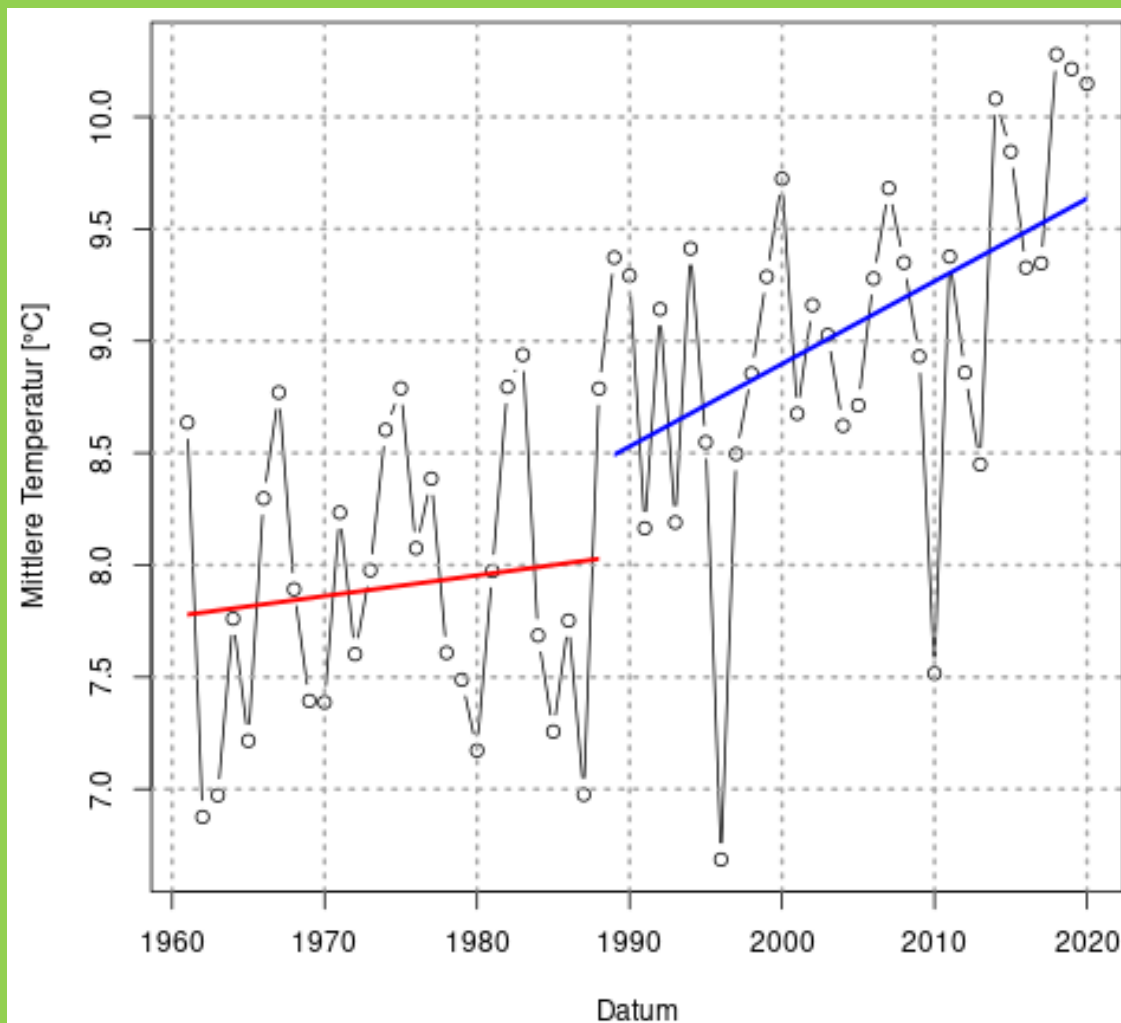


# Klima-Referenzdatensatz Sachsen 1961 - 2020

Schriftenreihe, Heft 18/2022



# Erzeugung eines lückenlosen, stationsbasierten und rasterbasierten Klima- Referenzdatensatzes für Sachsen für den Zeitraum 1961 bis 2020

Dr. Philipp Körner (TU Dresden), M.Sc. Ivan Vorobevskii (TU Dresden),  
Dr. Rico Kronenberg (TU Dresden), M.Sc. Ahmed Homoudi (TU Dresden)

Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Erzeugung eines stationsbasierten Klima-Referenzdatensatzes</b> .....	<b>11</b>
2.1	Beschaffung und Aufbereitung der stationsbasierten Rohdaten.....	11
2.1.1	Messnetze.....	12
2.1.2	Meteorologische Größen.....	12
2.1.3	Aufbereitung.....	13
2.2	Feststellung und Visualisierung der originalen Datenverfügbarkeit.....	14
2.3	Anwendung von Algorithmen zur Lückenfüllung und Homogenitätsprüfung.....	24
2.3.1	Beschreibung der Lückenfüllung.....	24
2.3.2	Beschreibung und Auswertung der Kreuzvalidierung.....	24
2.3.3	Homogenitätsanalyse.....	25
2.3.3.1	Minimumtemperatur (TN).....	26
2.3.3.2	Mittlere Temperatur (TM).....	27
2.3.3.3	Maximumtemperatur (TX).....	29
2.3.3.4	Relative Luftfeuchte (RF).....	30
2.3.3.5	Niederschlag (RR).....	32
2.3.3.6	Sonnenscheindauer (SD).....	34
2.3.3.7	Mittlere Windgeschwindigkeit (FF).....	36
2.3.3.8	Maximale Windgeschwindigkeit (FM).....	38
2.3.3.9	Dampfdruck (DD).....	40
2.3.3.10	Schneehöhe (SN).....	42
2.3.4	Zusammenfassung der Homogenitätsanalyse.....	44
2.4	Berechnung abgeleiteter Größen.....	45
2.5	Bereitstellung des stationsbasierten Klima-Referenzdatensatzes.....	45
<b>3</b>	<b>Erzeugung eines rasterbasierten Datensatzes</b> .....	<b>45</b>
3.1	Erzeugung des rasterbasierten Klima-Referenzdatensatzes Sachsen.....	45
3.1.1	Methodik zur Berechnung der Rasterdatensätze.....	46
3.1.2	Validierung.....	46
3.1.3	Homogenität.....	47
3.1.4	Ergebnisse.....	48
3.2	Erstellung einer rasterbasierten Starkregenanalyse.....	50
3.2.1	Überblick.....	51
3.2.2	Regenhöhe.....	52
3.2.3	Überschreitungstage.....	52
3.2.4	Mittlere Intensität der Ereignisse.....	55
3.2.5	Auftrittshäufigkeit.....	63
3.2.6	Kerngebiete der Änderung.....	67
3.2.7	Auftrittshäufigkeit - Transekte.....	71

3.2.8	Zusammenfassung und Ausblick .....	81
3.3	Erzeugung eines Rasterdatensatzes für abgesetzte Niederschläge in Sachsen, 1961-2020 .....	83
3.3.1	Eingangsgrößen .....	83
3.3.2	Ergebnisse .....	84
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>86</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Räumliche Ausdehnung des Mitteldeutschen Kernensembles (LAU, 2020).....	11
Abbildung 2: Verlauf der originalen Daten der relativen Luftfeuchte der Station Wiesenburg (DWD ID: 5546) .....	13
Abbildung 3: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die mittlere Temperatur in Sachsen .....	15
Abbildung 4: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die mittlere Windgeschwindigkeit in Sachsen .....	16
Abbildung 5: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die maximalen Windgeschwindigkeit in Sachsen .....	17
Abbildung 6: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für den Niederschlag in Sachsen .....	18
Abbildung 7: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die Schneehöhe in Sachsen .....	19
Abbildung 8: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die Schneehöhe in Sachsen .....	20
Abbildung 9: Originale Datenverfügbarkeit der meteorologischen Messgrößen.....	23
Abbildung 10: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für TN.....	26
Abbildung 11: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für TN.....	27
Abbildung 12: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für TM.....	28
Abbildung 13: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für TM.....	28
Abbildung 14: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für TX.....	29
Abbildung 15: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für TX.....	30
Abbildung 16: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für RF.....	31
Abbildung 17: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für RF.....	32
Abbildung 18: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für RR.....	33
Abbildung 19: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für RR.....	34
Abbildung 20: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für SD.....	35
Abbildung 21: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für SD.....	36
Abbildung 22: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für FF.....	37
Abbildung 23: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für FF.....	38
Abbildung 24: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für FM.....	39
Abbildung 25: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für FM.....	40
Abbildung 26: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für DD.....	41
Abbildung 27: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für DD.....	42
Abbildung 28: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für SN.....	43
Abbildung 29: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für SN.....	44
Abbildung 30: Mittlere Werte für den Zeitraum 1961-2020 für die Temperatur, relative Feuchte und den Niederschlag.....	48
Abbildung 31: Mittlere Werte für den Zeitraum 1961-2020 für die Windgeschwindigkeit, Verdunstung und Globalstrahlung.....	50
Abbildung 32: Planungsregionen, Landkreise und kreisfreie Städte des Freistaates Sachsen .....	51
Abbildung 33: Starkregen R90p, R95p – Regenhöhe für 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	52
Abbildung 34: Starkregen R90p - Überschreitungstage für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	53

Abbildung 35: Starkregen R95p - Überschreitungstage für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	54
Abbildung 36: Box-Whisker-Plot für die flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p, R95p – Überschreitungstage für Sachsen .....	55
Abbildung 37: Starkregen R90p – mittlere Intensität für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	56
Abbildung 38: Starkregen R90p – mittlere Intensität für die Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 für Sachsen, Kalenderjahr .....	57
Abbildung 39: Starkregen R90p – mittlere Intensität für die Änderung der Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 gegenüber 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	58
Abbildung 40: Starkregen R95p – mittlere Intensität für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	59
Abbildung 41: Starkregen R95p – mittlere Intensität für die Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 für Sachsen, Kalenderjahr .....	60
Abbildung 42: Starkregen R95p – mittlere Intensität für die Änderung der Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 gegenüber 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	61
Abbildung 43: Box-Whisker-Plot für die flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p, R95p – mittlere Intensität für Sachsen, Kalenderjahr .....	62
Abbildung 44: Starkregen R90p – Auftrittshäufigkeit für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden .....	64
Abbildung 45: Starkregen R95p – Auftrittshäufigkeit für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden .....	65
Abbildung 46: Box-Whisker-Plot für die flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p, R95p – Auftrittshäufigkeit für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden .....	66
Abbildung 47: Kerngebiete der Änderung von Starkregen R90p, R95p - Überschreitungstage für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	68
Abbildung 48: Kerngebiete der Änderung für Starkregen R90p, R95p – mittlere Intensität für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	68
Abbildung 49: Kerngebiete der Änderung für Starkregen R90p, R95p - mittlere Intensität für die Änderung der Dekaden gegenüber 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	69
Abbildung 50: Kerngebiete der Änderung von Starkregen - Auftrittshäufigkeit R90p, R95p – für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden .....	70
Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt Nord-Süd in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	73
Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt Nord-Süd in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	74
Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt West-Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	75
Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt West-Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	76

Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt Zentral in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	77
Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt Zentral in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	78
Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	79
Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte .....	80
Abbildung 59: Mittlere jährliche Summe der Nebeldeposition 1961-2020 .....	84
Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der Jahressumme der Nebeldeposition nach Höhenstufe .....	85
Abbildung 61: Mittlerer Jahresgang der Nebeldeposition nach Höhenstufen .....	85

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Datenverfügbarkeit der Messnetze .....	12
Tabelle 2: Übersicht über die zu füllenden meteorologischen Zeitreihen .....	13
Tabelle 3: Statistische Kennwerte für die Lückenfüllung der meteorologischen Größen .....	25
Tabelle 4: Kennwerte der lagekorrespondierenden Validierung (tägliche Auflösung).....	47
Tabelle 5: Kennwerte der lagekorrespondierenden Validierung (monatliche Auflösung).....	47
Tabelle 6: Starkregen R90p und R95p – durchschnittliche Anzahl der Überschreitungstage sowie deren Änderung gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr.....	54
Tabelle 7: Starkregen R90p und R95p – durchschnittliche mittlere Intensität sowie deren Änderung gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr .....	62
Tabelle 8: Starkregen R90p und R95p – durchschnittliche Änderung der Auftrittshäufigkeit 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden .....	66



## Abkürzungsverzeichnis

AMN	Agrarmeteorologisches Messnetz Sachsen
BIAS	mittlere Abweichung
CHMI	Tschechisches Hydrometeorologisches Institut
DD	Dampfdruck
doy	doy of the year (Tag des Jahres)
DWD	Deutscher Wetterdienst
FF	mittlere Windgeschwindigkeit
FM	Maximum der Windgeschwindigkeit
IMGW	Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (Polen)
KLIWES	Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen
LAU	Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
LTV	Landestalsperrenverwaltung Sachsen
MAE	mean absolute error
MDK	Mitteldeutsches Kernensemble
R <sup>2</sup>	quadrierter Korrelationskoeffizient nach Pearson
R90p	90. Perzentil des Niederschlages
R95p	95. Perzentil des Niederschlages
RaKliDa	Rasterklimadaten
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem
RF	relative Luftfeuchte
RG	Globalstrahlung
RK	Niederschlag, korrigiert
RMSE	root mean squared error
RR	Niederschlag, unkorrigiert
SD	Sonnenscheindauer
SN	Schneehöhe
snht	Standard Normal Homogeneity Test
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TM	Mittlere Temperatur
TN	Minimum der Temperatur
TX	Maximum der Temperatur

# 1 Einleitung

Der Jahreswechsel von 2020 zu 2021 markiert den Abschluß der Klimanormalperiode 1991-2020. Dies ist Anlass, die Entwicklung des Klimas aus unterschiedlichen Blickwinkeln verschiedener Anwendungsbereiche zu betrachten. Dieser Bericht stellt dar, wie die Datengrundlage als Basis für diese Betrachtungen im Zeitraum zweier aufeinanderfolgender Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 aufbereitet und verdichtet wird. Das betrifft in erster Linie meteorologische Stationsdaten. Diese können neben fehlerhaften Daten, etwa durch Fehler bei der Datenaufnahme, der Datenübermittlung durch Beobachter oder Computer, auch Datenlücken enthalten. Häufig decken sie zudem nur einen kleineren Teil des Analysezeitraumes ab, etwa da die Messreihe später begann oder aus verschiedenen Gründen die Messkampagne wieder aufgegeben wurde. All das führt dazu, dass die zahlreichen Niederschlags- und Klimastationen den Untersuchungszeitraum nicht vollständig abdecken. Um für die angesprochenen Klimaanalysen dennoch vollständige Zeitreihen nutzen zu können, beschäftigt sich der erste Teil dieses Berichtes mit dem Erstellen lückenloser Zeitreihen. Er versteht sich als eine Ergänzung, Erweiterung und Verbesserung des "Klima-Referenzdatensatz Sachsen (1961-2015)" (Bernhofer, 2019). Durch eine neu entwickelte Methodik (Körner et al., 2018) ist es möglich, deutlich größere Datenlücken bei einem deutlich geringeren Schätzfehler zu füllen. Eine Darstellung des zeitlichen Verlaufes des Schätzfehlers zeigt interessante Zusammenhänge zur Datenverfügbarkeit.

Der zweite Teil des Berichtes beschreibt die Methodik und damit bestimmten Rasterdaten, die auf Grundlage des ersten Berichtsteiles erzeugt wurden. Für Sachsen in den KLIWES-Grenzen (Schwarze, 2011) werden hier mittels Thin plate splines smoothing und Kriging in Abhängigkeit der Geografischen Länge, Breite und Höhe über dem Meeresspiegel Rasterdaten der meteorologischen Größen erzeugt. Die verbesserte verwendete Methodik, die höhere räumliche Auflösung (100 Meter vs. 1.000 Meter bisher) und der Abschluss der Klimanormalperiode 1991-2020 machen die Ergebnisse zu einer wertvollen Quelle für anschließender Analysen.

Eine Analyse der rasterbasierten Starkregenanalyse für Sachsen, 1961-2020, ist ebenfalls Teil dieses Berichtes und schließt an die Starkregenereignisse von 1961 bis 2015 (Bernhofer, 2017b) an.

Ebenso mit aktualisierter Methodik (Körner et al., 2020 und Körner et al., 2021) und erweitertem Zeitraum wird die Berechnung des Nebelniederschlags für Sachsen (Bernhofer, 2017a) fortgeführt. Der Zeitraum wird von 1967-2015 auf 1961-2020 erweitert, wodurch hier ebenfalls zwei vollständige Klimanormalperioden abgedeckt sind. Die Methodik zur Berechnung der Nebeldeposition wurde im Vergleich zur vorherigen Studie komplett überarbeitet, außerdem wurde durch die oben genannte Methodik eine Verdichtung der Eingangsdaten durchgeführt.

Dieser Bericht enthält die Beschreibung der angewendeten Methoden sowie statistische Auswertungen und Maßzahlen. Abgerundet werden die Ergebnisse durch einige ausgewählte Kartendarstellungen. Die kompletten Datensätze dieses Berichtes der Jahre 1961-2020 werden im „Regionalen Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen unter [www.rekis.org](http://www.rekis.org) frei zur Verfügung gestellt.

## 2 Erzeugung eines stationsbasierten Klima-Referenzdatensatzes

In diesem Abschnitt wird beschrieben mithilfe welcher Ausgangsdaten und mit welcher Methodik der stationsbasierte Klima-Referenzdatensatz erzeugt wird. Ausgangspunkt sind die Eingangsdaten, welche einerseits als Zielgröße lückengefüllt werden und andererseits als Prädiktoren dienen, um andere Stationen und meteorologischen Messgrößen zu füllen. Zielgröße ist in diesem Zusammenhang die spezifische Zeitreihe einer bestimmten meteorologischen Messgrößer einer Station, die es zu füllen gilt. Prädiktoren sind andere Zeitreihen, die Daten aufweisen, um die Zielgröße entsprechend auffüllen zu können. Ziel ist es, die in Abschnitt 2.1 genannten Zeitreihen der meteorologischen Messgrößen im Gebiet des Mitteldeutschen Kernensembles (MDK, Struve et al., 2020) für den Zeitraum 1961 bis 2020 in täglicher Auflösung lückenlos aufzufüllen.

### 2.1 Beschaffung und Aufbereitung der stationsbasierten Rohdaten

Das MDK-Gebiet (Abbildung 1) umfasst einen rechteckigen Raumausschnitt um die mitteldeutschen Bundesländer Thüringen, Sachsen-Anhalt und Sachsen mit einem räumlichen Puffer. Dadurch beinhaltet es, zusätzlich zu den genannten, Teilgebiete der Bundesländer Brandenburg, Berlin, Niedersachsen, Hessen und Bayern. Außerdem sind Gebiete der Republik Polen sowie der Tschechischen Republik im untersuchten Raumausschnitt enthalten.



Abbildung 1: Räumliche Ausdehnung des Mitteldeutschen Kernensembles (LAU, 2020)

### 2.1.1 Messnetze

Zur Bearbeitung steht eine umfangreiche Datengrundlage an Tagesdaten aus verschiedenen Messnetzen im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Diese umfasst zum einen die Daten der Nationalen Wetterdienste Deutschlands (Deutscher Wetterdienst, DWD), Polens (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, deutsch: Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft, IMGW) sowie Tschechiens (Český hydrometeorologický ústav, deutsch: Tschechisches Hydrometeorologisches Institut, CHMI). Zum anderen stehen Daten der Landesmessnetze aus Thüringen, Sachsen-Anhalt und Sachsen zur Verfügung. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Daten der einzelnen Messnetze.

**Tabelle 1: Übersicht über die Datenverfügbarkeit der Messnetze**

Messnetz	Maximale Datenverfügbarkeit	Anzahl Messreihen
DWD (Deutschland)	1961-2020	20.981
CHMI (Tschechien)	1961-2020	6.703
IMGW (Polen)	1961-2018	241
LTV Sachsen	1961-2020	57
AMN Sachsen	1993-2020	148
Landesmessnetze Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen (ohne LTV und AMN Sachsen)	1961-2020	1.534

### 2.1.2 Meteorologische Größen

Das Elementspektrum der zu füllenden Zeitreihen umfasst die folgenden zehn meteorologischen Standardmessgrößen in täglicher Auflösung:

- Minimumtemperatur (TN), Maximumtemperatur (TX) und Mitteltemperatur (TM), jeweils der Luft in °C in zwei Metern Höhe über Grund
- Mittel der relativen Luftfeuchte (RF) in % in zwei Metern über Grund
- Niederschlag (RR) in mm
- Sonnenscheindauer (SD) in h
- Mittel (FF) und Maximum (FM) der Windgeschwindigkeit in zehn Metern Höhe in m/s
- Mittel des Dampfdrucks (DD) in hPa
- Schneehöhe (SN) in cm

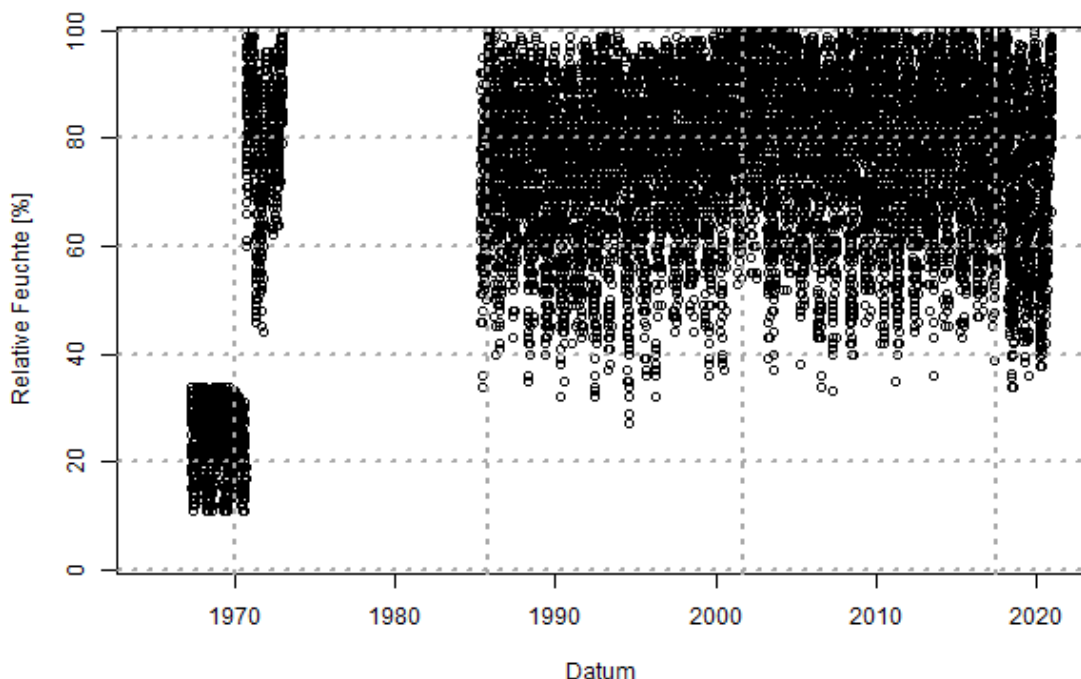
Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die zu füllenden meteorologischen Zeitreihen. Dargestellt sind lediglich die Stationen des MDK-Gebietes und der Messnetze, die lückengefüllt werden.

**Tabelle 2: Übersicht über die zu füllenden meteorologischen Zeitreihen**

Meteorologische Größe	Anzahl Messstationen	Messnetze
TM	370	DWD, CHMI, IMGW, AMN
TN	331	DWD, CHMI, IMGW
TX	331	DWD, CHMI, IMGW
RF	365	DWD, CHMI, IMGW, AMN
RR	2.131	DWD, CHMI, IMGW, LTV, AMN
SD	199	DWD, CHMI, IMGW
FF	195	DWD, CHMI, IMGW, AMN
FM	130	DWD, CHMI, IMGW
DD	330	DWD, CHMI, IMGW
SN	1.998	DWD, CHMI, IMGW

### 2.1.3 Aufbereitung

Die Daten der nationalen Wetterdienste werden durch die Standardroutinen der Wetterdienste sowie durch eine ReKIS-interne Routine geprüft. Unplausible Daten werden hierbei entfernt. Jedoch ist es trotz sorgfältiger Prüfung möglich, dass fehlerhafte Werte durch diese Prüfungen nicht erkannt werden. Ein Beispiel, welches erst durch Prüfung des ersten Tests der lückengefüllten Daten erkannt werden konnte, ist die Zeitreihe der relativen Luftfeuchte der DWD-Station "Wiesenburg" (ID 5546). Die ersten vier Jahre der Zeitreihe (Abbildung 2) sind unplausibel. Während die Daten selbst im Wertebereich der relativen Luftfeuchtigkeit liegen (0 bis 100%), ist dieser Abschnitt der Zeitreihe insgesamt außerhalb der Plausibilitäts-grenzen, da er im Bereich von ca. 10 bis maximal 40% Luftfeuchte schwankt. Möglich ist hier, dass etwa andere Messgrößen Eingang in die Datenbank des DWD gefunden haben. Wurden derartige Fehler entdeckt, wurden die Daten ebenfalls vor der endgültigen Anwendung der Lückenfüllung entfernt.



**Abbildung 2: Verlauf der originalen Daten der relativen Luftfeuchte der Station Wiesenburg (DWD ID: 5546)**

Die Daten der Landesämter liegen auf sehr unterschiedliche Arten vor. Insgesamt 16 verschiedene Landesmessnetze aus Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen in stündlicher und täglicher Auflösung finden Eingang als Prädiktoren in die Lückenfüllung. Mit Ausnahme des Agrarmetrologischen Messnetzes sowie des Niederschlagsmessnetzes der LTV werden die Zeitreihen der Landesmessnetze selbst nicht lückengefüllt. Eine solche zusätzliche Lückenfüllung wäre sicher anzustreben, erforderte jedoch intensivere Arbeiten mit den unterschiedlichen Datenformaten und der Qualität der Daten selbst. Stundendaten wurden auf Tageswerte aggregiert. Hierfür wurde der Mittelwert verwendet, mit zwei Ausnahmen: Niederschlag wurde aufsummiert, für Windrichtungsdaten wurde der resultierende Vektor verwendet.

Alle Daten, ob die der nationalen Wetterdienste oder die der Landesämter, wurden stationsbasiert, unterteilt nach der meteorologischen Messgröße für die Jahre 1951 bis 2020 aggregiert. Es werden alle Stationen verwendet, die in diesem Zeitraum wenigstens drei Jahre Daten aufweisen. Alle anderen Daten werden nicht verwendet. Die Erweiterung von 1961 auf 1951 im Rahmen der Lückenfüllung erfolgt, um die Qualität derselben durch mehr Daten zum Anlernen der Modelle zu erhöhen. Die Lückenfüllung, in Abschnitt 2.3 beschrieben, erfolgt für die Jahre 1961 bis 2020.

## **2.2 Feststellung und Visualisierung der originalen Datenverfügbarkeit**

Die originale Datenverfügbarkeit wird durch zwei Arten sichtbar gemacht. Zum einen als zeitlicher Verlauf der Datenverfügbarkeit über den Beobachtungszeitraum, zum anderen räumlich verteilt über das Untersuchungsgebiet aufgeteilt in Zeitscheiben.

Zunächst soll die räumliche Darstellung gezeigt werden. Um hier einen visuellen Effekt zur räumlichen Unterscheidbarkeit der Stationsverfügbarkeit zu erreichen, wurde wie folgt vorgegangen: Im ersten Schritt wurde für jede Station die mittlere Datenverfügbarkeit für jede der sechs Dekaden (1961-1970 bis 2011-2020) ermittelt. Hierbei werden Werte von 0 bis 1 bestimmt, wobei 0 keine Datenverfügbarkeit und 1 eine Datenverfügbarkeit über die gesamten 10 Jahre ohne einen einzigen Fehlwert bedeutet. Ein Wert von 0,05 beispielsweise bedeutet, dass innerhalb der Dekade die Station lediglich für ein halbes Jahr Messdaten aufweist. Hier wirken sich Änderungen im Messnetz der Schneehöhe besonders aus: Anfang der 2010er Jahre wurde dazu übergegangen, beim Großteil der automatischen Stationen im Sommerhalbjahr gar keine Schneehöhe mehr zu messen. Damit reduziert sich die mittlere Stationsverfügbarkeit, zusätzlich zum ausgedünnten Messnetz.

Im Anschluss an die Bestimmung der dekadischen Datenverfügbarkeit wurde für jeden 100 mal 100 Meter Rasterpunkt für Sachsen bestimmt, ob er im Radius von 25 km einer jeden Station liegt. Die 25 km sind iterativ gewählt worden. Beim Niederschlag, der die höchste Messnetzdichte aufweist, wäre ein Abstand von 10 Kilometern gerechtfertigt gewesen, bei der maximalen Windgeschwindigkeit als dünnstes Messnetz wäre ein Abstand von 50 Kilometern optisch eventuell ansprechender. Die 25 Kilometer sind somit ein Kompromiss über alle abgebildeten Elemente.

Im letzten Schritt wird die dekadische Datenverfügbarkeit aller Stationen im 25 km Abstand für jeden Punkt in Sachsen aufsummiert. Je nach Element können hierbei Werte zwischen 0 (im Umkreis von 25 km um diesen Punkt gibt es keine Stationen, die das entsprechende Element in der betreffende Dekade misst) und bis zu 60 erreicht werden.

Dargestellt werden gemessene Klimaelemente. Abgeleitete Elemente haben die jeweils geringste Datenverfügbarkeit ihrer abhängigen Größen. Für die Temperatur- und Feuchtigkeitsgrößen mittlere Temperatur, Minimumtemperatur, Maximumtemperatur, relative Luftfeuchte und Dampfdruck wird stellvertretend die mittlere Temperatur dargestellt. Die Abweichungen zu den anderen Größen ist hier minimal, da an den allermeisten Stationen alle Temperaturgrößen sowie die relative Feuchte gemeinsam gemessen werden und der Dampfdruck sich daraus ableitet. Zusätzlich zu den Dekaden ist als siebte Abbildung die Datenverfügbarkeit über alle Dekaden für Sachsen nach der Lückenfüllung dargestellt.

Hinweis: Dunkles Orange (links in der Legende) steht für eine Stationsverfügbarkeit von null, d. h. im Umkreis von 25 Kilometern gibt es keine Messungen der entsprechenden Größe im jeweiligen Zeitraum

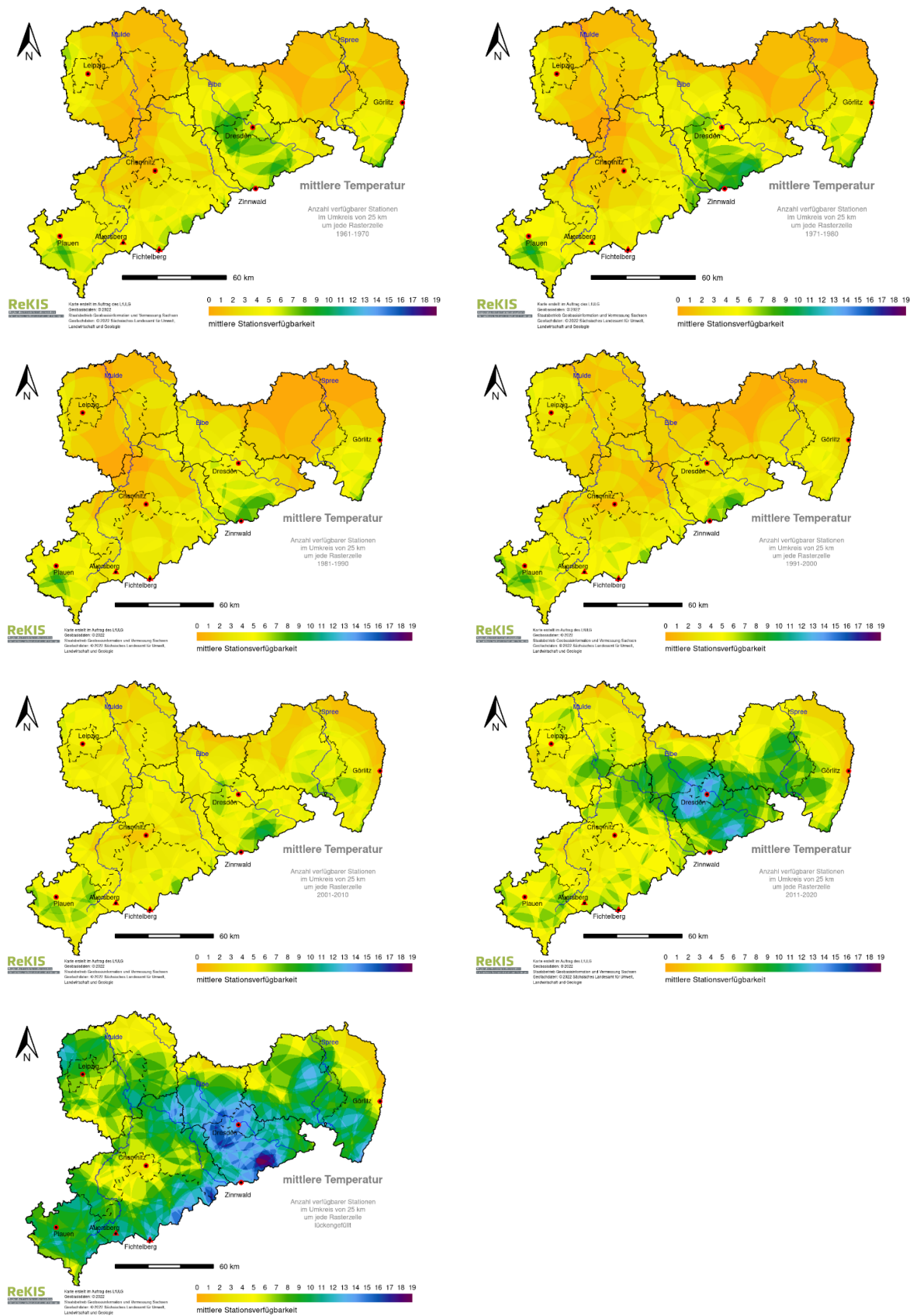
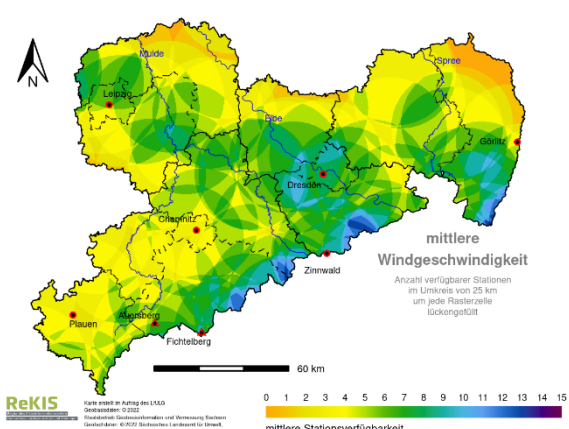
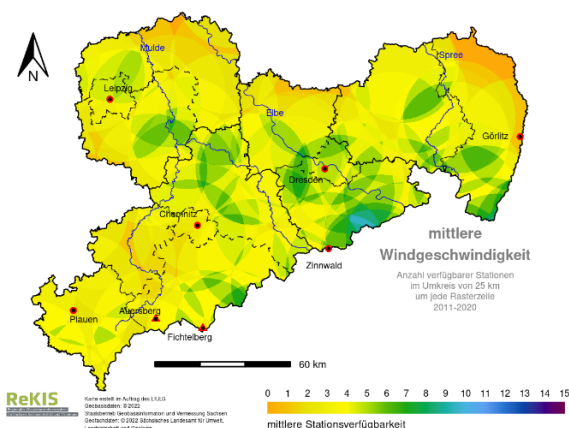
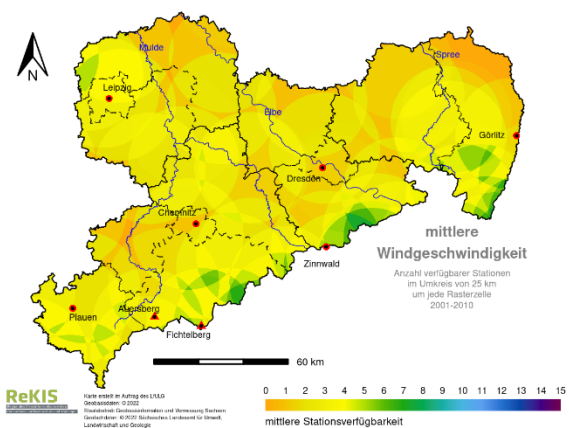
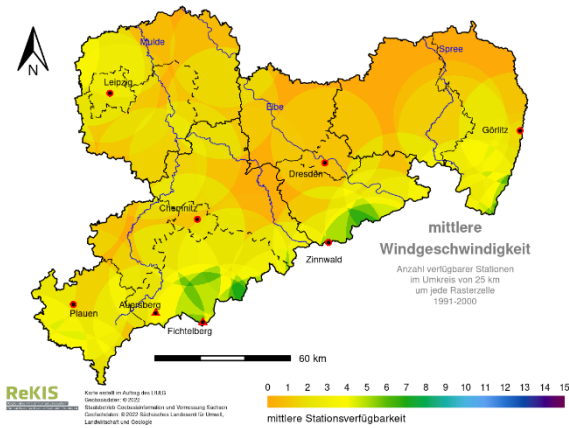
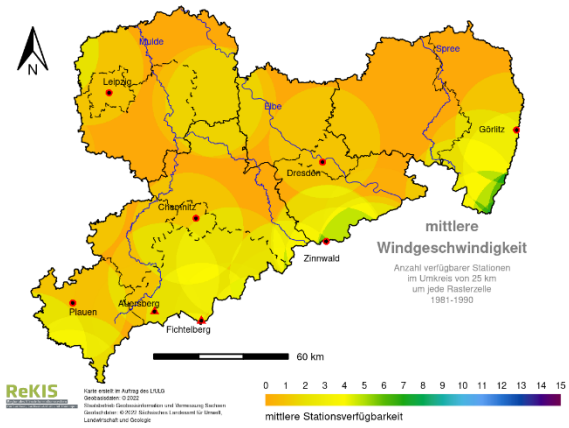
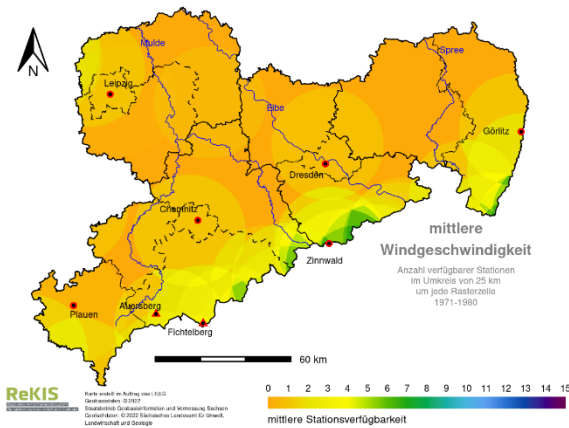
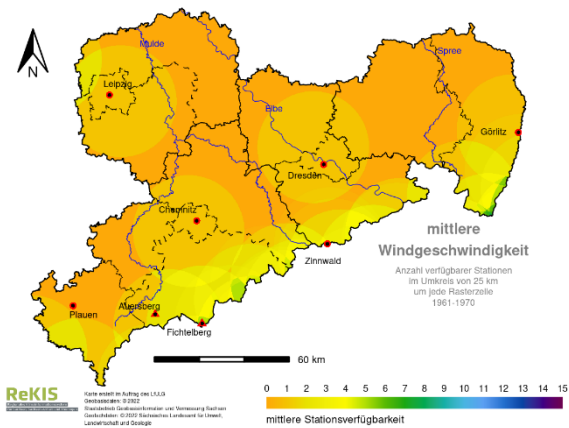
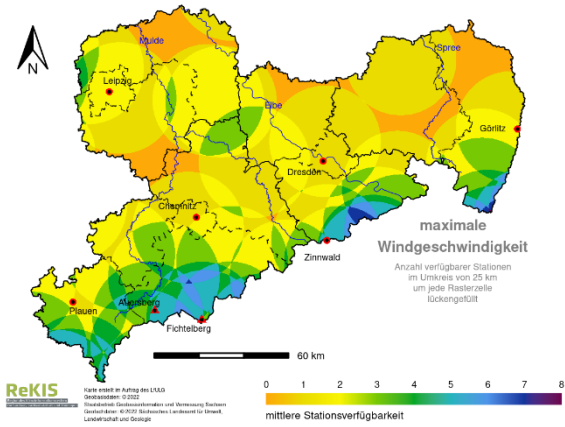
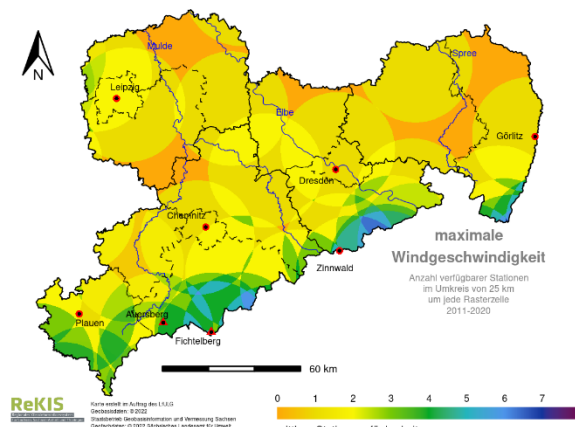
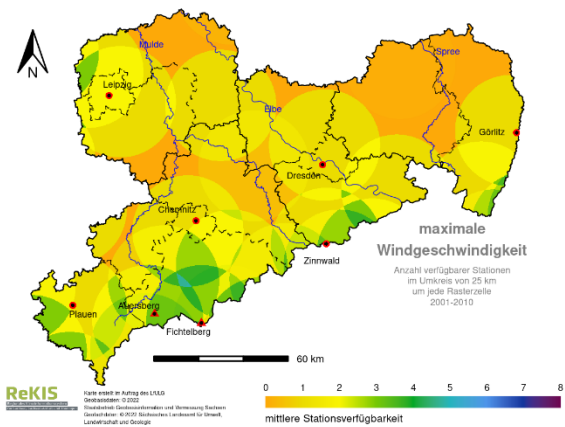
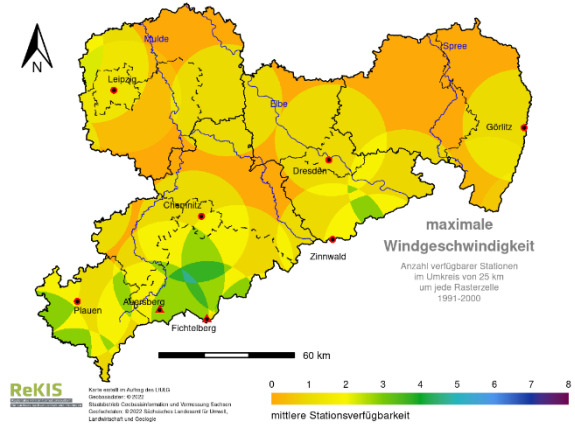
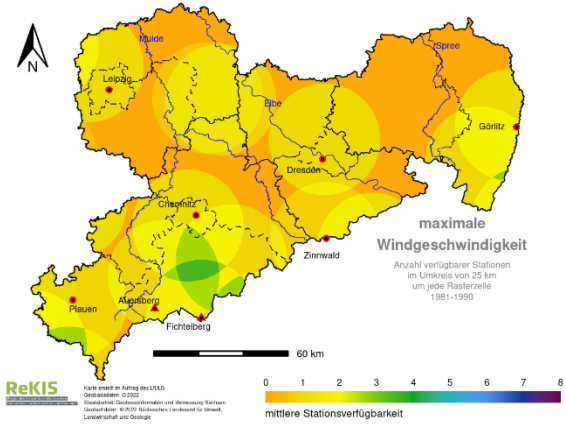
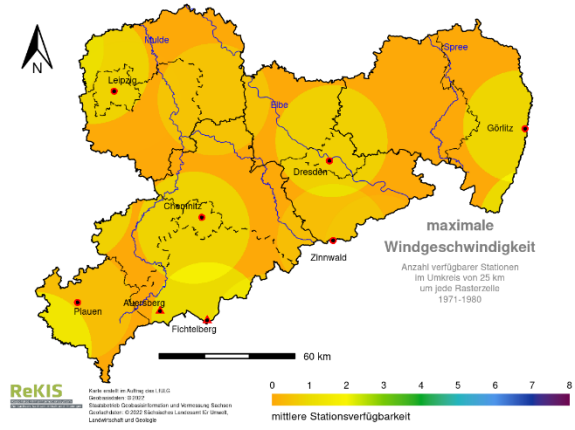
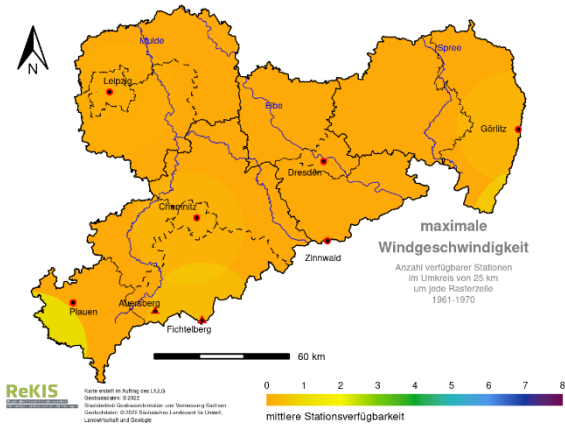


Abbildung 3: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die mittlere Temperatur in Sachsen

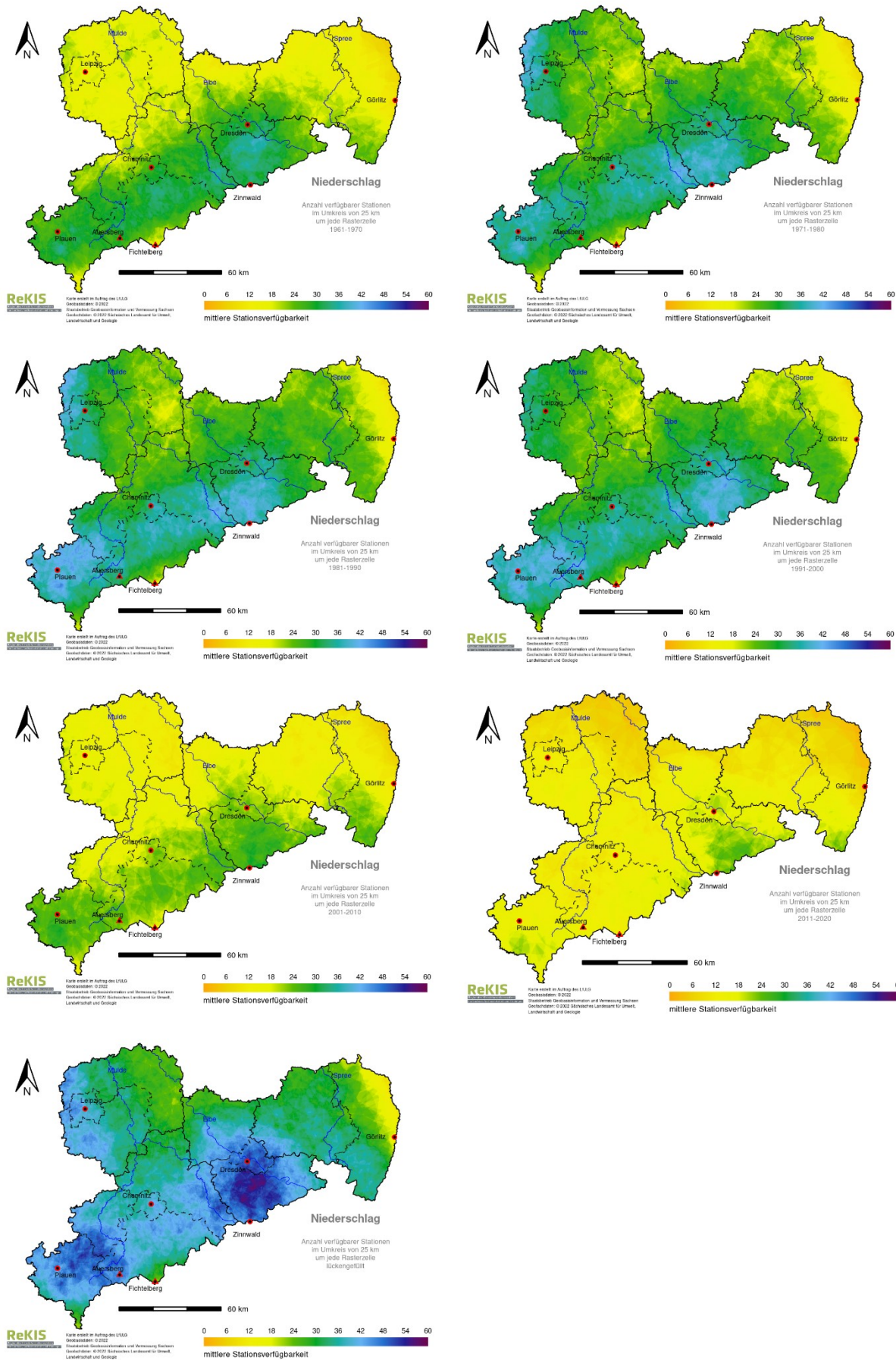


**Abbildung 4: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die mittlere Windgeschwindigkeit in Sachsen**

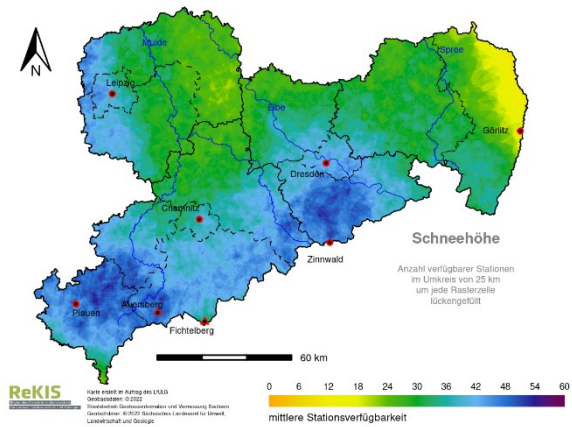
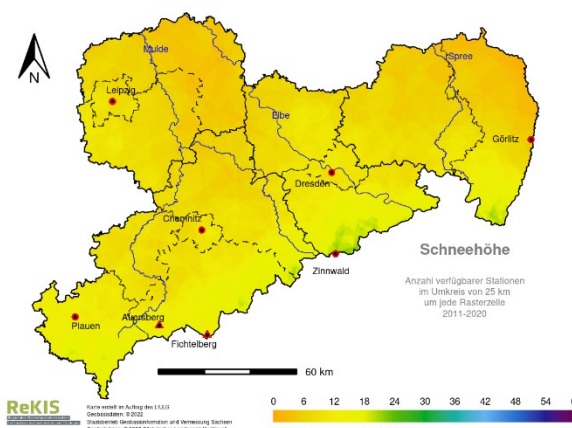
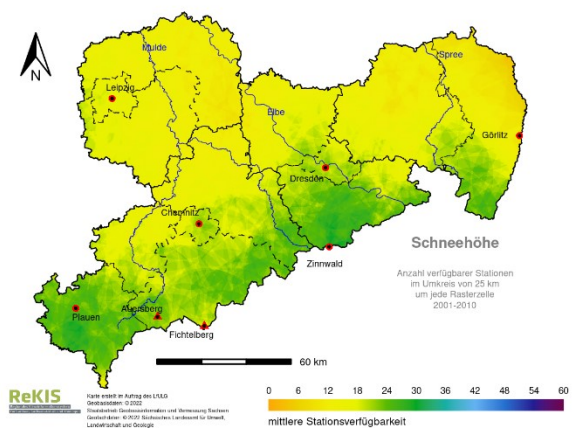
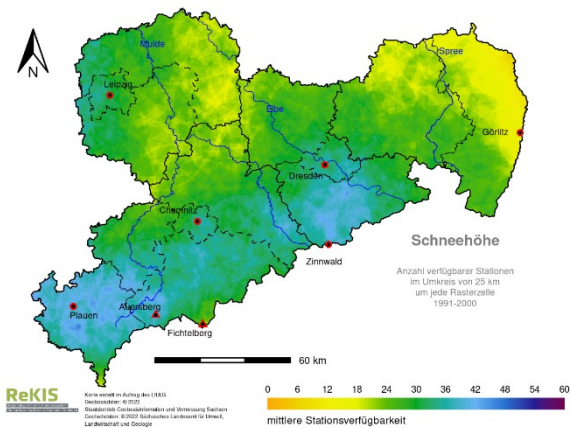
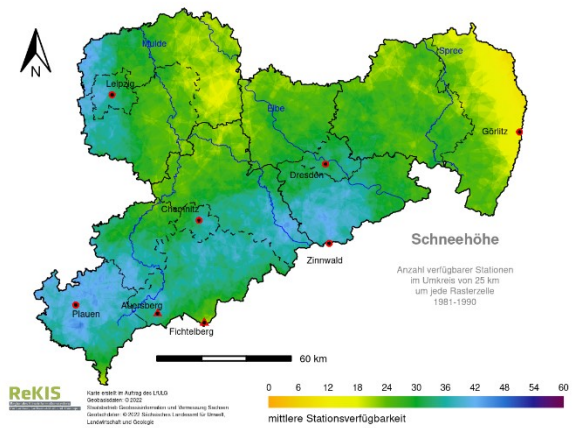
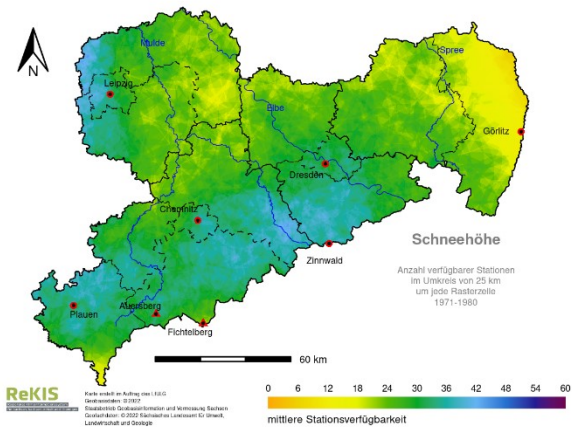
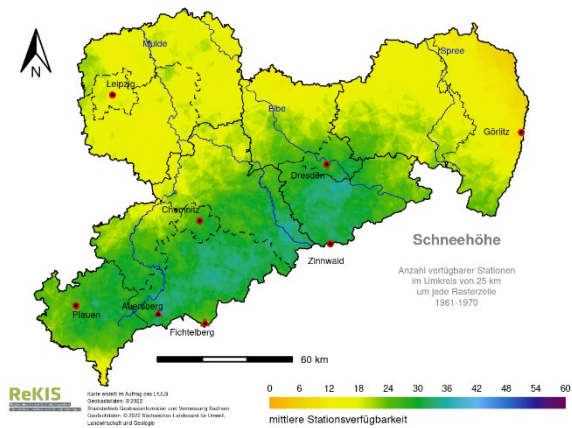




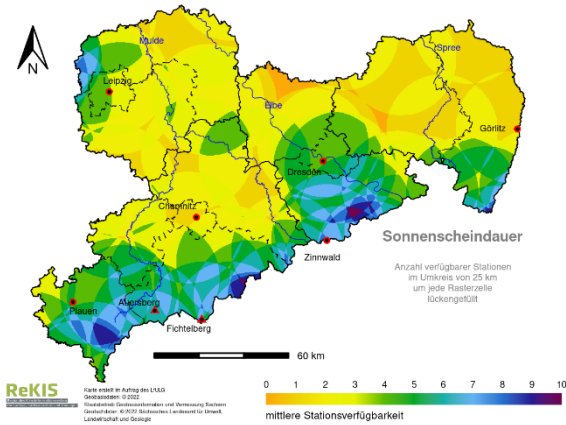
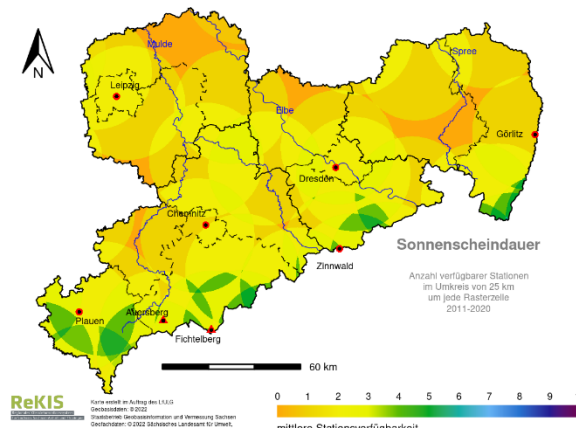
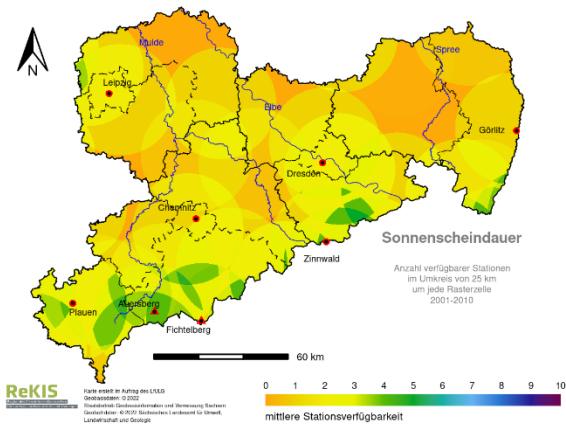
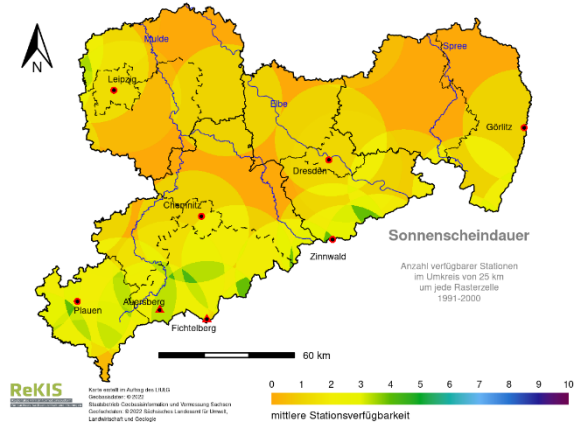
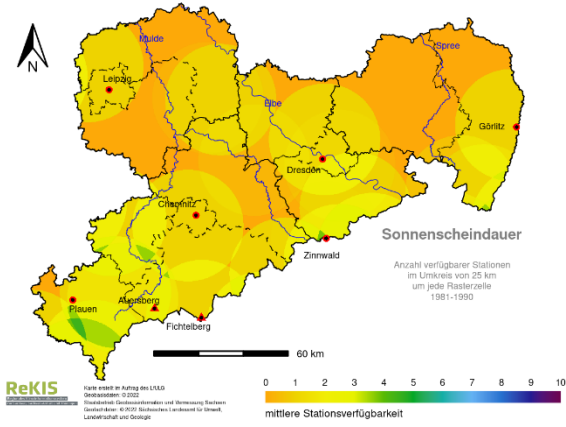
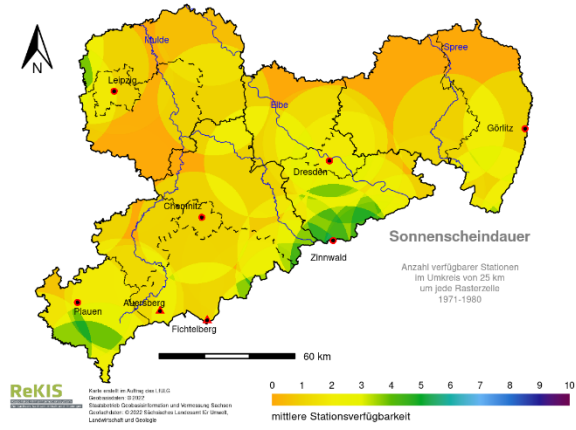
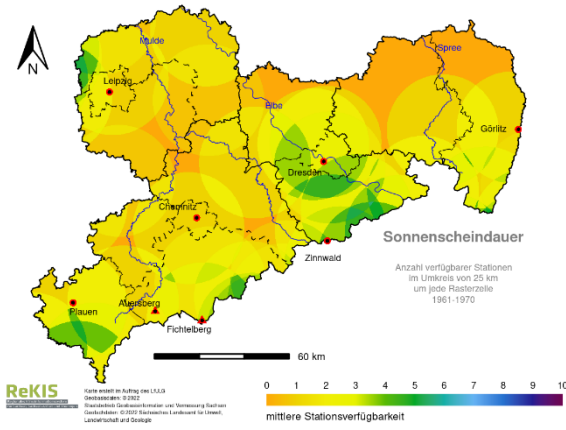
**Abbildung 5: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die maximalen Windgeschwindigkeit in Sachsen**



**Abbildung 6: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für den Niedererschlag in Sachsen**



**Abbildung 7: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die Schneehöhe in Sachsen**

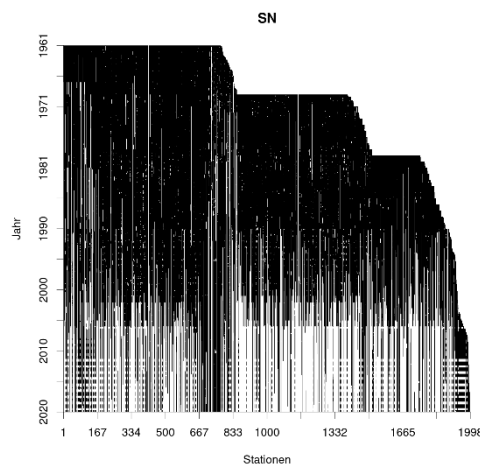
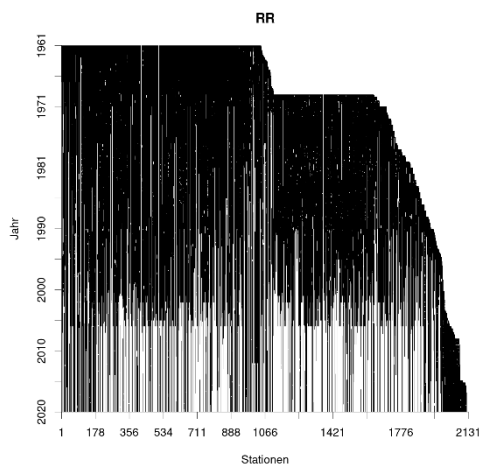
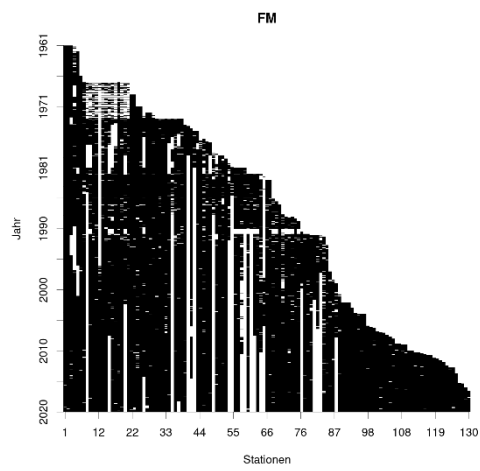
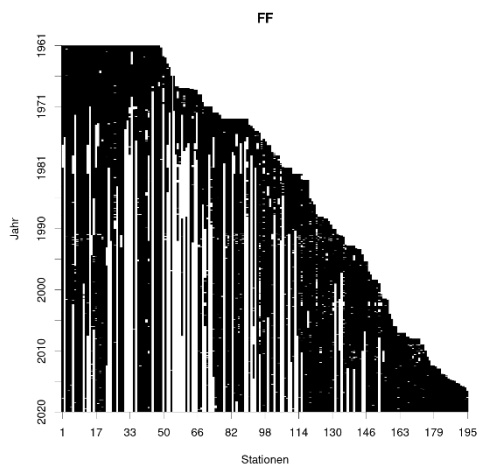
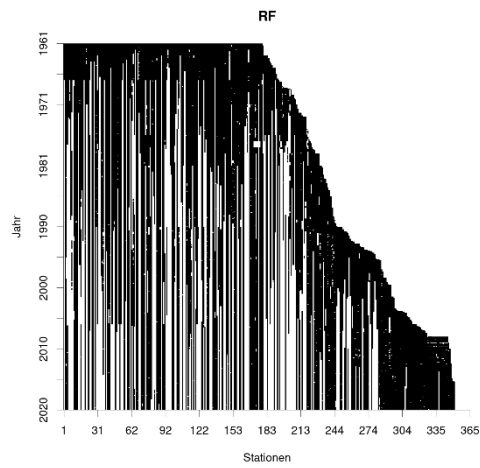
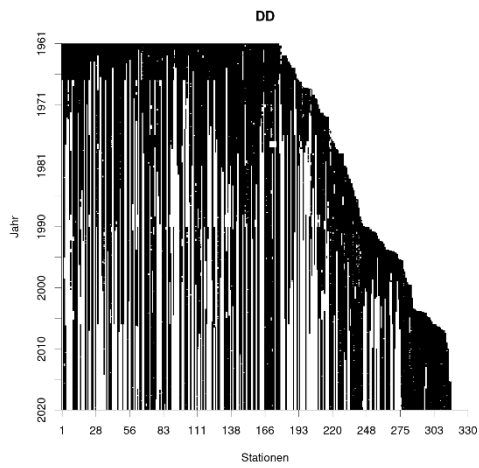


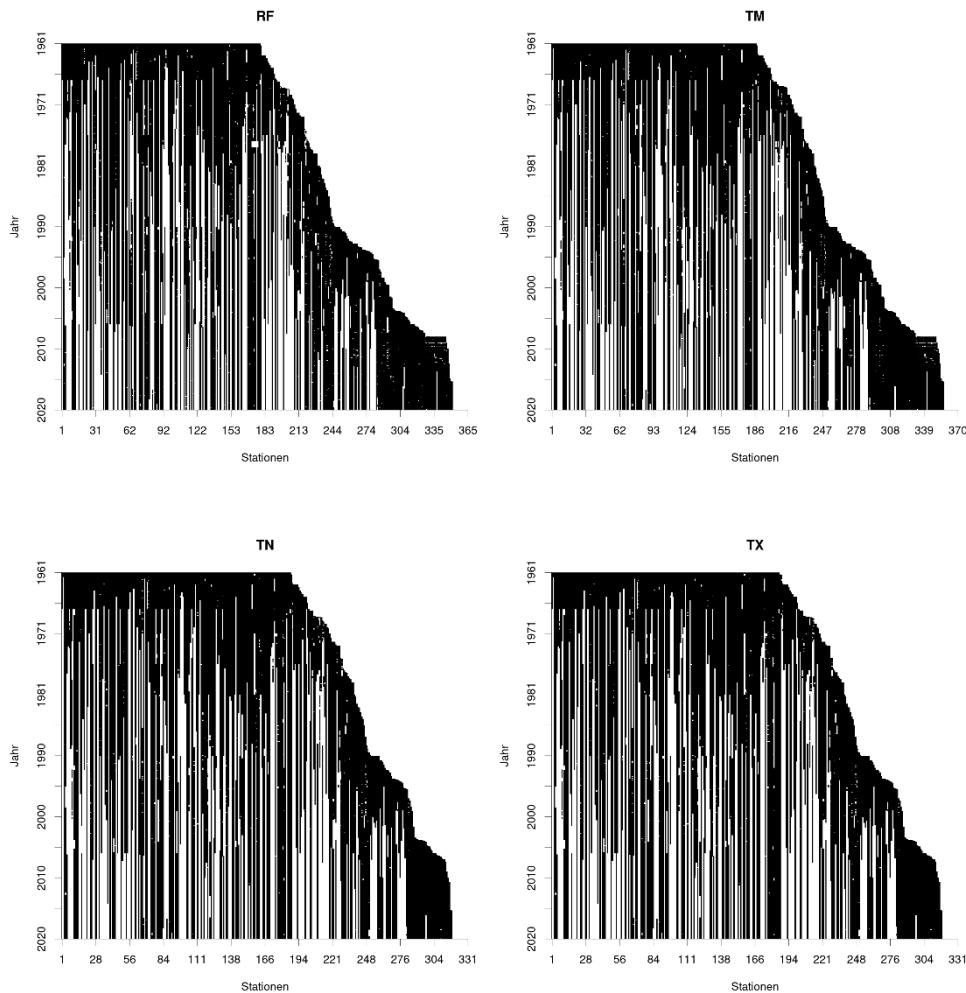
**Abbildung 8: Räumliche Darstellung der dekadischen Entwicklung der Stationsverfügbarkeit für die Schneehöhe in Sachsen**

Bei den Größen Temperatur (Abbildung 3), mittlere Windgeschwindigkeit (Abbildung 4) und maximale Windgeschwindigkeit (Abbildung 5) ist eine deutliche Zunahme der Stationsdichte über die Zeit zu erkennen. Das Stationsnetz wurde in Beginn schlecht abgedeckten Gebiete verdichtet. Die höchste Stationsdichte ist jeweils im Osterzgebirge auszumachen. Defizite im Stationsmessnetz liegen oft im Norden und insbesondere in Ostsachsen. Bei der Größe Sonnenscheindauer (Abbildung 8) ist kein deutlicher Trend zu mehr oder weniger Stationen im Messnetz zu erkennen. Die räumliche Abdeckung liegt in der letzten Dekade 2011-2020 etwa im Bereich der ersten Dekade 1961-1970, während die Dekaden dazwischen eine etwas geringere Stationsabdeckung aufweisen. Der Blick in die Abbildung der lückenlosen Stationsreihe verrät, dass die Stationsdichte hier deutlich höher ist. Grund hierfür ist, dass nur wenige Stationen durchgehend messen. Vielmehr gibt es zahlreiche Stationen, die im Laufe der Zeit die Messungen eingestellt haben, ebenso wie neue Stationen, die erst im Verlauf der Untersuchungszeit die Messungen aufgenommen haben. Auch hier ist die Stationsdichte im Erzgebirge am höchsten, Nord- und Ostsachsen weisen die geringste Stationsdichte auf.

Ein anderes Bild zeigt sich bei den Größen Niederschlag (Abbildung 6) und Schneehöhe (Abbildung 7): Die hohe Datenverfügbarkeit der 1960er Jahre sind im folgenden Jahrzehnt noch gesteigert und verharrt bis Ende der 1990er auf hohem Niveau. Nach der Jahrtausendwende wurde die Stationsdichte jedoch sehr deutlich reduziert, so dass jetzt in großen Teilen des Gebietes deutlich weniger Stationen als noch in den 1960er Jahren zur Verfügung stehen. Im Mittel wurde verglichen mit der Zeit 1971-2000 bei über 50% der Stationen die Messungen eingestellt.

Bei der räumlichen Verteilung der Stationen lässt sich wie auch beiden anderen Messgrößen feststellen, dass die höchste Dichte im Erzgebirge und hier insbesondere im Vogtland zu verzeichnen ist. Nord- und Ostsachsen weisen über den gesamten Zeitraum die geringste Stationsdichte auf.





**Abbildung 9: Originale Datenverfügbarkeit der meteorologischen Messgrößen. In schwarzen Bereichen sind Daten verfügbar, in weißen Bereichen nicht.**

In Abbildung 9 ist die Datenverfügbarkeit aller für den MDK-Raum verwendeter meteorologischer Messreihen über die Zeit dargestellt. Die y-Achse stellt hier von oben nach unten den zeitlichen Verlauf für die Jahre 1961 bis 2020 dar. Auf der x-Achse sind die meteorologischen Zeitreihen dargestellt. Die Zeitreihen sind sortiert nach dem Beginn der Messung, die Abbildung lässt demzufolge keine direkten Rückschlüsse auf einzelne Stationen zu. Für alle Elemente gilt, dass die Datenverfügbarkeit je nach Station sehr unterschiedlich sein kann: Einige Stationen messen durchgängig und haben, wenn überhaupt, nur sehr wenige Lücken über einzelne Tage. Andere Stationen haben größere Lücken, bis hin zu einigen Jahrzehnten. Es gibt Stationen, an denen die Messungen eingestellt wurden und andere, die aktuelle Messwerte aufweisen, aber erst seit einigen Jahren messen. All diese verschiedenen Arten von Lücken werden in Abschnitt 2.3 geschlossen. Für alle meteorologischen Größen gilt, dass im Mittel die Anzahl der Stationen mit verfügbaren Daten zunimmt (Windgeschwindigkeit FF und maximale Windgeschwindigkeit FM), oder etwa gleichbleibt. Ausnahme sind jedoch die Größen des Niederschlages (RR) sowie der Schneehöhe (SN). Für RR standen zu Beginn der 1990er mehr als 1.800 Stationen zur Verfügung, Ende 2020 sind davon weniger als 800 verblieben. Die Abnahme ist hierbei nicht kontinuierlich, es ist ein deutlicher Schnitt in der Datenverfügbarkeit in den Jahren 2002 und 2006 zu sehen. Ähnliches gilt, in noch größerem Ausmaß, für die Schneehöhe: von fast 1.800 Stationen Anfang der 1990er Jahre sind weniger als 400 Stationen verblieben, die kontinuierlich messen. Weitere ca. 200 Stationen messen

noch saisonal, im Zeitraum Oktober bis April. Diese saisonale Messung ist durch das Muster ab etwa dem Jahr 2010 gut in der Abbildung 9 zu erkennen. Der Wegfall des Großteils der Stationen macht sich auch in der Kreuzvalidierung in Abschnitt 2.3.2 bemerkbar: eine geringere Datenverfügbarkeit bedeutet eine geringere Qualität der Lückenfüllung.

## **2.3 Anwendung von Algorithmen zur Lückenfüllung und Homogenitätsprüfung**

### **2.3.1 Beschreibung der Lückenfüllung**

Ziel der Lückenfüllung ist es, für alle Größen einen vollständigen Datensatz ohne Lücken zu erhalten. Es sollen alle Lücken, egal ob es sich um einen einzelnen Tag, oder einen Zeitraum von 50 Jahren handelt, gefüllt werden. Zur Lückenfüllung kommt ein erweitertes Verfahren nach Körner et al. (2018) zur Anwendung. Es handelt sich um das nicht-parametrische "gradient boosting"-Verfahren. Mittels eines Waldes von Entscheidungsbäumen werden Zusammenhänge zwischen der Zielgröße, dem Prädiktanden, und den Stützstellen, den Prädiktoren hergestellt. Diese Zusammenhänge werden für den Zeitraum, an dem die Zielgröße gemessen wurde, hergestellt, oder auch "erlernt". Für Zeiträume, an denen keine Messungen der Zielgröße vorliegen, wird das gradient boosting-Modell angewendet. Prädiktoren sind meteorologische Zeitreihen anderer Stationen der gleichen Größe, aber auch anderer meteorologischer Größen, oder beispielsweise der Zeit, wie dem Tag des Jahres ("doy"). Es sind Methoden zur Unterteilung der Zeitreihe in unterschiedlich lange Abschnitte implementiert, so dass auf die Stationsverfügbarkeit Rücksicht genommen werden kann. So wird für jeden Abschnitt die optimale Auswahl an verfügbaren Stationen zur Prädiktorenauswahl verwendet.

### **2.3.2 Beschreibung und Auswertung der Kreuzvalidierung**

Zur Bewertung der Qualität der Lückenfüllung bzw. Verlängerung der Zeitreihen wird eine Kreuzvalidierung für jede meteorologische Größe und jede Station wie folgt durchgeführt: Zunächst werden die Daten der Zeitreihe jeder Station in zwei gleich lange Abschnitte, je nach Datenverfügbarkeit der Station, unterteilt. Anschließend werden die Daten des ersten Abschnittes genutzt um die Daten des zweiten Abschnittes mit der oben beschriebenen Methode aufzufüllen. Das gleiche wird anschließend andersherum durchgeführt: Die Daten des zweiten Abschnittes werden verwendet, um die Daten des ersten Abschnittes zu rekonstruieren.

Somit stehen für alle Größen und Stationen für jeden Zeitpunkt, an dem Daten gemessen wurden, auch aufgefüllte Daten zur Verfügung. Diese Datenpaare werden anschließend statistisch miteinander verglichen.

Die Art der Durchführung der Kreuzvalidierung wurde gewählt, um die Qualität des für die Lückenfüllung ungünstigsten Falls abschätzen zu können. Dieser ungünstige Fall ist eine Zeitreihe, die erst später im Untersuchungszeitraum beginnt, oder bereits vor Ende des Untersuchungszeitraumes endet. Genau genommen handelt es sich also hier um eine Bewertung der Qualität für die Zeitreihenverlängerung. Für den klassischen Fall der Lückenfüllung stehen vor und nach der Lücken Daten zum Anlernen zur Verfügung. Tests hierzu haben gezeigt, dass die Qualität der Lückenfüllung deutlich besser ist als die Qualität der Zeitreihenverlängerung. Die statistischen Kennwerte aus Tabelle 3 zeigen somit den ungünstigsten Fall an. Einzelne Lücken im Datensatz werden mit deutlich höherer Qualität gefüllt. Insbesondere der niedrige Bias bei allen Größen zeigt, dass mit keinem systematischen Fehler bei Anwendung der Lückenfüllung zu rechnen ist. Die hohen Gütekriterien und geringen Fehlermaße über alle Elemente hinweg unterstützen die Entscheidung, die oben beschriebene Lückenfüllung auf den meteorologischen Datensatz anzuwenden.



**Tabelle 3: Statistische Kennwerte für die Lückenfüllung der meteorologischen Größen**

Größe	RMSE	MAE	BIAS	R <sup>2</sup>
DD	0,55 hPa	0,38 hPa	0,02 hPa	0,98
FF	0,77 m/s	0,57 m/s	0,04 m/s	0,76
FM	1,62 m/s	1,18 m/s	0,08 m/s	0,83
RF	4,36 %	3,29 %	-0,02 %	0,86
RR	1,66 mm	0,64 mm	0,08 mm	0,84
SD	0,83 h	0,56 h	0,01 h	0,96
SN	2,16 cm	0,63 cm	-0,04 cm	0,80
TM	0,59 °C	0,43 °C	0,00 °C	0,994
TN	0,92 °C	0,68 °C	0,00 °C	0,981
TX	0,73 °C	0,53 °C	0,02 °C	0,993

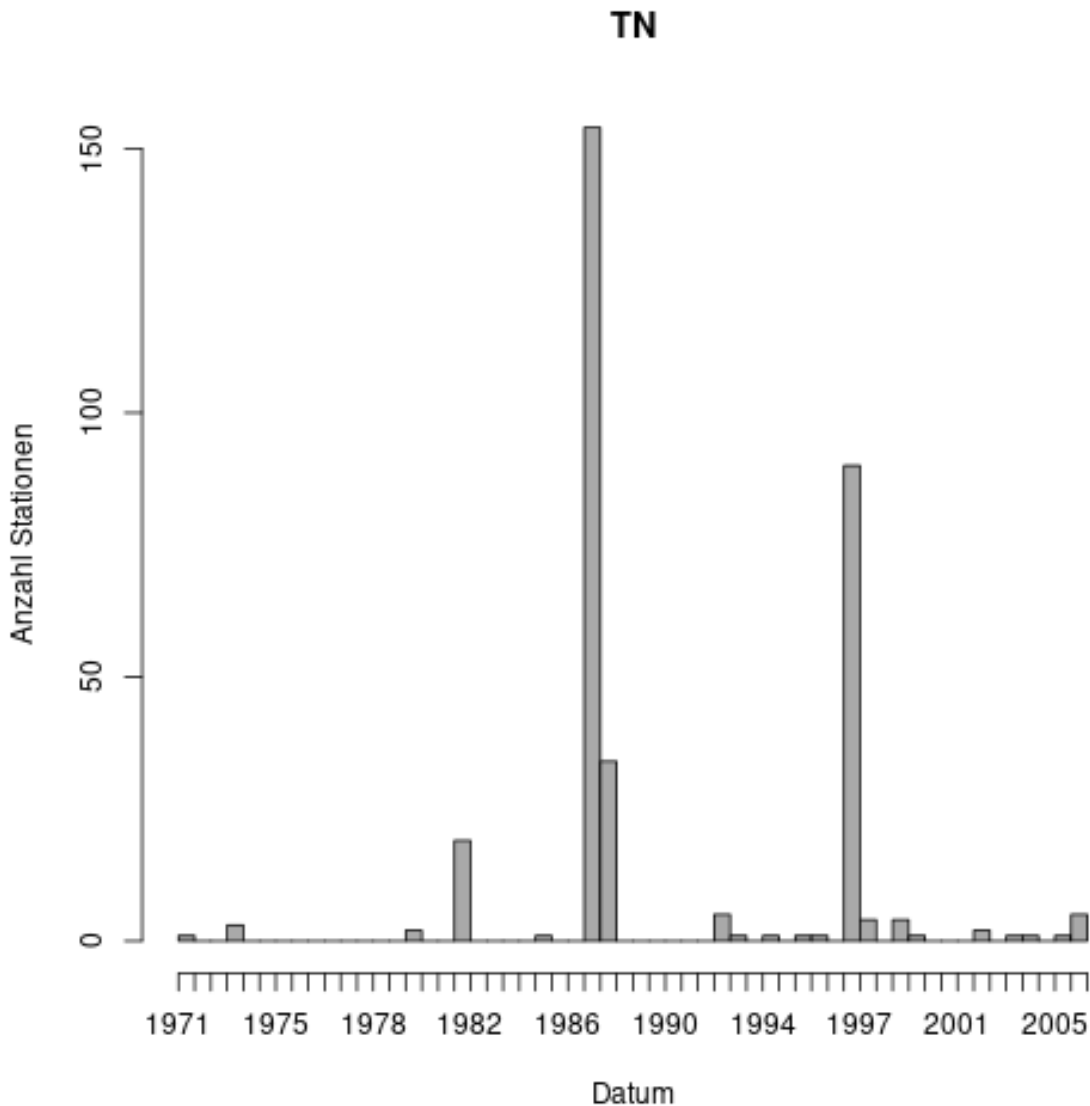
### 2.3.3 Homogenitätsanalyse

Homogenitätstests auf Zeitreihen werden angewandt um zu testen, ob Bruchpunkte oder Trends in den jeweiligen Zeitreihen vorhanden sind. Man unterscheidet zwischen absoluten und relativen Homogenitätstests. Absolute Homogenitätstests beziehen nur die untersuchte Zeitreihe selbst mit ein; relative Homogenitätstests werden relativ zu einer zweiten, bereits als homogen getestete Zeitreihe, getestet. Da keine "Referenzzeitreihen" für die verschiedenen Größen existieren, die sicher homogen sind, werden in diesem Bericht zwei absolute Homogenitätstests angewendet. Dies ist zum einen der "Pettitt-Test" (Pettitt, 1979) welcher sehr robust Bruchpunkte in Zeitreihen detektiert. Zum anderen wird der "Standard Normal Homogeneity Test" (kurz: "snht", Alexandersson, 1986) verwendet. Dieser ist weniger robust, wird aber als Absicherung der Aussagen des Pettitt-Testes verwendet.

Inhomogenitäten in Zeitreihen können zum einen in der Zeitreihe selbst begründet sein. Gründe hierfür sind beispielsweise Standortwechsel, Gerätewechsel, Beobachterwechsel, Gerätereuekalibrierung, Änderungen der direkten Umgebung des Messtandortes, wie Baumfällung oder Hausbau. Diese Aufzählung ist nicht vollständig. Zum anderen können Treiber von Inhomogenitäten extern sein, so dass diese Inhomogenitäten an vielen Stationen zeitgleich festgestellt werden können. Im Folgenden werden die Inhomogenitäten der lückengefüllten Zeitreihen getrennt nach meteorologischer Messgröße einzeln untersucht. Der Übersicht halber werden die Ergebnisse ausschließlich für den Pettitt-Test dargestellt, der "snht" unterstützt die Aussagen des Pettitt-Testes durchgehend. Ausgewertet werden p-Wert, also die Irrtumswahrscheinlichkeit. Diese gibt an, wie (un-)wahrscheinlich es ist, dass die Messwerte vor und nach einem Bruchpunkt die gleichen statistischen Eigenschaften haben, also einer gleichen Grundgesamtheit entstammen. p-Werte kleiner als 0,05 bedeuten, dass eine Zeitreihe mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 95% homogen ist. Der zweite Wert von Interesse ist der Bruchpunkt. Zu welchem Zeitpunkt ist es am wahrscheinlichsten, dass die betrachtete Zeitreihe einen Bruchpunkt hat? Unterlegt werden die Ergebnisse mit grafischen Auswertungen, durch welche die Aussagen veranschaulicht werden. Hinweis: Homogenitätstest sind niemals absolut. Sie sind immer vom verwendeten Test und der Irrtumswahrscheinlichkeit abhängig.

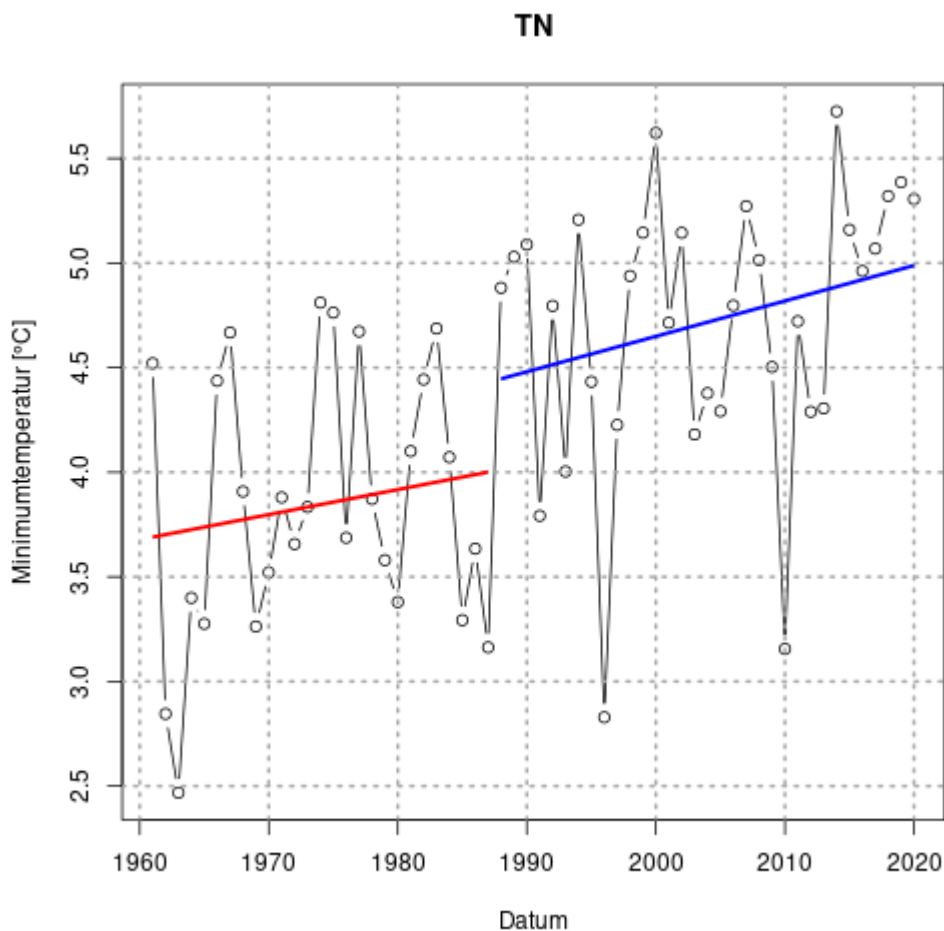
### 2.3.3.1 Minimumtemperatur (TN)

Für die Minimumtemperatur wurde für alle 331 Stationen Inhomogenitäten festgestellt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme "die Zeitreihe ist homogen" reicht von 0,97 bis 1,0. Es ist somit sehr sicher, dass alle Zeitreihen von Inhomogenitäten beeinflusst sind. Ein Blick auf die Verteilung der Bruchpunkte über die Zeit in Abbildung 10 für alle Stationen offenbart, dass diese nicht zufällig verteilt sind, sondern es vielmehr zwei Zeitpunkte gibt, welche besonders häufig als Bruchpunkt erkannt werden. Die Zeitpunkte liegen im Jahr 1987 und im Jahr 1997.



**Abbildung 10: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für TN.**

In Abbildung 11 sind die mittleren Jahreswerte aller 331 Stationen für die Minimumtemperatur dargestellt. Das Jahr mit der größten Häufung der Bruchpunkte ist das Jahr 1987. Um diesen Bruchpunkt sichtbar zu machen, wurden zwei Trendlinien erstellt. Zum ersten eine rote Trendlinie, beginnend von 1961 bis zum Jahr des Bruchpunktes, 1987. Die zweite Trendlinie, von 1988 bis 2020, ist in Blau gehalten.

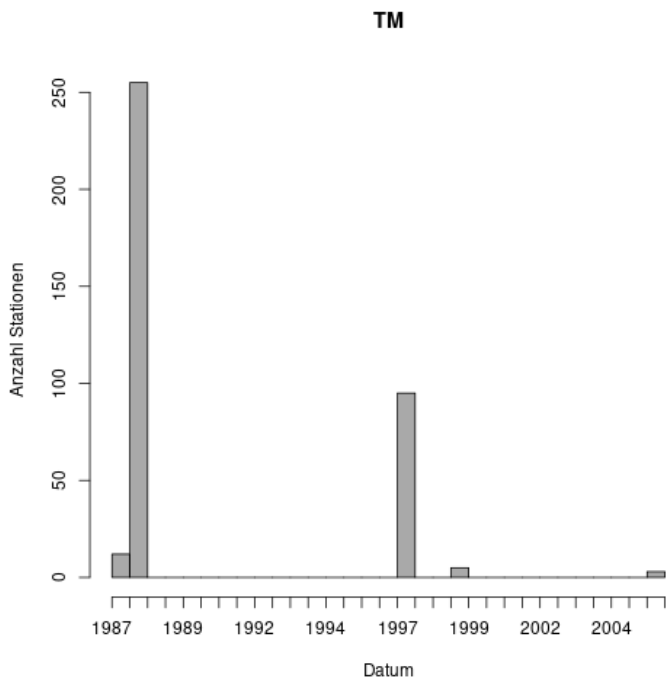


**Abbildung 11: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für TN. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Zwei Dinge werden deutlich: Zum einen ist der Anstieg der Trendlinie im zweiten Teil etwas steiler als im ersten Teil. Zum anderen gibt es einen vergleichsweise großen Sprung von ca. 0.5 Kelvin am Bruchpunkt. Die Häufung der Bruchpunkte sowie der große Sprung sprechen jeweils deutlich für die These, dass die Inhomogenität der Zeitreihen überwiegend auf ein externes Signal zurückzuführen ist. Zu Ende des Abschnittes 2.3.3 wird hierauf näher eingegangen. Die Inhomogenitäten durch dieses externe Signal zeigen nicht, dass die Zeitreihen von stationsbezogenen Inhomogenitäten unbeeinflusst ist. Es zeigt vielmehr, dass die externen Signale die stationsbezogenen überlagern. Nichtsdestotrotz gibt es dennoch einige Stationen, die andere Bruchpunkte aufweisen und somit vermutlich stationsbezogene Ursachen für Inhomogenitäten aufweisen.

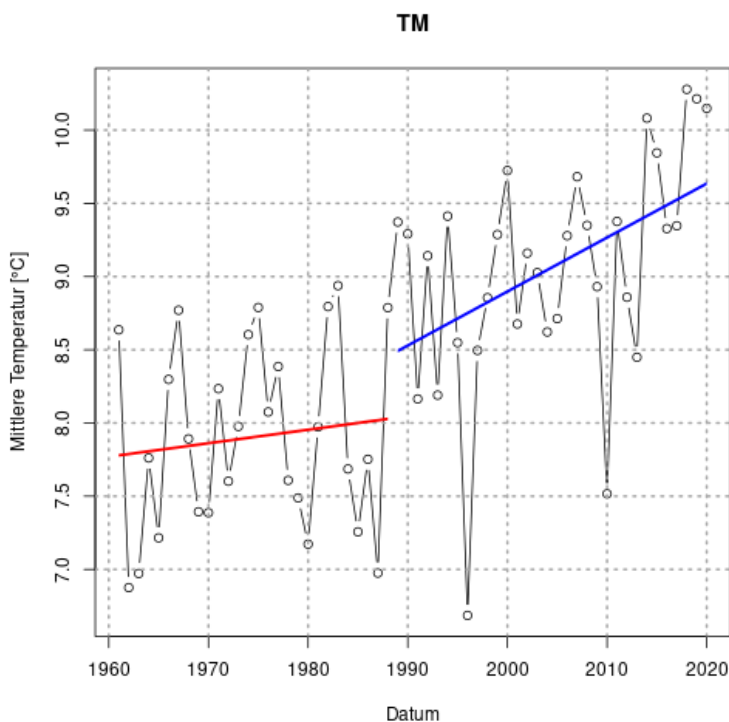
### 2.3.3.2 Mittlere Temperatur (TM)

Für die mittlere Temperatur wurde für alle 370 Stationen Inhomogenitäten festgestellt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme "die Zeitreihe ist homogen" beträgt für alle Zeitreihen, gerundet auf die 9. Nachkommastelle, 1,0. Es ist somit sehr sicher, dass alle Zeitreihen von Inhomogenitäten beeinflusst sind. Ein Blick auf die Verteilung der Bruchpunkte über die Zeit in Abbildung 12 für alle Stationen offenbart, dass diese nicht zufällig verteilt sind, sondern wie schon bei TN, es zwei Zeitpunkte gibt, welche besonders häufig als Bruchpunkt erkannt werden. Die Zeitpunkte liegen hier im Jahr 1988 und im Jahr 1997.



**Abbildung 12: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für TM.**

In Abbildung 13 sind die mittleren Jahreswerte aller 370 Stationen für die mittlere Temperatur dargestellt. Das Jahr mit der größten Häufung der Bruchpunkte ist das Jahr 1988. Um diesen Bruchpunkt sichtbar zu machen, wurden zwei Trendlinien erstellt. Zum ersten eine rote Trendlinie, beginnend von 1961 bis zum Jahr des Bruchpunktes, 1988. Die zweite Trendlinie, von 1989 bis 2020, ist in Blau gehalten.

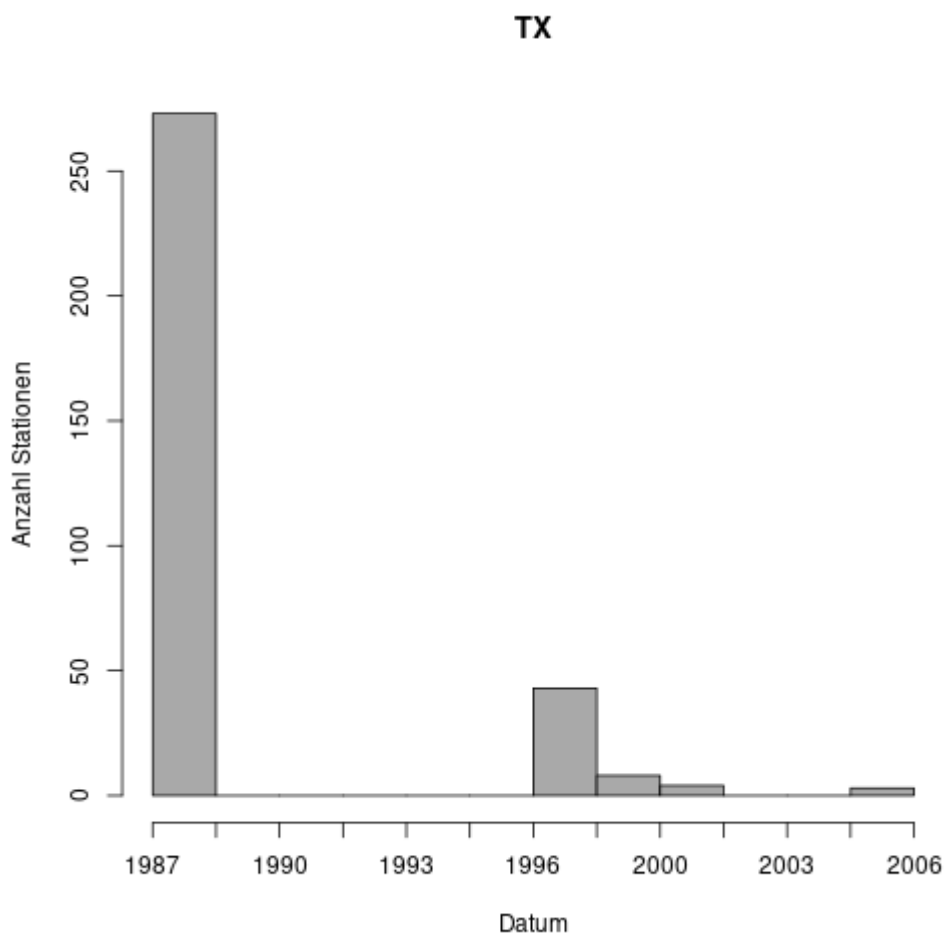


**Abbildung 13: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für TM. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Zwei Dinge werden deutlich: Zum einen ist der Anstieg der Trendlinie im zweiten Teil deutlich steiler als im ersten Teil. Zum anderen gibt es einen vergleichsweise großen Sprung von ca. 0,5 Kelvin am Bruchpunkt. Die Häufung der Bruchpunkte sowie der große Sprung sprechen jeweils deutlich für die These, dass die Inhomogenität auch dieser Zeitreihen überwiegend auf ein externes Signal zurückzuführen ist. Zu Ende des Abschnittes 2.3.3 wird hierauf näher eingegangen. Die Inhomogenitäten durch dieses externe Signal zeigen nicht, dass die Zeitreihen von stationsbezogenen Inhomogenitäten unbeeinflusst ist. Es zeigt vielmehr, dass die externen Signale die stationsbezogenen überlagern. Nichtsdestotrotz gibt es dennoch einige wenige Stationen, die andere Bruchpunkte aufweisen und somit vermutlich stationsbezogene Ursachen für Inhomogenitäten aufweisen.

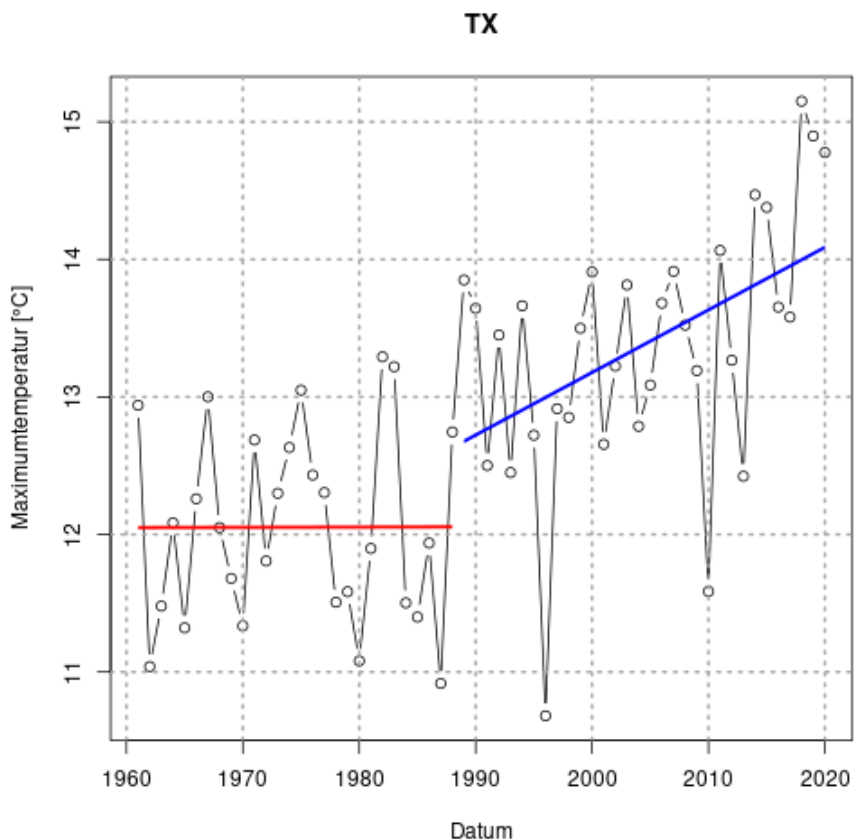
### 2.3.3.3 Maximumtemperatur (TX)

Für die Maximumtemperatur wurde für alle 331 Stationen Inhomogenitäten festgestellt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme "die Zeitreihe ist homogen" beträgt für alle Zeitreihen, gerundet auf die 10. Nachkommastelle, 1,0. Es ist somit sehr sicher, dass alle Zeitreihen von Inhomogenitäten beeinflusst sind. Ein Blick auf die Verteilung der Bruchpunkte über die Zeit in Abbildung 14 für alle Stationen offenbart, dass diese nicht zufällig verteilt sind, sondern wie schon bei TN und TM, es zwei Zeitpunkte gibt, welche besonders häufig als Bruchpunkt erkannt werden. Die Zeitpunkte liegen hier im Jahr 1988 und im Jahr 1997.



**Abbildung 14: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für TX.**

In Abbildung 15 sind die mittleren Jahreswerte aller 331 Stationen für die Maximumtemperatur dargestellt. Das Jahr mit der größten Häufung der Bruchpunkte ist das Jahr 1988. Um diesen Bruchpunkt sichtbar zu machen, wurden zwei Trendlinien erstellt. Zum ersten eine rote Trendlinie, beginnend von 1961 bis zum Jahr des Bruchpunktes, 1988. Die zweite Trendlinie, von 1989 bis 2020, ist in Blau gehalten.

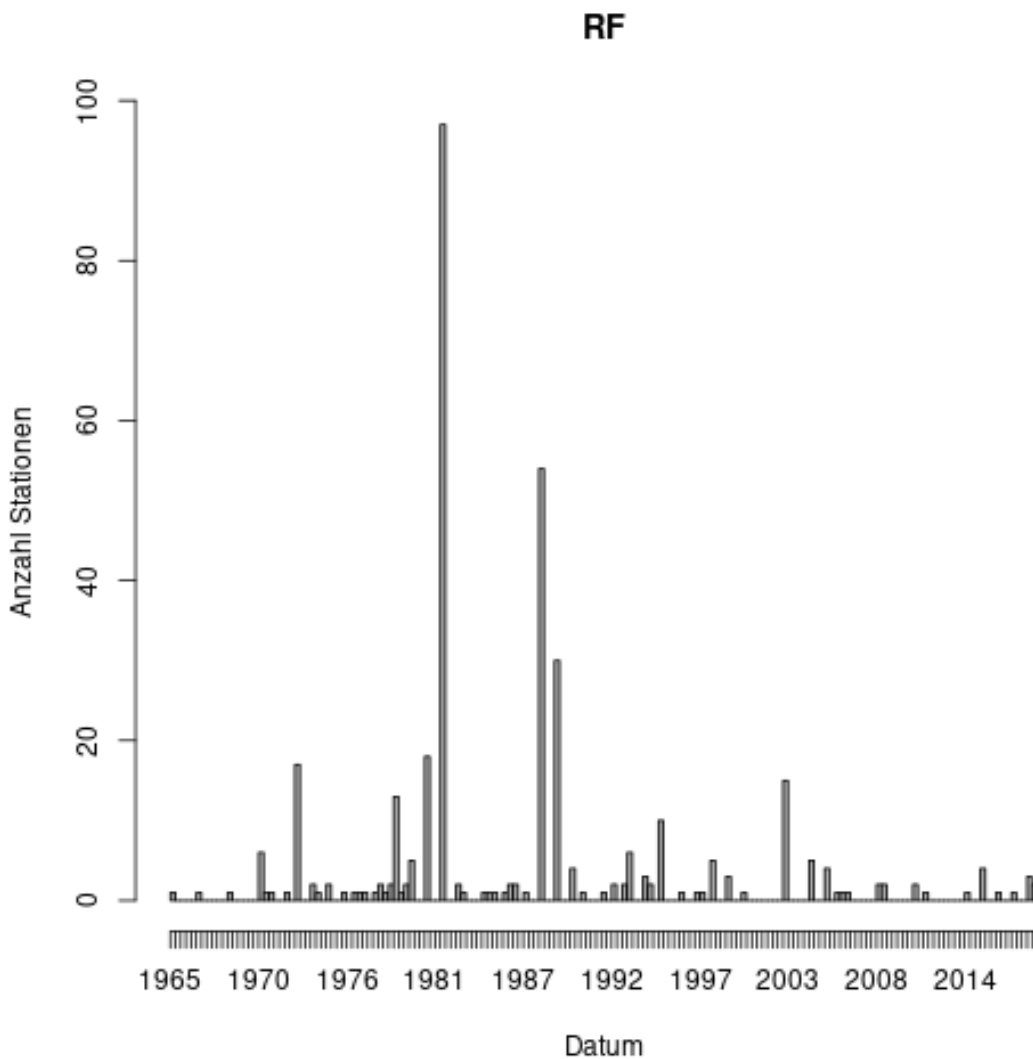


**Abbildung 15: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für TX. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Auch hier werden wieder zwei Dinge werden deutlich: Während es im ersten Abschnitt praktisch keinen Anstieg des Trends gibt, fällt dieser im zweiten Teil umso stärker aus. Zum zweiten gibt es einen sehr großen Sprung von ca. 0,75 Kelvin am Bruchpunkt. Die Häufung der Bruchpunkte sowie der große Sprung sprechen jeweils deutlich für die These, dass die Inhomogenität auch dieser Zeitreihen überwiegend auf ein externes Signal zurückzuführen ist. Zu Ende des Abschnittes 2.3.3 wird hierauf näher eingegangen. Die Inhomogenitäten durch dieses externe Signal zeigen nicht, dass die Zeitreihen von stationsbezogenen Inhomogenitäten unbeeinflusst ist. Es zeigt vielmehr, dass die externen Signale die stationsbezogenen überlagern. Nichtsdestotrotz gibt es dennoch einige wenige Stationen, die andere Bruchpunkte aufweisen und somit vermutlich stationsbezogene Ursachen für Inhomogenitäten aufweisen.

#### 2.3.3.4 Relative Luftfeuchte (RF)

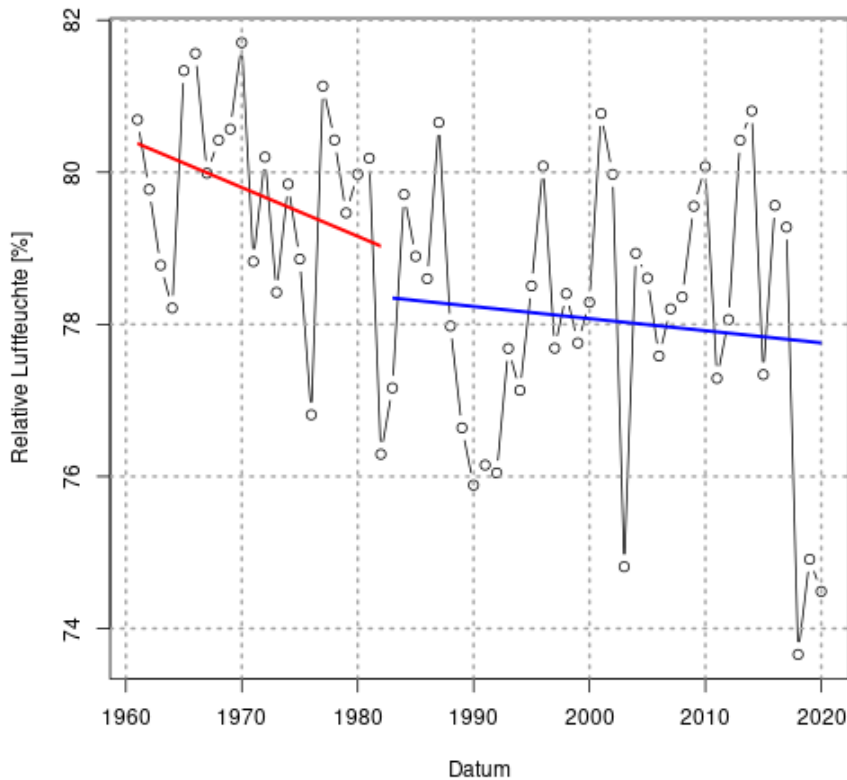
Im Gegensatz zur Temperatur ist bei der relativen Feuchte keine Häufung der Bruchpunkte Ende der 1980er Jahre auszumachen. Von insgesamt 365 Stationen mit Zeitreihen der relativen Luftfeuchte weißt etwa ein Viertel hiervon den deutlichsten Bruchpunkt zu Beginn der 1980er Jahre auf (Abbildung 16). Dennoch sind alle Zeitreihen von Inhomogenitäten betroffen. Die Irrtumswahrscheinlichkeit hierfür liegt zwischen 0 und 0,002. Somit ist sind alle Zeitreihen praktisch sicher inhomogen.



**Abbildung 16: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für RF.**

Im Gegensatz zur Temperatur ist hier sehr deutlich zu erkennen, dass die Verteilung der Bruchpunkte der Stationen deutlich mehr streut. Das spricht dafür, dass die Gründe für die jeweiligen Bruchpunkte im Umfeld der Stationen selbst zu suchen sind. Tatsächlich ist es bei Messreihen der relativen Feuchte so, dass die Werte häufig driften: Mit der Zeit, werden so immer höhere Maximalwerte erreicht, von 101 bis über 110%. Nach einer Eichung wird das Maximum wieder neu festgelegt, auf einen Wert von 97 bis 100 %. Diese Drift kann auch in die Entgegengesetzte Richtung erfolgen, so dass nach einiger Zeit nur noch Maximalwerte von z.B. 92 % erreicht werden. Die Zeitpunkte der Eichung sind dann in der Homogenitätsanalyse als Bruchpunkte sichtbar.

## RF



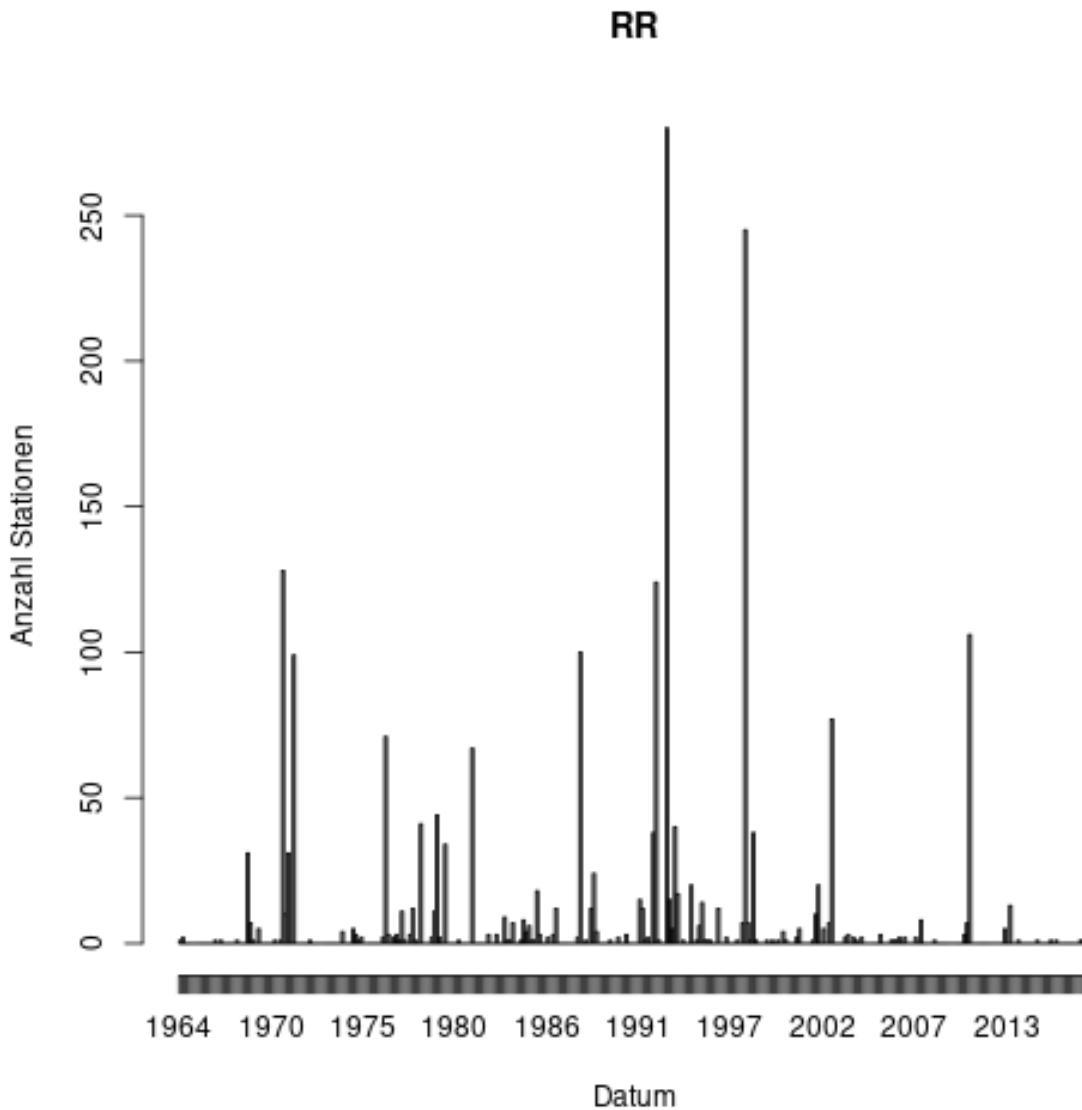
**Abbildung 17: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für RF. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

In Abbildung 17 wird auch deutlich, dass im Jahr mit der größten Häufung der Bruchpunkte die mittlere Feuchte einen Sprung von lediglich 0,5 % macht und der Gradient sich auf geringem Niveau ändert. Extreme Einzeljahre, wie die Trockenperiode 2018 bis 2020 sorgen jedoch für einen deutlich größeren Ausschlag der mittleren Werte. Für die relative Feuchte muss also davon ausgegangen werden, dass die Inhomogenitäten ganz überwiegend durch Ereignisse an den Stationen selbst verursacht sind, ein großräumiger Trend in die eine oder andere Richtung kann hier nicht nachgewiesen werden.

### 2.3.3.5 Niederschlag (RR)

In den Niederschlagsdaten sind, soweit sei vorausgegriffen, die einzigen Zeitreihen dieser Untersuchung enthalten, für welche Inhomogenitäten nicht sicher nachgewiesen werden können. Bei insgesamt vier von 2131 Stationen ist die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme, dass die Zeitreihe inhomogen ist, größer als 0,5. Bei einer Station, der Messstation "Niedergoseln" aus dem Agrarmeteorologischen Messnetz des LfULG beträgt die Irrtumswahrscheinlichkeit 0,986. Das bedeutet, dass diese Zeitreihe mit einer Wahrscheinlichkeit von über 98% homogen ist. Der Grund hierfür könnte darin zu suchen sein, dass die Zeitreihe nur etwas mehr als 5 Jahre Messwerte aufweist. Die anderen knapp 55 Jahre sind gefüllt. Offenbar sind in den gemessenen Jahren keine stationsbedingten Inhomogenitäten aufgetreten. In den lückengefüllten Jahren haben sich die Inhomogenitäten der umliegenden Stationen offenbar herausgemittelt. Insgesamt ist die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Inhomogenitätsannahme im Vergleich zu den anderen Messgrößen um einige Größenordnungen höher, wenngleich immer noch weit weg von der Annahme einer Homogenität im gesamten Datensatz.

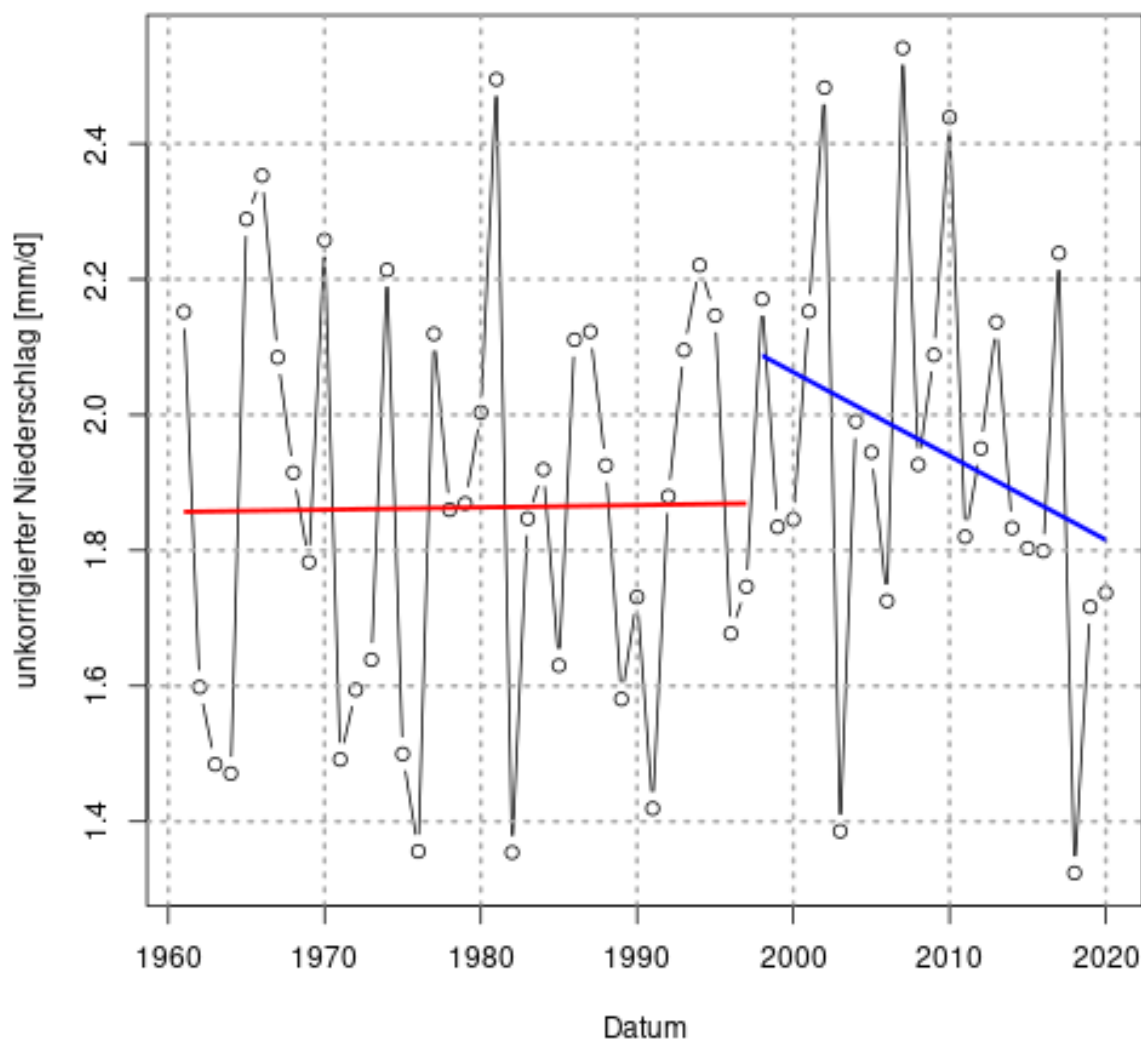




**Abbildung 18: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für RR.**

Deutlich wird in Abbildung 18, dass die Bruchpunkte sehr heterogen über den Betrachtungszeitraum verteilt sind. Das spricht für die Annahme, dass stationsbedingt Inhomogenitäten einem eventuellen großräumigen Trend überwiegen. Diese stationsbedingten Ursachen können beispielsweise Änderungen der Messgeräte, Änderungen des Standorts sowie der Abschirmung sein, welche sich für jede Station individuell ändert.

## RR



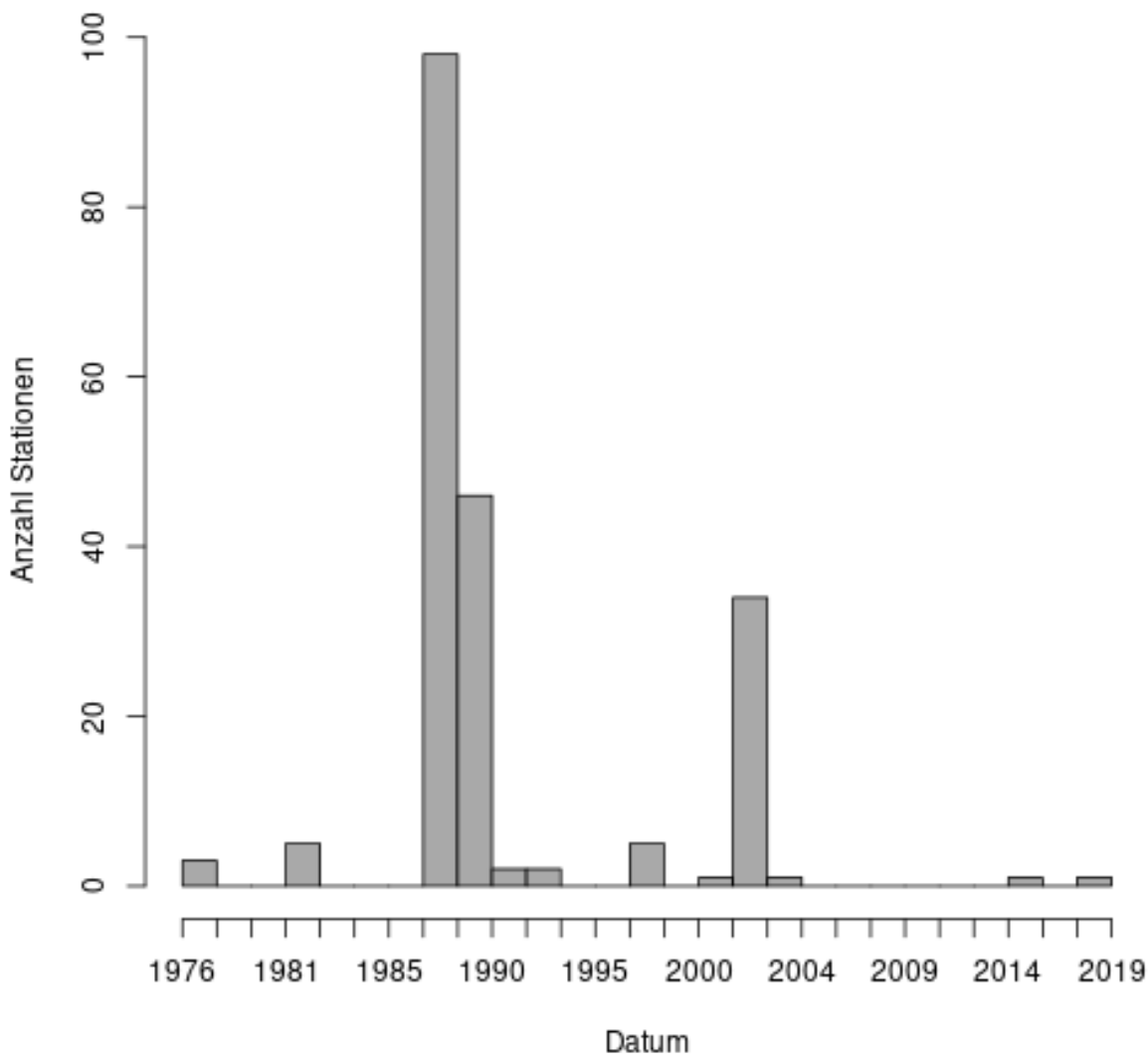
**Abbildung 19: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für RR. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Abbildung 19 zeigt den Verlauf der mittleren Tagessumme des Niederschlages. Ende der 1990er Jahre häufen sich die Jahre mit etwas größeren Niederschlagssummen, so dass hier auch das Jahr mit der größten Anzahl an Bruchpunkten liegt. Im ersten Teil ist kein Trend erkennbar, der abnehmende Trend im zweiten Abschnitt ist für eine klimatologische Einordnung zu kurz. Insgesamt konnte keine Änderung des mittleren Niederschlages über den Gesamtzeitraum beobachtet werden. Die Inhomogenitäten werden daher größtenteils auf die oben genannten stationsbedingten Ursachen zurückgeführt.

### 2.3.3.6 Sonnenscheindauer (SD)

Die Analyse der Zeitreihen der Sonnenscheindauer ergibt ein ähnliches Bild wie bei den Zeitreihen der Temperatur. Alle Zeitreihen werden als Inhomogen erkannt, die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt zwischen 0 und 0,02. Etwa die Hälfte aller 199 Stationen haben ihren größten Bruchpunkt im Jahr 1988. Abbildung 20 zeigt die Verteilung, nur wenige Stationen haben ihren wahrscheinlichsten Bruchpunkt außerhalb der häufigsten Jahre. Für diese einzelnen Stationen ist damit eine stationsbedingte Ursache am wahrscheinlichsten.

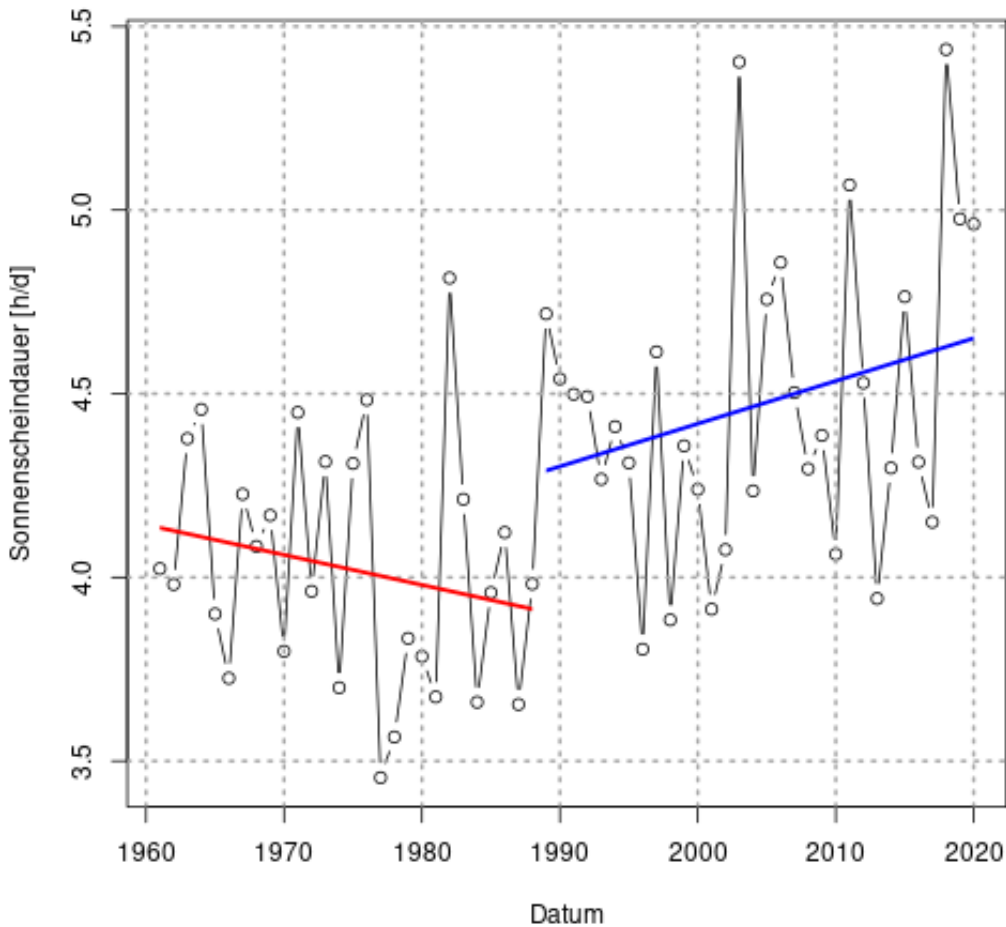
## SD



**Abbildung 20: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für SD.**

Die Häufung aus Abbildung 20 lässt sich auch sehr deutlich in Abbildung 21 wiederfinden. Während bis zum Jahr 1988 ein abnehmender Trend um im Mittel ca. 4 Sonnenstunden pro Tag zu beobachten ist, springt der Mittelwert ab 1989 auf ca. 4,5 Sonnenstunden pro Tag bei deutlich ansteigendem Trend. Hierfür sind vermutlich zwei Gründe ursächlich: Zum einen der "Dimming-Effekt" mit dem Zusammenbruch der DDR, der durch reduzierte Emissionen von Schwebstaub aus Industrie und Hausbrand zu einer besseren Durchlässigkeit der Atmosphäre für die solare Einstrahlung geführt hat. Zum anderen treten aufgrund der globalen Klimaerwärmung sommerliche Hochdruckwetterlagen, die mit wenig Wolken und somit höherer Sonneneinstrahlung einhergehen, deutlich häufiger auf.

## SD



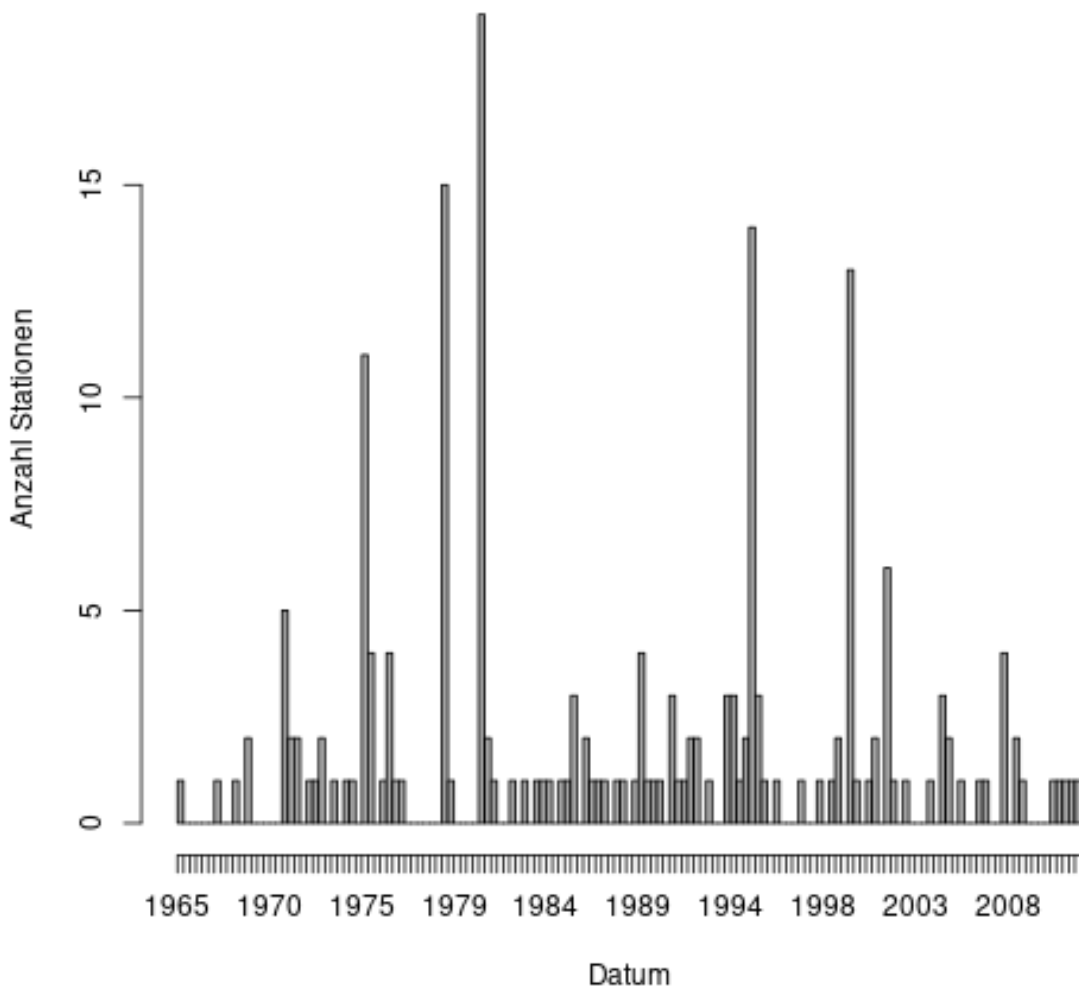
**Abbildung 21: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für SD. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Die Auswirkungen der erhöhten solaren Einstrahlung lässt sich gut in den Zeitreihen der Temperaturen ablesen: Während bis 1988 die Mittel- und Minimumtemperatur leichte Anstiege verzeichnen und die Maximumtemperatur keinen Trend aufweist, gibt es jeweils um 1988 einen klimatologisch betrachtet sehr großen Sprung sowie einen deutlichen Anstieg der Erwärmung mit der Zeit. Man kann somit mithilfe der Homogenitätsanalyse die Aussage treffen, dass das Dimming durch Luftverschmutzung bis zum Ende der 1980er Jahre durch die erhöhten Treibhausgasemissionen die Erwärmung der bodennahen Atmosphäre wenn auch nicht aufgehalten, so doch wenigstens etwas abgepuffert hat.

### 2.3.3.7 Mittlere Windgeschwindigkeit (FF)

Die Analyse der Zeitreihen der Windgeschwindigkeit lässt keine Häufung der Bruchpunkte in einem bestimmten Zeitraum erkennen (Abbildung 22). Es ist somit für alle 195 betrachteten Stationen (mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0 bis 0,0002) als sehr wahrscheinlich anzusehen, dass diese Inhomogen sind und dass diese Inhomogenitäten auf Ursachen der Messungen am Standort selbst zurückzuführen sind. In der Tat sind Sprünge der Mittelwerte einzelner Zeitreihen bis um den Faktor sechs zu beobachten, die klimatologisch nicht zu begründen wären.

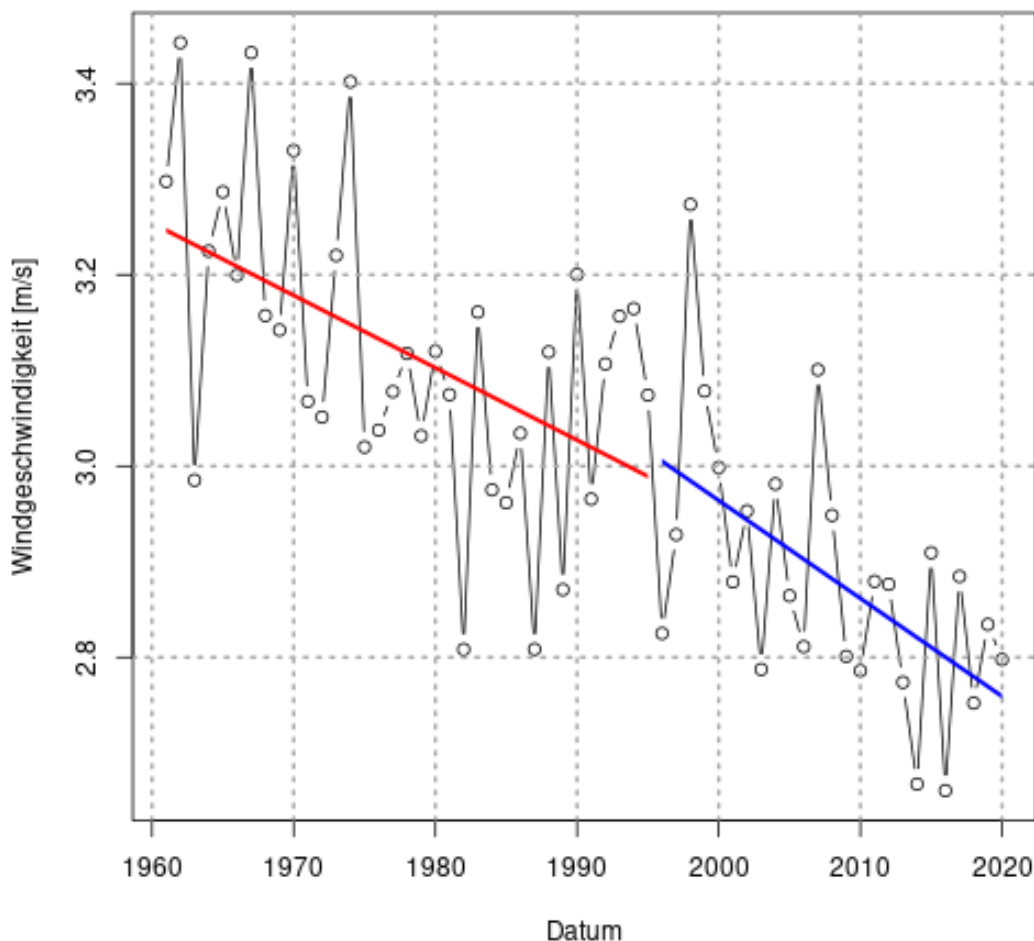
## FF



**Abbildung 22: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für FF.**

Gründe hierfür können verschiedene sein: Der häufigste ist vermutlich das Ersetzen des Windmessgerätes. Häufig werden ältere Schalenkreuzanemometer mit moderneren Ultraschallanemometern ersetzt. Diese haben eine höhere Genauigkeit und haben keine minimale Anlaufgeschwindigkeit, so dass auch geringe Windgeschwindigkeiten bestimmt werden können, für welche die älteren Schalenkreuzanemometer einen Messwert von 0 m/s registrieren. Ein weiterer typischer Grund für Inhomogenitäten ist die Änderung der Messhöhe. Ist diese Änderung den Metadaten erfasst, wird mithilfe des logarithmischen Windprofils eine Umrechnung auf die Standardmesshöhe von 10 Metern über Grund vorgenommen. Wenn allerdings keine solche Daten vorhanden sind oder solche Daten fehlerhaft sind, so muss angenommen werden, dass die Messung in der Standardmesshöhe von 10 Metern erfolgt ist.

## FF

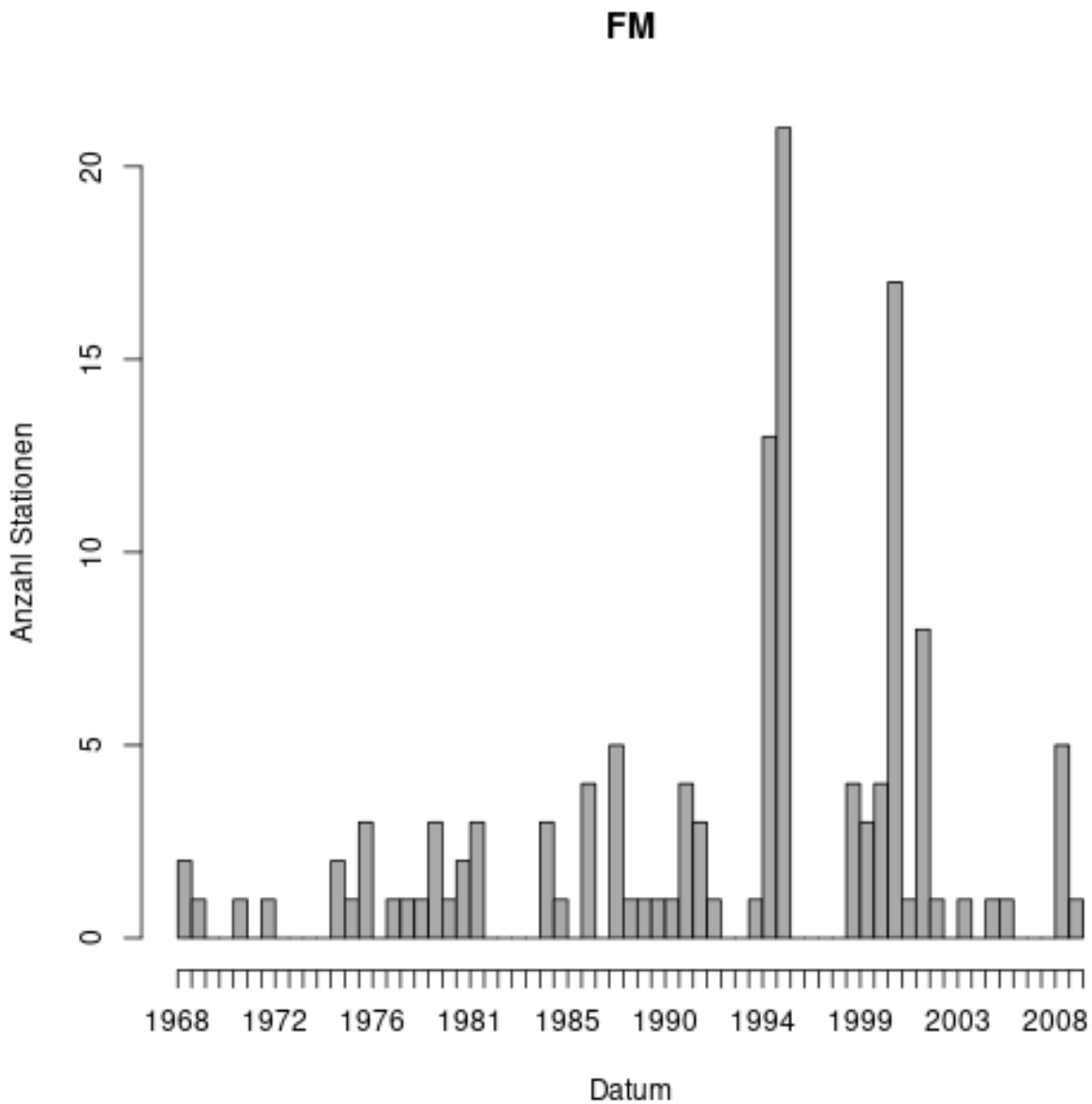


**Abbildung 23: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für FF. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Insgesamt ist zu beobachten, dass die Sprünge der mittleren Windgeschwindigkeit in beide Richtungen, also sowohl größere als auch kleinere mittlere Werte nach dem Bruchpunkt, auftreten. Allerdings ist, wie auch in Abbildung 23 zu sehen, mit der Zeit eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeiten dominant. Dies hängt zum einen mit der global beobachteten Abnahme der Windgeschwindigkeiten zusammen (Wohland et al., 2021). Zum anderen hängt diese Abnahme mit der zunehmenden Abschirmung der Messstandorte zusammen: Das Aufwachsen von Vegetation sowie der Bau neuer Gebäude überwiegt den entgegengesetzten Fall. Auch der kaum geänderte Gradient sowie der geringe Sprung des Mittelwertes sprechen für stationsbedingte Gründe der Inhomogenitäten.

### 2.3.3.8 Maximale Windgeschwindigkeit (FM)

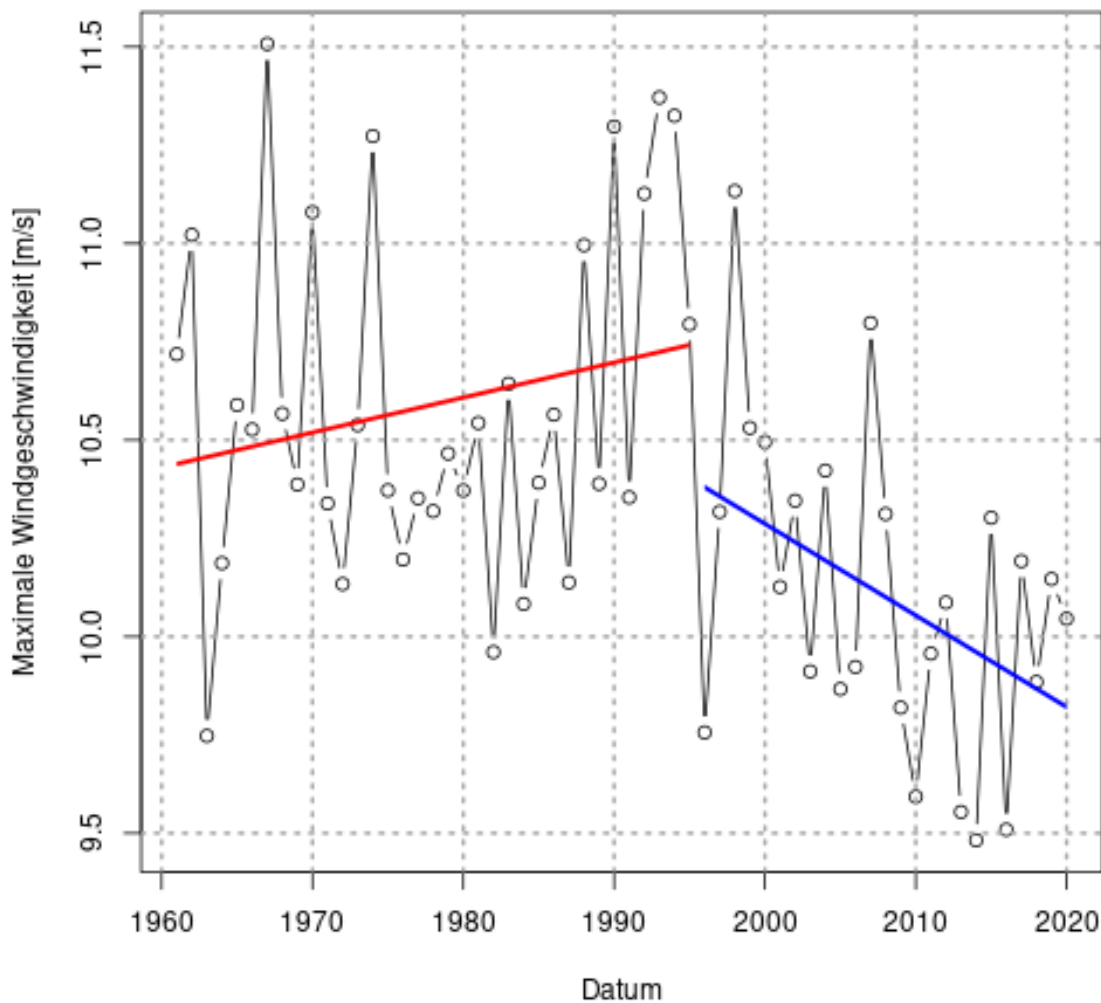
Wie bei der mittleren Windgeschwindigkeit ist auch bei der maximalen Windgeschwindigkeit mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0 bis 0,0002 von Inhomogenitäten an allen 130 Stationen auszugehen. Und ebenso vergleichbar ist die Verteilung der Bruchpunkte über die Zeit (Abbildung 24). Von einem großräumigen Einfluss auf die Inhomogenitäten ist somit nicht auszugehen, vielmehr ebenfalls von standortbezogenen Ursachen.



**Abbildung 24: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für FM.**

Die größte Häufung tritt Mitte der 1990er Jahre auf. In Abbildung 25 ist zu sehen, dass anders als bei der mittleren Windgeschwindigkeit an diesem Bruchpunkt einen größeren Sprung und eine Umkehr des Trends zu beobachten ist. Dieser ist jedoch verglichen mit den absoluten Werten der maximalen Windgeschwindigkeiten klein, so dass von einer Überinterpretation dieses Ergebnisses abgesehen werden muss. Die Inhomogenitäten in den einzelnen Zeitreihen machen sich ähnlich wie bei der mittleren Windgeschwindigkeit in größeren Sprüngen in beide Richtungen bemerkbar.

## FM



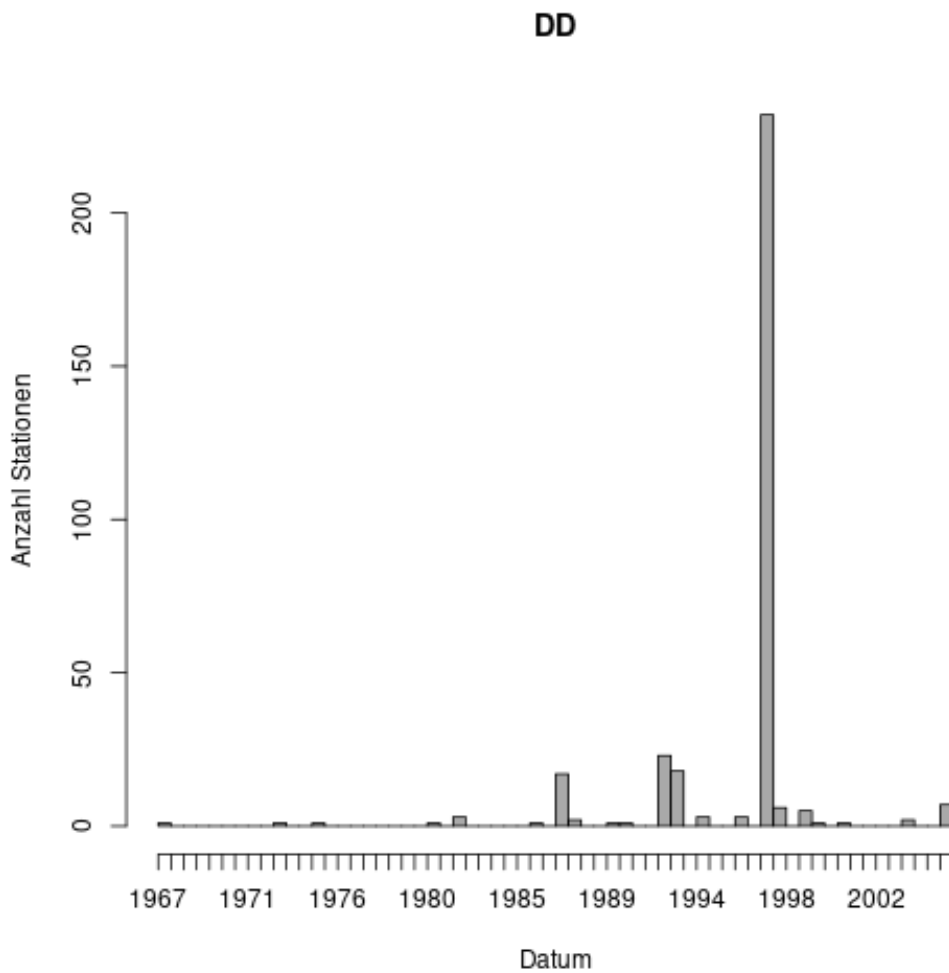
**Abbildung 25: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für FM. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Die Gründe hierfür sind wieder in den Stationen selbst zu finden, Messgerätewechsel und Änderungen bei den Messhöhen sind hier die Hauptursachen.

### 2.3.3.9 Dampfdruck (DD)

Bei der Betrachtung der Ergebnisse des Dampfdruckes wird zunächst festgehalten, dass auch hier alle Zeitreihen Inhomogenitäten aufweisen. Die Irrtumswahrscheinlichkeiten liegen zwischen 0 und 0,01. Die Auswertung von Abbildung 26 mag zunächst verwundern: Die Verteilung der Bruchpunkte des Dampfdruckes, bestimmt aus den Größen Temperatur und relativer Luftfeuchte, weist ein ähnliches Verhalten wie die Temperatur auf, jedoch tritt die Häufung der Bruchpunkte (mehr als 230 von 330 Zeitreihen) nicht wie bei der Temperatur im Jahr 1988 auf, sondern im Jahr 1997.

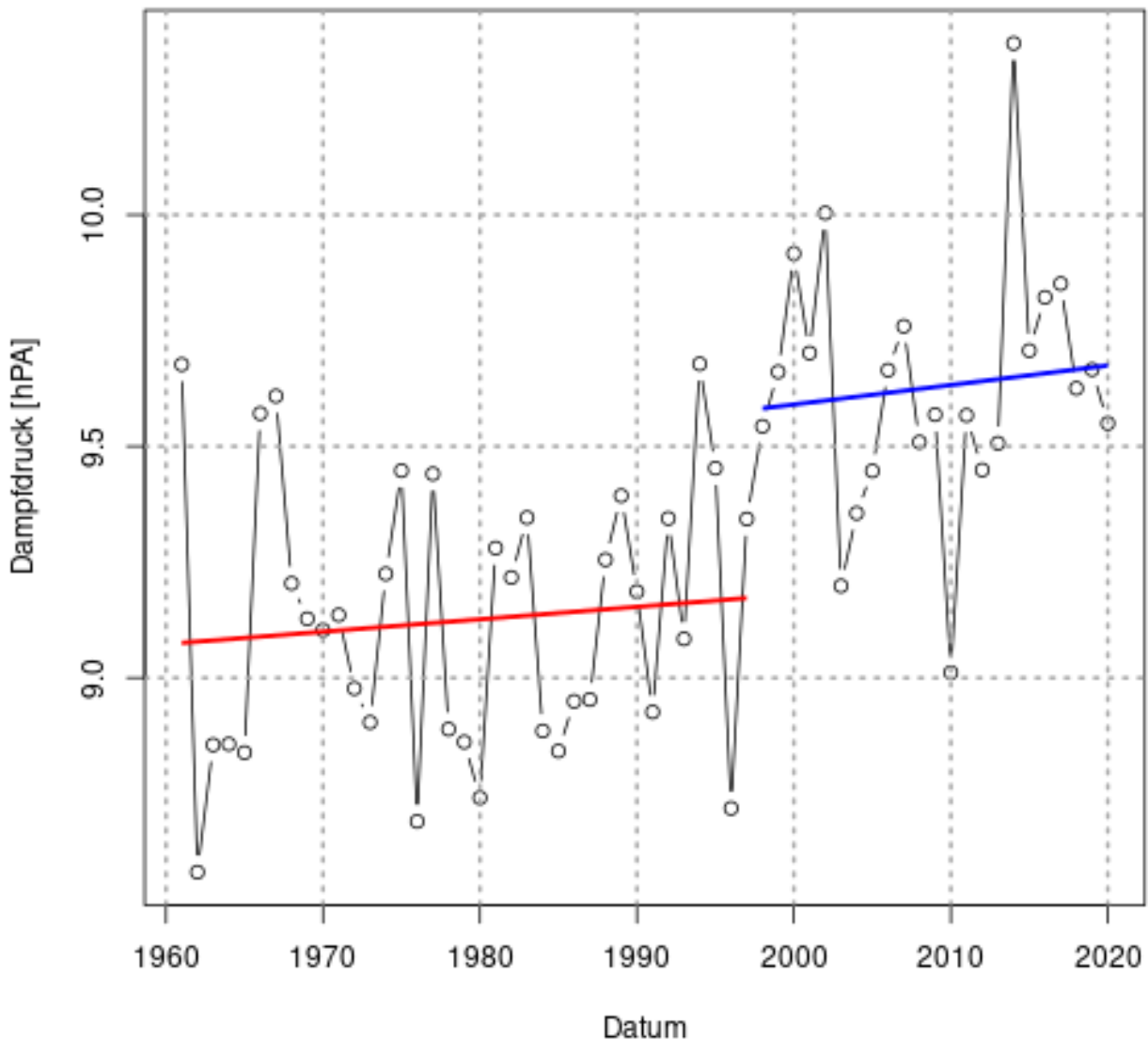




**Abbildung 26: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für DD.**

Ein zweiter Blick in die Verteilung der Bruchpunkte der mittleren Temperatur (Abbildung 12) zeigt, dass es dort eine zweite, lokale Häufung von Bruchpunkten gibt. In diesem Bericht sind ausschließlich die wahrscheinlichsten Bruchpunkte dargestellt. Würden detailliertere Untersuchungen durchgeführt, würden auch weitere Bruchpunkte in den Zeitreihen gefunden. Das heißt, Temperaturzeitreihen, deren wahrscheinlichster Bruchpunkt im Jahr 1988 liegt, können weitere Bruchpunkte, wie z. B. im Jahr 1997 haben. Bleibt die Frage, warum die Häufung der Bruchpunkte überdeutlich im Jahr 1997 auftritt und im Jahr 1988 nur weniger als 10% der Bruchpunkte liegen. Die Antwort findet sich im physikalischen Zusammenhang der beiden Größen Sättigungsdampfdruck und Temperatur. Ausgehen von der Clausius-Clapeyron-Gleichung oder einer Approximation wie der Magnus-Formel wird deutlich, dass zwischen beiden Größen ein exponentieller Zusammenhang besteht. Je höher die Temperatur, desto höher der Sättigungsdampfdruck. Eine Erhöhung der Temperatur um ein Kelvin führt zu einer Erhöhung des Sättigungsdampfdruckes von ca. 7%. Somit führt eine Erhöhung der Temperatur von 10 Kelvin zu einer Verdopplung des Sättigungsdampfdruckes. Da die relative Luftfeuchte nicht in gleichem Maße sinkt wie der Sättigungsdampfdruck ansteigt, führen somit immer höhere Temperaturen zu exponentiell höheren Dampfdruckwerten. Für die Zukunft ist es somit möglich, dass auch ein relativ moderater Temperaturanstieg zu einem deutlichen Anstieg des Dampfdruckes führt und somit neue Bruchpunkte in den Zeitreihen des Dampfdruckes entstehen, auch wenn diese Bruchpunkte in den Zeitreihen der Temperatur weniger deutlich ausgeprägt sind.

## DD

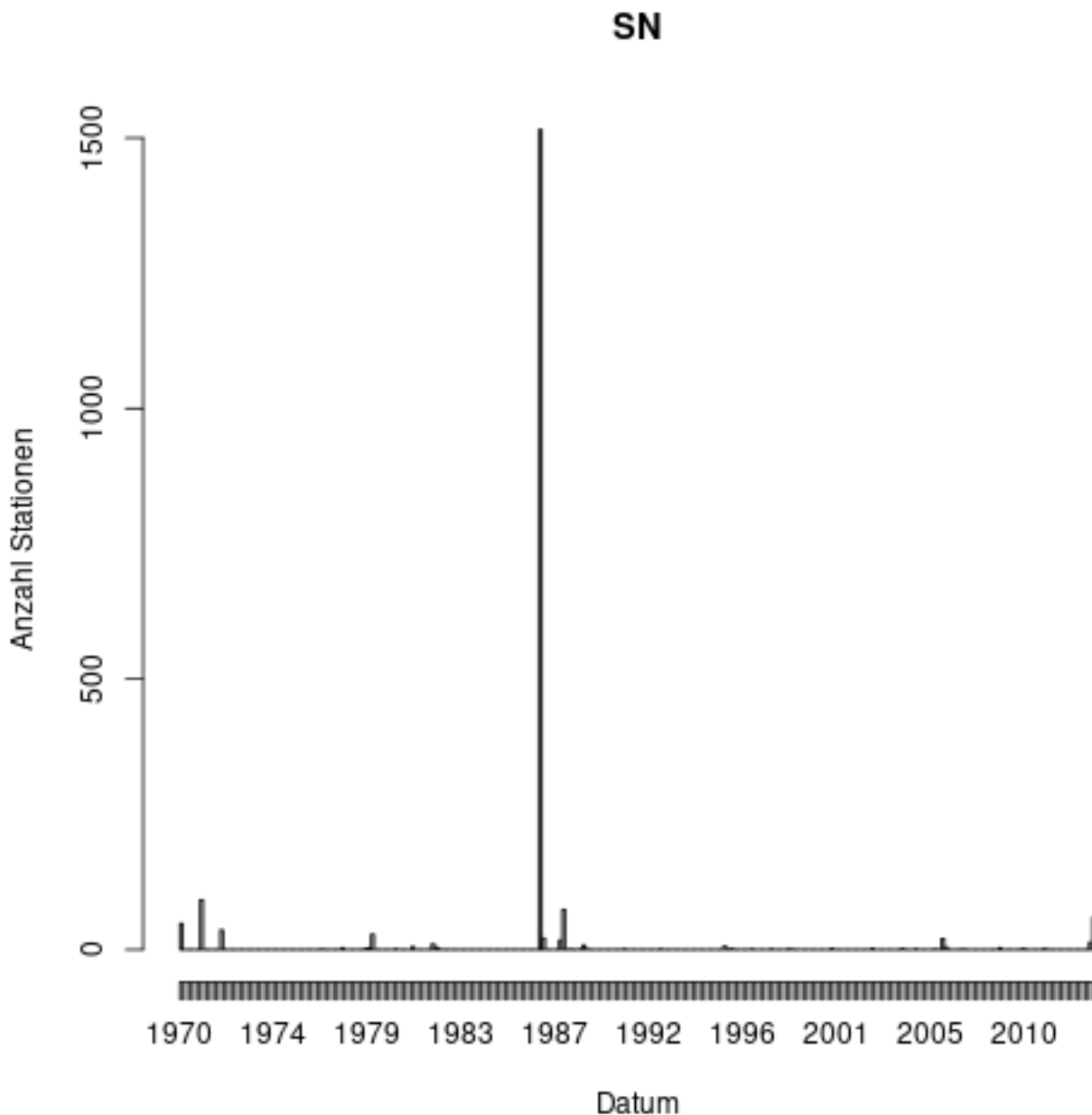


**Abbildung 27: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für DD. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Der Sprung in Abbildung 27 zeigt einen deutlichen Sprung des mittleren Dampfdrucks um etwa 0,4 hPa im Jahr 1995. Der Gradient steigt hingegen nur leicht, da leicht sinkende Werte der relativen Luftfeuchte den Anstieg etwas abpuffern.

### 2.3.3.10 Schneehöhe (SN)

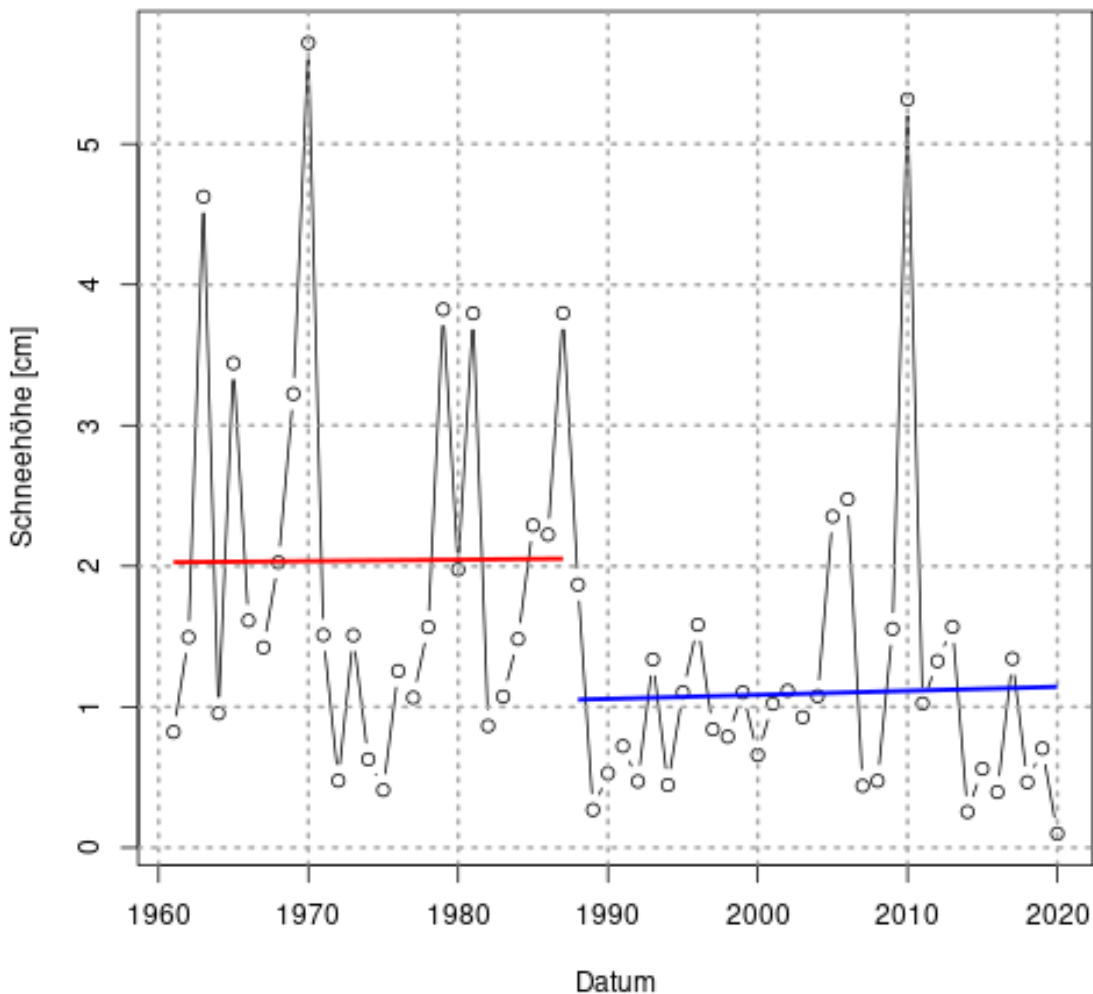
Die deutlichste Häufung der Bruchpunkte aller Messgrößen weisen die Zeitreihen der Schneehöhe auf. Neben der festgestellten Inhomogenität aller Zeitreihen (Irrtumswahrscheinlichkeit 0 bis 0,06) fällt auf, dass mehr als 1.500 aller 1998 Stationen den größten Bruch im Jahr 1987 (Abbildung 28) aufweisen. Eine derartige Häufung ist bei den anderen Messgrößen nicht festzustellen. Es ist damit praktisch gesichert, dass die Ursachen für die Inhomogenitäten überwiegend nicht in den Zeitreihen selbst, sondern in großräumigen Klimaänderungen zu finden sind.



**Abbildung 28: Zeitliche Verteilung der Bruchpunkte für SN.**

Ursache für diese Häufung ist vermutlich die Reduzierung des Dimmings Ende der 1980er Jahre. Dies führte einerseits zu einer höheren Temperatur und damit einen größeren Anteil von Regen an und einem geringeren Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag. Außerdem führt eine erhöhte solare Einstrahlung zu schnellerem Abschmelzen des Schnees. Dieser Effekt lässt sich ohne genauere Untersuchungen jedoch nicht exakt quantifizieren, da Schnee aufgrund der ihm eigenen sehr hohen Albedo die solare Einstrahlung überwiegend reflektiert.

## SN



**Abbildung 29: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Stationen für SN. Rote Linie: Mittlerer Trend vor dem häufigsten Bruchpunkt. Blaue Linie: Mittlerer Trend nach dem häufigsten Bruchpunkt.**

Deutlich wird die Größe des Bruchs auch am Vergleich der Zahlen: Die mittlere Schneehöhe vor dem Bruchpunkt war fast doppelt so hoch wie die mittlere Schneehöhe es nach dem Bruchpunkt ist.

### 2.3.4 Zusammenfassung der Homogenitätsanalyse

Bis auf eine einzelne Zeitreihe konnten für allen untersuchten Zeitreihen Inhomogenitäten nachgewiesen werden. Für die Größen mittlere Windgeschwindigkeit, maximale Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte und Niederschlag dominieren hierbei die stationsbasierten Inhomogenitäten deutlich vor den externen Ursachen. Bei den Zeitreihen der Messgrößen, mittlere, Minimum- und Maximumtemperatur, Dampfdruck, Sonnenscheindauer und Schneehöhe hingegen dominieren die externen Ursachen. Diese ist vermutlich vor allem im Rückgang des Dimming-Effektes zu finden: Durch die Reduzierung des Schwebstaubes in der Luft konnte deutlich mehr solare Strahlung den Boden erreichen, mit Auswirkungen auf die Temperatur, den Dampfdruck und die Schneehöhe. Diese These wird durch Cahill et al, 2015 gestützt. Diese detektieren einen globalen Bruchpunkt der Temperatur 1979/1980. Durch Dimming (oder aber durch den anderen Untersuchungszeitraum) kann der Bruchpunkt für Mitteldeutschland nach hinten verlagert sein.

## 2.4 Berechnung abgeleiteter Größen

- korrigierter Niederschlag RK in (mm) nach Richter (1995)
- Globalstrahlung RG in ( $J/cm^2$ ), ( $kWh/m^2$ ), ( $W/m^2$ ) nach Ångström (1924)
- potentielle Verdunstung ET in (mm), ( $W/m^2$ ) nach Turc-Wendling (Wendling et al., 1991)
- Gras-Referenzverdunstung GR in (mm), ( $W/m^2$ ) nach FAO-Standard (Allen, 1998)

## 2.5 Bereitstellung des stationsbasierten Klima-Referenzdatensatzes

Der Referenzdatensatz wird über das Portal "ReKIS" zur Verfügung gestellt. Neben den lückengefüllten Stationsdaten der gemessenen sowie abgeleiteten Größen werden für die gemessenen Größen flagging-Daten bereitgestellt. Diese geben für jeden Zeitpunkt und jede Station an, ob es sich um original gemessene Daten (Flag "0"), lückengefüllte Daten (Flag "1") oder eine Erweiterung der Zeitreihe außerhalb des gemessenen Zeitraumes (Flag "2") handelt.

## 3 Erzeugung eines rasterbasierten Datensatzes

In diesem Abschnitt werden das Vorgehen zur Erstellung sowie die Eigenschaften und die Verfügbarkeit verschiedener rasterbasierter Produkte beschrieben. Diese sind zuerst ein rasterbasierter Klima-Referenzdatensatz für den Freistaat Sachsen. Dieser führt die Arbeiten zum Interpolationstool RaKliDa (Kronenberg et al., 2021) fort und erweitern diese in Bezug auf die räumliche Auflösung, die zeitliche Abdeckung, die verwendeten Stationsdaten sowie die Interpolationsmethode.

Der zweite Punkt dieses Abschnittes, die Erstellung einer rasterbasierten Starkregenanalyse, führt die Starkregenanalyse nach Bernhofer et al. (2017b) fort und ermöglicht räumliche und zeitliche Aussagen zur Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen in Sachsen.

Im dritten Punkt wird, ebenfalls rasterbasiert, die Nebeldeposition nach Körner et al. (2020) für Sachsen bestimmt. Dies führt frühere Berechnungen nach Bernhofer et al. (2017a) fort und entwickelt diese weiter.

Alle Berechnungen erfolgen in täglicher Auflösung für den Zeitraum 1961 bis 2020 mit einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 Metern.

### 3.1 Erzeugung des rasterbasierten Klima-Referenzdatensatzes Sachsen

Aus dem in den Abschnitten 2.3 und 2.4 erstellten vollständig lückengefüllten stationsbasierten Datensatz für den MDK-Raum werden Rasterdatensätze für Sachsen für die folgenden Elemente erstellt:

- Minimum (TN), Maximum (TX) und Mittel (TM) der Lufttemperatur in 2m ü. Grund in ( $^{\circ}C$ )
- Mittel der relativen Luftfeuchte (RF) in 2m ü. Grund in (%)
- Niederschlag (RR) und korrigierter Niederschlag (RK) in (mm)
- Globalstrahlung (RG) in ( $J/cm^2$ )

Die Datensätze werden für die Jahre 1961 bis 2020 in täglicher Auflösung für ein 100 x 100 Meter Raster erzeugt.

### 3.1.1 Methodik zur Berechnung der Rasterdatensätze

Es kommen zwei verschiedene Interpolationsmethoden zum Einsatz: Für die Größen TM, TN, TX, RF und RG werden thin plate splines (tps) verwendet. Die Implementierung erfolgt mit dem Paket "fields" (Nychka et al., 2021) in der statistischen Programmiersprache "R" (R Core Team, 2022). Hier wird die meteorologische Größe als Funktion der geografischen Länge, der geografischen Breite sowie der Geländehöhe an die Stationsdaten angepasst und anschließend für jede Rasterzelle berechnet.

Für die Niederschlagsgrößen RR und RK wird eine erweiterte Methodik angewendet, welche sich im ReKIS-Fortschrittsbericht 2019 in der Überprüfung durch Kreuzvalidierung als qualitativ hochwertigste herausgestellt hat. Sie besteht aus mehreren Schritten: Neben dem tps, wie es für die anderen meteorologischen Größen verwendet wurde, wird ein Kriging angewendet, welches ebenfalls für der "fields"-Paket im "R" realisiert wird. Nach der Berechnung stehen für jede Rasterzelle zwei Werte zur Verfügung, ein mittels tps und ein mittels Kriging berechneter. Aus diesen beiden Werten wird der Mittelwert gebildet und als Niederschlagswert für die Zelle verwendet.

Im nächsten Schritt wird ein Indikator berechnet der angibt, ob in einer bestimmten Zelle an einem bestimmten Tag überhaupt Niederschlag gefallen ist oder nicht. Dieser Indikator ist für die Stationsdaten entweder 0 (kein Niederschlag) oder 1 (Niederschlag). Der Indikator wird für jede Rasterzelle, wie für die absoluten Niederschlagswerte im Schritt davor, mit tps und Kriging interpoliert. Der Mittelwert aus beiden Methoden ergibt die Wahrscheinlichkeit für jede Rasterzelle, dass zum jeweiligen Tag Niederschlags gefallen ist. Dieser Wert liegt typischerweise zwischen 0 und 1. Werte kleiner als 0 und größer als 1 sind durch die Art der Interpolation möglich und werden auf 0 bzw. 1 korrigiert.

Zur Berechnung der Tageswerte des Niederschlages wird nun wie folgt vorgegangen: Ist die Wahrscheinlichkeit für Niederschlag in einer Zelle größer oder gleich 50% (Indikatorwerte  $\geq 0,5$ ), dann wird der Absolutwert aus dem ersten Schritt verwendet. Ist die Wahrscheinlichkeit kleiner als 50% (Indikatorwerte  $< 0,5$ ), dann wird der Niederschlagswert auf 0 mm/d gesetzt.

Für alle Größen gilt, dass Werte, die durch geostatistische Interpolation entstehen und außerhalb des möglichen Wertebereiches der jeweiligen Größe liegen, auf den plausiblen Wertebereich versetzt werden. Ein Niederschlag von -0,4 mm wird somit zu 0 mm, eine relative Feuchte von 104% wird zu 100%.

Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.1 genannten Größen werden Rasterdaten in der gleichen Auflösung für die Größen Mittel (FF) und Maximum (FM) der 10m-Windgeschwindigkeit sowie die Hauptwindrichtung (FD) in 10 m über Grund erzeugt. Diese Erstellung erfolgt durch Berechnung des Mittelwertes (FM, FX) beziehungsweise des resultierenden Vektors (FD) aus dem vorhandenen Datensatz "Windfeld Sachsen" (LfULG, 2022 in Vorbereitung), welcher die entsprechenden Winddaten in Stundenauflösung enthält.

### 3.1.2 Validierung

Dieser Abschnitt untersucht die Standorttreue des Schätzers der räumlichen Interpolation durch den Vergleich von lagekorrespondierenden Stationen und den jeweiligen 100m-Rasterzellen. Durch die 100m Auflösung ist sowohl der räumliche Abstand als auch der Unterschied zwischen der Höhe über dem Meeresspiegel zwischen Station und Rasterzelle sehr gering und beträgt jeweils nur einige Meter. Ein guter räumlicher Schätzer sollte somit nur geringe Abweichungen zwischen der Zeitreihe der Station und jener des Rasterdatensatzes aufweisen.

Für Tageswerte umfasst die Validierung die Größen Minimumtemperatur (TN), Maximumtemperatur (TX), mittlere Temperatur (TM), relative Luftfeuchte (RF), Niederschlag (RR), korrigierter Niederschlag (RK) und Globalstrahlung (RG). Raster anderer Größen wie beispielsweise Nebeldeposition oder Verdunstung wurden aus Rasterdatensätzen anderer Größen bestimmt, so dass ein Vergleich mit Stationswerten nicht möglich ist.

**Tabelle 4: Kennwerte der lagekorrespondierenden Validierung (tägliche Auflösung)**

Größe	RMSE	MAE	BIAS	R <sup>2</sup>
TN (°C)	0,53	0,36	-0,02	0,996
TX (°C)	0,34	0,23	-0,01	0,999
TM (°C)	0,32	0,24	0,00	0,999
RF (%)	2,86	2,12	0,04	0,96
RR (mm)	0,68	0,23	0,00	0,97
RK (mm)	0,72	0,26	0,00	0,97
RG (J/cm <sup>2</sup> )	45,1	25,8	-2,4	0,996

Tabelle 4 zeigt, dass durch die verwendeten Interpolationsmethoden für die täglichen Werte eine sehr hohe Standorttreue gegeben ist.

Für den Vergleich der monatlichen Raster stehen die Größen mittlere Temperatur (TM), Niederschlag (RR), korrigierter Niederschlag (RK) sowie Globalstrahlung (RG) zur Verfügung.

**Tabelle 5: Kennwerte der lagekorrespondierenden Validierung (monatliche Auflösung)**

Größe	RMSE	MAE	BIAS	R <sup>2</sup>
TM (°C)	0,19	0,15	0,00	0,9997
RR (mm)	4,23	2,83	-0,01	0,985
RK (mm)	4,45	3,03	0,01	0,985
RG (kWh/m <sup>2</sup> )	1,54	1,09	-0,20	0,9995
RG (W/m <sup>2</sup> )	2,10	1,50	-0,27	0,9995

Durch den höheren Aggregierungsgrad der monatlichen Daten im Vergleich zu den täglichen Daten ist die Übereinstimmung der in Tabelle 5 noch einmal deutlich höher als beim täglichen Vergleich. Dies bestätigt die Eignung der gewählten Interpolationsmethode. Außerdem ist dies eine Möglichkeit den Datensatz auf Fehler zu überprüfen. Sollten solche auftreten, so würde dies spätestens an dieser Stelle auffallen.

Hinweis: Die Validierung der lagekorrespondierenden Zeitreihen der Rasterzellen mit den Stationsdaten stellt keine Kreuzvalidierung dar. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit der Kreuzvalidierung der Lückenfüllung aus Abschnitt 2.3.2 ist darum nicht sinnvoll. Die Kreuzvalidierung der räumlichen Interpolation wurde vergleichend für verschiedene räumliche Interpolationsmethoden im ReKIS-Fortschrittsbericht 2019 durchgeführt.

### 3.1.3 Homogenität

Aus den festgestellten Inhomogenitäten aller Zeitreihen in Abschnitt 2.3.3 und der Ergebnisse der Validierung der lagekorrespondierenden Rasterzellen mit den entsprechenden Zeitreihen ist zu schließen, dass die Zeitreihen der Rasterzellen in gleichem Maße Inhomogenitäten wie die Zeitreihen aufweisen. Eine separate Untersuchung aller ca. 20.000.000 Pseudozeitreihen ist rechentechnisch derzeit unmöglich durchzuführen.

### 3.1.4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die mittleren Jahreswerte des Zeitraumes 1961-2020 dargestellt. Die Daten aller Tagesraster aller Messgrößen und abgeleiteter Elemente werden über im „Regionalen Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen unter [www.rekis.org](http://www.rekis.org) zum freien Herunterladen bereitgestellt. In Abbildung 30 sind die Karten für die mittlere Temperatur, Minimumtemperatur, Maximumtemperatur, relative Luftfeuchte, korrigierter sowie unkorrigierter Niederschlag dargestellt. Bei den Temperaturgrößen ist ein klarer Zusammenhang zwischen Höhenlage und Temperaturwerten zu erkennen: Je höher ein Gebiet über dem Meeresspiegel liegt, desto geringer ist die Temperatur. Dies folgt dem mittleren adiabatischen Höhengradienten. Umgekehrt ist der Zusammenhang bei der Feuchte und dem Niederschlag: Je höher ein Gebiet liegt, desto höher ist auch die Jahressumme des Niederschlages und auch der Mittelwert der relativen Luftfeuchte.

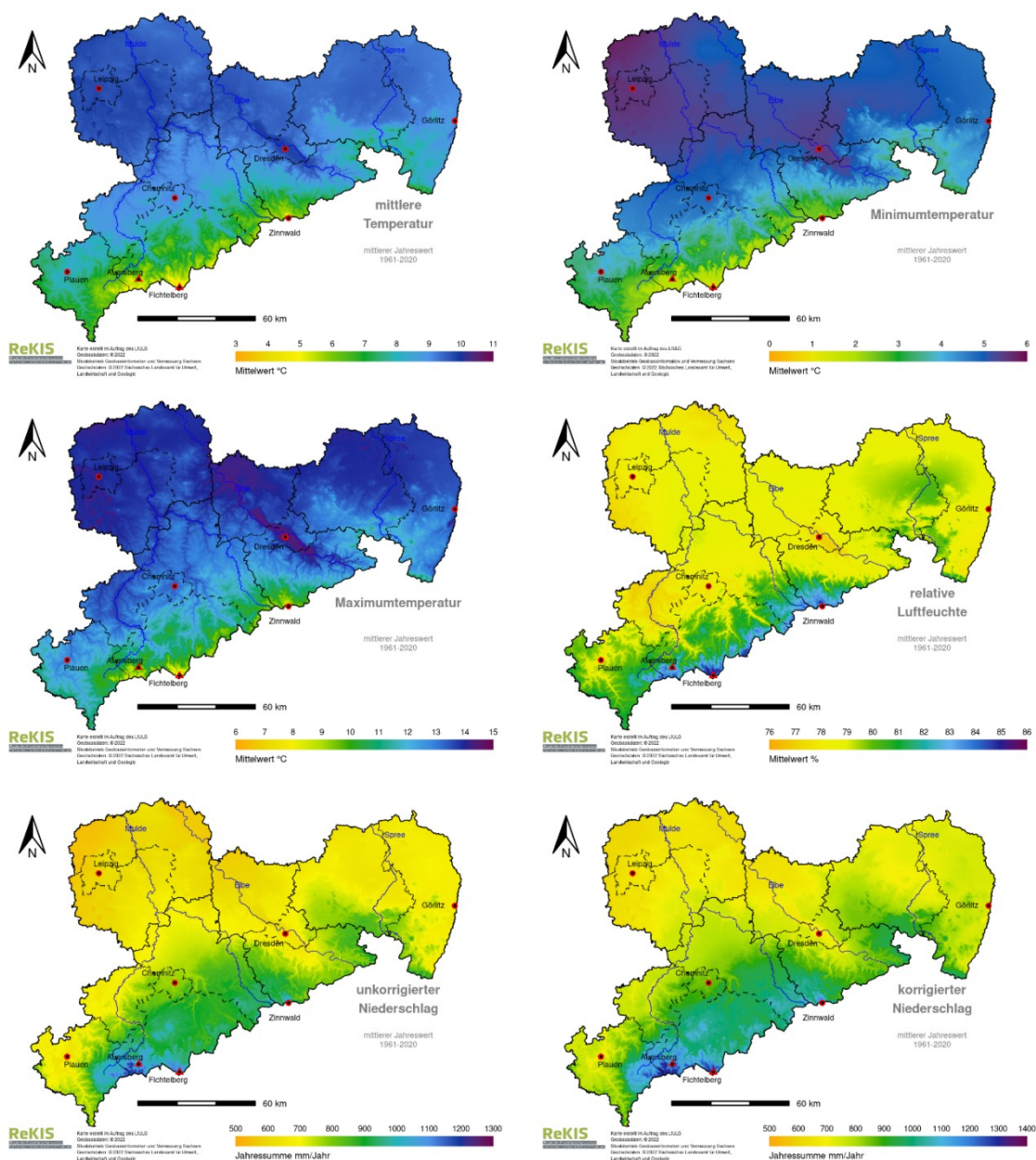


Abbildung 30: Mittlere Werte für den Zeitraum 1961-2020 für die Temperatur, relative Feuchte und den Niederschlag

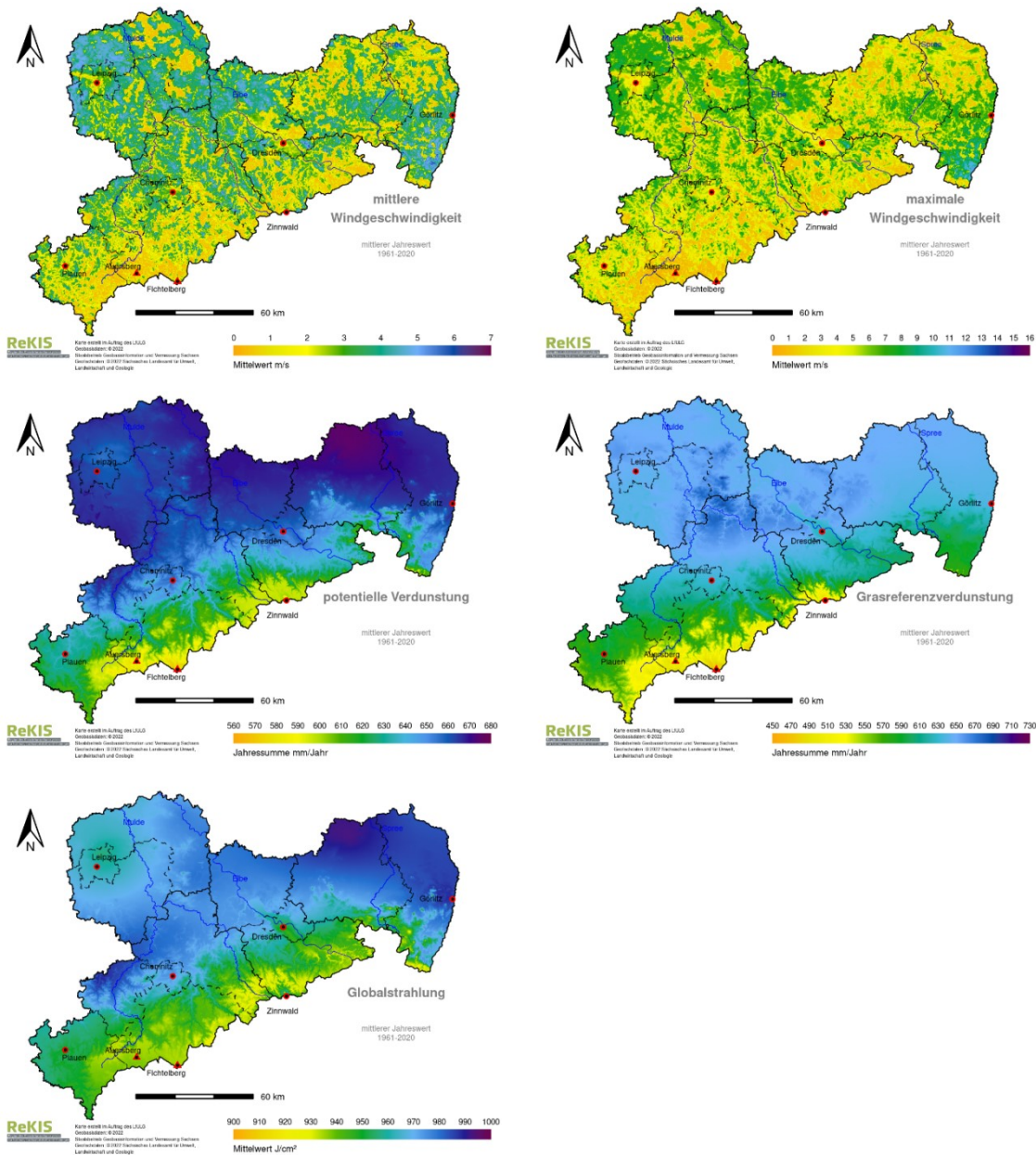


In Abbildung 31 wird sichtbar, dass die mittleren Werte der Windgeschwindigkeiten nur noch eine geringe Höhenabhängigkeit aufweisen. Stattdessen spielt der Einfluss der Landbedeckung sowie die Orografie, hier insbesondere der Verlauf der Flusstäler, die entscheidende Rolle. Eine Höhenabhängigkeit kann dagegen bei der Globalstrahlung beobachtet werden. Diese wird allerdings überlagert durch großräumige Einflüsse, so dass das Maximum der Globalstrahlung in Sachsen in der Niederlausitz auszumachen ist. Dieser Einfluss paust sich auf die potentielle Verdunstung durch, da diese von der Globalstrahlung abhängt. Bei der Grasreferenzverdunstung ist dieser Einfluss geringer, so dass diese stärker höhenabhängig ist und höher ausfällt, je niedriger ein Gebiet liegt.

Hinweis: Die Daten des Windfeldes wurden nicht im Rahmen dieser Untersuchung erstellt. Vielmehr wurden die Raster durch Aggregation (LfULG, 2022 in Vorbereitung) aus Stundendaten erzeugt. Diese Daten weisen in entscheidenden Punkten systematische Abweichungen mit anderen Untersuchungen (Starke et al., 2019) oder Produkten (Windkarte des Deutschen Wetterdienstes<sup>1</sup>) auf. Neben zahlreichen lokalen Auswirkungen betrifft dies den Höhengradienten: Während Messdaten an Stationen und Untersuchungen des DWD zeigen, dass die Windgeschwindigkeit mit der Geländehöhe zunimmt, ist bei dem vorliegenden Produkt, wie in Abbildung 31 zu sehen ist, das Gegenteil der Fall. Dies ist bei Verwendung der Rasterdaten entsprechend zu berücksichtigen.

---

<sup>1</sup> [https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/windkarten/SA\\_0\\_10.jpg](https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/windkarten/SA_0_10.jpg)



**Abbildung 31: Mittlere Werte für den Zeitraum 1961-2020 für die Windgeschwindigkeit, Verdunstung und Globalstrahlung**

### 3.2 Erstellung einer rasterbasierten Starkregenanalyse

Die rasterbasierte Starkregenanalyse ist eine Erweiterung der Studie von Bernhofer et al. (2017b), die im Auftrag des LfULG durchgeführt wurde. Die angewendete Methodik ist hierbei die gleiche. Siehe hierzu auch Schaller et al., 2020. Zu Grundlagen und Methoden wird darum auf vorgenannte Studie verwiesen. Unterschiede ergeben sich aus dem erweiterten Zeitraum (1961-2020 vs. 1961-2015), der räumlichen Auflösung (100m vs. 1000m) sowie der verwendeten Daten. In diesem Bericht werden die aktuellen, wie oben beschrieben, lückenlosen Daten des Referenzdatensatzes verwendet. Durch Änderung in der Datenverfügbarkeit und Verbesserung bei der Lückenfüllung und der räumlichen Interpolation kommt es zu geringfügigen Änderungen in den Ergebnissen im Vergleich zur vorherigen Studie. Diese Änderungen sind jedoch regional stark beschränkt. Die Grundaussagen zur Änderung des Auftretens von Starkregen wird durch unsere Untersuchungen bekräftigt.

### 3.2.1 Überblick

Für den Freistaat Sachsen wurde Starkregen hinsichtlich der Regenhöhe, der Überschreitungstage, der mittleren Intensität und der Auftrittshäufigkeit für den Zeitraum 1961 - 2020 analysiert. Die Kerngebiete der Änderung wurden aus diesen Ergebnissen abgeleitet. Des Weiteren wurde der zeitliche Verlauf der Auftrittshäufigkeit für Transekte dargestellt. Alle Ergebnisse wurden für Starkregen R90p (90. Perzentil) und Starkregen R95p (95. Perzentil) generiert. Im Fokus liegt die Analyse der Änderung der Klimanormalperiode 1991 – 2020 gegenüber der Referenzperiode 1961 – 1990.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse exemplarisch für den Freistaat Sachsen gezeigt. Nach den in Abbildung 32 dargestellten Planungsregionen, Landkreisen und kreisfreien Städten erfolgt die flächenhafte Differenzierung der Ergebnisse.

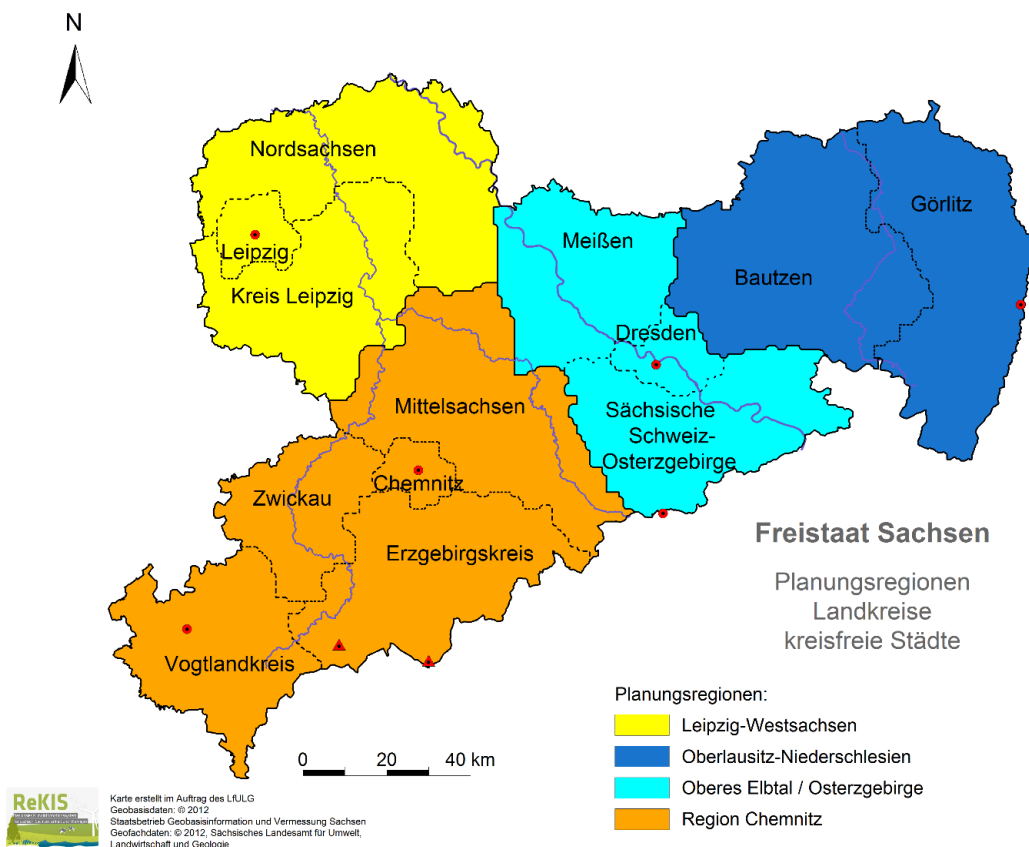
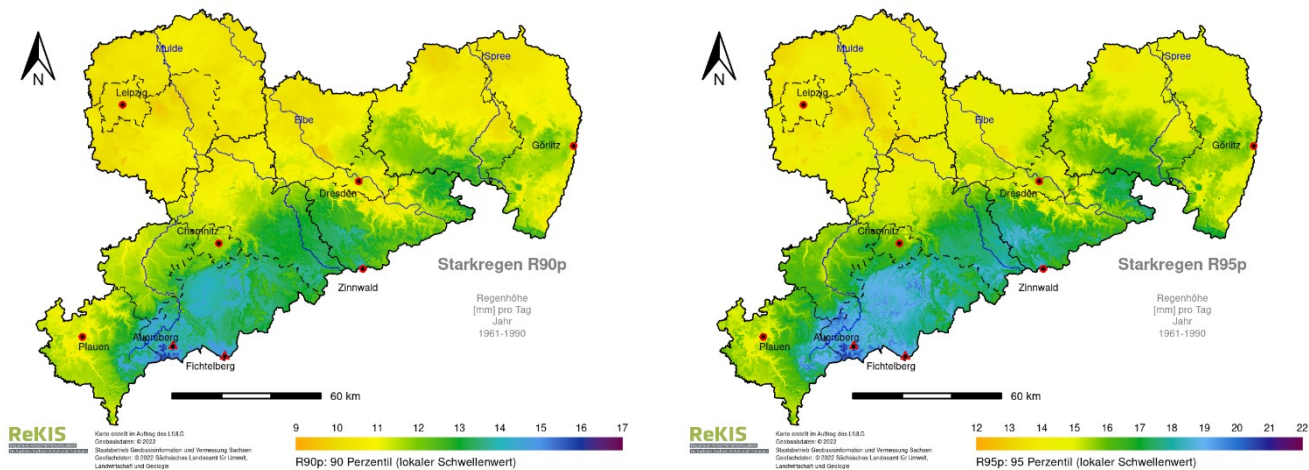


Abbildung 32: Planungsregionen, Landkreise und kreisfreie Städte des Freistaates Sachsen

### 3.2.2 Regenhöhe

Die Regenhöhe der WMO-Referenzperiode ist die Basis der nachfolgenden Niederschlagsindizes. Die lokal unterschiedlichen Ausprägungen der Höhe eines Starkniederschlags R90p/R95p zeigt Abbildung 33.

Die Regenhöhe (synonym Regenmenge) folgt annähernd der Geländehöhe, welches sich in einem Süd-Nord Gradienten manifestiert. Zusätzlich ist durch Luv-Leeeffekte ein deutlicher West-Ost Gradient erkennbar. Aufgrund des Perzentil basierten Ansatzes sind die Regenhöhen für R90p niedriger als für R95p. Die maximalen Regenhöhen treten in den Kammlagen des Westerzgebirges auf.



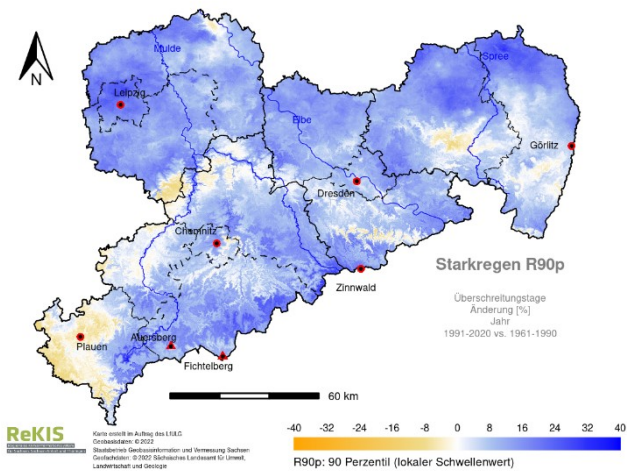
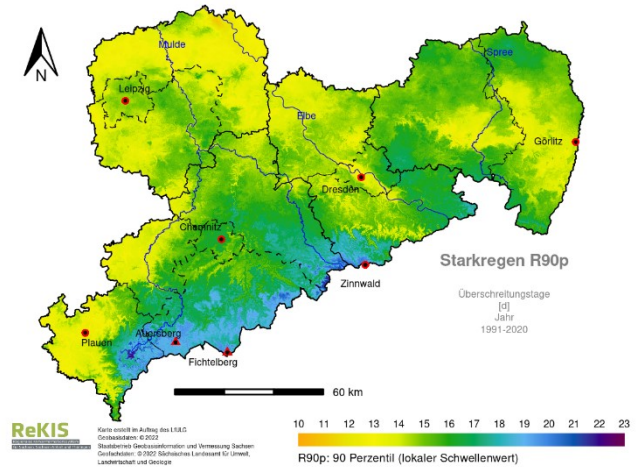
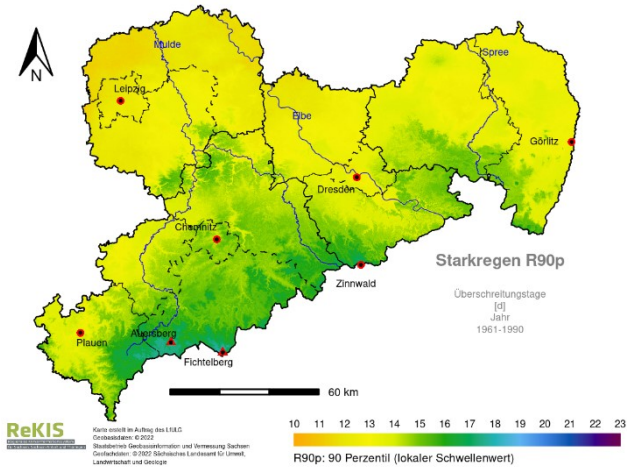
**Abbildung 33: Starkregen R90p, R95p – Regenhöhe für 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**

Hinweis: Die flächenhaften Verteilungen ergeben sich aus der Analyse von Zeitreihen für ca. 20.000.000 Pseudostationen (100x100m-Rasterzellen), die aus interpolierten Tagessummen extrahiert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass scheinbar unplausible Argumente in den extrahierten Zeitreihen auftreten können. Unter anderem ist die zur Interpolation notwendige adäquate Verteilung der Stützstellen nicht immer gegeben. Bei der Bewertung der Abbildungen ist vom Gesamteindruck auszugehen.

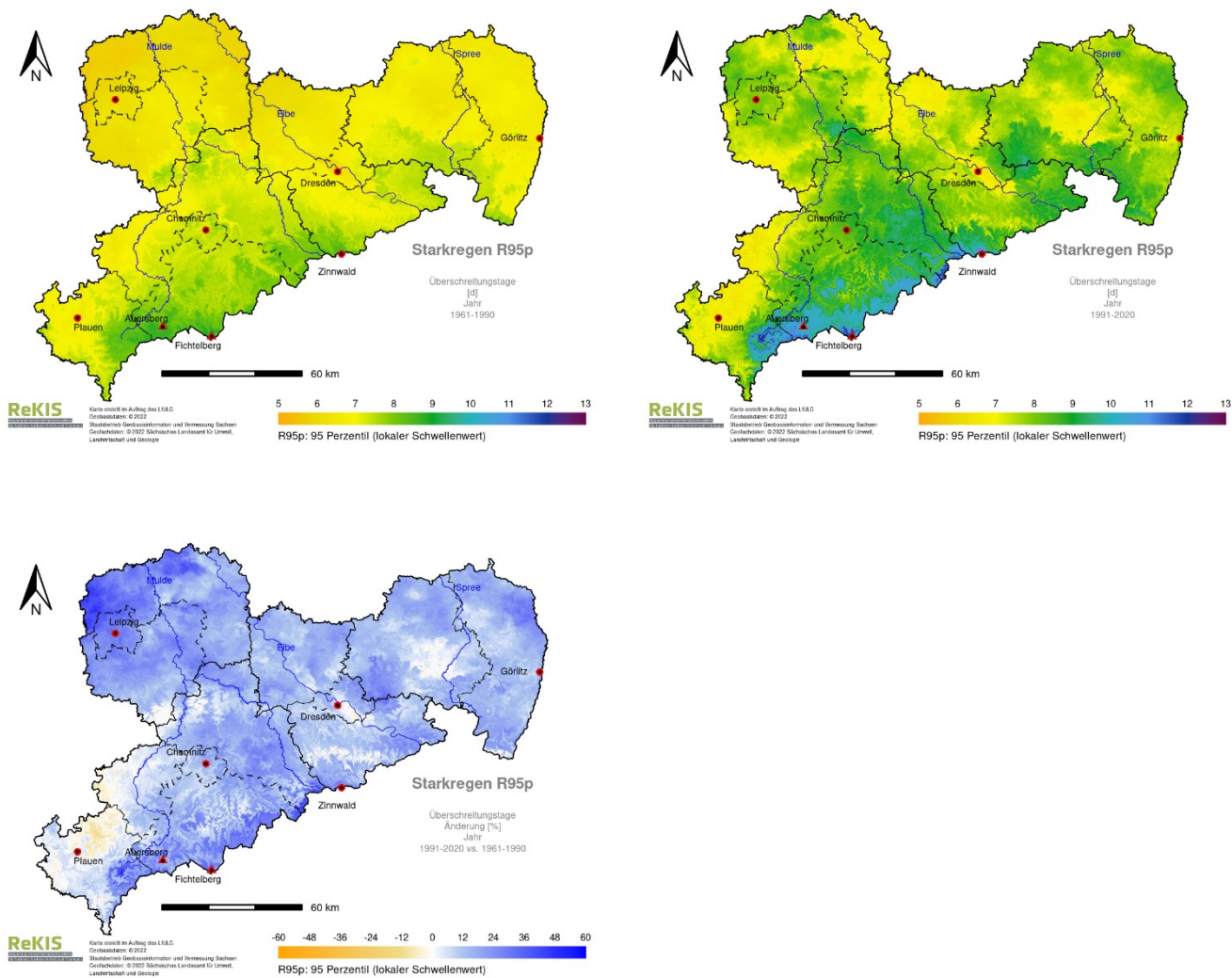
### 3.2.3 Überschreitungstage

Die Überschreitungstage von Starkregen R90p und R95p werden für die Referenzperiode und die beiden 30-jährigen Zeiträume in Abbildung 34 und Abbildung 35 gezeigt. Des Weiteren werden die prozentualen Änderungen gegenüber der Referenzperiode dargestellt. In Tabelle 6 wird deren Flächenmittel, sowie die durchschnittlichen Änderungen für Sachsen aufgeführt. Die flächenhafte Verteilung der Änderungen wird in Abbildung 36 mit Box-Whisker-Plots dargestellt.

Für die Überschreitungstage ist eine flächendeckende Zunahme festzustellen. Die Region Leipzig, sowie die Kammlagen des Erzgebirges zeigen besonders starke Zunahmen gegenüber der Referenzperiode, vor allem für den Zeitraum 1991 - 2020. Die Abnahme der Überschreitungstage kann in den Leelagen der Mittelgebirge, unter anderem im Vogtlandkreis, in Nordsachsen im Verlauf der Elbe und in Teilen der Region Oberlausitz-Niederschlesien beobachtet werden. Die Zunahmen sind für Starkregen R95p höher als für R90p.



**Abbildung 34: Starkregen R90p - Überschreitungstage für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**

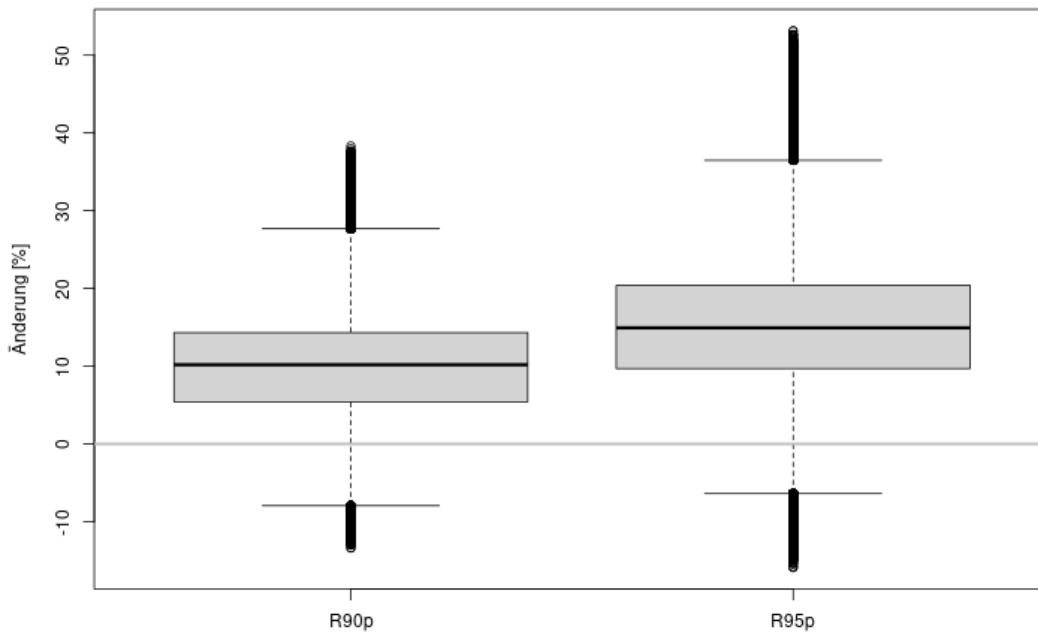


**Abbildung 35: Starkregen R95p - Überschreitungstage für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**

**Tabelle 6: Starkregen R90p und R95p – durchschnittliche Anzahl der Überschreitungstage sowie deren Änderung gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**

Zeitraum	R90p Überschreitungstage Zeitraum [d]	R90p Überschreitungstage Änderung 1961-1990 [%]	R95p Überschreitungstage Zeitraum [d]	R95p Überschreitungstage Änderung 1961-1990 [%]
1961 – 1990	13,8	-	6,9	-
1991 – 2020	15,1	9,6	8,0	15,0

Überschreitungstage 1991-2020 vs 1961-1990



**Abbildung 36: Box-Whisker-Plot für die flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p, R95p – Überschreitungstage für Sachsen**

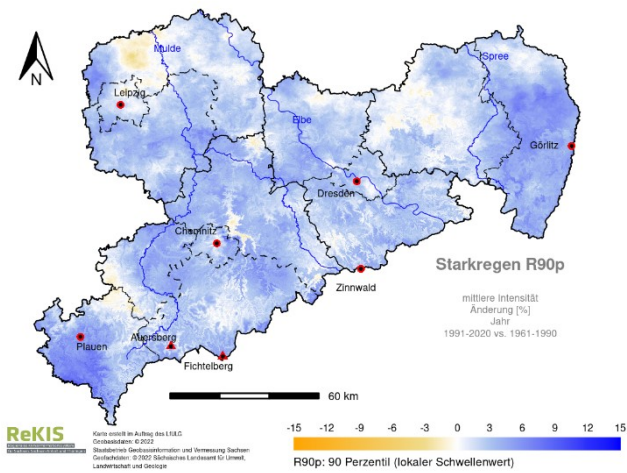
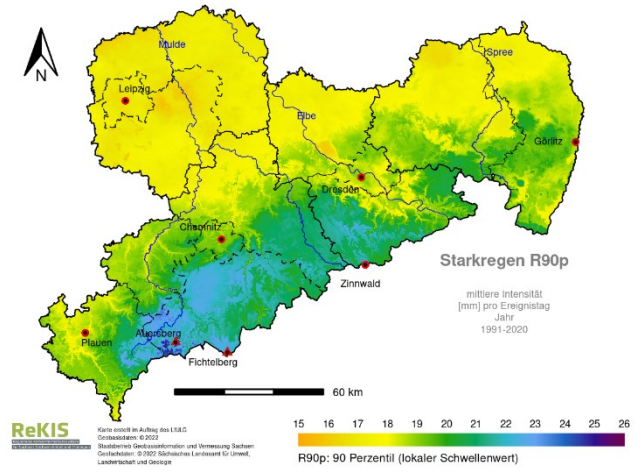
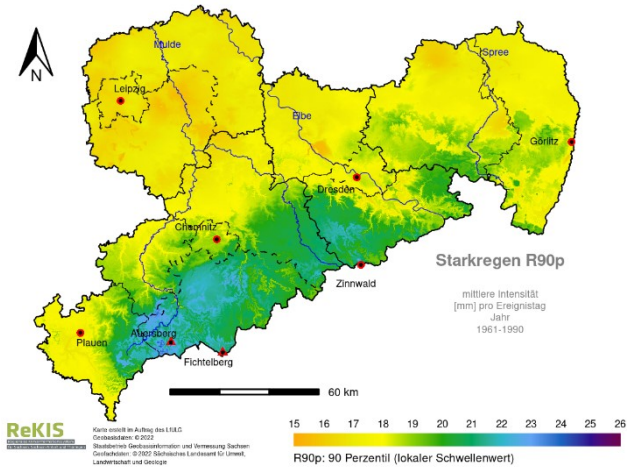
### 3.2.4 Mittlere Intensität der Ereignisse

Die mittlere Intensität von Starkregen wird für die Referenzperiode und den Zeitraum 1991-2020, sowie deren Änderung gegenüber der Referenzperiode für beide Perzentile dargestellt (Abbildung 37, Abbildung 40). Die Ergebnisse werden für die Dekaden (Abbildung 38, Abbildung 41) dargestellt, sowie die Änderung der Dekaden gegenüber der Referenzperiode (Abbildung 39 und Abbildung 42). Abbildung 43 visualisiert die flächenhafte Verteilung der Änderungen mit Box-Whisker-Plots.

Im Flächenmittel kann eine geringe Zunahme der mittleren Intensität von Starkregenereignissen für das Kalenderjahr festgestellt werden. Allerdings treten teilweise auf engstem Raum sehr verschieden hohe Zu- und Abnahmen der mittleren Intensität auf. Die kann beispielsweise mit der originalen Stationsverfügbarkeit zusammenhängen und darf nicht überinterpretiert werden.

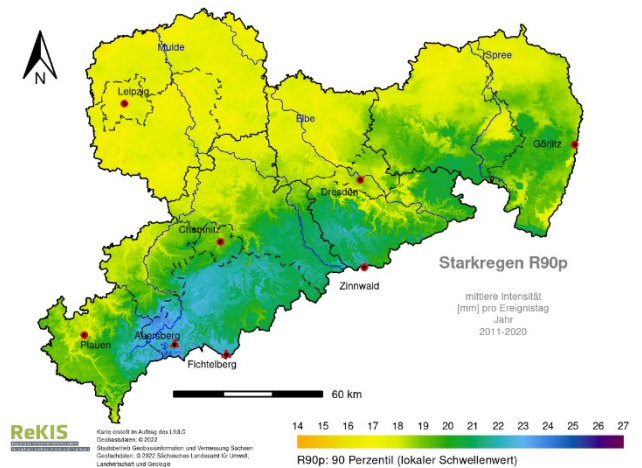
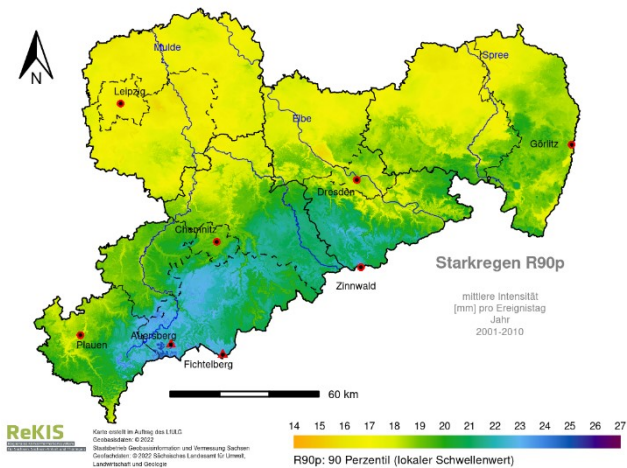
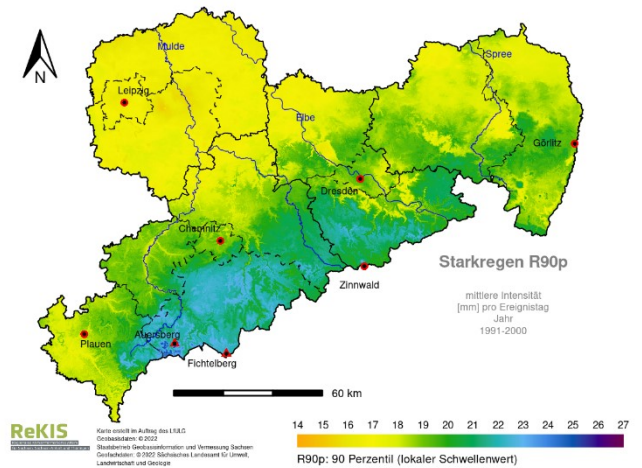
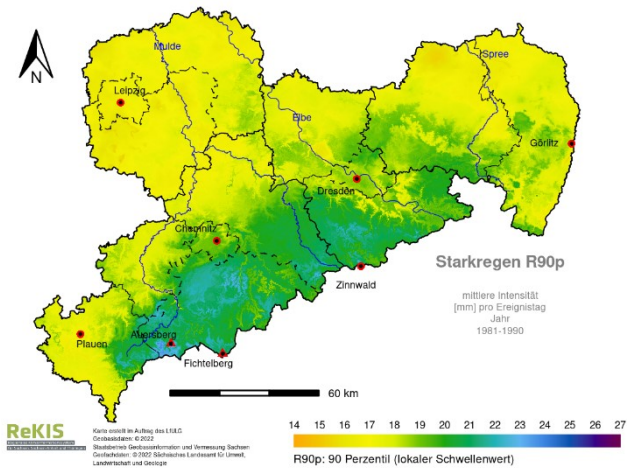
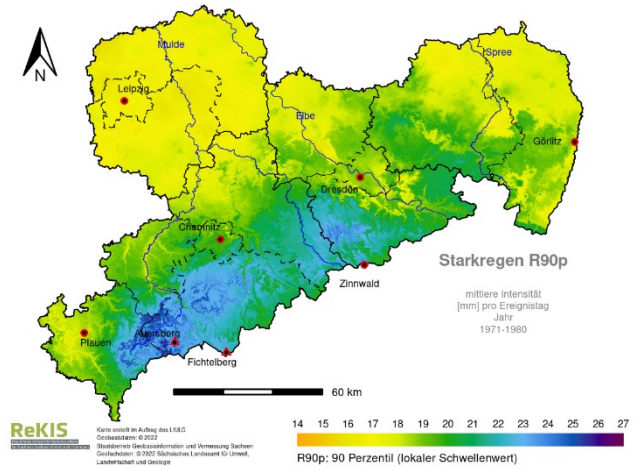
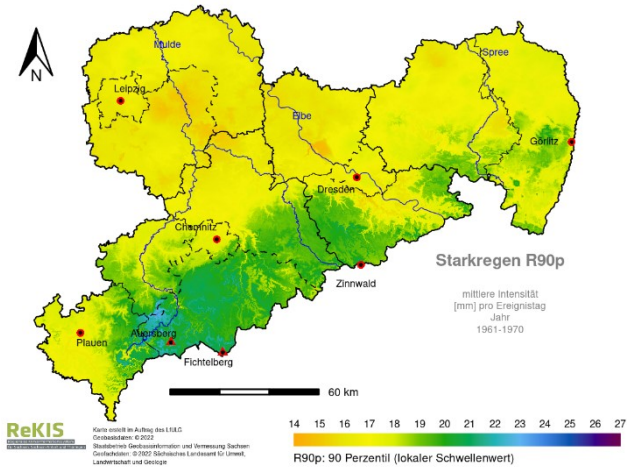
Die höchsten mittleren Intensitäten traten am Erzgebirgskamm um den Fichtelberg und den Auersberg auf. Die Zunahmen der mittleren Intensität zeigen sich vor allem in den Luvlagen und die Abnahmen in den Leelagen. Besonders deutlich ist dieses Muster für das 95. Perzentil für 1991 - 2020 vs. 1961 - 1990 zu beobachten. Die Zunahmen zeigen sich unter anderem in den Landkreisen Zwickau, Meißen, sowie den Kreisfreien Städten Dresden und Chemnitz. Die Abnahmen sind unter anderem in der Region Leipzig-West Sachsen, in Teilen der Region Chemnitz und dem Landkreis Bautzen festzustellen.

Im Verlauf der Dekaden können deutliche Unterschiede der mittleren Intensität von Starkregenereignissen beobachtet werden. Die maximalen Intensitäten traten dabei 1971 - 1980 am westlichen Erzgebirgskamm auf. Die flächendeckend höchsten Zunahmen sind für den gleichen Zeitraum festzustellen. Die maximalen Intensitäten erstrecken sich über das gesamte Erzgebirge bis in die Lausitz. Die nahezu flächendeckende Zunahme der Intensität für 2011 - 2020 vs. 1961 - 1990 zeigt lokale Maxima im Hügel- und Tiefland Sachsens.

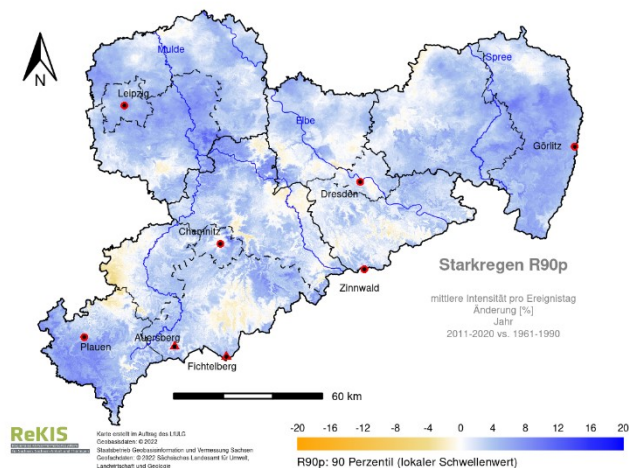
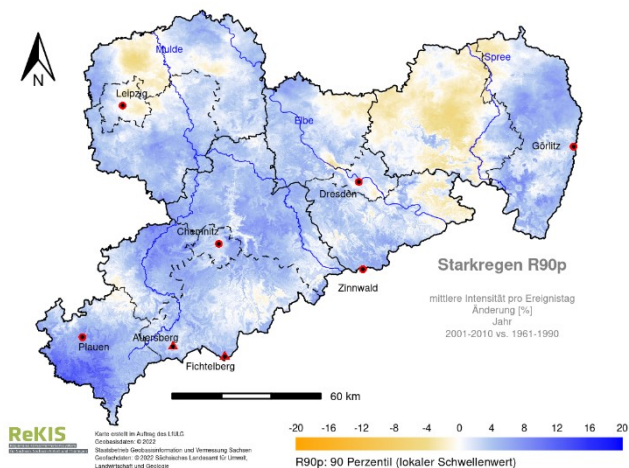
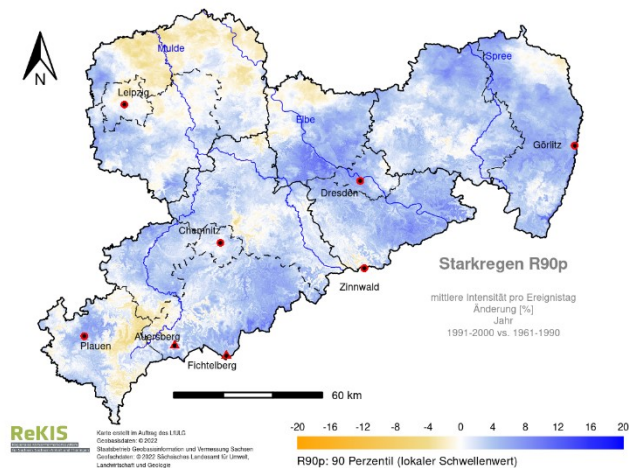
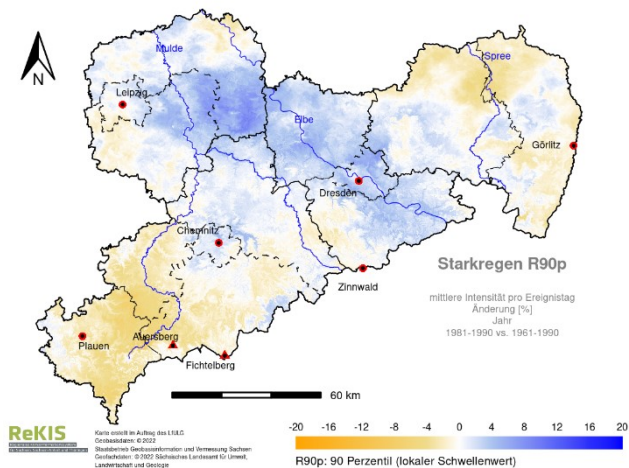
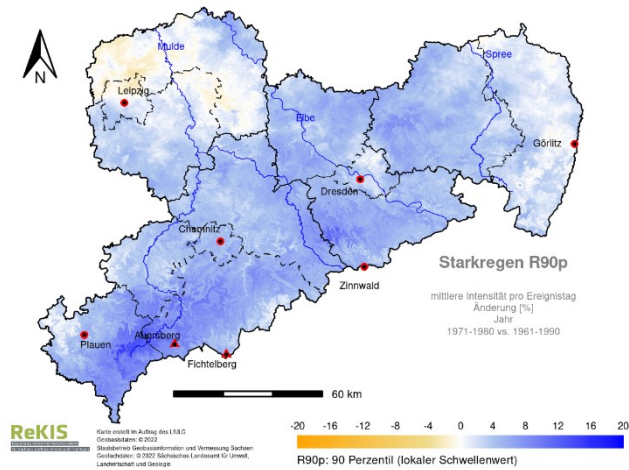
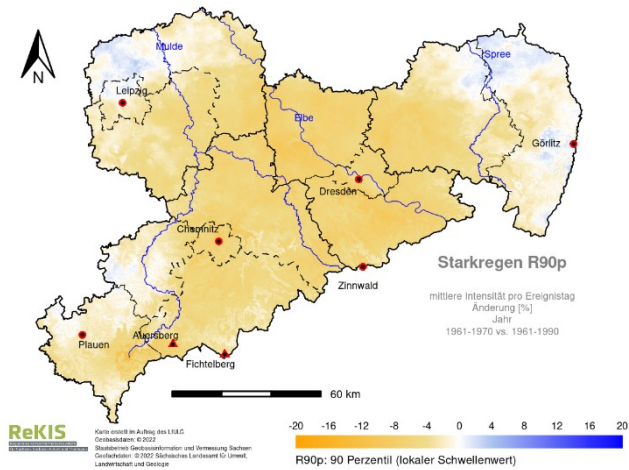


**Abbildung 37: Starkregen R90p – mittlere Intensität für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**

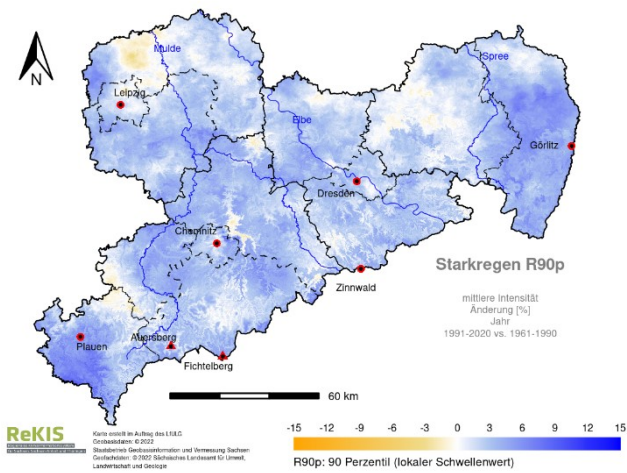
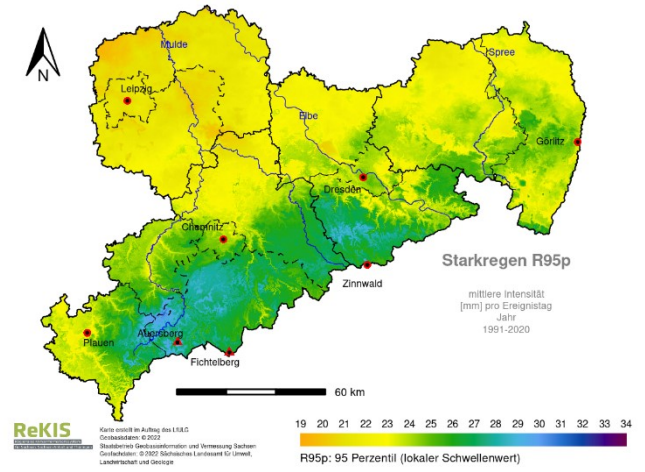
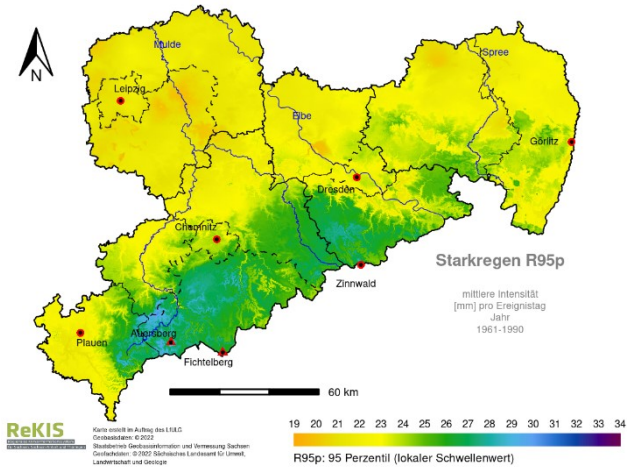




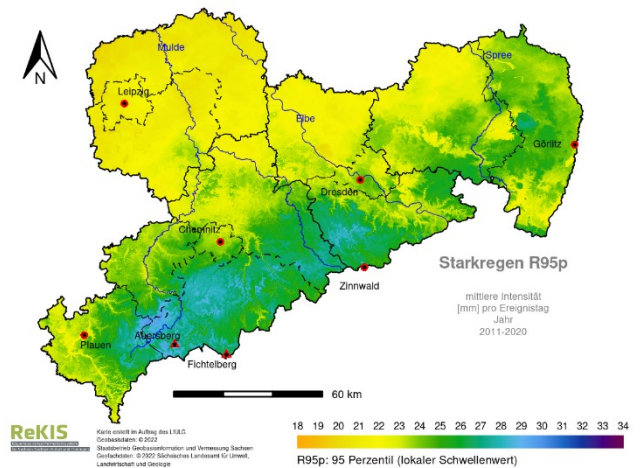
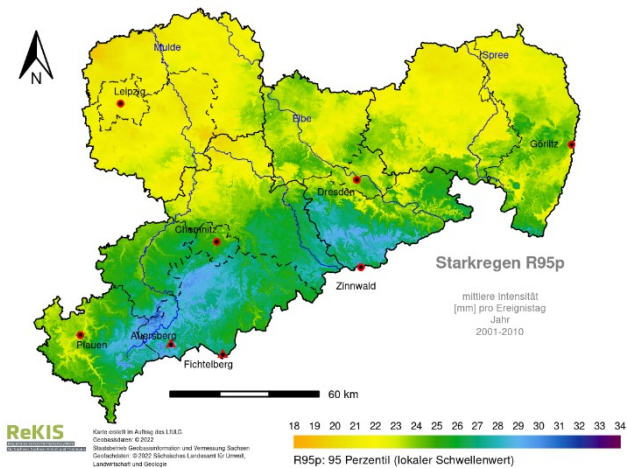
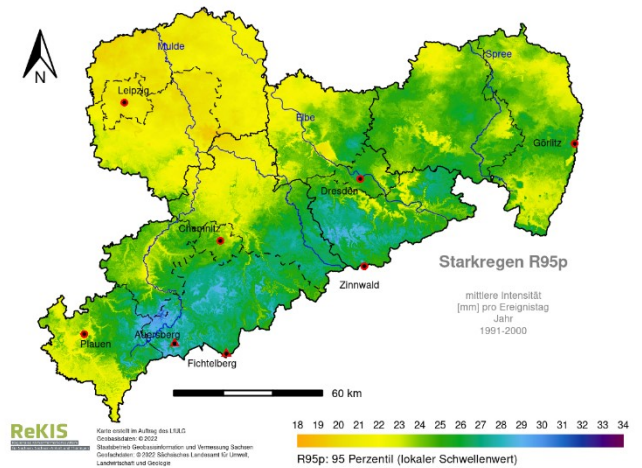
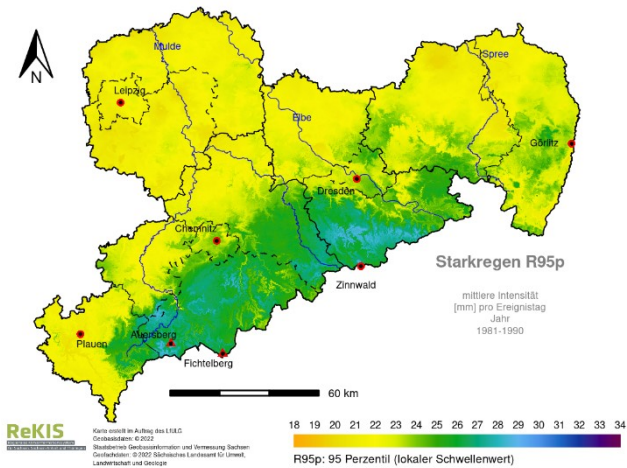
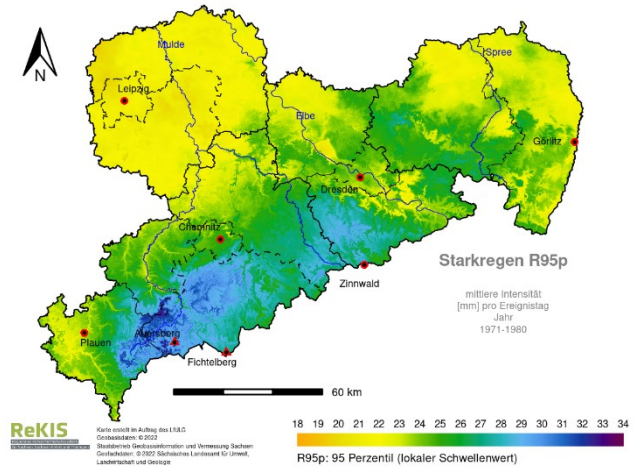
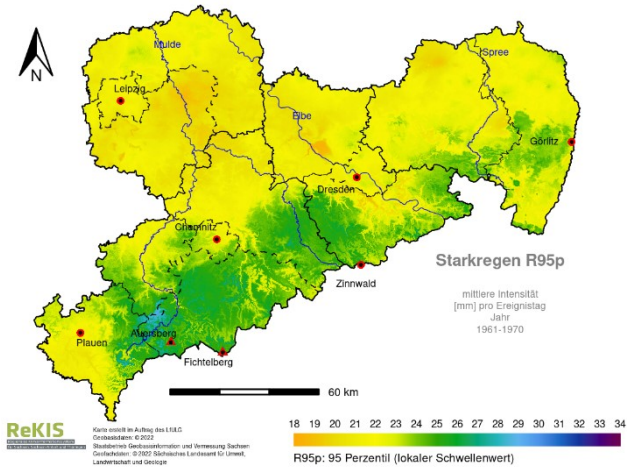
**Abbildung 38: Starkregen R90p – mittlere Intensität für die Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 für Sachsen, Kalenderjahr**



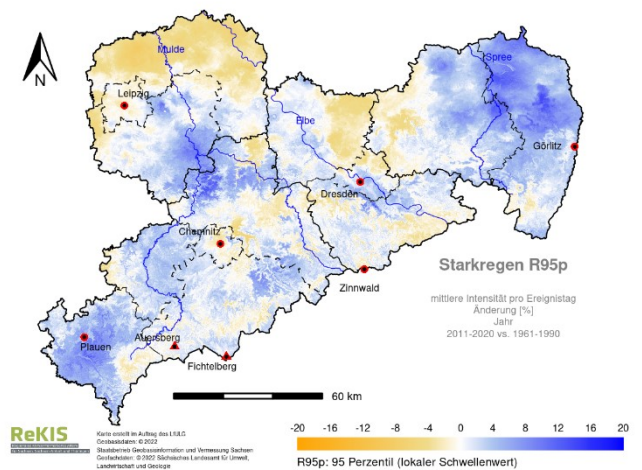
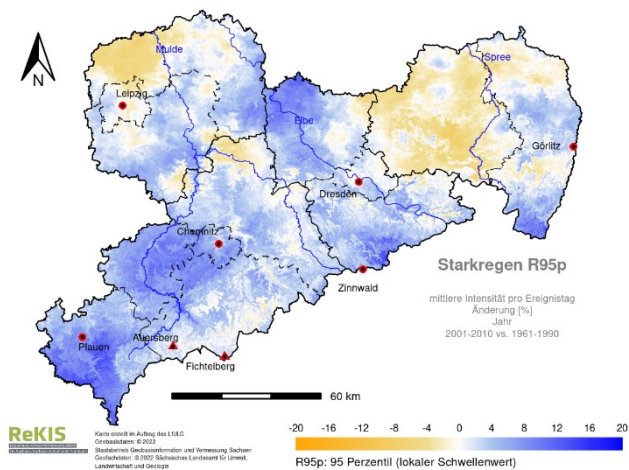
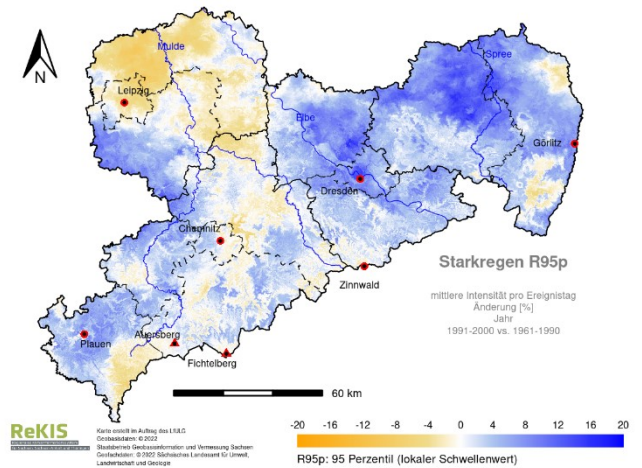
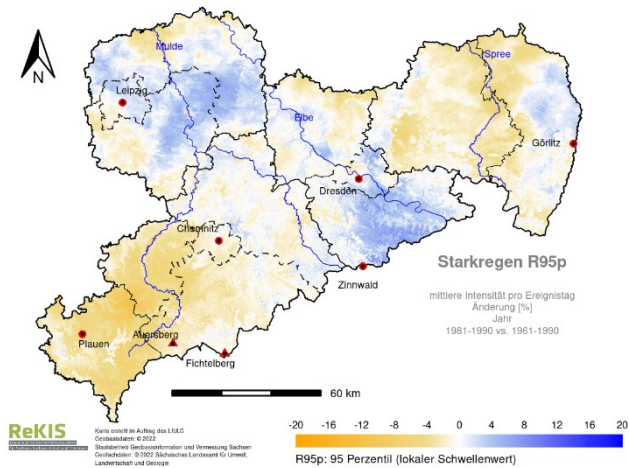
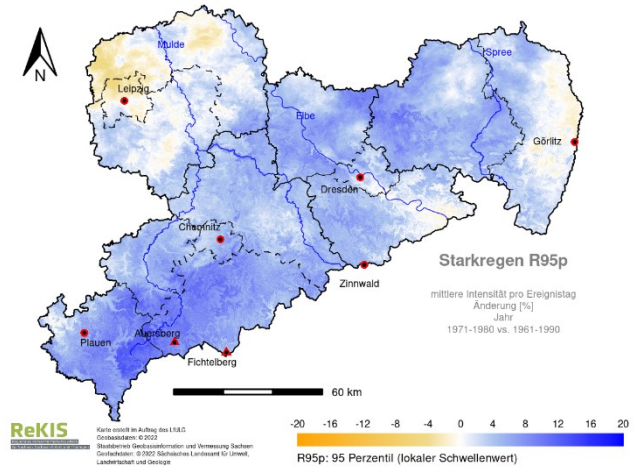
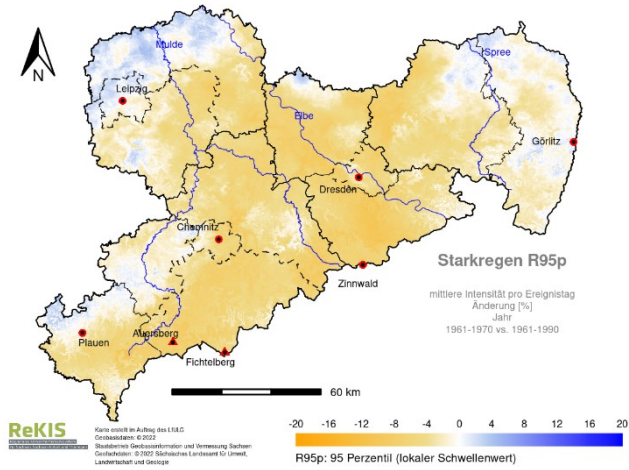
**Abbildung 39: Starkregen R90p – mittlere Intensität für die Änderung der Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 gegenüber 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**



**Abbildung 40: Starkregen R95p – mittlere Intensität für 1961-1990, 1991-2020 und Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**



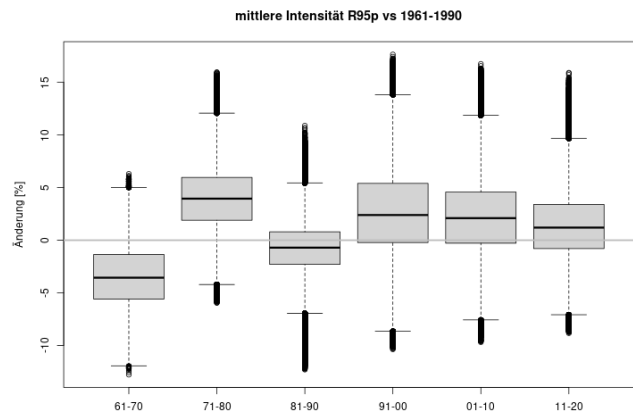
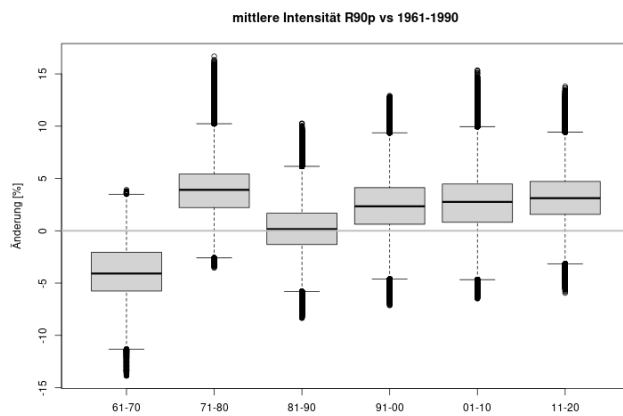
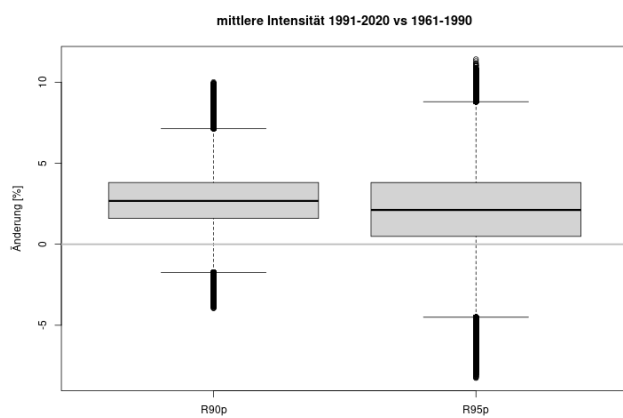
**Abbildung 41: Starkregen R95p – mittlere Intensität für die Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 für Sachsen, Kalenderjahr**



**Abbildung 42: Starkregen R95p – mittlere Intensität für die Änderung der Dekaden 1961-1970, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 gegenüber 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**

**Tabelle 7: Starkregen R90p und R95p – durchschnittliche mittlere Intensität sowie deren Änderung gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**

Zeitraum	R90p mittlere Intensität Zeitraum [d]	R90p mittlere Intensität Änderung 1961-1990 [%]	R95p mittlere Intensität Zeitraum [d]	R95p mittlere Intensität Änderung 1961-1990 [%]
1961 – 1990	18,3	-	23,3	-
1991 – 2020	18,8	2,7	23,8	2,1
1961 – 1970	17,6	-3,9	22,5	-3,5
1971 – 1980	19,0	4,0	24,3	4,1
1981 – 1990	18,3	0,2	23,1	-0,8
1991 – 2000	18,7	2,4	23,9	2,6
2001 – 2010	18,8	2,6	23,8	2,3
2011 - 2020	18,9	3,1	23,6	1,4



**Abbildung 43: Box-Whisker-Plot für die flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p, R95p – mittlere Intensität für Sachsen, Kalenderjahr**

### 3.2.5 Auftrittshäufigkeit

Die Auftrittshäufigkeit wird für den Zeitraum 1961-2020 bestimmt und flächenhaft für 1991-2020 vs. 1961-1990 visualisiert. In Abbildung 44 und Abbildung 45 werden die Ergebnisse der Jahreszeiten und Vegetationsperioden dargestellt. Die flächenhafte Verteilung wird Abbildung 46 mit Box-Whisker-Plots veranschaulicht.

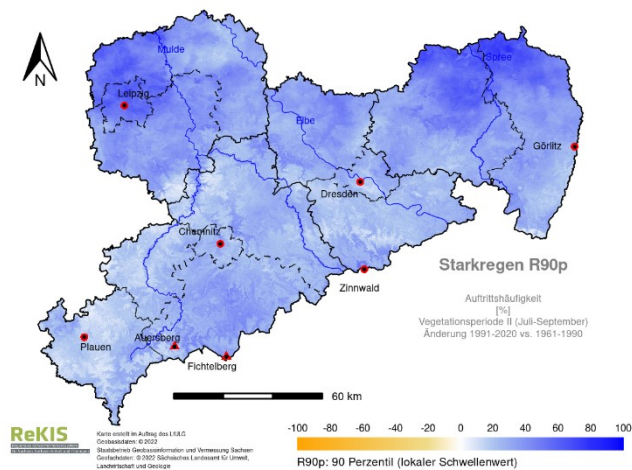
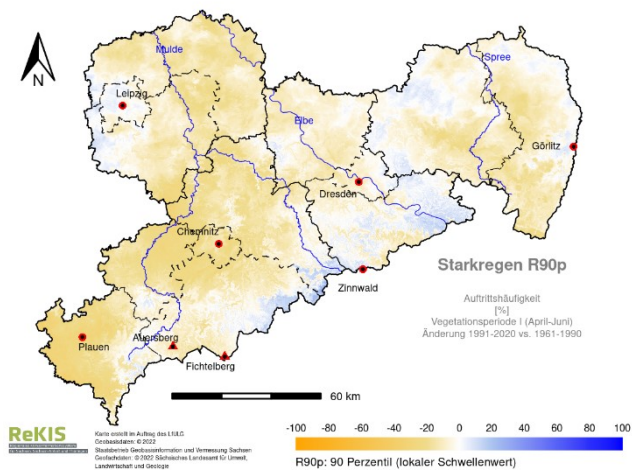
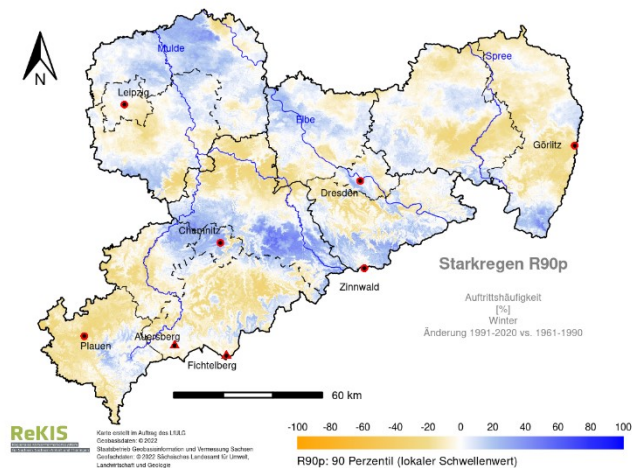
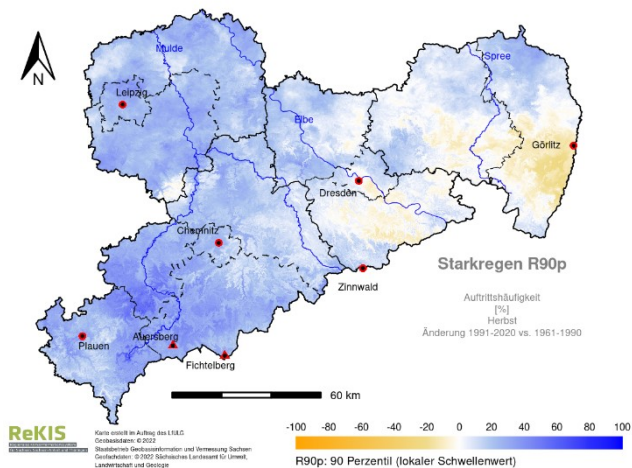
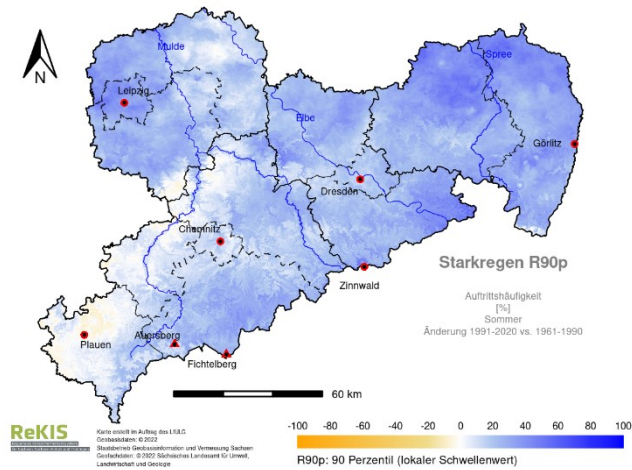
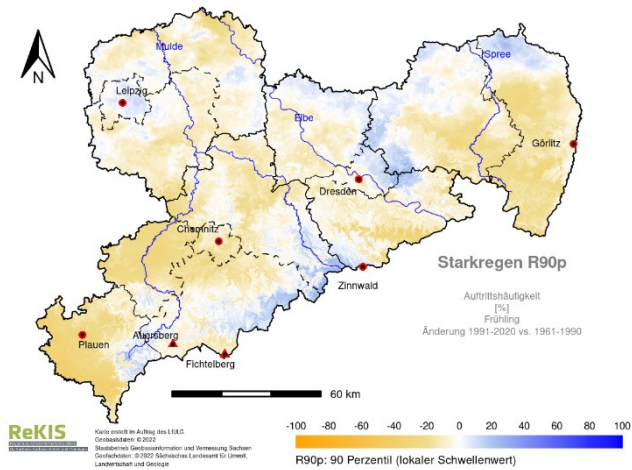
Im Frühling sind die Entwicklungen in Sachsen heterogen mit insgesamt abnehmender Tendenz. Im Erzgebirgskamm und im Großraum Dresden können Zunahmen festgestellt werden. Im Flächenmittel sind die Abnahmen für R95p (– 12 %) stärker als für R90p (– 7 %).

Deutliche Zunahmen der Auftrittshäufigkeit wurden im Sommer nahezu flächendeckend (mit Ausnahme des Vogtlandkreises) beobachtet. Für R95p sind Zunahmen im Flächenmittel von + 36 % und für R90p von + 22 % bestimmt worden.

Der Herbst zeigt eine deutliche Zweiteilung Sachsens mit Zunahmen im Westen und Abnahmen im Osten. Die Region Oberes Elbtal / Osterzgebirge kann als Übergangsbereich angesehen werden. Die höchsten Zunahmen sind für R95p in den Kammlagen zu finden. Im Flächenmittel ist eine Abnahme festzustellen.

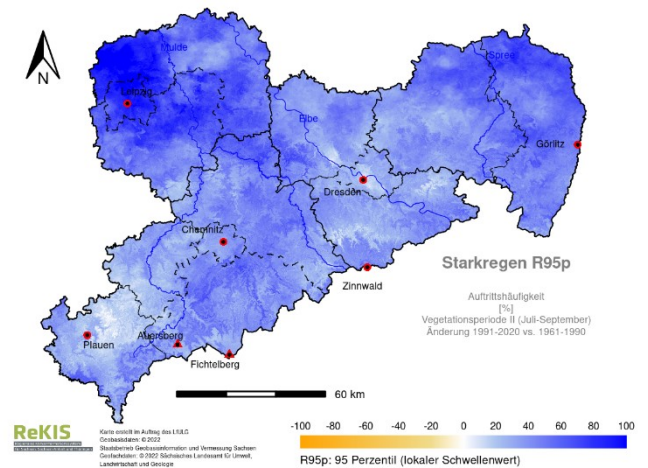
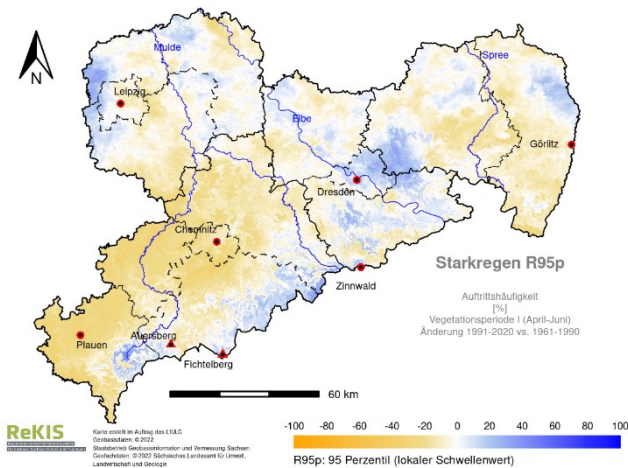
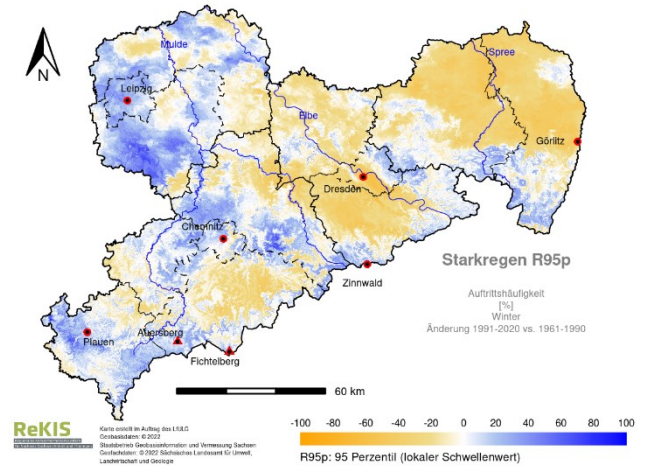
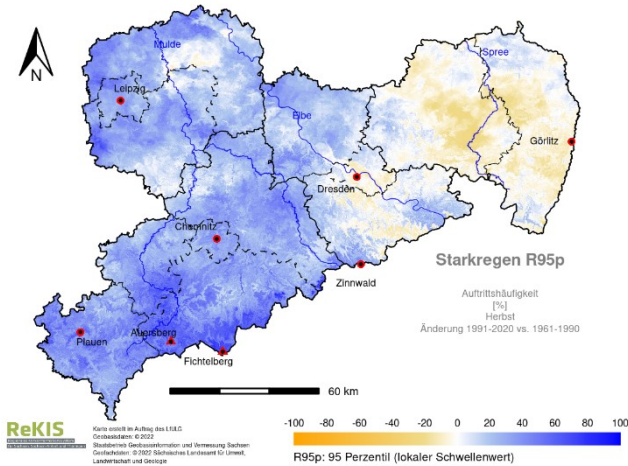
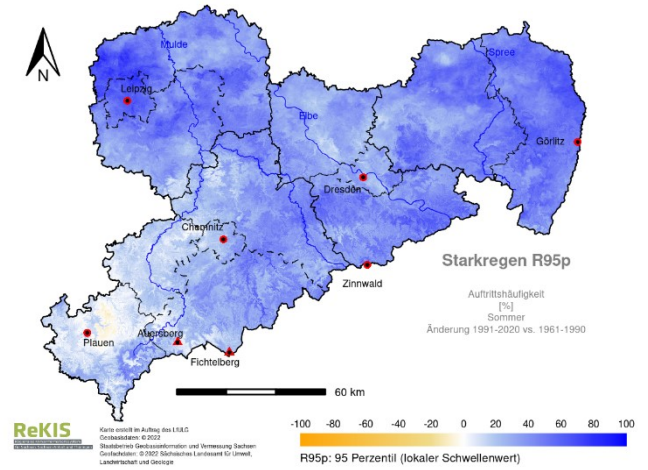
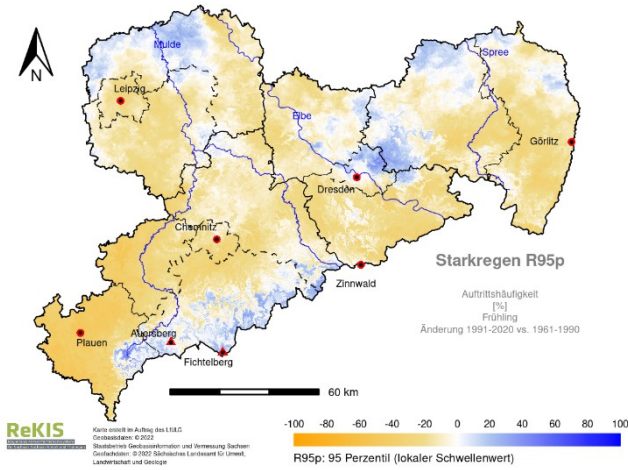
Ein sehr heterogenes Verteilungsmuster zeigt der Winter. Kleinräumige Zu- und Abnahmen liegen nahe beieinander und weisen eine hohe Amplitude auf. Für R95p ist die Abnahme im Flächenmittel mit – 4 % wesentlich deutlicher als für R90p mit – 1 %.

In der Vegetationsperiode I ist eine flächendeckende Abnahme (- 9 bzw. -6 % für R90p und R95p) der Auftrittshäufigkeit festzustellen und eine deutliche Zunahme in der Vegetationsperiode II. Die stärksten Zunahmen sind in der Region Leipzig-Westsachsen zu beobachten mit nahezu einer Verdopplung der Ereignisse. Im Flächenmittel nimmt die Auftrittshäufigkeit von R90p um + 31 % und R95p um + 45 % zu.



**Abbildung 44: Starkregen R90p – Auftretshäufigkeit für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden**

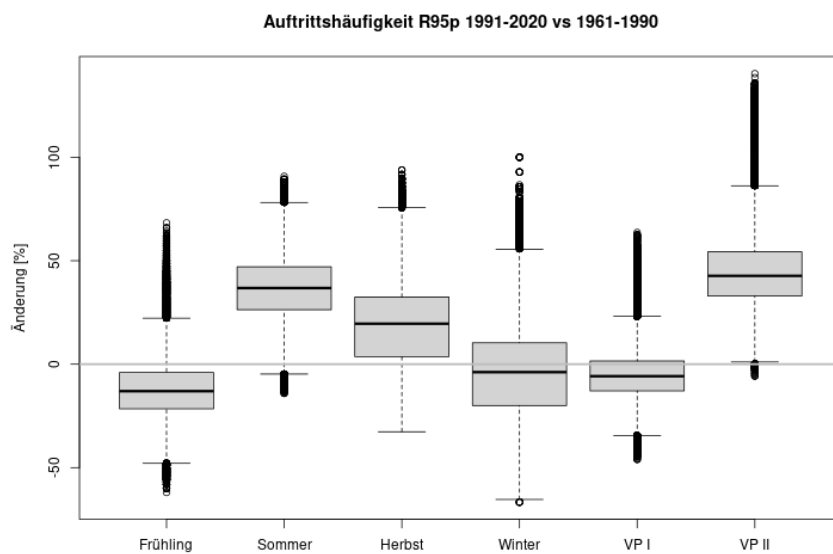
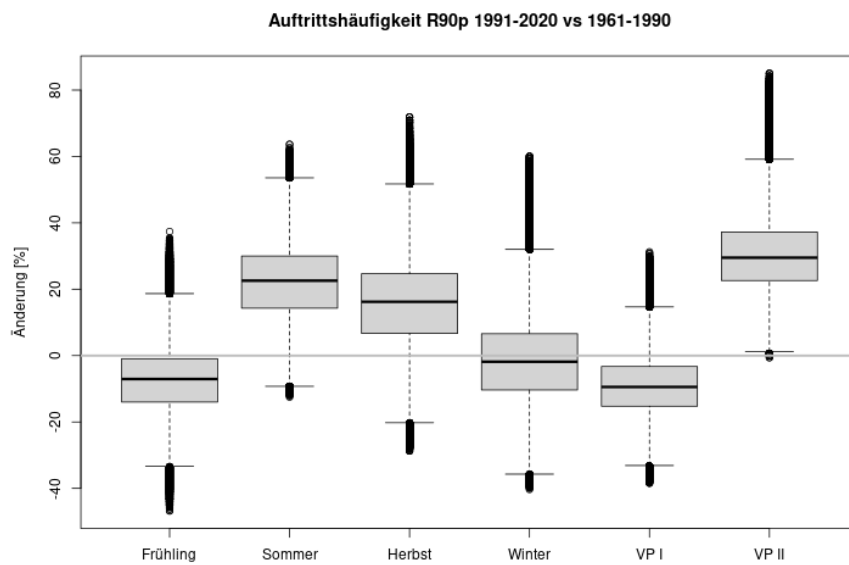




**Abbildung 45: Starkregen R95p – Auftretshäufigkeit für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden**

**Tabelle 8: Starkregen R90p und R95p – durchschnittliche Änderung der Auftrittshäufigkeit 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden**

Zeitraum	R90p Auftrittshäufigkeit Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 [%]	R95p Auftrittshäufigkeit Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 [%]
Frühling	-7	-12
Sommer	22	36
Herbst	16	19
Winter	-1	-4
Vegetationsperiode I	-9	-6
Vegetationsperiode II	31	45



**Abbildung 46: Box-Whisker-Plot für die flächenhafte Verteilung von Starkregen R90p, R95p – Auftrittshäufigkeit für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden**

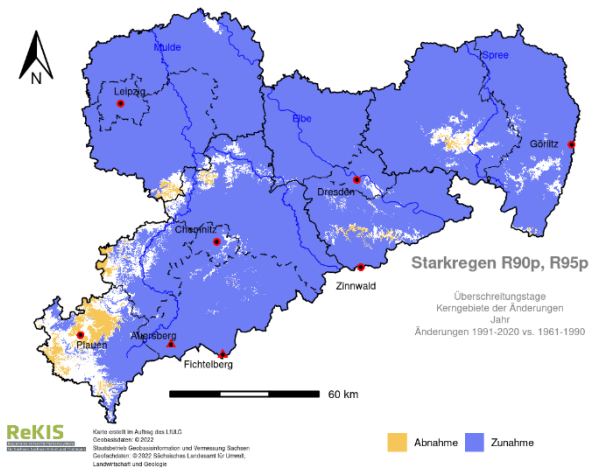
### 3.2.6 Kerngebiete der Änderung

Die Identifizierung und Visualisierung von Kerngebieten der Änderung des Starkniederschlagsverhaltens soll einen schnellen Überblick zu besonders oder weniger betroffenen Regionen ermöglichen. Die Kerngebiete werden aus den Ergebnissen der Kapitel 3.2.3 - 3.2.5 bestimmt. Für jeden Index werden für den gleichen Zeitraum die Änderungskarten von R90p und R95p miteinander verschnitten. Im Ergebnis werden Kerngebiete für die Überschreitungstage (Abbildung 47), die mittlere Intensität (Abbildung 48 und Abbildung 49) und die Auftrittshäufigkeit (Abbildung 50) dargestellt. Die Kerngebiete visualisieren somit die Perzentil-übergreifenden räumlichen Veränderungen der jeweiligen Indizes.

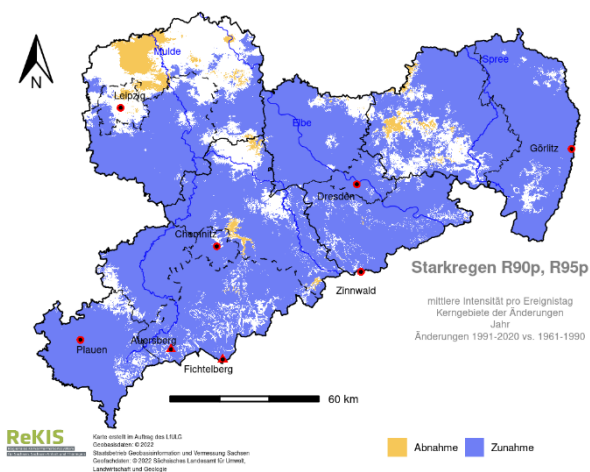
Für die Überschreitungstage zeigen die Kerngebiete der Änderung für beide Zeiträume ein nahezu einheitliches Muster, eine Zunahme. Abnahmen sind vor allem im Vogtland, und in Teilen der Lausitz zu finden. Weiße Flächen deuten darauf hin, dass die Ergebnisse der beiden Perzentile sich widersprechen oder sich keine klare Änderung in einem der beiden Perzentile manifestierte (Unsicherheitsbereich).

Die Kerngebiete der mittleren Intensitätsänderungen visualisieren die stärksten Abnahmen in der Planungsregion Leipzig-West Sachsen, sowie im Vogtland und in Teilen der Region Oberlausitz-Niederschlesien. Die dekadische Analyse verdeutlicht, dass es Zeiten mit Abnahmen (1961-70), von räumlich sehr heterogenen Änderungen und von klaren Zunahmen gibt. Zu letzteren gehört am eindeutigsten die Periode 1971-1980.

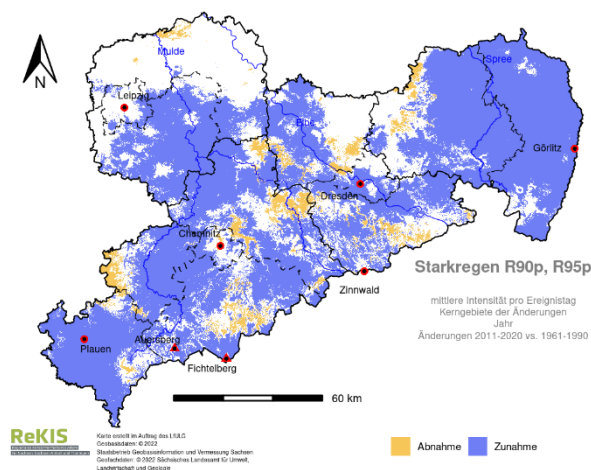
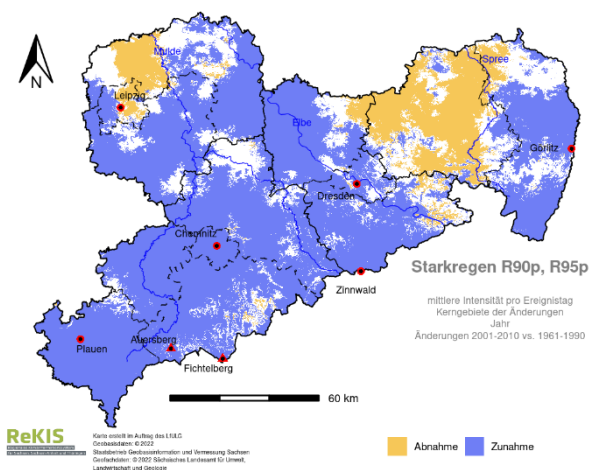
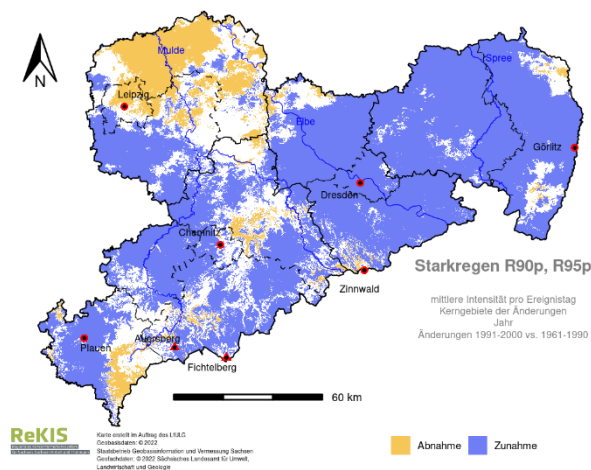
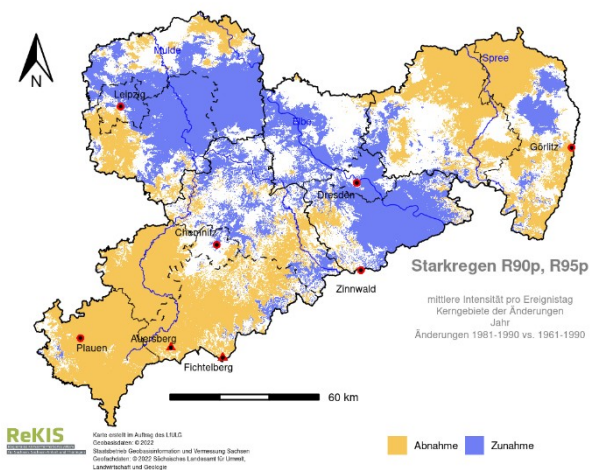
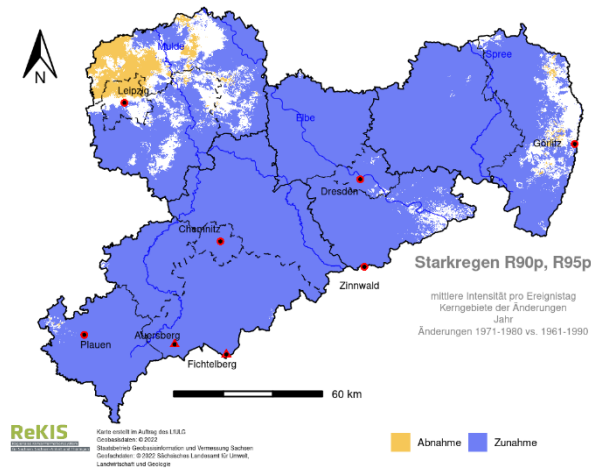
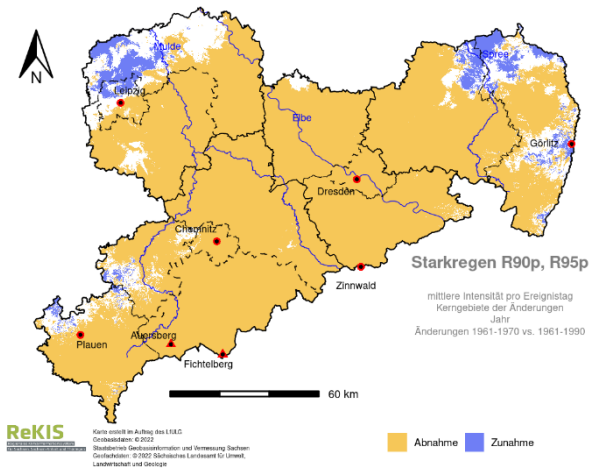
Die Kerngebiete der Änderung der Auftrittshäufigkeit werden für die Jahreszeiten visualisiert. Deutlich können übereinstimmende Verteilungsmuster erkannt werden. Im Frühling sind nahezu flächendeckende Abnahmen (mit Ausnahme des Erzgebirgskamms und dem Dresdner Umland) zu erkennen. Dieses Muster ist in der Vegetationsperiode I ähnlich stark ausgeprägt. Im Sommer sind fast flächendeckend Zunahmen der Auftrittshäufigkeit festzustellen (Abnahmen im Vogtlandkreis). In der Vegetationsperiode II treten ausschließlich Zunahmen auf. Im Herbst zeigt sich deutlich die Zweiteilung mit Zunahmen im Westen und Abnahmen im Ost. Das heterogene Verteilungsmuster im Winter ist deutlich ausgeprägt. Die Kerngebiete der Änderung zeigen deutlich regional unterschiedliche Ausprägungen.



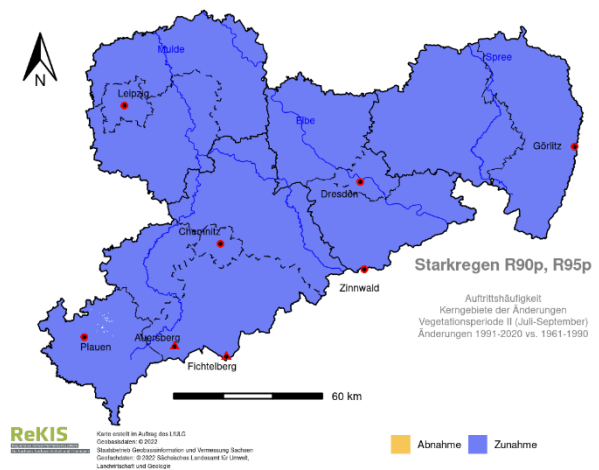
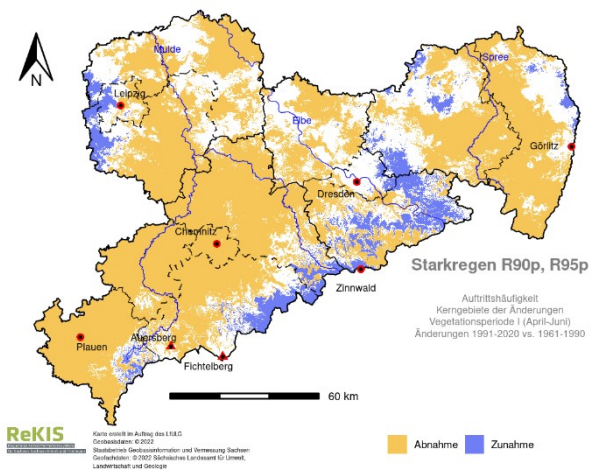
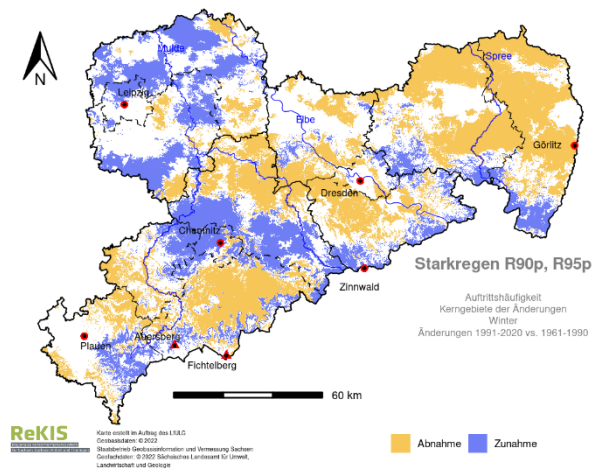
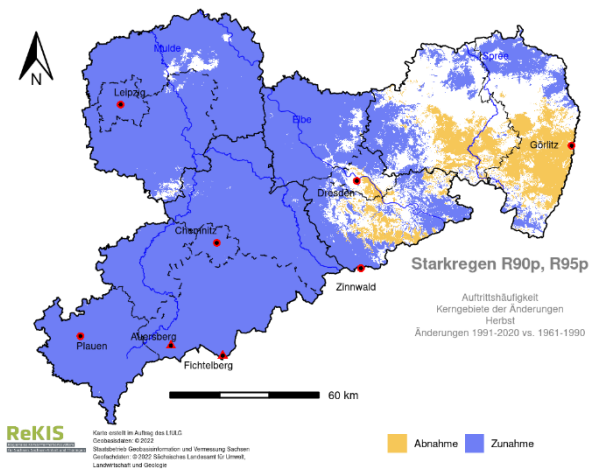
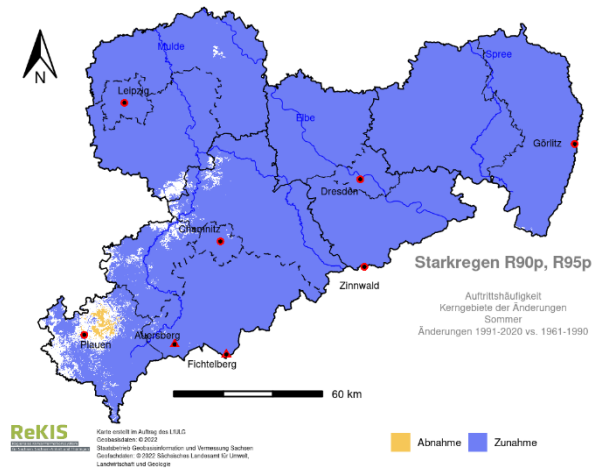
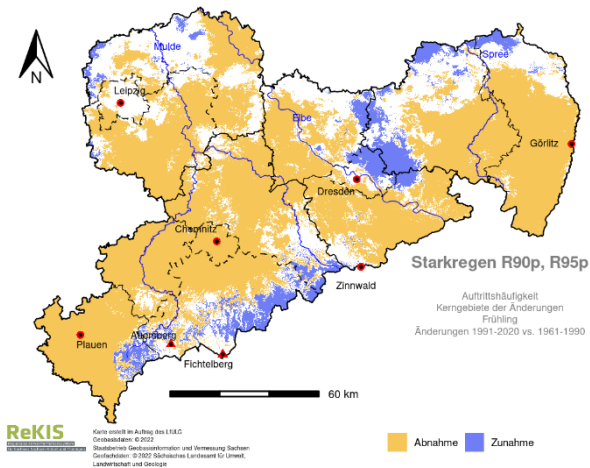
**Abbildung 47: Kerngebiete der Änderung von Starkregen R90p, R95p – Überschreitungstage für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**



**Abbildung 48: Kerngebiete der Änderung für Starkregen R90p, R95p – mittlere Intensität für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**



**Abbildung 49: Kerngebiete der Änderung für Starkregen R90p, R95p – mittlere Intensität für die Änderung der Dekaden gegenüber 1961-1990 für Sachsen, Kalenderjahr**



**Abbildung 50: Kerngebiete der Änderung von Starkregen - Auftretshäufigkeit R90p, R95p – für die Änderung 1991-2020 vs. 1961-1990 für Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden**

### 3.2.7 Auftrittshäufigkeit - Transekte

Die Transekte ermöglichen es, den zeitlichen Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkregen zu analysieren. Im Gegensatz zu den bisherigen Analysen werden hier 100 Meter breite Streifen durch Sachsen betrachtet. Der zeitliche Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen wird für die Transekte Nord-Süd, West-Ost, Zentral und Ost (Abbildung 51 - Abbildung 58) für 1961-2020 visualisiert. Für die Indizes R90p und R95p wird der zeitliche Verlauf für die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden dargestellt. Zusätzlich wird die Lage der Transekte innerhalb Sachsens dargestellt. Den Nord-Süd Verlauf Sachsens stellen die Transekte Nord-Süd, Zentral und Ost dar. Sie umfassen alle in Sachsen vorhandenen naturräumlichen Haupteinheiten. Dabei repräsentiert das Transekt Nord-Süd die maximale Nord-Süd Ausdehnung Sachsens mit dem maximalen Höhenunterschied. Am südlichen Ende des Nord-Süd-Transekts liegt die Station Fichtelberg (Westerzgebirge). Das Transekt Zentral repräsentiert den zentralen Nord-Süd Verlauf durch Sachsen und gibt einen Einblick auf die erweiterte Region Dresden. Es läuft durch die Station Zinnwald-Georgenfeld (Osterzgebirge). Das Transekt Ost geht durch die Station Löbau/Spree und visualisiert das Starkniederschlagsverhalten im Osten Sachsens. Das Transekt West-Ost stellt den Verlauf von West nach Ost durch die Station Görlitz dar.

Bei den Transektabbildungen zeigt die x-Achse den zeitlichen Verlauf der Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen R90p und R95p an und die y-Achse den räumlichen Verlauf des jeweiligen Transekts. Alle Transekte im Nord-Süd Verlauf zeigen die y-Achse von oben (Norden) nach unten (Süden). Für das Transekt West-Ost ist der Verlauf von oben (Westen) nach unten (Osten) zu interpretieren. Beispielsweise visualisiert der untere Rand des Transekts West-Ost den zeitlichen Verlauf der Starkniederschlagsverhältnisse der Region Görlitz. Bei der Interpretation der Abbildungen ist Methodik bedingt der Fokus auf den Verlauf der Auftrittshäufigkeit zu legen, für einzelne Jahre dürfen keine Werte ausgelesen werden.

Im Folgenden werden die markantesten Änderungen durch die Erweiterung des Datensatzes um fünf Jahre bis 2015 Perzentil übergreifend erläutert. Eine ausführliche Erläuterung der Ergebnisse für 1961-2010 ist in Bernhofer et al. 2015a und Bernhofer et al. 2015b zu finden.

Das Transekt Nord-Süd zeigt für den Frühling, die Vegetationsperiode I und den Herbst zunehmende Auftrittshäufigkeiten vor allem in den Kammlagen. Im Sommer und in der Vegetationsperiode II sind für das gesamte Transekt eine Zunahme der Auftrittshäufigkeit zu erkennen mit auffällig hohen Zunahmen in den Berglagen. Im Winter entwickelt sich ein starker Nord-Süd-Gradient mit einer hohen Anzahl an Starkregenereignissen in den Kammlagen.

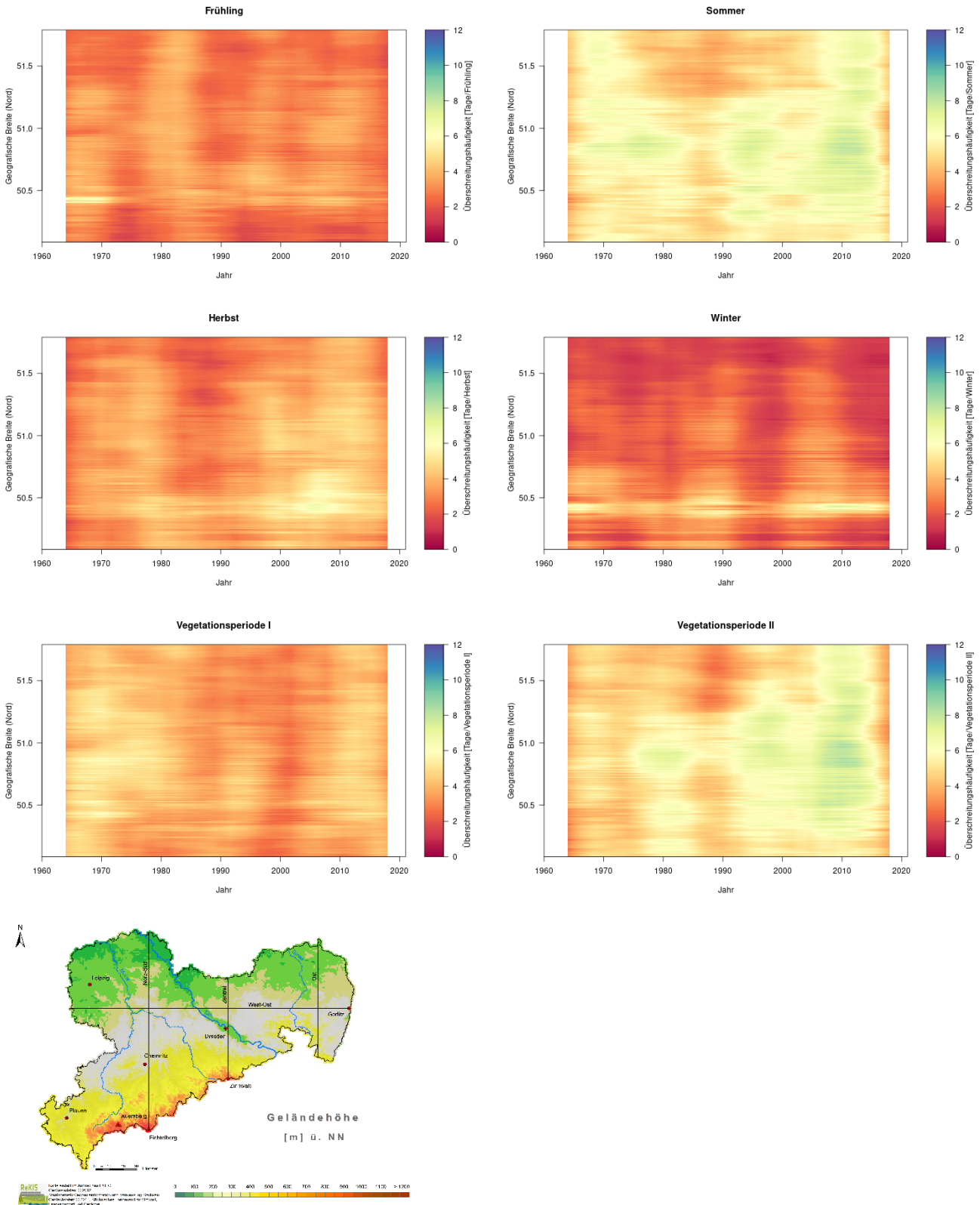
Auch kann für das Transekt Zentral für den Sommer und die Vegetationsperiode II für die letzten Jahre eine deutliche Zunahme in nahezu allen Bezugszeiträumen erkannt werden.

Im Transekt Ost können deutliche Zunahmen in der Vegetationsperiode II festgestellt werden. Die Entwicklung von Süd-Nord-Gradienten ist besonders im Sommer deutlich zu erkennen.

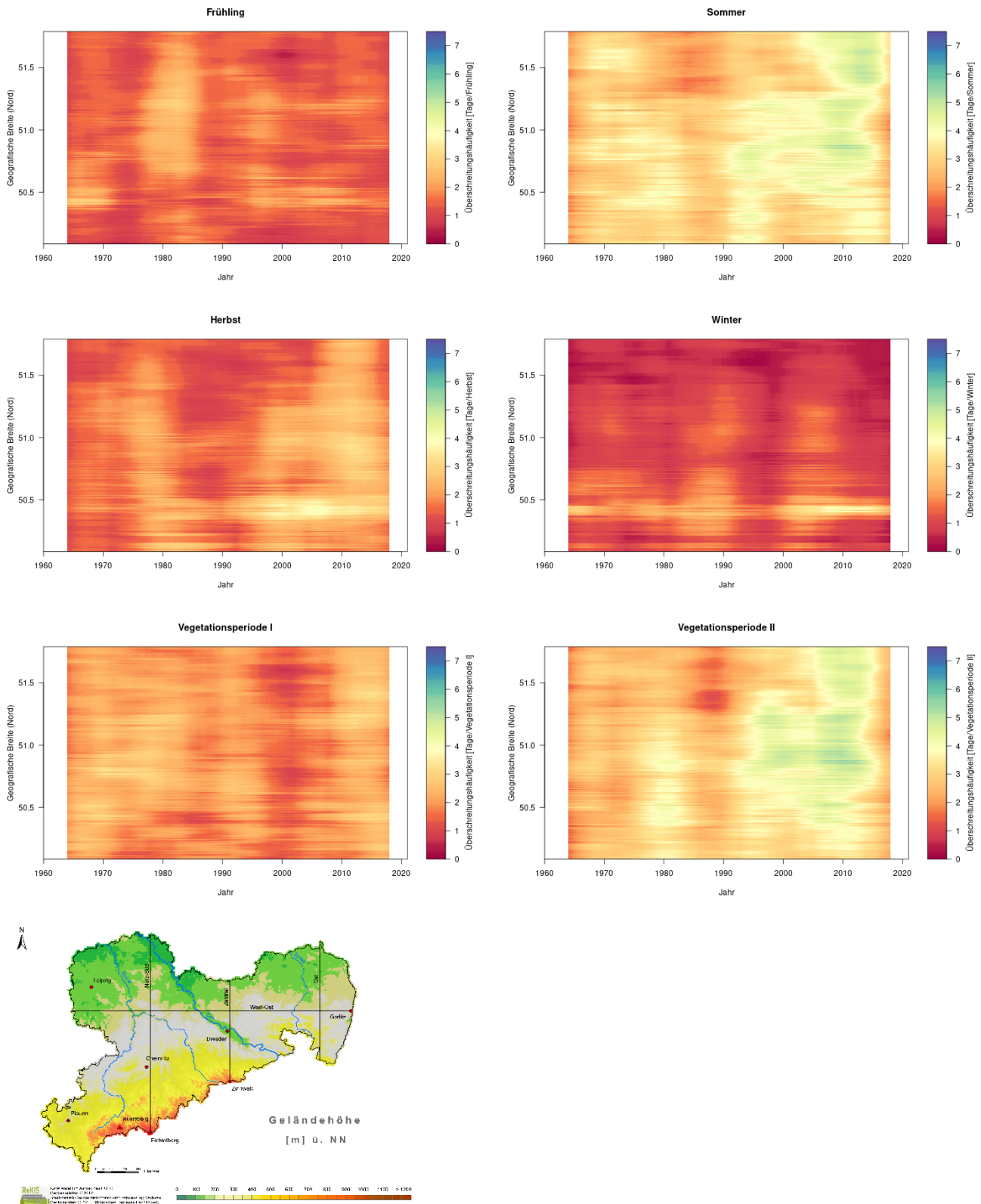
Das Transekt West-Ost zeigt im Sommer einen starker West-Ost-Gradienten mit einer starken Zunahme der Auftrittshäufigkeit im Osten. Im Herbst ist vor allem für Starkregen R90p die Zweiteilung mit abnehmenden Auftrittshäufigkeiten im Osten und Zunahmen im Westen festzustellen.

Die Transektgrafiken zeigen eine Periodizität, sprich eine Variabilität in der zeitlichen Entwicklung. Diese tritt unabhängig von den Klimanormalperioden in allen betrachteten Zeiträumen jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt auf. Die Erweiterung des Datensatzes zeigt für die letzten Jahre die Periodizität besonders eindrücklich. Die Bezugszeiträume mit den häufigsten Starkniederschlagsereignissen, Sommer und Vegetationsperiode II, zeigen die Periodizität besonders eindrücklich. Die auftretende Periodizität verdeutlicht, dass Veränderungen im Auftreten von Starkniederschlagsereignissen vor dem Hintergrund der natürlichen Variabilität des Elements Niederschlag zu bewerten sind. Weitere Untersuchungsergebnisse zur Auftrittshäufigkeiten von Starkniederschlägen sind in Schaller (2013) ausführlich diskutiert.

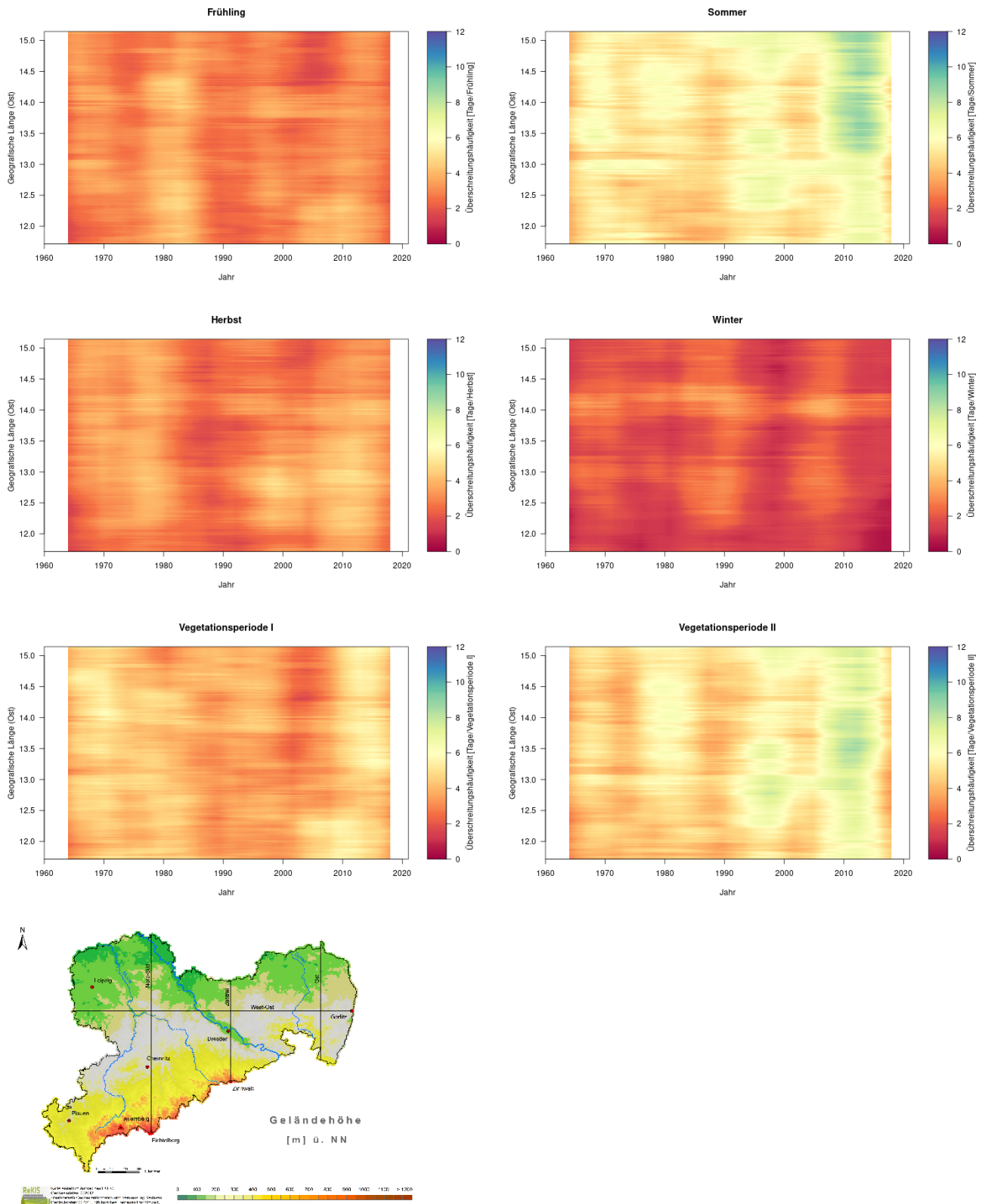




**Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt Nord-Süd in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte**



**Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt Nord-Süd in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte**



**Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt West-Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte**

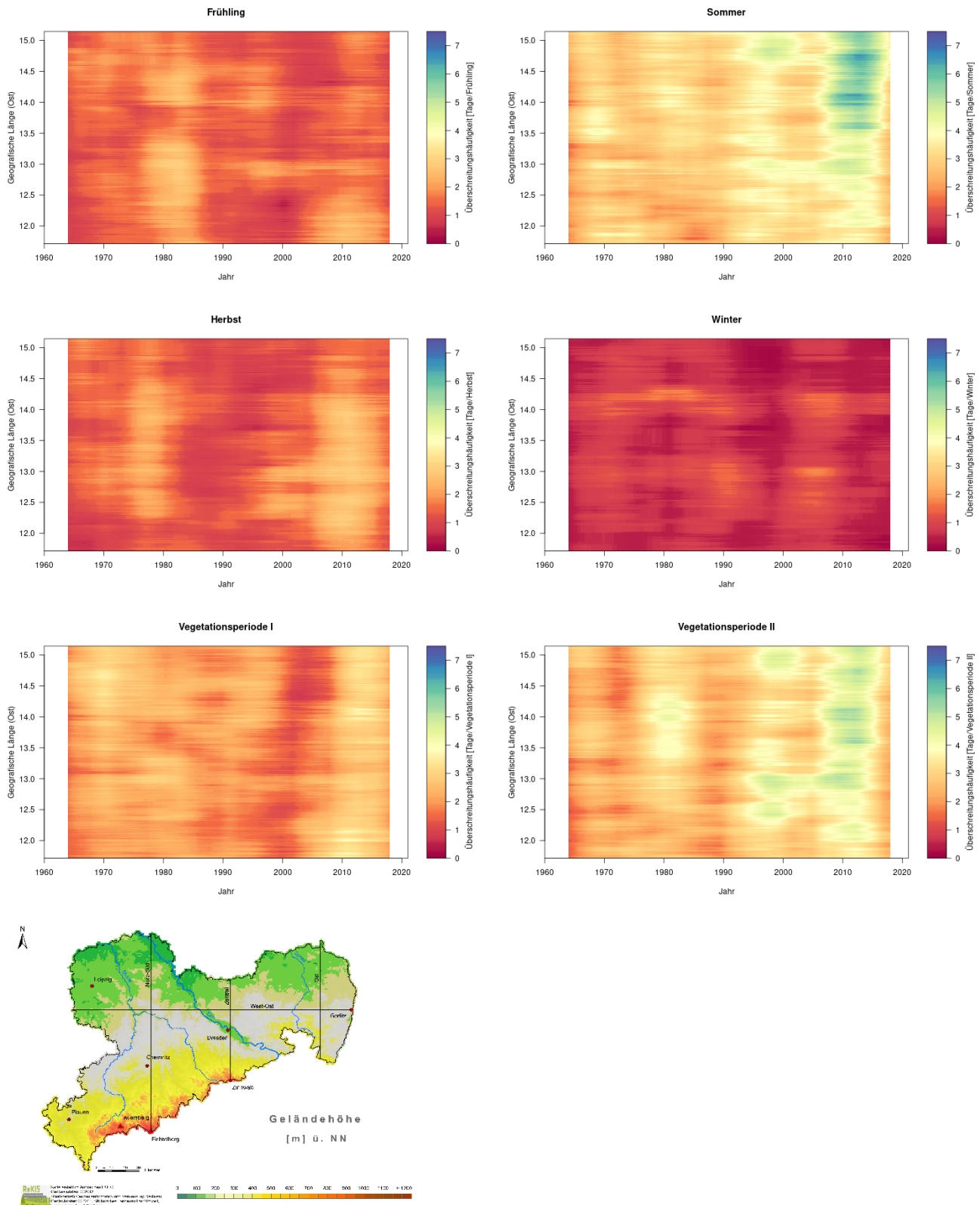
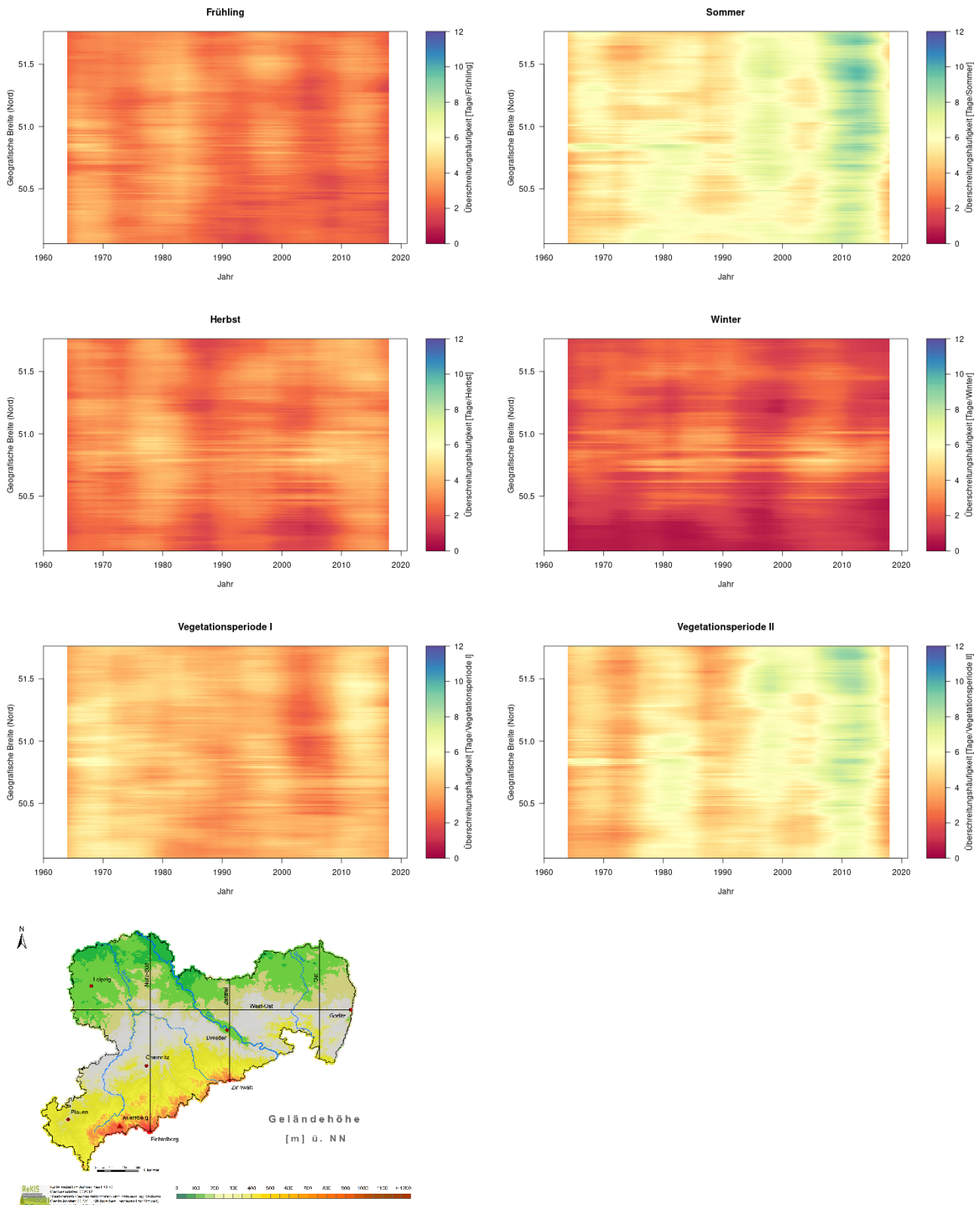
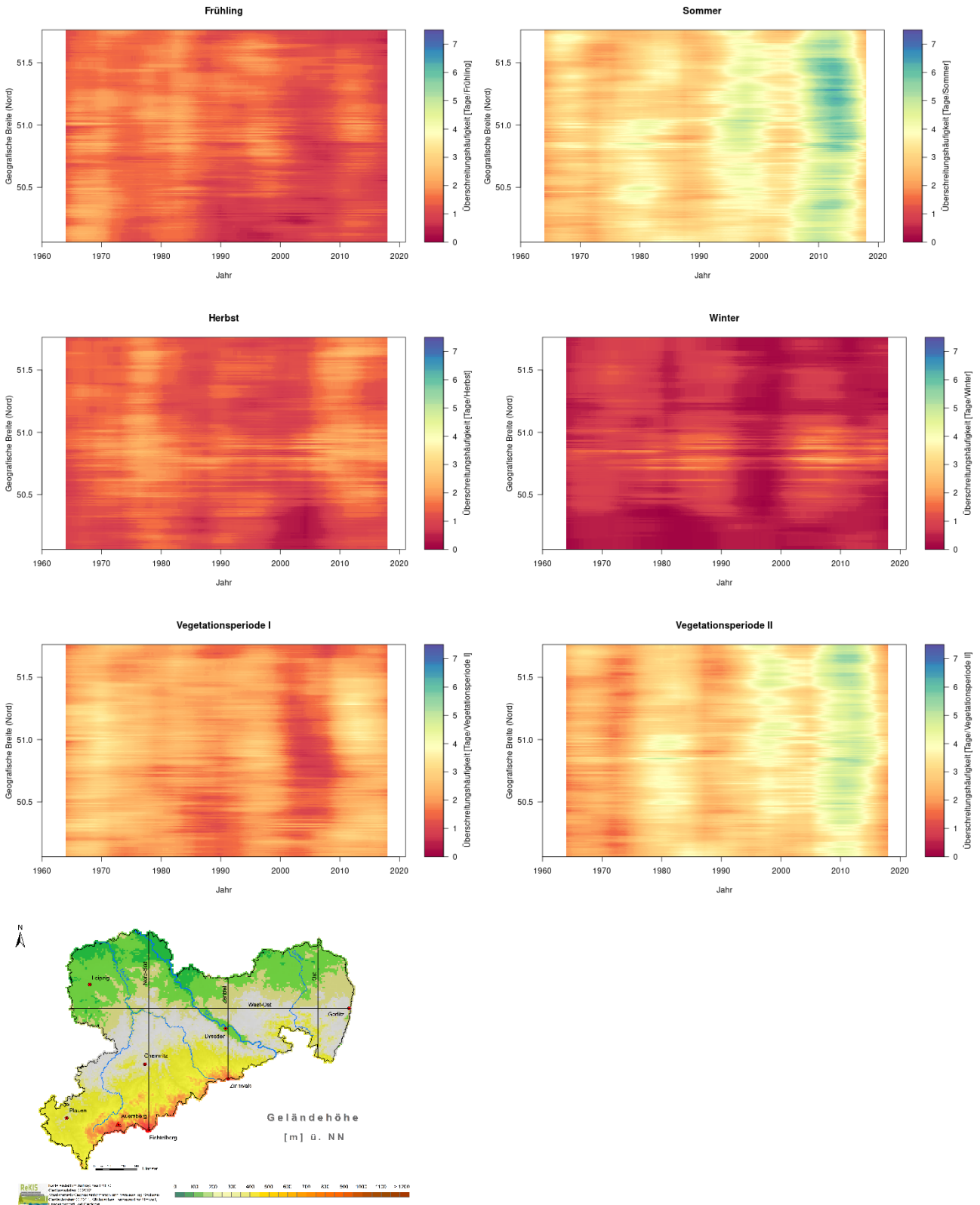


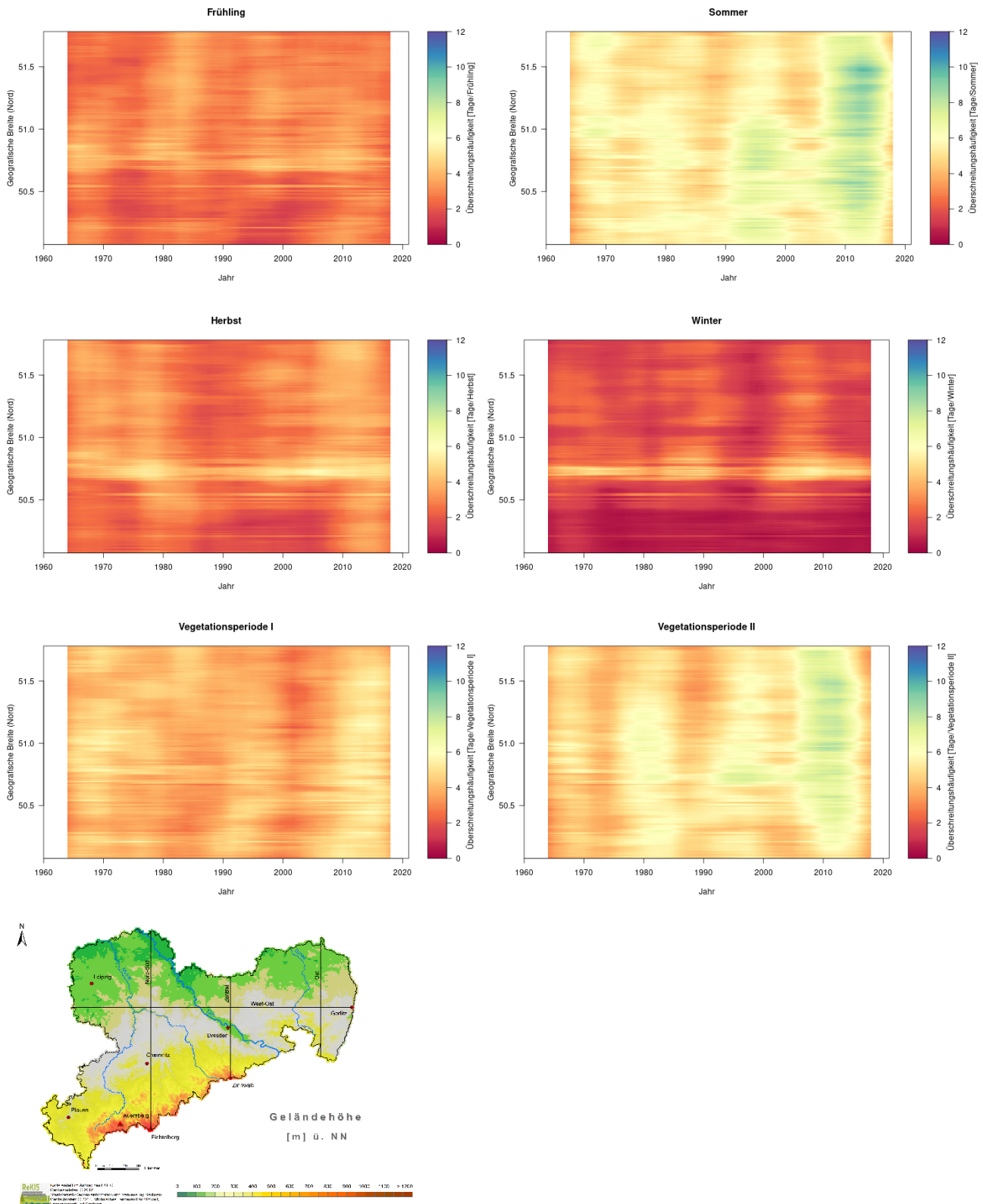
Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt West-Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte



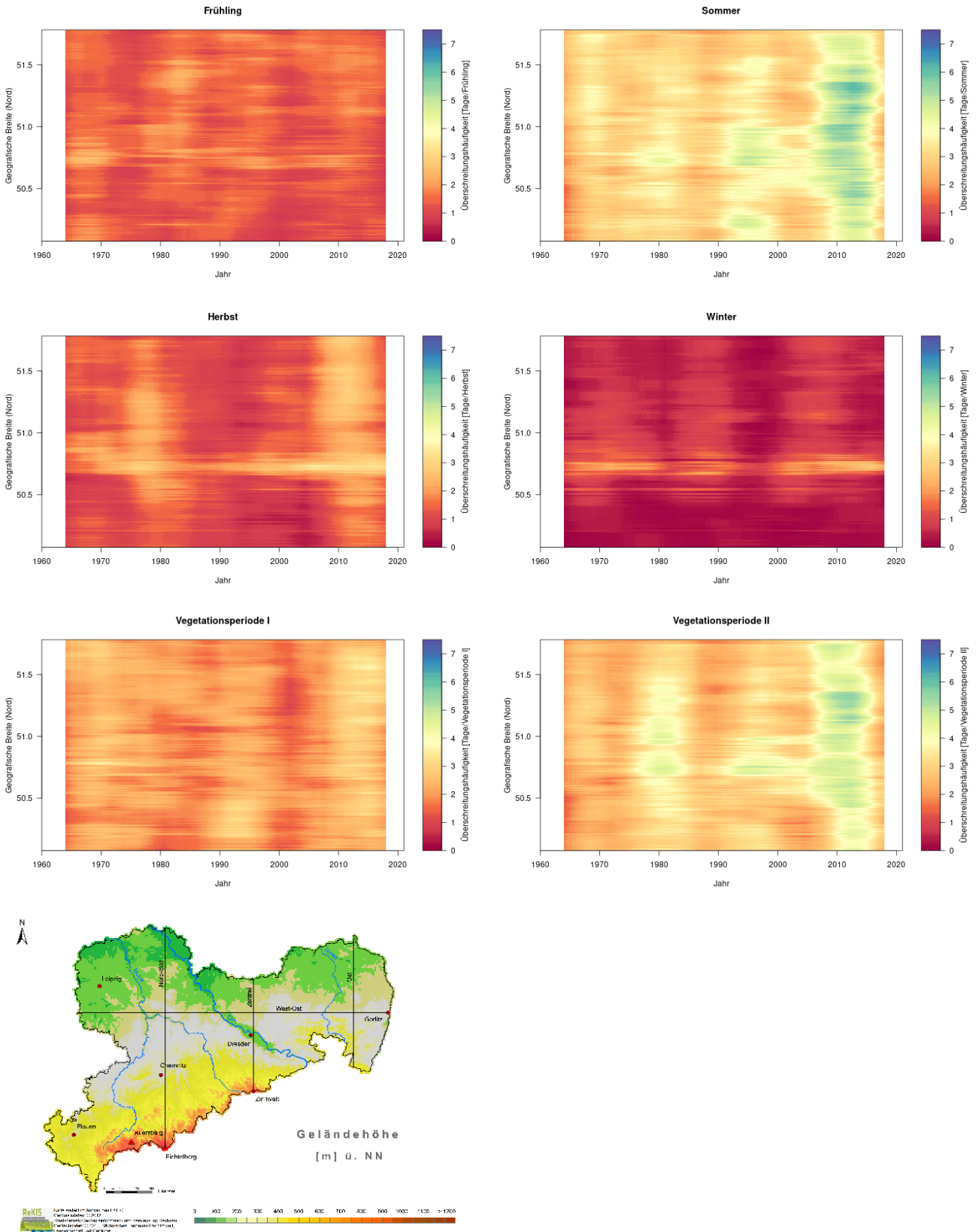
**Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt Zentral in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte**



**Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt Zentral in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte**



**Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R90p für das Transekt Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte**



**Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf (1961-2020) der Auftrittshäufigkeit von Starkregen R95p für das Transekt Ost in Sachsen, Jahreszeiten und Vegetationsperioden I und II, Lage der Transekte**



### 3.2.8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Publikation ist eine Fortschreibung der Publikationen „Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen“ (Bernhofer et al. 2015a) und „Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit“ (Bernhofer et al. 2015b) sowie der "Starkregenereignisse von 1961 bis 2015" (Bernhofer et al., 2017b) mit einer erweiterten Datenbasis bis 2020. Schwerpunkt ist die Analyse verschiedener Starkniederschlagsindizes für 1961 – 2020. Im Fokus stehen die Kerngebiete der Änderungen von Starkniederschlagsereignissen.

In Anlehnung an die WMO-Indizes wurden die Starkniederschlagsindizes R90p und R95p betrachtet, die auf dem 90. bzw. 95. Perzentil der Niederschlagstage basieren. Demnach wurden die größten 10 % der vorhandenen Messwerte in die Untersuchungen einbezogen (analog R95p: 5 %). Im Allgemeinen werden die Ergebnisse für Starkregen R90p und R95p gemeinsam genannt, auf unterschiedliche Ergebnisse wird explizit hingewiesen.

Die Starkniederschlagsindizes wurden für die Referenzperiode 1961 – 1990, für die Klimanormalperiode 1991 – 2020, sowie ggf. für Dekaden betrachtet. Im Folgenden werden vor allem die Änderungen gegenüber der Referenzperiode dargestellt.

Im Vergleich zu Vorgängerstudien zeigt sich eine Verstärkung der Signale durch die Erweiterung der Datenbasis um 5 Jahre. Die Anzahl der Starkniederschlagsereignisse sowie deren mittleren Intensität nehmen für beide Perioden im Vergleich zur Referenzperiode zu. Für den aktuellen Zeitraum 1991 – 2020 konnte eine weitere Zunahme beobachtet werden. Die prozentualen Änderungen für Starkregen R95p sind für die meisten Indizes stärker als für R90p.

Die Verteilungsmuster der Regenhöhe, der Anzahl der Überschreitungstage, sowie der mittleren Intensität von Starkregenereignissen zeigen einen Süd-Nord Gradienten (Höhenabhängigkeit) und einen West-Ost Gradienten (Luv-Leelage).

Für das Kalenderjahr ist eine flächendeckende Zunahme der Tage mit Starkregenereignissen zu beobachten. Starke Zunahmen sind in der Region Leipzig, sowie in den Kammlagen des Erzgebirges vor allem für den Zeitraum 1991 - 2020 festzustellen. Abnahmen der Überschreitungstage treten in den Leelagen der Mittelgebirge - unter anderem in Nordsachsen im Verlauf der Elbe und in Teilen der Region Oberlausitz-Niederschlesien auf.

Die mittlere Intensität eines Starkregenereignisses nimmt im Flächenmittel geringfügig zu, zeigt aber kleinräumig stärkere Zu- und Abnahmen. Die höchsten Intensitäten traten am Erzgebirgskamm um den Fichtelberg und den Auersberg auf. Die Zunahmen der Intensität zeigen sich vor allem in den Luvlagen und die Abnahmen in den Leelagen. Im Verlauf der Dekaden können deutliche Unterschiede der mittleren Intensität von Starkregenereignissen beobachtet werden. Die flächendeckend höchsten Zunahmen sind für 2011 - 2020 festzustellen. Die Auftrittshäufigkeit von Starkregen ermöglicht es Veränderungen im Jahresverlauf festzustellen. Im Frühling sind die Entwicklungen in Sachsen heterogen mit insgesamt abnehmender Tendenz. Deutliche Zunahmen der Auftrittshäufigkeit wurden im Sommer nahezu flächendeckend beobachtet. Der Herbst zeigt eine deutliche Zweiteilung Sachsens mit Zunahmen im Westen und Abnahmen im Osten, wobei die Region Oberes Elbtal / Osterzgebirge den Übergangsbereich darstellt. Ein sehr heterogenes Verteilungsmuster zeigt der Winter. Kleinräumige Zu- und Abnahmen liegen nahe beieinander und weisen eine hohe Amplitude auf. In der Vegetationsperiode I ist eine flächendeckende Abnahme der Auftrittshäufigkeit festzustellen und eine deutliche Zunahme in der Vegetationsperiode II. Die Tran-

sekte zeigen den zeitlichen Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkregen. Die Erweiterung des Datensatzes zeigt deutliche Änderungen. Die Auftrittshäufigkeit nimmt in allen Transekten im Nord-Süd Verlauf zu. Die stärksten Zunahmen sind in den Berg- und Kammlagen, vor allem in den Sommermonaten zu finden. Dabei sind Niveauverschiebungen und die Entwicklung von Gradienten zu identifizieren. Die Periodizität zeigt sich in den hinzugenommenen Zeitraum besonders eindrücklich.

Die Kerngebiete der Änderung zeigen weitgehend einheitliche Zu- und Abnahmen für beide Niederschlagsperzentile. Die Zunahmen der Überschreitungstage und der mittleren Intensität sind für 1991 – 2020 höher als für 1981-2010. Es konnten unterschiedliche regionale Veränderungen beobachtet werden:

In der Region Leipzig-Westsachsen konnten mehr Tage mit Starkregen beobachtet werden mit teils abnehmender Intensität. Die Auftrittshäufigkeit nimmt vor allem im Sommer, speziell in der Vegetationsperiode II, zu.

Im Vogtlandkreis gab es weniger Tage mit Starkregen bei zunehmender Intensität der Ereignisse. Im Jahresverlauf fanden häufiger Starkregenereignisse im Sommer, Vegetationsperiode II und Herbst statt, in allen anderen Zeiträumen fanden seltener Starkregenereignisse statt.

Im Erzgebirgskamm ist eine Zunahme der Anzahl der Starkregenereignisse sowie deren Intensität zu beobachten. Diese Region zeigt im Frühling und der Vegetationsperiode I eine Häufung der Starkregenereignisse, im Gegensatz zu den meisten anderen Regionen.

In der Lausitz wurden weniger Starkregenereignisse beobachtet. Die mittlere Intensität der Ereignisse nahm 2011 – 2020 besonders stark zu.

Die Ergebnisse bestätigen prinzipiell die Vorgängeranalysen. Jedoch hat sich, wie aus den Dekadenkarten der Transekte abzulesen ist, die Änderung der Starkniederschlagscharakteristika in den letzten Jahren beschleunigt. Eine stetige Fortführung dieser Art von Analysen ist bei der aktuell hohen Dynamik des Klimas dringend geboten.

Als Ausblick für zukünftige Forschungsfelder sei auf Folgendes hingewiesen: Bisherige Analysen belegen, dass zunehmend längere trockene Witterungsabschnitte in den Sommermonaten von Starkregenereignissen unterbrochen wurden. Halten die beobachteten Trends eines verminderten Niederschlags in der Vegetationsperiode I an, zieht das Probleme in der Landwirtschaft, wie niedriges Pflanzenwachstum und einen gesteigerten Bewässerungsbedarf nach sich. Die zunehmenden Starkregenereignisse in der Vegetationsperiode II gehen wiederum mit längeren Dürrephasen einher. Diese bergen die Gefahr Ernten zu zerstören, sowie ein hohes Erosionspotenzial. Vor diesem Hintergrund ist die Thematik der in letzter Zeit häufig öffentlich thematisierten Sturzfluten hochaktuell. Diese innerjährlichen Veränderungen sollten weiterhin intensiv untersucht werden. Zur Quantifizierung sind detaillierte Analysen über den Anteil des Starkregens am Gesamtniederschlag sowie deren innerjährliche Verteilung notwendig. Eine Kopplung mit Analysen zu Andauer, Intensität und Häufigkeit von Trockenperioden wären aufgrund der Häufung dieser Ereignisse sehr sinnvoll.

Regionale Klimaprojektionen zeigen eine Fortsetzung der aktuellen Entwicklung an, mit einer weiteren Temperaturerhöhung, mit vermehrten Trockenperioden und häufigeren Starkregenereignissen. In den tieferen Lagen Sachsen ist künftig eine zunehmende Hitzebelastung zu erwarten. Trockene Flächen haben ein hohes Konvektionspotenzial. Gepaart mit großen Wasserflächen, wie beispielsweise rekultivierten Seenlandschaften, birgt dies ideale Bedingungen zur vermehrten Entstehung von sommerlichen Hitzegewittern.

In den Daten wurden solche Effekte in den Regionen der ehemaligen bzw. noch aktiven Braunkohleregionen bereits identifiziert (Bernhofer et al. 2015a). Es wird vermutet, dass die aufsteigenden, feuchten Luftmassen Richtung Gebirge verdriften und aufgrund des orographisch erzwungenen Aufstiegs bereits im Bergland abregnen. Eine tiefere Analyse könnte die Relevanz dieser Phänomene für die Regionen beleuchten.

Extremste Niederschläge haben bisher ein leicht abweichendes räumliches und zeitliches Verteilungsmuster gezeigt. Häufig wurden die extremsten Ereignisse von Vb-Wetterlagen verursacht. Eine gekoppelte Analyse zum Auftreten von starkregenrelevanten Wetterlagen und der veränderten Starkniederschlagscharakteristik ist von besonderem Interesse.

### **3.3 Erzeugung eines Rasterdatensatzes für abgesetzte Niederschläge in Sachsen, 1961-2020**

Nebeldeposition (ND) oder abgesetzter Niederschlag ist eine Teilgröße des Wasserhaushalts, die regional starken Schwankungen unterliegt. In den niederen Lagen Sachsens wie beispielsweise der Leipziger Tieflandsbucht hat ND praktisch keinerlei Bedeutung und liegt in der Jahressumme im niedrigen einstelligen Millimeterbereich. Im Gegensatz dazu können in den Hochlagen der Mittelgebirge, wie im Bereich des Fichtelberges, durchaus einige 100mm im Jahr anfallen. Sie entsteht, indem Vegetation Wasser aus treibendem Nebel auskämmt. Zur Entstehung sind somit Nebel, Wind und Vegetation Voraussetzung. ND wird nicht gemessen und fast nie modelliert, bleibt auch in Wasserhaushaltsbetrachtungen meist unberücksichtigt. In Bernhofer et al. (2017a) sowie Körner et al. (2020) und Körner et al. (2021) wurde eine Methode entwickelt, wie mithilfe von meteorologischen Größen und Daten zur Landnutzung ND abgeleitet werden kann. Die Methode ist in der genannten Literatur detailliert beschrieben. Hier werden die verwendeten Eingangsdaten sowie die Ergebnisse beschrieben. Die Berechnung erfolgt in Stundenauflösung, die Ausgabe der Ergebnisse in Tagesauflösung im Zeitraum 1961 bis 2020 auf einem 100 x 100m Raster.

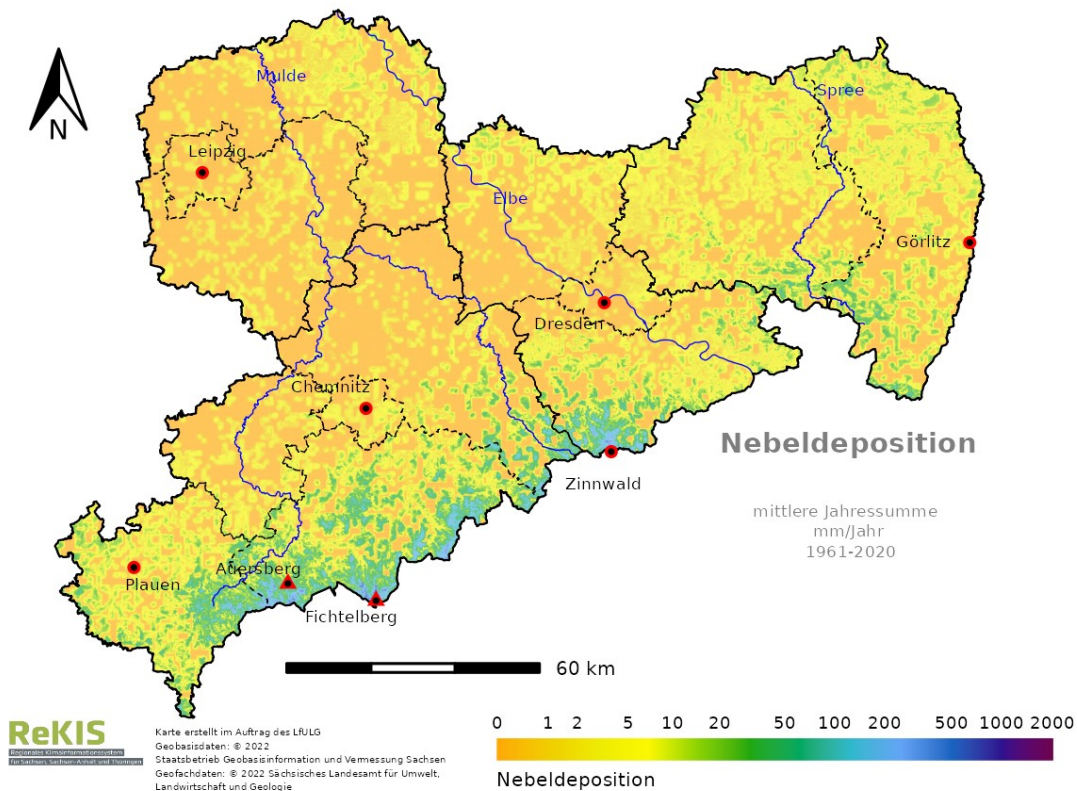
#### **3.3.1 Eingangsgrößen**

Für die Berechnung wurden folgende Eingangsgrößen verwendet:

- Windgeschwindigkeit aus Produkt "Windfeld Sachsen" (LfULG, 2022) für Sachsen in Stundenauflösung
- Lufttemperatur in Stundenauflösung (DWD)
- Relative Feuchte in Stundenauflösung (DWD)
- Aus Temperatur und Feuchte abgeleiteter Flüssigwassergehalt (lwc) in Stundenauflösung
- Digitales Geländemodell (dgm) in 100m Auflösung (RaKliDa)
- Vegetationshöhenmodell in 1.000m Auflösung (Global Forest Height)
- LAI in der Form: Linearer Anstieg mit Vegetationshöhe: bei 1m Vegetationshöhe:  $1\text{m}^2/\text{m}^2$ , bei 40m Vegetationshöhe:  $7\text{m}^2/\text{m}^2$

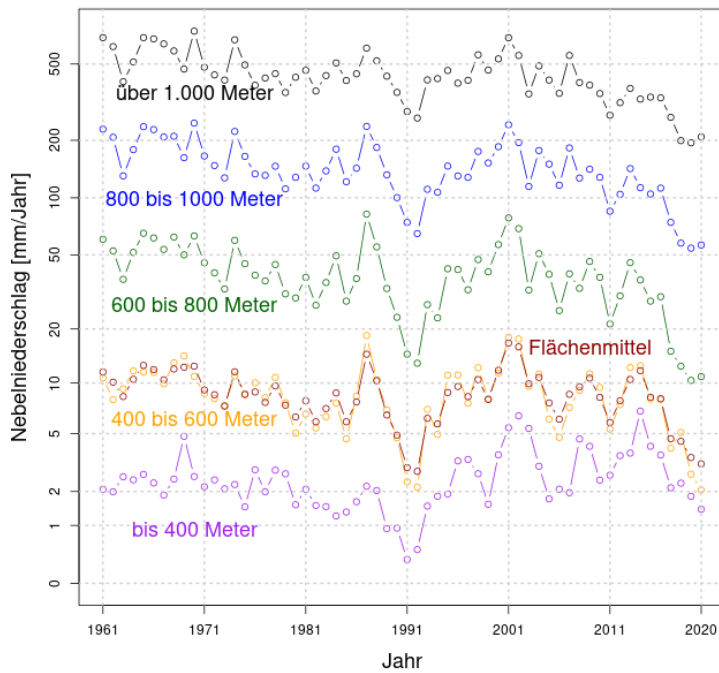
### 3.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden als ".asc"-Raster über das „Regionale Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen unter [www.rekis.org](http://www.rekis.org) frei zugänglich zur Verfügung gestellt. In Abbildung 59 ist die mittlere jährliche Summe der Nebeldeposition im gesamten Untersuchungszeitraum 1961-2020 dargestellt. Die Jahressummen im Flachland sind hierbei immer im Bereich einiger weniger mm/Jahr und spielen somit für den Wasserhaushalt keine Rolle. In den höheren Lagen des Erzgebirges steigt die Jahressumme jedoch sprunghaft auf mehrere 100 mm/Jahr an. Der Anteil der höheren Lagen an der Gesamtfläche Sachsens ist gering, die Auswirkung für diese Gebiete ist jedoch groß: Sowohl positive Effekte wie mehr Pflanzenverfügbares Wasser oder geringere Auswirkungen von Trockenheit als auch negative Auswirkungen wie intensivere Frühjahrshochwasser oder erhöhter Windbruch durch Eislast (Nebelfrostablagerungen) können die Folge sein.



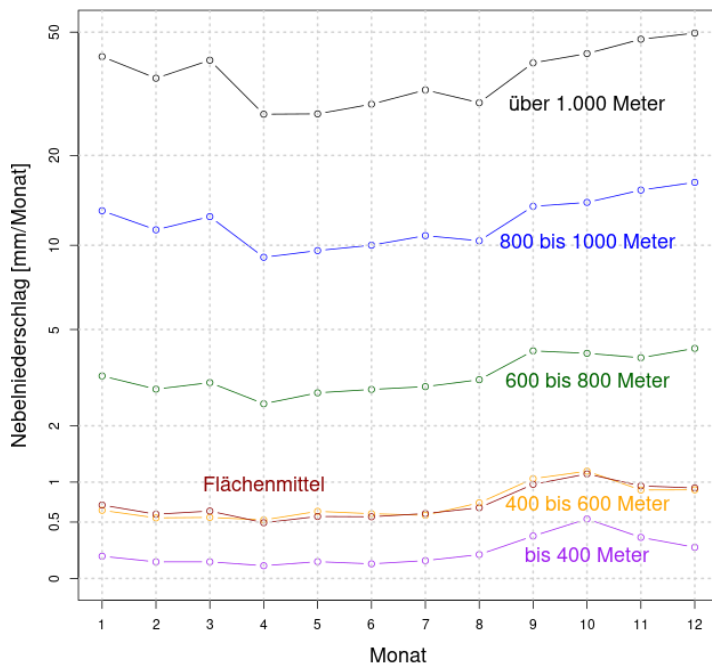
**Abbildung 59: Mittlere jährliche Summe der Nebeldeposition 1961-2020**

Aufgeschlüsselt nach Höhenstufen in Abbildung 60 wird die Aussage aus der räumlichen Darstellung unterstrichen: Je höher ein Gebiet über dem Meeresspiegel liegt, desto mehr Nebeldeposition findet im Mittel statt. Es lassen sich jedoch weitere Erkenntnisse aus der Abbildung ziehen: So gibt es beispielsweise um das Jahr 1990 herum einen Einbruch der Nebeldeposition. Im gleichen Zeitraum, in dem auch zahlreiche weitere meteorologische Größen Brüche in ihren Zeitreihen aufweisen. Außerdem lässt sich erkennen, dass in den drei Trocken/Dürre Jahren 2018-2020 auch der Nebelniederschlag in den meisten Höhenstufen historisch geringe Werte aufweist. Insgesamt weist die Nebeldeposition in den höheren Lagen einen leicht negativen Trend im Verlauf der Zeit auf. In den tieferen Lagen ist dieser Trend umgekehrt, so dass die Nebeldeposition einen leicht positiven Trend aufweist. Dies aber auch einem sehr viel geringeren Niveau, so dass insgesamt eine sehr leichte Abnahme zu verzeichnen ist.



**Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der Jahressumme der Nebeldeposition nach Höhenstufe**

Im mittleren Jahresverlauf (Abbildung 61) zeigt sich, dass das Auftreten der maximalen Monatssumme (der Nebelhäufigkeit folgend) mit der Höhenlage verschiebt. Während im Flachland der meiste Nebel in den Herbstmonaten Oktober und November auftritt, ist das Maximum in den höheren Lagen des Erzgebirges im Winter zu verzeichnen. Insgesamt tritt Nebeldeposition jedoch das ganze Jahr hinüber auf, so dass auch im Sommer im Bergland beispielsweise deutlich mehr Nebelniederschlag zu verzeichnen ist, als im Herbst im Flachland.



**Abbildung 61: Mittlerer Jahrgang der Nebeldeposition nach Höhenstufen**

## Literaturverzeichnis

- ALEXANDERSSON, H., 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology* 6, 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- ALLAN, R., PEREIRA, L., SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56.
- ÅNGSTRÖM, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 50, 121–126. <https://doi.org/10.1002/qj.49705021008>
- BERNHOFER, C., KÖRNER, P., SCHWARZE, R., 2017a. Berücksichtigung abgesetzter Niederschläge bei der Korrektur von Niederschlagsmessungen - sachsen.de (No. 9), Schriftenreihe des LfULG. Dresden.
- BERNHOFER, C., PLUNTKE, T., BARFUS, K., HEIDENREICH, M., KRONENBERG, R., HAUFFE, C., WAGNER, M., SCHWARZE, R., GUTZMANN, B., 2019. Klima-Referenzdatensatz Sachsen (1961-2015) - sachsen.de (No. 7), Schriftenreihe des LfULG.
- BERNHOFER, C., SCHALLER, A., PLUNTKE, T., FRANKE, J., 2017b. Starkregenereignisse von 1961 bis 2015 Analyse von Starkregenereignissen von 1961 bis 2015 für den Freistaat Sachsen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie ; Heft 5/2017.
- BERNHOFER, P.D.C., FRANKE, J., KÖRNER, P., FISCHER, S., KIRSTEN, L., KOSTROWSKI, D., PRASSE, H., SCHALLER, A., DONIX, T., 2015a. Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen.
- BERNHOFER, P.D.C., HÄNSEL, D.S., PLUNTKE, T., SCHALLER, A., 2015b. Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit.
- CAHILL, N., RAHMSTORF, S., PARNELL, A.C., 2015. Change points of global temperature. *Environ. Res. Lett.* 10, 084002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084002>
- KÖRNER, P., KALAB, D., KRONENBERG, R., BERNHOFER, C., 2020. REAL-Fog: A simple approach for calculating the fog in the atmosphere at ground level (English Title: REAL-Fog: A simple approach for calculating the fog in the atmosphere at ground level). *Meteorologische Zeitschrift* 29, 55–65. <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0976>
- KÖRNER, P., KRONENBERG, R., GENZEL, S., BERNHOFER, C., 2018. Introducing Gradient Boosting as a universal gap filling tool for meteorological time series. *Meteorologische Zeitschrift* 369–376. <https://doi.org/10.1127/metz/2018/0908>
- KÖRNER, P., RICO, K., GLIKSMAN, D., CHRISTIAN, B., 2021. REAL-Fog Part 2: A novel approach to calculate high resolved spatio-temporal Fog Deposition: a daily fog deposition data set for entire Germany for 1949-2018. *Journal of Hydrology* 126360. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126360>
- KRONENBERG, R., FRANKE, J., BERNHOFER, C., 2021. Das Regionale Klimainformationssystem ReKIS – eine gemeinsame Plattform für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. pp. 366–374.
- LFULG, 2022. Erzeugung und Verifizierung eines raumzeitlich hochaufgelösten Windfeldes für den Freistaat Sachsen., Schriftenreihe des LfULG.
- NYCHKA, D., FURRER, R., PAIGE, J., SAIN, S., 2021. fields: Tools for spatial data.
- PETTITT, A.N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28, 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- R CORE TEAM, 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RICHTER, D., 1995. Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, Deutscher Wetterdienst, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 194. Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes.
- SCHALLER, A., 2013. Untersuchungen zu geänderten Starkniederschlägen aus gemessenen und modellierten Niederschlagszeitreihen. (Diplomarbeit). Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Me-teorologie.

- SCHALLER, A.S., FRANKE, J., BERNHOFER, C., 2020. Climate dynamics: temporal development of the occurrence frequency of heavy precipitation in Saxony, Germany. *Meteorologische Zeitschrift* 335–348. <https://doi.org/10.1127/metz/2020/0771>
- SCHWARZE, R., DRÖGE, W., MALESKA, V., LÜNICH, K., SCHÖNFELD, M., SPITZER, S., KUHN, K., ZWEIG, M., STEINL, C., 2011. KiiWES - Kernkomponente (No. 44), Schriftenreihe des LfULG. Dresden.
- STARKE, M., LEIDING, T., STAHN, P., GASSDORF, T., HALLER, M., WALTER, A., BERNHOFER, C., ZIEMANN, A., 2019. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben: Quantitative Windklimatologie für Windenergieapplikationen in Höhen über 100 m (QuWind100). <https://doi.org/10.2314/KXP:1685669980>
- STRUVE, S., PFANNSCHMIDT, K., HEYER, F., FRANKE, J., KRONENBERG, R., EICHHORN, M., LAU, 2020. Mitteldeutsches Kernensemble (MDK) zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten - Dokumentation - Version 1.0. Halle (Salle).
- TUD, INSTITUT FÜR HYDROLOGIE UND METEOROLOGIE, PROFESSUR FÜR METEOROLOGIE, 2020. Fortschrittsbericht 2020 ReKIS. Dresden.
- WENDLING, U., SCHELLIN, H.-G., THOMÄ, M., 1991. Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. *Meteorologische Zeitschrift*.
- WOHLAND, J., FOLINI, D., PICKERING, B., 2021. Wind speed stilling and its recovery due to internal climate variability. *Earth System Dynamics* 12, 1239–1251. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1239-2021>

**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](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)

[www.lfulg.sachsen.de](http://www.lfulg.sachsen.de)

**Autoren:**

Dr. Philipp Körner, M.Sc. Ivan Vorobevskii, Dr. Rico Kronenberg,  
M.Sc. Ahmed Homoudi

TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie,

Professur für Meteorologie

Pienner Straße 23, 01737 Tharandt

Telefon: + 49 351 463-31340

Telefax: + 49 351 463-31302

E-Mail: [meteorologie@tu-dresden.de](mailto:meteorologie@tu-dresden.de)

**Redaktion:**

Dr. Johannes Franke

LfULG / Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen / Fachzentrum Klima

Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden

Telefon: + 49 351 2612-5501

Telefax: + 49 351 XXXX-X

E-Mail: [johannes.franke@smekul.sachsen.de](mailto:johannes.franke@smekul.sachsen.de)

**Fotos:**

Dr. Philipp Körner, TU Dresden (Titelbild)

**Redaktionsschluss:**

01.07.2022

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> 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](http://www.lfulg.sachsen.de)