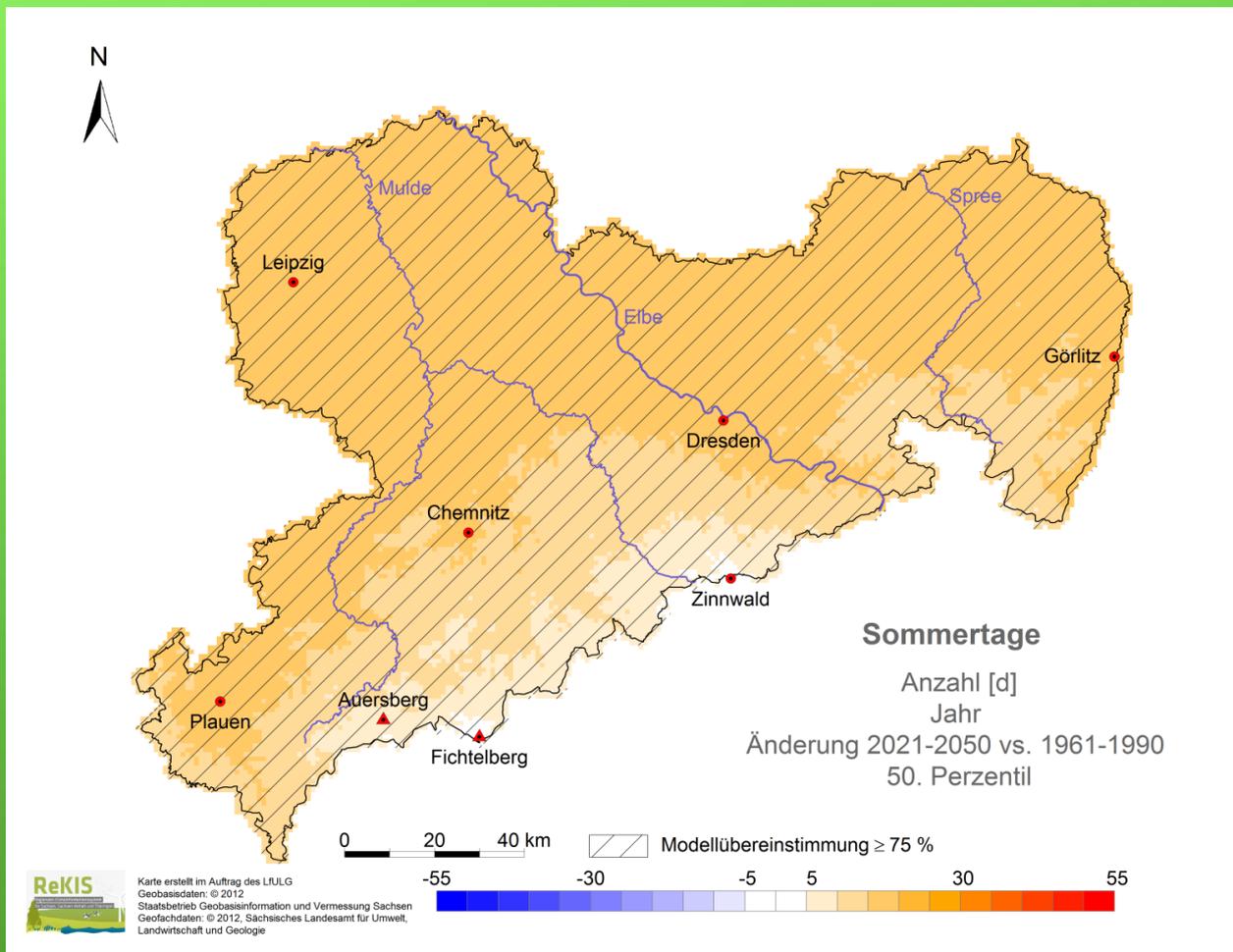


# Witterungsextreme im WEREX-V-Ensemble

Schriftenreihe, Heft 9/2016



# Analyse und Bewertung des WEREX-V-Ensembles hinsichtlich der Abbildung von Extremen in Sachsen

Christian Bernhofer, Thomas Pluntke, Andrea Schaller

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....   | <b>11</b>  |
| <b>2</b> | <b>Vorgehensweise</b> .....   | <b>13</b>  |
| <b>3</b> | <b>Verwendete Datenbasis</b> .....  | <b>13</b>  |
| <b>4</b> | <b>Phase I: Güte der Abbildung von witterungsbedingten Extremen im sächsischen Klimadatensatz WEREX V</b> ..... | <b>16</b>  |
| 4.1      | Methoden .....  | 16         |
| 4.1.1.   | Höhe der Extremereignisse .....   | 17         |
| 4.1.2.   | Überschreitungstage der Extremereignisse .....  | 17         |
| 4.1.3.   | Zeitlicher Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen .....                              | 18         |
| 4.1.4.   | Dürreperioden.....  | 21         |
| 4.1.5.   | Bestimmung der Güte der WEREX-V-Läufe .....   | 23         |
| 4.1.6.   | Ergebnisdarstellung und Interpretationsbeispiele .....  | 26         |
| 4.2      | Ergebnisse .....  | 29         |
| 4.2.1    | Starkniederschlag.....  | 29         |
| 4.2.2    | Extremtemperaturen.....   | 48         |
| 4.2.3    | Dürreperioden.....  | 79         |
| 4.3      | Diskussion.....   | 85         |
| 4.3.1    | Workshops zu Nutzererfahrungen von Regionalen Klimaprojektionen.....  | 85         |
| 4.3.2    | Diskussion der gewonnenen Ergebnisse .....  | 87         |
| <b>5</b> | <b>Phase II: Abschätzung von projizierten Witterungsextremen für Sachsen</b> .....                              | <b>89</b>  |
| 5.1      | Methoden .....  | 89         |
| 5.1.1    | Auswahl von Indizes und Projektionen aus dem WEREX-V-Ensemble.....  | 89         |
| 5.1.2    | Ergebnisdarstellung.....  | 90         |
| 5.1.3    | Interpretationsbeispiel .....   | 91         |
| 5.2      | Ergebnisse .....  | 92         |
| 5.2.1    | Starkniederschlag.....  | 92         |
| 5.2.2    | Wärme-/Kältebelastung.....  | 100        |
| 5.2.3    | Dürreperioden.....  | 104        |
| 5.3      | Diskussion.....   | 116        |
| 5.3.1    | Starkniederschlag.....  | 116        |
| 5.3.2    | Zeitlicher Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlag.....   | 116        |
| 5.3.3    | Wärmebelastung .....  | 117        |
| 5.3.4    | Kältebelastung.....   | 118        |
| 5.3.5    | Dürren.....   | 118        |
| <b>6</b> | <b>Kernaussagen</b> .....   | <b>120</b> |
| <b>7</b> | <b>Literaturverzeichnis</b> .....   | <b>125</b> |
| <b>8</b> | <b>Anhang</b> .....   | <b>128</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1:  | Stationen mit einer 99-prozentigen Datenverfügbarkeit (OBS) .....  | 16 |
| Abbildung 2:  | Anzahl der Überschreitungstage für den Starkniederschlag R95p in der VPI der Periode 1961–2000. Dargestellt sind die beobachteten (schwarz) und mit verschiedenen Antrieben (farbig) simulierten und nachfolgend geglätteten Überschreitungstage (jeweils 10 Realisierungen; bei EH5_L1, HC3C_L1 und HCG2_L1 20 Realisierungen). ..... | 19 |
| Abbildung 3:  | Darstellung der mittels der Diskreten Fouriertransformation separierten Kurven für drei Frequenzen und der Summe aller 1.544 Frequenzen der Station Dresden-Klotzsche (schwarz = OBS, rot = eine exemplarische C20 Simulation).....  | 20 |
| Abbildung 4:  | Definition von Dürreperioden am Beispiel des SPEI12 .....  | 23 |
| Abbildung 5:  | Ergebnisse der Fouriertransformation der Auftrittshäufigkeit vom Starkniederschlag R95p der Station Dresden in der Vegetationsperiode I für vier zufällig ausgewählte C20-Realisierungen (rot) im Vergleich zu OBS (schwarz) .....   | 25 |
| Abbildung 6:  | Summe der einzelnen Frequenzen und dazugehörigen Amplituden (Ergebnis der FFT) für die beobachteten Auftrittswahrscheinlichkeiten der Stationen Dresden (rot) und Fichtelberg (schwarz). Links: Vegetationsperiode I, RMSE zwischen den Kurven = 0,001 1/d; rechts: Vegetationsperiode II, RMSE zwischen den Kurven = 0,0019 1/d ..... | 26 |
| Abbildung 7:  | Links: Prinzipieller Aufbau des Box-Whisker-Plots; rechts: Beispiel zur Interpretation (Starkniederschlag R80p – Höhe, Dresden-Klotzsche, 1961–1990) .....   | 27 |
| Abbildung 8:  | Musterblätter für die Höhe und die Überschreitungstage von Starkniederschlägen .....   | 27 |
| Abbildung 9:  | Interpretationsbeispiel: Karte (Starkniederschlag R80p – Höhe).....  | 28 |
| Abbildung 10: | Starkniederschlag R80p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten) .....  | 31 |
| Abbildung 11: | Starkniederschlag R90p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten) .....  | 32 |
| Abbildung 12: | Starkniederschlag R95p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten) .....  | 33 |
| Abbildung 13: | Starkniederschlag R99p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten) .....  | 34 |
| Abbildung 14: | Maximaler Tagesniederschlag RX1day: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten) .....   | 35 |
| Abbildung 15: | Maximaler 5-Tagesniederschlag RX5day: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten) .....   | 36 |
| Abbildung 16: | Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 39 |
| Abbildung 17: | Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....  | 40 |
| Abbildung 18: | Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 41 |
| Abbildung 19: | Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....  | 42 |
| Abbildung 20: | Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 43 |

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 21: | Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 44 |
| Abbildung 22: | Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....  | 45 |
| Abbildung 23: | Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 46 |
| Abbildung 24: | Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche (1961–2000 und Dekaden) .....                                  | 47 |
| Abbildung 25: | Minimumtemperatur TN10 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für den Winter (unten) ..... | 51 |
| Abbildung 26: | Minimumtemperatur TN90 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das VPI (unten) .....    | 52 |
| Abbildung 27: | Maximumtemperatur TX10 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für den Winter (unten) ..... | 54 |
| Abbildung 28: | Maximumtemperatur TX90 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für die VPI (unten) .....    | 55 |
| Abbildung 29: | Minimumtemperatur TN10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten (1961–2000 und Dekaden).....   | 59 |
| Abbildung 30: | Minimumtemperatur TN10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und für die Fläche für den Winter (unten) .....  | 60 |
| Abbildung 31: | Minimumtemperatur TN10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I und II und das Kalenderjahr (1961–2000 und Dekaden) .....                                | 61 |
| Abbildung 32: | Minimumtemperatur TN90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten .....   | 62 |
| Abbildung 33: | Minimumtemperatur TN90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und für die Fläche (1961–2000) für die VPI (unten).....                                 | 63 |
| Abbildung 34: | Minimumtemperatur TN90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und für die Fläche (1961–2000) für die VPII (unten) .....   | 64 |
| Abbildung 35: | Maximumtemperatur TX10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten (1961–2000 und Dekaden).....   | 65 |
| Abbildung 36: | Minimumtemperatur TX10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) sowie für die Fläche für den Winter (unten) .....                                      | 66 |
| Abbildung 37: | Maximumtemperatur TX10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Vegetationsperioden sowie das Kalenderjahr (1961–2000 und Dekaden) .....                                      | 67 |
| Abbildung 38: | Maximumtemperatur TX90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten .....   | 68 |
| Abbildung 39: | Maximumtemperatur TX90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) sowie für die Fläche für die VPI (unten).....   | 69 |
| Abbildung 40: | Maximumtemperatur TX90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) sowie für die Fläche für die VPII (unten).....  | 71 |
| Abbildung 41: | Frosttage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (1961–2000) (unten) .....  | 73 |
| Abbildung 42: | Eistage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten).....   | 74 |
| Abbildung 43: | Sommertage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten).....  | 75 |
| Abbildung 44: | Heiße Tage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten).....  | 76 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 45: | Kälteperioden pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten).....  | 77  |
| Abbildung 46: | Wärmeperioden pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten).....  | 78  |
| Abbildung 47: | Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI3 und SPEI3, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Dresden-Klotzsche.....  | 80  |
| Abbildung 48: | Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI12 und SPEI12, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Dresden-Klotzsche.....  | 81  |
| Abbildung 49: | Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI3 und SPEI3, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Fichtelberg (WEWA).....   | 82  |
| Abbildung 50: | Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI12 und SPEI12, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Fichtelberg (WEWA).....   | 83  |
| Abbildung 51: | Interpretationsbeispiel der Musterblätter .....  | 92  |
| Abbildung 52: | Starkniederschlag R95p – Regenhöhe: prozentuale Änderung [%] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (Kalenderjahr, 25., 50. und 75. Perzentil).....   | 94  |
| Abbildung 53: | Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage: Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (Vegetationsperiode I [April-Juni], 25., 50. und 75. Perzentil) .....  | 95  |
| Abbildung 54: | Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage: prozentuale Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (Vegetationsperiode II [Juli-September], 25., 50. und 75. Perzentil) .....   | 96  |
| Abbildung 55: | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961-2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-CLM-L1-A1B für die Vegetationsperiode I und II des Zeitraums 1961-2100.....   | 99  |
| Abbildung 56: | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die Läufe EH5-CLM-L1-A1B, EH5-RACMO-L3-A1B, EH5-REMO-L3-A1B und HCG2-L1-A1B für die Vegetationsperiode I und II des Zeitraums 1961-2100.....  | 100 |
| Abbildung 57: | Sommertage: Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961–1990 (25., 50. und 75. Perzentil, Kalenderjahr).....  | 102 |
| Abbildung 58: | Frosttage: Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961–1990 (25., 50. und 75. Perzentil, Kalenderjahr).....   | 103 |
| Abbildung 59: | Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPEI3 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 3 bzw. 4 bis 12 Monaten für die Station Dresden-Klotzsche. Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961-1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft. .... | 105 |
| Abbildung 60: | Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPEI3 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 3 bzw. 4 bis 12 Monate für die Station Fichtelberg (WEWA). Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961-1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft. .... | 106 |
| Abbildung 61: | Dürreperioden SPI3 und SPI12: kumulative Anzahl in 30 Jahren und Stärke pro Ereignis in der Klimanormalperiode 1961-1990 .....   | 111 |
| Abbildung 62: | Trockenperioden SPI3 – kumulative Anzahl in 30 Jahren: Änderung [-] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (25., 50. und 75. Perzentil).....  | 112 |
| Abbildung 63: | Trockenperioden SPI3 – Mittlere Stärke pro Ereignis: Änderung [%] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (25., 50. und 75. Perzentil).....  | 113 |
| Abbildung 64: | Trockenperioden SPI12 – kumulative Anzahl in 30 Jahren: Änderung [-] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (25., 50. und 75. Perzentil).....   | 114 |
| Abbildung 65: | Trockenperioden SPI12 – Mittlere Stärke pro Ereignis: Änderung [%] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (25., 50. und 75. Perzentil).....   | 115 |
| Abbildung 66: | Zeitreihe des SPI3/SPEI3 [-] und des SPI12/SPEI12 [-] einer zufällig ausgewählten Projektion für die Station Dresden .....   | 119 |
| Abbildung 67: | Starkniederschlag R80p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VP II (unten).....   | 136 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 68: | Starkniederschlag R90p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten).....  | 137 |
| Abbildung 69: | Starkniederschlag R95p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten).....  | 138 |
| Abbildung 70: | Starkniederschlag R99p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten).....  | 139 |
| Abbildung 71: | Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden .....  | 140 |
| Abbildung 72: | Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 141 |
| Abbildung 73: | Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden .....  | 142 |
| Abbildung 74: | Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 143 |
| Abbildung 75: | Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden .....  | 144 |
| Abbildung 76: | Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 145 |
| Abbildung 77: | Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden .....  | 146 |
| Abbildung 78: | Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....   | 147 |
| Abbildung 79: | Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden (1961–2000 und Dekaden).....  | 148 |
| Abbildung 80: | Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden).....  | 149 |
| Abbildung 81: | Meteorologisches Halbjahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plots für die Station Dresden (1961–2000 und Dekaden).....  | 150 |
| Abbildung 82: | Meteorologisches Halbjahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p - Überschreitungstage: Box-Whisker-Plots für die Station Fichtelberg (1961 – 2000 und Dekaden).....  | 151 |
| Abbildung 83: | Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPI12 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 12 bzw. mehr als 12 Monate für die Station Dresden-Klotzsche. Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961–1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft. ....  | 152 |
| Abbildung 84: | Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPI12 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 12 bzw. mehr als 12 Monate für die Station Fichtelberg (WEWA). Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961–1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft. .... | 153 |
| Abbildung 85: | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961–2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-RACMO-L3-A1B, VP I+II, 1961–2100 .....  | 154 |
| Abbildung 86: | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961–2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-REMO-L3-A1B, VP I+II, 1961–2100 .....   | 155 |
| Abbildung 87: | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961–2013) und für alle Realisierungen des Laufs HCG2-L1-A1B, VP I+II, 1961–2100 .....   | 156 |

## Tabellenverzeichnis

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1:  | Übersicht des WEREX V-Ensembles; Globalmodelle: ECHAM5 (MPI Hamburg, Deutschland), HadCM3C (Hadley Centre, Großbritannien, mit Kohlenstoffkreislauf), HadGEM2 (Hadley Centre, Großbritannien, mit Landnutzung); dynamische Regionalmodelle: CCLM (Community Modell, Deutschland), REMO (MPI Hamburg, Deutschland), RACMO (KNMI, Wetterdienst, Niederlande) ..... | 14  |
| Tabelle 2:  | Anzahl an OBS-Stationen für verschiedene Niveaus an Fehlwerten. Grundlage ist die gemeinsame Stationsliste der C20-Simulationen (530 Stationen).....   | 15  |
| Tabelle 3:  | Anzahl der Stationen, die für die Analyse des Extremwertverhaltens genutzt werden .....  | 15  |
| Tabelle 4:  | Einteilung der SPI-Werte in Feuchtezustandskategorien (nach McKEE et al. 1993; GUTTMAN 1999).....  | 22  |
| Tabelle 5:  | Zuweisung von Rängen zu absoluten bzw. prozentualen Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Indizes.....  | 24  |
| Tabelle 6:  | Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Starkniederschlagsindizes für das Kalenderjahr und die Vegetationsperioden .....  | 29  |
| Tabelle 7:  | Güte der WEREX V-Antriebe bezüglich der Wiedergabe der Starkniederschlagshöhe. Die grau hinterlegten Felder geben die jeweils zwei besten mittleren Ränge an.....  | 30  |
| Tabelle 8:  | Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Starkniederschlagsindizes für das Kalenderjahr und die Vegetationsperioden .....  | 38  |
| Tabelle 9:  | Güte der WEREX V-Projektionen für die Überschreitungstage von Starkniederschlagsereignissen. Die grau hinterlegten Felder geben die jeweils zwei besten mittleren Ränge an. ....   | 38  |
| Tabelle 10: | Anzahl an Realisationen der WEREX V-Antriebe, die „gut“ die beobachtete Periodizität des Starkniederschlags R95p widerspiegeln .....   | 48  |
| Tabelle 11: | Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Temperaturextreme für den Winter und die Vegetationsperioden .....  | 50  |
| Tabelle 12: | Güte der WEREX V-Projektionen für die Höhe von Temperaturextremen.....   | 50  |
| Tabelle 13: | Aussagekraft für die Über-/Unterschreitungstage von Extremtemperaturereignissen für .....  | 57  |
| Tabelle 14: | Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für die Über-/Unterschreitungstage von Extremtemperaturereignissen für den Winter und die Vegetationsperioden .....   | 58  |
| Tabelle 15: | Güte der WEREX V-Projektionen für die Über-/Unterschreitungstage von Temperaturextremereignissen ...   | 58  |
| Tabelle 16: | Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Ereignistage, Kälte- und Wärmeperioden für das Kalenderjahr .....   | 72  |
| Tabelle 17: | Güte der WEREX V-Projektionen für Temperaturextreme von Ereignistagen, Kälte- und Wärmeperioden der Periode 1961–2000 .....  | 72  |
| Tabelle 18: | Ranganalyse der Dürreindizes SPI3 und SPEI 3, Mittel aller verfügbaren Stationen .....   | 84  |
| Tabelle 19: | Ranganalyse der Dürreindizes SPI12 und SPEI 12, Mittel aller verfügbaren Stationen .....   | 84  |
| Tabelle 20: | Kennzeichnung der vier besten WEREX V-Läufe für verschiedene Extremindizes .....   | 88  |
| Tabelle 21: | Analysierte Indizes und deren sozio-ökonomische Relevanz .....   | 90  |
| Tabelle 22: | Signaländerung des 50. Perzentils in Prozent und Millimeter für Starkniederschlag R95p – Regenhöhe (Kalenderjahr) in der nahen und fernen Zukunft .....  | 97  |
| Tabelle 23: | Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Vegetationsperiode I in der nahen und fernen Zukunft .....   | 97  |
| Tabelle 24: | Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Vegetationsperiode II in der nahen und fernen Zukunft .....  | 97  |
| Tabelle 25: | Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Sommertage in der nahen und fernen Zukunft .....  | 104 |
| Tabelle 26: | Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Frosttage in der nahen und fernen Zukunft ..  | 104 |
| Tabelle 27: | Analyse der Dürreperiodenindizes auf Basis des SPEI3 für alle Stationen im Untersuchungsgebiet. Für die zukünftigen Perioden ist das Änderungssignal vs. 1961–1990 dargestellt. ....   | 108 |
| Tabelle 28: | Analyse der Dürreperiodenindizes auf Basis des SPEI12 für alle Stationen im Untersuchungsgebiet. Für die zukünftigen Perioden ist das Änderungssignal vs. 1961–1990 dargestellt. ....  | 109 |

Tabelle 29: Stationen, die der Analyse in diesem Bericht unterzogen werden (RK-korrigierter Niederschlag, T-min – Minimumtemperatur, T-max – Maximumtemperatur, ETP – Potenzielle Verdunstung): Die Kreuze markieren die Datenverfügbarkeit. .... 129

## Abkürzungsverzeichnis

|       |  |
|-------|--|
| Ahfk  | Auftrittshäufigkeit  |
| C20   | modelliertes Klima der Vergangenheit (hier 1961-2000)  |
| DP    | Dürreperioden  |
| FD    | Frosttage  |
| GCM   | Global Circulation Model: Globales Zirkulationsmodell  |
| HD    | Heiße Tage   |
| ID    | Eistage  |
| IDW   | Inverse Distanzwichtung  |
| IPCC  | Intergovernmental Panel on Climate Change: Weltklimarat der Vereinten Nationen   |
| IQR   | Inter Quartile Range: Abstand zwischen dem 25. und dem 75. Perzentil   |
| OBS   | observierter (gemessener Datensatz)  |
| RCM   | Regional Climate Model: Regionales Klimamodell   |
| RMSE  | Root Mean Square Error: Fehlermaß  |
| R95p  | 95. Perzentil des Niederschlags (nur Tage mit Niederschlag $\geq 1$ mm)  |
| SU    | Sommertage   |
| SPEI  | Standardisierter Niederschlags-Evaporationsindex (Basisdaten: 3- bzw. 12-monatig geglättete Differenzen aus Niederschlag und Potentieller Verdunstung) |
| SPI   | Standardisierter Niederschlagsindex (Basisdaten: 3- bzw. 12-monatige geglättete Niederschläge)   |
| VP I  | Vegetationsperiode I (April-Juni)  |
| VP II | Vegetationsperiode II (Juli-September)   |

# 1 Einleitung

Der aktuelle Fünfte Sachstandsbericht des IPCC (2013) belegt fundierter denn je, dass der Klimawandel auf menschliche Ursachen zurückzuführen ist. Schon heute sind die Folgen des Klimawandels in der Gesellschaft und Wirtschaft sowie den Ökosystemen aller Kontinente und der Ozeane zu beobachten (IPCC 2014). Die Veränderungen können durchaus Chancen für einige Regionen bieten, die z. B. günstigere landwirtschaftliche Anbaubedingungen vorfinden. Überwiegend stellen die sich ändernden klimatischen Randbedingungen jedoch Probleme und Gefahren dar, z. B. durch vermehrte Dürren und Hochwasser (BATES et al. 2008). Witterungsbedingte Extremereignisse wirken sich besonders schwerwiegend aus und stehen daher politisch besonders im Fokus. So wurden in Mitteleuropa bereits negative Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft (Trockenheit, Erosion, Windbruch), das Wassermanagement (Konflikt zwischen Hochwasserschutz und Trinkwasserbereitstellung) und die menschliche Gesundheit festgestellt oder werden für die Zukunft befürchtet (REGKLAM-KONSORTIUM 2013, IMPAKT 2013).

Selbst wenn die Gesellschaft mit einer raschen und weitgehenden globalen Reduktion des Ausstoßes von klimaschädlichen Substanzen reagierte (was gegenwärtig nicht erkennbar ist), führte die Trägheit des Klimasystems zu einer noch Jahrzehnte andauernden Erwärmung (IPCC 2013). Das sogenannte 2-Ziel der globalen Erwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts stellt dabei eine optimistische Untergrenze dar. Daher gibt es in vielen Bereichen keine Alternative zur Anpassung an den Klimawandel. Aufgrund der ungeheuren Anstrengungen, die für eine optimale Anpassung nötig wären, ist eine Priorisierung nötig. Dazu wird die Vulnerabilität von Regionen bzw. sozio-ökonomischen und natürlichen Bereichen festgestellt (ADELPHI et al. 2015). Die Arbeiten hierzu basieren zu einem Großteil auf Modellrechnungen in einer Modellkaskade, die mit den Annahmen zur globalen Entwicklung und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen (SRES: IPCC SRES SPM 2000) bzw. mit dem damit verbundenen Strahlungsantrieb (RCP: Moss et al. 2010) beginnen. Am Ende der Kaskade stehen Wirkmodelle oder Entscheidungsmöglichkeiten, die als Grundlage plausible Zeitreihen verschiedener klimatischer Größen benötigen. Erstellt werden diese meist durch eine Abfolge von globalen und regionalen Klimamodellen (GCM, General Circulation Model und RCM, Regional Climate Model), die jedoch prinzipiell nicht in der Lage sind, eine exakte Projektion des zukünftigen Klimas bereitzustellen. Gründe hierfür sind Unsicherheiten in der globalen Entwicklung der Emissionen, die schwer zu fassende natürliche Variabilität des Klimas und die Unsicherheit in den Modellen selbst (BECKER et al. 2010). Gelingt es den Klimamodellen schon recht gut, das mittlere globale Verhalten der Temperatur wiederzugeben, so ist die Zuverlässigkeit bei Extremereignissen besonders des Niederschlags nicht zufriedenstellend (IPCC 2012).

Im 5. Fortschrittsbericht des IPCC (2013) werden die erwarteten Extreme für Europa benannt: hohe Temperaturen und Hitzeperioden, meteorologische Trockenheiten und Starkniederschläge. Es wird für Mitteleuropa von einer Zunahme von Starkniederschlägen im Winter ausgegangen, im Sommer sei diese Zunahme nur sehr schwach und räumlich inhomogen.

Studien der beobachteten Klimaentwicklung in Deutschland belegen Zunahmen von Starkniederschlägen im Winter, Frühling, Herbst und Abnahmen im Sommer (ZOLINA et al. 2008) sowie Zunahmen von Temperatur-extremen (DEUTSCHLÄNDER & DALELANE 2012). Betont werden starke regionale Unterschiede in der Ausprägung der Ereignisse. Der Osten Deutschlands wurde bei deutschlandweiten Untersuchungen aufgrund von Datenproblemen häufig unterrepräsentiert. Regionale Ergebnisse konnten für Sachsen und angrenzende Regionen in erster Linie mit Hilfe von Landesinitiativen (z. B. KLIMOSA 2008, Analyse Klimaentwicklung 2014), BMBF-Initiativen (z. B. REGKLAM 2013) bzw. EU-Projekten (z. B. INTERREG: NEYMO 2014, KLAPS 2014)

gewonnen werden. In den INTERREG-Projekten konnten an den östlichen Grenzen zu Sachsen die Fortsetzung der Veränderungen in den mittleren und extremen Klimabedingungen nachgewiesen werden (LUPIKASZA et al. 2001; LÜNICH et al. 2014; MEHLER et al. 2014).

Zahlreiche Studien analysieren die klimatischen Bedingungen und Änderungen im Freistaat Sachsen. Trends der Mittelwerte der Klimaelemente in Sachsen sowie erste Auswertungen zu Extremwerten des Niederschlags und der Temperatur in ihrem rezenten Änderungsverhalten (z. B. BERNHOFER et al. 2008; BERNHOFER et al. 2015) belegen, dass die Klimaänderungen in Sachsen in vielen Aspekten besonders ausgeprägt sind. Aufgrund der Lage in der Übergangszone zwischen maritim und kontinental geprägtem Klima sowie dem Einfluss der Mittelgebirge kommt es zu ausgeprägten Trockenereignissen in Sachsen bei gleichzeitig stark verändertem Starkniederschlagsverhalten. Die Ergebnisse weisen auf eine Umverteilung des Niederschlags und auf leichte Veränderungen der Intensität hin. Besondere Impaktrelevanz haben die Verschiebungen in den Vegetationsperioden (VP), wobei es in der VPI zu einer Abnahme der Niederschlagssumme und Zunahme von Trockenperioden kam und in VPII zu einer Zunahme der Niederschlagssumme bei gleichzeitiger Zunahme von Trockenperioden und Starkregen. Die regionalen Ausprägungen können jahreszeitlich sehr verschieden sein. Auch die mittleren und extremen Temperaturindizes weisen überwiegend ansteigende Trends auf, wie z. B. Zunahme von Hitzewellen (BERNHOFER et al. 2015).

WEREX V ist der aktuelle, speziell für Sachsen und dessen unmittelbare Umgebung (Teile von Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Bayern) aufbereitete Klimadatensatz für das 21. Jahrhundert, der ein Ensemble aus verschiedenen SRES-Szenarios, globalen und regionalen Klimamodellen darstellt (KREIENKAMP et al. 2011). Die GCM und RCM wurden in einem letzten Schritt durchweg statistisch-dynamisch auf Stationsdaten abgebildet. Dadurch besitzt dieser Datensatz eine hohe methodische Konsistenz und eignet sich grundsätzlich zur Abschätzung zukünftiger extremer Witterungsereignisse.

Die Klimaprojektionen des WEREX V-Datensatzes kommen zu konsistenten Ergebnissen bezüglich der Temperaturen und ihrer Extreme (BERNHOFER et al. 2013). Erste Analysen bezüglich des Niederschlags haben ergeben, dass insbesondere für Jahreswerte die Trendrichtung nicht gesichert ist. Die Tendenzen zeigen in Richtung trockenere Sommer und feuchtere Winter. Die großen Bandbreiten insbesondere von projizierten extremen Niederschlagsindizes des WEREX V-Datensatzes erschweren klare Trendaussagen (BERNHOFER et al. 2013). In vielen Studien wurden Dämpfungseffekte bei Starkniederschlägen und/oder räumliche Ungenauigkeiten festgestellt. Diese Dämpfungen treten sowohl bei den GCM (Grund: räumliche Mittelung mit sehr großer Gitterweite) als auch beim statistisch-dynamischen Downscaling (Grund: statistische Glättung) und beim dynamischen Downscaling (Grund: räumliche Mittelung mit großer Gitterweite) auf (FRANKE 2009). Systematische Untersuchungen zur Qualität von Projektionsdaten, insbesondere von Extremen, sind notwendig, um potenziellen Impakt-Modellierern zuverlässige Klimadaten an die Hand zu geben.

## 2 Vorgehensweise

Das vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie beauftragte und von der Technischen Universität Dresden (TUD), Lehrstuhl Meteorologie, durchgeführte Projekt wurde in zwei Phasen durchgeführt.

Ziel der **Phase I** war es, die Leistungsfähigkeit des WEREX V-Datensatzes zur Abbildung von witterungsbedingten Extremen in ihrer zeitlichen Entwicklung und Ausprägung zu analysieren. Nach einer Analyse der Datensituation wurden die zu untersuchenden Stationen festgelegt. Für jede der 120 Klimaprojektionen wurden definierte Niederschlags-, Temperatur und Dürreindizes analysiert und objektiv bewertet. Somit ist eine Einschätzung des gesamten WEREX V-Ensembles und der einzelnen GCM-RCM-Antriebe möglich. Eine gezielte Nutzung der am besten performierenden Projektionen für bestimmte Fragestellungen ist möglich.

In Abhängigkeit von den in Phase I erzielten Ergebnissen wurde das Vorgehen in **Phase II** zwischen den Projektbeteiligten (AG und AN) abgestimmt. Es wurde festgelegt, dass zum einen die Klimasignale für ausgewählte Extremindizes in der Zukunft analysiert werden (Kap. 5). Zum anderen werden – weil Probleme in der Abbildung von Extremen in Phase I identifiziert wurden – Möglichkeiten der Korrektur von Projektionsdaten und zukünftige Wege für die Betrachtung von Klimaextremen aufgezeigt. Letzteres ist nicht Bestandteil dieses Berichts.

## 3 Verwendete Datenbasis

Die Analyse bezieht sich auf Tageswerte der Periode 1961–2000. Beobachtete Zeitreihen von Klima- und Niederschlagsstationen wurden über REKIS bezogen ([www.rekis-org](http://www.rekis-org)). Datenquelle ist der deutsche und tschechische Wetterdienst (DWD, CHMI). Im Folgenden wird die Bezeichnung **OBS** für beobachtete Zeitreihen (gemessene Werte) verwendet.

Das WEREX V-Ensemble wurde durch die Firma CEC Potsdam erstellt und besteht aus 12 Klimaprojektionen (Tabelle 1; LFULG 2011). Diese beinhalten verschiedene Globalmodelle (GCM), verschiedene Methodenkombinationen von dynamischem Downscaling mit dynamischen Regionalen Klimamodellen (RCM), empirisch-statistischem Downscaling (ESD) und einer Kombination aus beidem. Sie beziehen sich auf die Emissionsszenarios A1B und E1 (Basisszenario für das 2 K-Ziel, 450 ppm atm. [CO<sub>2</sub>]) und auf verschiedene Modellläufe (L1–L3). Zu jedem Datensatz bzw. Modelllauf existieren 10 Realisierungen, sodass insgesamt 120 Realisierungen zur Verfügung stehen.

**Tabelle 1: Übersicht des WEREX V-Ensembles; Globalmodelle: ECHAM5 (MPI Hamburg, Deutschland), HadCM3C (Hadley Centre, Großbritannien, mit Kohlenstoffkreislauf), HadGEM2 (Hadley Centre, Großbritannien, mit Landnutzung); dynamische Regionalmodelle: CCLM (Community Modell, Deutschland), REMO (MPI Hamburg, Deutschland), RACMO (KNMI, Wetterdienst, Niederlande)**

| Nr. | Globalmodell | Regionalmodell | Szenario | Lauf | Bezeichnung      | AnzStats |
|-----|--------------|----------------|----------|------|------------------|----------|
| 1   | ECHAM5       | –              | A1B      | 1    | EH5_L1_A1B       |          |
| 2   | ECHAM5       | CCLM           | A1B      | 1    | EH5-L1_A1B_CLM   |          |
| 3   | ECHAM5C      | –              | E1       | 1    | EH5_L1_E1        |          |
| 4   | ECHAM5       | –              | A1B      | 2    | EH5_L2_A1B       |          |
| 5   | ECHAM5       | CCLM           | A1B      | 2    | EH5_L2_CLM       |          |
| 6   | ECHAM5       | –              | A1B      | 3    | EH5_L3_A1B       |          |
| 7   | ECHAM5       | RACMO          | A1B      | 3    | EH5_L3_A1B_RACMO |          |
| 8   | ECHAM5       | REMO           | A1B      | 3    | EH5_L3_A1B_REMO  |          |
| 9   | HadCM3C      | –              | A1B      | 1    | HC3C_L1_A1B      |          |
| 10  | HadCM3C      | –              | E1       | 1    | HC3C_L1_E1       |          |
| 11  | HadGEM2      | –              | A1B      | 1    | HCG2_L1_A1B      |          |
| 12  | HadGEM2      | –              | E1       | 1    | HCG2_L1_E1       |          |

Von den 12 Antrieben des WEREX V-Ensembles können für die Analyse der Periode 1961–2000 diejenigen zusammengefasst werden, die sich hinsichtlich SRES unterscheiden. Es können z. B. EH5\_L1\_A1B und EH5\_L1\_E1 gemeinsam betrachtet werden, weil erst ab 2001 die Szenarien zur Treibhausgasemissionen verwendet werden. Vorher werden gemessene Treibhausgaskonzentrationen für die Simulation verwendet. Die Unterschiede zwischen beiden Globalantrieben EH5\_L1\_A1B und EH5\_L1\_E1 im Zeitraum 1961–2000 sind rein zufälliger Natur und werden daher gemeinsam betrachtet. Final werden somit die WEREX V-Realisierungen von neun GCM/RCM Antrieben untersucht. Weil es sich bei den Simulationen um den Kontrolllauf für das 20. Jahrhundert handelt, hat sich die Bezeichnung **C20** durchgesetzt, die auch hier verwendet wird.

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass das globale Modell ECHAM5 besonders häufig als Antrieb genutzt wird. Das Ensemble ist daher durch dieses Modell stark beeinflusst. Das ECHAM-Modell wird beim Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg betrieben, es gehört zu den am meisten verwendeten globalen Klimamodellen weltweit und insbesondere in Europa.

### Datenverfügbarkeit

Die A1B-Läufe beinhalten 469 Niederschlagsstationen und 61 Klimastationen, die E1-Läufe 554 Niederschlagsstationen und 62 Klimastationen. Eine gemeinsame Stationsliste über alle Projektionen umfasst 530 Stationen. Hierfür wurde die tatsächliche Datenverfügbarkeit im OBS-Datensatz geprüft. In Tabelle 2 ist die Anzahl an Stationen aufgelistet, die über weniger als 1/5/10/ und 20 % Fehlwerte verfügen.

**Tabelle 2: Anzahl an OBS-Stationen für verschiedene Niveaus an Fehlwerten. Grundlage ist die gemeinsame Stationsliste der C20-Simulationen (530 Stationen)**

| Fehlwerte | Niederschlag | Potenzielle Verdunstung | Maximumtemperatur | Minimumtemperatur |
|-----------|--------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| < 1 %     | 200          | 12                      | 19                | 19                |
| < 5 %     | 241          | 12                      | 23                | 23                |
| < 10 %    | 253          | 12                      | 24                | 24                |
| < 20 %    | 265          | 12                      | 28                | 28                |

Für die Entscheidung, welcher Prozentsatz an Fehlwerten zugelassen wird, wurde zwischen der absoluten Anzahl an Stationen, deren räumlicher Verteilung (Höhenlage und Naturräume) und dem Zugewinn an Stationen bei Zulassen von mehr Fehlwerten abgewägt. Es wurde sich für eine Datenverfügbarkeit von 99 % entschieden, um die statistischen Unsicherheiten, die mit zunehmendem Anteil an Fehlwerten steigen, zu minimieren. Die Datendichte wird für die Region als ausreichend erachtet, mit folgenden Ausnahmen: Das Erzgebirge ist nur mit dem Fichtelberg (der höchst gelegenen Station im Gebiet) vertreten, weshalb die Station Zinnwald-Georgenfeld als Ausnahme zugelassen wird (Datenverfügbarkeit 75 % für alle Elemente). Um die Verteilung der Stationen auf die naturräumlichen Einheiten in Sachsen zu verbessern, wurde weiterhin die Station Plauen ins Kollektiv aufgenommen (Datenverfügbarkeit 98,7 % für Niederschlag und Temperatur). Für die Station Jena-Sternwarte liegen zwar beobachtete Werte der Potenziellen Verdunstung vor, jedoch keine simulierten Werte. Obwohl mehr Stationen mit mittleren Temperaturen existieren, wurde der Einheitlichkeit halber die Anzahl auf die Stationen begrenzt, die über Minimum- und Maximumtemperatur verfügen. Die finale Stationsauswahl ist zahlenmäßig der Tabelle 3 zu entnehmen, sämtliche Metadaten der Stationen befinden sich im Anhang (Tabelle 29). Die räumliche Verteilung der ausgewählten Stationen ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Vergleich der Datensätze OBS und C20 erfolgt ohne Schalttage, weil es im C20-Datensatz keine gibt.

**Tabelle 3: Anzahl der Stationen, die für die Analyse des Extremwertverhaltens genutzt werden**

| Fehlwerte | Niederschlag | Potenzielle Verdunstung | Temperatur max | Temperatur mittel | Temperatur min |
|-----------|--------------|-------------------------|----------------|-------------------|----------------|
| < 1 %     | 199          | 12                      | 21             | 21                | 21             |

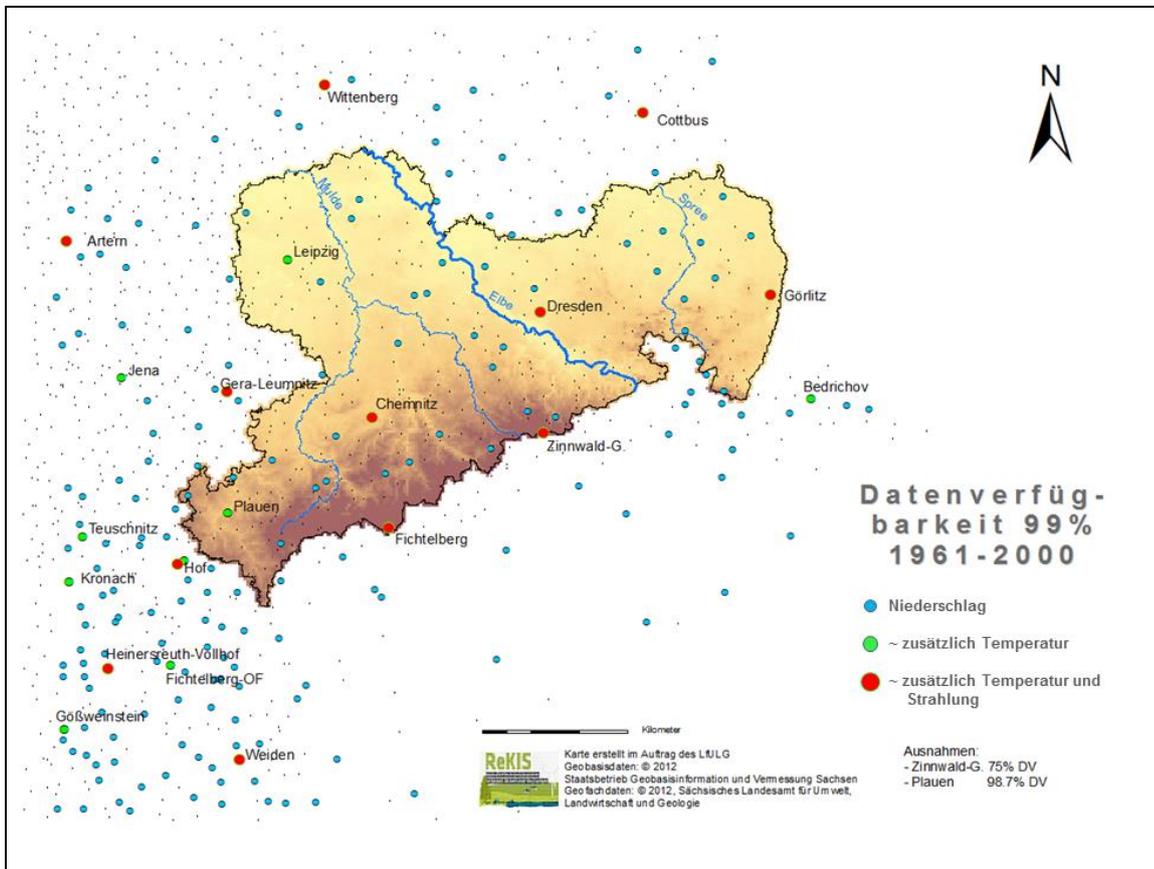


Abbildung 1: Stationen mit einer 99-prozentigen Datenverfügbarkeit (OBS)

# 4 Phase I: Güte der Abbildung von witterungsbedingten Extremen im sächsischen Klimadatensatz WEREX V

## 4.1 Methoden

Um eine größtmögliche Anwendbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, ist eine Auswahl an Extremindizes nötig, die für die Klimafolgenforschung relevant ist. Hierzu fand im März 2015 ein Workshop mit Personen statt, die WEREX- oder WETTREG-Daten für Impaktbetrachtungen verwendet haben (siehe Kap. 4.3.1).

Im Fachgespräch Wetterextreme (2011) wurden geeignete Methoden zur Extremwertanalyse (wie die Nutzung statistischer Eigenschaften der Verteilungen in Extremwertnähe) identifiziert. Wesentliche Aspekte dieses Fachgespräches wurden in der Studie „Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen“ (BERNHOFER et al. 2015) berücksichtigt. Um lokale Charakteristika objektiv zu berücksichtigen, wird die Analyse von Lufttemperatur (Max, Min) und Niederschlag mittels gestufter Perzentile auf der Basis beobachteter Tageswerte durchgeführt. Indizes mit festen Schwellenwerten (z. B. Frosttage) bzw. absoluten Extremen (z. B. maximaler 1-Tagesniederschlag) werden wegen ihrer Relevanz für auswirkungsbezogene Betrachtungen (Impaktrelevanz) vergleichend analysiert. Zusätzlich werden länger anhaltende Perioden von Dürre sowie Wärme und Kälte betrachtet.

Es werden die Höhe von Extremereignissen, die mittlere jährliche Anzahl der Überschreitungstage von Extremereignissen und der zeitliche Verlauf der Aufttrittshäufigkeit von Extremereignissen analysiert. Dazu werden perzentilbasierte Indizes, WMO-Indizes und regional übliche Ereignistage betrachtet.

Folgende Zeiträume werden analysiert: 1961–2000, die WMO-Referenzperiode 1961–1990 und die Dekaden 1961–1970 bis 1991–2000. Als Bezugszeiträume werden verwendet: Jahr, Vegetationsperioden I (Apr-Jun) und II (Jul-Sep) und die Jahreszeiten.

#### 4.1.1. Höhe der Extremereignisse

Die Höhe von Extremereignissen wird für Niederschlag und Temperatur mittels perzentilbasierten Indizes und anhand von Indizes mit festen Schwellenwerten analysiert. Als Zeitraum wird immer die Referenzperiode 1961–1990 zugrunde gelegt. Die Höhe der Extremereignisse wird für das Kalenderjahr, die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden ermittelt.

**Starkniederschlag R80p – Höhe:** Höhe des 80. Perzentils aller Niederschlagstage (Tage mit Niederschlag  $\geq$  1 mm) [mm]. Die Begriffe Höhe und Regenmenge werden synonym verwendet.

**Starkniederschlag R90p – Höhe:** Höhe des 90. Perzentils aller Niederschlagstage (Tage mit Niederschlag  $\geq$  1 mm) [mm]

**Starkniederschlag R95p – Höhe:** Höhe des 95. Perzentils aller Niederschlagstage (Tage mit Niederschlag  $\geq$  1 mm) [mm]

**Starkniederschlag R99p – Höhe:** Höhe des 99. Perzentils aller Niederschlagstage (Tage mit Niederschlag  $\geq$  1 mm) [mm]

**Maximaler Tagesniederschlag – Rx1day:** mittlerer jährlicher Maximalwert für die tägliche Niederschlags-summe [mm]

**Maximaler 5-Tagesniederschlag – Rx5day:** mittlerer jährlicher Maximalwert für Niederschlag, der an fünf aufeinanderfolgenden Tagen fällt [mm]

**Maximumtemperatur TX10 – Höhe:** Höhe des 10. Perzentils der Maximumtemperatur [°C]

**Maximumtemperatur TX90 – Höhe:** Höhe des 90. Perzentils der Maximumtemperatur [°C]

**Minimumtemperatur TN10 – Höhe:** Höhe des 10. Perzentils der Minimumtemperatur [°C]

**Minimumtemperatur TN90 – Höhe:** Höhe des 90. Perzentils der Minimumtemperatur [°C]

#### 4.1.2. Überschreitungstage der Extremereignisse

Die Überschreitungstage von Extremereignissen werden für Niederschlag und Temperatur mittels perzentilbasierten Indizes und anhand von Ereignistagen (festen Schwellenwerten) bestimmt. Es werden der Gesamtzeitraum 1961–2000 und die Dekaden von 1961–1970 bis 1991–2000 betrachtet. Für alle Zeiträume werden das Kalenderjahr, die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden analysiert. Die Anzahl der Über- und Unterschreitungstage wird für Jahre ermittelt und dann über den betrachteten Zeitraum (z. B. Dekade) gemittelt.

Alle Über- und Unterschreitungstage basieren auf den ermittelten Perzentilen der Referenzperiode 1961–1990 für das Kalenderjahr.

**Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage:** Tage, an denen die Starkniederschlagshöhe R80p erreicht oder überschritten wird ( $RK \geq$  Regenhöhe R80p) [d]

**Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage:** Tage, an denen die Starkniederschlagshöhe R90p erreicht oder überschritten wird ( $RK \geq$  Regenhöhe R90p) [d]

**Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage:** Tage, an denen die Starkniederschlagshöhe R95p erreicht oder überschritten wird ( $RK \geq$  Regenhöhe R95p) [d]

**Starkniederschlag R99p – Überschreitungstag:** Tage, an denen die Starkniederschlagshöhe R99p erreicht oder überschritten wird ( $RK \geq \text{Regenhöhe R99p}$ ) [d]

**Maximumtemperatur TX10 – Unterschreitungstag:** Tag, an dem die Höhe des 10. Perzentils der Maximumtemperatur nicht überschritten wird [d]

**Maximumtemperatur TX90 – Überschreitungstag:** Tag, an dem die Höhe des 90. Perzentils der Maximumtemperatur erreicht oder überschritten wird [d]

**Minimumtemperatur TN10 – Unterschreitungstag:** Tag, an dem die Höhe des 10. Perzentils der Minimumtemperatur nicht überschritten wird [d]

**Minimumtemperatur TN90 – Überschreitungstag:** Tag, an dem die Höhe des 90. Perzentils der Minimumtemperatur erreicht oder überschritten wird [d]

**Frosttage** (*FD eng: Number of frost days*): mittlere jährliche Anzahl der Tage, an denen die Minimumtemperatur  $0\text{ °C}$  unterschreitet [d]  $TN < 0\text{ °C}$

**Eistage** (*ID eng: Number of icing days*): mittlere jährliche Anzahl der Tage, an denen die Maximumtemperatur den Wert von  $0\text{ °C}$  nicht erreicht oder überschreitet [d]  $TX < 0\text{ °C}$

**Sommertage** (*SU eng: Number of summer days*): mittlere jährliche Anzahl der Tage, an denen die Maximumtemperatur  $25\text{ °C}$  überschreitet [d]  $TX > 25\text{ °C}$

**Heiße Tage:** mittlere jährliche Anzahl der Tage, an denen die Maximumtemperatur den Wert von  $30\text{ °C}$  überschreitet [d]  $TX > 30\text{ °C}$

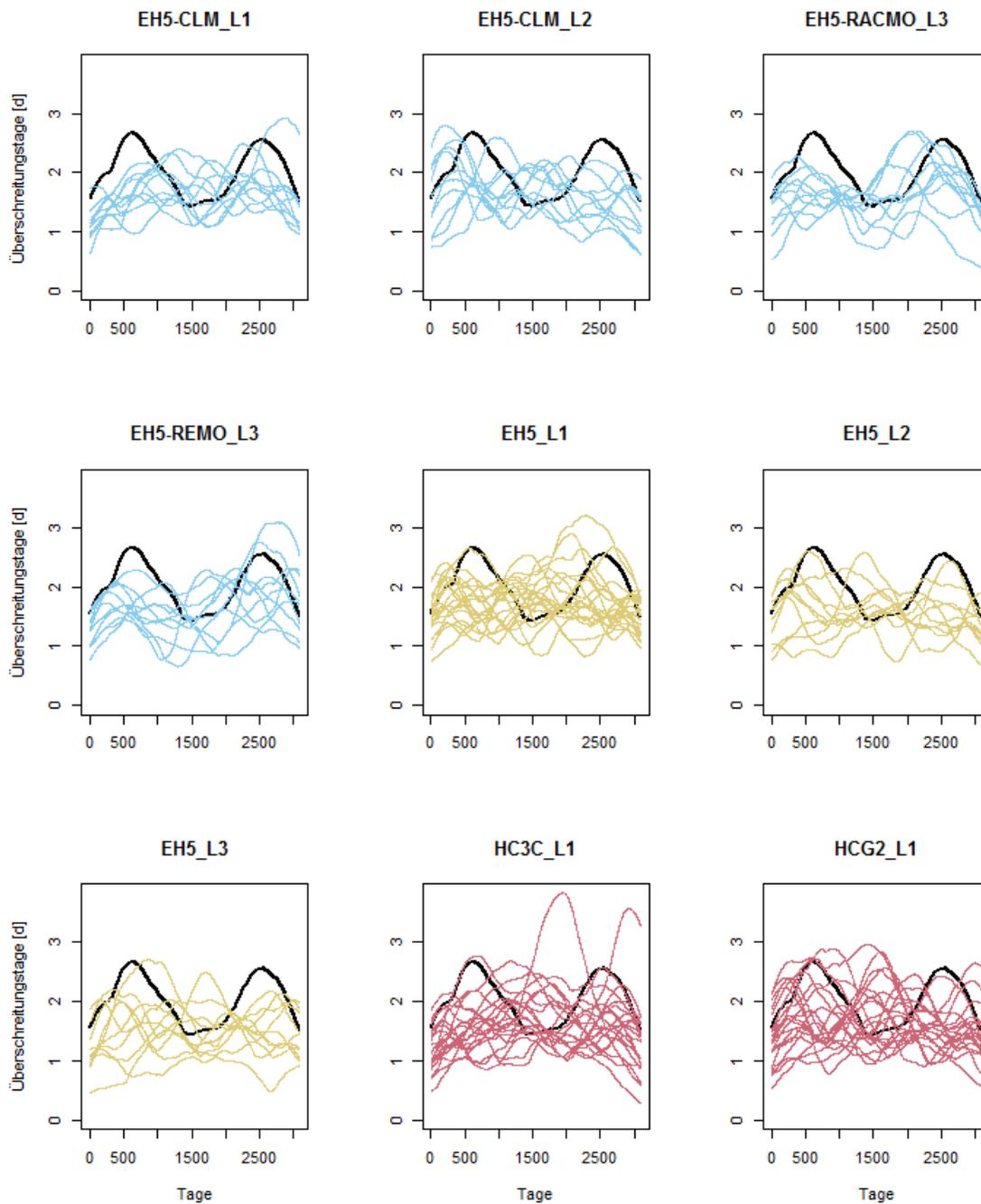
**Wärmeperiode – WSDI** (*eng: Warm spell duration index*), Index für die Dauer von Wärmeperioden: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen, an denen die Maximumtemperatur das 90. Perzentil des jeweiligen Tages überschreitet [d]

**Kälteperiode – CSDI** (*eng: Cold spell duration index*), Index für die Dauer von Kälteperioden: mittlere jährliche Anzahl der Tage mit mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen, an denen die Minimumtemperatur das 10. Perzentil des jeweiligen Tages unterschreitet [d]

#### 4.1.3. Zeitlicher Verlauf der Auftretshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen

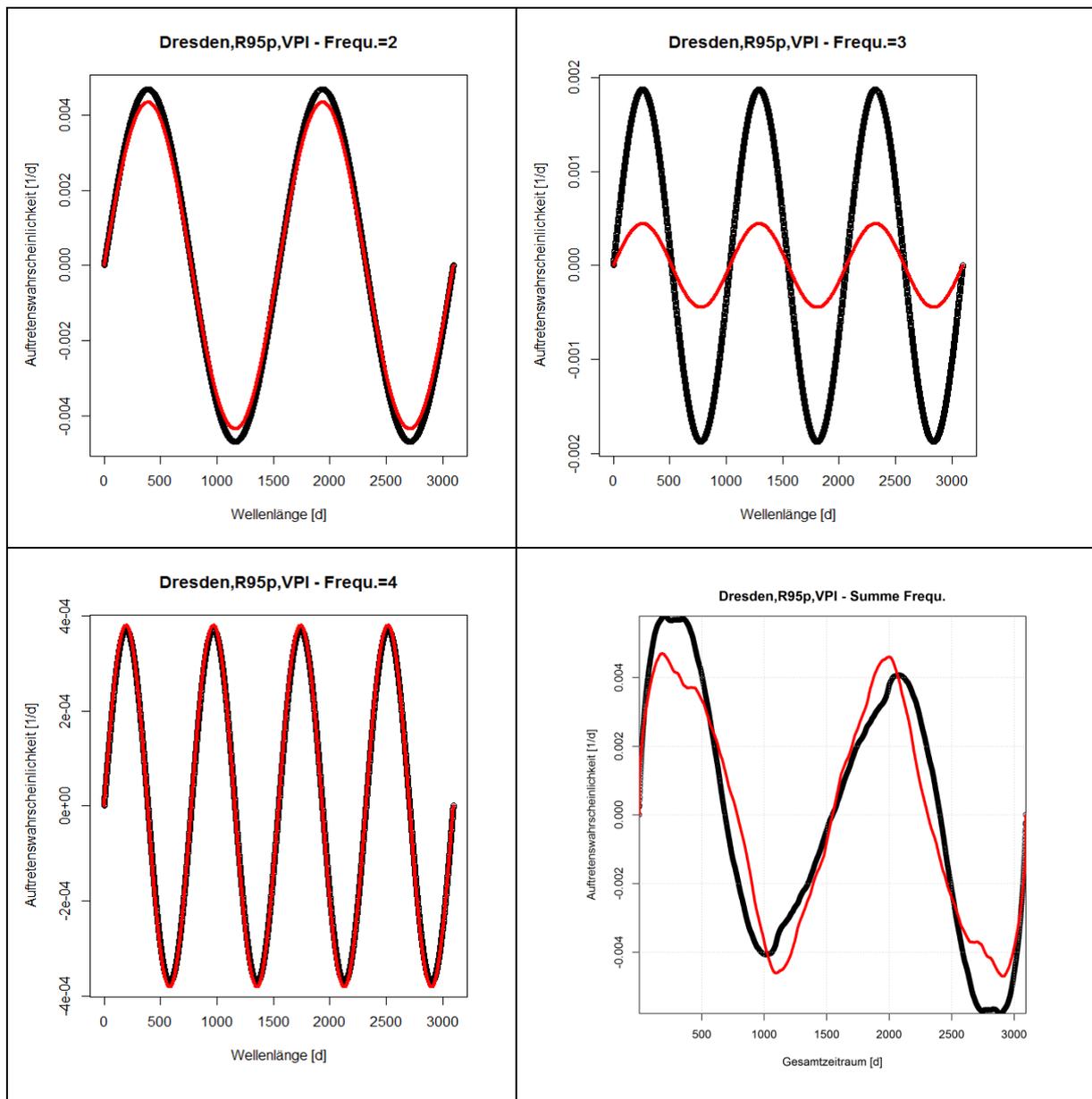
Die Auftretshäufigkeit eines Starkniederschlags wurde im zeitlichen Verlauf für 1961–2000 bestimmt. Grundlage sind die Überschreitungstage von Niederschlagsextremen. Diese werden mit Hilfe einer nicht parametrischen Kernschätzung geglättet (gewähltes Glättungsintervall 6 Jahre), wobei der zeitliche Verlauf als inhomogener Poisson-Prozess aufgefasst wurde. Aufgrund der Komplexität und des Umfangs der Methodik wird diese hier nicht dargestellt, sondern auf SCHALLER (2013) verwiesen. Diese Methodik wurde innerhalb der Projekte „Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen“ (BERNHOFER et al. 2015) und „Untersuchungen zur Erfassung und Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit“ (BERNHOFER et al. 2015a) angewendet: für die Starkniederschläge R80p, R90p, R95p und R99p wurden räumliche und zeitliche Veränderungen in Sachsen festgestellt. Dabei ist das Verhalten dieser vier Indizes prinzipiell hinsichtlich Menge, Intensität und Auftretshäufigkeit sehr ähnlich. Lediglich R99p weist ein teilweise abweichendes Verhalten auf. Besonders auffällig sind die Verminderung der Auftretshäufigkeit von Starkniederschlägen in der VPI, eine Erhöhung in VPII und zeitliche Schwankungen, die z. T. eine gewisse Periodizität erkennen lassen.

Die Analyse, ob der WEREX V-Datensatz in der Lage ist, die beobachtete zeitliche Variabilität von Starkniederschlägen abzubilden, erfolgt exemplarisch anhand des Starkniederschlags R95p für die Stationen Dresden und Fichtelberg. Die Daten müssen methodenbedingt (Glättungsintervall 6 Jahre) am Anfang und Ende der Reihe um 3 Jahre reduziert werden. Einen Eindruck des beobachteten und simulierten zeitlichen Schwankungsverhaltens gibt Abbildung 2. Zu erkennen ist, dass eine zeitliche Variabilität simuliert, aber die Anzahl der Überschreitungstage von Starkniederschlägen unterschätzt wird.



**Abbildung 2: Anzahl der Überschreitungstage für den Starkniederschlag R95p in der VPI der Periode 1961–2000. Dargestellt sind die beobachteten (schwarz) und mit verschiedenen Antrieben (farbig) simulierten und nachfolgend geglätteten Überschreitungstage (jeweils 10 Realisierungen; bei EH5\_L1, HC3C\_L1 und HCG2\_L1 20 Realisierungen).**

Der zeitliche Verlauf der simulierten Kurven kann nicht mit dem der beobachteten Kurve verglichen werden, weil die antreibenden GCM keine zeitliche Kongruenz auf der Skala von wenigen Jahren herstellen können, sondern nur eine klimatologische Kongruenz (mindestens 30 Jahre) aufweisen sollten.



**Abbildung 3: Darstellung der mittels der Diskreten Fouriertransformation separierten Kurven für drei Frequenzen und der Summe aller 1.544 Frequenzen der Station Dresden-Klotzsche (schwarz = OBS, rot = eine exemplarische C20 Simulation)**

Um die Abbildung der zeitlichen Schwankungen der Auftretshäufigkeiten<sup>1</sup> von Starkniederschlägen der WEREX-Läufe zu analysieren, wurden die Kurven einer Diskreten Fouriertransformation unterzogen (R-Package FFT). Jede Kurve lässt sich demnach als Summe von Kurven verschiedener Frequenzen und Amplituden beschreiben. Vor der Fourieranalyse ist ein eventuell in den Datenreihen vorhandener Trend zu entfernen. Die FFT-Analyse wird für die beobachteten und simulierten (und mit der Kernschätzung geglätteten) Auftretshäufigkeiten durchgeführt. Als Ergebnis erhält man für die verschiedenen Wellenlängen die berechneten beobachteten und simulierten Amplituden. Eine Wellenlänge von 3.128 Tagen entspricht, weil

<sup>1</sup> Die Bezeichnungen Auftretshäufigkeit und Auftretswahrscheinlichkeit werden synonym verwendet und meinen die mittels der Kernschätzung ermittelte Häufigkeit, mit der ein Starkniederschlag an diesem Tag auftritt. Die ebenfalls verwendete Bezeichnung Überschreitungstage ist eine abgeleitete Größe, die die Anzahl der Starkniederschlagstage in der jeweiligen Bezugsperiode (z. B. VPI) quantifiziert. Sie wurde eingeführt, um sich den Sachverhalt besser vorstellen zu können.

es der Gesamtzeitraum ist, einer Frequenz von 1. Exemplarisch ist in Abbildung 3 die beobachtete (schwarze Linie) und eine simulierte Kurve (rote Linie) für die Frequenzen 2, 3 und 4 sowie die Summe aller Frequenzen dargestellt. In diesem Beispiel wird die Frequenz 2 (d. h. zwei komplette Wellen passen in den Zeitraum) sehr gut vom Modell wiedergegeben, die Frequenz 3 jedoch nicht. Die Abbildung zur Summe aller Kurven (jede Frequenz mit ihrer spezifischen Amplitude) zeigt, dass die simulierte Kurve recht gut die beobachtete widerspiegelt. Die Bestimmung des Gütemaßes zur Quantifizierung der Übereinstimmung wird in Kapitel 4.1.5 erläutert.

#### 4.1.4. Dürreperioden

Die Begriffe Trockenheit, Trockenperiode und Dürre werden international unterschiedlich verwendet. In der (englischsprachigen) Literatur werden Dürren und Trockenperioden häufig synonym verwendet, zum Teil wird Dürre auch als fortschreitende bzw. lang andauernde Trockenheit definiert (z. B. BENDER & SCHALLER 2014). MARACCHI (2000) stellt beispielsweise fest, dass Agrarwissenschaftler das Wort Dürre zur Definition eines Wasserstresszustandes verwenden, der das Getreidewachstum und den -ertrag beeinträchtigt. Trockene Phasen kurzer Andauer werden für die Landwirtschaft nicht als Dürren, sondern als dry spell (Trockenheit) betrachtet (PEREIRA & PAULO 2004).

Im deutschen Sprachgebrauch wird der Dürrebegriff häufig eher auswirkungsbezogen (Auswirkungen der Dürre auf Gesellschaft, Ökonomie und Ökologie) verwendet, während Trockenperioden sich eher auf das bloße Auftreten eines im Vergleich zum Klimanormalen zu trockenen Zeitabschnittes beziehen.

In diesem Bericht werden auf Monatsbasis berechnete Indizes verwendet, die für Land-, Forst- und Wasserwirtschaft relevant sind. Um diesen Bezug zum Impact zu unterstreichen und eine Abgrenzung zu auf Tages- oder Wochenbasis basierenden Trockenindizes vorzunehmen, wird in diesem Bericht der Begriff Dürre verwendet. Nähere Ausführungen zu diesem Thema sind in BERNHOFER et al. (2015a) zu finden.

Beispielhaft wurden aus der Vielzahl von möglichen Dürreindizes der Standardisierte Niederschlagsindex **SPI** und der Standardisierte Niederschlags-Evaporations-Index **SPEI** analysiert.

- Der SPI ist eine aus dem kumulierten Niederschlag abgeleitete Größe mit der abgeschätzt werden kann, wie nass oder trocken ein Zeitabschnitt im Vergleich zu den durchschnittlichen Niederschlagsverhältnissen ist. Er basiert auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Niederschlags (MCKEE et al. 1993). Langzeitniederschlagsdatenreihen werden im ersten Schritt zu Monatsdaten aggregiert und nachfolgend gleitend gemittelt. Die Größe des Mittelungsfensters richtet sich nach dem Anwendungszweck. Für landwirtschaftliche Anwendungen werden zumeist die kurzen Zeitskalen von 3 bis 6 Monaten genutzt (VERGNI & TODISCO 2011). Für hydrologische Anwendungen werden eher SPI-Werte auf der Zeitskala von 12+ Monaten verwendet (GUTTMAN 1999). Die Reihe wird in Häufigkeiten umgewandelt, woran dann eine Verteilung (zumeist die Gamma-Verteilung) angepasst wird. Die Wahrscheinlichkeiten werden dann in eine standardisierte Reihe transformiert mit einem Mittelwert von Null und einer Standardabweichung von 1. Durch die Standardisierung des SPI können trockenere und nasse Klimate in gleicher Weise repräsentiert werden. Zudem sind die Häufigkeiten bestimmter Dürrezustände (Dürrekategorien siehe Tabelle 4) durch die Normalverteilung festgelegt und die Seltenheit eines Dürreereignisses kann zuverlässig bestimmt werden. Die 2,3 % der SPI-Werte in der Klasse „extrem trocken“ sind dann auch wirklich als extremes Ereignis anzusehen (WILHITE 1995). In den letzten Jahren wurde der SPI aufgrund seiner soliden theoretischen Entwicklung, Robustheit und Vielseitigkeit in Dürreanalysen zunehmend verwendet.
- Die Berechnung des SPEI basiert auf der Berechnungsmethodik des SPI. Anstelle des Niederschlags wird die Klimatische Wasserbilanz (Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration) ver-

wendet (VICENTE-SERRANO et al. 2010). Die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration erfolgt in dieser Arbeit mit dem Ansatz von TURC-WENDLING (ATV-DVWK 1996), der als Eingangsgrößen die Temperatur und die Globalstrahlung benötigt. Als geeignetste Verteilung für die Standardisierung hat sich die log-logistische herausgestellt. Für die Klassifizierung der Feuchtezustände wird das gleiche Schema wie für den SPI (Tabelle 4) verwendet. Durch die zusätzliche Einbeziehung einer bedeutenden dürrerelevanten Größe – der Verdunstung – wird dem wärmeinduziertem Trockenheitsstress Rechnung getragen

- Die Berechnung des SPI3, SPI12 und SPEI3, SPEI12 erfolgt mit dem R-Paket SPEI (<http://cran.r-project.org/web/packages/SPEI>).

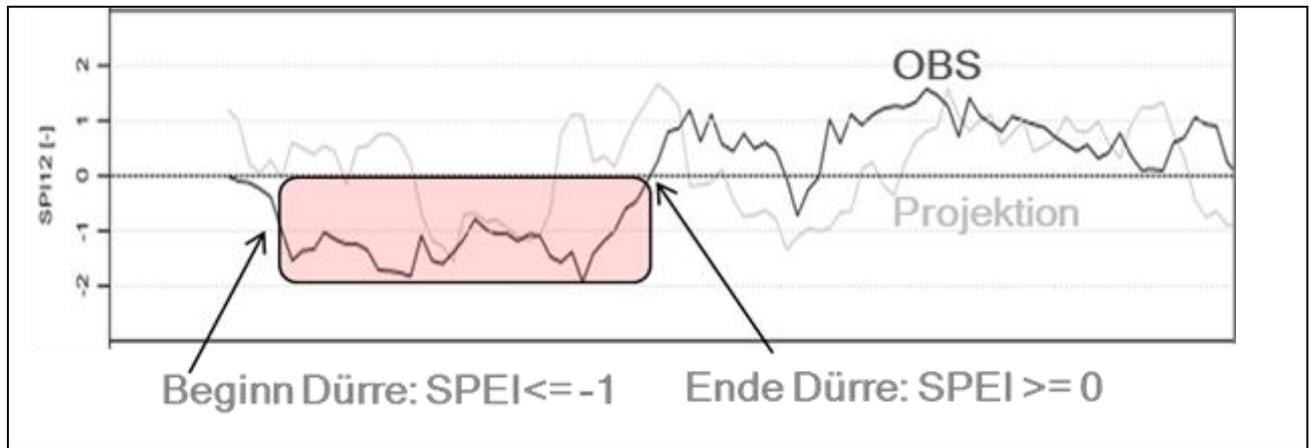
**Tabelle 4: Einteilung der SPI-Werte in Feuchtezustandskategorien (nach MCKEE et al. 1993; GUTTMAN 1999)**

| Index-Wert          | Feuchtezustandsbeschreibung | Häufigkeit |
|---------------------|-----------------------------|------------|
| SPI > 2             | Extrem nass                 | 2,3 %      |
| 1,99 > SPI > 1,50   | Sehr nass                   | 4,4 %      |
| 1,49 > SPI > 1,00   | Moderat nass                | 9,2 %      |
| 0,99 > SPI > 0      | Leicht nass                 | ≈ 34 %     |
| 0 > SPI > -0,99     | Leicht trocken              | ≈ 34 %     |
| -1,00 > SPI > -1,49 | Moderate Trockenheit        | 9,2 %      |
| -1,50 > SPI > -1,99 | Starke Trockenheit          | 4,4 %      |
| SPI < -2            | Extrem trocken              | 2,3 %      |

Ausgehend von den monatlichen Reihen des SPI bzw. SPEI erfolgt in Anlehnung an den Ansatz aus BERNHOFER et al. (2015a) die Berechnung folgender Dürrecharakteristika für OBS und die Projektionen (vgl. Abbildung 4):

- Beginn Dürreperiode: SPI bzw. SPEI  $\leq -1$
- Ende Dürreperiode: SPI bzw. SPEI:  $\geq 0$
- **Dürreandauer** = Ende – Beginn der Dürreperiode
- **Dürrestärke** = Summe(|SPI|) bzw. Summe(|SPEI|) während der Dürreandauer
- **Dürreschwere** = Dürrestärke/Dürreandauer

Die Dürreschwere ist ein normiertes Maß, das einen objektiven Vergleich von Dürreperioden unterschiedlicher Länge und Stärke ermöglicht.



**Abbildung 4: Definition von Dürreperioden am Beispiel des SPEI12**

Die auf diese Weise ermittelten Dürreperioden wurden für den Zeitraum 1961–2000 für verschiedene Andauerklassen analysiert:

- SPI3/ SPEI3: Andauerklassen 1-3, 4-6, 7-9, 10-12 Monate
- SPI12/ SPEI12: Andauerklassen 1-6, 7-12, 13-18, 19-24, 25-30, >31 Monate

Für jede dieser Andauerklassen wurden für OBS und alle Projektionen berechnet:

- Anzahl
- Mittlere Dürrestärke
- Mittlere Dürreschwere

Mittels der in Kapitel 4.1.5 vorgestellten Ranganalyse wird die Güte der WEREX V-Läufe als Mittel der Dürrecharakteristika Anzahl und Dürrestärke für jede Andauerklasse ermittelt. Die Dürreschwere (Quotient der zwei anderen Charakteristika) geht in die finale Bewertung nicht ein, um redundante Informationen zu vermeiden.

#### 4.1.5. Bestimmung der Güte der WEREX V-Läufe

Um die Güte der Abbildung von Extremwerten durch die WEREX V-Daten zu ermitteln, wurden für die Höhe der Temperaturperzentile die absoluten Abweichungen und für alle anderen Indizes die prozentualen Abweichungen der simulierten von den beobachteten Indexwerten (absolute Werte) ermittelt:

$$(|C20 - OBS|) / OBS * 100\%$$

Den Abweichungen wurden die in Tabelle 5 aufgelisteten Ränge zugewiesen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um nicht nur eine (eventuell zufällig) beste Realisierung weiter zu betrachten, sondern diejenigen Realisierungen zu betrachten, die in definierte Gütebereiche fallen.

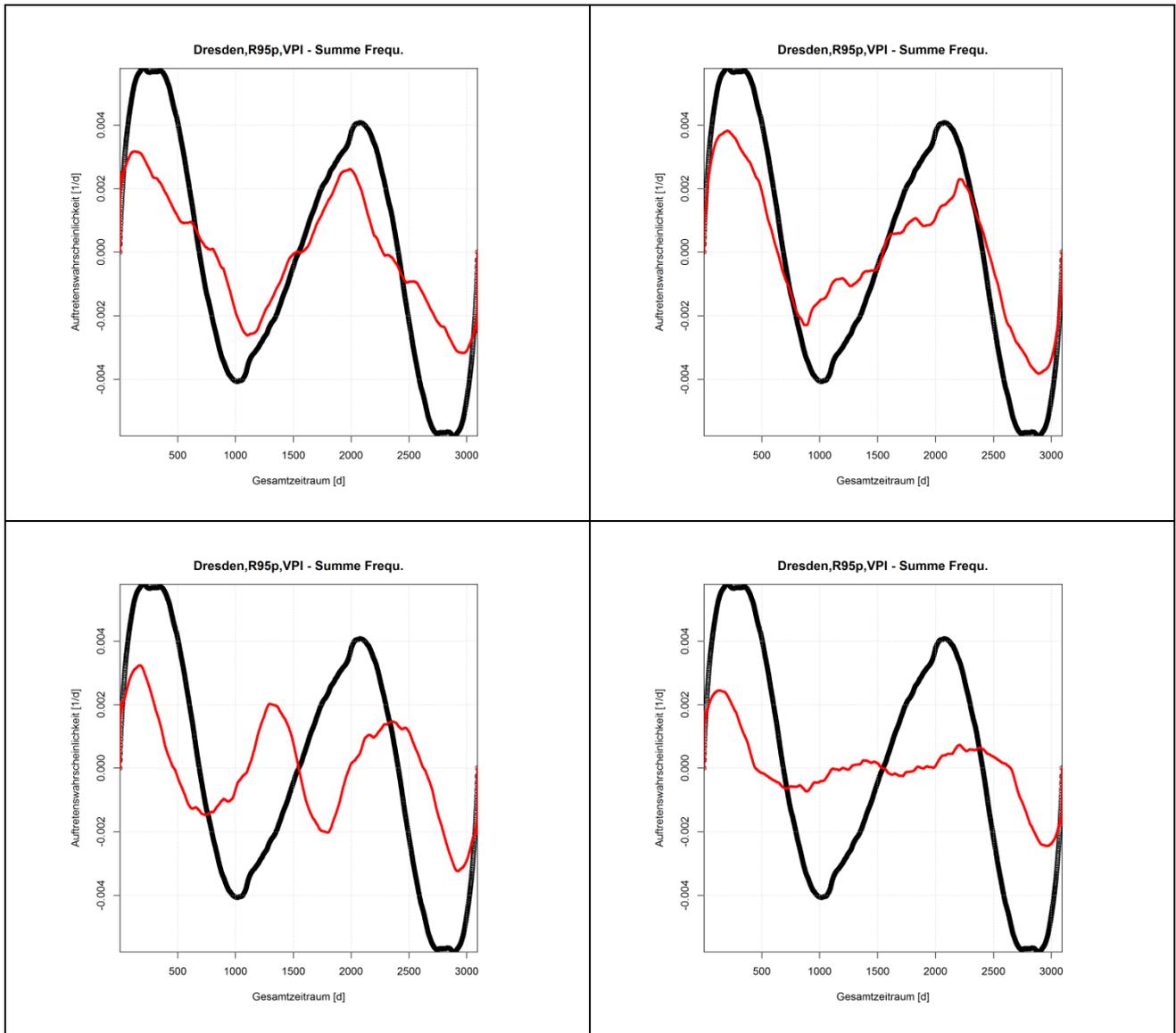
**Tabelle 5: Zuweisung von Rängen zu absoluten bzw. prozentualen Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Indizes**

| Absolute Abweichungen<br>(für Höhe der Temperaturperzentile) | prozentuale Abweichungen<br>(für alle anderen Indizes) | Rang | Kommentar            |
|--|--|------|----------------------|
| < 0.5 K  | < 10 %   | 1    | „Sehr gut“           |
| < 1.0 K  | < 20 %   | 2    | „Gut“                |
| < 1.5 K  | < 30 %   | 3    | „Befriedigend“       |
| ≥ 1.5 K  | ≥ 30 %   | 4    | „Nicht Befriedigend“ |

Die Güte der Wiedergabe der zeitlichen Variabilität der Starkniederschläge wird anhand des Fehlermaßes RMSE für die Summe aller Frequenzen ermittelt.

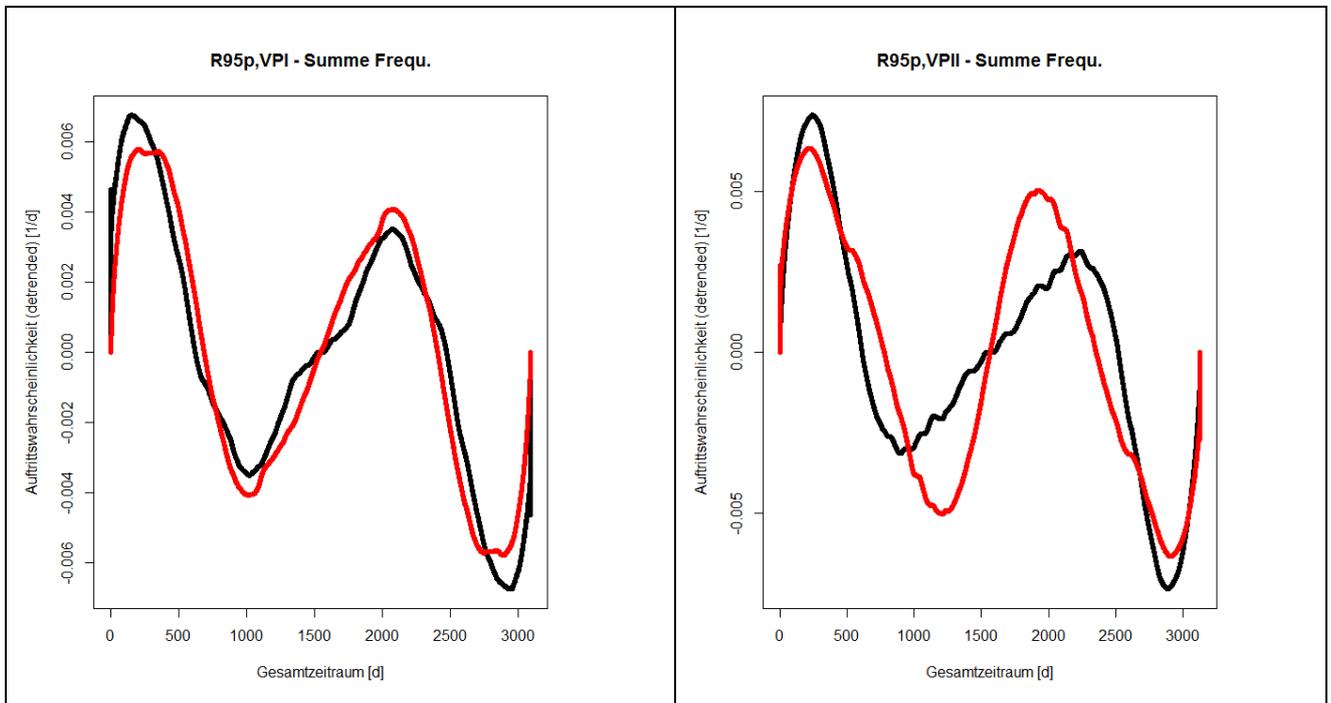
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\text{Anzahl}} \sum (obs - sim)^2}$$

Die Abbildung 5 verdeutlicht anhand 4 weiterer zufällig ausgewählter C20-Simulationen die stark schwankende Güte der Abbildung der Periodizität der WEREX V-Realisierungen. Eine wellenspezifische Analyse zur Amplitudenhöhe und Phase wird als unpassend erachtet, deshalb die Wahl des universellen Maßes RMSE.



**Abbildung 5: Ergebnisse der Fouriertransformation der Auftrittshäufigkeit vom Starkniederschlag R95p der Station Dresden in der Vegetationsperiode I für vier zufällig ausgewählte C20-Realisierungen (rot) im Vergleich zu OBS (schwarz)**

Die Entscheidung, welche Höhe des RMSE für gut bzw. nicht gut befunden wird, kann durch die natürliche Variabilität des zeitlichen Schwankungsverhaltens des Starkniederschlags definiert werden. Dazu wurden die Ergebnisse der Fouriertransformation der beobachteten Auftrittswahrscheinlichkeiten der Stationen Dresden und Fichtelberg miteinander verglichen (Abbildung 6). Weil erwartet wird, dass die Periodizität vom großskaligen Wettergeschehen bestimmt wird, sollten die zeitlichen Schwankungen innerhalb der Untersuchungsregion sehr ähnlich sein. Abweichungen zwischen den Kurven können demzufolge als natürliche Variabilität interpretiert werden. Der RMSE zwischen den Kurven beträgt  $0,001 \text{ d}^{-1}$  für VPI und  $0,0019 \text{ d}^{-1}$  für VPII. Diese Werte werden als Maß für die Qualität der Anpassung der simulierten Kurven an die beobachtete Kurve der Auftrittshäufigkeit verwendet. Ist der RMSE zwischen der beobachteten und einer simulierten Kurve kleiner als die „natürliche Variabilität“, so wird die Simulation als „gut“ eingestuft, andernfalls als „unbefriedigend“.

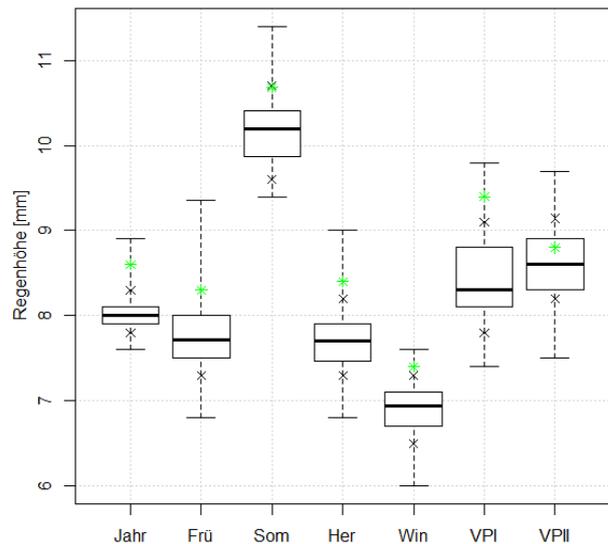
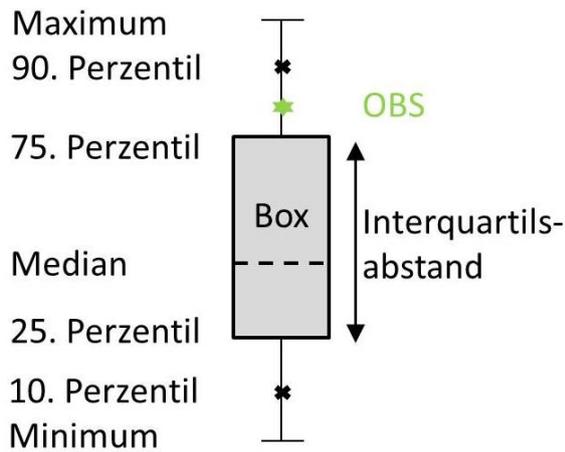


**Abbildung 6: Summe der einzelnen Frequenzen und dazugehörigen Amplituden (Ergebnis der FFT) für die beobachteten Auftrittswahrscheinlichkeiten der Stationen Dresden (rot) und Fichtelberg (schwarz). Links: Vegetationsperiode I, RMSE zwischen den Kurven = 0,001 1/d; rechts: Vegetationsperiode II, RMSE zwischen den Kurven = 0,0019 1/d**

#### 4.1.6. Ergebnisdarstellung und Interpretationsbeispiele

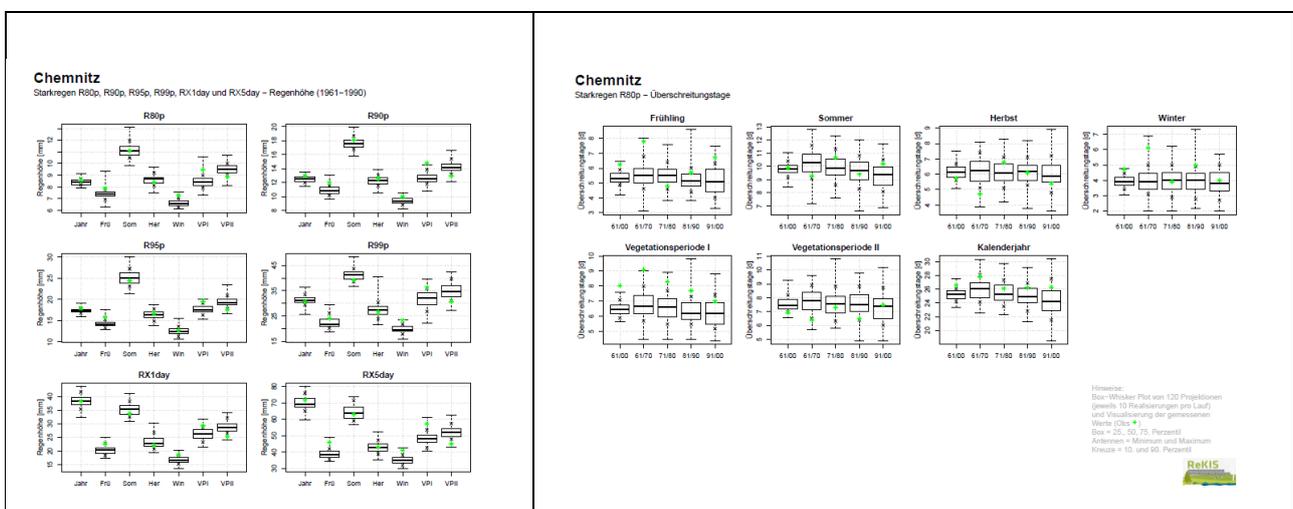
##### Darstellung für einzelne Stationen

Ein Großteil der Ergebnisse basiert auf Box-Whisker-Plots (Abbildung 7). Sie visualisieren die Ergebnisse der 120 WEREX V-Realisierungen hinsichtlich eines gewählten Index. Die Box enthält 50 % der Daten, konkret diejenigen zwischen dem 25. und dem 75. Perzentil, wobei der Median (50. Perzentil) zusätzlich mit einem waagerechten Strich gekennzeichnet ist. Die Lage des Medians in der Box gibt Auskunft über die Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung. Die Länge der Box wird als Interquartilsabstand (IQR = englisch: interquartile range) bezeichnet, der ein Maß für die Streuung der Daten ist. Mit schwarzen Kreuzen sind das 10. und das 90. Perzentil eingezeichnet. Die Enden der Antennen (Whisker) stellen den Minimal- und Maximalwert der 120 Werte dar. Mit einem grünen Stern wird der Index, der sich aus den beobachteten Daten ergibt, markiert. In Abbildung 7 ist ein Interpretationsbeispiel dargestellt. Für das Jahr unterschätzen mehr als 90 % der Projektionen den observierten Wert; die Abweichung beträgt im Median weniger als 1 mm.



**Abbildung 7: Links: Prinzipieller Aufbau des Box-Whisker-Plots; rechts: Beispiel zur Interpretation (Starkniederschlag R80p – Höhe, Dresden-Klotzsche, 1961–1990)**

Zusammengehörige Boxplots wurden stationsweise in Musterblättern angeordnet. Im Text werden exemplarisch die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (WEWA) aufgeführt, alle weiteren Stationen sind auf der DVD einsehbar. Die Musterblätter stellen fachlich zusammengehörige Indizes gemeinsam dar, ermöglichen demzufolge den Vergleich zwischen Indizes, die auf Perzentilen und auf festen Schwell- bzw. Maximalwerten basieren. Zwei Beispiele sind der Abbildung 8 zu entnehmen.



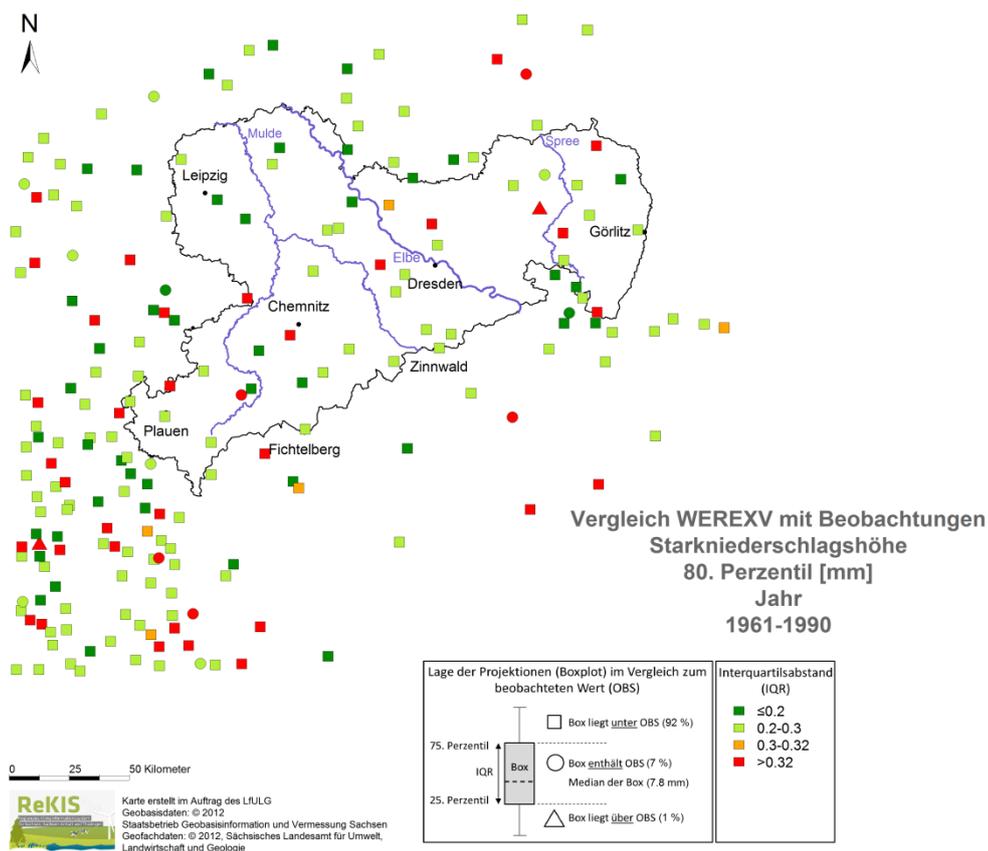
**Abbildung 8: Musterblätter für die Höhe und die Überschreitungstage von Starkniederschlägen**

### Flächenhafte Darstellung

Um von Aussagen an den exemplarischen Stationen zur flächenhaften Analyse der Abbildung von Extremen zu kommen, wurden von den Boxplots die Größe der Interquartilsabstände und die Lage der Box zum beobachteten Index weiterverarbeitet. Somit werden Aussagen möglich, ob ein bedeutender Teil (IQR = 50 %) der 120 Realisationen in der Lage ist, den OBS-Wert zu treffen bzw. unter- oder überschreitet. Das wird anhand der Symbole in der Karte (vgl. Abbildung 9) möglich: Ein Dreieck mit der Spitze nach oben kennzeichnet eine Überschreitung durch 50 % (Box) der WEREX V-Realisationen und ein Viereck eine Unterschreitung. Der

Kreis visualisiert, dass die Beobachtung innerhalb der Box liegt. In der Legende sind hinter den Symbolen prozentuale Angaben zu deren flächenhaftem Anteil vermerkt; eine schnelle quantitative Güteabschätzung ist damit möglich. Auch der flächenhafte Mittelwert des Medians ist angegeben, um die Größe des Interquartilsabstandes einordnen zu können. Exakte Aussagen sind nicht möglich, weil der Median an jeder Station nicht in der Karte vermerkt ist. Dieser kann den Musterabbildungen entnommen werden.

Mittels der Farben können Informationen zur Größe des IQR (Box) gewonnen werden. Grün steht für eine kleine Box, was als eine geringe Bandbreite zwischen den Realisierungen interpretiert werden kann (Simulationen zeigen ähnliche Ergebnisse). Rot verdeutlicht eine verhältnismäßig große Uneinheitlichkeit zwischen den Simulationen. Weitere Aussagen, die aus den Karten abgeleitet werden können, betreffen räumlich Strukturen (räumliche oder Höhen-Gradienten) der Güte der Simulationen. Aus dem Interpretationsbeispiel in Abbildung 9 können folgende Informationen gewonnen werden: An 92 % der Stationen liegt ein Großteil der Projektionen (75 %, entspricht dem IQR) unterhalb des beobachteten Wertes, d. h. die Projektionen unterschätzen die Starkniederschlagshöhe. An 7 % der Stationen wird der IQR getroffen, an 1 % der Stationen überschätzen die Projektionen. Der Median der Projektionen aller Stationen beträgt 7,8 mm. Dieser Wert dient zur Einordnung des IQR, der farblich dargestellt wird. Die Größe des IQR schwankt in diesem Fall ca. zwischen 0,1 und 0,4 mm. Dem visuellen Eindruck nach zu urteilen (Verteilung von Symbolen und Karten im Untersuchungsgebiet) liegen keine Höhen- und Lagegradienten in der Abbildungsgüte der Projektionen vor.



**Abbildung 9: Interpretationsbeispiel: Karte (Starkniederschlag R80p – Höhe)**

## 4.2 Ergebnisse

### 4.2.1 Starkniederschlag

Starkniederschlagsereignisse werden hinsichtlich der Höhe der Ereignisse, den Überschreitungstagen und dem zeitlichen Verlauf der Auftretshäufigkeit analysiert. Für ausgewählte Bezugszeiträume (Jahre, Vegetationsperioden) gibt es eine flächige Darstellung der Güte des WEREX V-Ensembles in Form einer Karte. Abschließend wird die Güte der neun verschiedenen WEREX V-Projektionen gegenüber dem observierten Wert bewertet.

#### Höhe der Starkniederschläge

Die Höhe von Starkniederschlagsereignissen wird perzentilbasiert für die Indizes R80p (Abbildung 10), R90p (Abbildung 11), R95p (Abbildung 12) und R99p (Abbildung 13) für die Referenzperiode 1961–1990 (Jahr) visualisiert. Die flächenhaften Darstellungen für die Vegetationsperioden sind dem Anhang zu entnehmen. Des Weiteren wird die Höhe des Maximalen Tagesniederschlags-RX1day (Abbildung 14) und des Maximalen 5-Tagesniederschlags RX5day (Abbildung 15) dargestellt. In Tabelle 6 werden die in den Karten aufgeführten prozentualen Anteile der Projektionen zusammengefasst, die im Vergleich zu den beobachteten Ereignistagen oberhalb, unterhalb bzw. innerhalb der Box (Interquartilsabstand der 120 Realisationen) liegen. Die Güte der neun WEREX V-Läufe ist Tabelle 7 zu entnehmen.

Die Höhe aller observierten Starkniederschlagsindizes unterliegt einem Jahresverlauf, mit einem Maximum im Sommer und einem Minimum im Winter. Dieser Verlauf wird von den WEREX V-Projektionen für die Stationen Dresden und Fichtelberg wiedergegeben. Die Höhe der Starkniederschläge wird für alle Perzentile in nahezu alle Bezugsperioden vom Großteil der 120 Realisationen unterschätzt. Der Maximale 1-Tagesniederschlag RX1day wird gut abgebildet, RX5day jedoch ebenfalls unterschätzt.

Die flächenhafte Analyse der Projektionen verdeutlicht, dass es sich mit der Unterschätzung um ein generelles Problem handelt. Lediglich bei R95p und R99p stimmten viele Simulationen recht gut mit der Beobachtung in VP II überein. Visuell konnten keine räumlichen Verteilungsmuster in Form einer lageabhängigen Unter- bzw. Überschätzung der Projektionen gegenüber den observierten Werten festgestellt werden. Des Weiteren konnten visuell keine Verteilungsmuster für die Größen der Box, also des IQR, gefunden werden. Der IQR ist für das Kalenderjahr kleiner als für die VPI und VP II, d. h. die Unterschiede zwischen den Projektionen bezüglich der Starkniederschlagsereignisse sind in den warmen Jahreszeiten größer. Der IQR ist für die größeren höher als für die niedrigeren Perzentile. Ebenso verhält es sich für RX1day und RX5day: je extremer die Niederschläge, desto größer ist die Unsicherheit bei den Modellen. Die Höhe von RX1day wird im Untersuchungsgebiet gut abgebildet und teils unterschätzt, RX5day wird größtenteils unterschätzt.

**Tabelle 6: Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Starkniederschlagsindizes für das Kalenderjahr und die Vegetationsperioden**

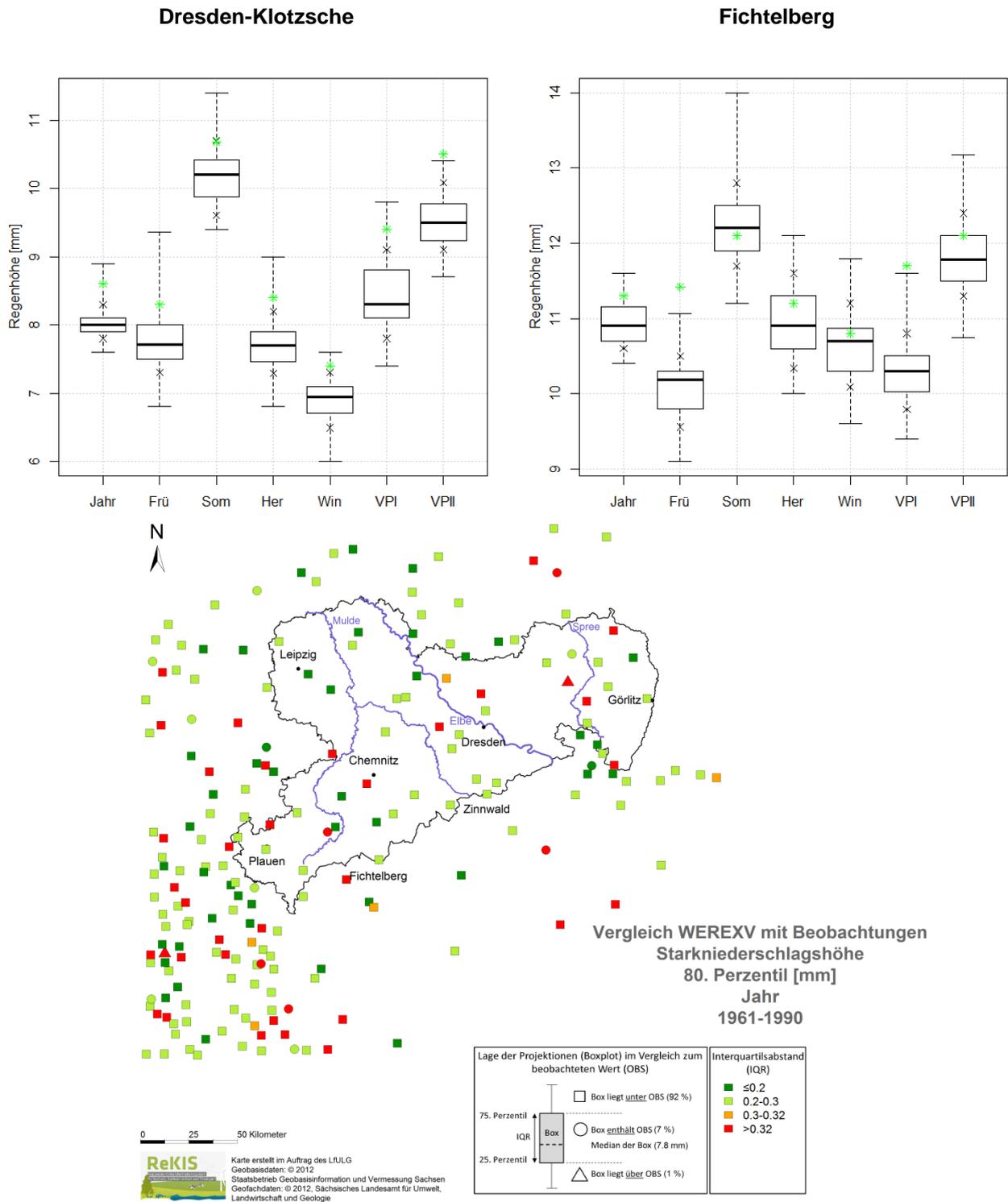
| Niederschlagsindizes | 50 % der Projektionen (IQR) im Vergleich zum beobachteten Wert (OBS) | Kalenderjahr [%] | VP I [%] | VP II [%] |
|----------------------|--|------------------|----------|-----------|
| R80p - Höhe          | unterschätzen  | 92               | 94       | 85        |
|                      | enthalten  | 7                | 5        | 11        |
|                      | überschätzen   | 1                | 0        | 3         |
| R90p - Höhe          | unterschätzen  | 95               | 96       | 85        |
|                      | enthalten  | 4                | 4        | 12        |
|                      | überschätzen   | 1                | 0        | 2         |

| Niederschlagsindizes | 50 % der Projektionen (IQR) im Vergleich zum beobachteten Wert (OBS) | Kalenderjahr [%] | VP I [%]  | VP II [%] |
|----------------------|--|------------------|-----------|-----------|
| R95p - Höhe          | unterschätzen  | <b>94</b>        | <b>96</b> | <b>76</b> |
|                      | enthalten  | 6                | 3         | <b>21</b> |
|                      | überschätzen   | 0                | 0         | 3         |
| R99p - Höhe          | unterschätzen  | <b>81</b>        | <b>72</b> | 45        |
|                      | enthalten  | 17               | 26        | <b>46</b> |
|                      | überschätzen   | 1                | 2         | 9         |
| RX1day - Höhe        | unterschätzen  | 40               | -         | -         |
|                      | enthalten  | <b>47</b>        | -         | -         |
|                      | überschätzen   | 13               | -         | -         |
| RX5day - Höhe        | unterschätzen  | <b>69</b>        | -         | -         |
|                      | enthalten  | 28               | -         | -         |
|                      | überschätzen   | 3                | -         | -         |

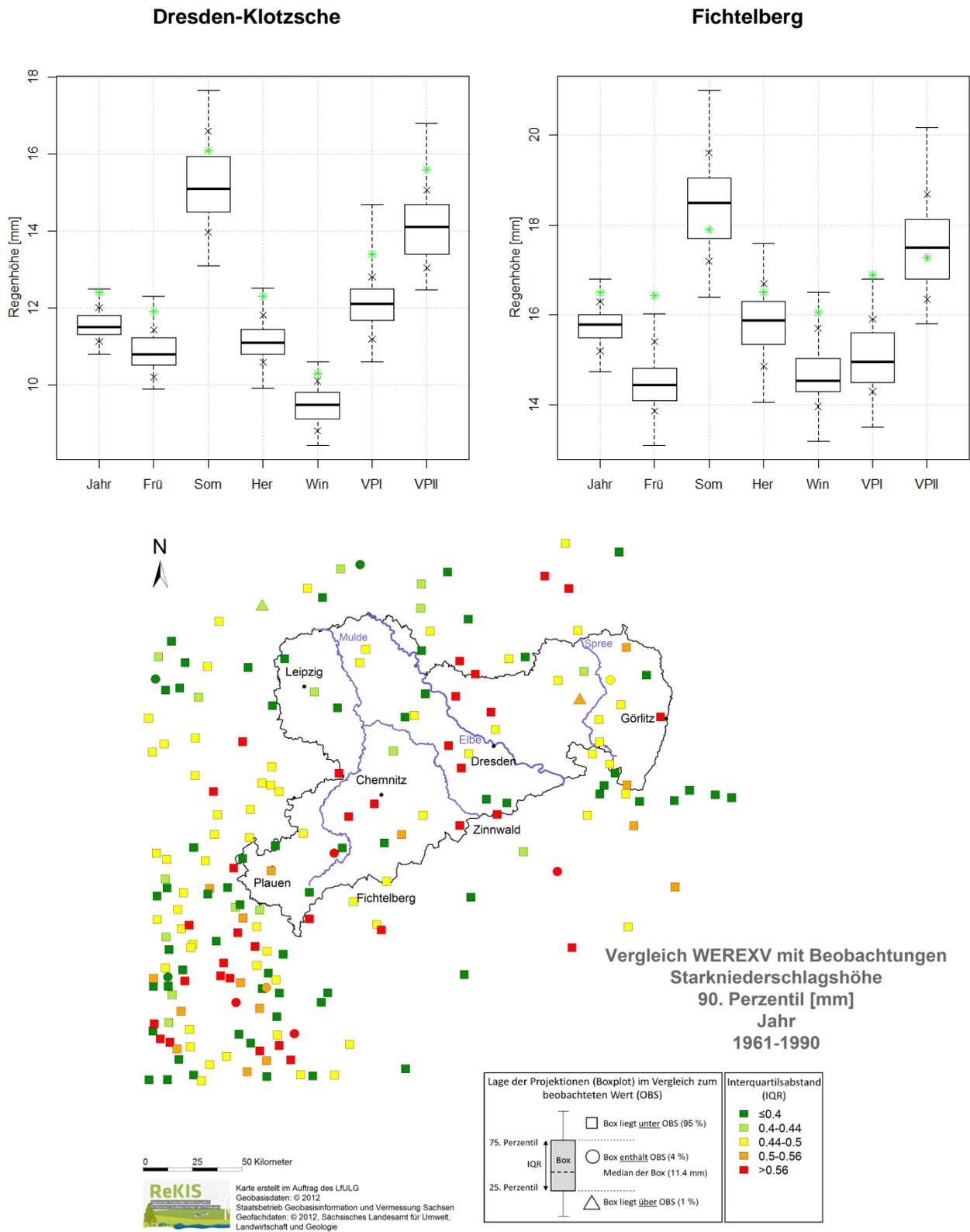
Wie relevant die gefundenen Abweichungen von OBS sind und welche WEREX V-Antriebe im Mittel am besten die Starkniederschlagshöhe wiedergeben, ist Tabelle 7 zu entnehmen. Als Ergebnis der in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Ranganalyse ist zu konstatieren, dass die WEREX V-Läufe, die einen GCM-RCM Input haben (CLM, RACMO und REMO), und das Modell HCG2\_L1 „sehr gut“ bis „gut“ in der Lage sind, die Niederschlagshöhen wiederzugeben. Die mittleren Abweichungen der Realisierungen eines Antriebs der fünf besten Antriebe sind am kleinsten für die VP II (12–14 %) und am größten für die VPI (16–19 %). Beispielhaft würde das für Dresden bedeuten: Der beobachtete Starkniederschlag R99p beträgt im Jahr 30 mm und wird von den besten Antrieben mit ca. 26 mm beziffert. Wie relevant diese Abweichungen sind, ist stark vom Impakt abhängig. Für die Stadtentwässerung hätte ein Mehr an 4 mm vermutlich gravierendere Auswirkungen als für die Talsperrenbewirtschaftung. Wurden aus der flächenhaften Analyse für RX5day meist Unterschätzungen berechnet, so zeigt die Ranganalyse, dass Abweichungen mit 11–13 % noch sehr begrenzt sind und die Modelle demzufolge gut performieren.

**Tabelle 7: Güte der WEREX V-Antriebe bezüglich der Wiedergabe der Starkniederschlagshöhe. Die grau hinterlegten Felder geben die jeweils zwei besten mittleren Ränge an.**

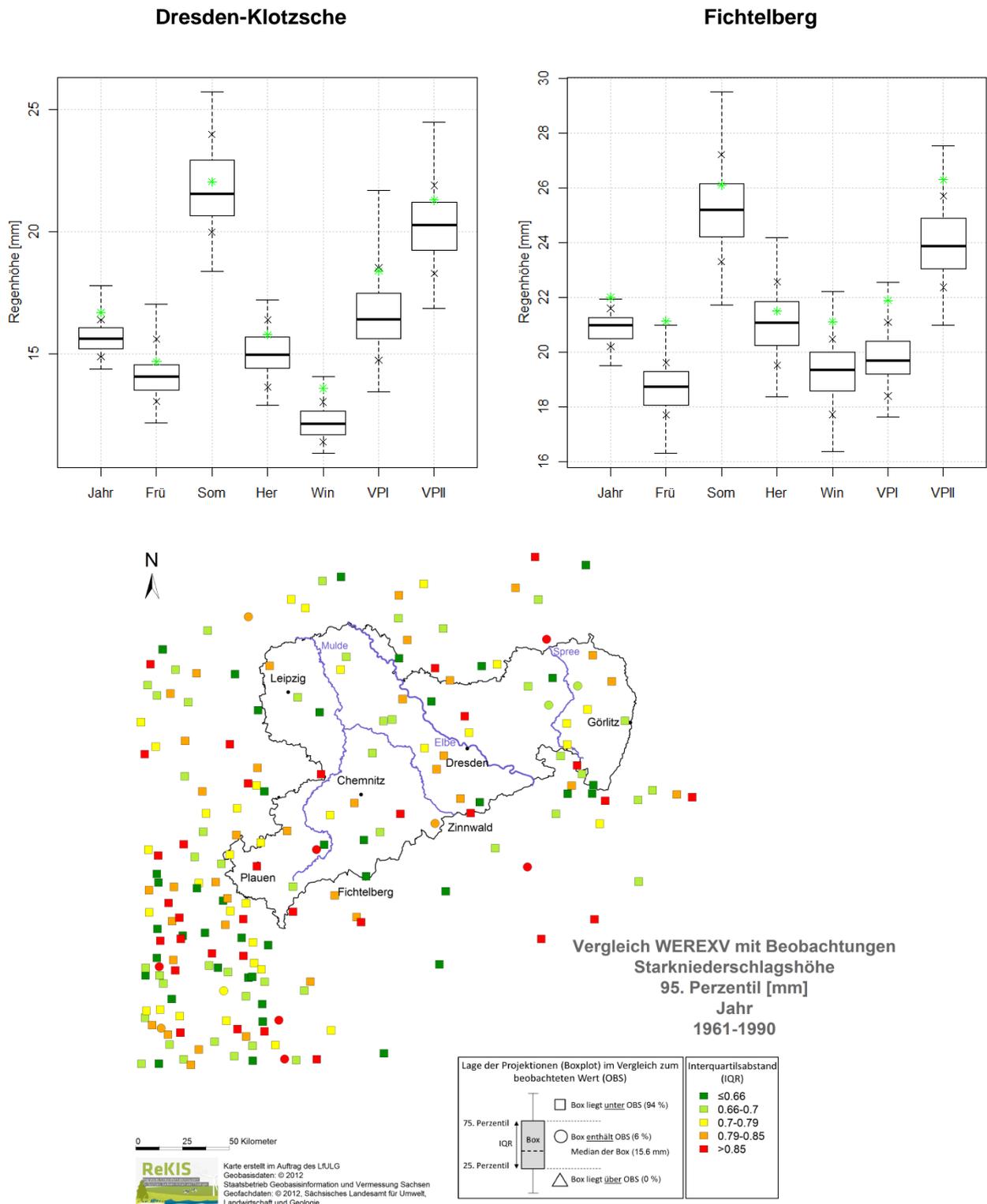
| WEREX V-Lauf | R80p Jahr | R80p VP I | R80p VP II | R90p Jahr | R90p VP I | R90p VP II | R95p Jahr | R95p VP I | R95p VP II | R99p Jahr | R99p VP I | R99p VP II | RX1 Jahr | RX5d Jahr |
|--------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|
| EH5_L1       | 1,6       | 2,0       | 1,4        | 1,6       | 2,1       | 1,3        | 1,6       | 2,0       | 1,2        | 1,3       | 1,7       | 1,3        | 1,1      | 1,1       |
| EH5_L2       | 1,6       | 2,0       | 1,4        | 1,7       | 2,2       | 1,3        | 1,7       | 2,2       | 1,2        | 1,3       | 1,9       | 1,4        | 1,1      | 1,1       |
| EH5_L3       | 1,7       | 2,1       | 1,4        | 1,7       | 2,3       | 1,4        | 1,8       | 2,3       | 1,3        | 1,4       | 1,9       | 1,3        | 1,1      | 1,2       |
| EH5.CLM_L1   | 1,3       | 1,8       | 1,2        | 1,4       | 1,8       | 1,2        | 1,4       | 1,8       | 1,2        | 1,3       | 1,7       | 1,3        | 1,2      | 1,2       |
| EH5.CLM_L2   | 1,5       | 1,8       | 1,3        | 1,4       | 1,8       | 1,2        | 1,4       | 1,7       | 1,2        | 1,3       | 1,6       | 1,4        | 1,2      | 1,2       |
| EH5.RACMO_L3 | 1,4       | 1,8       | 1,3        | 1,3       | 1,8       | 1,3        | 1,3       | 1,8       | 1,2        | 1,2       | 1,6       | 1,3        | 1,2      | 1,1       |
| EH5.REMO_L3  | 1,4       | 1,9       | 1,3        | 1,4       | 2,0       | 1,2        | 1,4       | 2,0       | 1,2        | 1,3       | 1,9       | 1,3        | 1,3      | 1,3       |
| HC3C_L1      | 1,5       | 2,0       | 1,2        | 1,5       | 2,1       | 1,2        | 1,5       | 2,0       | 1,1        | 1,3       | 1,7       | 1,3        | 1,2      | 1,2       |
| HCG2_L1      | 1,5       | 1,9       | 1,2        | 1,5       | 1,9       | 1,2        | 1,4       | 1,8       | 1,1        | 1,2       | 1,5       | 1,3        | 1,2      | 1,2       |



**Abbildung 10: Starkniederschlag R80p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten)**



**Abbildung 11: Starkniederschlag R90p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten)**



**Abbildung 12: Starkniederschlag R95p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten)**

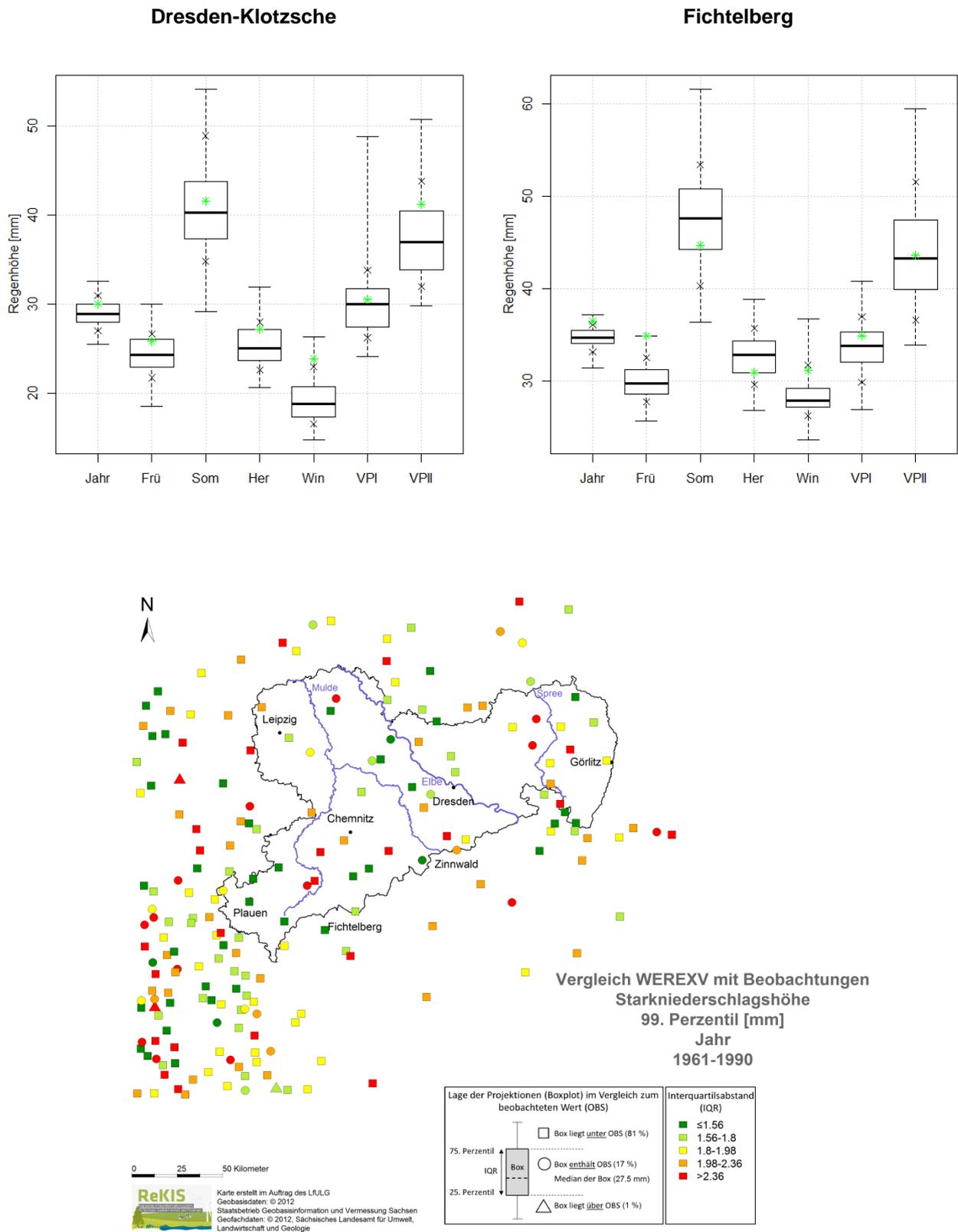
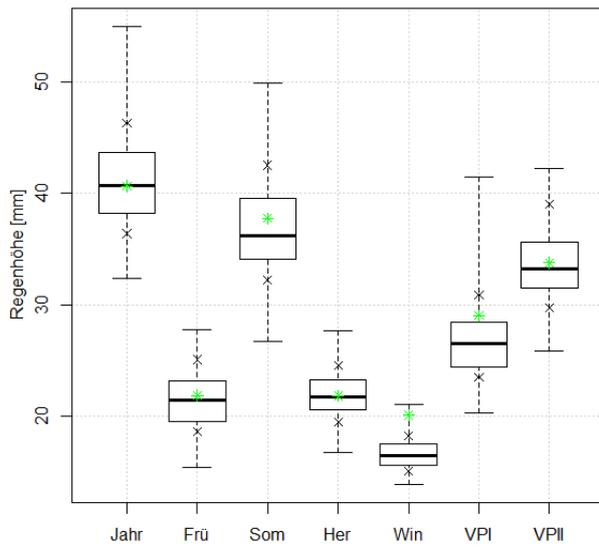


Abbildung 13: Starkniederschlag R99p – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten)

### Dresden-Klotzsche



### Fichtelberg

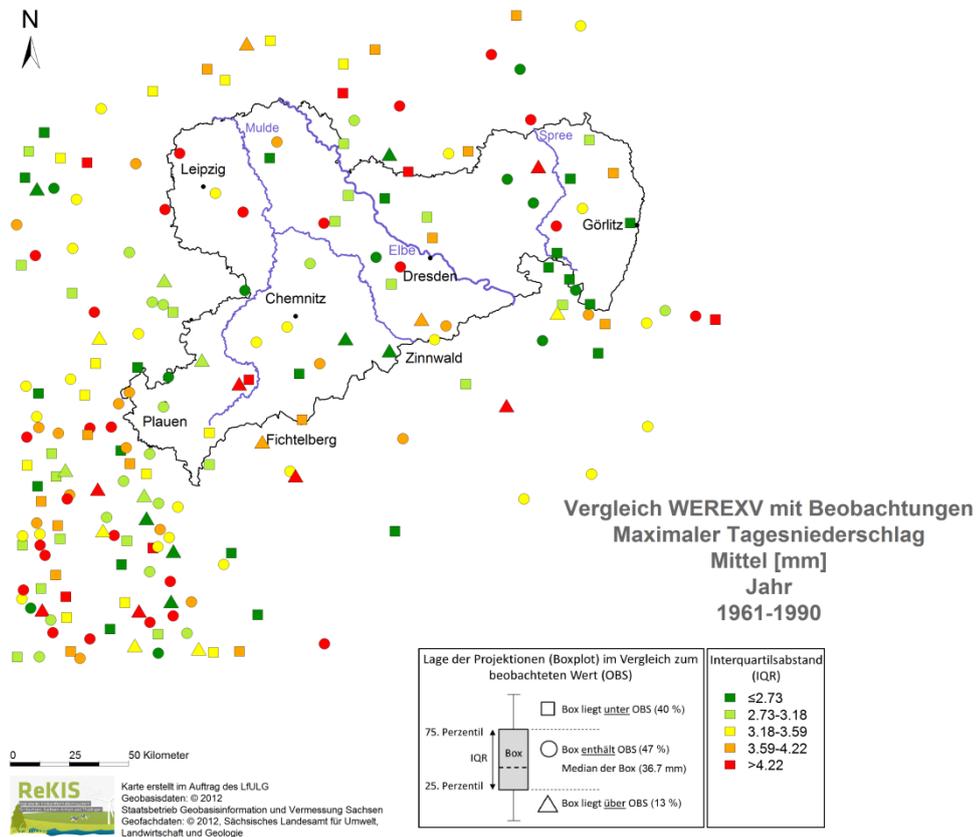
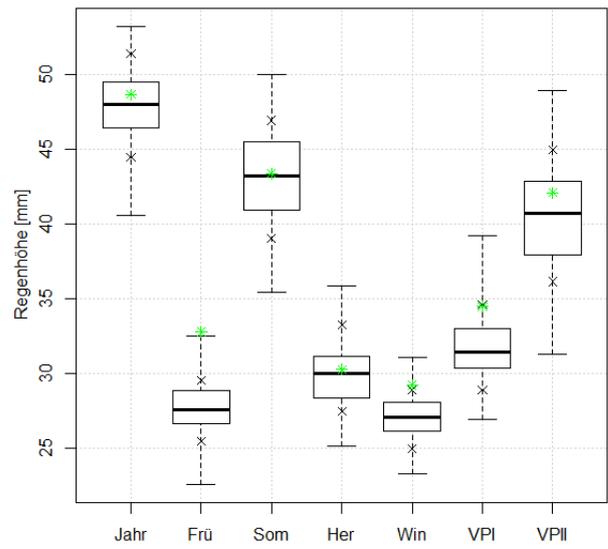
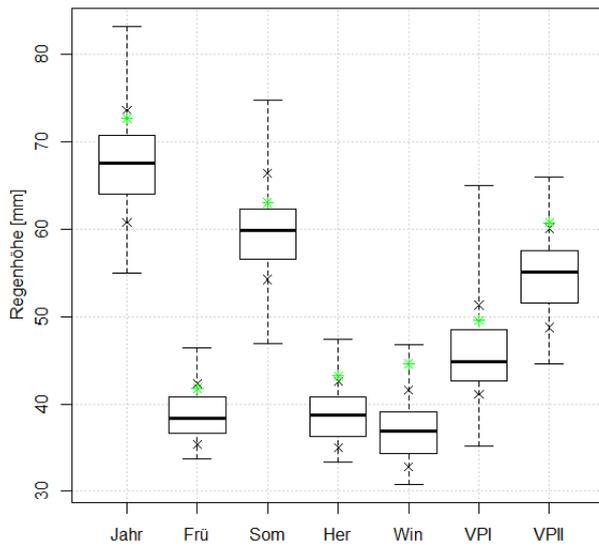
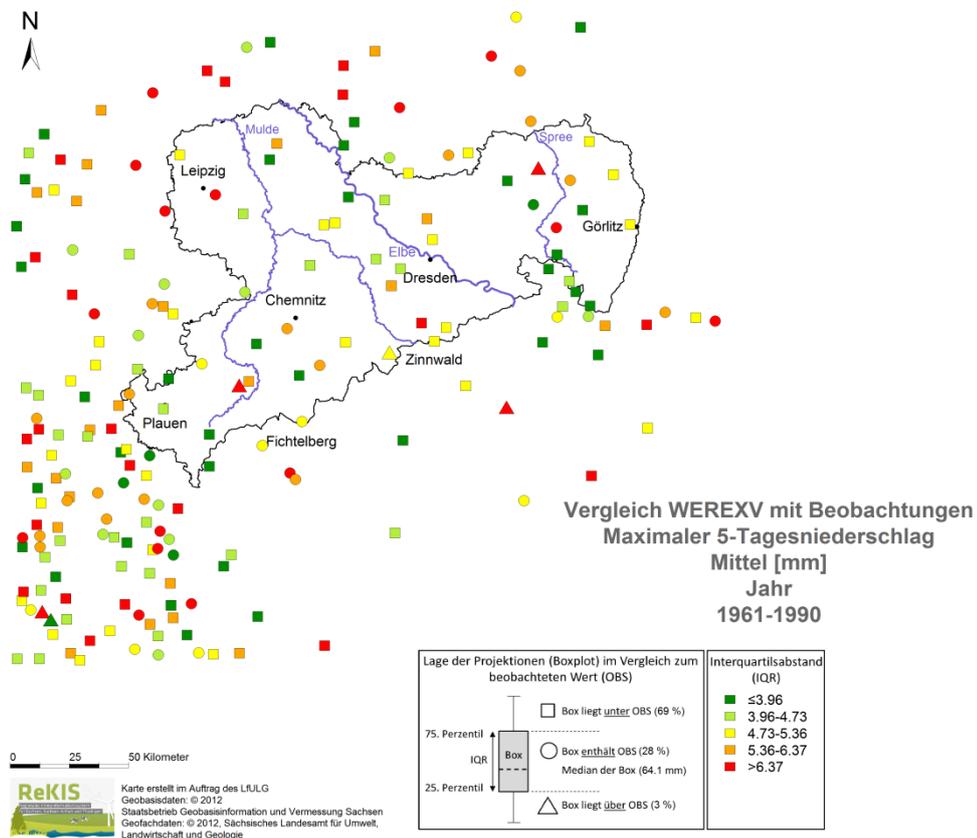
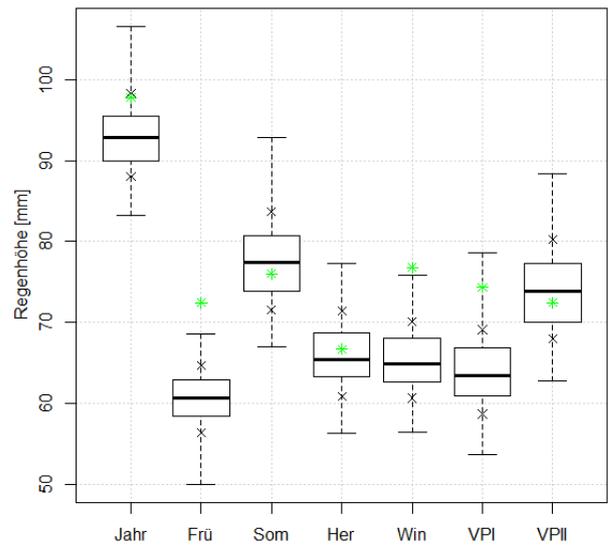


Abbildung 14: Maximaler Tagesniederschlag RX1day: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten)

### Dresden-Klotzsche



### Fichtelberg



**Abbildung 15: Maximaler 5-Tagesniederschlag RX5day: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das Kalenderjahr (unten)**

## Überschreitungstage der Starkniederschläge

Die Überschreitungstage von Starkniederschlagsereignissen werden perzentilbasiert für die Indizes R80p (Abbildung 16 und Abbildung 17), R90p (Abbildung 18 und Abbildung 19), R95p (Abbildung 20 und Abbildung 21) und R99p (Abbildung 22 und Abbildung 23) für die Vegetationsperioden der Periode 1961–2000 und den Dekaden analysiert. Weitere Bezugszeiträume wie das Kalenderjahr, das hydrologische Jahr, Halbjahre und die Jahreszeiten sind dem Anhang zu entnehmen. In Tabelle 8 werden die in den Karten aufgeführten prozentualen Anteile der Projektionen zusammengefasst, die im Vergleich zu den beobachteten Ereignistagen oberhalb, unterhalb bzw. innerhalb der Box (Interquartilsabstand der 120 Realisationen) liegen. Die Güte der neun WEREX V-Antriebe bei der Reproduktion der Überschreitungstage ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Die mittleren jährlichen **Überschreitungstage der Starkniederschläge R80p** werden von den WEREX V-Projektionen für den Gesamtzeitraum für Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten gut getroffen, in der VP I wird OBS unterschätzt und in VP II überschätzt. Die flächigen Darstellungen bestätigen die Überschätzung in VP II für 80 % der Stationen, in VP I ist der Anteil an Über- und Unterschätzungen sowie Treffern ausgewogen. Für das Kalenderjahr kann eine nahezu flächendeckende Überschätzung festgestellt werden. Die Dekadische Variabilität der gemessenen Werte kann nicht abgebildet werden, vielmehr variieren die Projektionen kaum.

Die mittleren jährlichen **Überschreitungstage von Starkniederschlägen R90p** werden von den WEREX V-Projektionen für den Gesamtzeitraum für die Jahreszeiten gut getroffen. Für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg ist in den Dekaden eine kontinuierliche Abnahme der Anzahl der Starkniederschlagsereignisse R90p festzustellen, die von den WEREX V-Projektionen nicht reproduziert wird. Für das Kalenderjahr ist eine nahezu flächendeckende Überschätzung zu erkennen. In der Vegetationsperiode I zeigen die WEREX V-Projektionen kein eindeutiges Signal in der Fläche. Eine nahezu flächendeckende Überschätzung zeigt sich in der Vegetationsperiode II.

Die Variabilität der mittleren jährlichen **Überschreitungstage von Starkniederschlag R95p** in den gemessenen Werten wird von den Projektionen in den Dekaden nicht reproduziert. Für das Kalenderjahr ist eine nahezu flächendeckende Überschätzung der WEREX V-Projektionen zu den gemessenen Werten für 1961–2000 festzustellen. In der Vegetationsperiode II zeigt sich für die gemessenen Werte der Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg eine Zunahme der Überschreitungstage R95p. Diese Entwicklung wird von den WEREX V-Projektionen nicht reproduziert. Die Projektionen zeigen für die Vegetationsperiode I kein einheitliches Signal. In der Vegetationsperiode II ist flächendeckend größtenteils eine Überschätzung festzustellen.

Die mittleren jährlichen **Überschreitungstage von Starkniederschlag R99p** werden für den Gesamtzeitraum 1961–2000 gut abgebildet. Für die Jahreszeiten ergibt sich für Dresden und Fichtelberg kein einheitliches Bild für den Gesamtzeitraum. In der Fläche ergibt sich im Vergleich zu anderen Perzentilen kein einheitliches Bild für die Vegetationsperioden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Projektionen die Überschreitungstage der Perzentile 80, 90 und 95 fürs Jahr und die VP II überschätzen. Für das 99. Perzentil und generell in VP II kommt es zu Über-, Unterschätzungen und Treffern. Weil die Berechnungsgrundlage die Perzentilhöhen fürs Jahr der Periode 1961–1990 sind, können Abweichungen von OBS für 1961–2000 nur durch die letzte Dekade verursacht werden. Weil WEREX V die dekadische Variabilität der Starkniederschläge kaum erfasst, überraschen die Abweichungen für das Jahr nicht. Die Überschätzungen in VP II lassen auf prinzipielle Probleme in der Nachbildung der innerjährlichen Niederschlagsvariabilität schlussfolgern. Das belegen auch die mittleren Rangzahlen in Tabelle 9, die deutlich schlechter als für VP I und das Jahr sind. Die Güteeinschätzung der neun WEREX V-Antriebe

zeigt eine Abnahme der Güte in den VP mit zunehmender Perzentilhöhe. Mittlere Abweichungen von OBS von 23–30 % werden von vielen potenziellen Nutzern wahrscheinlich schon als kritisch erachtet. Die Wiedergabe der Häufigkeit von Starkniederschlägen R80p und R90p kann als „sehr gut“ bis „gut“ bewertet werden. Die WEREX V-Antriebe mit zwischengeschaltetem RCM und HCG2\_L1 zeigen insgesamt die beste Übereinstimmung mit beobachteten Überschreitungstagen von Starkniederschlägen.

**Tabelle 8: Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Starkniederschlagsindizes für das Kalenderjahr und die Vegetationsperioden**

| Niederschlagsindizes       | 50 % der Projektionen (IQR) im Vergleich zum beobachteten Wert (Obs) | Kalenderjahr [%] | VP I [%]  | VP II [%] |
|----------------------------|--|------------------|-----------|-----------|
| R80p – Überschreitungstage | unterschätzen  | 10               | 31        | 4         |
|                            | enthalten  | 13               | 34        | 16        |
|                            | überschätzen   | <b>76</b>        | 35        | <b>80</b> |
| R90p – Überschreitungstage | unterschätzen  | 7                | 35        | 3         |
|                            | enthalten  | 18               | 40        | 22        |
|                            | überschätzen   | <b>75</b>        | 25        | <b>75</b> |
| R95p – Überschreitungstage | unterschätzen  | 8                | 36        | 4         |
|                            | enthalten  | 20               | 51        | 32        |
|                            | überschätzen   | <b>72</b>        | 12        | <b>64</b> |
| R99p – Überschreitungstage | unterschätzen  | 17               | 44        | 11        |
|                            | enthalten  | <b>48</b>        | <b>53</b> | 51        |
|                            | überschätzen   | 35               | 3         | <b>38</b> |

In Tabelle 9 wird die Güte der WEREX V-Projektionen für die Überschreitungstage von Starkniederschlagsereignissen abgebildet, wobei die hervorheben.

**Tabelle 9: Güte der WEREX V-Projektionen für die Überschreitungstage von Starkniederschlagsereignissen. Die grau hinterlegten Felder geben die jeweils zwei besten mittleren Ränge an.**

| WEREX V Lauf | R80p Jahr | R80p VP I | R80p VP II | R90p Jahr | R90p VP I | R90p VP II | R95p Jahr | R95p VP I | R95p VP II | R99p Jahr | R99p VP I | R99p VP II |
|--------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|
| EH5_L1       | 1,7       | 1,5       | 2,2        | 1,7       | 1,5       | 2,5        | 1,7       | 1,4       | 2,8        | 1,4       | 2,2       | 2,7        |
| EH5_L2       | 1,9       | 1,7       | 2,5        | 1,9       | 1,6       | 3,0        | 1,8       | 1,6       | 3,4        | 1,6       | 2,4       | 3,2        |
| EH5_L3       | 1,7       | 1,5       | 2,4        | 1,7       | 1,4       | 2,7        | 1,7       | 1,7       | 3,1        | 1,4       | 2,5       | 2,7        |
| EH5.CLM_L1   | 1,3       | 1,3       | 1,7        | 1,3       | 1,4       | 1,9        | 1,4       | 1,6       | 2,3        | 1,3       | 2,5       | 2,6        |
| EH5.CLM_L2   | 1,5       | 1,4       | 2,0        | 1,5       | 1,5       | 2,2        | 1,4       | 1,5       | 2,5        | 1,3       | 2,3       | 2,6        |
| EH5.RACMO_L3 | 1,4       | 1,4       | 1,9        | 1,4       | 1,5       | 2          | 1,4       | 1,7       | 2,3        | 1,3       | 2,3       | 2,5        |
| EH5.REMO_L3  | 1,4       | 1,4       | 2,0        | 1,4       | 1,4       | 2,3        | 1,4       | 1,5       | 2,6        | 1,3       | 2,2       | 2,8        |
| HC3C_L1      | 1,4       | 1,3       | 2,2        | 1,5       | 1,4       | 2,6        | 1,5       | 1,6       | 3,0        | 1,4       | 2,3       | 2,9        |
| HCG2_L1      | 1,5       | 1,3       | 2,0        | 1,5       | 1,4       | 2,4        | 1,4       | 1,5       | 2,7        | 1,4       | 2,2       | 2,6        |

Anwender mit hydrologischem Hintergrund sind meist interessiert an Aussagen zum hydrologischen Jahr (November bis Oktober) bzw. den Halbjahren. Exemplarisch wurden die Stationen Dresden und Fichtelberg auf den Unterschied zwischen meteorologischem und hydrologischem Jahr untersucht (Abbildung 24 und Anhang). Die Unterschiede sind in den Boxplots kaum zu erkennen und werden demzufolge als vernachlässigbar eingeschätzt. Die Unterschiede resultieren aus der um ein Jahr verminderten Datenmenge (es fehlen Novem-

ber, Dezember 1960) für das hydrologische Jahr. Schlussfolgernd wird festgestellt, dass die Ergebnisse aus den Betrachtungen für meteorologische Zeiträume uneingeschränkt für hydrologische Zeiträume gelten.

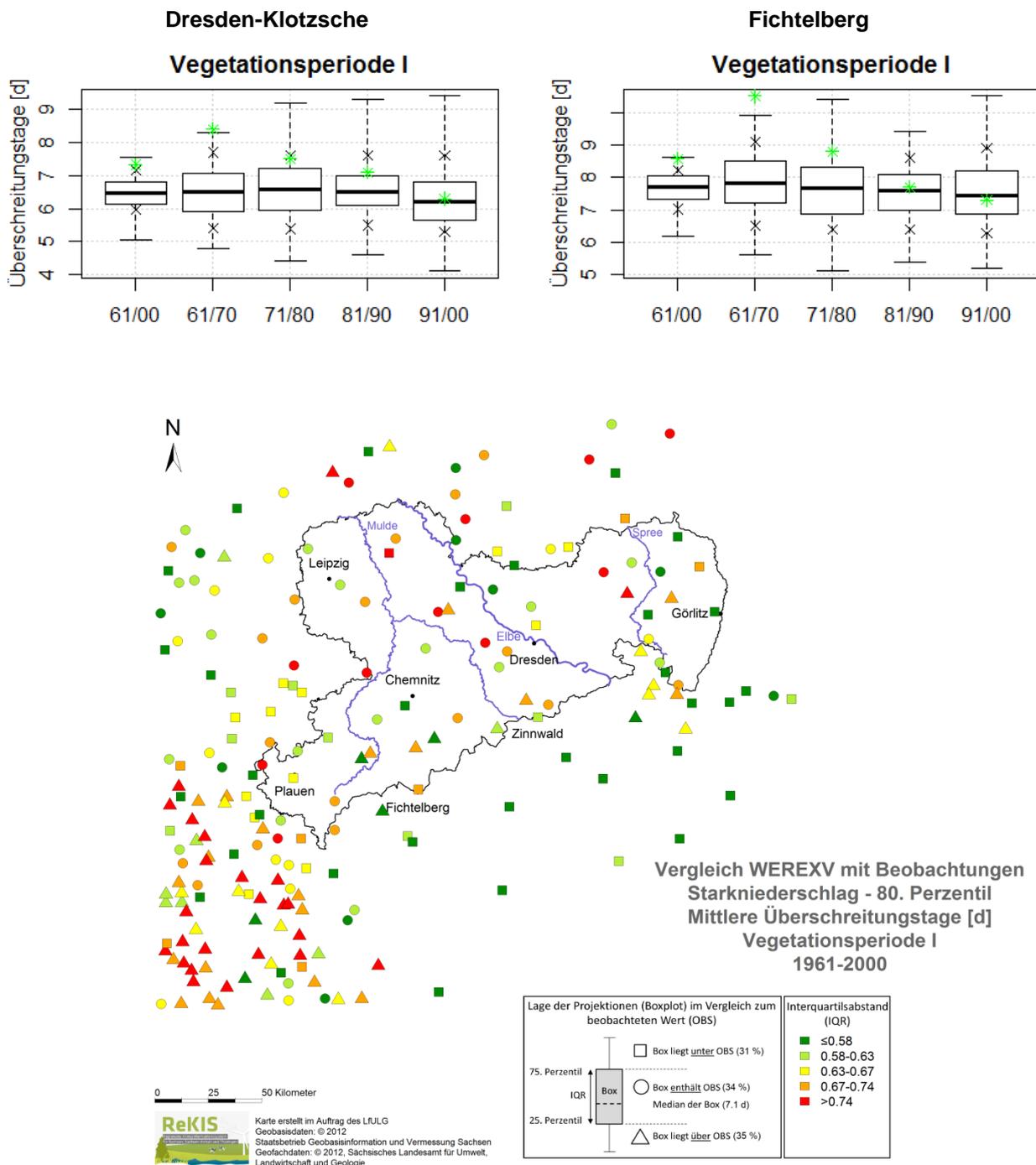
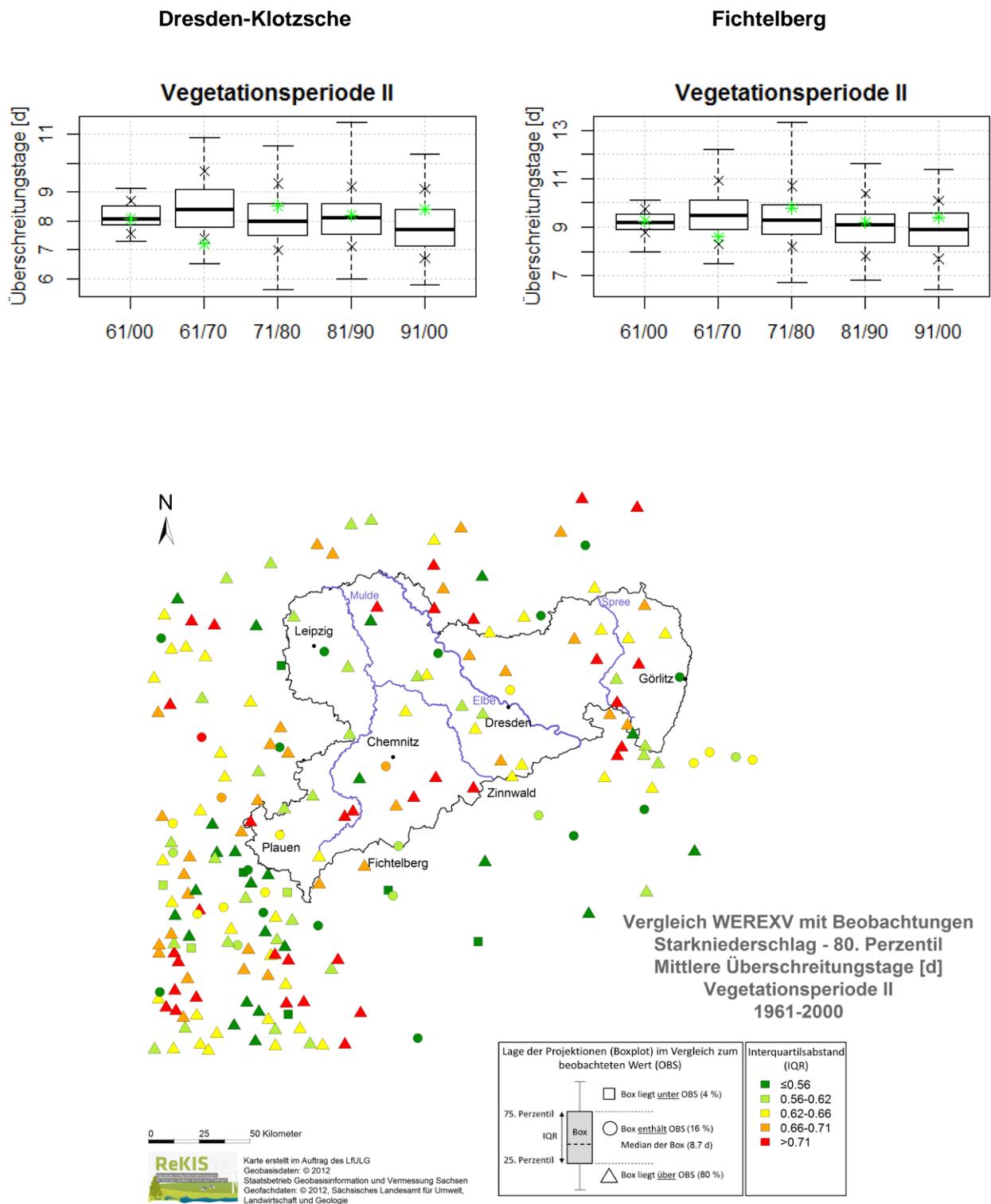


Abbildung 16: Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)



**Abbildung 17: Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)**

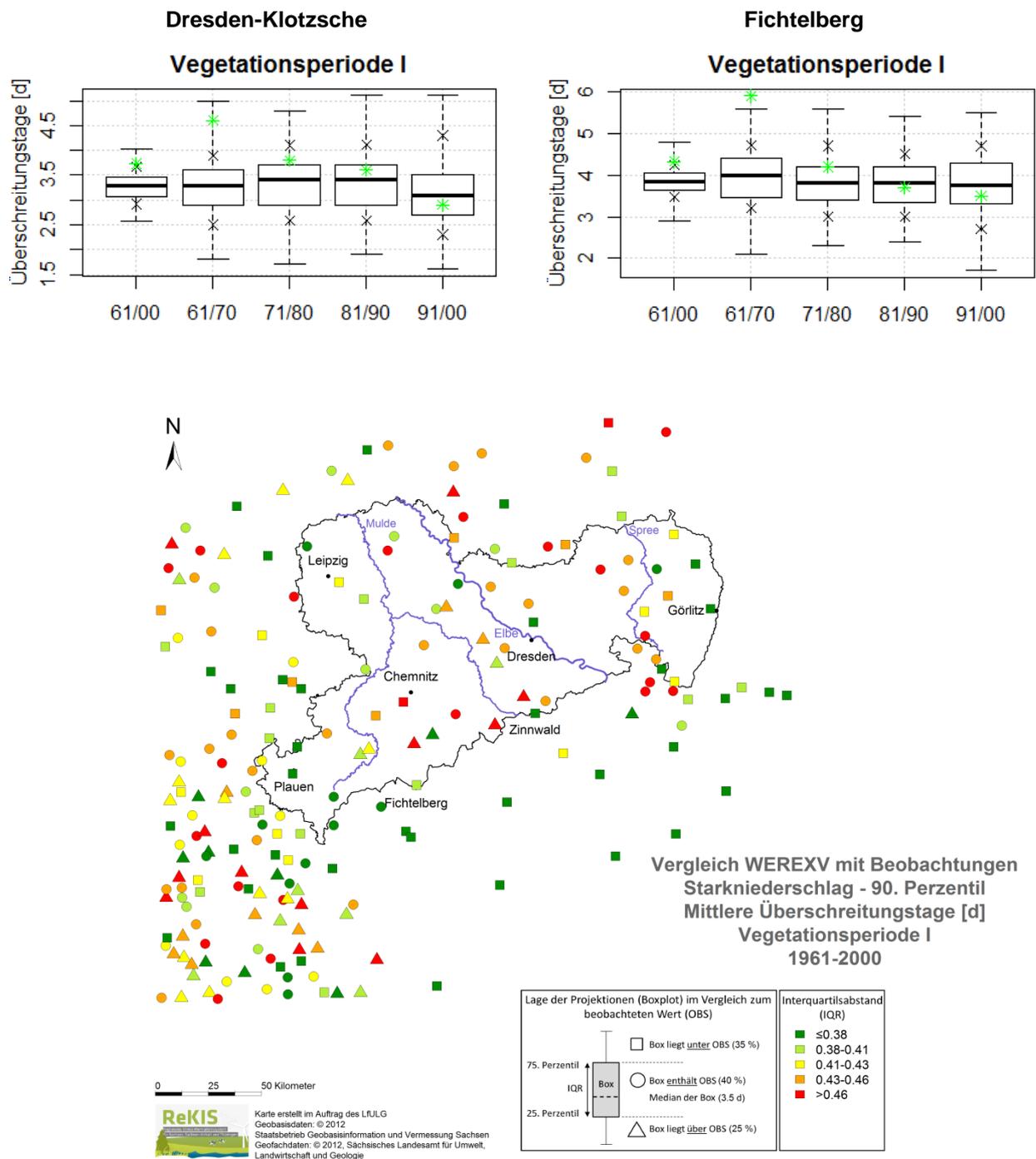
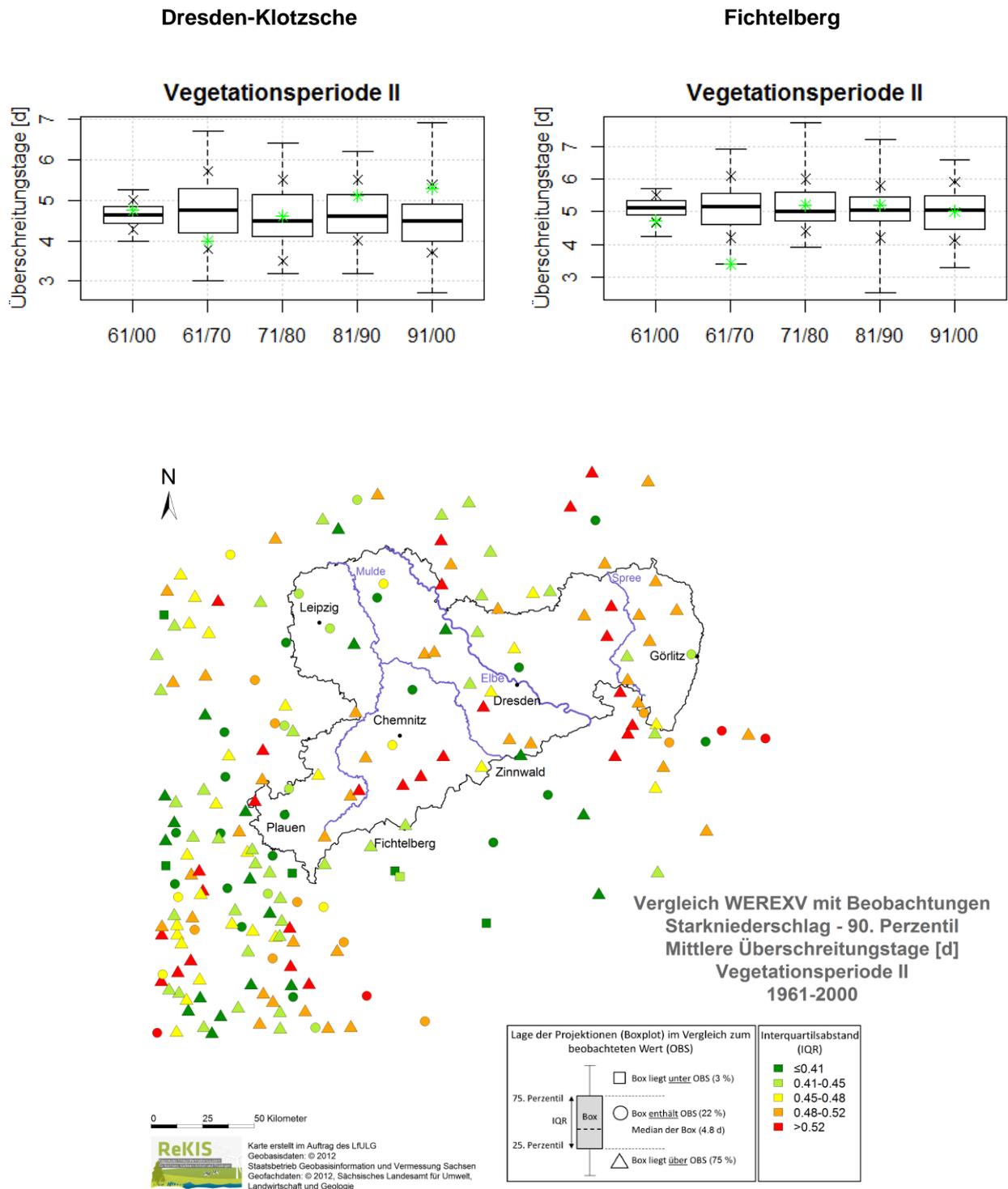
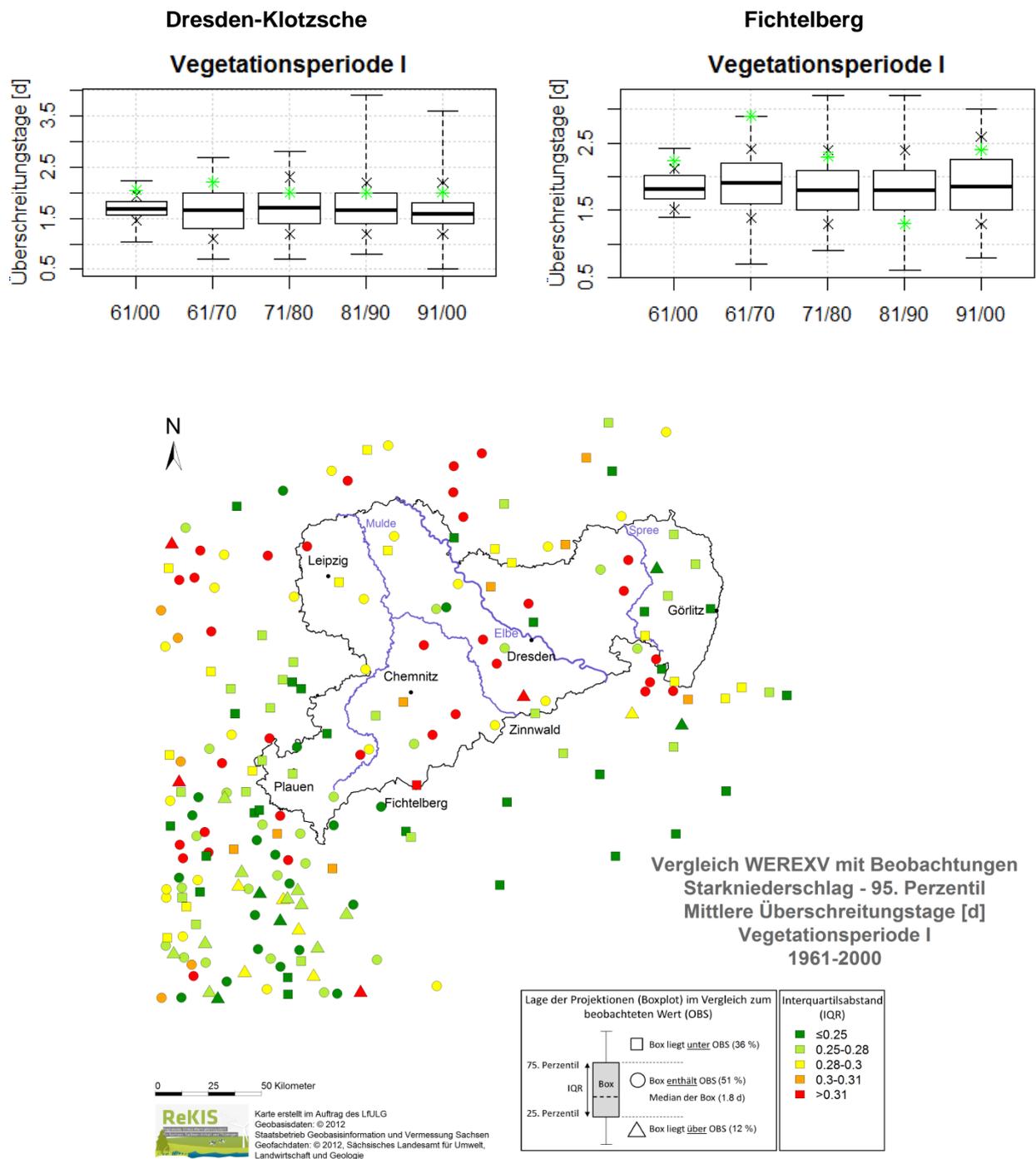


Abbildung 18: Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)



**Abbildung 19: Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)**



**Abbildung 20: Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)**

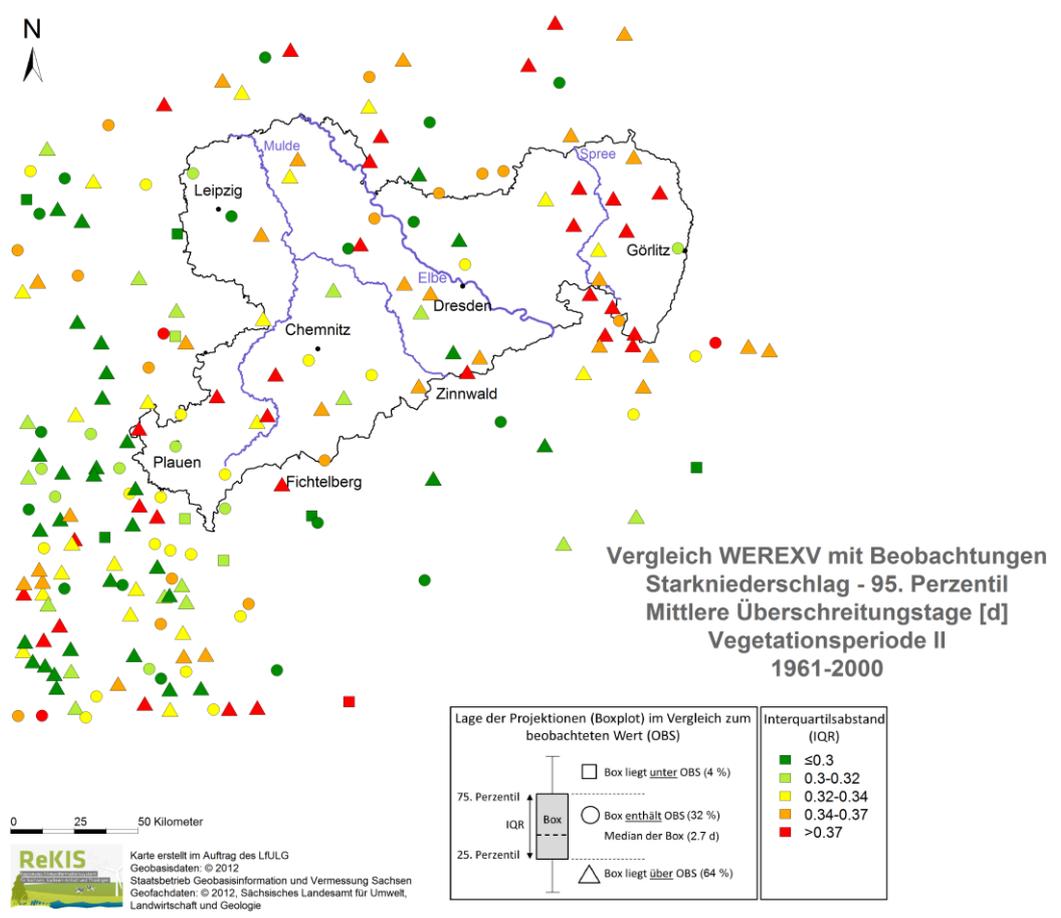
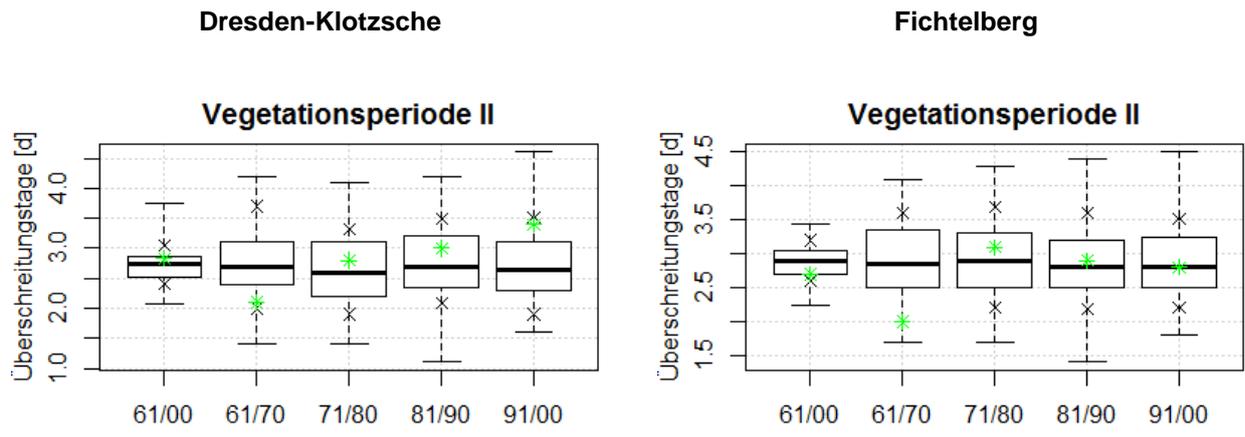


Abbildung 21: Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)

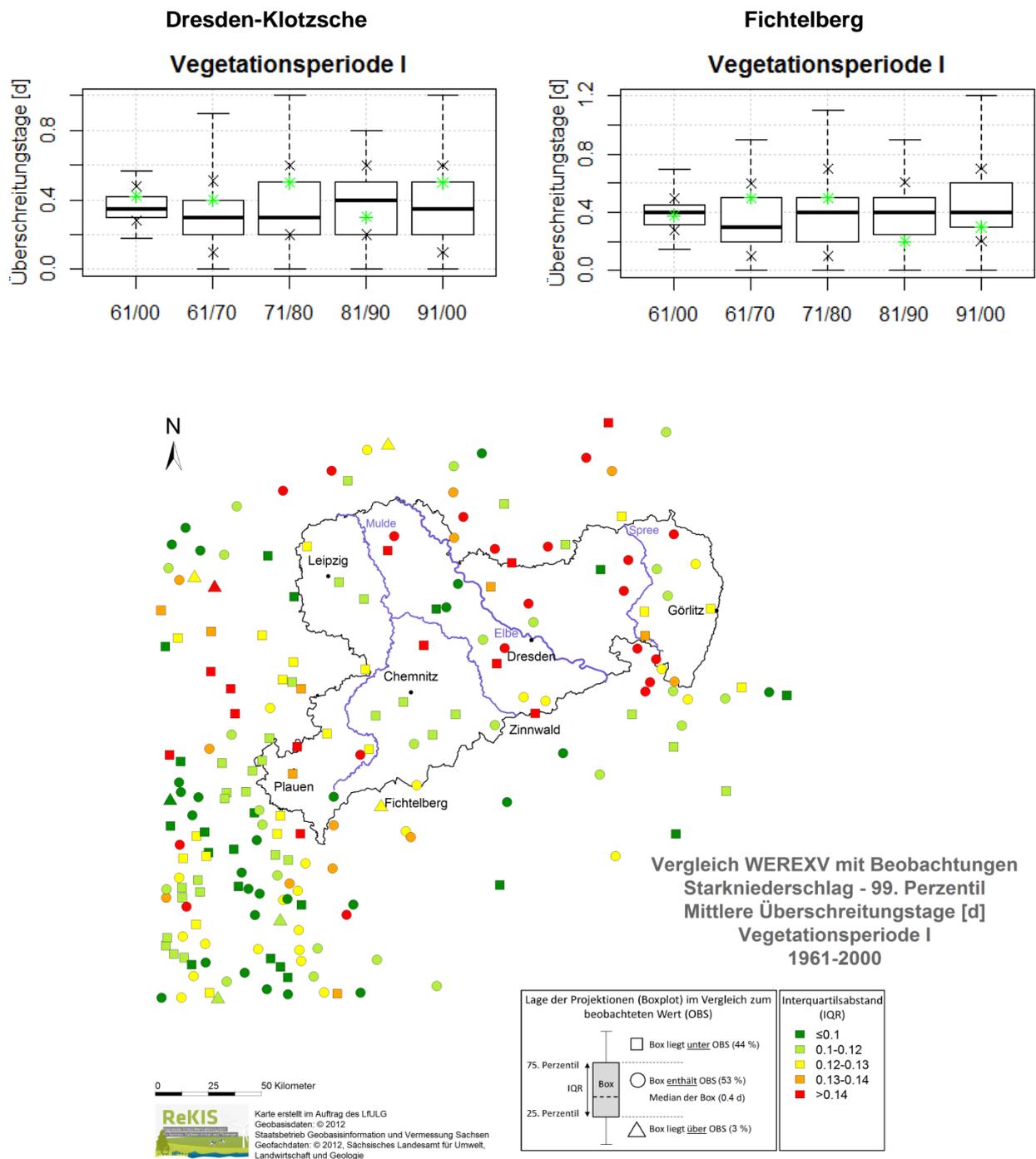
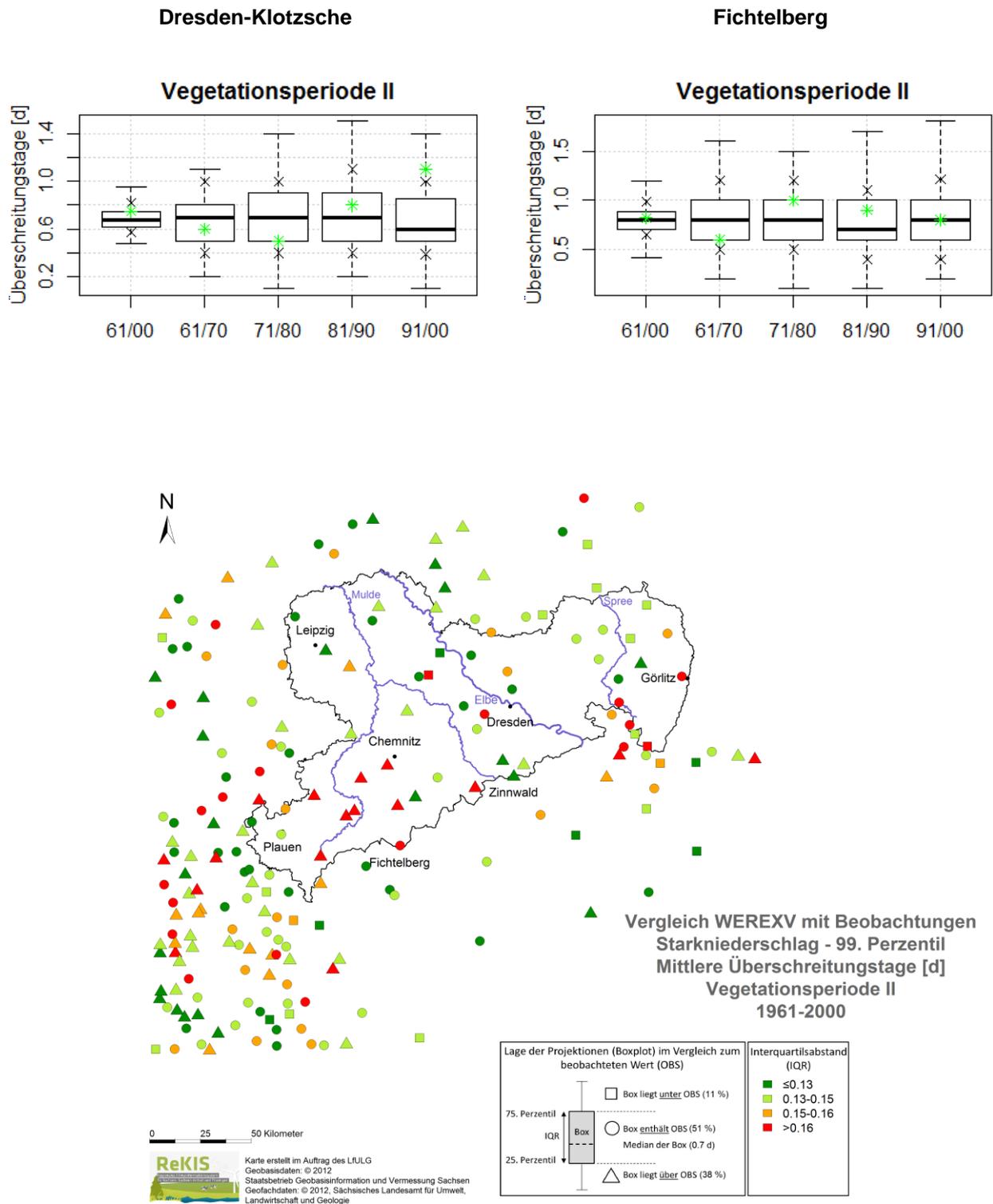


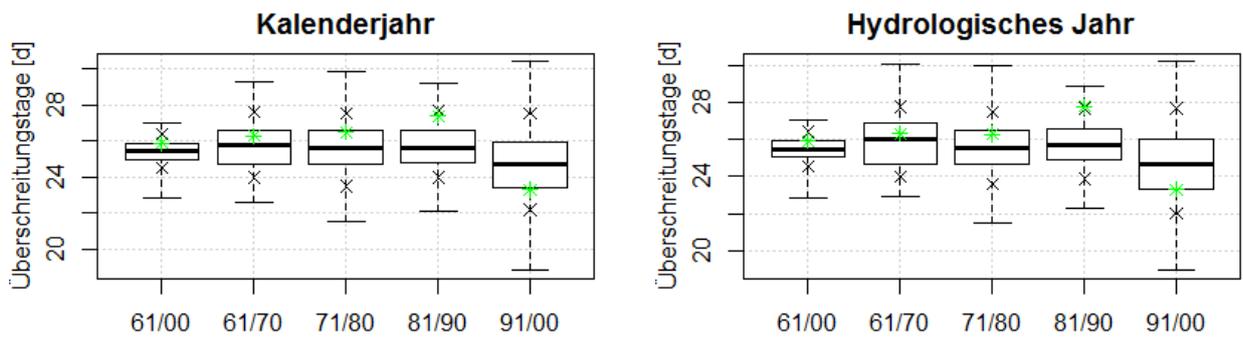
Abbildung 22: Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)



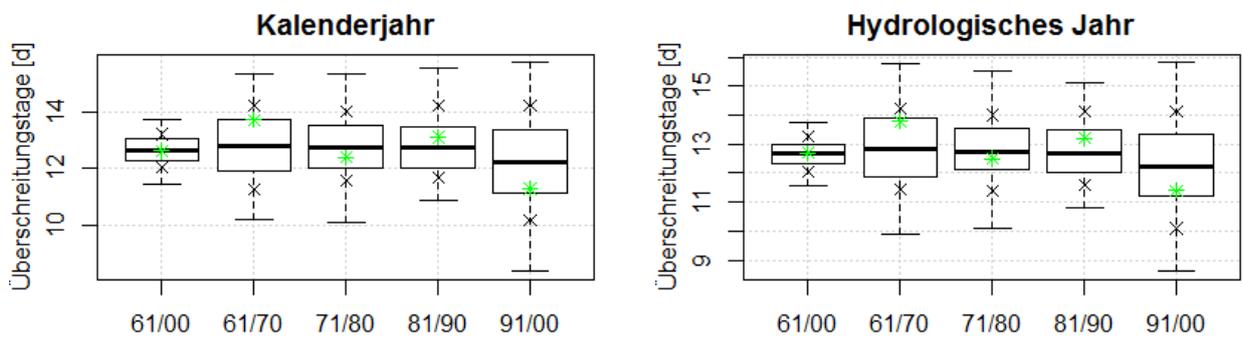
**Abbildung 23: Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage für Dresden und Fichtelberg für die Vegetationsperiode II: Box-Whisker-Plot (oben) und Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)**

## Dresden-Klotzsche

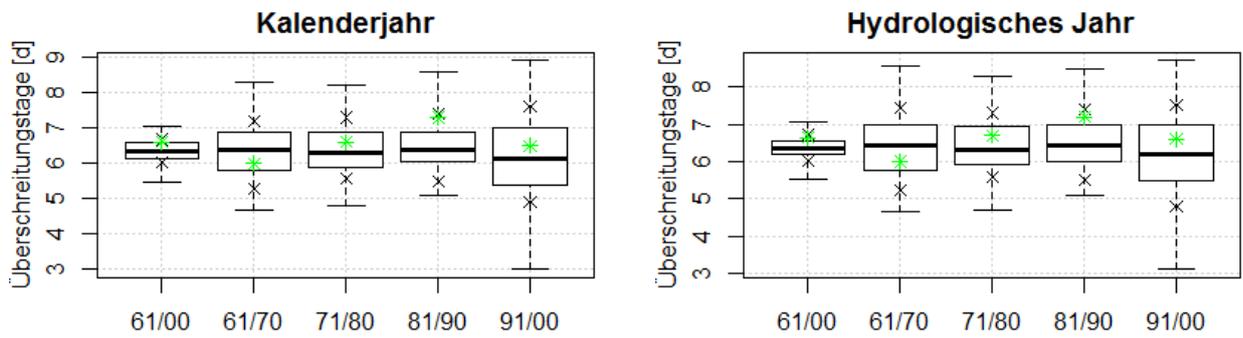
R80p



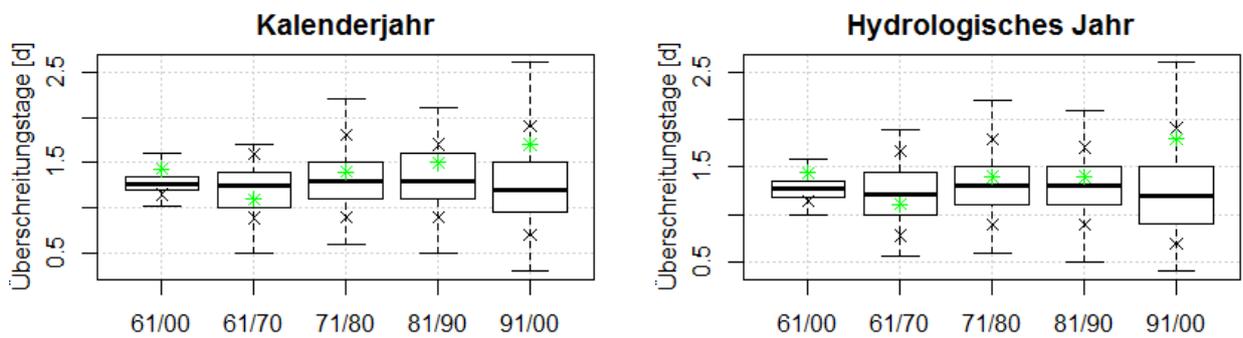
R90p



R95p



R99p



**Abbildung 24: Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche (1961–2000 und Dekaden)**

### Zeitlicher Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen

Die Analyse wurde exemplarisch für die Auftrittshäufigkeit des Starkniederschlags R95p für die Vegetationsperioden der Stationen Dresden und Fichtelberg durchgeführt. Abweichend von den sonst durchgeführten Ranganalysen, wurde hier nur die Anzahl an Realisationen der WEREX V Antriebe, die „gut“ die beobachtete Periodizität des Starkniederschlags R95p widerspiegeln, quantifiziert (Tabelle 10). Das sind in der VPI recht wenige Realisationen, maximal 3,5 für die HCG2\_L1 angetriebenen Realisierungen. In der VPII sind es mit bis zu 9 für EH5-CLM\_L1 wesentlich mehr „gute“ Realisierungen. Das liegt im Wesentlichen an den ermittelten RMSE-Schwellenwerten. Für die VPII ist dieser mit 0,0019 fast doppelt so hoch wie für VPI, d. h. die Hürde, damit eine Realisierung als „gut“ eingestuft wird, ist in VPII leichter zu nehmen. Diese Analysen sind als vorläufig zu betrachten, weil vorerst nur zwei Stationen analysiert wurden und somit die „natürliche“ Variabilität eingeschränkt abgebildet wird (siehe Kapitel 4.1.5).

Wie schon für die Perzentilhöhe und die Überschreitungstage performieren die Antriebe mit zwischengekoppelem RCM und das englische Modell HCG2\_L1 am besten.

**Tabelle 10: Anzahl an Realisationen der WEREX V-Antriebe, die „gut“ die beobachtete Periodizität des Starkniederschlags R95p widerspiegeln**

| WEREX V      | R95p VPI |             | R95p VPII |             |
|--------------|----------|-------------|-----------|-------------|
|              | Dresden  | Fichtelberg | Dresden   | Fichtelberg |
| EH5_L1       | 1.5*     | 0.5         | 4         | 6           |
| EH5_L2       | 0        | 1           | 5         | 4           |
| EH5_L3       | 1        | 1           | 7         | 5           |
| EH5-CLM_L1   | 1        | 1           | 1         | 9           |
| EH5-CLM_L2   | 2        | 2           | 6         | 3           |
| EH5-RACMO_L3 | 1        | 1           | 6         | 7           |
| EH5-REMO_L3  | 2        | 3           | 4         | 4           |
| HC3C_L1      | 0        | 0.5*        | 4.5*      | 7.5*        |
| HCG2_L1      | 3.5*     | 1           | 4         | 7.5*        |

\* Die Dezimalstellen ergeben sich daraus, dass es bei EH5\_L1, HC3C\_L1 und HCG2\_L1 20 Realisationen sind (sonst 10) und deshalb die Anzahl dieser Antriebe für eine bessere Vergleichbarkeit halbiert wurde.

### 4.2.2 Extremtemperaturen

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Stationen Dresden und Fichtelberg abgebildet. Für ausgewählte Bezugszeiträume gibt es zusätzlich eine flächige Darstellung in Form einer Karte. Die erstellten Musterblätter sind für alle Stationen unter [www.rekis.org](http://www.rekis.org) (Freistaat Sachsen | Klimaentwicklung) zugänglich.

### Höhe der Extremtemperaturen

Die Höhe von Extremtemperaturenereignissen wird perzentilbasiert für die Indizes der Minimumtemperatur TN10 (Abbildung 25), TN90 (Abbildung 26) und der Maximumtemperatur TX10 (Abbildung 27), TX90 (Abbildung 28) analysiert. Betrachtete Zeiträume sind das Kalenderjahr, die Jahreszeiten und die Vegetationsperioden der Referenzperiode 1961–1990. In Tabelle 11 werden die in den Karten aufgeführten prozentualen Anteile der Projektionen zusammengefasst, die im Vergleich zu den beobachteten Werten oberhalb, unterhalb bzw. innerhalb der Box (Interquartilsabstand der 120 Realisationen) liegen. Die Güte der WEREX V-Projektionen ist Tabelle 12 zu entnehmen.

Der beobachtete Jahresverlauf der Maximum- und Minimumtemperaturextreme wird von den Projektionen für alle Indizes wiedergegeben.

Die Höhe der Minimumtemperatur TN10 wird für die Stationen Dresden und Fichtelberg für Frühling, Sommer, Winter, Vegetationsperiode I und das Jahr von den WEREX V-Projektionen gegenüber dem gemessenen Wert überschätzt und für den Herbst und die Vegetationsperiode II unterschätzt. Am markantesten ist die Überschätzung im Winter, die im gesamten Untersuchungsgebiet zu sehen ist.

Für die Höhe der Minimumtemperatur TN90 kann für die Stationen Dresden und Fichtelberg eine Unterschätzung der WEREX V-Projektionen gegenüber den gemessenen Werten für das Kalenderjahr, den Sommer, den Herbst und die Vegetationsperioden angegeben werden. Für die Vegetationsperioden wurde Karten erstellt zur Analyse aller Stationen. In der Fläche bestätigt sich die Unterschätzung für die VPI (76 % der Stationen) und die VPII (81 % der Stationen).

Die Höhe der Maximumtemperatur TX10 wird für die Stationen Dresden und Fichtelberg für Frühling, Sommer, Winter, Vegetationsperiode I und das Jahr von den WEREX V Projektionen gegenüber dem gemessenen Wert überschätzt und für den Herbst und die Vegetationsperiode II unterschätzt (analog TN10). Flächendeckend ist eine Überschätzung im Winter festzustellen.

Flächendeckend unterschätzen die WEREX V Projektionen in den Vegetationsperioden die Höhe der Maximumtemperatur TX90 gegenüber dem gemessenen Wert. Für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg zeigt sich für alle Zeiträume außer dem Winter eine Unterschätzung.

Visuell konnten keine räumlichen Verteilungsmuster in Form einer Lage abhängigen Unter- bzw. Überschätzung der Projektionen gegenüber den observierten Werten festgestellt werden. Die Höhe der WEREX V-Projektionen von Maximum- und Minimumtemperaturextremen weist eine geringe Streuung auf (IQR klein), d. h. die unterschiedlichen WEREX V-Antriebe unterscheiden sich wenig in ihren Ergebnissen. Des Weiteren konnten visuell keine Verteilungsmuster für die Größen der Box, also des Interquartilsabstandes, gefunden werden.

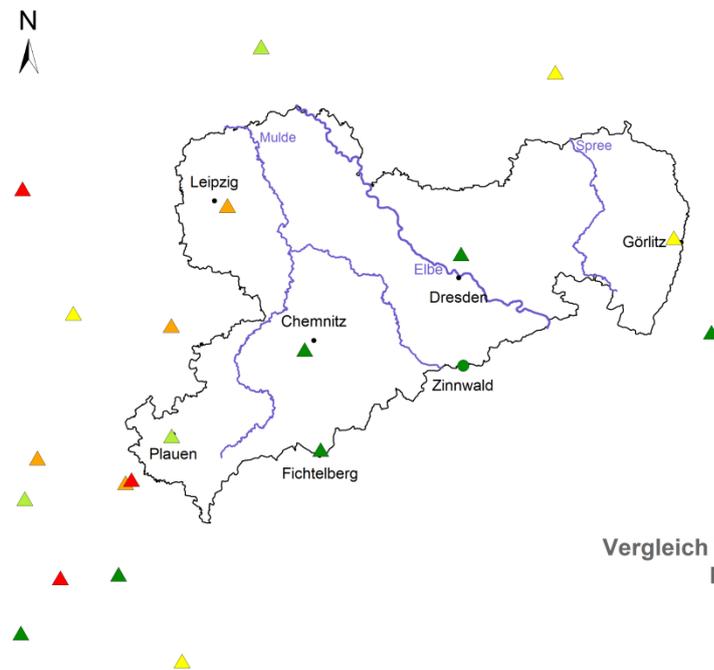
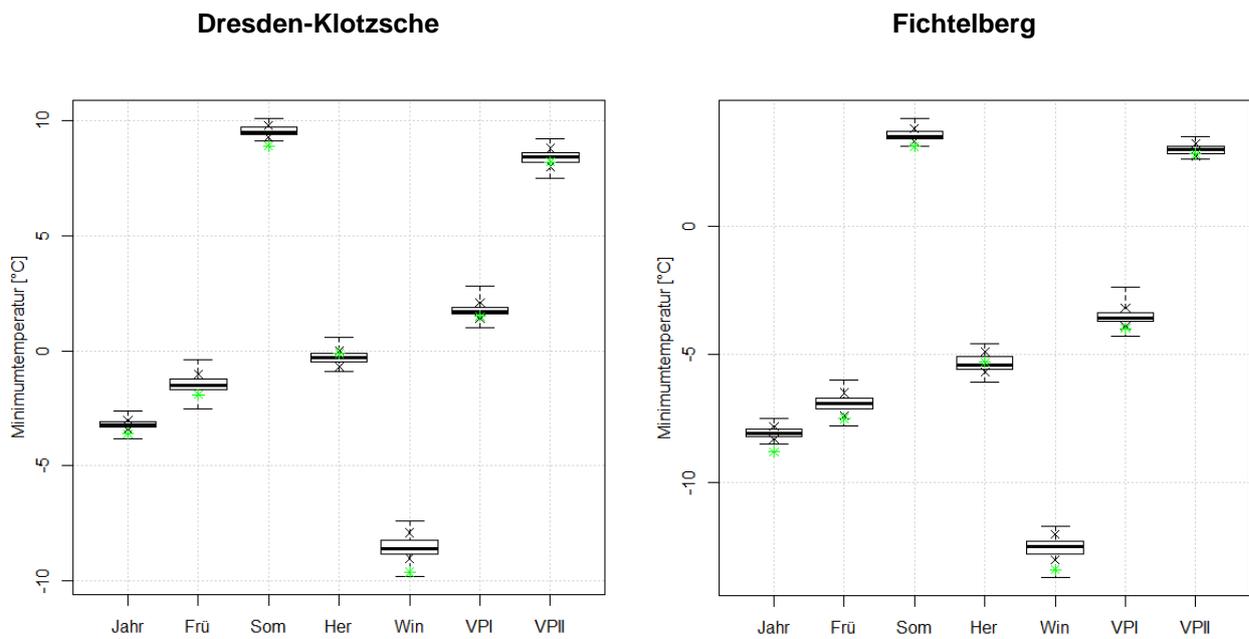
Die Überschätzung der 10. Perzentile und die Unterschätzung der 90. Perzentile gegenüber den Beobachtungen bedeuten eine Kappung der Extreme durch die Projektionen. Die Analyse der Güte der WEREX V-Antriebe verdeutlicht die Schwierigkeiten im Winter (mittlere Abweichungen bei TX und TN zwischen 22 und 30 %). Die Vegetationsperioden werden demgegenüber deutlich besser abgebildet, wobei die Abweichungen in VPII mit <13 % am geringsten sind. Die Antriebe EH5\_L1, EH5.CLM\_L2, EH5.RACMO\_L3, EH5\_L3, und EH5.REMO\_L3 erweisen sich als die geeignetsten für die Abbildung der Höhe der Temperaturextreme.

**Tabelle 11: Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Temperaturextreme für den Winter und die Vegetationsperioden**

| Temperaturindizes | 50 % der Projektionen (IQR) im Vergleich zum beobachteten Wert (OBS) | Winter [%] | VP I [%]  | VP II [%]  |
|-------------------|--|------------|-----------|------------|
| TN10 – Höhe       | unterschätzen  | 0          |           |            |
|                   | enthalten  | 5          | -         | -          |
|                   | überschätzen   | <b>95</b>  |           |            |
| TN90 – Höhe       | unterschätzen  |            | <b>76</b> | 81         |
|                   | enthalten  | -          | 24        | <b>19</b>  |
|                   | überschätzen   |            | 0         | 0          |
| TX10 – Höhe       | unterschätzen  | 0          |           |            |
|                   | enthalten  | 5          | -         | -          |
|                   | überschätzen   | <b>95</b>  |           |            |
| TX90 – Höhe       | unterschätzen  |            | <b>95</b> | <b>100</b> |
|                   | enthalten  | -          | 5         | 0          |
|                   | überschätzen   |            | 0         | 0          |

**Tabelle 12: Güte der WEREX V-Projektionen für die Höhe von Temperaturextremen**

| WEREX V Lauf | TN10 Winter | TN90 VP I | TN90 VP II | TX10 Winter | TX90 VP I | TX90 VP II |
|--------------|-------------|-----------|------------|-------------|-----------|------------|
| EH5_L1       | 2,8         | 1,2       | 1,0        | 2,2         | 2,0       | 2,0        |
| EH5_L2       | 3,2         | 1,3       | 1,0        | 2,7         | 1,7       | 1,8        |
| EH5_L3       | 2,7         | 1,4       | 1,0        | 2,2         | 1,8       | 1,3        |
| EH5.CLM_L1   | 3,8         | 1,4       | 1,0        | 3,2         | 2,2       | 1,3        |
| EH5.CLM_L2   | 3,0         | 1,2       | 1,0        | 2,3         | 1,4       | 2,0        |
| EH5.RACMO_L3 | 3,2         | 1,2       | 1,0        | 2,8         | 1,7       | 1,1        |
| EH5.REMO_L3  | 3,0         | 1,1       | 1,0        | 2,5         | 1,4       | 1,5        |
| HC3C_L1      | 2,7         | 1,7       | 1,3        | 2,3         | 2,3       | 2,9        |
| HCG2_L1      | 2,7         | 1,5       | 1,2        | 2,5         | 2,2       | 2,4        |



Vergleich WEREXV mit Beobachtungen  
 Minimumtemperatur  
 10. Perzentil [°C]  
 Winter  
 1961-1990

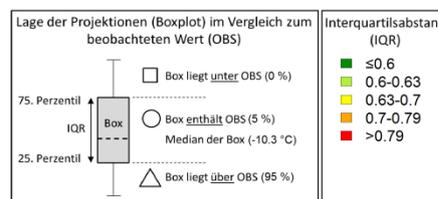
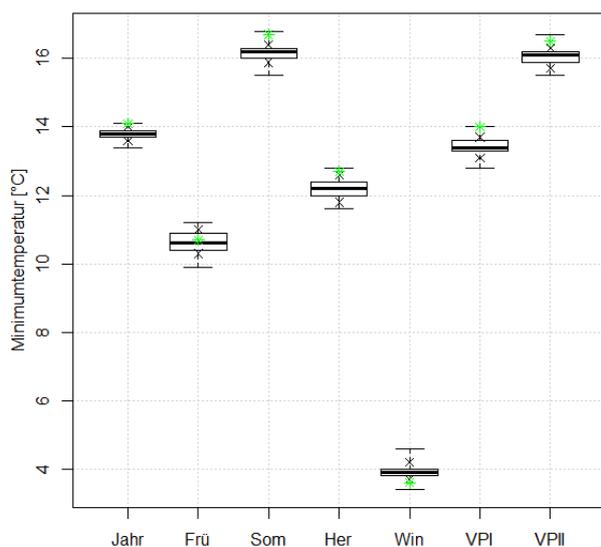
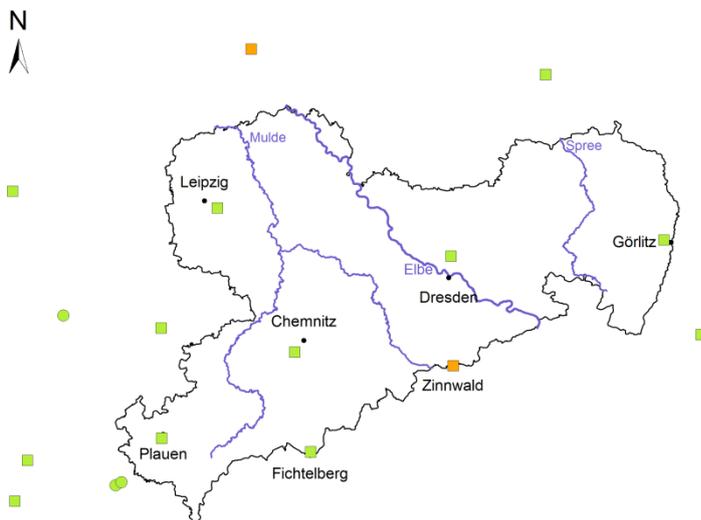
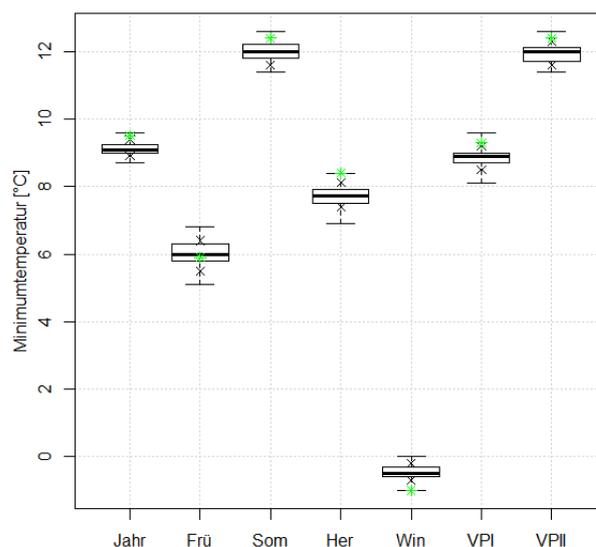


Abbildung 25: Minimumtemperatur TN10 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für den Winter (unten)

### Dresden-Klotzsche

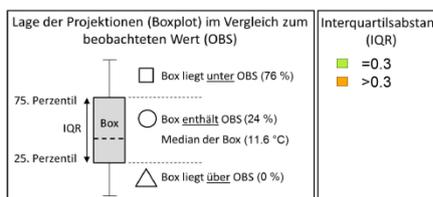


### Fichtelberg

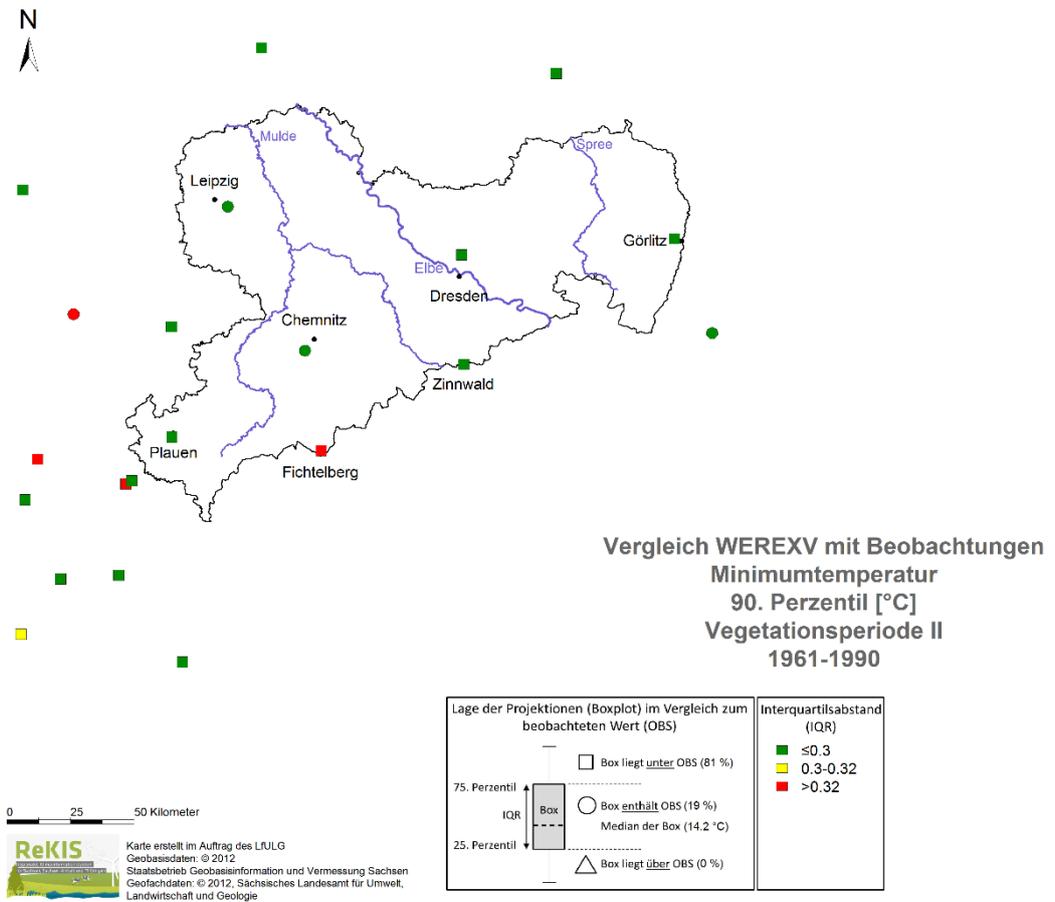


### Vergleich WEREXV mit Beobachtungen Minimumtemperatur 90. Perzentil [°C] Vegetationsperiode I 1961-1990

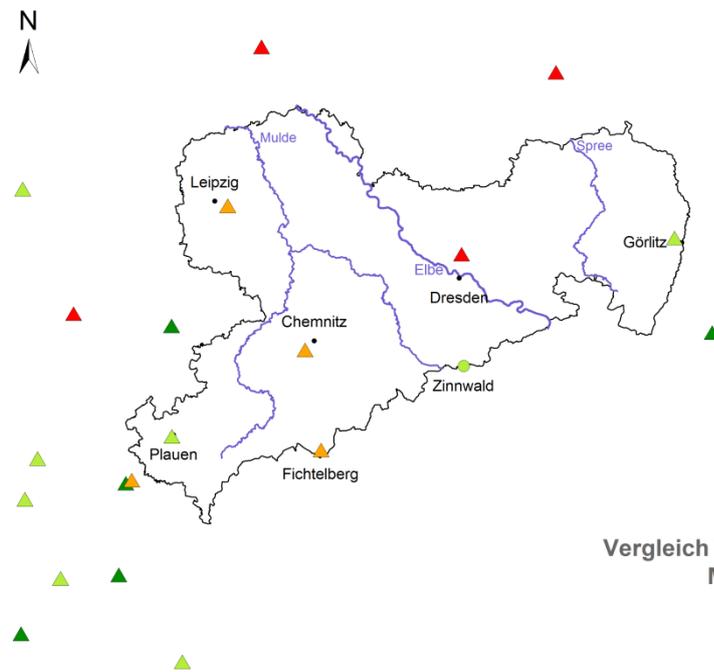
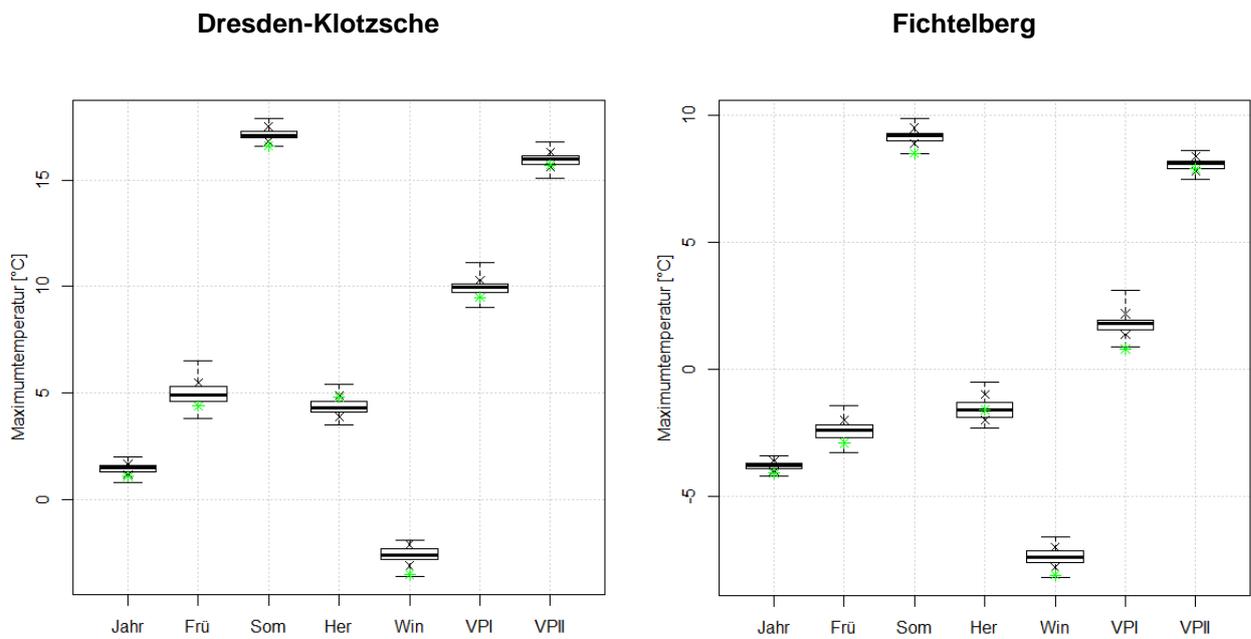
0 25 50 Kilometer  
**ReKIS**  
 Karte erstellt im Auftrag des LfULG  
 Geobasisdaten: © 2012  
 Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen  
 Geofachdaten: © 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt,  
 Landwirtschaft und Geologie



**Abbildung 26: Minimumtemperatur TN90 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für das VPI (unten)**



**Fortsetzung Abbildung 26: Vegetationsperiode II**



Vergleich WEREXV mit Beobachtungen  
Maximumtemperatur  
10. Perzentil [°C]  
Winter  
1961-1990

0 25 50 Kilometer  
**ReKIS**  
 Karte erstellt im Auftrag des LfULG  
 Geobasisdaten: © 2012  
 Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen  
 Geofachdaten: © 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt,  
 Landwirtschaft und Geologie

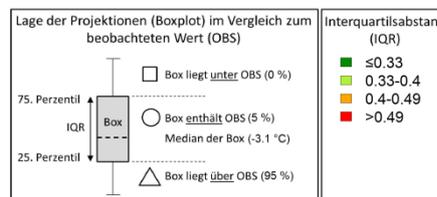
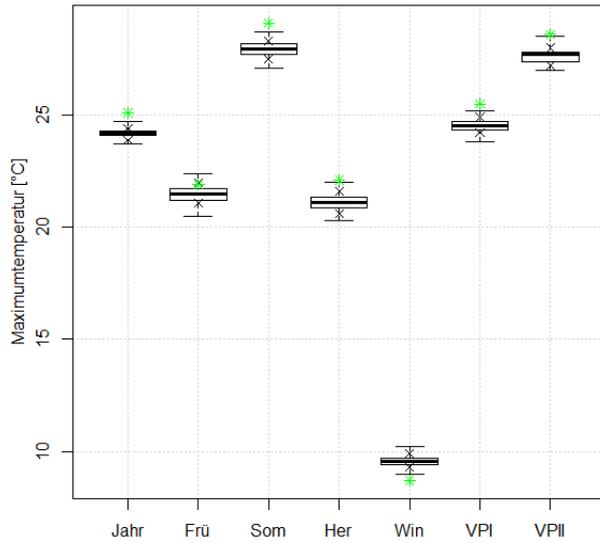
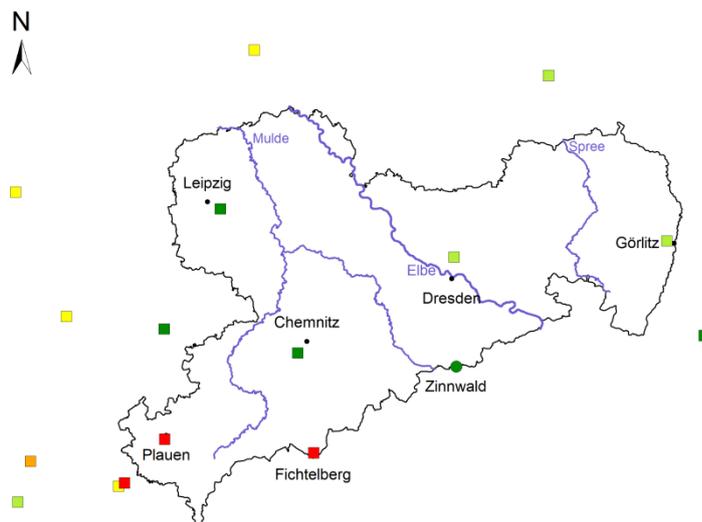
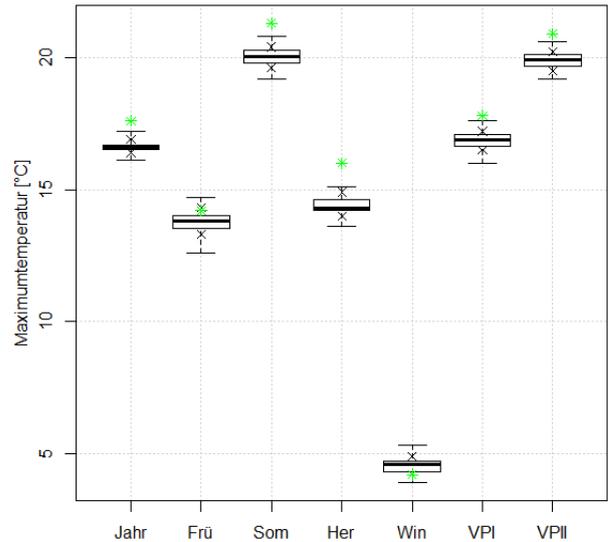


Abbildung 27: Maximumtemperatur TX10 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für den Winter (unten)

### Dresden-Klotzsche



### Fichtelberg

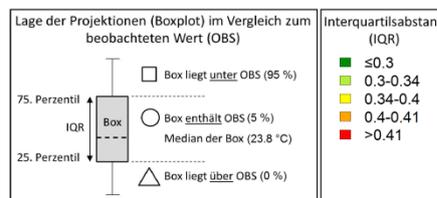


### Vergleich WEREXV mit Beobachtungen Maximumtemperatur 90. Perzentil [°C] Vegetationsperiode I 1961-1990

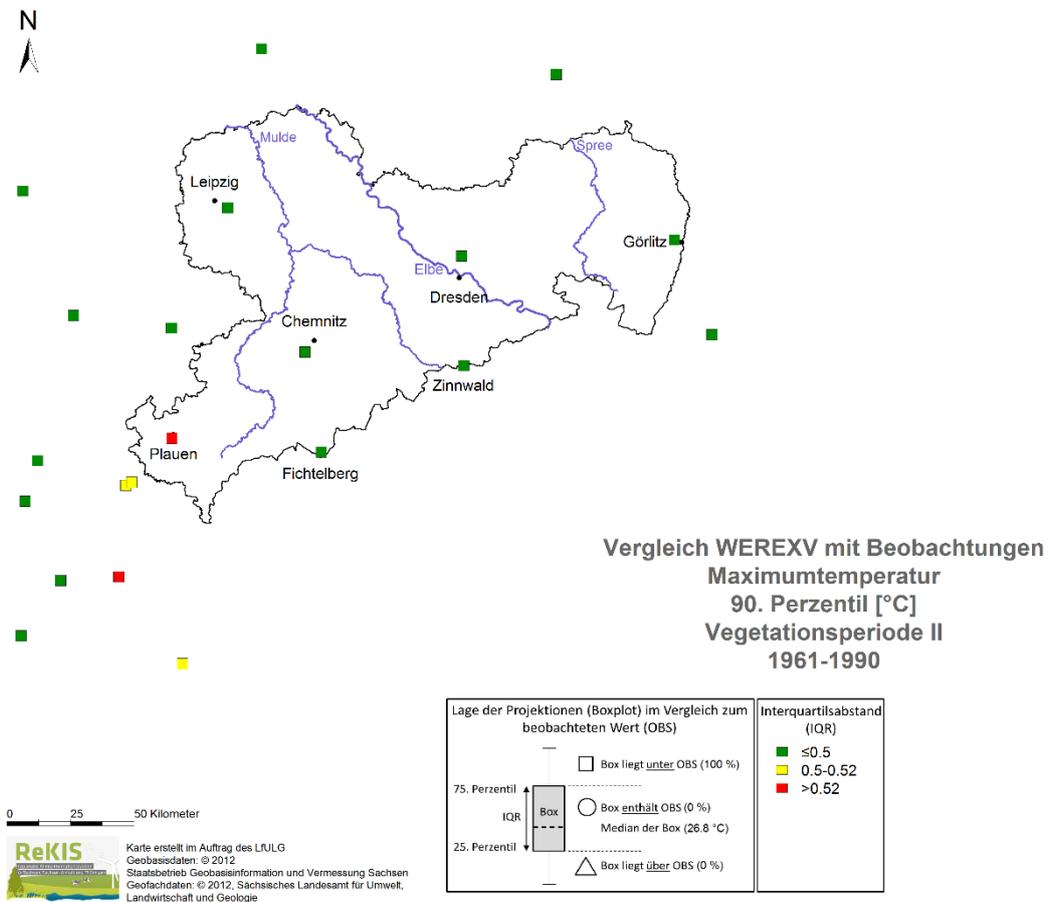
0 25 50 Kilometer



Karte erstellt im Auftrag des LfULG  
Geobasisdaten: © 2012  
Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen  
Geofachdaten: © 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt,  
Landwirtschaft und Geologie



**Abbildung 28: Maximumtemperatur TX90 – Höhe: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für das Kalenderjahr, Jahreszeiten und Vegetationsperioden (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet für die VPI (unten)**



### Fortsetzung Abbildung 28: Vegetationsperiode II

#### Über-/Überschreitungstage von Extremtemperaturen

Die Unter- bzw. Überschreitungstage von Extremtemperaturen werden perzentilbasiert für die Indizes der Minimumtemperatur TN10 (Abbildung 29 bis Abbildung 31), TN90 (Abbildung 32 bis Abbildung 34), der Maximumtemperatur TX10 (Abbildung 35 bis Abbildung 37) und TX90 (Abbildung 38 bis Abbildung 40) analysiert. Betrachtete Zeiträume sind das Kalenderjahr, die Jahreszeiten und die Vegetationsperiode der Periode 1961–2000 sowie der Dekaden. Vollständigkeitshalber wurden alle Indizes für alle Zeiträume berechnet. Aber nicht alle Indizes haben für alle Zeiten eine hohe Aussagekraft. Ein Überblick hierzu gibt Tabelle 13. In Tabelle 14 werden die in den Karten aufgeführten prozentualen Anteile der Projektionen zusammengefasst, die im Vergleich zu den beobachteten Ereignistagen oberhalb, unterhalb bzw. innerhalb der Box (Interquartilsabstand der 120 Realisationen) liegen. Die Güte der WEREX V-Projektionen ist Tabelle 15 zu entnehmen.

**Tabelle 13: Aussagekraft für die Über-/Unterschreitungstage von Extremtemperaturereignissen (x = Aussage sinnvoll; --- = Aussage nicht sinnvoll)**

| Temperaturindizes           | Frühling | Sommer | Herbst | Winter | VP I | VP II |
|-----------------------------|----------|--------|--------|--------|------|-------|
| TX10 – Unterschreitungstage | X        | ---    | X      | X      | X    | X     |
| TX90 – Überschreitungstage  | X        | X      | X      | ---    | X    | X     |
| TN10 – Unterschreitungstage | X        | ---    | X      | X      | X    | X     |
| TN90 – Überschreitungstage  | X        | X      | X      | ---    | X    | X     |

Die mittlere jährliche Anzahl der Unterschreitungstage der **Minimumtemperatur TN10** wird von den WEREX V-Projektionen für den Gesamtzeitraum 1961–2000 im Frühling, Sommer und Herbst gut abgebildet. Im Winter kann an einem Großteil der Stationen eine Überschätzung festgestellt werden. Bei Betrachtung der Dekaden zeigt sich für die gemessenen Werte der Stationen Dresden-Klotzsche, Fichtelberg (und weitere) im Frühling eine kontinuierliche Abnahme von 1961–1970 bis 1991-2000. Diese Abnahme zeigen die WEREX V-Projektionen für den Frühling nur in den letzten beiden Dekaden. Weitere Übereinstimmungen in den Dekaden scheinen nur zufällig zu sein. Prinzipiell fällt die relative Konstanz der projizierten Werte gegenüber den beobachteten Werten auf.

Für die mittlere jährliche Anzahl der Überschreitungstage der **Minimumtemperatur TN90** ist eine deutliche Zunahme der gemessenen Werte in den Dekaden für die Vegetationsperioden zu beobachten. Verschieden stark ausgeprägt ist die Zunahme der Überschreitungstage TN90 auch in den Jahreszeiten (außer Winter) und für das Kalenderjahr festzustellen. Diese dekadische Zunahme in den gemessenen Werten wird von den WEREX V-Projektionen für Dresden-Klotzsche, Fichtelberg und weitere Stationen abgebildet. Für einen Großteil der Stationen kann für die Vegetationsperiode I eine Unterschätzung der gemessenen Werte festgestellt werden. In der Vegetationsperiode II überwiegen die Überschätzungen.

Die mittlere jährliche Anzahl der Unterschreitungstage der **Maximumtemperatur TX10** zeigt für die gemessenen Werte im zeitlichen Verlauf der Dekaden eine hohe Variabilität, die von den WEREX V-Projektionen nicht wiedergegeben wird. Generell ist, wie in den meisten Fällen, die beste Übereinstimmung für das Kalenderjahr für den Gesamtzeitraum zu finden. Im Winter können 71 % der Stationen die Projektionen die gemessenen Werte sehr gut repräsentieren.

Die Überschreitungstage der **Maximumtemperatur TX90** zeigen für den Sommer und die Vegetationsperioden in den WEREX V-Projektionen eine kontinuierliche Zunahme von Dekade zu Dekade (Dresden-Klotzsche, Fichtelberg und weitere Stationen). Diese Zunahme ist in dieser starken Ausprägung bei den gemessenen Werten nicht zu finden. Auch die unterschiedlichen Ausprägungen der dekadischen Variabilität an den Stationen, z. B. im Frühling, werden nur teilweise getroffen. Für die Vegetationsperioden reproduzieren die meisten Stationen die Anzahl der Überschreitungstage sehr gut.

Visuell konnten keine räumlichen Verteilungsmuster in Form einer lageabhängigen Unter- bzw. Überschätzung der Projektionen gegenüber den observierten Werten festgestellt werden. Für alle Karten der Unter-/Überschreitungstage von Minimum- und Maximumtemperatur liegt der Interquartilsabstand zwischen 1 und 2 Tage für 1961–2000. Die Anzahl der Unter-/Überschreitungstage unterscheidet sich somit bei 50 % der Projektionen im Mittel um 1 bis 2 Tage pro Jahr, was ein sehr gutes Ergebnis ist. Für den Gesamtzeitraum sind die Unterschiede zwischen den Projektionen geringer als in den Dekaden.

Die Güte der neun WEREX V-Antriebe ist für die Über-/Überschreitungstage durchweg „sehr gut“, bei den besten Antrieben sind die mittleren Abweichungen kleiner 12 %. Die Antriebe EH5.CLM\_L2 und HCG2\_L1 stechen etwas heraus.

**Tabelle 14: Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für die Über-/Überschreitungstage von Extremtemperaturreignissen für den Winter und die Vegetationsperioden**

| Temperaturindizes          | 50 % der Projektionen (IQR) im Vergleich zum beobachteten Wert (OBS) | Winter [%] | VP I [%] | VP II [%] |
|----------------------------|--|------------|----------|-----------|
| TX10 – Überschreitungstage | unterschätzen  | 0          |          |           |
|                            | enthalten  | 71         | -        | -         |
|                            | überschätzen   | 29         |          |           |
| TX90 – Überschreitungstage | unterschätzen  |            | 33       | 24        |
|                            | enthalten  | -          | 62       | 48        |
|                            | überschätzen   |            | 5        | 29        |
| TN10 – Überschreitungstage | unterschätzen  | 5          |          |           |
|                            | enthalten  | 38         | -        | -         |
|                            | überschätzen   | 57         |          |           |
| TN90 – Überschreitungstage | unterschätzen  |            | 62       | 0         |
|                            | enthalten  | -          | 38       | 38        |
|                            | überschätzen   |            | 0        | 62        |

**Tabelle 15: Güte der WEREX V-Projektionen für die Über-/Überschreitungstage von Temperaturextremereignissen**

| WEREX V Lauf | TN10 Winter | TN90 VP I | TN90p VP II | TX10 Winter | TX90 VP I | TX90 VP II |
|--------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|------------|
| EH5_L1       | 1,0         | 1,4       | 1,1         | 1,0         | 1,2       | 1,0        |
| EH5_L2       | 1,0         | 1,7       | 1,1         | 1,0         | 1,2       | 1,0        |
| EH5_L3       | 1,0         | 1,7       | 1,0         | 1,0         | 1,2       | 1,0        |
| EH5.CLM_L1   | 1,3         | 1,7       | 1,1         | 1,1         | 1,4       | 1,0        |
| EH5.CLM_L2   | 1,0         | 1,5       | 1,1         | 1,0         | 1,1       | 1,1        |
| EH5.RACMO_L3 | 1,0         | 1,8       | 1,0         | 1,0         | 1,3       | 1,0        |
| EH5.REMO_L3  | 1,0         | 1,8       | 1,0         | 1,0         | 1,2       | 1,0        |
| HC3C_L1      | 1,0         | 1,0       | 1,2         | 1,0         | 1,2       | 1,0        |
| HCG2_L1      | 1,0         | 1,1       | 1,2         | 1,0         | 1,0       | 1,0        |

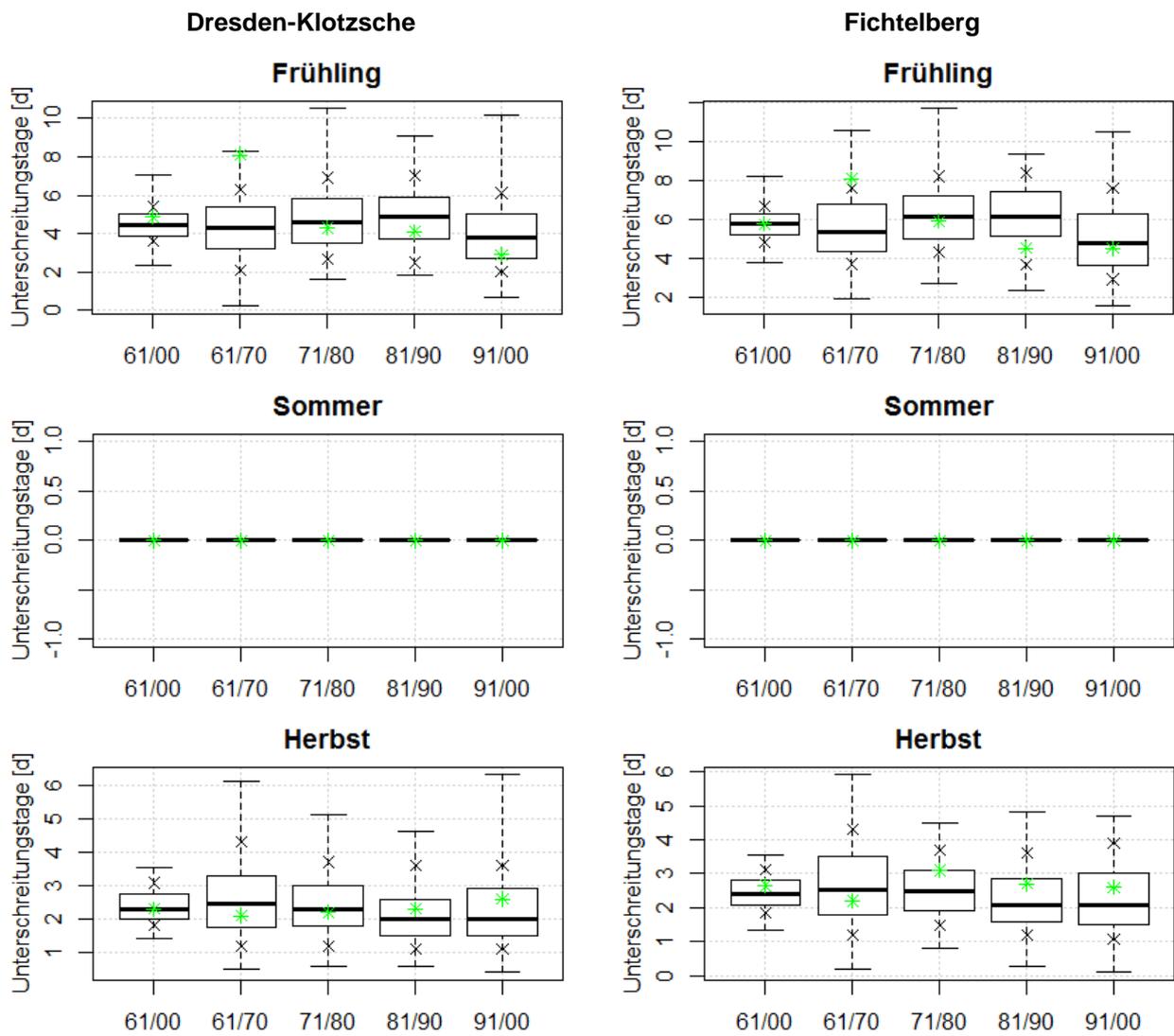
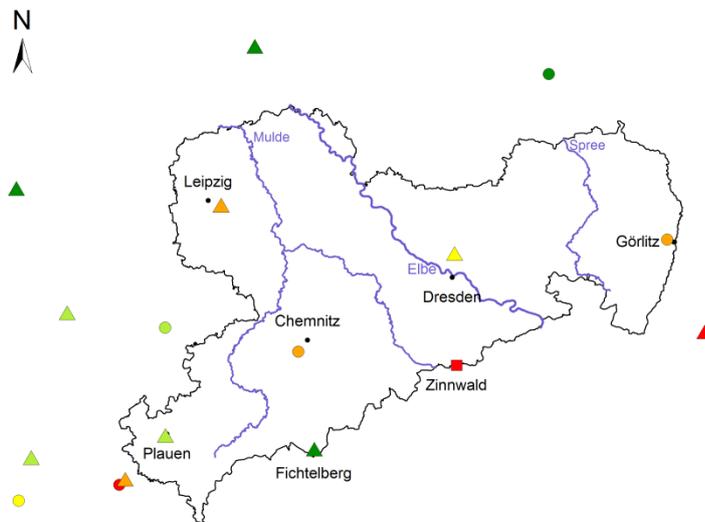
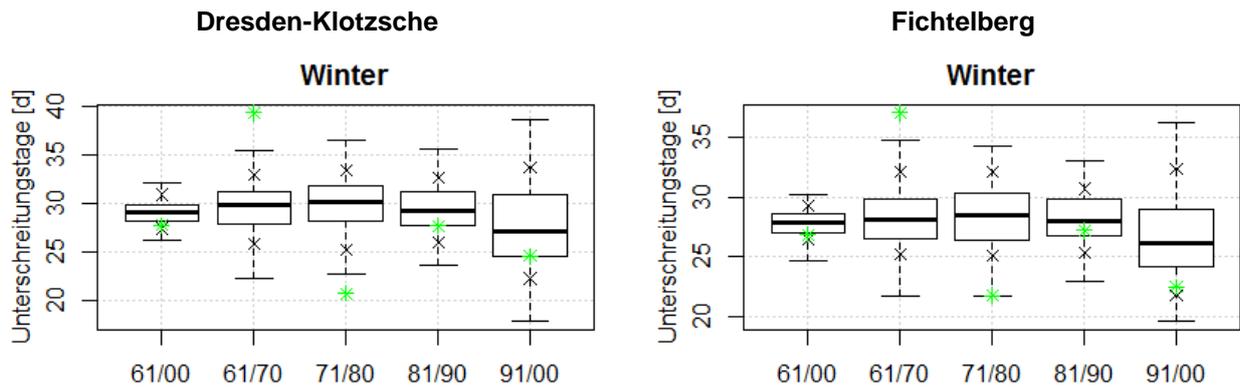


Abbildung 29: Minimumtemperatur TN10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten (1961–2000 und Dekaden)



Vergleich WEREXV mit Beobachtungen  
 Minimumtemperatur - 10. Perzentil  
 Mittlere Unterschreitungstage [d]  
 Winter  
 1961-2000

0 25 50 Kilometer  
 ReKIS Karte erstellt im Auftrag des LfULG  
 Geobasisdaten: © 2012  
 Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen  
 Geofachdaten: © 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt,  
 Landwirtschaft und Geologie

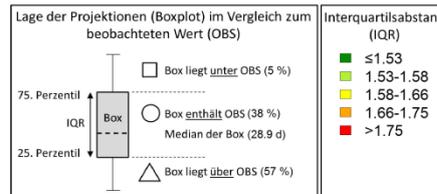
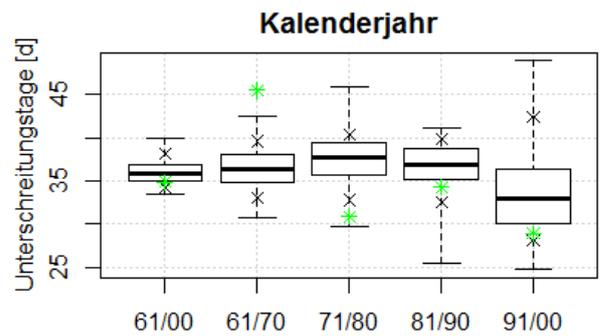
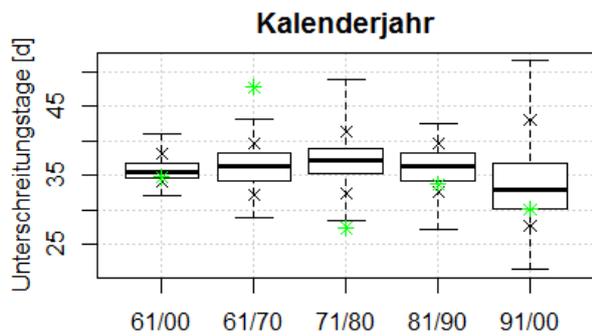
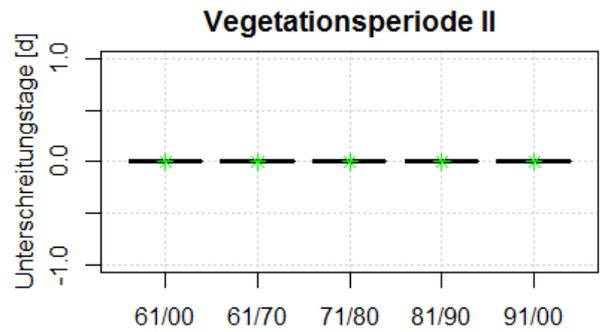
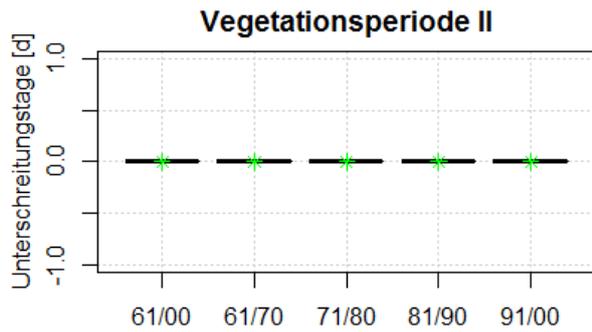
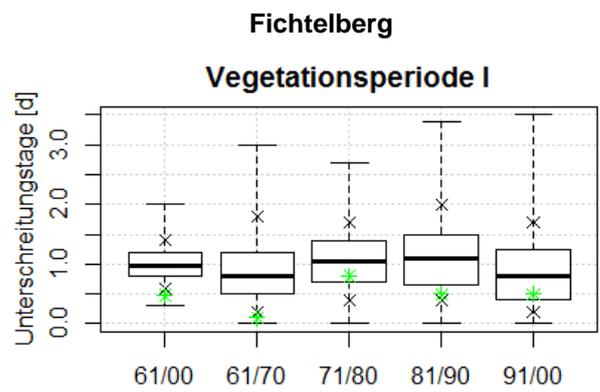
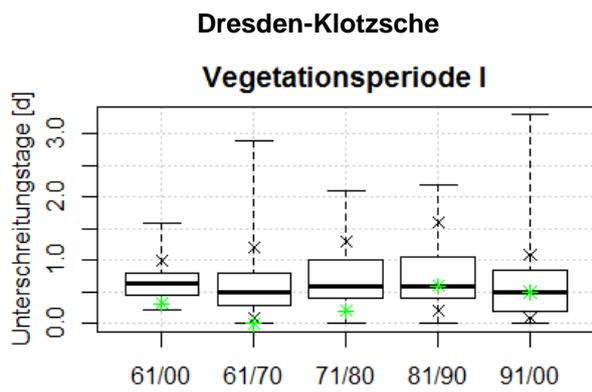
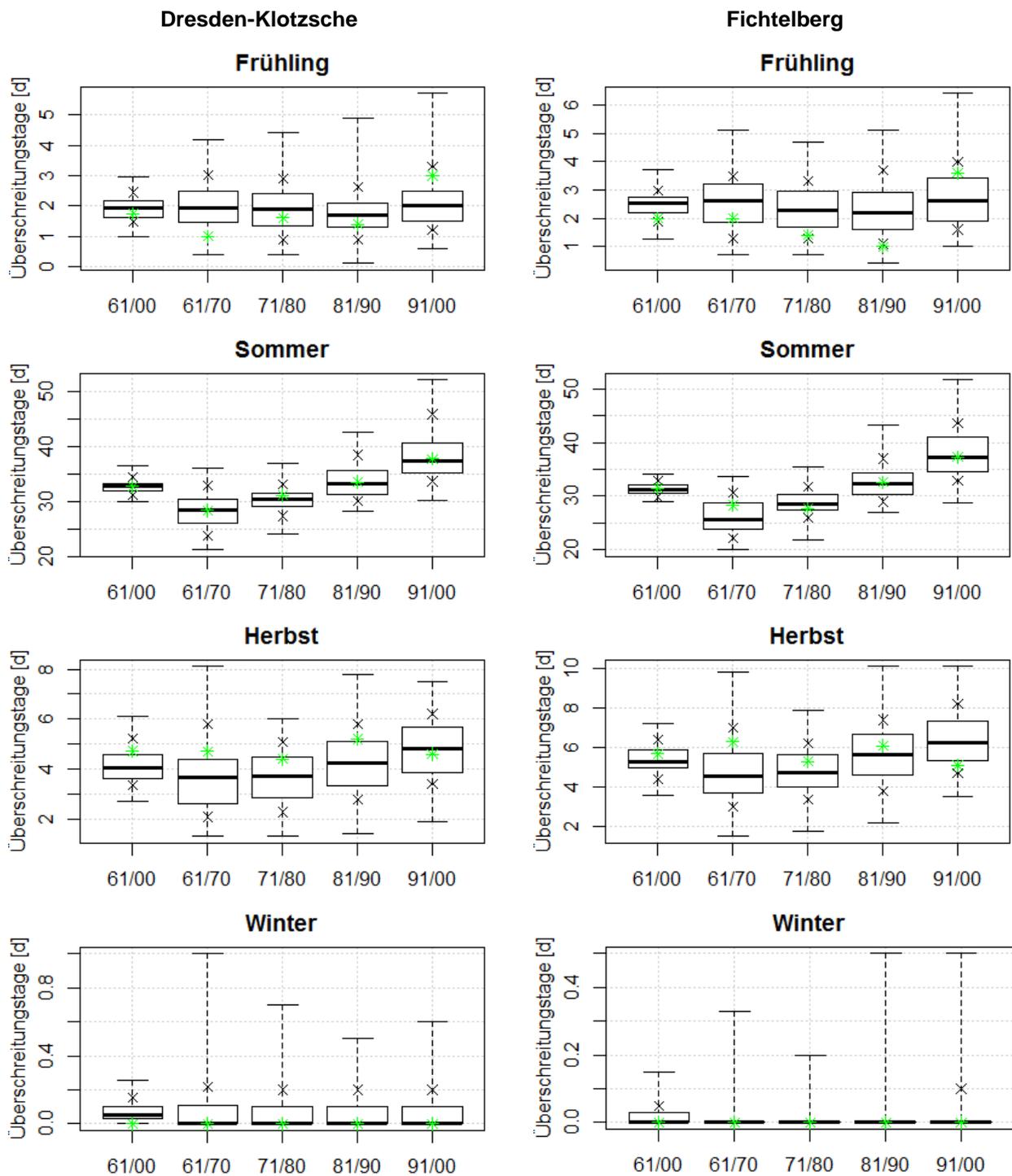


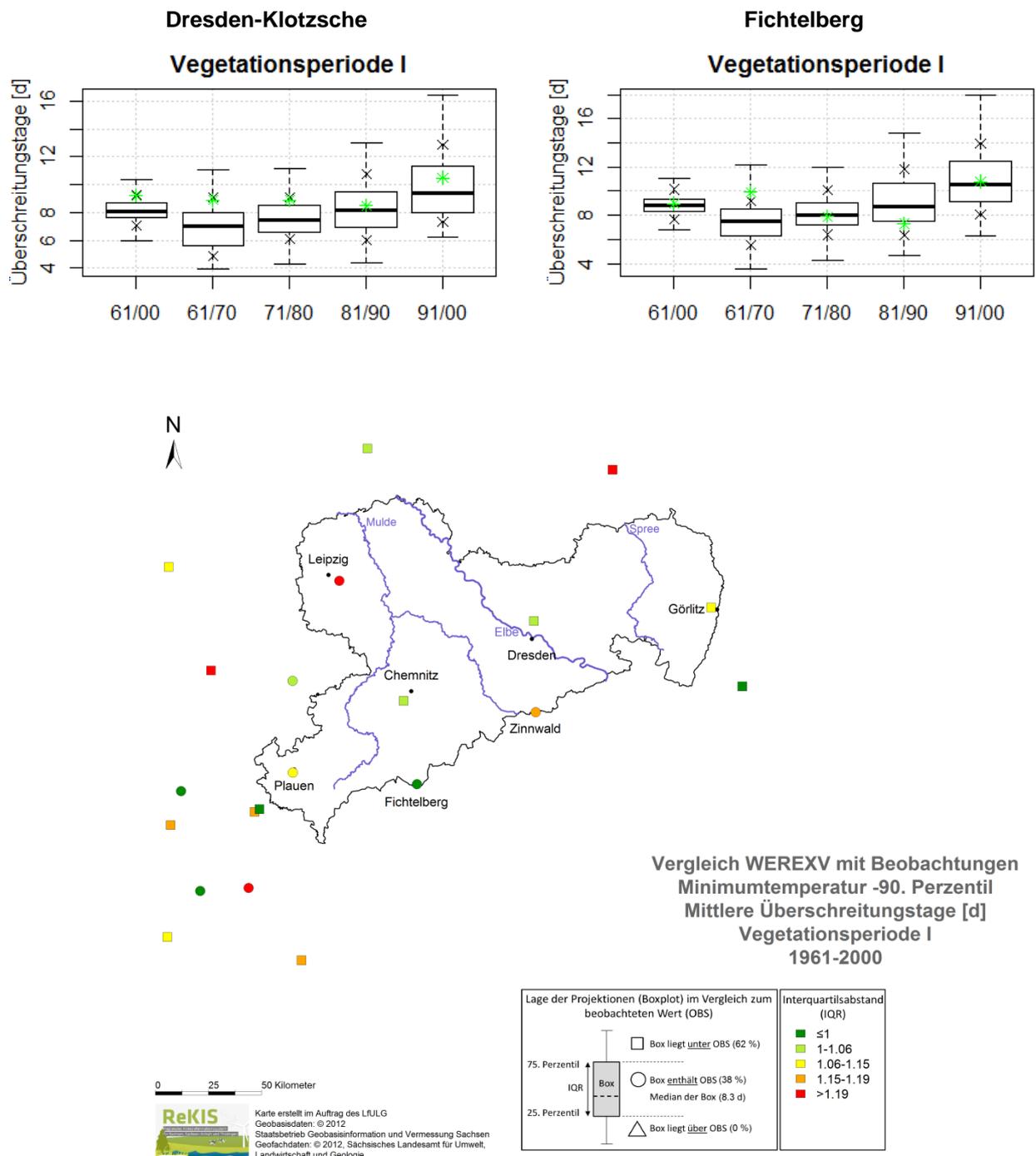
Abbildung 30: Minimumtemperatur TN10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und für die Fläche für den Winter (unten)



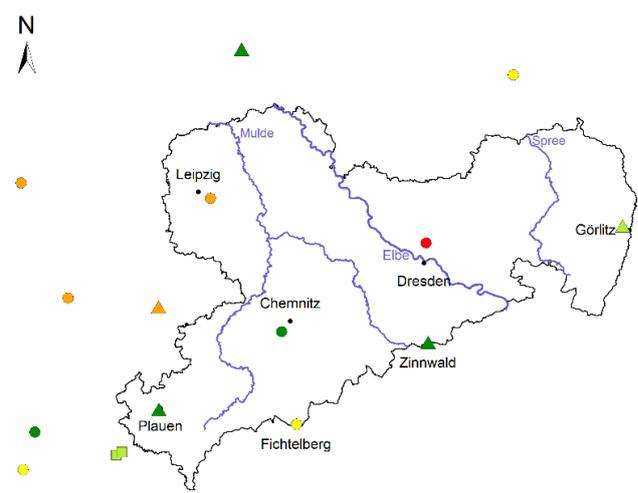
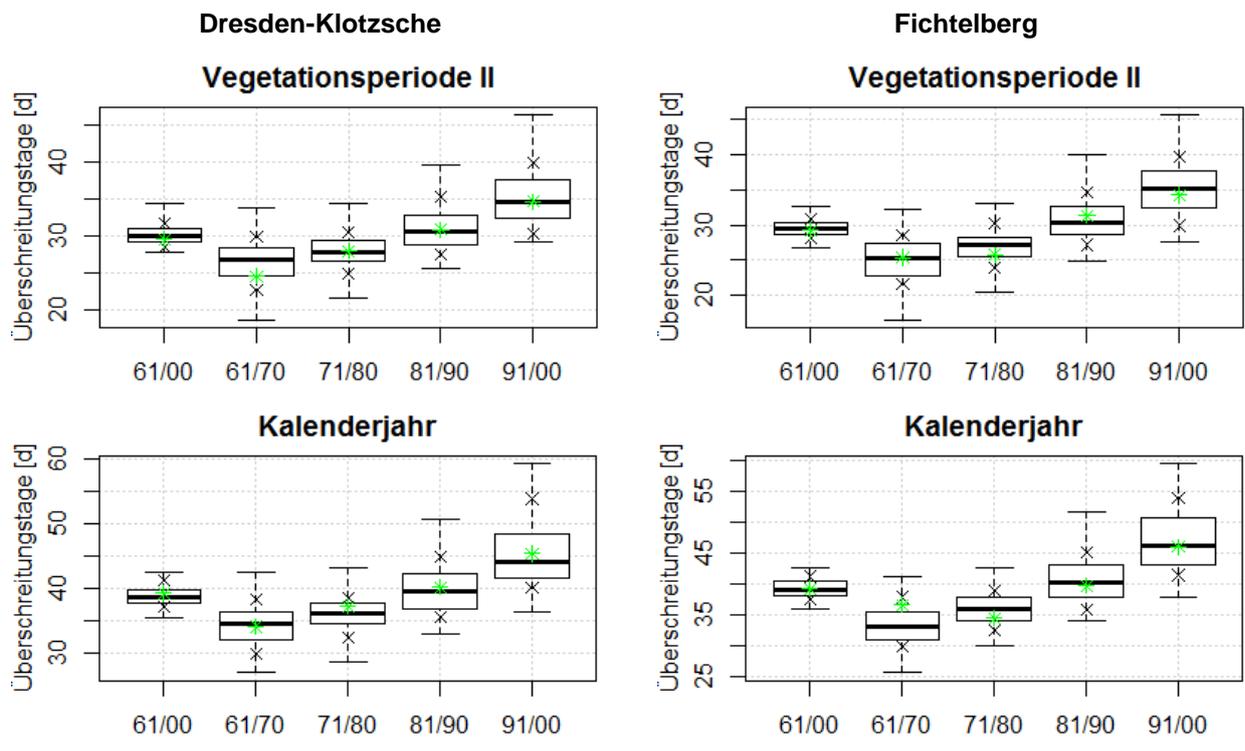
**Abbildung 31: Minimumtemperatur TN10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Vegetationsperiode I und II und das Kalenderjahr (1961–2000 und Dekaden)**



**Abbildung 32: Minimumtemperatur TN90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten**



**Abbildung 33: Minimumtemperatur TN90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und für die Fläche (1961–2000) für die VPI (unten)**



Vergleich WEREXV mit Beobachtungen  
 Minimumtemperatur - 90. Perzentil  
 Mittlere Überschreitungstage [d]  
 Vegetationsperiode II  
 1961-2000

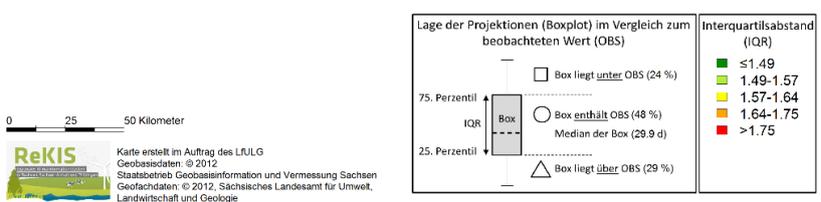
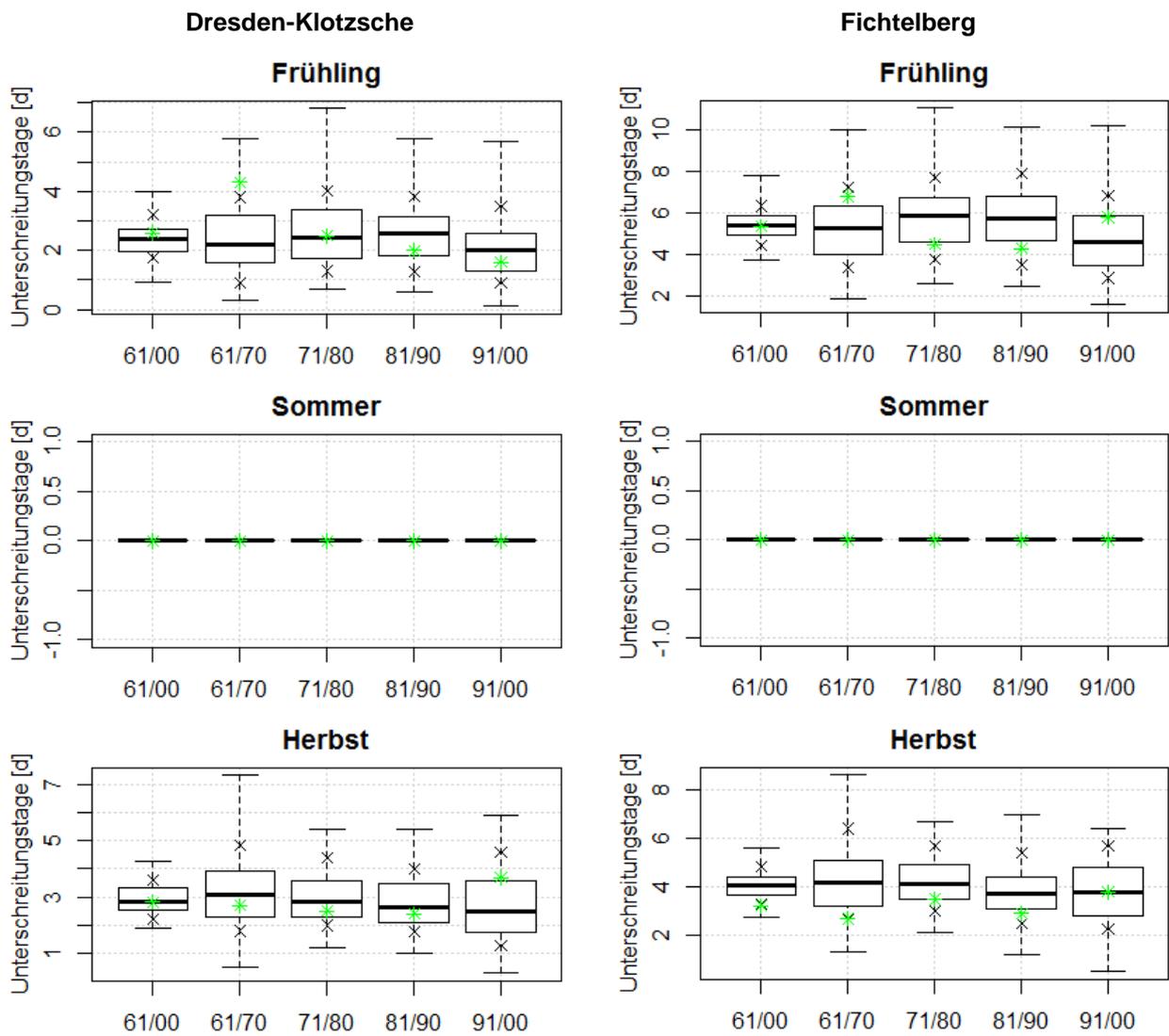
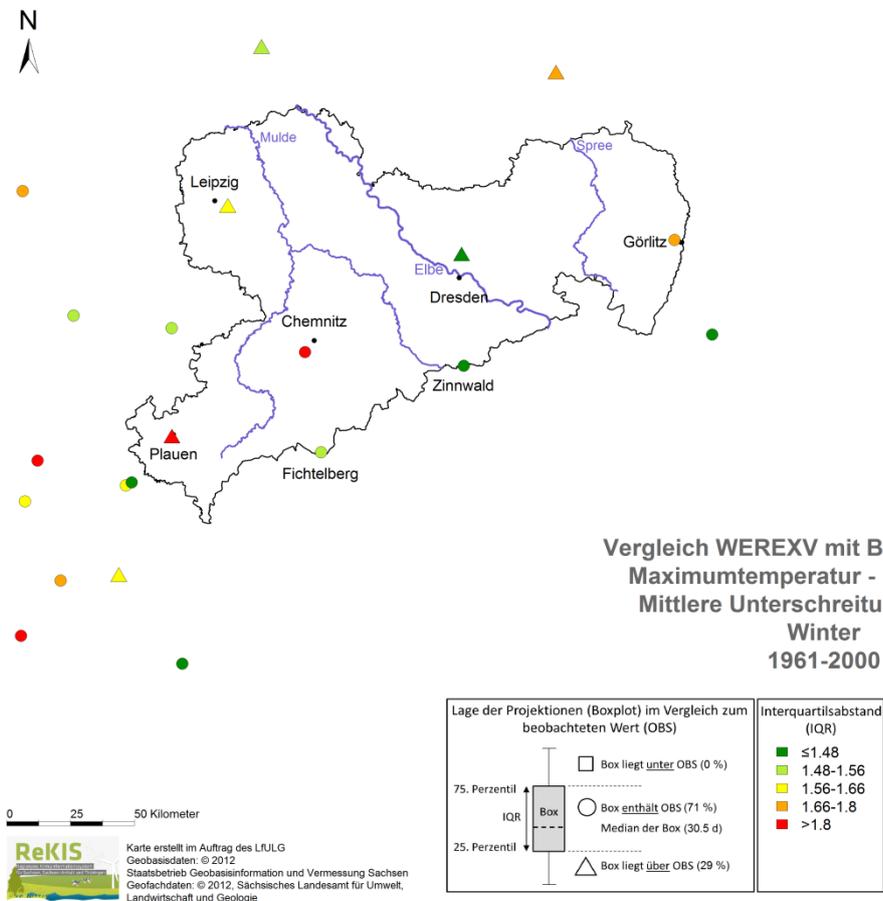
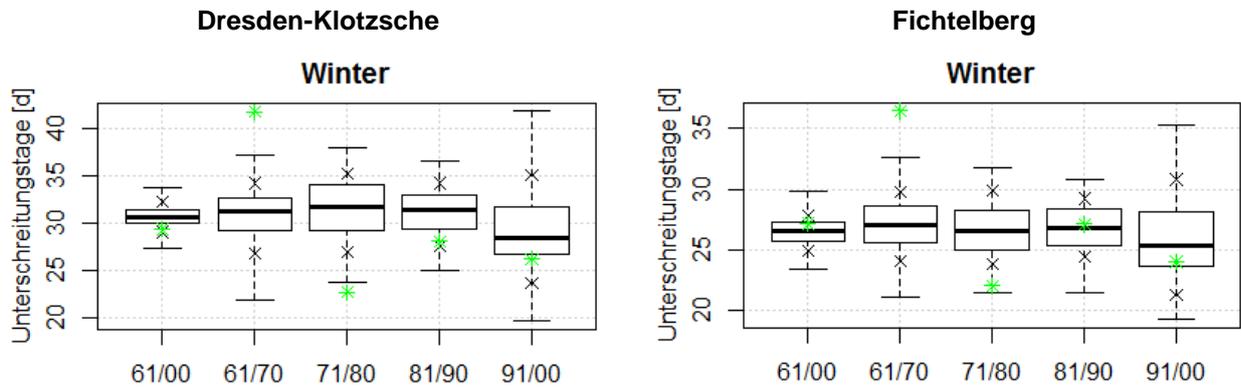


Abbildung 34: Minimumtemperatur TN90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und für die Fläche (1961–2000) für die VPII (unten)



**Abbildung 35: Maximumtemperatur TX10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten (1961–2000 und Dekaden)**



**Abbildung 36: Minimumtemperatur TX10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) sowie für die Fläche für den Winter (unten)**

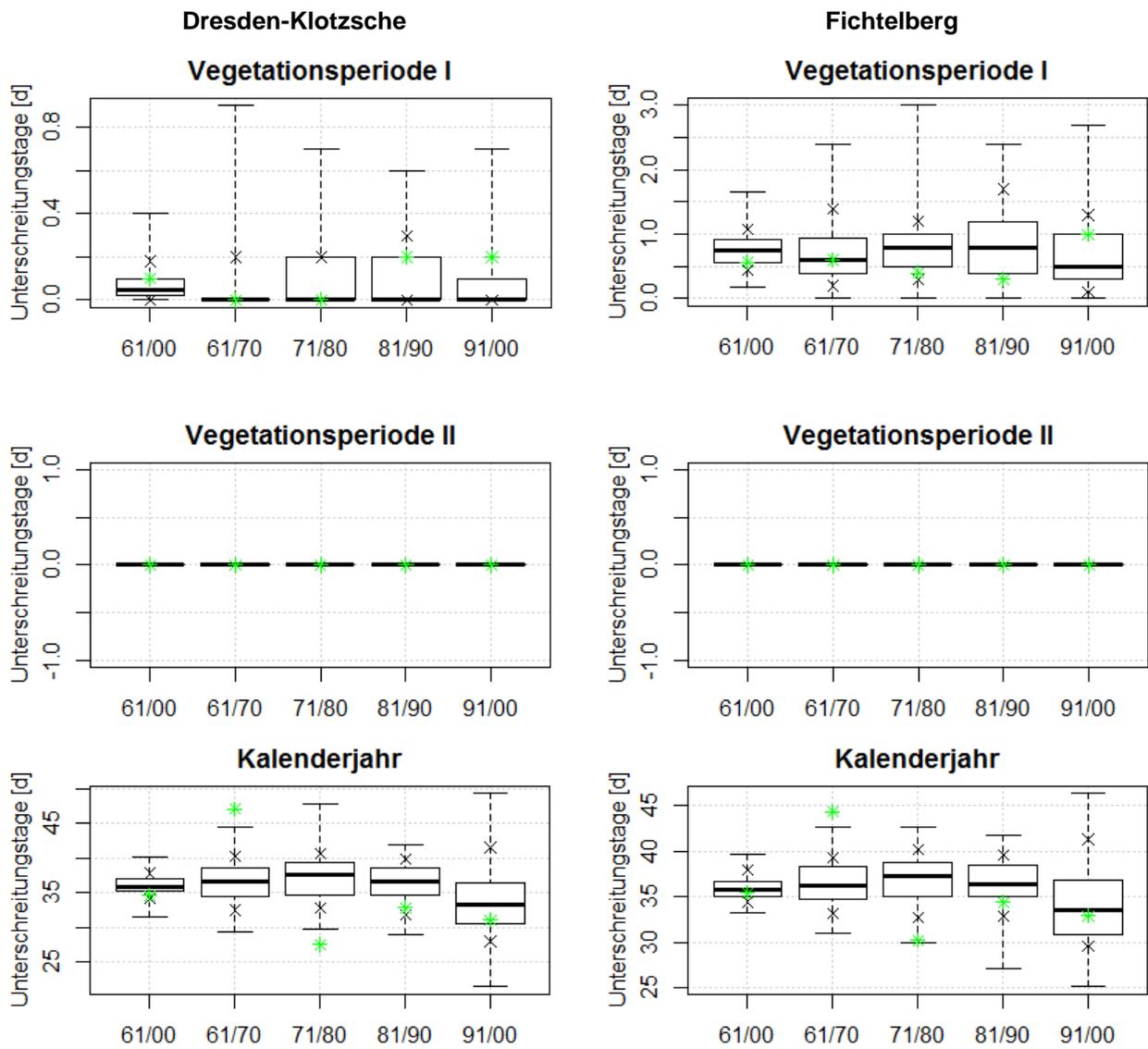
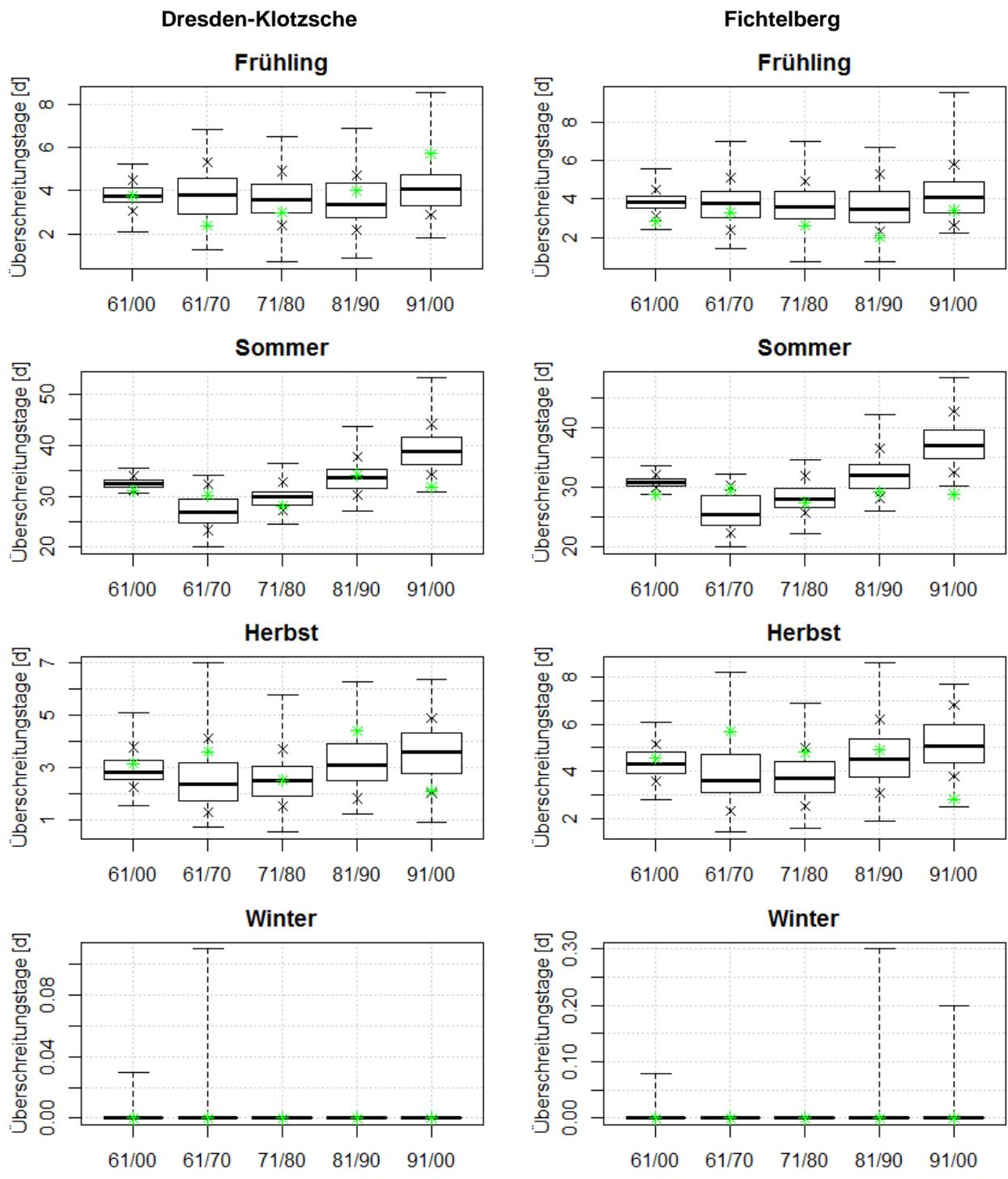
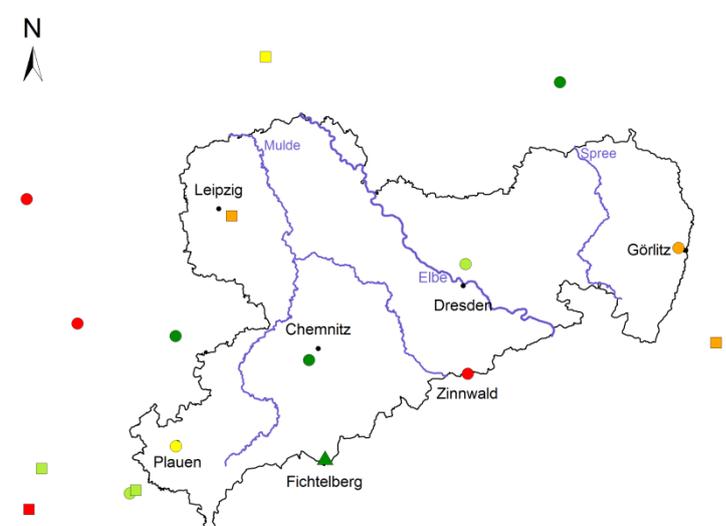
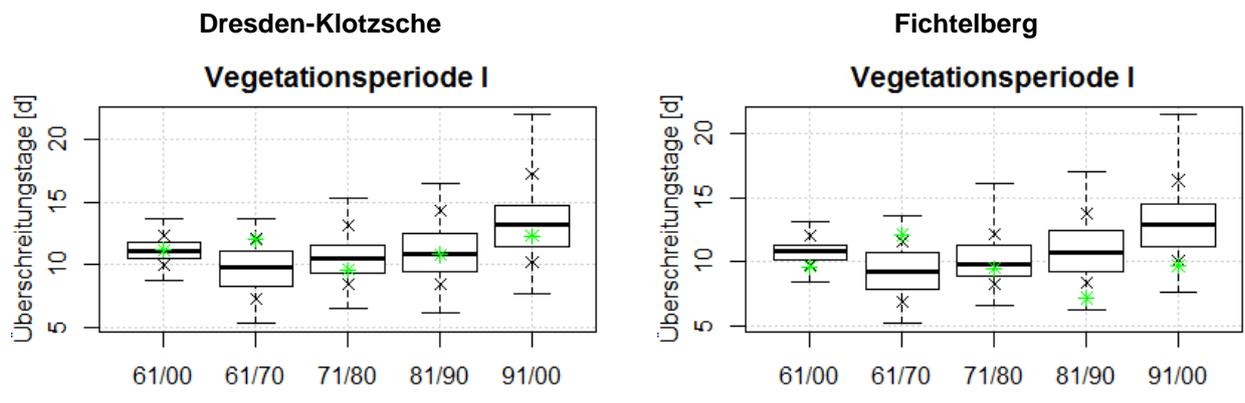


Abbildung 37: Maximumtemperatur TX10 – Unterschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Vegetationsperioden sowie das Kalenderjahr (1961–2000 und Dekaden)



**Abbildung 38: Maximumtemperatur TX90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg für die Jahreszeiten**



Vergleich WEREXV mit Beobachtungen  
 Maximumtemperatur -90. Perzentil  
 Mittlere Überschreitungstage [d]  
 Vegetationsperiode I  
 1961-2000

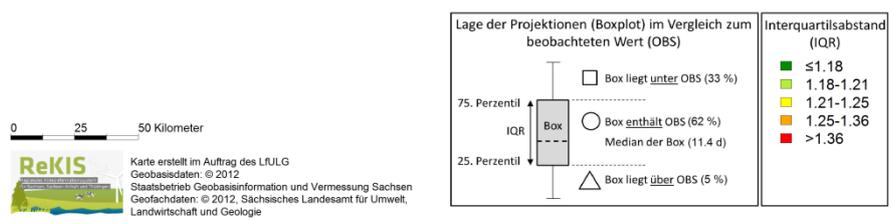
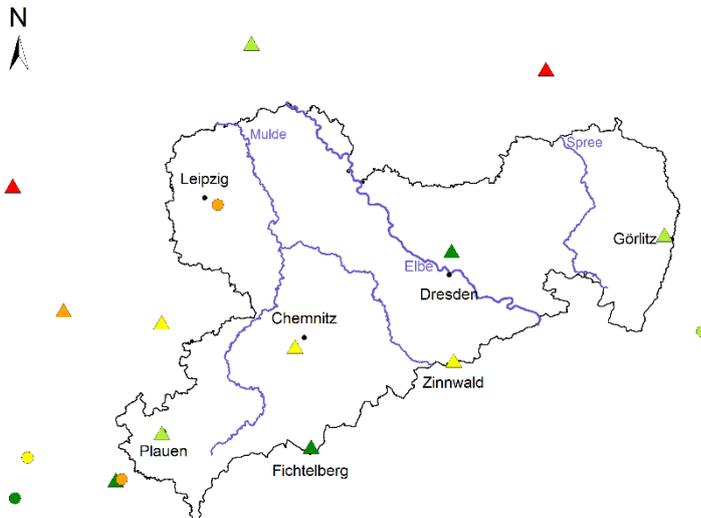
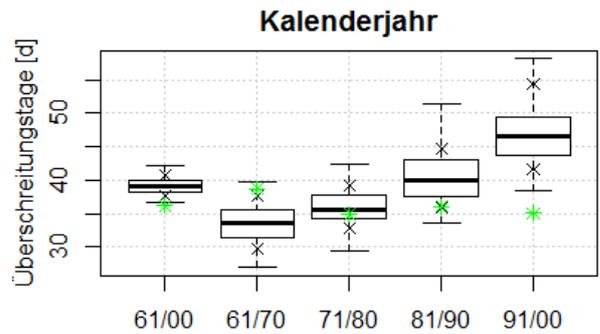
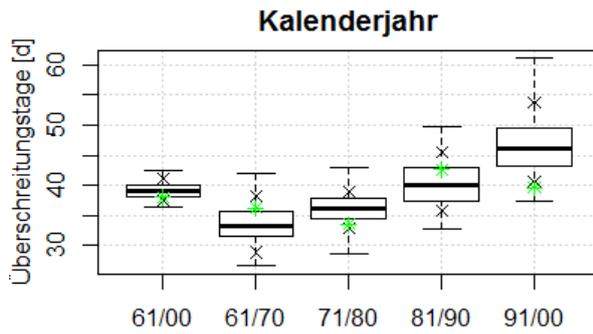
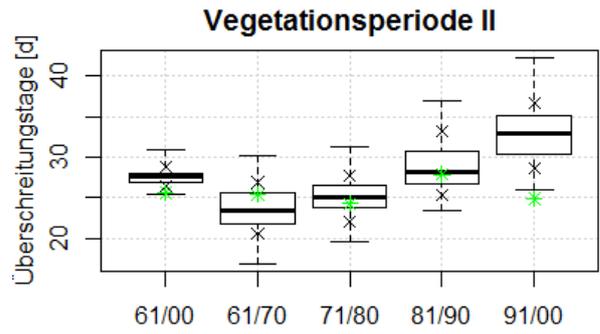
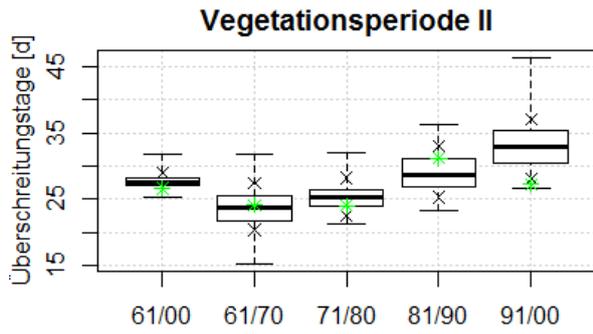


Abbildung 39: Maximumtemperatur TX90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) sowie für die Fläche für die VPI (unten)

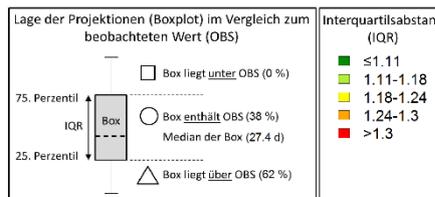
### Dresden-Klotzsche

### Fichtelberg



Vergleich WEREXV mit Beobachtungen  
 Maximumtemperatur - 90. Perzentil  
 Mittlere Überschreitungstage [d]  
 Vegetationsperiode II  
 1961-2000

0 25 50 Kilometer  
**ReKIS**  
 Karte erstellt im Auftrag des LfULG  
 Geobasisdaten: © 2012  
 Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen  
 Geofachdaten: © 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt,  
 Landwirtschaft und Geologie



## Abbildung 40: Maximumtemperatur TX90 – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) sowie für die Fläche für die VPII (unten)

### Ereignistage, Kälte- und Wärmeperioden

Basierend auf festen Schwellenwerten werden die Ereignistage Frosttage (Abbildung 41), Eistage (Abbildung 42), Sommertage (Abbildung 43) und Heiße Tage (Abbildung 44) abgebildet. Des Weiteren werden auf Perzentilen basierende Kälteperioden (Abbildung 45) und Wärmeperioden (Abbildung 46) visualisiert. Für alle Indizes ist der Bezugszeitraum das Kalenderjahr. Für jeden Index werden für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg ein Boxplot für den Gesamtzeitraum 1961–2000 und die Dekaden abgebildet. Zusätzlich gibt es eine flächenhafte Aussage über den Gesamtzeitraum. In Tabelle 16 werden die in den Karten aufgeführten prozentualen Anteile der Projektionen zusammengefasst, die im Vergleich zu den beobachteten Ereignistagen oberhalb, unterhalb bzw. innerhalb der Box (Interquartilsabstand der 120 Realisationen) liegen. Die Güte der WEREX V-Projektionen ist Tabelle 17 zu entnehmen.

Die mittlere jährliche Anzahl an **Frosttagen** wird für den Gesamtzeitraum 1961–2000 für das Kalenderjahr an den exemplarischen Stationen getroffen, ein Bild, das sich in der Fläche nur zum Teil wiederfindet. Oft werden die Frosttage auch unterschätzt. Die zeitliche Variabilität in den Dekaden wird für Dresden-Klotzsche von den WEREX V-Projektionen nicht abgebildet. Die beobachteten Tendenzen an der Station Fichtelberg sind in den Projektionen zu erkennen.

Flächendeckend wird die mittlere jährliche Anzahl der **Eistage** für den Gesamtzeitraum 1961–2000 unterschätzt (90 % der Stationen). Für die zeitliche Variabilität in den Dekaden zeigt sich ein ähnliches Erscheinungsbild wie bei den Frosttagen: keine Abbildung an der Station Dresden-Klotzsche und tendenziell richtige Abbildung des Rückgangs an Eistagen an der Station Fichtelberg.

Die mittlere jährliche Anzahl der **Sommertage** wird für den Gesamtzeitraum an allen Stationen unterschätzt. Die WEREX V-Projektionen zeigen in den Dekaden eine stetige Zunahme der Sommertage. Diese Tendenz wurde an den Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg nicht so eindeutig gemessen. Für Dresden betragen die Abweichungen in einigen Dekaden mehr als 10 Tage (44 %).

Die mittlere jährliche Anzahl an **Heißen Tagen** wird für den Gesamtzeitraum flächendeckend unterschätzt. In den Dekaden wurde an der Station Dresden-Klotzsche eine stetige Zunahme der Anzahl Heißer Tage von festgestellt (1961–1990). Dieser Trend wird von den WEREX V-Projektionen ebenso angezeigt. Aufgrund der Lage des Fichtelbergs auf dem Erzgebirgskamm sind dort keine Heißen Tage festzustellen.

Für den Gesamtzeitraum 1961–2000 ist eine flächendeckende Überschätzung der mittleren jährlichen Anzahl an Tagen, die **Kälteperioden (CSDI)** darstellen, festzustellen. Dabei ist die Überschätzung für die Station Dresden-Klotzsche stärker als für den Fichtelberg. Die zeitliche Variabilität der gemessenen Werte in den Dekaden wird von den Projektionen nicht abgebildet.

Flächendeckend wird die mittlere jährliche Anzahl an Tagen, die **Wärmeperioden (WSDI)** darstellen, überschätzt. Für Dresden-Klotzsche und den Fichtelberg zeigt sich eine Zunahme der Wärmeperioden von Dekade zu Dekade. Dieser Trend wird auch von den WEREX V-Projektionen abgebildet. Dieses Muster konnte bei weiteren Stationen beobachtet werden.

Visuell konnten keine räumlichen Verteilungsmuster in Form einer lageabhängigen Unter- bzw. Überschätzung der Projektionen gegenüber den observierten Werten festgestellt werden.

Die Güte der besten WEREX V-Antriebe ist für die Frost- und Eistage „sehr gut“ (< 10 %), für die Sommer- und Heißen Tage „gut“ bis „befriedigend“. Hierbei ist der Trend: je extremer der Index, desto schlechter dessen Abbildung. Die Projektionen sind mit Abweichungen von deutlich mehr als 30 % größtenteils nicht hinsichtlich Kälte- und Wärmeperioden belastbar. Die beiden Antriebe EH5.RACMO\_L3, EH5\_L3 performieren am besten.

**Tabelle 16: Prozentuale Lage der Projektionen im Vergleich zum beobachteten Wert für Ereignistage, Kälte- und Wärmeperioden für das Kalenderjahr**

| Temperaturindizes    | 50 % der Projektionen (IQR) im Vergleich zum beobachteten Wert (OBS) | Kalenderjahr [%] |
|----------------------|--|------------------|
| Frosttage            | unterschätzen  | <b>52</b>        |
|                      | enthalten  | 43               |
|                      | überschätzen   | 5                |
| Eistage              | unterschätzen  | <b>90</b>        |
|                      | enthalten  | 10               |
|                      | überschätzen   | 0                |
| Sommertage           | unterschätzen  | <b>100</b>       |
|                      | enthalten  | 0                |
|                      | überschätzen   | 0                |
| Hitzetage            | unterschätzen  | <b>90</b>        |
|                      | enthalten  | 10               |
|                      | überschätzen   | 0                |
| Kälteperioden (CSDI) | unterschätzen  | 0                |
|                      | enthalten  | 0                |
|                      | überschätzen   | <b>100</b>       |
| Wärmeperioden (WSDI) | unterschätzen  | 0                |
|                      | enthalten  | 0                |
|                      | überschätzen   | <b>100</b>       |

**Tabelle 17: Güte der WEREX V-Projektionen für Temperaturextreme von Ereignistagen, Kälte- und Wärmeperioden der Periode 1961–2000**

| WEREX V-Lauf | Frosttage | Eistage | Sommertage | Heiße Tage | Kälteperioden | Wärmeperioden |
|--------------|-----------|---------|------------|------------|---------------|---------------|
| EH5_L1       | 1,0       | 1,4     | 2,5        | 3,8        | 3,9           | 3,1           |
| EH5_L2       | 1,0       | 1,9     | 2,4        | 3,4        | 3,9           | 3,1           |
| EH5_L3       | 1,0       | 1,4     | 2,1        | 3,5        | 3,9           | 3,7           |
| EH5.CLM_L1   | 1,0       | 1,9     | 2,6        | 3,6        | 4,0           | 3,0           |
| EH5.CLM_L2   | 1,0       | 1,3     | 2,3        | 3,7        | 3,8           | 3,1           |
| EH5.RACMO_L3 | 1,0       | 1,8     | 1,9        | 2,8        | 3,8           | 3,3           |
| EH5.REMO_L3  | 1,0       | 1,8     | 1,9        | 3,1        | 3,8           | 3,4           |
| HC3C_L1      | 1,0       | 1,4     | 2,6        | 3,7        | 3,8           | 3,9           |
| HCG2_L1      | 1,0       | 1,5     | 2,7        | 3,9        | 3,9           | 3,6           |

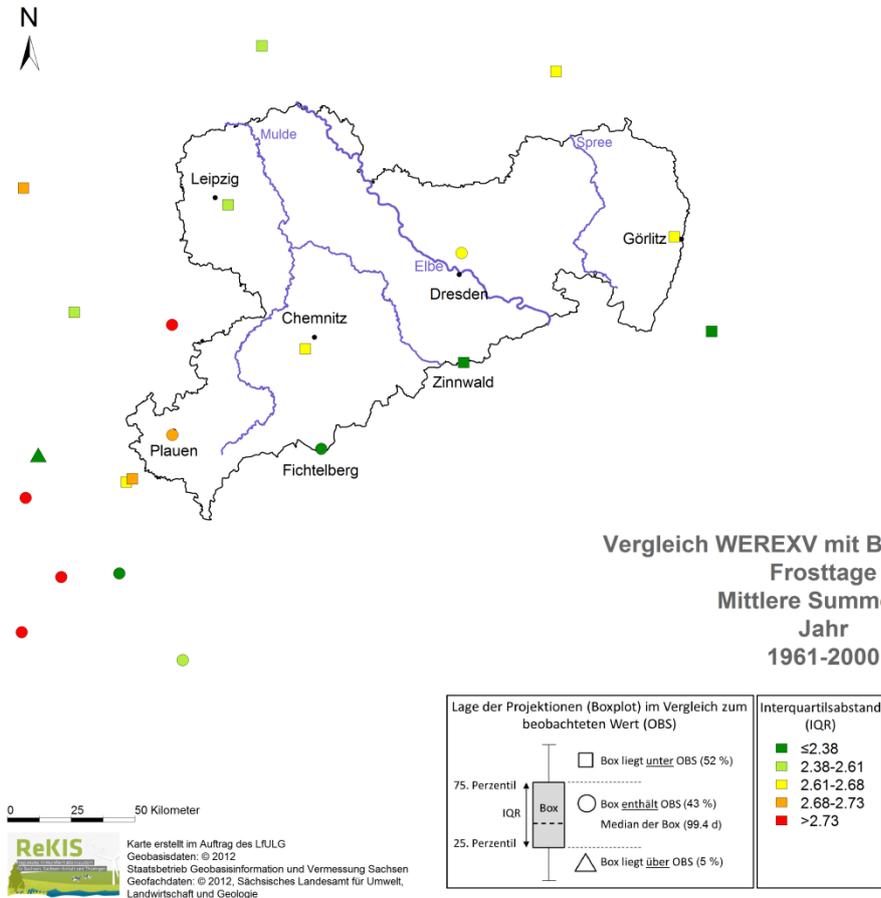
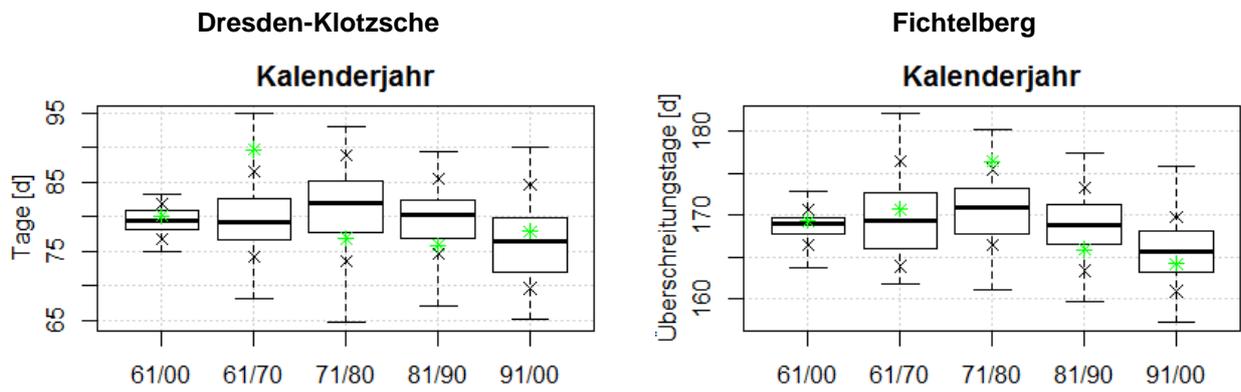


Abbildung 41: Frosttage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (1961–2000) (unten)

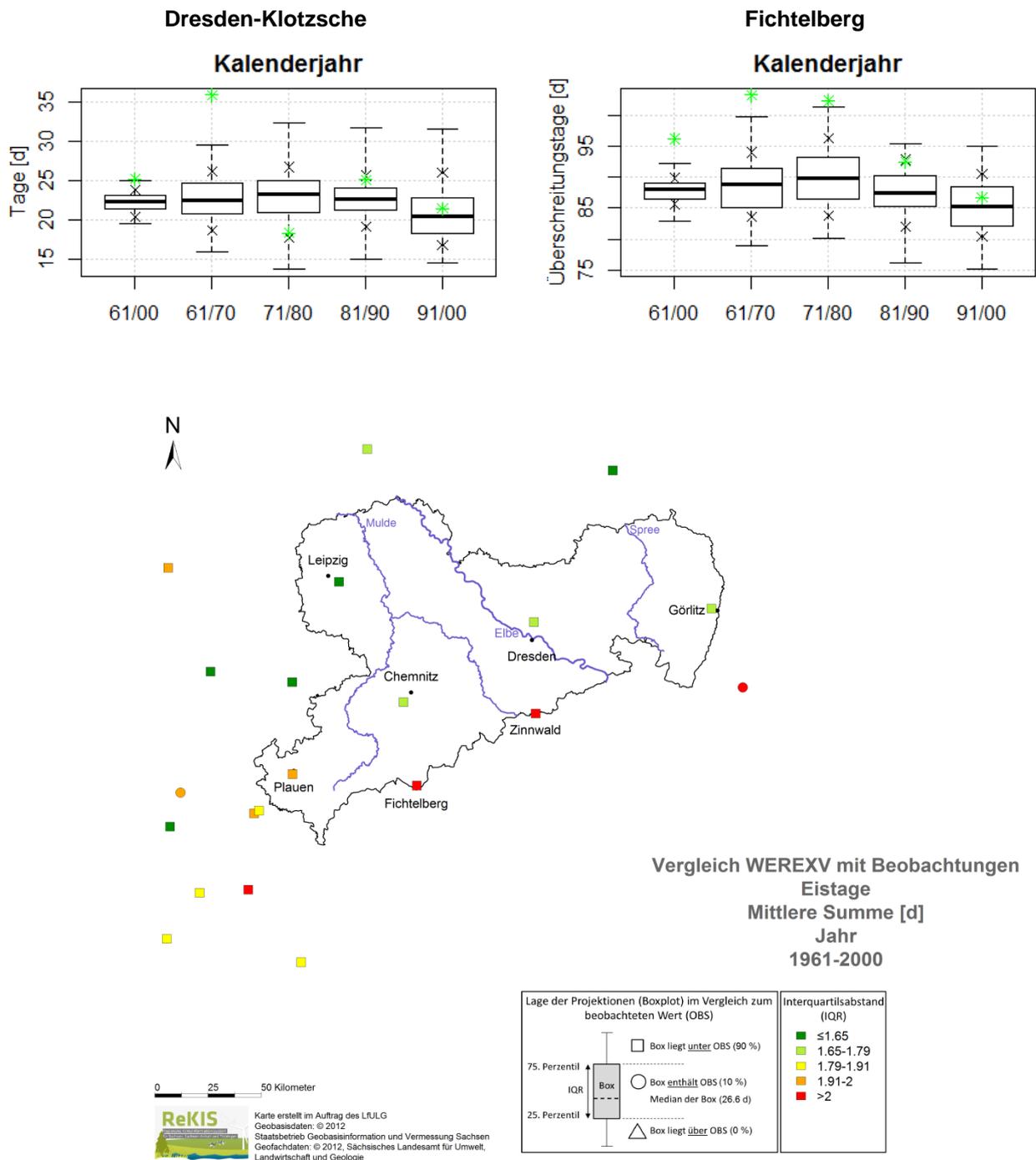
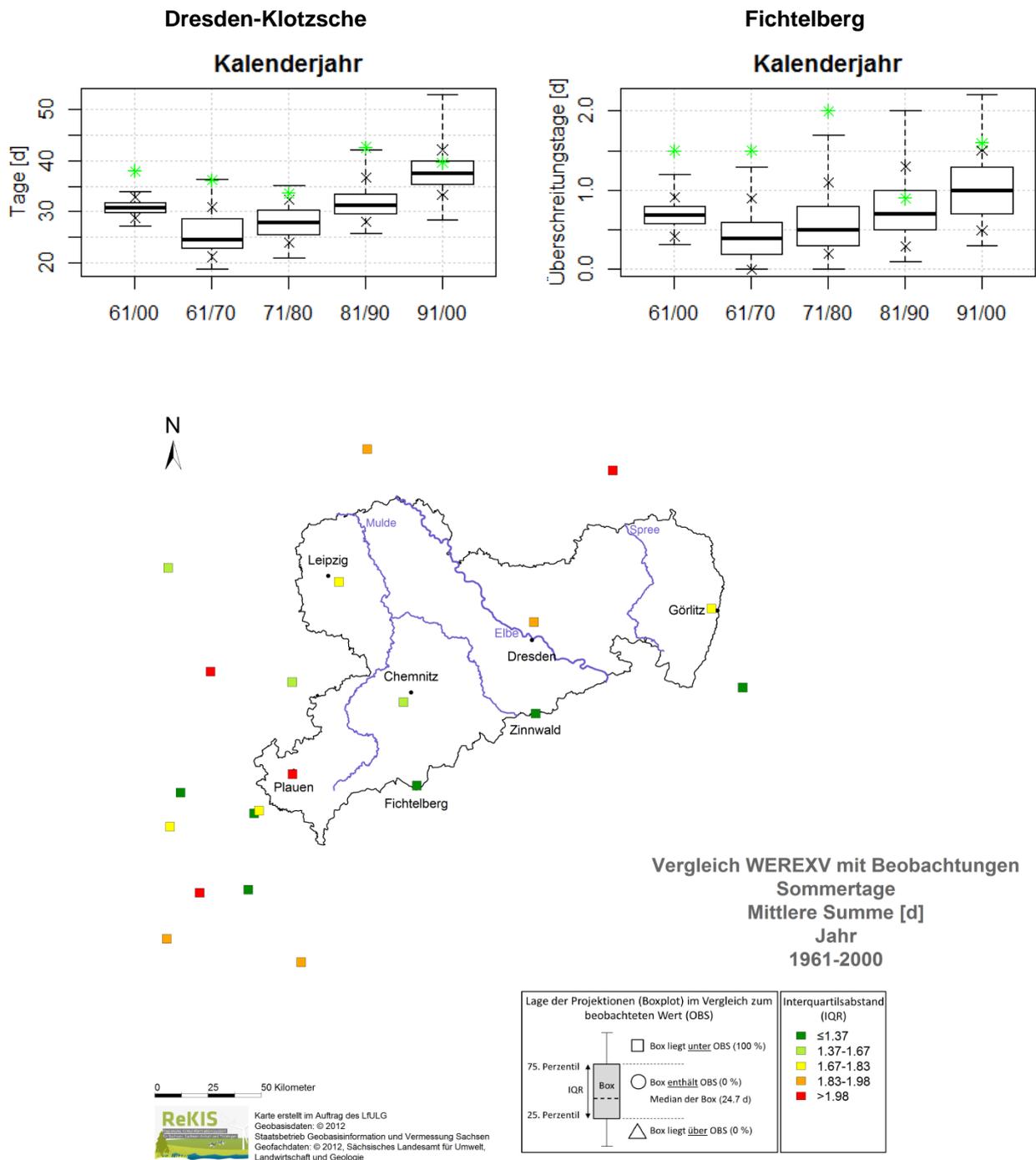


Abbildung 42: Eistage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten)



**Abbildung 43: Sommertage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten)**

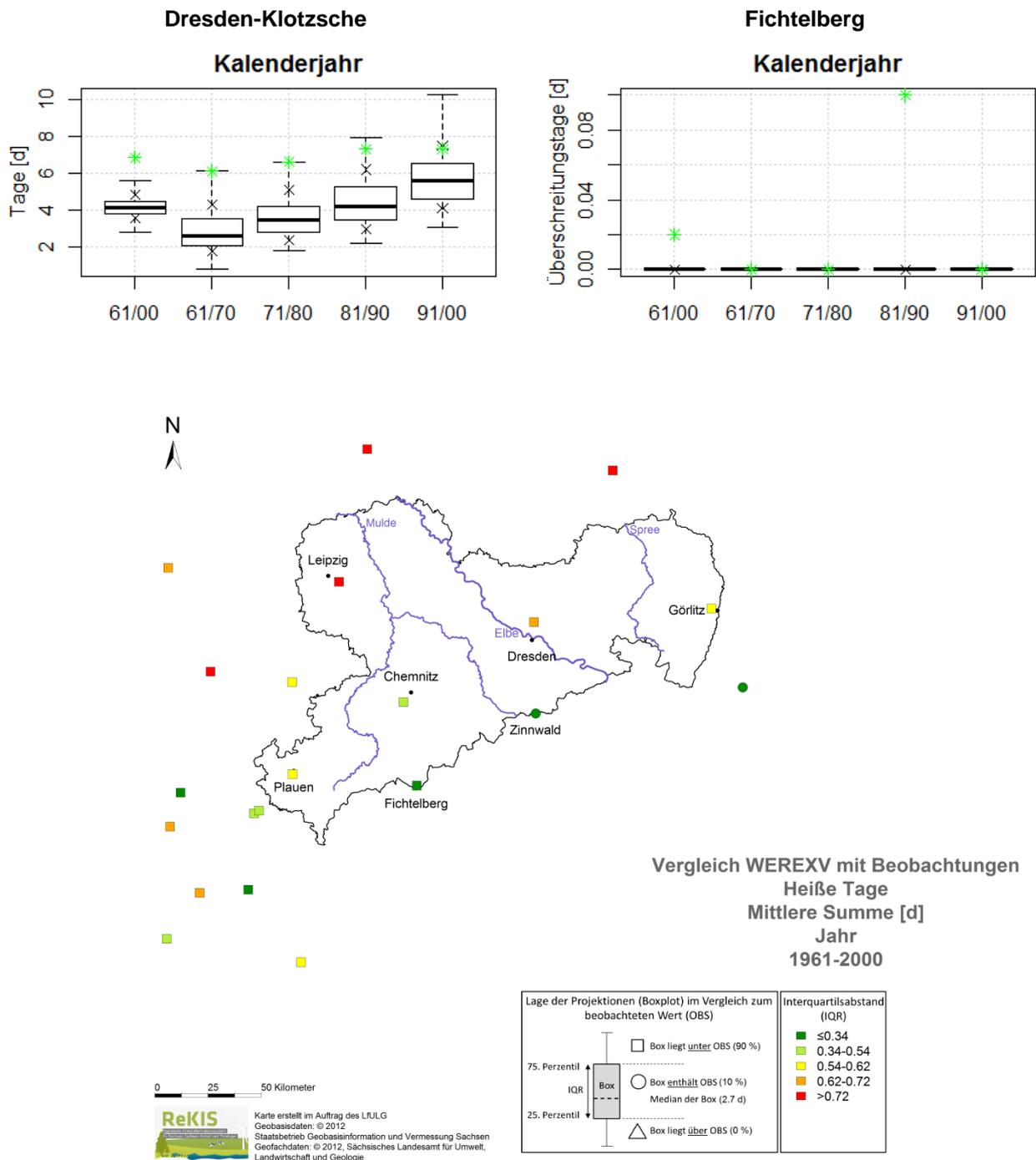


Abbildung 44: Heiße Tage pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten)

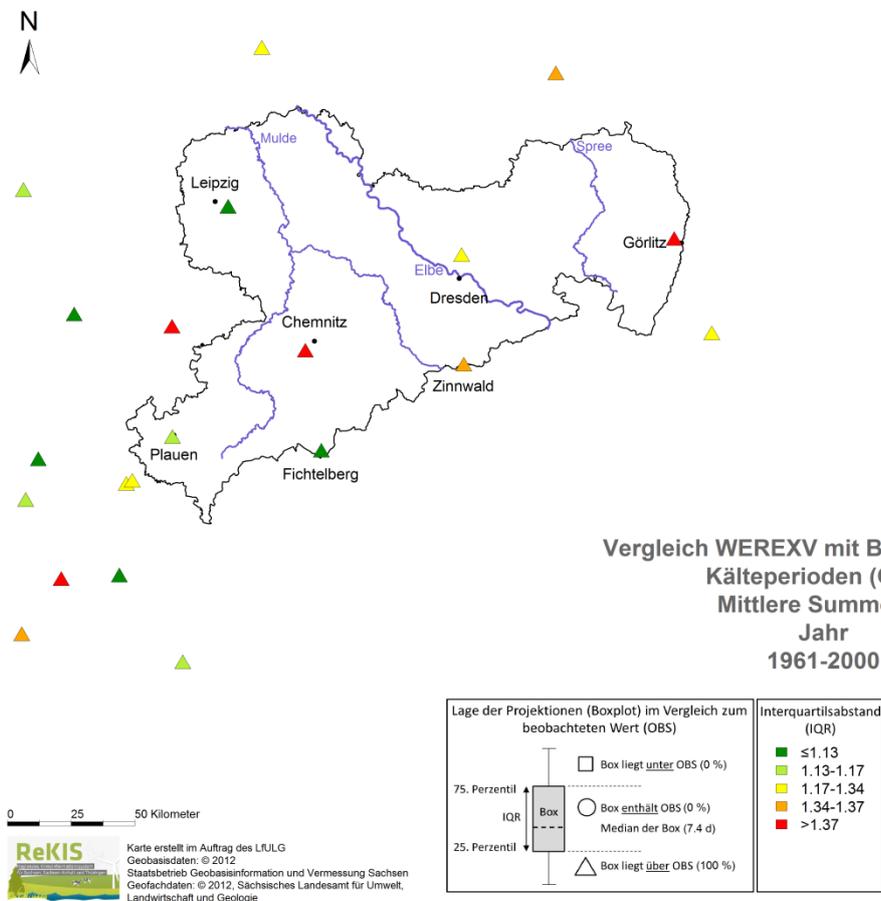
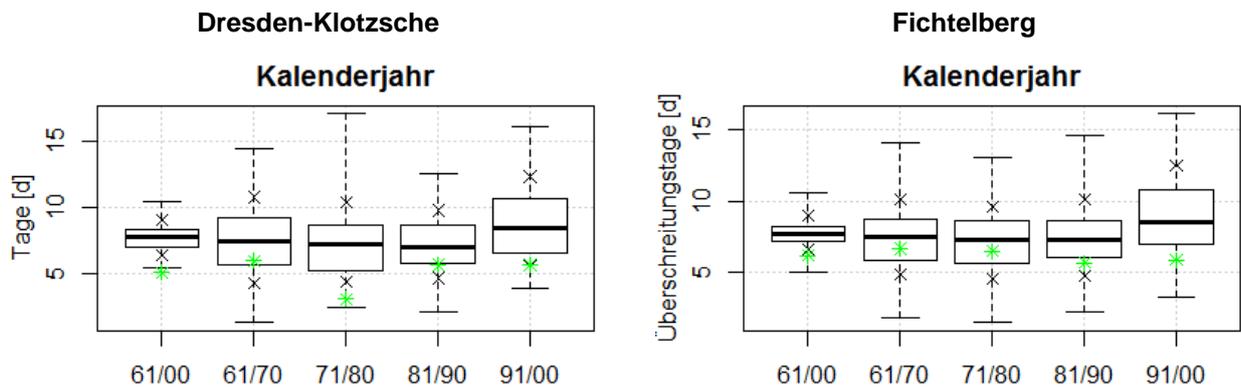


Abbildung 45: Kälteperioden pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten)

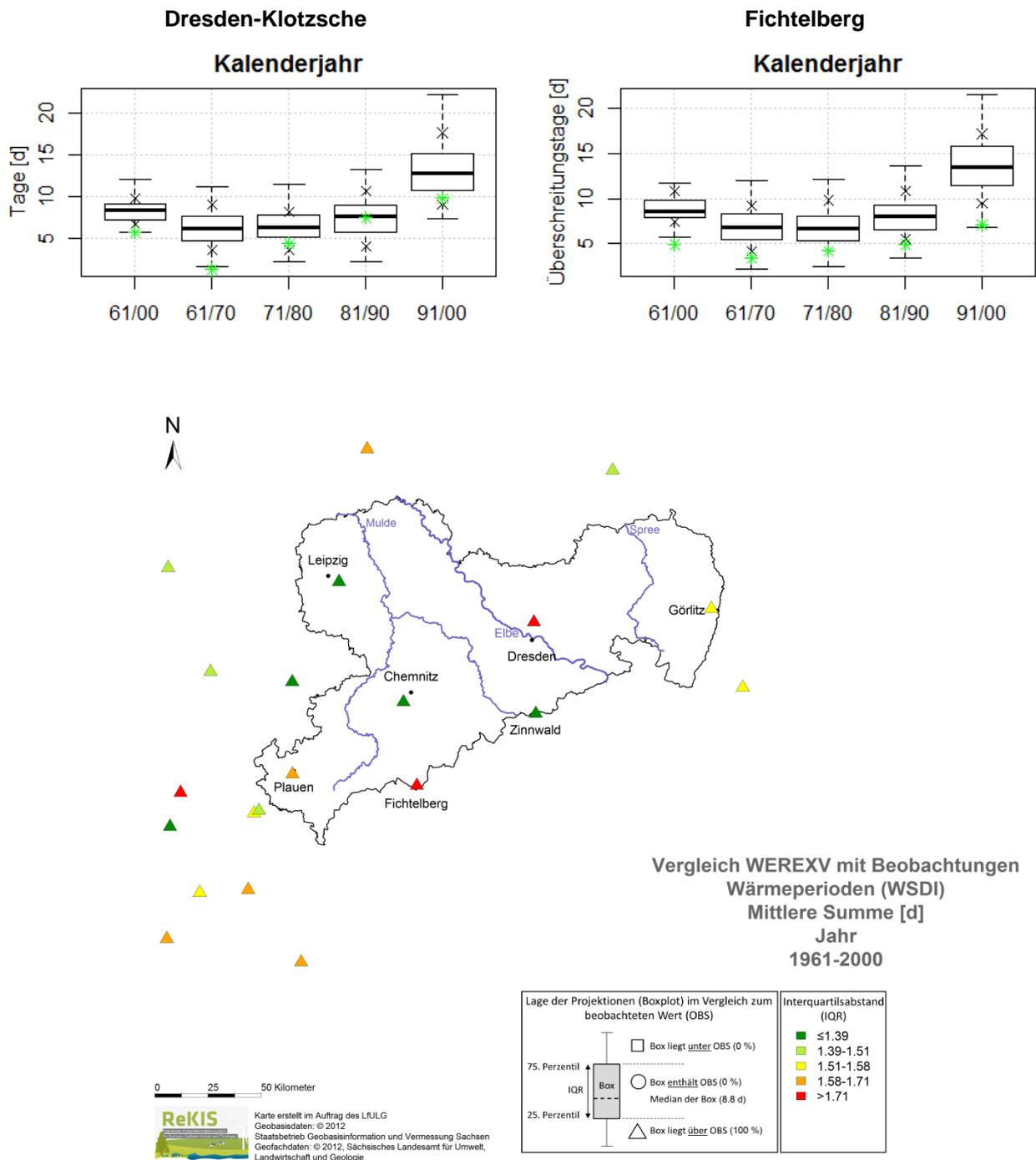


Abbildung 46: Wärmeperioden pro Jahr: Box-Whisker-Plot für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden) (oben) und flächenhafte Darstellung (unten)

### 4.2.3 Dürreperioden

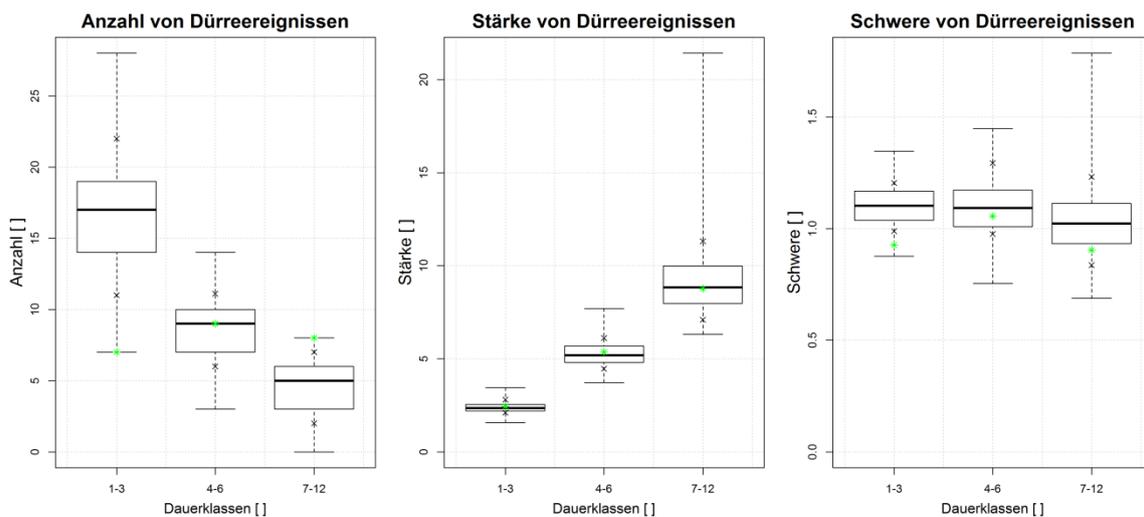
Abbildung 47 bis Abbildung 50 veranschaulichen die Fähigkeit des WEREX V-Ensembles, Dürreperioden an den Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (WEWA) nachzubilden. Obwohl sich kein völlig einheitliches Bild ergibt, sind folgende Tendenzen erkennbar:

- Dürreperioden kurzer Dauer (1 bis 3 Monate bei SPI3/ SPEI3 und 1 bis 12 Monate bei SPI12/SPEI12) werden in ihrer **Anzahl** überschätzt. Dürreperioden mittlerer Dauer (4 bis 6 Monate bei SPI3/SPEI3) werden „gut“ abgebildet. Jedoch kommt es zur Unterschätzung der Anzahl von Dürreperioden langer Dauer (7 bis 12 Monate bei SPI3/SPEI3 und >19 Monate bei SPI12/SPEI12).
- Der SPI/SPEI 3 weist geringe Abweichungen der **Stärke von Dürreperioden** zu OBS in Dresden, aber starke positive und negative Abweichungen am Fichtelberg auf. Der SPI/SPEI 12 überschätzt für Dresden und Fichtelberg die Stärke aller Andauerklassen bis auf die Klasse >31 Monate.
- Größtenteils wird die **Schwere** von Dürreperioden überschätzt.

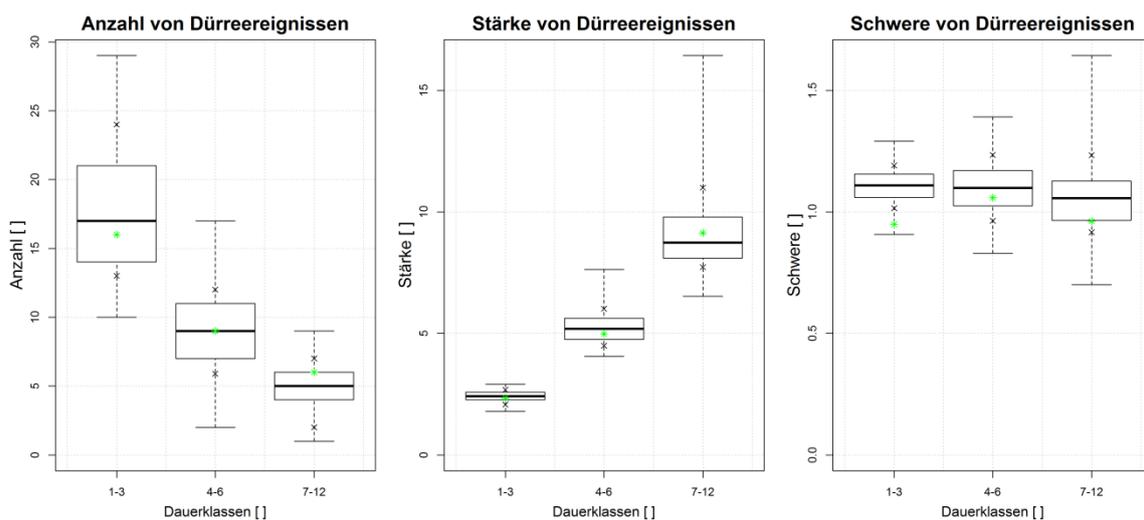
Zur Identifikation der WEREX V-Antriebe, die am ehesten in der Lage sind, das beobachtete Dürregeschehen nachzuvollziehen, wurde wieder eine Ranganalyse angewendet. In Tabelle 18 und Tabelle 19 sind für verschiedene Andauerklassen die Güte der Wiedergabe von Anzahl und Stärke von Dürreperioden tabelliert sowie der Mittelwert über die Andauerklassen.

Über alle Andauerklassen wird ersichtlich, dass die Anzahl von Dürreereignissen überwiegend nur „befriedigend“ teilweise sogar „unbefriedigend“ wiedergegeben wird. Am besten ist die Übereinstimmung beim SPEI3. Die Stärke wird „sehr gut“ bis „gut“ bei SPI3/SPEI3 abgebildet (Abweichungen von 13 bis 23 %) und „gut“ bis „befriedigend“ bei SPI12/SPEI12 (Abweichungen von 17 bis 30 %).

### Dresden-Klotzsche – SPI3

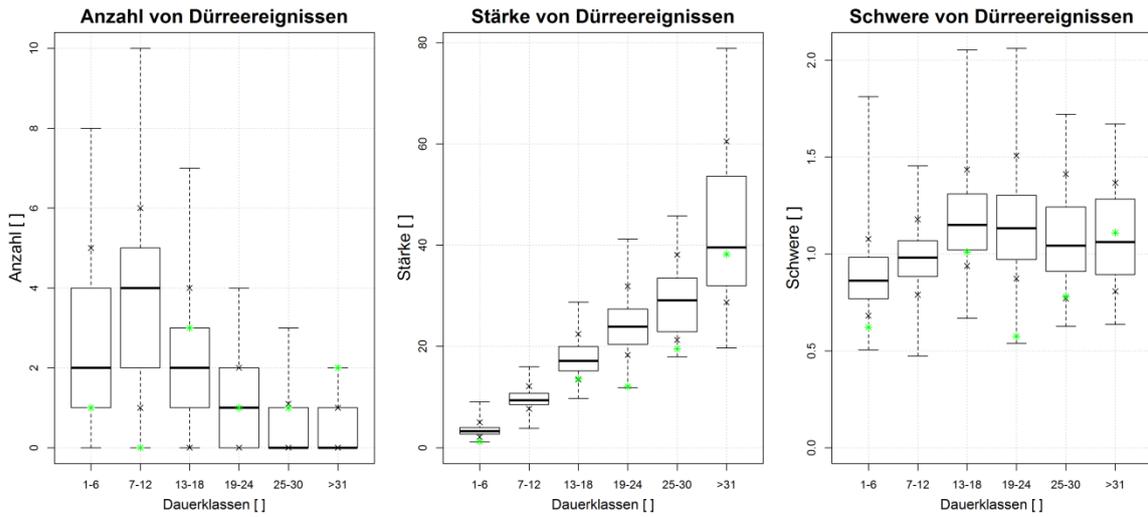


### Dresden-Klotzsche - SPEI3

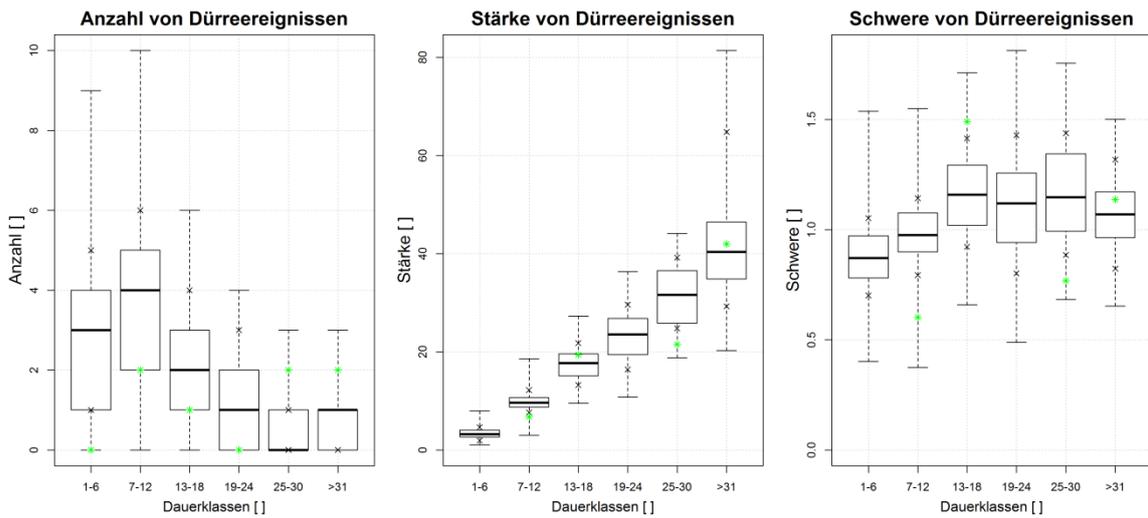


**Abbildung 47: Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI3 und SPEI3, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Dresden-Klotzsche**

### Dresden-Klotzsche – SPI12

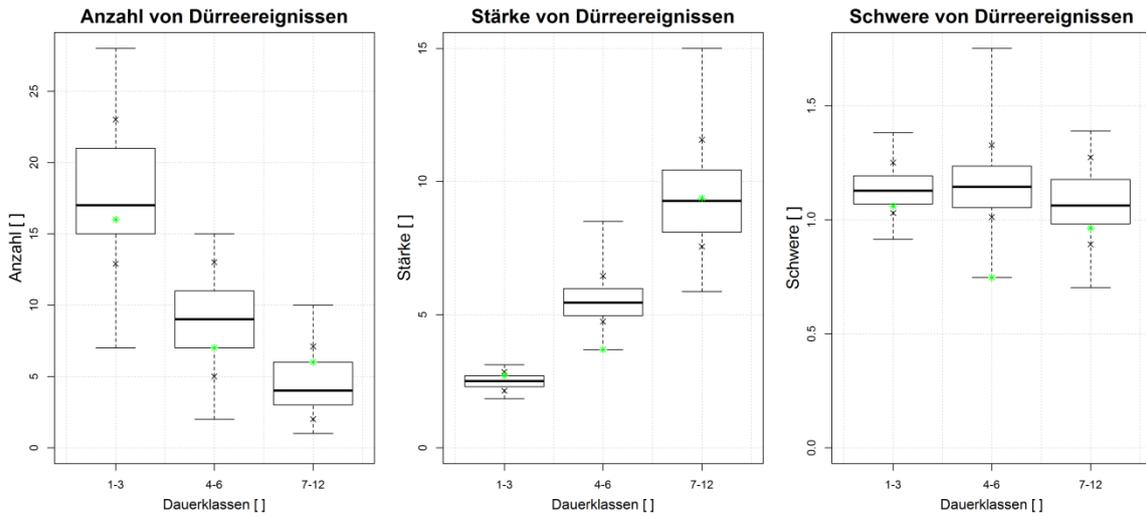


### Dresden-Klotzsche – SPEI12

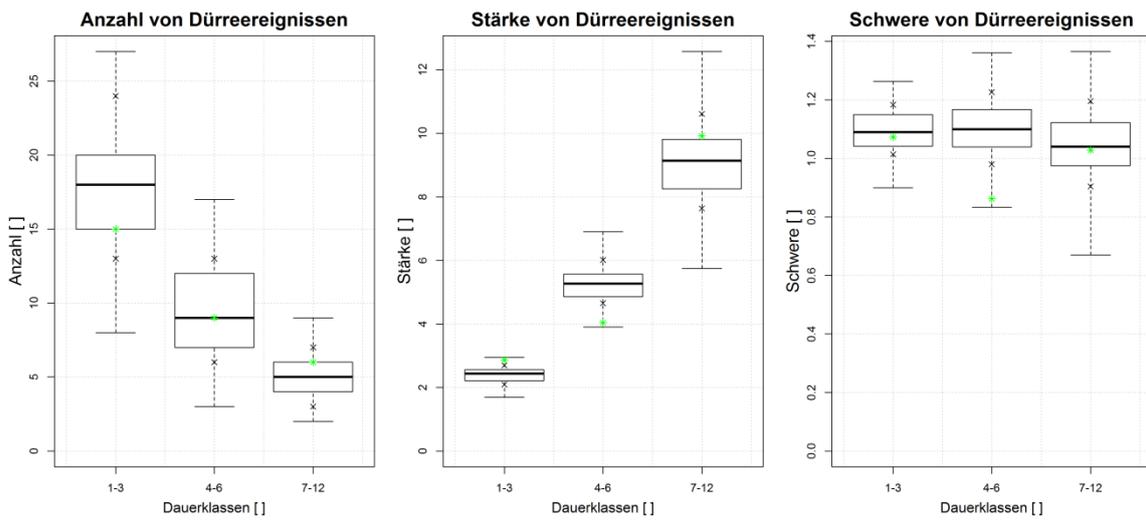


**Abbildung 48: Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI12 und SPEI12, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Dresden-Klotzsche**

### Fichtelberg (WEWA) – SPI3

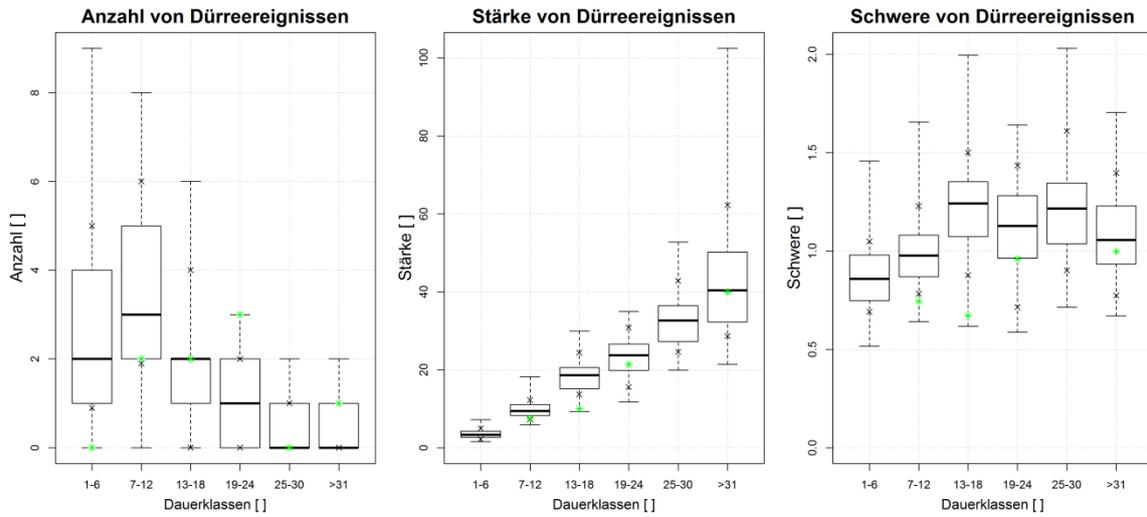


### Fichtelberg (WEWA) – SPEI3

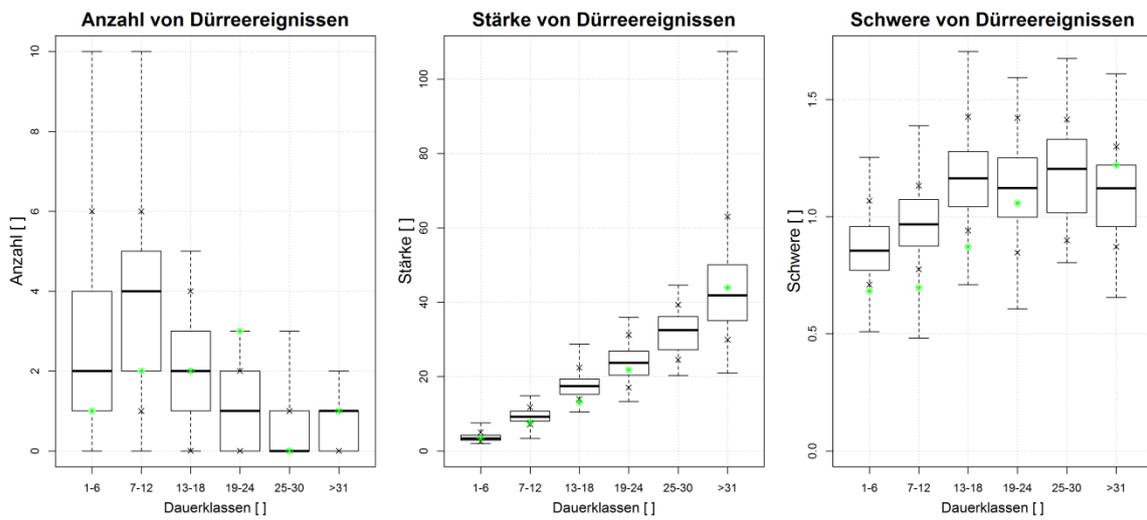


**Abbildung 49: Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI3 und SPEI3, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Fichtelberg (WEWA)**

### Fichtelberg (WEWA) – SPI12



### Fichtelberg (WEWA) – SPEI12



**Abbildung 50: Analyse der Dürrecharakteristika auf der Basis des SPI12 und SPEI12, getrennt nach Klassen der Dürreandauer, für die Station Fichtelberg (WEWA)**

**Tabelle 18: Ranganalyse der Dürreindizes SPI3 und SPEI 3, Mittel aller verfügbaren Stationen**

| SPI3         | Dauerklasse<br>1-3 Monate |        | Dauerklasse<br>4-6 Monate |        | Dauerklasse<br>7-12 Monate |        | Mittelwerte<br>Dauerklassen |        |
|--------------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
|              | Anzahl                    | Stärke | Anzahl                    | Stärke | Anzahl                     | Stärke | Anzahl                      | Stärke |
| EH5_L1       | 2,6                       | 1,6    | 3,0                       | 1,6    | 2,8                        | 1,9    | 2,8                         | 1,5    |
| EH5_L2       | 3,5                       | 1,5    | 3,3                       | 1,3    | 3,1                        | 1,9    | 3,3                         | 1,4    |
| EH5_L3       | 3,2                       | 1,4    | 2,9                       | 1,7    | 2,8                        | 1,8    | 3,0                         | 1,5    |
| EH5.CLM_L1   | 2,8                       | 1,5    | 3,2                       | 1,4    | 3,3                        | 1,7    | 3,1                         | 1,4    |
| EH5.CLM_L2   | 3,1                       | 1,5    | 3,1                       | 1,6    | 3,0                        | 1,8    | 3,1                         | 1,5    |
| EH5.RACMO_L3 | 2,9                       | 1,5    | 3,3                       | 1,3    | 3,2                        | 2,0    | 3,1                         | 1,4    |
| EH5.REMO_L3  | 2,6                       | 1,6    | 3,1                       | 1,6    | 2,9                        | 1,9    | 2,9                         | 1,4    |
| HC3C_L1      | 3,1                       | 1,6    | 3,6                       | 1,3    | 3,3                        | 2,3    | 3,3                         | 1,4    |
| HCG2_L1      | 3,0                       | 1,6    | 3,4                       | 1,5    | 2,9                        | 1,8    | 3,1                         | 1,4    |
| <b>SPEI3</b> |                           |        |                           |        |                            |        |                             |        |
| EH5_L1       | 3,3                       | 1,7    | 2,3                       | 1,8    | 2,6                        | 1,3    | 2,7                         | 1,4    |
| EH5_L2       | 3,9                       | 1,6    | 2,5                       | 1,9    | 3,2                        | 1,5    | 3,2                         | 1,6    |
| EH5_L3       | 3,7                       | 1,6    | 2,5                       | 1,7    | 2,8                        | 1,4    | 3,0                         | 1,4    |
| EH5.CLM_L1   | 2,9                       | 1,5    | 2,8                       | 1,8    | 2,8                        | 1,3    | 2,9                         | 1,5    |
| EH5.CLM_L2   | 3,8                       | 1,7    | 2,9                       | 1,8    | 2,5                        | 1,3    | 3,1                         | 1,5    |
| EH5.RACMO_L3 | 3,6                       | 1,8    | 2,5                       | 1,7    | 2,5                        | 1,5    | 2,8                         | 1,4    |
| EH5.REMO_L3  | 3,3                       | 1,5    | 2,5                       | 1,9    | 2,6                        | 1,2    | 2,8                         | 1,4    |
| HC3C_L1      | 3,4                       | 1,6    | 2,9                       | 1,8    | 3,1                        | 1,4    | 3,1                         | 1,5    |
| HCG2_L1      | 3,3                       | 1,7    | 2,8                       | 1,9    | 2,9                        | 1,4    | 3,0                         | 1,6    |

**Tabelle 19: Ranganalyse der Dürreindizes SPI12 und SPEI 12, Mittel aller verfügbaren Stationen**

| SPI12         | Dauerklasse<br>1-6 Monate |        | Dauerklasse<br>7-12 Monate |        | Dauerklasse<br>13-18 Monate |        | Dauerklasse<br>25-30 Monate |        | Dauerklasse<br>>31 Monate |        | Mittelwerte<br>Dauerklassen |        |
|---------------|---------------------------|--------|----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|---------------------------|--------|-----------------------------|--------|
|               | Anzahl                    | Stärke | Anzahl                     | Stärke | Anzahl                      | Stärke | Anzahl                      | Stärke | Anzahl                    | Stärke | Anzahl                      | Stärke |
| EH5_L1        | 3.3                       | 2.9    | 3.7                        | 3.0    | 3.1                         | 2.4    | 3.8                         | 2.2    | 3.9                       | 2.3    | 3.5                         | 2.1    |
| EH5_L2        | 4.0                       | 2.9    | 3.7                        | 2.6    | 3.0                         | 2.3    | 3.3                         | 2.8    | 4.0                       | 2.3    | 3.4                         | 2.2    |
| EH5_L3        | 3.6                       | 2.4    | 3.7                        | 2.5    | 3.2                         | 2.2    | 4.0                         | 2.0    | 4.0                       | 2.4    | 3.5                         | 2.0    |
| EH5.CLM_L1    | 3.2                       | 2.5    | 3.8                        | 2.7    | 2.9                         | 2.6    | 3.0                         | 2.0    | 3.8                       | 2.8    | 3.2                         | 2.3    |
| EH5.CLM_L2    | 3.4                       | 2.6    | 3.9                        | 2.8    | 2.9                         | 2.3    | 4.0                         | 2.6    | 3.7                       | 2.1    | 3.4                         | 2.4    |
| EH5.RACMO_L3  | 3.1                       | 2.4    | 3.7                        | 2.7    | 3.3                         | 2.2    | 4.0                         | 2.6    | 3.8                       | 2.3    | 3.4                         | 2.4    |
| EH5.REMO_L3   | 3.4                       | 2.4    | 3.7                        | 2.5    | 3.1                         | 2.7    | 3.4                         | 2.2    | 4.0                       | 2.2    | 3.4                         | 2.1    |
| HC3C_L1       | 3.0                       | 2.6    | 3.7                        | 2.7    | 3.1                         | 2.4    | 3.4                         | 2.8    | 3.8                       | 2.1    | 3.3                         | 2.2    |
| HCG2_L1       | 3.9                       | 2.2    | 3.7                        | 2.8    | 2.8                         | 2.2    | 4.0                         | 2.8    | 3.8                       | 2.3    | 3.5                         | 2.2    |
| <b>SPEI12</b> |                           |        |                            |        |                             |        |                             |        |                           |        |                             |        |
| EH5_L1        | 3.3                       | 2.0    | 3.3                        | 2.7    | 3.0                         | 2.4    | 4.0                         | 1.7    | 4.0                       | 2.2    | 3.5                         | 2.1    |
| EH5_L2        | 3.6                       | 2.6    | 3.5                        | 2.8    | 3.7                         | 2.8    | 3.5                         | 2.2    | 3.8                       | 2.7    | 3.6                         | 2.4    |
| EH5_L3        | 3.9                       | 2.4    | 3.3                        | 2.7    | 3.4                         | 2.8    | 3.7                         | 1.7    | 4.0                       | 2.9    | 3.6                         | 2.2    |
| EH5.CLM_L1    | 3.0                       | 2.6    | 3.6                        | 2.5    | 3.8                         | 2.9    | 3.2                         | 1.8    | 3.4                       | 2.6    | 3.4                         | 2.3    |
| EH5.CLM_L2    | 3.1                       | 2.3    | 3.5                        | 2.8    | 3.2                         | 2.3    | 3.7                         | 2.2    | 3.8                       | 2.8    | 3.4                         | 2.4    |
| EH5.RACMO_L3  | 3.7                       | 2.6    | 3.4                        | 2.5    | 3.4                         | 2.3    | 4.0                         | 2.2    | 3.3                       | 2.7    | 3.5                         | 2.3    |
| EH5.REMO_L3   | 3.9                       | 2.3    | 3.5                        | 2.7    | 3.6                         | 2.7    | 3.5                         | 1.7    | 4.0                       | 2.5    | 3.7                         | 2.2    |
| HC3C_L1       | 3.0                       | 2.4    | 3.5                        | 2.8    | 3.2                         | 2.8    | 4.0                         | 1.7    | 3.2                       | 2.3    | 3.4                         | 2.2    |
| HCG2_L1       | 3.0                       | 2.0    | 3.3                        | 2.6    | 3.1                         | 2.6    | 4.0                         | 2.0    | 3.8                       | 2.5    | 3.4                         | 2.1    |

## 4.3 Diskussion

### 4.3.1 Workshops zu Nutzererfahrungen von Regionalen Klimaprojektionen

Sämtliche Methoden zur Regionalisierung (Downscaling) von globalen Klimasimulationen weisen noch Defizite in der Abbildung des vergangenen Klimas auf. Auf nationaler und regionaler Ebene wurde in den letzten Monaten dieses Thema verstärkt thematisiert. Auf Konferenzen und Workshops war man bestrebt, die Erfahrungen der Nutzer solcher Daten einzuholen und die Probleme sowie Möglichkeiten der Optimierung der Methoden zu diskutieren. Nachfolgend wird auf drei Workshops aufgrund ihrer Relevanz für den sächsischen Raum näher eingegangen.

#### 05.03.2015 und 03./04.09.2015: Erwartungen an und Erfahrungen mit regionalen Klimaprojektionen (LfULG)

Beide Workshops hatten ähnliche Ziele, weshalb sie zusammen erwähnt werden. Zum einen wurden aktuelle Projekte, die regionale Klimaprojektionen verwendet haben, und die Erfahrungen mit den Klimadaten vorgestellt. In den Projekten WEREX V Extreme, REGKLAM, NEYMO und SAPHIR wurden Daten der statistischen Methoden WEREX und WETTREG sowie z. T. dynamische Modellergebnisse verwendet. Zum anderen dienten die Workshops dem Austausch mit Nutzern von regionalen Klimadaten hinsichtlich ihrer Erfahrungen zur Abbildung von Klimaextremen bzw. deren Auswirkungen in Wasserwirtschaft, Landwirtschaft etc. Im Vorfeld zum Workshop am 05.03.2015 wurde ein Fragebogen (Anhang) entwickelt und verschickt, um die Expertise der Nutzer in Erfahrung zu bringen.

Für das EU-Projekt NEYMO, das den Wasserhaushalt der Lausitzer Neiße unter sich ändernden Bedingungen betrachtete, wurden Klimaprojektionen für die Region mit WETTREG2013 erstellt. Die Modellvalidierung für den beobachteten Zeitraum zeigte, dass die Abweichungen zu gemessenen Größen und abgeleiteten Indizes sehr variabel zwischen den Stationen sind. Der Bias ist dabei in Gebirgsregionen höher als im Flachland. Im Jahresverlauf sind die Unsicherheiten im Sommer am größten. Es zeigte sich aber, dass die Häufigkeit starker Niederschlagsereignisse gut abgebildet wird. Insgesamt wird die Niederschlagssumme jedoch unterschätzt und die potenzielle Verdunstung überschätzt. Der Abfluss in der Lausitzer Neiße wird damit zu gering simuliert. Die Größenordnung von Hochwässern wird bei Nutzung von Projektionsdaten erreicht, aber nicht deren Häufigkeit. Es werden viele Niedrigwasserperioden simuliert, aber keine lang anhaltenden Perioden. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint die Stärke der zukünftig modellierten Abflussrückgänge nicht sehr realistisch oder zumindest wenig belastbar.

Im Projekt SAPHIR wurden Teile des WEREX V-Datensatzes klimatologisch analysiert und für eine landwirtschaftliche Ertragsmodellierung verwendet. Zur Korrektur von auftretenden Abweichungen zu Beobachtungen wurden Biaskorrekturen getestet, aber letztendlich nicht angewendet, weil keine markanten Verbesserungen ersichtlich wurden. Auch eine zweidimensionale Biaskorrektur (Temperatur und Niederschlag) erbrachte keine Vorteile gegenüber klassischen Methoden. Der räumliche Deckungsgrad von Niederschlägen >1 mm wird von WEREX V-Daten gut wiedergegeben. Kleinere Niederschläge werden jedoch zu häufig simuliert, was die Beantwortung von trockenheitsrelevanten Fragestellungen in der Landwirtschaft erschwert.

Im Rahmen des Projektes REGKLAM wurde u. a. die Abbildung von Niederschlagsextremen von statistischen und dynamischen Downscaling-Methoden untersucht. Es wurde festgestellt, dass in WETTREG die Nachprozessierung von Klimastationsdaten anders als von Niederschlagsstationsdaten ist. Damit ergeben sich inkonsistente flächenhafte Klimatrendsignale, z. B. bei der mittleren Trocken- und Nassperiodendauer (v. a. im Sommer und im Szenario A1B). Die Ergebnisse einer Modellvalidierung zeigen eine Unterschätzung der Häu-

figkeit von Tagen mit mehr als 10 und 20 mm, bei den Perzentilen (90, 95, 99) wurde kein eindeutiges Verhalten ermittelt. WETTREG10 hatte diesbezüglich einen geringeren Bias als WETTREG06. Die maximale Andauer von Trockenperioden im Sommerhalbjahr simulieren WEREX4 und WETTREG06 gut, im Winterhalbjahr wird sie leicht unterschätzt. Generell werden zu viele Trocken- und Nassphasen simuliert und sie werden in ihrer Persistenz und räumlichen Abdeckung unterschätzt. Die Gründe für das stärkere Hin- und Herpendeln zwischen Nass- und Trockenperioden bei statistischen und dynamischen regionalen Klimamodellen sind derzeit offen.

In der Diskussion wurde angeregt, einen Katalog von Datenprüfungen zu erstellen, den Beobachtungs- und Projektionsdaten durchlaufen sollten. Die Prüfungen sollten sich auf statistische Verteilungsmomente (Mittelwert, Varianz, Schiefe, Perzentile) und auf interessierende Indizes beziehen. Hierzu bieten sich u. a. Indizes dieses Berichtes an, wie Starkniederschläge, SPEI, Wärme- und Kälteperioden, Heiße Tage etc. Es wurde um detailliertere Informationen zu Datenprüfung und -aufbereitung bei der Herausgabe der Daten gebeten.

Wasserhaushaltsmodelle benötigen flächenhafte Klimainformationen. Weil modellinterne Interpolationsverfahren oft sehr einfach sind, kam der Wunsch nach einer Element übergreifenden Regionalisierung auf, die die Konsistenz zwischen den Klimaelementen sichert. Das zukünftige Zusammenfallen von Anomalien klimatologischer Größen ist von Bedeutung für Forst- und Landwirtschaft (Borkenkäfervermehrung, verfrühte Blattfärbung, Trockenstress). Es gibt z. T. Definitionen zu kritischen, witterungsbedingten Konstellationen. Ob diese von den Projektionen in ihrer Häufigkeit und Intensität wieder gegeben werden, wäre von Interesse. Ob die vorhandenen Daten diese Untersuchung zulassen, ist offen.

Zwischen LfULG, TU Dresden und den Entwicklern der Modelle WEREX und WETTREG (Firma CEC) gab es darüber hinaus eine Diskussion zu Optimierungsmöglichkeiten des Regionalisierungsverfahrens WEREX. Hierzu gibt es aktuell ein F&E-Projekt des LfULG, in dem CEC Verbesserungsmöglichkeiten der Methode aufzeigen soll. Es wurden Sensitivitätsanalysen angeregt zur Wichtung von Temperatur- und Niederschlagsverteilungen.

Um aktuelle Klimatrends zu erfassen, wurde vorgeschlagen, die Bestimmung der Zirkulationsmuster auf den Zeitraum bis 2005 auszudehnen. Als problematisch wurde angesehen, dass für aktuelle Globalmodellläufe unter RCP-Szenarien die Ergebnisse erst ab 1971 bereitgestellt werden. Eine Validierung und die Berechnung von Klimaänderungsszenarien mit Bezug auf den von der WMO empfohlenen Referenzzeitraum 1961–1990 ist dann nicht mehr möglich.

### **23./24.03.2015: Downscaling-Workshop (DWD)**

Es wurden der Status der Entwicklungen und die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten von physikalisch-dynamischen und empirisch-statistischen Downscaling-Methoden diskutiert. Bei den RCM wurde auf die Möglichkeiten der Biasreduktion sowie die Anpassung und Erweiterung der Modellphysik fokussiert. Bei den empirisch-statistischen Ansätzen standen die Belastbarkeit der Ergebnisse für die weiter entfernte Zukunft und die Bereitstellung von regional (zwischen den Stationen) und zeitlich (unterhalb der Tagesskala) hoch aufgelösten Datensätzen im Mittelpunkt. Weil dynamische und statistische Modellierer bisher wenig zusammengearbeitet haben, wurden Vorzüge und Grenzen sowie Möglichkeiten der Kombination der Methoden abgewogen. Es wurde auf eine Unterfinanzierung der Modellentwicklung, Ergebnisanalyse und Nutzerberatung hingewiesen. Die durch die Projekte CORDEX und ReKliEs-De in naher Zukunft zahlreich vorliegenden aktuellen regionalen Klimaprojektionen stellen die Nutzer vor große Herausforderungen. Insbesondere bei der Selektion von Projektionen, des Aggregierens von Daten, der Kommunikation komplexer Sachverhalte etc. stellte sich häufig die Frage der Zuständigkeit (Klimamodellierer oder Wirkmodellierer).

### 4.3.2 Diskussion der gewonnenen Ergebnisse

Ziel dieses Berichtes ist die Analyse der Leistungsfähigkeit des WEREX V-Ensembles hinsichtlich der Abbildung von Extremen in Sachsen. Demzufolge stehen nicht die klimatischen Veränderungen in der Periode 1961–2000 im Fokus, sondern die Übereinstimmung zwischen beobachtetem und modelliertem Klima.

Die Höhe der untersuchten **Starkniederschlagsperzentile** (R80p, R90p, R85p, R99p) wird von den Projektionen über alle Jahreszeiten hinweg unterschätzt, d. h. es werden prinzipiell weniger Starkniederschläge bzw. Niederschläge geringerer Höhe simuliert. Gemäßigte Starkniederschlagsindizes werden besser als extremere wiedergegeben. Die Modellunsicherheit, d. h. die Differenzen zwischen den 120 Realisierungen, ist in den Jahreszeiten erwartungsgemäß größer als im Jahr und größer bei hohen als bei niedrigeren Perzentilen. Die beobachtete dekadische Variabilität des Auftretens von Starkniederschlägen wird nicht wiedergegeben. Von einem Teil der Projektionen wird jedoch eine prinzipielle zeitliche Variabilität des Auftretens von Starkniederschlägen (Periodizität) adäquat wiedergegeben. Die Nachbildung der innerjährlichen Niederschlagsvariabilität, insbesondere in den für die Landwirtschaft relevanten Vegetationsperioden, ist nicht zufriedenstellend. Der maximale 1-Tages- und 5-Tagesniederschlag wird „sehr gut“ wiedergegeben, wobei letzterer größtenteils etwas unterschätzt wird. Zum Vergleich sei eine Studie von BENISTON et al. (2007) angeführt, der Ergebnisse des RCM REMO für Süddeutschland mit Beobachtungen vergleicht. Die räumliche Variabilität von Sommerniederschlägen (5-jähriges Wiederkehrintervall des maximalen 1-Tagesniederschlags) wird ungenügend wiedergegeben, mit 30 % Überschätzung im Flachland und 30 % Unterschätzung in den Bergregionen. Winterniederschläge (5-jähriges Wiederkehrintervall des maximalen 5-Tagesniederschlags) werden mit Fehlern bis zu 30 % wiedergegeben. GOODESS et al. (2007) verglichen 22 statistische Downscaling-Methoden und fanden ähnliche Probleme: bessere Abbildung von Mittelwerten als Extreme, bessere Abbildung von gemäßigten Temperatur und Niederschlagsextremen im Winter als im Sommer, bessere Abbildung der Häufigkeit von Extremen als deren Intensität. Letzteres wird erklärt mit der guten Performance der Modelle hinsichtlich der atmosphärischen Zirkulation und den bestehenden Zusammenhängen mit der Häufigkeit von Extremniederschlägen. Die Intensität wird eher von lokalen Prozessen bestimmt.

In den Projektionen sind die **Temperaturextreme** gekappt (Überschätzung der 10. Perzentile und Unterschätzung der 90. Perzentile der Minimum- und Maximumtemperatur). Die Zunahme der Auftrittshäufigkeit von extrem hohen Minimum- und Maximumtemperaturen in den letzten 40 Jahren wird von den Projektionen gut abgebildet. Die dekadische Variabilität von extrem niedrigen Minimum- und Maximumtemperaturen wird dagegen nicht erfasst. Dass die dekadische Variabilität an einigen Stationen recht gut getroffen wird und an anderen Stationen nicht einmal tendenziell, deutet auf Probleme in der Aneichung hin (flächenhaft anstelle regionspezifisch). Die Anzahl an Ereignistagen wird generell unterschätzt. Trotzdem ist die Güte der Abbildung durch WEREX V für die kälterelevanten Ereignistage als „sehr gut“ einzuschätzen. Für wärmerelevante Ereignistage ist die Wiedergabe nur „gut“ bis „befriedigend“. Wie schon bei den Starkniederschlagsindizes zeigt es sich, dass gemäßigte (FD, SU) besser als extremere Indizes (ID, HD) abgebildet werden. Obwohl die Temperaturextreme in den Projektionen gekappt sind, wird die Anzahl an Kälte- und Wärmeperioden generell stark überschätzt. Ähnlich starke Abweichungen in den Perzentilen – sowohl Unter- als auch Überschätzung – wurden von KJELLSTRÖM et al. (2007) festgestellt. Der Median der Abweichungen des 95. Perzentils der Maximaltemperatur zwischen C20 und OBS (an 25 Stationen in Deutschland und unmittelbarer Umgebung) schwankt bei 10 RCM (antreibendes GCM: HadAM3H) zwischen -2,2 und +3,3 K. Das 5. Perzentil der Minimumtemperatur wird um +0,8 bis +5,0 K überschritten. Die Bandbreite der Modelle ist demzufolge sehr groß, größer als bei Mittelwerten.

Die Anzahl an **Dürreperioden** wird meist nur „befriedigend“ abgebildet. Es werden zu häufig kurze Perioden und zu wenig lange Perioden simuliert. Die Stärke von Dürren, die für die Landwirtschaft relevant sind (SPI3

und SPEI3), werden „gut“ reproduziert. Für die Wasserwirtschaft relevante Dürreperioden (SPI12 und SPEI12) werden in ihrer Stärke vom WEREX V-Ensemble überschätzt.

Eine Abhängigkeit der Güte der Projektionen der einzelnen Stationen von deren Lage und Höhe im Untersuchungsgebiet konnte visuell nicht festgestellt werden. Damit scheinen Abweichungen der Projektionsergebnisse von den Beobachtungen zufälliger Natur zu sein.

Zur Einschätzung der Güte der neun verschiedenen WEREX V-Läufe bei der Abbildung der verschiedenen Temperatur-, Niederschlags- und Dürreindizes wurden die jeweils ca. vier besten Läufe in (Tabelle 20) markiert. Starkniederschläge werden am besten von den RCM und HCG2\_L1 angetriebenen Läufen reproduziert. Extremtemperaturindizes können von den meisten WEREX V-Läufen gut nachgebildet werden. Dürreperioden können am besten von einigen GCM-Antrieben, einigen RCM-Antrieben und auch von HCG2\_L1 und HC3C\_L1 erfasst werden.

Sollen WEREX V-Läufe ausgewählt werden, die alle drei Indexkategorien gut abbilden, so schneiden folgende Läufe am besten ab:

- EH5.CLM\_L1
- EH5.RACMO\_L3
- EH5.REMO\_L3
- HCG2\_L1

**Tabelle 20: Kennzeichnung der vier besten WEREX V-Läufe für verschiedene Extremindizes**

| WEREX V      | Starkniederschlagsindizes |                |              | Temperaturindizes |                |               |                         | Dürreindizes |        |
|--------------|---------------------------|----------------|--------------|-------------------|----------------|---------------|-------------------------|--------------|--------|
|              | Höhe                      | Überschr.-tage | Periodizität | Höhe              | Überschr.-tage | Ereignis-tage | Warm- und Kälteperioden | 3 Mon        | 12 Mon |
| EH5_L1       |                           |                |              | x                 | x              | x             |                         | x            | x      |
| EH5_L2       |                           |                |              |                   | x              |               |                         |              |        |
| EH5_L3       |                           |                |              | x                 | x              | x             |                         | (x)          | x      |
| EH5.CLM_L1   | x                         | x              |              |                   | x              |               |                         | x            |        |
| EH5.CLM_L2   | x                         | x              | x            | x                 | x              | x             |                         |              |        |
| EH5.RACMO_L3 | x                         | x              | (x)          | x                 | x              | x             |                         | (x)          |        |
| EH5.REMO_L3  |                           | x              | x            | x                 | x              | x             |                         | x            | (x)    |
| HC3C_L1      |                           |                | x            |                   | x              | x             |                         |              | (x)    |
| HCG2_L1      | x                         | (x)            | x            |                   | x              |               |                         |              | (x)    |

Die z. T. starken Abweichungen von den beobachteten witterungsbedingten Extremen sind zu einem großen Teil den dynamischen Klimamodellen zuzuschreiben. So zeigten BLENKINSOP & FOWLER (2007), dass RCM Schwierigkeiten haben, höhere statistische Momente (z. B. Extreme) abzubilden. Auch die ungenaue Wiedergabe der Häufigkeit von Trockenphasen weist darauf hin, dass die Modelle Probleme bei der Abbildung der Persistenz von anomal trockenen Perioden haben. Die Unsicherheit in der Performance von Klimamodellen stammt zum einen von der Parametrisierung physikalischer Prozesse auf kleiner Skala und zum anderen aus den Unsicherheiten in den Strukturen zur Abbildung großräumiger Klimaprozesse. DAI (2012) weist auf noch ungenügend abgebildete Zusammenhänge zwischen Meeresoberflächentemperatur und Niederschlag über den Landmassen hin. Ein ausgewähltes GCM/ RCM repräsentiert immer nur eine von vielen möglichen Aus-

prägungen des zukünftigen Klimas. Diese Untersuchungen belegen, dass sich die Einbeziehung von RCM in die WEREX-Modellkaskade aus Sicht der Reproduktion von Extremen gelohnt hat. Ein umfassender Vergleich zwischen der Performance von dynamischen und den hier verwendeten statistischen Downscaling-Methoden ist kaum möglich, weil die analysierten Indizes und oft auch die Zeiträume nicht übereinstimmen.

## 5 Phase II: Abschätzung von projizierten Witterungsextremen für Sachsen

In der Phase I des Projektes wurde die Leistungsfähigkeit des WEREX V-Ensembles bei der Abbildung von witterungsbedingten Temperatur- und Niederschlagsextremen untersucht. Dies ist eine essenzielle Voraussetzung, um die Zuverlässigkeit der projizierten Daten einschätzen zu können. Ausgewählte Extremindizes werden in Phase II für die am besten performierenden WEREX V-Ensemblemitglieder für Sachsen dargestellt. Die Idee ist, die Spannweite dieses Teilensembles bei der Abbildung von Extremen aufzuzeigen. Die in Phase I ermittelten, z. T. erheblichen Probleme bei der Abbildung von witterungsbedingten Extremen verbieten eine räumlich und zeitlich detaillierte Analyse von einzelnen WEREX V-Läufen bzw. -Realisationen. Vielmehr soll vermittelt werden, wie der derzeitige vorliegende WEREX V-Datensatz Extreme in der Zukunft abbildet, um so einen Vergleich zu anderen Regionalklimaprojektionen zu ermöglichen.

### 5.1 Methoden

#### 5.1.1 Auswahl von Indizes und Projektionen aus dem WEREX V-Ensemble

Die **Auswahl der Extremindizes** richtet sich i) nach der sich derzeit darstellenden Relevanz für Sachsen (BERNHOFER et al. 2015; BERNHOFER et al. 2015a), namentlich Starkniederschlagsereignisse, Wärme- und Kältebelastung sowie Dürreperioden (Definitionen siehe Kap.4.1) sowie ii) der Güte der Abbildung von Extremen durch WEREX V. Beispielsweise wurde zur Darstellung der Hitzebelastung die Anzahl von Sommertagen betrachtet und nicht die schlechter performierenden Heißen Tage.

Es werden die in Tabelle 21 zusammengefassten Indizes betrachtet. Erwähnt wird in Kürze auch die sozio-ökonomische Relevanz, die für einige Indizes neben Risiken auch Chancen darstellen. In Phase I des Projektes wurden vier **WEREX V-Antriebe** identifiziert, die am besten die untersuchten Extremkennwerte abbilden. Das sind im Einzelnen:

- EH5.CLM\_L1
- EH5.RACMO\_L3
- EH5.REMO\_L3
- HCG2\_L1

Für das Treibhausgasszenario SRES **A1B** werden nachfolgend 40 Projektionen analysiert. Die 10 Realisierungen eines jeden Antriebs sind mögliche statistische Ausprägungen, d. h. die Unterschiede zwischen den Realisierungen eines Antriebs sind gering, weil sie nicht unabhängig voneinander entstanden sind. Die statistischen Eigenschaften dieses Ensembles werden dadurch geprägt. Ebenso beeinflusst die Übergewichtung des Laufes 3 von EH5.

**Tabelle 21: Analyisierte Indizes und deren sozio-ökonomische Relevanz**

| Index   | Relevanz  |
|---|---|
| Höhe und Überschreitungstage des 95. Perzentils des Niederschlags | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hochwasserrisiko in kleinen Einzugsgebieten (hauptsächlich in gebirgigen Regionen, in denen eine schnelle Abflusskonzentration stattfindet)</li> <li>- wild abfließendes Wasser</li> <li>- Erosion (Bodenabtrag, Stoffeintrag in Gewässer)</li> </ul>  |
| Anzahl von Sommertagen  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesundheit: Wärmebelastung/ Wohlbefinden</li> <li>- Tourismus: veränderte Attraktivität von Regionen</li> <li>- Energiewirtschaft (erhöhter Kühlbedarf)</li> </ul>   |
| Anzahl von Frosttagen   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Landwirtschaft (z. B. für Wintergetreide)</li> <li>- Energiewirtschaft (verminderter Heizbedarf)</li> <li>- Gesundheit: Wohlbefinden</li> </ul>  |
| Anzahl und Stärke von Dürreperioden                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Für Landwirtschaft eher kurzfristige Dürreperioden von Bedeutung → Analyse des SPI3 bzw. SPEI3, die mit einer Mittelungszeit von 3 Monaten eher das kurzfristige Schwankungsverhalten abbilden; Auswertung von Dürreperioden einer Dauer von 1-3 Monaten.</li> <li>- Für Bewirtschaftung von Wasserressourcen eher langfristige Dürreperioden relevant → Analyse des SPI12 bzw. SPEI12, die mit einer Mittelungszeit von 12 Monaten das langfristige Schwankungsverhalten abbilden; Auswertung von Dürreperioden einer Dauer von mehr als 12 Monaten.</li> </ul> |

### 5.1.2 Ergebnisdarstellung

Die **Darstellung** der projizierten Witterungsextreme erfolgt in Form von Karten. Lediglich die Ergebnisse der Dürreindizes, die auf dem SPEI beruhen (also auf Niederschlags, Temperatur- und Strahlungsdaten), werden aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit (12 Stationen für das gesamte Untersuchungsgebiet) tabellarisch für die sächsischen Stationen zusammengefasst.

Für die Zukunft werden sogenannte **Klimaänderungssignale** berechnet, sprich die simulierten zukünftigen Ausprägungen eines Index im Vergleich zur modellierten Referenz (1961–1990). Es wird bewusst keine beobachtete Referenz verwendet. Die simulierten Werte (WEREX V) haben Fehler, was in Phase I mittels eines Vergleichs mit Beobachtungsdaten gezeigt wurde. Es wird i. d. R. davon ausgegangen, dass die Fehler sich nicht prinzipiell über die Zeit ändern, d. h. in der Zukunft haben sie die gleiche Größenordnung wie in der simulierten Vergangenheit. Eine Analyse der absoluten Größen in der Zukunft wäre von vornherein fehlerbehaftet, wohingegen der Änderung der Größen mehr getraut wird. Für die Starkniederschlagshöhe und die Dürrestärke erfolgt die Angabe des Klimaänderungssignals in Prozent, für die Temperaturereignistage und die Überschreitungstage des Starkniederschlags in Tagen. Die Änderung der Anzahl an Dürreperioden ist dimensionslos. Es werden die häufig national und international verwendeten Perioden 2021–2050 (nahe Zukunft) und 2071–2100 (ferne Zukunft) analysiert.

Die Bandbreite des WEREX V-Ensembles wird mittels des **25., 50. (Median) und 75. Perzentils** der Klimasignale dargestellt, wobei das 50. Perzentil die wahrscheinlichste Ausprägung des jeweiligen Index ist. In Form einer Schraffur wird die **Modelleinigkeit** in den Karten aufgezeigt. Wenn mindestens 75 % des Ensembles mit der Richtung des Signals (Ab- oder Zunahme) des 50. Perzentils übereinstimmt, sind die Aussagen der 40 Zukunftsrealisationen sehr ähnlich und die Fläche wird schraffiert.

Für die Dürreindizes werden auch Karten der simulierten Vergangenheit (1961–1990) erstellt, weil es sich um einen selbst definierten Dürreindex handelt und demzufolge keine Referenzen vorhanden sind. Für die Starkniederschlags- und Temperaturindizes wird auf BERNHOFER et al. (2015) verwiesen.

Die Berechnung der Extremindizes erfolgt stationsweise. Für die flächige Darstellung sind die Punktdaten zu **interpolieren**. Die Änderungssignale der Sommertage und Frosttage weisen eine hohe Korrelation mit der Stationshöhe auf, d. h. es manifestieren sich klare Höhengradienten. Daher wurde – basierend auf den Werten an der Station und dessen Seehöhe – ein Regressionsmodell aufgebaut. Mithilfe des Digitalen Geländemodells wurde für jede 1 x 1 km-Gitterzelle ein Wert mittels des Regressionsmodells errechnet. Die sich an den Stützstellen ergebenden Unterschiede zwischen dem Regressions- und dem Beobachtungswert (Residuen) werden mittels der Inversen Distanzwichtung (IDW) interpoliert (Verwendung von 3 Nachbarstationen, Potenz: 2). Die Summe der mittels Regression und mittels IDW berechneten Werte ist das Ergebnis. Die Niederschlags- und Dürreindizes weisen kaum eine Korrelation zur Höhe auf, weshalb ausschließlich mittels IDW interpoliert wurde.

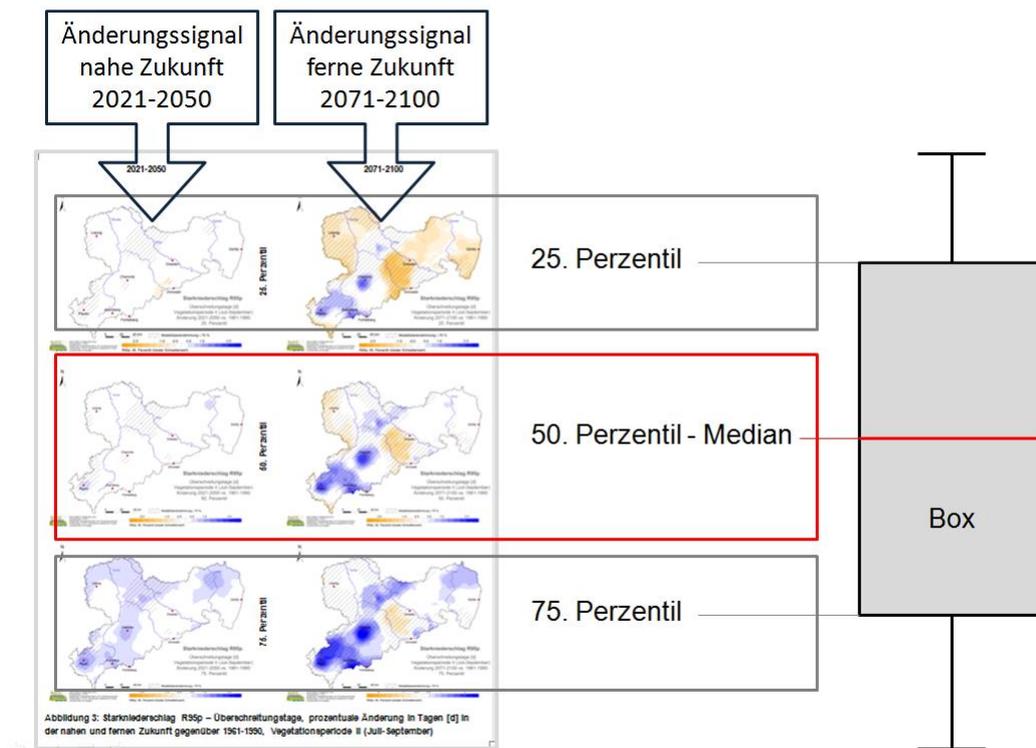
Bei einer Auflösung von 1 x 1 km gibt es für Sachsen 19.572 Rasterzellen. Für ausgewählte Indizes wurden Flächenmittel über alle Rasterzellen berechnet, um einen Gesamteindruck der Signaländerung zu erhalten.

Für Starkniederschläge (R95p) wird ergänzend zur Höhe der **zeitliche Verlauf der Aufttrittshäufigkeit** Ahfk für 1961–2100 analysiert. Details zur Methodik sind dem Kapitel 4.1.3 zu entnehmen.

In vielen Fällen bietet sich eine **höhenpezifische Interpretation** an. In BERNHOFER et al. (2008) erfolgte eine Einteilung in vier Höhenstufen. Wie oben erwähnt, ist keine räumlich und zeitlich detaillierte Analyse der zukünftigen Ausprägungen von Extremen anvisiert. Deshalb wird nachfolgend im Wesentlichen auf zwei Höhenstufen abgezielt (Tiefland:  $\leq 350$  m und Bergland  $> 350$  m).

### 5.1.3 Interpretationsbeispiel

Für alle analysierten Extremindizes wurden Musterblätter erstellt (Abbildung 51). Diese enthalten Karten mit dem Änderungssignal für die nahe Zukunft (2021–2050) und die ferne Zukunft (2051–2100) gegenüber der Referenzperiode (1961–1990). Der Fokus liegt auf den beiden mittleren Karten. Sie geben den Median (50. Perzentil) aus den 40 analysierten Realisierungen an. Des Weiteren werden Karten für das 25. und das 75. Perzentil dargestellt. Dadurch wird die obere und untere Grenze der Box des Box-Whisker-Plots visualisiert. Die Box und die Karten enthalten 50 % der Daten und ermöglichen somit eine Aussage über die Streuung des Ensembles.



**Abbildung 51: Interpretationsbeispiel der Musterblätter**

## 5.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die projizierten Klimaänderungssignale für den Starkniederschlag R95p, für Sommer- und Frosttage und Dürreperioden für die nahe und ferne Zukunft dargestellt und analysiert.

### 5.2.1 Starkniederschlag

Starkniederschlag wird hinsichtlich der Signaländerung der Regenhöhe des 95. Perzentils (R95p) [%] für das Kalenderjahr analysiert. Das Änderungssignal der Überschreitungstage für Starkniederschlag R95p wird für die Vegetationsperioden (VP) I und II betrachtet. Des Weiteren erfolgte eine Kernschätzung des zeitlichen Verlaufs der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlag R95p.

Bei der Analyse der Ergebnisse sollten lokal stark abweichende Ergebnisse nicht überwertet werden. Diese können das Resultat einer natürlichen räumlichen Variabilität sein. Es ist aber nicht auszuschließen, dass datenseitige Probleme (Plausibilität, Homogenität, Konsistenz) die Ursache hierfür sind. Die Daten wurden nur einer begrenzten, nicht näher dokumentierten Prüfung unterzogen (KREIENKAMP et al. 2011), bevor sie Eingang in WEREX V fanden. Auch Inkonsistenzen in der Prozessierung von Niederschlags- und Klimastationen werden vermutet (siehe Kapitel 4.3.1).

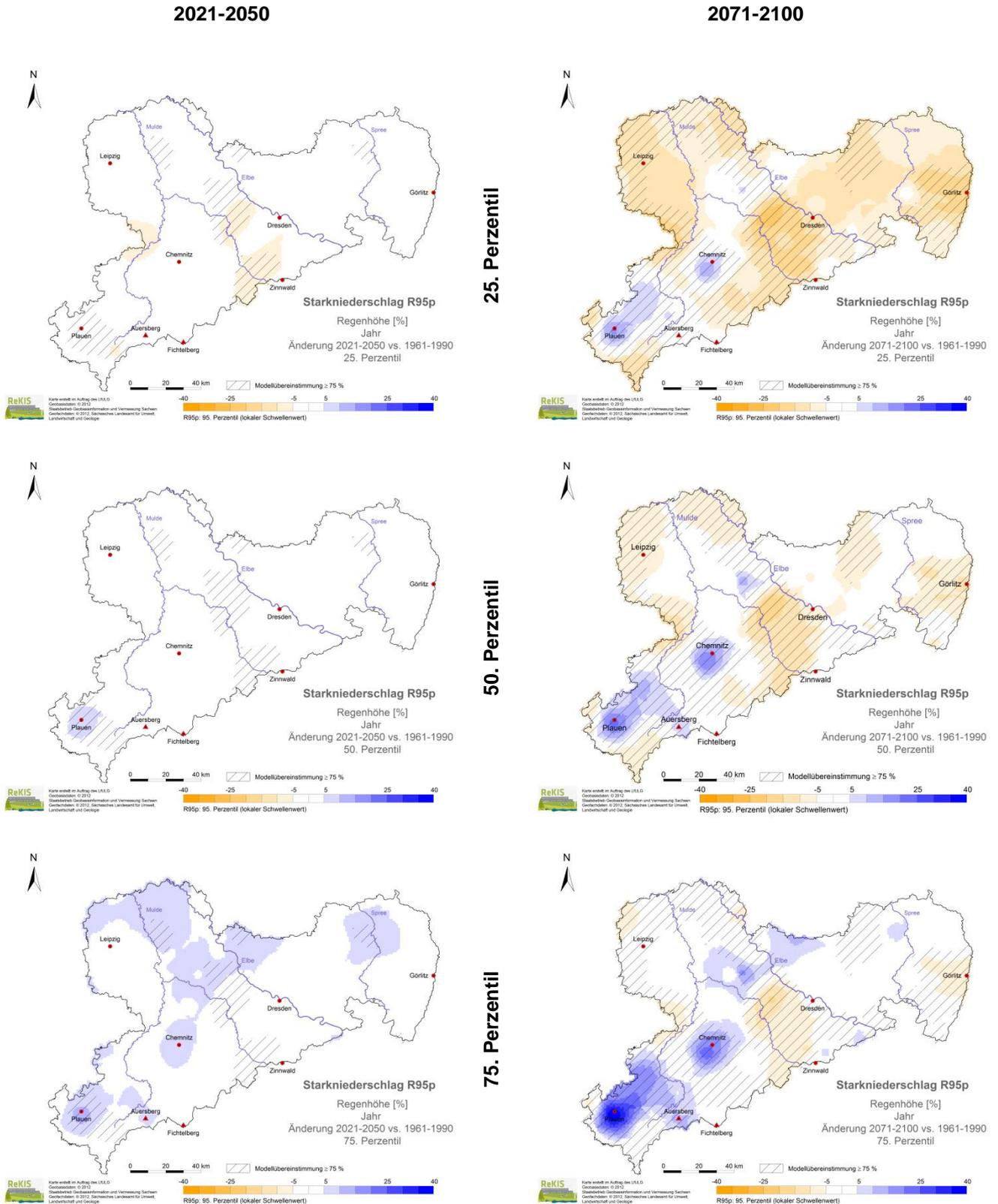
Klimaänderungssignale können sich regional sehr unterscheiden. Das erschwert Aussagen über das mittlere Verhalten in Sachsen. Deshalb wird für die nachfolgenden Tabellen das Flächenmittel als arithmetisches Mittel aller 19.572 Rasterzellen (1 km x 1 km) Sachsens berechnet.

## Regenhöhe und Überschreitungstage

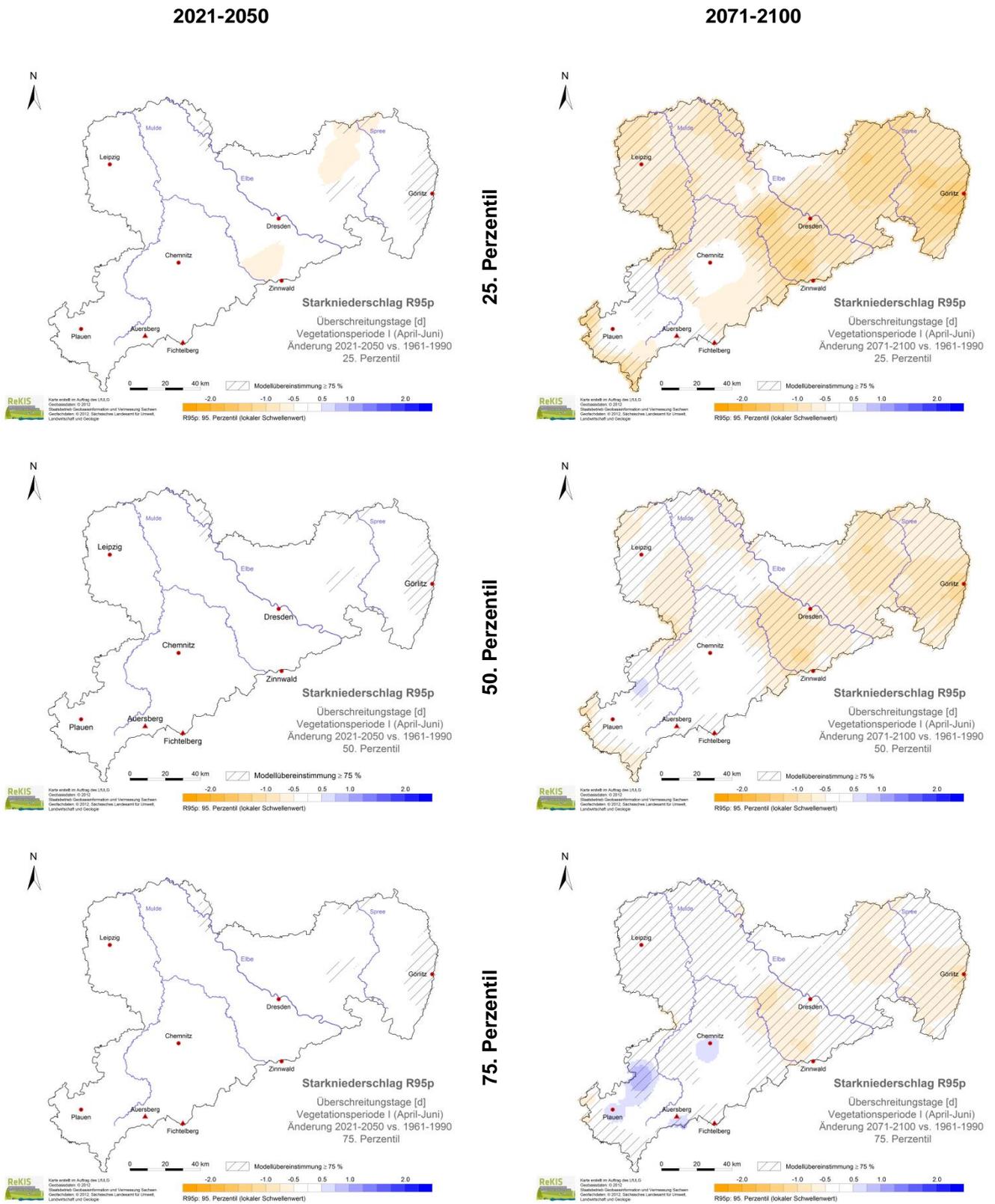
Die **Regenhöhe** von Starkniederschlag R95p zeigt für die nahe Zukunft gegenüber der Referenzperiode flächendeckend geringfügige Änderungen mit Tendenz zur Zunahme (50. Perzentil – Flächenmittel 0,5 %) (siehe Abbildung 52 und Tabelle 22). Für die ferne Zukunft sind die Signaländerungen räumlich sehr heterogen, das Flächenmittel deutet auf eine abnehmende Tendenz (- 3,2 %). Die Veränderungen der Regenhöhe R95p betragen wenige Millimeter. Die räumlichen Strukturen weisen für das 25., 50. und 75. Perzentil gleiche Muster auf. Die Änderungssignale der 40 Realisierungen zeigen für die nahe Zukunft eine geringe Streuung um Null, für die ferne Zukunft eine deutlich höhere Streuung. Die Modellübereinstimmung ist in der fernen Zukunft großflächiger als in der nahen Zukunft. Eine mögliche Ursache dafür sind die geringfügigen Änderungen in der nahen Zukunft. Das Änderungssignal des Medians schwankt im Bereich von  $\pm 5\%$ . So nahe bei null ist die Chance, dass 75 % der Projektionen dem Signal des Medians folgen, recht gering.

Für Starkniederschlag R95p kann für die nahe Zukunft gegenüber der Referenzperiode eine leichte Abnahme der Anzahl der **Überschreitungstage in VP I** festgestellt werden (50. Perzentil, Flächenmittel -5 %) und eine stärkere Abnahme in der fernen Zukunft (-26 %) (Abbildung 53 und Tabelle 23). Für die ferne Zukunft zeigen sich im Osten Sachsens stärkere Abnahmen der Überschreitungstage in der Vegetationsperiode I mit einer maximalen Abnahme bei Görlitz von 59 %. Für das 25., 50. und 75. Perzentil können in der nahen und der fernen Zukunft die gleichen räumlichen Muster identifiziert werden. Die 40 Realisierungen zeigen für das Änderungssignal der fernen Zukunft eine höhere Streuung als für die nahe Zukunft. In der fernen Zukunft ist die Modellübereinstimmung großflächiger als in der nahen Zukunft.

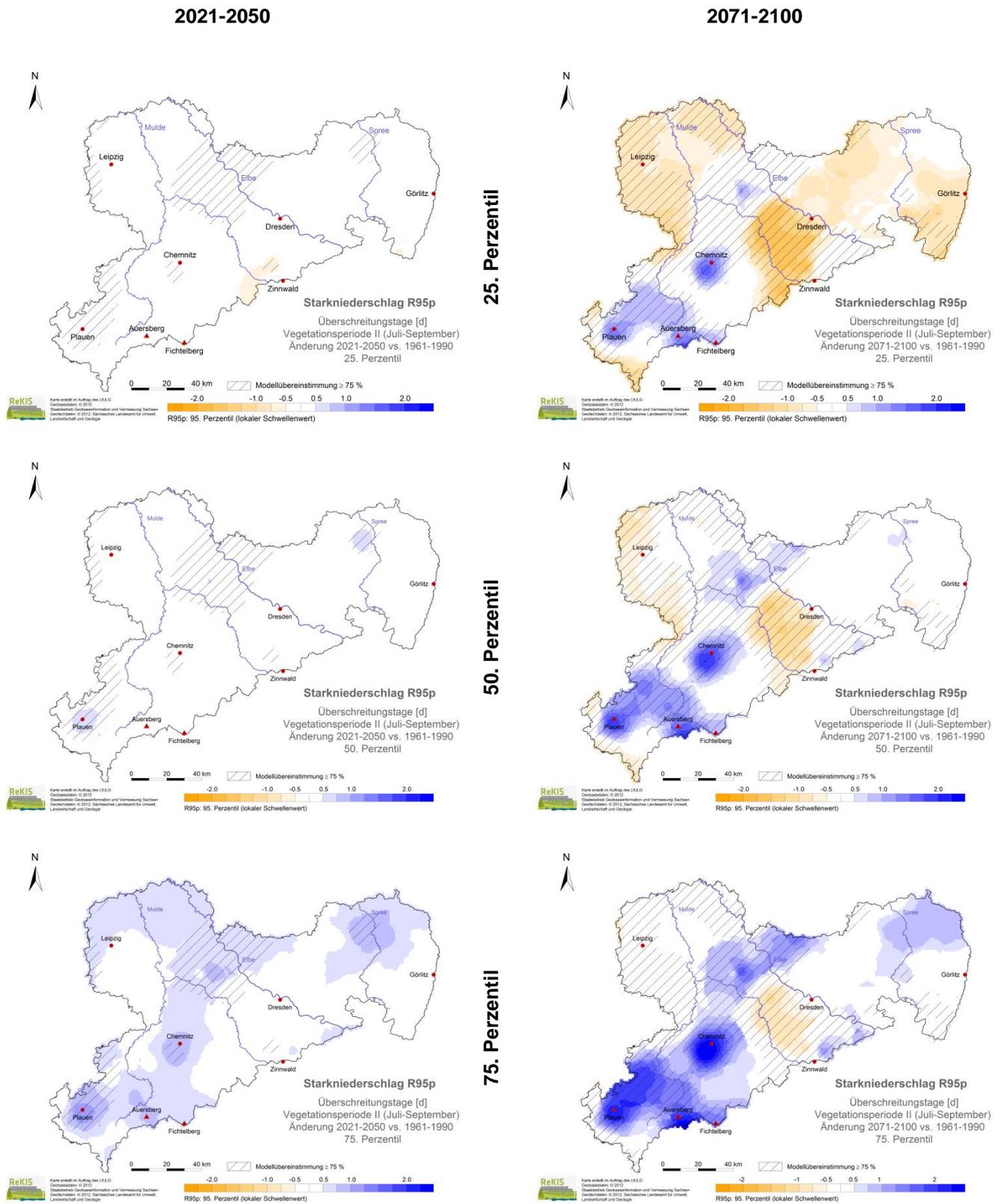
Für Starkniederschlag R95p verändert sich die Anzahl der **Überschreitungstage in VP II** im Median in der nahen Zukunft geringfügig (Abbildung 54). Im Flächenmittel ist eine Zunahme von 7 % zu verzeichnen (Tabelle 23). Die ferne Zukunft zeigt wesentlich heterogenere Änderungssignale mit deutlichen Zunahmen in einem von Südwest nach Nordost reichendem Streifen. Große Teile Sachsens erfahren keine Änderung. Abnahmen treten in der Region Dresden und Leipzig auf. Das Flächenmittel des Medians von 0,7 % zeigt daher kein flächendeckendes Änderungssignal für die ferne Zukunft. Die räumlichen Strukturen für das 25., 50. und 75. Perzentil sind für die nahe und ferne Zukunft sehr ähnlich. Das Änderungssignal der 40 Realisierungen zeigt in der fernen Zukunft eine deutlich höhere Streuung als in der nahen Zukunft. Die Modellübereinstimmung ist in der nahen Zukunft flächendeckend geringer als in der fernen Zukunft. Dies kann mit dem Wertebereich der nahen Zukunft (Median  $\pm 0,5$  Tage) erklärt werden (s. o.).



**Abbildung 52: Starkniederschlag R95p – Regenhöhe: prozentuale Änderung [%] in der nahen und ferneren Zukunft gegenüber 1961-1990 (Kalenderjahr, 25., 50. und 75. Perzentil)**



**Abbildung 53: Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage: Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (Vegetationsperiode I [April-Juni], 25., 50. und 75. Perzentil)**



**Abbildung 54: Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage: prozentuale Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (Vegetationsperiode II [Juli-September], 25., 50. und 75. Perzentil)**

**Tabelle 22: Signaländerung des 50. Perzentils in Prozent und Millimeter für Starkniederschlag R95p – Regenhöhe (Kalenderjahr) in der nahen und fernen Zukunft**

| Station              | Stationshöhe [minn] | 2021-2050 Signal |          | 2071-2100 Signal |          |
|----------------------|---------------------|------------------|----------|------------------|----------|
|                      |                     | [%]              | [mm]     | [%]              | [mm]     |
| <b>Flächenmittel</b> | -                   | <b>0,5 %</b>     | -        | <b>- 3,2 %</b>   | -        |
| Leipzig-Holzhausen   | 138 m               | 0,4 %            | 0,1 mm   | - 6,7 %          | - 1,1 mm |
| Dresden-Klotzsche    | 227 m               | 0,9 %            | 0,1 mm   | - 3,3 %          | - 0,5 mm |
| Görlitz              | 238 m               | - 2,3 %          | - 0,4 mm | - 10,3 %         | - 1,6 mm |
| Plauen               | 386 m               | 8,6 %            | 1,2 mm   | 21,1 %           | 3,0 mm   |
| Chemnitz WEWA        | 418 m               | 2,5 %            | 0,4 mm   | 18,7 %           | 3,3 mm   |
| Zinnwald-Georgenfeld | 877 m               | - 1,3 %          | - 0,3 mm | - 4,5 %          | - 0,9 mm |
| Fichtelberg WEWA     | 1213 m              | - 0,8 %          | - 0,2 mm | - 0,4 %          | - 0,1 mm |

**Tabelle 23: Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Vegetationsperiode I in der nahen und fernen Zukunft**

| Station              | Stationshöhe [minn] | 2021-2050 Signal |              | 2071-2100 Signal |               |
|----------------------|---------------------|------------------|--------------|------------------|---------------|
|                      |                     | [d]              | [%]          | [d]              | [%]           |
| Flächenmittel        | -                   | <b>- 0,1 d</b>   | <b>- 5 %</b> | <b>- 0,5 d</b>   | <b>- 26 %</b> |
| Leipzig-Holzhausen   | 138 m               | + 0,1 d          | + 3 %        | - 0,4 d          | - 25 %        |
| Dresden-Klotzsche    | 227 m               | - 0,1 d          | - 8 %        | - 0,6 d          | - 35 %        |
| Görlitz              | 238 m               | - 0,3 d          | - 14 %       | - 1,1 d          | - 59 %        |
| Plauen               | 386 m               | + 0,1 d          | + 6 %        | + 0,4 d          | + 22 %        |
| Chemnitz WEWA        | 418 m               | + 0,1 d          | + 7 %        | 0,1 d            | + 8 %         |
| Zinnwald-Georgenfeld | 877 m               | - 0,20 d         | - 14 %       | - 0,6 d          | - 40 %        |
| Fichtelberg WEWA     | 1213 m              | - 0,1 d          | - 3 %        | - 0,3 d          | - 18 %        |

**Tabelle 24: Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für Vegetationsperiode II in der nahen und fernen Zukunft**

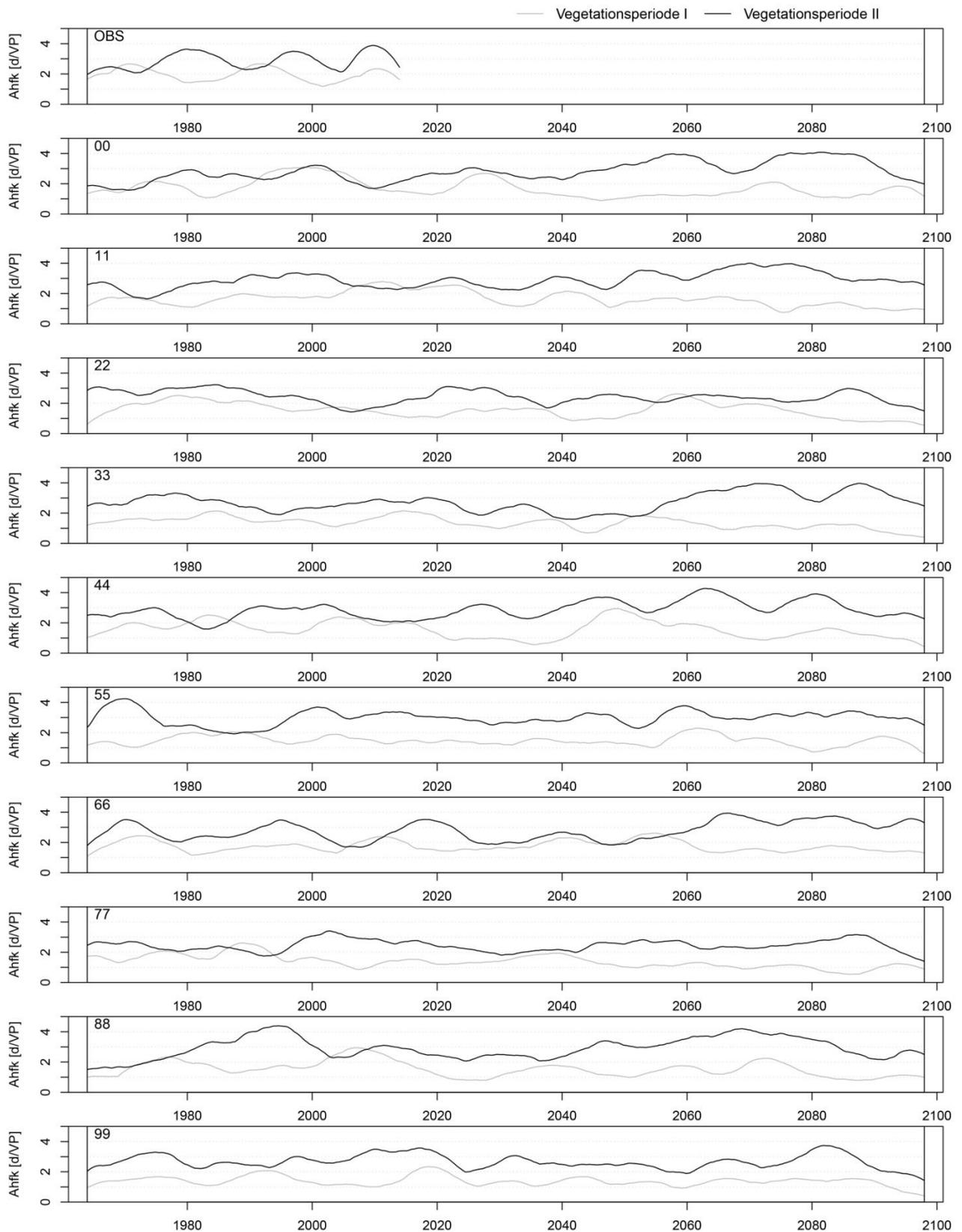
| Station              | Stationshöhe [minn] | 2021-2050 Signal |      | 2071-2100 Signal |        |
|----------------------|---------------------|------------------|------|------------------|--------|
|                      |                     | [d]              | [%]  | [d]              | [%]    |
| Flächenmittel        | -                   | 0,2 d            | 7 %  | 0,0 d            | 0,7 %  |
| Leipzig-Holzhausen   | 138 m               | 0,2 d            | 6 %  | - 0,5 d          | - 17 % |
| Dresden-Klotzsche    | 227 m               | 0,2 d            | 7 %  | - 0,2 d          | - 7 %  |
| Görlitz              | 238 m               | 0,0 d            | 0 %  | - 0,2 d          | - 8 %  |
| Plauen               | 386 m               | 0,6 d            | 24 % | 1,9 d            | 67 %   |
| Chemnitz WEWA        | 418 m               | 0,4 d            | 13 % | 2,0 d            | 70 %   |
| Zinnwald-Georgenfeld | 877 m               | 0,1 d            | 2 %  | - 0,3 d          | - 9 %  |
| Fichtelberg WEWA     | 1213 m              | 0,2 d            | 6 %  | 1,0 d            | 33 %   |

### Zeitlicher Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlag

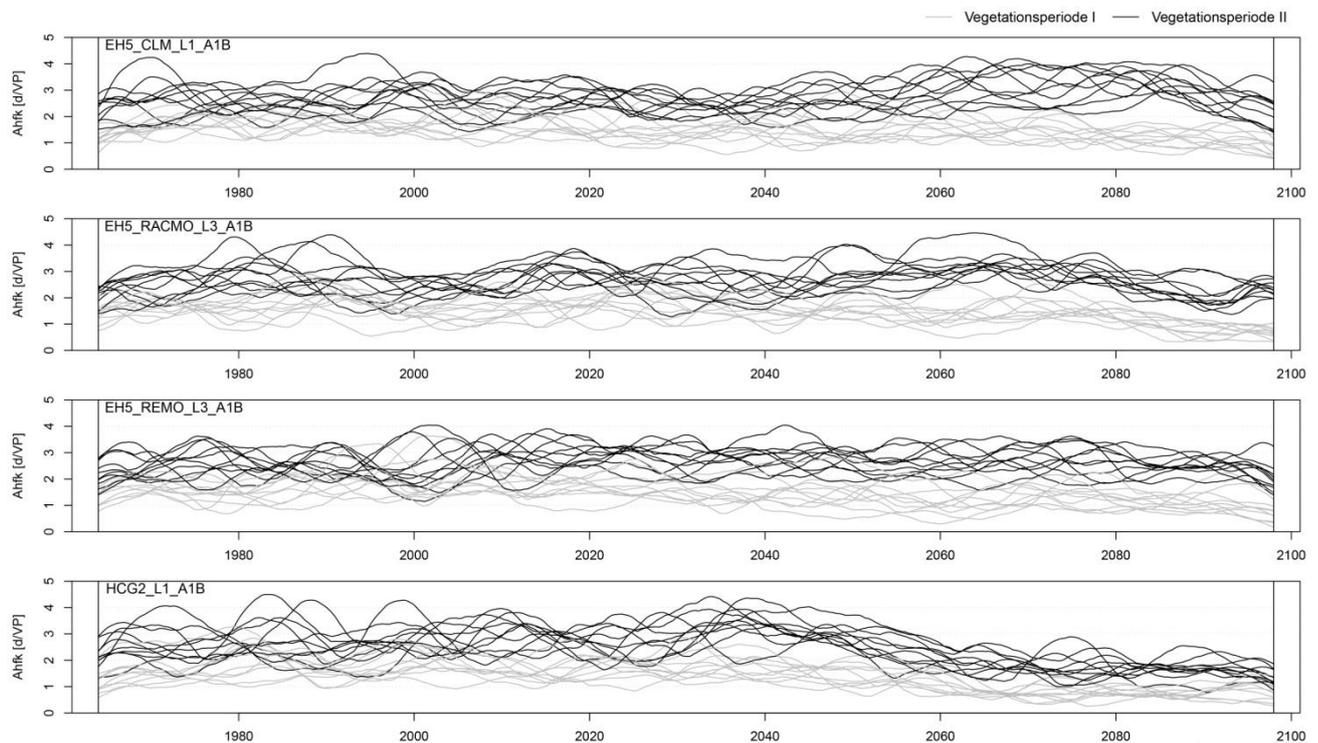
Es wurde eine Kernschätzung des zeitlichen Verlaufs der Auftrittshäufigkeit Ahfk von Starkniederschlag R95p von 1961–2100 in der Vegetationsperiode (VP) I und II für die Stationen Dresden-Klotzsche, Fichtelberg (WEWA), Leipzig-Holzhausen, Görlitz, Plauen und Zinnwald-Georgenfeld durchgeführt. Fokus dieses Kapitels ist die Darstellung von Starkniederschlag im zeitlichen Verlauf über den gesamten modellierten Zeitraum, um zu analysieren, ob sich die beobachtete zeitliche Variabilität in der Zukunft fortsetzt. Es werden exemplarisch die Ergebnisse der Station Dresden-Klotzsche gezeigt. Die Ergebnisse der anderen Stationen sind der DVD zu entnehmen. Für einen räumlichen Eindruck der Überschreitungstage von Starkniederschlagsereignissen in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 wird auf Abbildung 53 und Abbildung 54 verwiesen. Die Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlag R95p wird in Tagen pro VP angegeben. Methodikbedingt ist der Kurvenverlauf an den Rändern (3 Jahre) nicht zu bewerten und wird daher ausschließlich für 1964–2097 visualisiert.

In Abbildung 55 werden die Auftrittshäufigkeiten von Starkniederschlag R95p für den Lauf EH5-CLM-L1-A1B für alle Realisierungen und die observierte Zeitreihe für die Vegetationsperioden dargestellt. Die entsprechenden Abbildungen für die anderen WEREX V-Läufe sind im Anhang (Abbildung 85, Abbildung 86, Abbildung 87) zu finden. Die betrachteten Realisierungen der ausgewählten ECHAM5-Läufe zeigen sowohl für den Referenzzeitraum als auch für die Zukunft ein **Schwankungsverhalten**. Eine zeitliche Übereinstimmung des Schwankungsverhaltens der beobachteten mit der simulierten Ahfk ist erwartungsgemäß nicht festzustellen. Das Schwankungsverhalten ist in den einzelnen Realisierungen der Läufe sehr unterschiedlich. Bei einem Großteil der Projektionen unterscheidet sich das Schwankungsverhalten deutlich von dem der observierten Zeitreihe. Dies zeigt sich besonders deutlich in der VP I. Die Ursache ist möglicherweise methodikbedingt mit der geringen Anzahl an Starkregenereignissen in VP I zu erklären.

Abbildung 56 visualisiert den **zeitlichen Verlauf** der Auftrittshäufigkeit für Dresden-Klotzsche für EH5-CLM-L1-A1B, EH5-RACMO-L3-A1B, EH5-REMO-L3-A1B und HCG2-L1-A1B für die VP I und II. Auf der DVD sind diese Abbildungen für die Stationen Fichtelberg (WEWA), Leipzig-Holzhausen, Görlitz, Plauen und Zinnwald-Georgenfeld zu finden. Generell treten in der VP II mehr Starkniederschlagsereignisse auf als in der VP I. Bei Betrachtung der ausgewählten Läufe für die Vergangenheit ist die Ahfk in der VP I regelmäßig auch mal höher als in der VP II. Dies ist in den Projektionen weniger häufig zu erkennen. Vielmehr treten Phasen auf, in denen die Ahfk in der VP II deutlich über der Ahfk in der VP I liegt. In den verschiedenen Läufen ist dieses Phänomen unterschiedlich stark ausgeprägt. Besonders prägnant ist es für die Stationen Fichtelberg und Plauen für die ferne Zukunft. Des Weiteren sind die langfristigen Tendenzen der Auftrittshäufigkeit in der VP II in den vier Läufen der Station Dresden-Klotzsche unterschiedlich. Während für EH5-CLM-L1-A1B der Trend positiv ist, ist er für EH5-RACMO-L3-A1B und EH5-REMO-L3-A1B null und für HCG2-L1-A1B sogar negativ. Die starke Abnahme von HCG2-L1-A1B zeigt sich auch für die Stationen Leipzig-Holzhausen, Görlitz und Zinnwald-Georgenfeld. Die Station Plauen zeigt hingegen Zunahmen der Ahfk in beiden VP in allen Läufen. Am Fichtelberg sind die Zunahmen auf VP II beschränkt.



**Abbildung 55: Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961-2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-CLM-L1-1A1B für die Vegetationsperiode I und II des Zeitraums 1961-2100**



**Abbildung 56: Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die Läufe EH5-CLM-L1-A1B, EH5-RACMO-L3-A1B, EH5-REMO-L3-A1B und HCG2-L1-A1B für die Vegetationsperiode I und II des Zeitraums 1961-2100**

### 5.2.2 Wärme-/Kältebelastung

Um die Aussagen des WEREX V-Datensatzes hinsichtlich der Wärme- und Kältebelastung bewerten zu können, wurden Sommer- und Frosttage für die nahe und ferne Zukunft untersucht. Die Änderungssignale werden in Tagen gegenüber der Referenzperiode 1961–1990 für das Kalenderjahr analysiert.

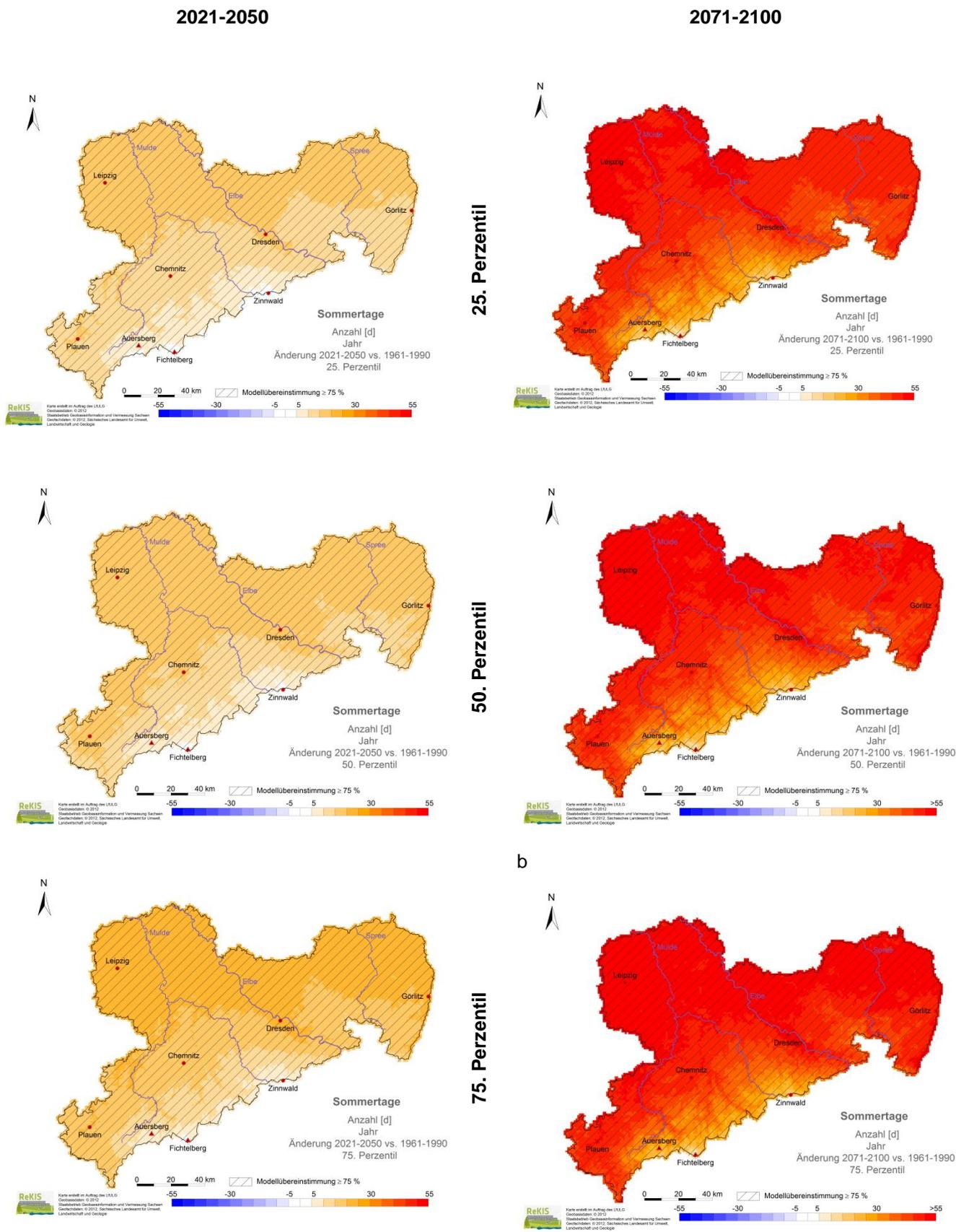
Die **Wärmebelastung** in der Zukunft wurde anhand der **Sommertage** analysiert. Die Sommertage nehmen in der nahen Zukunft gegenüber der Referenzperiode um 16 Tage zu (Flächenmittel des Medians der 40 Projektionen) und in der fernen Zukunft um 45 Tage zu (Abbildung 57 und Tabelle 25). Dies entspricht einer Zunahme der Sommertage im Flächenmittel von 74 % in der nahen und 235 % in der fernen Zukunft. Die Anzahl der Sommertage nimmt im Tiefland stärker zu als im Bergland und zeigt somit einen deutlichen Höhengradienten. Die stärksten Auswirkungen bezüglich der Wärmebelastung sind im Tiefland mit einer Zunahme der Sommertage um 16 bis 18 in der nahen Zukunft und mit einer Verdreifachung des Signals in der fernen Zukunft zu erwarten. Die prozentual höchsten Zunahmen der Sommertage sind im Kamm des Erzgebirges zu verzeichnen. Beispielsweise nimmt die jährliche Anzahl der Sommertage am Fichtelberg in der nahen Zukunft um 1 Tag und in der fernen Zukunft um 8 Tage zu. Dies entspricht einer Zunahme um 199 bzw. 1.078 %. Ursache dieser hohen prozentualen Zunahmen ist die geringe Anzahl der Sommertage in der Referenzperiode (durchschnittlich weniger als ein Sommertag pro Jahr). Das zeigt deutlich, dass hohe prozentuale Änderungen nicht automatisch mit einem hohen Impact (z. B. Gesundheitsbelastung) verbunden und demzufolge immer im Kontext mit den absoluten Zahlen zu bewerten sind.

Die räumlichen Strukturen sind für das 25., 50. und 75. Perzentil sehr ähnlich (Abbildung 57). Die geringen Unterschiede zwischen dem 25. und dem 75. Perzentil weisen darauf hin, dass die Änderungssignale der

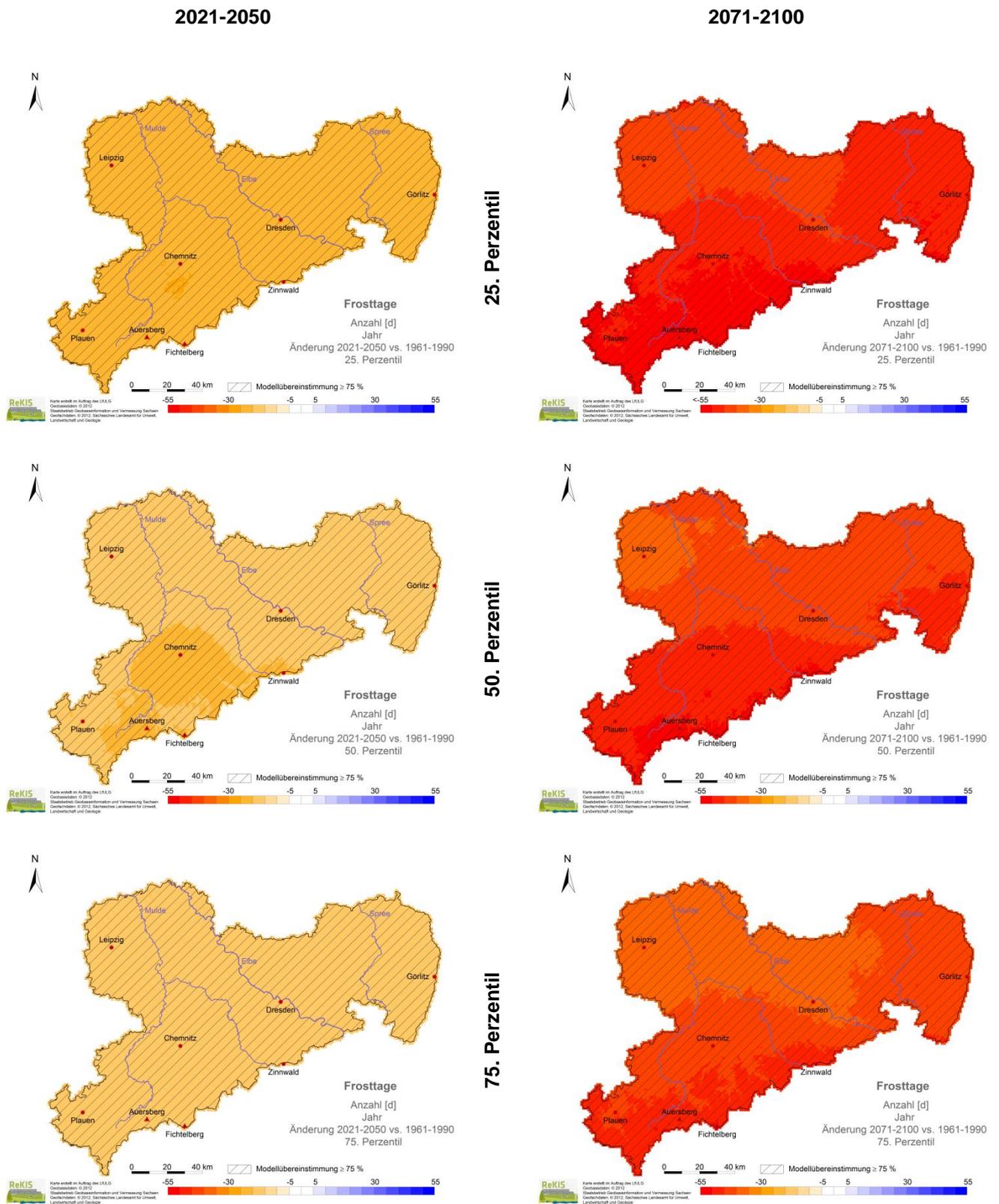
40 Realisierungen nahe beieinander liegen, die Schwankungsbreite des Ensembles demzufolge gering ist. Es zeigt sich für die nahe und die ferne Zukunft eine flächendeckende Modellübereinstimmung von 100 %, d. h. die Richtung (Vorzeichen) des Mediansignals stimmt mit der Richtung von 75 % des Ensembles überein.

Die **Kältebelastung** wurde anhand der **Frosttage** für die Zukunft analysiert. Die Frosttage nehmen in der nahen Zukunft um 19 Tage (Flächenmittel des Medians der 40 Realisierungen) ab, dies entspricht einer Abnahme von 21 % (Abbildung 58 und Tabelle 26). In der fernen Zukunft werden Abnahmen des Flächenmittels um 44 d (-50 %) projiziert. Die Kammlagen zeigen mit einer Abnahme von 20 Tagen in der nahen Zukunft und über 50 Tagen in der fernen Zukunft etwas stärkere Abnahmen als die Tieflagen (Tabelle 26). Prozentual gesehen ist die Abnahme in den Tieflagen (21–24 % in der nahen Zukunft und 50–54 % in der fernen Zukunft) höher als im Bergland (14–23 % in der nahen Zukunft und 34–52 % in der fernen Zukunft).

Für das 25., 50. und 75. Perzentil sind die gleichen räumlichen Strukturen zu erkennen. Flächendeckend zeigt sich eine Modellübereinstimmung von 100 %. Folglich stimmt die Richtung (Vorzeichen) des Mediansignals mit der Richtung von 75 % des Ensembles überein.



**Abbildung 57: Sommerstage: Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961–1990 (25., 50. und 75. Perzentil, Kalenderjahr)**



**Abbildung 58: Frosttage: Änderung in Tagen [d] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961–1990 (25., 50. und 75. Perzentil, Kalenderjahr)**

**Tabelle 25: Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Sommertage in der nahen und fernen Zukunft**

| Station              | Stationshöhe [minn] | 2021-2050 Signal |               | 2071-2100 Signal |                |
|----------------------|---------------------|------------------|---------------|------------------|----------------|
|                      |                     | [d]              | [%]           | [d]              | [%]            |
| <b>Flächenmittel</b> | -                   | <b>+ 16 d</b>    | <b>+ 74 %</b> | <b>+ 45 d</b>    | <b>+ 235 %</b> |
| Leipzig-Holzhausen   | 138 m               | 18 d             | 55 %          | 52 d             | 157 %          |
| Dresden-Klotzsche    | 227 m               | 17 d             | 61 %          | 48 d             | 166 %          |
| Görlitz              | 238 m               | 16 d             | 63 %          | 46 d             | 185 %          |
| Plauen               | 386 m               | 17 d             | 76 %          | 47 d             | 210 %          |
| Chemnitz WEWA        | 418 m               | 14 d             | 77 %          | 43 d             | 235 %          |
| Zinnwald-Georgenfeld | 877 m               | 4 d              | 188 %         | 16 d             | 833 %          |
| Fichtelberg WEWA     | 1213 m              | 1 d              | 199 %         | 8 d              | 1078 %         |

**Tabelle 26: Signaländerung des 50. Perzentils in Tagen und Prozent für Frosttage in der nahen und fernen Zukunft**

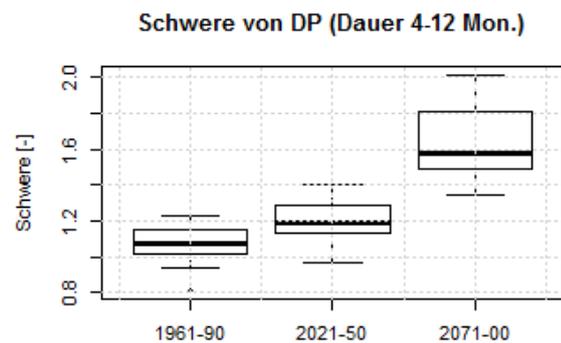
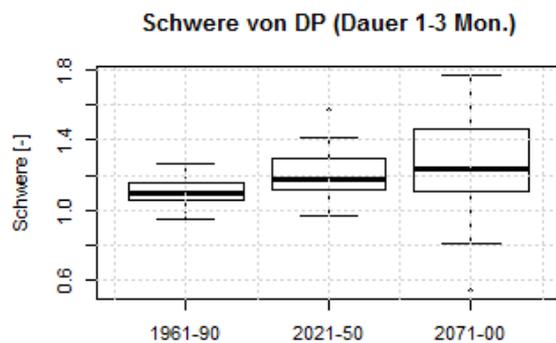
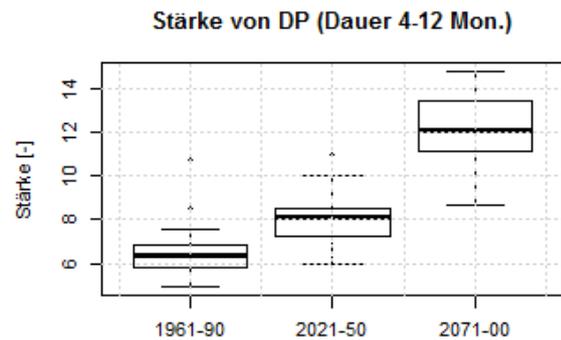
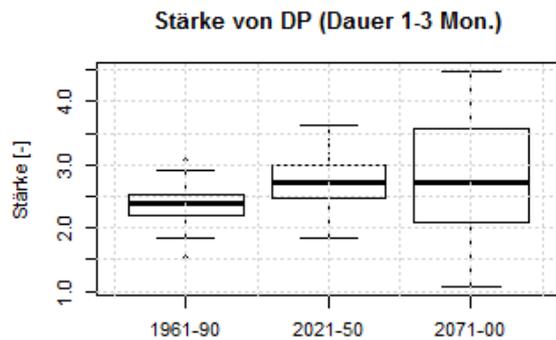
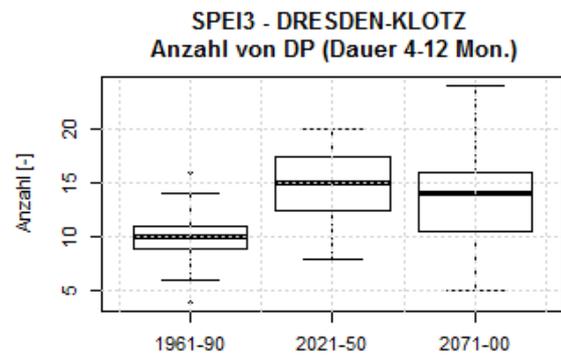
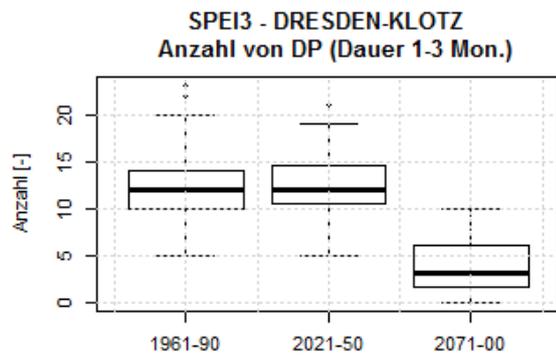
| Station              | Stationshöhe [minn] | 2021-2050 Signal |               | 2071-2100 Signal |               |
|----------------------|---------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
|                      |                     | [d]              | [%]           | [d]              | [%]           |
| <b>Flächenmittel</b> | -                   | <b>- 19 d</b>    | <b>- 21 %</b> | <b>- 44 d</b>    | <b>- 50 %</b> |
| Leipzig-Holzhausen   | 138 m               | - 17 d           | - 24 %        | - 39 d           | - 54 %        |
| Dresden-Klotzsche    | 227 m               | - 17 d           | - 22 %        | - 41 d           | - 52 %        |
| Görlitz              | 238 m               | - 19 d           | - 21 %        | - 45 d           | - 50 %        |
| Plauen               | 386 m               | - 20 d           | - 20 %        | - 48 d           | - 48 %        |
| Chemnitz WEWA        | 418 m               | - 21 d           | - 23 %        | - 47 d           | - 52 %        |
| Zinnwald-Georgenfeld | 877 m               | - 20 d           | -14 %         | - 52 d           | - 34 %        |
| Fichtelberg WEWA     | 1213 m              | - 20 d           | - 12 %        | - 54 d           | - 31 %        |

### 5.2.3 Dürreperioden

Die Analyse von Dürreperioden (DP) erfolgte für den rein niederschlagsbasierten Index SPI und den SPEI. Letzterer bildet DP realitätsnäher ab, weil neben dem Niederschlag die Verlustgröße Verdunstung mit einbezogen wird. Zur Berechnung der potenziellen Verdunstung werden Temperatur und Strahlungsdaten benötigt, die im Untersuchungsgebiet nur an 12 Stationen gemessen werden. Eine Visualisierung in Kartenform wird daher nicht für den SPEI, sondern nur für den SPI durchgeführt. Um mögliche Höhengradienten der Indizes zu identifizieren, werden nicht nur die fünf in Sachsen liegenden, sondern alle 12 Stationen aufgeführt.

### Standardisierter Niederschlags-Evaporationsindex SPEI

Die Ergebnisse der auf dem SPEI basierenden Dürreanalyse werden für alle 12 Stationen tabellarisch zusammengefasst (Tabelle 27 und Tabelle 28) sowie exemplarisch für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg (WEWA) in Form von Boxplots visualisiert (SPEI3: Abbildung 59 und Abbildung 60; SPEI12: Abbildung 83 und Abbildung 84 im Anhang). Im Folgenden wird auf die Ergebnisse aller und die Besonderheiten der beiden im Detail analysierten Stationen eingegangen.



**Abbildung 59: Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPEI3 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 3 bzw. 4 bis 12 Monaten für die Station Dresden-Klotzsche. Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961-1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft.**

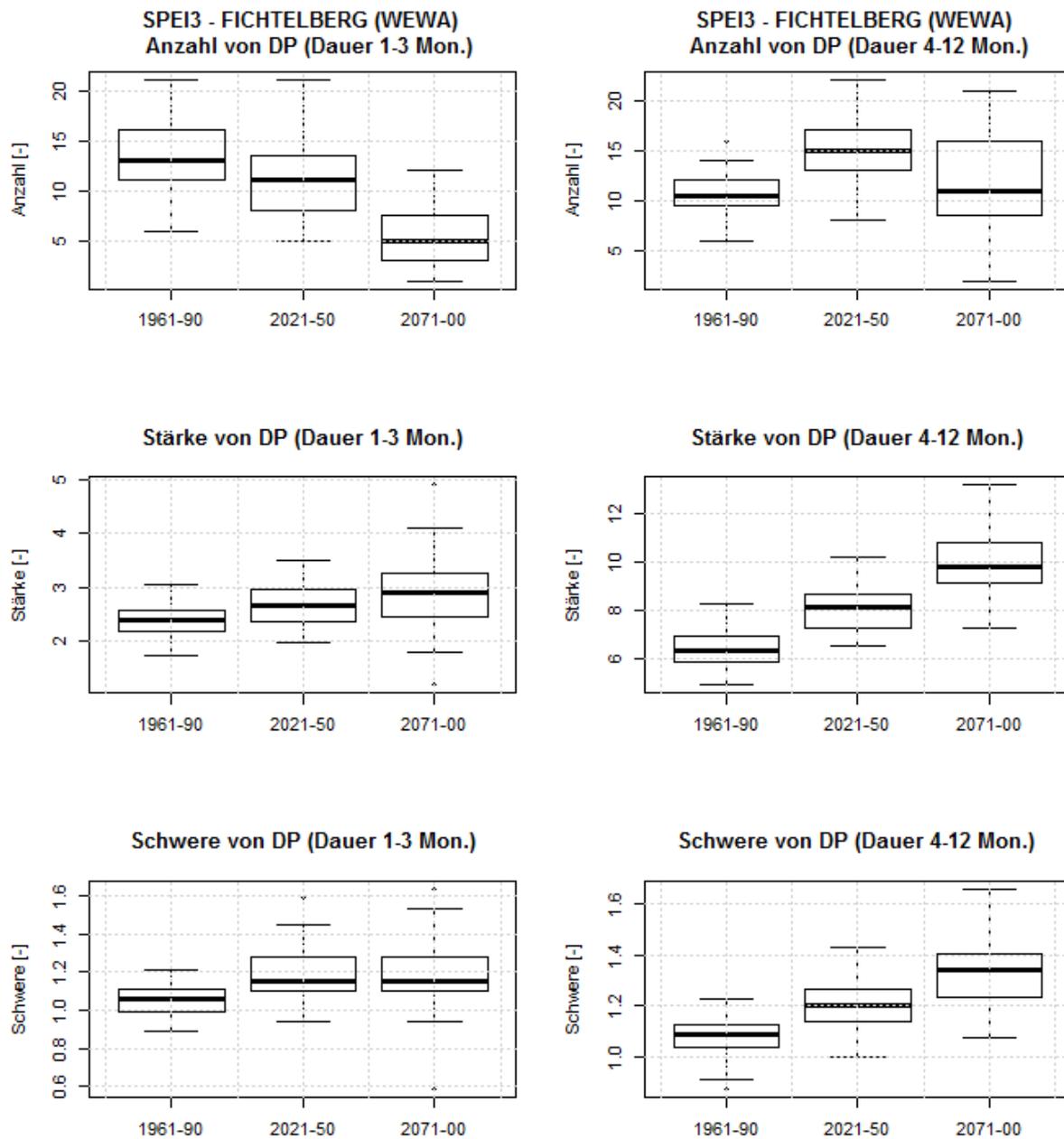


Abbildung 60: Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPEI3 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 3 bzw. 4 bis 12 Monate für die Station Fichtelberg (WEWA). Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961-1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft.

Der für z. B. landwirtschaftliche Belange relevante **SPEI3** wurde hinsichtlich Dürreperioden kurzer (1–3 Monate) und langer Dauer (4–12 Monate) analysiert. Ist man an der Gesamtanzahl von kurzen DP interessiert, müssten zu den kurzen die langen DP addiert werden, weil auch lange DP für die kurze Zeitdauer relevant sind.

- In der Referenzperiode 1961–90 gibt es 12–13 kurze DP und 9–10 lange DP. Die Unterschiede in der Stärke und Schwere der DP innerhalb einer Andauerklasse sind marginal. Es existiert ein Höhengradient in der Schwere (in flacheren Regionen schwerere DP), der allerdings erst in der 2. Nachkommastelle ersichtlich wird.
- Für die nahe Zukunft 2021–2050 wird in flacheren Regionen eine leichte Zunahme bzw. keine Änderung und in höheren Regionen eine leichte Abnahme der Anzahl von kurzen DP projiziert. Längere DP nehmen markant zu. Die Stärke von kurzen nimmt um 5–18 % und die von langen DP sogar um 17–29 % pro Ereignis zu. Ähnlich verhält es sich mit der Schwere von DP (4–12 % bzw. 12–20 %).
- Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) wird eine Abnahme der Anzahl von kurzen DP um 4–11 Perioden prognostiziert, wohingegen die Anzahl längerer DP um 1–13 zunimmt. Die Zunahme der Stärke beträgt für kurze und lange DP 4–33 % bzw. 50–170 % und der Schwere 7–17 % bzw. 20–80 %.

Der für das Wassermanagement relevante **SPEI12** wurde für DP kurzer (1–12 Monate) und langer Dauer (> 12 Monate) untersucht.

- In der Vergangenheit gab es 4–6 kurze und 2–3 lange DP. Kurze DP verlaufen im Flachland stärker als im Bergland. Die langen DP fallen schwerer als kurze aus.
- In der nahen Zukunft gibt es leichte Abnahmen der Anzahl von kurzen DP um bis zu 2 in 30 Jahren, jedoch werden längere DP häufiger (2–4). Die Stärke von kurzen DP kann bis zu 14 % und die von langen um 54–200 % pro Ereignis zunehmen. Ebenso verhält es sich mit der Schwere <11 % bzw. 8–27 %.
- Für die ferne Zukunft wird eine Abnahme der Anzahl von kurzen DP um 4–5 in 30 Jahren projiziert und von längeren DP um 0–2. Die Stärke von kurzen DP ändert sich um  $\pm 70$  % und die von langen DP um 500–3.000 %. Auch die Schwere wird zunehmen (<43 % bzw. 53–138 %). Damit sinkt die Anzahl von DP, wie in Abbildung 83 ersichtlich, auf null. Das resultiert daraus, dass der SPEI12 in den meisten Projektionen nicht mehr über 0 geht, das heißt, es besteht ein kontinuierlicher Wassermangel (Abbildung 66). Auch die extremen Stärken und Schwere der DP sind Ergebnis dieses im Vergleich zu 1961–1990 extrem trockenen Zustandes.

Aus den Boxplots (Abbildung 59, Abbildung 60, Abbildung 83 und Abbildung 84) wird die Spannweite des Ensembles ersichtlich. Insbesondere in der fernen Zukunft variieren die Ergebnisse der 40 Zukunftsrealisationen bei der Stärke und demzufolge Schwere von DP sehr. Die Modelle sind sich größtenteils einig in der Richtung der Veränderungen, die Unsicherheiten sind größer in der Ausprägung von DP.

**Tabelle 27: Analyse der Dürreperiodenindizes auf Basis des SPEI3 für alle Stationen im Untersuchungsgebiet. Für die zukünftigen Perioden ist das Änderungssignal vs. 1961–1990 dargestellt.**

| Anzahl             |                  | Dauer 1 bis 3 Monate |                      |                      | Dauer 4 bis 12 Monate |                      |                      |
|--------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Station            | Stationshöhe [m] | 1961-1990 [-]        | 2021-2050 Signal [-] | 2071-2100 Signal [-] | 1961-1990 [-]         | 2021-2050 Signal [-] | 2071-2100 Signal [-] |
| COTTBUS (WEWA)     | 69               | 13                   | 2                    | -6                   | 10                    | 4.5                  | 11                   |
| WITTENBERG (WEWA)  | 105              | 12                   | 1                    | -9                   | 10                    | 5                    | 13                   |
| ARTERN (WEWA)      | 164              | 13                   | 0                    | -10                  | 10                    | 4.5                  | 11.5                 |
| DRESDEN-KLOTZ      | 227              | 12                   | 0                    | -9                   | 10                    | 5.5                  | 3                    |
| GOERLITZ (WEWA)    | 238              | 11.5                 | 0                    | -8.5                 | 9                     | 6.5                  | 4                    |
| GERA-LEUMNITZ      | 311              | 13                   | -1                   | -9.5                 | 10                    | 6                    | 3                    |
| HEINERSREUTH-VOLL  | 350              | 12                   | 0.5                  | -9                   | 9.5                   | 5                    | 13                   |
| CHEMNITZ (WEWA)    | 418              | 13                   | 1                    | -4                   | 10                    | 5                    | 6                    |
| WEIDEN             | 440              | 14                   | -0.5                 | -11                  | 10                    | 5                    | 12                   |
| HOF-HOHENSAAS      | 565              | 12.5                 | -1                   | -10                  | 11                    | 5                    | 11                   |
| ZINNWALD-GEORGEN   | 877              | 13                   | -2                   | -10.5                | 9.5                   | 6                    | 3                    |
| FICHTELBERG (WEWA) | 1213             | 13                   | -2                   | -8                   | 10.5                  | 4                    | 1                    |
| Stärke             | Stationshöhe [m] | 1961-1990 [-]        | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] | 1961-1990 [-]         | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] |
| COTTBUS (WEWA)     | 69               | 2.3                  | 11                   | 16                   | 6.4                   | 17                   | 71                   |
| WITTENBERG (WEWA)  | 105              | 2.4                  | 8                    | 23                   | 6.5                   | 19                   | 96                   |
| ARTERN (WEWA)      | 164              | 2.3                  | 15                   | 33                   | 6.2                   | 29                   | 110                  |
| DRESDEN-KLOTZ      | 227              | 2.4                  | 18                   | 12                   | 6.4                   | 25                   | 102                  |
| GOERLITZ (WEWA)    | 238              | 2.4                  | 14                   | 14                   | 6.5                   | 29                   | 171                  |
| GERA-LEUMNITZ      | 311              | 2.4                  | 10                   | 14                   | 6.4                   | 25                   | 85                   |
| HEINERSREUTH-VOLL  | 350              | 2.4                  | 18                   | 4                    | 6.3                   | 28                   | 124                  |
| CHEMNITZ (WEWA)    | 418              | 2.3                  | 11                   | 18                   | 6.4                   | 17                   | 50                   |
| WEIDEN             | 440              | 2.3                  | 5                    | 15                   | 6.7                   | 24                   | 86                   |
| HOF-HOHENSAAS      | 565              | 2.3                  | 14                   | 14                   | 6.3                   | 25                   | 82                   |
| ZINNWALD-GEORGEN   | 877              | 2.4                  | 15                   | 31                   | 6.4                   | 22                   | 90                   |
| FICHTELBERG (WEWA) | 1213             | 2.4                  | 13                   | 22                   | 6.3                   | 26                   | 55                   |
| Schwere            | Stationshöhe [m] | 1961-1990 [-]        | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] | 1961-1990 [-]         | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] |
| COTTBUS (WEWA)     | 69               | 1.1                  | 7.3                  | 15.9                 | 1.1                   | 14.4                 | 47.6                 |
| WITTENBERG (WEWA)  | 105              | 1.1                  | 6.6                  | 17.3                 | 1.1                   | 14.9                 | 65.6                 |
| ARTERN (WEWA)      | 164              | 1.1                  | 4.2                  | 8.8                  | 1.1                   | 18.7                 | 66.4                 |
| DRESDEN-KLOTZ      | 227              | 1.1                  | 10.7                 | 14.8                 | 1.1                   | 14.6                 | 64.9                 |
| GOERLITZ (WEWA)    | 238              | 1.1                  | 7.3                  | 11.7                 | 1.1                   | 13.3                 | 82.0                 |
| GERA-LEUMNITZ      | 311              | 1.1                  | 8.4                  | 11.0                 | 1.1                   | 17.2                 | 46.5                 |
| HEINERSREUTH-VOLL  | 350              | 1.1                  | 11.2                 | 7.2                  | 1.0                   | 20.4                 | 79.8                 |
| CHEMNITZ (WEWA)    | 418              | 1.1                  | 10.9                 | 12.4                 | 1.1                   | 10.7                 | 20.6                 |
| WEIDEN             | 440              | 1.1                  | 7.3                  | 10.5                 | 1.1                   | 15.2                 | 60.0                 |
| HOF-HOHENSAAS      | 565              | 1.1                  | 12.5                 | 17.0                 | 1.0                   | 16.4                 | 52.8                 |
| ZINNWALD-GEORGEN   | 877              | 1.1                  | 9.8                  | 13.8                 | 1.0                   | 15.8                 | 45.8                 |
| FICHTELBERG (WEWA) | 1213             | 1.1                  | 11.1                 | 9.8                  | 1.1                   | 12.0                 | 20.3                 |

**Tabelle 28: Analyse der Dürreperiodenindizes auf Basis des SPEI12 für alle Stationen im Untersuchungsgebiet. Für die zukünftigen Perioden ist das Änderungssignal vs. 1961–1990 dargestellt.**

| Anzahl             |                  | Dauer 1 bis 12 Monate |                      |                      | Dauer > 12 Monate |                      |                      |
|--------------------|------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| Station            | Stationshöhe [m] | 1961-1990 [-]         | 2021-2050 Signal [-] | 2071-2100 Signal [-] | 1961-1990 [-]     | 2021-2050 Signal [-] | 2071-2100 Signal [-] |
| COTTBUS (WEWA)     | 69               | 5                     | -1                   | -4                   | 2.5               | 3.5                  | 1                    |
| WITTENBERG (WEWA)  | 105              | 5                     | -2                   | -5                   | 2.5               | 3                    | -1                   |
| ARTERN (WEWA)      | 164              | 4.5                   | -0.5                 | -4                   | 3                 | 2                    | -1                   |
| DRESDEN-KLOTZ      | 227              | 5                     | -2                   | -5                   | 3                 | 3                    | -2                   |
| GOERLITZ (WEWA)    | 238              | 5                     | -2                   | -5                   | 3                 | 3                    | -2                   |
| GERA-LEUMNITZ      | 311              | 4.5                   | -2                   | -4                   | 3                 | 3                    | -2                   |
| HEINERSREUTH-VOLL  | 350              | 5                     | 0                    | -5                   | 3                 | 3                    | -1                   |
| CHEMNITZ (WEWA)    | 418              | 5                     | -1                   | -4                   | 3                 | 3                    | 1                    |
| WEIDEN             | 440              | 5                     | -2                   | -5                   | 2.5               | 4                    | -1                   |
| HOF-HOHENSAAS      | 565              | 6                     | -1                   | -5                   | 3                 | 3                    | 0                    |
| ZINNWALD-GEORGEN   | 877              | 4                     | -2                   | -4                   | 3                 | 3                    | -2                   |
| FICHTELBERG (WEWA) | 1213             | 5                     | -2                   | -5                   | 3                 | 3.5                  | -1                   |
| Stärke             | Stationshöhe [m] | 1961-1990 [-]         | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] | 1961-1990 [-]     | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] |
| COTTBUS (WEWA)     | 69               | 8                     | 6                    | 1                    | 21                | 59                   | 532                  |
| WITTENBERG (WEWA)  | 105              | 7                     | -6                   | 25                   | 21                | 79                   | 1332                 |
| ARTERN (WEWA)      | 164              | 7                     | 7                    | 73                   | 20                | 115                  | 1660                 |
| DRESDEN-KLOTZ      | 227              | 7                     | 9                    | -37                  | 20                | 106                  | 1845                 |
| GOERLITZ (WEWA)    | 238              | 7                     | 3                    | -54                  | 21                | 207                  | 2642                 |
| GERA-LEUMNITZ      | 311              | 6                     | -8                   | -62                  | 21                | 79                   | 3100                 |
| HEINERSREUTH-VOLL  | 350              | 7                     | 2                    | 45                   | 22                | 67                   | 1371                 |
| CHEMNITZ (WEWA)    | 418              | 6                     | 14                   | -8                   | 22                | 54                   | 479                  |
| WEIDEN             | 440              | 7                     | 11                   | 39                   | 23                | 73                   | 1263                 |
| HOF-HOHENSAAS      | 565              | 7                     | 8                    | -3                   | 21                | 65                   | 821                  |
| ZINNWALD-GEORGEN   | 877              | 7                     | 7                    | -44                  | 20                | 151                  | 2629                 |
| FICHTELBERG (WEWA) | 1213             | 6                     | 11                   | -59                  | 22                | 132                  | 1224                 |
| Schwere            | Stationshöhe [m] | 1961-1990 [-]         | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] | 1961-1990 [-]     | 2021-2050 Signal [%] | 2071-2100 Signal [%] |
| COTTBUS (WEWA)     | 69               | 1.0                   | -1.6                 | 14.2                 | 1.1               | 7.8                  | 65.7                 |
| WITTENBERG (WEWA)  | 105              | 0.9                   | 6.2                  | 9.7                  | 1.1               | 15.3                 | 83.6                 |
| ARTERN (WEWA)      | 164              | 1.0                   | 4.6                  | 41.2                 | 1.1               | 26.7                 | 107.5                |
| DRESDEN-KLOTZ      | 227              | 0.9                   | 10.0                 | -1.6                 | 1.1               | 13.3                 | 108.6                |
| GOERLITZ (WEWA)    | 238              | 0.9                   | 6.6                  | 5.8                  | 1.1               | 24.0                 | 137.5                |
| GERA-LEUMNITZ      | 311              | 0.9                   | -0.1                 | 25.3                 | 1.1               | 17.0                 | 118.7                |
| HEINERSREUTH-VOLL  | 350              | 0.9                   | 10.7                 | 43.3                 | 1.1               | 24.8                 | 102.2                |
| CHEMNITZ (WEWA)    | 418              | 0.9                   | 1.4                  | 20.5                 | 1.1               | 15.4                 | 52.7                 |
| WEIDEN             | 440              | 0.9                   | 1.9                  | 21.2                 | 1.1               | 12.5                 | 73.8                 |
| HOF-HOHENSAAS      | 565              | 0.9                   | 8.3                  | 14.6                 | 1.1               | 15.6                 | 68.5                 |
| ZINNWALD-GEORGEN   | 877              | 0.9                   | 7.6                  | 11.3                 | 1.1               | 17.6                 | 88.1                 |
| FICHTELBERG (WEWA) | 1213             | 0.9                   | 7.1                  | -11.7                | 1.1               | 20.5                 | 62.8                 |

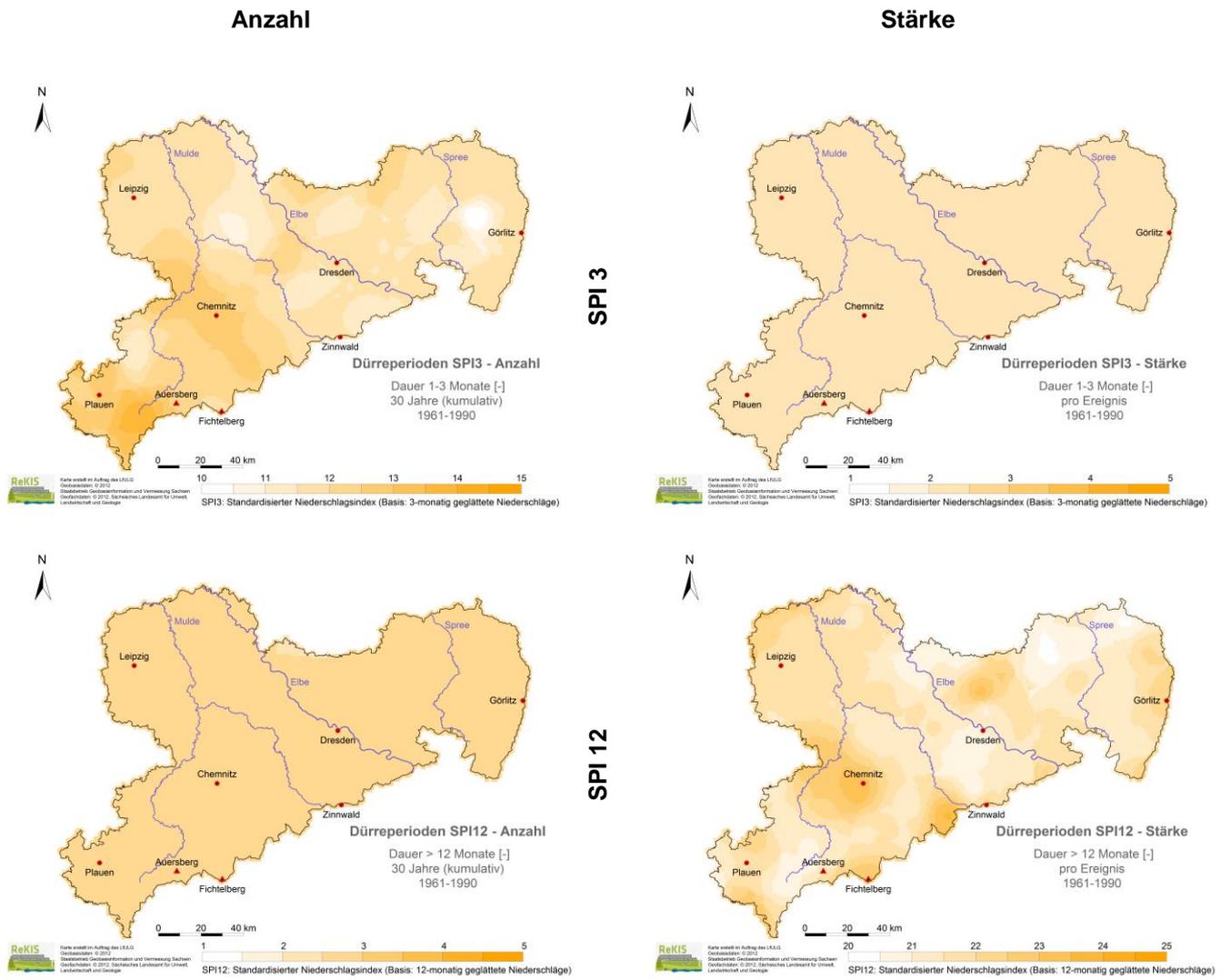
## Standardisierter Niederschlagsindex SPI

Die Ergebnisse der Dürreanalyse auf Basis des rein niederschlagsbasierten Index SPI konnten aufgrund der hohen Stationsdichte gut regionalisiert werden. Abbildung 61 bis Abbildung 65 zeigen für den SPI3 und den SPI12 ausgewählte Kennwerte für den Freistaat Sachsen. Auf die Darstellung der Dürreschwere wurde verzichtet, weil sie sich aus Stärke und Andauer ermitteln lässt. Für den SPI3 wurde die Anzahl und Stärke von DP mit einer Dauer von 1 bis 3 Monaten gewählt, weil schon kurze DP für die Landwirtschaft von Bedeutung sind. Für wasserwirtschaftliche Belange interessieren eher DP des SPI12 mit Andauern > 12 Monaten.

Abbildung 61 verdeutlicht die Dürrebedingungen der modellierten **Referenzperiode** 1961–1990. Basierend auf dem SPI3 bzw. SPI12 wird der Median der 40 ausgewählten Projektionen dargestellt. Die Anzahl von SPI3-DP (Dauer 1–3 Monate) schwankt in Sachsen zwischen 10 bis 15 in der Referenzperiode, wobei DP im südwestlichen Teil Sachsens häufiger als im übrigen Teil auftraten. Die Stärke beträgt – einheitlich über Sachsen – ca. 2,5 pro Ereignis. Die auf dem SPI12 basierenden DP (Dauer >12 Monate) treten sehr einheitlich in Sachsen 2,5- bis 3-mal in den 30 Jahren auf. Die Dürrestärken schwanken ohne erkennbare Gradienten zwischen 20 und 25, wobei Maxima relativ lokal im Erzgebirgskamm und bei Chemnitz auftraten.

In Abbildung 62 bis Abbildung 65 sind die **Klimaänderungssignale** für die Anzahl und Stärke von DP in der nahen und fernen Zukunft abgebildet. Hierbei wird aus dem Ensemble von 40 Projektionen das 50. Perzentil dargestellt, um ein mittleres Verhalten aufzuzeigen. Das 25. und 75. Perzentil verdeutlichen die Schwankungsbreite der Projektionen.

- Die Anzahl von DP des SPI3 verändert sich in der nahen Zukunft nur wenig, in der fernen Zukunft werden es in verschiedenen Landesteilen um bis zu 7 Perioden weniger. Die Schwankungsbreite des Ensembles reicht in der fernen Zukunft von flächendeckenden Abnahmen (25. Perzentil) bis zu lokalen Zu- und Abnahmen (75. Perzentil). Es stechen die Stationen Plauen, Chemnitz, Lauenstein und Röcknitz mit einer besonderen Tendenz zu Zunahmen sowie Leipzig, Zinnwald und das südlichste Vogtland mit Abnahmen heraus. Die Stärke von DP nimmt im Großteil Sachsen zu, besonders stark in Chemnitz, Leipzig, dem südlichen Vogtland und Görlitz. Der Schwankungsbereich reicht von Abnahmen (lokal bis zu 30 %) bis zu 70 % Zunahmen. Mitte des 21. Jahrhunderts ist das Änderungssignal noch weniger stark ausgeprägt als Ende des Jahrhunderts. Bis auf wenige kleine Regionen ist die Modellübereinstimmung > 75 %, d. h. die Richtung des Signals ist bei der Mehrzahl der Projektionen gleich.
- Beim SPI12 bildet sich in der nahen Zukunft eine Höhengradient der Anzahl von DP aus: Im Erzgebirge werden DP gehäuft projiziert (2–3), im Gebirgsvorland etwas weniger gehäuft und im Flachland gibt es keine Änderung. In der fernen Zukunft vergrößert sich die betroffene Fläche, wobei der Höhengradient verschwindet. Nun sind auch Gebiete in Nordostsachsen und um Leipzig stärker betroffen. Die Schwankungsbreite der Projektionen reicht von lokalen Abnahmen bis zu großflächigen starken Zunahmen. Für nahezu ganz Sachsen ist die Modellübereinstimmung hoch. Bei der Stärke ist kein Höhengradient erkennbar, werden die DP vorerst auf dem Erzgebirgskamm und Görlitz stärker, so ist später mehr als die Hälfte Sachsens von sehr starken Dürren betroffen. Die Schwankungsbreite des Ensembles reicht von regionalen Abnahmen (im Norden und der Region Chemnitz–Plauen) bis hin zu extremen, flächendeckenden Zunahmen. Die flächendeckende hohe Modellübereinstimmung weist auf eine hohe Aussagesicherheit des Signals hin.



**Abbildung 61: Dürreperioden SPI3 und SPI12: kumulative Anzahl in 30 Jahren und Stärke pro Ereignis in der Klimanormalperiode 1961-1990**

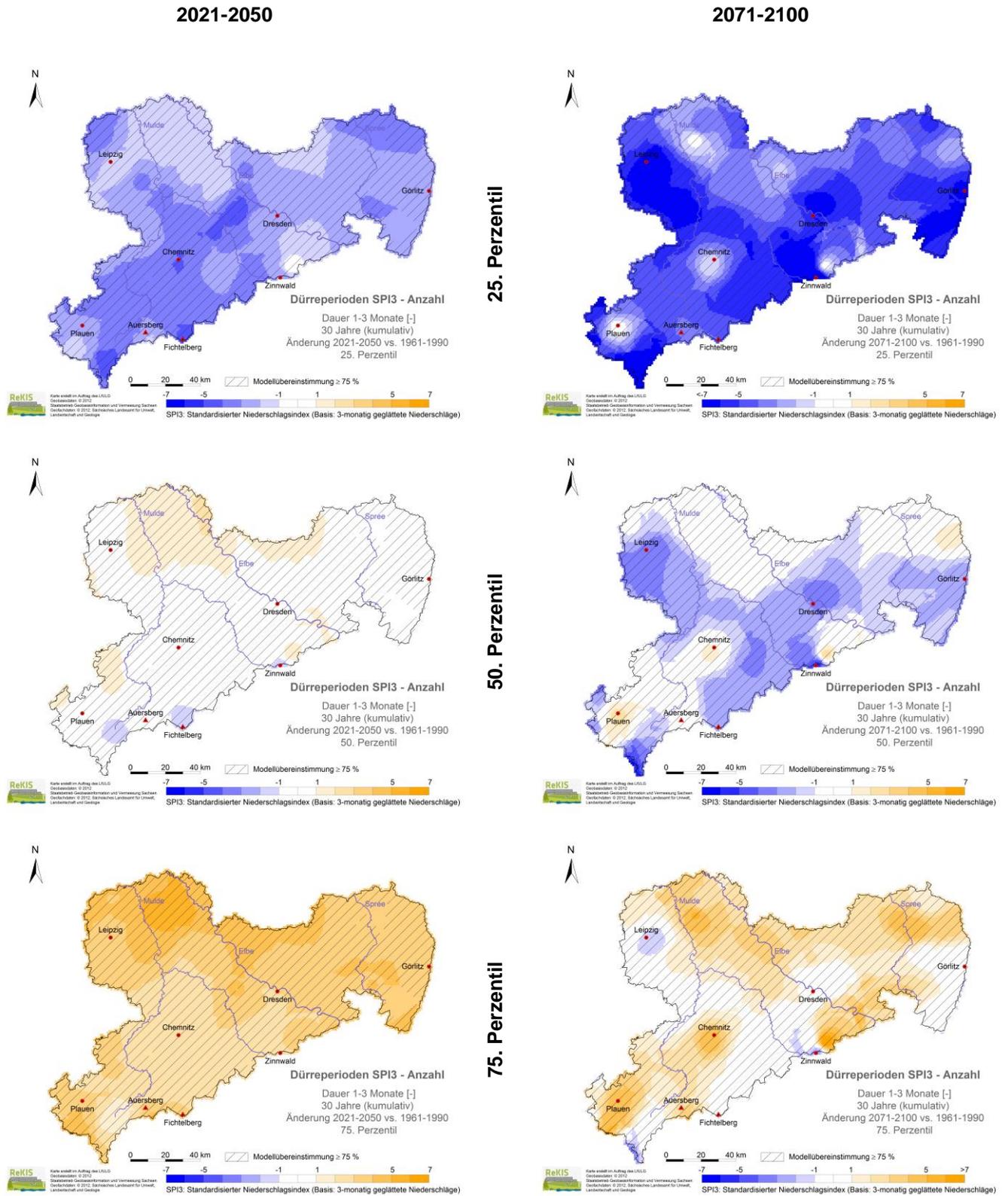
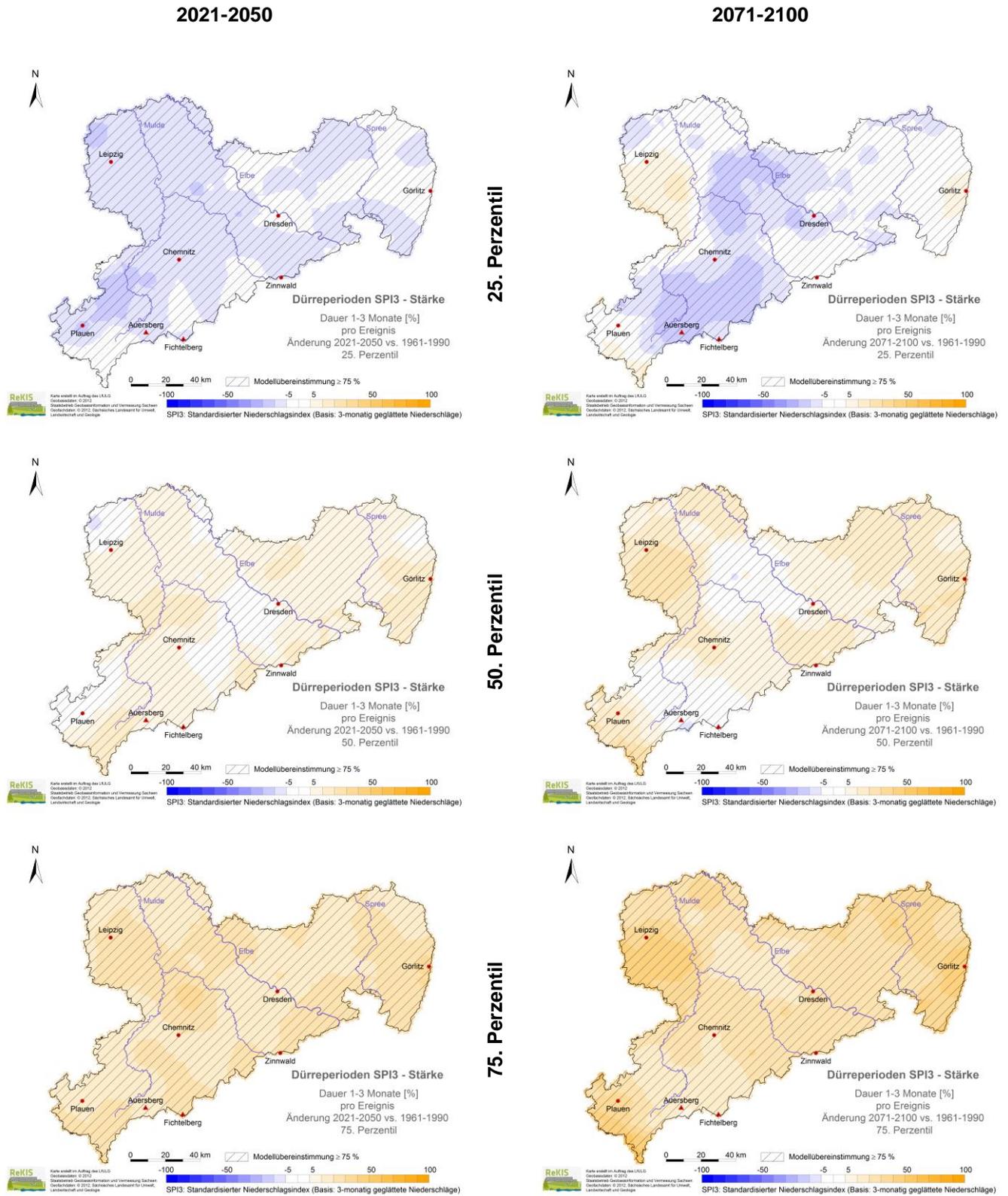
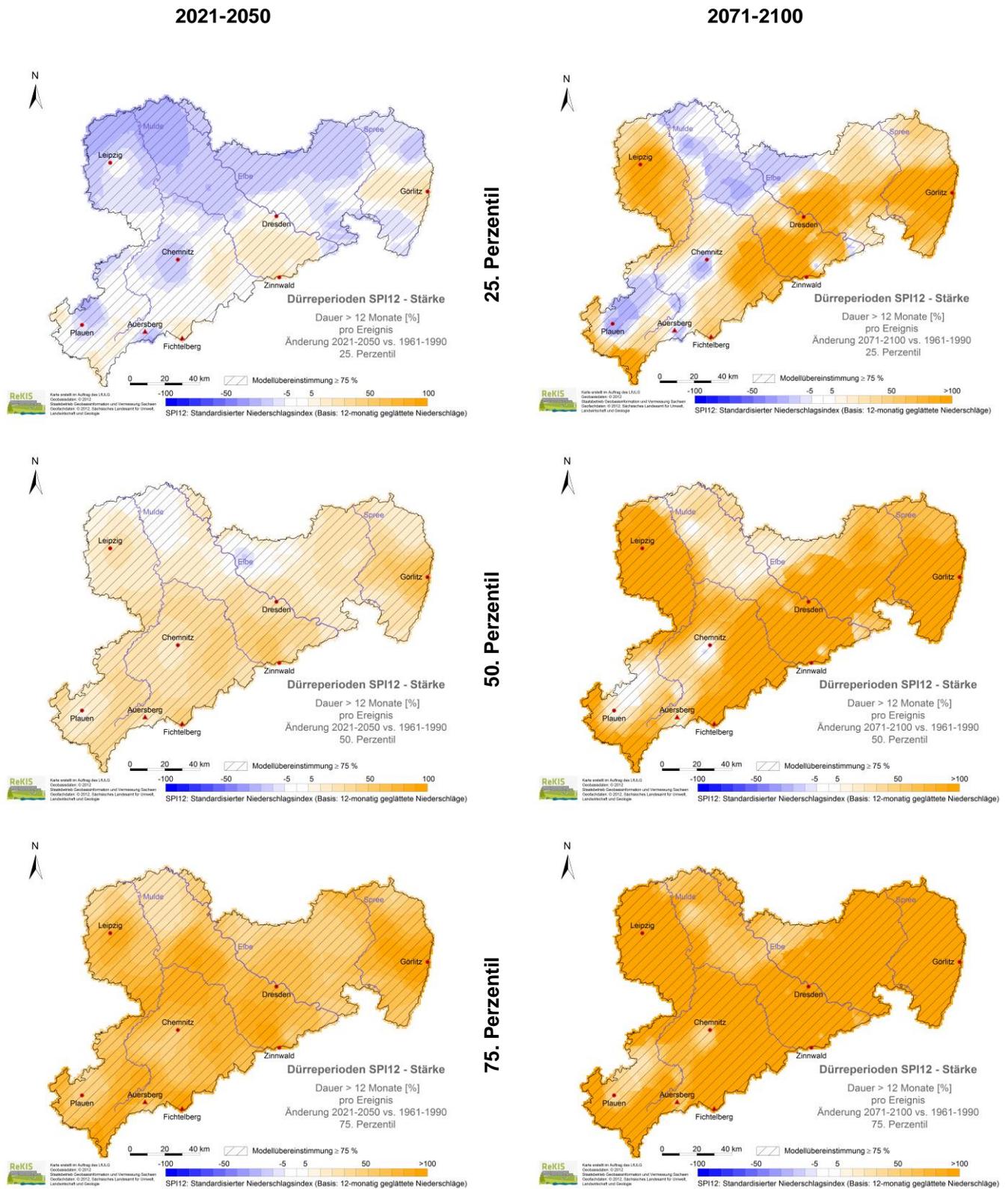


Abbildung 62: Trockenperioden SPI3 – kumulative Anzahl in 30 Jahren: Änderung [-] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (25., 50. und 75. Perzentil)



**Abbildung 63: Trockenperioden SPI3 – Mittlere Stärke pro Ereignis: Änderung [%] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (25., 50. und 75. Perzentil)**





**Abbildung 65: Trockenperioden SPI12 – Mittlere Stärke pro Ereignis: Änderung [%] in der nahen und fernen Zukunft gegenüber 1961-1990 (25., 50. und 75. Perzentil)**

## 5.3 Diskussion

### 5.3.1 Starkniederschlag

Starkniederschlag wurde exemplarisch für das 95. Perzentil des Niederschlags analysiert (R95p). Die **Höhe des Starkniederschlags** zeigt für das WEREX V-Ensemble für die nahe Zukunft eine leichte Zunahme und für die ferne Zukunft ein räumlich heterogenes Signal mit im Mittel leicht abnehmender Tendenz. In BERNHOFER et al. (2015) wurde ein Anstieg der Niederschlagssummen oberhalb des 95. Perzentils 1981–2010 im Vergleich zur Referenzperiode diagnostiziert.

Die Anzahl der **Überschreitungstage in VP I** wird in WEREX V in der nahen Zukunft leicht und in der fernen Zukunft stärker abnehmend simuliert. Damit würde sich die beobachtete Tendenz in Sachsen fortsetzen BERNHOFER et al. (2015). In der **VP II** zeigen die Projektionen kein eindeutiges Bild für die Anzahl an Starkniederschlagsereignissen. In der nahen Zukunft gibt es flächendeckend kaum bis geringfügige Zunahmen. Für das Ende des 21. Jahrhunderts wird ein sehr heterogenes Muster mit starken Zu- und Abnahmen modelliert. Starke Zunahmen gibt es in einem von Südwest nach Nordost reichendem Streifen und Abnahmen um Dresden und Leipzig. In BERNHOFER et al. (2015) wurde für observierte Zeitreihen (1961–2010) für die VP II eine flächendeckende Zunahme der Ahfk von Starkniederschlägen festgestellt. Diese Tendenz ist für das WEREX V-Ensemble anfangs noch vorhanden, verliert sich aber in der fernen Zukunft. Im IPCC-Report (2012) gibt es für Zentraleuropa keine einheitlichen Hinweise zur Veränderung des zukünftigen Starkniederschlagsverhaltens im Sommer. Für eine Reihe von RCMs (nicht jedoch für GCMs) wurden zukünftige Zunahmen im Sommer beschrieben (CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2003; FREI et al. 2006; IPCC 2012) und das sogar trotz einer signifikanten Abnahme des mittleren Niederschlags BENISTON et al. (2007). Letztere weisen auf eine starke Abhängigkeit des sommerlichen Starkniederschlagssignals vom RCM hin. Somit beschreiben die WEREX V-Signale nur einen Teil der möglichen Zukünfte. Steigende Mitteltemperaturen können in der warmen Jahreszeit zu einer Zunahme an konvektiven, lokal begrenzten Starkniederschlagsereignissen führen (starke Abhängigkeit von der direkten Umgebung). Aufgrund des kleinräumigen Auftretens ist möglicherweise kein flächendeckend eindeutiges Signal zu erkennen.

Das WEREX V-Ensemble zeigt für die Starkniederschlagshöhe eine geringe Bandbreite und Modellübereinstimmung für die nahe Zukunft auf, eine deutlich stärkere Streuung und Übereinstimmung in der fernen Zukunft. Ebenso verhält es sich mit der Starkniederschlagshäufigkeit in den VP.

Vorteil der projizierten Abnahmen in VP I sind aus Impaktsicht die verminderte Gefahr von Hochwasser, wild abfließendem Wasser und Erosion und damit weniger Probleme im Wassermanagement (Speicher und Kanalisation), der Landwirtschaft, der Infrastruktur etc. Für die VP II werden sowohl Regionen mit vermehrt auftretenden als auch mit weniger Starkniederschlägen simuliert. Damit sind die sozio-ökonomischen Auswirkungen regional sehr verschieden. Die Sicherheit dieser regionalspezifischen Aussagen ist jedoch noch begrenzt, weil Probleme im Datenmaterial vermutet werden (siehe Kapitel 4.3.1).

### 5.3.2 Zeitlicher Verlauf der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlag

In der Zukunft zeigt die Auftrittshäufigkeit (Ahfk) von Starkniederschlag R95p weiterhin ein deutliches **Schwankungsverhalten** für alle betrachteten Stationen (Dresden-Klotzsche, Fichtelberg [WEWA], Leipzig-Holzhausen, Görlitz, Plauen und Zinnwald-Georgenfeld). Das Schwankungsverhalten der Ahfk wurde für Sachsen für die 1961–2010 festgestellt (SCHALLER 2013). Ein Schwankungsverhalten ist auch deutlich bei den Analysen der Überschreitungswahrscheinlichkeiten für ausgewählte Klimaprojektionen von DEUTSCHLÄNDER & DALELANE (2012) zu erkennen. Ein direkter Vergleich der beiden Arbeiten ist aufgrund unterschiedlicher Parametrisierungen und der Verwendung von verschiedenen Klimaprojektionen nicht möglich.

Der **zeitliche Verlauf** von Starkniederschlagsereignissen zeigt künftig deutliche Veränderungen in den VP I und VP II. In der Zukunft ist die Ahfk der WEREX V-Projektionen in der VP II in allen Läufen höher als in der VP I. Dies ist besonders stark bei den Stationen Fichtelberg und Plauen in der fernen Zukunft ausgeprägt. Für die Ahfk in der VP I ist ein abnehmender Trend festzustellen. Für die VP II zeigen die verschiedenen Läufe unterschiedliche Tendenzen. Der Lauf EH5-CLM-L1-A1B zeigt einen positiven Trend in der VP II bei allen Stationen. EH5-RACMO-L3-A1B und EH5-REMO-L3-A1B zeigen keine deutlichen Trends in der VP II. Der Trend für HCG2-L1-A1B ist teils sogar negativ mit starken Abnahmen in den Projektionen der Stationen Leipzig-Holzhausen, Görlitz und Zinnwald-Georgenfeld und Zunahmen bei den Stationen Plauen und Fichtelberg. Die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Aufttrittshäufigkeit von Starkniederschlag R95p zeigt dieselben Tendenzen in den Vegetationsperioden wie die stationsbezogenen Analysen der Überschreitungstage.

Für die Stationen Dresden-Klotzsche, Leipzig-Holzhausen und Görlitz beschreibt SCHALLER (2013) für 1961–2010 eine Abnahme der Ahfk in der VP I und eine Zunahme in der VP II. Demzufolge ist die Ahfk in der VP II höher als in der VP I. Die höheren Ahfk in der VP II als in der VP I sind in den WEREX V-Projektionen in der Zukunft auch festzustellen, deren Entwicklung in der Periode 1961–2010 wird jedoch nicht wiedergegeben. Die abnehmende Tendenz der Ahfk in der VP I setzt sich in den Projektionen fort. Die beobachtete zunehmende Tendenz der Ahfk in der VP II ist in den Projektionen hingegen nicht deutlich ausgeprägt. Hier zeigen sich verschiedene Entwicklungen abhängig von Station und Lauf.

DEUTSCHLÄNDER & DALELANE (2012) untersuchten für Deutschland mit einer sehr ähnlichen Methodik die Niederschlagsprojektionen der regionalen Klimamodelle CLM, REMO, WettReg und STAR für den Sommer des Zeitraums 1961–2100. Die numerischen Modelle CLM und REMO zeigen praktisch keine Änderungen für den Sommer, wobei die Überschreitungswahrscheinlichkeit gegen Ende des 21. Jahrhunderts leicht abnimmt. Die statistischen Modelle WettReg und STAR zeigen jedoch einen 40-prozentigen Rückgang der Starkniederschlagsereignisse. Hier deutet sich ein prinzipieller Unterschied zwischen dynamischen und statistischen Regionalmodellen an.

### 5.3.3 Wärmebelastung

Für das ausgewählte WEREX V-Ensemble konnte eine flächendeckende Zunahme der **Sommertage** in der nahen und fernen Zukunft festgestellt werden. In BERNHOFER et al. (2015) wurde für die Leipziger Tieflandsbucht eine Zunahme von 16 bis 18 Sommertagen für 1981–2010 gegenüber der Referenzperiode 1961–1990 angegeben. Dieser aus observierten Daten ermittelte Trend setzt sich in der Zukunft fort. Für die nahe Zukunft konnte für die Station Leipzig-Holzhausen eine mittlere Zunahme von 18 Sommertagen und für die ferne Zukunft eine Zunahme von 52 Tagen festgestellt werden. Die mittlere Anzahl der Sommertage zeigt für das WEREX V-Ensemble im Tiefland eine stärkere Zunahme als im Bergland. Dieser Höhengradient zeigt sich auch in den Beobachtungen (BERNHOFER et al. 2015). In Zentraleuropa werden in der Zukunft mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit die Frequenz und Intensität von warmen Tagen zunehmen (IPCC 2012; FISCHER & SCHÄR 2010).

Die Streuung der WEREX V-Projektionen ist für die untersuchten Temperaturindizes gering. Es wurde eine flächendeckende, 100-prozentige Modellübereinstimmung festgestellt. Eine künftige Zunahme der Wärmebelastung kann somit als sehr wahrscheinlich angenommen werden. Die zunehmende Wärmebelastung in der Zukunft geht im Tiefland einher mit Folgen für die Gesundheit und verursacht höhere Kosten für Infrastruktur und Klimatisierung von Gebäuden und Transportmitteln. Positive Auswirkungen sind im Bergland insbesondere in den Übergangsjahreszeiten zu erwarten, beispielsweise für den Tourismussektor.

### 5.3.4 Kältebelastung

Eine Abnahme von **Frosttagen** in den ausgewählten WEREX V-Läufen wurde in der nahen und fernen Zukunft gegenüber der Referenzperiode flächendeckend festgestellt, insbesondere in den Berglagen. In BERNHOFER et al. (2015) wird für den Großteil Sachsens für 1981–2010 eine Abnahme an Frosttagen gegenüber 1961–1990 angegeben. Gleichzeitig wurde eine leichte Zunahme in Ostsachsen festgestellt. Diese Trends werden sich entsprechend der analysierten Projektionen nicht fortsetzen. Auch IPCC (2012) sowie FISCHER & SCHÄR (2010) gehen davon aus, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Zukunft eine Abnahme der kalten Tage stattfinden wird.

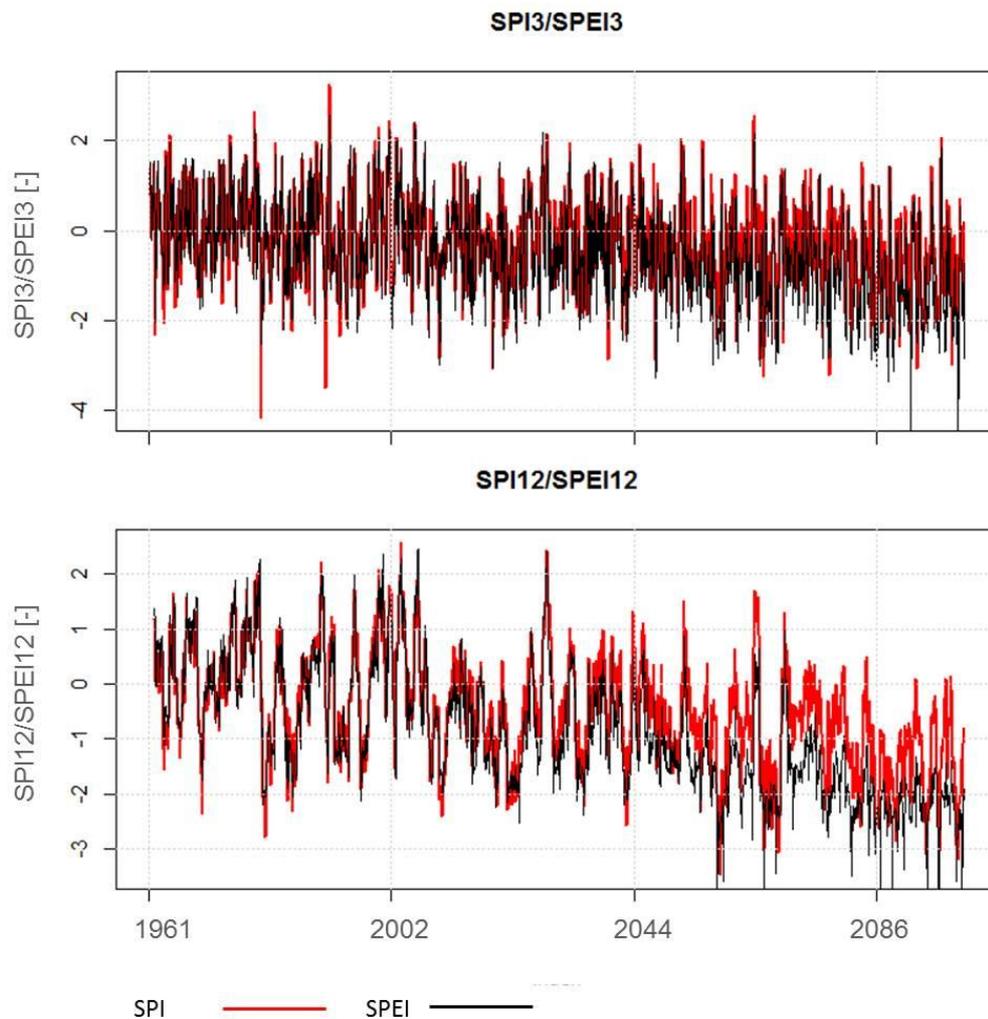
Temperaturabgeleitete Indizes zeigen eine geringe Streuung der WEREX V-Projektionen und eine flächendeckende, 100-prozentige Modellübereinstimmung. Sehr wahrscheinlich ist von einer Abnahme der Kältebelastung in der Zukunft auszugehen. Dies erhöht künftig das Risiko für den Wintertourismus (Schneesicherheit). Eine Verminderung an Frosttagen und die damit einhergehende Verlängerung der Vegetationszeit ist für viele landwirtschaftliche Kulturen förderlich. Einige Kulturen (z. B. Winterweizen) benötigen allerdings Frostperioden zum Schossen und Blühen. Beispielhaft für positive Effekte seien verminderte Straßenschäden durch weniger Wechsel um die Null-Grad-Grenze genannt.

### 5.3.5 Dürren

Die Hauptursache für Dürren in Sachsen sind Niederschlagsanomalien. Dies zeigt ein Vergleich der Ergebnisse des auf Niederschlag und potenzieller Verdunstung beruhenden SPEI mit dem SPI, der lediglich auf Niederschlagsdaten beruht. Die Anzahl und Stärke von DP werden sehr ähnlich abgebildet. DEMUTH & STAHL (2002) zeigten für weite Teile Europas, dass Dürren hauptsächlich durch Niederschlagsdefizite verursacht werden. Die Ausprägungen von Dürren an den Stationen Dresden und Fichtelberg sind den Ergebnissen des Gesamtkollektivs der 12 Stationen sehr ähnlich. In der Vergangenheit gab es mehr kurze als lange DP. Dies gilt für Indizes von eher landwirtschaftlicher Bedeutung (SPI3/ SPEI3) und für die wasserwirtschaftlich relevanten Indizes (SPI12/ SPEI12).

Zukünftig nimmt die Anzahl kurzer DP ab und langer DP zu. Stärke und Schwere eines Ereignisses erhöhen sich, besonders bei langen DP. In der fernen Zukunft ist die Verschiebung von kurzen schwachen zu langen starken DP besonders deutlich. In der Mehrzahl der Projektionen wird eine über mehrere Jahre andauernde DP des SPI12/SPEI12 am Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (Abbildung 66). Die zukünftige Anzahl von solch schwerwiegenden DP ist daher so gering (teilweise 0), die Stärke aber enorm hoch.

Die DP im 20. Jahrhundert sind hauptsächlich durch Niederschlagsdefizite verursacht, in Abbildung 66 stimmen SPI und SPEI überein. Der SPI hat im 21. Jahrhundert einen abnehmenden Trend, der durch den Niederschlagsrückgang verursacht wird. Der SPEI hat noch einen gravierenderen Abwärtstrend, der durch zusätzlich mit der Zeit zunehmenden Verdunstungsraten erklärbar wird. DP werden in der Zukunft demzufolge durch eine Kombination von Niederschlagsdefiziten und erhöhten Verdunstungsverlusten hervorgerufen. Untersuchungen von BLENKINSOP & FOWLER (2007) zeigen ebenfalls für große Teile Europas den Übergang von kurzen zu langen Trockenphasen. Auf der kurzfristigeren Skala von 3 Monaten werden auch gegen Ende des 21. Jahrhunderts wiederholt feuchte Abschnitte auftreten, wenn auch deutlich weniger als Jahrzehnte vorher. Damit sind insbesondere wasserwirtschaftliche Belange betroffen, die auf ein langfristig gesichertes Wasserdargebot bauen. Bei der Talsperren- und Grundwasserbewirtschaftung sind ernste Konsequenzen zu befürchten. Auch die Land- und Forstwirtschaft wird sich auf ein sinkendes Niveau von verfügbaren Wasserressourcen einstellen müssen, z. B. mit einer Sortenanpassung. Temporären Engpässen durch häufigere, lang andauernde und stärkere Dürren kann mit Bewässerung begegnet werden, sofern genügend Wasser zu Verfügung steht.



**Abbildung 66: Zeitreihe des SPI3/SPEI3 [-] und des SPI12/SPEI12 [-] einer zufällig ausgewählten Projektion für die Station Dresden**

Die regionalen Ausprägungen und die Spannweite der Dürreindizes des WEREX V-Ensembles sind nicht einheitlich für die untersuchten Indizes. Generell sind die Signale und die Spannweiten in der fernen Zukunft deutlich höher als in der nahen Zukunft. Die regionalen Ausprägungen ändern sich im Zeitraum 2021–2100 nicht gravierend.

Die regionalen Unterschiede und die Spannweite sind sehr hoch bei den Änderungen der Anzahl an SPI3-DP ( $\pm 7$  DP in ferner Zukunft). D. h., die Änderungen sind in den unterschiedlichen Regionen verschieden stark, dabei ist die Aussagesicherheit des Ensembles gering. Die Änderungen der Anzahl der SPI12-DP sind regional einheitlicher – bei ebenfalls erhöhter Aussagesicherheit des Ensembles. Für die Dürrestärke sind die regionalen Unterschiede und die Spannweite des Ensembles beim SPI3 geringer als beim SPI12.

Stationen im Südwesten Sachsens verhalten sich oft extremer bzw. in entgegengesetzter Richtung zu den restlichen Stationen. Dies sollte nicht überbewertet werden, weil Probleme im Datenmaterial nicht ausgeschlossen werden können (siehe Kapitel 4.3.1 und 5.2.1).

Die festgestellte Zunahme von schweren Dürren steht im Einklang mit europäischen und globalen Untersuchungen (DAI 2012). Das noch unsichere Ausmaß und die Häufigkeit von Dürren thematisieren BLENKINSOP & FOWLER (2007), die dynamische Klimamodelle für Europa analysierten. Während tendenziell der Norden Europas von weniger und der Süden von mehr Dürren betroffen sein wird, sind die Aussagen im Übergangsbereich (in dem auch Deutschland liegt) sehr unsicher. Untersuchungen von BURKE & BROWN (2007) verwiesen auf der Grundlage von SPI-Berechnungen für ein GCM-Ensemble auf keine zukünftig zunehmende Trockenheit in Mitteleuropa. Indizes, die den zunehmenden Verdunstungsanspruch der Atmosphäre berücksichtigen, zeigten jedoch eine zunehmende Dürreerregung an.

Diese Arbeit leistet mit dem speziell für Sachsen erstellten Klimadatensatz einen wertvollen Beitrag zur Minimierung dieser Unsicherheit. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die projizierten Veränderungen im Niederschlagsregime (Abnahme) als auch die erhöhte Verdunstung für die zunehmende Dürreerregung verantwortlich sind.

## 6 Kernaussagen

Seit etwa 15 Jahren wird die WEREX/WETTREG-Methodik in Sachsen zur Regionalisierung von globalen Klimamodellergebnissen verwendet und stetig weiter entwickelt. Sie stellt eine gleichberechtigte Alternative zum dynamischen Downscaling von Klimamodellierungen dar und bildet damit einen wesentlichen Bestandteil der deutschen und sächsischen Klimaprojektionen. WEREX V stellt das aktuelle Ensemble dar, das diverse globale und regionale Klimamodelle bei verschiedenen SRES-Szenarios als Antrieb verwendete. Diese wurden in einem letzten Schritt durchweg statistisch-dynamisch auf Stationsdaten abgebildet. Somit liegen 120 Projektionen des Klimas bis zum Ende des 21. Jahrhunderts vor.

Weil die größten Auswirkungen des Klimawandels im Zusammenhang mit Dürren, Starkniederschlägen und Wärmebelastungen erwartet werden, ist das nutzerseitige Interesse an der Ausprägung von extremen Wetterbedingungen in der Zukunft sehr hoch. Daraus resultierte die Frage nach der Güte der Abbildung witterungsbedingter Extreme durch den WEREX V-Datensatz und den zukünftigen Ausprägungen der Extreme. Es wurde eine nutzerseitige Sicht auf die Daten angestrebt. Es sollte die Frage beantwortet werden, ob sich aus der Impaktforschung ergebende Aufgabenstellungen hinsichtlich extremer Ausprägungen des Klimas mit diesem Datensatz zufriedenstellend beantwortet werden können.

Es wurden zunächst für die Analyse von Temperatur- und Niederschlagsextremen geeignete Indizes ausgewählt. Dabei wurden Empfehlungen der WMO (2009) und des Fachgesprächs „Wetterextreme“ (Dezember 2011) sowie aktuelle Forschungsergebnisse für den Freistaat Sachsen berücksichtigt. Durch die perzentilbasierte Betrachtungsweise (z. B. 90. Perzentil der Maximaltemperatur oder des Niederschlags) und die Standardisierung von Werten (z. B. Standardisierter Niederschlagsindex SPI) werden lokal spezifische Extreme betrachtet und somit lokale/regionale Aussagen zu Veränderungen möglich. Auch auf festen Schwellenwerten beruhende Indizes, wie z. B. Frosttage, wurden wegen ihrer hohen Relevanz (z. B. für die Landwirtschaft) und ihrer guten Verständlichkeit untersucht.

Das Projekt wurde in zwei Phasen durchgeführt. Ziel der Phase I war es, die Leistungsfähigkeit des WEREX V-Datensatzes zur Abbildung von witterungsbedingten Extremen in ihrer zeitlichen Entwicklung und Ausprägung zu analysieren. In Phase II wurden ausgewählte Extremindizes für die am besten performierenden WEREX V-Ensemblemitglieder für Sachsen dargestellt und analysiert.

In **Phase I** des Projektes wurden die ausgewählten Indizes zur Beschreibung von Temperatur-, Niederschlags- und Dürreextremen für die Periode 1961–2000 aus gemessenen Werten und aus simulierten (WEREX V)-Werten berechnet und verglichen. Die Abweichungen wurden mittels einer Ranganalyse objektiv bewertet, wobei der niedrigste Rang 1 Abweichungen kleiner 10 % bzw. 0,5 K gleichzusetzen sind.

Die Starkniederschlagshöhe der vier untersuchten Perzentile (80., 90., 95., 99.) wird von allen Modellen im Jahr und den Vegetationsperioden I und II unterschätzt (beste Ensemble-Mitglieder ca. -11 bis -18 %). Die innerjährliche Variabilität des Auftretens von Starkniederschlägen, insbesondere in den Vegetationsperioden, wird nicht zufriedenstellend wiedergegeben. Eine mehrjährige Variabilität des Auftretens von Starkniederschlägen wird prinzipiell simuliert, wenngleich meist in geringerem Umfang.

Die Analyse der Temperaturperzentile (10., 90.) verdeutlicht, dass die hohen und niedrigen Extreme im WEREX V-Ensemble gekappt sind. Die Anzahl von Ereignistagen wird generell unterschätzt: Frost- und Eistage um bis zu 14 % und Sommertage sowie Heiße Tage zwischen 19 und 28 % (beste Modelle). Perzentilbasierte Wärme- und Kälteperioden werden mit Fehlern größer als +30 % simuliert.

Die Analyse von Dürreperioden erfolgte auf der Basis des standardisierten Niederschlags- und des Niederschlags-Evaporationsindex, der durch unterschiedliche Mittelungszeiträume Relevanz für unterschiedliche sozio-ökonomische Sektoren besitzt: 3-monatige Mittelung für die Landwirtschaft und 12-monatige Mittelung für das Wassermanagement. WEREX V simuliert kurze Dürreperioden zu häufig (> +25 %) und lange Perioden zu selten (< - 25 %). Die Stärke von Dürren, die für die Landwirtschaft relevant sind, hat ebenfalls einen erheblichen Bias, wird aber besser reproduziert als die für Wasserhaushaltsbetrachtungen (Abweichungen 12–18 % bzw. 17–25 %).

Indexübergreifend wurde festgestellt: Niederschlags- und Temperaturextreme werden gedämpft. Je extremer ein Index, desto schlechter dessen Abbildung. Die Reproduktion von langen Perioden ist problematisch, d. h., heißt die Persistenz von Wetterlagen wird nicht ausreichend erfasst. Die innerjährliche und die dekadische Variabilität werden schlechter wiedergegeben als Jahreswerte bzw. klimatologische Mittelwerte. Es wurde keine Abhängigkeit der Güte der Projektionen der einzelnen Stationen von deren Lage und Höhe im Untersuchungsgebiet gefunden. Arbeiten, die RCM und statistische Modelle miteinander vergleichen (BLENKINSOP & FOWLER 2007; HÄNSEL et al. 2015) fanden für beide Methoden eine schlechte Abbildung von persistenten Wetterlagen (feucht oder trocken). Das Problem der ungenügenden Abbildung von Dürreperioden, Mehrtagesniederschlägen, Kälte- und Wärmeperioden kann demzufolge von den GCM und/oder RCM – also dem Input von WEREX V – und/oder dem statistischen Downscaling herrühren.

Folgende vier WEREX V-Läufe wurden ermittelt, die die drei Indexkategorien Starkniederschlags-, Temperaturextreme und Dürren relativ gut abbilden können:

- EH5.CLM\_L1 (ECHAM5, Lauf 1, mit nachgeschaltetem Downscaling mittels CCLM)
- EH5.RACMO\_L3 (ECHAM5, Lauf 3, mit nachgeschaltetem Downscaling mittels RACMO)
- EH5.REMO\_L3 (ECHAM5, Lauf 3, mit nachgeschaltetem Downscaling mittels REMO)
- HCG2\_L1 (HadGEM2, Berücksichtigung Aerosole, Transportchemie, transiente Landnutzung, Lauf 3)

Die Einbeziehung von RCM in die WEREX-Modellkaskade hat sich aus Sicht der Reproduktion von Extremen gelohnt.

In **Phase II** wurden für die besten vier WEREX V-Läufe mit ihren jeweils 10 Realisierungen ausgewählte Indizes aus jeder Indexkategorie für die nahe Zukunft (2021–2050) und die ferne Zukunft (2071–2100) unter dem A1B-Szenario berechnet.

Dabei setzt sich die flächendeckend beobachtete Abnahme der Überschreitungstage von Starkniederschlag R95p in der Vegetationsperiode I für 1961–2010 in der nahen und verstärkt in der fernen Zukunft fort. Die in der Vegetationsperiode II bisher beobachteten Zunahmen an Starkniederschlagsereignissen konnten in der Zukunft nur in einem von Südwest nach Nordost reichendem Streifen gefunden werden. Gleiches gilt für die Höhe von Starkniederschlagsereignissen. Die Sicherheit der Aussagen ist aber begrenzt.

Zukünftig erhöht sich das allgemeine Temperaturniveau. Extreme Ausprägungen ändern sich jedoch weit stärker. Sehr wahrscheinlich setzt sich die flächendeckend beobachtete Zunahme der Sommertage für 1961–2010 in der nahen und verstärkt in der fernen Zukunft fort. Besonders betroffen sind tiefere Lagen. Auch die großflächig beobachtete Abnahme (Schwerpunkt höhere Lagen) der Frosttage für 1961–2010 setzt sich sehr wahrscheinlich in der nahen und verstärkt in der fernen Zukunft fort. Die Modelle sind sich bezüglich der Temperaturindizes einig.

Als Hauptursache für Dürren in der Vergangenheit wurden in Sachsen Niederschlagsdefizite identifiziert. In der Zukunft verschärft sich – entsprechend den WEREX V-Läufen – die Situation durch weiter rückläufige Niederschläge bei gleichzeitig zunehmendem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre. Zukünftig könnte die Anzahl von kurzen Dürreperioden ab- und von langen Dürreperioden zunehmen. Die Stärke und auch die Schwere von Dürren nehmen generell zu, besonders ausgeprägt bei langen Dürren. Während sich die Anzahl von kurzfristigen Dürreperioden (SPI3) regional differenziert verändert, ist von flächendeckend bedeutsamen Zunahmen bei langfristigen DP (SPI12) auszugehen. Die Bandbreite innerhalb des WEREX V-Ensembles ist für viele Indizes noch beträchtlich.

Bei Hinzunahme weiterer Klimaprojektionen (z. B. rein dynamische Modelle) würde die Modellunsicherheit insbesondere für die ferne Zukunft weiter steigen. Arbeiten, die sich mit Änderungen auf europäischem Maßstab beschäftigen, zeigen eine Verschärfung von Dürren im Süden und eine Entspannung im Norden Europas an. In diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass Sachsen von einer gravierenden Verschärfung bezüglich des verfügbaren Wasserdargebots betroffen ist, die insbesondere auf das Wassermanagement und die Land- und Forstwirtschaft einwirken. Die sich aus dem WEREX V-Ensemble ergebende Sicherheit der Aussagen ist für die Dürreindizes, insbesondere in der fernen Zukunft, begrenzt.

In der Analyse fiel ein von Südwest nach Nordost verlaufender Streifen in Sachsen mit oft konträren Trends auf. Hier erhöht sich zukünftig die Starkniederschlagsmenge und die Anzahl von Starkniederschlags-Überschreitungstagen in VP II. Bezüglich der Dürre fällt die Region mit erhöhten Stärken in der Periode 1961–1990 auf. Zukünftig erhöht sich die Anzahl von SPI3-Dürren, dagegen verändert sich die Stärke von SPI12-Dürren kaum. Es wird von WEREX V demzufolge ein Gebiet simuliert, das derzeit besonders von gravierenden Dürren betroffen ist und sich zukünftig durch erhöhte Starkniederschläge und kurze Dürren auszeichnet. Das ist in sich durchaus plausibel. Jedoch fiel die Region in der auf beobachteten Werten basierenden Starkniederschlagsanalyse nicht auf (BERNHOFER et al. 2015; BERNHOFER et al. 2015a). Demzufolge sind datenseitige Probleme nicht auszuschließen. Ursachen können in den beobachteten Eingangsdaten liegen, aber auch während der Simulation mit WEREX V entstanden sein.

Die hier analysierten zukünftigen Trends von witterungsbedingten Extremen in der Zukunft sind – basierend auf den Erkenntnissen aus der Phase I des Projektes – als noch nicht vollständig gesichert anzusehen. Ursa-

che sind die Dämpfung der Extreme und die ungenügende Abbildung der Persistenz von Witterungsereignissen. Das am schwierigsten zu simulierende Element ist der Niederschlag, weshalb insbesondere die Ergebnisse zu den Extremniederschlägen als unsicher einzuschätzen sind. Das Temperatursignal für das 21. Jahrhundert ist so stark, dass zwar die konkrete Anzahl an Ereignistagen als unsicher eingeschätzt werden muss, nicht aber die generelle Tendenz. Ebenso verhält es sich mit den Dürreperioden.

Die Auswirkungen der projizierten Abnahmen des Starkniederschlags in der VP I bieten eine Reihe von Vorteilen für Land- und Wasserwirtschaft: weniger Erosion, verstärkte Versickerung, weniger Hochwasser etc. In Regionen, in den sich die Starkniederschläge in VP II erhöhen, sind natürlich entsprechende Nachteile zu verzeichnen. Zunehmende Erosionsereignisse führen zum Bodenabtrag, zum Nährstoffaustrag und somit auch zu Gewässergüteproblemen.

Die vermehrte Anzahl an Sommertagen kann in flacheren Regionen zu gesundheitlichen Belastungen führen, die direkt aus der thermischen Belastung herrühren, aber auch indirekt über z. B. eine erhöhte Ozonbelastung wirken. Für höher gelegene Regionen ergeben sich Chancen für den Tourismus. Der Bedarf zur Klimatisierung von Gebäuden und Transportmitteln wird sich erhöhen. Eine Reduzierung der Frosttage kann sich positiv und negativ auf die landwirtschaftlicher Kulturen auswirken. Aus touristischer Sicht ergeben sich Nachteile für den Skitourismus und Vorteile für das menschliche Wohlbefinden.

Die zunehmend langanhaltenden und starken Dürren bergen Risiken für die Wasserwirtschaft und gravierende Risiken für den Schiffsverkehr auf der Elbe. Auch für die Landwirtschaft ergeben sich erhebliche Risiken in Gebieten mit Böden, die nur eine geringe Wasserhaltefähigkeit besitzen, bzw. wenn keine finanziellen Ressourcen bzw. kein Wasser für eine Bewässerung vorhanden sind. Insgesamt müssen sich zahlreiche sozioökonomische Sektoren insbesondere in den Sommermonaten auf ein erheblich vermindertes Wasserdargebot einstellen.

Final soll noch ein Ausblick gegeben werden. Die in diesem Projekt und von vielen anderen Arbeitsgruppen festgestellten Probleme der Klimamodelle bei der Reproduktion von Extremen lassen bisher nur einen begrenzten und unsicheren Einblick in zukünftige Verhältnisse klimatischer Extreme in Sachsen zu. Um GCM und RCM besser validieren und statistische Modelle besser kalibrieren zu können und somit die Unsicherheit weiter zu reduzieren, ist es einerseits wichtig, die gemessenen Datengrundlagen zu verbessern und ihre Fortsetzung in die Zukunft zu sichern. Auch die Weiterentwicklung der Klimamodelle ist dringend nötig, um die Prozesse besser zu beschreiben (dynamische Modelle) und die statistischen Beziehungen unter dem Aspekt einer besseren Wiedergabe von Extremen zu optimieren (statistische Modelle). Für Sachsen gibt es hinsichtlich der Weiterentwicklung der WEREX Methode derzeit einen intensiven Dialog zwischen den Modellentwicklern, dem Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie und der TU Dresden, mit dem Ziel, die Methoden zu optimieren und somit anwendungsbereite Klimaprojektionen zu erstellen. Als Novum ist geplant, die Beobachtungswerte und die Klimaprojektionen einem objektiven Test zu unterziehen, um deren Vollständigkeit und Güte zu analysieren. Als Bewertungskriterien eignen sich eine Reihe von in diesem Bericht verwendeten, anwenderorientierten Indizes. Überlegenswert ist es, der klassischen Herangehensweise der Betrachtung der Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert ein Alternative entgegen zu stellen. So wäre es denkbar, in spezifischen Impaktsystemen nach kritischen Schwellen zu suchen, bei deren Erreichen bzw. Überschreiten neuartige Qualitätsniveaus erreicht werden. Beispielsweise könnte untersucht werden, wie lange und stark Trockenperioden ausfallen müssten, um zum Trockenfallen von Flüssen oder dem Leerlaufen von Speichern zu führen. Mit der Angabe von Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten solcher Witterungsereignisse könnten Dimensionierungen und Planungen (z. B. von Talsperren) neu überdacht werden.

Weiterhin sind Strategien zum Umgang mit der sich ergebenden Bandbreite bzw. der Unsicherheiten der Projektionen zu entwickeln. Dem Nutzer müssen geeignete Verfahren und adäquate Informationen zur Verfügung gestellt werden, um zu vermeiden, dass einseitige oder zu begrenzte Informationen zu falschen Schlüssen führen.

# 7 Literaturverzeichnis

- ADELPHI, PRC, EURAC: Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt, Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau, (2015)
- ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. ATV-DVWK-M 238 (1996), Bonn, 135 S.
- BATES BC, KUNDZEWICZ ZW, WU S AND PALUTIKOF JP [Eds.]: Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariate, (2008), Geneva, 210 pp
- BECKER P, DEUTSCHLÄNDER T, KOßMANN M, NAMYSLO J, KNIERIM A: Klimaszenarien und Klimafolgen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Informationen zur Raumentwicklung: Heft 6-7 (2008)
- BENDER S, SCHALLER M: Vergleichendes Lexikon. - Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren. Climate Service Center (2014), 126 S.
- BENISTON M, STEPHENSON D, CHRISTENSEN O, FERRO C, FREI C, GOYETTE S, HALSNAES K, HOLT T, JYLHÄ K, KOFFI B, PALUTIKOF J, SCHÖLL R, SEMMLER T, WOTH K: Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change* 81 (2007), pp 71–95, doi:10.1007/s10584-006-9226-z
- BERNHOFER C, GOLDBERG V, FRANKE J, HÄNTZSCHEL J, HARMANSA S, PLUNTKE T, GEIDEL K, SURKE M, PRASSE H, FREYDANK E, HÄNSEL S, MELLENTIN U, KÜCHLER W: Sachsen im Klimawandel – Eine Analyse. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.) SMUL, Dresden, (2008)
- BERNHOFER C, FRANKE J, KÖRNER P: Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen für Sachsen hinsichtlich relevanter Kenngrößen für die Klimafolgenabschätzung. *Schriftenreihe des LfULG*, Heft 13/2015, (2015)
- BERNHOFER C, FRANKE J, FISCHER S, KIRSTEN L, KÖRNER P, KOSTROWSKI D, PRASSE H, SCHALLER A, DONIX T: Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. *Schriftenreihe des LfULG*, Heft 3/2015, (2015)
- BERNHOFER C, HÄNSEL S, SCHALLER A, PLUNTKE T: Untersuchungen zur Erfassung und Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit. *Schriftenreihe des LfULG*, Heft7/2015, (2015)
- BLENKINSOP S, FOWLER HJ: Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *Int. J. Climatol.* 27 (2007), pp 1595–1610. doi:10.1002/joc.1538
- CHRISTENSEN JH, CHRISTENSEN OB: Climate modeling: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421 (2003), pp 805-806
- DAI A: Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change* 3 (2012), pp 52–58, doi:10.1038/nclimate1633
- DEMUTH S, STAHL K: ARIDE – assessment of the regional impact of droughts in Europe. Final Report to the European Union. ENV4-CT97-0553. Institute of Hydrology, Freiburg: Germany (2001)
- DEUTSCHLÄNDER T UND DALELANE C: Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Hrsg., Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe und Bundesanstalt Technisches Hilfswerk und Deutscher Wetterdienst und Umweltbundesamt, Offenbach (M), (2012)
- FISCHER EM, SCHÄR C: Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience* (2010), Vol3, pp 398-403
- FRANKE J: Risiken des Klimawandels für den Wasserhaushalt – Variabilität und Trend des zeitlichen Niederschlagsspektrums. Diss. an TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, 102 S., (2009)

- FREI C, SCHÖLL R, FUKUTOME S, SCHMIDL J, VIDALE PL: Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* (2006), 111, D06105
- GOODESS CM, ANAGNOSTOPOULOU C, BÁRDOSSY A, FREI C, HARPHAM C, HAYLOCK MR, HUNDECHA Y, MAHERAS P, RIBALAYGUA J, SCHMIDL J, SCHMITH T, TOLIKA K, TOMOZEIU R, WILBY RL: An intercomparison of statistical downscaling methods for Europe and European regions – assessing their performance with respect to extreme temperature and precipitation events. *Climatic Research Unit Research Publication 11* (2007), ([http://www.cru.uea.ac.uk/cru/pubs/crup/CRU\\_RP11.pdf](http://www.cru.uea.ac.uk/cru/pubs/crup/CRU_RP11.pdf))
- GUTTMANN NB: Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 35 (1999), pp 311–322.
- HÄNSEL S, SCHUCKNECHT A, BÖTTCHER F, BERNHOFER C, MATSCHULLAT J: Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100, Starkniederschlags- und Trockenheitstrends, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 246 (2015), Selbstverlag des DWD, Offenbach, 205 S.
- Impact: Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen. Hrsg.: Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz (TMLFUN), 153 S., (2013)
- IPCC: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaption. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel On Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, (2012), 582 p
- IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, TF et al. (eds.)] Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (2013), 1535 pp
- IPCC: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE et al.[Eds.]: Summary for policy-makers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (2014), pp 1-32
- KJELLSTRÖM E, BÄRRING L, JACOB D, JONES R, LENDERINK G, SCHÄR C: Modelling daily temperature extremes: recent climate and future changes over Europe. *Climatic Change* 81 (2007), pp 249–265, DOI 10.1007/s10584-006-9220-5
- KREIENKAMP F, SPEKAT A, ENKE W: WEREX V: Regionale Klimaprojektionen für Sachsen. Veröffentlichung des LfULG, (2011), <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/25601>
- LUPIKASZA E, HAENSEL S UND MATSCHULLAT J: Regional and seasonal variability of extreme precipitation trends in southern Poland and central-eastern Germany 1951-2006. *International Journal of Climatology* 31(15), (2011), pp 2249–2271
- LÜNICH K, PLUNTKE T, NIEMAND C, M ADYNKIEWICZ-PIRAGAS, I ZDRALEWICZ, I OTOP, B MISZUK, J KRYZA, I LEJCUŚ, M STROŃSKA: Lausitzer Neiße – Charakteristik und Klima der Region. Broschüre des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 73 S., (2014)
- MARACCHI G: Agricultural drought – a practical approach to definition, assessment and mitigation strategies. In: JJ VOGT & F SOMMA (Hrsg.). *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer, Dordrecht, pp 63-75, (2000)
- MCKEE TB, DOESKEN NJ, KLEIST J: Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, 9th Conference on Applied Climatology (1995), pp 233-236. January 15-20, Dallas, Texas

- MEHLER S, SZYMANOWSKI M, BŁAŚ M, SOBIK M, MIGAŁA K, WERNER M, KRYZA M, MISZUK B, OTOPIŃSKI I, KOLANEK A, STROŃSKA M: Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum. Broschüre des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 78 S., (2014)
- PEREIRA LS, PAULO AA: Droughts: Concepts, Indices and Prediction. In: HAMDY A & TRISORIO-LIUZZI G, Water Management for Drought Mitigation in the Mediterranean, Options Méditerranéennes, Série B n. 47. Bari: CIHEAM (Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes), 328 p., (2004)
- REGKLAM-Konsortium [Hrsg.]: Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Region Dresden. Grundlagen, Ziele und Maßnahmen. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 7, (2013), Rhombos-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-944101-17-0.
- SCHALLER A: Untersuchungen zu geänderten Starkniederschlägen aus gemessenen und modellierten Niederschlagszeitreihen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, 137 S., (2013)
- VERGNI L, TODISCO F: Spatio-temporal variability of precipitation, temperature and agricultural drought indices in Central Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(3), (2011), pp 301-313
- VICENTE-SERRANO SM, BEGUERÍAS S, LÓPEZ-MORENO JI: A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate* 23, (2010), pp 1696–1718
- WMO: Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, (2009)
- ZOLINA O, SIMMER C, KAPALA A, BACHNER S, GULEV S AND MAECHTEL H (2008): Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 113(D6).

# 8 Anhang

## TABELLENVERZEICHNIS

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 29: | Stationen, die der Analyse in diesem Bericht unterzogen werden (RK-korrigierter Niederschlag, T-min - Minimumtemperatur, T-max-Maximumtemperatur, ETP-Potenzielle Verdunstung): Die Kreuze markieren die Datenverfügbarkeit. .... | 130 |
|-------------|---|-----|

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 67: | Starkniederschlag R80p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten) .....   | 136 |
| Abbildung 68: | Starkniederschlag R90p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten) .....   | 137 |
| Abbildung 69: | Starkniederschlag R95p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten) .....   | 138 |
| Abbildung 70: | Starkniederschlag R99p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten) .....   | 139 |
| Abbildung 71: | Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden.....                                   | 140 |
| Abbildung 72: | Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....           | 141 |
| Abbildung 73: | Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden.....                                   | 142 |
| Abbildung 74: | Starkniederschlag R90p - Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....           | 143 |
| Abbildung 75: | Starkniederschlag R95p - Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961 – 2000 und die Dekaden.....                                 | 144 |
| Abbildung 76: | Starkniederschlag R95p - Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....           | 145 |
| Abbildung 77: | Starkniederschlag R99p - Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden.....                                   | 146 |
| Abbildung 78: | Starkniederschlag R99p - Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten).....           | 147 |
| Abbildung 79: | Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p - Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden (1961–2000 und Dekaden) .....     | 148 |
| Abbildung 80: | Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p - Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden). .... | 149 |
| Abbildung 81: | Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p - Überschreitungstage: Box-Whisker-Plots für die Station Dresden (1961–2000 und Dekaden).....  | 150 |
| Abbildung 82: | Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p - Überschreitungstage: Box-Whisker-Plots für die Station Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden). ....                                       | 151 |

|                               |  |     |
|-------------------------------|--|-----|
| Abbildung 83:                 | Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPI12 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 12 bzw. mehr als 12 Monate für die Station Dresden-Klotzsche. Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961-1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft .....  | 152 |
| Abbildung 84:                 | Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPI12 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 12 bzw. mehr als 12 Monate für die Station Fichtelberg (WEWA). Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961-1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft ..... | 153 |
| Abbildung 85:                 | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961-2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-RACMO-L3-A1B, VP I+II, 1961-2100 .....  | 154 |
| Abbildung 86:                 | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961-2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-REMO-L3-A1B, VP I+II, 1961-2100 .....   | 155 |
| Abbildung 87:                 | Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961-2013) und für alle Realisierungen des Laufs HCG2-L1-A1B, VP I+II, 1961-2100 .....   | 156 |
| FRAGEBOGEN ZUM WORKSHOP ..... |  | 157 |

**Tabelle 29: Stationen, die der Analyse in diesem Bericht unterzogen werden (RK-korrigierter Niederschlag, T-min – Minimumtemperatur, T-max – Maximumtemperatur, ETP – Potenzielle Verdunstung): Die Kreuze markieren die Datenverfügbarkeit.**

| ID    | Name                              | Bundesland | Höhe [m] | Breite [Dez.Grad] | Länge [Dez.Grad] | RK | T-min | T-max | ETP |
|-------|-----------------------------------|------------|----------|-------------------|------------------|----|-------|-------|-----|
| 2571  | Altenberg-Kipsdorf                | SN         | 550      | 50.804            | 13.676           | X  |       |       |     |
| 3574  | Altendorf/Waldnaab                | BY         | 400      | 49.714            | 12.171           | X  |       |       |     |
| 198   | Artern                            | TH         | 164      | 51.374            | 11.292           | X  | X     | X     | X   |
| 50002 | As                                |            | 675      | 50.221            | 12.180           | X  |       |       |     |
| 225   | Auerstedt                         | TH         | 150      | 51.100            | 11.583           | X  |       |       |     |
| 50003 | Bedrichov                         |            | 777      | 50.815            | 15.137           | X  | X     | X     |     |
| 466   | Betzenstein                       | BY         | 501      | 49.680            | 11.417           | X  |       |       |     |
| 509   | Bischofsgruen (Hohe Reuth)        | BY         | 660      | 50.051            | 11.794           | X  |       |       |     |
| 536   | Blankenstein                      | TH         | 480      | 50.399            | 11.692           | X  |       |       |     |
| 647   | Brand/Oberpfalz                   | BY         | 592      | 49.959            | 11.913           | X  |       |       |     |
| 50007 | Brandys-nad-Labem                 |            | 179      | 50.190            | 14.661           | X  |       |       |     |
| 800   | Burg/Spreewald                    | BB         | 55       | 51.837            | 14.144           | X  |       |       |     |
| 5396  | Buttelstedt-Weiden                | TH         | 250      | 51.071            | 11.359           | X  |       |       |     |
| 50012 | Cheb                              |            | 483      | 50.069            | 12.391           | X  |       |       |     |
| 853   | Chemnitz                          | SN         | 418      | 50.791            | 12.872           | X  | X     | X     | X   |
| 50016 | Chřibská                          |            | 440      | 50.852            | 14.524           | X  |       |       |     |
| 880   | Cottbus                           | BB         | 69       | 51.776            | 14.317           | X  | X     | X     | X   |
| 905   | Dahme                             | BB         | 86       | 51.867            | 13.430           | X  |       |       |     |
| 50018 | Desna                             |            | 772      | 50.789            | 15.320           | X  |       |       |     |
| 1001  | Doberlug-Kirchhain                | BB         | 97       | 51.645            | 13.574           | X  |       |       |     |
| 50019 | Doksany                           |            | 158      | 50.458            | 14.170           | X  |       |       |     |
| 50020 | Doksy                             |            | 284      | 50.568            | 14.668           | X  |       |       |     |
| 1048  | Fichtelberg-Klotzsche             | SN         | 227      | 51.128            | 13.754           | X  | X     | X     | X   |
| 1060  | Drognitz                          | TH         | 530      | 50.589            | 11.577           | X  |       |       |     |
| 1116  | Eckersdorf-Busbach                | BY         | 435      | 49.941            | 11.403           | X  |       |       |     |
| 1119  | Edelsfeld                         | BY         | 535      | 49.577            | 11.697           | X  |       |       |     |
| 1141  | Egloffstein-Bieberbach            | BY         | 512      | 49.732            | 11.298           | X  |       |       |     |
| 3824  | Eisleben-Osterhausen              | ST         | 163      | 51.452            | 11.507           | X  |       |       |     |
| 1208  | Elsterberg                        | SN         | 290      | 50.599            | 12.160           | X  |       |       |     |
| 1210  | Elsterwerda                       | BB         | 90       | 51.451            | 13.505           | X  |       |       |     |
| 1259  | Erbendorf                         | BY         | 500      | 49.840            | 12.047           | X  |       |       |     |
| 1314  | Ettersburg                        | TH         | 330      | 51.033            | 11.275           | X  |       |       |     |
| 1318  | Etzelwang                         | BY         | 425      | 49.528            | 11.585           | X  |       |       |     |
| 1358  | Fichtelberg                       | SN         | 1213     | 50.428            | 12.953           | X  | X     | X     | X   |
| 1357  | Fichtelberg/Oberfranken-Huetstadt | BY         | 657      | 49.981            | 11.838           | X  | X     | X     |     |

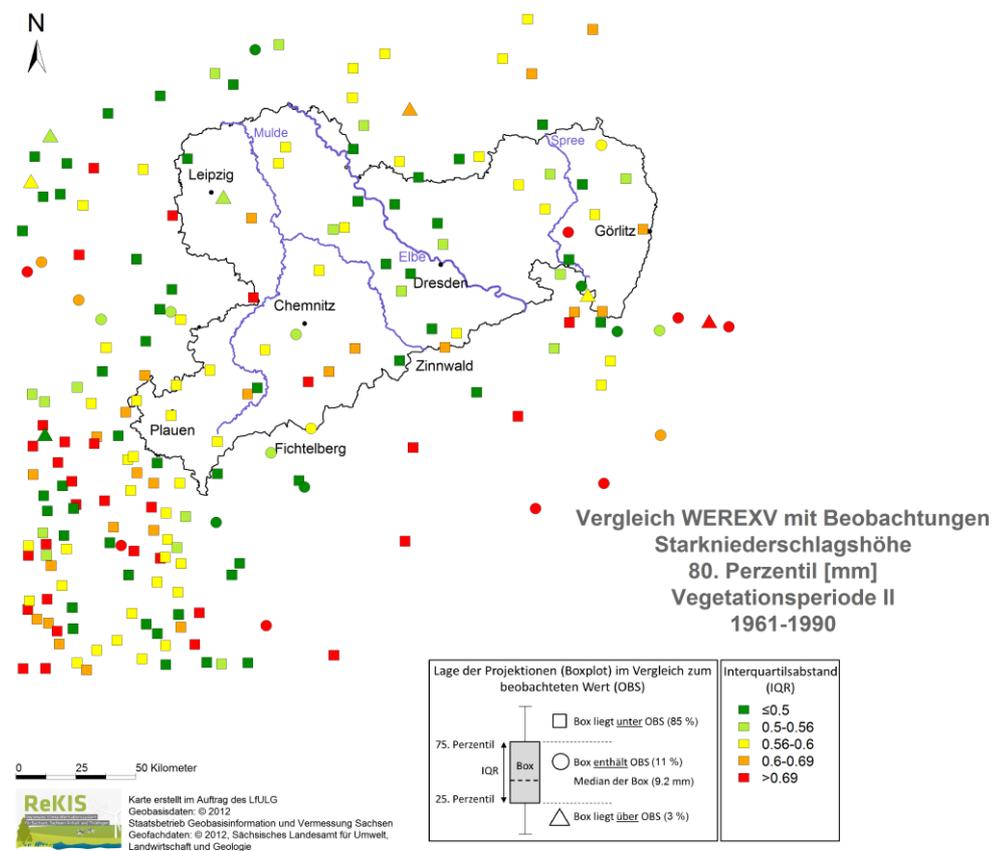
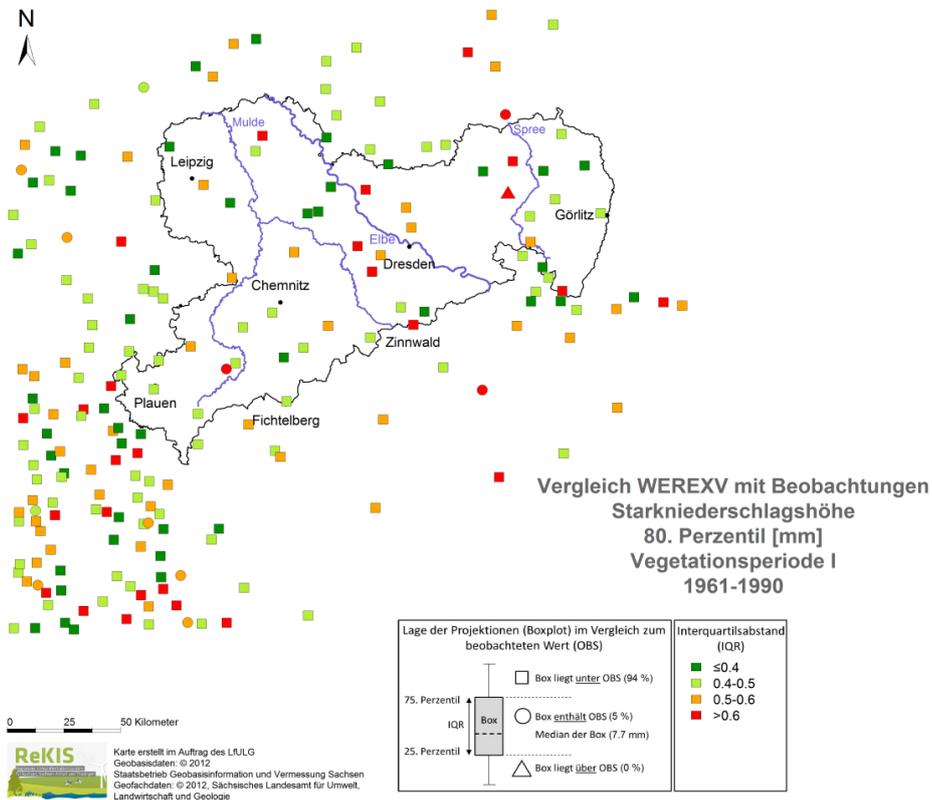
| ID    | Name                          | Bundes-<br>land | Höhe<br>[m] | Breite<br>[Dez.Grad] | Länge<br>[Dez.Grad] | RK | T-<br>min | T-<br>max | ETP |
|-------|-------------------------------|-----------------|-------------|----------------------|---------------------|----|-----------|-----------|-----|
| 1391  | Floss                         | BY              | 515         | 49.721               | 12.291              | X  |           |           |     |
| 1612  | Gera-Leumnitz                 | TH              | 311         | 50.881               | 12.129              | X  | X         | X         | X   |
| 1610  | Gera-Untermhaus               | TH              | 200         | 50.891               | 12.064              | X  |           |           |     |
| 1684  | Goerlitz                      | SN              | 238         | 51.162               | 14.951              | X  | X         | X         | X   |
| 1689  | Goessweinstein                | BY              | 443         | 49.766               | 11.306              | X  | X         | X         |     |
| 1728  | Grafenwoehr                   | BY              | 411         | 49.719               | 11.901              | X  |           |           |     |
| 1729  | Grafenwoehr-Grub              | BY              | 404         | 49.677               | 11.984              | X  |           |           |     |
| 4727  | Grossenhain-Skassa            | SN              | 125         | 51.286               | 13.471              | X  |           |           |     |
| 1872  | Grumbach                      | SN              | 290         | 51.018               | 13.558              | X  |           |           |     |
| 1876  | Guben                         | BB              | 46          | 51.938               | 14.696              | X  |           |           |     |
| 1915  | Haehnichen                    | SN              | 155         | 51.359               | 14.861              | X  |           |           |     |
| 1954  | Halle-Ammendorf               | ST              | 82          | 51.430               | 11.965              | X  |           |           |     |
| 50024 | Harrachov                     |                 | 670         | 50.772               | 15.436              | X  |           |           |     |
| 2029  | Hartenstein-Rupprechtstegen   | BY              | 410         | 49.600               | 11.481              | X  |           |           |     |
| 5395  | Harth-Poellnitz Neundorf      | TH              | 340         | 50.768               | 11.981              | X  |           |           |     |
| 2038  | Hartmannsdorf bei Kirchberg   | SN              | 563         | 50.563               | 12.581              | X  |           |           |     |
| 320   | Heinersreuth-Vollhof          | BY              | 350         | 49.967               | 11.519              | X  | X         | X         | X   |
| 2168  | Hersbruck                     | BY              | 332         | 49.505               | 11.403              | X  |           |           |     |
| 2177  | Herzberg/Elster               | BB              | 81          | 51.700               | 13.229              | X  |           |           |     |
| 2195  | Heuckewalde-Giebelroth        | ST              | 302         | 50.967               | 12.135              | X  |           |           |     |
| 2231  | Hirschau                      | BY              | 410         | 49.543               | 11.960              | X  |           |           |     |
| 2233  | Hirschberg                    | TH              | 456         | 50.404               | 11.819              | X  |           |           |     |
| 2234  | Hirschfeld                    | BB              | 105         | 51.388               | 13.618              | X  |           |           |     |
| 2248  | Hoefchen-Kriebstein Talsperre | SN              | 212         | 51.036               | 13.014              | X  |           |           |     |
| 2261  | Hof                           | BY              | 565         | 50.312               | 11.876              | X  | X         | X         | X   |
| 2260  | Hof (Stadt)                   | BY              | 474         | 50.323               | 11.908              | X  | X         | X         |     |
| 2274  | Hohenberg/Eger                | BY              | 517         | 50.092               | 12.213              | X  |           |           |     |
| 1558  | Hohendubrau-Gebelzig          | SN              | 196         | 51.226               | 14.666              | X  |           |           |     |
| 2304  | Hohndorf                      | SN              | 415         | 50.733               | 12.686              | X  |           |           |     |
| 2310  | Hollfeld                      | BY              | 423         | 49.940               | 11.298              | X  |           |           |     |
| 50029 | Jablonne-v-Podjestedi         |                 | 320         | 50.772               | 14.775              | X  |           |           |     |
| 2444  | Jena (Sternwarte)             | TH              | 155         | 50.925               | 11.583              | X  | X         | X         |     |
| 2463  | Jonsdorf, Kurort              | SN              | 450         | 50.852               | 14.690              | X  |           |           |     |
| 2468  | Jueckelberg-Flemmingen        | TH              | 235         | 50.935               | 12.621              | X  |           |           |     |
| 50034 | Karlovy-Vary_Lazne            |                 | 377         | 50.228               | 12.878              | X  |           |           |     |
| 50035 | Karlovy-Vary_Letiste          |                 | 603         | 50.202               | 12.911              | X  |           |           |     |
| 4052  | Kemberg-Radis                 | ST              | 94          | 51.756               | 12.510              | X  |           |           |     |
| 2556  | Kemnath                       | BY              | 460         | 49.867               | 11.881              | X  |           |           |     |

| ID    | Name                               | Bundes-land | Höhe [m] | Breite [Dez.Grad] | Länge [Dez.Grad] | RK | T-min | T-max | ETP |
|-------|------------------------------------|-------------|----------|-------------------|------------------|----|-------|-------|-----|
| 2640  | Klitten                            | SN          | 132      | 51.344            | 14.599           | X  |       |       |     |
| 2651  | Knau                               | TH          | 460      | 50.651            | 11.724           | X  |       |       |     |
| 2664  | Koelleda                           | TH          | 143      | 51.191            | 11.244           | X  |       |       |     |
| 2668  | Koelsa                             | SN          | 115      | 51.471            | 12.230           | X  |       |       |     |
| 2720  | Kossdorf                           | BB          | 87       | 51.502            | 13.229           | X  |       |       |     |
| 50040 | Kralovice                          |             | 468      | 49.988            | 13.491           | X  |       |       |     |
| 2750  | Kronach                            | BY          | 312      | 50.252            | 11.321           | X  | X     | X     |     |
| 314   | Kubschuetz, Kr. Bautzen            | SN          | 232      | 51.160            | 14.504           | X  |       |       |     |
| 2781  | Kulmbach-Burghaig                  | BY          | 385      | 50.113            | 11.406           | X  |       |       |     |
| 2782  | Kulmbach-Kirchleus                 | BY          | 430      | 50.171            | 11.384           | X  |       |       |     |
| 2786  | Kupferberg                         | BY          | 470      | 50.138            | 11.574           | X  |       |       |     |
| 50043 | Kytlice                            |             | 406      | 50.813            | 14.491           | X  |       |       |     |
| 2882  | Lauenstein                         | SN          | 509      | 50.784            | 13.823           | X  |       |       |     |
| 2884  | Lauf/Pegnitz (Klaeranlage)         | BY          | 333      | 49.504            | 11.274           | X  |       |       |     |
| 2928  | Leipzig-Holzhausen                 | SN          | 138      | 51.315            | 12.446           | X  | X     | X     |     |
| 4128  | Lengefeld-Reifland (Saidenbach TS) | SN          | 450      | 50.734            | 13.219           | X  |       |       |     |
| 2960  | Leuchtenberg                       | BY          | 538      | 49.599            | 12.265           | X  |       |       |     |
| 2974  | Libehna                            | ST          | 80       | 51.714            | 12.068           | X  |       |       |     |
| 50044 | Liberec                            |             | 398      | 50.770            | 15.024           | X  |       |       |     |
| 5897  | Lichtenberg/Oberfranken            | BY          | 575      | 50.373            | 11.678           | X  |       |       |     |
| 2997  | Lieberose                          | BB          | 47       | 51.986            | 14.303           | X  |       |       |     |
| 3057  | Lohsa                              | SN          | 125      | 51.387            | 14.407           | X  |       |       |     |
| 50047 | Luby                               |             | 530      | 50.257            | 12.400           | X  |       |       |     |
| 3497  | Ludwigschorgast                    | BY          | 336      | 50.123            | 11.559           | X  |       |       |     |
| 3109  | Luetzen                            | ST          | 122      | 51.252            | 12.142           | X  |       |       |     |
| 3111  | Luhe-Wildenau-Neumaierhof          | BY          | 425      | 49.595            | 12.095           | X  |       |       |     |
| 3121  | Maehring                           | BY          | 676      | 49.911            | 12.528           | X  |       |       |     |
| 3122  | Maehring-Griesbach                 | BY          | 720      | 49.867            | 12.481           | X  |       |       |     |
| 5814  | Mansfeld-Annarode                  | ST          | 322      | 51.551            | 11.406           | X  |       |       |     |
| 50049 | Marenice                           |             | 395      | 50.810            | 14.677           | X  |       |       |     |
| 2694  | Marktgoelitz-Koenigsthal           | TH          | 380      | 50.561            | 11.310           | X  |       |       |     |
| 3188  | Marktleuthen                       | BY          | 539      | 50.129            | 12.015           | X  |       |       |     |
| 3191  | Marktrechwitz                      | BY          | 508      | 50.004            | 12.109           | X  |       |       |     |
| 50053 | Milesovka                          |             | 833      | 50.555            | 13.931           | X  |       |       |     |
| 50054 | Mimon                              |             | 278      | 50.660            | 14.726           | X  |       |       |     |
| 1652  | Mistelgau-Hardt                    | BY          | 420      | 49.902            | 11.431           | X  |       |       |     |
| 3312  | Mockrehna                          | SN          | 102      | 51.513            | 12.823           | X  |       |       |     |
| 3372  | Muehltruff                         | SN          | 478      | 50.539            | 11.926           | X  |       |       |     |

| ID    | Name                            | Bundes-<br>land | Höhe<br>[m] | Breite<br>[Dez.Grad] | Länge<br>[Dez.Grad] | RK | T-<br>min | T-<br>max | ETP |
|-------|---------------------------------|-----------------|-------------|----------------------|---------------------|----|-----------|-----------|-----|
| 50056 | Nejdek                          |                 | 610         | 50.336               | 12.715              | X  |           |           |     |
| 3516  | Neuhaus/Mittelfranken-Mosenberg | BY              | 393         | 49.659               | 11.560              | X  |           |           |     |
| 3520  | Neuhausen/Erzgebirge            | SN              | 593         | 50.684               | 13.481              | X  |           |           |     |
| 3530  | Neukirchen/Oberpfalz -Haid      | BY              | 479         | 49.500               | 11.640              | X  |           |           |     |
| 3533  | Neumark                         | SN              | 378         | 50.656               | 12.359              | X  |           |           |     |
| 3573  | Neustadt/Orla                   | TH              | 310         | 50.743               | 11.746              | X  |           |           |     |
| 3635  | Nordhalben                      | BY              | 621         | 50.379               | 11.505              | X  |           |           |     |
| 3698  | Oberkotzau                      | BY              | 504         | 50.261               | 11.930              | X  |           |           |     |
| 3732  | Obersteina                      | SN              | 185         | 51.194               | 13.101              | X  |           |           |     |
| 3737  | Obertrubach                     | BY              | 435         | 49.695               | 11.350              | X  |           |           |     |
| 3800  | Oppach                          | SN              | 320         | 51.055               | 14.503              | X  |           |           |     |
| 3804  | Oranienbaum                     | ST              | 63          | 51.799               | 12.400              | X  |           |           |     |
| 3822  | Osterfeld (Bauernweg)           | ST              | 200         | 51.084               | 11.926              | X  |           |           |     |
| 3837  | Ostrau                          | SN              | 160         | 51.200               | 13.169              | X  |           |           |     |
| 3885  | Pechbrunn                       | BY              | 540         | 49.972               | 12.162              | X  |           |           |     |
| 3886  | Pegnitz (Klaeranlage)           | BY              | 420         | 49.741               | 11.555              | X  |           |           |     |
| 3888  | Pegnitz-Trockau                 | BY              | 515         | 49.825               | 11.495              | X  |           |           |     |
| 3889  | Peickwitz                       | BB              | 102         | 51.462               | 13.984              | X  |           |           |     |
| 3946  | Plauen                          | SN              | 386         | 50.482               | 12.130              | X  | X         | X         |     |
| 3948  | Plech                           | BY              | 443         | 49.649               | 11.468              | X  |           |           |     |
| 3977  | Pomssen                         | SN              | 143         | 51.241               | 12.613              | X  |           |           |     |
| 3989  | Pottenstein                     | BY              | 365         | 49.773               | 11.409              | X  |           |           |     |
| 50064 | Praha-Ruzyne                    |                 | 364         | 50.101               | 14.258              | X  |           |           |     |
| 4000  | Presseck                        | BY              | 640         | 50.227               | 11.548              | X  |           |           |     |
| 4001  | Presseck-Wartenfels             | BY              | 450         | 50.210               | 11.494              | X  |           |           |     |
| 4002  | Pressig-Rothenkirchen           | BY              | 400         | 50.362               | 11.318              | X  |           |           |     |
| 50067 | Primda                          |                 | 742         | 49.669               | 12.678              | X  |           |           |     |
| 4014  | Probstzella                     | TH              | 360         | 50.533               | 11.385              | X  |           |           |     |
| 4048  | Radeburg                        | SN              | 153         | 51.210               | 13.724              | X  |           |           |     |
| 3110  | Radibor-Quoos                   | SN              | 155         | 51.253               | 14.370              | X  |           |           |     |
| 4107  | Regnitzlosau                    | BY              | 530         | 50.298               | 12.048              | X  |           |           |     |
| 4109  | Rehau                           | BY              | 587         | 50.221               | 12.028              | X  |           |           |     |
| 4137  | Reinsdorf, Kreis Nebra          | ST              | 118         | 51.291               | 11.605              | X  |           |           |     |
| 2992  | Remptendorf                     | TH              | 495         | 50.528               | 11.661              | X  |           |           |     |
| 4197  | Riesa (West)                    | SN              | 142         | 51.301               | 13.251              | X  |           |           |     |
| 4227  | Roecknitz                       | SN              | 118         | 51.451               | 12.778              | X  |           |           |     |
| 4252  | Ronneburg                       | TH              | 285         | 50.851               | 12.188              | X  |           |           |     |

| ID    | Name                          | Bundes-<br>land | Höhe<br>[m] | Breite<br>[Dez.Grad] | Länge<br>[Dez.Grad] | RK | T-<br>min | T-<br>max | ETP |
|-------|-------------------------------|-----------------|-------------|----------------------|---------------------|----|-----------|-----------|-----|
| 4286  | Rothenburg                    | ST              | 85          | 51.645               | 11.753              | X  |           |           |     |
| 4317  | Ruhland                       | BB              | 98          | 51.456               | 13.865              | X  |           |           |     |
| 50069 | Rumburk                       |                 | 390         | 50.951               | 14.571              | X  |           |           |     |
| 4381  | Sangerhausen                  | ST              | 179         | 51.478               | 11.312              | X  |           |           |     |
| 4506  | Schneeberg                    | SN              | 450         | 50.586               | 12.639              | X  |           |           |     |
| 4529  | Schoenbrunn/Sachsen           | SN              | 400         | 50.646               | 13.064              | X  |           |           |     |
| 4535  | Schoeneck-Kottenheide         | SN              | 768         | 50.381               | 12.401              | X  |           |           |     |
| 4539  | Schoenewalde                  | BB              | 79          | 51.813               | 13.236              | X  |           |           |     |
| 4540  | Schoenewerda                  | TH              | 119         | 51.323               | 11.366              | X  |           |           |     |
| 4546  | Schoensee-Dietersdorf         | BY              | 685         | 49.527               | 12.570              | X  |           |           |     |
| 4564  | Schraplau                     | ST              | 135         | 51.434               | 11.669              | X  |           |           |     |
| 4609  | Schwarzenbach-Goetzmannsgruen | BY              | 521         | 50.193               | 11.893              | X  |           |           |     |
| 50070 | Semcice                       |                 | 234         | 50.367               | 15.004              | X  |           |           |     |
| 50073 | Sluknov                       |                 | 359         | 51.001               | 14.448              | X  |           |           |     |
| 4743  | Sollschwitz                   | SN              | 132         | 51.349               | 14.217              | X  |           |           |     |
| 4788  | Spremberg (Klaeranlage)       | BB              | 99          | 51.579               | 14.372              | X  |           |           |     |
| 4812  | Stadtroda                     | TH              | 245         | 50.851               | 11.716              | X  |           |           |     |
| 4818  | Stambach-Querenbach           | BY              | 598         | 50.153               | 11.740              | X  |           |           |     |
| 50076 | Stankov                       |                 | 362         | 49.553               | 13.068              | X  |           |           |     |
| 4846  | Steinbach am Wald             | BY              | 616         | 50.443               | 11.375              | X  |           |           |     |
| 4865  | Steinwiesen                   | BY              | 365         | 50.299               | 11.466              | X  |           |           |     |
| 4968  | Taennesberg                   | BY              | 590         | 49.529               | 12.333              | X  |           |           |     |
| 4979  | Tanna                         | TH              | 548         | 50.494               | 11.862              | X  |           |           |     |
| 4981  | Tanneberg                     | SN              | 248         | 51.057               | 13.412              | X  |           |           |     |
| 4982  | Tannenbergl                   | SN              | 532         | 50.608               | 12.939              | X  |           |           |     |
| 5015  | Teunz-Wildstein               | BY              | 671         | 49.524               | 12.418              | X  |           |           |     |
| 5017  | Teuschnitz                    | BY              | 633         | 50.400               | 11.389              | X  | X         | X         |     |
| 1775  | Tharandt-Grillenburg          | SN              | 384         | 50.951               | 13.501              | X  |           |           |     |
| 5027  | Thierstein                    | BY              | 595         | 50.106               | 12.100              | X  |           |           |     |
| 5033  | Thurnau                       | BY              | 399         | 50.028               | 11.381              | X  |           |           |     |
| 5034  | Thurnau-Tannfeld              | BY              | 517         | 49.984               | 11.401              | X  |           |           |     |
| 5140  | Uebigau                       | BB              | 84          | 51.592               | 13.295              | X  |           |           |     |
| 50086 | Varnsdorf                     |                 | 365         | 50.909               | 14.606              | X  |           |           |     |
| 5231  | Vilseck                       | BY              | 430         | 49.615               | 11.815              | X  |           |           |     |
| 5304  | Waldershof-Hohenhard          | BY              | 690         | 49.932               | 12.066              | X  |           |           |     |
| 5303  | Waldershof-Schafbruck         | BY              | 723         | 49.936               | 12.094              | X  |           |           |     |
| 5354  | Warmensteinach                | BY              | 610         | 49.991               | 11.771              | X  |           |           |     |

| ID    | Name                        | Bundes-<br>land | Höhe<br>[m] | Breite<br>[Dez.Grad] | Länge<br>[Dez.Grad] | RK | T-<br>min | T-<br>max | ETP |
|-------|-----------------------------|-----------------|-------------|----------------------|---------------------|----|-----------|-----------|-----|
| 5397  | Weiden                      | BY              | 440         | 49.666               | 12.184              | X  | X         | X         | X   |
| 5406  | Weiherhammer                | BY              | 395         | 49.641               | 12.049              | X  |           |           |     |
| 5449  | Weißkeißel                  | SN              | 125         | 51.492               | 14.723              | X  |           |           |     |
| 5485  | Wernberg-Koeblitz-Neunaigen | BY              | 407         | 49.521               | 12.097              | X  |           |           |     |
| 5539  | Wiesau                      | BY              | 513         | 49.911               | 12.187              | X  |           |           |     |
| 5597  | Windischeschenbach-Neuhaus  | BY              | 467         | 49.801               | 12.168              | X  |           |           |     |
| 5629  | Wittenberg                  | ST              | 105         | 51.889               | 12.644              | X  | X         | X         | X   |
| 5690  | Wonsees                     | BY              | 420         | 49.977               | 11.298              | X  |           |           |     |
| 5714  | Wunsiedel                   | BY              | 520         | 50.039               | 12.028              | X  |           |           |     |
| 5737  | Zahna                       | ST              | 94          | 51.908               | 12.788              | X  |           |           |     |
| 50089 | Zandov                      |                 | 250         | 50.716               | 14.398              | X  |           |           |     |
| 50090 | Zatec                       |                 | 210         | 50.348               | 13.550              | X  |           |           |     |
| 5765  | Zeulenroda                  | TH              | 462         | 50.636               | 11.975              | X  |           |           |     |
| 5769  | Ziegelroda                  | ST              | 263         | 51.333               | 11.468              | X  |           |           |     |
| 5779  | Zinnwald-Georgenfeld        | SN              | 877         | 50.731               | 13.751              | X  | X         | X         | X   |



**Abbildung 67: Starkniederschlag R80p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten)**

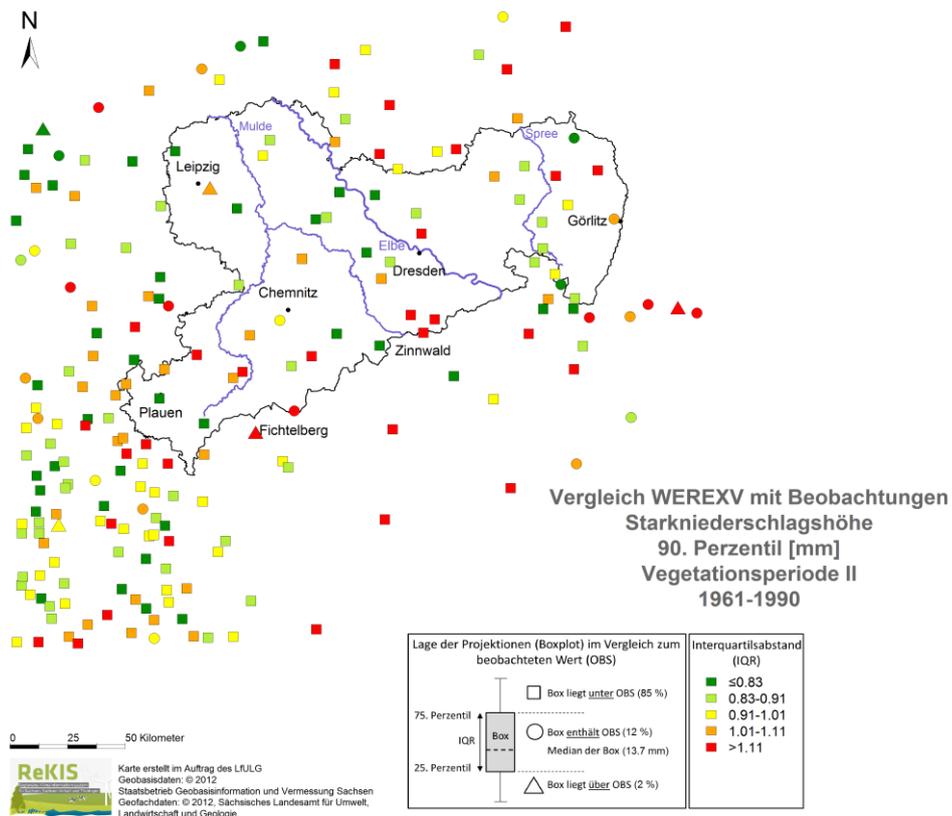
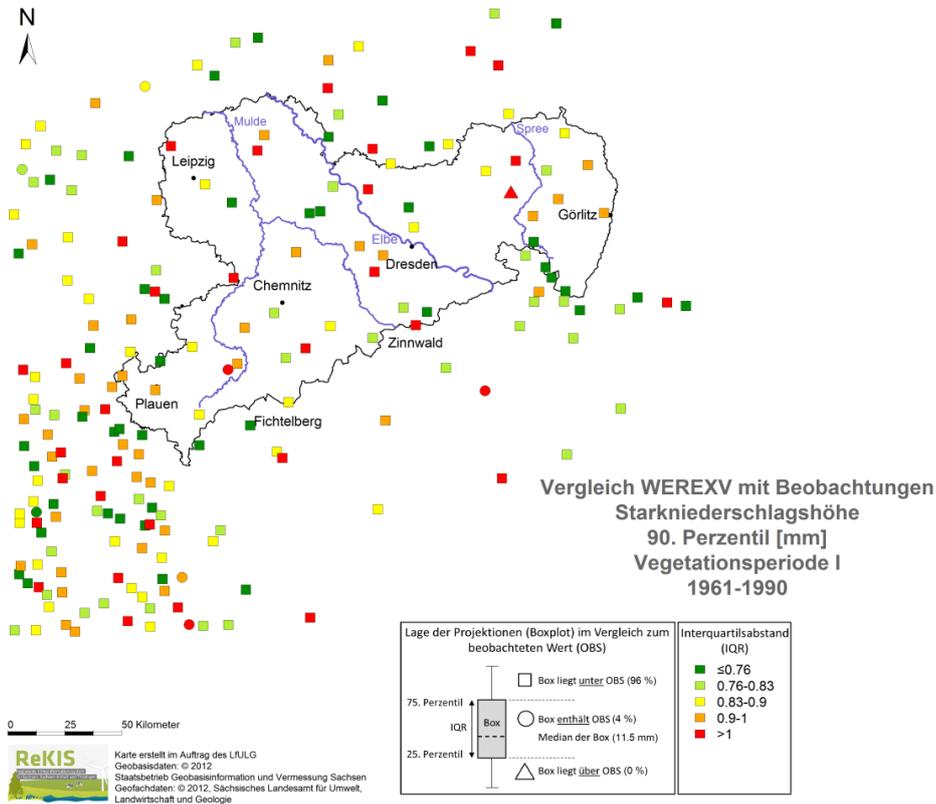
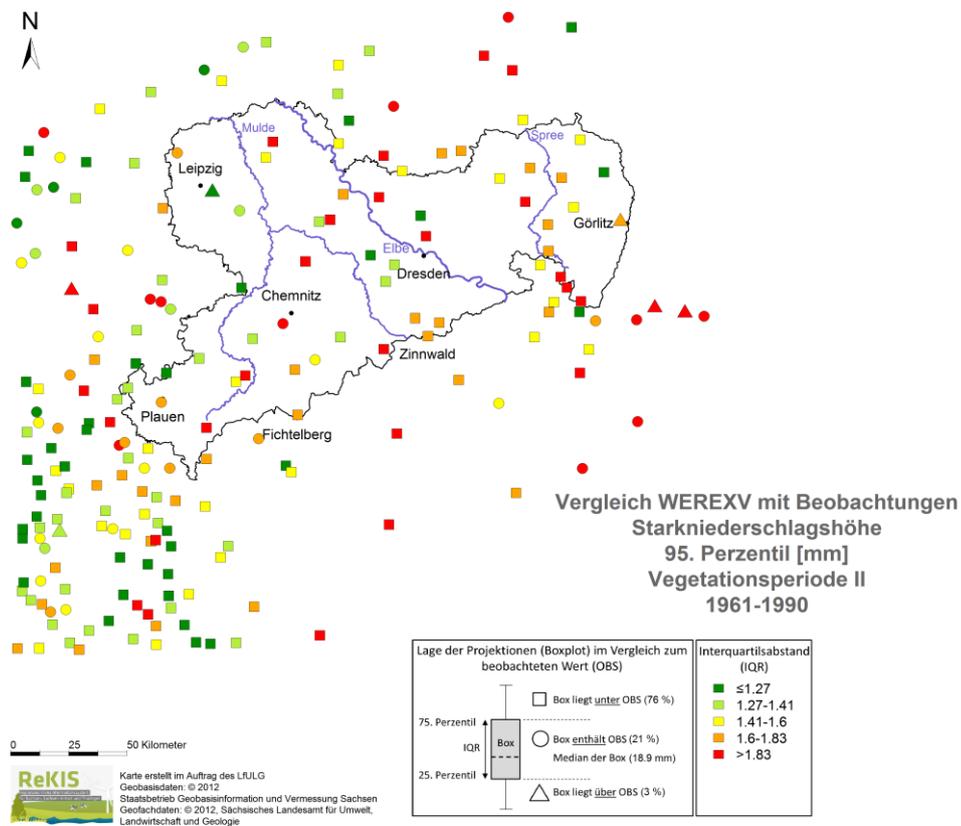
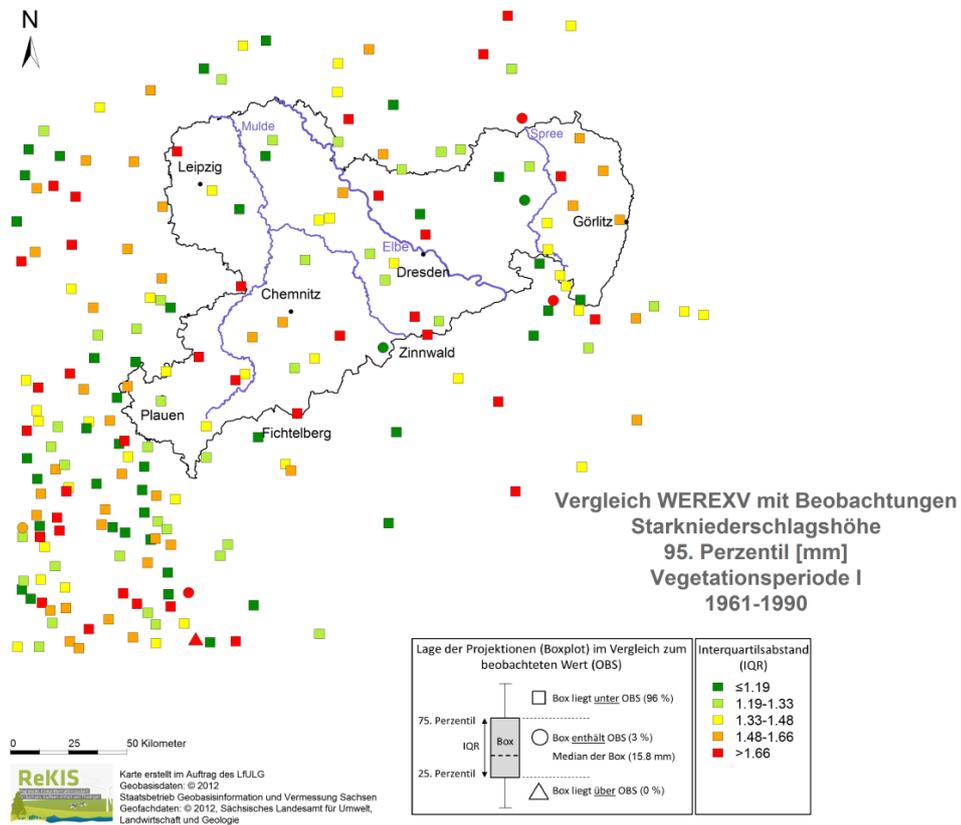


Abbildung 68: Starkniederschlag R90p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VP II (unten)



**Abbildung 69: Starkniederschlag R95p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten)**

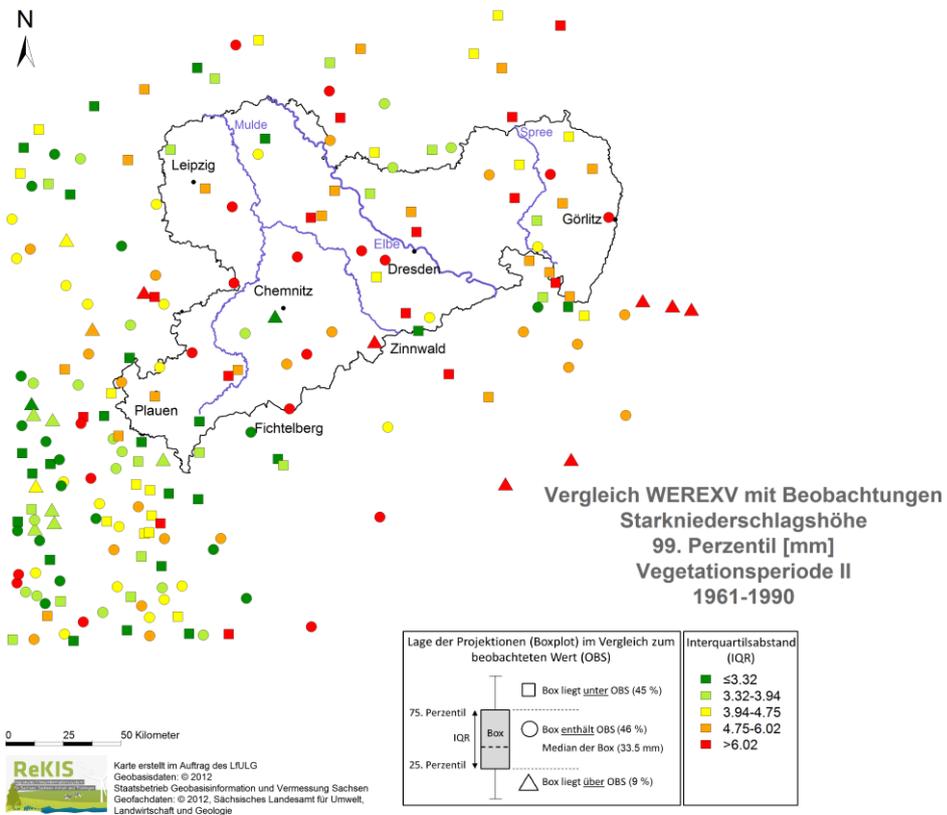
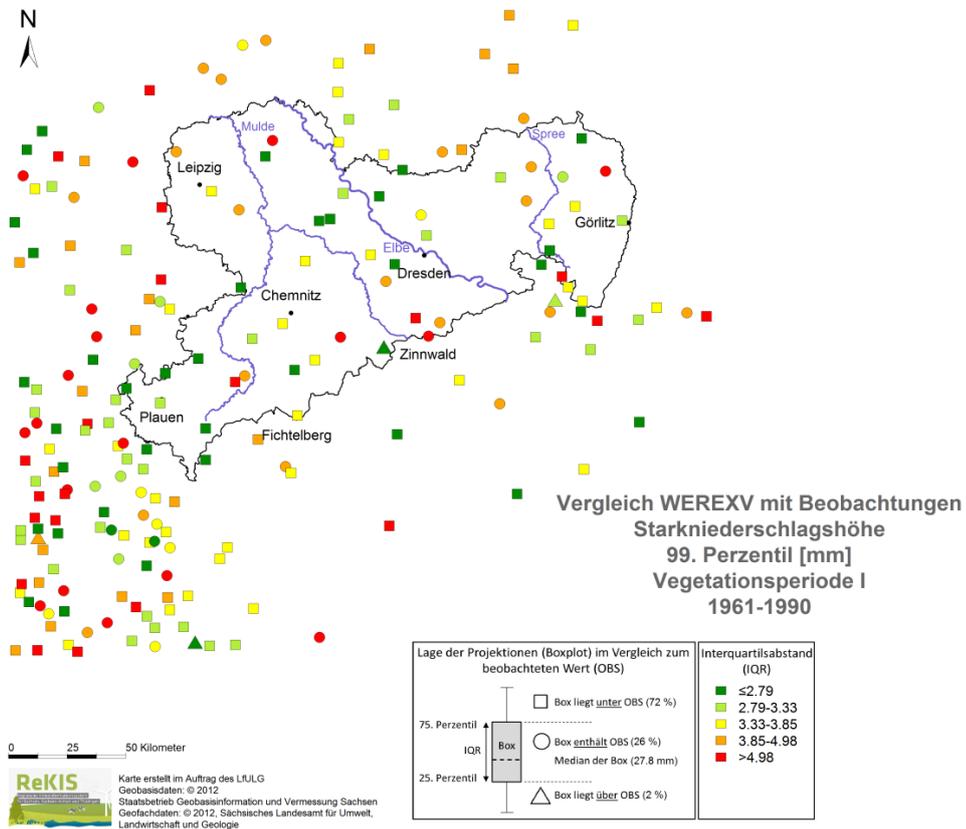
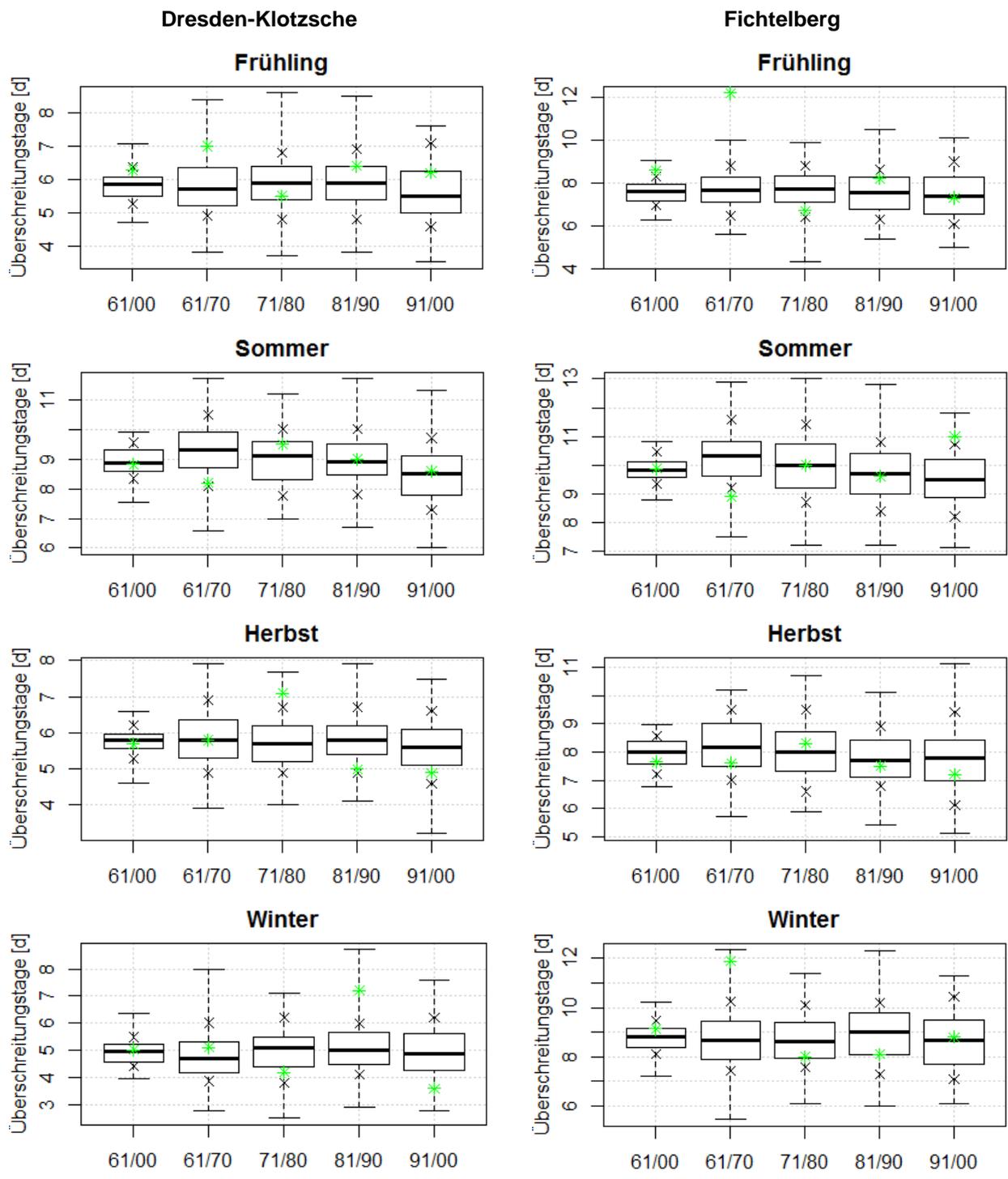
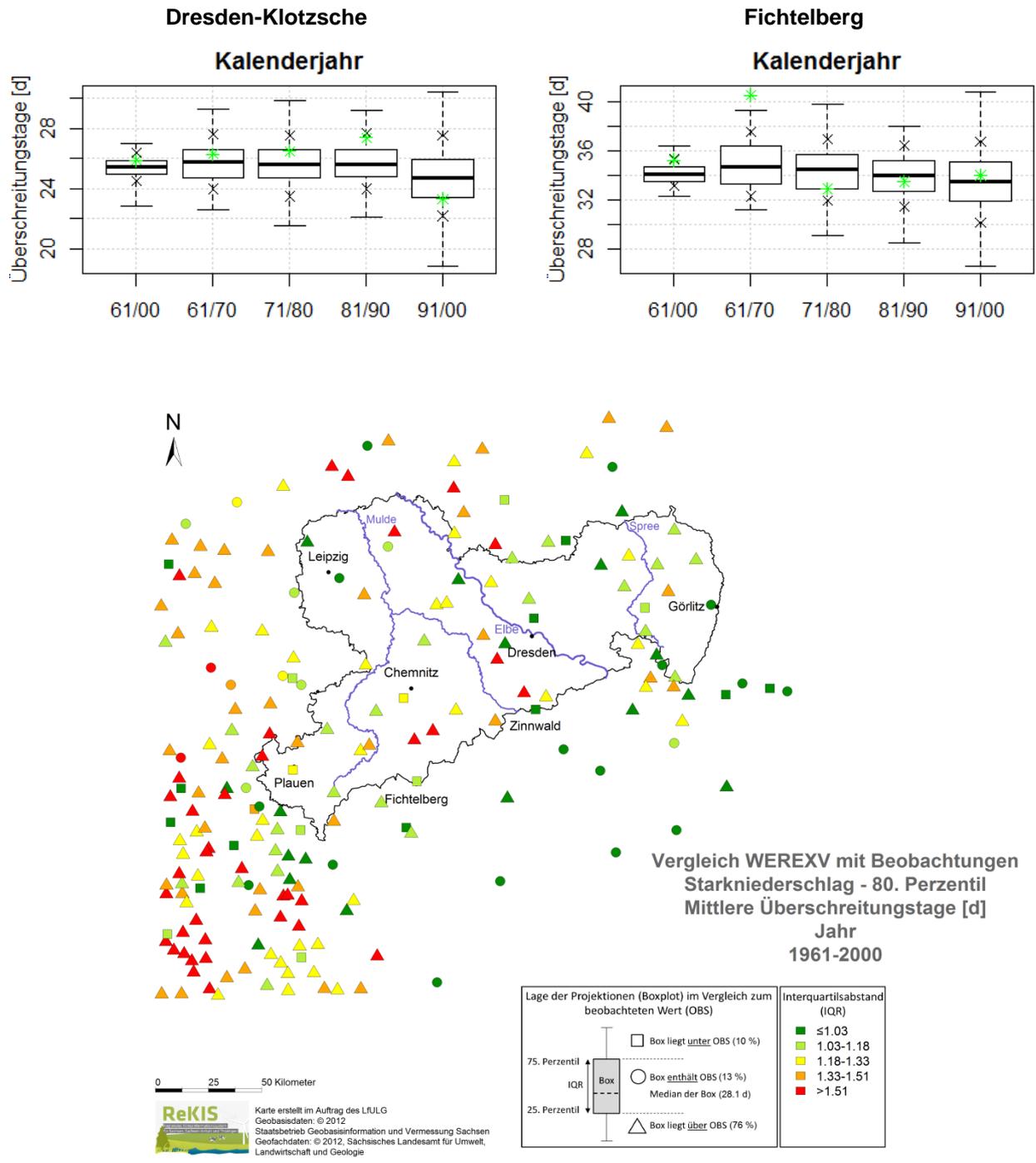


Abbildung 70: Starkniederschlag R99p – Höhe: Darstellung für das Gesamtgebiet für die Vegetationsperiode VPI (oben) und VPII (unten)



**Abbildung 71: Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden**



**Abbildung 72: Starkniederschlag R80p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)**

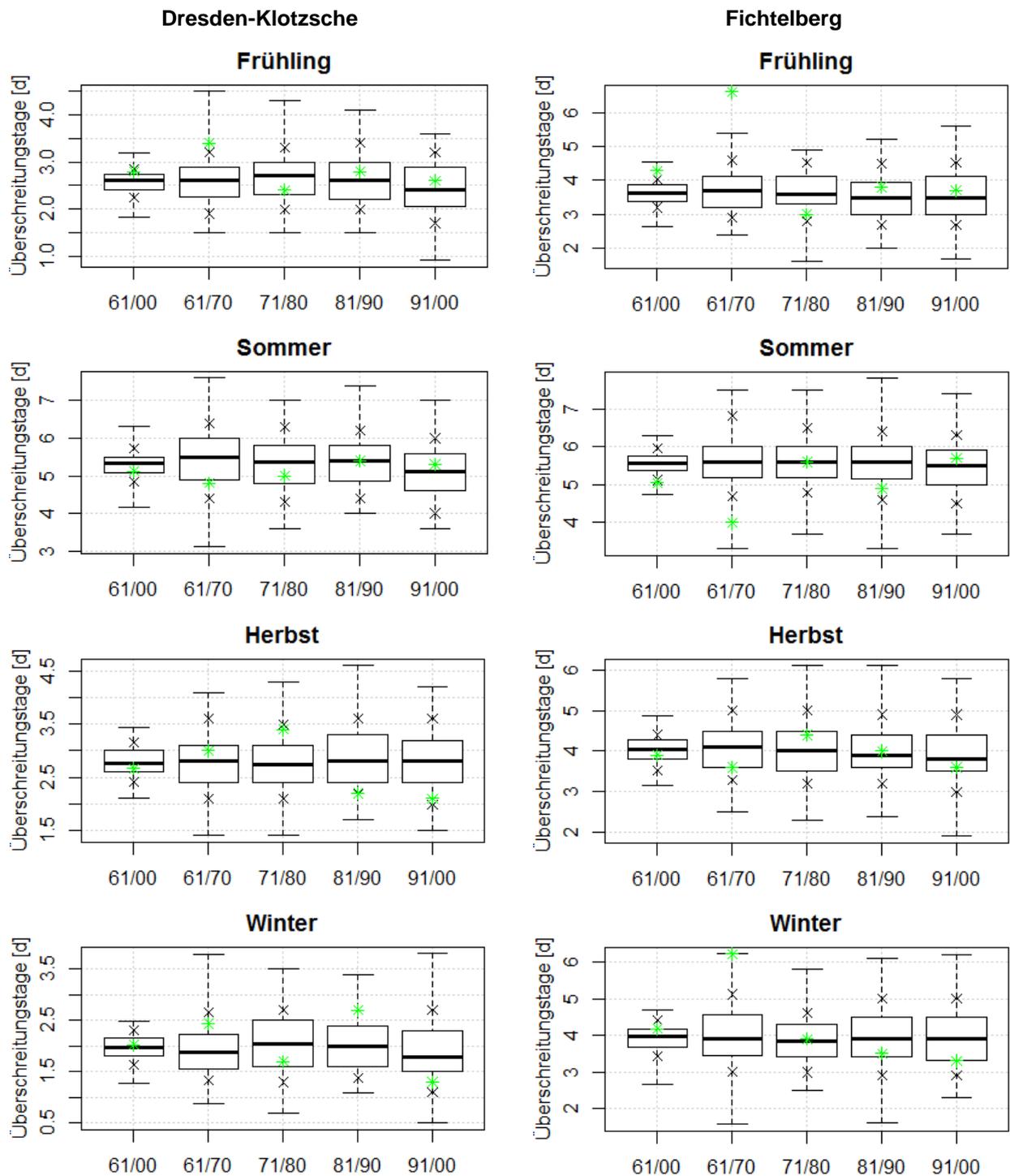
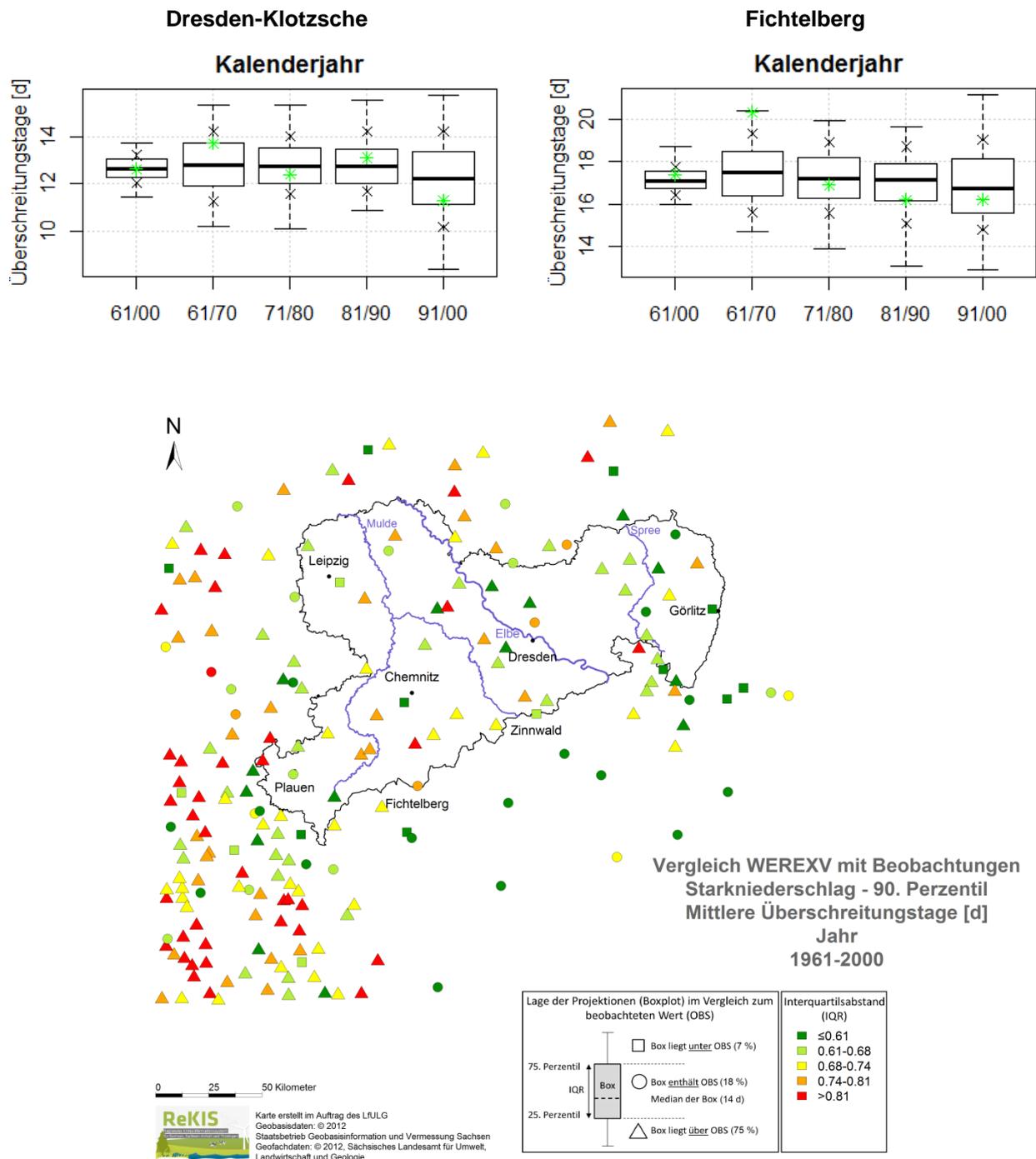
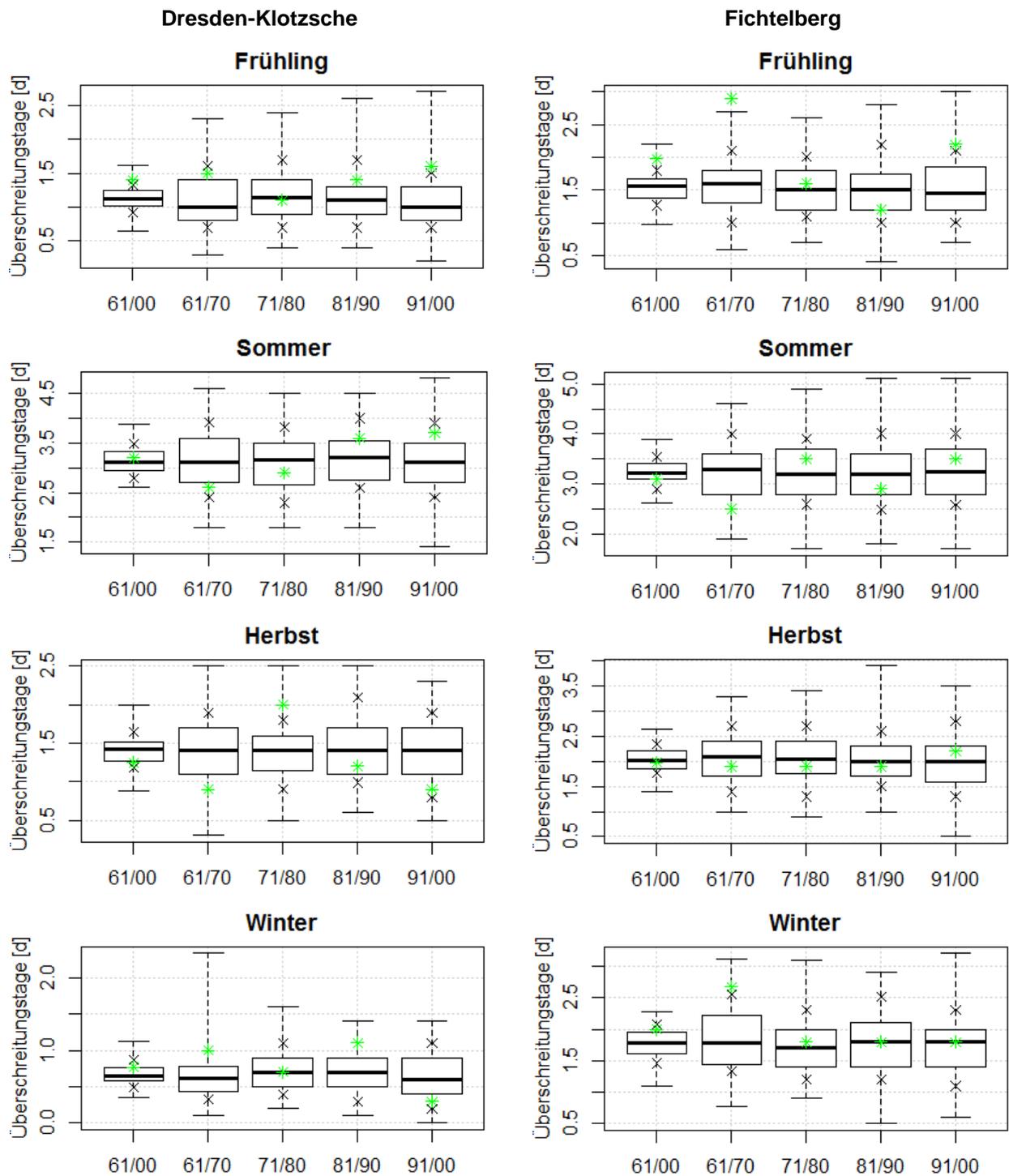


Abbildung 73: Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden



**Abbildung 74: Starkniederschlag R90p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)**



**Abbildung 75: Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden**

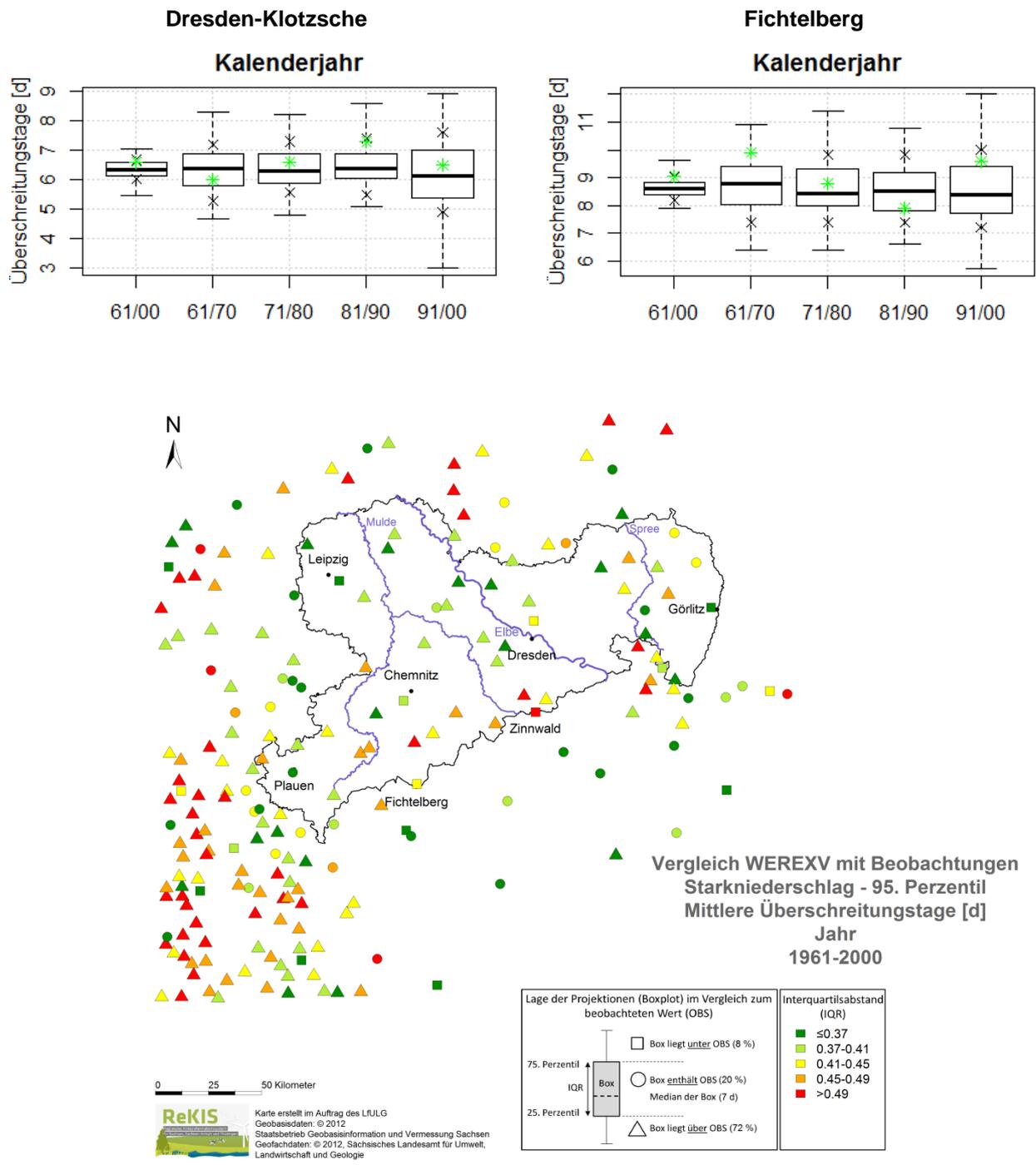
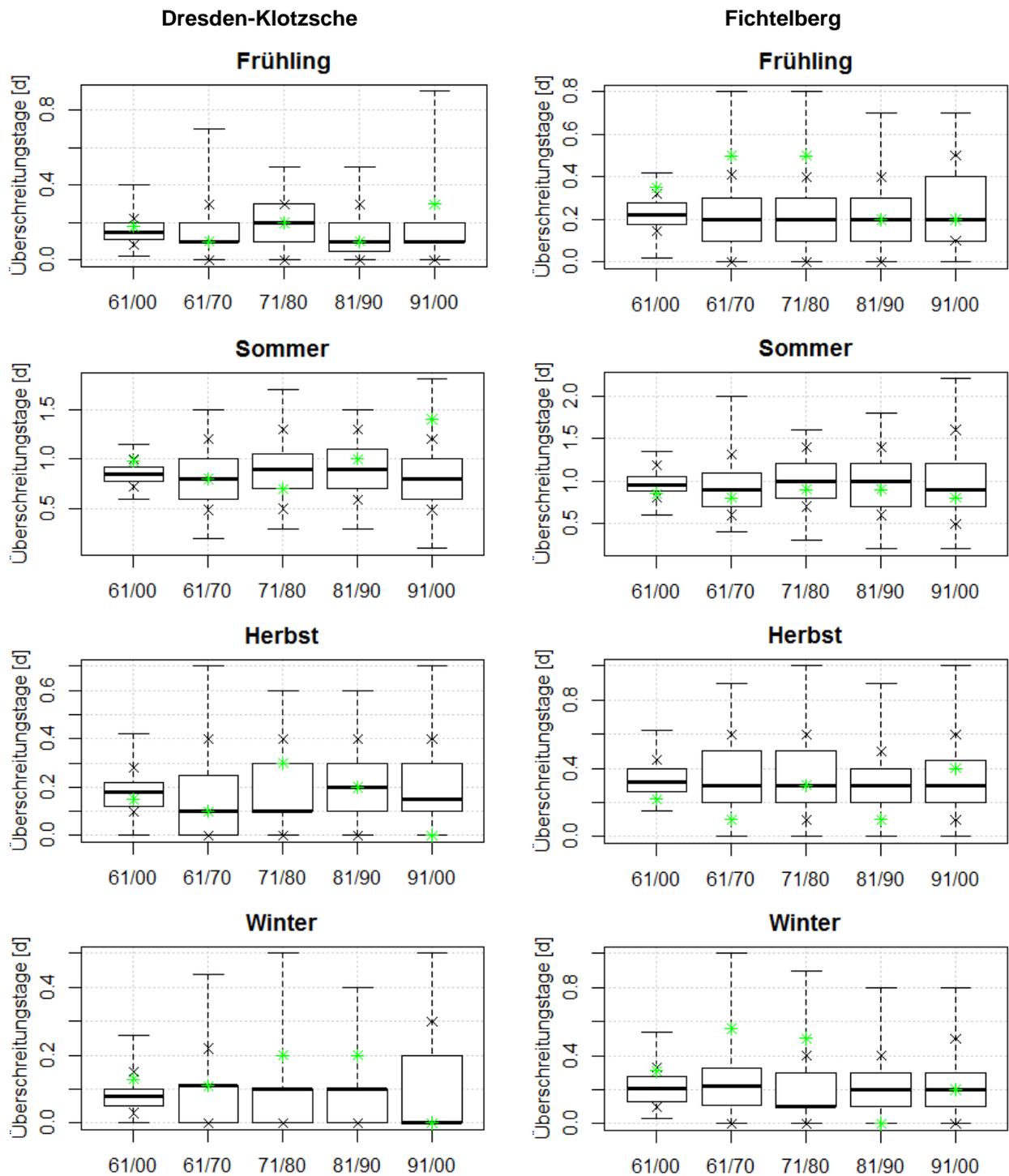
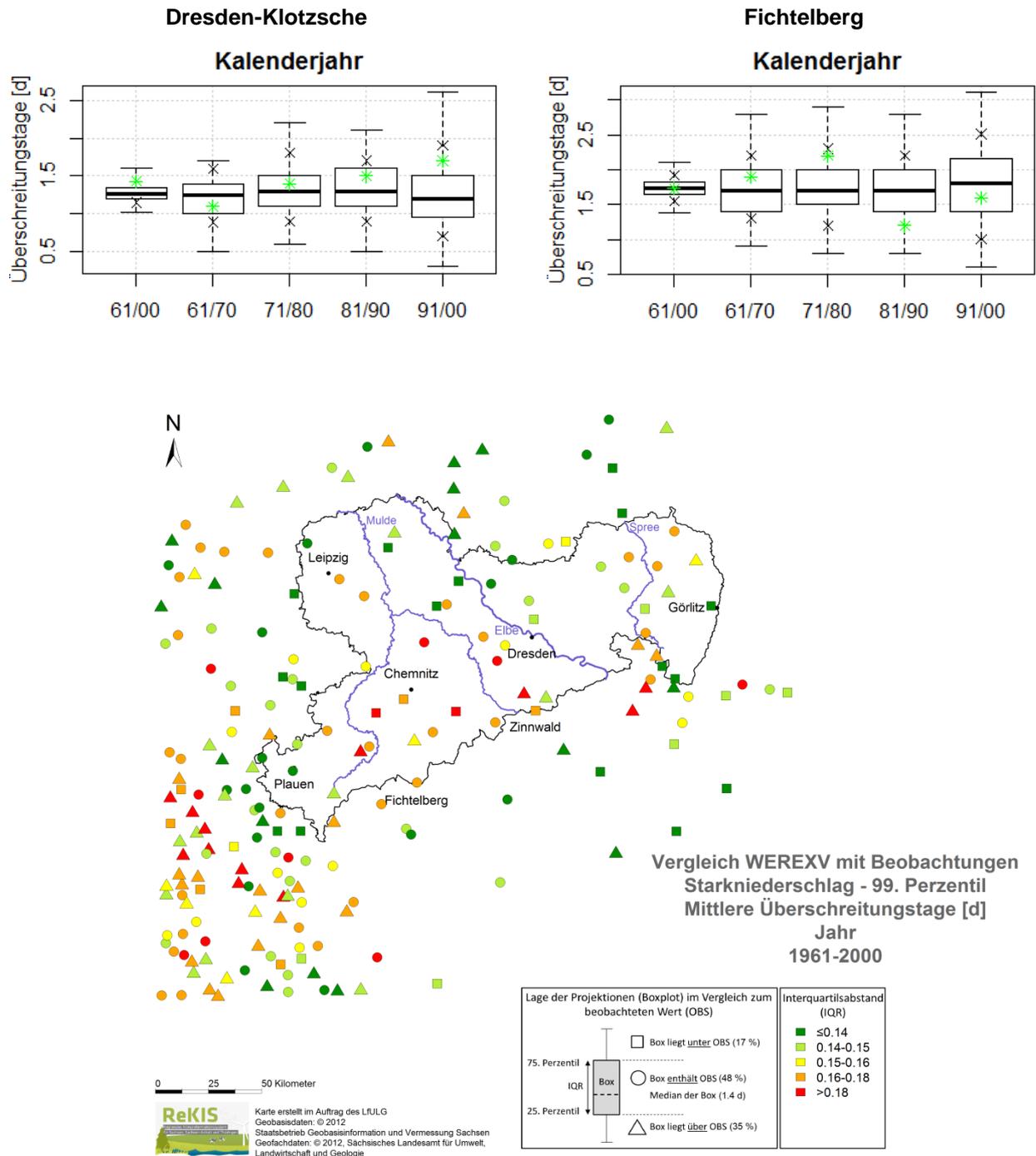


Abbildung 76: Starkniederschlag R95p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)



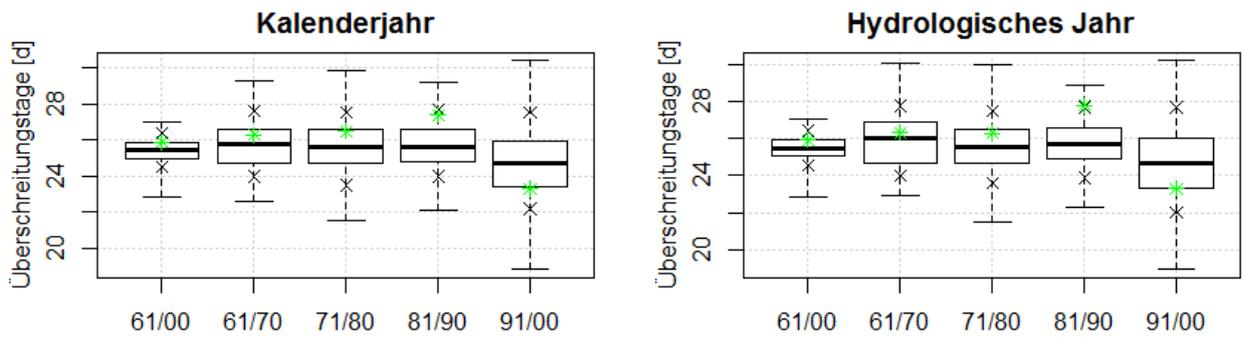
**Abbildung 77: Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage der Stationen Dresden und Fichtelberg für die Jahreszeiten der Periode 1961–2000 und die Dekaden**



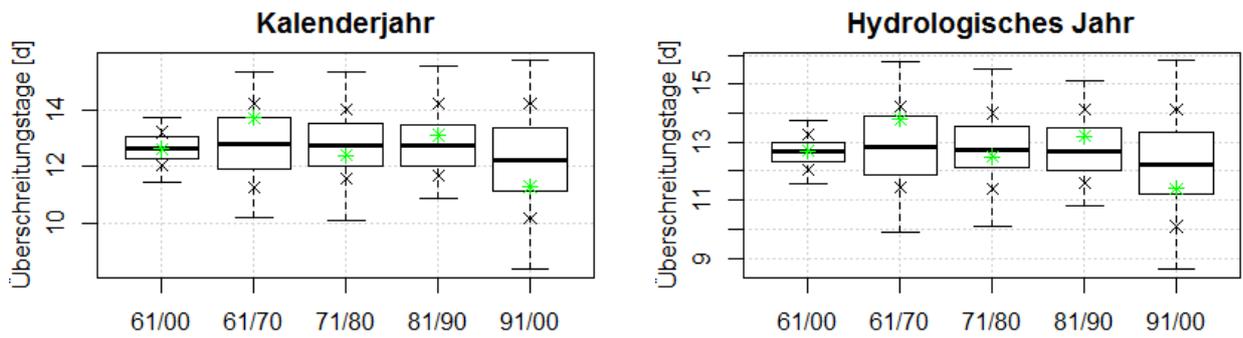
**Abbildung 78: Starkniederschlag R99p – Überschreitungstage für das Kalenderjahr: für Dresden und Fichtelberg Box-Whisker-Plot (oben) sowie Darstellung für das Gesamtgebiet (unten)**

Dresden-Klotzsche

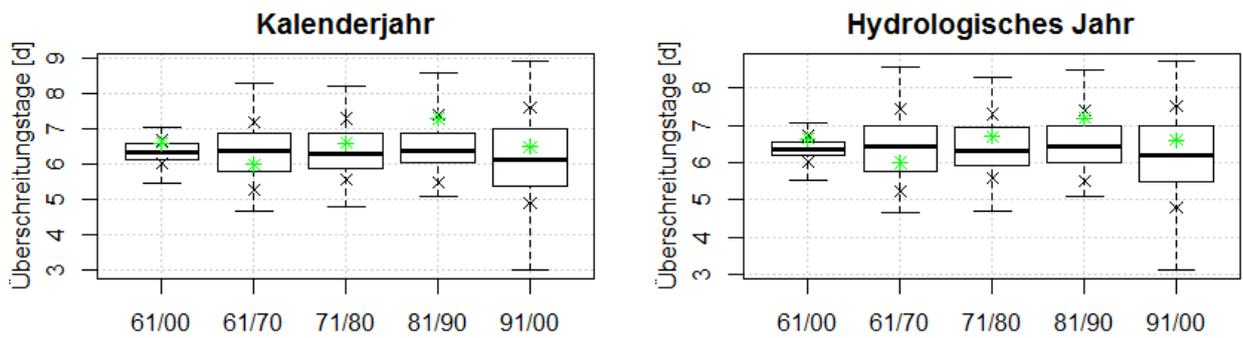
R80p



R90p



R95p



R99p

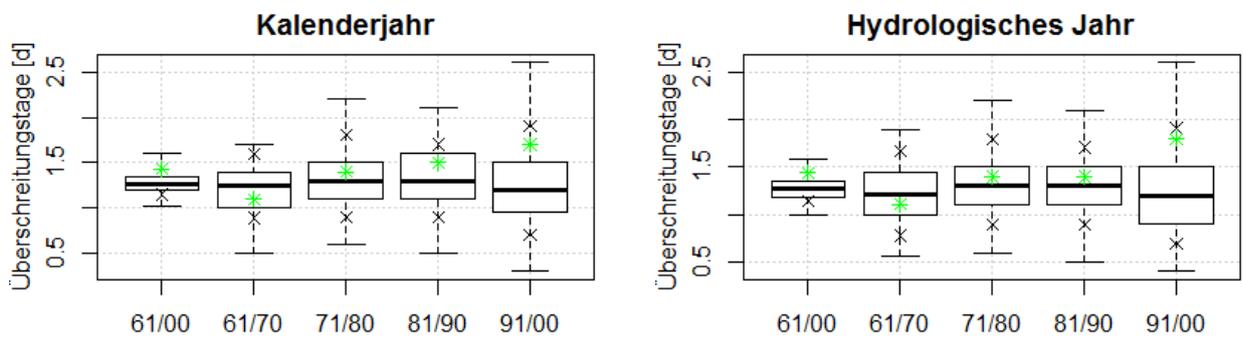
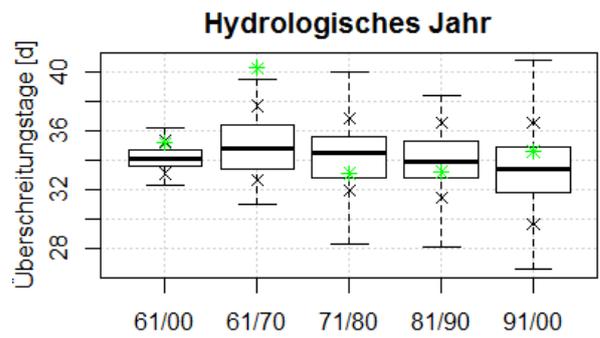
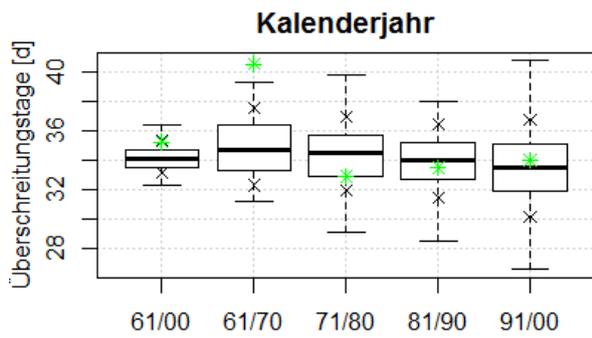


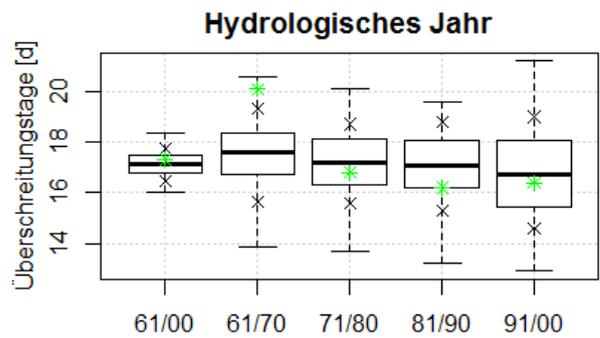
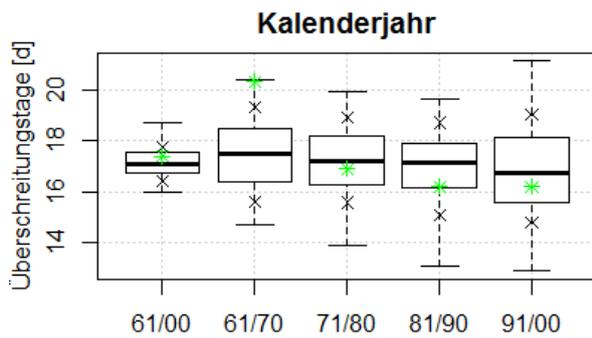
Abbildung 79: Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Dresden (1961–2000 und Dekaden)

Fichtelberg

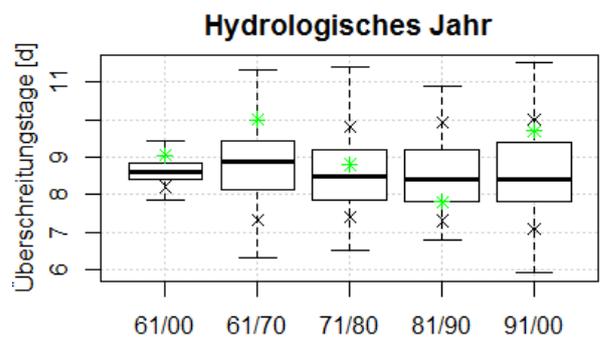
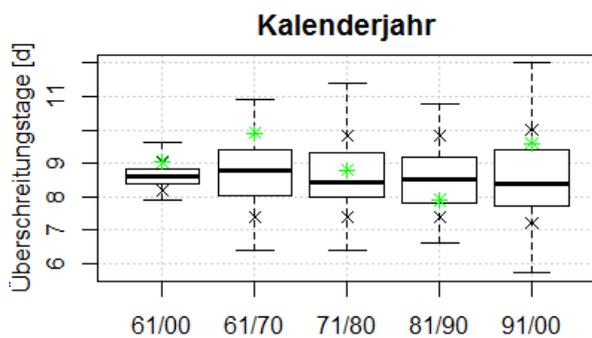
R80p



R90p



R95p



R99p

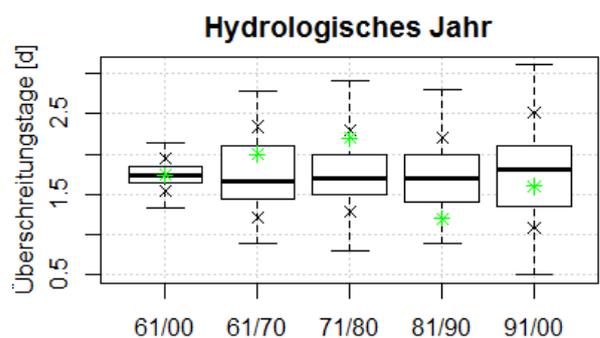
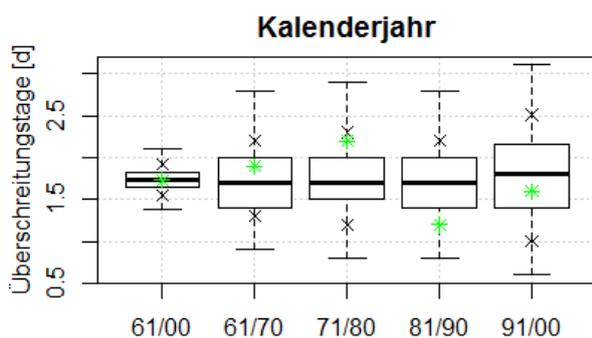
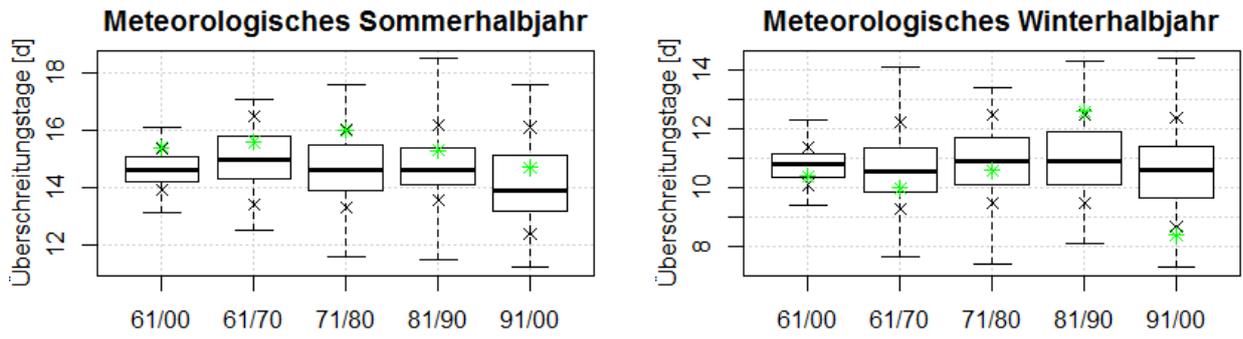


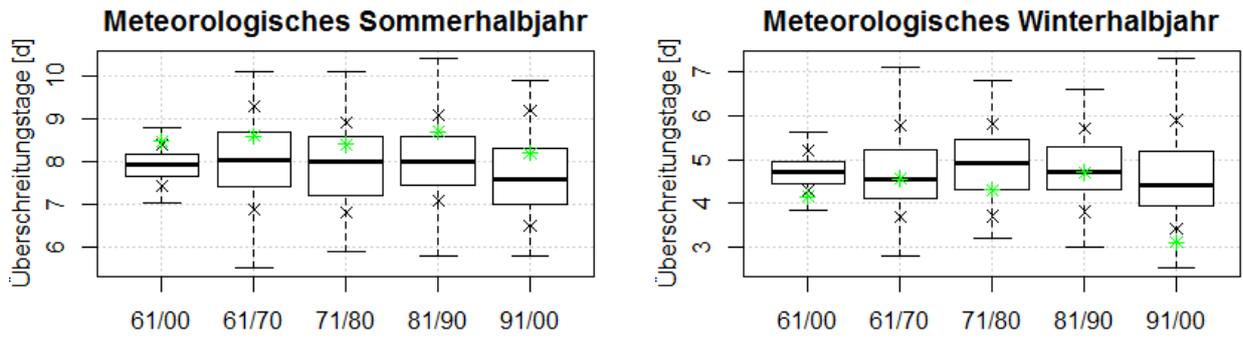
Abbildung 80: Vergleich Kalenderjahr und Hydrologisches Jahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plot für Fichtelberg (1961–2000 und Dekaden)

Dresden-Klotzsche

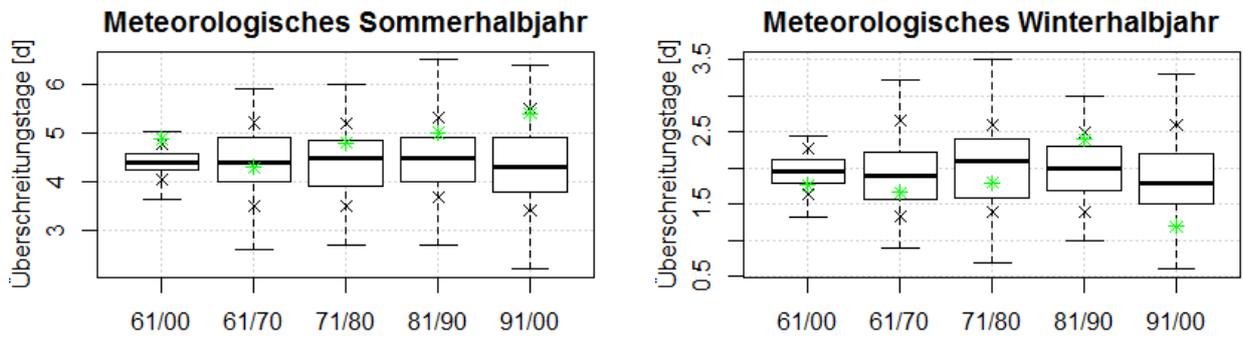
R80p



R90p



R95p



R99p

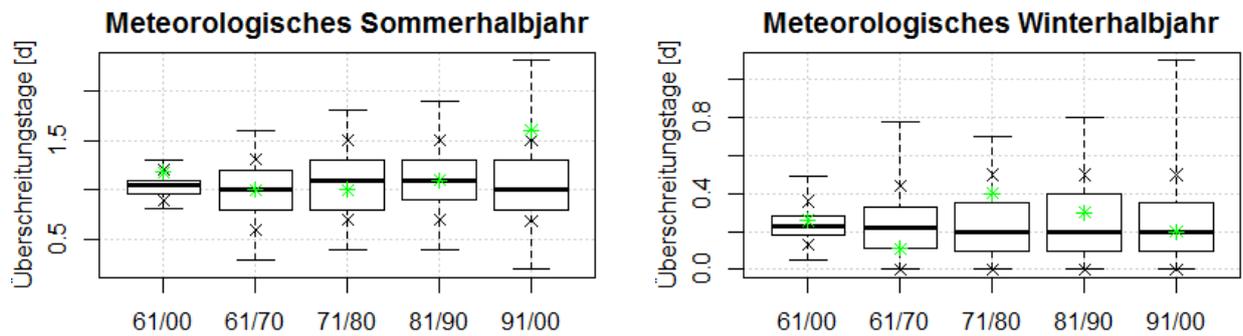
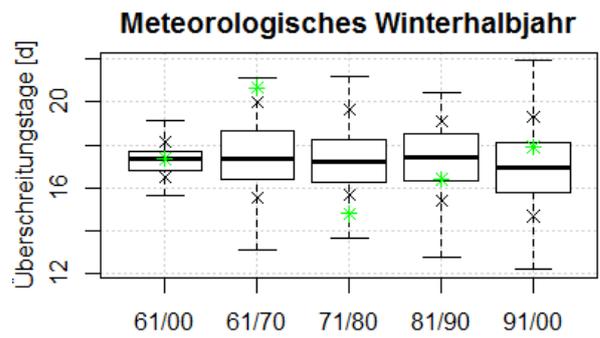
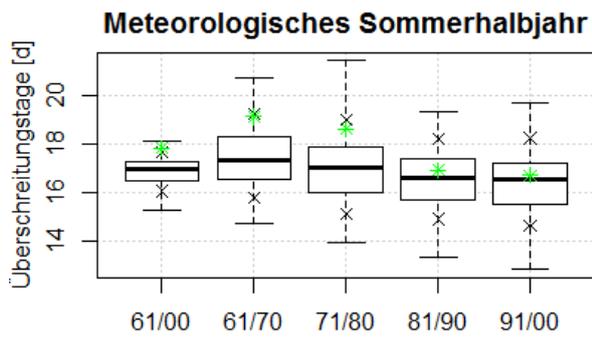


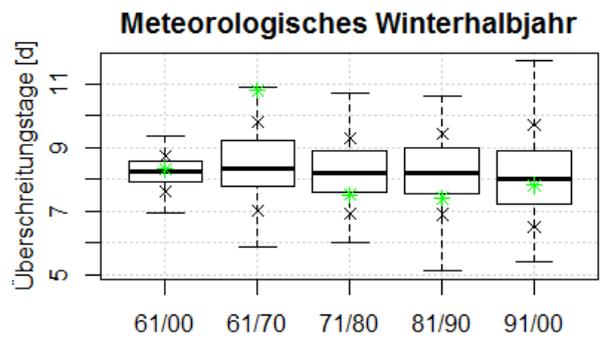
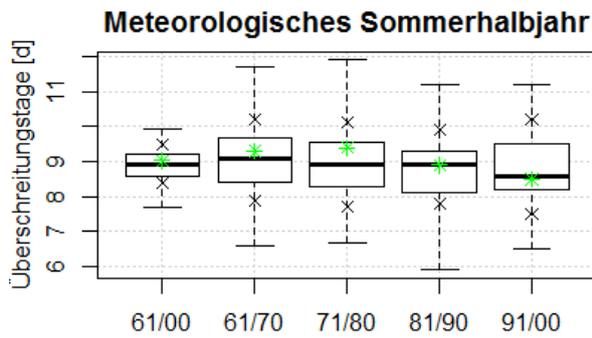
Abbildung 81: Meteorologisches Halbjahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p – Überschreitungstage: Box-Whisker-Plots für die Station Dresden (1961–2000 und Dekaden)

Fichtelberg

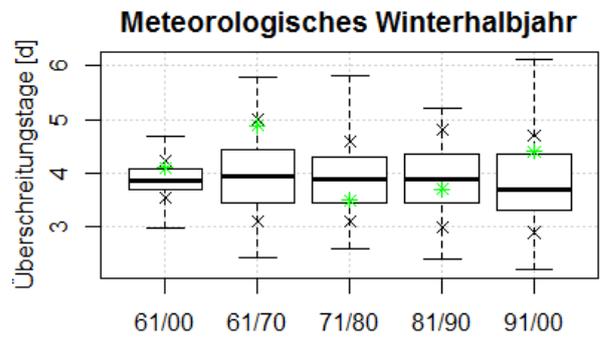
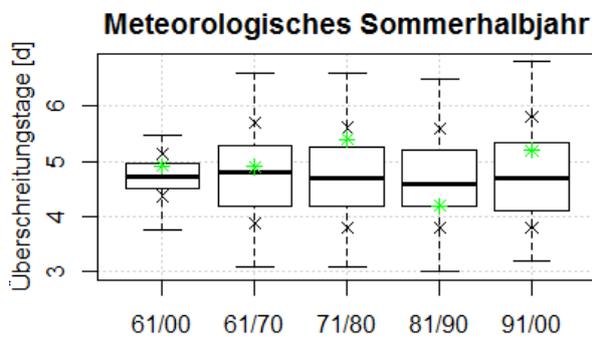
R80p



R90p



R95p



R99p

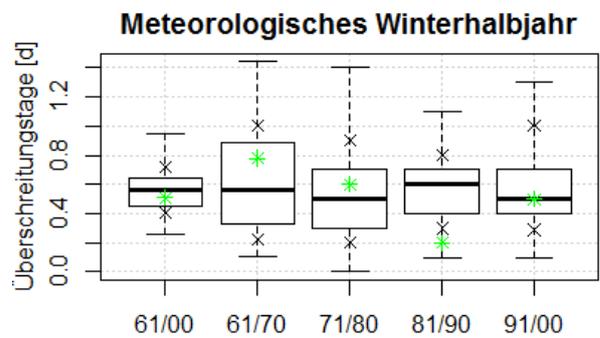
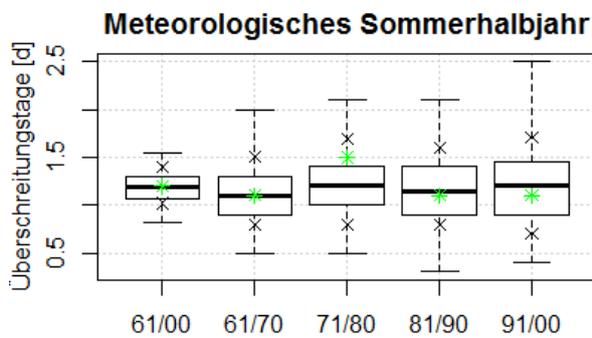
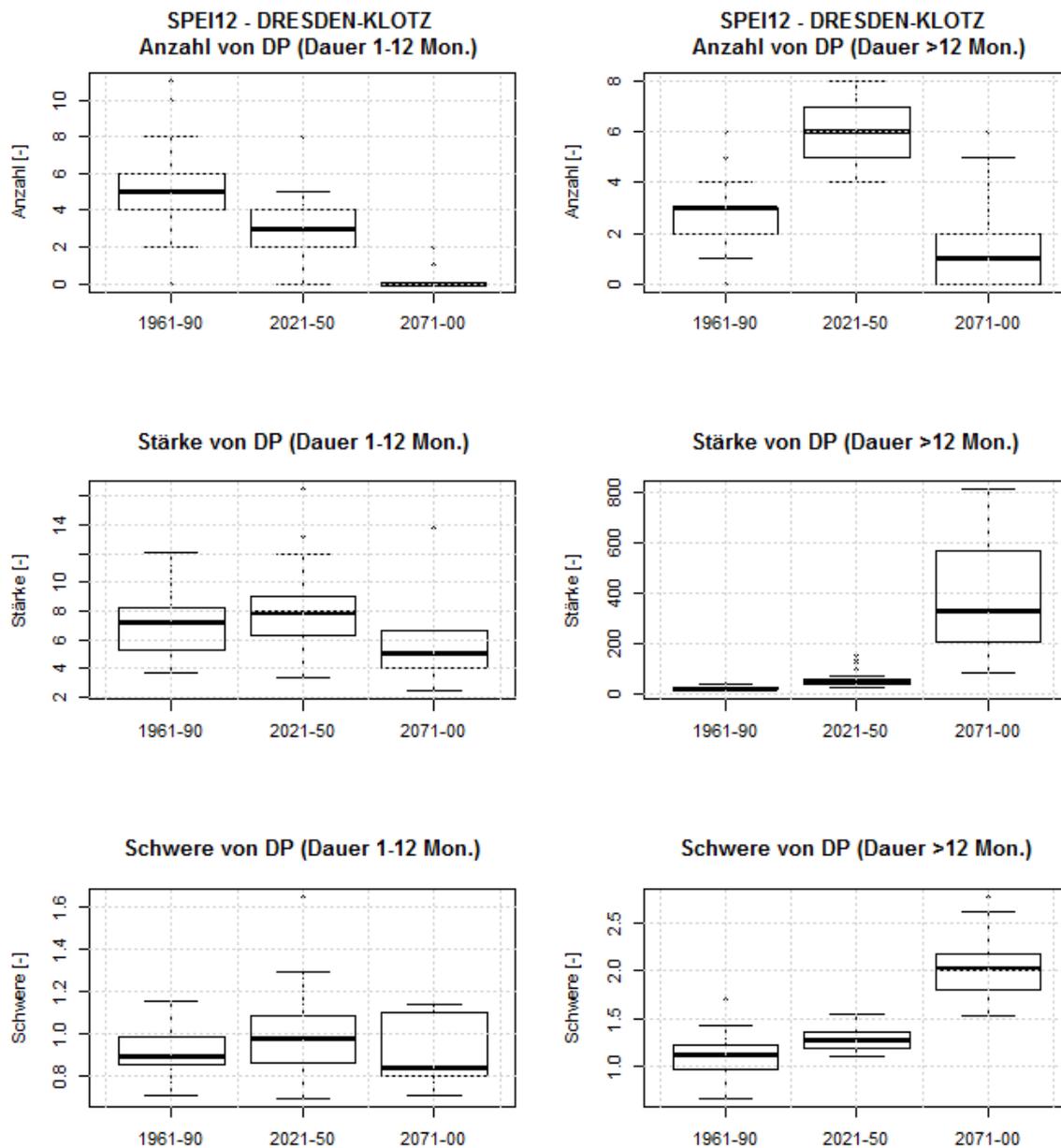
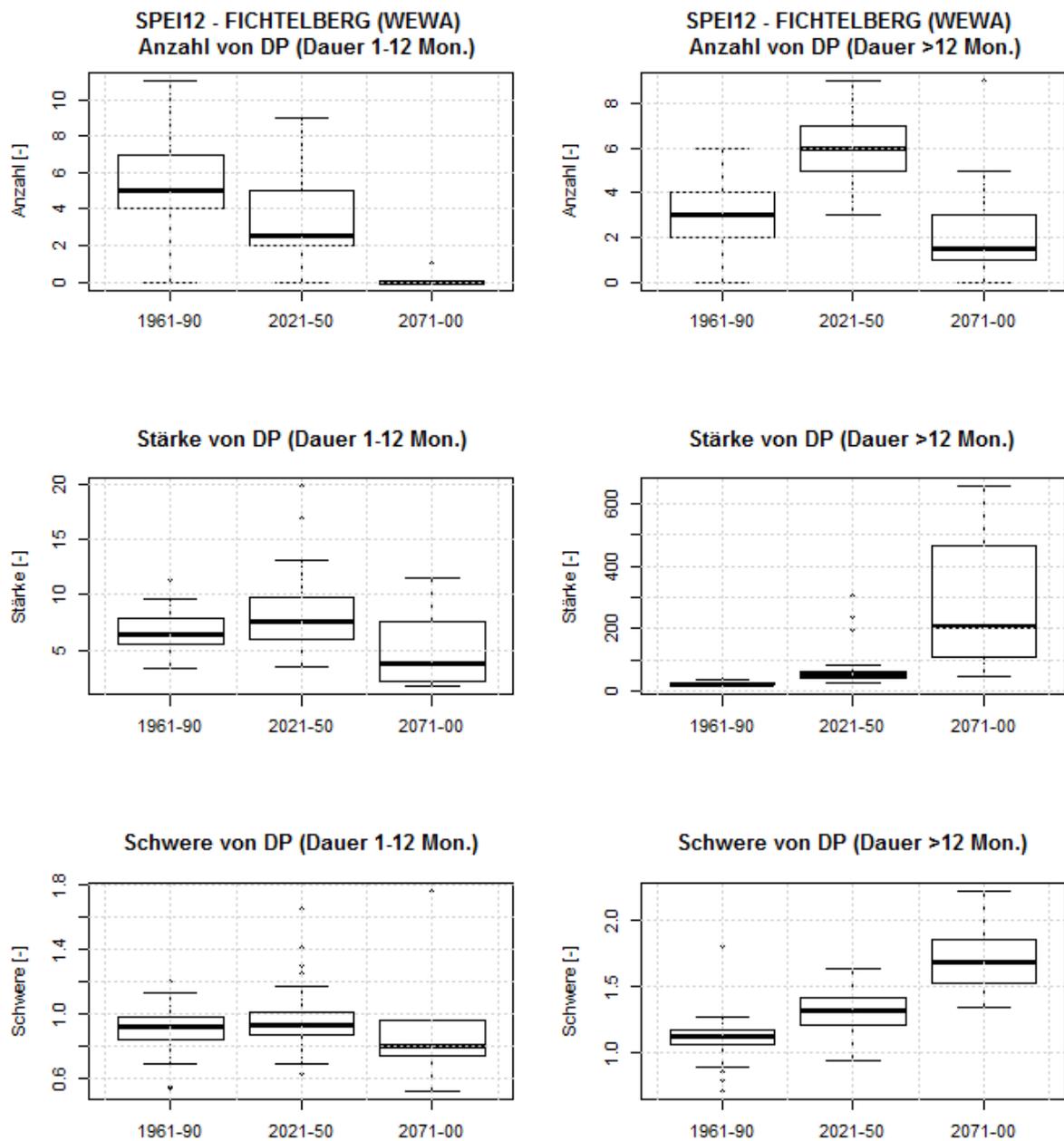


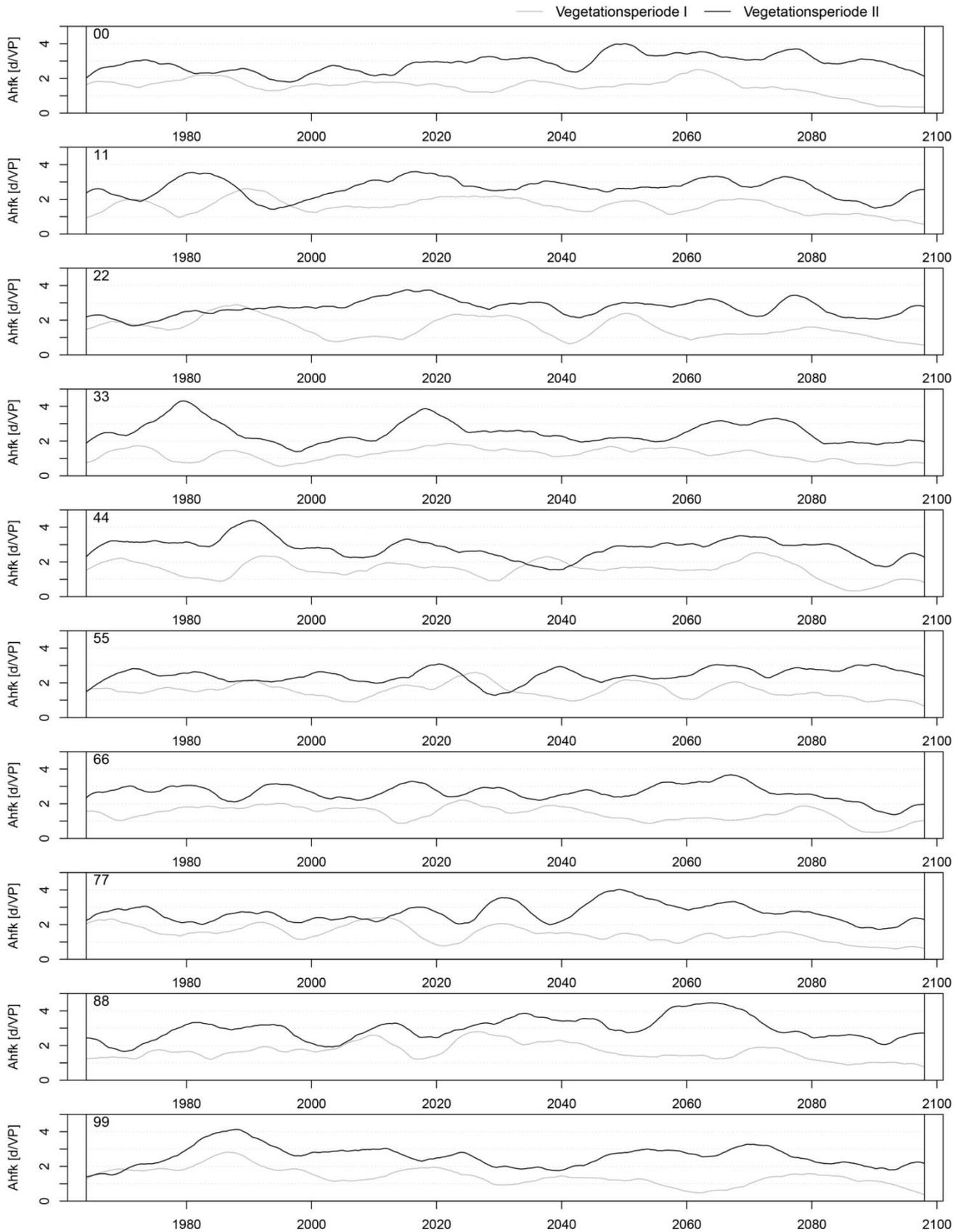
Abbildung 82: Meteorologisches Halbjahr für Starkniederschlag R80p, R90p, R95p und R99p - Überschreitungstage: Box-Whisker-Plots für die Station Fichtelberg (1961 – 2000 und Dekaden).



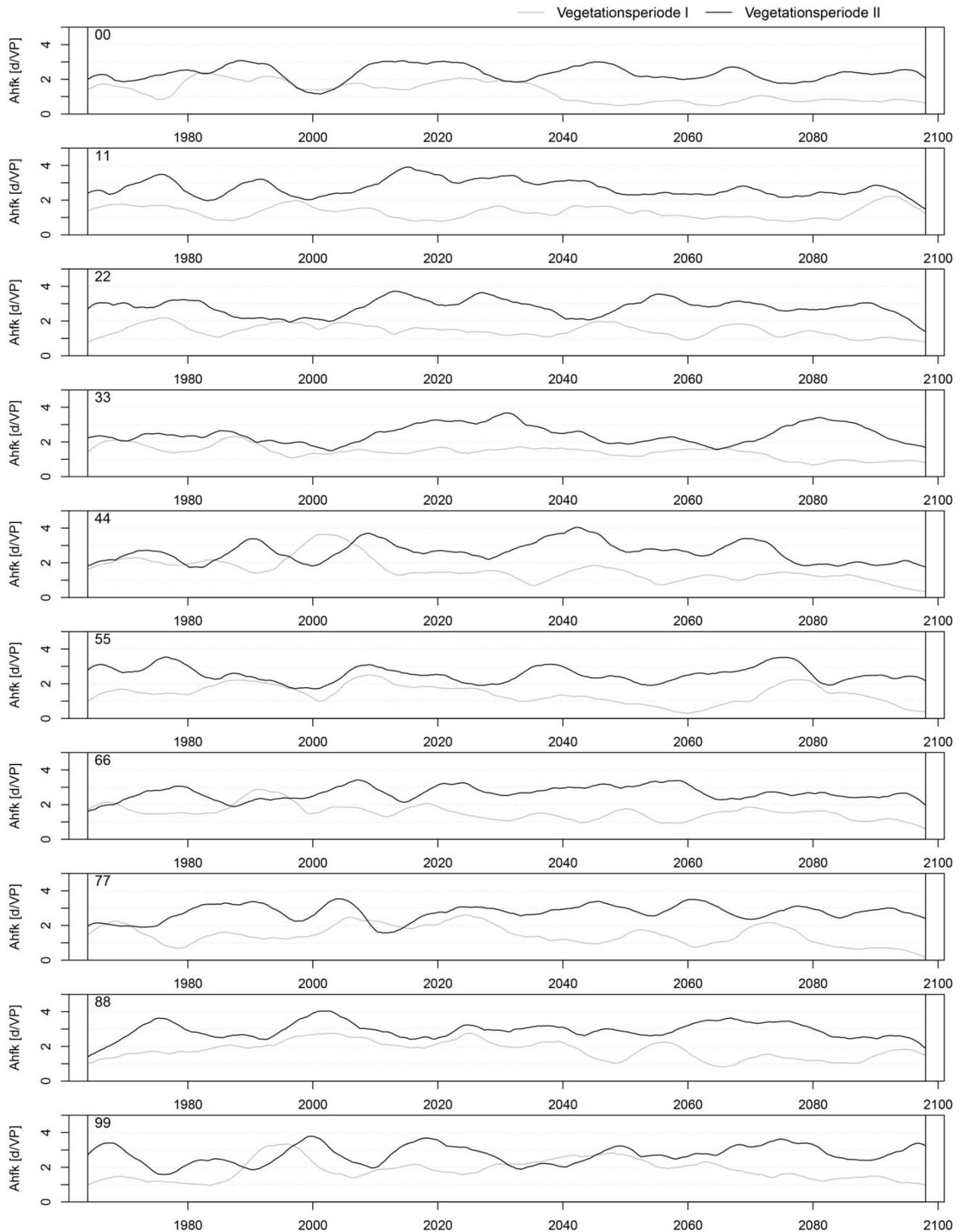
**Abbildung 83: Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPI12 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 12 bzw. mehr als 12 Monate für die Station Dresden-Klotzsche. Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961–1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft.**



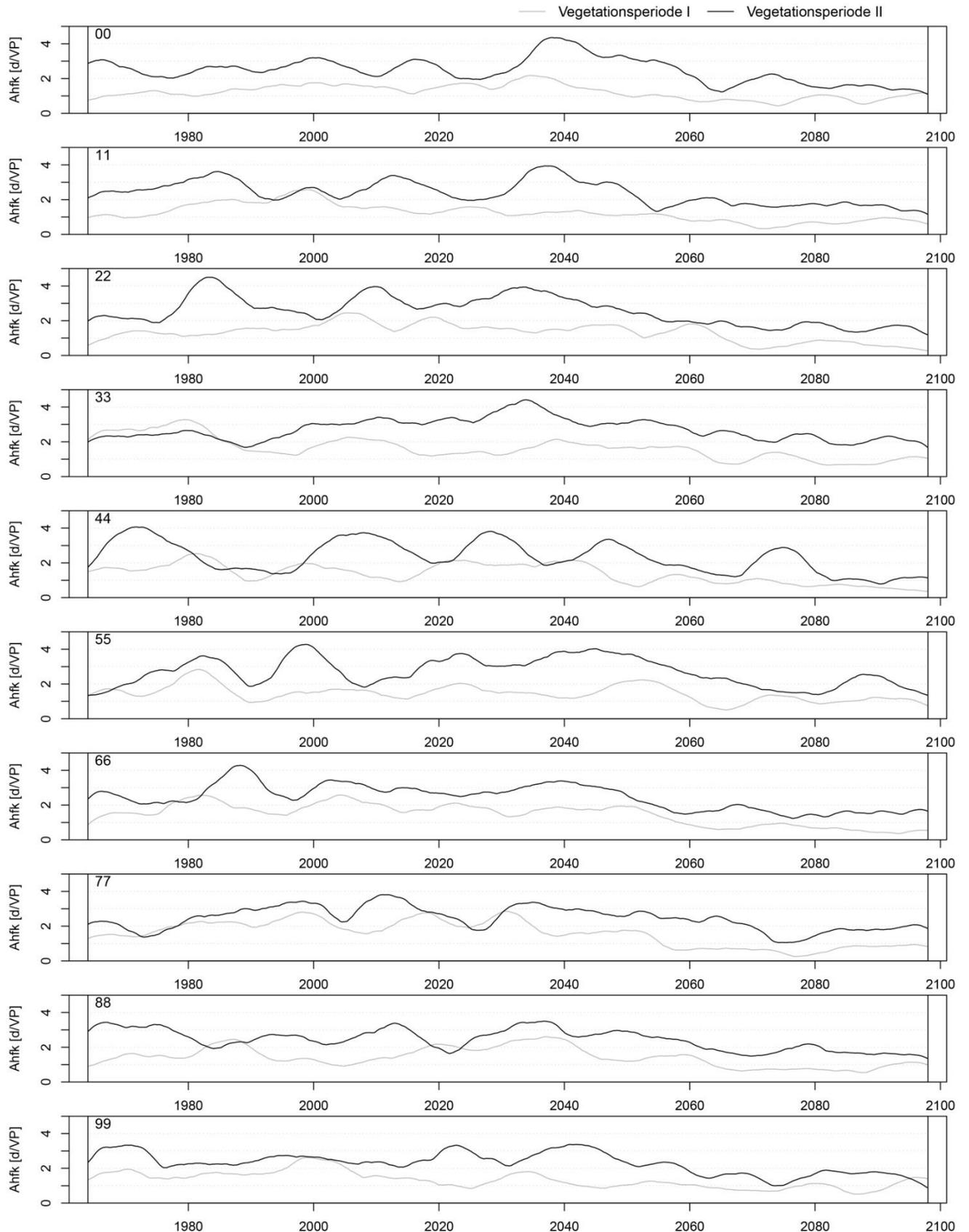
**Abbildung 84:** Boxplot der jährlichen Anzahl (oben), der Stärke (mitte) und der Schwere (unten) von Dürreperioden des SPI12 für Dürreperiodenandauern von 1 bis 12 bzw. mehr als 12 Monate für die Station Fichtelberg (WEWA). Dargestellt werden Ergebnisse für die C20-Referenzperiode 1961–1990 sowie für die nahe und die ferne Zukunft.



**Abbildung 85: Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961–2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-RACMO-L3-A1B, VP I+II, 1961–2100**



**Abbildung 86: Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961–2013) und für alle Realisierungen des Laufs EH5-REMO-L3-A1B, VP I+II, 1961–2100**



**Abbildung 87: Kernschätzung der Auftrittshäufigkeit [d/VP] von Starkregen R95p für Dresden-Klotzsche für die observierte Zeitreihe (1961–2013) und für alle Realisierungen des Laufs HCG2-L1-A1B, VP I+II, 1961–2100**

# Informationen und Fragebogen

## zum Projekt „Analyse und Bewertung des WEREX V-Ensembles hinsichtlich der Abbildung von Extremen in Sachsen“

Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Referat Klima und Luftqualität  
Ansprechpartner: Dr. Johannes Franke (johannes.franke@smul.sachsen.de)

Auftragnehmer: Technische Universität Dresden, Professur für Meteorologie  
Ansprechpartner: Thomas Pluntke (thomas.pluntke@tu-dresden.de; 0351 463-31343),  
Prof. Christian Bernhofer

Laufzeit: November 2014 bis November 2015

### Anliegen dieses Schreibens:

Wir möchten Sie über das laufende Projekt informieren und Ihre Erfahrungen im Umgang mit Projektionsdaten der statistischen Downscaling-Modelle WETTREG und WEREX V für unsere weitere Arbeit nutzen. Insbesondere sind wir an der Abbildung von Temperatur- und Niederschlagsextremen und der Element übergreifenden Konsistenz der Klimadaten und deren Auswirkungen in Impaktmodellen interessiert. Am 5. März 2014 möchten wir einen Workshop in Dresden durchführen, um uns mit Ihnen diesbezüglich auszutauschen. Einführend geben wir Ihnen eine kurze Einführung ins Projekt. Im 2. Teil würden wir in Form eines Fragebogens gern schon erste Informationen von Ihrer fachlichen Expertise oder Fragen von Ihnen bekommen.

## Informationen

### **Ziele des Projektes**

Aktuelle Studien in Sachsen belegen eine zunehmende Trockenheit in Sachsen in der vegetationsaktiven Phase bei einer gleichzeitigen Veränderung von Starkniederschlägen. Insbesondere in der Vegetationsperiode II haben sich Starkniederschläge in den letzten Jahrzehnten gehäuft. Da auch aktuelle Klimaprojektionen Hinweise auf einen ähnlichen Trend in der Zukunft liefern, ist eine Anpassung an diese Verhältnisse in vielen Bereichen der Gesellschaft nötig. Auswirkungen von Klimaveränderungen werden oft modelliert. Um Impaktmodellierern eine Datengrundlage liefern zu können, die Temperatur- und Niederschlagsextreme realistisch abbildet, wird die diesbezügliche Leistungsfähigkeit des WEREX V-Datensatzes in diesem Projekt analysiert (Phase I) und Vorschläge für eine Auswahl und Korrektur von Projektionsdatensätzen gegeben (Phase II).

### **Methoden**

Die Analyse erfolgt in Phase I anhand von Extremindizes. Hierzu zählen Indizes mit festen Schwellenwerten und mit Schwellenwerten, die mittels des Perzentilansatzes ermittelt werden. Die Auswahl der Indizes soll sich nach den Bedürfnissen der Anwender/Impaktmodellierer richten. Deshalb ist die folgende Auswahl nur als Ausgangspunkt zu betrachten:

- Niederschlag: 80./ 90./ 95. und 99. Perzentil, Tage mit mehr als 10 bzw. 20 mm Niederschlag
- T-max: 10. und 90. Perzentil, Eistage, Sommertage, Hitzetage
- T-min: 10. und 90. Perzentil, Frosttage, Tropennächte
- T-mitt: 10. und 90. Perzentil, Wärme- und Kältesumme

Die Analyse erfolgt zum einen durch einen Vergleich mit den beobachteten Werten in Form eines Boxplots. Zum anderen erfolgt eine Analyse der zeitlichen Abfolge der Überschreitungshäufigkeiten (nach der Methode der Kernschätzung) von Perzentil basierten Schwellenwerten, des DWD-Trockenindex, der Potenziellen Verdunstung, der Klimatischen Wasserbilanz sowie Standard Precipitation Index (SPI) bzw. Standard Evaporation Precipitation Index (SPEI).

Es wird der Zeitraum 1961–2000 für die Bezugszeiträume Jahre, Halbjahre, Jahreszeiten, VP I und VP II analysiert.

In Phase II des Projektes erfolgt im Falle einer zufriedenstellenden qualitativen und quantitativen Abbildung von Extremwerten eine profunde Analyse des Extremverhaltens im 21. Jahrhundert auf Basis des bewerteten WEREX V-Datensatzes bzw. auf Basis einer geeigneten Untermenge des WEREX V-Datensatzes.

Im Falle einer systematisch abweichenden Abbildung von Extremwerten der Klimasimulationen müssen Korrekturverfahren angewandt bzw. entwickelt werden, sodass die Projektionen für eine Impakt-Modellierung verwendet werden können. Eine Analyse der Literatur zur „Bias-Korrektur“ deutet auf zahlreiche Probleme hin, sodass einige Autoren zum Verzicht auf eine Korrektur raten. Das gravierendste Problem ist der Verlust der Konsistenz zwischen den Klimaelementen, wie sie natürlicherweise auftritt und im Allgemeinen von den Globalen und Regionalen Klimamodellen wiedergegeben wird.

#### Daten

Die Analyse bezieht sich auf Tageswerte der Periode 1961–2000. Beobachtete Zeitreihen von Klima- und Niederschlagsstationen stammen vom deutschen und tschechischen Wetterdienst.

Das WEREX V-Ensemble wurde durch die Firma CEC Potsdam erstellt (KREIENKAMP et al. 2011) und besteht aus 12 Klimaprojektionen. Die empirisch-statistische Downscaling Methode WEREX V wird entweder direkt auf der Grundlage von verschiedenen Globalmodellen (GCM) oder auf der Grundlage von zusätzlich mittels dynamischem Downscaling generierten Klimaprojektionen angewendet. Es werden Projektionen für die Emissionsszenarios A1B und E1 (Basisszenario für das 2 °C-Ziel) sowie verschiedene Modellläufe (L1–L3) verwendet. Zu jedem Modelllauf existieren 10 Realisierungen (Summe: 120).

| Nr. | Globalmodell | Regionalmodell | Szenario | Lauf | Bezeichnung      |
|-----|--------------|----------------|----------|------|------------------|
| 1   | ECHAM5       | –              | A1B      | 1    | EH5_L1_A1B       |
| 2   | ECHAM5       | CCLM           | A1B      | 1    | EH5-L1_A1B_CLM   |
| 3   | ECHAM5C      | –              | E1       | 1    | EH5_L1_E1        |
| 4   | ECHAM5       | –              | A1B      | 2    | EH5_L2_A1B       |
| 5   | ECHAM5       | CCLM           | A1B      | 2    | EH5_L2_CLM       |
| 6   | ECHAM5       | –              | A1B      | 3    | EH5_L3_A1B       |
| 7   | ECHAM5       | RACMO          | A1B      | 3    | EH5_L3_A1B_RACMO |
| 8   | ECHAM5       | REMO           | A1B      | 3    | EH5_L3_A1B_REMO  |
| 9   | HadCM3C      | –              | A1B      | 1    | HC3C_L1_A1B      |
| 10  | HadCM3C      | –              | E1       | 1    | HC3C_L1_E1       |
| 11  | HadGEM2      | –              | A1B      | 1    | HCG2_L1_A1B      |
| 12  | HadGEM2      | –              | E1       | 1    | HCG2_L1_E1       |

## Fragebogen

Es ist nicht notwendig, alle Fragen zu beantworten, wenn diese bisher nicht relevant bei Ihrer Arbeit waren bzw. sein werden.

|  |
|--|
| Allgemein: Welche Auswirkungen von Klimaänderungen haben Sie in Ihrer bisherigen Arbeit betrachtet? Bitte geben Sie Projektpreferenzen an, wenn möglich.   |
| ....   |
| Daten: Mit welchen Projektionsdaten haben Sie konkret gearbeitet?  |
| ...  |
| Daten: Welche Erfahrungen haben Sie mit der Konsistenz* von klimatischen Datensätzen gemacht? Werden die Klimadaten vor der eigentlichen Modellierung regionalisiert? Wenn ja, mit welchen Methoden? |
| ...  |
| Daten: Welche Erfahrungen haben Sie mit der Abbildung von klimatischen Extremen bei der Nutzung von simulierten Klimadaten gemacht?  |
| ...  |
| Methoden: Mit welchen Indices haben Sie Erfahrung gesammelt?<br>Welche Indices sind relevant für Ihre Arbeit? Wenn möglich, geben Sie bitte konkrete Definitionen an.                                |
| ...  |
| Workshop: Möchten Sie Ihre Erfahrungen mit einer kurzen Präsentation auf dem Workshop darstellen? Wenn ja, zu welchem Thema/Projekt?   |
| ...  |
| Sonstiges:   |
| ...  |

\* Beobachtete Klimaelemente sind konsistent, d. h. sie stehen physikalisch in direktem Zusammenhang. Zum Beispiel kann es an einem wolkenlosen Tag keinen Niederschlag geben. Klimadaten aus dynamischen Klimamodellen verfügen ebenfalls über eine elementübergreifende Konsistenz. Ob die Konsistenz bei einem statistischen Downscaling (z. B. WEREX V) von GCM-Daten oder bei der Regionalisierung von Klimaelementen noch gegeben ist, soll überprüft werden.

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de  
www.smul.sachsen.de/lfulg

**Autoren:**

Prof. Dr. Christian Bernhofer, Thomas Pluntke, Andrea Schaller  
Technische Universität Dresden  
Institut für Hydrologie und Meteorologie  
Professur für Meteorologie  
Pienner Str. 23, 01737 Tharandt  
Telefon: + 49 351 463-31343 oder -31340  
Telefax: +49 351 463-31302  
E-Mail: meteorologie@tu-dresden.de

**Redaktion:**

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

**Redaktionsschluss:**

07.03.2016

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

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

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl 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. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.