



KliWES 3.0 – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 1/2026



KliWES 3.0 – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen: Erweiterung des Modellraums und der Datengrundlagen sowie Entwicklung von Methoden für eine effiziente Datenverarbeitung

Endbericht

Corina Hauffe, Clara Brandes, Robert Mietrach, Sofie Pahner, Dr. Thomas Wöhling, Patric Röhm,
Chris Burschyk, Dr. Rico Kronenberg, Dr. Ivan Vorobevskii, Prof. Dr. Niels Schütze

TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	10
Abbildungsverzeichnis im Anhang	11
Tabellenverzeichnis im Anhang	14
Abkürzungsverzeichnis	15
1 Einleitung und Zielstellung	17
2 Aufbereitung von Datengrundlagen	19
2.1 Bearbeitungsraum	19
2.2 Geodaten.....	19
2.3 Meteorologische Daten.....	20
2.3.1 Datensätze für den Beobachtungszeitraum 1961 - 2020	20
2.3.1.1 Klimareferenzdatensatz 2.0	20
2.3.1.2 ERA5-Land-Datensatz.....	22
2.3.2 Verwendung der Beobachtungsdatensätze in der Wasserhaushaltsmodellierung	24
2.3.3 Datensätze für den Projektionszeitraum bis 2100	24
2.3.4 Bias-Korrektur für Klimaprojektionen	28
2.4 Hydrologische Daten	29
2.4.1 Durchflussmessreihen	29
2.4.2 Bewirtschaftungsdaten	30
2.5 Differenzenganglinienanalyse DIFGA.....	32
2.6 Ausweisung der Modellregionen.....	33
3 Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO	35
3.1 Informationen zum Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO und verwendeten Ansätzen.....	35
3.2 Änderungen am Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO in KliWES 3.0	36
3.2.1 Weiterentwicklung und Anpassungen von ArcEGMO zur Qualitätssicherung basierend auf Modelltests.....	37
3.2.2 Weiterentwicklung und Anpassungen von ArcEGMO durch den Modellentwickler	40
3.3 Hydrotopbildung und Modellaufbau für ArcEGMO	40
3.4 Validierung des unkalibrierten Modells	41
3.5 Modellkalibrierung für ArcEGMO.....	46
3.6 Validierung des kalibrierten Modells	50
3.7 Ausweisung von Qualitätsstufen für Modellregionen	56
3.8 Verfahren zur Parameterübertragung für unkalibrierte Modellregionen	58
3.9 Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO	60

3.9.1	Gegenüberstellung der Wasserhaushaltsergebnisse für Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen im Reanalysezeitraum	60
3.9.2	Auswertung der WHH-Ergebnisse für die Klimaprojektionen über den gesamten Bearbeitungsraum	67
3.10	Einschränkungen und Defizite der Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO	71
3.11	Zusammenfassung maßgeblicher Änderungen zwischen den KliWES-Projekten.....	74
4	Wasserhaushaltsberechnungen mit Raven	77
4.1	Auswahl der Testregion	77
4.2	Modellaufbau für Raven	78
4.3	Validierung des unkalibrierten Modells	80
4.4	Modellkalibrierung für Raven.....	84
4.5	Validierung des kalibrierten Modells	85
4.5.1	Validierung der Kalibrierparameter	85
4.5.2	Validierung des Kalibrierzeitraums 2000-2015.....	86
4.5.3	Validierung der Zeiträume 1995-1999 und 2016-2020	88
4.6	Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen mit Raven.....	91
4.6.1	Auswertung der Wasserhaushaltsberechnungen für den Beobachtungszeitraum	91
4.6.2	Auswertung der Wasserhaushaltsberechnungen für die Klimaprojektionen.....	92
4.7	Fazit	94
5	Wasserhaushaltsberechnungen mit BROOK90	95
5.1	Das Wasserhaushaltsmodell BROOK90	95
5.2	Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen mit BROOK90.....	96
5.2.1	Exemplarische räumliche Ergebnisse	97
5.2.2	Exemplarische Punktergebnisse.....	98
5.2.3	Validierung der Verdunstungskomponente mit FLUXNET-Türmen	99
5.2.4	Räumliche Veränderungen der jährlichen Summen der Wasserhaushaltskomponenten in der historischen und zukünftigen Periode	102
6	Vergleichende Betrachtung des Modell-Ensembles	109
7	Zusammenfassung	113
	Literaturverzeichnis.....	115
	Online-Quellen	120

Anhang	121
A 1 Anhang ArcEGMO	121
A 1.1 Vergleich der Bearbeitungsräume von KliWES 1.0, 2.0 und 3.0	121
A 1.2 Aufbereitung der geografischen und topologischen Datengrundlagen	121
A 1.2.1 Teileinzugsgebiete	121
A 1.2.2 Fließgewässer	123
A 1.2.3 Pegel (geografische Lage)	124
A 1.2.4 Boden	124
A 1.2.5 Grundwasserflurabstände	126
A 1.2.6 Geologie	127
A 1.2.7 Digitales Geländemodell	127
A 1.2.8 Landnutzung	128
A 1.2.9 Anschlussgrad und Kanalisationsart	128
A 1.3 Aufbereitung der meteorologischen und hydrologischen Datengrundlagen	130
A 1.3.1 ReKIS-Nebeldatensatz	130
A 1.3.2 Referenzensemble und Mitteldeutsches Kernensemble	132
A 1.3.3 Bewirtschaftungsdaten	138
A 1.4 Beschreibung der Hydrotopbildung	139
A 1.5 Weitere Auswertungen der Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO	140
A 1.5.1 Auswertungen der Wasserhaushaltsergebnisse für den Reanalysezeitraum	140
A 1.5.2 Auswertung der Wasserhaushaltsergebnisse für die Klimaprojektionen	142
A 1.5.3 Beispielhafte Auswertung der Wasserhaushaltsergebnisse einer Klimaprojektion	146
A 2 Anhang Raven	159
A 3 Anhang BROOK90	160
A 3.1 Inputdatensätze	160
A 3.1.1 Landnutzungsdaten	160
A 3.1.2 Bodenkarte	162
A 3.1.3 Topographie-Datensatz	163
A 3.1.4 Waldhöhen-Datensatz	164
A 3.1.5 Blattflächenindex-Datensatz	165
A 3.1.6 Gitter-basierte Parametrisierung	165
A 3.1.7 Bodenparameter	167
A 3.1.8 Vegetationsparameter	167
A 3.1.9 Abflussparameter	168
A 3.1.10 Weitere standortspezifische Parameter	169

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Karten der verschiedenen Bearbeitungsräume während der KliWES-Projektphasen 1.0 (links), 2.0 (Mitte) und 3.0 (rechts)	19
Abbildung 2:	Karte zu Abweichungen des korrigierten Niederschlags als Gebietsmittel (2000-2015) zwischen RDS 2.0 und RDS 1.0	22
Abbildung 3:	Zusammenfassung der meteorologischen Datengitter: historische Daten (RaKliDa mit 1 km Auflösung) und Klimaprojektionen (MDK mit 0,11° und Nebelniederschlag mit 12 km Auflösung) für das KliWES 3.0-Gebiet	28
Abbildung 4:	Beispielhafte Darstellung der diagnostische q-q-Diagramme vor und nach der BIAS-Korrektur verschiedener meteorologischer Variablen für alle Gitterzellen eines MDK-Mitglieds (CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018_r26_r2)	29
Abbildung 5:	Schematische Darstellung zum Ablaufschema der Differenzenganglinienanalyse	33
Abbildung 6:	Schematische Modellstruktur von ArcEGMO (BAH, 2025)	35
Abbildung 7:	Karte der mittleren realen Verdunstung (2000-2015) auf Teileinzugsgebietsebene basierend auf Ergebnissen des unkalibrierten Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO	43
Abbildung 8:	Karte des langsamen Grundwasserzuflusses RG2 (Mittelwert 2000-2015) auf Teileinzugsgebietsebene basierend auf Ergebnissen des unkalibrierten Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO	44
Abbildung 9:	Modellraum KliWES 3.0 mit Einteilung des Bearbeitungsraums in Modellregionen mit gemessenen Q-Daten und DIFGA-Ergebnis (dunkelblau, Kategorie 1), mit gemessenen Q-Daten ohne DIFGA-Ergebnis (hellblau, Kategorie 2) und ohne gemessene Q-Daten (grau, Kategorie 3)	45
Abbildung 10:	Lage der zur Kalibrierung und Validierung verwendeten Pegel innerhalb des Modellraums in KliWES 3.0	48
Abbildung 11:	NSE für logarithmierte Dauerlinie des gemessenen und simulierten Durchflusses im Bereich der Überschreitungswahrscheinlichkeit 1% bis 90% der kalibrierten Modellregionen (Kategorie 1 und 2) im Kalibrierzeitraum (Karte oben, links) und Validierzeitraum (Karte unten, links) sowie jeweils dazugehörige Häufigkeitsverteilung (Histogramme rechts)	52
Abbildung 12:	NSE für aktuelle Jahressummen von ETR_{DIFGA} und simulierter $ETR_{ArcEGMO}$ der kalibrierten Modellregionen (Kategorie 1) im Kalibrierzeitraum (Karte oben, links) und Validierzeitraum (Karte unten, links) sowie jeweils dazugehörige Häufigkeitsverteilung (Histogramme rechts)	54

Abbildung 13:	NSE für aktuelle Monatswerte des Zuflusses zum schnellen GW-Speicher RG1 _{DIFGA} und RG1 _{ArcEGMO} der kalibrierten Modellregionen (Kategorie 1) im Kalibrierzeitraum (Karte oben, links) und Validierzeitraum (Karte unten, links) sowie jeweils dazugehörige Häufigkeitsverteilung (Histogramme rechts).....	55
Abbildung 14:	Karte der Modellregionen mit Ausweisung von vier Qualitätsstufen	58
Abbildung 15:	Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5 sowie die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	61
Abbildung 16:	Mittlerer Jahresgang der potentiellen Verdunstung der Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie der jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	62
Abbildung 17:	Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung der Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie der jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	63
Abbildung 18:	Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher RG für die Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	64
Abbildung 19:	Mittlerer Jahresgang des Gesamtabflusses für die Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	65
Abbildung 20:	Karte der mittleren realen Verdunstung (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teileinzugsgebietsebene für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5	66
Abbildung 21:	Karte des Zuflusses zum GW-Speicher RG (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teileinzugsgebietsebene für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5	67
Abbildung 22:	Zeitlicher Verlauf des Niederschlags für den Datensatz RDS 2.0 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO ...	68

Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der realen Verdunstung für den Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	69
Abbildung 24: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher für die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2071–2100 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	70
Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflusses für die Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	71
Abbildung 26: Kartendarstellung des Fließgewässernetzes mit Messstationen (links), der Landnutzung (Mitte) und Leitbodenarten (rechts) für die Testregion Dohna	78
Abbildung 27: Erstellte Modellstruktur für Raven (Darstellung auf Grundlage von Bouaziz et al. (2021)) in Anlehnung an die ArcEGMO-Modellstruktur	79
Abbildung 28: Ganglinie (links) und Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses (rechts) für die Beobachtung (blau) und Raven Simulation (rot) ohne Kalibrierung für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015	82
Abbildung 29: Vergleich der jährlichen realen Verdunstung der DIFGA-Analyse mit der Raven-Simulation (links) und Vergleich der Grundwasserzufluss (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015	83
Abbildung 30: Langjähriger Mittelwert der von Raven simulierten realen Verdunstung ETR für Teileinzugsgebiete des Gebietes Dohna im Zeitraum 2000-2015	83
Abbildung 31: Ganglinie (links) und Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses (rechts) für die Beobachtung (blau) und Raven Simulation (rot) nach der Kalibrierung für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015	88
Abbildung 32: Vergleich der jährlichen realen Verdunstung der DIFGA-Analyse mit der Raven-Simulation (ETR + Bodenspeicherfüllung) (links) und Vergleich der Grundwasserzufluss (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015 nach der Kalibrierung	88
Abbildung 33: Ganglinien (links) und Dauerlinien (rechts) des täglichen logarithmierten Abflusses Q des Pegels Dohna der fünfjährigen Validierungszeiträume 1995-1999 (oben) und 2016-2020 (unten)	90

Abbildung 34: Reale Verdunstung ETR (links) und Grundwasserzufluss RG (rechts) in mm/a für den Zeitraum 1995 bis 2020 des Einzugsgebiets Dohna, die Validierperioden sind hellgrau markiert, der Kalibrierzeitraum grau.....	90
Abbildung 35: Jährliche Abflusswerte in mm/a (links) und Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses (rechts) für Beobachtung (blau) und Raven-Simulation (rot) nach der Kalibrierung für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020	92
Abbildung 36: Vergleich der DIFGA-Analyse mit der kalibrierten Raven-Simulation der jährlichen realen Verdunstung (links) und der Grundwasserzuflüsse (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020	92
Abbildung 37: Vergleich der Jahressummen (Zeitraum 1961-2020) der potentiellen Verdunstung (links) und reale Verdunstung (rechts) für $ETP_{ERA5-Land}$ (blau) sowie der modellintern berechneten ETP auf der Grundlage des RDS 2.0 Datensatzes (rot), MDK13 (grün) und MDK14 (violett) für das Einzugsgebiet Dohna	93
Abbildung 38: Vergleich der Jahressummen (Zeitraum 1961-2100) der potentiellen Verdunstung (oben) und reale Verdunstung (unten) für die ETP-Daten des ERA5-Land-Datensatzes (blau), sowie der modellintern berechneten ETP auf der Grundlage des RDS2.0 Datensatzes (rot), MDK13 (grün) und MDK14 (violett) für das Einzugsgebiet Dohna	94
Abbildung 39: Mittlere Wasserbilanzkomponenten für den August 2002 (Hochwasserjahr) und den September 2018 (Dürrejahr).....	97
Abbildung 40: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für verschiedene Landnutzungstypen (exemplarische HRU). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt, andere Zeiträume werden durch Anomalien repräsentiert. Die Bandbreite für das RCP 8.5-Szenario zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe. Standorte werden mit Nummern auf der Karte rechts angezeigt. 1 – Grasland, 2 – Ackerland, 3 – Laubwald, 4 – Nadelwald.	98
Abbildung 41: Standorte der FLUXNET-Türme in Sachsen.....	100
Abbildung 42: Mittlere monatliche Gesamtverdunstung an allen fünf FLUXNET-Standorten.....	101
Abbildung 43: Mittlere jährliche Wasserbilanzkomponenten für die historische Periode (1991-2020 und 1961-1990). Urbane Gebiete und große Wasserflächen sind ausgeblendet.	103
Abbildung 44: Mittlere jährliche Wasserbilanz aggregiert auf Gemeindeebene: historische absolute Werte (1991-2020) und prozentuale Veränderung für das zukünftige RCP 8.5-Szenario (MDK-Ensemble-gemittelt für 2031-2060 und 2071-2100).	104

Abbildung 45: Mittlere jährliche Verdunstung: historische absolute Werte (1991-2020) und prozentuale Veränderung für die 7 verschiedenen zukünftigen RCP 8.5 MDK Szenarien (2071-2100). Urbane Gebiete sind ausgeblendet.	105
Abbildung 46: Mittlere saisonale Wasserbilanzkomponenten für die vier Haupttypen natürlicher Landbedeckung in Sachsen: historische Daten (1961-1990, 1991-2020) und zukünftige RCP 8.5-Szenarien (2031-2060, 2071-2100) des MDK.....	106
Abbildung 47: Jährliche Zeitreihe des E/P-Verhältnisses für die vier Haupttypen natürlicher Landbedeckung für historische und zukünftige Zeitperioden. Dünne Linien stellen die jährlichen Werte dar, während dicke Linien geglättete Werte sind.....	108
Abbildung 48: Vergleich langjähriger Wasserhaushaltskomponenten (reale Verdunstung, Direktabfluss und Grundwasserzufluss, 1991-2020) basierend auf Ergebnisse aus ArcEGMO, BROOK90, Raven und DIFGA für das Einzugsgebiet Dohna	109
Abbildung 49: Tern-Diagramm mit relativen Wasserhaushaltskomponenten für sechs Dekaden (1961-2020) basierend auf DIFGA-Ergebnissen des Einzugsgebiets Dohna	111
Abbildung 50: Tern-Diagramm mit relativen Wasserhaushaltskomponenten für sechs Dekaden (1961-2020) basierend auf Modellergebnissen (DIFGA, ArcEGMO, BROOK90, Raven) des Einzugsgebiets Dohna.....	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der meteorologischen Größen des Klimareferenzdatensatzes RDS 2.0.....	21
Tabelle 2: Liste der meteorologischen Größen des ERA5-Land Datensatzes	23
Tabelle 3: Liste der 21 Klimaprojektionen des MDK.....	26
Tabelle 4: Übersicht der Kalibrierparameter für das Modell ArcEGMO mit den Startwerten, Ober- und Untergrenzen der Kalibrierfaktoren.....	49
Tabelle 5: Zusammenfassung der wesentlichen Änderungen zwischen den drei Projektteilen von KliWES 1.0, 2.0 und 3.0.....	75
Tabelle 6: Vergleich langjähriger Wasserhaushaltskomponenten (2000-2015) aus DIFGA und Raven in mm/a 80	
Tabelle 7: Übersicht der Gütekriterien im Zeitraum 2000-2015 für das unkalibrierte Raven-Modell des Einzugsgebietes Dohna	82
Tabelle 8: Übersicht der Kalibrierparameter und deren optimierte Werte (flächengewichtetes Mittel) für Raven 86	
Tabelle 9: Übersicht der mittleren Wasserhaushalts- und Abflusskomponenten für den Kalibrierzeitraum 2000-2015.....	87
Tabelle 10: Übersicht der Gütekriterien im Kalibrierzeitraum 2000-2015 für das kalibrierte Raven-Modell 87	
Tabelle 11: Übersicht der Gütekriterien für die beiden Validierungszeiträume des EZGs Dohna (Modell Raven) 89	
Tabelle 12: Mittlere jährliche Wasserbilanz für den Zeitraum 1991-2020 für exemplarische HRU aus Abbildung 42	99

Tabelle 13: Gegenüberstellung von Gütekriterien (z.B. Kling-Gupta-Effizienz KGE) zur Bewertung der Anpassungsgüte zwischen simulierter und an fünf FLUXNET-Stationen gemessener realer Verdunstung ETR.....	101
Tabelle 14: Vergleich langjähriger Wasserhaushaltskomponenten (Niederschlag P, reale Verdunstung ETR, Direktabfluss RD und Grundwasserzufluss RG in mm/a, 1991-2020) basierend auf Ergebnisse aus DIFGA, ArcEGMO, Raven und BROOK90 für das Einzugsgebiet Dohna.....	110

Abbildungsverzeichnis im Anhang

Abbildung A 1: Karte der Teileinzugsgebietsstruktur im Bearbeitungsraum	122
Abbildung A 2: Karte der interpolierten GW-Flurabstände der Stichtagsmessung von 2022 (8 m x 8 m Raster) für den Lockergesteinsbereich Sachsens.....	127
Abbildung A 3: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Nebelniederschlags (1961 bis 2015) in KliWES 3.0	130
Abbildung A 4: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Nebelniederschlags (1961 bis 2015) in KliWES 2.0	131
Abbildung A 5: Vergleich von langjährigem Mittelwert MW, Minimum und Maximum des Nebelniederschlags (1961 bis 2015) aller Rasterzellen der zugehörigen Höschicht aus KliWES 2.0 und KliWES 3.0	132
Abbildung A 6: Übersicht des vollständigen Klimareferenzensembles (zweite bis vierte Spalte von links) und des reduzierten Mitteldeutschen Kernensembles (fünfte bis zehnte Spalte von links; ReKIS Portal, 2025)	132
Abbildung A 7: Für KliWES 3.0 konzipiertes GIS-Modul zur automatisierten Erzeugung einer Hydrotopstruktur	139
Abbildung A 8: Mittlerer Jahresgang der Temperatur für den Datensatz RDS 2.0 sowie die jeweils 7 MDK-Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum)	140
Abbildung A 9: Karte des Niederschlags (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teileinzugsgebietsebene für den Beobachtungsdatensatz RDS 2.0.....	141
Abbildung A 10: Karte des Zuflusses zum langsamen GW-Speicher RG2 (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teileinzugsgebietsebene für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5....	141
Abbildung A 11: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für die jeweils 7 MDK-Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2021–2050 über gesamten Bearbeitungsraum)	142
Abbildung A 12: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für die jeweils 7 MDK-Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2071–2100 über gesamten Bearbeitungsraum)	143
Abbildung A 13: Zeitlicher Verlauf der potentiellen Verdunstung für die Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	144

Abbildung A 14: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher für die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2021–2050 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO	145
Abbildung A 15: Zeitlicher Verlauf des Zuflusses zum GW-Speicher für die Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO.....	146
Abbildung A 16: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags (1961–2020) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens	147
Abbildung A 17: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags (2021–2050) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens	148
Abbildung A 18: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags (2071–2100) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens	149
Abbildung A 19: Karten der räumlichen Verteilung des Niederschlags (langjährige Mittelwerte für 1961-2020 (oben, links), 2021-2050 (oben, rechts) sowie 2071-2100 (unten, links)) für die Klimaprojektion MDK4 im Bearbeitungsraum Sachsen	150
Abbildung A 20: Karte der räumlichen Verteilung der realen Verdunstung $ETR_{1961-2020}$ (langjähriger Mittelwert für 1961-2020, oben) sowie Differenzkarten von $ETR_{2021-2050} - ETR_{1961-2020}$ (Mitte) und $ETR_{2071-2100} - ETR_{1961-2020}$ (unten) für die Klimaprojektion MDK4 auf Teileinzugsgebietsebene im Bearbeitungsraum	151
Abbildung A 21: Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung (1961–2020) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens.....	152
Abbildung A 22: Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung (2021–2050) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens.....	153
Abbildung A 23: Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung (2071–2100) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens.....	154
Abbildung A 24: Karte der räumlichen Verteilung des Zuflusses zum GW-Speicher $RG_{1961-2020}$ (langjähriger Mittelwert für 1961-2020, oben) sowie Differenzkarten von $RG_{2021-2050} - RG_{1961-2020}$ (Mitte) und $RG_{2071-2100} - RG_{1961-2020}$ (unten) für die Klimaprojektion MDK4 auf Teileinzugsgebiets-ebene im Bearbeitungsraum.....	155
Abbildung A 25: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher (1961–2020) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens.....	156
Abbildung A 26: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher (2021–2050) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens.....	157

Abbildung A 27: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher (2071–2100) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens.....	158
Abbildung A 28: Vergleich der DIFGA-Analyse mit der kalibrierten Raven-Simulation des jährlichen Direktabflusses QD (links) und dem Grundwasserabfluss QG (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020	159
Abbildung A 29: Vergleich der DIFGA-Analyse mit der kalibrierten Raven-Simulation der jährlichen Grundwasserabfluss-Komponenten QG1 (links) und QG2 (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020	159
Abbildung A 30: Räumliche Verteilung der Vegetationsklassen nach dem ATKIS-Landnutzungsdatensatz und den dazugehörigen ArcEGMO-Bezeichnungen für BROOK90 (die Klassen-Codes sind in Tabelle A 4 erklärt)	160
Abbildung A 31: Räumliche Verteilung des BK50 Datensatz (Stand Mai 2020). Die Legende für die Bodenkarte wird nicht dargestellt, da das Gebiet mehr als 1000 lokale Bodentypen enthält.....	162
Abbildung A 32: SRTM30 Topographie-Datensatz mit Höhenangaben für das KliWES 3.0-Gebiet	163
Abbildung A 33: Räumliche Verteilung der Waldhöhen laut dem GEDI-Waldhöhendatensatz für den Zeitpunkt Oktober 2019	164
Abbildung A 34: Beispielhafte räumliche Verteilung des MODIS Blattflächenindex Datensatzes für den 21.08.2022.....	165
Abbildung A 35: Vergrößertes Beispiel verwendeter Datensätze in Bezug auf das 500-m-Modellierungsgitter	166
Abbildung A 36: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für Nadelwald (exemplarische HRU neben Johanngeorgenstadt; ID 3306). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt. Die Bandbreite für die RCP-Szenarien zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe.	170
Abbildung A 37: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für Laubwald (exemplarische HRU neben Dresden; ID 38728). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt. Die Bandbreite für die RCP-Szenarien zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe.	171
Abbildung A 38: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für Grasland (exemplarische HRU neben Görlitz; ID 44696). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt. Die Bandbreite für die RCP-Szenarien zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe.	172
Abbildung A 39: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für Ackerland (exemplarische HRU neben Lommatzsch; ID 47231). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt. Die Bandbreite für die RCP-Szenarien zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe.	173
Abbildung A 40: Mittlere jährliche Niederschlagssummen für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.	174
Abbildung A 41: Mittlere jährliche Niederschlagssummen für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.	175

Abbildung A 42: Mittlere jährliche Niederschlagssummen für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.	176
Abbildung A 43: Mittlere jährliche Verdunstung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.....	177
Abbildung A 44: Mittlere jährliche Verdunstung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.....	178
Abbildung A 45: Mittlere jährliche Verdunstung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.....	179
Abbildung A 46: Mittlerer jährlicher Abfluss für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.....	180
Abbildung A 47: Mittlerer jährlicher Abfluss für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.....	181
Abbildung A 48: Mittlerer jährlicher Abfluss für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.....	182
Abbildung A 49: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.	183
Abbildung A 50: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.	184
Abbildung A 51: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.	185
Abbildung A 52: Mittlere jährliche Wasserbilanz für natürliche Landnutzungsarten, zusammengefasst aus allen Gitterpunkten für das historische und zukünftige Klima. Daten für Klimaprojektionen für verschiedene RCP-Szenarien wurden nicht ermittelt.	186

Tabellenverzeichnis im Anhang

Tabelle A 1: Vergleich des Anschlussgrades [%] der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation von 2016 und 2019 auf Landkreisebene (StLA Sachsen, 2018 und 2021).....	129
Tabelle A 2: Übersicht der im WHH-Modell ArcEGMO verwendeten Pegel für Kalibrierung und Validierung (Bereitstellung der Datenreihen durch LfULG, LTV)	133
Tabelle A 3: Übersicht der ins WHH-Modell ArcEGMO eingebundenen Talsperren- und Speicherabgaben (Bereitstellung der Datenreihen durch LTV).....	138
Tabelle A 4: Klassifizierung des ATKIS-Landnutzungsdatensatz in BROOK90.....	161

Abkürzungsverzeichnis

CB	Speicherkonstante des Bodenspeichers (nummeriert entsprechend der Bodenhorizonte)
CG1	Speicherkonstante schneller Grundwasserspeicher in d
CG2	Speicherkonstante langsamer Grundwasserspeicher in d
DIFGA	Differenzenganglinienanalyse
ERA5-Land	meteorologischer Rasterdatensatz für Reanalysezeitraum (Muñoz Sabater, 2019)
ETP	potentielle Verdunstung (Grasreferenzansatz nach FAO-Standard (Allen et al., 1994))
ETP _{ERA5}	potentielle Verdunstung (Grasreferenzverdunstung) errechnet aus Klimavariablen des ERA5-Land-Datensatzes
ETP _{RDS2}	potentielle Verdunstung (Grasreferenzverdunstung) errechnet aus Klimavariablen des Klimareferenzdatensatzes RDS 2.0
ETR	reale Verdunstung
ETR _{DIFGA}	reale Verdunstung (abgeleitet mittels DIFGA-Analyse)
ETR _{Modell}	reale Verdunstung (als Simulationsergebnis der Modelle ArcEGMO, Raven oder BROOK90)
EZG	Einzugsgebiet
GS	Globalstrahlung
GW	Grundwasser
IQR	Interquartilabstand
KGE	Kling-Gupta-Effizienz (Gütekriterium)
LEAG	Lausitzer Energie AG
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
LTV	Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
MDK	Mitteldeutsches Kernensemble (meteorologischer Rasterdatensatz mit 21 Klimaprojektionen (Struve et al., 2020))
Nebel	Nebelniederschlag
NSE	Nash-Sutcliffe-Effizienz (Gütekriterium)
P	Niederschlag (als Summe aus korrigiertem Niederschlag und Nebelniederschlag)
Q	Durchfluss bzw. Abfluss in m ³ /s sowie Abflussspende in mm/d oder mm/a
Q _{Modell}	Simulierter Durchfluss bzw. Abfluss in m ³ /s sowie Abflussspende in mm/d oder mm/a
QB	Abfluss aus Bodenspeicher (nummeriert entsprechend der Bodenhorizonte)
QG1	Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher
QG2	Abfluss aus dem langsamen Grundwasserspeicher
QO	Oberflächenabfluss im Modell Raven
R	Zufluss zu allen Speichern

RD	Direktabfluss (entspricht der Summe der Zuflüsse zu allen oberflächennahen Speichern)
RDS 1.0	Klimareferenzdatensatz 1.0 (Bernhofer et al., 2019, meteorologischer Rasterdatensatz für Sachsen basierend auf Beobachtungsdaten)
RDS 2.0	Klimareferenzdatensatz 2.0 (Körner et al., 2022, Weiterentwicklung des RDS 1.0)
REST	Restglied der DIFGA-Analyse zusammengesetzt aus Bodenspeicheränderung und ETR (entspricht ETR_{DIFGA})
RG1	Zufluss zum schnellen Grundwasserspeicher
RG2	Zufluss zum langsamen Grundwasserspeicher
RG	Summe der Zuflüsse zum schnellen und langsamen Grundwasserspeicher (Grundwasserzufluss)
SG1max	maximale Speicherfüllung des schnellen Grundwasserspeichers in mm
SSE	Residuenquadratsumme (sum of squared errors, Gütekriterium)
TM	mittlere Lufttemperatur in °C
TEG	Teileinzugsgebiet(e)
WHH	Wasserhaushalt

1 Einleitung und Zielstellung

Das LfULG-Projekt „Klimawandel und Wasserhaushalt der Einzugsgebiete Sachsens“ (KliWES) befasst sich seit 2008 mit Fragen zur zukünftigen Entwicklung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen unter sich verändernden klimatischen Randbedingungen. Die zunehmenden Änderungen dieser Klimabedingungen sind inzwischen in den unterschiedlichsten Bereichen spürbar. So ist z.B. im Zeitraum 1961 – 2021 in Sachsen ein starker Anstieg der potentiellen Verdunstung zu verzeichnen. Vorläufiger Höhepunkt dieser Entwicklung ist die Trockenperiode 2018 – 2020 mit geringen Niederschlägen bei gleichzeitig hohen Temperaturen. Diese kumulativen Effekte führten in 2019 und 2020 verbreitet zu noch nie beobachteten Tiefstständen im Grundwasser.

Die zukünftige Entwicklung des Wasserhaushalts in Sachsen lässt sich allerdings nicht eindeutig vorhersagen. Um dennoch Informationen als Entscheidungsgrundlage zu erhalten, kann mithilfe von Wasserhaushaltsmodellen und auf der Basis von verschiedenen Klimaprojektionen ein möglicher Ereignisraum aufgespannt werden. Dieser Ensemble-Ansatz wurde in Bezug auf die Klimaprojektionen bereits in den Vorgängerprojekten KliWES 1.0 (Laufzeit 2008 bis 2014) sowie KliWES 2.0 (2019 bis 2021) verfolgt. Im Fokus standen hierbei vor allem die Auswahl eines geeigneten Wasserhaushaltsmodells, der Aufbau eines möglichst flächendeckenden Modells für Sachsen, die Kalibrierung dieses großräumigen Modells sowie die Entwicklung eines Internetauftritts für die öffentliche Bereitstellung aller Wasserhaushaltsergebnisse.

Im Vorhaben KliWES 3.0 wurden nun Ziele verfolgt, die vor allem der inhaltlichen und methodischen Weiterentwicklung des KliWES-Projekts dienten. Als wichtigste sind zu nennen:

- die Wiedereinbindung der Lausitzer Neiße in den KliWES 3.0-Projektraum,
- die Einbindung der Bergbauregionen im Großraum Leipzig und der Lausitz sowie des Flusseinzugsgebietes der Weißen Elster zur Erreichung einer flächendeckenden Abdeckung Sachsens bei der Wasserhaushaltsmodellierung,
- die Integration von Bias-korrigierten Klimaprojektionen des Mitteldeutschen Kernensembles (MDK) als Klima-Ensemble
- die Nachführung von zeitlich verlängerten und methodisch überarbeiteten Inputdaten (meteorologische und hydrologische), sowie
- der Test und die Evaluierung eines Ensemble-Ansatzes für verschiedene Wasserhaushaltsmodelle und -parameter,
- die Einbeziehung der aktuellen Stichtagsmessung zur Anbindung der GW-Oberfläche,

- die Automatisierung von Prozessen zur Qualitätssicherung wie auch zur beschleunigten, reproduzierbaren Bearbeitung.

Ein Schwerpunkt der Projektarbeiten lag auf der Erweiterung des Ensemble-Ansatzes, indem verschiedene Wasserhaushaltsmodelle zum Einsatz kamen und ein Optimierungsansatz verwendet wurde, mit dem Parameterunsicherheiten abgebildet werden konnten. Der vorliegende Bericht befasst sich daher umfassend mit den drei Modellen ArcEGMO, Raven und BROOK90. Darüber hinaus werden die Vorgehensweisen und Hintergründe zu den Datengrundlagen, zur Modellkalibrierung, der Qualitätssicherung sowie der Ergebnisauswertung der ermittelten Wasserhaushaltsgrößen erläutert.

Die Simulationen mit den Modellen ArcEGMO und Raven erfolgten an der Professur für Hydrologie, TU Dresden. Die Wasserhaushaltsberechnungen mit dem Modell BROOK90 wurden an der Professur für Meteorologie, TU Dresden durchgeführt.

Die erzeugten Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO sind frei zugänglich und über den Webauftritt des sogenannten GWN Viewers abrufbar.

2 Aufbereitung von Datengrundlagen

2.1 Bearbeitungsraum

Im Projekt KliWES 3.0 erfolgten flächendeckende Wasserhaushaltsmodellierungen für den gesamten Raum Sachsens (s. Abbildung 1, rechte Karte). In vorherigen Projektphasen konnten verschiedene Teilflächen (noch) nicht berücksichtigt werden. So waren nun erstmals Tagebaugebiete und Bergbaufolgelandschaften der Lausitz und des Leipziger Raums Bestandteil des Bearbeitungsraumes. Für die Flusseinzugsgebiete der Lausitzer Neiße wie auch der Elbe erfolgten die WHH-Modellierungen allerdings nur für Flächen innerhalb Sachsens. Wie mit diesen Gegebenheiten im Rahmen der Wasserhaushaltsmodellierung umgegangen wurde, ist in Abschnitt 3.3 beschrieben. Insgesamt ergab sich eine Fläche von ca. 22.000 km², für welche die Wasserhaushaltsmodellierung durchgeführt wurden.

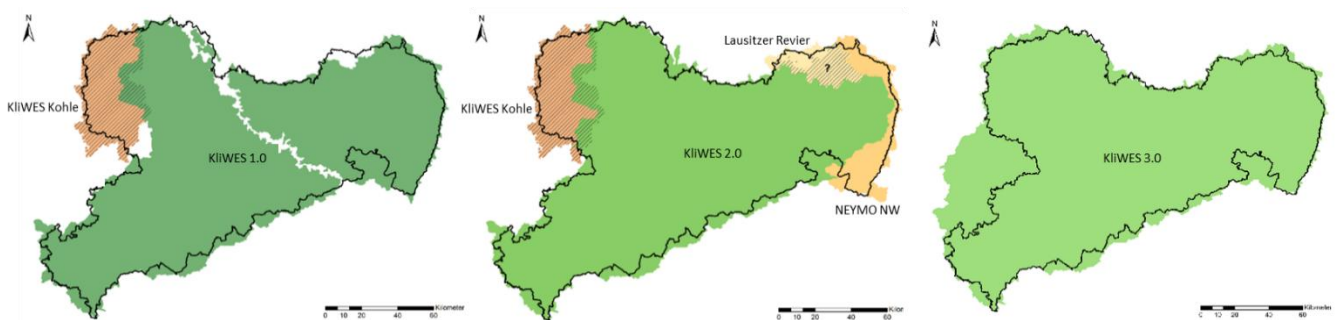


Abbildung 1: Karten der verschiedenen Bearbeitungsräume während der KliWES-Projektphasen 1.0 (links), 2.0 (Mitte) und 3.0 (rechts)

Grundlage für die hydrologische Abgrenzung des Bearbeitungsraums war die Teileinzugsgebietsstruktur, welches durch das LfULG abgeleitet und über das iDA-Portal bezogen wurden. Detaillierte Informationen zu den Teileinzugsgebieten finden sich in Abschnitt A 1.2.

Nähere Informationen zur jeweiligen Festlegung für die verschiedenen Bearbeitungsräume während der KliWES-Projektphasen 1.0, 2.0 und 3.0 enthält A 1.1.

2.2 Geodaten

Für Wasserhaushaltsmodellierungen wurden eine Reihe von topologischen und geografischen Datengrundlagen benötigt. Die Anforderungen richteten sich hierbei nach dem verwendeten Wasserhaushaltsmodell. Im Rahmen des KliWES-Projekts umfasste dies folgende Datengrundlagen:

- Teileinzugsgebiete
- Fließ- und Standgewässernetz
- Pegel

- Boden
- Geologie
- Landnutzung
- Grundwasserflurabstände
- Digitales Geländemodell (DGM)
- Anschlussgrad an die öffentliche Kanalisation und Kanalisationsart

Die genannten Daten wurde bereits im LfULG-Projekt KliWES 2.0 (Hauffe et al., 2022) umfangreich aufbereitet und für die Wasserhaushaltsmodellierung parametrisiert. Auf die Datenbasis wurde in KliWES 3.0 zurückgegriffen. Es gab allerdings einige Änderungen gegenüber dem Vorgängerprojekt, welche sich vor allem durch die Erweiterung des Bearbeitungsraums ergaben. Dies machte eine entsprechende Überarbeitung der topologischen und geografischen Datengrundlagen besonders im Einzugsgebiet der Weißen Elster erforderlich.

Nähere Erläuterungen zur Aufbereitung der Datengrundlagen sind im Anhang A 1.2 zu finden.

2.3 Meteorologische Daten

Für die Wasserhaushaltsmodellierungen wurden meteorologische Datensätze als Input benötigt. Für die Abbildung des historischen Zeitraumes von 1961 bis 2020 standen zwei Datensätze zur Verfügung. Mögliche Entwicklungen des zukünftigen Klimas lagen in Form von 21 Datensätzen (Zeitraum 1961 bis 2100) vor.

2.3.1 Datensätze für den Beobachtungszeitraum 1961 - 2020

2.3.1.1 Klimareferenzdatensatz 2.0

Der Klimareferenzdatensatz 2.0 (RDS 2.0, Körner et al., 2022) ist einer der beiden Datensätze, die den historischen Zeitraum repräsentieren. Er wurde mit einer räumlichen Auflösung von 1 km Rasterweite (s. Abbildung 3, links) und einer verbesserten Interpolationsmethode (Thin-Plate-Splines) für tägliche Zeitschritte von 1961 bis 2020 erstellt. Grundlage für die Interpolation bildeten gemessene Klimavariablen. Für die in Tabelle 1 aufgeführten meteorologischen Größen existiert somit jeweils ein täglicher Rasterdatensatz.

Tabelle 1: Liste der meteorologischen Größen des Klimareferenzdatensatzes RDS 2.0

Bezeichnung	Einheit
Minimale Lufttemperatur	°C
Maximale Lufttemperatur	°C
Mittlere Lufttemperatur	°C
Relative Luftfeuchte	-
Korrigierter Niederschlag	mm
Globalstrahlung	W m ⁻²
Mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe	m s ⁻¹
Nebelniederschlag	mm

Die Ableitung der Nebelniederschlagsdaten erfolgte durch Körner et al. (2022). Da der Datensatz keine Abdeckung des gesamten Modellraums bot, waren Ergänzungen erforderlich, welche im Kapitel A 1.3.1 zusammengefasst sind. Zudem wird darauf hingewiesen, dass zwischen den verwendeten Nebeldata-sätzen in KliWES 2.0 und 3.0 Unterschiede existieren. Sie ergaben sich aufgrund einer geänderten Me-thodik zur Ableitung der Nebelniederschläge.

Die ursprünglich als ASCII-Dateien vorliegenden Daten wurden für das KliWES 3.0-Projekt variablen-weise in netCDF4-Dateien umformatiert. Dieses standardisierte Format ist einfacher zu handhaben und besitzt eine wesentlich höhere Performanz bezüglich der Modellierung.

Gegenüberstellung des Niederschlags von RDS 1.0 und 2.0

Zwischen den beiden RDS 1.0, welcher im Projekt KliWES 2.0 verwendet wurde, und RDS 2.0 bestehen eine Reihe von Unterschieden. So erhöhte sich die Anzahl der Niederschlagsstationen, welche die Grundlage für die Interpolation waren, im RDS 2.0 gegenüber der Vorgängerversion deutlich. Auch das Verfahren zur Lückenfüllung von Fehlwerten in den Messreihen wurde angepasst. Darüber hinaus än-derte sich das Interpolationsverfahren (s. Körner et al., 2022). Die meteorologischen Größen wurden im RDS 2.0 bis zum 31.12.2020 nachgeführt, wohingegen der RDS 1.0 bis zum 31.12.2015 reichte.

Aufgrund dieser Weiterentwicklungen erfolgte eine Gegenüberstellung ausgewählter meteorologi-schen Größen des RDS 1.0 und 2.0, um die Auswirkungen zu untersuchen. Beispielhaft sollen hier die Unterschiede für den korrigierten Niederschlag dargestellt werden. Diese sind in Abbildung 2 als Diffe-renzen auf Einzugsgebietsebene gemittelt für den Zeitraum 2000 bis 2015 visualisiert.

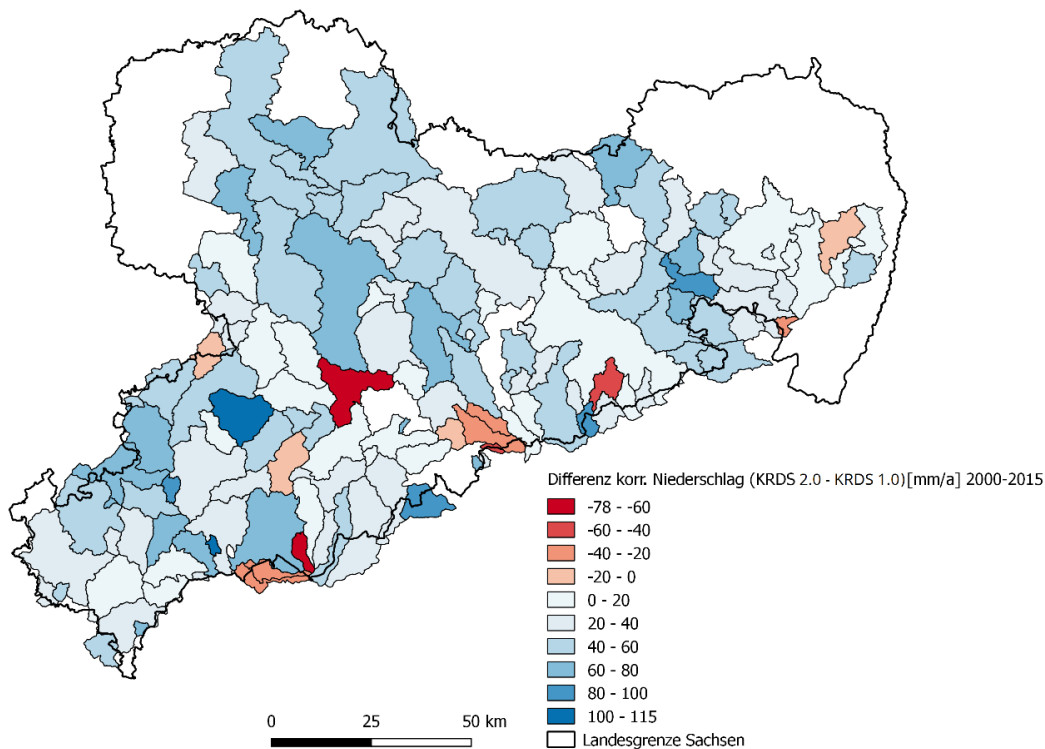


Abbildung 2: Karte zu Abweichungen des korrigierten Niederschlags als Gebietsmittel (2000-2015) zwischen RDS 2.0 und RDS 1.0

Für einige wenige Einzugsgebiete, darunter Teile des Erzgebirgskamms, ergaben sich signifikante Abweichungen im langjährigen Mittel. Die maximale Differenz des korrigierten Niederschlags aus dem RDS 2.0 lag einerseits mit -78 mm/a unter den Werten des RDS 1.0 und andererseits mit +115 mm/a darüber. Im Allgemeinen waren die RDS 2.0-Niederschlagsgebietsmittel in der Fläche überwiegend höher, was einen größeren Niederschlagseintrag für die Wasserhaushaltsberechnungen im Vergleich zum Vorgängerprojekt KliWES 2.0 bedeutete.

2.3.1.2 ERA5-Land-Datensatz

Im Gegensatz zum RDS 2.0 handelt es sich bei ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2019) um einen Reanalyse-datensatz meteorologischer Zeitreihen. Die Reanalyse kombiniert Modelldaten mit Beobachtungen aus der ganzen Welt zu einem konsistenten Datensatz, der die Gesetze der Physik nutzt. Sie ermöglicht damit eine realitätsnahe Beschreibung des Klimas der Vergangenheit. Der ERA5-Land-Datensatz wurde durch das ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) entwickelt und nutzt Simulationsergebnisse der ERA5-Reanalyse. ERA5 stellt stündliche Schätzungen verschiedenster atmosphärischer, terrestrischer und ozeanischer Klimavariablen zur Verfügung und deckt dabei die gesamte Erde auf einem 30 km Raster ab.

ERA5-Land hingegen wird durch eine erneute Anwendung der sogenannten Landkomponente der ERA5-Reanalyse erzeugt, wodurch sich eine deutlich erhöhte räumliche Auflösung im Vergleich zu ERA5

erzielen lässt. Die Daten liegen global mit einer 9 km Rasterweite vor. Hierfür erfolgt die Verwendung von Atmosphärenvariablen aus ERA5, wie z.B. Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, als Randbedingungen für die ERA5-Land-Berechnungen. Durch die Hinzunahme dieses atmosphärischen Antriebs kann verhindert werden, dass die modellbasierten Berechnungen von der Realität abweichen. Dennoch sind die Klimavariablen des ERA5-Land-Datensatzes zu einem gewissen Grad mit Unsicherheiten behaftet. Numerische Modelle können nur eine mehr oder weniger genaue Darstellung der realen physikalischen Prozesse liefern, die die verschiedenen Komponenten des Klimas bestimmen.

Der Datensatz enthält verschiedene Klimavariablen (s. Tabelle 2) beginnend im Januar 1950 bis zur Gegenwart in stündlicher Auflösung.

Tabelle 2: Liste der meteorologischen Größen des ERA5-Land Datensatzes

Bezeichnung	Bezeichnung	Einheit
2m_dewpoint_temperature	Taupunkt	°C
2m_temperature	Mittlere Lufttemperatur	°C
10m_u_component_of_wind	Mittlere ostwärts gerichtete Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe	m s ⁻¹
10m_v_component_of_wind	Mittlere nordwärts gerichtete Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe	m s ⁻¹
surface_net_solar_radiation	Solarstrahlung / kurzwellige Strahlung	J m ⁻²
surface_net_thermal_radiation	Wärmestrahlung / langwellige Strahlung	J m ⁻²
surface_solar_radiation_downwards	Globalstrahlung	J m ⁻²
surface_pressure	Luftdruck	Pa
total_precipitation	Niederschlag	mm

Der Reanalysedatensatz steht frei zur Verfügung und kann über den Climate Data Store der Copernicus Plattform heruntergeladen werden.

Ableitung der potentiellen Verdunstung aus ERA5-Land-Daten

Ausgehend von ERA5-Land- Klimavariablen (Muñoz Sabater, 2019) erfolgte die Ableitung der Grasreferenzverdunstung nach FAO-Standard (Allen et al., 1994). Grundlage hierfür bildete die Herangehensweise der Studie von Singer et al. (2021).

Demnach werden stündliche Werte zum Zeitpunkt t und der Pixelposition x für die potentielle Verdunstung $hPET$ anhand der Gleichung

$$hPET_{x,t} = \frac{0.408 \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{37}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 u_2)}$$

berechnet. Hier ist R_n die stündliche Solarstrahlung (MJm^{-2}), G der Bodenwärmestrom (MJm^{-2}), γ die Psychrometer-Konstante ($kPA^{\circ}C^{-1}$), T_a stündliche Werte der Lufttemperatur ($^{\circ}C$) nach der Umrechnung der ERA5-Land Temperatur in K, e_s stündliche Werte für den Sättigungsdampfdruck (kPA), e_a stündliche Werte für den realen Dampfdruck (kPA) und u_2 die Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) in 2m Höhe über der Landoberfläche in stündlicher Auflösung. Alle Größen, die nicht direkt in Tabelle 2 aufgeführt sind, können aus diesen abgeleitet werden. Die so erhaltenen, räumlich verteilten potentiellen Verdunstungswerte in stündlicher Auflösung wurden anschließend auf Tageswerte aggregiert.

2.3.2 Verwendung der Beobachtungsdatensätze in der Wasserhaushaltsmodellierung

Aus den vorhandenen Datensätzen für den Beobachtungszeitraum ergaben sich zwei Varianten für die meteorologischen Eingangsdaten der anschließenden Wasserhaushaltsmodellierungen. Zum einen wurden alle Klimavariablen des RDS 2.0 als Inputdaten verwendet. Die Ableitung der potentiellen Verdunstung erfolgte modellintern und wird nachfolgend als ETP_{Modell} (in Bezug auf ArcEGMO, Raven oder BROOK90) bezeichnet. Dieser Eingangsdatensatz für den historischen Zeitraum heißt auch im Weiteren RDS 2.0.

Zum anderen wurde eine Kombination aus Klimavariablen des RDS 2.0 (P, TM und GS) und der abgeleiteten potentiellen Verdunstung basierend auf ERA5-Land-Daten genutzt. Diese vorprozessierte potentiellen Verdunstung wird nachfolgend ETP_{ERA5} genannt und wurde als eigene Modelleingangsgröße für die Wasserhaushaltsmodellierungen mit ArcEGMO und Raven bereitgestellt. Eine modellinterne Ableitung erfolgte in diesem Fall nicht. Diese Kombination der Modelleingangsdaten aus RDS 2.0 und ERA5-Land wird im Weiteren als RDS2/ERA5 bezeichnet.

In Kapitel 3.4 sind die Hintergründe erläutert, welche zur Verwendung dieser beiden Varianten bei den Eingangsdaten geführt haben.

2.3.3 Datensätze für den Projektionszeitraum bis 2100

Als Klimaprojektionsdatensatz wurde das Mitteldeutsche Kernensemble (MDK) v1.0 (Struve et al., 2020) verwendet, welches 21 Klimaprojektionen enthält. Das MDK basiert auf globalen Modellläufen (Coupled Modelling Intercomparison Project 5 CMIP5), die mit verschiedenen regionalen Klimamodellen herunterskaliert (downscaling) wurden. Danach erfolgte eine Reduzierung der großen Anzahl verfügbarer Kombinationen von Modellen, Emissionsszenarien und Realisierungen durch eine Hauptkomponentenanalyse auf insgesamt 21 Modellläufe. Das Vorgehen basiert auf Dalelane et al. (2018). Die ausgewählten Datensätze verteilen sich gleichmäßig auf drei Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5), wovon das RCP-Szenario 8.5 den stärksten Anstieg der Treibhausgase annimmt und somit auch die größten klimatischen Änderungen erwarten lässt. Die Bandbreite klimatischer Entwicklungen des ursprünglichen (nicht-reduzierten) Klimaensembles wird durch das MDK weitestgehend abgedeckt.

Die MDK-Daten haben eine räumliche Auflösung von $0,11^\circ$ (ca. 12,5 km, s. Abbildung 3, links) und eine tägliche zeitliche Auflösung. Sie umfassen den Zeitraum von 1961-2005 (historische Läufe) und 2006-2100 (Projektionsläufe).

Eine Übersicht der Klimaprojektionen des Mitteldeutschen Kernensembles mit ihren originalen Bezeichnungen sowie der vergebenen ID zur einfacheren Identifikation der Datensätze enthält Tabelle 3. Die originalen Bezeichnungen setzen sich aus:

- Der Kennzeichnung der Projektphase (CMIP5), in welcher die Emissionsszenarien entwickelt und Klimamodellrechnungen durchgeführt wurden,
- der Abkürzung des jeweiligen globalen Klimamodells,
- der Abkürzung des regionalen Klimamodells, welches für das Downscaling verwendet wurde, sowie
- der Kennzeichnung der Klimaszenarien (r26, r45 und r85)

zusammen.

Tabelle 3: Liste der 21 Klimaprojektionen des MDK

ID	Bezeichnung der Klimaprojektion	Klimaszenario
MDK1	CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018_r26_r2	RCP 2.6
MDK2	CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018_r26_r4	RCP 2.6
MDK3	CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018_r45_r5	RCP 4.5
MDK4	CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018_r85_r4	RCP 8.5
MDK5	CMIP5_EC-EARTH_EPISODES-2018_r45_r2	RCP 4.5
MDK6	CMIP5_EC-EARTH_EPISODES-2018_r85_r2	RCP 8.5
MDK7	CMIP5_EC-EARTH_RACMO-22E_r45_r12	RCP 4.5
MDK8	CMIP5_EC-EARTH-r12_CCLM-4-8-17_r26_r12	RCP 2.6
MDK9	CMIP5_EC-EARTH-r12_CCLM-4-8-17_r45_r12	RCP 4.5
MDK10	CMIP5_EC-EARTH-r12_WETTREG-2018_r85_r1	RCP 8.5
MDK11	CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r26_r1_norm_calender	RCP 2.6
MDK12	CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r45_r1_norm_calender	RCP 4.5
MDK13	CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r85_r1_norm_calender	RCP 8.5
MDK14	CMIP5_HadGEM2-ES-r1_WETTREG-2018_r85_r1	RCP 8.5
MDK15	CMIP5_MIROC5-r1_CCLM-4-8-17_r26_r1_norm_calender	RCP 2.6
MDK16	CMIP5_MIROC5-r1_CCLM-4-8-17_r85_r1_norm_calender	RCP 8.5
MDK17	CMIP5_MPI-ESM-LR_EPISODES-2018_r26_r3	RCP 2.6
MDK18	CMIP5_MPI-ESM-LR_EPISODES-2018_r85_r1	RCP 8.5
MDK19	CMIP5_MPI-ESM-LR-r1_CCLM-4-8-17_r45_r1	RCP 4.5
MDK20	CMIP5_MPI-ESM-LR-r1_WETTREG-2018_r26_r1	RCP 2.6
MDK21	CMIP5_NorESM1-M-r1_EPISODES-2018_r45_r1	RCP 4.5

Die Auswahl und Zusammenstellung der 21 Klimaprojektionen des MDK aus dem vollständigen Referenzensemble ist in Struve et al. (2020) beschrieben sowie in Abbildung A 6 als Übersicht dargestellt.

Da die 21 Klimaprojektionen aus sehr unterschiedlichen Global- und Regionalmodellen stammen, gab es hinsichtlich Metadatenaufbau, zugrundeliegendem Kalender, verfügbaren Klimavariablen und räumlicher Abdeckung größere Inkonsistenzen. Für eine effiziente Nutzung war daher zunächst eine Homogenisierung der Datensätze notwendig. Zudem lagen sie im Ausgangszustand nicht bias-korrigiert vor, was im Rahmen des Projekts ebenfalls adressiert wurde (s. Kapitel 2.3.4).

Für drei MDK-Mitglieder:

- CMIP5_EC-EARTH-r12_WETTREG-2018_r85_r1
- CMIP5_MPI-ESM-LR-r1_WETTREG-2018_r26_r1
- CMIP5_HadGEM2-ES-r1_WETTREG-2018_r85_r1

erfolgte zudem die Berechnung der fehlenden Globalstrahlung und der korrigierten Niederschläge mit Hilfe der Angström- und Richter-Formeln.

Für die folgenden Klimaprojektionen wurden die modellinternen 365/360-Tage-Kalender auf den 'normalen' 365/366-Tage-Kalender angepasst:

- CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r26_r1
- CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r45_r1
- CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r85_r1
- CMIP5_MIROC5-r1_CCLM-4-8-17_r26_r1
- CMIP5_MIROC5-r1_CCLM-4-8-17_r85_r1

Bei einem 365-Tage-Kalender (fehlende Schaltjahre) musste zu jedem Schaltjahr der fehlende Tag am 29. Februar als Mittelwert zwischen dem 28.02. und dem 01.03. ergänzt werden. Bei einem 360-Tage-Kalender weist jeder Monat 30 Tage. Die fehlenden 5 oder 6 Tage (Abhängigkeit vom Schaltjahr) wurden in jedem Jahr in gleichen Zeitintervallen eingefügt. Die Bezeichnungen der Klimaprojektionen wurden entsprechend um den Zusatz „_norm_calender“ ergänzt (s. Tabelle 3).

Es muss außerdem beachtet werden, dass das Enddatum der Zeitreihen für die folgenden Projektionen vom 31.12.2100 abweicht.

- Für CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r26_r1 (ID 11, s. Tabelle 3) ist der 31.12.2099 das Enddatum.
- Für CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r45_r1 (ID 12) ist der 30.11.2099 das Enddatum.
- Für CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r85_r1 (ID 13) ist der 31.12.2099 das Enddatum.

Zusätzlich war für einige Datensätze eine Ergänzung fehlender Rasterzellen mittels Interpolation notwendig, da die originalen Daten nicht den gesamten Modellraum abdeckten. Die betreffenden Zellen sind an den östlichen und südlichen Landesgrenzen zu finden und notwendig für die einzugsgebietsbezogene Wasserhaushaltsmodellierung.

Darüber hinaus wurden Nebelniederschlagsdaten (Körner et al., 2022) für die 21 Klimaprojektionen berechnet. Nähere Ausführungen hierzu können dem Anhang A 1.3 entnommen werden.

2.3.4 Bias-Korrektur für Klimaprojektionen

Die BIAS-Korrektur der MDK-Daten erfolgte elementweise mithilfe der Empirical Robust Quantile Mapping (Boé et al., 2007 und Villani et al., 2014). Dazu wurden zunächst die Unterschiede in den täglichen Quantilen (mit einer Schrittweite von 0,01) zwischen Beobachtung (RDS 2.0) und historischen Modellläufen (MDK) getrennt für jeden Monat über den verfügbaren Überlappszeitraum (1961-2005) ermittelt. Für den Niederschlag wurde zusätzlich eine Korrektur für trockene/nasse Tage integriert. Dadurch kann der Anteil der Niederschlagstage zwischen den beobachteten und modellierten Daten berücksichtigt werden.

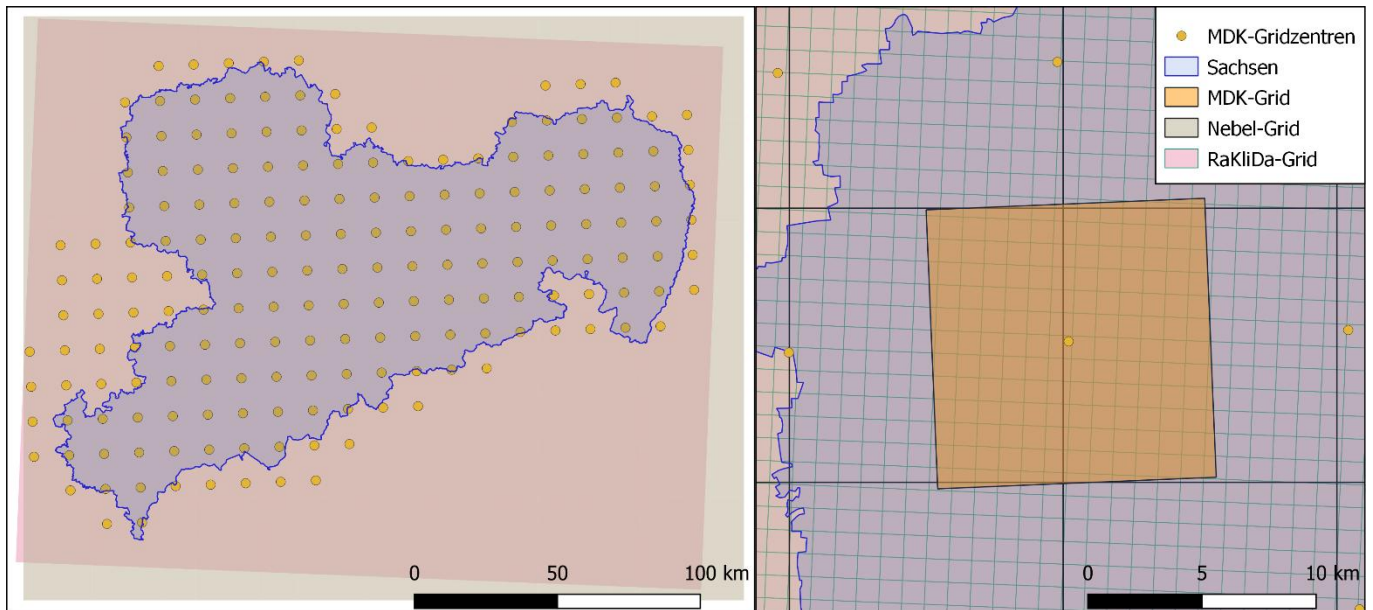


Abbildung 3: Zusammenfassung der meteorologischen Datengitter: historische Daten (RaKliDa mit 1 km Auflösung) und Klimaprojektionen (MDK mit 0,11° und Nebelniederschlag mit 12 km Auflösung) für das KliWES 3.0-Gebiet

Die Rasterzellen des RDS 2.0 und des MDK unterschieden sich hinsichtlich Rasterweite und räumlicher Ausrichtung allerdings erheblich, wie Abbildung 3 (rechts) zeigt. Daher mussten zunächst alle Klimavariablen des RDS 2.0 für jeden Tag und jede Rasterzelle für das MDK-Raster gemittelt werden. Die Rotation der MDK-Gitterdaten wurde hierbei berücksichtigt. Anschließend erfolgte die Anwendung der abgeleiteten Korrekturen auf den gesamten Zeitraum von 1961-2100 für jede Variable.

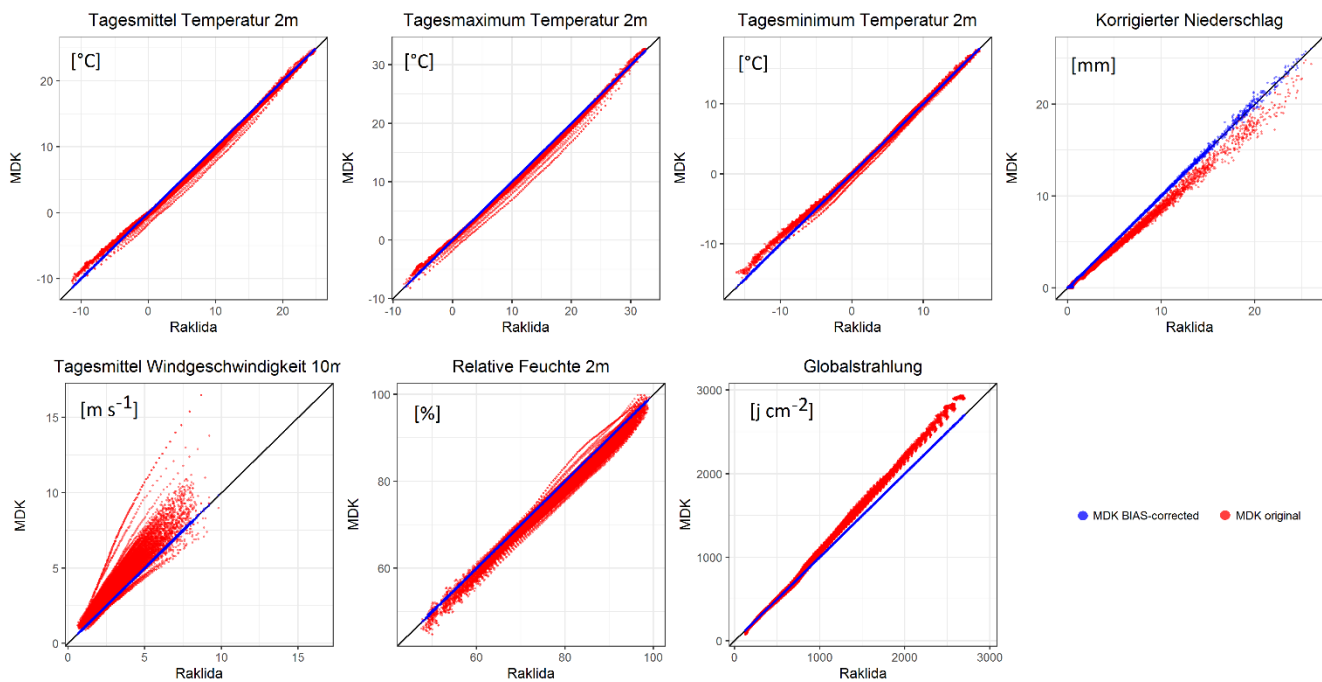


Abbildung 4: Beispielfhafte Darstellung der diagnostische q-q-Diagramme vor und nach der BIAS-Korrektur verschiedener meteorologischer Variablen für alle Gitterzellen eines MDK-Mitglieds (CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018_r26_r2)

Die BIAS-korrigierten MDK-Daten wurden, wie die unkorrigierte Version im netCDF4-Format, gespeichert. Für jedes MDK-Mitglied wurden diagnostische Diagramme (Abbildung 4) erstellt, die die Quantile der korrigierten und unkorrigierten MDK-Daten mit RakliDa für jede Variable und Gitterzelle vergleichen. Beispielfhaft ist dies hier für die sieben Variablen der Klimaprojektion CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018_r26_r2 in Abbildung 4 dargestellt. Die größten Abweichungen wurden für Windgeschwindigkeitsdaten durch die BIAS-Korrektur angepasst.

2.4 Hydrologische Daten

2.4.1 Durchflussmessreihen

Für die Kalibrierung und Validierung von Wasserhaushaltsmodellen werden als wesentliche Vergleichsgröße Informationen zum Durchfluss benötigt. Sachsen verfügt über eine Vielzahl von Pegeln, welche die entsprechenden täglichen Durchflussdaten lieferten. Allerdings eignen sich für die Kalibrierung eines Wasserhaushaltsmodells nur Pegel, welche möglichst wenige Datenlücken aufweisen und deren Einzugsgebiete nur begrenzt anthropogen beeinflusst sind.

Als Datenquellen für die Durchflussreihen sind folgende zu nennen:

- direkte Bereitstellung durch das LfULG
- das Datenportal iDA
- die interne Datenbank der Professur für Hydrologie, TU Dresden

Im Rahmen einer Vorstudie, der sogenannten Sensitivitätsstudie 2.0 (Hauffe et al., 2023), wurden 84 Durchflusszeitreihen sächsischer Pegel von gering beeinflussten Einzugsgebieten für die weitere Verwendung im Projekt KliWES 3.0 ausgewählt. Zahlreiche weitere Pegel (> 150), die aufgrund von Datenlücken oder fehlenden Messwerten vor 1990 sowie ggf. vorhandenen Beeinflussungen von der Analyse in der Sensitivitätsstudie 2.0 ausgeschlossen wurden, konnten nun zunächst berücksichtigt werden. Für diese Datenreihe erfolgte eine umfangreiche Plausibilitäts- und Qualitätskontrolle. Hierbei wurde auf folgende Aspekte geachtet:

- Beginn und Ende der Messung
- Mittelwert, Minimum und Maximum
- Anzahl und Länge von Datenlücken
- vorhandene Nullwerte in den Datenreihen
- aufeinander folgende konstante Werte
- häufig wiederkehrende Werte

Im Endergebnis fiel die Auswahl auf 80 zusätzliche Pegel, welche für die Kalibrierung und Validierung des Wasserhaushaltsmodells geeignet waren. Zusammen mit den 84 Durchflussreihen aus der Sensitivitätsstudie 2.0 ergaben sich 164 geeignete Pegel. Davon eigneten sich 105 Datenreihen für die Anwendung der sogenannten Differenzenganglinienanalyse, welche in Kapitel 2.5 erläutert wird.

Alle verwendeten Pegel sind in ihrer räumlichen Verteilung innerhalb des Bearbeitungsraums in Abbildung 10 dargestellt. Zudem enthält Tabelle A 2 weitere Informationen zu den Pegeln.

2.4.2 Bewirtschaftungsdaten

Neben den Durchflussreihen der Pegel spielten Bewirtschaftungsdaten eine relevante Rolle. Zu nennen sind hier:

- Talsperrenabgaben zahlreicher Wasserspeicher Sachsens,
- Überleitungen zwischen Fließgewässern,
- Einleitungen von Sumpfungsässern in Fließgewässer sowie
- Abschlüge aus Fließgewässern in Speicher.

Diese Datenreihen waren für die Kalibrierung und Validierung des Wasserhaushaltsmodells notwendig. So sollte sichergestellt werden, dass die Kalibrierung der Parameter unbeeinflusst von anthropogenen

Veränderungen des Einzugsgebietes ist. Die Bereitstellung der Daten erfolgte überwiegend durch die Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV), die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV), die Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG) und die Lausitzer Energie AG (LEAG).

Maßgebliche Beeinflussungen des Gebietswasserhaushalts durch anthropogene Maßnahmen und Bauwerke sind mitunter nur für die jüngere Vergangenheit gut dokumentiert und verfügbar. Daher lag der Fokus bei der Datenbereitstellung auf dem Zeitraum ab 01.01.2000 (wenn möglich ab 1995) bis 31.12.2020.

Grundsätzlich wurden die Zeitreihen nur bis zum 31.12.2020 in das Modell eingebunden, da zu diesem Datum der Simulationszeitraum der Wasserhaushaltsmodellierung endet. In den Szenarienrechnungen konnte keine Bewirtschaftung berücksichtigt werden, da eine Vorhersage der zukünftigen Steuerregeln nicht Bestandteil der Studie war.

Talsperren

Durch die LTV wurden Abgabereihen und Überleitungen für 31 Talsperren in täglicher Auflösung für den genannten Zeitraum zur Verfügung gestellt. Es konnten 30 Talsperren- und Speicherabgaben in die Wasserhaushaltsmodellierung integriert werden. Eine Übersicht der berücksichtigten Talsperren enthält Tabelle A 3.

Überleitungen

Der Abfluss des Rothschnberger Stollens wurde mit den Zeitreihen verschiedener Pegel durch das LfULG bereitgestellt. Ergänzend wurden Zeitreihen für die Muldewasserüberleitung durch die LTV und der Neißewasserüberleitung (Zeitraum 2006- 2020) durch die LMBV zur Verfügung gestellt. Diese Überleitungen konnten ins WHH-Modell ArcEGMO integriert werden.

Bewirtschaftungsdaten des Lausitzer Raums

Die LMBV übergab Datenreihen für den bergbaubeeinflussten Lausitzer Raum in täglicher Auflösung, welche für verschiedene Zeiträume zwischen 2000 und 2023 vorliegen. Es handelte sich dabei um Abschläge in die Speichersysteme sowie Zuleitungen aus den Speichern (Bärwalde, Lohsa II, Dreiweibern und Burghammer) und Durchflüsse einzelner Pegel.

Der Abschlag von Wasser aus der Spree in die Kleine Spree am Wehr Spreewiese konnte nur durch die Differenzenbildung der Pegel Bautzen UP 1 und Spreewiese Verteilerwehr approximiert werden. Als zusätzliche Bedingung wurde dabei der Mindestabfluss der Spree unterhalb des Wehres von $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Uhlmann, et al. 2023) beachtet.

Von der LEAG wurden Zeitreihen zu Entnahmen und Einleitungen von Sumpfungswässern bzw. Kraftwerksanlagen in der Lausitz bereitgestellt. Im Allgemeinen waren die Daten lediglich von Januar 2010 bis Dezember 2022 verfügbar. Nach der Prüfung konnten die Einleitungsmengen aus der Grubenwasserbehandlungsanlage Kringelsdorf (TGB Reichwalde und Nochten) in den Weißen Schöps und Tzschelln (TGB Nochten) in die Spree in das Modell integriert werden. Außerdem ließen sich die Entnahmen und Einleitungen des Kraftwerkes Boxberg in die Oberflächengewässer berücksichtigen. Alle anderen zur Verfügung gestellten Zeitreihen weiterer Beeinflussungen lagen unterhalb des Pegels Spreewitz und hatten auf die Modellgüte keine Auswirkungen, da sie sich unterhalb der letzten Durchflussmessstelle befinden.

Bewirtschaftungsdaten des Leipziger Raums

Durch die MIBRAG wurden mittlere theoretische Sumpfungswassermengen (Zeitraum 2018 bis 2022) für den aktiven Tagebau (Profen und Schleenhain) im Einzugsgebiet der Weißen Elster bereitgestellt. Die Einleitungsorte in die Oberflächengewässer sowie die mittleren Durchflussmengen an den Pegeln Kleindalzig und Böhlen 1 waren ebenfalls vorhanden. Da es sich um mittlere Werte aus dem Zeitraum 2018 bis 2022 handelte, konnten diese lediglich zur Plausibilitätsprüfung beim Vergleich der gemessenen und simulierten Durchflüsse genutzt werden.

2.5 Differenzenganglinienanalyse DIFGA

Bei der Differenzenganglinienanalyse (DIFGA) handelt es sich um ein am IHM (TU Dresden) entwickeltes Verfahren zur inversen Ableitung von verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen aus Beobachtungsdaten von Gebietsniederschlag und Durchfluss am Gebietsauslass. Im Ergebnis liegen Informationen u.a. zum langsamen Grundwasserabfluss und zum sogenannten Restglied auf Monatsbasis vor. Letztere Größe umfasst die reale Verdunstung sowie die Bodenspeicheränderung und entspricht im langjährigen Mittel der realen Verdunstung. Nachfolgend wird die DIFGA-Ausgabegröße Restglied bzw. REST als ETR_{DIFGA} bezeichnet.

Für die Anwendung des DIFGA-Verfahrens ist die Ermittlung der dominierenden hydrogeologischen Lithofaziesseinheit eines Pegeleinzugsgebietes notwendig. Hinter jeder Lithofaziesseinheit stehen drei Parameter, welche zur Beschreibung der Grundwasserspeicher dienen: die Speicherkonstante eines schnellen (CG1) und eines langsamen (CG2) Grundwasserspeichers sowie die maximale Speicherfüllung des schnellen Grundwasserspeichers (SG1max). Letzterer reguliert den Zufluss zu den beiden Speichern.

Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist in Schwarze (1985) sowie Schwarze et al. (2014) zu finden. Abbildung 5 enthält eine schematische Darstellung des DIFGA-Verfahrens.

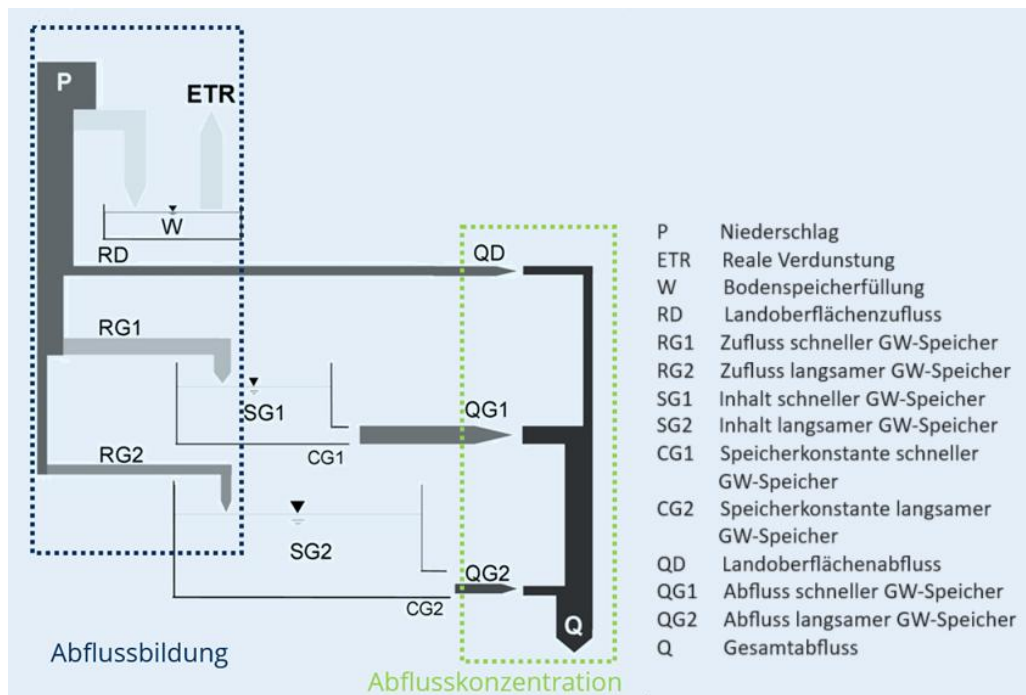


Abbildung 5: Schematische Darstellung zum Ablaufschema der Differenzenganglinienanalyse

Für die Ermittlung der drei Parameter wurden bereits vorliegende DIFGA-Analysen zahlreicher Einzugsgebiete in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen herangezogen und jeweils die mittleren Werte (Median) sowie Minima und Maxima abgeleitet. Diese Analysen erfolgten bereits im Rahmen von Vorarbeiten zum LfULG-Projekt KliWES 2.0 (Hauffe et al., 2022). Grundlage hierfür stellte die hydrogeologische Karte (s. Abschnitt A 1.2.6) dar, in welcher jeder geologischen Gesteinsgruppe eine hydrogeologische Lithofaziesseinheit flächendeckend für Sachsen zugewiesen wurden. In dem verwendeten Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO gehen die drei Parameter CG1, CG2 und SG1max in den sogenannten SLOWCOMP-Ansatz ein und dienen zur Abbildung der Grundwasserspeicher.

DIFGA-Analysen erfordern mindestens 30-jährige Beobachtungszeitreihen für Niederschlag und Durchfluss in anthropogen gering beeinflussten Gebieten. 105 Pegel im Bearbeitungsraum erfüllten diese Anforderung. Da sich letztlich allerdings nur Quellgebiete eigneten, konnten für 70 Modellregionen DIFGA-Ergebnisse abgeleitet und als (weitere) Vergleichsgrößen der Kalibrierung herangezogen werden. Details zur Kalibrierstrategie sind in Kapitel 3.5 nachzulesen.

2.6 Ausweisung der Modellregionen

Für die Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells war zunächst eine Untergliederung des Bearbeitungsraumes erforderlich. Folgende Kriterien waren hierfür relevant:

- Vorhandensein eines Pegels am Gebietsauslass

- Pegel mit mindestens 10 Jahren Durchflussdaten im Zeitraum 2000 bis 2015 (idealerweise möglichst lückenlose Durchflussdaten von 1995 bis 2020)
- Pegel Einzugsgebiete mit einer Mindestgröße von 4,5 km²
- Keine unmittelbare anthropogene Beeinflussung (z.B. Abgabe einer Talsperre) oberhalb eines Pegels

Erfüllte ein vorhandener Pegel diese Kriterien nicht, wurde die betreffende Region mit dem unterstromigen Pegel Einzugsgebiete zusammengelegt. So ließen sich anhand der Teileinzugsgebietsstruktur, der Lage der Pegel und den notwendigen Durchflussdaten insgesamt 164 Regionen ableiten. Nach der Untergliederung des Bearbeitungsraums entsprechend der genannten Kriterien blieben noch Gebiete übrig, die über keinen Pegel am Auslass verfügten oder deren Beobachtungsdaten qualitativ mangelhaft für die Ausweisung einer Region waren. Diese zusätzlichen 19 Gebiete gelten als unbeobachtet und konnten somit auch nicht kalibriert werden.

Alle 183 abgeleiteten Gebiete werden nachfolgend als Modellregionen bezeichnet. Jeder Modellregion wurde eine Regions-ID zugeordnet. Handelte es sich bei einer Modellregion um ein Kopfgebiet, dann entsprach der Umriss der Modellregion dem Pegel Einzugsgebiet. Befand sich die Modellregion hingegen unterhalb eines Pegels, so erstreckte sie sich vom Oberlieger- bis zum jeweiligen Unterliegerpegel.

Die 183 Modellregionen wurden in drei Kategorien eingeteilt:

- Kategorien 1: Modellregion mit gemessenen Durchflussdaten und DIFGA-Ergebnis (Anzahl 70),
- Kategorien 2: Modellregion mit gemessenen Durchflussdaten und ohne DIFGA-Ergebnis (94) sowie
- Kategorien 3: Modellregion ohne gemessene Durchflussdaten und ohne Kalibrierung (19).

Die Anzahl der Modellregionen war vorläufig, da sich mit Abschluss der Evaluierung des unkalibrierten Modells (s. Abschnitt 3.4) noch Änderungen ergaben. Die endgültige Festlegung bezüglich der zugewiesenen Kategorie je Modellregion ist in Abbildung 9 dargestellt.

3 Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO

3.1 Informationen zum Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO und verwendeten Ansätzen

Das Modellsystem ArcEGMO wurde durch das Büro für Angewandte Hydrologie Berlin (BAH) entwickelt. Es kam bereits in KliWES 1.0 und 2.0 für die flächendeckende Wasserhaushaltsmodellierung in Sachsen bezüglich des Beobachtungszeitraums sowie mehrerer Klimaprojektionen zum Einsatz. Die nachfolgende Modellbeschreibung stützt sich daher auf Schwarze et al. (2014) sowie Hauffe et al. (2022) unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Weiterentwicklungen.

ArcEGMO ist GIS-basiert und modular angelegt. Zudem ist das Modellsystem offen konzipiert, sodass an definierten Schnittstellen andere Modelle eingebunden werden können. Im Modell sind für die verschiedenen Kompartimente (z.B. Abflussbildungsebene ABI) diverse Modellansätze integriert, die vom Nutzer für die jeweilige Aufgabenstellung gewählt werden können.

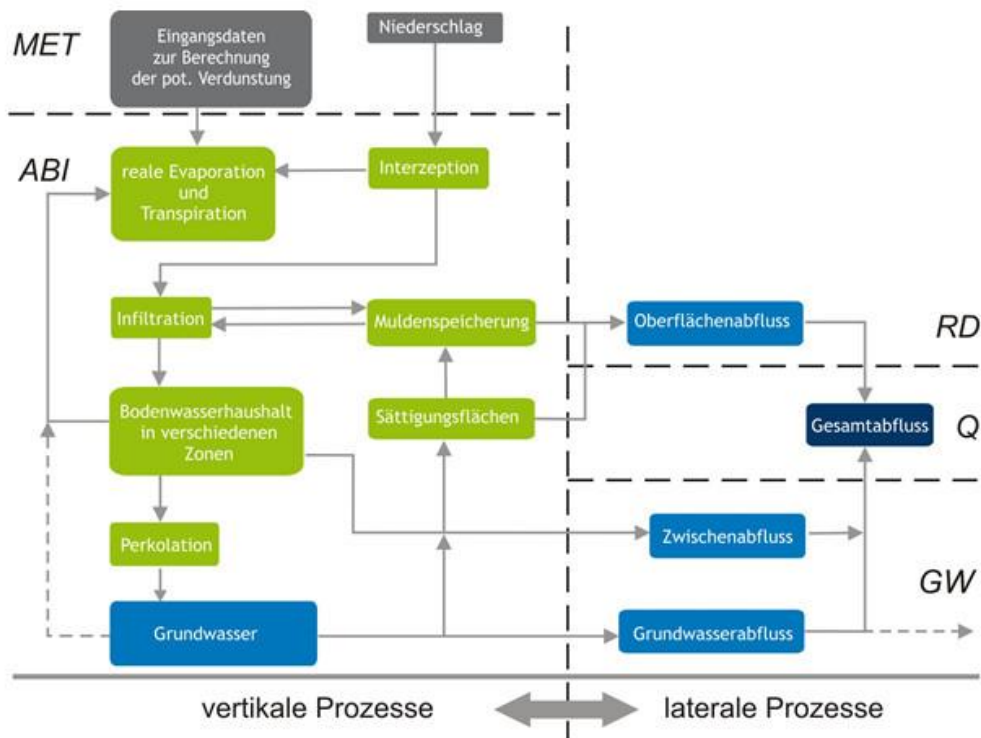


Abbildung 6: Schematische Modellstruktur von ArcEGMO (BAH, 2025)

Nachfolgend ist ein Überblick bezüglich der verwendeten Ansätze aufgeführt:

- Schneedynamik: Grad-Tag-Verfahren (Knauf),
- Potentielle Verdunstung: Grasreferenzverdunstung nach FAO (Allen et al., 1994)
- Pflanzenwachstum: statisch, dynamisch mit Zeitfunktion für Wurzeltiefe und LAI, VEGEN-Ansatz (für Ackerflächen),

- Interzeption: abflussloser Einzelspeicher mit Überlauf,
- Infiltration: Ansatz nach Holtan (1961),
- Bodenwasserdynamik: überarbeitetes Mehrschicht-Kapazitätsmodell nach Koitzsch (1977) und Glugla (1969) mit
- Kapillaraufstieg: KapRed-Ansatz (BAH, 2025)
- Grundwasserabfluss: SLOWCOMP (Schwarze, Dröge, & Opherden, 1999),
- Direktabfluss: Ansatz der Kinematischen Welle,
- Fließprozesse im Gewässer: Speicherkaskade nach Kalinin-Miljukov,
- Wechselwirkung Oberflächen-/Grundwasser: Auenmodell (BAH, 2025)
- Bewirtschaftung: Einleitungen, Entnahmen, Talsperre, Nachführung.

Abgesehen von einer Erweiterung der Bewirtschaftungsmaßnahmen wurden dieselben Ansätze wie in KliWES 2.0 verwendet. Es erfolgten allerdings für einige der Ansätze inhaltliche Anpassungen oder Änderungen hinsichtlich der Parametrisierung. Nähere Informationen hierzu können dem Abschnitt 0 entnommen werden.

Die räumliche Modellgliederung erstreckt sich vom Pegel Einzugsgebiet über Teileinzugsgebiete bis hin zu den Hydrotopen. Letztere stellen die kleinste Modelleinheit dar, für die Wasserhaushaltsberechnungen erfolgen. Meteorologische Eingangsdaten können sowohl als Stationsdaten als auch in Form von Rasterdaten verarbeitet werden. Hinsichtlich der Bodenparametrisierung ist eine variable Anzahl an Bodenhorizonten je Hydrotop möglich. Das Grundwasser wird auf Hydrotopebene stets durch zwei parametrisierbare Einzellinearspeicher repräsentiert. Weitere Informationen zum Modellsystem ArcEGMO sind in Pfützner et al. (2007) sowie unter BAH (2025) zu finden.

3.2 Änderungen am Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO in KliWES 3.0

Ursprünglich wurde eine Nutzung der identischen ArcEGMO-Modellversion aus dem Vorgängerprojekt KliWES 2.0 angestrebt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu KliWES 3.0 zu gewährleisten. Lediglich zusätzliche Ausgabegrößen und ein neues Ausgabedatenformat sowie die Integration einer Schnittstelle zum netCDF4-Datenformat für die Verarbeitung des meteorologischen Inputs durch den Modellentwickler waren vorgesehen (s. Abschnitt 3.2.2).

Aufgrund umfangreicher Untersuchungen zu Prozessabbildungen und Parametereinstellungen im Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO, welche im Rahmen von

- nachträglichen Analysen der WHH-Ergebnisse aus KliWES 2.0,
- der Studie "Machbarkeit der Wasserhaushaltsmodellierung im Lausitzer Braunkohlraum" (Pahner et al., 2023) mit standardisierten ArcEGMO-Modelltests sowie
- fortgesetzten Tests und Untersuchungen zur Gewährleistung einer guten Modellierungspraxis in KliWES 3.0

erfolgten, ergab sich allerdings zusätzlicher Anpassungsbedarf.

3.2.1 Weiterentwicklung und Anpassungen von ArcEGMO zur Qualitätssicherung basierend auf Modelltests

Innerhalb von KliWES 2.0 (Hauffe et al., 2022) konnte keine detaillierte Auswertung der Modellergebnisse speziell auf Hydrotopenebene realisiert werden. Dies erfolgte im Vorfeld der erneuten Modellierungen in KliWES 3.0 und führte zur Identifikation einzelner Auffälligkeiten:

- Einzelne Böden der BK50 wiesen in den unteren Horizonten einen sehr hohen Skelettanteil mit teilweise über 90 Vol% auf. Infolge der Anwendung der modellinternen Skelettkorrektur reduziert sich das Porenvolumen in den betreffenden Horizonten sehr stark. Bei unveränderter Perkulationsrate verursachte dies einen bodeninneren Rückstau, welcher mitunter bis zur Bodenoberfläche reichte. Hydrotopen mit den stark skeletthaltigen Böden besaßen daher stark erhöhte Werte des hypodermischen Abflusses und des Landoberflächenabflusses im Gegensatz zur Umgebung.
- In KliWES 2.0 wurde kein Sandgehalt für die verschiedenen Bodenarten eingelesen. Nur bei Vorgabe dieses Körnungsanteils können jedoch auf Ackerflächen vegetationsbedingte Makroporen berücksichtigt werden.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen sowie ausgehend von früheren Studien (Pahner et al., 2023, Hauffe et al., 2022) hat sich die Durchführung von systematischen Modelltests als sinnvolle Maßnahme zur Qualitätssicherung erwiesen. Die fortgesetzte Testung von verschiedenen Modellreaktionen lieferte folgende Ergebnisse inkl. der daraus resultierenden Modelländerungen:

- In KliWES 2.0 wurde nur der Tongehalt für jede Bodenschicht in ArcEGMO eingelesen. Die Modelltests zeigen jedoch, dass auch Schluff- und Sandgehalt für die Modellierung notwendig sind. Die bisher fehlenden Angaben wurden basierend auf Informationen der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (Eckelmann et al., 2005) ergänzt. Hierzu wurden die in der BK50 enthaltenen Angaben der Bodenarten genutzt, um die Körnungsanteile von Sand und Schluff für jeden Horizont abzuleiten. Vor allem der Sandgehalt wird für die modellinterne Bestimmung vegetationsbedingter Makroporen auf Ackerflächen benötigt.

- Für jede Bodenschicht wird in ArcEGMO ein Makroporositätswert berechnet. Die Makroporen als präferentielle Fließwege ermöglichen den direkten Wasserfluss aus dem oberflächennahen Wasser in den langsamen Grundwasserspeicher. Maßgebliche Einflussgrößen sind dabei der Skelett- und Tonanteil eines Horizonts sowie dessen Tiefe im Verhältnis zur maximalen Tiefe landnutzungs-gebundener Makroporen. Die Wichtung der drei Einflussgrößen erfolgt über vom Anwender vorzugebende Faktoren. Bei Verwendung der Wichtungsfaktoren aus KliWES 2.0 besitzt der Skelettanteil einen dominanten Einfluss auf die Makroporosität. Einige Böden der BK50 weisen jedoch einen steigenden Skelettanteil mit zunehmender Tiefe auf. Folglich würde das zu einem eher unrealistischen Anstieg der Makroporosität über die Tiefe führen. Um dies zu verhindern, wurde der Wichtungsfaktor des Skelettanteils auf Null gesetzt und hat daher keinen Einfluss auf die Makroporenberechnung.

- Sensitivitätsuntersuchungen zum Einfluss von hohen Skelettanteilen zeigten, dass sich eine pauschale Reduzierung aller Angaben des Skelettanteils > 70 Vol% auf den Wert von 70 Vol% günstig auswirkt. Im Ergebnis tritt bei den betreffenden Böden zwar immer noch ein erhöhter hypodermischer Abfluss sowie Landoberflächenabfluss gegenüber benachbarten Flächen auf. Der bodeninnere Rückstau kann mit dieser Kompromisslösung aber erheblich reduziert werden.

- Die Modellierung für Seeflächen erfolgte bisher nach der Bilanzgleichung $RO = P - (See)ETR$. Im Falle von $P - ETR > 0$ gelangte das Wasser direkt zum Abfluss. Da Standgewässer modellintern über keinen separaten Seespeicher verfügten, sondern stattdessen der langsame GW-Speicher als solcher fungierte, erfolgte entsprechend der Bilanzgleichung keine Speisung dieses Speichers durch Niederschlagswasser. Gleichzeitig war aber bei $P - ETR < 0$ eine Zehrung aus dem langsamen GW-Speicher möglich, so dass sich der Speicherinhalt über die Zeit erheblich reduzieren konnte. In Einzugsgebieten mit hohem Wasserflächenanteil führte das in der Folge zu einer (nicht zu vernachlässigenden) Verfälschung von Grundwasserneubildung und Speicherinhalt. In KliWES 3.0 erfolgte daher die Modellierung von Seeflächen nach dem Ansatz $RG2 = P - (See)ETR$, um einen Zufluss zum langsamen GW-Speicher zu gewährleisten. Bei $P - ETR < 0$ reduziert sich weiterhin die Speicherfüllung des GW-Speichers, bei $P - ETR > 0$ erfolgte nun aber eine Auffüllung. Die Verluste aus dem Speicher konnten so reduziert werden.

- Der Auenansatz in ArcEGMO dient der Abbildung des Austauschs zwischen grundwassernahen Auenflächen und dem Fließgewässer. Dabei zeigt der Test des Auenmoduls, dass der Austausch jedoch primär nur in Richtung des Fließgewässers stattfindet. Die Reinfiltration vom Fließgewässer in die Grundwasserspeicher der Auenflächen bei längeren Trockenperioden ist sehr gering. Ursache hierfür ist die modellinterne Begrenzung der reinfiltrierenden Wassermenge auf das im Gewässerabschnitt

gespeicherte Wasservolumen. Ein modifizierter Auenansatz ermöglicht nun eine realistischere Reinfiltration, wobei sowohl das Gewässervolumen als auch der aktuelle Durchfluss berücksichtigt werden.

- Während der Testung des Auenansatzes bezüglich der Reinfiltration vom Fließgewässer in die Grundwasserspeicher der Auenflächen wurde ein Fehler in der Modellierung des Grundwasserspeichers identifiziert. Obwohl bei vollständig trockenen Bedingungen dem Grundwasserspeicher nichts zufließt, konnte sich dieser wieder von selbst füllen. Es wurde fälschlicherweise eine vorhandene, aber jahreszeitlich bedingte Abnahme der Grundwasserzehrung vom Modell als Grundwasserspeicherfüllung interpretiert. Das fehlerhafte Modellverhalten wurde entsprechend durch BAH korrigiert.
- Da in ArcEGMO der Grundwasserflurabstand als statische Größe ohne zeitliche Veränderung implementiert ist, findet keine direkte Rückkopplung zwischen Verdunstung, kapillarer Aufstiegsrate und Grundwasserflurabstand statt. Daher übernimmt der KapRed-Ansatz die Reduktion des Kapillaraufstiegs in Abhängigkeit der Grundwasserspeicherfüllung. Der Test dieses konzeptionellen Ansatzes zeigte, dass er sowohl für grundwassernahe Auenflächen als auch für alle anderen Vegetationsflächen wirksam ist. Auf vegetationslosen Flächen erfolgt jedoch keine Reduktion des kapillaren Aufstiegs.
- Im Rahmen der Modelltests wurde weiterhin untersucht, bis zu welchem Grundwasserflurabstand ein signifikanter kapillarer Aufstieg stattfindet. Es zeigte sich, dass dafür der Grundwasserflurabstand nicht kleiner als die Summe aus landnutzungsabhängiger Wurzeltiefe und maximaler kapillarer Aufstiegshöhe sein darf. Ob der Grundwasserflurabstand dabei die Gesamtbodentiefe überschreitet, ist nicht relevant. Resultierend hieraus wurde die Parametrisierung der Wurzeltiefen sowie des Kapillaraufstiegs eingehend geprüft. Im Ergebnis führte dies zu einer Reduktion von Wurzeltiefen für vier Landnutzungsklassen (Landnutzungs-IDs 1210, 1230, 1240 und 1300, s. Tabelle A 4) sowie zu einer Verringerung der kapillaren Aufstiegshöhen. Hierdurch konnte die häufig auftretende Überschätzung der Zehrung vermindert werden.
- Für die Lithofaziesseinheit Lockergestein wurde die Aufteilung der Perkolation auf zwei Grundwasserspeicher ausgeschaltet, so dass die Tiefenversickerung nur noch in den langsamen Grundwasserspeicher gelangt. Zuvor erreichte diese vornehmlich den schnelle GW-Speicher. Der langsame GW-Speicher erhielt einen geringen Anteil der Perkolation. Da die Zehrung auf grundwassernahen Flächen, welche in Lockergesteinsgebieten häufiger vorkommen, aus dem langsamen GW-Speicher erfolgt, führte dies im Ergebnis zu einem starken Rückgang im Speicherinhalt. Indem die maximale Speicherfüllung des schnellen Grundwasserspeichers auf Null gesetzt wurde, fließt die Tiefenversickerung für alle Lockergesteinsgebiete vollständig dem langsamen GW-Speicher zu.

3.2.2 Weiterentwicklung und Anpassungen von ArcEGMO durch den Modellentwickler

Neben den Modellanpassungen auf Basis der Modelltests wurden durch BAH zusätzliche Modellausgaben speziell für den Boden- und Grundwasserhaushalt implementiert. Hierbei handelt es sich zum einen um die Infiltration in die oberste Bodenschicht und zum anderen um die Zehrung aus dem langsamen Grundwasserspeicher infolge von Kapillaraufstieg und direktem Wasserentzug bei geringen Flurabständen. Die Ausgabegröße für den Zufluss zum langsamen Grundwasserspeicher enthält wie in KliWES 2.0 den Austausch zwischen Boden- und Grundwasser inklusive der Grundwasserzehrung. Die reine Grundwasserneubildung als positiver Zufluss konnte nun in als Differenz von Grundwasserzufluss und -zehrung ermittelt werden.

Darüber hinaus wurde durch BAH eine Schnittstelle zum Dateiformat netCDF4 integriert, welches nun das Einlesen des meteorologischen Inputs ohne vorherige Umformatierung erlaubt. Das Network Common Data Format (netCDF) ist ein binäres Dateiformat zur standardisierten Datenspeicherung inklusive den Datensatz beschreibende Metadaten. Es findet vor allem im Wissenschaftsbereich zur effizienten und maschinenunabhängigen Datenverarbeitung Anwendung.

Zudem ermöglichte BAH die Ablage von ArcEGMO-Ergebnisdateien in einem binären Datenformat. Im Gegensatz zur Ausgabe von ascii-Dateien ist die Schreibgeschwindigkeit des Binärformats wesentlich höher bei gleichzeitiger Minimierung des benötigten Speicherbedarfs.

3.3 Hydrotopbildung und Modellaufbau für ArcEGMO

In ArcEGMO existieren die räumlichen Modellierungsebenen Gebiet, Teilgebiet und Hydrotop mit jeweils zugeordneten Modellparametern. Hydrotope werden auch als Elementarflächen bezeichnet und stellen die kleinste Flächeneinheit bezüglich der Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen dar. Gebiete werden als Modellregion bezeichnet und weisen am Gebietsauslass in den überwiegenden Fällen einen Pegel auf (s. auch Kapitel 2.6).

Aufgrund der Erweiterung des Bearbeitungsraums war eine Hydrotopbildung für die zusätzlich zu modellierenden Flächen der Lausitzer Neiße und der sächsischen Bergbauregionen erforderlich. Anstatt nur in diesen Räumen die Hydrotope neu zu bilden und diese mit der bestehenden Hydrotopstruktur aus KliWES 2.0 zu verbinden, war es jedoch zielführender, die Hydrotopbildung für den gesamten KliWES 3.0-Raum erneut durchzuführen. Dieses Vorgehen bot eine Reihe von Vorteilen:

- Hinsichtlich der Mindestgröße der Hydrotope musste nicht zwangsläufig der Grenzwert aus KliWES 2.0 verwendet werden. Die Vorgabe einer Mindestgröße diente zur Reduzierung der Anzahl von Kleinstflächen und damit einer entsprechenden Generalisierung. Dies stellte einen Kompromiss zwischen möglichst genauer Abbildung der realen Verhältnisse, vorhandener Geodatenbasis und der

benötigten Modellrechenzeiten dar. In KliWES 2.0 führte die Mindestgröße von 100 m² zu unverhältnismäßig hohen Rechenzeiten bei gleichzeitig nicht eindeutig zu definierendem Mehrgewinn bezüglich der Abbildungsgenauigkeit. Daher besitzen die Hydrotope in KliWES 3.0 eine minimale Größe von 10.000 m².

- Unter Einhaltung der Mindestgröße von 10.000 m² ergaben sich für den gesamten Bearbeitungsraum ca. 425.000 Hydrotope. Aufgrund der deutlich geringeren Hydrotopanzahl im Vergleich zu KliWES 2.0 (ca. 1,3 Mio.) waren die Hydrotopdaten selbst sowie die Simulationsergebnisse auf Hydrotopebene schneller zu verarbeiten und benötigten weniger Speicherplatz.
- Zudem ermöglichte die geringere Hydrotopanzahl erheblich kürzere Rechenzeiten von ArcEGMO, vor allem im Hinblick auf die Simulation der Klimaprojektionen. Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Mindestgröße auf die ArcEGMO-Modellierungszeit sind in Hauffe et al. (2022) und Schwarze et al. (2012) zu finden.
- Da die Teilgebietsstruktur aus KliWES 2.0 ohne wesentliche Veränderung weiterverwendet wurde, ist auf dieser Ebene ein Ergebnisvergleich zwischen KliWES 2.0 und 3.0 möglich.

Die Hydrotopbildung basierte grundsätzlich auf vier Datengrundlagen:

- Teileinzugsgebietsgrenzen,
- Boden,
- Landnutzung und
- Geologie.

Mit Vorliegen aller notwendigen Datengrundlagen und Parameter für die Wasserhaushaltsmodellierung mit ArcEGMO konnten erste Modellläufe durchgeführt werden. Die Modellausgaben wurden auf eventuelle Fehlermeldungen, Warnungen und Vollständigkeit aller Ausgaben geprüft und Anpassungen entsprechend vorgenommen.

3.4 Validierung des unkalibrierten Modells

Ziel der Evaluierung war die umfangreiche Überprüfung des Modells auf Fehler oder Unstimmigkeiten sowie die Ausgabe der Wasserhaushaltsgrößen für allgemeine Plausibilitäts- und Qualitätskontrollen. Folgende Kontrollen wurden durchgeführt:

- Mittelwerte von 2000-2015 verschiedener Wasserhaushaltsgrößen (z.B. reale Verdunstung, hypodermischer Abfluss oder langsamer Grundwasserabfluss) in ihrer räumlichen Verteilung auf Modellgebiets- und Teileinzugsgebietsebene zur visuellen Bewertung

- Gegenüberstellung der Mittelwerte von 2000-2015 für die simulierte reale Verdunstung inkl. Bodenspeicheränderung aus ArcEGMO mit der DIFGA-Ergebnisgröße ETR_{DIFGA} sowie dem simulierten schnellen Grundwasserzufluss RG1 mit der DIFGA-Ergebnisgröße RG1 auf Modellgebietsebene
- Bildung der mittleren Wasserhaushaltsbilanz (2000-2015) und Ableitung der prozentualen Anteile von realer Verdunstung und Gesamtabfluss am Niederschlag für die Modellgebietsebene
- Vergleich der beobachteten und simulierten Durchflüsse der Modellregionen anhand von Gütekriterien
- Einhaltung der physikalisch sinnvollen Grenzen der Wasserhaushaltsgrößen

Beispielhaft sollen hier die räumlichen Verteilungen der mittleren realen Verdunstung $ETR_{ArcEGMO}$ (Abbildung 7) sowie des langsamen Grundwasserzuflusses RG2 (Abbildung 8) grafisch dargestellt werden. Dies erfolgt auf Teileinzugsgebietsebene, um die räumliche Variabilität aufzeigen zu können.

In beiden Abbildungen zeigen sich räumlich plausible Verteilungen der Wasserhaushaltsgrößen $ETR_{ArcEGMO}$ und RG2. Auch liegen die Ergebnisse überwiegend in einem realistischen Wertebereich. So weisen z.B. städtisch geprägte Flächen geringere ETR-Werte auf (s. Abbildung 7), wohingegen auf Wald- und Seeflächen hauptsächlich hohe Verdunstungswerten auftreten.

Einzelne Teilflächen fielen bei der Evaluation des unkalibrierten Modells allerdings auch durch besonders hohe oder sehr niedrige ETR-Werte auf und wurden näher untersucht. Die auftretenden Kombinationen aus Gefälle, Landnutzungs- und Bodeneigenschaften konnten als ursächlich ermittelt werden.

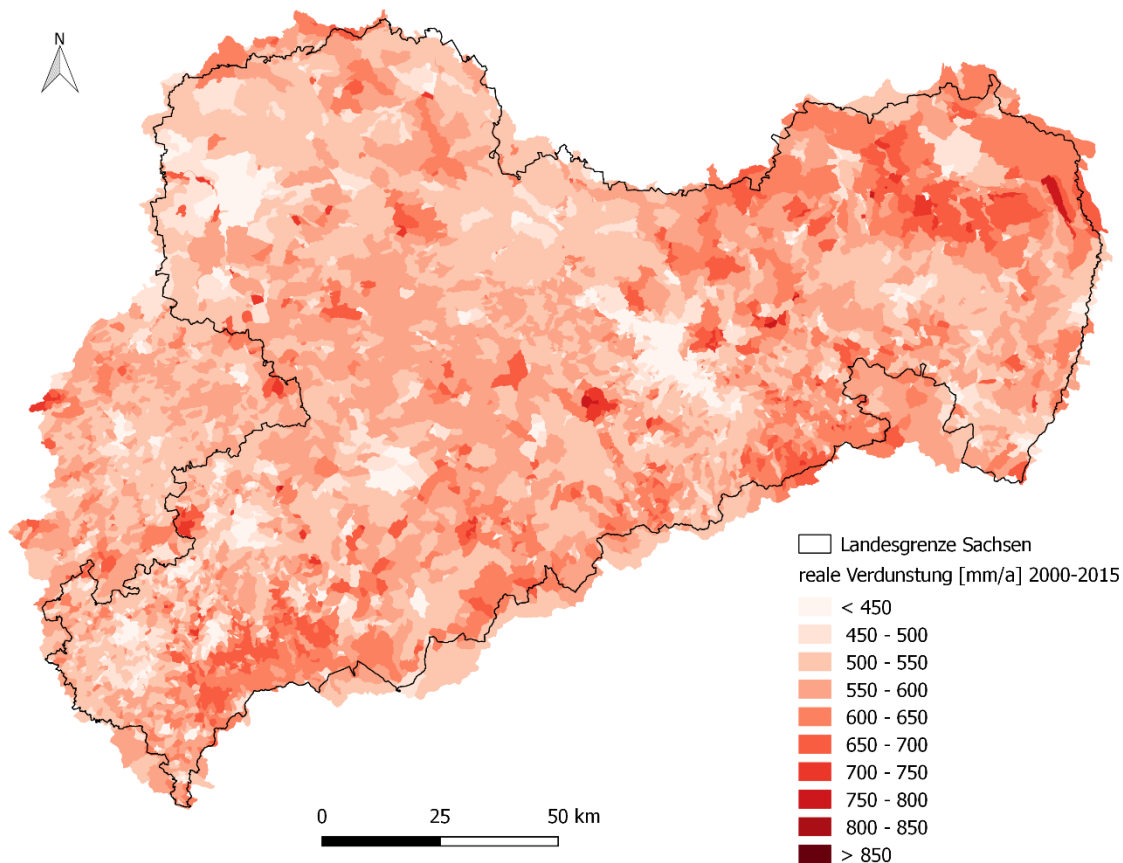


Abbildung 7: Karte der mittleren realen Verdunstung (2000-2015) auf Teileinzugsgebietsebene basierend auf Ergebnissen des unkalibrierten Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO

Die räumliche Verteilung der Größe RG2 (Abbildung 8) folgt teilweise der Niederschlagsverteilung für Sachsen mit höheren Werten in den Gebirgslagen und geringeren Werten in den tieferen Lagen. Auffallend niedrige RG2-Werten finden sich vor allem auf Seeflächen und grundwassernahe Flächen. Für letztere ist dies plausibel, da der langsame Grundwasserzufluss die Summe aus Speicherzufluss und Grundwasserzehrung wiedergibt. Da auf grundwassernahen Flächen Zehrung eine relevante Rolle spielt, ergeben sich geringere Werte für die Größe RG2. Seeflächen hingegen wurden gesondert untersucht. Die Analysen führten zu einer Änderung des Modellierungsansatzes von Seen. Details hierzu finden sich in Kapitel 3.2.

Während die einzelnen Wasserhaushaltsgrößen in ihrer räumlichen Verteilung und ihrer Bandbreite zum größten Teil plausibel waren, zeigten sich größere Unterschiede bei der Gegenüberstellung von simulierter realer Verdunstung $ETR_{ArcEGMO}$ und ETR_{DIFGA} . Hier fiel eine Unterschätzung von $ETR_{ArcEGMO}$ gegenüber den DIFGA-Ergebnissen in allen betrachteten Einzugsgebieten auf. Die Evaluation des unkalibrierten Modells zeigte zudem, dass es gleichzeitig zu systematischen Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Durchflüssen kam. An nahezu allen verwendeten Pegeln lagen deutliche Überschätzungen der simulierten Durchflüsse im Vergleich zu den Beobachtungen vor. Dies unterschied sich

auffällig vom Vorgängerprojekt KliWES 2.0, in welchem das unkalibrierte Modell gleichermaßen Über- wie auch Unterschätzungen der simulierten Durchflüsse im Vergleich zu den Messungen lieferte.

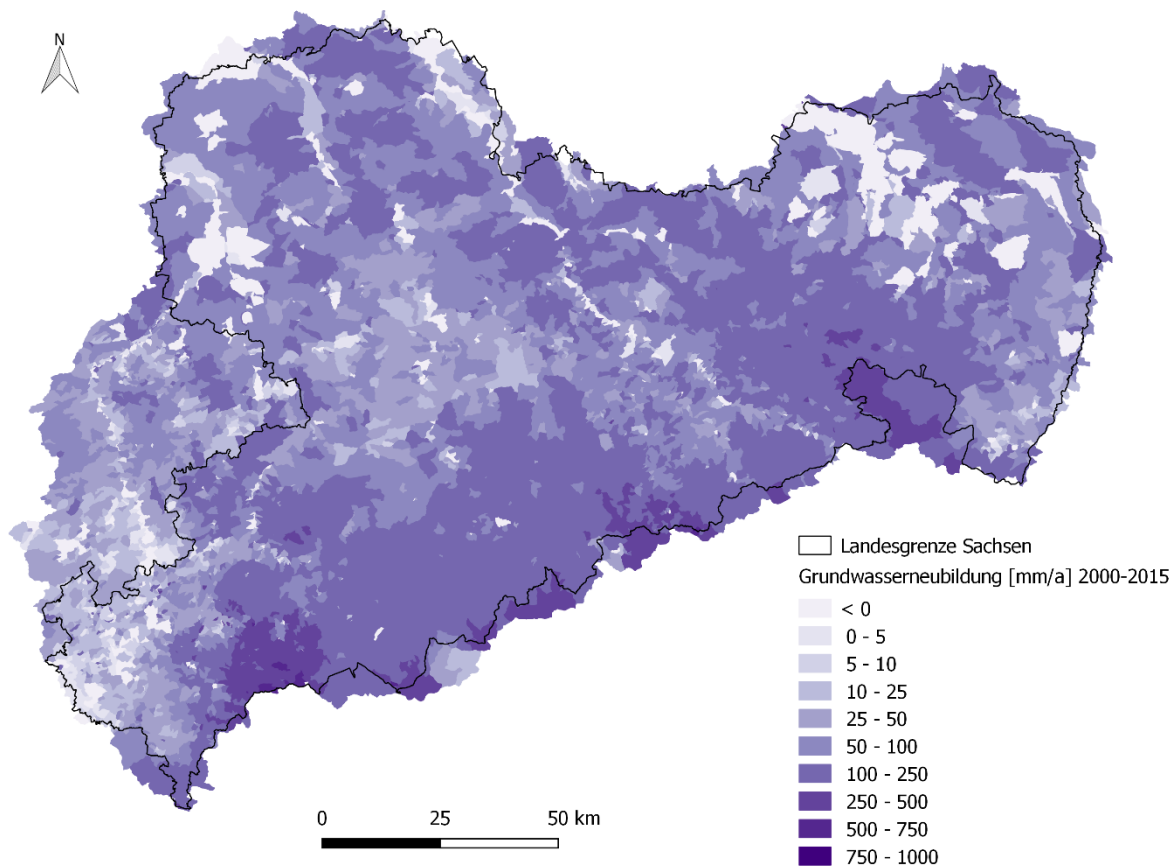


Abbildung 8: Karte des langsamen Grundwasserzuflusses RG2 (Mittelwert 2000-2015) auf Teileinzugsgebietsebene basierend auf Ergebnissen des unkalibrierten Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO

Aufgrund der systematischen Unterschätzung der realen Verdunstung und der Überschätzung der simulierten Durchflüsse resultierten umfangreiche Analysen, um die Ursachen zu ermitteln. Es zeigte sich, dass verschiedene Aspekte zu diesem Ergebnis beitrugen. So führte der aktualisierte Beobachtungsdatensatz RDS 2.0 einerseits zu mehr Niederschlagsinput (s. Abschnitt 2.3.1.1) und andererseits zu einer geringeren potentiellen Verdunstung im Vergleich zu KliWES 2.0. Zudem hatten eine Reihe von Modelländerungen in ArcEGMO (s. Abschnitt 0) zur Folge, dass die reale Verdunstung (u.a. von grundwassernahen Flächen) reduziert wurde. Besonders auf grundwassernahen Flächen traten im Vorgängerprojekt teils unplausibel hohe Verdunstungswerte auf. Die Reduktion war somit sinnvoll und die entsprechenden Änderungen wurden beibehalten. Im Ergebnis dieser Änderungen konnte nun allerdings in der Wasserhaushaltsberechnung der Niederschlagseintrag nicht in ausreichender Menge verdunstet werden, um eine schlüssige Bilanz zu erhalten. Daher wurde die Verwendung eines zweiten meteorologischen Datensatzes für den Beobachtungszeitraum in Betracht gezogen. Ausgehend von diesem zu-

sätzlichen Datensatz ERA5-Land wurde die potentielle Verdunstung ETP_{ERA5} separat berechnet (s. Abschnitt 2.3.1.2). Die ermittelten Werte fielen höher aus als die modellintern ermittelte Grasreferenzverdunstung $ETP_{ArcEGMO}$ unter Verwendung des RDS 2.0. Die ETP_{ERA5} wurde anschließend als eigenständige Eingangsgröße in den Wasserhaushaltsmodellierungen mit ArcEGMO und Raven genutzt.

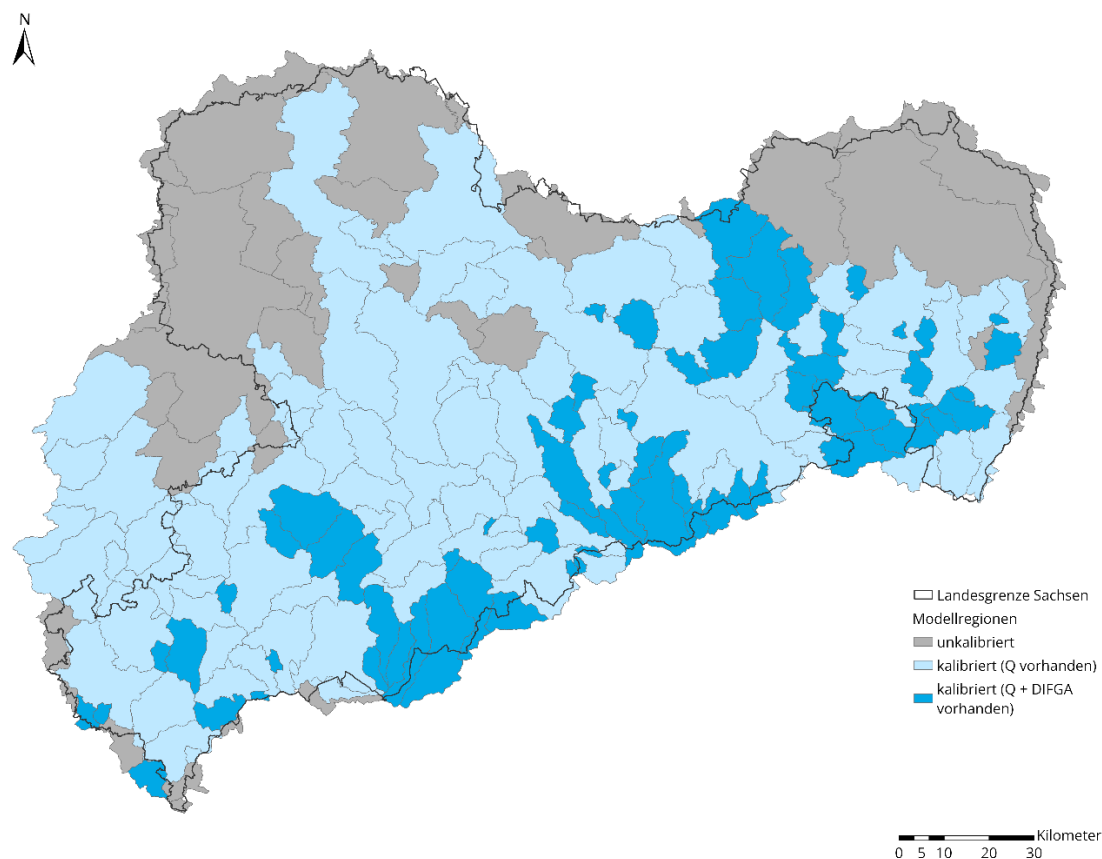


Abbildung 9: Modellraum KliWES 3.0 mit Einteilung des Bearbeitungsraums in Modellregionen mit gemessenen Q-Daten und DIFGA-Ergebnis (dunkelblau, Kategorie 1), mit gemessenen Q-Daten ohne DIFGA-Ergebnis (hellblau, Kategorie 2) und ohne gemessene Q-Daten (grau, Kategorie 3)

Die systematische Überschätzung der simulierten Durchflüsse gegenüber der Beobachtung konnte durch diesen Schritt deutlich reduziert werden. Zudem zeigten Abweichungen nun Über- wie auch Unterschätzungen. Für 13 der insgesamt 164 Modellregionen lagen die Abweichungen zwischen simuliertem und beobachtetem Durchfluss allerdings weiterhin bei über 100%. Nach Überprüfung der Modelleinstellungen und -parametrisierung, um eventuelle Fehler auszuschließen, konnte keine Ursache für diese großen Differenzen gefunden werden. Da die Abweichungen eventuell durch Beeinflussungen der Durchflussreihen hervorgerufen werden, erfolgte nachträglich der Ausschluss dieser Modellregionen von der Kalibrierung. Somit ergab sich insgesamt eine Anzahl von 151 Regionen für die Kalibrierung. Die Verteilung der Modellregionen auf die zuvor definierten Kategorien (s. Abschnitt 2.6) änderte sich hierdurch wie folgt:

- Kategorien 1: Modellregion mit gemessenen Durchflussdaten und DIFGA-Ergebnis (Anzahl 66),
- Kategorien 2: Modellregion mit gemessenen Durchflussdaten und ohne DIFGA-Ergebnis (85) sowie
- Kategorien 3: Modellregion ohne gemessene Durchflussdaten und ohne Kalibrierung (32).

In Abbildung 9 ist die Übersichtskarte dieser Modellregionen mit den dazugehörigen Kategorien dargestellt. Von den 22.200 km² des gesamten Modellraums entfallen ca. 4.050 km² (etwa 18%) auf Modellregionen der Kategorie 1 sowie ca. 13.000 km² (etwa 58%) auf Regionen der Kategorie 2.

Entsprechend der Zuordnung zu den Kategorien 1 und 2 unterschied sich die Kalibrierstrategie für die jeweiligen Modellregionen.

3.5 Modellkalibrierung für ArcEGMO

Ziel der Modellkalibrierung war eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Wasserhaushaltsgrößen wie Verdunstung oder Grundwasserneubildung. Gleichzeitig sollten bezüglich des beobachteten Durchflusses am Pegel insbesondere die Niedrigwasserperioden vom Modell gut wiedergegeben werden. Der dafür genutzte Kalibrierzeitraum erstreckte sich wie in KliWES 2.0 vom 01.01.2000 bis zum 31.12.2015. Mit diesem ließen sich die aktuellen klimatischen Bedingungen bestmöglich wiedergeben. Außerdem fanden innerhalb des Zeitraums keine gravierenden Landnutzungsänderungen statt, welche von ArcEGMO in der verwendeten Modellversion nicht abgebildet werden können. Innerhalb der 16 Jahre mussten für die Kalibrierpegel mindestens 10 Jahre an Durchflussdaten vorliegen.

Als meteorologischer Input für die Kalibrierung der Modellregionen wurde der Kombinationsdatensatz RDS2/ERA5 verwendet, welcher Klimavariablen des RDS 2.0 und die ETP_{ERA5} umfasst.

Hinsichtlich des verwendeten Optimierungsalgorithmus‘ gab es eine Änderung in KliWES 3.0 gegenüber KliWES 2.0. Im Vorgängerprojekt wurde mit AMALGAM ein evolutionärer Algorithmus zur Findung eines einzigen pareto-optimalen Parametersatzes je Modellregion genutzt. Neben der optimalen Lösung war nun in KliWES 3.0 zusätzlich die Angabe von Unsicherheitsbändern bezüglich der Modellergebnisse im Fokus. Daher erfolgte ein Wechsel der Methode zu DREAM bzw. der darin enthaltene Markov Chain Monte Carlo (MCMC) Algorithmus eignen sich insbesondere zur Abschätzung von Unsicherheiten der Kalibrierparameter. Die grundlegende Funktionsweise des MCMC-Algorithmus sowie weitere Details sind in ter Braak (2006), ter Braak und Vrugt (2008) sowie Vrugt et al. (2008) nachzulesen.

Die Kalibrierung der Modellregion unterschied sich je nach Art der verfügbaren Zielgrößen. Für 66 der 151 zu kalibrierenden Modellregionen lagen neben dem gemessenen Durchfluss auch DIFGA-Ergebnisse vor, welche als Zielgrößen bei der Kalibrierung herangezogen werden konnten. Entsprechend den Festlegungen in Kapitel 2.6 gehörten diese Modellregionen somit zur Kategorie 1. Die drei Zielgrößen der Kalibrierung waren:

- die Dauerlinie des täglichen beobachteten logarithmierten Durchflusses (im Bereich der Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1% bis 90%),
- der monatliche Zufluss zum schnellen Grundwasserspeicher RG1 aus DIFGA sowie
- die Jahressummen von ETR_{DIFGA} (als Ergebnis der DIFGA-Analyse).

Bei der erstgenannten Zielgröße wurde der Bereich von 1% bis 90% der Überschreitungswahrscheinlichkeit der Dauerlinie verwendet. Dadurch ergab sich während der Kalibrierung eine Betonung des Niedrig- und Mittelwasserbereichs. Dementsprechend erfolgte keine Anpassung für Hochwasserereignisse, da sie in der Wasserhaushaltsmodellierung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Neben dem beobachteten Durchfluss wurden zusätzlich die aktuellen Jahressummen von ETR_{DIFGA} (Gebietsmittel) als Vergleichsgröße verwendet. Diese Ergebnisgröße konnte mit den Modellausgabegrößen der realen Verdunstung $ETR_{ArcEGMO}$ und der Bodenspeicheränderung ΔS verglichen werden.

Modellregionen der Kategorie 2 (Anzahl 85), welche die Voraussetzungen für eine DIFGA-Analyse nicht erfüllten, verfügten nur über die erstgenannte der drei Zielgrößen für die Modellkalibrierung. Abbildung 10 zeigt die Lage der Kalibrierpegel bezüglich der Modellregionen mit Kategorie 1 (grün gefärbt) sowie Kategorie 2 (gelb gefärbt) innerhalb des Modellraums in KliWES 3.0.

Darüber hinaus wurde eine zusätzliche Randbedingung für die Kalibrierung eingeführt, welche aus beobachteten Grundwasserstandsänderungen im Zeitraum 2000 bis 2015 für den Lockergesteinsbereich in Sachsen abgeleitet wurde. So reduzierten sich die mittleren Grundwasserstände innerhalb der 16 Jahre um ca. 20 cm. Unter Annahme einer (hohen) Porosität von 40 Vol% des Lockergesteins und einem zusätzlichen Puffer wurde im Rahmen der Kalibrierung eine maximale Speicheränderung im langsamen Grundwasserspeicher von -100 mm als Summe über den Kalibrierzeitraum zugelassen. Führten bestimmte Parameterkombinationen zu einer größeren Änderung, wurden diese mit einem sogenannten Strafterm (penalty) versehen und bei der Auswahl des optimalen Parametersatzes nicht berücksichtigt.

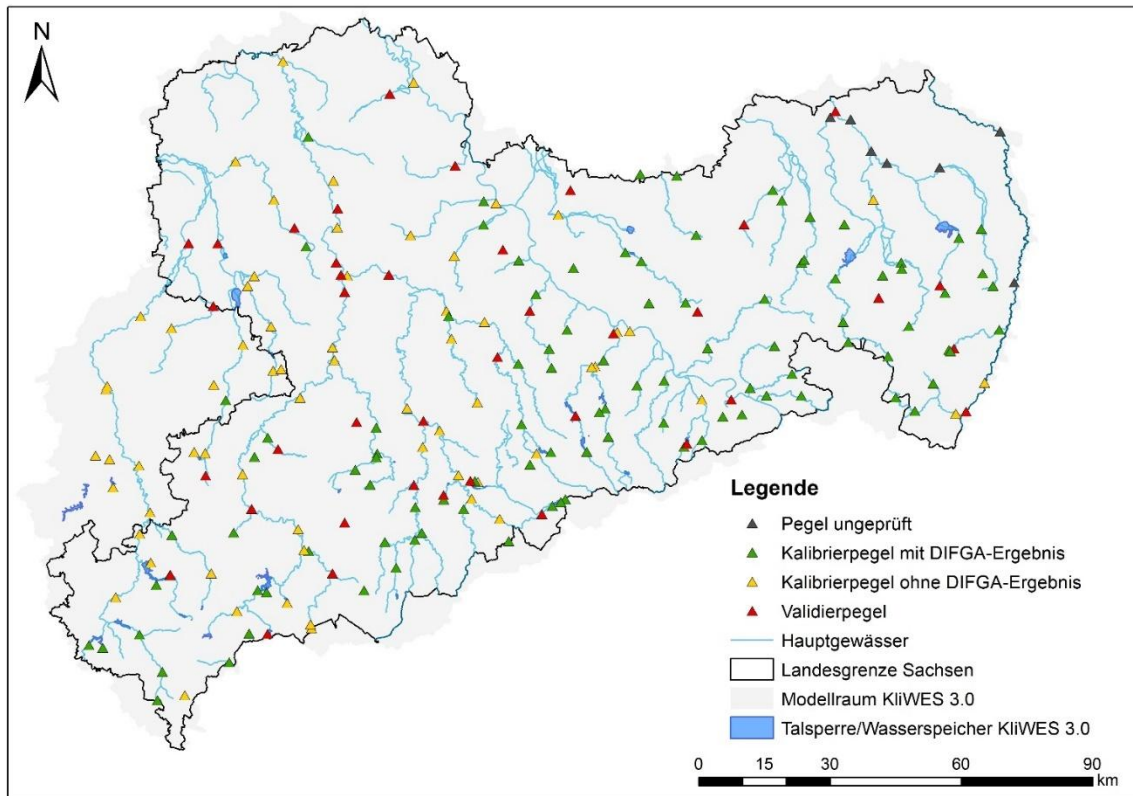


Abbildung 10: Lage der zur Kalibrierung und Validierung verwendeten Pegel innerhalb des Modellraums in KliWES 3.0

Folgende Modellparameter wurden im Rahmen der Kalibrierung regionenspezifisch angepasst:

- Speicherkonstante des schnellen Grundwasserspeichers,
- Rückgangsexponent des Einzellinearspeichers für den Gerinneabfluss sowie
- Lagerungsdichte des Bodens.

Auf jeden Parameter wirkte dabei ein eigener Kalibrierfaktor, welcher im Ausgangszustand (unkalibriert) den Wert 1.0 aufwies und während der Kalibrierung in festgelegten Grenzen variiert wurde. Einen Überblick der Ober- und Untergrenze der Kalibrierfaktoren mit den zugehörigen Modellparametern gibt Tabelle 4. Die ersten zwei genannten Parameter waren bereits Bestandteil der Kalibrierung in KliWES 2.0.

Tabelle 4: Übersicht der Kalibrierparameter für das Modell ArcEGMO mit den Startwerten, Ober- und Untergrenzen der Kalibrierfaktoren

Kalibrierparameter	Startwert Faktor	Untergrenze	Obergrenze
Speicherkonstante des schnellen Grundwasserspeichers	1.0	0.2	1.2
Rückgangsexponent des Einzellinearspeichers für den Gerinneabfluss	1.0	0.1	3.0
Lagerungsdichte des Bodens	1.0	0.8	1.2

Als Gütekriterium zur Einschätzung der Modellanpassung wurde während der Kalibrierung im Rahmen des DREAM-Algorithmus eine Gauss'sche Likelihood-Funktion genutzt.

$$L = -\frac{n}{2} \cdot \log(2\pi) - \frac{n}{2} \cdot \log(\sigma^2) - \frac{1}{2} \cdot \sigma^{-2} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2$$

Dabei steht x_i für die jeweilige beobachtete Vergleichsgröße zum Zeitpunkt i und y_i für die entsprechende simulierte Modellausgabe zum selben Zeitpunkt i . In die Likelihood-Funktion geht auch der Messfehler σ ein, der aus den Minima- bzw. Maximawerten der Vergleichsgrößen x mit

$$\sigma = (\min(x) - \max(x)) / 2$$

geschätzt wurde. Die verwendete Gauss'sche Likelihood-Funktion ist dem in KliWES 2.0 verwendeten Fehlermaß der Summe der Fehlerquadrate ähnlich. Im Fall der Kalibrierung mit j Zielgrößen, wird für jede Zielgröße separat eine Likelihood-Funktion berechnet und anschließend die gleichgewichtete Summe dieser $j = 3$ Funktionen gebildet:

$$L_{ges} = \sum_{j=1}^3 L_j$$

Weiterhin lässt sich die Modellkalibrierung in KliWES 3.0 durch folgende Merkmale beschreiben:

- Weitergabe des beobachteten Durchflusses (anstatt der Simulation in KliWES 2.0) an die unterstromige Modellregion: Damit wurde die Akkumulation von Durchflussabweichungen zwischen Simulation und Beobachtung stromabwärts verhindert. Außerdem ließen sich so sämtliche Modellregionen parallel kalibrieren, was eine enorme Zeitersparnis darstellte.
- Einlesen von gemessenen Talsperrenabgaben und Überleitungsmengen (in KliWES 2.0 nicht berücksichtigt): Damit wurde sichergestellt, dass die regionsspezifische Parameteranpassung ausschließlich auf die Abbildung des natürlichen Wasserhaushalts abzielte und nicht fälschlicherweise aufgrund einer nicht im Modell enthaltenen anthropogenen Beeinflussung erfolgte.

3.6 Validierung des kalibrierten Modells

Die Evaluierung des kalibrierten Modells konnte für Modellregionen der Kategorie 1 und 2 durchgeführt werden. Sie erfolgte einerseits für den Kalibrierzeitraum von 01.01.2000 bis 31.12.2015. Andererseits wurden die Wasserhaushaltsergebnisse des kalibrierten Modells anhand der zwei Zeiträume vom 01.01.1995 bis 31.12.1999 sowie vom 01.01.2016 bis 31.12.2020 validiert. Von den jeweils fünf Jahren mussten für die zur Validierung herangezogenen Pegel (s. Abbildung 10, rot gefärbt) mindestens 2,5 Jahre mit Durchflussdaten belegt sein. Der erste Validierzeitraum von 1995 bis 1999 enthält sehr niederschlagsreiche Jahre und diente somit der Überprüfung zur Abbildung dieser klimatischen Zustände durch das Modell. Der zweite Validierzeitraum von 2016 bis 2020 umfasst hingegen sehr trockene Jahre ab 2018, welche hinsichtlich des Modellverhaltens ebenfalls von besonderem Interesse waren.

Für die Bewertung der Anpassungsgüte diente das Kriterium der Nash-Sutcliffe-Effizienz, welches sich wie folgt errechnet:

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^n(y_i-x_i)^2}{\sum_{i=1}^n(x_i-\overline{x_i})^2}$$

Die beobachtete Vergleichsgröße wird mit x_i zum Zeitpunkt i bezeichnet. Die Variable y_i steht für die entsprechende simulierte Modellausgabe. Der NSE eignet sich vor allem zur Einschätzung der Modellanpassung hinsichtlich der Dynamik, d.h. wie gut die simulierte Modellgröße die Vergleichsgröße im zeitlichen Verlauf abbildet. Für $NSE = 1$ würden Simulationsergebnis und Vergleichsgröße perfekt übereinstimmen. Je kleiner der NSE, desto größer sind die Abweichungen zwischen simulierter Größe y_i und Vergleichsgröße x_i .

Als Vergleichsgrößen wurden die drei Zielgrößen der Kalibrierung für alle Regionen der Kategorie 1 (mit DIFGA-Ergebnis) betrachtet. Verfügte eine Region über kein DIFGA-Ergebnis (Kategorie 2), wurde nur die logarithmierte Dauerlinie der gemessenen Durchflüsse als Vergleichsgröße herangezogen.

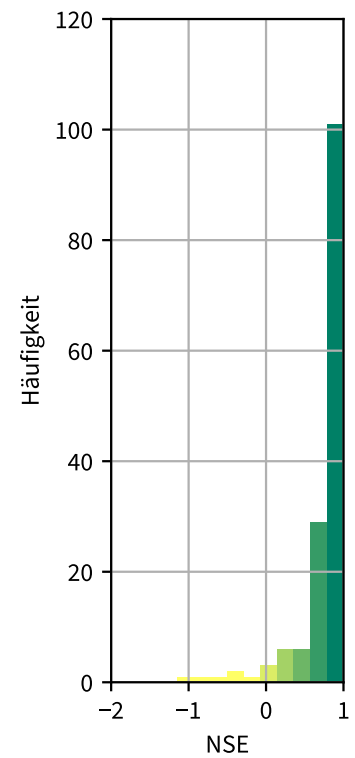
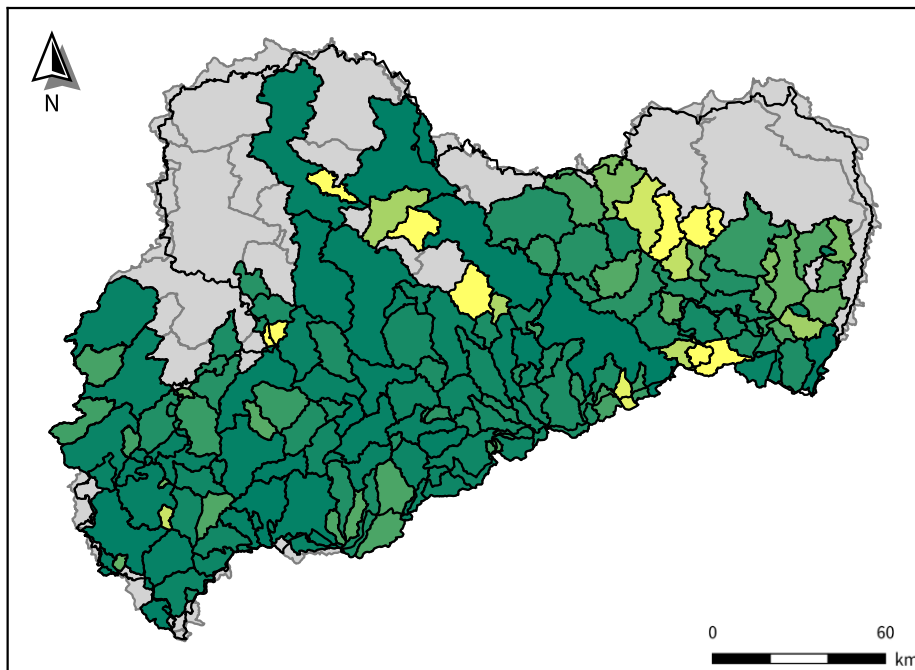
Die Ergebnisse der Evaluierung sind in Abbildung 11 (für die logarithmierte Dauerlinie), Abbildung 12 (für ETR) und Abbildung 13 (für RG1) hinsichtlich der räumlichen Verteilung der NSE-Werte je kalibrierter Modellregion sowie als Häufigkeitsverteilung der NSE-Werte über die entsprechende Anzahl an Modellregionen dargestellt. Die Abbildungen enthalten je Zielgröße die Auswertungen für den Kalibrierzeitraum (Darstellungen oben) sowie den Validierzeitraum (Darstellungen unten).

Dunkelgrüne Regionen weisen dabei eine sehr gute Anpassung ($NSE > 0.6$) aus. Hellgrüne Gebiete repräsentieren NSE-Werte zwischen 0 und < 0.6 . Für einen $NSE < 0$ werden die Modellregionen mit gelb ausgewiesen. Hier gibt es keine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Werten. Alle grau markierten Flächen geben die unbeobachteten Modellregionen (Kategorie 3) wieder.

Anhand der Kartendarstellungen wie auch der Histogramme in Abbildung 11 ist erkennbar, dass für die überwiegende Mehrheit der 151 Modellregionen eine sehr gute Anpassung der simulierten Durchflusswerte an die Beobachtungsdaten für die logarithmierte Dauerlinie für Kalibrier- und Validierungszeitraum erzielt werden konnte. Modellregionen der Kategorie 1 weisen mitunter etwas geringere NSE-Werte im Vergleich zu Modellregionen der Kategorie 2 auf. Da Erstere für drei Zielfunktionen kalibriert wurden, musste eine Kompromisslösung zwischen diesen drei Funktionen gefunden werden. Dies führte teilweise zu einer Verschlechterung der simulierten Durchflüsse gegenüber der Beobachtung, um eine Verbesserung für die anderen beiden Zielgrößen (Monatswerte RG1 und Jahreswerte ETR) zu erzielen. Die mitunter etwas größeren Abweichungen für eine der Zielgrößen wurde als akzeptabel angesehen, um insgesamt eine möglichst realistische Aufteilung auf die verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten zu erlangen. Für Modellregionen der Kategorie 2 war diese Kompromisslösung nicht notwendig, so dass hier für nahezu alle Regionen sehr gute Anpassungen erreicht werden konnten.

Wenige Regionen (Anzahl Kalibrierzeitraum: 8, Anzahl Validierungszeitraum: 5) schneiden im Ergebnis der Evaluierung unzureichend ab, da sie nur eine ungenügende Anpassung von $NSE < 0$ zwischen simulierten und beobachteten Werten der logarithmierten Dauerlinien erreichen.

Kalibrierungszeitraum 2000 bis 2015



Validierungszeitraum 1996 bis 1999 und 2016 bis 2020

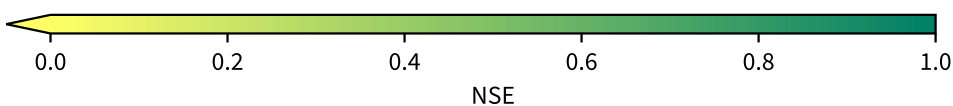
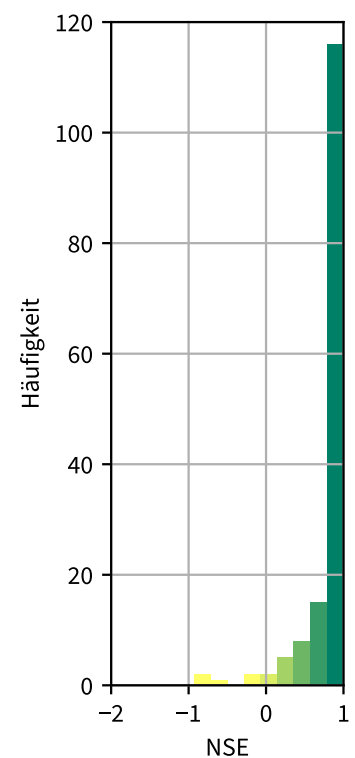
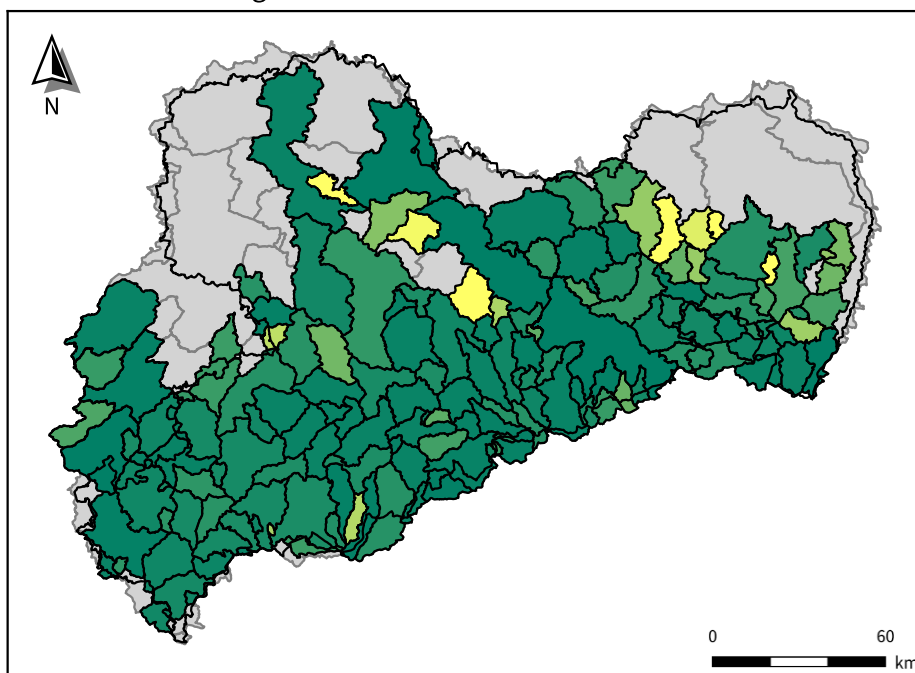


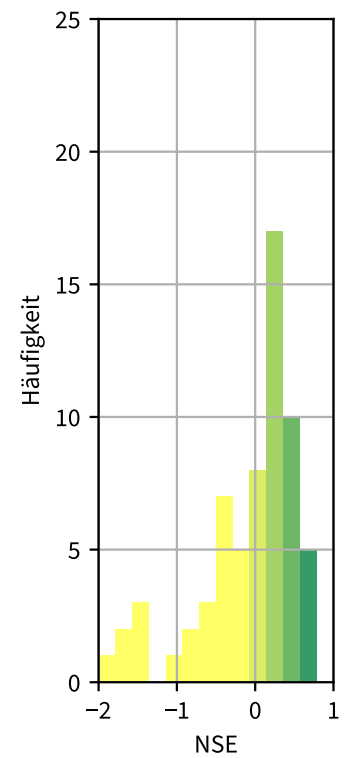
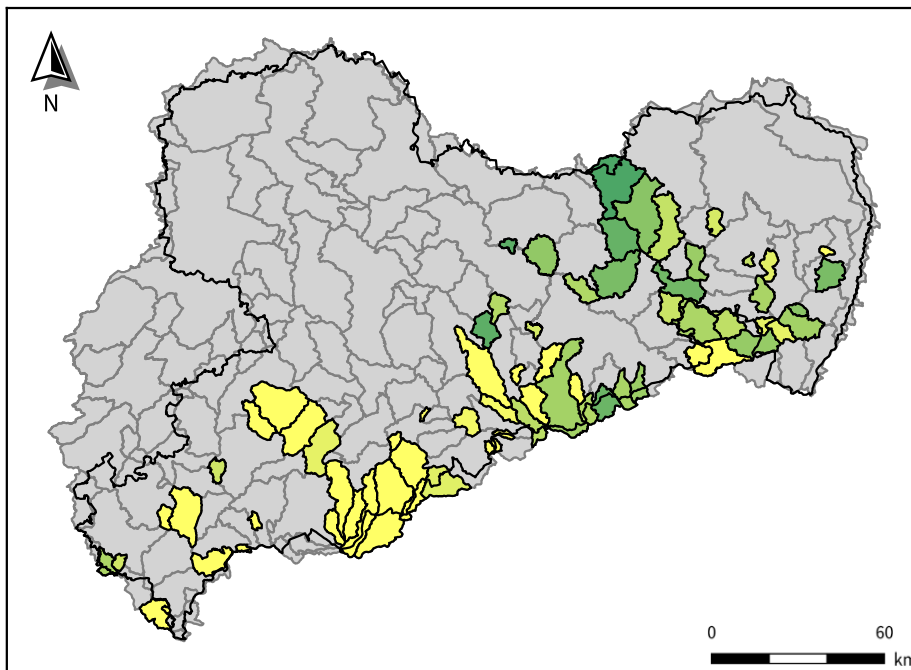
Abbildung 11: NSE für logarithmierte Dauerlinie des gemessenen und simulierten Durchflusses im Bereich der Überschreitungswahrscheinlichkeit 1% bis 90% der kalibrierten Modellregionen (Kategorie 1 und 2) im Kalibrierzeitraum (Karte oben, links) und Validierzeitraum (Karte unten, links) sowie jeweils dazugehörige Häufigkeitsverteilung (Histogramme rechts)

Die Anpassungsgüte hinsichtlich der realen Verdunstung ETR wird für die 66 Modellregionen der Kategorie 1 in Abbildung 12 dargestellt. Im Kalibrierzeitraum erreichen 39 Modellregionen für die Vergleichsgröße ETR_{DIFGA} gegenüber $ETR_{ArcEGMO}$ einen NSE-Wert von > 0 und $< 0,8$. Für 37 Regionen wurden im Validierzeitraum NSE-Werte von > 0 und < 1 erzielt. Dies trifft vornehmlich auf Gebiete in Mittel- und Ostsachsen zu. Modellregionen im Erzgebirgsbereich schneiden hingegen schlechter ab. Von den drei Vergleichsgrößen der Evaluierung fällt die Anpassungsgüte der simulierten $ETR_{ArcEGMO}$ gegenüber ETR_{DIFGA} am geringsten aus.

Hinsichtlich der Vergleichsgröße des schnellen Grundwasserzuflusses RG1 konnte eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Simulation und DIFGA-Ergebnis erzielt werden, wie Abbildung 13 zeigt. 49 Modellregionen erreichen im Kalibrierzeitraum NSE-Werte zwischen > 0 und $< 0,6$ für die Vergleichsgröße $RG1_{DIFGA}$ gegenüber $RG1_{ArcEGMO}$. Im Validierzeitraum liegen für 48 Regionen die NSE-Werte zwischen > 0 und $< 0,8$. Die Anpassungsgüte bezüglich der NSE-Werte ist für den Kalibrierzeitraum auch hier für Gebiete in Mittel- und Ostsachsen etwas besser als im Erzgebirgsbereich. Für den Validierzeitraum zeigt sich hingegen kein eindeutiges Muster in der räumlichen Verteilung der NSE-Werte.

Für alle drei Vergleichsgrößen liegen die maximal erreichten NSE-Werte im Validierzeitraum etwas höher im Vergleich zum Kalibrierzeitraum. Die Anzahl der Modellregionen, welche einen $NSE > 0$ für jede Vergleichsgröße überschreiten, unterscheidet sich hingegen zwischen Kalibrier- und Validierzeitraum nur geringfügig.

Kalibrierungszeitraum 2000 bis 2015



Validierungszeitraum 1996 bis 1999 und 2016 bis 2020

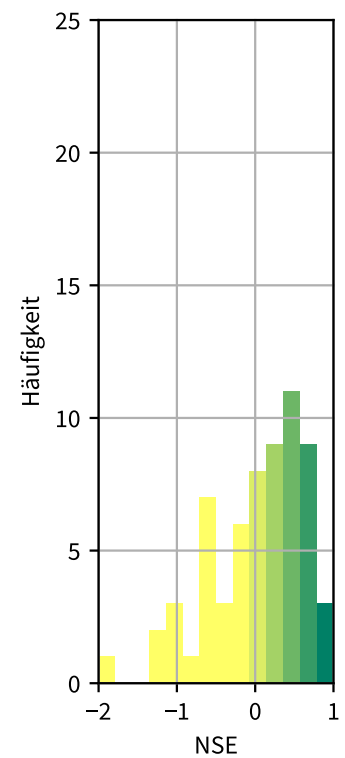
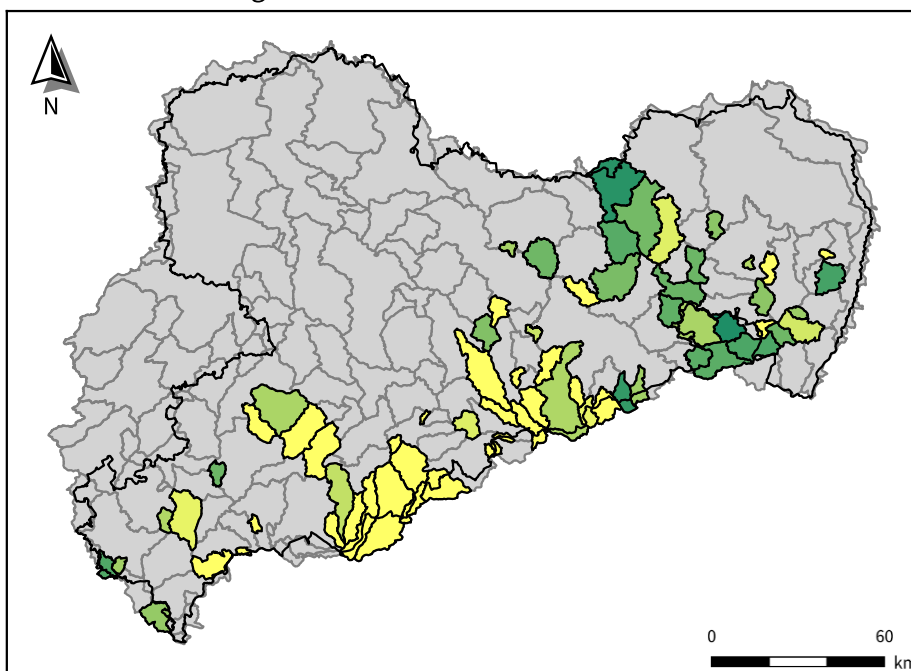
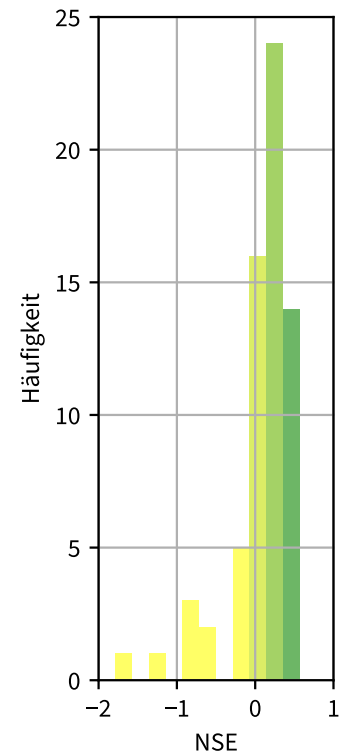
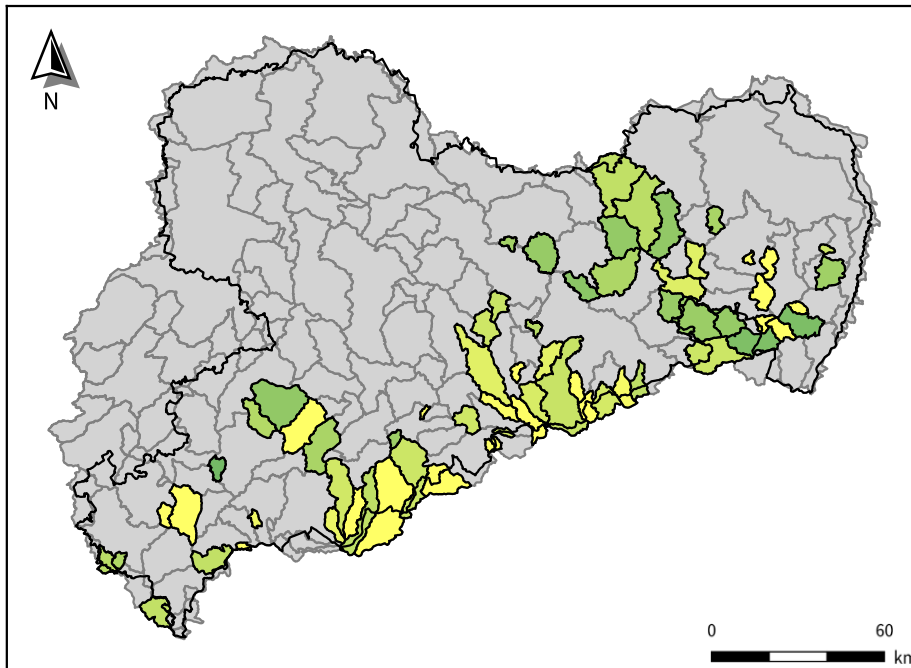


Abbildung 12: NSE für aktuelle Jahressummen von ETR_{DIFGA} und simulierter $ETR_{ArcEGMO}$ der kalibrierten Modellregionen (Kategorie 1) im Kalibrierzeitraum (Karte oben, links) und Validierungszeitraum (Karte unten, links) sowie jeweils dazugehörige Häufigkeitsverteilung (Histogramme rechts)

Kalibrierungszeitraum 2000 bis 2015



Validierungszeitraum 1996 bis 1999 und 2016 bis 2020

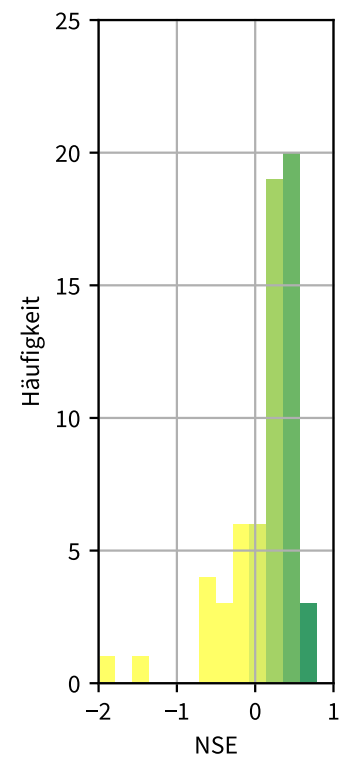
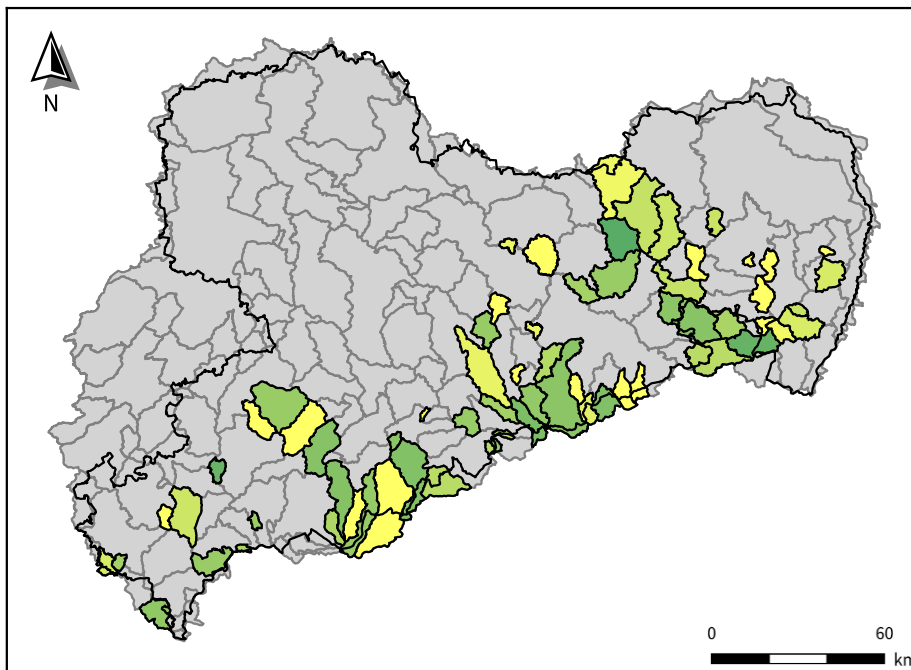


Abbildung 13: NSE für aktuelle Monatswerte des Zuflusses zum schnellen GW-Speicher RG1_{DIFGA} und RG1_{ArcEGMO} der kalibrierten Modellregionen (Kategorie 1) im Kalibrierzeitraum (Karte oben, links) und Validierungszeitraum (Karte unten, links) sowie jeweils dazugehörige Häufigkeitsverteilung (Histogramme rechts)

3.7 Ausweisung von Qualitätsstufen für Modellregionen

Basierend auf den Evaluierungsergebnissen der kalibrierten Modellregionen wurde eine Ausweisung von vier Qualitätsstufen vorgenommen. Mit diesen soll eine Empfehlung hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Belastbarkeit der erzielten WHH-Ergebnisse je Modellregion gegeben werden. Die Kriterien für die Ausweisung der Qualitätsstufen orientieren sich dabei an den bereits beschriebenen Kategorien der Modellregionen (s. Abschnitt 2.6) und den NSE-Werten des gesamten Evaluierungszeitraums (1995 - 2020). Es wird unterschieden in:

- Qualitätsstufe 1 (kalibrierte Modellregion, sehr hohe Belastbarkeit der erzielten Wasserhaushaltsergebnisse)
- Qualitätsstufe 2 (kalibrierte Modellregion, hohe Belastbarkeit der erzielten Wasserhaushaltsergebnisse)
- Qualitätsstufe 3 (unkalibrierte/unbeobachtete Modellregion, keine Aussagen zur Belastbarkeit der erzielten Wasserhaushaltsergebnisse)
- Qualitätsstufe 4 (kalibrierte Modellregion, geringere Belastbarkeit der erzielten Wasserhaushaltsergebnisse)

Modellregionen der Kategorie 1 entsprechen der Qualitätsstufe 1. Bei ihnen orientierte sich der Wasserhaushalt neben den Durchflusszeitreihen an weiteren Wasserhaushaltsgrößen als zusätzliche Vergleichsdaten für die Modellkalibrierung. Hierdurch konnten auch interne Gebietszustände besser berücksichtigt werden. Daher werden die simulierten Wasserhaushaltsergebnisse als valide angesehen. Eine Ausnahme bei der Zuordnung in Qualitätsstufe 1 bilden Regionen, welche im Rahmen der Evaluierung folgende Grenzwerte des NSE nicht überschritten haben:

- $NSE < 0$ für die Dauerlinie des täglichen beobachteten logarithmierten Durchflusses (im Bereich der Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1% bis 90%)
- $NSE < -1$ für monatliche Zuflüsse zum schnellen Grundwasserspeicher RG1 aus DIFGA sowie
- $NSE < -1$ für die Jahressummen von ETR_{DIFGA} (als Ergebnis der DIFGA-Analyse)

Trifft eines der drei Kriterien zu, wird die entsprechende Modellregion der Qualitätsstufe 4 zugeordnet. Für die beiden Vergleichsgrößen RG1 und ETR wurde ein Grenzwert des NSE von -1 gewählt, da es sich bei diesen Größen nicht um direkte Messungen, sondern um abgeleitete Werte ausgehend von Beobachtungen handelt.

Modellregionen der Kategorie 2 (ohne DIFGA-Ergebnis) werden der Qualitätsstufe 2 zugeordnet. Sie wiesen eine mindestens 10 Jahre lange Durchflusszeitreihe am Pegel auf, erfüllten aber nicht die Voraussetzungen zur Durchführung einer DIFGA-Analyse. Die Wasserhaushaltsergebnisse haben somit eine geringere Belastbarkeit gegenüber der Kategorie 1. Die erzielten Resultate sind aber valider als Ergebnisse der Kategorie 3. Für Gebiete der Qualitätsstufe 2 wird, soweit vorhanden, eine Hinzunahme weiterer Informationen (z.B. Messdaten, Simulationsergebnisse o.ä.) empfohlen. Auch hier gibt es eine Ausnahme, die anhand der NSE-Werten für den Evaluierungszeitraum (1995 - 2020) definiert wird. Ist der $NSE < 0$ für die Dauerlinie des täglichen beobachteten logarithmierten Durchflusses (im Bereich der Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1% bis 90%), so wird die betreffende Modellregion der Qualitätsstufe 4 zugewiesen.

Modellregionen der dritten Kategorie finden sich vollständig in der Qualitätsstufe 3 wieder. Sie verfügten über keine oder keine geeigneten Durchflusszeitreihen am Gebietsauslass. Außerdem umfasst die Qualitätsstufe stark anthropogen beeinflusste Bereiche wie das Lausitzer und Mitteldeutsche Braunkohlerevier. Da es hierfür entweder keine Vergleichsdaten für die Kalibrierung gab bzw. eine Abbildung der umfangreichen anthropogenen Beeinflussungen im Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO nicht erfolgte, lassen sich keine Aussagen zur Güte der Ergebnisse tätigen. Die vielfältigen Bewirtschaftungsmaßnahmen der Lausitzer- und Mitteldeutschen Braunkohlereviere verändern den Wasserhaushalt maßgeblich, was nur durch Berücksichtigung von z.B. durch Steuerungsregeln, Ortskenntnisse, Grundwasserströmung etc. plausibel simuliert werden kann. Die Wasserhaushaltsergebnisse für diese Regionen werden im Rahmen von KliWES 3.0 mit zur Verfügung gestellt, sollten aber durch weitere Daten ergänzt werden.

Wasserhaushaltsergebnisse für Modellregionen der Qualitätsstufe 4 gelten als gering belastbar, da sie in der Kalibrierung unzureichend abschnitten. Auch hier wird die Berücksichtigung ergänzender Daten und Informationen empfohlen.

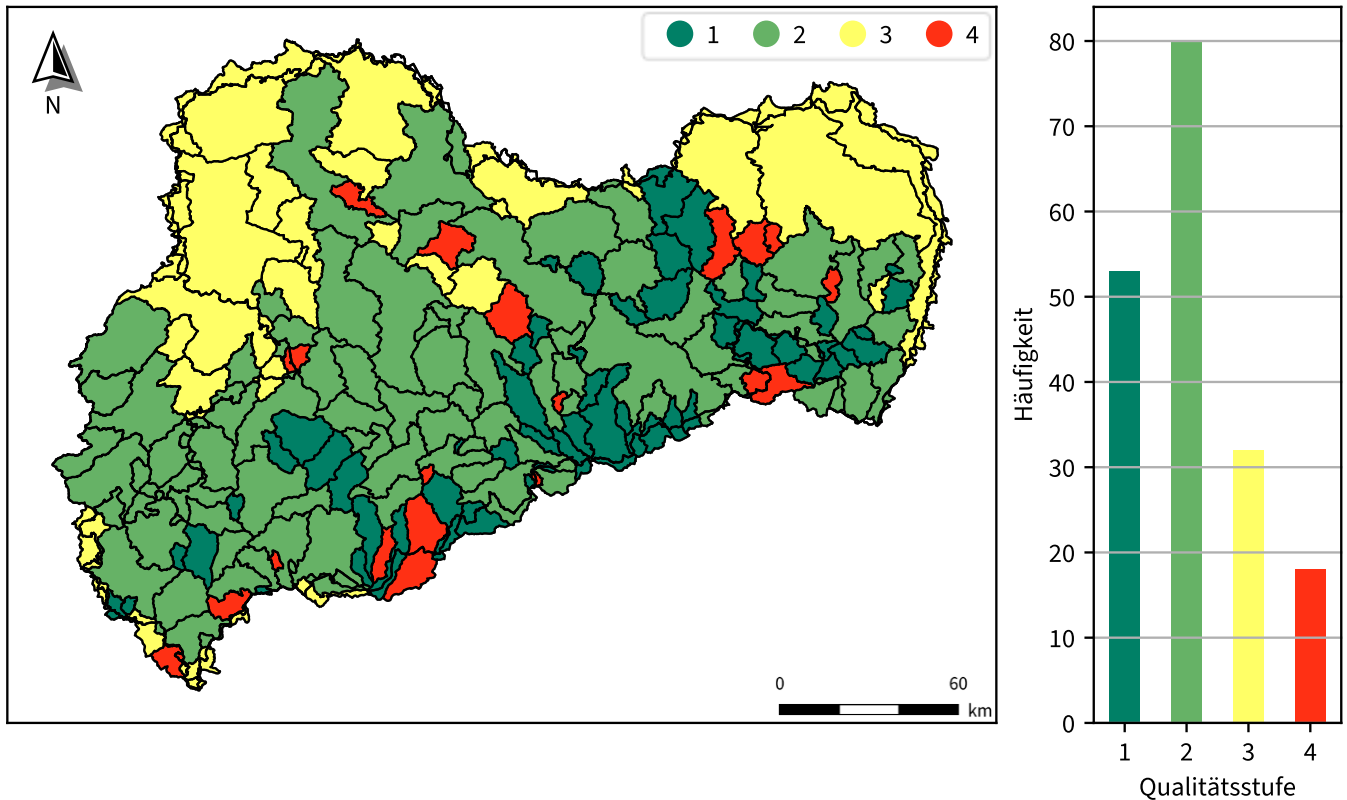


Abbildung 14: Karte der Modellregionen mit Ausweisung von vier Qualitätsstufen

Eine räumliche Übersicht der Modellregionen sowie der dazugehörigen Qualitätsstufen enthält Abbildung 14. 53 Modellregionen gehören der Qualitätsstufe 1 an, weitere 80 Modellregionen der Qualitätsstufe 2. Für 32 Regionen erfolgte keine Kalibrierung, so dass sie der Qualitätsstufe 3 angehören. Qualitätsstufe 4 umfasst 18 Modellregionen, welche zwar kalibriert wurden, in der Bewertung der Anpassungsgüte aber nicht die definierten NSE-Grenzwerte erreichten. Dies ist überwiegend auf eine ungenügende Anpassung zwischen simuliertem und beobachtetem Durchfluss zurückzuführen. Von den 18 Modellregionen gehören 13 der Kategorie 1 an und 5 der Kategorie 2.

3.8 Verfahren zur Parameterübertragung für unkalibrierte Modellregionen

Für die 19 Modellregionen, welche aufgrund fehlender oder fehlerhafter Durchflussmessungen am Gebietsauslass nicht kalibriert werden konnten, erfolgte eine Parameterübertragung aus kalibrierten Modellregionen basierend auf ähnlichen Gebietseigenschaften. Hierfür wurde der K-Nearest-Neighbors (KNN)-Klassifikationsalgorithmus verwendet. Er zählt zu den Verfahren des überwachten Lernens und ist ein nichtparametrischer Ansatz, welcher zur Klassifikation und Regression in der Datenanalyse genutzt wird. Er folgte hier der Annahme, dass Ähnlichkeiten zwischen den Gebietseigenschaften einer unkalibrierten und einer kalibrierten Modellregion (ausgehend von der Hydrotpebene) vorliegen. Der KNN-Algorithmus ermittelt hierbei die Ähnlichkeit von Gebietseigenschaften in Form von Distanz.

Je kleiner das errechnete Distanzmaß ist, desto ähnlicher sind sich die Gebietseigenschaften zweier Hydrotopen.

Zur Klassifikation wurde die Parametrisierung der Hydrotopen (21 ausgewählte Eigenschaften) verwendet. Da der KNN-Algorithmus ausschließlich numerische Daten verarbeitet, wurden alle nicht-numerischen Merkmale aus dem Datensatz entfernt. Anschließend erfolgte eine Normierung der Daten mittels der euklidischen Norm (2-Norm): $\|v\|_2 = (\sum_{k=1}^N |v_k|^2)^{\frac{1}{2}}$. Durch die Normierung wurden die ursprünglich sehr unterschiedlichen Wertebereiche der verschiedenen Gebietseigenschaften in einen vergleichbaren Wertebereich transformiert.

Für die Implementierung des Algorithmus wurde folgendes Setting gewählt:

- Anzahl der berücksichtigten Nachbarn (k): $k = 10$,
- Distanzmetrik: Euklidische Distanz $d_{st} = \sqrt{(x_s - x_t)(x_s - x_t)'}$ (mit x_s, x_t als Merkmalsvektoren),
- Distanzgewichtung: Quadratisch invers $w_{st} = \frac{1}{d_{st}^2}$.

Der Datensatz wurde in einen Trainingsdatensatz (kalibrierte Modellregionen mit 321.106 Hydrotopen × 21 Gebietseigenschaften; 76 % der Daten) und einen Testdatensatz (unkalibrierten Modellregionen mit 101.149 Hydrotopen × 21 Gebietseigenschaften; 24 % der Daten) partitioniert.

Für jedes zu untersuchende Hydrotop des Testdatensatzes wurde die Ähnlichkeit zu den Hydrotopen des Trainingsdatensatzes bestimmt und aus der erhaltenen Distanzmatrix die k (10) Hydrotopen mit den niedrigsten Distanzen ausgewählt. Die am häufigsten vertretene Modellregion der k Hydrotopen wurde dem untersuchten Hydrotop zugewiesen. Im Ergebnis war den 101.149 Hydrotopen der unkalibrierten Modellregionen jeweils eine kalibrierte Modellregion zugewiesen. Die finale Zuweisung der Kalibrierparameter erfolgte letztlich durch Auswertung der am häufigsten zugewiesenen kalibrierten Modellregion. Dieser Schritte wurde für alle Hydrotopen je unkalibrierter Modellregion ausgeführt.

Nach der Übertragung der kalibrierten Parameter auf die unbeobachteten Modellregionen erfolgten die sogenannten Produktivläufe, bei welchen die meteorologischen Datensätze (zwei Beobachtungsdatensätze und 21 Klimaprojektionen) für den gesamten verfügbaren Zeitraum simuliert wurden.

3.9 Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO

Die mit dem Modell ArcEGMO erzeugten Wasserhaushaltsergebnisse sind öffentlich zugänglich und können über den Internetauftritt des sogenannten GWN Viewers visualisiert wie auch heruntergeladen werden.

Die Ergebnisse der Produktivläufe werden in den nachfolgenden Kapiteln beispielhaft ausgewertet. Für einige der anschließenden Auswertungen erfolgt eine Zusammenfassung von ArcEGMO-Ausgabegröße:

- Niederschlag P = Niederschlag + Nebelniederschlag
- Grundwasserzufluss RG = schneller Grundwasserzufluss + langsamer Grundwasserzufluss
- Direktabfluss RD = Oberflächenabfluss + hypodermischer Abfluss + Mischkanalisation + Trennkanalisation

Weitere grafische Darstellungen zur Auswertung befinden sich im Anhang A 1.5.

3.9.1 Gegenüberstellung der Wasserhaushaltsergebnisse für Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen im Reanalysezeitraum

Die Gegenüberstellung der verschiedenen Produktivläufe für den Reanalysezeitraum erfolgt für mittlere Jahresgänge. Jede meteorologische und hydrologische Größe wird hierfür räumlich (über den gesamten Bearbeitungsraum) wie auch zeitlich (für Monatswerte von 1961 bis 2020) gemittelt. Die Ergebnisse der beiden Beobachtungsdatensätze werden in den Boxplot-Darstellungen jeweils einzeln abgebildet. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen sind für die drei RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5 zusammengefasst.

Abbildung 15 zeigt den mittleren Jahresgang des Niederschlags. Von den beiden Beobachtungsdatensätzen ist hier nur der RDS2/ERA5-Datensatz aufgeführt, da beide denselben Niederschlag als Inputdaten verwenden. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Klimaprojektionen im Reanalysezeitraum den innerjährlichen Verlauf der Beobachtungsdaten gut wiedergeben. Sie entsprechen der typischen Niederschlagsverteilung für Sachsen der vergangenen 60 Jahre mit etwas höheren Niederschlägen in den Sommermonaten und geringeren Mengen im Winter. So liegt der Median im Sommer bei bis zu 80 mm/mon Niederschlag, während die Werte im Winter zwischen 50 bis 60 mm/mon betragen. In den Klimaprojektionen treten im August aber auch maximale monatliche Niederschläge von > 250 mm/mon auf, welche in den Beobachtungsdaten nicht vorliegen.

Abweichungen treten in der Variabilität auf. Hier weisen die Projektionsdatensätze u.a. in den Monaten Juni und September eine größere Bandbreite der monatlichen Niederschlagsmenge gegenüber der Beobachtung auf.

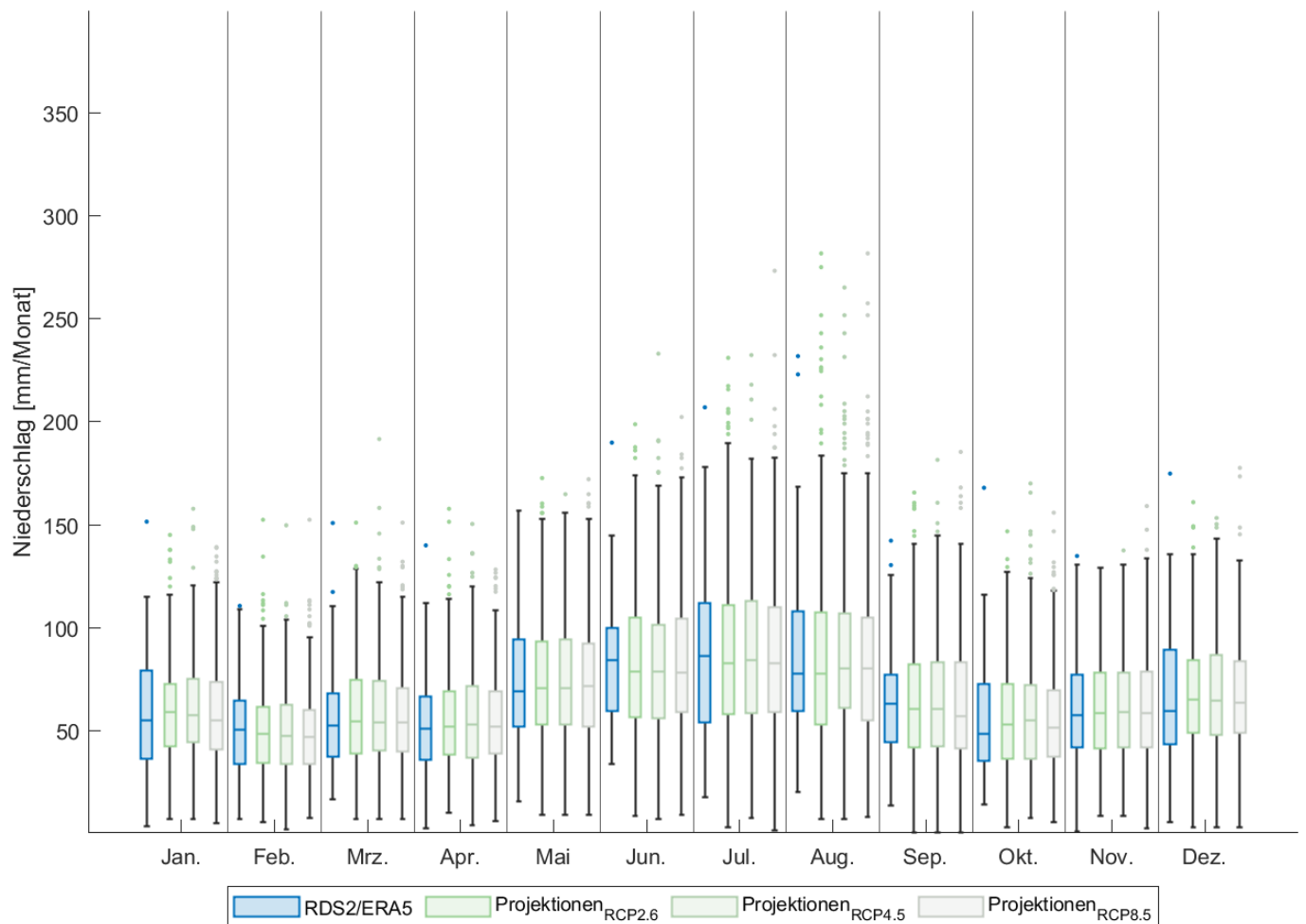


Abbildung 15: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5 sowie die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Abbildung 16 visualisiert den mittleren Jahresgang der potentiellen Verdunstung für die beiden Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie die Klimaprojektionen, zusammengefasst für die drei RCP-Szenarien. Der innerjährliche Verlauf ist für alle Datensätze vergleichbar. In den Monaten von November bis Februar gibt es im Median wie auch in der Variabilität kaum Unterschiede in der potentiellen Verdunstung. Für die Monate von März bis Oktober weist die potentielle Verdunstung basierend auf RDS/ERA5 hingegen höhere Werte auf. Dies war mit der Ableitung der potentiellen Verdunstung unter Verwendung der ERA5-Land-Daten angestrebt worden.

Die Klimaprojektionen decken sich hinsichtlich ihrer statistischen Kenngrößen weitestgehend mit dem RDS 2.0-Datensatz, da die Bias-Korrektur diesen als Grundlage verwendete. Auffallend ist allerdings der Monat Juni, in welchem die Bandbreite der potentiellen Verdunstung für die Klimaprojektionen deutlich größer ist im Vergleich zu den beiden Beobachtungsdatensätzen.

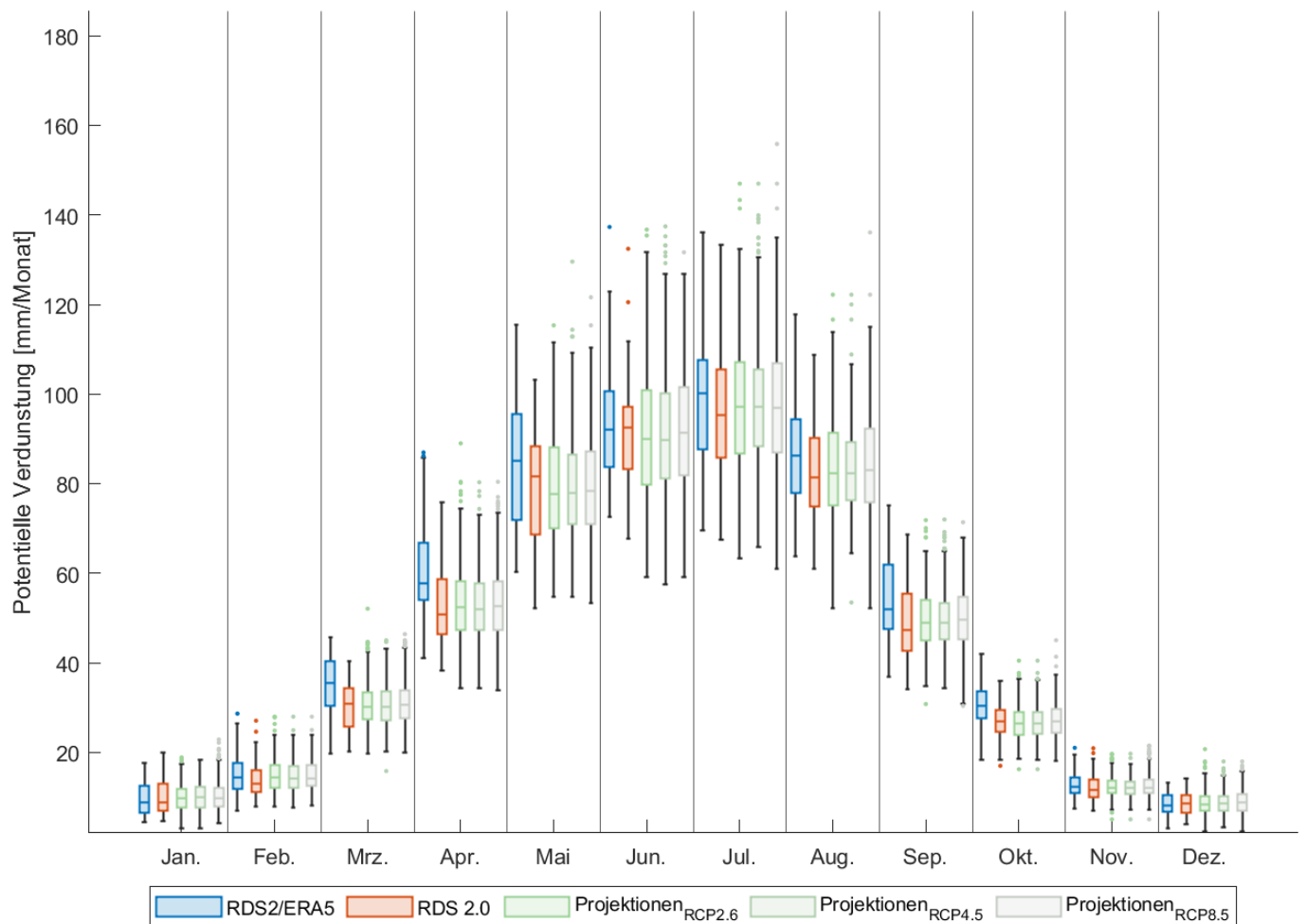


Abbildung 16: Mittlerer Jahresgang der potentiellen Verdunstung der Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie der jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Die mittleren Jahresgänge der realen Verdunstung fallen hinsichtlich ihres Wertebereichs erwartungsgemäß etwas niedriger aus im Vergleich zur potentiellen Verdunstung, wie Abbildung 17 zeigt. Die höheren Monatswerte der potentiellen Verdunstung nach RDS2/ERA5 prägen sich allerdings auch in der realen Verdunstung durch. Besonders in den Monaten März und April weichen die ETR-Werte nach RDS2/ERA5 von den weiteren Datensätzen ab. Demgegenüber sind die ETR-Werte basierend auf dem RDS 2.0 in den Monaten August bis Oktober durchschnittlich niedriger. Dies führt im Gegenzug zu einem höheren Zufluss zum Grundwasserspeicher (s. Abbildung 18, rote Boxplots) wie auch zu einem höheren Gesamtabfluss (s. Abbildung 19, rote Boxplots).

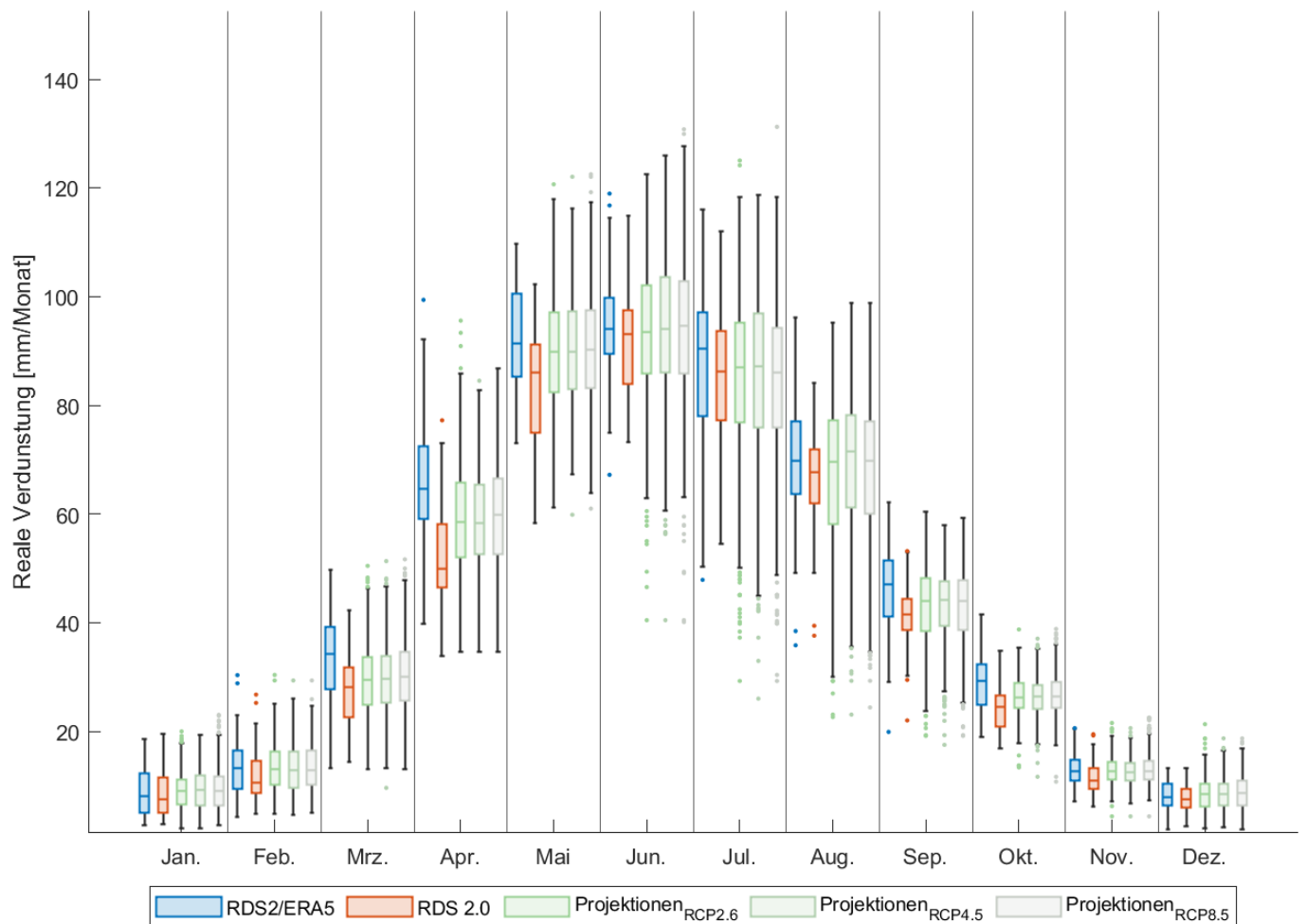


Abbildung 17: Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung der Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie der jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Hier weisen die Wasserhaushaltsergebnisse für die Größe RG und den Beobachtungsdatensatz RDS 2.0 über das Jahr durchschnittlich die höchsten Werte auf, wohingegen die Ergebnisse ausgehend von RDS2/ERA5 am geringsten ausfallen.

Insgesamt sind sich die Klimaprojektionen im mittleren Jahresverlauf, zusammengefasst nach den drei RCP-Szenarien, für den Reanalysezeitraum sehr ähnlich. Median, 25%- und 75%-Quantil der Boxplot-Darstellungen liegen meist auf einem vergleichbaren Niveau. Unterschiede treten vornehmlich bei den Maximal- und Minimalwerten auf.

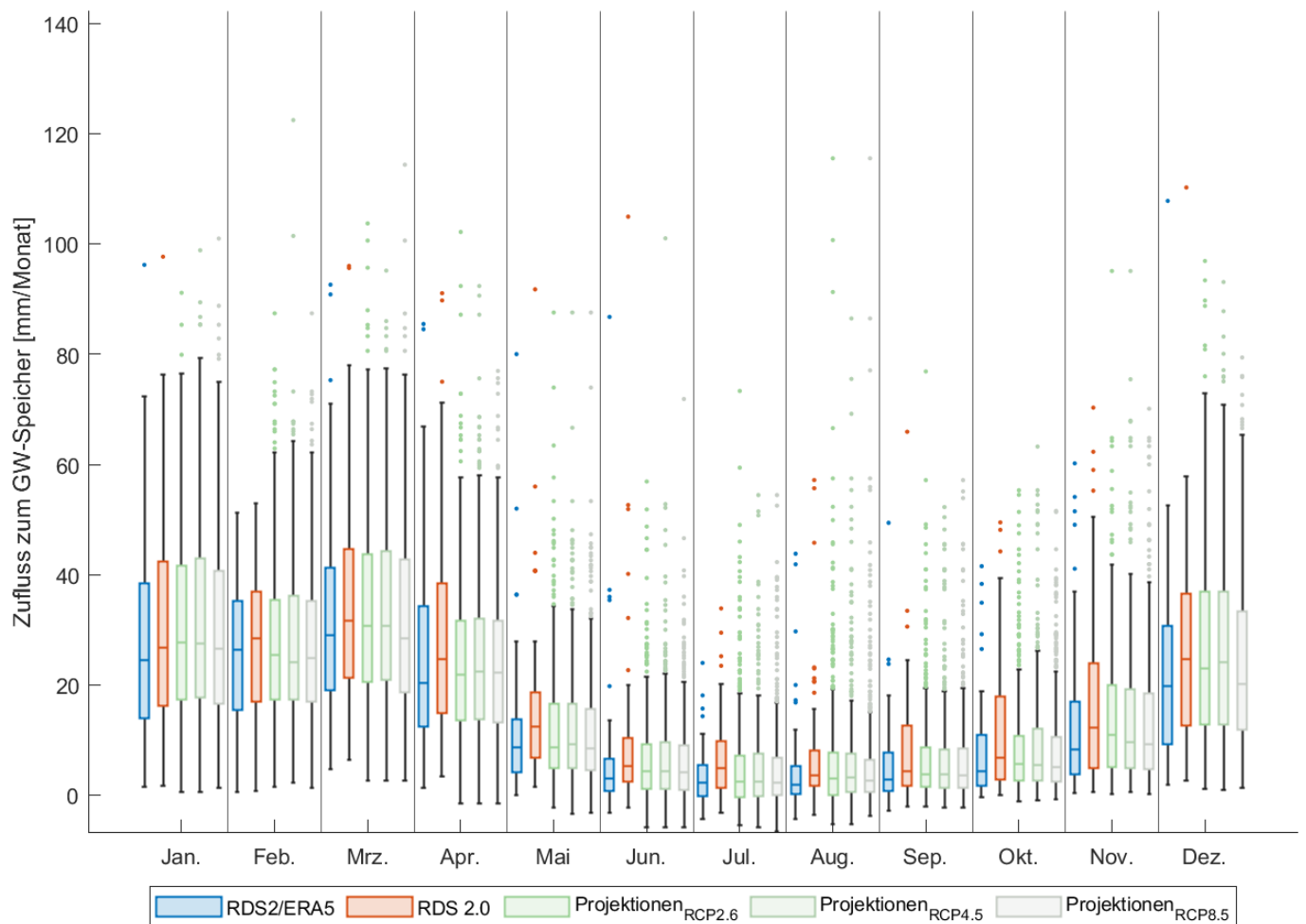


Abbildung 18: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher RG für die Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Die mittleren Jahresgänge der Temperatur für die beiden Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie die Klimaprojektionen, zusammengefasst für die drei RCP-Szenarien, zeigt die Abbildung A 8 im Anhang.

Ein Eindruck zur räumlichen Verteilung der Wasserhaushaltsergebnisse geben Abbildung 20 und Abbildung 21. Hier sind die langjährigen Mittelwerte (1961 bis 2020) der realen Verdunstung sowie des Zuflusses zum GW-Speicher auf Teileinzugsgebietsebene dargestellt. Grundlage ist die Wasserhaushaltsberechnung für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5.

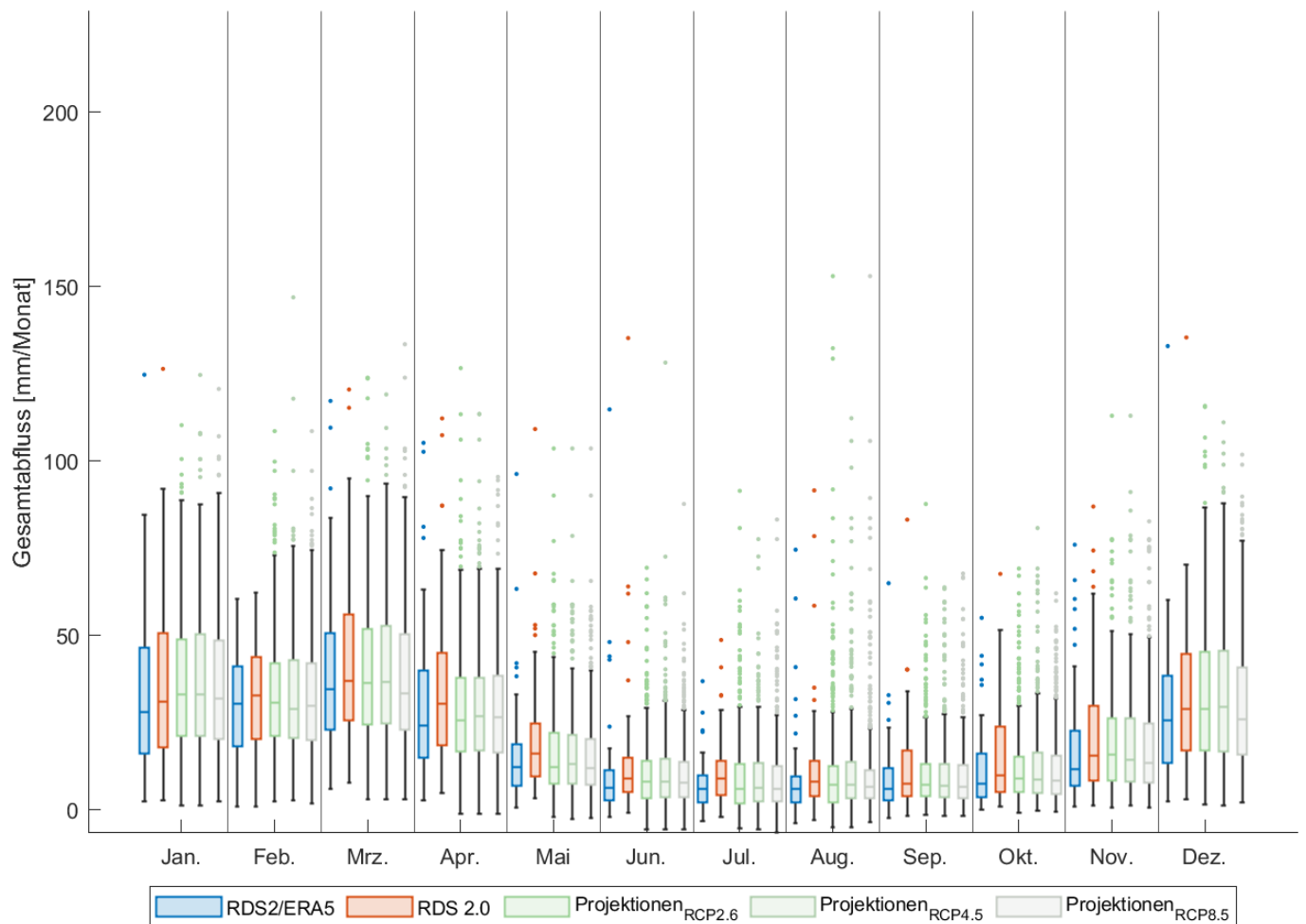


Abbildung 19: Mittlerer Jahresgang des Gesamtabflusses für die Beobachtungsdatensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie die jeweils 7 Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Die reale Verdunstung erreicht durchschnittlich Werte zwischen 500 bis 650 mm/a und ist in ihrer räumlichen Verteilung sehr heterogen. Auffallend sind die hohen Werte am Erzgebirgskamm (vor allem um den Fichtelberg) sowie im Bereich der Lausitzer Seen. Sie erscheinen plausibel, da die Nadelwaldbestände im Gebirge mit hohem Wasserdargebot wie auch die Seeflächen im Flachland verdunstungsintensiv sind. Im Gegenzug weisen urbane Flächen mit ihrem höheren Versiegelungsgrad und dementsprechend hohen Abflusswerten im Ergebnis relativ geringe Verdunstungswerte auf.

Der Zufluss zum GW-Speicher RG wird in Abbildung 21 räumlich verteilt dargestellt. Die Verteilung folgt dabei überwiegend dem räumlichen Muster des Niederschlags (s. Abbildung A 9) für Sachsen. Die mittleren Jahreswerte für RG liegen im nördlichen und mittleren Sachsen zwischen 50 bis 200 mm/a und erreichen im Gebirgsraum bis zu 500 mm/a.

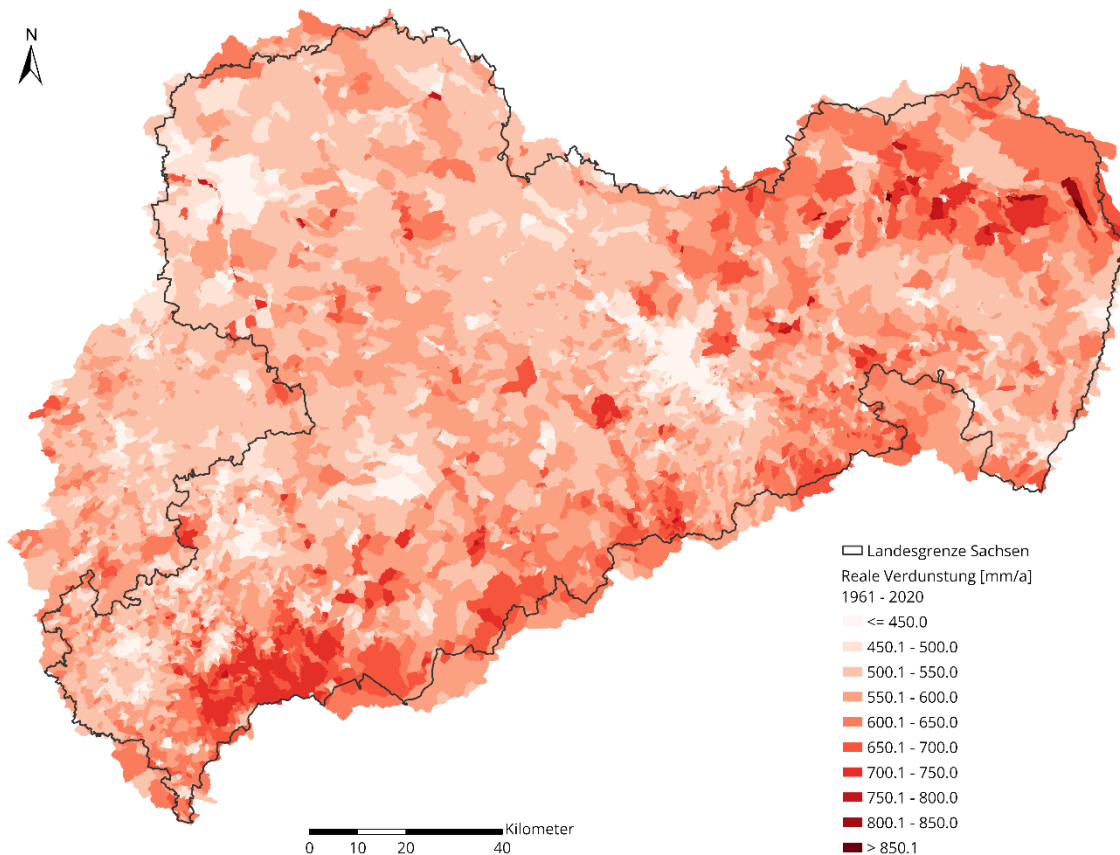


Abbildung 20: Karte der mittleren realen Verdunstung (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teil-einzugsgebietsebene für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5

Die niedrigsten Werte ($RG < 0 \text{ mm/a}$) treten auf See- und Auenflächen auf. Wie in Abschnitt 0 erläutert, erfolgt bei Seeflächen die Abbildung des Wasservolumens nicht über einen eigenständigen Speicher, sondern wird durch den GW-Speicher dargestellt. Die hohe reale Verdunstung von Seeflächen (z.B. in der Lausitz, s. Abbildung 20) führt im Gegenzug zu einem Defizit im GW-Speicher.

Eine weitere Karte der räumlichen Verteilung für den Zufluss zum langsamen GW-Speicher zeigt Abbildung A 10.

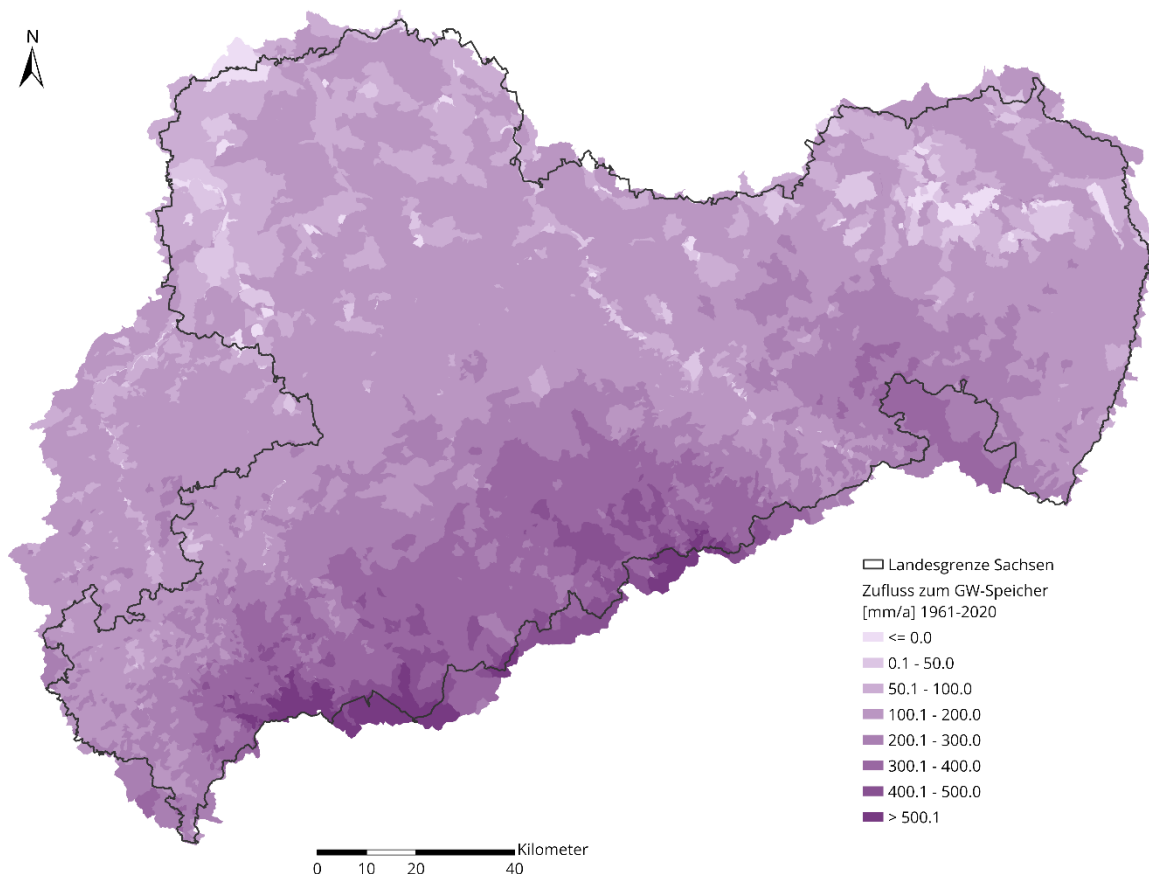


Abbildung 21: Karte des Zuflusses zum GW-Speicher RG (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teileinzugsgebietsebene für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5

3.9.2 Auswertung der WHH-Ergebnisse für die Klimaprojektionen über den gesamten Bearbeitungsraum

Der zeitliche Verlauf des Niederschlags der sieben Projektionen des RCP-Szenarios 8.5 im Reanalysezeitraum sowie die projizierte zukünftige Entwicklung ist in Abbildung 22 dargestellt. Das 10-jährige gleitende Mittel der Jahresniederschläge (Beobachtungsdatensatz RDS 2.0) in Sachsen schwankt zwischen ca. 750 mm/a bis zu 875 mm/a. Diese Bandbreite wird durch die Klimaprojektionen vergleichbar abgedeckt, auch wenn die minimalen Niederschlagswerte deutlich niedriger als die Beobachtungsdaten liegen. Der Interquartilabstand IQR für die sieben Projektionen des RCP-Szenarios 8.5 reicht für den Reanalysezeitraum von ca. 50 mm/a bis zu rund 100 mm/a. Mit Blick in die Zukunft bis 2095 nimmt dieser Wertebereich auf bis zu 250 mm/a deutlich zu. Dies ist ein Maß für die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung des Jahresniederschlags. Die sieben Projektionen umfassen einerseits klimatische Verläufe, welche von einer Abnahme des Niederschlags ausgehen, und andererseits projizierte Entwicklungen, die eine erhebliche Zunahme der Jahresniederschläge annehmen.

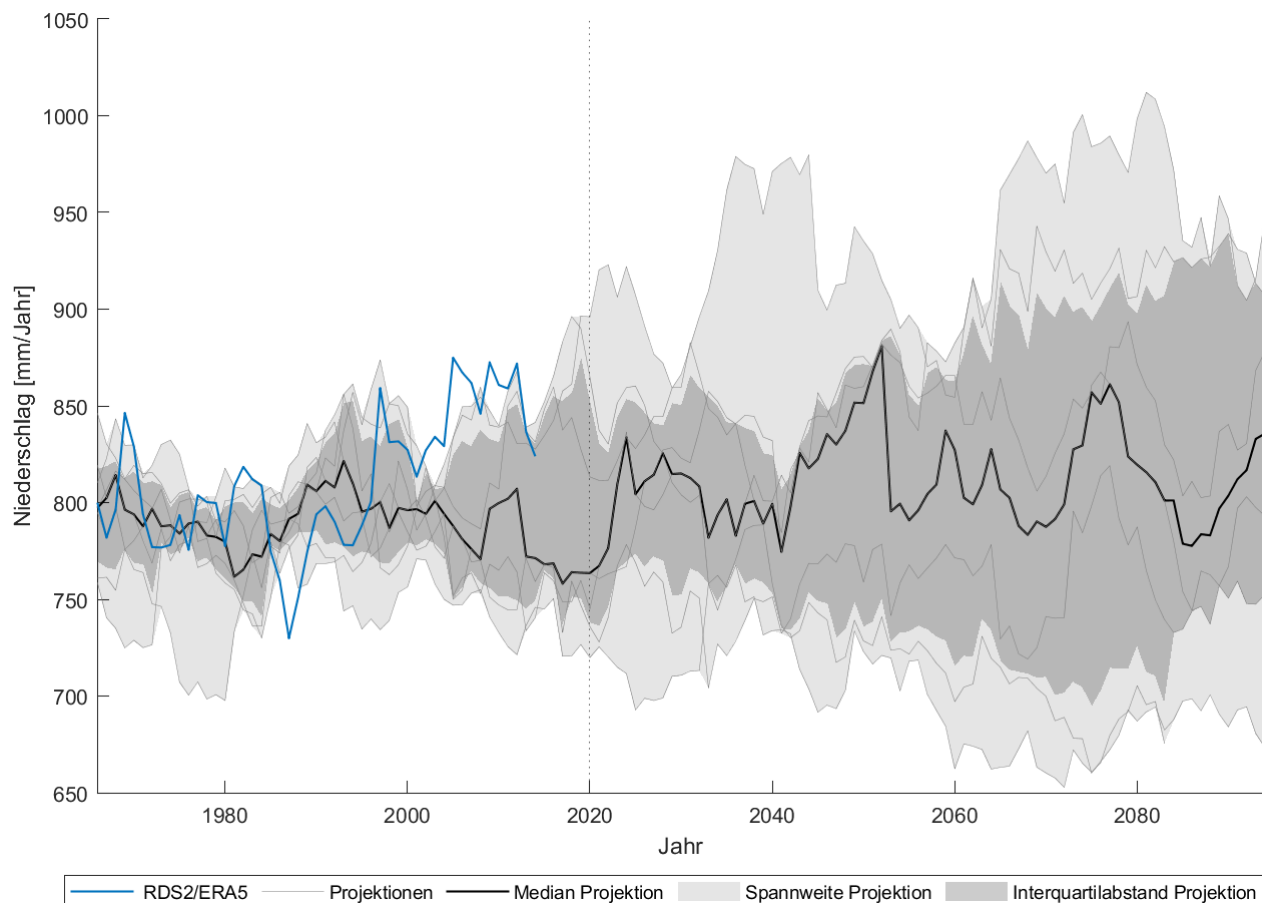


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf des Niederschlags für den Datensatz RDS 2.0 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Dies deckt sich mit dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Ein eindeutiger Trend der Niederschlagsentwicklung für den mitteleuropäischen Raum ist gegenwärtig nicht ausweisbar. Stattdessen ist von einem häufigeren Auftreten von extremen Wetterlagen (Starkregen, Dürren) auszugehen. Die sieben MDK-Projektionen des RCP-Szenarios 8.5 spiegeln dies in gewissem Maße wider. Hinsichtlich der innerjährlichen Verteilung der Niederschläge weisen die Projektionen eine Verschiebung auf. So zeigt sich vor allem für das Klimaszenario RCP 8.5 im Vergleich der Zeiträume 2021-2050 (s. Abbildung A 11) zu 2071-2100 (s. Abbildung A 12) eine Abnahme der Sommerniederschläge von Juni bis September sowie ein Anstieg in den Wintermonaten Dezember und Januar. Die in den letzten Jahren häufiger beobachtetet Frühjahrstrockenheit wird im Allgemeinen durch die Klimaprojektionen nicht abgebildet.

Für den zeitlichen Verlauf der simulierten realen Verdunstung, welcher in Abbildung 23 dieselben sieben Klimaprojektionen visualisiert, zeigt sich ein klarer Trend. Dieser ist für die beiden Beobachtungsdatensätze wie auch die sieben MDK-Klimaprojektionen erkennbar. Die simulierte reale Verdunstung basierend auf den Beobachtungsdatensätzen RDS 2.0 und RDS2/ERA5 unterscheidet sich mit ca. 40 mm/a bis 60 mm/a deutlich. Hier machen sich die verschiedenen Ableitungen der Grasreferenzverdunstung für RDS 2.0 und ERA5-Land bemerkbar.

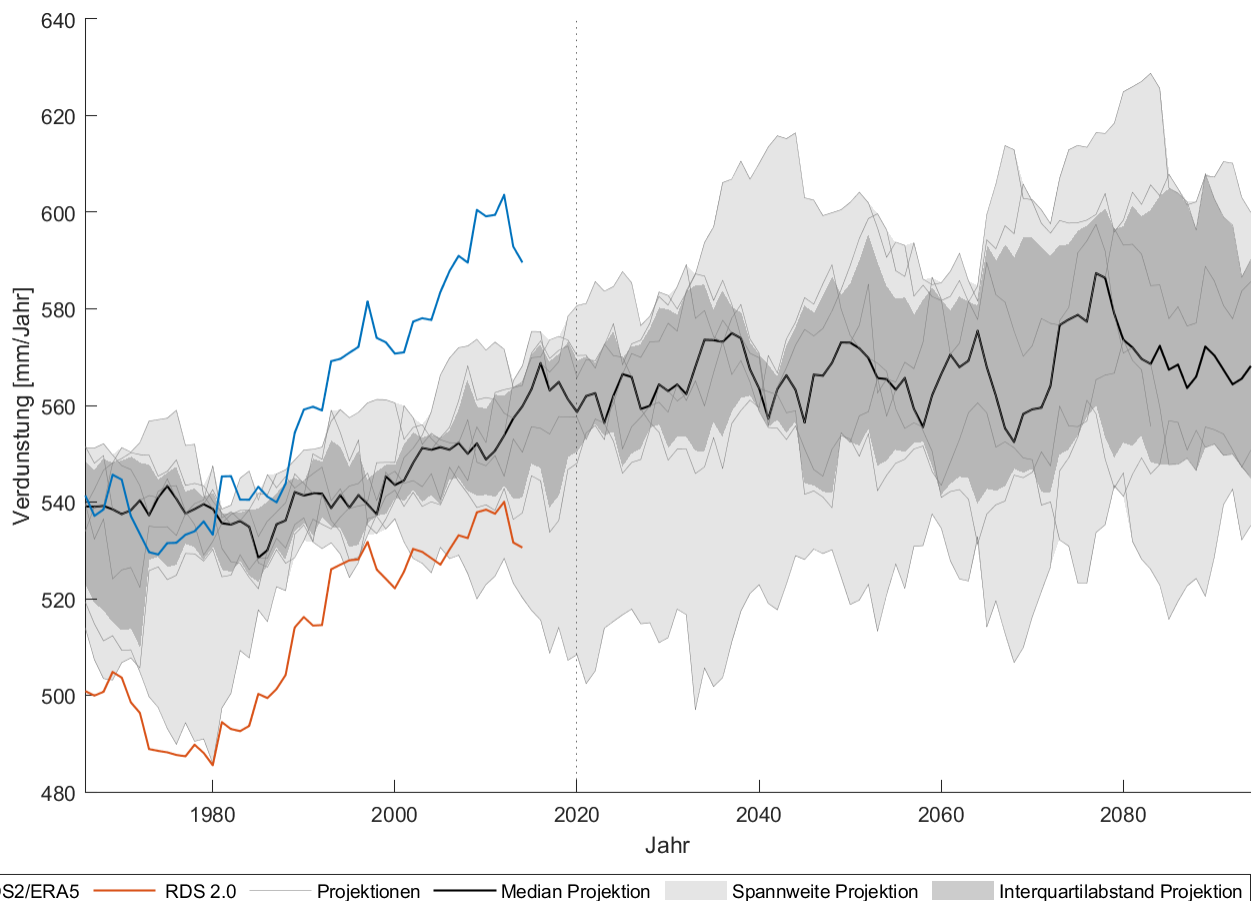


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der realen Verdunstung für den Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Durch das zugrundeliegende RCP-Szenario 8.5, mit einer starken Zunahme der Treibhausgase und damit der Temperaturen, ergibt sich bis ca. 2040 auch ein deutlicher Anstieg der realen Verdunstung. Danach verbleibt die reale Verdunstung auf dem höheren Niveau bei einer zunehmenden Bandbreite des IQR. Aufgrund von teilweise eintretender Wasserlimitierung ab der Mitte des 21. Jahrhunderts ist die weitere Zunahme der Verdunstung begrenzt. Energetisch wäre ein fortgesetzter Anstieg möglich, wie der projizierte zeitliche Verlauf der potentiellen Verdunstung in Abbildung A 13 zeigt.

Die Kombination aus hoher Variabilität zukünftiger Niederschläge und steigender realer Verdunstung prägt sich auf die Abflusskomponenten durch. Hier zeigt sich vor allem für die sieben Projektionen des RCP-Szenarios 8.5 ein Rückgang in den projizierten Zuflüssen zum GW-Speicher für die Sommermonate (s. Abbildung 24 für 2071-2100 und Abbildung A 14 für 2021-2050). So weist der Median der GW-Zuflüsse über den gesamten Bearbeitungsraum und für die Monate Juli und August Werte von knapp über 0 mm/mon auf. Die Minimalwerte können negativ ausfallen, was einem Wasserverlust aus dem GW-Speicher entspricht. Für die beiden RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 ergeben sich hingegen nur geringfügige Änderungen im GW-Zufluss.

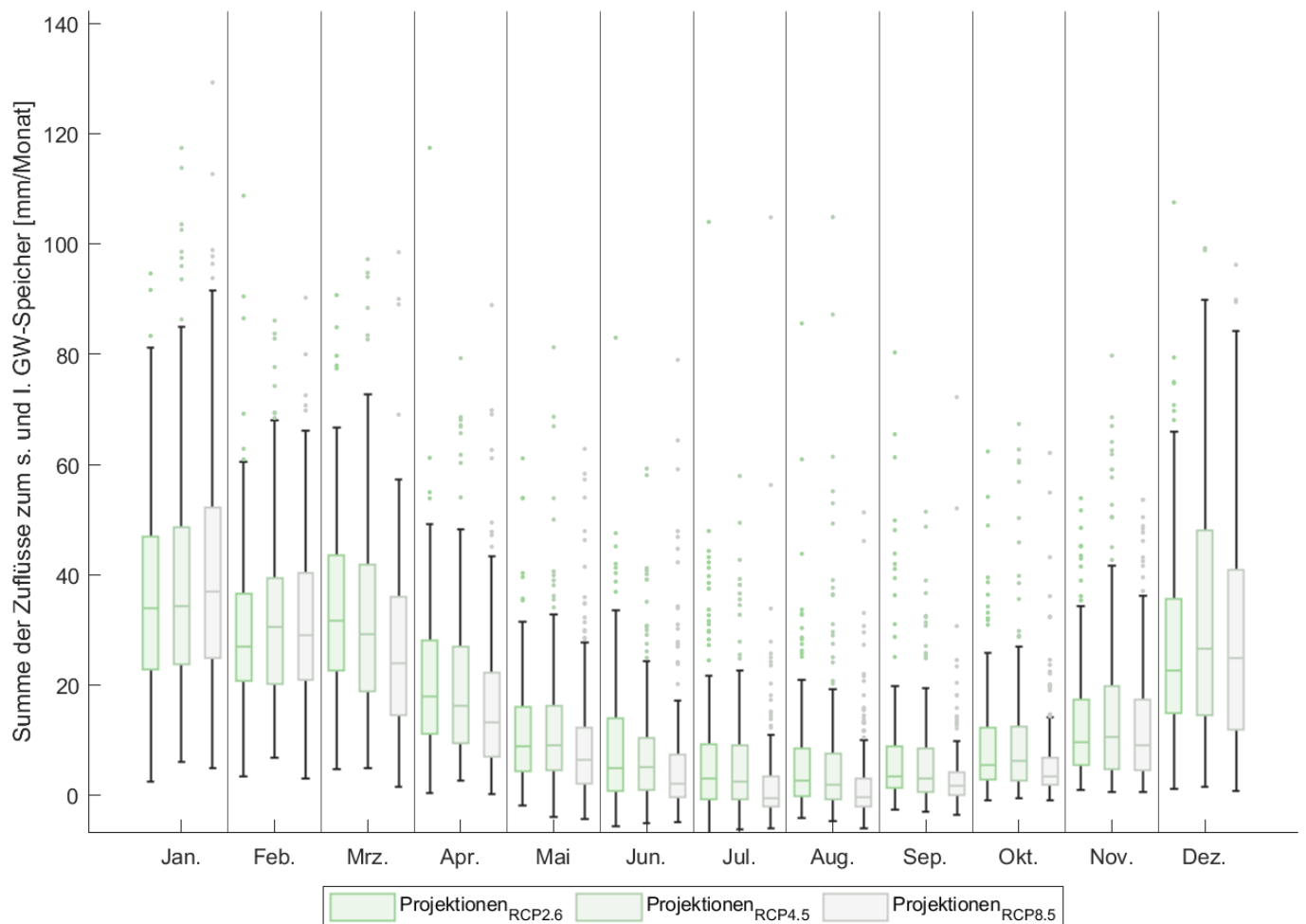


Abbildung 24: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher für die jeweils 7 Klima-projektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2071–2100 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Abbildung A 15 stellt die zeitliche Entwicklung des Zuflusses zum GW-Speicher (als 10-jähriges gleitendes Mittel) für die Klimaprojektionen des RCP 8.5. Wie bereits beim Niederschlag ist auch hier eine größere Bandbreite des IQR und der Minimal- und Maximalwerte ab der Mitte des 21. Jahrhunderts sichtbar. Ein eindeutiger Trend hin zu einer Zu- oder Abnahme des GW-Speicherzuflusses kann nicht festgestellt werden.

Gleiches lässt sich für den zeitlichen Verlauf des Gesamtabflusses sagen (s. Abbildung 25). Im Reanalysezeitraum variieren die Werte größtenteils zwischen 200 mm/a und 300 mm/a, wobei der simulierte Gesamtabfluss für den Beobachtungsdatensatz RDS 2.0 mit bis zu 340 mm/a am oberen Rand der dargestellten Datensätze liegt. Die sieben Klimaprojektionen des RCP 8.5 bilden in Sachsen für den Zeitraum bis 2095 eine große Bandbreite an möglichen Entwicklungen des Gesamtabflusses ab.

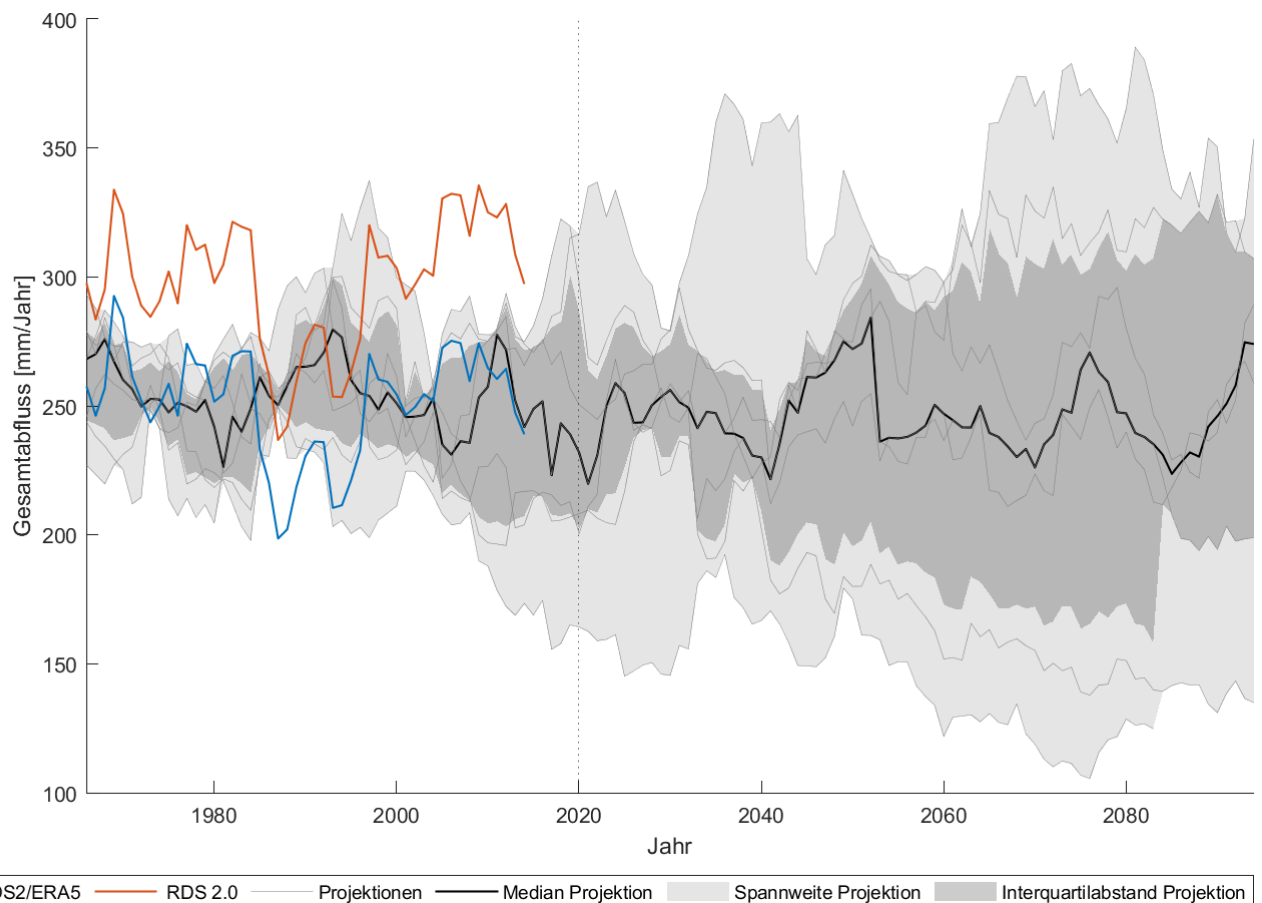


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflusses für die Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

Es ist zu erwähnen, dass die Klimaprojektion CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r85_r1 (ID 13, s. Tabelle 3) bereits 2099 endet. Die Berechnung des gleitenden Mittels reicht daher nur bis zum Jahr 2090, um eine zunehmende Verzerrung des Mittelwertes durch immer weniger Jahreswerte zu vermeiden. Dies ist für die betreffende Klimaprojektion teilweise in den Abbildungen als Abbruch des Zeitverlaufs sichtbar.

Die Wasserhaushaltsergebnisse einer ausgewählten Klimaprojektion wurden beispielhaft differenzierter betrachtet. Die Ergebnisse der Auswertung finden sich im Anhang, Abschnitt A 1.5.3.

3.10 Einschränkungen und Defizite der Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO

Die durchgeführten Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO weisen (wie im Allgemeinen für Modellsimulationen üblich) Ungenauigkeiten und Unsicherheiten auf, welche für die Bewertung der Ergebnisse relevant sind.

Zunächst ist grundsätzlich darauf hinzuweisen,

- dass Klimaprojektionen keine Vorhersagen bzw. Prognosen des zukünftigen Klimas sind. Sie stellen lediglich mögliche Varianten der Klimaentwicklung dar. Infolgedessen ist ebenso die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten als mögliche zukünftige Variante unter der Annahme der Klimaprojektionen zu betrachten.
- dass die Modellberechnungen einen weitestgehend natürlichen Wasserhaushalt simulieren. Es wurde nur eine begrenzte Anzahl von anthropogenen Beeinflussungen in den Simulationen des Beobachtungszeitraums berücksichtigt. Im Projektionszeitraum wurden keine Bewirtschaftungen oder Beeinflussungen integriert.
- dass während der Wasserhaushaltsberechnungen keine adaptiven Anpassungen der Landnutzung erfolgten. Mit Blick auf den Beobachtungszeitraum bedeutet dies, dass u.a. das Waldsterben im Erzgebirge in 1970er und 1980er Jahren vom Modell nicht abgebildet wird und für diesen Zeitraum somit größere Abweichungen gegenüber den Beobachtungsdaten zu erwarten sind.
- dass das Wasserhaushaltsmodell ohne Kopplung mit einem Grundwasserströmungsmodell simuliert wurde. Komplexe Wechselwirkungen aufgrund starker Grundwasserstandsänderungen können nicht abgebildet werden.
- dass die simulierten Durchflussdaten nicht zur Abschätzung von zukünftigen Eintrittswahrscheinlichkeiten für Hochwasserereignisse geeignet sind, da das Modell ArcEGMO nicht für diesen Zweck kalibriert wurde.

Teile des Textes sind der Veröffentlichung von Schwarze et al. (2014) entnommen. Die Aussagen haben nach wie vor Gültigkeit.

Als Einschränkungen und Unsicherheiten sind darüber hinaus folgende zu nennen:

- Lokale bzw. kleinräumige Niederschlagsereignisse können vom Messnetz nicht immer erfasst werden. Sie gehen somit auch nicht in die Interpolation von Niederschlagsdaten (ausgehend von Stationswerten) ein und sind damit im erzeugten Rasterdatensatz der Beobachtungsdaten nicht darstellbar.
- Starkniederschlagsereignisse können in ihrer Entstehung von Klimamodellen (noch) nicht konkret simuliert werden. Daher sind sie in Klimaprojektionen eher unterrepräsentiert.

- Gemessene Durchflussreihen unterliegen Unsicherheiten. Dies betrifft einerseits die Messungsgenauigkeit. Andererseits können sie durch Überleitungen, Talsperrenbewirtschaftung, etc. beeinflusst sein. Diese anthropogenen Einflüsse konnten nicht vollständig berücksichtigt werden, da nötige Informationen oder Datenreihen fehlten. In solchen Fällen wurde das natürliche Abflussverhalten im Modell simuliert und nicht der anthropogen beeinflusste Durchfluss.
- Die simulierten Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten weisen zu Beginn des Simulationszeitraumes Unsicherheiten auf, da genaue Kenntnisse des Gebietszustandes (z.B. Bodenfeuchte oder Füllung der Grundwasserspeicher) zu Beginn der Modellierung fehlten. Dies führt zu Beginn eines Modellierungslaufs zu Abweichungen zwischen Modellergebnissen und Messwerten bzw. Referenzdaten.
- Verschiedene Kartengrundlagen (z.B. Geologie, Böden, Grundwasserflurabstände) basieren auf punktuellen Stichproben, die nur einen begrenzten Einblick in die räumliche Heterogenität der hydrogeologischen bzw. hydraulischen Eigenschaft eines Gebietes geben (Grundmann, 2010). Für den Erhalt von Karten müssen die punktuellen Geoinformationen auf die Fläche übertragen werden.
- Einige Kartengrundlagen waren nicht flächendeckend und konsistent verfügbar. Die geografischen Eingangsdaten mussten daher aus verschiedenen Kartengrundlagen mit unterschiedlichen Maßstäben zusammengestellt werden. Hierfür war teilweise die Formulierung von Annahmen und die Ableitung von Parametern notwendig. Als Beispiel ist die Bodenkarte (Abbildung A 31) zu nennen.
- Die Hydrotopbildung (s. Abschnitt A 1.4) stellt grundsätzlich eine Generalisierung der Eingangsdaten dar, welche zu einem Informationsverlust führt.
- Anschlussgrad und Kanalisationsart (s. Abschnitt A 1.2.9) wurden basierend auf statistischen Angaben abgeleitet, da es keine frei verfügbaren ortsgenauen Informationen gibt. Die abgeleiteten Datengrundlagen müssen somit nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen.
- Zur Simulation des Pflanzenwachstums (und damit der Transpiration) wurde der VEGEN-Ansatz sowie der statische Ansatz im Modell ArcEGMO verwendet. Der statische Ansatz ist ein relativ einfaches Verfahren, welches auf Flächen ohne Vegetationsdynamik im Jahresgang zum Einsatz kommt. Hierbei handelt es sich z.B. um Wasserflächen oder vegetationslose Böden. Der komplexere VEGEN-Ansatz (Klöcking, 2012, Hauffe et al., 2022) erfordert eine Vielzahl von Eingangsparametern. Damit konnten Fruchtfolgen, wie auf Ackerflächen üblich, simuliert werden. Die verwendeten Fruchtfolgen sind jedoch keine standortgenaue Rekonstruktion der Anbauverhältnisse seit 1961.

- Die in der Realität vorhandene Rückkopplung zwischen klimatischen Gegebenheiten und Einzugsgebietseigenschaften wird nur unvollständig abgebildet. Im Modell findet keine Anpassung der Vegetation, des Bodens, der Grundwasserflurabstände etc. an die geänderten Bedingungen statt.
- Um auch ohne Kopplung mit einem Grundwasserströmungsmodell ein eventuelles Absinken von Grundwasserständen abbilden zu können, wurde der KapRed-Ansatz (s. Abschnitt 3.2.2) im Modell ArcEGMO verwendet. Im Falle von Zehrungsprozessen auf grundwassernahen Flächen wird damit der Kapillaraufstieg reduziert, was im Ergebnis einem Absinken der Grundwasserstände gleichkommt.
- In ArcEGMO ist das Speichervolumen von Grundwasserspeichern unlimitiert. Es kann sich damit in der Modellierung unbegrenzt füllen wie auch leeren.
- Nähere Informationen zu Unsicherheiten von DIFGA finden sich in Schwarze et al. (2012).
- Einzugsgebiete ohne Pegelinformationen wurden nicht kalibriert und dementsprechend auch nicht validiert, da die Vergleichsdaten fehlten. Sie sind hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit daher kritisch zu betrachten.

3.11 Zusammenfassung maßgeblicher Änderungen zwischen den KliWES-Projekten

Die Wasserhaushaltsberechnungen für Sachsen erfolgten in den drei Projektteilen KliWES 1.0, 2.0 und 3.0 mit dem Modell ArcEGMO. Die Strategie der multi-kriteriellen Kalibrierung basierend auf Beobachtungsdaten des Durchflusses sowie Ergebnissen einer Ganglinienseparation mit DIFGA wurde dabei in allen drei Projektphasen verfolgt. Die verwendeten Datengrundlagen, Modellversionen von ArcEGMO und angewandten Methoden für die Wasserhaushaltsberechnungen unterscheiden sich jedoch teilweise voneinander.

Tabelle 5 soll daher eine zusammenfassende Übersicht dieser Unterschiede zwischen den drei Projektphasen geben. Es können allerdings nur ausgewählte Aspekte betrachtet werden.

Details und Hintergründe zu den erfolgten Anpassungen und Weiterentwicklungen von KliWES 3.0 gegenüber dem Vorgängerprojekt KliWES 2.0 sind den verschiedenen Abschnitten in Kapitel 3 zu entnehmen.

Tabelle 5: Zusammenfassung der wesentlichen Änderungen zwischen den drei Projektteilen von KliWES 1.0, 2.0 und 3.0

Aspekt	KliWES 1.0	KliWES 2.0	KliWES 3.0
Meteorologischer Input	Beobachtungsdatensatz (1961 – 2010)	Referenzdatensatz 1.0 (1961 – 2015)	Referenzdatensatz 2.0 (1961 - 2020)
	Nebeldatensatz nach Schwarze et al. (2013)	Nebeldatensatz 1.0 nach Körner et al. (2021)	Nebeldatensatz 2.0 nach Körner et al. (2022)
	-	-	ERA5-Land-Datensatz zur Ableitung der potentiellen Verdunstung
	3 Klimaprojektionen (SRES-Szenarien, bias-korrigiert)	8 Klimaprojektionen (RCP-Szenarien, nicht bias-korrigiert)	21 Klimaprojektionen des MDK (RCP-Szenarien, bias-korrigiert)
Datengrundlagen	Verwendung von Dränagen	Verwendung von Dränagen	Keine Verwendung von Dränagen
	Ableitung der GW-Flurabstände aus Bodenprofilen der BKkonz	Ableitung der GW-Flurabstände aus GW-Stichtagsmessung von 2016	Ableitung der GW-Flurabstände aus GW-Stichtagsmessung von 2022
Bearbeitungsraum	Bearbeitungsraum KliWES 1.0 unter Ausschluss von Leipziger und Lausitzer Bergbaugebieten sowie dem Elbeschlauch	Bearbeitungsraum KliWES 2.0 unter Ausschluss der Lausitzer Neiße sowie der Leipziger und Lausitzer Bergbaugebieten	Erweiterung KliWES 2.0-Bearbeitungsraum um Flusseinzugsgebiete Lausitzer Neiße und Weiße Elster (bis Saale-Mündung) sowie Lausitzer Bergbaugebiet
Größe Bearbeitungsraum	17.300 km ²	ca. 17.000 km ²	ca. 22.200 km ²
Anzahl Modellregionen gesamt	242	189	183
Anzahl Modellregionen mit DIFGA-Analyse	113	114	66
Mindestgröße der Hydrotape	100.000 m ²	100 m ²	10.000 m ²
Anpassungen / Weiterentwicklungen für Modell ArcEGMO	Kein Auenansatz	Auenansatz mit einseitiger Zustrom-Dynamik von Umgebung hin zu Auenflächen	Auenansatzes mit Wechselwirkung zwischen Auenflächen und Umgebung
	Seeflächenbilanzierung: P = ETR + RO	Seeflächenbilanzierung: P = ETR + RO	Seeflächenbilanzierung: P = ETR + RG2

Aspekt	KliWES 1.0	KliWES 2.0	KliWES 3.0
	Keine Reduzierung der GW-Zehrung bei Ausschöpfung des GW-Speichers	GW-Zehrung durch Kapillaraufstieg variiert in Abhängigkeit von Ausschöpfung des GW-Speichers, wird aber nicht Null	GW-Zehrung durch Kapillaraufstieg variiert in Abhängigkeit von Ausschöpfung des GW-Speichers, wird bei Speicherinhalt < 0 auf Null gesetzt
Kalibrierzeitraum	2000 - 2010	2000 - 2015	2000 - 2015
Optimierer	CMAES	Amalgam	DREAM
Zielgrößen der Kalibrierung	Zufluss zu den GW-Speichern (monatlich), aktuelle reale Verdunstung (monatlich) sowie Abfluss aus dem schnellen GW-Speicher (monatlich)	Täglicher gemessener Durchfluss, Dauerlinie des täglichen logarithmierten Durchflusses sowie Abfluss aus dem schnellen GW-Speicher (monatlich)	Dauerlinie des täglichen logarithmierten Durchflusses, Zufluss zum schnellen GW-Speicher (monatlich) sowie aktuelle reale Verdunstung (Jahressummen)
Kalibrierparameter	Verdunstungskorrektur, Makroporosität sowie Aufteilungsparameter der zwei GW-Speicher	Speicherkonstante des schnellen GW-Speichers, Rückgangsexponent des Einzellinearspeichers für den Gerinneabfluss sowie Aufteilungsparameter der zwei GW-Speicher	Speicherkonstante des schnellen GW-Speichers, Rückgangsexponent des Einzellinearspeichers für den Gerinneabfluss sowie Lagerungsdichte des Bodens

4 Wasserhaushaltsberechnungen mit Raven

4.1 Auswahl der Testregion

Bevor mit der Wasserhaushaltsberechnung mit dem Modell Raven begonnen werden konnte, war die Auswahl einer Testregion erforderlich. Denn im Gegensatz zu den Modellierungen mit ArcEGMO und BROOK90 wurde für Raven nur ein vergleichsweise kleiner Bearbeitungsraum angestrebt. Anhand dieser Testregion werden Untersuchungen zu Modellreaktionen von Raven, der Qualität der Ergebnisse und der Vergleichbarkeit mit den anderen beiden Modellen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen letztlich in das Modellensemble einfließen.

Für die Auswahl der Testregion galten einige Randbedingungen, die sich aus der Datenverfügbarkeit und den Möglichkeiten der Modelle ergeben. So sollte die Gebietsfläche $>50 \text{ km}^2$ sein und 200 km^2 nicht überschreiten. Gleichzeitig sollten möglichst heterogene Gebietseigenschaften abgedeckt werden. Da der BROOK90-Modellraum innerhalb der sächsischen Grenze liegt, sind zudem Regionen nicht geeignet, die größtenteils außerhalb Sachsens liegen. Kleine Grenzüberschreitungen können jedoch auch in BROOK90 kompensiert werden.

Darüber hinaus musste die gewählte Region DIFGA-Ergebnisse (s. Abschnitt 2.5) aufweisen, um einen möglichst umfangreichen Vergleich von abgeleiteten DIFGA-Ergebnissen, gemessenen Werten und Simulationsergebnissen aus ArcEGMO, Raven und BROOK90 vornehmen zu können. Daraus folgt, dass nur geringe anthropogene Einflüsse vorliegen dürfen, welche Voraussetzung für die DIFGA-Analyse sind. Außerdem ist das Vorhandensein einer FLUXNET-Station relevant, an der die reale Verdunstung gemessen wird, da sie insbesondere für den Vergleich der realen Verdunstung notwendig ist.

Die Modellregion Dohna erfüllte alle genannten Bedingungen und wurde daher als Testregion für das Modellensemble ausgewählt. Das Einzugsgebiet der Müglitz liegt im Osterzgebirge und deckt eine Fläche von rund 194 km^2 ab. Die Landnutzung wird durch Grünland, Nadelwälder und Landwirtschaftlich genutzte Flächen dominiert. Braunerden bilden die vorherrschende Leitbodenart. Die Geologie setzt sich vorwiegend aus Gneis und Gesteinen magmatischen Ursprungs zusammen.

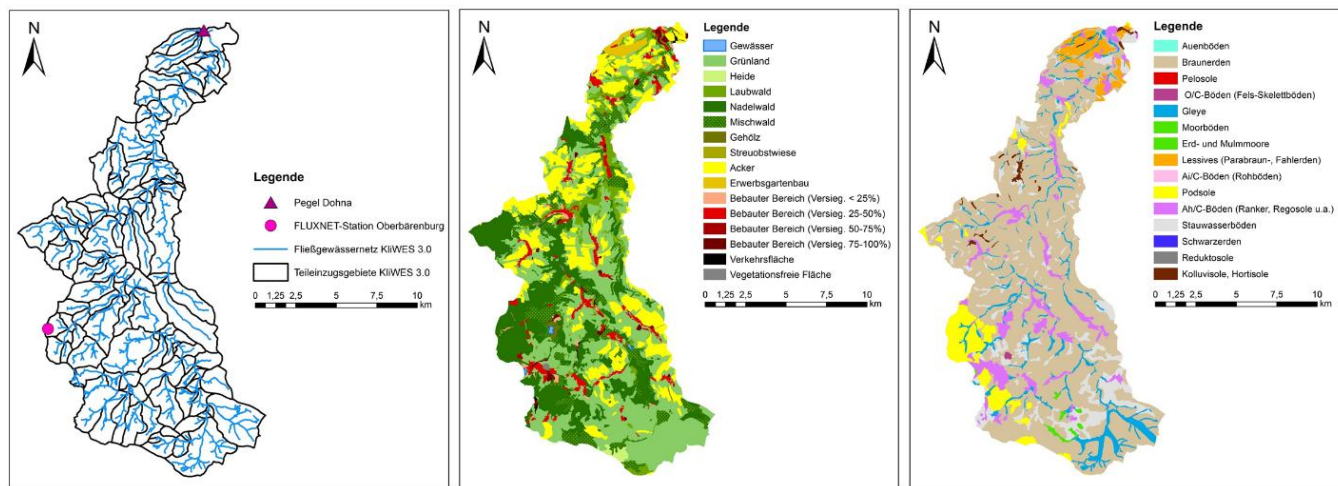


Abbildung 26: Kartendarstellung des Fließgewässernetzes mit Messstationen (links), der Landnutzung (Mitte) und Leitbodenarten (rechts) für die Testregion Dohna

Die FLUXNET-Station Oberbärenburg liegt am westlichen Rand des Einzugsgebietes in einem Nadelwaldbestand (s. Abbildung 26) auf einer Höhe von 734 m ü NN (Fluxnet, 2023).

4.2 Modellaufbau für Raven

Raven ist ein hydrologischer Modellbaukasten zur Entwicklung und Anwendung überwiegend konzeptioneller Modelle. Die Open Source Software ist in C++ geschrieben und wird an der University of Waterloo, Kanada kontinuierlich weiterentwickelt (Craig et al., 2020). Raven enthält eine Vielzahl von Ansätzen zur Beschreibung hydrologischer Einzelprozesse, welche durch den Anwender frei gewählt werden können. Durch die nutzerbestimmte Festlegung hinsichtlich der Anzahl von Speichern (z.B. Mulden-, Boden- und Grundwasserspeicher) und der Flüsse zwischen den Speichern kann die Modellstrukturen zur Beschreibung eines Einzugsgebietes selbst definiert werden. Damit können einerseits neue Modellstrukturen entwickelt wie auch bestehende hydrologische Modelle mit Raven nachgebaut werden. Letzteres fand bereits in der Machbarkeitsstudie Lausitz (Pahner et al., 2022) Anwendung. So wurde für ein Einzugsgebiet in der Lausitz eine Modellstruktur zusammengestellt, die ähnliche Prozesse wie das Modell ArcEGMO integriert. Raven bietet darüber hinaus ebenfalls die Option, meteorologische Messdaten im netCDF4-Format einzulesen.

Diese diente in KliWES 3.0 als Grundlage für den Modellaufbau der Testregion Dohna. Wie auch in der Wasserhaushaltsmodellierung mit ArcEGMO wurde die Modellregion Dohna in Teileinzugsgebiete und Hydrotöpfe unterteilt. Auf Hydrotöpebene waren Eigenschaften zu Vegetation, Landnutzung, Boden, Grundwasser und Geländeoberfläche zu definieren. Hier erfolgte die Übernahme aller Eingangsdaten und Gebietseigenschaften aus dem bestehenden ArcEGMO-Modell, um eine möglichst konsis-

tente und vergleichbare Datenbasis zu nutzen. Auch für die Teileinzugsgebietsebene, welche hauptsächlich der Definition von Oberliegern bzw. Unterliegern und der Anwendung von Routing-Funktionen dient, wurden die Parameter des ArcEGMO-Modells übernommen.

Für die Übertragung der Gebietseigenschaften auf die bereits vorhandene Raven-Modellstruktur (s. Abbildung 27) waren teilweise Anpassungen notwendig. Die BK50 verfügt insgesamt über sehr viele Horizonte in den einzelnen Bodenprofilen (bis zu zehn). In Raven führt diese hohe Anzahl an Schichten und deren teilweise sehr geringe Mächtigkeit zum einen zu geringen Infiltrationsraten und zum anderen zu einer sehr langsamen Tiefenperkolation. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken wurde die Horizontanzahl auf maximal drei Horizonten begrenzt. Aus diesem Grund mussten die Bodenprofile der BK50 aggregiert werden. Dies erfolgte über eine mächtigkeits-gewichtete Mittelung der BK50-Horizonte auf drei Horizonte gleicher Dicke. Die Bodenprofile in der Region Dohna sind zwischen ein und zwei Meter tief. Die minimale Horizontmächtigkeit im Modell beträgt daher 0,333 m.

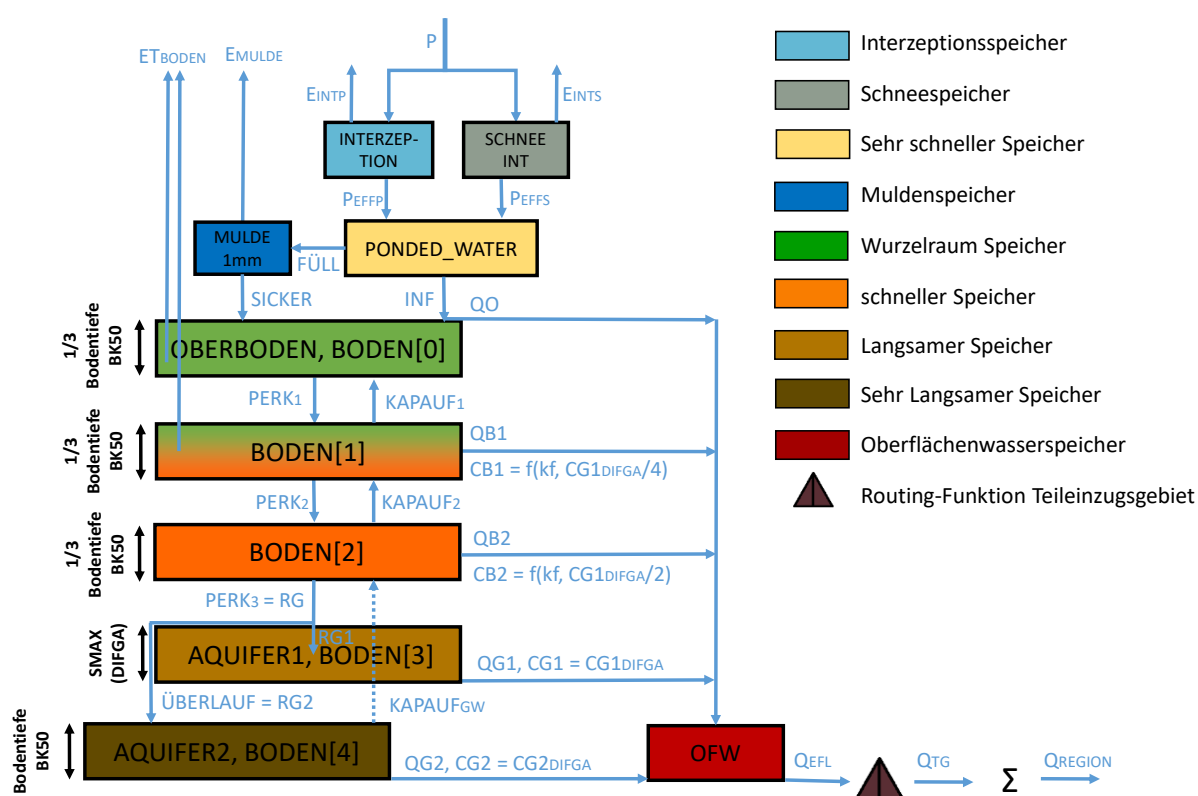


Abbildung 27: Erstellte Modellstruktur für Raven (Darstellung auf Grundlage von Bouaziz et al. (2021)) in Anlehnung an die ArcEGMO-Modellstruktur

Der Aufbau der Grundwasserspeicher orientiert sich an der Struktur des Modells für die DIFGA-Analyse (Kapitel 2.5). So können die aus dieser Ganglinienseparation abgeleiteten Parameter auch in das Raven Modell übernommen werden.

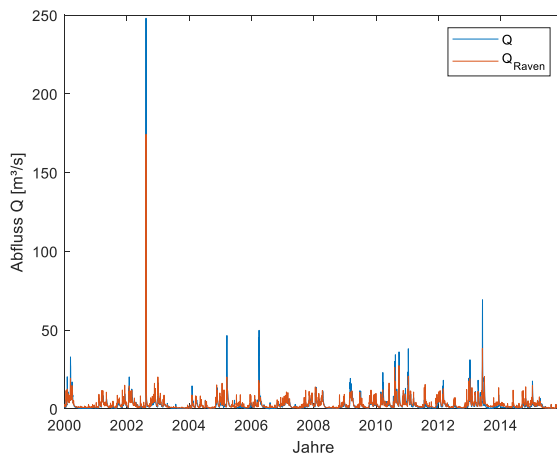
4.3 Validierung des unkalibrierten Modells

Für die Bewertung des unkalibrierten Modells wurden die gleichen Kontrollen durchgeführt, wie sie in Kapitel 3.4 für ArcEGMO beschrieben sind. Im langjährigen Mittel des Kalibrierzeitraumes ergibt die Summe der realen Verdunstung und des Gesamtabflusses annähernd den gemessenen Niederschlag wieder (Tabelle 6). Im Durchschnitt verdunsten 55,8% des Niederschlags, während 44,2% im Gewässer abfließen. Die Verdunstung ist gegenüber der DIFGA-Analyse etwas geringer, der Abfluss etwas höher.

Tabelle 6: Vergleich langjähriger Wasserhaushaltskomponenten (2000-2015) aus DIFGA und Raven in mm/a

Wasserhaushaltsgröße	Raven	DIFGA
Niederschlag (P)	1043,4	1037,7
Gesamtabfluss (Q)	462,4	414,1
reale Verdunstung (ETR)	583,3	633,1
Oberflächenabfluss (QO) bzw. Direktabfluss (QD)	62,7	107,4
Bodenabfluss 1 (QB1)	22,2	-
Bodenabfluss 2 (QB2)	65,8	-
Grundwasserabfluss (QG)	311,2	308,7
Schneller Grundwasserabfluss (QG1)	196,3	252,8
Langsamer Grundwasserabfluss (QG2)	114,9	55,9
Grundwasserzufluss (RG)	314,2	297,2
Zufluss schneller Grundwasserspeicher (RG1)	196,4	240,7
Zufluss langsamer Grundwasserspeicher (RG2)	117,8	56,5

Die Anpassung der simulierten an die gemessene Ganglinie ist in Abbildung 28 (links) dargestellt, während die Dauerlinie des logarithmierten Abflusses rechts zu sehen ist. Der NSE für den Ganglinienvergleich beträgt 0,67 (Tabelle 7). Für die Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses wird ein NSE von 0,85 erreicht, wobei die Anpassung bei Ausschluss der höchsten Abflüsse etwas schlechter ist (NSE = 0,76). An



der Dauerlinie in

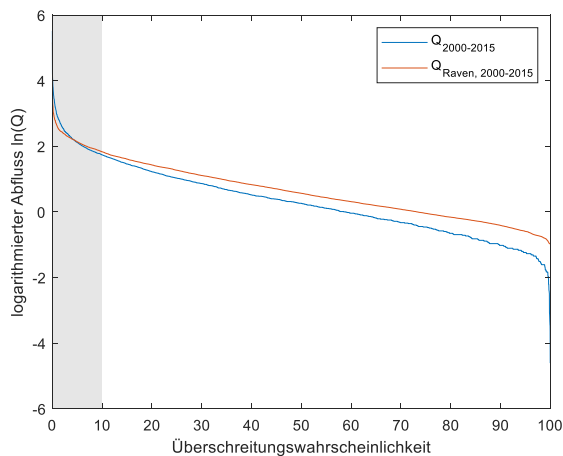


Abbildung 28 (rechts) ist gut zu erkennen, dass das unkalibrierte Modell den Abfluss insbesondere im Niedrigwasser überschätzt.

Die Übereinstimmung der realen Verdunstung aus Simulation und Ganglinienseparation ist in Abbildung 29 (links) dargestellt. Insgesamt sind die simulierten Werte aus Raven im Jahresvergleich niedriger (NSE der Jahreswerte 0,004). Dabei muss zusätzlich darauf hingewiesen werden, dass die zeitliche Auflösung der Zielfunktion einen großen Einfluss auf die Bewertung der Anpassungsgüte hat. So wurde im monatlichen Zeitschritt für die reale Verdunstung ein NSE von 0,73 erreicht.

Tabelle 7: Übersicht der Gütekriterien im Zeitraum 2000-2015 für das unkalibrierte Raven-Modell des Einzugsgebietes Dohna

Nr.	Gütekriterium	Wert
1	NSE der Ganglinie	0,67
2	KGE der Ganglinie	0,73
3	NSE der logarithmierten täglichen Abfluss-Dauerlinie (10-100%)	0,76
4	NSE der monatlichen realen Verdunstung	0,73
5	NSE der jährlichen realen Verdunstung	0,004
6	NSE des monatlichen Grundwasserzuflusses	0,58
7	NSE des jährlichen Grundwasserzuflusses	0,53
8	Kombinierter NSE (Mittelwert aus 3,5,6) (Gütekriterium der Kalibrierung)	0,45

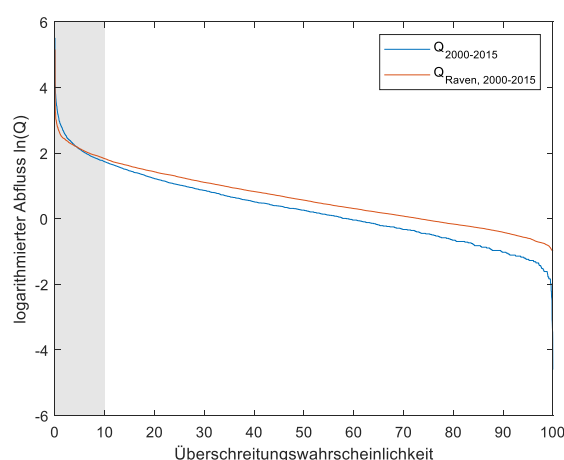
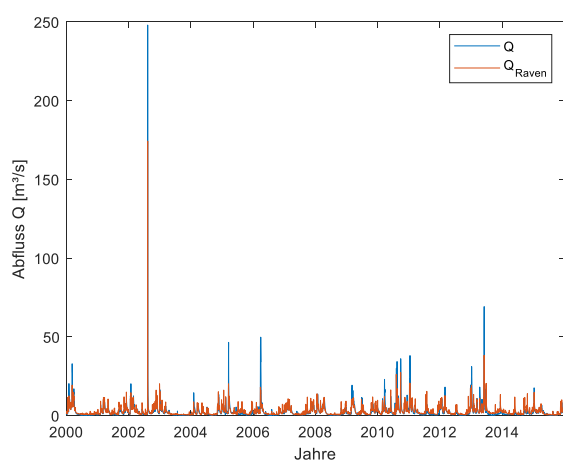


Abbildung 28: Ganglinie (links) und Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses (rechts) für die Beobachtung (blau) und Raven Simulation (rot) ohne Kalibrierung für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015

Der Grundwasserzufluss (Abbildung 29, rechts) wird durch das unkalibrierte Modell bereits verhältnismäßig gut abgebildet, der NSE beträgt 0,58 für monatliche Werte. Im Gegensatz zu ETR wird auch für die jährlichen Werte ein verhältnismäßig guter NSE (0,53) erreicht. Der kombinierte NSE, der als Evaluationskriterium des Modells auch später für die Kalibrierung verwendet wird, beträgt 0,45. Dies wird insbesondere durch den geringen Wert für die reale Verdunstung verursacht.

In der räumlichen Verteilung der langjährigen mittleren Verdunstung, welche in Abbildung 30 dargestellt ist, ist ein Zusammenhang mit der Landnutzung (s. Abbildung 26) erkennbar. Teileinzugsgebiete (TEZG) mit einem hohen Anteil an versiegelten Flächen haben geringere Verdunstungswerte als beispielsweise Acker oder Wald dominierte TEZG. Die höchste Verdunstung von rund 714 mm/a wird in einem sehr kleinen TEZG erreicht, welches größtenteils aus einer Wasserfläche besteht.

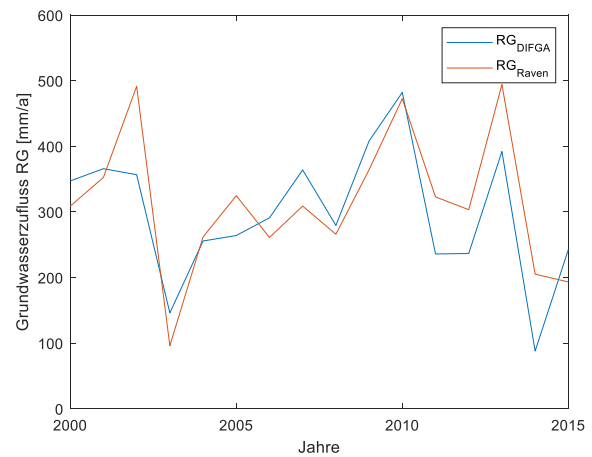


Abbildung 29: Vergleich der jährlichen realen Verdunstung der DIFGA-Analyse mit der Raven-Simulation (links) und Vergleich der Grundwasserzulufluss (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015

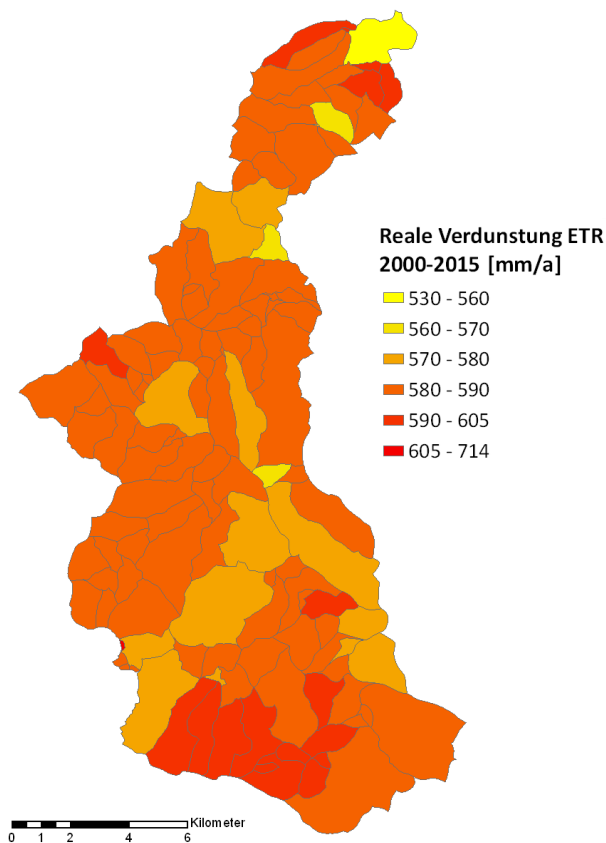


Abbildung 30: Langjähriger Mittelwert der von Raven simulierten realen Verdunstung ETR für Teileinzugsgebiete des Gebietes Dohna im Zeitraum 2000-2015

Im Anschluss an die Überprüfung des unkalibrierten Modells und ggf. notwendige Korrekturen erfolgte die Kalibrierung.

4.4 Modellkalibrierung für Raven

Die Kalibrierung des Modells Raven für das Einzugsgebiet Dohna erfolgte mit dem Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) Optimierer, der an der Professur für Hydrologie für Raven bereits Anwendung fand.

Die Zielfunktionen wurden soweit möglich aus ArcEGMO übernommen. So diente sowohl die Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses unter Ausschluss der höchsten Abflüsse (10%), als auch die jährliche reale Verdunstung aus DIFGA als Zielgröße. Zusätzlich wurden die monatlichen Werte der Komponente RG, also die Summe des Zuflusses zu den beiden Grundwasserspeichern, als Zielfunktion integriert. Als Gütekriterium diente ein kombinierter NSE, indem im Rahmen der Kalibrierung die gleichgewichtete Summe dieser drei Zielfunktionen gebildet wurde.

Folgende Kalibrierparameter wurden verwendet:

- Die Verdunstungskorrektur
- Der Exponent der Infiltrationsfunktion,
- Drei Faktor zur horizontweisen Anpassung der maximalen Perkulationsrate
- Drei Faktoren zur Anpassung der Rückgangskonstanten der Bodenspeicher und des schnellen Grundwasserspeichers

Insgesamt wurden acht Parameter kalibriert. Die Ausgangswerte für die Perkulationsrate und die Rückgangskonstanten wurden für jeden Bodenhorizont in Abhängigkeit von der hydraulischen Leitfähigkeit berechnet. So kann die Heterogenität des Bodens auch in diesen Parametern abgebildet werden. Für die zwei Aquifer-Speicher wurden die Rückgangskonstanten aus den DIFGA-Analysen übernommen.

Für das flächengewichtete Mittel der Perkulationsraten der verschiedenen Horizonte sollte gelten, dass die Werte mit zunehmender Tiefe abnehmen, oder der Wert eines Horizonts maximal gleich des darüber liegenden ist. Für die Rückgangskonstanten in Tagen war ein umgekehrter Zusammenhang angestrebt, die Werte nehmen mit der Tiefe zu. Die Bodenhorizonte sollten zusätzlich keine höheren Rückgangskonstanten als die Grundwasserleiter aufweisen. Diese Randbedingungen wurden durch eine Faktormultiplikation und die definierten Parametergrenzen erreicht.

Die kapillare Aufstiegsrate wurde als Kalibrierparameter getestet und letztlich ausgeschlossen, da sie sich als eher insensitiv herausstellte. Inwiefern dies nur für das Gebiet Dohna zutrifft, muss in weiteren Untersuchungen ermittelt werden.

Die Kalibrierstrategie für Raven wurde größtenteils auf das Vorgehen für ArcEGMO abgestimmt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten. Durch die vielfältigen Ausgaben des Modells Raven sind allerdings auch andere Vorgehensweisen zur Optimierung möglich.

Die Kalibrierung wurde für den Zeitraum vom 01.01.2000 bis zum 31.12.2015 durchgeführt. Dies entspricht demselben Kalibrierzeitraum wie in Wasserhaushaltsmodellierung mit ArcEGMO.

4.5 Validierung des kalibrierten Modells

Die Evaluierung der Modellkalibrierung wird in zwei Teilen durchgeführt. Zunächst werden die optimierten Parameter interpretiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Wasserhaushaltsgrößen des Kalibrierzeitraums und der zwei Validierperioden (1995-1999 und 2016-2020) mit den DIFGA-Analysen.

4.5.1 Validierung der Kalibrierparameter

Insgesamt verhalten sich die Parameter wie erwartet (Tabelle 8). Der Exponent der Infiltrationsfunktion verändert sich nur geringfügig. Der Korrekturfaktor für die potentielle Verdunstung wird so angepasst, dass die reale Verdunstung ETR_{DIFGA} im Mittel erreicht wird.

Die maximalen Perkulationsraten nehmen mit der Tiefe ab, wobei der Wert des dritten (untersten) Bodenhorizonts mit 20,18 mm/d verhältnismäßig gering ist und auf hohe laterale Abflüsse und weniger Tiefenperkolation hinweist.

Die Rückgangskonstante des mittleren Bodenhorizonts ist mit 1,72 Tagen recht niedrig, sodass nur eine geringfügige Verzögerung dieser lateralen Abflusskomponente stattfindet. Der unterste Bodenhorizont und der schnelle Grundwasserspeicher erhalten im Ergebnis der Kalibrierung jeweils einen Wert von 8,68 d und verzögern den Abfluss gleichermaßen.

Tabelle 8: Übersicht der Kalibrierparameter und deren optimierte Werte (flächengewichtetes Mittel) für Raven

Kalibrierparameter	Einheit	Startwert	Optimierter Wert
Exponent der Infiltrationsfunktion	-	7	6,49
Korrekturfaktor der potentiellen Verdunstung	-	1	1,09
Maximale Perkulationsrate OBERBODEN	mm/d	100,0	161,24
Maximale Perkulationsrate BODEN [1]	mm/d	100,0	94,56
Maximale Perkulationsrate BODEN [2]	mm/d	50,0	20,18
Rückgangskonstante BODEN [1]	d	2,72	1,72
Rückgangskonstante BODEN [2]	d	5,45	8,68
Rückgangskonstante AQUIFER1	d	10,89	8,68

Die kalibrierten Werte der Rückgangskonstanten in Raven (Tabelle 8) legen eine neue Zusammenfassung der lateralen Abflusskomponenten für den Vergleich mit den DIFGA-Ergebnissen nahe. Der Direktabfluss QD_{DIFGA} kann verglichen werden mit der Summe des Oberflächenabfluss QO_{Raven} und des schnellen Bodenabfluss $QB1_{Raven}$. Der schnelle Grundwasserabfluss $QG1_{DIFGA}$ wird mit den addierten Abflusskomponenten $QB2_{Raven}$ und $QG1_{Raven}$ verglichen. Der langsame Grundwasserabfluss $QG2$ ist in DIFGA und Raven äquivalent, da diese Rückgangskonstante nicht Teil der Optimierung ist und in beiden Modellen rund 340 Tage beträgt.

$$QD_{DIFGA} \sim (QO_{Raven} + QB1_{Raven})$$

$$QG1_{DIFGA} \sim (QB2_{Raven} + QG1_{Raven})$$

$$QG2_{DIFGA} \sim QG2_{Raven}$$

4.5.2 Validierung des Kalibrierzeitraums 2000-2015

Die gute Anpassung des Modells an die gemessenen Durchflüsse im Kalibrierzeitraum ist sowohl in den langjährigen Mittelwerten (Tabelle 9), den Gütekriterien eins bis drei in

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und in der Visualisierung der Gang- und Dauerlinie (Abbildung 31) erkennbar. Auch für die reale Verdunstung wird eine in Raven gute Wiedergabe dieser aus DIFGA abgeleiteten WHH-Komponente erreicht. Der NSE der realen Verdunstung wird sowohl für den monatlichen und den jährlichen Zeitschritt verbessert (

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und Abbildung 32, links). Die Anpassung des simulierten Grundwasserzuflusses RG im monatlichen Zeitschritt im Vergleich zu RG aus der DIFGA-Analyse, kann ebenfalls verbessert werden. Anders als bei der realen Verdunstung verschlechtert sich der NSE für den jährlichen Grundwasserzufluss (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dies ist auch im zeitlichen Verlauf der WHH-Komponente in Abbildung 32 (rechts) erkennbar.

Werden die langjährigen Mittelwerte der Abflusskomponenten wie bereits beschrieben zusammengefasst, ergeben sich sehr gute Übereinstimmungen für den Kalibrierzeitraum. Die zugehörigen Zeitreihen der Jahressummen (1961-2020) sind im Anhang A 2 dargestellt.

$$QD_{DIFGA} \sim (QO_{Raven} + QB1_{Raven}) \rightarrow 108,9 \sim (60,4+35,3)=95,7$$

$$QG1_{DIFGA} \sim (QB2_{Raven} + QG1_{Raven}) \rightarrow 246,7 \sim (88,8+170,5)=259,3$$

$$QG2_{DIFGA} \sim QG2_{Raven} \rightarrow 60,8 \sim 60,6$$

Tabelle 9: Übersicht der mittleren Wasserhaushalts- und Abflusskomponenten für den Kalibrierzeitraum 2000-2015

Bezeichnung	Raven	DIFGA
Niederschlag (P)	1043,3	1037,7
Gesamtabfluss (Q)	416,1	414,0
Reale Verdunstung (ETR)	629,6	632,5
Oberflächenabfluss (QO) bzw. Direktabfluss (QD)	60,4	108,9
Bodenabfluss 1 (QB1)	35,3	-
Bodenabfluss 2 (QB2)	88,8	-
Grundwasserabfluss (QG)	231,1	307,5
Schneller Grundwasserabfluss (QG1)	170,5	246,7
Langsamer Grundwasserabfluss (QG2)	60,6	60,8
Grundwasserzufluss (RG)	232,6	296,2
Zufluss schneller Grundwasserspeicher (RG1)	170,6	234,8
Zufluss langsamer Grundwasserspeicher (RG2)	62,1	61,4

Tabelle 10: Übersicht der Gütekriterien im Kalibrierzeitraum 2000-2015 für das kalibrierte Raven-Modell

Nr.	Gütekriterium	Wert
1	NSE der Ganglinie	0,73
2	KGE der Ganglinie	0,82
3	NSE der logarithmierten täglichen Abfluss-Dauerlinie (10-100%)	0,97
4	NSE der monatlichen realen Verdunstung	0,80
5	NSE der jährlichen realen Verdunstung	0,47
6	NSE des monatlichen Grundwasserzuflusses	0,61
7	NSE des jährlichen Grundwasserzuflusses	0,26
8	Kombinierter NSE (Mittelwert aus 3,5,6) (Gütekriterium der Kalibrierung)	0,68

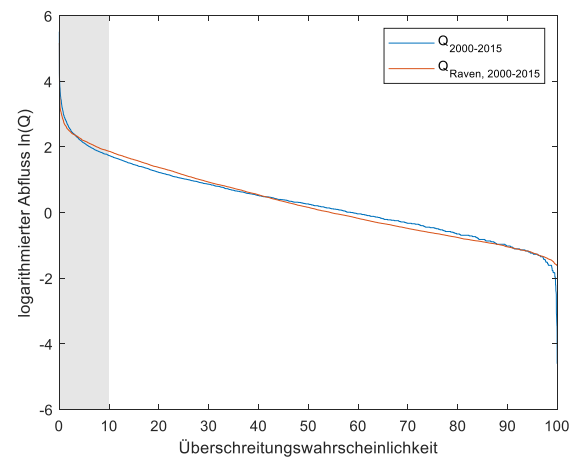
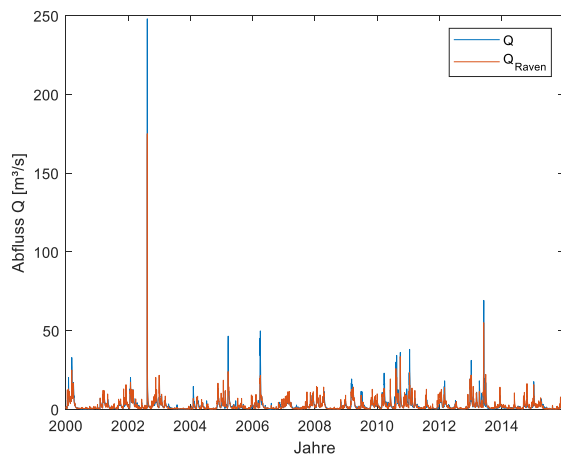


Abbildung 31: Ganglinie (links) und Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses (rechts) für die Beobachtung (blau) und Raven Simulation (rot) nach der Kalibrierung für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015

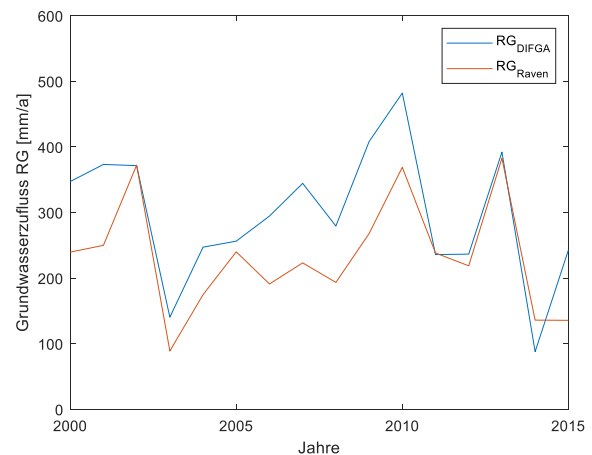
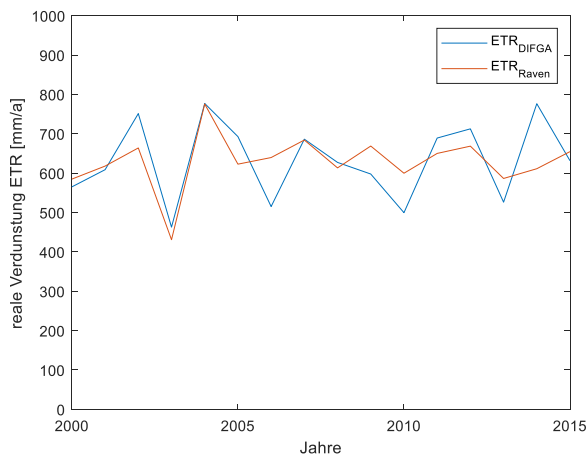


Abbildung 32: Vergleich der jährlichen realen Verdunstung der DIFGA-Analyse mit der Raven-Simulation (ETR + Bodenspeicherfüllung) (links) und Vergleich der Grundwasserzufluss (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 2000-2015 nach der Kalibrierung

4.5.3 Validierung der Zeiträume 1995-1999 und 2016-2020

Anhand der Gütekriterien (Tabelle 11) ist zu erkennen, dass der beobachtete Durchfluss im ersten Validierungszeitraum von 1995 bis 1999 etwas besser durch die Simulation wiedergegeben werden kann. Der größte Unterschied in den für die Kalibrierung verwendeten Gütekriterien ergibt sich für die reale Verdunstung, wobei hier der zweite Zeitraum einen besseren Wert erreicht. Die NSE-Werte für den monatlichen Grundwasserzufluss sind für beide Zeiträume ähnlich.

In den Dauerlinien der beiden Validierungsperioden fällt auf, dass die größten Abweichungen bei mittleren und niedrigen Abflüssen auftreten (Abbildung 33). Insgesamt wird das Abflussvolumen in beiden Validierungsperioden unterschätzt. Für den Zeitraum 2016 bis 2020 nähern sich die Dauerlinien von simulierter Zeitreihe und gemessenen Werten im Bereich der kleinsten Durchflüsse wieder an.

Die Unterschätzung des Abflusses wird insbesondere in den Trockenjahren 2018 bis 2020 sichtbar (Abbildung 33, unten links). Die Trockenheit macht sich durch eine sehr hohe reale Verdunstung und eine geringere Menge an Grundwasserzuflüssen bemerkbar (Abbildung 34). Die Reaktion des Raven-Modells für das EZG Dohna auf die klimatische Trockenheit dieser Jahre ist stärker ausgeprägt als in den DIFGA-Daten.

Tabelle 11: Übersicht der Gütekriterien für die beiden Validierungszeiträume des EZGs Dohna (Modell Raven)

Nr.	Gütekriterium	Zeitraum 1995-1999	Zeitraum 2016-2020
1	NSE der Ganglinie	0,62	0,53
2	KGE der Ganglinie	0,81	0,69
3	NSE der logarithmierten täglichen Abfluss-Dauerlinie (10-100%)	0,75	0,64
4	NSE der monatlichen realen Verdunstung	0,79	0,79
5	NSE der jährlichen realen Verdunstung	-0,93	-0,26
6	NSE des monatlichen Grundwasserzuflusses	0,52	0,49
7	NSE des jährlichen Grundwasserzuflusses	0,16	-2,22
8	Kombinierter NSE (Mittelwert aus 3,5,6) (Gütekriterium der Kalibrierung)	0,11	0,28

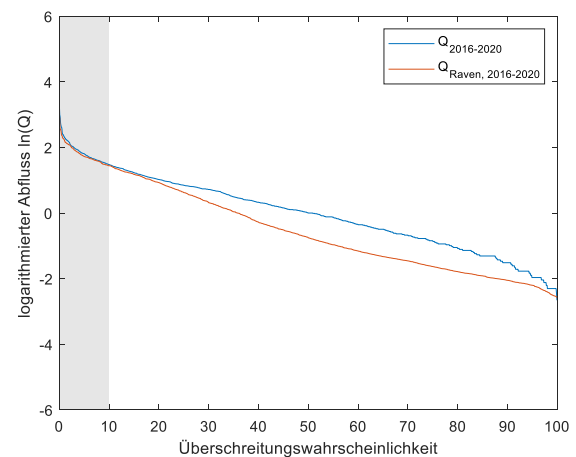
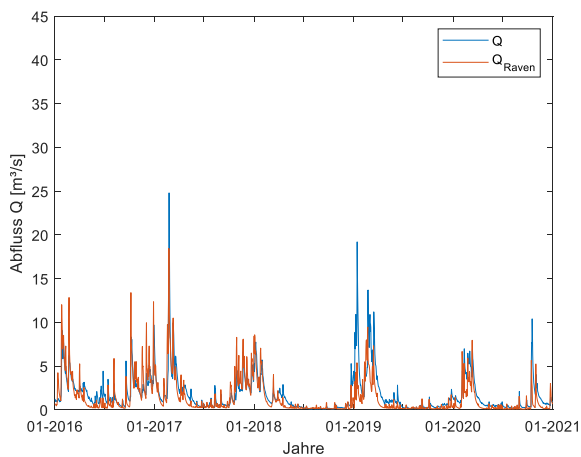
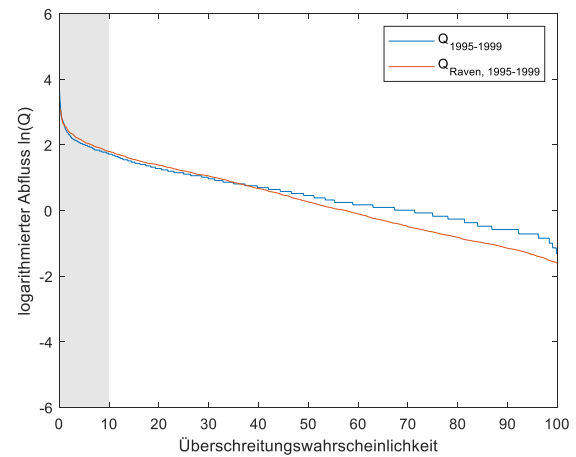
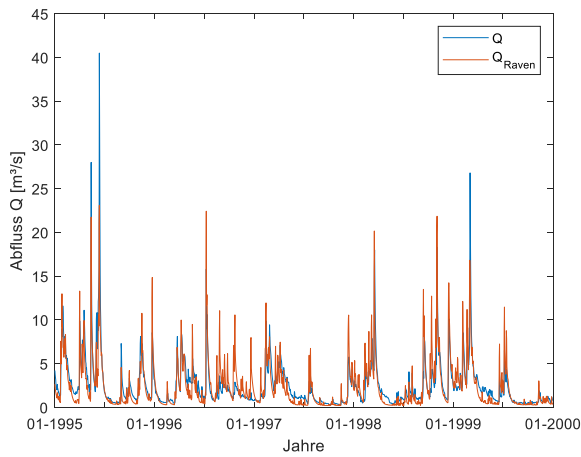


Abbildung 33: Ganglinien (links) und Dauerlinien (rechts) des täglichen logarithmierten Abflusses Q des Pegels Dohna der fünfjährigen Validierungszeiträume 1995-1999 (oben) und 2016-2020 (unten)

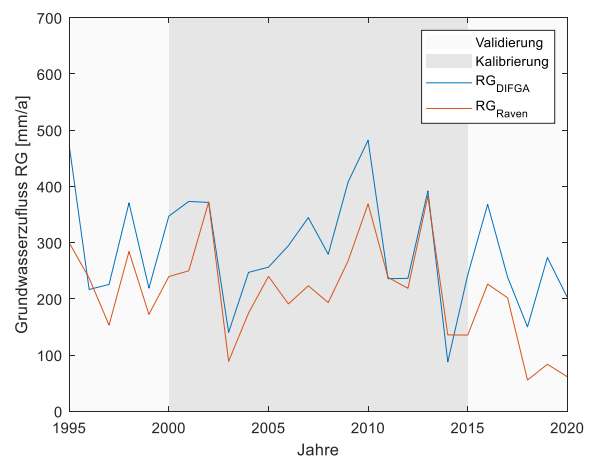
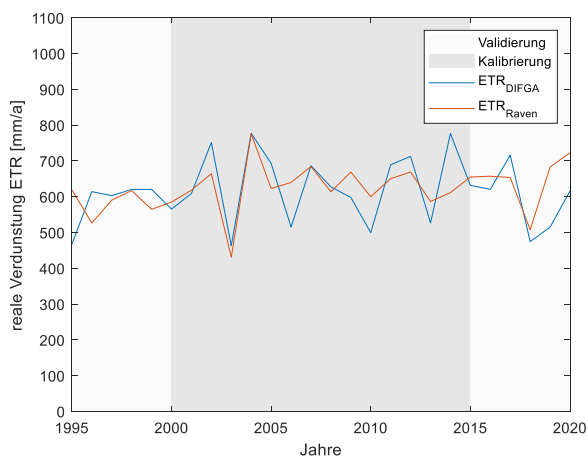


Abbildung 34: Reale Verdunstung ETR (links) und Grundwasserzufluss RG (rechts) in mm/a für den Zeitraum 1995 bis 2020 des Einzugsgebiets Dohna, die Validierungsperioden sind hellgrau markiert, der Kalibrierzeitraum grau

4.6 Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen mit Raven

4.6.1 Auswertung der Wasserhaushaltsberechnungen für den Beobachtungszeitraum

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen für den Beobachtungszeitraum basieren auf dem meteorologischen Datensatz RDS2/ERA5. Für den in Abbildung 35 (links) dargestellten jährlichen Durchfluss im Kalibrierzeitraum 2000-2015 ist erkennbar, dass die Übereinstimmung von Messung und Simulation sehr groß ist. Auch die Abflüsse zwischen 1961 bis zum Anfang der 80er Jahre werden sehr gut durch das kalibrierte Modell wiedergegeben (Abbildung 35, links). Hinsichtlich der jährlichen realen Verdunstung zeigen die DIFGA-Ergebnisse für das Gebiet Dohna eine etwas höhere zeitliche Dynamik als die simulierten Werte (s. Abbildung 36, links). Die langjährigen Mittelwerte beider Zeitreihen sind sich relativ ähnlich.

Im Zeitraum zwischen 1983 bis 1995 ist der simulierte Jahresabfluss des Raven Modell meist geringer als die gemessenen Werte, die reale Verdunstung verhält sich entgegengesetzt (Abbildung 35 und Abbildung 36, links). Diese Unterschätzung von Q und Überschätzung von ETR ist möglicherweise durch den Einfluss des Waldsterbens in diesem Zeitraum im oberen Dohna-Einzugsgebiet erklärbar (Renner und Hauffe, 2024). Durch die fehlende bzw. neu aufwachsende Vegetation wird ein größerer Anteil des Niederschlags in Abfluss umgewandelt und es steht weniger Wasser für die Verdunstung zur Verfügung. Da in Raven keine Landnutzungs- oder Vegetationsänderungen berücksichtigt wird, konnten im genannten Zeitraum die Beobachtungsdaten mit dem Modell nicht reproduziert werden.

Die Unterschätzung des Abflusses durch das Modell ist auch im Mittel- und Niedrigwasser in der Dauerlinie zu erkennen, wobei der niedrigste Abfluss vom Modell überschätzt wird (Abbildung 35, rechts). Ursache hierfür dürfte der grundsätzlich geringere simulierte Grundwasserzufluss RG (s. Abbildung 36, rechts) sein. Dieser folgt zwar im zeitlichen Verlauf dem DIFGA-Ergebnis für RG , stützt den Basisabfluss in Mittel- und Niedrigwasserlagen aber zu einem geringeren Anteil. Auch die Landnutzungs- oder Vegetationsänderungen im Einzugsgebiet könnten ursächlich für die Unterschiede zwischen den beiden Dauerlinien im Mittel- und Niedrigwasser sein.

Die große Abweichung der WHH-Komponenten (Abbildung 35 und Abbildung 36) zur Messung in den Trockenjahren 2018 bis 2020 sind durch eine Vegetationsänderung hingegen nicht erklärbar. Die geringen jährlichen Abflüsse zwischen 2018 und 2020 sind im Raven Modell vor allem auf den geringen Abfluss aus dem langsamen Grundwasserspeicher zurückzuführen. Mit einer mittleren Rückgangskonstante von etwa 340 d kann dieser sich über einen dreijährigen Zeitraum unter trockenen Bedingungen und wenig GW-Zufluss erheblich leeren kann.

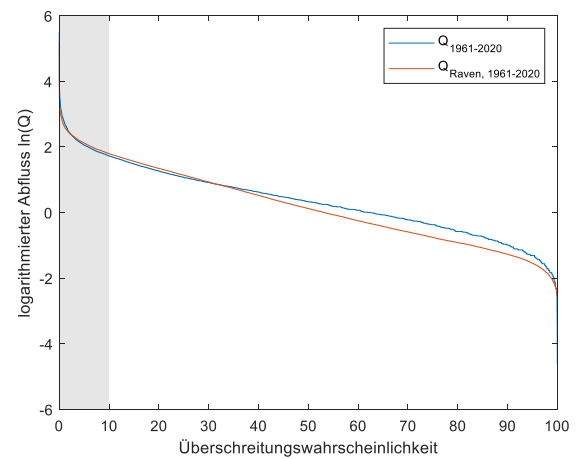
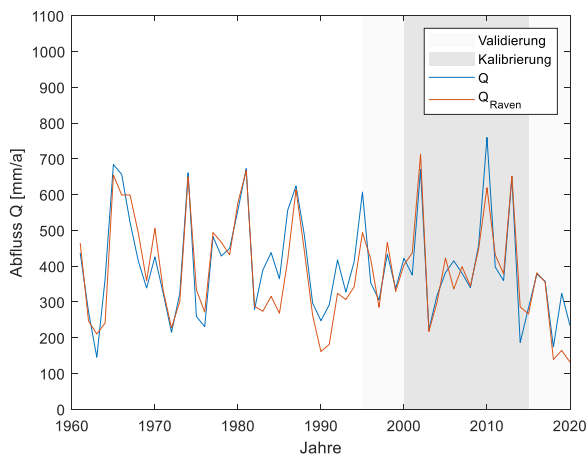


Abbildung 35: Jährliche Abflusswerte in mm/a (links) und Dauerlinie des logarithmierten Durchflusses (rechts) für Beobachtung (blau) und Raven-Simulation (rot) nach der Kalibrierung für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020

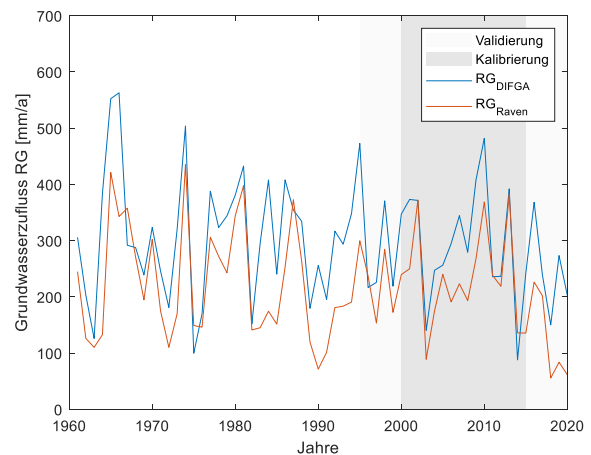
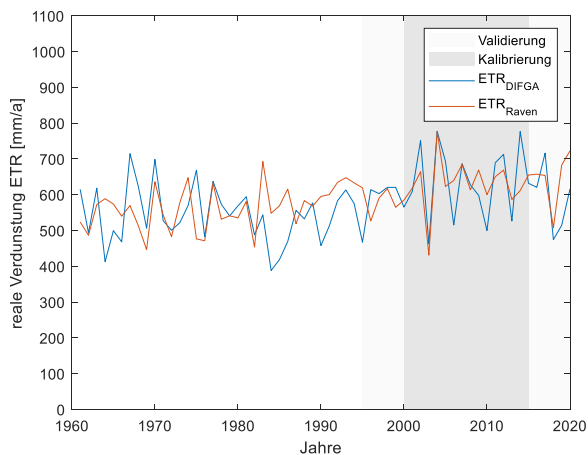


Abbildung 36: Vergleich der DIFGA-Analyse mit der kalibrierten Raven-Simulation der jährlichen realen Verdunstung (links) und der Grundwasserzuflüsse (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020

4.6.2 Auswertung der Wasserhaushaltsberechnungen für die Klimaprojektionen

Für die Wasserhaushaltsberechnungen mit Raven wurden zwei der 21 Klimaprojektionen des MDK-Ensembles genutzt. Dabei handelt es sich um Projektionen des RCP 8.5-Szenarios (mit 8,5 W/m² Zunahme im Strahlungsantrieb) und den maximalen bzw. minimalen mittleren Jahresniederschlag:

- MDK13 (CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E_r85_r1_norm_calender) und
- MDK14 (CMIP5_HadGEM2-ES-r1_WETTREG-2018_r85_r1).

Für die Wasserhaushaltsberechnungen der Klimaprojektionen wurde wie in ArcEGMO auch in Raven die modellintern berechnete potentielle Verdunstung (ETP) genutzt. Für Raven ist der Penman-Monteith-

Ansatz, welcher neben den Klimagrößen auch vegetationsspezifische Parameter wie Wuchshöhe und LAI einbezieht, der ähnlichste Ansatz zur Grasreferenzverdunstung, die für die externe Berechnung der ETP für die Kalibrierung angewendet wurde.

Es wurde festgestellt, dass die modellintern berechneten ETP- Werte nicht mit der aus ERA5-Land abgeleiteten potentiellen Verdunstung übereinstimmen. Ein Grund dafür ist neben der Parametrisierung der Vegetation vor allem die Nettostrahlung, welche aus Daten der kurzwelligen Strahlung, der Temperatur und des Niederschlags sowie den Einzugsgebietseigenschaften in Raven abgeleitet wird (Craig et al., 2020). Die Berechnung für diese Klimagröße kann in Raven nicht verändert werden. Durch diese Unterschiede ist ein Vergleich des Wasserhaushaltes der Klimaprojektionen (modellintern berechnete ETP) mit den Werten nach ETP_{ERA5} nur bedingt möglich.

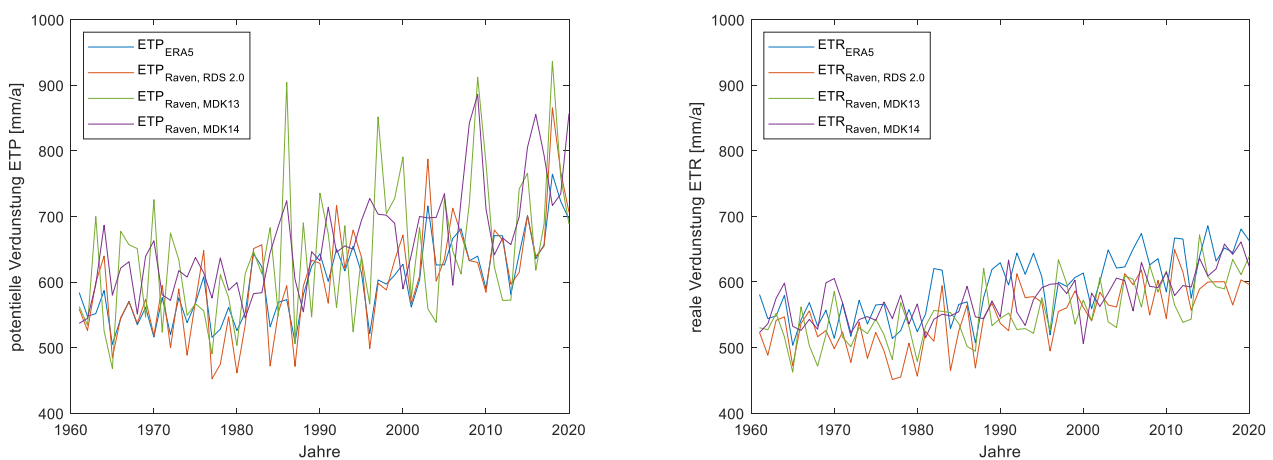


Abbildung 37: Vergleich der Jahressummen (Zeitraum 1961-2020) der potentiellen Verdunstung (links) und realen Verdunstung (rechts) für ETP_{ERA5} -Land (blau) sowie der modellintern berechneten ETP auf der Grundlage des RDS 2.0 Datensatzes (rot), MDK13 (grün) und MDK14 (violett) für das Einzugsgebiet Dohna

Die Klimaprojektionen verhalten sich insgesamt erwartungsgemäß. Die potentielle Verdunstung steigt bis 2100 im Mittel weiter an, dabei hat das MDK14 eine höhere ETP als MDK13 (Abbildung 38, oben). In beiden Klimaprojektionen ist die reale Verdunstung im Zeitraum 2021-2100 niedriger als die Werte der potentiellen Verdunstung, bedingt durch Wasserlimitierung. Durch höhere Niederschlagsmengen ist die reale Verdunstung der Projektion MDK13 höher als in MDK14 (Abbildung 38, unten).

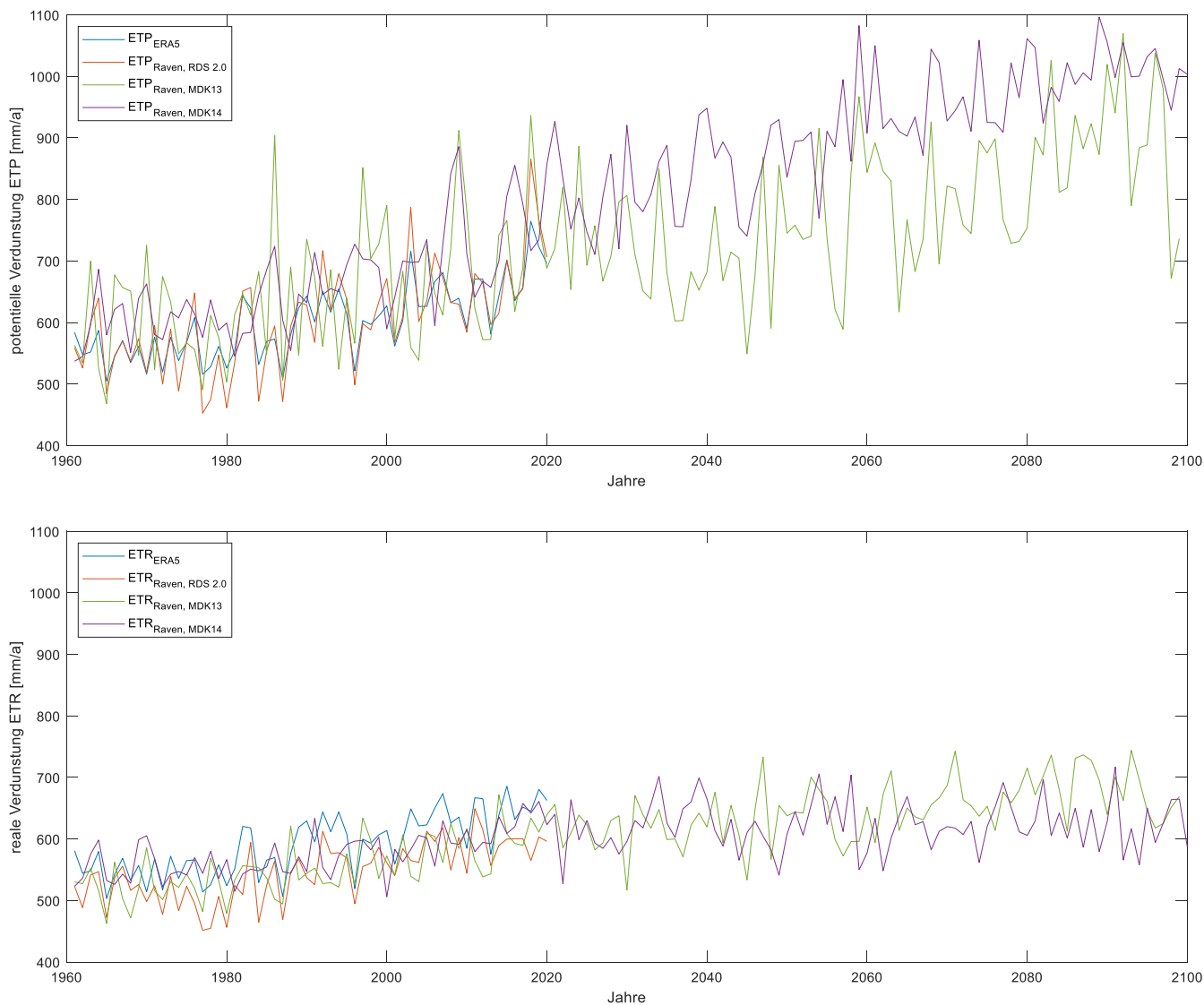


Abbildung 38: Vergleich der Jahressummen (Zeitraum 1961-2100) der potentiellen Verdunstung (oben) und reale Verdunstung (unten) für die ETP-Daten des ERA5-Land-Datensatzes (blau), sowie der modellintern berechneten ETP auf der Grundlage des RDS2.0 Datensatzes (rot), MDK13 (grün) und MDK14 (violett) für das Einzugsgebiet Dohna

4.7 Fazit

Die Wasserhaushaltsmodellierung für das Einzugsgebiet Dohna mit dem Modell Raven war insgesamt erfolgreich. Die Gebietseigenschaften konnten größtenteils aus den Datengrundlagen übernommen werden. Die vielfältigen Ausgaben und Anpassungsmöglichkeiten des Open Source Modells ermöglichen andere Kalibrierstrategien als für ArcEGMO und umfangreiche Auswertungen der Modellergebnisse.

Eine Anwendung des Modells auf Basis der in KliWES 3.0 verwendeten Modellregionen ist in Raven grundsätzlich denkbar. Weitere Analysen beispielsweise zur modellinternen Verdunstungsberechnung und der Modellkalibrierung, aber auch zu weiteren Gebietseigenschaften sind dazu notwendig. Auch die Integration von umfangreichen Bewirtschaftungsdaten in Raven ist möglich.

5 Wasserhaushaltsberechnungen mit BROOK90

Parallel zu den Wasserhaushaltsmodellierungen mit ArcEGMO und Raven kam auch das Modell BROOK90 zum Einsatz. Im Gegensatz zur Modellierung mit den anderen beiden Modellen, welche im Rahmen des KliWES-Projekts auf Vektordaten basierten, benötigte BROOK90 Rasterdaten als Input. Die Wasserhaushaltsberechnungen mit BROOK90 erfolgten für die Fläche Sachsens. Gebiete außerhalb der sächsischen Grenze wurden nicht berücksichtigt.

Die verwendeten und aufbereiteten Input-Datensätze werden im Anhang A 3.1 vorgestellt.

5.1 Das Wasserhaushaltsmodell BROOK90

BROOK90 ist ein physikalisches 1D hydrologisches Modell mit einem besonderen Fokus auf einer detaillierten Darstellung der vertikalen Wasseraustauschprozesse im Boden-Wasser-Pflanzensystem an einem Standort (Federer et al., 2023). Das Modell beginnt mit der Verteilung von Niederschlag (Regen oder Schnee), welcher zunächst die Baumkrone (oder allgemein Pflanzschicht) durchläuft, wo er entweder abgefangen wird und verdunstet (Interzeption) oder zum Boden gelangt. Sobald der Niederschlag den Boden erreicht, kann er in den Boden infiltrieren, gefrieren, verdunsten, zur Oberflächenabflussbildung beitragen, in tiefere Schichten perkolieren oder als Bodenfeuchtigkeit gespeichert werden. Das infiltrierte Wasser wird nach einem „Top-Down“-Ansatz über Makroporen und Matrixfluss auf die Bodenschichten verteilt. Die vertikale Wasserbewegung wird durch das Matrixpotenzial sowie die potenzielle Verdunstung gesteuert und mit den Darcy-Richards-Gleichungen beschrieben, wobei die hydraulische Parametrisierung wie Wassergehalt, Matrixpotenzial und hydraulische Leitfähigkeit nach Clapp und Hornberger (Clapp und Hornberger, 1978) verwendet wird. Das Modell berücksichtigt Grundwasser, Sickerwasser und Hangabfluss als wesentliche hydrologische Komponenten. Die Speicherung des Bodenwassers wird für die Verdunstung aus den oberen Bodenschichten sowie für die Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln zur Transpiration verwendet.

Das Modell verwendet eine zweischichtige Version der Penman-Monteith (PM)-Gleichung nach Shuttleworth-Wallace (SW) (Shuttleworth und Wallace, 1985), um die potenzielle Verdunstung getrennt für die Baumkrone und die Bodenoberfläche zu berechnen, wobei das Energiebudget der Oberfläche und der Gradient des fühlbaren Wärmeflusses berücksichtigt werden. Die von der Baumkrone abhängige ETP besteht aus der Verdunstung von abgefangenem Schnee und Regen sowie der Pflanzentranspiration. Sie wird als die maximale Verdunstung definiert, die von einer gegebenen Landoberfläche unter den gegebenen Wetterbedingungen auftreten würde, wenn alle Pflanzen- und Bodenoberflächen von außen befeuchtet wären. Die von der Bodenoberfläche abhängige ETP umfasst die Verdunstung von Boden- und Schneeflächen. Sie wird als die maximale Verdunstung definiert, die von einer Landoberfläche unter den gegebenen Wetterbedingungen auftreten würde, wenn die Pflanzenoberflächen trocken und

das Bodenwasser innerhalb der Feldkapazität liegen würden. Die SW-Methode berücksichtigt mehrere Widerstände, wie den über der Baumkrone, innerhalb der Baumkrone, an der Kronenoberfläche und den Dampffluss im Boden. Diese werden in der Standard-PM-Gleichung angewendet und ermöglichen so separate Schätzungen aller fünf ETP-Komponenten. Es ist zu beachten, dass BROOK90 zwischen Boden evaporation und Pflanzentranspiration unterscheidet, wobei zu einem Zeitpunkt nur ein Prozess in der Baumkrone und ein Prozess auf dem Boden stattfinden kann. Die tatsächliche Verdunstung ETR basiert daher auf der Verfügbarkeit von Wasser im System (innerhalb der Baumkrone, auf dem Boden und in der Bodenmatrix). Die täglichen Verdunstungsraten werden als gewichtete Summe der Tages- und Nachtwerte (basierend auf der Sonnenscheindauer) berechnet, wobei die Abfangrate auch in höherer Frequenz (stündlich) geschätzt werden kann.

Im Vergleich zu 2D Modellen kann das BROOK90-Modell laterale Flüsse (insbesondere Zuflüsse) auf geneigtem Gelände nicht ausreichend darstellen und berücksichtigt keinen Grundwasserfluss (nur eine Retentionsspeicherung nach dem Bucket-Modell, die in keiner Weise zur Bodenfeuchtigkeit beiträgt). Dies könnte ein kritischer Punkt für die genaue Schätzung der Bodenfeuchtigkeit in Gebieten mit starkem Gefälle und erhöhtem Grundwasserspiegel sein.

5.2 Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen mit BROOK90

Für die Wasserhaushaltssimulationen mit BROOK90 für den Beobachtungszeitraum wurde ebenfalls der RDS 2.0 (s. Kapitel 2.3.1.1) als meteorologischer Antrieb verwendet. Die Simulationen erfolgten parallelisiert (60 Kerne). Dies dauerte für die gesamte Anzahl an Rasterzellen etwa acht Tage. Modellausgaben für jede Rasterzelle umfassen die folgenden Variablen auf einer täglichen Skala:

- Niederschlag,
- potentielle Verdunstung, reale Verdunstung sowie deren Komponenten (Transpiration, Interzeption, Boden- und Schneeverdunstung),
- Abfluss (Oberfläche, Makroporenfluss, Downslope, Grundwasser),
- Bodenversickerung,
- Grundwasserneubildung als Abfluss aus der letzten Bodenschicht und
- Bodenspeicherinhalt und Bodenfeuchte (je Bodenschicht und für das gesamte Bodenprofil).

5.2.1 Exemplarische räumliche Ergebnisse

Abbildung 39 zeigt die mittleren monatlichen Hauptkomponenten der Wasserbilanz für zwei Extremfälle: Das Hochwasser im August 2002 und die Dürreperiode im September 2018. Im August 2002 ging mehr als die Hälfte des Niederschlags, im Erzgebirge durchschnittlich 70 % bis 90 %, direkt in den Oberflächenabfluss, während der Rest verdunstete. Im September 2018 verursachte das Niederschlagsdefizit eine lange hydrologische Trockenheit. Daher waren die Abflusswerte sehr niedrig und fast das gesamte im System verfügbare Wasser verdunstete als Transpiration und Interzeption. Die gewählten Beispiele zeigen, wie verschiedene Landnutzungs- und Bodentypen in Hochwasser- und Dürresituationen in Bezug auf den Gesamtabfluss, die Verdunstung sowie die Gesamtbodenfeuchte reagieren. Insbesondere ist der Unterschied zwischen natürlichen und städtischen Gebieten bezüglich der Verdunstung deutlich sichtbar. So weisen z.B. Städte eine reduzierte Verdunstung auf, wohingegen für Waldflächen im Erzgebirge besonders hohe Werten vorliegen. Der Einfluss verschiedener Bodentypen und -tiefen ist anhand der Bodenfeuchte deutlich erkennbar. Dies zeigt sich u.a. für das Ackerland zwischen Leipzig und Chemnitz sowie für Flusstäler und flache Böden im Erzgebirge.

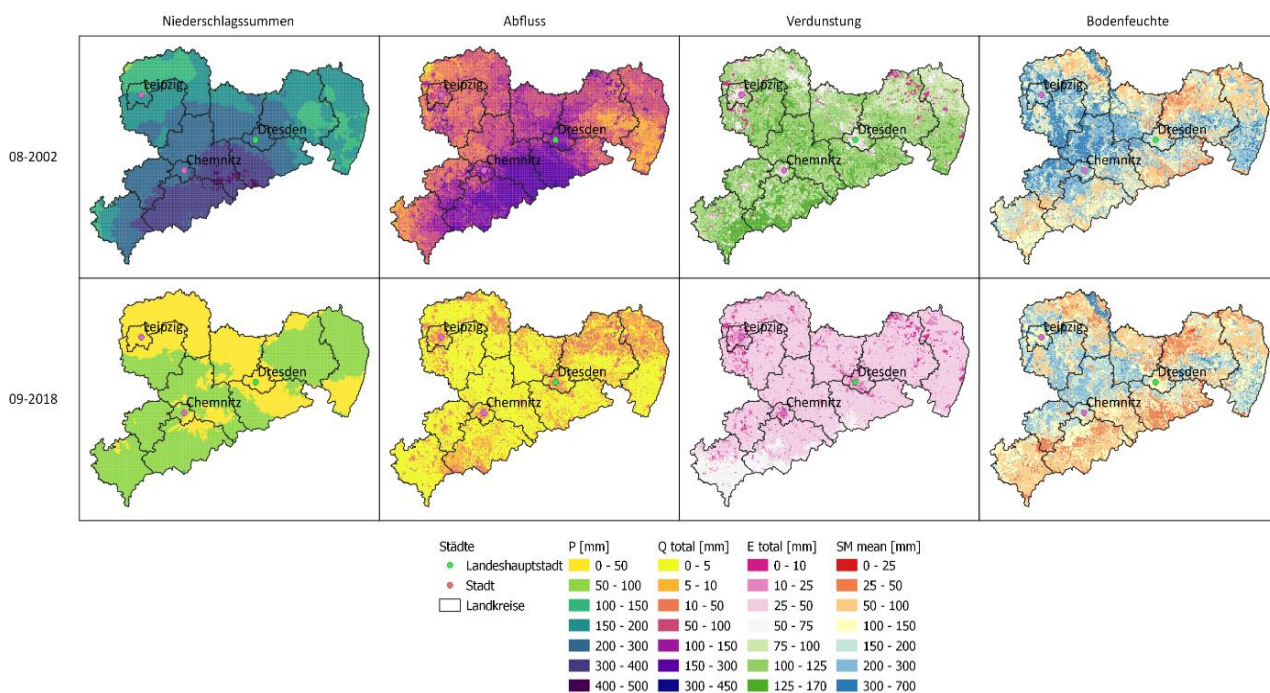


Abbildung 39: Mittlere Wasserbilanzkomponenten für den August 2002 (Hochwasserjahr) und den September 2018 (Dürrejahr)

5.2.2 Exemplarische Punktergebnisse

Abbildung 40 und Tabelle 12 zeigen die Wasserbilanzkomponenten für vier (exemplarische) natürliche Landnutzungstypen: Nadel- und Laubwald, Grünland und Ackerland. Der saisonale Verlauf des Niederschlags zeigt für alle vier Zellen das gleiche Muster mit unterschiedlichen absoluten Mengen. Maximale Regenmengen sind in den Monaten Juli und August zu finden. Die geringste Regenmenge wird normalerweise im Februar beobachtet. Die Verdunstung, die vor allem in der Vegetationsperiode zu 90 % aus Transpiration besteht, liegt je nach Landnutzung in einem Bereich von 10 bis 20 mm in der Wintersaison und bis zu 80 bis 120 mm pro Monat im Mai bis Juli. Das Abflussregime zeigt typischerweise jährliche Maxima von ungefähr 30 bis 80 mm pro Monat im März bis April (Schneesmelze), während die Sommerwerte normalerweise unter 20 mm liegen. Unter Berücksichtigung des Modellaufbaus können typischerweise zwischen 50 % und 90 % des Gesamtabflusses zur Grundwasserneubildung (vertikaler Abfluss von der letzten Bodenschicht nach unten) beitragen. Diese ist in den Wintermonaten (aber auch in Frühling) höher und in der Sommerperiode und Herbst nahezu Null.

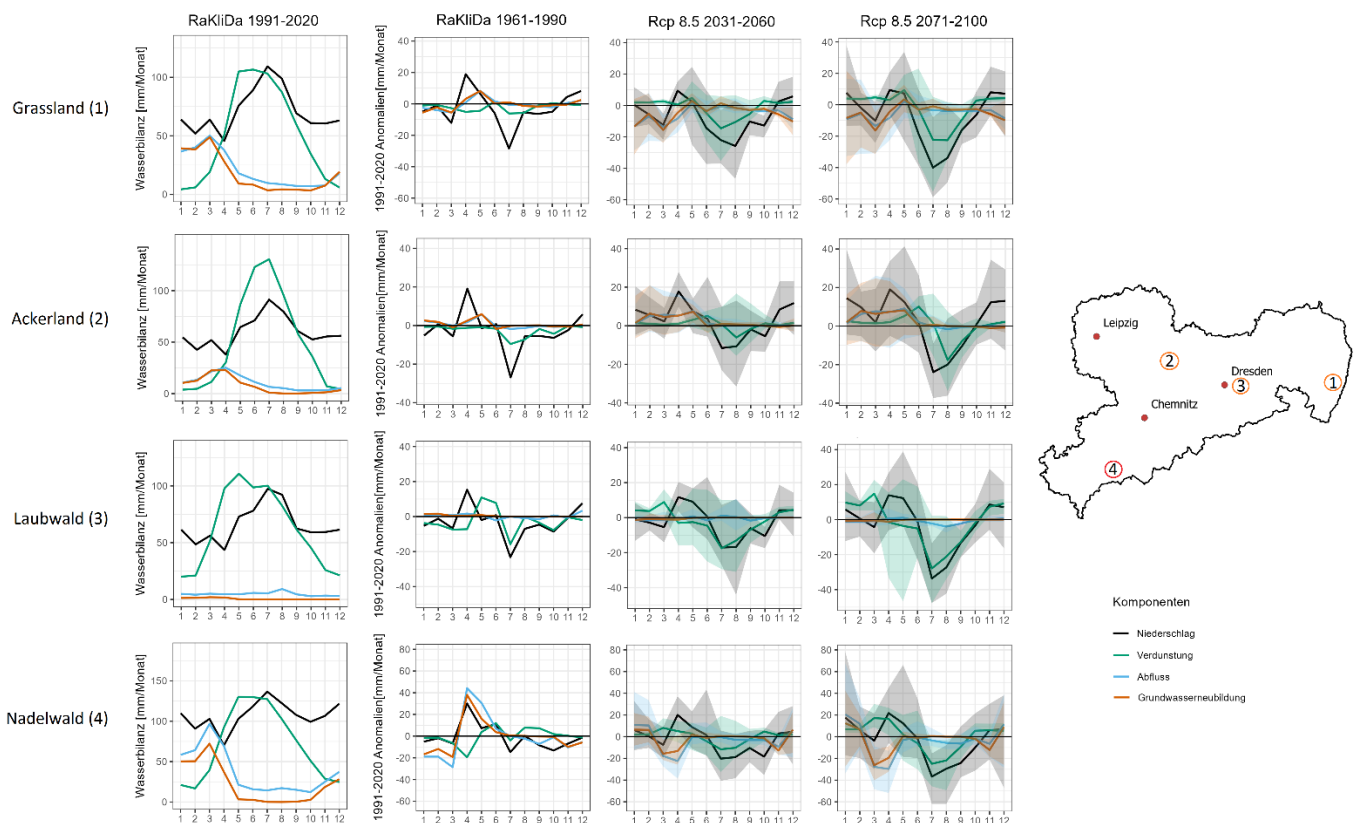


Abbildung 40: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für verschiedene Landnutzungstypen (exemplarische HRU). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt, andere Zeiträume werden durch Anomalien repräsentiert. Die Bandbreite für das RCP 8.5-Szenario zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe. Standorte werden mit Nummern auf der Karte rechts angezeigt. 1 – Grasland, 2 – Ackerland, 3 – Laubwald, 4 – Nadelwald.

Für alle ausgewählten Standorte zeigten sich Verschiebungen im Niederschlag sowohl in der historischen Periode (1961-1990) als auch in den zukünftigen Perioden (RCP 8.5: 2031-2060 und 2071-2100). So wird im April-Mai mit bis zu 20 % mehr Niederschlag gerechnet, während im Juli-August bis zu 40 % weniger erwartet wird. Diese Veränderungen spiegeln sich direkt im Hauptteil des Wasserhaushalts wider, nämlich der Transpiration, die demselben Muster folgt. Andere Komponenten zeigen kleinere Veränderungen, obwohl erwartet wird, dass die Grundwasserneubildung an den ausgewählten Standorten bis zum Ende des Jahrhunderts im Frühjahr abnimmt (mit Ausnahme des landwirtschaftlichen Standorts). Weitere Abbildungen mit RCP-Szenarien (2.6 und 4.5) in absoluten Werten sowie Anomalien sind im Anhang 0 aufgeführt. Es sollte ebenfalls beachtet werden, dass die Anomalien für die Klimaprojektionen als Mittelwerte aus sieben Modellläufen dargestellt werden, während die einzelnen Läufe als Bandbreite gezeigt werden. Hier wird deutlich, dass die Unsicherheit in Bezug auf die zukünftigen monatlichen Wasserhaushaltskomponenten als hoch einzustufen ist, da die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellläufen für einige Komponenten Anomalien von bis zu 40-80 % aufweisen.

Tabelle 12: Mittlere jährliche Wasserbilanz für den Zeitraum 1991-2020 für exemplarische HRU aus Abbildung 42

Wasserbilanzkomponenten	(1) Grasland		(2) Ackerland		(3) Laubwald		(4) Nadelwald	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Niederschlag	837	100	703	100	776	100	1285	100
Verdunstung	582	70	576	82	720	93	841	65
Transpiration	486	58	505	72	569	73	604	47
Interzeption	81	10	54	8	140	18	221	17
Boden/Schnee Verdunstung	15	2	17	2	11	1	17	1
Abfluss	252	30	130	18	59	8	441	34
Grundwasserneubildung	213	25	97	14	9	1	263	20

5.2.3 Validierung der Verdunstungskomponente mit FLUXNET-Türmen

Die Gesamtverdunstung als Komponente der Wasserbilanz aus der Modellausgabe wurde mit Daten der FLUXNET-Türme validiert. Diese Stationen messen die Verdunstung über verschiedenen Vegetationsbestände mittels Eddy-Kovarianz-Technik. Innerhalb Sachsens befinden sich fünf Stationen mit einer Messreihenlänge von 10 bis zu 23 Jahren (Abbildung 41). Die Validierung wurde für monatliche Aggregationen mittels der Kling-Gupta-Effizienz (Gupta et al., 2009) durchgeführt (Tabelle 13). Die besten Ergebnisse mit dem höchsten KGE wurden für Kurzbestände erzielt: Grünland in Grillenburg (0,94) und Ackerland in Klingenberg (0,80). Die schlechtesten Ergebnisse wurden im alten Fichtenwald von Tharandt (0,42) und in Oberbärenburg (0,44) erzielt, während der junge Buchenwald in Hetzdorf eine mitt-

lere Anpassung zeigte (0,59). Schlechte Ergebnisse für die Wälder ergeben sich aus der deutlichen Überschätzung der mittleren Verdunstung (bis zu 55 %) und Unterschätzung der Variabilität (bis zu 16 %), die vor allem auf eine hohe Interzeptionsverdunstung zurückzuführen ist. Diese Erkenntnisse sind nicht neu und können sowohl auf Probleme in den Prozessbeschreibungen in BROOK90, aber auch auf systematische Messfehler bei der Eddy-Kovarianz Messung hindeuten (Vorobevskii et al., 2022). Die geringe Korrelation für die Station Hetzdorf konnte durch den schnell wachsenden Jungwaldbestand erklärt werden, der mit dem vorgestellten Modellaufbau nicht korrekt dargestellt werden konnte (feste Parametrisierung). Schließlich liegt der BIAS des Eingangsniederschlags aus dem RDS 2.0-Datensatz im Vergleich zu den FLUXNET-Messungen innerhalb von $\pm 10\%$.

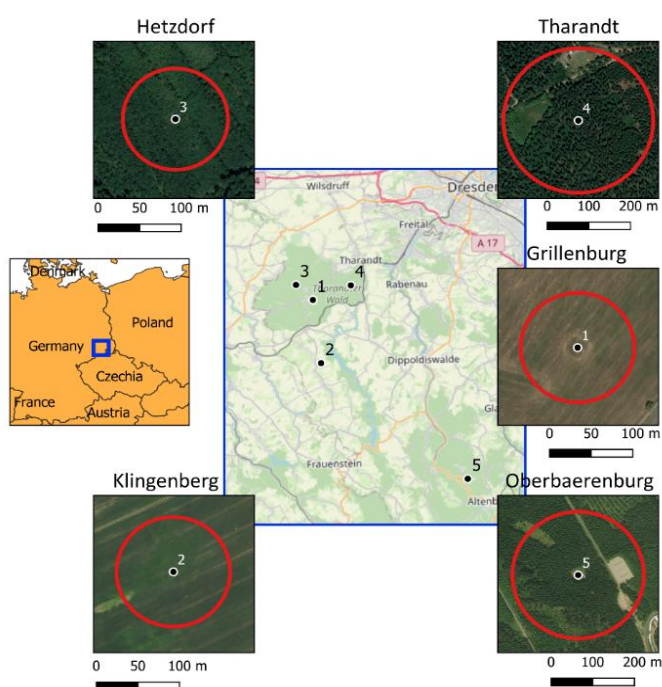


Abbildung 41: Standorte der FLUXNET-Türme in Sachsen

Tabelle 13: Gegenüberstellung von Gütekriterien (z.B. Kling-Gupta-Effizienz KGE) zur Bewertung der Anpassungsgüte zwischen simulierter und an fünf FLUXNET-Stationen gemessener realer Verdunstung ETR

Statistik	Optimum	Tha	Obe	Het	Gri	Kli
		1997-2020	2008-2020	2010-2020	2003-2020	2005-2020
KGE ETR	1	0,42	0,44	0,59	0,94	0,80
Corr ETR		0,84	0,90	0,67	0,95	0,84
BIAS ETR		1,55	1,53	1,17	1,04	1,12
Varianzverhältnis ETR		0,89	0,84	0,83	0,99	1,01
BIAS Niederschlag		0,96	0,97	0,94	0,92	1,11

Es konnte gezeigt werden, dass, obwohl es eine systematische Überschätzung der Verdunstung während des ganzen Jahres gibt, insbesondere in den Wäldern, ein weiterer Fehler zwischen Wachstumsperiode und Sommerpeak auftritt (Abbildung 42). Dies ist vermutlich auf die Unsicherheit im saisonalen LAI-Verlauf zurückzuführen, der aus MODIS-Daten abgeleitet wurde.

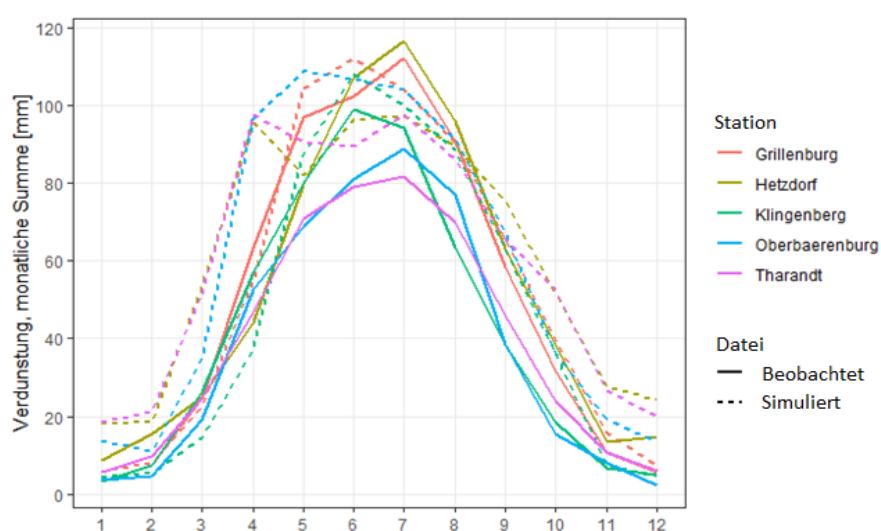
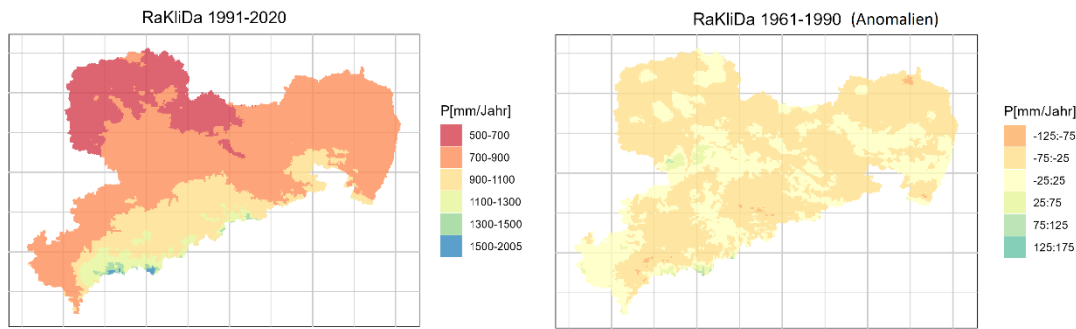


Abbildung 42: Mittlere monatliche Gesamtverdunstung an allen fünf FLUXNET-Standorten

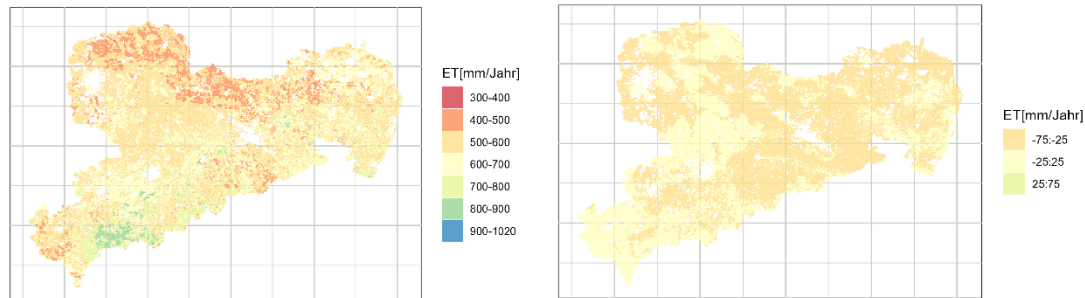
5.2.4 Räumliche Veränderungen der jährlichen Summen der Wasserhaushaltskomponenten in der historischen und zukünftigen Periode

Räumliche Veränderungen der Wasserbilanz über den historischen Zeitraum sind in Abbildung 43 dargestellt. Die mittleren jährlichen Summen der Bilanzkomponenten werden für den aktuellen Zeitraum 1991-2020 in absoluten Werten gezeigt, während die Periode 1961-1990 als Anomalien dargestellt ist, um die Veränderungen der letzten 60 Jahre sichtbar zu machen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Niederschlagsmengen in den letzten 30 Jahren insgesamt 25-75 mm höher liegen als in der vorherigen Referenzperiode. In weiten Teilen des Untersuchungsgebiets gehen mehr als 70 % des jährlichen Niederschlags in die Verdunstung über (500-600 mm). Entsprechend den Niederschlagstrends sind die Verdunstungsmengen in den letzten 30 Jahren ebenfalls um 25-75 mm höher. Der Gesamtabfluss zeigt eine hohe räumliche Variabilität in der Region, von nahezu 0 mm in den nördlichen Flachlandgebieten (wo der gesamte Niederschlagsmenge verdunstet) bis hin zu 1.600 mm im Erzgebirge. Zeitliche Veränderungen sind in den meisten Teilen des Untersuchungsgebiets gering, mit Ausnahme eines leichten Anstiegs des Abflusses in den Gebirgsregionen (bis zu 75 mm) und eines Rückgangs in der Nähe von Bautzen und Mittweida. Die Grundwasserneubildung folgt naturgemäß den Abflussmustern, da sie einen Teil davon ausmacht. Für den Großteil Sachsens beträgt die Grundwasserneubildung etwa 100 mm, und historischen Veränderungen in der Menge sind in den Simulationen kaum erkennbar.

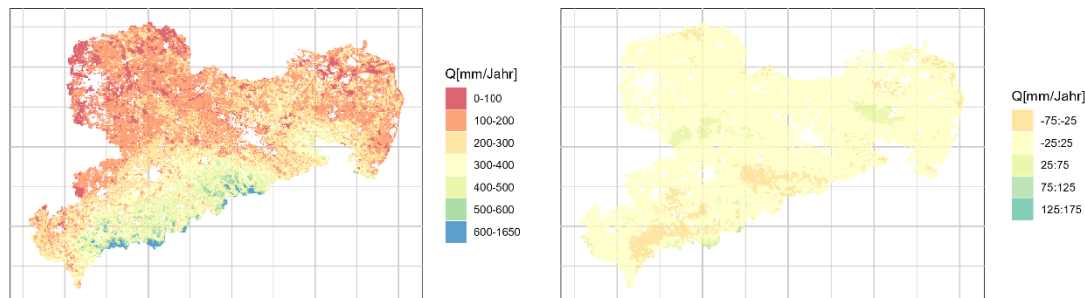
Niederschlag



Verdunstung



Abfluss



Grundwasserneubildung

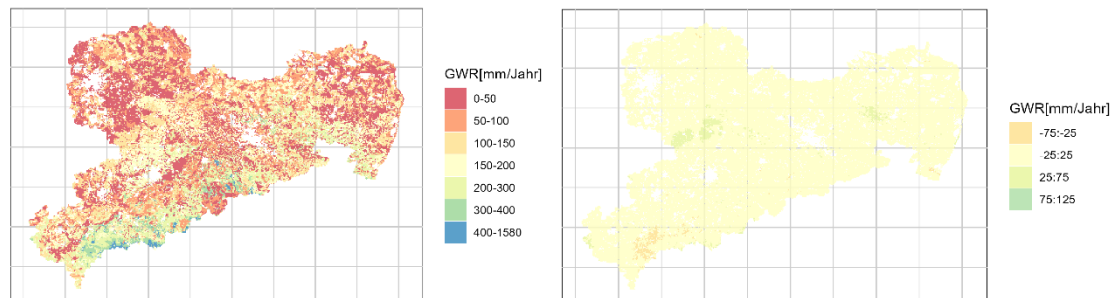
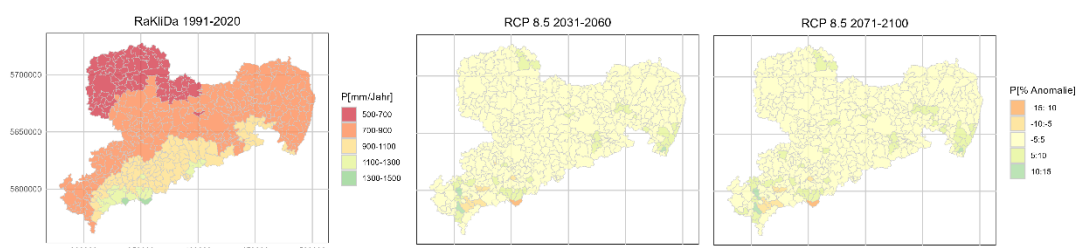


Abbildung 43: Mittlere jährliche Wasserbilanzkomponenten für die historische Periode (1991-2020 und 1961-1990). Urbane Gebiete und große Wasserflächen sind ausgeblendet.

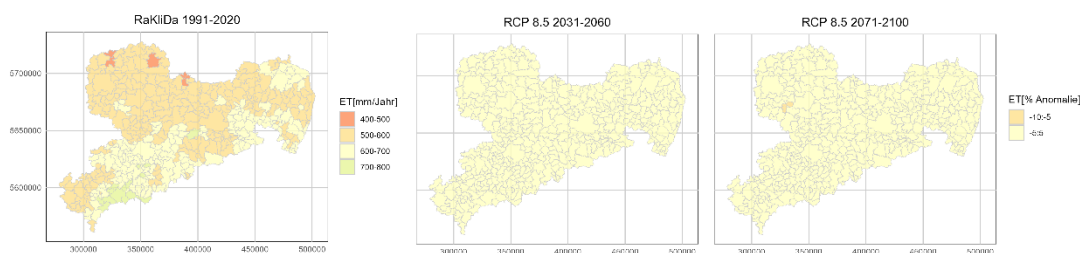
Die Gemeinde-aggregierten Komponenten der Wasserbilanz für die historische Periode (1991-2020) und die ensemble-gemittelten Daten der zukünftigen Klimaprojektion im RCP 8.5-Szenario sind in Abbildung 44 dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass gemäß dem MDK-Ensemble die Hauptveränderungen im Niederschlag einige Gemeinden im westlichen Erzgebirge und im östlichen Teil Sachsens betreffen (hauptsächlich eine Zunahme von bis zu 10 %). Bei der Verdunstung hingegen übersteigen die Veränderungen im Jahresmittel kaum ± 5 %. Auf der anderen Seite sind Änderungen im Gesamtabfluss und in

der Grundwasserneubildung erkennbar. Für das Flachland in Norden und Mittelsachsens wird bis Ende des Jahrhunderts ein Anstieg von durchschnittlich 10-20 % erwartet, während im westlichen Erzgebirge die jährlichen Summen um bis zu 50 % reduziert werden könnten. Obwohl sich die Gesamtwerte für Niederschlag und Verdunstung im Ensemble-Mittel nicht signifikant verändert haben, änderte sich der Jahresverlauf. Es wird allgemein mehr Niederschlag im Frühjahr und weniger im Sommer erwartet. Die Ergebnisse für den Abfluss lassen sich daher durch die erhöhte Wasserverfügbarkeit aufgrund von Schneeschmelze oder überschüssigem Niederschlag über dem feuchten Bodenprofil im März-April erklären, wenn die Verdunstungsraten noch nicht so hoch sind wie im Sommer. Weitere Abbildungen mit allen Variablen und RCP-Szenarien in absoluten Werten sowie Anomalien sind im Anhang 0 aufgeführt.

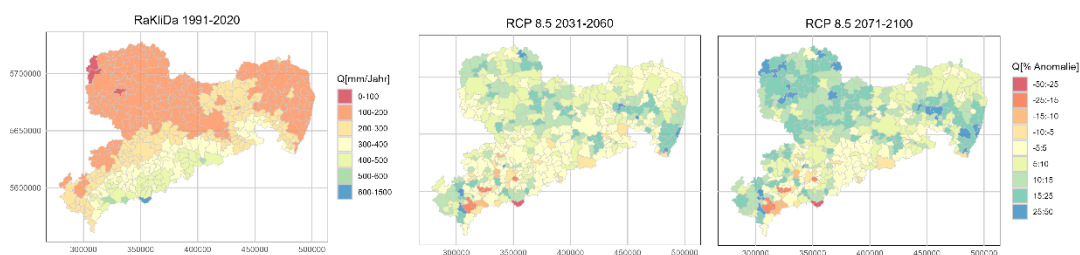
Niederschlag



Verdunstung



Abfluss



Grundwasserneubildung

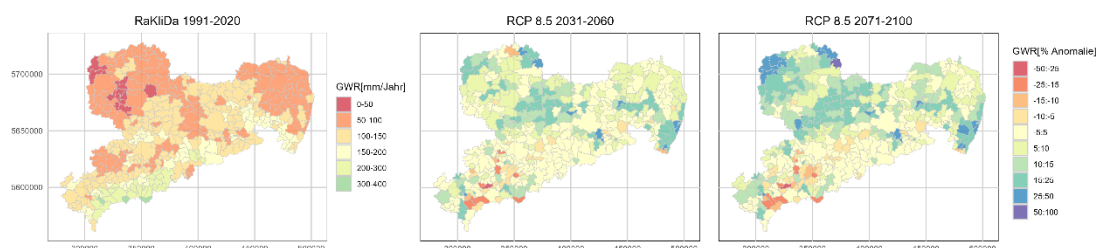


Abbildung 44: Mittlere jährliche Wasserbilanz aggregiert auf Gemeindeebene: historische absolute Werte (1991-2020) und prozentuale Veränderung für das zukünftige RCP 8.5-Szenario (MDK-Ensemble-gemittelt für 2031-2060 und 2071-2100).

Das MDK-Ensemble besteht aus sieben Klimamodellen für jedes RCP-Szenario, um eine große Bandbreite möglicher Klimaveränderungsszenarien abzudecken. Daher ist es manchmal sinnvoll, einzelne Modellläufe anstatt des gemittelten Ensemble-Wertes zu betrachten (Abbildung 45). Beispielsweise zeigen sich im trockenen HadGEM2-WettReg-2018 RCP 8.5-Szenario potenzielle Änderungen in der Verdunstung mit einer Reduktion der jährlichen Summen um 100-150 mm, während im feuchten HadGEM2-RACMO-Szenario die Verdunstung um bis zu 50-100 mm zunehmen könnte.

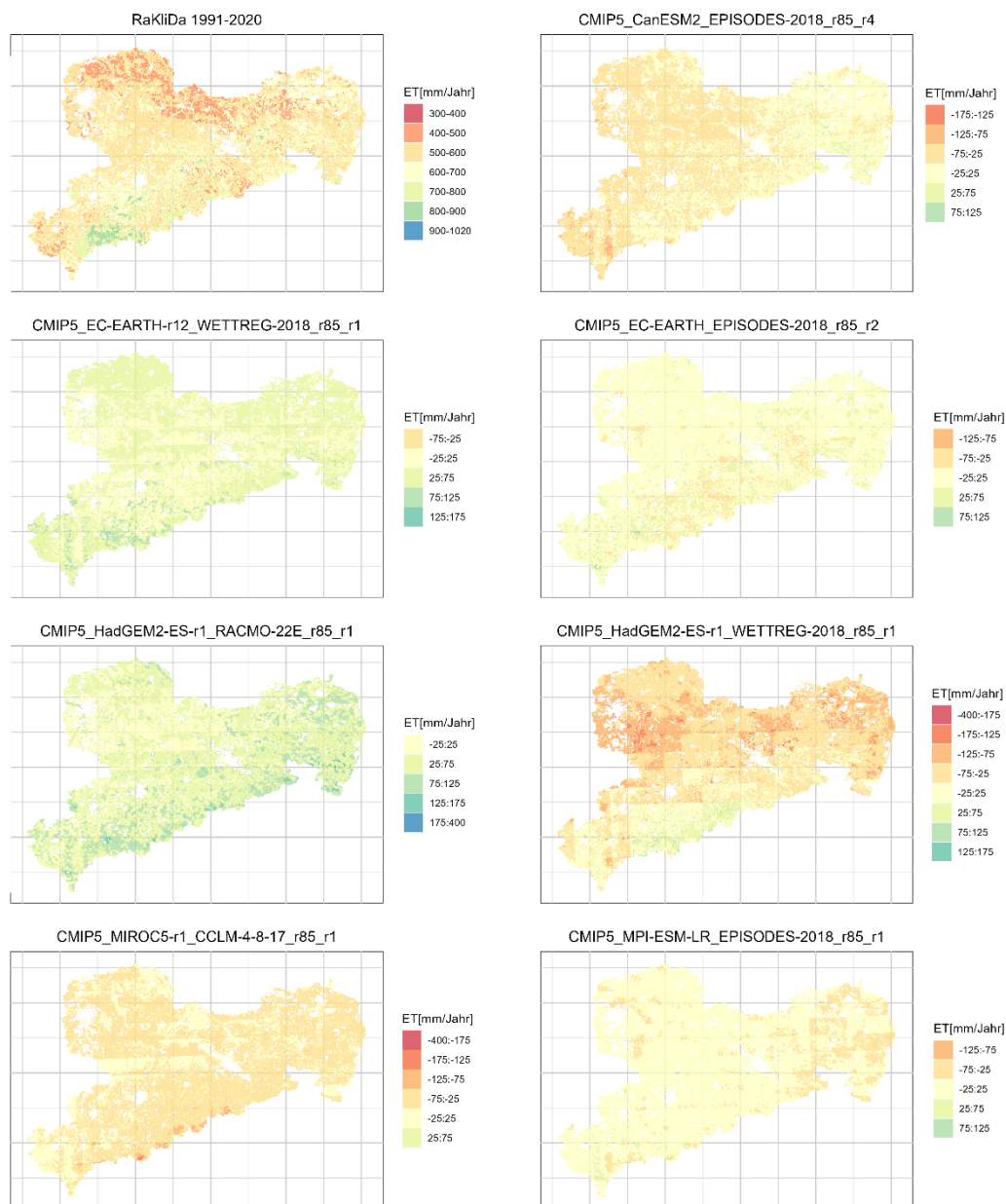


Abbildung 45: Mittlere jährliche Verdunstung: historische absolute Werte (1991-2020) und prozentuale Veränderung für die 7 verschiedenen zukünftigen RCP 8.5 MDK Szenarien (2071-2100). Urbane Gebiete sind ausgeblendet.

Abbildung 46 zeigt die Wasserbilanz für vier Haupttypen natürlicher Vegetation, unterteilt in Vegetations- und Winterperioden. In dieser Abbildung sind alle Rasterzellen und Modellläufe des RCP 8.5-Szenarios mit derselben Vegetationsklasse als Violin-Frequenzdiagramme dargestellt. Wie bereits erwähnt, wird eine Verschiebung des jährlichen Niederschlagsverlauf hin zu einer höheren Wasserverfügbarkeit in der Wintersaison für das gesamte Gebiet bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet, insbesondere für das RCP 8.5-Szenario. Diese Veränderungen der Niederschlagssummen werden jedoch unterschiedliche Auswirkungen auf die Umverteilung von Verdunstung und Abfluss für die verschiedenen Vegetationstypen haben.

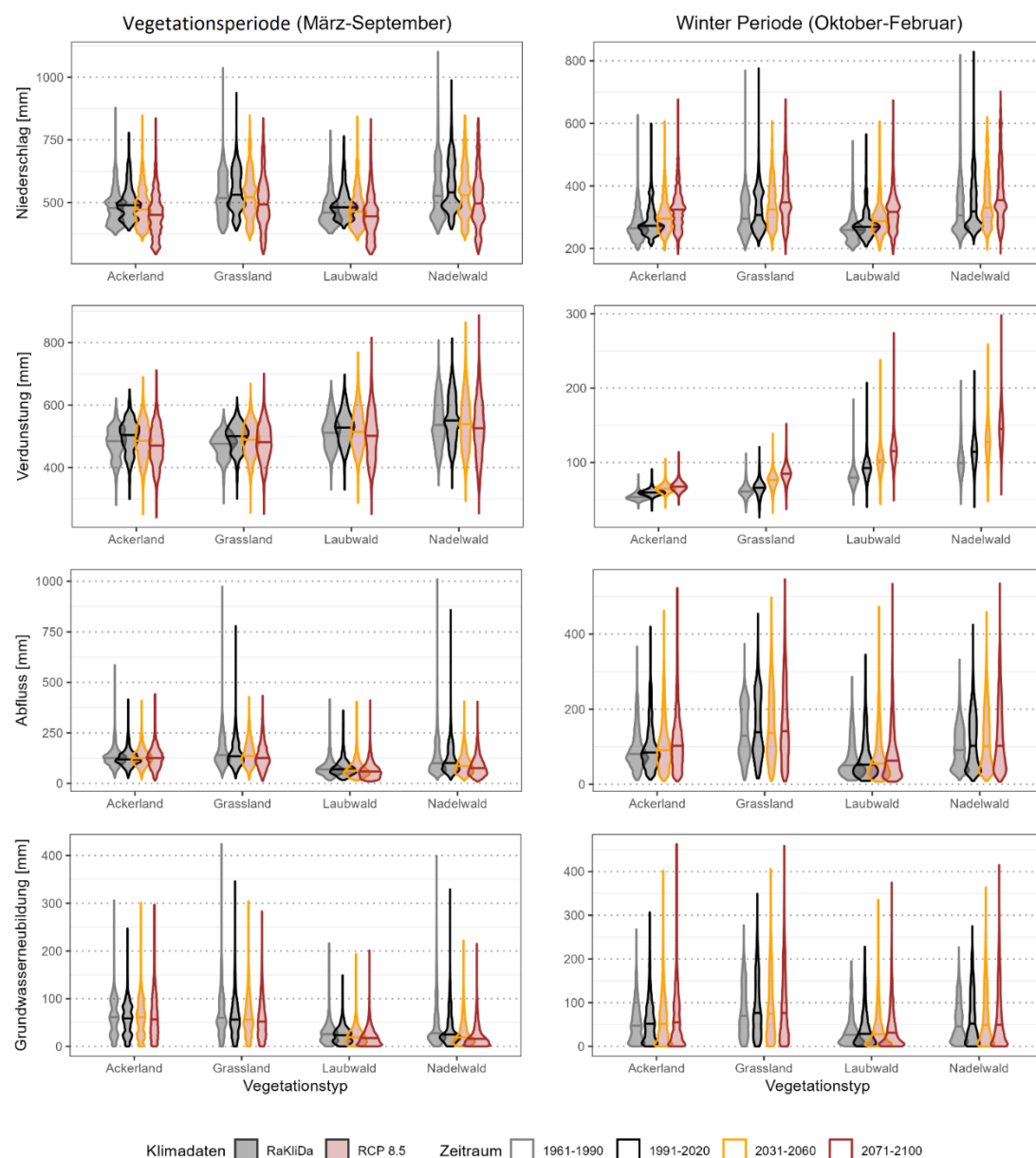


Abbildung 46: Mittlere saisonale Wasserbilanzkomponenten für die vier Haupttypen natürlicher Landbedeckung in Sachsen: historische Daten (1961-1990, 1991-2020) und zukünftige RCP 8.5-Szenarien (2031-2060, 2071-2100) des MDK

Für die jährlichen Abflusssummen (und die Grundwasserneubildung als Teil davon) in der Vegetationsperiode werden nur geringe Effekte erwartet, mit einer leichten Abnahme. In den Winterperioden hingegen wird der bereits beobachtete Trend eines steigenden Abflusses bis 2100 weiter zunehmen, insbesondere für Ackerland. Für die Verdunstungskomponente zeigen die beobachteten historischen Trends einen Anstieg der jährlichen und saisonalen Summen für alle Vegetationstypen. Die Klimaprojektionen allerdings zeigen einen generellen Rückgang der Verdunstung für den Zeitraum von März bis September und einen Anstieg für den Zeitraum von Oktober bis Februar, insbesondere in den Wäldern kann dieser Anstieg höher ausfallen. Die Ergebnisse für weitere RCP-Szenarien sind im Anhang 0 zu finden.

Die Analyse des Verhältnisses zwischen Verdunstung und Niederschlag (E/P) ist wichtig, um die Wasserverfügbarkeit für die potenzielle Grundwasserneubildung zu verstehen (Abbildung 47). Die niedrigsten Werte wurden für die Graslandschaften (E/P 0,6-0,7) festgestellt, während im Laubwald fast 80 bis 90 % des jährlichen Niederschlags verdunsten. In den letzten 20 Jahren wurde ein steigender Trend im E/P-Verhältnis beobachtet (um 10-15 %). Allerdings zeigen die Klimaprojektionen, mit Ausnahme von zwei RCP 8.5-Modellen, keinen klaren steigenden oder fallenden Trends. Einzig hervorzuheben ist, dass die potenzielle Bandbreite der Veränderungen für das RCP 8.5-Szenario viel größer ist als für das RCP 2.6-Szenario.

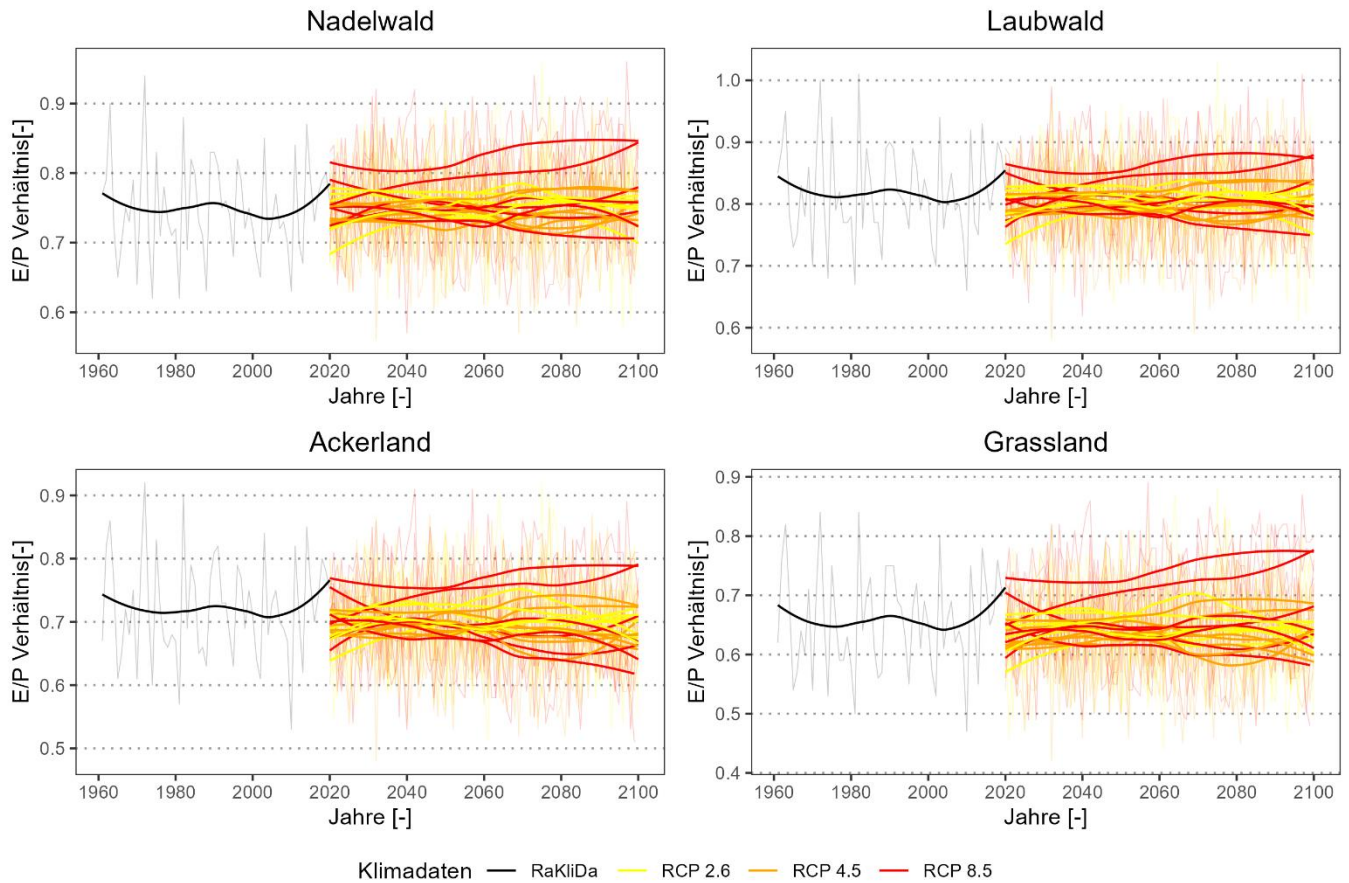


Abbildung 47: Jährliche Zeitreihe des E/P-Verhältnisses für die vier Haupttypen natürlicher Landbedeckung für historische und zukünftige Zeitperioden. Dünne Linien stellen die jährlichen Werte dar, während dicke Linien geglättete Werte sind.

6 Vergleichende Betrachtung des Modell-Ensembles

Für das Einzugsgebiet Dohna, welches in Abschnitt 4.1 vorgestellt wird, erfolgt beispielhaft eine Gegenüberstellung der Wasserhaushaltsergebnisse für das Modellensemble aus ArcEGMO, Raven und BROOK90. Die Ergebnisse der Ganglinienseparation mit DIFGA sollen als Referenz dienen. Grundlage des Vergleichs bilden relative Wasserhaushaltskomponenten der realen Verdunstung, des Direktabflusses und des GW-Zuflusses. Diese sind in Abbildung 48 als 30-jährige Mittelwerte (1991-2020) dargestellt. Die dazugehörigen absoluten Werte enthält Tabelle 14.

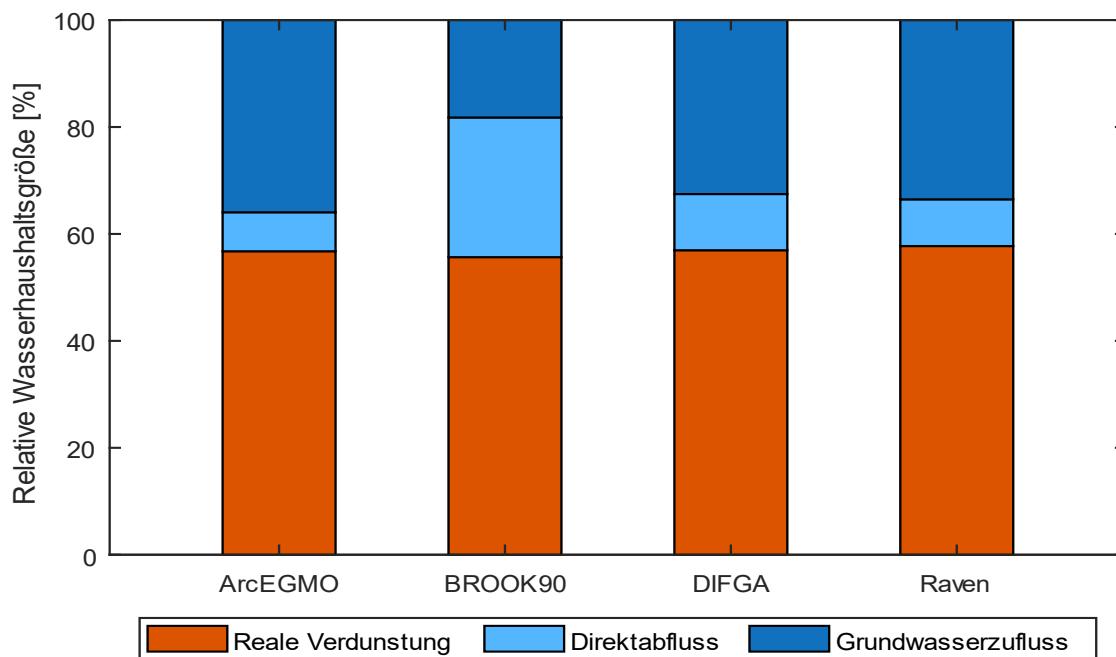


Abbildung 48: Vergleich langjähriger Wasserhaushaltskomponenten (reale Verdunstung, Direktabfluss und Grundwasserzufluss, 1991-2020) basierend auf Ergebnisse aus ArcEGMO, BROOK90, Raven und DIFGA für das Einzugsgebiet Dohna

Das Säulendiagramm veranschaulicht, wie sich der Jahresniederschlag von fast 1000 mm/a im Gebiet Dohna auf die drei WHH-Komponenten aufteilt. Hinsichtlich der realen Verdunstung sind alle vier Modellergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung. Die Ergebnisse des Modells BROOK90 weisen den geringsten Wert auf, während Raven den höchsten Wert simulierte. Die Differenz liegt bei rund 70 mm/a (s. Tabelle 14).

Tabelle 14: Vergleich langjähriger Wasserhaushaltskomponenten (Niederschlag P, reale Verdunstung ETR, Direktabfluss RD und Grundwasserzufluss RG in mm/a, 1991-2020) basierend auf Ergebnisse aus DIFGA, ArcEGMO, Raven und BROOK90 für das Einzugsgebiet Dohna

	P	ETR	RD	RG
DIFGA	984	609	86	288
ArcEGMO	990	587	71	332
Raven	990	624	83	283
BROOK90	987	558	254	175

Für die Aufteilung der beiden Komponenten Direktabfluss und GW-Zufluss ergeben sich größere Unterschiede. Hier ist die Verteilung von RD und RG für ArcEGMO, Raven und DIFGA recht ähnlich, wobei die Ergebnisse von ArcEGMO etwas stärker von den DIFGA-Werten abweichen. Für BROOK90 zeigt sich hingegen eine deutlich andere Aufteilung der beiden Abflusskomponenten mit einem wesentlich größeren Direktabflussanteil und einem geringeren Zufluss zum Grundwasser. Dies lässt sich durch die Verwendung von Ergebnissen der DIFGA-Analysen für die Kalibrierung der Modelle ArcEGMO und Raven begründen. Die Aufteilung der simulierten Wasserhaushaltskomponenten orientiert sich daher folgerichtig an den DIFGA-Ergebnissen. Für das Modell BROOK90 erfolgte keine Kalibrierung an verschiedene Wasserhaushaltskomponenten. Hierdurch ergibt sich eine abweichende Aufteilung für die simulierten Größen des Direktabflusses, des GW-Zuflusses und der realen Verdunstung.

Um die zeitliche Entwicklung der drei relativen WHH-Komponenten im historischen Zeitraum von 1961-2020 darzustellen, werden in Abbildung 49 die DIFGA-Ergebnisse als 10-jährige Mittelwerte in einem sogenannten Tern-Diagramm veranschaulicht. Es zeigt ebenfalls die Aufteilung drei WHH-Komponenten für das Gebiet Dohna. Durch die Darstellung der Komponenten für sechs Dekaden ist erkennbar, dass sich die Aufteilung über die Zeit ändert. Während der GW-Anteil für die ersten Dekaden ca. 40% des Jahresniederschlags ausmacht und der ETR-Anteil zwischen 55% und 60% liegt, ändert sich diese Aufteilung für die letzte Dekade von 2011-2020 deutlich hin zu einer höheren Verdunstung und einer Abnahme des GW-Anteils am Niederschlag.

Abbildung 50 zeigt das Tern-Diagramm mit der Ergänzung um die WHH-Ergebnisse der Modelle ArcEGMO, Raven und BROOK90. Grundsätzlich sind hinsichtlich der realen Verdunstung alle vier Modell-ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung (zwischen 53% und 67% des Niederschlags). Die ETR-Ergebnisse des Modells BROOK90 weisen eine geringere Bandbreite auf, während Raven die höchste Variabilität simulierte und gut mit den DIFGA-Ergebnissen übereinstimmt.

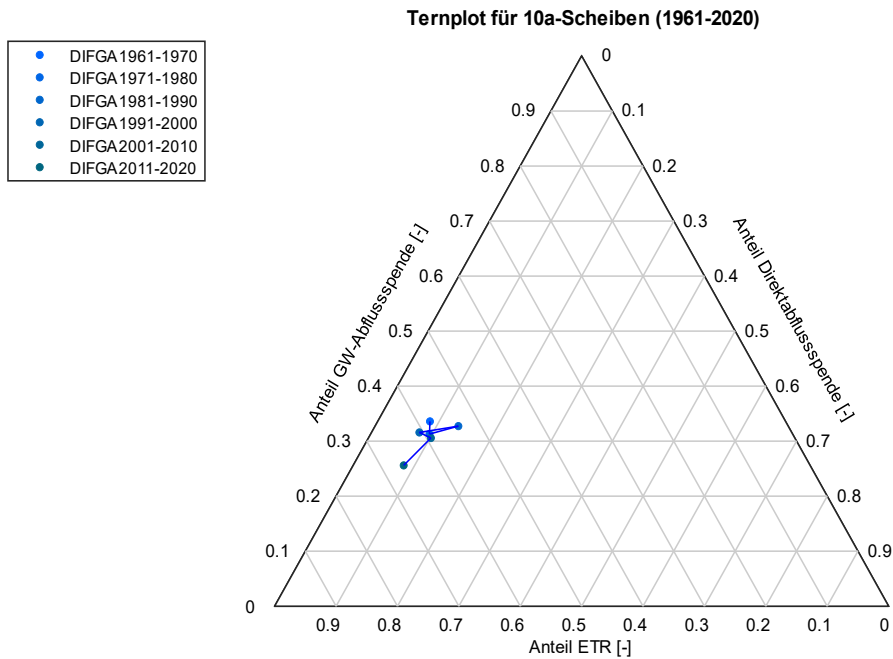


Abbildung 49: Tern-Diagramm mit relativen Wasserhaushaltskomponenten für sechs Dekaden (1961-2020) basierend auf DIFGA-Ergebnissen des Einzugsgebiets Dohna

Den simulierten ETR-Werten von BROOK90 wird aber dennoch eine hohe Zuverlässigkeit zugesprochen, da sie mit dem Verdunstungsansatz nach Shuttleworth-Wallace errechnet wurden. Dieser Verdunstungsansatz geht von einer zweischichtigen Vegetation aus und ist damit etwas realitätsnäher als der Grasreferenzansatz mit der Annahme einer einschichtigen Vegetation, welcher in ArcEGMO und Raven verwendet wurde.

Die Aufteilung von Direktabfluss- und Grundwasserzufluss ist, wie bereits in Abbildung 48 erkennbar, recht unterschiedlich. Während mit Raven die große Bandbreite hinsichtlich des Zuflusses zum GW-Speicher abgebildet werden kann, zeigen die ArcEGMO-Ergebnisse eine etwas geringere Variabilität. Die Modellergebnisse beider Modelle entsprechen aber grundlegend den mit DIFGA abgeleiteten WHH-Komponenten. BROOK90 modelliert hingegen einen größeren Anteil Direktabfluss (zwischen 23% und 28%) und im Gegenzug einen geringeren Zufluss zum GW-Speicher (um die 18% vom Niederschlag).

Für die Aufteilung der Direktabfluss- und Grundwasserzufluss-Anteile wird eine höhere Zuverlässigkeit bei den Modellergebnissen von ArcEGMO und Raven gesehen. Zum einen enthalten beide Modelle Ansätze, welche den Abfluss auch über laterale Komponenten (Routingfunktionen von Oberflächen- und Gerinneabfluss) abbilden. Zum anderen orientieren sich die Ergebnisse an abgeleiteten WHH-Größen basierend auf der Ganglinienseparation mit DIFGA. Die Aufteilung der WHH-Komponenten wird daher als valide angesehen.

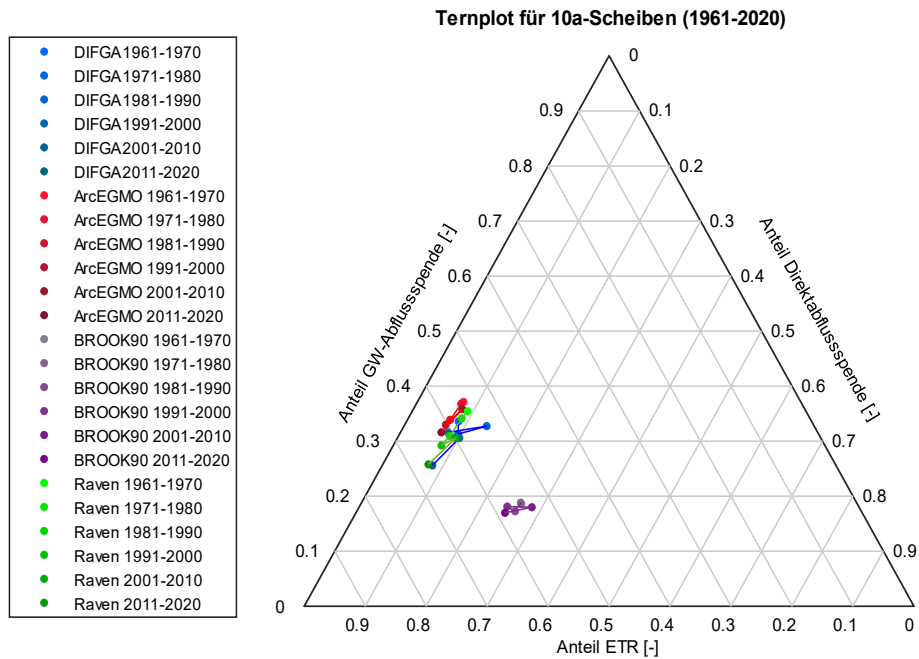


Abbildung 50: Tern-Diagramm mit relativen Wasserhaushaltskomponenten für sechs Dekaden (1961-2020) basierend auf Modellergebnissen (DIFGA, ArcEGMO, BROOK90, Raven) des Einzugsgebiets Dohna

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des LfULG-Vorhabens KliWES 3.0 wurden erstmals Wasserhaushaltsberechnungen für den gesamten Freistaat Sachsen auf der Grundlage des bisher verwendeten Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO durchgeführt. Zudem kam ein Modellensemble bestehend aus ArcEGMO, BROOK90 und Raven pilothaft in ausgewählten Einzugsgebieten zum Einsatz. Der Wasserhaushalt und seine Komponenten wurden sowohl für den Beobachtungszeitraum 1961–2020 als auch für 21 Klimaprojektionen des Mitteldeutschen Kernensembles für den Zeitraum 1961–2100 berechnet. Die in der Einleitung formulierten Projektziele zur inhaltlichen und methodischen Weiterentwicklung des KliWES-Projekts wurden unter Berücksichtigung einer umfassenden Qualitätssicherung erreicht.

In den Ergebnissen der Wasserhaushaltsberechnungen für KliWES 3.0 zeigte sich für den Reanalyse Zeitraum 1961–2020 im Mittel ein Anstieg der realen Verdunstung in Sachsen ab 1990, der zunächst nicht durch die Anfangsparametrisierung des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO abgebildet werden konnte. Die in diesem Zeitraum durch eine Ganglinienseparation geschätzte Aufteilung der Wasserflüsse konnte erst durch eine alternative Berechnung der Grasreferenzverdunstung aus stündlichen ERA5-Land-Daten sowie Nebenbedingungen während der Kalibrierungen erreicht werden. Letztere stellen sicher, dass der Trend der Speicherentwicklung im seit 1990 beobachteten Rahmen bleibt. Für die zukünftige Entwicklung des Wasserhaushaltes in Sachsen gibt es für die ferne Zukunft 2050-2100 eine zu große Spannweite von Entwicklungen, um belastbare Trends in Niederschlag (u.a. eine saisonale Verschiebung von Niederschlag in das Winterhalbjahr), realer Verdunstung und Abfluss abzuschätzen. Insbesondere die Vorhersage des Verhaltens der Vegetation ist unter Bedingungen von zunehmenden Trockenstress und potenzieller Evapotranspiration für diesen Zeitraum sehr schwierig. Für die nahe Zukunft bis 2050 zeigen die Berechnungen einen weiteren, leichten Anstieg der realen Verdunstung, der für einzelne EZG mit einer Abnahme des Zuflusses zum Grundwasserspeicher verbunden sein kann. Für die WHH-Modellierungen mit ArcEGMO wurde zudem eine Bewertung der Ergebnisse in Form von Qualitätsstufen vorgenommen. Sie soll eine Orientierung zur Belastbarkeit der Ergebnisse für verschiedenen Modellregionen bieten.

In der Modellensemble-Pilotstudie wurden alle drei Wasserhaushaltsmodelle – soweit möglich – auf denselben geografischen und topologischen Datengrundlagen aufgebaut. Ebenso wurde auf eine einheitliche Nutzung der meteorologischen Eingangsdaten geachtet. Erwartungsgemäß weisen die Ergebnisse der Modelle aber Unterschiede auf. Während die realen Verdunstungswerte aus BROOK90 aufgrund des verwendeten Verdunstungsansatzes als valide gelten, weichen die Werte für Direktabfluss und Zufluss zum GW-Speicher wesentlich von denen der anderen Modelle ab. Hier sind die Ergebnisse von ArcEGMO und Raven zuverlässiger, da beide laterale Abflusskomponenten detaillierter modellieren.

Die simulierten Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen auf der Grundlage des bisher verwendeten Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO sind für das gesamte Gebiet des Freistaats Sachsen frei zugänglich über den Webaufruf des sogenannten GWN Viewers abrufbar. Sie zeigen die mögliche Bandbreite an zukünftigen klimatischen Entwicklungen für Sachsen ausgehend von den Projektionen des Mitteldeutschen Kernensembles in einer sehr hohen räumlichen Auflösung. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Qualitätssicherung (1) neue und umfangreiche Modelltests, welche für ArcEGMO und Raven erfolgten, implementiert, (2) Pre- und Postprocessing der Datengrundlagen sowie der Modellergebnisse verbessert und (3) alle Arbeitsschritte im Rahmen der Standards einer guten Modellierungspraxis durch Automatisierung beschleunigt und reproduzierbar ausgeführt. Damit wurden auch die Grundlagen geschaffen, um die FAIR-Prinzipien für das Management von Forschungsdaten (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable - übersetzt: auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar) umsetzen zu können.

Für die Weiterentwicklung des KliWES-Vorhabens zeigt die Integration des Verdunstungsansatzes von BROOK90 nach Shuttleworth-Wallace in das Modellsystem Raven große Potentiale zur weiteren Entwicklung der Modellgrundlage für zukünftige Wasserhaushaltsberechnungen. Mit diesem Modellsystem können auch realistische Bewirtschaftungsdaten und -regeln für Reanalyse und Zukunftsszenarien integriert werden. Dadurch lassen sich die Wasserhaushaltsberechnungen sowohl auf der Grundlage der neuesten Klimaszenarien als auch optimaler und adaptiver Anpassungen in der Wasserressourcenbewirtschaftung fortschreiben.

Literaturverzeichnis

- ALLEN, R.G., SMITH, M., PERRIER, A. & PEREIRA, L.S. (1994). An Update for Definition of Reference Evapotranspiration. ICID Bulletin 43, 2, 1-34.
- BERNFOFER, C., PLUNTKE, T., BARFUS, C., HEIDENREICH, M., KRONENBERG, R., HAUFFE, C., WAGNER, M., SCHWARZE, R., GUTZMANN, B. (2019). Klima-Referenzdatensatz 1961-2015 – Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlagen im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 7/2019.
- BLS (2018). Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Bayern 2016, Statistische Berichte. (Hrsg.) Bayerisches Landesamt für Statistik, Fürth.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/wasser-oeffentlich-2190211169004.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am: 17.05.2023
- BOÉ, J., TERRAY, L., HABETS, F., & MARTIN, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 27(12), 1643-1655.
- BOUAZIZ, L.J., FENICIA, F., THIREL, G., DE BOER-EUSER, T., BUITINK, J., BRAUER, C., DE NIEL, J., DEWALS, B.J., DROGUE, G., GRELLIER, B. (2021). Behind the scenes of streamflow model performance. (C. GmbH, Hrsg.) Hydrology and Earth System Sciences, 25(2), S. 1069-1095. doi.org/hess-25-1069-2021.
- BUCHHORN, M., SMETS, B., BERTELS, L., DE ROO, B., LESIV, M., TSENDBAZAR, N. - E., HEROLD, M., FRITZ, S. (2020). Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe 2020.
- CLAPP, R.B., HORNBERGER, G.M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. Water Resources Research, Vol. 14, No. 4, S. 601-604, August 1978. doi.org/10.1029/WR014i004p00601.
- CRAIG, J.R., G. BROWN, R. CHLUMSKY, W. JENKINSON, G. JOST, K. LEE, J. MAI, M. SERRER, M. SHAFII, N. SGRO, A. SNOWDON, AND B.A. TOLSON (2020). Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework, Environmental Modelling and Software, 129, 104728, doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104728.
- DALELANE, C., FRÜH, B., STEGER, C., WALTER, A. (2018). Ein pragmatischer Ansatz zum Aufbau eines reduzierten regionalen Klimaprojektionsensembles für Deutschland unter Verwendung des EURO-CORDEX 8.5-Ensembles. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57 (3), S. 477-491.
- ECKELMANN, W., SPONAGEL, H., & GROTTENTHALER, W. (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

- FEDERER, C.A., C. VÖRÖSMARTY UND B. FEKETE (2003). Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *Journal Hydrometeorology*. doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004%3C1276:SOAETS%3E2.0.CO;2
- GUPTA, V.H., KLING, H., YILMAZ, K.K., MARTINEZ G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, Vol. 377, 1-2.
- HAUFFE, C., PAHNER, S., RÖHM, P., PFÜTZNER, B., KLÖCKING, B., MEY, S., GEBEL, M., UHLIG, M., BÜRGER, S., HALBFAß, S., WAGNER, M., WÖHLING, T., SCHWARZE, R., REHSE, C. (2022). *KliWES 2.0 - Klimawandel und Wasserhaushalt*. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 17/2022.
- HAUFFE, C., BRANDES, C., PAHNER, S., WAGNER, M., SCHÜTZE, N., LEI, K. (2023). *Sensitivitätsstudie 2.0 - Sensitivität des Wasserdargebots im Zeitraum 1961-2021 unter besonderer Beobachtung der Grundwasserneubildung in der Periode 2014-2021*. Abschlussbericht unveröffentlicht.
- HÜLSMANN, S., STEFANOVA, A., ADYNKIEWICZ-PIRAGAS, M., LEJCUŚ, I., ZDRALEWICZ, I. (2021). *Niedrigwasser und Mindestwasserabflüsse in der Lausitzer Neiße – Grenzüberschreitende Ansätze zur Ermittlung und Bewertung*. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- KLÖCKING, B. (2003). *Parametrisierung und Validierung des PSCN-Moduls anhand der Messwerte der Altengottenschen Lysimeterstationen*. Abschlussbericht GLOWA-Elbe I, Verbundvorhaben "Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Umwelt und die Gesellschaft. Berlin.
- KÖRNER, P., KALAß, D., KRONENBERG, R., BERNHOFER, C. (2021). REAL-Fog part 2: A novel approach to calculate high resolved spatio-temporal fog deposition: A daily fog deposition data set for entire Germany for 1949–2018. *Journal of Hydrology*, Vol. 599. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126360.
- KÖRNER, P., VOROBESKII, I., KRONENBERG, R., HOMOUDI, A. (2022). *Klima-Referenzdatensatz Sachsen 1961 – 2020 – Erzeugung eines lückenlosen, stationsbasierten und rasterbasierten Klima-Referenzdatensatzes für Sachsen für den Zeitraum 1961 bis 2020*. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 18/2022.
- LFULG (2014). *Hydrologisches Handbuch – Pegelverzeichnis Teil 1*. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- LUONG, T.T., PÖSCHMANN, J., VOROBESKII, I., WIEMANN, S., KRONENBERG, R., BERNHOFER, C. (2020). Pseudo-Spatially-Distributed Modeling of Water Balance Components in the Free State of Saxony. *Hydrology* 2020, 7, 84. doi.org/10.3390/hydrology7040084.
- MANSEL, H., KACIREK, A., PFÜTZNER, B., MEY, S., HESSE, P., SCHWARZE, R., HAUFFE, C., RÖHM, P. (2019). *Wasserhaushalt im Tagebaugebiet um Leipzig - Berechnung des Wasserhaushaltes im Tagebaugebiet um Leipzig auf Basis eines Ensembles von zehn Klimaprojektionen für die Säule B*

- des Wasserhaushaltsportales. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- MLUL (2017). Kommunale Abwasserbeseitigung im Land Brandenburg – Lagebericht 2017. (Hrsg.) Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL).
<https://mluk.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/Lagebericht-Abwasserbeseitigung2017.pdf>. Zugriff am: 17.05.2023
- MUÑOZ SABATER, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi.org/10.24381/cds.e2161bac. Zugriff am: 11.04.2025
- MYNENI, R., KNYAZIKHIN, Y., PARK, T. (2021). MODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Datensatz]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
doi.org/10.5067/MODIS/MCD15A2H.061. Zugriff am: 10.05.2023
- PAHNER, S., BRANDES, C., HAUFFE, C., SCHÜTZE, N. (2023). Machbarkeitsstudie für Wasserhaushaltsberechnungen in den vom Braunkohlenbergbau betroffenen Regionen Sachsens. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 18/2023.
- PFÜTZNER, B., KLÖCKING, B., BECKER, A. (2007). ArcEGMO GIS-gestützte hydrologische Modellierung. Berlin und Potsdam: Büro für Angewandte Hydrologie (BAH).
- POTAPOV, P., LI, X., HERNANDEZ-SERNA, A., TYUKAVINA, A., HANSEN, M. C., KOMMAREDDY, A., PICKENS, A., TURUBANOVA, S., TANG, H., SILVA, C. E., ARMSTON, J., DUBAYAH, R., BLAIR, J. B., HOFTON, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. Remote Sensing of Environment, Vol. 253. doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165.
- SCHWARZE, R. (1985). Gegliederte Analyse und Synthese des Niederschlags-Abfluss-Verhaltens von Einzugsgebieten. Dissertation, Fakultät für Bau-, Wasser-, Forstwesen, Technische Universität Dresden.
- SCHWARZE, R., DRÖGE, W., OPPERDEN, K. (1999). Regionalisierung von Abflusskomponenten, Umsatzräumen und Verweilzeiten für kleine Mittelgebirgseinzugsgebiete. In H. Kleeberg, W. Mauser, G. Peschke, & U. Streit, Hydrologie und Regionalisierung - Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998), S. 345-370. Weinheim: Wiley - VCH.
- SCHWARZE, R., DRÖGE, W., HAUFFE, C., BALDY, A., WAGNER, M., STEINL, C., LÜNICH K. (2012). KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen (Klimaprojektionen). Abschlussbericht unveröffentlicht.
- SCHWARZE, R., DRÖGE, W., HAUFFE, C., BALDY, A., WAGNER, M. (2013): KliWES – Nebelkorrektur Erarbeitung einer Nebelkorrektur für meteorologische Daten mit einem geeigneten Verfahren im Rahmen des FuE-Projekts KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt (Klimaprojektionen). (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 16/2013.

- SCHWARZE, R., HAUFFE, C., BALDY, A., WINKLER, P., DRÖGE, W., WAGNER, M., RÖHM, P. (2014). KliWES Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen – Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist-Zustand und verschiedene Klima- bzw. Landnutzungsszenarien. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 32/2014.
- SHUTTLEWORTH, W.J., WALLACE, J.S. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 111 (469), S. 839-855.
doi.org/10.1002/qj.49711146910.
- SINGER, M.B., ASFAW, D.T., ROSOLEM, R., CUTHBERT, M.O., MIRALLES, D.G., MACLOAD, D., QUICHIMBO, E.A., MICHAELIDES, K. (2021). Hourly potential evapotranspiration at 0.1° resolution for the global land surface from 1981-present. In: Nature, Scientific Data 8, 224. doi.org/10.1038/s41597-021-01003-9.
- STLA SACHSEN (2018). Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung im Freistaat Sachsen 2016, Statistischer Bericht - Q I 1 - 3j/16. (Hrsg.) Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (StLA Sachsen), Kamenz 2018.
https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/SNHeft_derivate_00008446/Q_I_1_3j_16_SN_a1b.pdf. Zugriff am: 23.05.2023
- STLA SACHSEN (2021). Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung im Freistaat Sachsen 2019, Statistischer Bericht - Q I 1 - 3j/19. (Hrsg.) Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (StLA Sachsen), Kamenz 2021.
https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/SNHeft_derivate_00009481/statistik-sachsen_qi1_wasser-abwasser-oeffentlich.pdf. Zugriff am: 23.05.2023
- STLA SACHSEN-ANHALT (2018). Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung 2016, Statistischer Bericht, (Hrsg.) Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
https://statistik.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Landesamter/StaLa/startseite/Themen/Umwelt/Berichte/Wasserversorgung_und_Abwasserbeseitigung/6Q101_2016-A.pdf Zugriff am: 17.05.2023
- STEINIGER, M., WURBS, D., DEUMELANDT, P. (2013). Bedeutung landwirtschaftlicher Dränsysteme für den Wasser- und Stoffhaushalt, Abschlussbericht. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 28/2013.
- STRUVE, S., EHLERT, I., PFANNSCHMIDT, K., HEYNER, F., FRANKE, J., KRONENBERG, R., EICHHORN, M. (2020). Mitteldeutsches Kernensemble zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten - Dokumentation - Version 1.0 (2020). Halle (Saale), März 2020.
- TER BRAAK, C. J. F. (2006). A Markov chain Monte Carlo version of the genetic algorithm differential evolution: Easy Bayesian computing for real parameter spaces. Statistics and Computing, 16, 239 – 249.

- TER BRAAK, C. J. F. AND J. A. VRUGT (2008). Differential evolution Markov chain with snooker updater and fewer chains. *Statistics and Computing*, 18, 435 – 446.
- TLS (2019). Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Thüringen 2016, Statistischer Bericht - Q I - 3 j / 16. Thüringer Landesamt für Statistik (TLS).
https://statistik.thueringen.de/webshop/pdf/2016/16101_2016_00.pdf. Zugriff am: 17.05.2023
- UHLMANN, W., ZIMMERMANN, K., KALTOFEN, M., GERSTGRASER, C., GROSSER, F., SCHÜTZEL, C. (2023).
 Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz. Umweltbundesamt. Texte 90/2023. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wasserwirtschaftliche-folgen-des>.
 Zugriff am: 10.07.2024
- VILLANI, V., RIANNA, G., MERCOGLIANO, P., ZOLLO, A. L., & SCHIANO, P. (2014). Statistical approaches versus weather generator to downscale rcm outputs to point scale: a comparison of performances. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 8(2), 142-154.
- VOROBESKII, I., LUONG, T.T., KRONENBERG, R., GRÜNWALD, T., BERNHOFER, C. (2022). Modelling evaporation with local, regional and global BROOK90 frameworks: importance of parameterization and forcing. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 26, 12.
- VRUGT, J. A., TER BRAAK, C. J. F., CLARK, M. P., HYMAN, J. M., AND ROBINSON, B. A. (2008). Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation, *Water Resources Research*, 44. doi.org/10.1029/2007WR006720.

Online-Quellen

- BAH (2025). ArcEGMO Das hydrologische Modellierungssystem. <https://arcegmo.de/eigenschaften/>.
Büro für Angewandte Hydrologie (BAH). Zugriff am: 26.03.2025
- COPERNICUS WEBSITE (2019a). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1?tab=download>. Zugriff am: 17.04.2019
- COPERNICUS WEBSITE (2019b). Corine Land Cover (CLC) 2018. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>. Zugriff am: 19.12.2019
- LFULG, LAU, TLUBN, IHM (2022). Regionales Klimainformationssystem Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen. <https://rekisviewer.hydro.tu-dresden.de/fdm/ReKISExpert.jsp>. Zugriff am: 22.11.2022
- FLUXNET (2023): <https://fluxnet.org/sites/siteinfo/DE-Obe>, Zugriff am: 02.11.2023
- REGIKLIM WEBSITE (2021).
https://www.regiklim.de/DE/Modellregionen/KlimaKonform/klimakonform_node.html. Zugriff am: 25.05.2023
- REKIS PORTAL (2025) https://rekis.hydro.tu-dresden.de/wp-content/uploads/2024/05/ReKIS_Steckbrief_Klimaprojektionsdaten_2024-04-24.pdf. Zugriff am: 10.04.2025
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LFULG) (2020). BK50 Arbeitsstand Mai 2020. <https://www.boden.sachsen.de/geodatendownload-des-fachbereichs-boden-19380.html>.
Zugriff am: 05.03.2021
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LFULG) (2023). Geodatendownload des Fachbereichs Wasser. <https://www.wasser.sachsen.de/geodatendownload-12834.html>.
Zugriff am: 22.03.2023
- SRTM30 (2013): doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003

Anhang

A 1 Anhang ArcEGMO

A 1.1 Vergleich der Bearbeitungsräume von KliWES 1.0, 2.0 und 3.0

Als Zielstellung für den Bearbeitungsraum wurde im Projekt KliWES 1.0 (Schwarze et al., 2014) eine vollständige Abdeckung der Fläche Sachsens durch ein Wasserhaushaltsmodell formuliert worden. Es lagen allerdings in diesem Raum sehr unterschiedliche Voraussetzungen für Wasserhaushaltsberechnungen vor, die zu einem teilweisen Ausschluss bestimmter Bereiche aus der Modellierung geführt haben. So konnten Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser in Auenbereichen modellseitig nicht abgebildet werden, so dass die Modellierung des sogenannten Elbeschlauchs nicht erfolgte. Hierbei handelt es sich um die Überflutungsflächen der Elbe während des Hochwassers 2002.

Darüber hinaus lagen und liegen in den sächsischen Tagebaugebieten der Lausitz wie auch im Leipziger Raum seit Jahrzehnten komplexe Wechselwirkungen vor, welche nur sehr eingeschränkt mit einem Wasserhaushaltsmodell abgebildet werden können. Auch diese Regionen wurden im Projekt KliWES 1.0 noch nicht mitberücksichtigt. Die betreffenden Flächen sind in Abbildung 1 (linke Karte) als weiße Bereiche sichtbar, während der Bearbeitungsraum dunkelgrün dargestellt ist. Die Fläche des Modellraums betrug rund 17.300 km². Eine Diskussion zur Festlegung des Bearbeitungsraums enthält Schwarze et al. (2014). Für die braun schraffierte Region im Nordwesten Sachsens wurden in einem separaten Projekt Wasserhaushaltsberechnungen durchgeführt (Mansel et al., 2019).

In KliWES 2.0 wurde der Elbeschlauch in den Projektraum eingebunden und die Lücke zwischen den Modellgebieten des Leipziger Raums und dem KliWES-Bearbeitungsraum geschlossen. Die aktuellen und ehemaligen Tagebaugebiete der Lausitz im Nordosten Sachsens wurden allerdings nicht abgedeckt. Für die Lausitzer Neiße erfolgten unabhängige Wasserhaushaltsberechnungen im Rahmen des Projekts NEYMO-NW (Hülsemann et al., 2021), wie der dunkelgelb dargestellte Bereich in Abbildung 1 (mittige Karte) zeigt. Der Projektbearbeitungsraum in KliWES 2.0 ist in Abbildung 1 (mittige Karte) als grüne Fläche erkennbar. Der Modellraum umfasste im Projekt KliWES 2.0 eine Fläche von ca. 17.000 km².

A 1.2 Aufbereitung der geografischen und topologischen Datengrundlagen

A 1.2.1 Teileinzugsgebiete

Für die Teileinzugsgebiete (TEG) wurde die bereits bearbeitete Struktur aus KliWES 2.0 übernommen. Um bei der Datengrundlage konsistent zu bleiben und eine korrekte Einbindung der neu zu integrierenden Gebiete innerhalb Sachsens zu gewährleisten, wurde auch in KliWES 3.0 die Teileinzugsgebietsstruktur

des LfULG mit Arbeitsstand 2019 verwendet. Änderungen erfolgten in Rücksprache mit der LTV für einzelne Teileinzugsgebiete in der Umgebung von Wasserspeichern und Talsperren. Hier lagen gegenüber dem Arbeitsstand von 2019 inzwischen Anpassungen vor, welche berücksichtigt werden sollten.

Teileinzugsgebiete in Polen, Tschechien sowie Brandenburg waren bereits in KliWES 2.0 (Hauffe et al., 2022) in die Teileinzugsgebietsstruktur integriert worden. Zur vollständigen Abdeckung der Weißen Elster mussten allerdings noch Teileinzugsgebiete in Thüringen und Sachsen-Anhalt ergänzt werden.

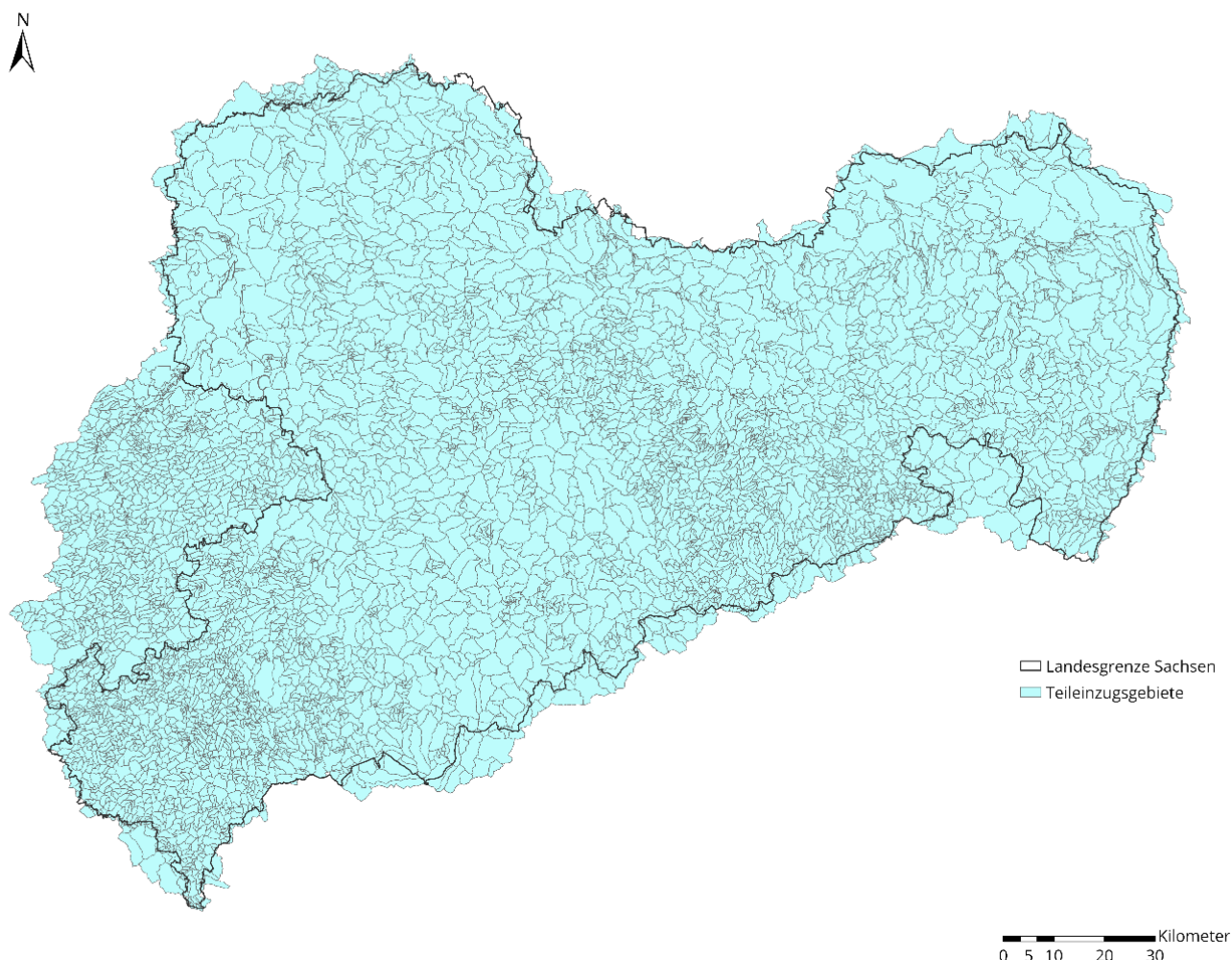


Abbildung A 1: Karte der Teileinzugsgebietsstruktur im Bearbeitungsraum

Hierfür wurde eine deutschlandweit vorliegende Teileinzugsgebietsstruktur verwendet, welche von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) frei zur Verfügung gestellt wird. Die Passfähigkeit zum sächsischen Datensatz war mangelhaft, so dass eine manuelle Überarbeitung der Topologie und Gebietskennzahlen an den Schnittstellen zwischen den Bundesländern erforderlich war.

Ergänzend wird darauf hingewiesen, dass in der Wasserhaushaltsmodellierung räumlich getrennte, aber dennoch in den Metadaten verbundene Teileinzugsgebiete nicht zulässig sind. Sie entstehen im

Allgemeinen durch eine komplexe Bewirtschaftung wie z.B. durch Überleitungen. Modellbedingt war hier eine Aufteilung in jeweils unabhängige Gebiete notwendig.

A 1.2.2 Fließgewässer

Auch beim Fließgewässernetz wurde auf den Datensatz des KliWES 2.0-Projekts (Arbeitsstand 2019) als Grundlage für die weitere Bearbeitung zurückgegriffen. Er basiert auf dem vom LfULG bereitgestellten Gewässernetzes und enthält bereits umfangreiche Korrekturen. Diese aufbereitete Gewässerstruktur wurde mit der aktuellen Datengrundlage von 2023 verglichen. Es zeigten sich nur sehr geringfügige Unterschiede zwischen den Datensätzen, so dass die weitere Verwendung der älteren überarbeiteten Gewässerstruktur gerechtfertigt war. Das aktuelle Fließgewässernetz von 2023 (LfULG, 2023) wurde hingegen genutzt, um die neuen Bearbeitungsgebiete an die vorhandene Datenbasis anzuschließen. Dies umfasst das Einzugsgebiet der Neiße in Sachsen ebenso wie die Lausitzer Tagebauregion. Für die Weiße Elster wurde dagegen das frei verfügbare Fließgewässernetz der BfG verwendet, da die sächsische Gewässerkarte keine Fließabschnitte in anderen Bundesländern enthielt. Der Datensatz der BfG war in seiner Auflösung allerdings teils deutlich gröber und enthielt nur die Hauptfließgewässer.

Um einen möglichst homogenen Datenbestand zu erzielen, wurden daher weitere Datenquellen zur Ergänzung von Fließgewässerverläufen herangezogen. Topografische Karten der umliegenden Bundesländer erwiesen sich als geeignet. Mit ihrer Hilfe konnten fehlende Fließabschnitte integrieren werden.

Im Anschluss an die räumliche Ergänzung des Gewässernetzes für den gesamten Bearbeitungsraum erfolgte der Abgleich von Fließgewässerstruktur und Teileinzugsgebietsgrenzen. Diese müssen für den Aufbau des Wasserhaushaltsmodells korrespondieren. Hierfür gelten folgende Regeln:

- An der Teileinzugsgebietsgrenze muss ein Fließgewässerabschnitt enden und unterstrom ein neuer beginnen.
- Münden Gewässer zusammen, so muss nach dem Zusammenfluss ein neuer Gewässerabschnitt beginnen.
- Fließgewässerabschnitte müssen einen Unterlieger haben, außer sie sind als Gebietsauslass an der Grenze des Untersuchungsraumes gekennzeichnet.
- Teileinzugsgebiete sollten lediglich einen Auslass besitzen. Liegen in einem Teileinzugsgebiet mehrere Auslässe vor, so muss der Vorfluter definiert und alle anderen Auslässe getrennt werden.

Das Fließgewässernetz wurde entsprechend der genannten Regeln korrigiert.

A 1.2.3 Pegel (geografische Lage)

Zunächst erfolgte eine Zusammenstellung der Lage aller bekannter Pegel, für die in den KliWES-Projekten Abflusszeitreihen zur Verfügung standen bzw. stehen. Grundlage war die Pegelkarte des LfULG (Stand Januar 2023) sowie ältere bereits in den KliWES-Teilprojekten erfasste Stände. Im Rahmen der Aufbereitung wurden Vorgänger- und Nachfolgerpegel zusammengeführt, um einen konsistenten Datenbestand zu erreichen. Zudem erfolgten teils Lagekorrekturen der Pegelpunkte, da diese sich für den folgenden automatisierten Aufbau des Wasserhaushaltmodells idealerweise direkt am Gewässer befinden sollten.

A 1.2.4 Boden

Auch die Bodenkarte musste ergänzt werden, um den Bearbeitungsraum vollständig abzudecken. Hierfür wurden verschiedene Datengrundlagen genutzt:

- Bodenkarte Sachsens Maßstab 1:50 000 BK50 (LfULG, Stand: Mai 2020, s. Abbildung A 31)
- Bodenübersichtskarte Maßstab 1:200 000 BÜK200 (BGR, Stand: 2019)
- Bearbeitete Bodenkarten der Vorgängerprojekte KliWES 1.0 (BKkonz und BÜK200, s. Schwarze et al., 2014) und KliWES 2.0 (BK50 Stand 2019 und BÜK200, s. Hauffe et al., 2022)

Basierend auf der für Sachsen flächendeckend vorhandenen BK50 erfolgten in KliWES 2.0 bereits umfangreich Aufbereitungen sowie Ergänzungen durch Flächen außerhalb Sachsens (Hauffe et al., 2022). Dieser Arbeitsstand bildete die Grundlage für die weitere Bearbeitung.

Nun kamen weitere Gebiete in den Bundesländern Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen hinzu, die zuvor nicht Bestandteil des Projekts waren. Basierend auf der Polygonstruktur der wurden diesen Flächen Bodeneigenschaften der BK50 zugeordnet. Die Zuweisung erfolgte ausgehend von räumlicher Nähe und Nachbarschaftsbeziehungen. Dies war insbesondere für Flächen in Brandenburg und Sachsen-Anhalt gut umsetzbar, da es sich fast ausschließlich um grenznahe Bereiche zu Sachsen handelt. Für das Einzugsgebiet der Weißen Elster (Thüringen und Sachsen-Anhalt) ließen sich mit diesem Vorgehen nur begrenzt Böden bzw. Bodenprofile übertragen. Hier wurden die Leitbodenformen und Beschreibungen der BÜK200 und BK50 miteinander verglichen und ein nach den Bodeneigenschaften geeigneter, regional vorkommender Boden der BK50 ausgewählt. Im Falle der polnischen Flächen des Untersuchungsraumes wird auf Bodeninformationen aus KliWES 1.0 (Schwarze et al., 2014) zurückgegriffen. Diese Gebiete waren nicht Bestandteil im Projekt KliWES 2.0. Abgesehen von einem europäischen Rasterdatensatz mit Bodeninformationen, welcher nicht an die vektorbasierte BK50 angebunden werden konnte, gibt es keine aktuellen Datengrundlagen. Daher wurde die vorhandene Raumstruktur aus

KliWES 1.0 übernommen und die Bodeninformationen der BK50 (Stand 2020) auf undefinierte Nachbarflächen übertragen. Für tschechische Gebiete erfolgte dasselbe Vorgehen.

Die zur BK50 gehörige Datenbank enthält detaillierte Aufschlüsselungen der Horizonte verschiedener Böden sowie die regional variablen Eigenschaften der Bodentypen. Sie lag ab Mai 2020 in ihrer abschließenden Fassung vor, was eine Aktualisierung der Datenbank aus KliWES 2.0 (Stand 2019) erforderlich machte.

In der Datenbank waren folgende Bodenparameter enthalten, welche für die Wasserhaushaltsmodellierung benötigt wurden:

- Horizontnummer
- Horizontmächtigkeit und -Tiefe
- Bodenart
- Gesamtporenvolumen in Volumen-%
- Skelettvolumen in Volumen-%
- Wassergehalt Feinboden bei pF 1,8 in Volumen-% entspricht Feldkapazität
- Wassergehalt Feinboden bei pF 4,2 in Volumen-% entspricht dem Permanenten Welkepunkt
- Humusstufe
- Trockenrohdichtestufe
- Physisches Durchwurzelungspotenzial in dm (nicht horizontspezifisch)

Die Datenbank wurde u.a. durch die Komplettierung horizontspezifischer Eigenschaften für alle Böden und Stufengrenzen für die Trockenrohdichte (TRD) erweitert. Dadurch konnte die hydraulische Leitfähigkeit k_f der Bodenhorizonte anhand der TRD-Stufen sowie der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (Tabelle 76, Eckelmann et al., 2005) abgeleitet werden. Der vorherige Ansatz bedurfte zusätzlicher Zwischenschritte bei der Ableitung, die nun nicht mehr erforderlich waren.

Weitere ermittelte Bodenparameter sind die Substratanteile Ton, Schluff und Sand sowie die Lagerungsdichte je Horizont. Das Vorgehen wurde im Rahmen des LfULG-Projekts Machbarkeitsstudie Lausitz entwickelt und umgesetzt (Pahner et al., 2023). Für die vorliegende Studie wurde auf den Ansatz zurückgegriffen.

Dränagen

Im Gegensatz zu den Projektteilen KliWES 1.0 (Schwarze et al., 2014) und KliWES 2.0 (Hauffe et al., 2022), in denen jeweils der Dränagedatensatz von Steiniger et al. (2013) verwendet wurde, erfolgte in der aktuellen Studie keine Einbindung von Dränagen. Hintergrund war die bestehende Unsicherheit bezüglich der tatsächlich vorhandenen Dränagen in Sachsen. So enthält der Datensatz von Steiniger et al. (2013) nur Informationen zu potentiell dränbedürftigen Böden und keine Kenntnisse zu existierenden Dränagemaßnahmen. Eine diesbezüglich flächendeckende Datensammlung war nicht verfügbar.

Die Berücksichtigung von Dränagen in den vorherigen Projektteilen führte in den betreffenden Einzugsgebieten oft zu einem hohen Anteil des Oberflächenabflusses an den gesamten Abflusskomponenten und schnellen Gebietsreaktionen bei Niederschlag. Dies korrespondierte nur begrenzt mit den jeweiligen Durchflussdaten. Daher wurde nun auf die Abbildung von Dränagen in der Wasserhaushaltsmodellierung verzichtet.

A 1.2.5 Grundwasserflurabstände

Für die Grundwasserflurabstände erfolgte eine vollständige Aktualisierung der Daten im Vergleich zu KliWES 2.0. Grundlage bildete die durch das LfULG zur Verfügung gestellte Stichtagsmessung von 2022. Das Raster-Shape enthielt interpolierte Grundwasserflurabstände mit einer Auflösung von 8 m x 8 m (Abbildung A 2). Angaben lagen grundsätzlich nur für den Lockergesteinsbereich vor. Aus diesem Grund sind in der Kartendarstellung keine Werte für den südlichen Raum Sachsens ausgewiesen. Die Grundwasserflurabstände im Festgesteinsbereich wurden pauschal mit 10 m unter GOK definiert. Dies gilt auch für alle Flächen außerhalb Sachsens. Hierfür lagen keine Informationen vor.

Es wird zudem darauf hingewiesen, dass sehr tiefliegende Grundwasserstände mit bis zu 296 m unter GOK in den Rasterdaten auftraten. Diese sind für die Wasserhaushaltsmodellierung irrelevant, so dass alle Werte > 10 m unter GOK auf 10 m gesetzt werden. Darüber hinaus gab es einzelne Rasterzellen mit negativen Werten, was einer Lage des Grundwasserstandes über der Geländeoberkante entspricht. Dies trat insbesondere bei Wasserflächen auf. Negative Werte wurden pauschal auf 0,2 m unter GOK festgesetzt. Auch Abstände zwischen 0 m und 0,2 m unter GOK wurden mit 0,2 m definiert. Abschließend erfolgte die Festlegung von Klassengrenzen der Grundwasserflurabstände, da diese für die Verarbeitung im Wasserhaushaltsmodell benötigt wurden. Die Flurabstandsklassen weisen eine Schrittweite von 0,2 m auf. Dies gilt für Tiefen von 0,2 m bis 3 m unter GOK. Zudem gibt es die Flurabstandsklassen 4 m, 5 m und 10 m. Die Klassengrenze bildet jeweils der Mittelwert zweier Flurabstandsklassen.

Die über Sachsen gemittelten Messwerte entsprechen laut Informationen des LfULG den langjährigen Mittelwerten der Grundwasserflurabstände für Sachsen und können somit als repräsentativ angesehen werden.

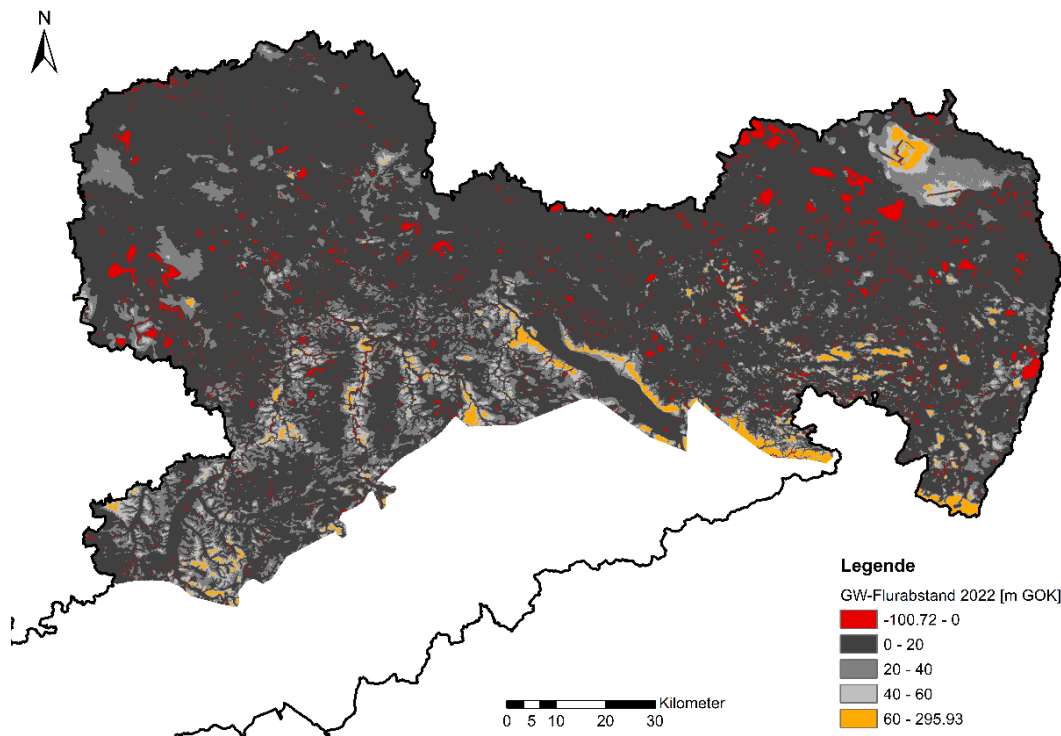


Abbildung A 2: Karte der interpolierten GW-Flurabstände der Stichtagsmessung von 2022 (8 m x 8 m Raster) für den Lockergesteinsbereich Sachsens

A 1.2.6 Geologie

Die in KliWES 2.0 aufbereitete hydro-/geologische Karte vereinte Informationen der hydrogeologischen Übersichtskarte HÜK200 und der Geologischen Übersichtskarte GÜK200. Die Ausdehnung dieser Kartengrundlage deckt den KliWES 3.0-Raum vollständig ab. Benötigte Parameter der Grundwasserspeicher für die WHH-Modellierung waren ebenfalls fast flächendeckend zugeordnet. Die fehlenden Angaben im Lausitzer und Leipziger Raum konnten durch Eigenschaften benachbarter Flächen ergänzt werden.

A 1.2.7 Digitales Geländemodell

Das Digitale Geländemodell (DGM) wurde für die Ableitung der hydrotopspezifischen Reliefeigenschaften Hangneigung, Ausrichtung und der mittleren Geländehöhe benötigt. Die Zusammenführung verschiedener Datengrundlagen erfolgte bereits im Vorgängerprojekt KliWES 2.0 und konnte weiterverwendet werden. Die Flächen innerhalb Sachsens sind durch das vom LfULG bereitgestellte DGM5 (Arbeitsstand Mai 2019) abgedeckt. Gebiete außerhalb Sachsens wurden mit einem europaweit vorliegenden DGM (EU-DEMv1.1; Copernicus Website, 2019a) aufgefüllt. Die ursprüngliche Rasterweite von 20 m musste allerdings zunächst auf 5 m x 5 m disaggregiert werden, um das Raster im Anschluss anbinden zu können. Die Passfähigkeit der Datengrundlagen wurde als ausreichend eingeschätzt (Hauffe et al., 2022).

A 1.2.8 Landnutzung

Ähnlich wie bei der Geologie deckte die bearbeitete Landnutzungskarte des KliWES 2.0-Projektes (Hauffe et al., 2022) den gesamten aktuellen Modellraum ab, so dass darauf zurückgegriffen werden konnte. Grundlage für die Landnutzung bildet eine ATKIS-Karte Sachsens mit einem Arbeitsstand von 2019. Die räumliche Verteilung der Landnutzung ist in Abbildung A 30 dargestellt. Die dazugehörige Klassifizierung kann Tabelle A 4 entnommen werden.

Nicht definierte Landnutzungsflächen innerhalb Sachsens wurden unter Nutzung weiterer Datengrundlagen wie Satellitendaten (Google Maps) und CORINE Landcover (Arbeitsstand 2018, Copernicus Website, 2019b) bestimmt. Bereiche außerhalb Sachsens, welche die ATKIS-Karte nicht enthält, wurden ebenfalls mithilfe des CORINE Landcover Datensatzes (Arbeitsstand 2018, Copernicus Website, 2019b) ergänzt und mit dem Datenbestand innerhalb Sachsens homogenisiert.

A 1.2.9 Anschlussgrad und Kanalisationsart

Der Anschlussgrad von Flächen an die Kanalisation beeinflusst in der Wasserhaushaltsmodellierung die Bildung von sogenanntem Kanalisationsabfluss. Für Sachsen existieren keine ortsspezifischen und exakten Informationen zum Anschlussgrad von Flächen. Allerdings konnte auf allgemeine Informationen hinsichtlich der Bevölkerung auf Landkreis- und Gemeinde-Ebene zurückgegriffen werden. Die Erhebung wird alle drei Jahre vom statistischen Landesamt des Freistaates für ganz Sachsen durchgeführt. In KliWES 2.0 fanden die Daten von 2016 Anwendung. Der Anschlussgrad der Bevölkerung wurde in dieser Erhebung auf Gemeinde-Ebene in sechs Stufen ($< 25\%$ bis $\geq 95\%$) eingeteilt (StLA Sachsen, 2018). Für die Parametrisierung wurde die Stufenmitte angewendet.

Im Bericht des Statistischen Landesamtes von 2019 (StLA Sachsen, 2021) wurden die Stufengrenzen des Anschlussgrades der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation auf Gemeinde-Ebene neu definiert ($< 75\%$ bis $\geq 99\%$). Da es durch die Nutzung des aktuelleren Datensatzes zu einem Informationsverlust hinsichtlich niedrigerer Anschlussgrade kommen würde und die Werte sich auf Landkreisebene nur sehr geringfügig verändert haben (s. Tabelle A 1), wurde der bearbeitete Datensatz von 2016 (Anschlussgrad und Kanalisationsart) auch in KliWES 3.0 verwendet. Es wird darauf hingewiesen, dass der Versiegelungsgrad (Landnutzungsparameter) einer Fläche den Anschlussgrad beeinflusst, so dass es zu einer zusätzlichen räumlichen Differenzierung kommt.

Tabelle A 1: Vergleich des Anschlussgrades [%] der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation von 2016 und 2019 auf Landkreisebene (StLA Sachsen, 2018 und 2021)

kreisfreie Städte, Landkreis	Anschlussgrad [%] an		Änderung 2016 bis 2019
	öffentliche Kanalisation 2016	öffentliche Kanalisation 2019	
Chemnitz, Stadt	98,5	98,7	+ 0,2
Dresden, Stadt	99,4	99,5	+ 0,1
Leipzig, Stadt	99,4	99,4	+ 0
Bautzen	88,6	89	+ 0,4
Erzgebirgskreis	88,3	89,5	+ 1,2
Görlitz	93	93,5	+ 0,5
Leipzig	93,3	94,1	+ 0,8
Meißen	92,5	93,9	+ 1,4
Mittelsachsen	80,2	81,1	+ 0,9
Nordsachsen	94,6	94,6	+ 0
Sächsische Schweiz- Osterzgebirge	90,9	91,3	+ 0,4
Vogtlandkreis	87	87,9	+ 0,9
Zwickau	87,2	87,7	+ 0,5
Sachsen	92,5	93,1	+ 0,6

Für Bayern, Brandenburg, Thüringen und Sachsen-Anhalt standen ähnliche Erhebungen der entsprechenden Statistischen Landesämter mit Stand von 2016 (BLS, 2018, StLA Sachsen-Anhalt, 2018 und TLS, 2019) bzw. 2017 (MLUL, 2017) zur Verfügung. Abgesehen von Brandenburg, für das die Anschlussgrade auf Gemeinde-Ebene vorlagen, waren für alle weiteren Bundesländer die Werte nur auf Landkreisebene verfügbar. Daher erfolgte für die Gemeinden in Bayern, Thüringen und Sachsen-Anhalt zunächst eine Übernahme der Anschlussgrade aus den jeweiligen Landkreisen. Im Anschluss konnte das Vorgehen, welches bereits für die sächsischen Gemeinden verwendet wurde, auch für alle Bearbeitungsflächen außerhalb Sachsens umgesetzt werden. Somit lagen flächendeckend Anschlussgrade für den Bearbeitungsraum vor.

Die Zuweisung der dominierenden Kanalisationsart (Misch- bzw. Trennkanalisation) konnte in allen betreffenden Bundesländern nur auf Landkreisebene erfolgen. Grundlage für die Bestimmung der Kanalisationsart waren ebenfalls die Berichte der jeweiligen Statistischen Landesämter. Das dominierende Kanalsystem wurde anhand der Längenangaben zu Misch- bzw. Trennkanalisation abgeleitet. Da der Statistische Bericht für Brandenburg (MLUL, 2017) keine konkreten Längenabgabe enthält, aber auf die Abwasserableitung "überwiegend mittels Trennkanalisation" verweist, wurde diese Kanalisationsart pauschal den brandenburgischen Landkreisen zugewiesen. Im Ergebnis liegen auch für die Kanalisationsart flächendeckende Informationen für den Bearbeitungsraum vor.

A 1.3 Aufbereitung der meteorologischen und hydrologischen Datengrundlagen

A 1.3.1 ReKIS-Nebeldatensatz

Damit den Nebeldatensatz aus von Plattform ReKIS im Projekt KliWES 3.0 verwendet werden konnte, war die Beseitigung eines räumlichen Versatzes zwischen den Rastern des Nebeldatensatz und den Rasterdatensätzen der anderen meteorologischen Größen erforderlich. Hierfür wurde der Nearest-Neighbor-Ansatz genutzt. Zudem mussten Rasterzellen ergänzt werden, da in den Kammlagen des Erzgebirges eine unvollständige Abdeckung des Bearbeitungsraumes durch den Nebeldatensatz vorlag. Die Füllung der räumlichen Lücken erfolgte mit einem von Philipp Körner (TUD, Professur für Meteorologie) übergebenen deutschlandweiten Nebeldatensatz. Die Passfähigkeit der beiden Datensätze wurde hinsichtlich der Größenordnung der Nebelniederschlagswerte sowie dem Auftreten von Nebeltagen und Nicht-Nebeltagen geprüft. Die Passfähigkeit wurde als hinreichend genau bewertet.

Die räumliche Verteilung des in KliWES 3.0 aufbereiteten ReKIS-Nebels ist in Abbildung A 3 im langjährigen Mittel dargestellt. Dabei wird der Zeitraum von 1961 bis 2015 betrachtet, um die Werte mit dem in KliWES 2.0 verwendeten Nebeldatensatz (s. Abbildung A 4) zu vergleichen.

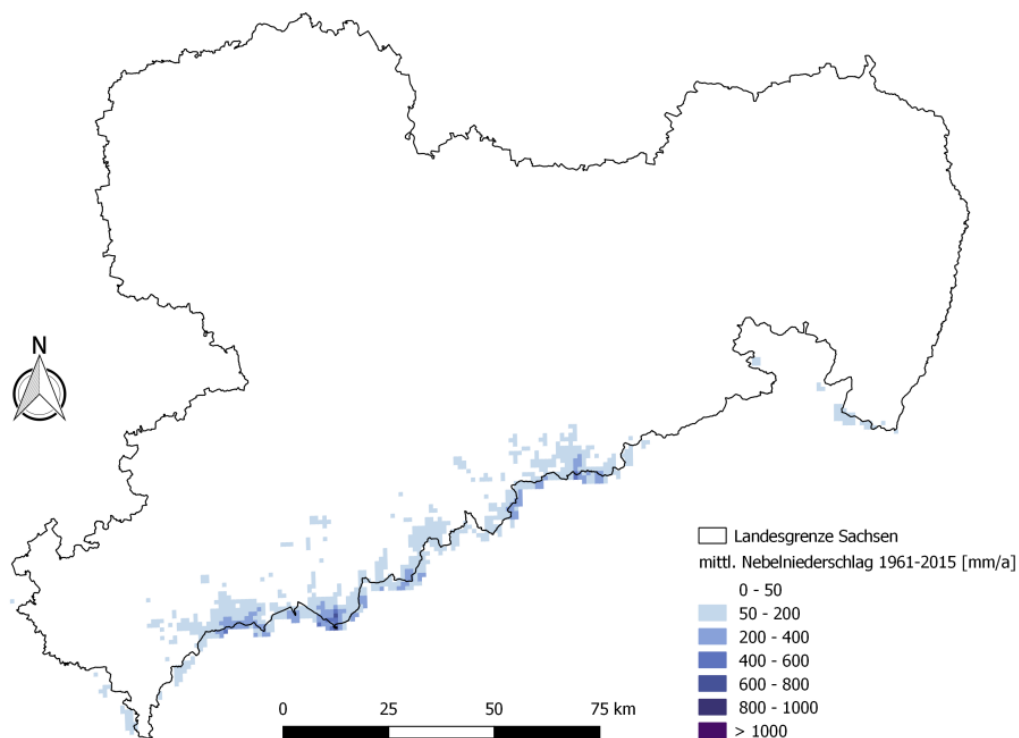


Abbildung A 3: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Nebelniederschlags (1961 bis 2015) in KliWES 3.0

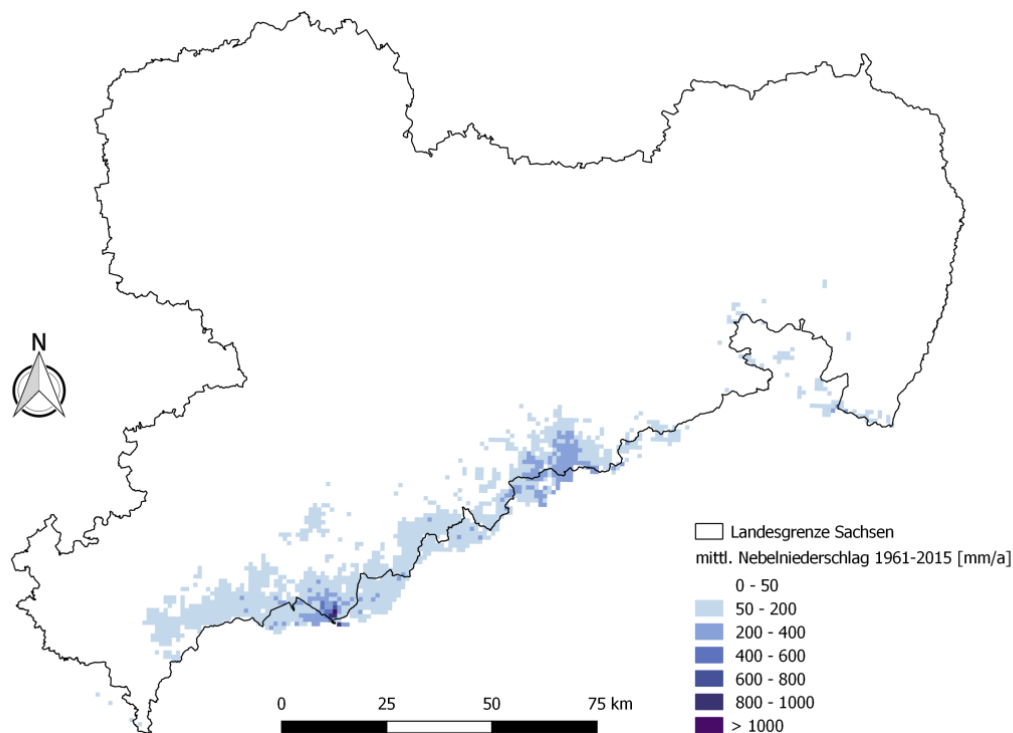


Abbildung A 4: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Nebelniederschlags (1961 bis 2015) in KliWES 2.0

Es ist zu beachten, dass der Nebel datensatz in KliWES 2.0 in seiner ursprünglichen Form teilweise zu hohe Nebelniederschläge in den Kammlagen des Erzgebirges aufwies. Daher erfolgte eine Reduktion der Nebelmengen oberhalb 800 m NHN in Abstimmung mit dem LfULG (Hauffe et al., 2022). Diese Korrektur der Nebelmengen ist in Abbildung A 5 dargestellt. Insgesamt sind die Bereiche mit relevanten Nebelmengen über 50 mm/a für den Datensatz aus KliWES 3.0 wesentlich kleiner und auf die nähere Umgebung des Erzgebirgskamms beschränkt. Auch die mittleren Nebelniederschlagsmengen je Höhenstufe sind in KliWES 3.0 überwiegend geringer (s. Abbildung A 5). Die Abnahmen gegenüber dem Nebel datensatz aus KliWES 2.0 betragen:

- 25 % (600 bis 700 m NHN),
- 41 % (700 bis 800 m NHN),
- 12 % (800 bis 900 m NHN),
- 10 % (1000 bis 1100 m NHN) und
- 42 % (1100 bis 1200 m NHN).

Lediglich in der Höhenstufe 900 bis 1000 m NHN lag die Nebelmenge aus KliWES 3.0 etwa 35 Prozent höher.

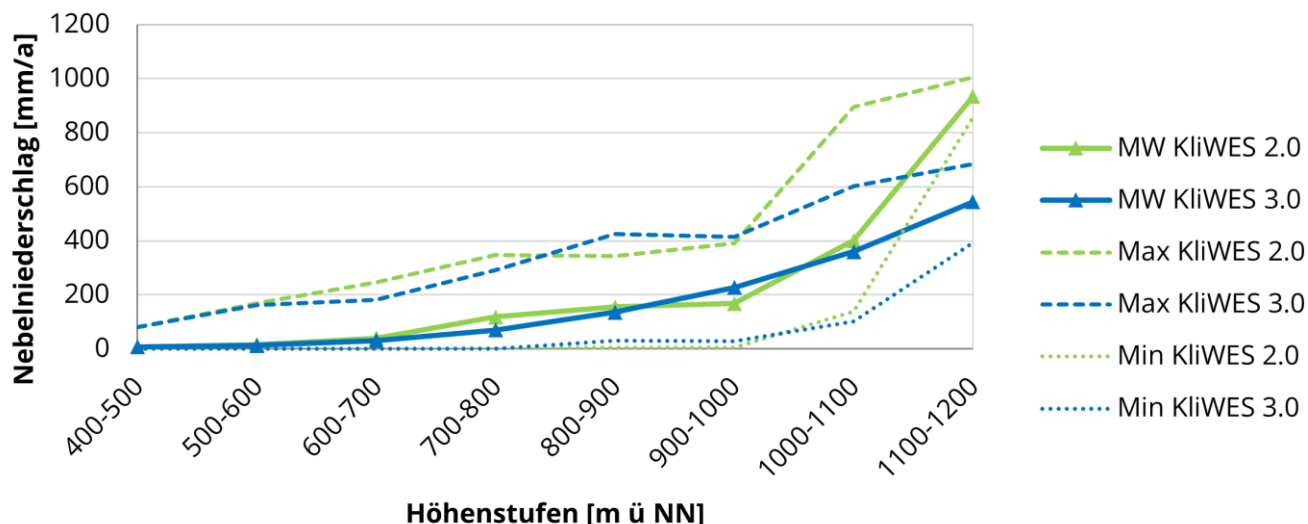


Abbildung A 5: Vergleich von langjährigem Mittelwert MW, Minimum und Maximum des Nebel niederschlags (1961 bis 2015) aller Rasterzellen der zugehörigen Höhengschicht aus KliWES 2.0 und KliWES 3.0

A 1.3.2 Referenzensemble und Mitteldeutsches Kernensemble

ReKIS EXPERT: Datensätze Basisdaten				Mitteldeutsches Kernensemble (MDK), v1.0					
Datensatz	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
				Szena-rio	Realisie-rung	Szena-rio	Realisie-rung	Szena-rio	Realisie-rung
CMIP5_CanESM2-r1_CCLM-4-8-17			X						
CMIP5_CanESM2-r1_REMO			X						
CMIP5_CanESM2-r1_WETTREG-2018			X						
CMIP5_CanESM2_EPISODES-2018	X	X	X	his, r26	r2, r4	his, r45	r5	his, r85	r4
CMIP5_CNRM-CM5-r1_WETTREG-2018			X						
CMIP5_CNRM-CM5-r1_EPISODES-2018	X	X	X						
CMIP5_EC-EARTH_RACMO-22E	X	X	X			his, r45	(r)12		
CMIP5_EC-EARTH_EPISODES-2018	X	X	X			his, r45	r2	his, r85	r2
CMIP5_EC-EARTH-r12_WETTREG-2018			X					r85	01
CMIP5_EC-EARTH-r12_CCLM-4-8-17	X	X	X	his, r26	(r)12	his, r45	(r)12		
CMIP5_EC-EARTH-r12_REMO			X						
CMIP5_MIROC5-r1_CCLM-4-8-17	X		X	his, r26	r1			his, r85	r1
CMIP5_MIROC5-r1_WETTREG-2018			X						
CMIP5_MIROC5-r1_REMO			X						
CMIP5_HadGEM2-ES-r1_CCLM-4-8-17		X	X						
CMIP5_HadGEM2-ES-r1_WETTREG-2018			X					r85	01
CMIP5_HadGEM2-ES-r1_RACMO-22E	X	X	X	his, r26	r1	his, r45	r1	his, r85	r1
CMIP5_HadGEM2-ES-r1_REMO	X		X						
CMIP5_MPI-ESM-LR-r1_CCLM-4-8-17	X	X	X			his, r45	r1		
CMIP5_MPI-ESM-LR-r1_WETTREG-2018	X		X	r26	01				
CMIP5_MPI-ESM-LR_EPISODES-2018	X	X	X	his, r26	r3			his, r85	r1
CMIP5_NorESM1-M-r1_EPISODES-2018	X	X	X			his, r45	r1		

Abbildung A 6: Übersicht des vollständigen Klimareferenzensembles (zweite bis vierte Spalte von links) und des reduzierten Mitteldeutschen Kernensembles (fünfte bis zehnte Spalte von links; ReKIS Portal, 2025)

Hydrologische Daten

Tabelle A 2: Übersicht der im WHH-Modell ArcEGMO verwendeten Pegel für Kalibrierung und Validierung (Bereitstellung der Datenreihen durch LfULG, LTV)

Pegel-nummer	Pegelname	Beginn Zeitreihe	Ende Zeitreihe	Anzahl Tage	Lücken	Null-werte
501010	Schöna	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
501060	Dresden	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
501110	Riesa	01.11.2004	31.12.2018	5174	0	0
501261	Torgau	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
530020	Klingenthal 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
550091	Buschmühle 1	01.11.1969	31.12.2020	18689	0	0
550110	Kirnitzschtal	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
550190	Porschdorf 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
550302	Sebnitz 2	01.11.1976	31.12.2020	16132	0	0
550390	Neustadt 1	01.11.1983	31.12.2020	13576	0	0
550490	Bielatal 1	01.11.1964	31.12.2020	20515	0	0
550560	Cunnersdorf 1	01.02.1977	31.12.2020	16040	0	0
550620	Neundorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	3	0
550630	Gottleuba 1	01.11.1971	31.12.2020	17959	0	44
550710	Markersbach	01.11.1969	31.12.2020	18689	0	55
550762	Liebstadt 2	01.01.1979	31.12.2020	15341	0	10
550800	Bischofswerda	01.11.1968	31.12.2020	19054	0	0
550810	Elbersdorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	2
550940	Dohna	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
551000	Kreischa	01.11.1962	31.12.2020	21246	0	183
551100	Klotzsche	01.11.1967	31.12.2020	19420	0	0
551208	Friedrichstadt	01.01.1999	31.12.2020	8036	305	0
551310	Ammelsdorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	2
551351	Hainsberg 7	01.01.1961	31.12.2020	21915	382	0
551411	Schmiedeberg 1	01.11.1982	31.12.2020	13941	0	0
551420	Dippoldiswalde 1	01.01.1994	31.12.2018	9131	0	0
551465	Hainsberg 5	01.01.1961	31.12.2020	21915	864	0
551521	Reichstädt	01.11.1981	31.12.2020	14306	0	424
551561	Freital 1	01.11.1967	31.12.2012	16498	0	0
551601	Wilsdruff 1	01.11.1978	31.12.2020	15402	0	0
551802	Herzogswalde 2	01.11.1989	31.12.2020	11384	0	9
551820	Garsebach	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0

Pegel- nummer	Pegelname	Beginn Zeitreihe	Ende Zeitreihe	Anzahl Tage	Lücken	Null- werte
551950	Niederau	01.11.1990	31.12.2020	11019	0	717
552012	Piskowitz 2	01.11.1970	31.12.2020	18324	0	0
552101	Ostrau 1	01.11.1997	31.12.2020	8462	0	0
552110	Seerhausen 1	01.11.1965	31.12.2020	20150	0	0
552190	Nebitzschen	12.04.2001	31.12.2020	7204	0	0
552210	Merzdorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	1
553013	Trado 3	01.11.1963	31.12.2020	20881	0	3
554120	Schönau	01.11.1975	31.12.2020	16498	0	0
554210	Prischwitz	01.11.1991	31.12.2020	10654	0	0
554220	Zescha	01.11.1965	31.12.2020	20150	0	0
554260	Pietzschwitz	01.02.1961	31.12.2020	21884	0	0
554340	Lipsa	01.11.1988	31.10.2018	10957	0	0
554411	Reichenau 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
554422	Ortrand	01.11.1988	30.04.2015	9677	0	0
554510	Radeberg	01.11.1987	31.12.2020	12115	0	0
554520	Großdittmannsdorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
554550	Kleinraschütz	01.11.1961	31.12.2020	21611	0	0
554570	Radeburg 3	01.11.1979	31.12.2020	15037	0	28
560021	Golzern 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
560051	Bad Düben 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
560301	Nemt 1	01.04.1995	31.12.2020	9407	193	0
561000	Thallwitz	01.11.1991	31.12.2020	10654	0	0
562010	Rautenkranz	01.11.2005	31.12.2020	5540	0	0
562012	Schönheide 3	01.11.1982	31.12.2020	13941	0	0
562031	Aue 3	01.11.1985	31.12.2020	12845	0	0
562040	Niederschlema	01.01.1961	31.12.2020	21915	365	0
562070	Zwickau-Pölbitz	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
562090	Wolkenburg	01.07.1993	31.12.2020	10046	1826	0
562115	Wechselburg 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
563290	Sachsengrund	01.11.1970	31.12.2020	18324	0	10
563460	Eibenstock 2	01.11.1984	31.12.2020	13210	0	4
563550	Sosa ZP 2	01.01.2004	31.12.2017	5114	409	67
563745	Johanngeorgenstadt 4	01.11.2004	31.12.2020	5905	0	0
563790	Aue 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
563800	Johanngeorgenstadt 2	01.11.1965	31.12.2020	20150	9497	0
563880	Markersbach 1	01.11.1973	31.12.2020	17228	0	0

Pegel- nummer	Pegelname	Beginn Zeitreihe	Ende Zeitreihe	Anzahl Tage	Lücken	Null- werte
564160	Wolfersgrün	01.11.1964	31.12.2020	20515	0	70
564201	Niedermülsen 1	01.01.1985	31.12.2020	13149	0	0
564300	Niederlungwitz	01.11.1964	31.12.2018	19784	0	0
564400	Chemnitz 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
564410	Göritzhein	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
564505	Burkhardtsdorf 2	01.11.1991	31.12.2020	10654	0	0
564531	Altchemnitz 2	01.11.1984	31.12.2020	13210	0	0
564611	Jahnsdorf 1	01.11.1991	31.12.2020	10654	0	0
564620	Harthau	01.11.1964	31.12.2020	20515	0	0
565990	Mulda 1	01.11.2005	31.12.2020	5540	0	0
566010	Berthelsdorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
566040	Nossen 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
566055	Mahlitzsch	01.05.2005	31.12.2020	5724	0	0
566100	Erlin	01.01.1961	31.12.2012	18993	0	0
567000	Wolfsgrund	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	9
567113	Burkersdorf 3	01.01.1961	31.10.2017	20758	0	0
567221	Krummenhennersdorf 1	01.11.1991	31.12.2020	10654	0	0
567301	Oberschöna 1	01.11.2004	31.12.2020	5905	0	0
567310	Böhrigen	01.11.2005	31.12.2020	5540	0	0
567320	Niederstriegis 1	01.01.1961	31.12.2016	20454	0	0
567400	Tannenberg	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
567420	Hopfgarten	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
567435	Kunnersdorf	01.01.2000	31.12.2020	7671	0	0
567451	Lichtenwalde 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
567590	Annaberg 1	01.01.1968	31.12.2020	19359	0	0
567700	Wiesa	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
567850	Streckewalde	01.01.1961	31.12.2019	21549	0	0
568133	Olbernhau 3	01.11.2005	31.12.2020	5540	0	0
568140	Pockau 1	01.01.1961	31.12.2012	18993	0	0
568160	Borstendorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
568175	Hetzdorf 1	01.11.1997	31.10.2010	4748	0	0
568200	Deutschgeorgenthal 2	01.11.1966	31.12.2020	19785	0	0
568250	Neuwerndorf	01.11.1967	31.12.2020	19420	0	27
568300	Rauschenbach 2	01.11.1965	31.12.2020	20150	0	14
568350	Rothenthal	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0

Pegel- nummer	Pegelname	Beginn Zeitreihe	Ende Zeitreihe	Anzahl Tage	Lücken	Null- werte
568400	Zöblitz	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
568600	Saidenbach ZP 1	01.01.2005	26.11.2020	5809	61	129
568630	Saidenbach ZP 2	01.01.1985	31.12.2020	13149	0	7
568700	Neunzehnhain II ZP 1	01.01.1968	31.12.2020	19359	0	0
576391	Bad Elster 1	01.11.1986	31.12.2020	12480	0	0
576401	Adorf 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
576411	Oelsnitz 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
576421	Straßberg	01.11.1965	31.12.2020	20150	0	0
576440	Elsterberg	01.11.1997	31.12.2020	8462	0	0
576470	Greiz	01.01.1961	31.10.2019	21488	365	0
576500	Berga	01.11.1999	31.10.2018	6940	0	0
576520	Gera-Langenberg	01.11.1989	31.10.2018	10592	0	0
576610	Zeitz	01.01.1990	31.12.2020	11323	0	0
577010	Schönlind 2	01.11.1992	31.12.2020	10288	730	0
577030	Bobenneukirchen	01.11.1992	31.12.2020	10288	0	21
577040	Ramoldsreuth	01.11.1992	31.12.2019	9922	0	0
577100	Hasenmühle	01.11.1967	31.12.2019	19054	0	0
577103	Rodlera	01.11.1997	31.12.2018	7731	26	0
577120	Neuensalz	01.11.1985	31.12.2020	12845	0	0
577211	Rodewisch 1	01.04.1997	31.12.2020	8676	0	0
577220	Mylau	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
577320	Weida	01.11.1989	31.10.2018	10592	0	0
577340	Hohenleuben ZP	01.11.1989	31.10.2018	10592	0	50
577350	Weida- Heinholdsmühle	01.11.1989	31.10.2018	10592	0	0
577400	Thieschitz	01.11.1989	31.10.2018	10592	0	0
577450	Oelsen	01.02.1993	30.06.2011	6724	0	0
577501	Neukirchen 1	01.11.1978	31.12.2020	15402	242	0
577510	Goessnitz	01.01.1985	31.10.2017	11992	0	0
577520	Remsa	04.08.2000	31.12.2020	7455	91	0
577700	Langenreinsdorf	01.11.1981	31.12.2019	13940	358	41
577800	Großstöbnitz	01.01.1990	31.01.2019	10623	0	0
577870	Langenleuba- Niederhain (Leuba)	29.07.1999	31.12.2017	6731	218	0
577880	Langenleuba- Niederhain (Wiera)	01.01.2005	31.12.2017	4748	31	0
577901	Streitwald 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	1461	0

Pegel- nummer	Pegelname	Beginn Zeitreihe	Ende Zeitreihe	Anzahl Tage	Lücken	Null- werte
577911	Borna 1	09.02.2001	31.12.2017	6170	339	4
577921	Kesselshain 1	01.11.1971	31.10.2018	17167	4388	10
578091	Albrechtshain 1	01.11.1967	29.12.2020	19418	5954	0
578110	Leipzig-Thekla	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
578170	Großbardau	01.11.1972	31.12.2020	17593	0	28
582000	Ebersbach	01.11.1964	31.12.2020	20515	0	0
582010	Schirgiswalde	01.11.1962	31.12.2020	21246	0	0
582035	Bautzen 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
582060	Lieske	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
583020	Hohberg	01.11.1985	31.12.2020	12845	0	0
583090	Großschweidnitz	01.11.1982	31.12.2020	13941	0	0
583122	Gröditz 2	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
583170	Kotitz	01.11.1969	31.10.2015	16801	0	0
583190	Drehsa	01.11.1976	31.12.2020	16132	0	678
583230	Oehlich	01.11.1967	31.10.2010	15706	0	0
583251	Jänkendorf 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
583280	Holtendorf	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
583282	Koenigshain	01.11.1978	31.12.2012	12480	0	0
583290	Särichen	01.11.1962	31.12.2020	21246	0	0
583342	Lomske	01.11.1988	31.12.2020	11749	0	2
660001	Hartau1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
660121	Rosenthal 1	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0
662001	Seifhennersdorf 1	01.11.1967	31.12.2020	19420	0	0
662011	Großschönau 2	01.11.1963	31.12.2020	20881	0	0
662021	Zittau 5	01.11.1993	31.12.2015	8096	0	0
662096	Niederoderwitz	01.11.1986	31.12.2020	12480	0	0
663090	Tauchritz	01.11.1964	31.12.2020	20515	0	0
663100	Rennersdorf 1	01.01.1961	31.12.2011	18627	0	0
663131	Rennersdorf 6	01.01.1961	31.12.2020	21915	0	0

A 1.3.3 Bewirtschaftungsdaten

Tabelle A 3: Übersicht der ins WHH-Modell ArcEGMO eingebundenen Talsperren- und Speicherabgaben (Bereitstellung der Datenreihen durch LTV)

Talsperren Name (Pegel Name)	Beginn Zeitreihe	Ende Zeitreihe	Anzahl Tage	Lücken	Nullwerte
TS Altenberg	22.12.2001	31.12.2020	6950	11	7
TS Bautzen (Bautzen UP 1)	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Carlsfeld	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	1768
TS Cranzahl	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	794
TS Dröda	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Eibenstock	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Einsiedel	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	6005
TS Falkenstein	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	4
TS Gottleuba	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	1
TS Klingenberg	01.01.1995	31.12.2020	9497	5	0
TS Koberbach	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	4287
TS Lehmühle	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	1
TS Lichtenberg	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	1041
TS Malter	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Muldenberg	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	741
TS Neunzehnhain I (Neunzehnhain I UP)	01.11.2011	31.12.2020	3349	29	9
TS Neunzehnhain II	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	914
TS Pirk	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Pöhl	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Quitzdorf (Sproitz)	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Radeburg 1	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	10
TS Radeburg 2	01.01.1995	31.12.2020	9497	151	351
TS Rauschenbach	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	259
TS Saidenbach	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	0
TS Schömbach	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	2
TS Sosa	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	1637
TS Stollberg	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	3022
TS Werda	01.01.1995	31.12.2020	9497	0	298
SB Borna	19.01.1995	31.12.2020	9479	787	5541
Stausee Rötha	01.01.2005	31.12.2020	5844	91	474

A 1.4 Beschreibung der Hydrotopbildung

In KliWES 2.0 erfolgte die Verschneidung dieser Datengrundlagen sowie die sich anschließende Aufbereitung zur Erreichung der finalen Hydrotopstruktur überwiegend durch das händische Ausführen einzelner GIS-Funktionen. Dieser Vorgang lief in KliWES 3.0 nun größtenteils automatisiert ab (s. Abbildung A 7). Innerhalb eines GIS-Moduls wurden bereits vorimplementierte Funktionen (s. Abbildung A 7 gelb markiert) und selbst geschriebene Funktionen (s. Abbildung A 7 grau markiert) kombiniert. Lagen die Datengrundlagen (s. Abbildung A 7 grün markiert) in der benötigten Form vor, konnte die Hydrotopstruktur unmittelbar erzeugt werden (s. Abbildung A 7 orange markiert). Insbesondere erfolgte eine Automatisierung der zuvor sehr zeitaufwändigen Bereinigung von Geometriefehlern nach der Verschneidung der Daten.

Das GIS-Modul verfügt über drei Teilmodule (1.1, 1.2a und 1.2b), wobei nach jedem Teilmodul eine Qualitätsprüfung des (Zwischen)ergebnisses durchgeführt wurde.

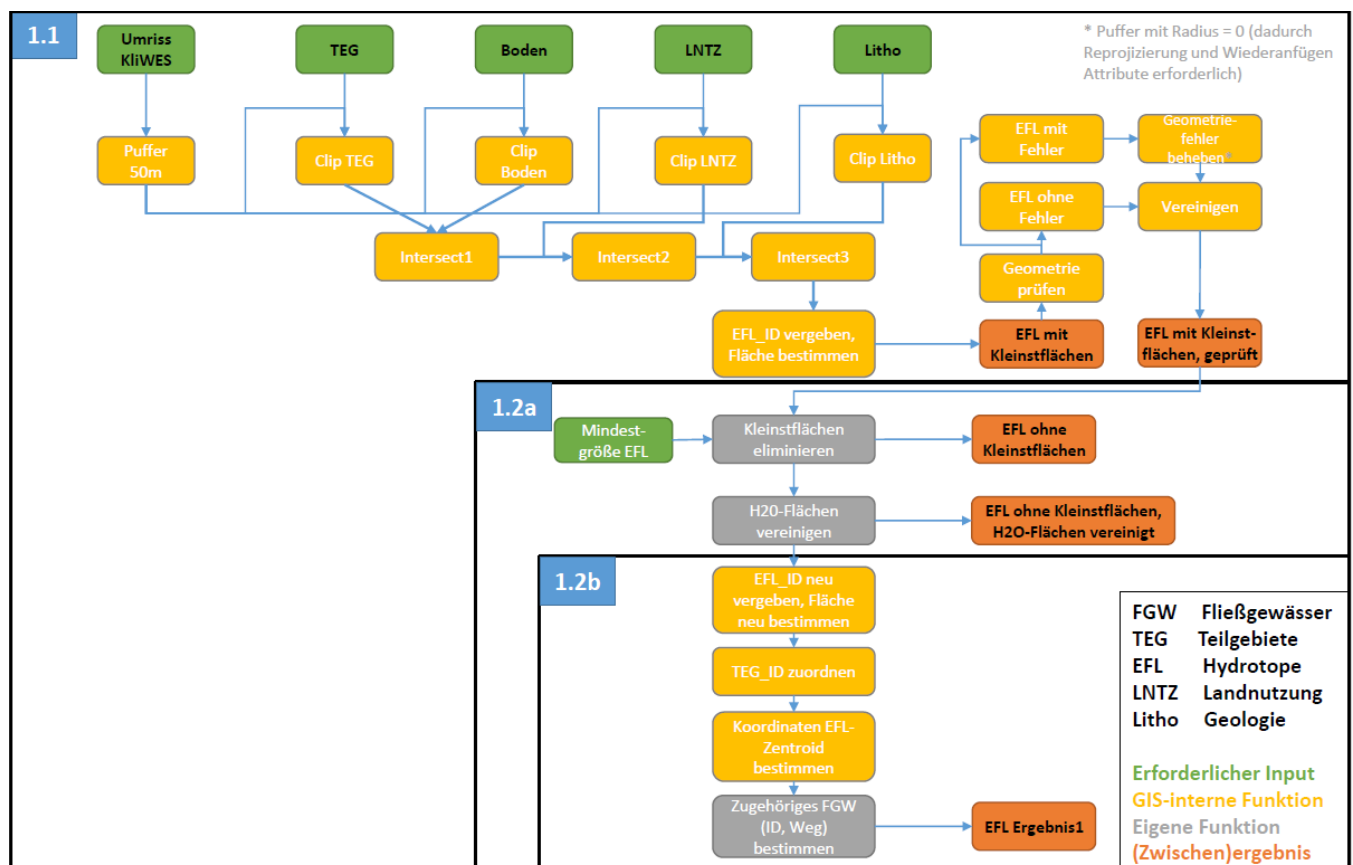


Abbildung A 7: Für KliWES 3.0 konzipiertes GIS-Modul zur automatisierten Erzeugung einer Hydrotopstruktur

Auf diese mithilfe des GIS-Moduls erhaltene Hydrotopstruktur (s. Abbildung A 7 „EFL Ergebnis1“) wurden anschließend repräsentative Werte für weitere Parameter übertragen. Hierbei handelte es sich um:

- Grundwasserflurabstand,
- mittlere Geländehöhe und Hangneigung sowie häufigste Ausrichtung (Digitales Geländemodell),
- Anschlussgrad, Kanalisation und Versiegelung.

Nähere inhaltliche Details zur Hydrotopbildung wie beispielsweise zum Vorgehen bei der Eliminierung von Kleinstflächen sind in Hauffe et al. (2022) nachzulesen.

Neben dem Aufbau und der Parametrisierung der Hydrotope mussten auch den Teileinzugsgebieten und Fließgewässern Eigenschaften zugewiesen werden. Ersteren wurden u.a. Angaben zu Gefälle, mittlerer Höhe und Ausrichtung zugewiesen. Letztere erhielten z.B. Informationen zur Rauigkeit und zum Sohlgefälle. Darüber hinaus erfolgte die Integration der meteorologischen und hydrologischen Inputdaten. Letztere werden u.a. als Zuflussreihen an den sächsischen Grenzen ins Modell eingelesen. Dies betrifft den Pegel Schöna an der Elbe (Grenze zwischen Tschechien und Deutschland) sowie den Pegel Hartau 1 an der Lausitzer Neiße (Grenze zwischen Polen und Deutschland).

A 1.5 Weitere Auswertungen der Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO

A 1.5.1 Auswertungen der Wasserhaushaltsergebnisse für den Reanalysezeitraum

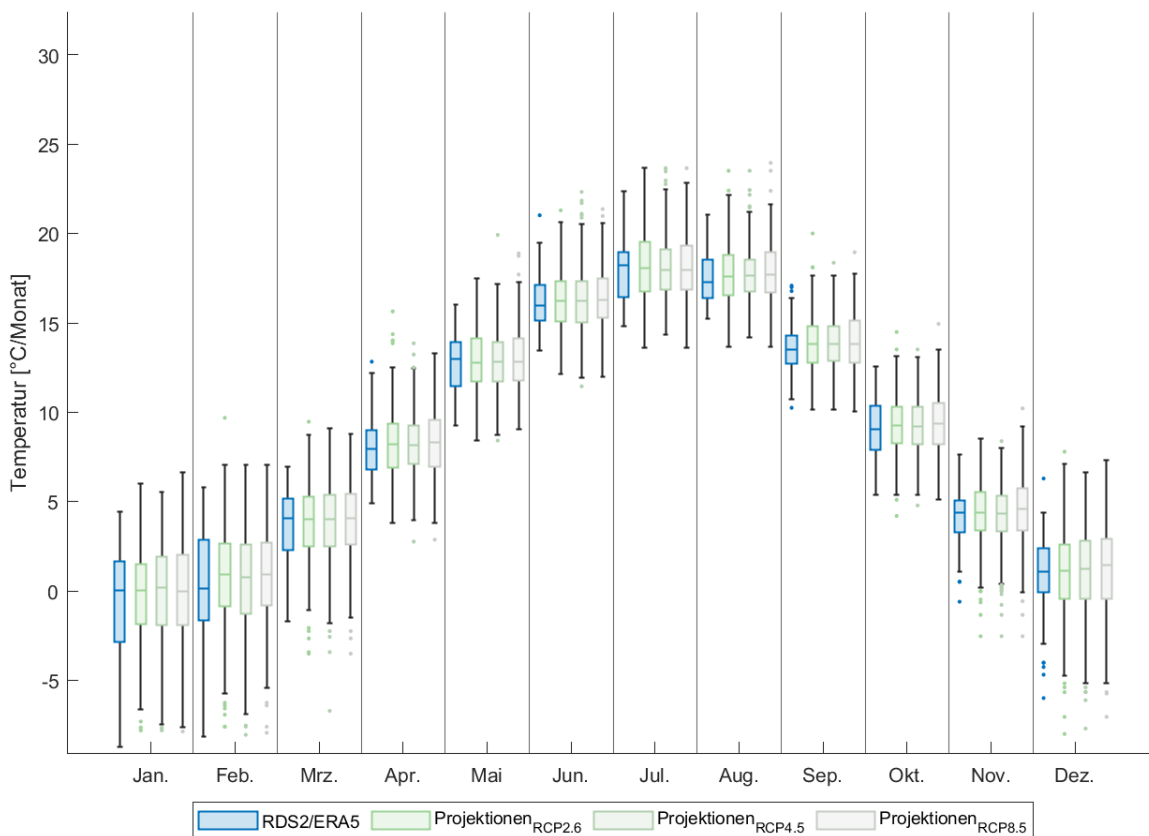


Abbildung A 8: Mittlerer Jahresgang der Temperatur für den Datensatz RDS 2.0 sowie die jeweils 7 MDK-Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 1961–2020 über gesamten Bearbeitungsraum)

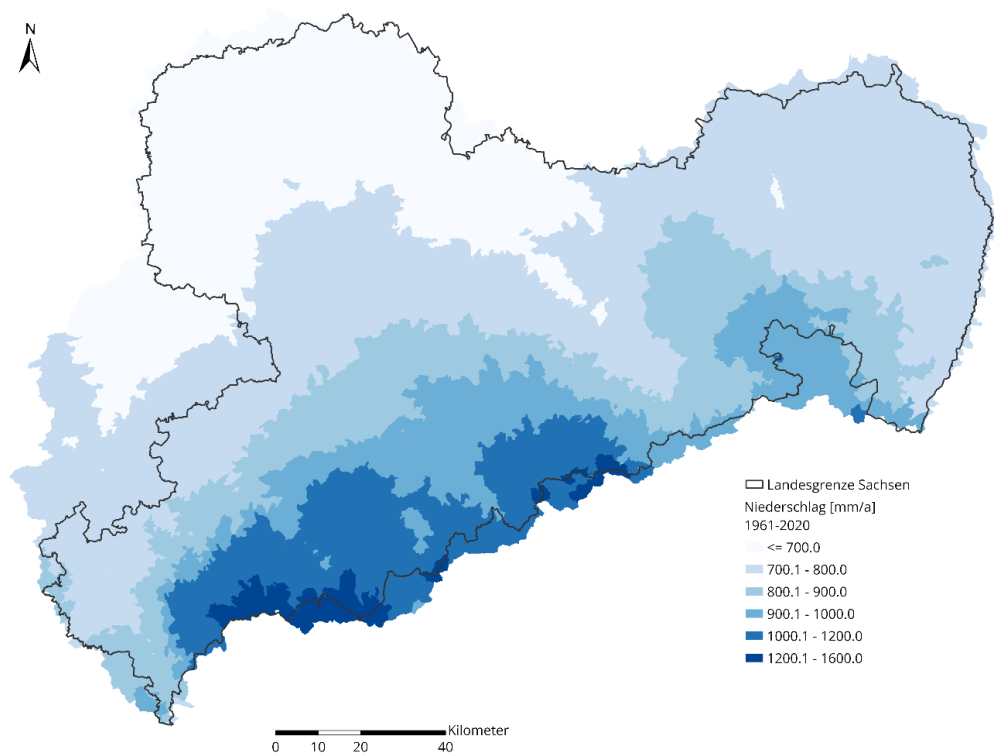


Abbildung A 9: Karte des Niederschlags (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teileinzugsgebiets-ebene für den Beobachtungsdatensatz RDS 2.0

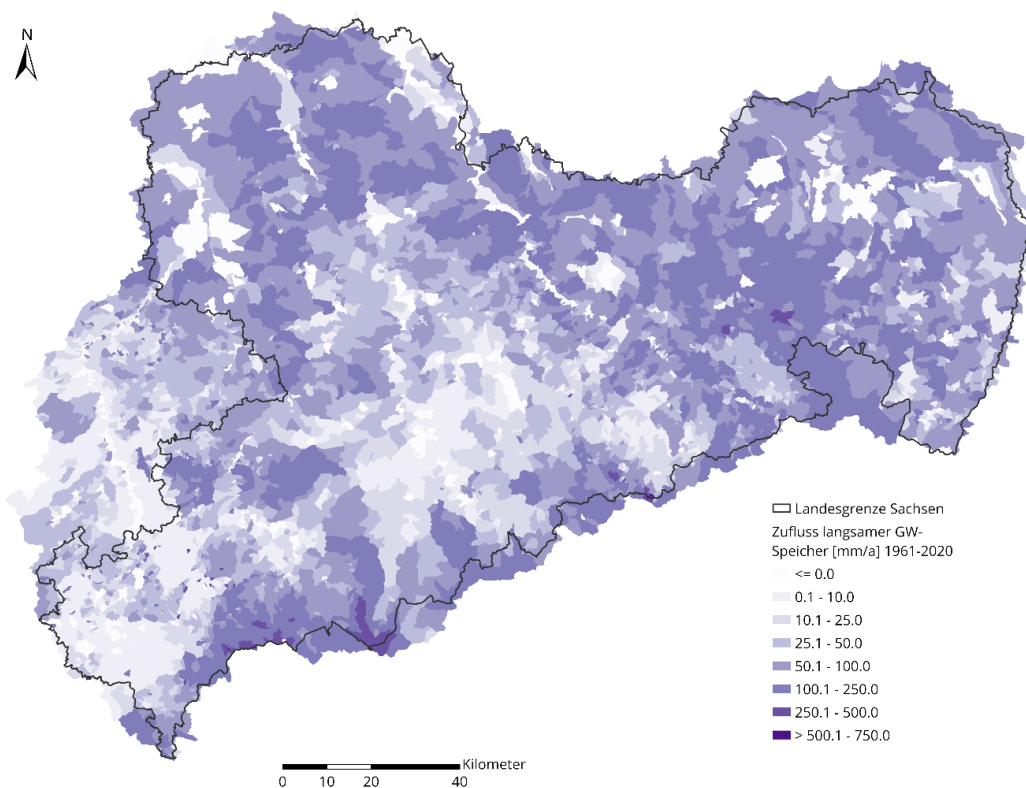


Abbildung A 10: Karte des Zuflusses zum langsamen GW-Speicher RG2 (Jahresmittelwert 1961-2020) auf Teileinzugsgebietsebene für den Beobachtungsdatensatz RDS2/ERA5

A 1.5.2 Auswertung der Wasserhaushaltsergebnisse für die Klimaprojektionen

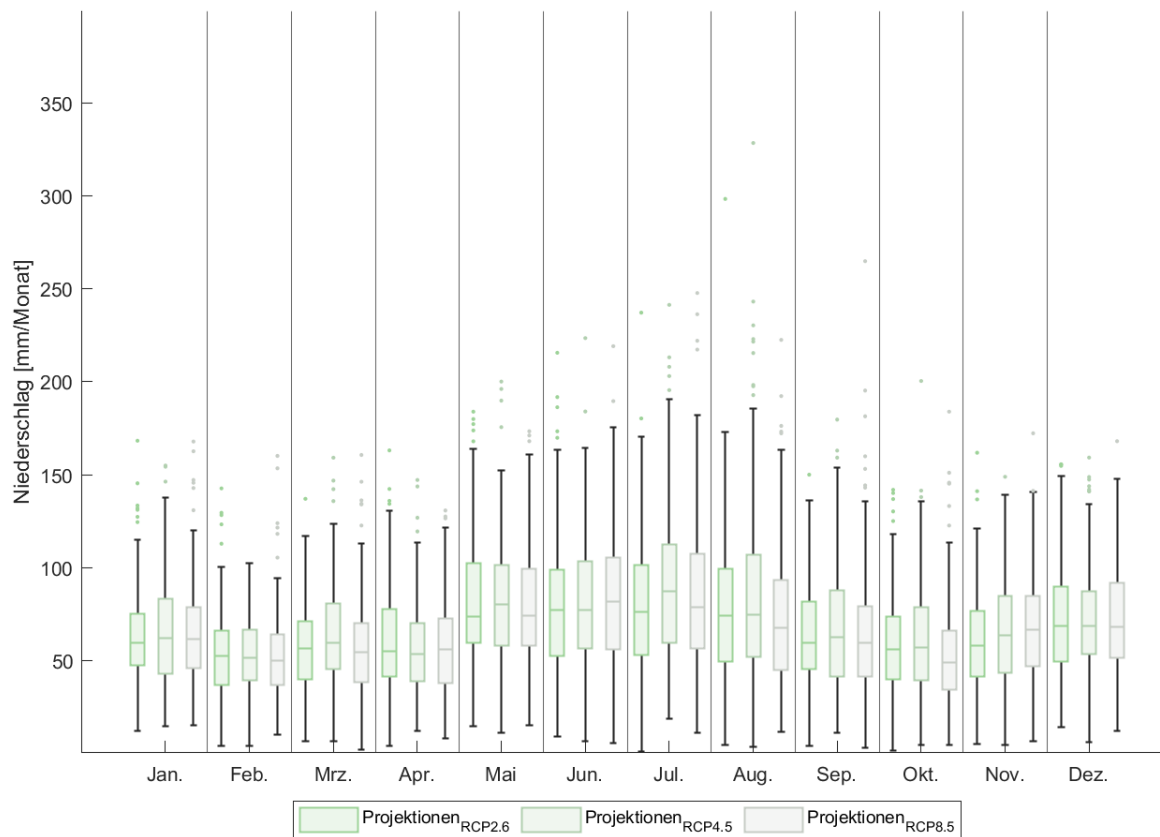


Abbildung A 11: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für die jeweils 7 MDK-Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2021–2050 über gesamten Bearbeitungsraum)

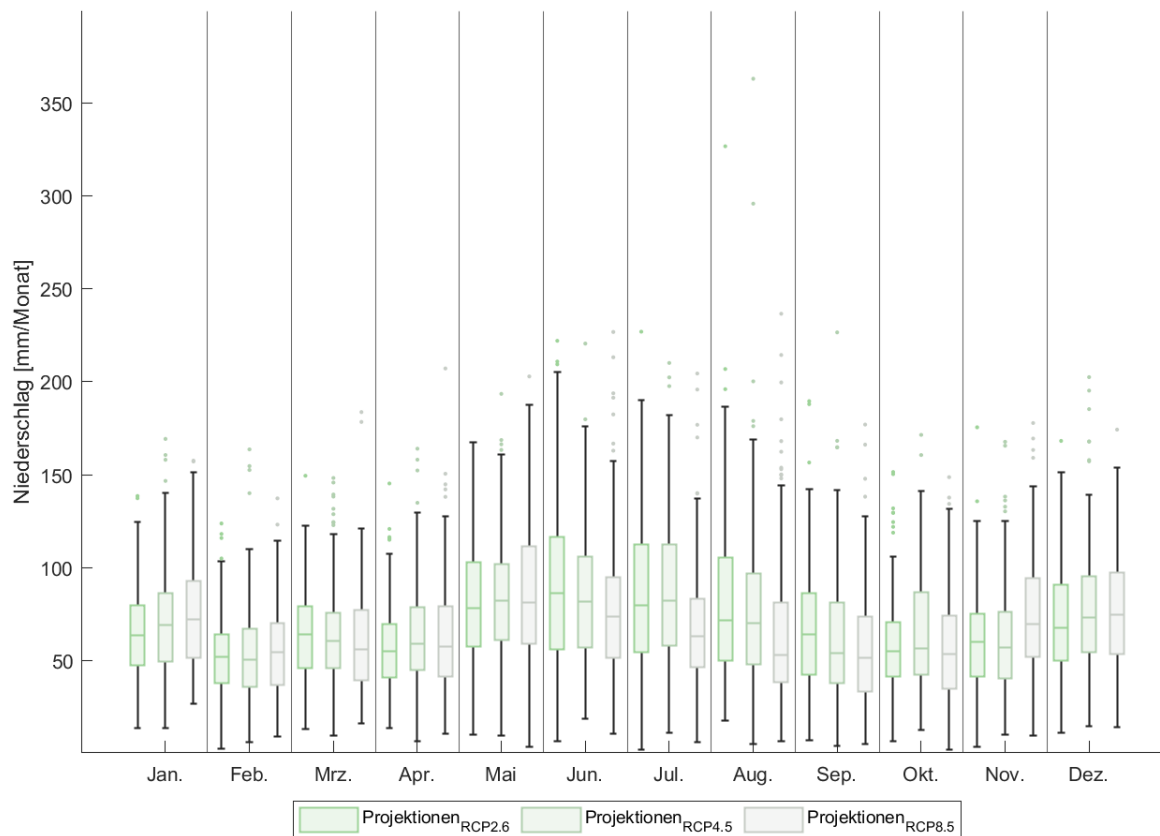


Abbildung A 12: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags für die jeweils 7 MDK-Klimaprojektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2071–2100 über gesamten Bearbeitungsraum)

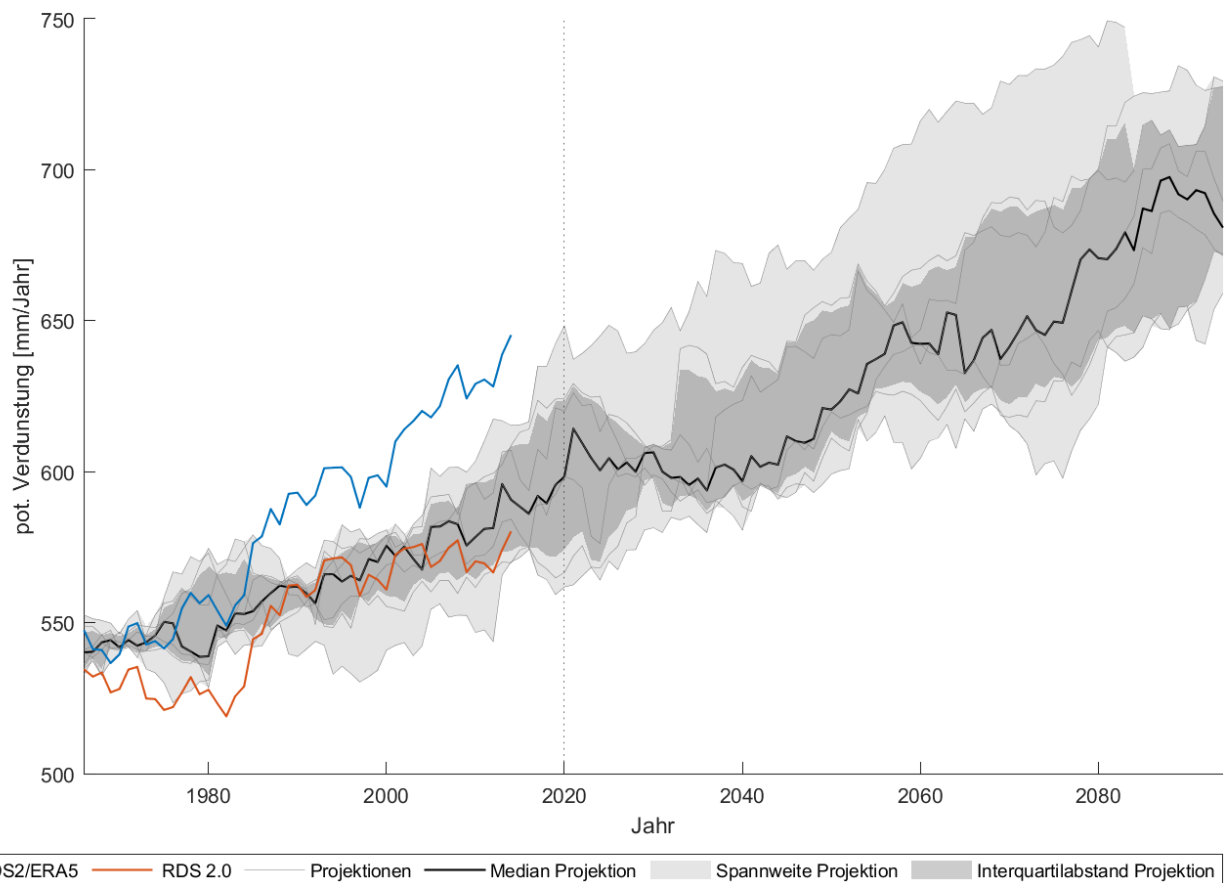


Abbildung A 13: Zeitlicher Verlauf der potentiellen Verdunstung für die Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

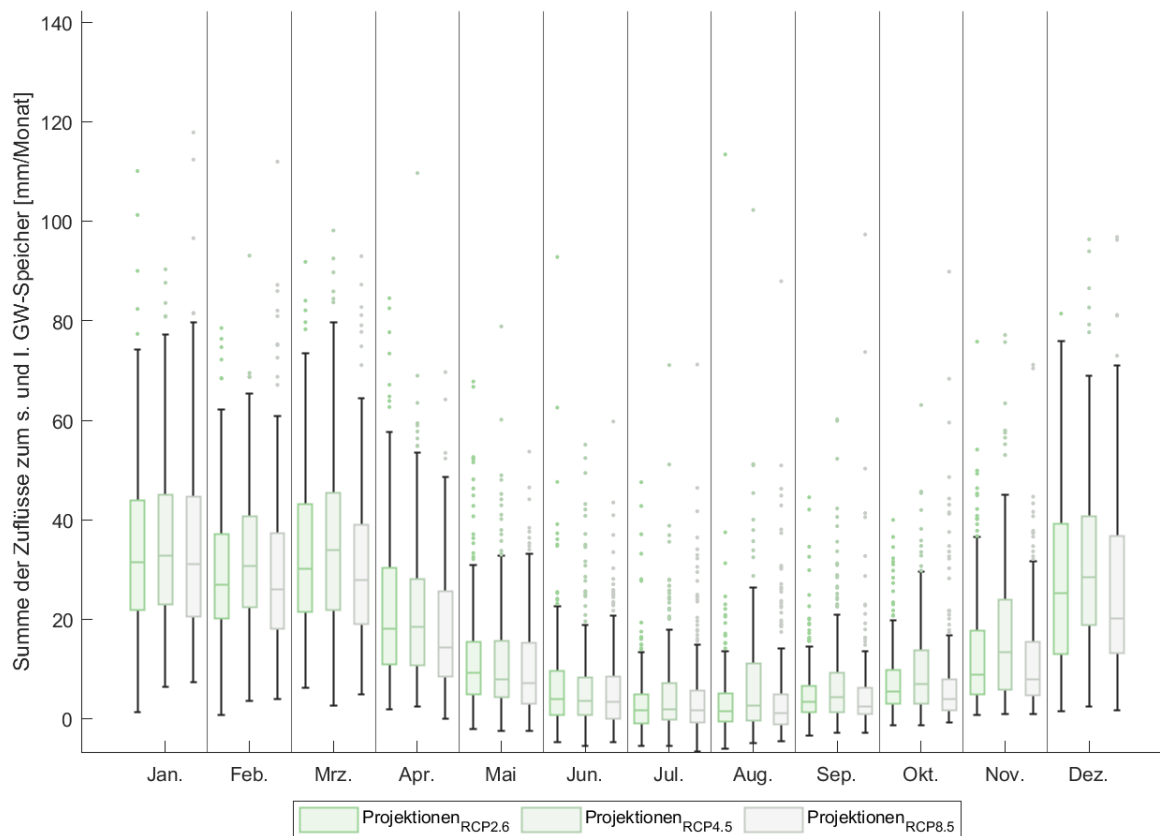


Abbildung A 14: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher für die jeweils 7 Klima-projektionen pro RCP-Szenario als Boxplot-Darstellung (gemittelte Monatswerte für 2021–2050 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

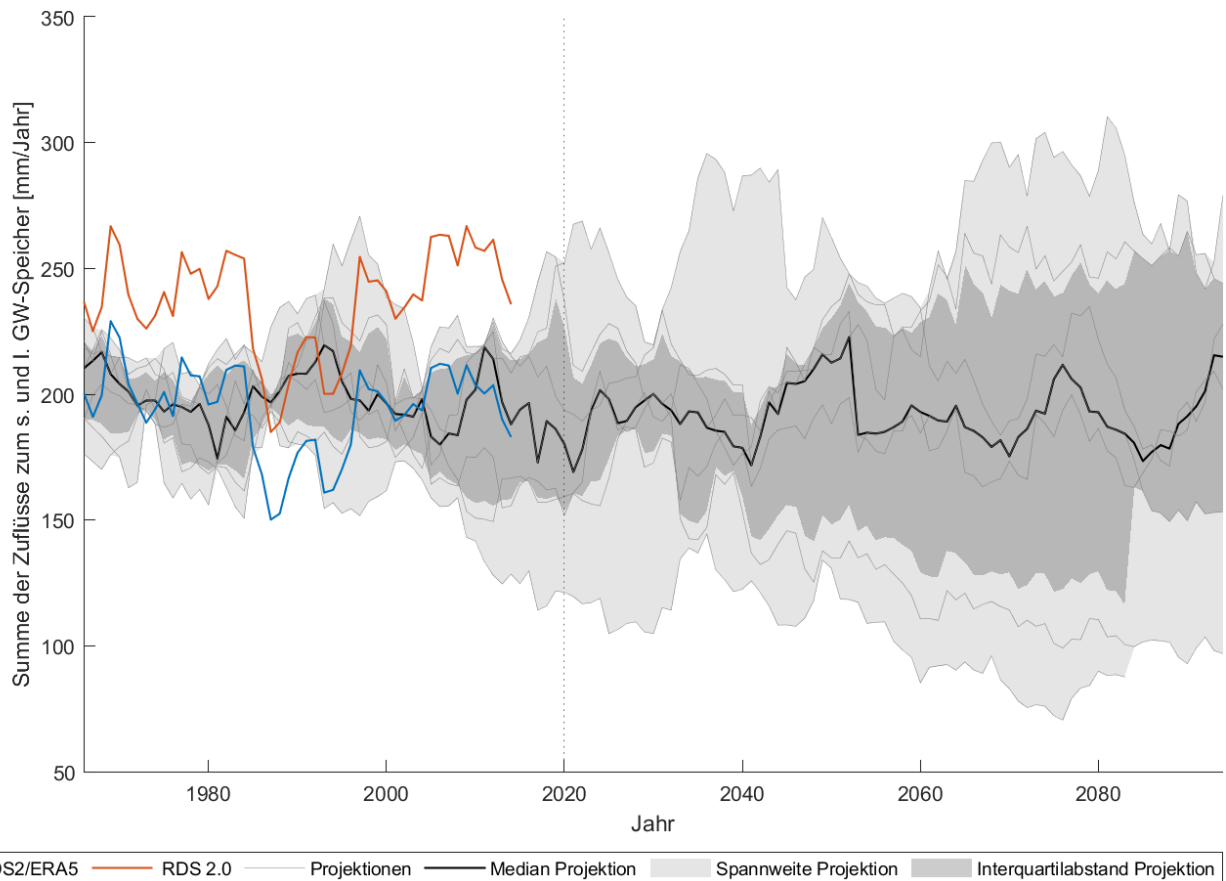


Abbildung A 15: Zeitlicher Verlauf des Zuflusses zum GW-Speicher für die Datensätze RDS 2.0 und RDS2/ERA5 sowie für die 7 Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios (als 10-jähriges gleitendes Mittel für 1965-2095 über gesamten Bearbeitungsraum) der WHH-Berechnung mit ArcEGMO

A 1.5.3 Beispielhafte Auswertung der Wasserhaushaltsergebnisse einer Klimaprojektion

Beispielhaft soll in diesem Abschnitt eine ausgewählte Klimaprojektion (CMIP5_CanESM2_EPISODES_2018_r85_r4, entspricht MDK4, s. Tabelle 3) näher betrachtet werden. Dies erfolgt für den innerjährlichen Verlauf sowie hinsichtlich der räumlichen Verteilung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen. Für erstere wurden die Ergebnisse für drei landschaftliche Räume Sachsens zusammengefasst. Die landschaftliche Gliederung richtet sich nach der Topologie und Klimatologie Sachsens und unterscheidet zwischen Gebirgsregionen, Gebirgsvorland/Hügelland (inkl. Lössgebieten) und Tiefland.

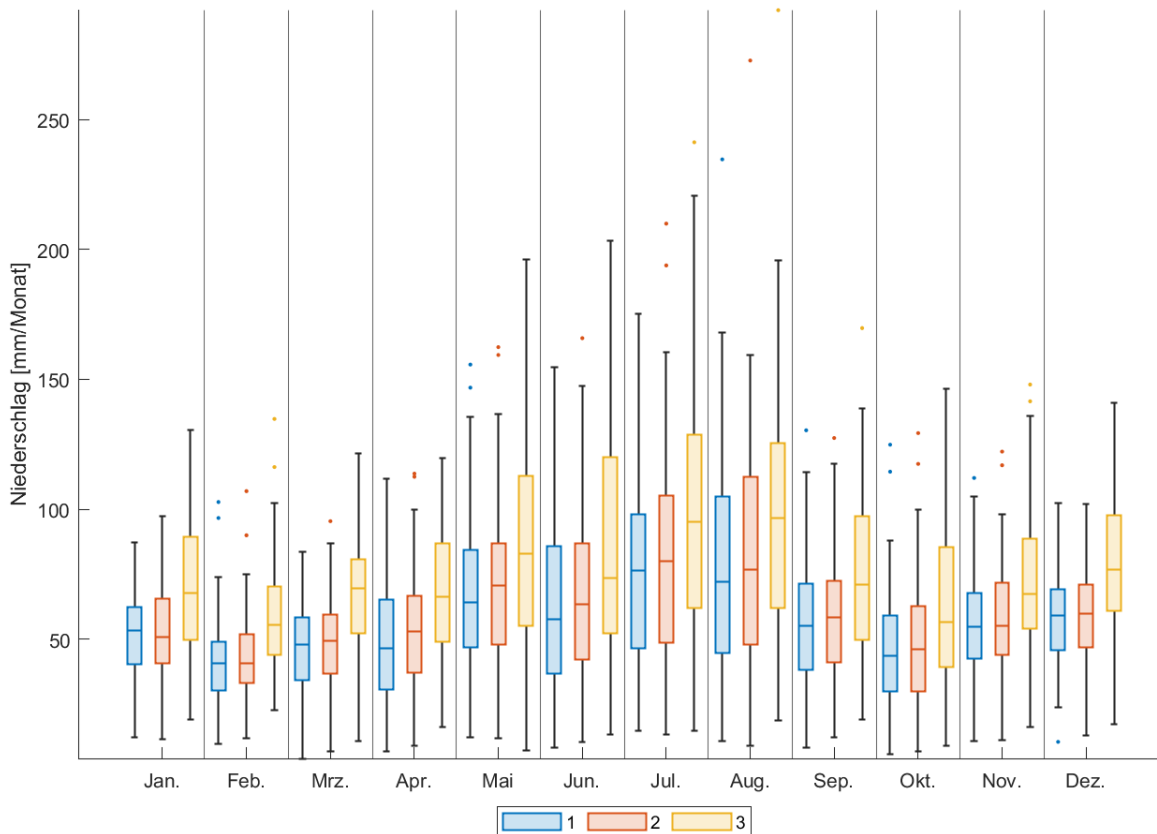


Abbildung A 16: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags (1961–2020) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

Die Boxplot-Darstellungen in (für den Reanalysezeitraum 1961–2020) und Abbildung A 18 (für die ferne Zukunft 2071–2100) veranschaulichen die innerjährliche Verteilung des Niederschlags aufgegliedert in die drei Landschaftsräume. Im Reanalysezeitraum entspricht die Verteilung dem innerjährlichen Verlauf der Beobachtungsdaten (s. Abbildung 15) mit geringeren Niederschlägen im Winter und höheren Werten in den Sommermonaten. Die geringsten Werte treten durchschnittlich im Februar auf, die höchsten im Juli.

Im Vergleich der Landschaftsräume sind in den Gebirgsregionen (gelbe Boxplots in Abbildung A 16) erwartungsgemäß die Jahresniederschläge höher als im die Gebirgsvorland/Hügelland (rote Boxplots) und im Tiefland (blaue Boxplots).

Für die ferne Zukunft (2071–2100) weist die Klimaprojektion MDK4 eine deutliche Verschiebung der innerjährlichen Niederschlagsverteilung auf. Die höchsten Werte bezüglich des Medians treten nun in den Monaten Mai und Dezember auf. Die geringsten Medianwerte des Niederschlags fallen im Zeitraum 2071–2100 auf den Mai. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge bleiben unter Annahme der ausgewählten Projektionen auf demselben Niveau (ca. 800 mm/a). Die Variabilität nimmt allerdings im Vergleich zum Reanalysezeitraum in nahezu allen Monaten und über alle Landschaftsräume ab.

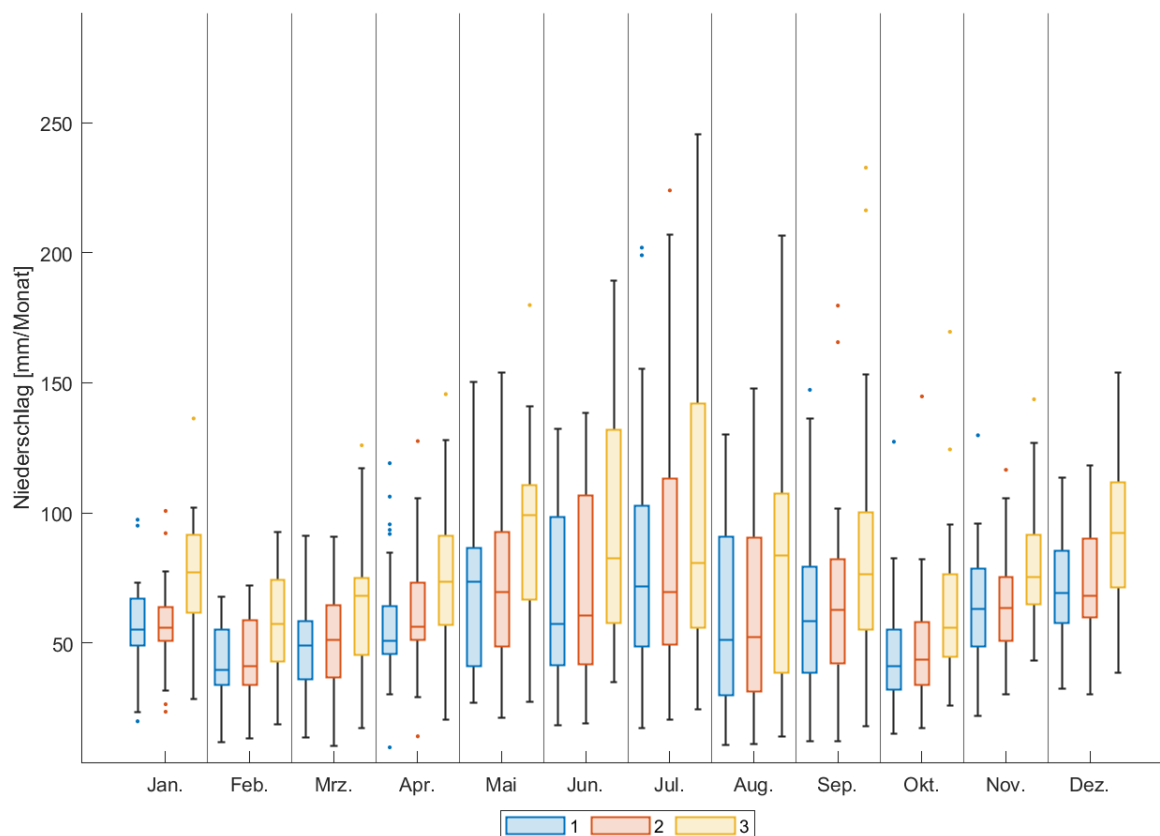


Abbildung A 17: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags (2021–2050) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

Ergänzend veranschaulicht Abbildung A 17 die innerjährliche Verteilung des Niederschlags für die nahe Zukunft 2021-2050 (aufgegliedert für drei Landschaftsräume) und Abbildung A 19 die räumliche Verteilung für die drei betrachteten Zeiträume.

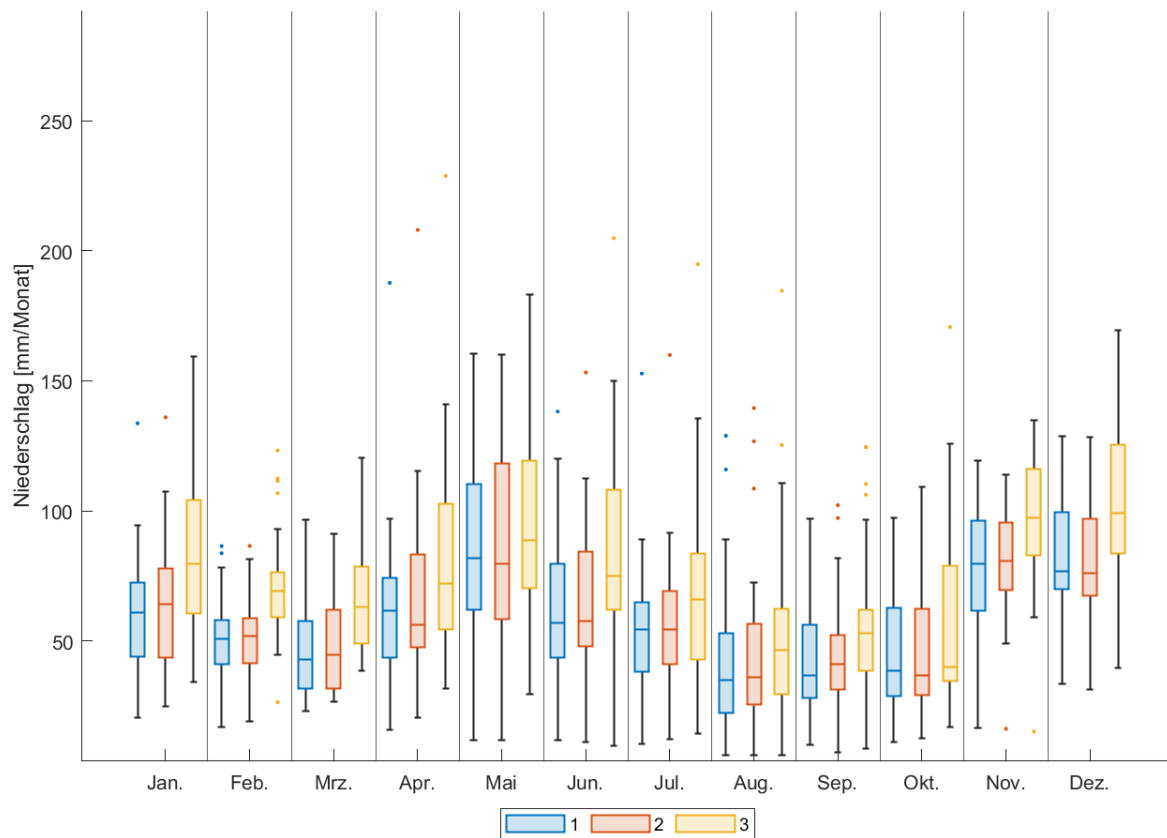


Abbildung A 18: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags (2071–2100) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

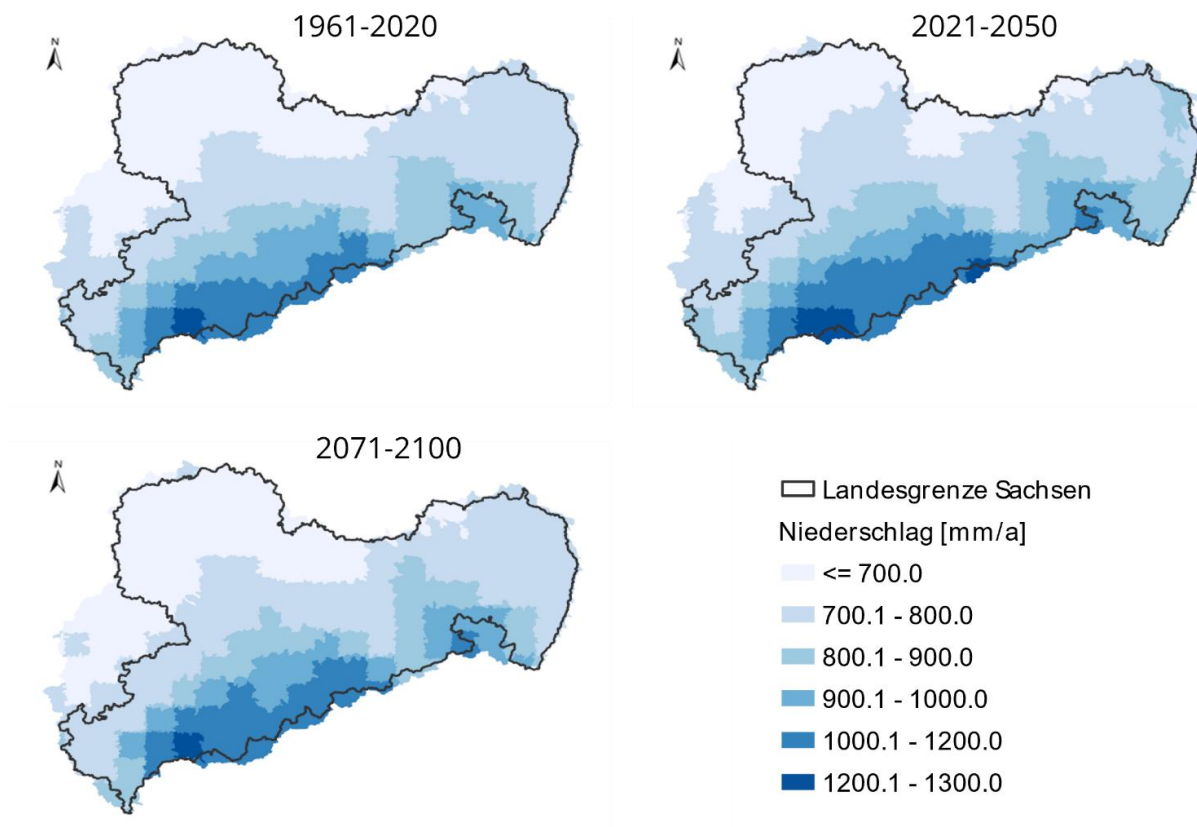


Abbildung A 19: Karten der räumlichen Verteilung des Niederschlags (langjährige Mittelwerte für 1961-2020 (oben, links), 2021-2050 (oben, rechts) sowie 2071-2100 (unten, links)) für die Klima projektion MDK4 im Bearbeitungsraum Sachsen

Hinsichtlich der realen Verdunstung ergibt sich ein differenziertes Bild. Die Klimaprojektion projiziert für den Zeitraum von 2021-2050 eine flächendeckende Zunahme der realen Verdunstung (s. Abbildung A 20, mittlere Karte). Für die ferne Zukunft von 2071-2100 zeigt sich hingegen eine unterschiedliche Ausprägung (s. Abbildung A 20, untere Karte). Während der Osten Sachsens und die Gebirgsregionen eine weitere Zunahme der realen Verdunstung aufweisen, gehen die Werte im Westen Sachsens von einem vergleichbaren oder geringfügig abnehmenden Niveau der jährlichen Verdunstung gegenüber dem Reanalysezeitraum aus. Dies wird maßgeblich durch die meteorologischen Eingangsdaten der Klimaprojektion MDK4 verursacht.

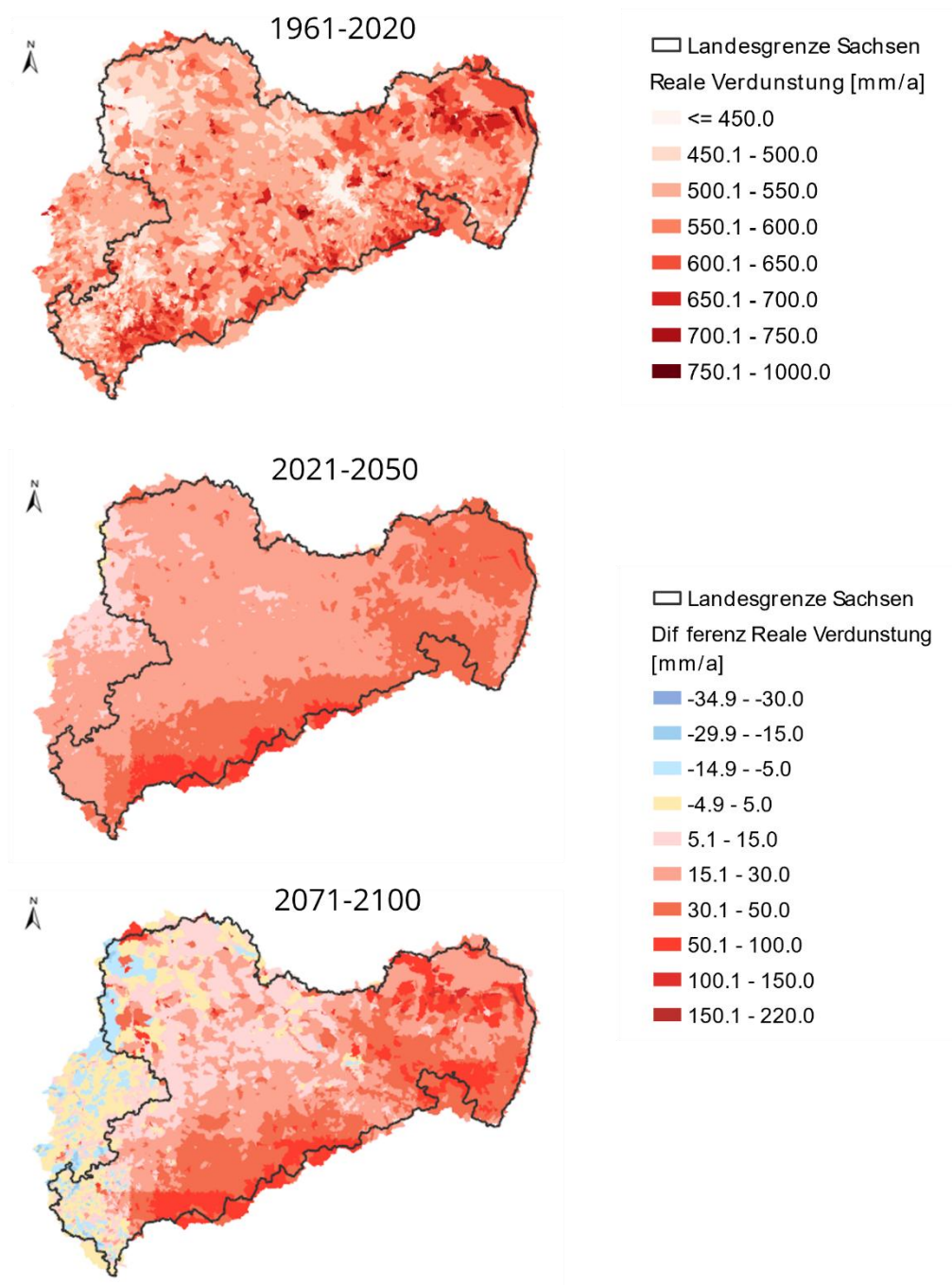


Abbildung A 20: Karte der räumlichen Verteilung der realen Verdunstung $ETR_{1961-2020}$ (langjähriger Mittelwert für 1961-2020, oben) sowie Differenzkarten von $ETR_{2021-2050} - ETR_{1961-2020}$ (Mitte) und $ETR_{2071-2100} - ETR_{1961-2020}$ (unten) für die Klimaprojektion MDK4 auf Teileinzugsgebietsebene im Bearbeitungsraum

Abbildung A 21, Abbildung A 22 und Abbildung A 23 greifen ergänzend die innerjährliche Verteilung der realen Verdunstung für den Reanalysezeitraum sowie die beiden Zeiträume von 2021-2050 und 2071 bis 2100 auf.

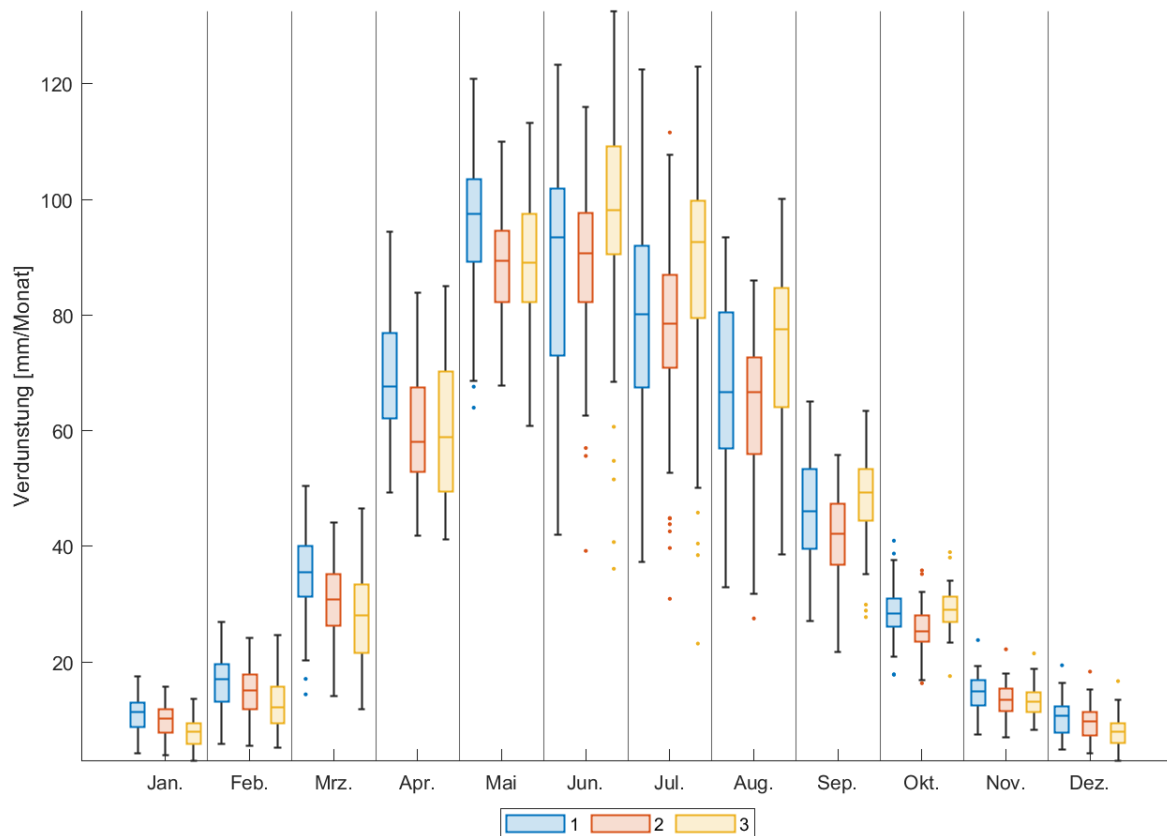


Abbildung A 21: Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung (1961–2020) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

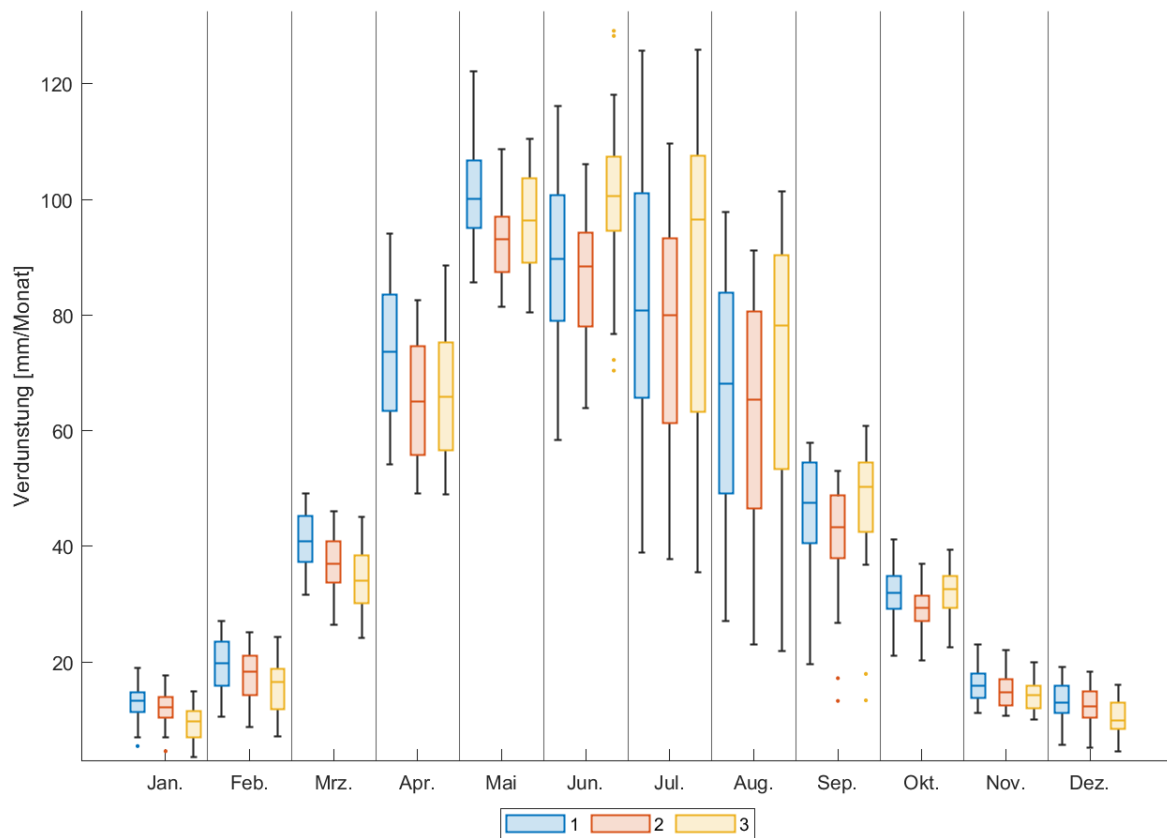


Abbildung A 22: Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung (2021–2050) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

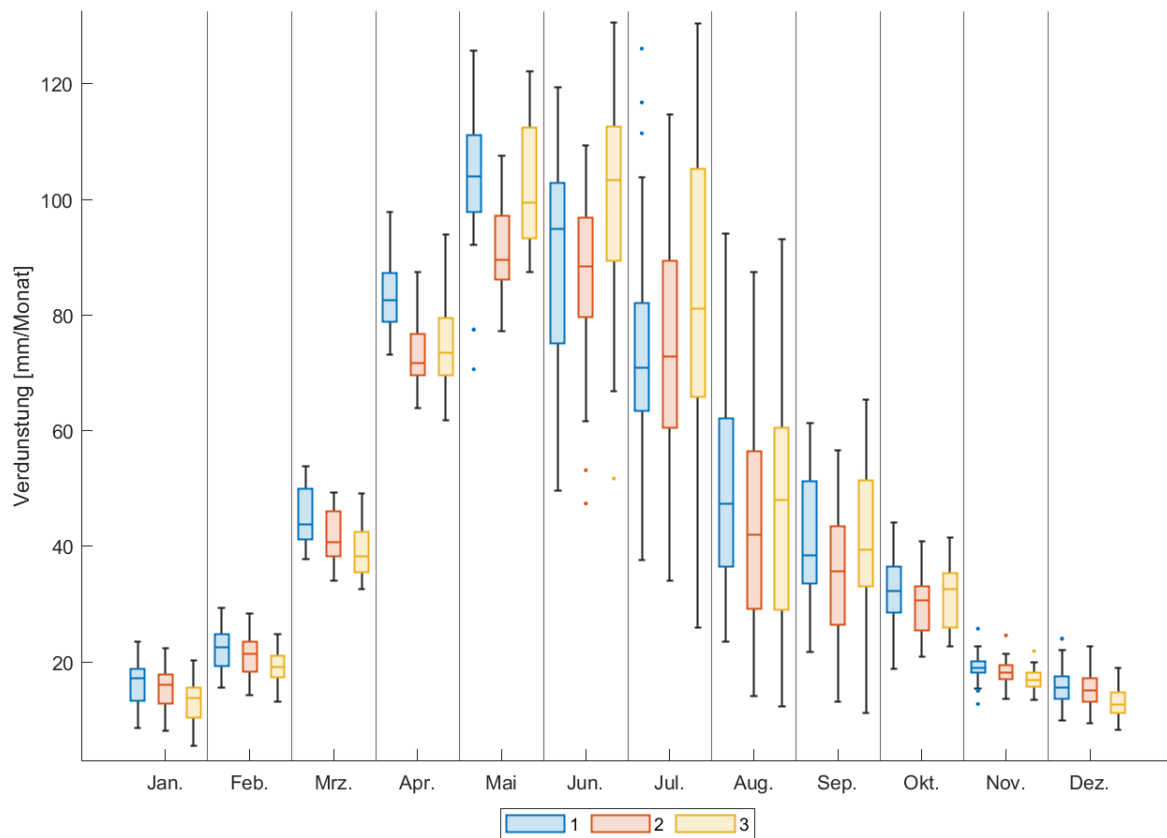


Abbildung A 23: Mittlerer Jahresgang der realen Verdunstung (2071–2100) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

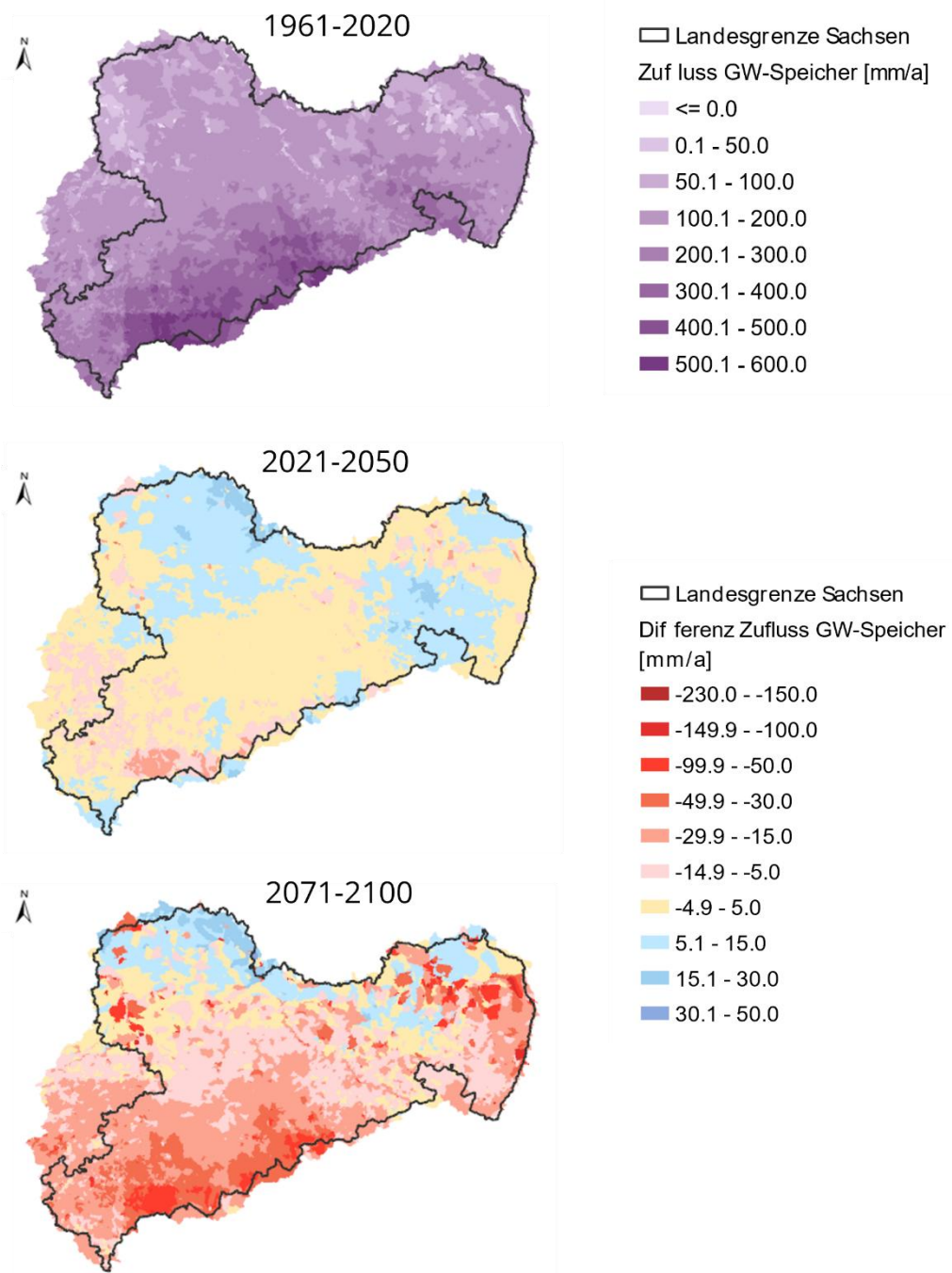


Abbildung A 24: Karte der räumlichen Verteilung des Zuflusses zum GW-Speicher $RG_{1961-2020}$ (langjähriger Mittelwert für 1961-2020, oben) sowie Differenzkarten von $RG_{2021-2050} - RG_{1961-2020}$ (Mitte) und $RG_{2071-2100} - RG_{1961-2020}$ (unten) für die Klimaprojektion MDK4 auf Teileinzugsgebiets-ebene im Bearbeitungsraum

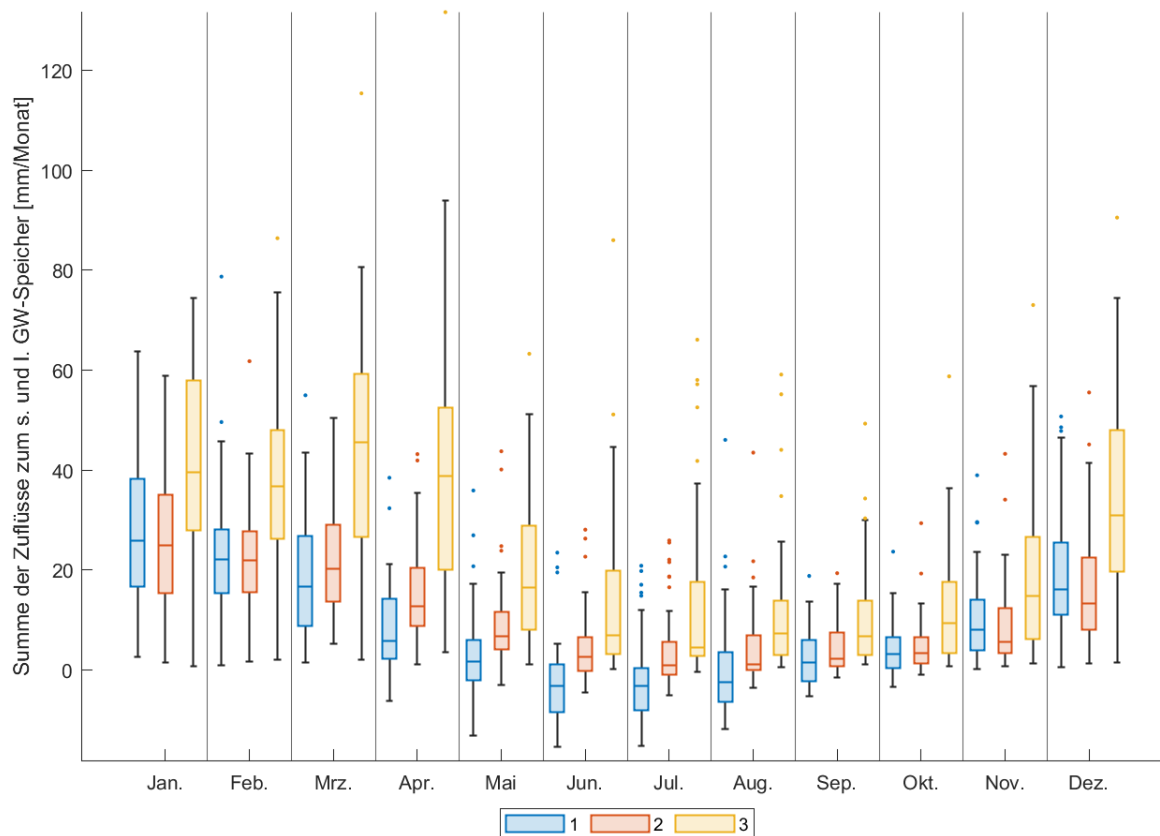


Abbildung A 25: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher (1961–2020) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

Abbildung A 25, Abbildung A 26 und Abbildung A 27 greifen ergänzend die innerjährliche Verteilung des GW-Zuflusses RG für den Reanalysezeitraum sowie die beiden Zeiträume von 2021-2050 und 2071-2100 auf.

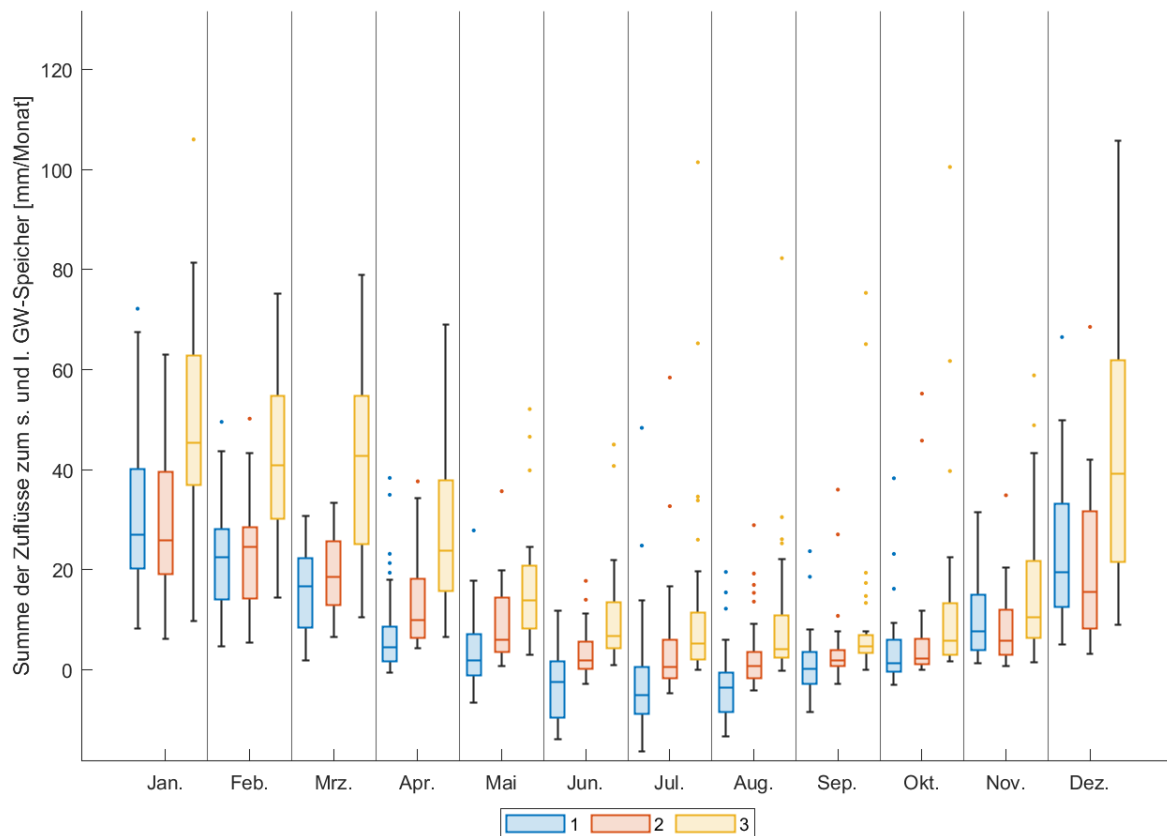


Abbildung A 26: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher (2021–2050) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

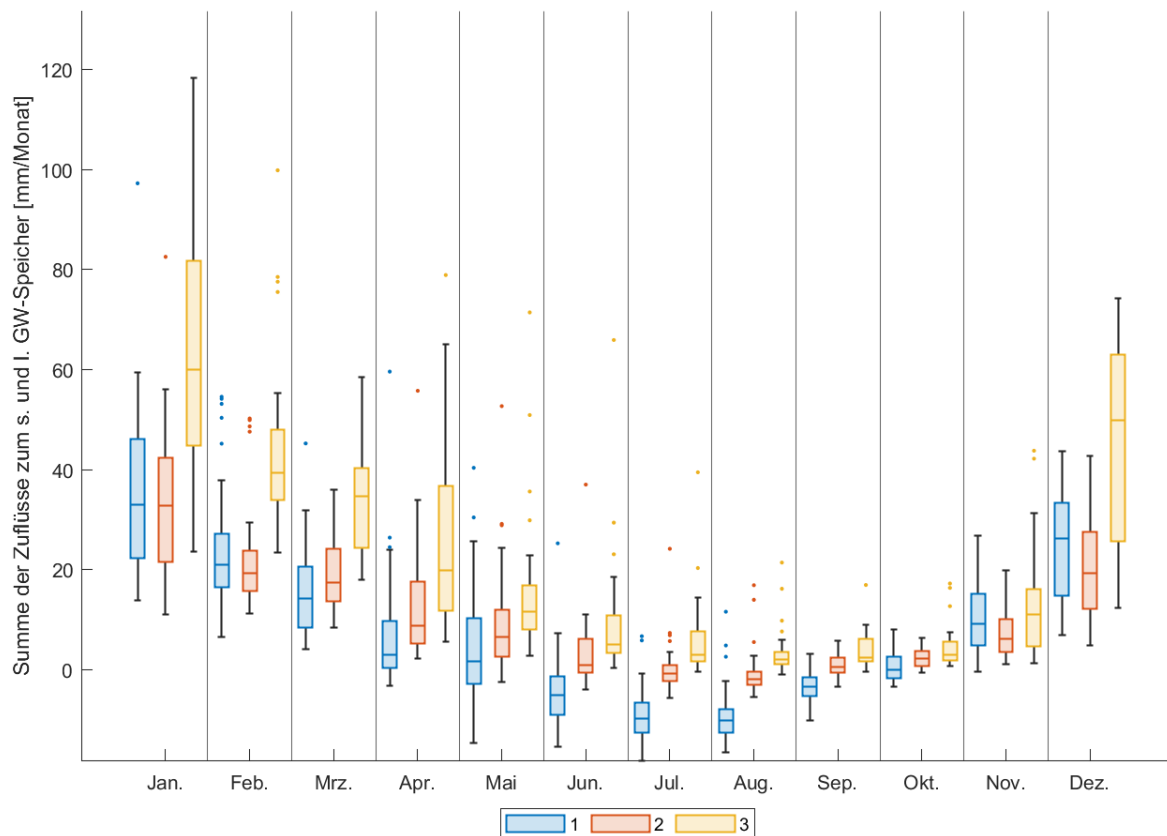


Abbildung A 27: Mittlerer Jahresgang des Zuflusses zum GW-Speicher (2071–2100) als Boxplot-Darstellung für die Klimaprojektion MDK4 über das Tiefland (1), das Gebirgsvorland/Hügelland (2) und den Gebirgsraum (3) Sachsens

A 2 Anhang Raven

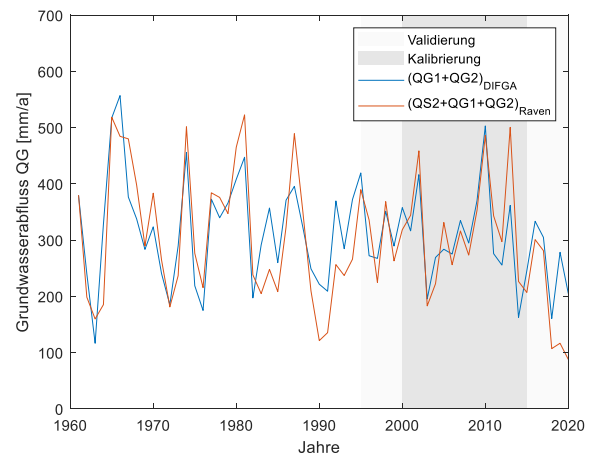
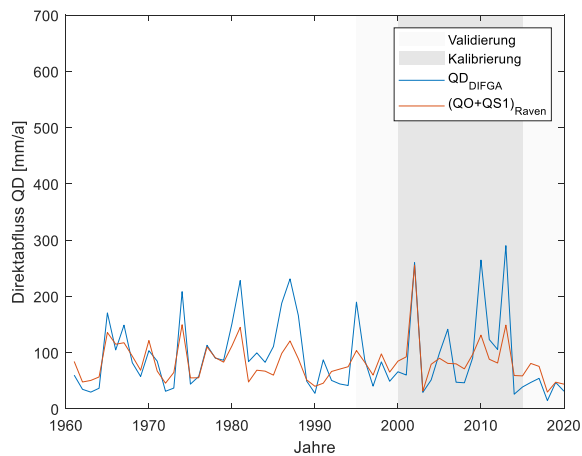


Abbildung A 28: Vergleich der DIFGA-Analyse mit der kalibrierten Raven-Simulation des jährlichen Direktabflusses QD (links) und dem Grundwasserabfluss QG (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020

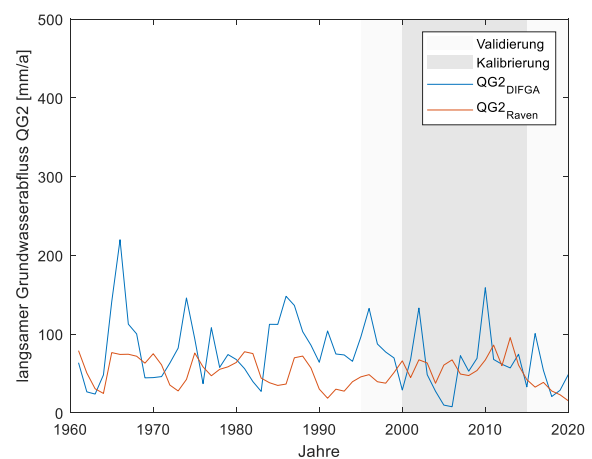
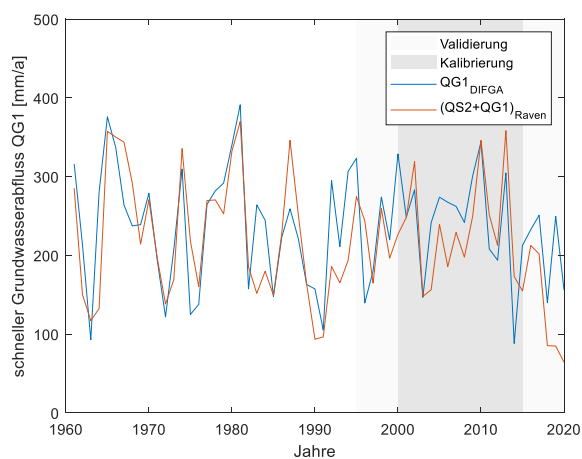


Abbildung A 29: Vergleich der DIFGA-Analyse mit der kalibrierten Raven-Simulation der jährlichen Grundwasserabfluss-Komponenten QG1 (links) und QG2 (rechts) für das Gebiet Dohna im Zeitraum 1961 bis 2020

A 3 Anhang BROOK90

A 3.1 Inputdatensätze

A 3.1.1 Landnutzungsdaten

Für die Identifizierung der Landnutzung wurden die Daten des amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) für Sachsen (Stand 2020) verwendet (Abbildung A 30). Diese Klassen bestehen aus Wasser-/Feuchtgebieten (2 Unterklassen), niedriger Vegetation (4 Unterklassen), Wäldern (6 Unterklassen), landwirtschaftlichen Flächen (4 Unterklassen), städtischen Gebieten (5 Unterklassen) und Gebieten ohne Vegetation.

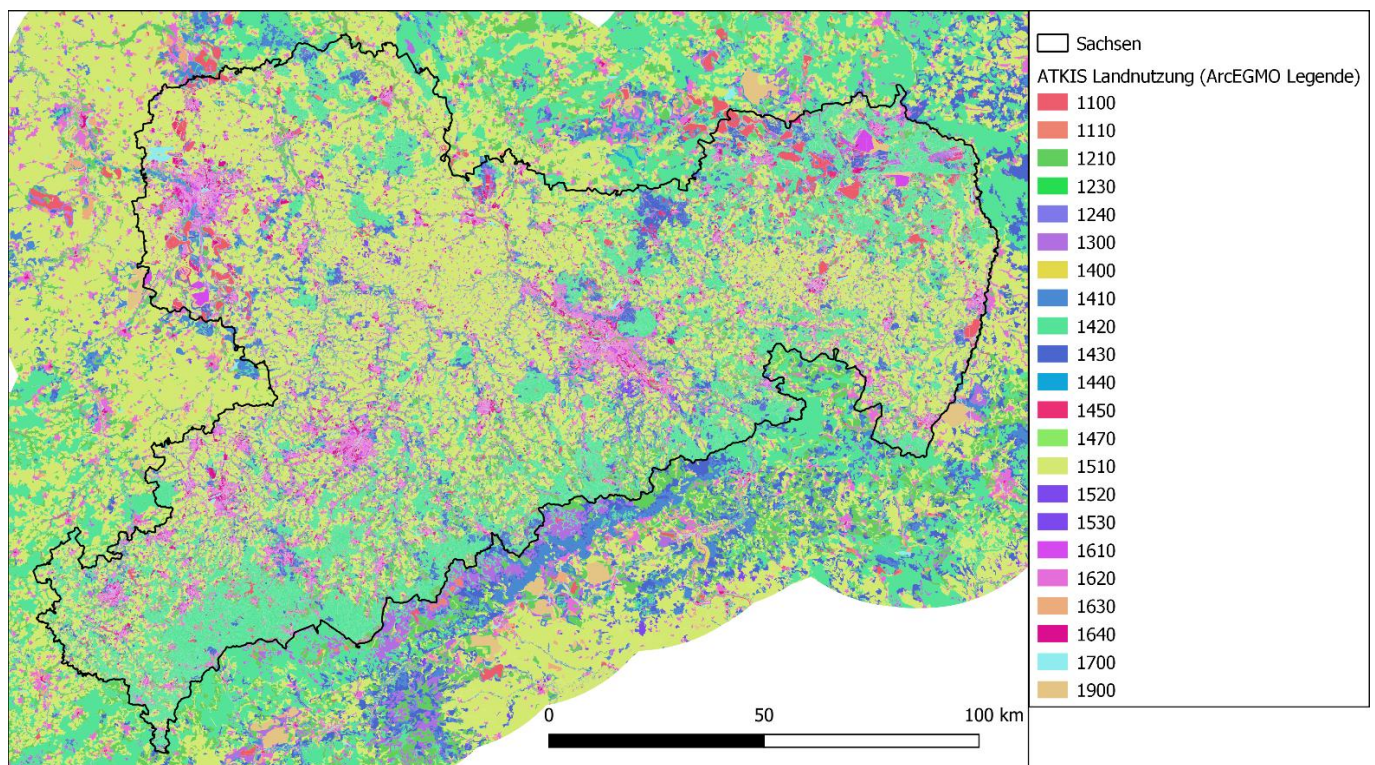


Abbildung A 30: Räumliche Verteilung der Vegetationsklassen nach dem ATKIS-Landnutzungsdatensatz und den dazugehörigen ArcEGMO-Bezeichnungen für BROOK90 (die Klassen-Codes sind in Tabelle A 4 erklärt)

Tabelle A 4: Klassifizierung des ATKIS-Landnutzungsdatensatz in BROOK90

ArcEGMO/ BROOK90 ID	Beschreibung
1100	GEWÄSSER (Fließgewässer, Quellbereich)
1110	FEUCHTFLÄCHEN (Hoch-/Übergangsmoor, Flachmoor, Sumpf)
1210	GRÜNLAND
1300	HEIDE
1400	WALD (inkl. Schluchtwald, Blockschuttwald, Trockenwald, Waldrand)
1410	LAUBWALD
1420	NADELWALD
1430	MISCHWALD
1440	FEUCHTWALD (Auwald, Bruch-, Sumpfwald)
1450	GEHÖLZ (Hecke, Gebüsch, Gehölzpflanzung, Baumgruppe, Baumreihe, Einzelbaum, Streuobstwiese)
1470	STREUOBSTWIESE
1510	ACKER
1520	ERWERBSGARTENBAU
1530	WEINBAU (Obstanbau)
1610	BEBAUTER BEREICH, Einzelhäuser, Kleinsiedlung (gering versiegelt, weniger als 25 %)
1620	BEBAUTER BEREICH, Einzel- und Reihenhaussiedlung, Straße (25-50 %)
1630	BEBAUTER BEREICH, Zeilenbebauung, Punktbauung, Hochhäuser (50-75 %)
1640	BEBAUTER BEREICH, Städtisches Kerngebiet (75-100 %)
1700	VERKEHRSFLÄCHEN
1900	VEGETATIONSFREIE FLÄCHE (Fels, Kies, Müll, Kohle, Schlamm, Ton)

A 3.1.2 Bodenkarte

Für die Identifizierung des Bodentyps wurde die Bodenkarte 1:50.000 für Sachsen (Stand 2020) verwendet (Abbildung A 31). Zur Klassifikation wurde die "Legend"-Nummer verwendet, die auf einen bestimmten Bodentyp mit entsprechenden physikalischen und biochemischen Eigenschaften verweist.

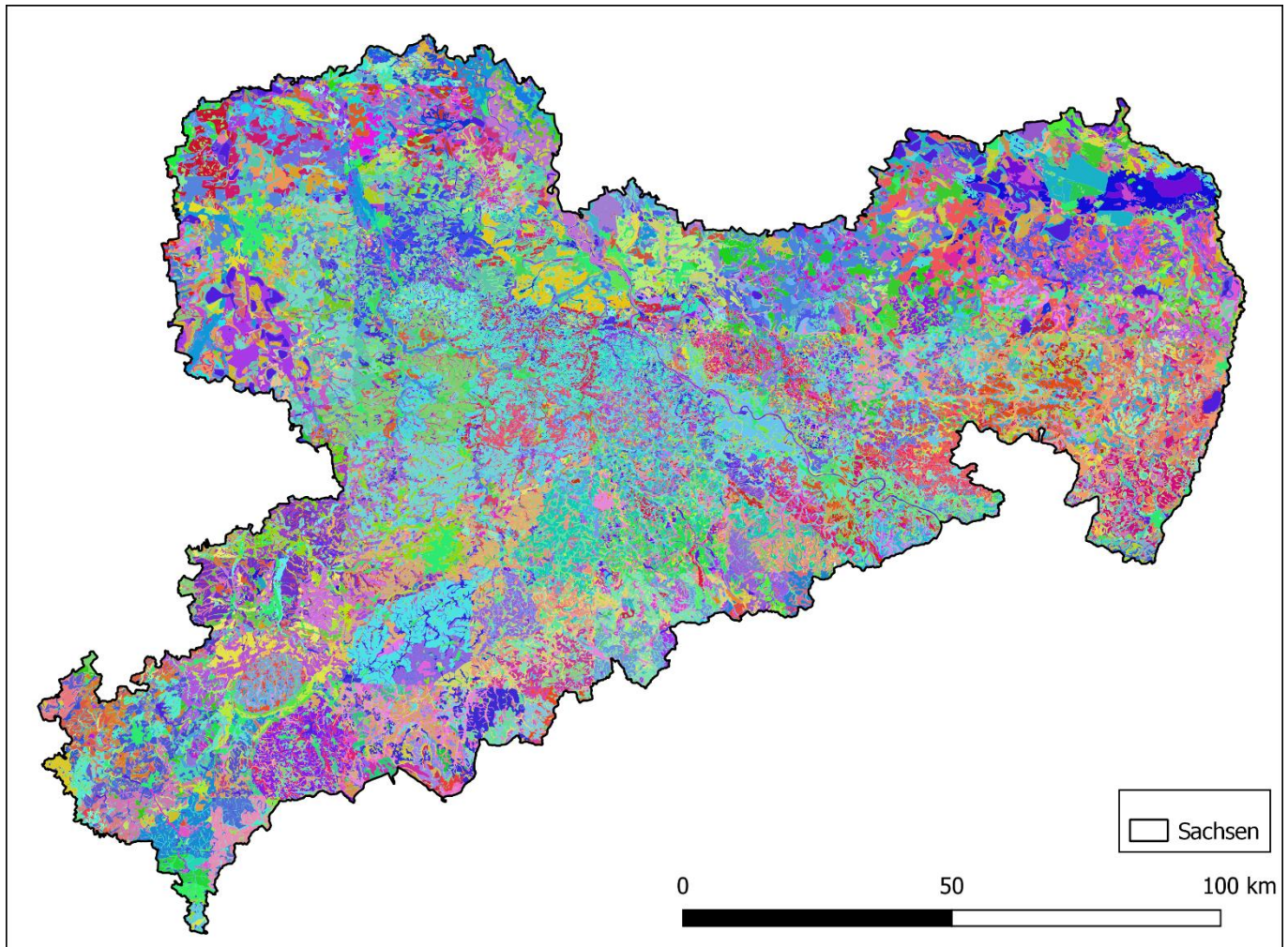


Abbildung A 31: Räumliche Verteilung des BK50 Datensatz (Stand Mai 2020). Die Legende für die Bodenkarte wird nicht dargestellt, da das Gebiet mehr als 1000 lokale Bodentypen enthält.

A 3.1.3 Topographie-Datensatz

Für die Berechnung der Hangneigung und der Hangausrichtung wurde das SRTM30-Digitales Höhenmodell (NASA JPL, 2013) verwendet. Dieses Modell mit Stand 2020 hat eine räumliche Auflösung von ca. 30 m (1 Bogensekunde) und ist frei verfügbar (STRM30, 2013). Die Darstellung des Höhenmodells erfolgt in Abbildung A 32.

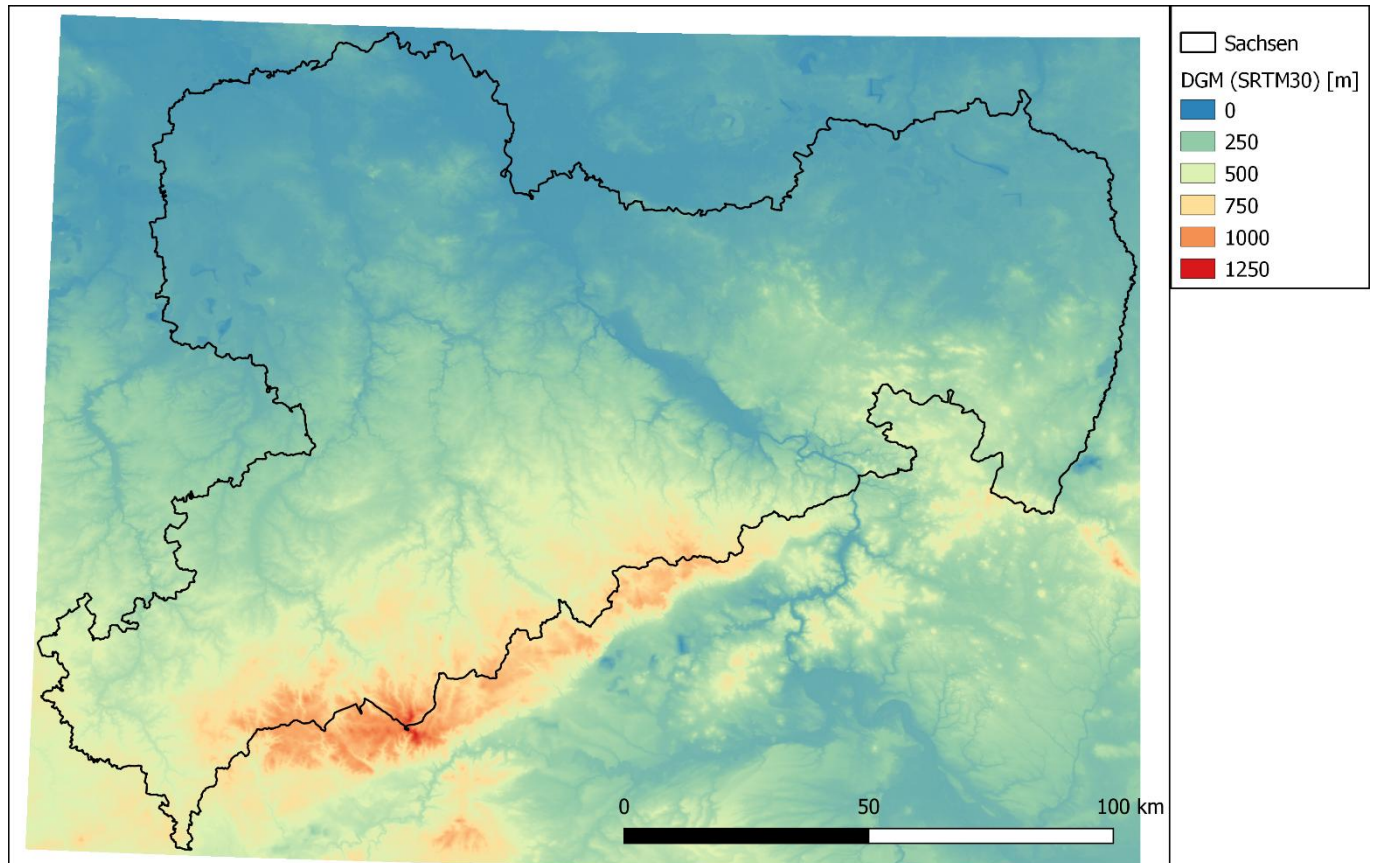


Abbildung A 32: SRTM30 Topographie-Datensatz mit Höhenangaben für das KliWES 3.0-Gebiet

A 3.1.4 Waldhöhen-Datensatz

Für eine genauere Bestimmung der Baumhöhe auf Waldflächen wurde der globale Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)-Datensatz mit Stand 2019 (Potapov et al., 2021) genutzt. Eine Übersichtskarte kann Abbildung A 33 entnommen werden. Dieser Datensatz kombiniert satellitengestützte Lidar-Messungen mit Landsat-Daten, um die Höhe der Baumkronen auf einer Rasterauflösung von 30 m zu schätzen.

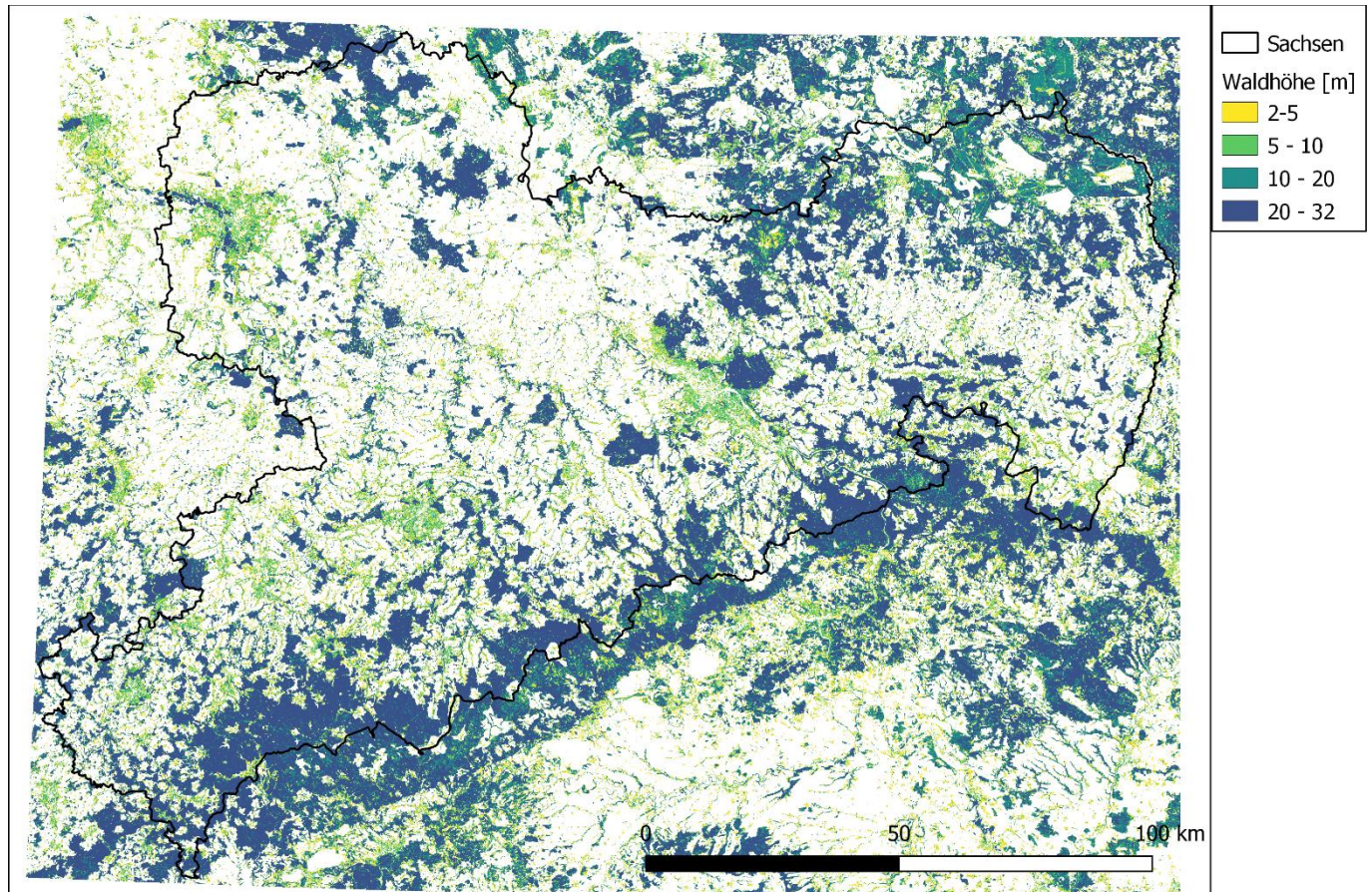


Abbildung A 33: Räumliche Verteilung der Waldhöhen laut dem GEDI-Waldhöhendatensatz für den Zeitpunkt Oktober 2019

A 3.1.5 Blattflächenindex-Datensatz

Für die Bestimmung der Blattflächenindex-Parameter wurde der Spectroradiometer-Satellitendatensatz MCD15A2Hv061 (Myneni et al., 2021) verwendet (Abbildung A 34). Der Datensatz liefert Blattflächenindex-Daten ab 2002 mit einer zeitlichen Auflösung von acht Tagen auf einem Raster von 500 m.

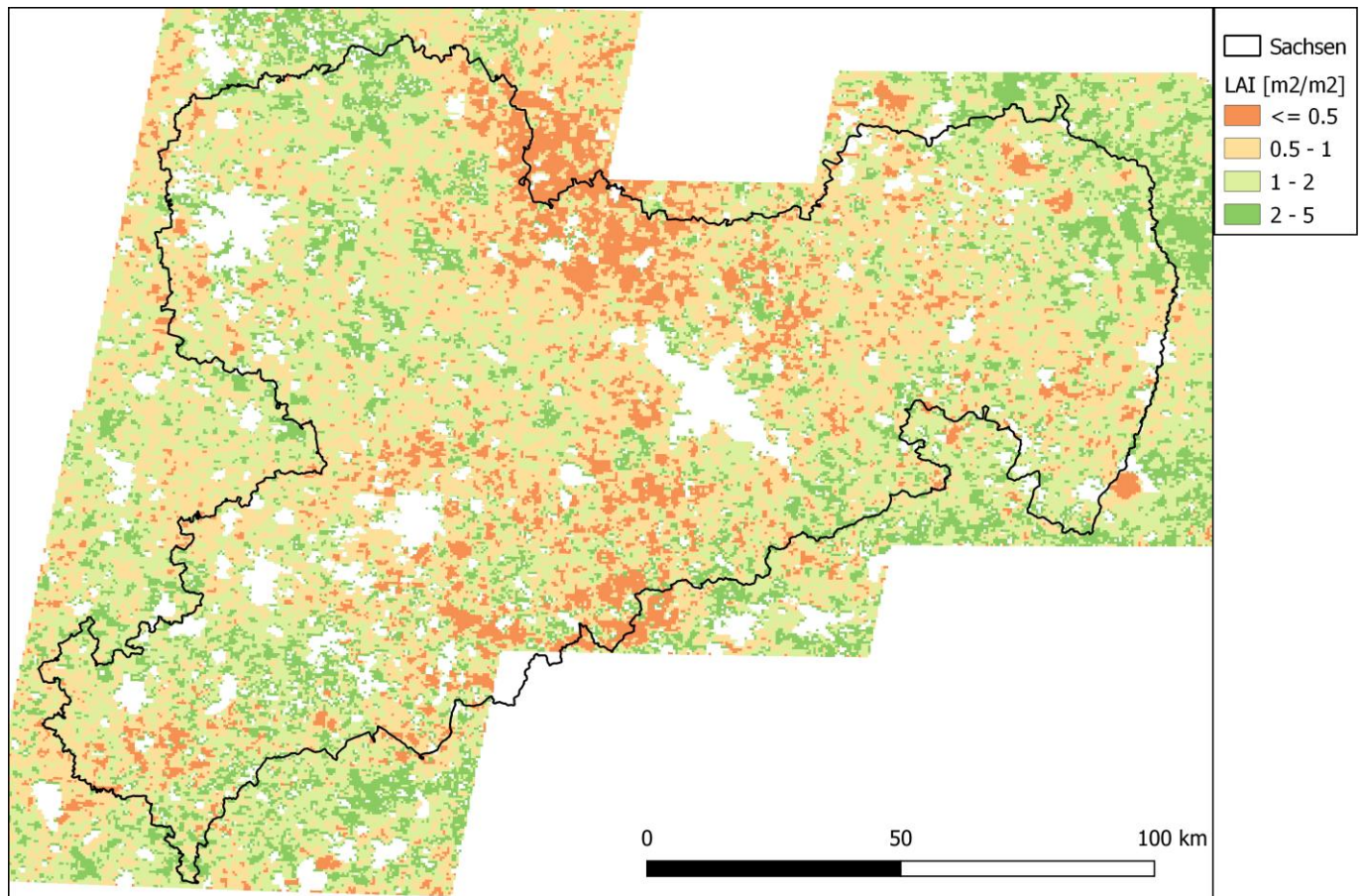


Abbildung A 34: Beispielhafte räumliche Verteilung des MODIS Blattflächenindex Datensatzes für den 21.08.2022

A 3.1.6 Gitter-basierte Parametrisierung

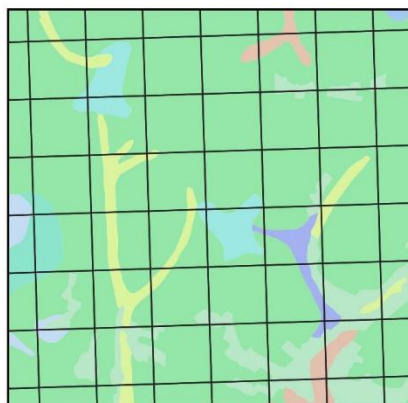
Die Wasserbilanzsimulationen mit BROOK90 (B90) wurden auf einem rechteckigen Raster mit einer Auflösung von 500 m durchgeführt. Das KliWES 3.0-Gebiet umfasst insgesamt 75.185 Zellen. BROOK90 ist ein physikalisches 1D hydrologisches Modell mit einem besonderen Fokus auf einer detaillierten Darstellung der vertikalen Wasseraustauschprozesse im Boden-Wasser-Pflanzensystem an einem Standort (Federer et al., 2023). Das Hydrotop-Raster, auf welchem die B90 Modelle betrieben wurden, wurde innerhalb der Grenzen von Sachsen in der UTM-Zone 33N (N-E) / EPSG 3045-Projektion erstellt. Das B90-Modell verfügt über mehr als 100 physikalisch basierte Parameter, von denen einige standortspezifisch sind. Diese standortspezifischen Parameter wurden mithilfe der oben genannten Datensätze zugewiesen (Abbildung A 35). Dafür wurden die Daten aus jedem Datensatz entweder über jedes Raster/Hydrotop (z.B. Topographie) gemittelt oder der dominante Wert verwendet (z.B. Landbedeckungstyp). Für

die übrigen Modellparameter erfolgte eine Übernahme aus der standardmäßigen Parameterliste des Entwicklers.

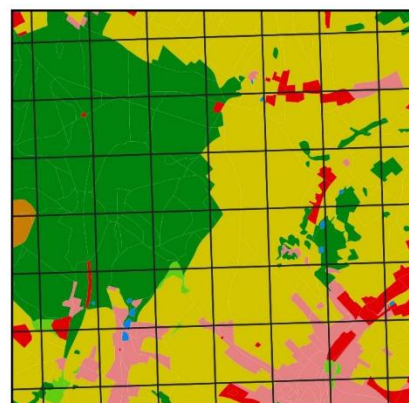
OpenStreetMaps



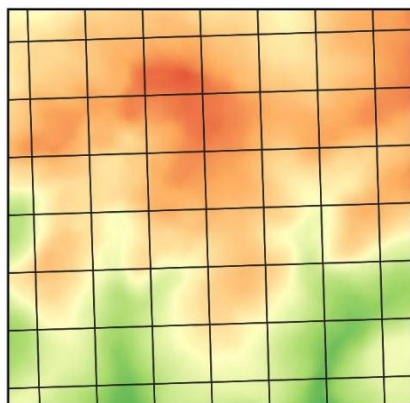
BK 50



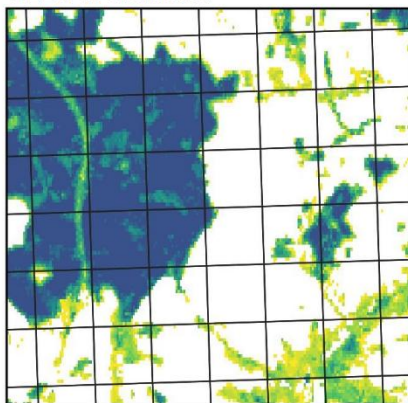
ATKIS LC



SRTM30



GEDI Waldhöhe



MODIS LAI

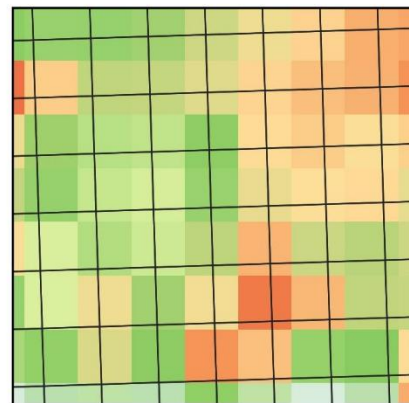


Abbildung A 35: Vergrößertes Beispiel verwendeter Datensätze in Bezug auf das 500-m-Modellierungsgitter

Parametrisierung des Modells BROOK90

A 3.1.7 Bodenparameter

Die Bodenparameter umfassen Informationen über die Anzahl der Bodenschichten (NLAYER) und deren Dicke (THICK), Steinanteil (STONEF), hydraulische Parameter nach Clapp-Hornberger (PSIF, THETAF, THSAT, BEXP, KF, WETINF) für jede Schicht, sowie der Anteil undurchlässiger Flächen (z.B. durch Versiegelung) (IMPERV) für einen Standort. NLAYER, THICK und STONEF werden direkt aus dem BK50-Datensatz übernommen, basierend auf den identifizierten dominierenden Legenden-Nummern. Die hydraulischen Parameter werden anhand des Sand-Ton-Lehm-Gehalts aus der BK50 zugewiesen, wobei der Bodentexturtyp zuvor identifiziert und ein fester Satz von Parametern abgeleitet wurde (Luong et al., 2020). IMPERV wird basierend auf der Landbedeckungsklasse festgelegt. Folgende Festlegungen gelten für die Parametrisierung von IMPERV:

- 0,99 für Wasser,
- 0,15 - 0,85 für urbane Gelände (von der Bebauungsdichte abhängig),
- 0,3 für Feuchtflächen und
- 0,05 für den Rest.

Für die Rasterzellen, für die keine BK50-Daten verfügbar waren, wurde eine feste Boden-Parametrisierung implementiert, die einem lehmigen Boden mit einer Tiefe von 1,5 m entspricht. Die betrifft hauptsächlich nicht-natürliche Landschaften, für welche die Bodentextur nicht identifiziert werden konnte.

A 3.1.8 Vegetationsparameter

Die meisten Vegetationsparameter für jedes Raster wurden basierend auf der identifizierten Landbedeckung zugewiesen. Dafür wurde eine feste Liste von Parametern für jede der 10 Klassen erstellt, die eine Zusammensetzung der Vorschläge der Modellentwickler, verfügbarer Literatur und Erfahrungswerten darstellt. Der Albedo oder die Oberflächenreflexion ohne (ALB) und mit (ALBSN) Schnee auf dem Boden variiert im Bereich von 0,05 - 0,3 für ALB und 0,3 - 0,7 für ALBSN. Die maximale jährliche Pflanzenhöhe (MAXHT) wurde im Bereich von 0,01 - 30 m festgelegt. Für hohe Vegetationsbestände (Wälder, Sträucher) wurde der Wert aus dem GEDI-Datensatz zugewiesen. Die relative innerjährliche (RELHT) Pflanzenhöhe (Anteil von MAXHT) zeigt eine saisonale Variation (mit Ausnahme der Waldklasse). Zum Beispiel beträgt sie für die Landwirtschaft von Oktober bis März 0,03. Die volle Höhe wird im Juli erreicht und bleibt bis zur Ernte im September bestehen. Die Breite des Blattes/ der Nadel (LWIDTH) wurde im Bereich von 1 - 40 mm festgelegt. Die maximale Länge der Feinwurzeln pro Quadratmeter Fläche wurde im Bereich von 100 - 3000 m festgelegt (1 für Wasser- und Bergbauklassen). Die relative Wurzeldichte

für steinfreies Volumen (ROOTDEN) liegt zwischen 0,05 und 0,6 für die obersten 10 cm des Bodens (null für Wasser) und nimmt mit einer Tiefe von 50 - 190 cm ab. Der maximale jährliche (MAXLAI) und relative innerjährliche (RELLAI) Blattflächenindex wird unter Verwendung des MODIS LAI-Datensatzes berechnet, wobei Korrekturen von unplausiblen Werten (negativ oder größer als 10) vorgenommen wurden. MAXLAI liegt zwischen 1 und 10 mit einem Medianwert von 5. Die maximale Blattleitfähigkeit (GLMAXC) wurde im Bereich von 0,5 - 1,5 cm/s festgelegt (0,01 für Wasser). Der Anteil des Xylem-Pflanzenwiderstands (FXYLEM) beträgt 0,5 - 0,9 für Wälder und 1 für alle weiteren Flächen. Der Extinktionskoeffizient für photosynthetisch aktive Strahlung im Blätterdach (CR) wurde auf 0,55 - 0,6 für Wälder und 0,7 für den Rest festgelegt. Die dynamische Rauigkeitslänge (ZOG) ist für städtische, Bergbau- und Wasserbedeckung mit 0,5 cm definiert und für die übrigen Flächen mit 2 cm. Der Reduktionsfaktor für die Schneedämpfung (KSNVP) wurde für Wälder auf 0,3 - 0,5 gesetzt und auf 1 für alle übrigen Vegetationstypen.

A 3.1.9 Abflussparameter

Die Abflussparameter in B90 beeinflussen die Aufteilung der Wasserflüsse zwischen Oberflächenabfluss, Makroporen, Hangabfluss und Grundwasserfluss. Einige davon haben keine direkte physikalische Bedeutung. Zwei separate feste Parameterkombinationen wurden für natürliche und nicht-natürliche Landbedeckungen verwendet. Für nicht-natürliche Landschaften, z. B. städtische Gebiete, kam ein vereinfachter Ansatz der schnellen Oberflächenabflussbildung zum Tragen, um die Rechenzeit zu reduzieren (IDEPTH, QFFC, QFPAR, QDEPTH-Parameter wurden auf 0 gesetzt). Der Bypass-Fluss wurde ausgeschaltet (BYPAR=0), was jedoch zu einer hohen Anzahl von hydrologischen Einheiten mit numerischen Problemen führte. Die vertikale Bodenwasserbewegung wurde so eingestellt, dass eine Drainage unter dem Einfluss der Schwerkraft entsteht (DRAIN=1). Darüber hinaus wurden die Parameter wie folgt definiert:

- die Verteilung des infiltrierten Wassers pro Tiefe nach dem klassischen Ansatz von oben nach unten mit INFEXP=0
- die Tiefe der Makroporen IDEPTH mit 10 cm
- die Parameter für die schnelle Oberflächenabflussbildung QFFC, QFPAR, QDEPTH mit 0,2, 0,1 bzw. 1 mm
- der Hangneigungswinkel DSLOPED für den Hangmatrixfluss entsprechend der Oberflächenschräge aus dem SRTM30-Datensatz
- die Anteile des täglichen Grundwasserflusses GSC und des Sickerwasserverlusts GSP aus einem Grundwasserspeicher unterhalb der Bodenschichten mit 0,1 bzw. 0,01

A 3.1.10 Weitere standortspezifische Parameter

Die restlichen nicht-standardmäßigen Parameter umfassen:

- den Breitengrad des Standorts (LATD) entsprechend den Koordinaten des Gitterzentrums,
- die Hangneigung (ESLOPED) abgeleitet vom SRTM30,
- die Ausrichtung (ASPECTD) ebenfalls abgeleitet vom SRTM30,
- die Hanglänge (LENGTH) definiert mit 500 m (Gitterauflösung) und
- die durchschnittliche Dauer von Niederschlagsereignissen pro Tag für jeden Monat (DURATN).

Die mittlere Ereignisdauer eines Niederschlags (DURATN) wurde mit stündlichen Daten der Klimastation Dresden-Klotzsche für den Zeitraum von 1995 bis 2021 berechnet und für alle Gitter festgelegt. Für alle Sommermonate beträgt die durchschnittliche Dauer drei Stunden, für die Wintermonate Oktober und November vier Stunden.

Weitere Auswertungen der Wasserhaushaltsberechnungen mit BROOK90

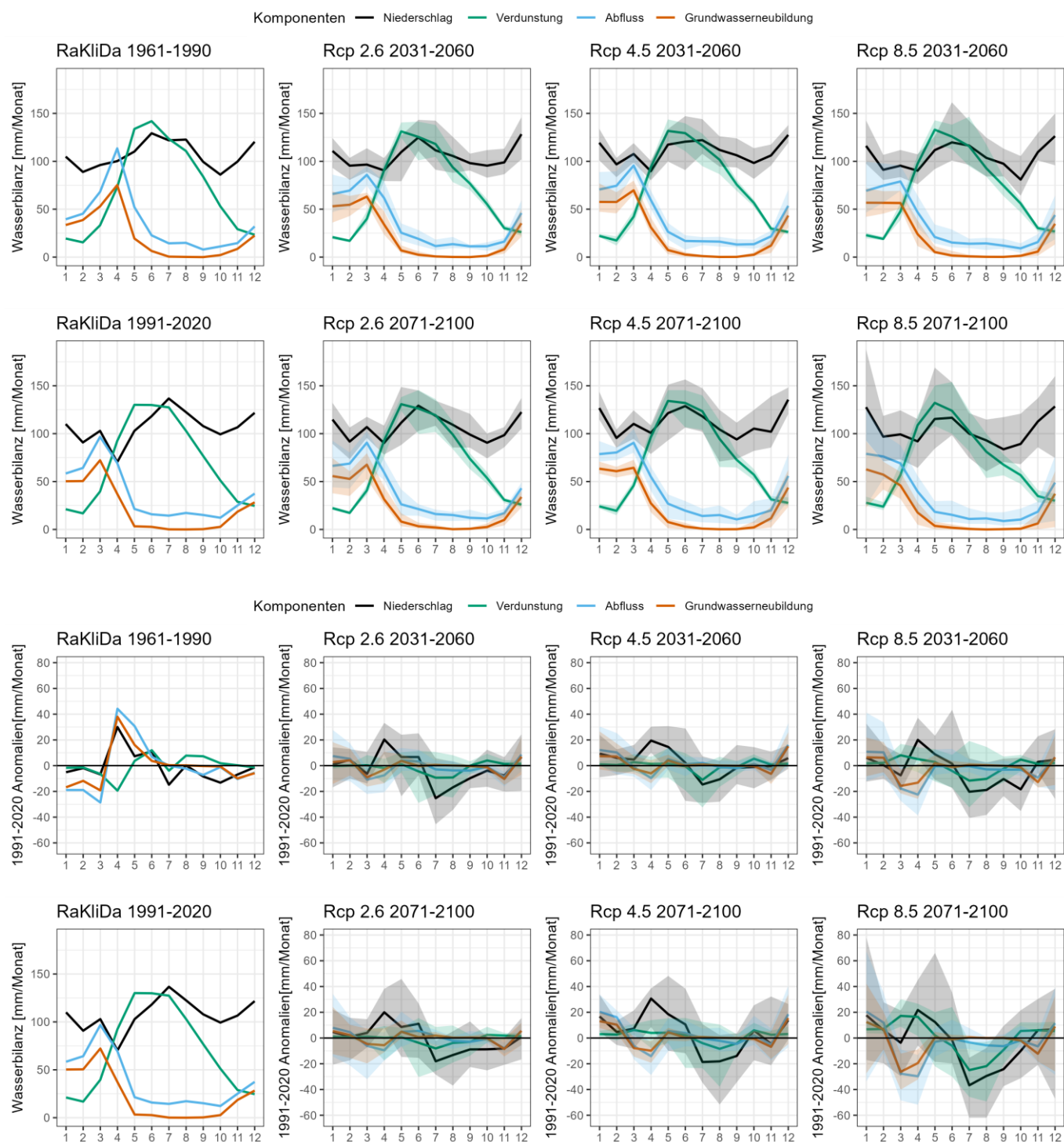


Abbildung A 36: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für Nadelwald (exemplarische HRU neben Johannegeorgenstadt; ID 3306). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt. Die Bandbreite für die RCP-Szenarien zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe.

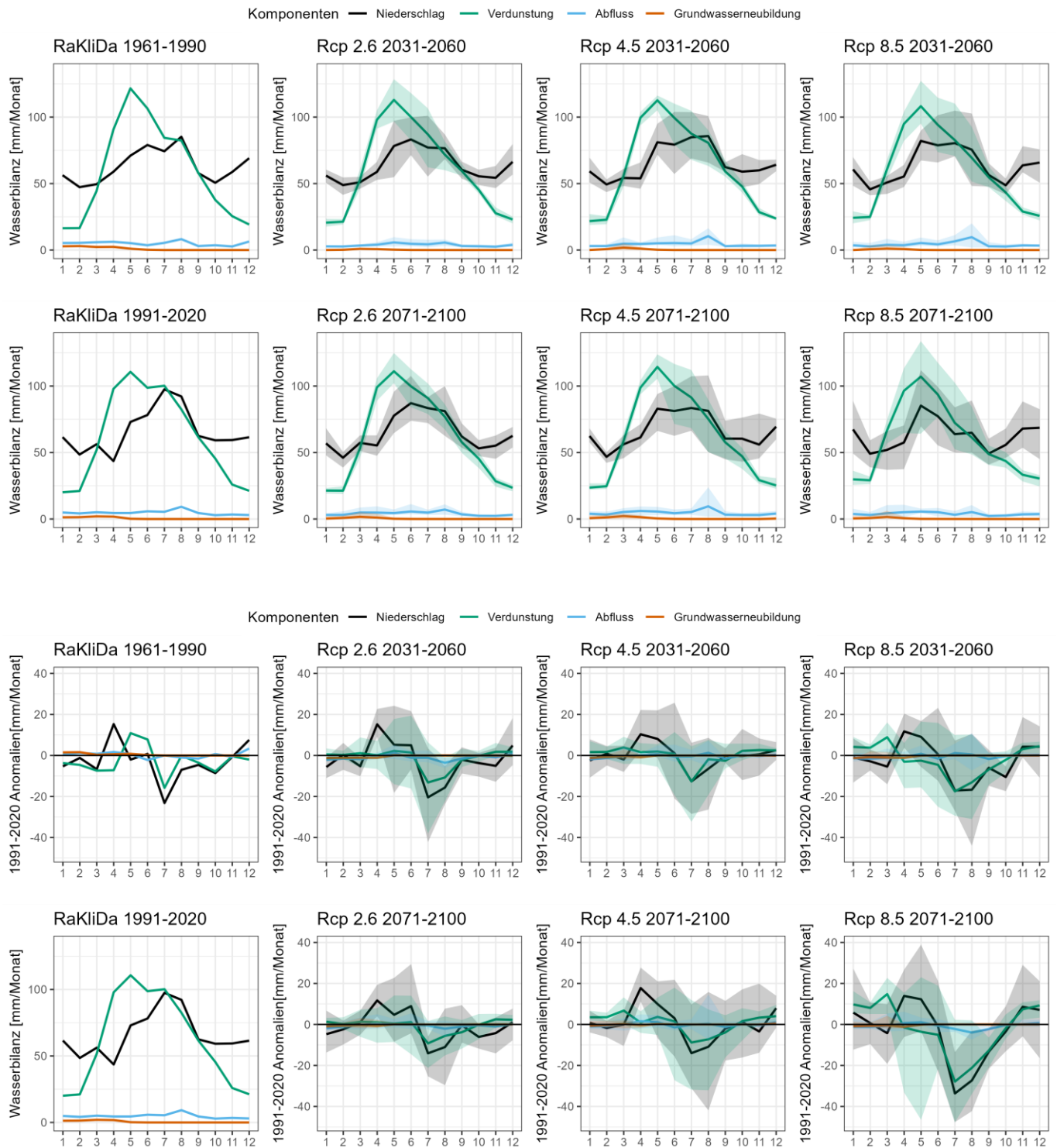


Abbildung A 37: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für Laubwald (exemplarische HRU neben Dresden; ID 38728). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt. Die Bandbreite für die RCP-Szenarien zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe.

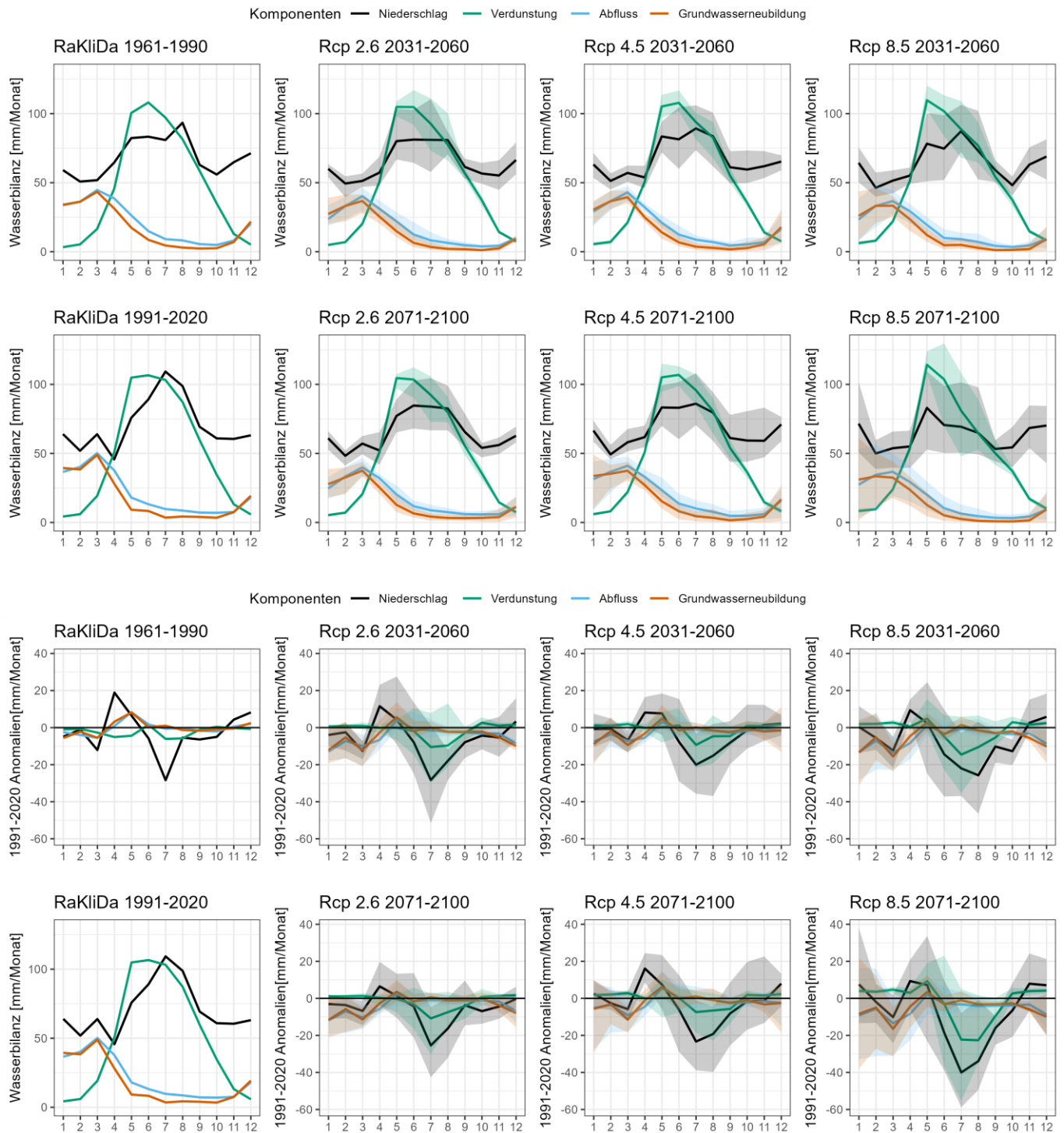
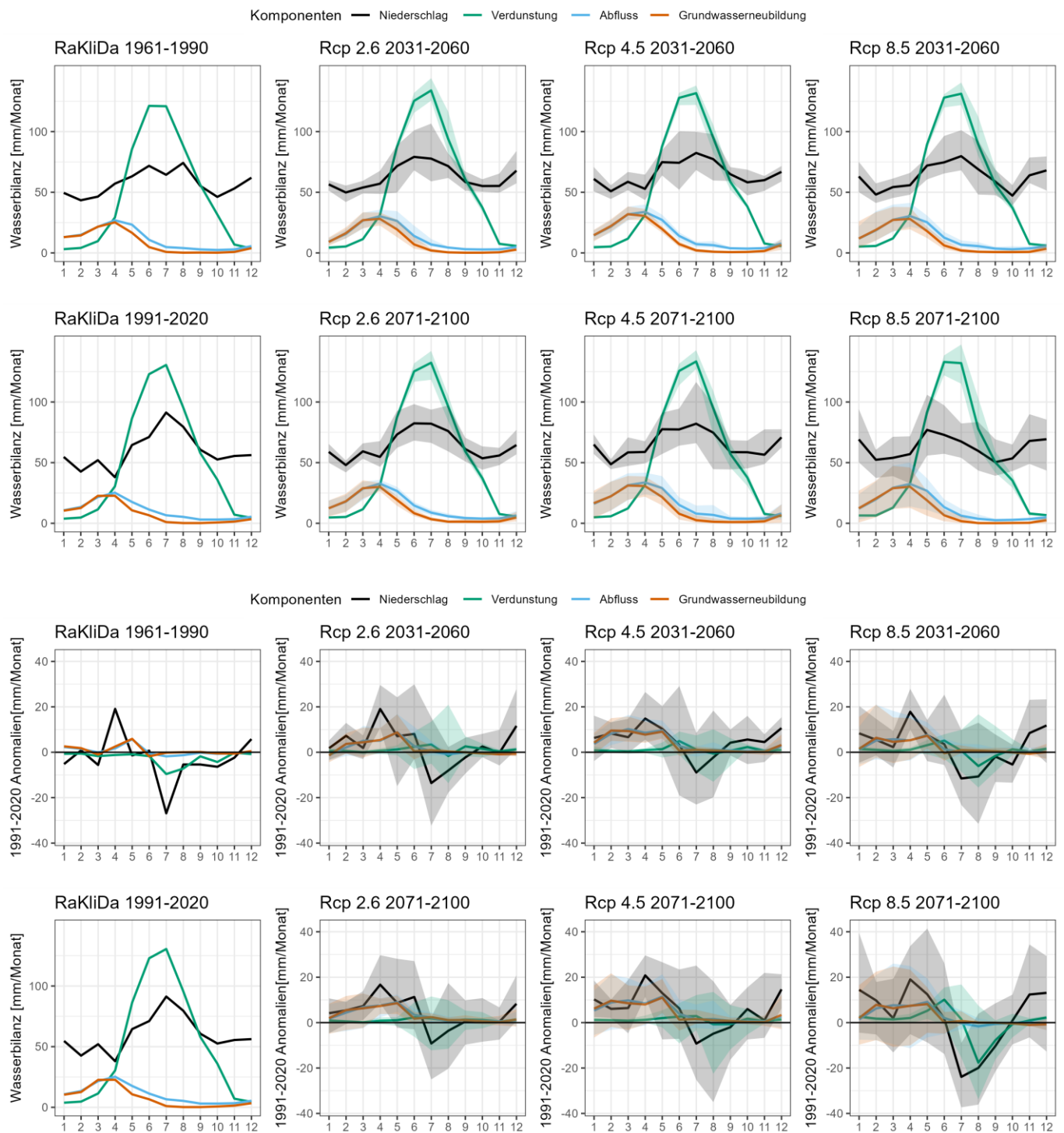


Abbildung A 38: Mittlere monatliche Wasserbilanzkomponenten für Grasland (exemplarische HRU neben Görlitz; ID 44696). Der Zeitraum 1991-2020 wird als Referenzperiode dargestellt. Die Bandbreite für die RCP-Szenarien zeigt sieben verschiedene Klimamodellläufe.



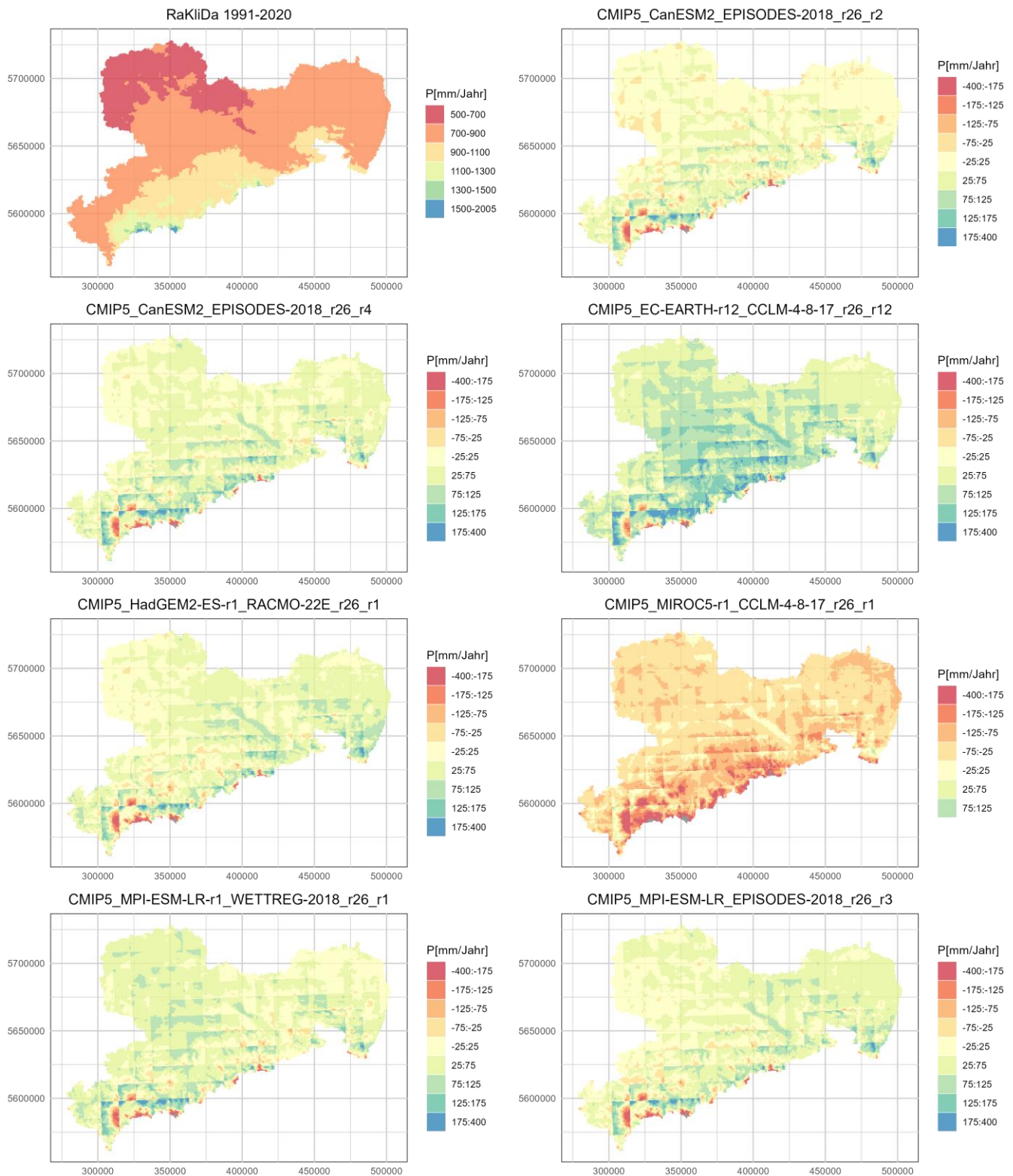


Abbildung A 40: Mittlere jährliche Niederschlagssummen für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.

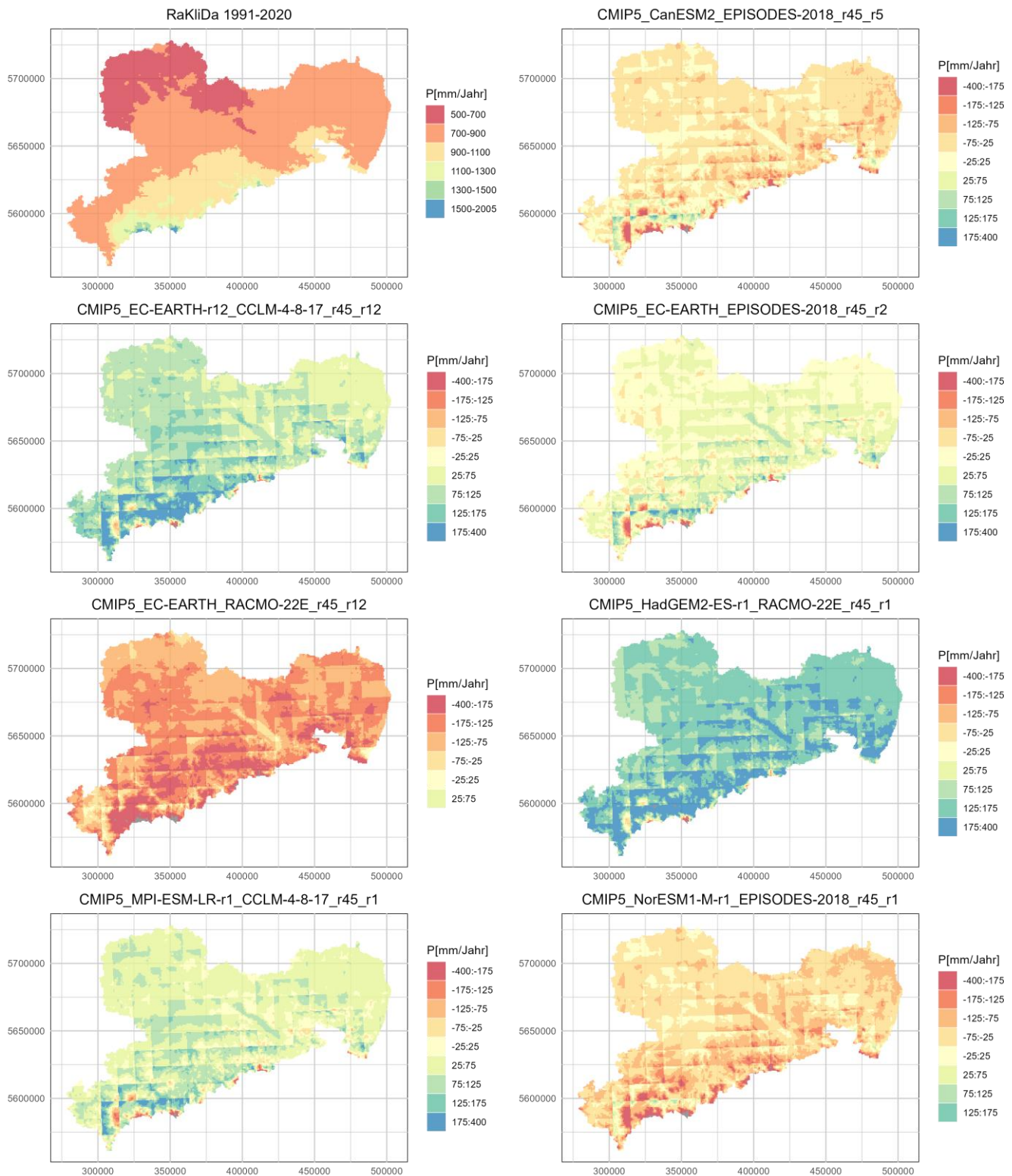


Abbildung A 41: Mittlere jährliche Niederschlagssummen für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.

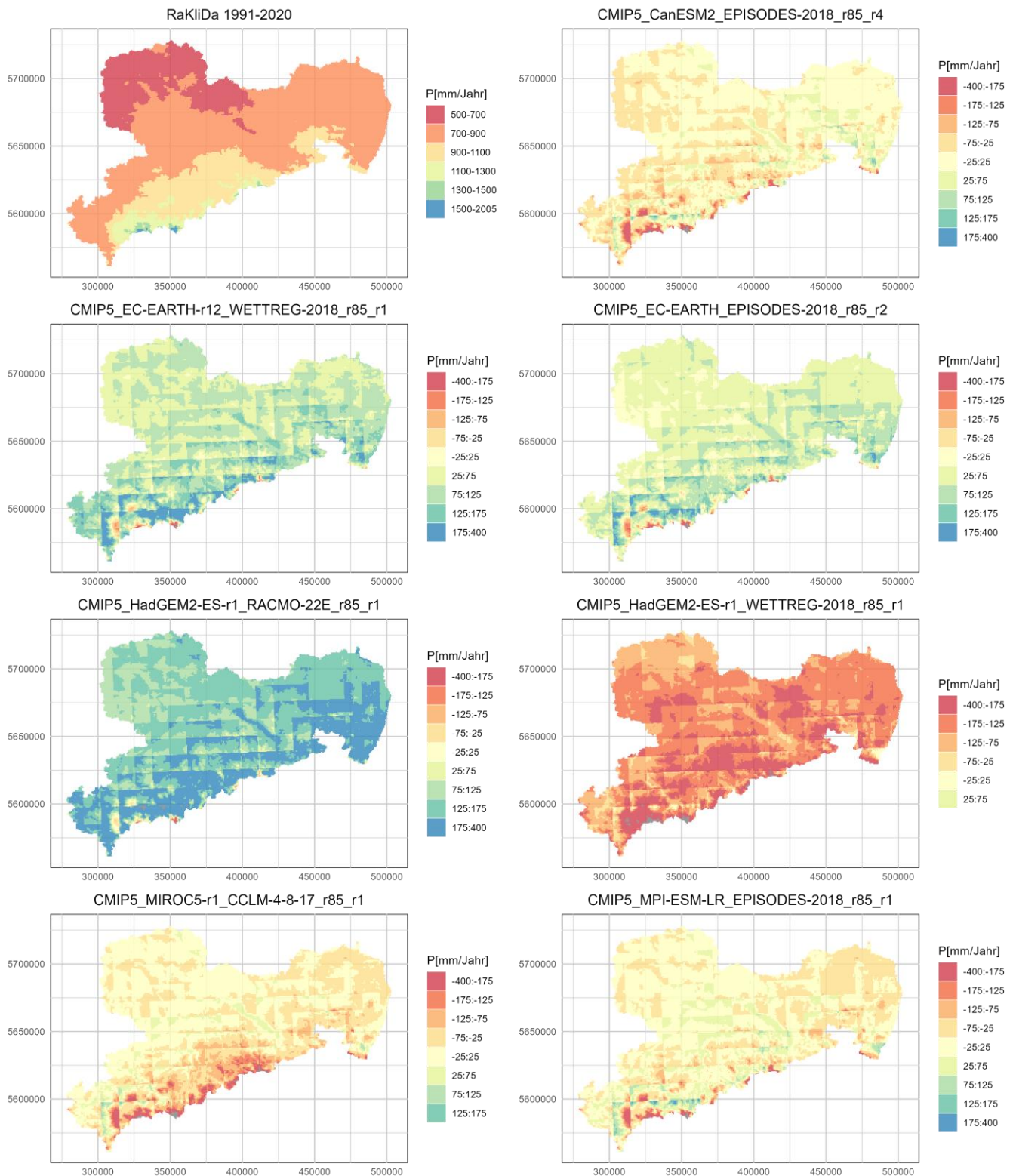


Abbildung A 42: Mittlere jährliche Niederschlagssummen für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.

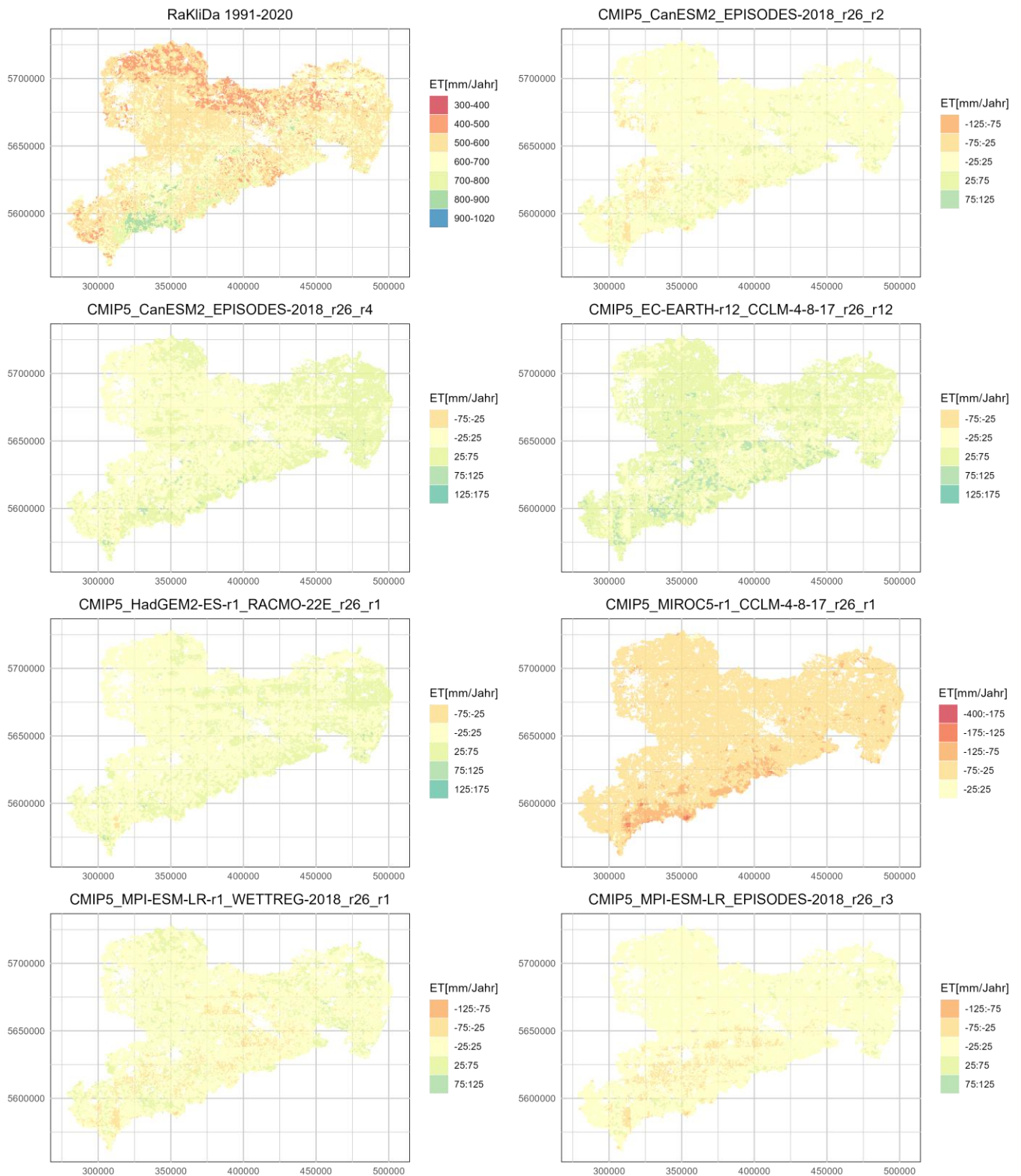


Abbildung A 43: Mittlere jährliche Verdunstung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.

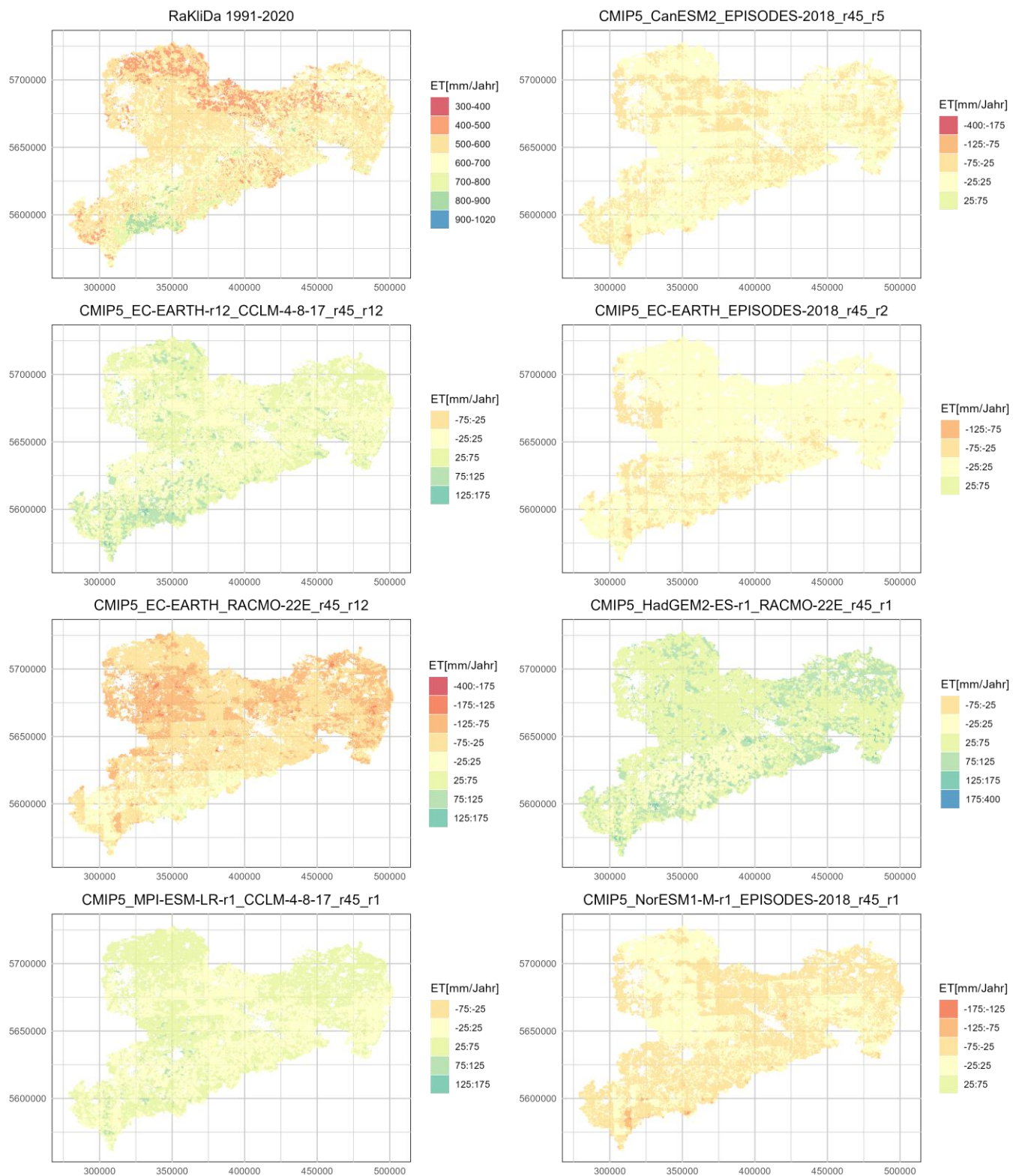


Abbildung A 44: Mittlere jährliche Verdunstung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.

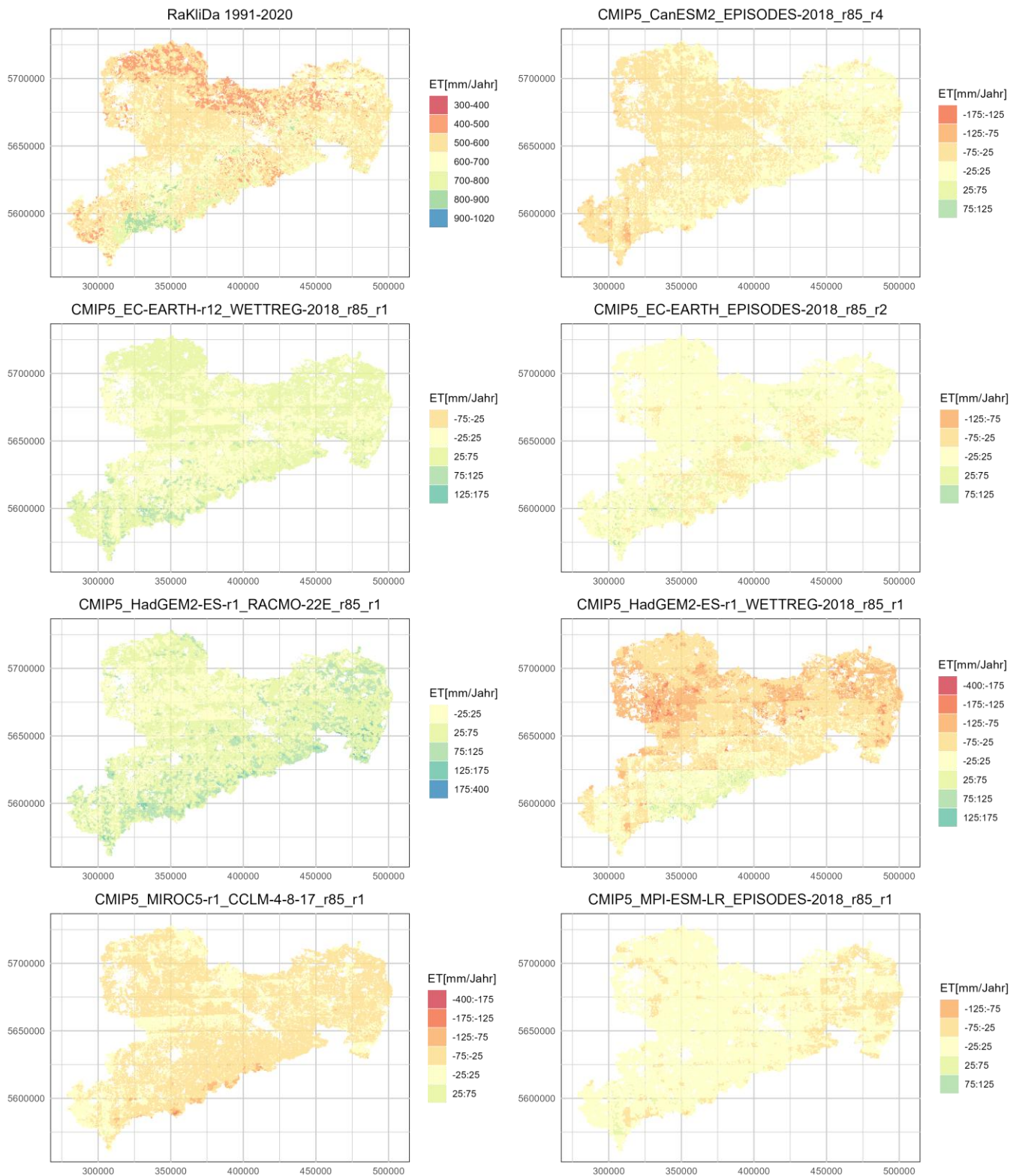


Abbildung A 45: Mittlere jährliche Verdunstung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.

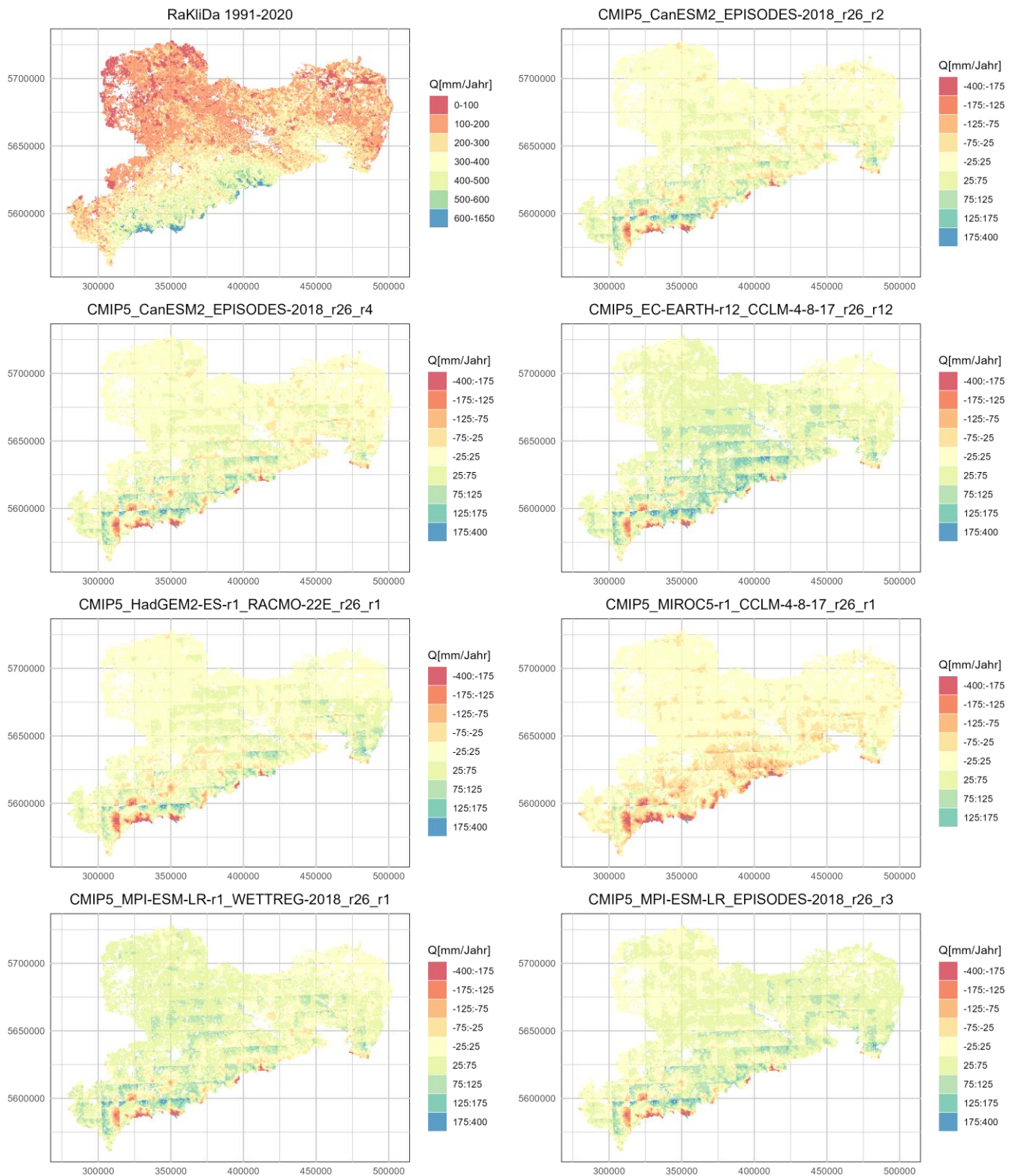


Abbildung A 46: Mittlerer jährlicher Abfluss für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.

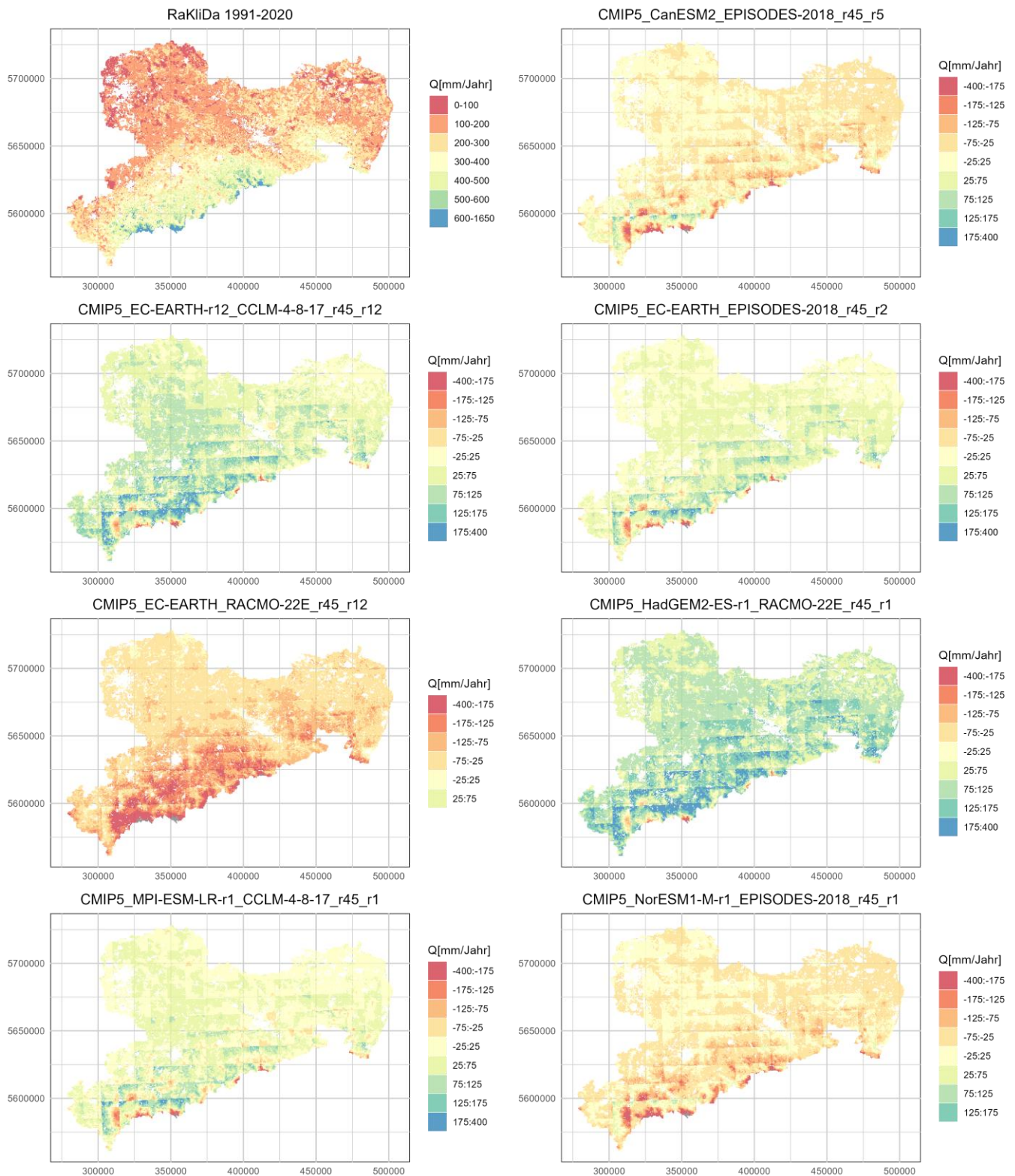


Abbildung A 47: Mittlerer jährlicher Abfluss für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.

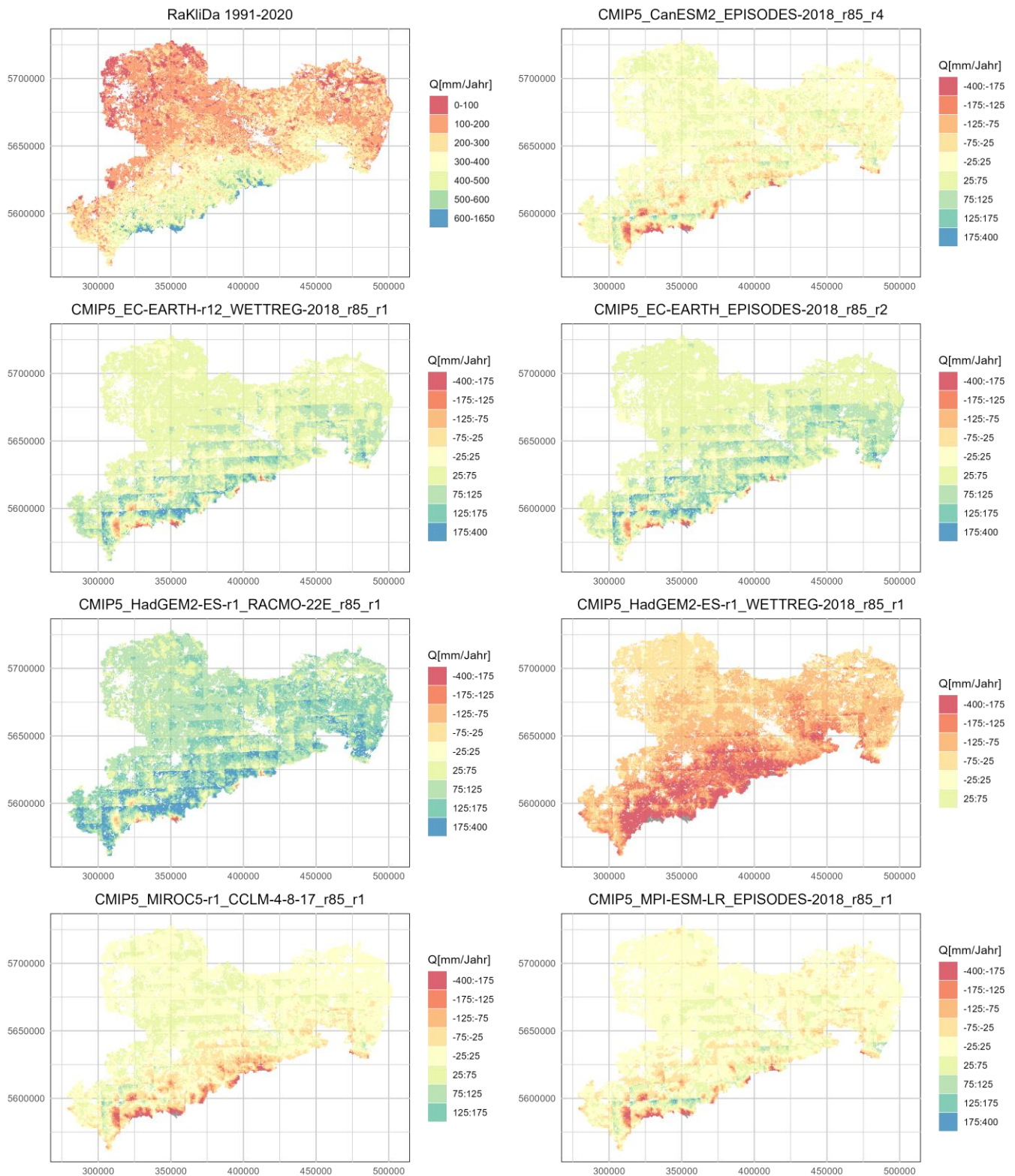


Abbildung A 48: Mittlerer jährlicher Abfluss für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.

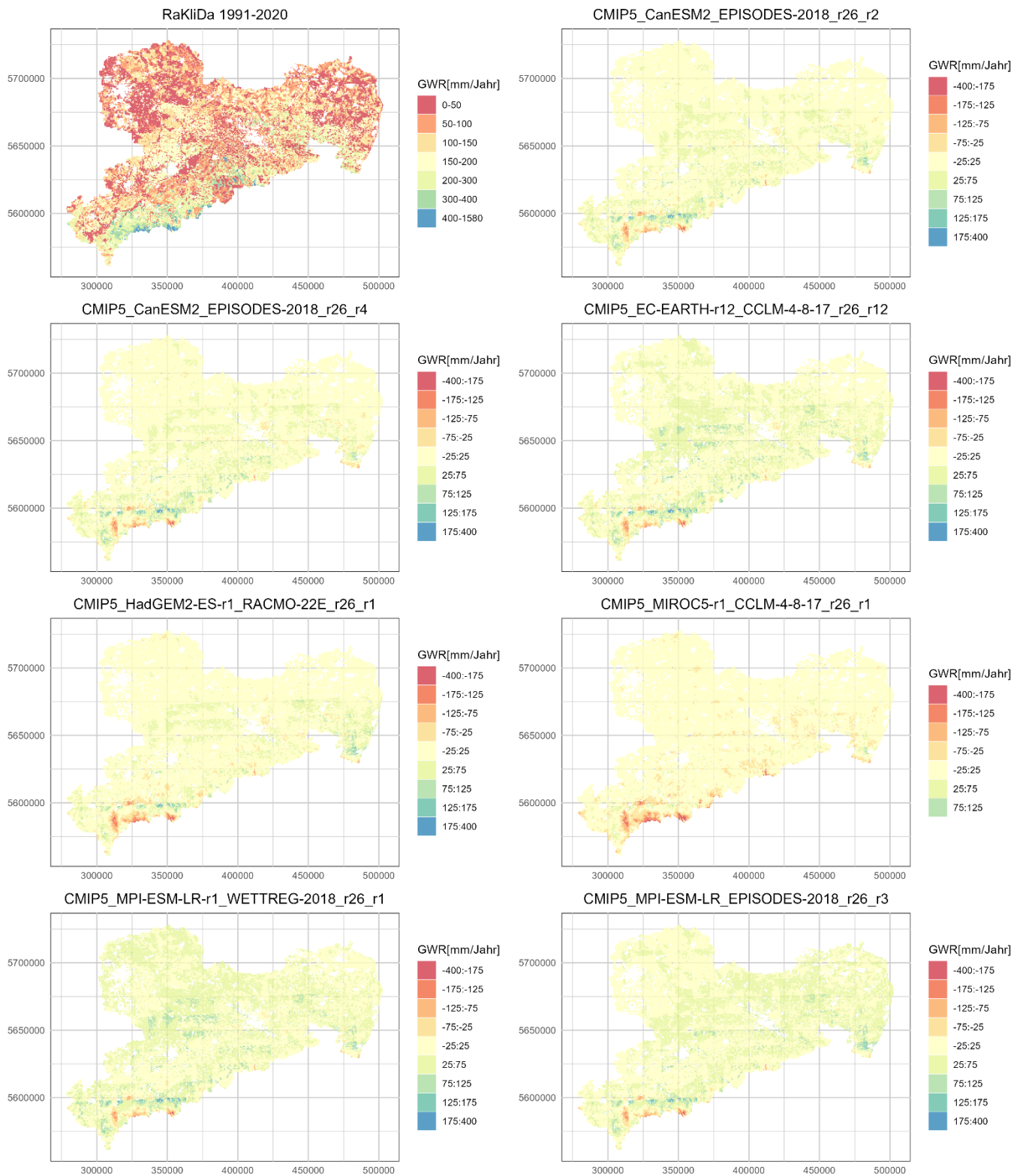


Abbildung A 49: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 2.6-Szenario.

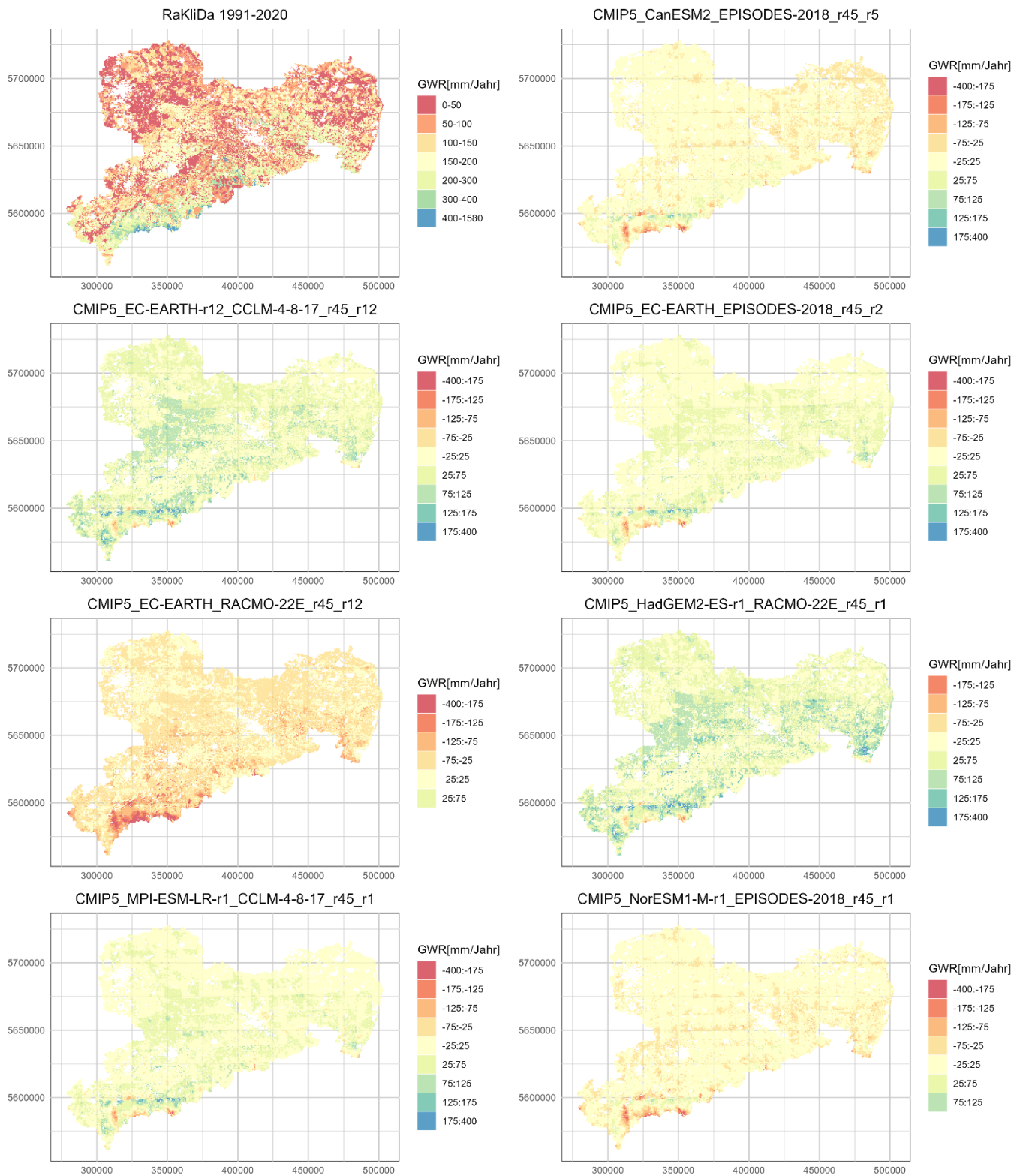


Abbildung A 50: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 4.5-Szenario.

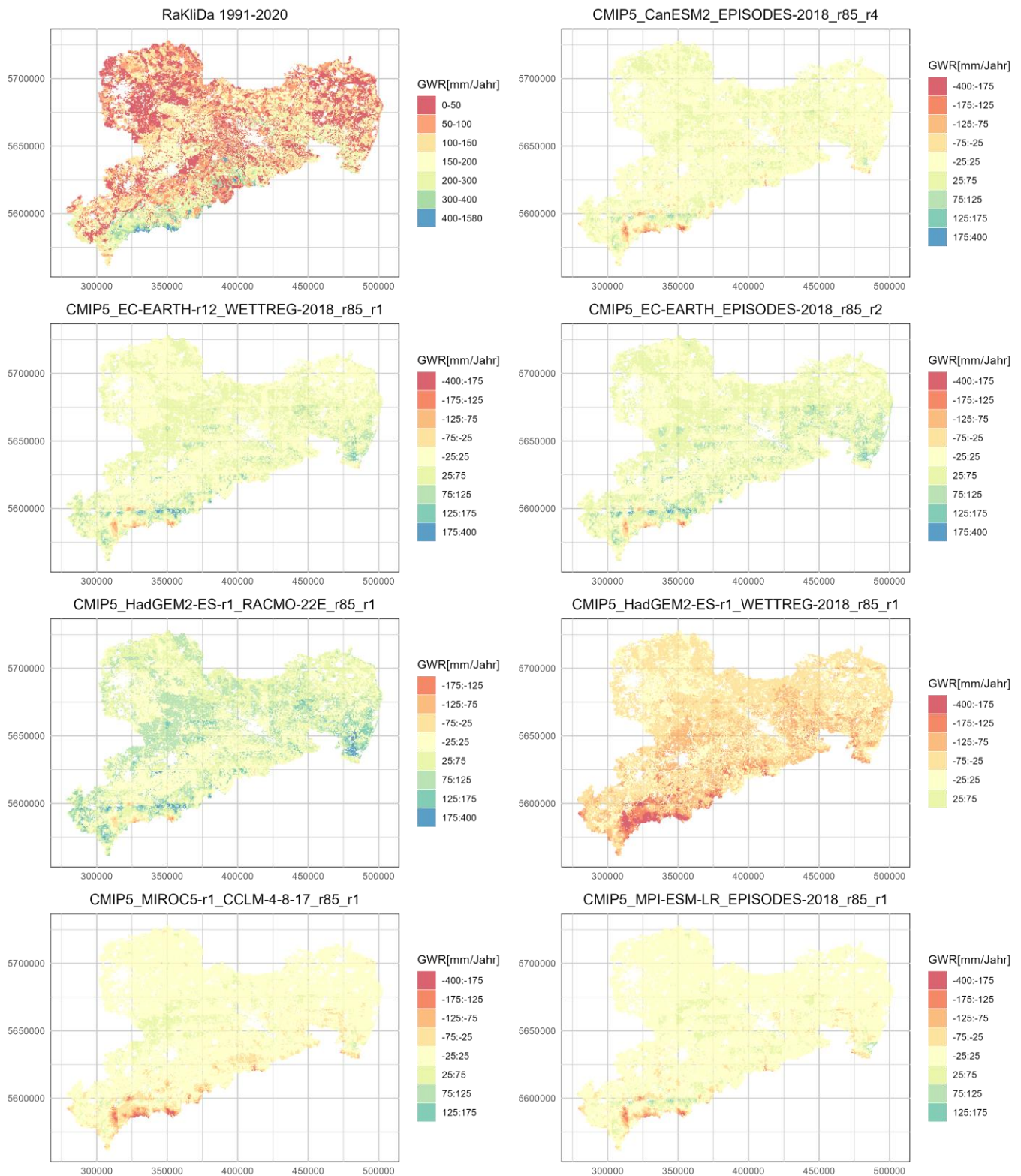


Abbildung A 51: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die historische Periode (1991-2020) und Anomalien der verschiedenen zukünftigen Klimaprojektionen (2071-2100) im RCP 8.5-Szenario.

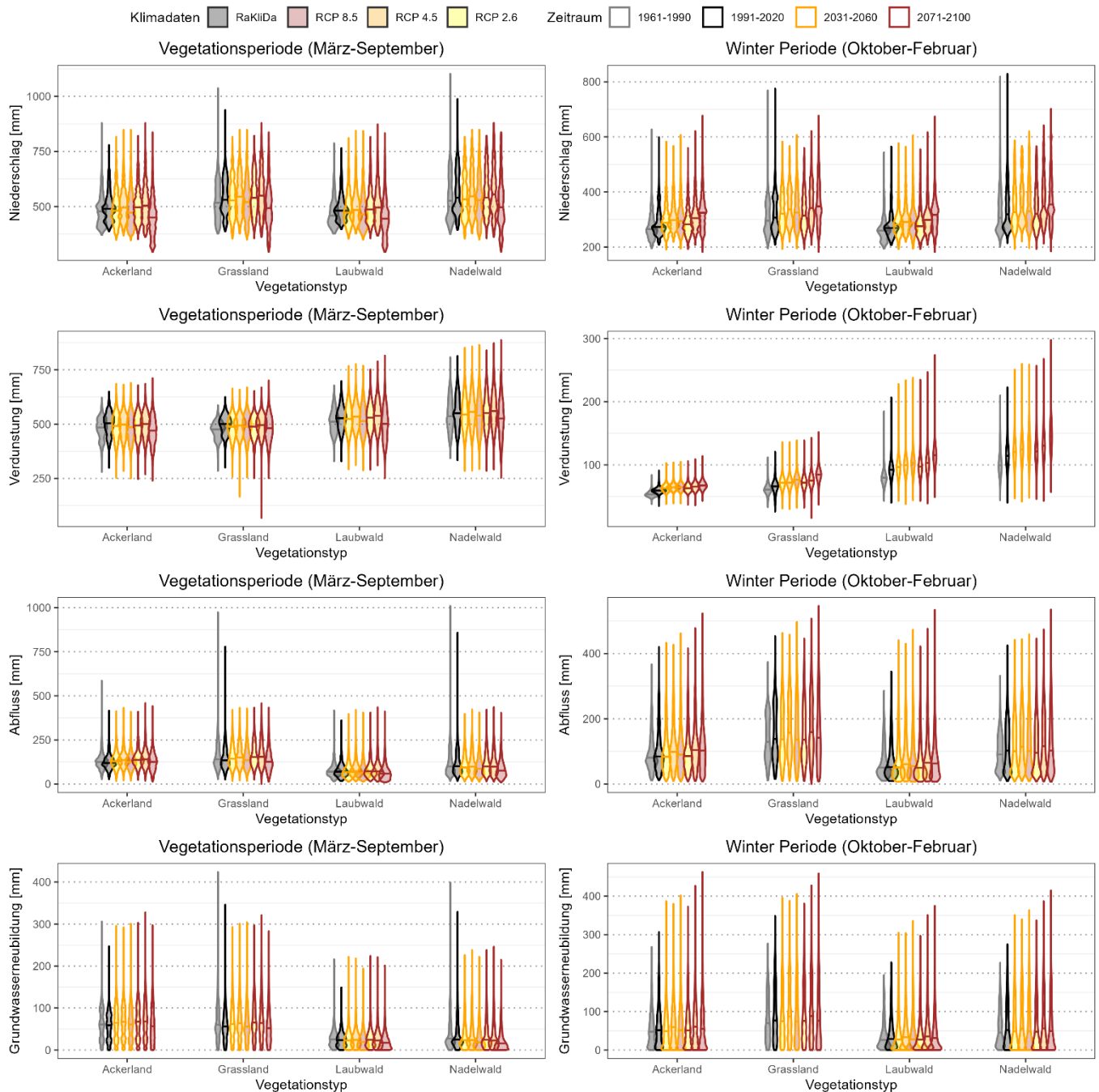


Abbildung A 52: Mittlere jährliche Wasserbilanz für natürliche Landnutzungsarten, zusammengefasst aus allen Gitterpunkten für das historische und zukünftige Klima. Daten für Klimaprojektionen für verschiedene RCP-Szenarien wurden nicht ermittelt.

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: Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

Autoren

Corina Hauffe, Clara Brandes, Robert Mietrach, Sofie Pahner, Dr.
Thomas Wöhling, Patric Röhm, Chris Burschky, Dr. Rico Kronenberg,
Dr. Ivan Vorobevskii, Prof. Dr. Niels Schütze

Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden

Bergstraße 66, 01069 Dresden

Telefon: +49 351 463-33931

E-Mail: hydrologie@tu-dresden.de

Redaktion

Udo Mellentin

Abteilung 4/Referat 43 Sächsisches Landesamt für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: +49 351 8928 – 4309, Telefax: +49 351 8928 - 4099

E-Mail: Udo.Mellentin@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis

Die Hintergrundbilder der Titelseite sind KI-generiert.

Redaktionsschluss

15.12.2025

ISSN

1867-2868

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber
als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank
des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG
(Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht
zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer
Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der
Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de