**	18,1	19,0	22,5	21,9
2878	70	Bad Lauchstädt	1973-07-12	17	**15,3**	16,9	17,3	20,9	20,7
2915	71	Lehesten/Thüringer Wald	1960-06-14	11,9	**10,8**	11,8	12,3	16,5	15,9

Fortsetzung Anhang 7: Ergebnisse des Tests der Reihung TN-TM-TX – Die fett und unterstrichen markierten Referenzwerte wurden genutzt, um den jeweiligen Wert zu ersetzen.

STATID	DATID	STAT_NAME	DATUM	TN	TN_Ref	TM	TM_Ref	TX	TX_Ref
3160	81	Vatterode-Gräfenstuhl	1977-12-04	1,6	**-3,1**	-0,6	-0,1	3,5	3,0
3166	82	Marienberg	2007-05-29	7,6	7,3	13,5	14,1	13	**15,2**
3821	93	Osterfeld	2007-07-29	15,8	**11,0**	14,9	14,7	25,1	16,5
3946	95	Plauen	1989-12-20	-7,5	3,8	6,1	6,8	-1	**9,5**
3946	95	Plauen	1998-02-22	1	6,1	8	8,1	7,3	**11,0**
4079	99	Rastenberg	1951-05-29	8,8	**7,4**	8,7	8,9	10,7	11,8
4079	99	Rastenberg	1955-03-07	-2,1	**-5,0**	-2,2	-2,3	2,2	1,7
4079	99	Rastenberg	1962-12-12	3,3	**0,8**	3,2	3,6	6,1	6,3
4149	100	Marienberg-Reitzenhain	1954-12-16	1,5	**-1,4**	-0,4	-0,9	4,4	3,5
4149	100	Marienberg-Reitzenhain	1956-12-23	-4,4	**-6,2**	-4,5	-5,2	-3,9	-4,1
4332	102	Saalfeld	1956-07-25	10,8	9,6	17,9	**14,5**	17,5	17,3
4464	105	Schleiz	1992-11-17	0,6	2,0	13,4	**3,1**	5,5	5,5
4464	105	Schleiz	2001-04-09	2	3,4	0	**7,0**	11,6	10,7
4464	105	Schleiz	2001-04-11	3,8	3,7	0	**7,2**	9,3	10,0
4464	105	Schleiz	2001-04-15	2,1	-1,4	0	**2,0**	3,2	3,6
4464	105	Schleiz	2001-04-16	1,9	2,5	0	**4,3**	6,7	7,2
5419	124	Weimar	1958-02-01	-2,4	-2,9	-2,8	**-1,8**	0	2,6
5419	124	Weimar	1964-12-03	-1,6	-2,2	0,4	0,0	0,3	**1,2**
5419	124	Weimar	2003-12-04	-999	1,7	2,9	3,4	0	**5,6**
5419	124	Weimar	2003-12-05	-999	2,1	2,3	2,7	0	**4,3**
5419	124	Weimar	2003-12-06	-999	1,0	2,7	3,0	0	**6,2**

Anhang 8: Langjährige Abflussbildungsbilanzen als Ergebnis der meteorologischen Eingangsdaten KNK und RDS für das Pegelgebiet Oehlisch im Zeitraum 1967 bis 2005

Komponente	KNK		RDS	
	mm/a	Prozent	mm/a	Prozent
Niederschlagsdargebot	804,5	100,0	765,4	100,0
Reale Verdunstung	601,1	74,7	570,4	74,5
Landoberflächenabfluss	38,5	4,8	34,2	4,5
Hypodermischer Abfluss	7,3	0,9	7,0	0,9
Schneller Grundwasserabfluss	95,3	11,8	103,3	13,5
Langsamer Grundwasserabfluss	63,8	7,9	51,9	6,8
Speicheränderung	-0,5	-0,1	-0,4	-0,1
Gesamtabfluss	204,9	25,5	196,4	25,7

Anhang 9: Langjährige Abflussbildungsbilanzen als Ergebnis der meteorologischen Eingangsdaten KNK und RDS für das Pegelgebiet Merzdorf im Zeitraum 1967 bis 2005

Komponente	KNK		RDS	
	mm/a	Prozent	mm/a	Prozent
Niederschlagsdargebot	682,1	100,0	655,2	100,0
Reale Verdunstung	505,6	74,1	501,7	76,6
Landoberflächenabfluss	23,7	3,5	21,4	3,3
Mischkanalisation	1,7	0,2	1,6	0,2
Hypodermischer Abfluss	8,0	1,2	7,0	1,1
Drainage	41,6	6,1	37,3	5,7
Schneller Grundwasserabfluss	32,5	4,8	31,0	4,7
Langsamer Grundwasserabfluss	70,5	10,3	57,0	8,7
Speicheränderung	-1,1	-0,2	-1,2	-0,2
Gesamtabfluss	178,1	26,1	155,2	23,7

Anhang 10: Langjährige Abflussbildungsbilanzen als Ergebnis der meteorologischen Eingangsdaten KNK und RDS für das Pegelgebiet Jänkendorf im Zeitraum 1967 bis 2005

Komponente	KNK		RDS	
	mm/a	Prozent	mm/a	Prozent
Niederschlagsdargebot	797,1	100,0	763,3	100,0
Reale Verdunstung	622,7	78,1	579,3	75,9
Landoberflächenabfluss	15,9	2,0	13,6	1,8
Hypodermischer Abfluss	8,3	1,0	8,1	1,1
Drainage	15,4	1,9	15,3	2,0
Schneller Grundwasserabfluss	95,1	11,9	93,9	12,3
Langsamer Grundwasserabfluss	40,4	5,0	53,2	7,0
Speicheränderung	-0,1	0,0	0,0	0,0
Gesamtabfluss	174,7	21,9	184,1	24,1

Anhang 11: Langjährige Abflussbildungsbilanzen als Ergebnis der meteorologischen Eingangsdaten KNK und RDS für das Pegelgebiet Johanngeorgenstadt 2 im Zeitraum 1967 bis 2005

Komponente	KNK		RDS	
	mm/a	Prozent	mm/a	Prozent
Niederschlagsdargebot	1408,0	100	1374,5	100
Reale Verdunstung	640,9	45,5	625,2	45,5
Landoberflächenabfluss	22,8	1,6	22,9	1,7
Hypodermischer Abfluss	69,8	5,0	69,4	5,1
Schneller Grundwasserabfluss	422,7	30,0	422,0	30,7
Langsamer Grundwasserabfluss	247,0	17,5	229,7	16,7
Speicheränderung	5,0	0,4	5,5	0,4
Gesamtabfluss	762,3	54,1	744,0	54,1

Anhang 12: Langjährige Abflussbildungsbilanzen als Ergebnis der meteorologischen Eingangsdaten KNK und RDS für das Pegelgebiet Markersbach 1 im Zeitraum 1967 bis 2005

Komponente	KNK		RDS	
	mm/a	Prozent	mm/a	Prozent
Niederschlagsdargebot	1491,4	100,0	1446,9	100,0
Reale Verdunstung	796,5	53,4	789,7	54,6
Landoberflächenabfluss	4,3	0,3	3,9	0,3
Hypodermischer Abfluss	184,8	12,4	171,4	11,8
Schneller Grundwasserabfluss	378,8	25,4	369,9	25,6
Langsamer Grundwasserabfluss	121,2	8,1	106,2	7,3
Speicheränderung	5,9	0,4	5,7	0,4
Gesamtabfluss	689,1	46,2	651,5	45,0

Anhang 13: Langjährige Abflussbildungsbilanzen als Ergebnis der meteorologischen Eingangsdaten KNK und RDS für das Pegelgebiet Aue 1 im Zeitraum 1967 bis 2005

Komponente	KNK		RDS	
	mm/a	Prozent	mm/a	Prozent
Niederschlagsdargebot	1251,9	100,0	1187,3	100,0
Reale Verdunstung	690,9	55,2	654,3	55,1
Landoberflächenabfluss	34,5	2,8	36,0	3,0
Hypodermischer Abfluss	71,4	5,7	66,0	5,6
Schneller Grundwasserabfluss	340,1	27,2	336,6	28,4
Langsamer Grundwasserabfluss	112,3	9,0	91,2	7,7
Speicheränderung	4,0	0,3	4,2	0,4
Gesamtabfluss	558,3	44,6	529,8	44,6

Anhang 14: Langjährige Abflussbildungsbilanzen als Ergebnis der meteorologischen Eingangsdaten KNK und RDS für das Pegelgebiet Dohna im Zeitraum 1967 bis 2005

Komponente	KNK		RDS	
	mm/a	Prozent	mm/a	Prozent
Niederschlagsdargebot	974,3	100,0	931,2	100,0
Reale Verdunstung	557,6	57,2	549,2	59,0
Landoberflächenabfluss	17,0	1,7	13,7	1,5
Hypodermischer Abfluss	60,2	6,2	49,5	5,3
Drainage	0,2	0,0	0,2	0,0
Schneller Grundwasserabfluss	264,3	27,1	263,0	28,2
Langsamer Grundwasserabfluss	73,9	7,6	54,4	5,8
Speicheränderung	1,7	0,2	1,8	0,2
Gesamtabfluss	415,5	42,7	380,8	40,9

Herausgeber:
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: LfULG@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/LfULG
Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des
Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft.

Autoren:
Prof. Dr. Christian Bernhofer, Thomas Pluntke, Dr. Klemens Barfus, Majana Heidenreich, Dr. Rico Kronenberg, Corina Hauffe, Dr. Michael Wagner, Dr. Robert Schwarze, Benjamin Gutzmann
Technische Universität Dresden
Institut für Hydrologie und Meteorologie
Pienner Str. 23, 01737 Tharandt
Telefon: + 49 351 463-31343 oder -31340
Telefax: +49351 463-31302
E-Mail: meteorologie@tu-dresden.de

Redaktion:
Dr. Johannes Franke
LfULG; Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-5116
Telefax: + 49 351 2612-5199
E-Mail: johannes.franke@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:
04.07.2019

ISSN:
1867-2868

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

Verteilerhinweis
Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.
Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

Täglich für
ein gutes Leben.
www.lfulg.sachsen.de