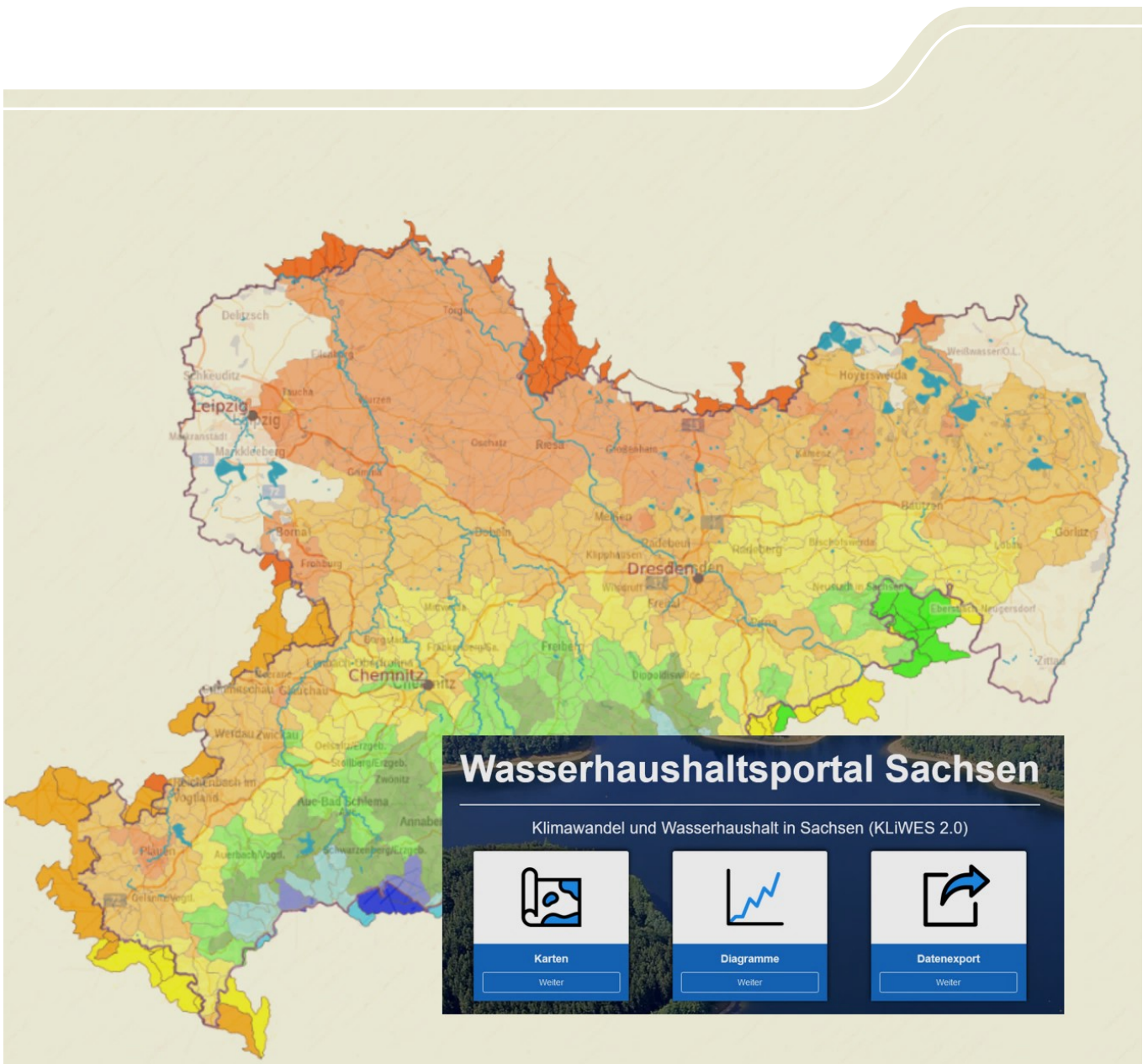


KIiWES 2.0 – Klimawandel und Wasserhaushalt

Schriftenreihe, Heft 17/2022



Methodikoptimierung der
Wasserhaushaltsmodellierung,
Fortschreibung von Modelleingangsdaten,
sachsenweite
Wasserhaushaltsmodellierung für
Ist-Zustand und Szenarien sowie
Weiterentwicklung der
KliWES-Internetanwendung
im Wasserhaushaltsportal Sachsen

Corina Hauffe, Sofie Pahner, Patric Röhm, Dr. Bernd Pfützner, Dr. Beate Klöcking, Dr. Silke Mey,
Dr. Michael Gebel, Mario Uhlig, Stephan Bürger, Dr. Stefan Halbfaß, Dr. Michael Wagner,
Dr. Thomas Wöhling, Dr. Robert Schwarze, Carolin Rehse



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



Inhalt

1	Zielstellung	12
2	Aufbereitung von Datengrundlagen	13
2.1	Aufbereitung benötigter Geodatengrundlagen	13
2.1.1	Fließgewässernetz	13
2.1.2	Boden.....	14
2.1.3	Landnutzung.....	17
2.1.4	Geologie.....	18
2.1.5	Anschlussgrad	18
2.1.6	Kanalisationsart	21
2.1.7	Drainagen.....	23
2.1.8	Digitales Geländemodell.....	24
2.1.9	Grundwasserflurabstände.....	24
2.1.10	Teileinzugsgebiete.....	26
2.2	Aufbereitung der meteorologischen und hydrologischen Datengrundlagen.....	26
2.2.1	Referenzdatensatz	26
2.2.2	Statistisches Nebelmodell.....	27
2.2.3	Korrektur des Nebelniederschlags.....	31
2.2.4	Klimaprojektionen	35
2.2.5	Meteorologischer Eingangsdatensatz zur Simulation der Trockenjahre 2018 und 2019	38
2.2.6	Durchflussdaten.....	45
2.3	DIFGA-Analysen.....	45
2.4	Festlegung Bearbeitungsraum.....	46
3	Hydrotopbildung und Modellaufbau	49
3.1	Übertragung von weiteren Gebietseigenschaften auf die Hydrotope	53
3.2	Parametrisierung des Auenmodells	54
3.3	Nutzung des Vegetationsmoduls VEGEN	57
3.3.1	Modellkonzept des Vegetationsmoduls VEGEN	57
3.3.2	Eingangsdaten für das Vegetationsmodell VEGEN	57
3.3.3	Ableitung regionstypischer Fruchtfolgen für Sachsen	60
3.3.4	Verortung der Fruchtfolgen im KliWES-Modell.....	65
3.3.5	Regionsspezifische Ableitung der VEGEN-Parameter	66
3.4	Untergliederung des Bearbeitungsraums in Modellregionen.....	69
4	Wasserhaushaltsberechnungen	73
4.1	Optimierungsstrategie	73
4.1.1	Allgemeines Vorgehen.....	73
4.1.2	Verfahren zur Auswertung der Optimierung.....	77
4.2	Ergebnisse der Optimierung	78
4.2.1	Ergebnisse im gesamten KliWES-Projektraum	78
4.2.2	Ergebnisse für ausgewählte Modellregionen	86
4.2.3	Ergebnisse für den Optimierungszeitraum 1961 bis 1987	101

5	Wasserhaushaltsergebnisse	106
5.1	Auswertung von Ergebnissen der Klimaprojektionen im gesamten Untersuchungsraum	106
5.2	Auswertung von Ergebnissen für die Trockenjahre 2018 und 2019	116
5.3	Diskussion von Unsicherheiten und Defiziten	124
6	Wasserhaushaltsportal Sachsen.....	129
6.1	Zielstellung	129
6.2	Datengrundlagen und -prozessierungen.....	130
6.2.1	Datenübergabeformat.....	130
6.2.2	Übergebene Dateninhalte aus der ArcEGMO-Modellierung.....	130
6.2.3	Übergebene Dateninhalte aus der DIFGA-Modellierung	132
6.2.4	Prozessierung der ArcEGMO-Hydrotopdaten und DIFGA-Daten.....	133
6.3	Softwareentwicklung.....	135
6.3.1	Konzeptionelle Vorüberlegungen.....	135
6.3.2	Bereitstellung von Test- und Produktivumgebung.....	135
6.3.3	Datenhaltung	136
6.3.4	Erstellung der Webanwendung.....	136
6.3.5	Startseite	137
6.3.6	Modul Karten	138
6.3.7	Modul Diagramme	140
6.3.8	Modul Datenexport	140
7	Zusammenfassung.....	142
8	Literatur.....	144

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anschlussgrad an die öffentliche Kanalisation im Freistaat Sachsen 2016 nach Gemeinden	19
Abbildung 2: Entwicklung der Anschlussgrade an die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sowie Trinkwasserdurchschnittsverbrauch nach NUTS2-Regionen (Ausschnitt)	20
Abbildung 3: Entwicklung der öffentlichen Abwasserentsorgung (Ausschnitt).....	20
Abbildung 4: Entwicklung der öffentlichen Abwasserentsorgung (Ausschnitt).....	22
Abbildung 5: Öffentliche Kanalisation 2016 nach Kreisfreien Städten und Landkreisen (Aufteilung in Misch- und Trennkanalisation in km)	23
Abbildung 6: Aus den Bodenprofilen abgeleitete Grundwasserflurabstandsklassen	25
Abbildung 7: Tagesdaten von relativer Feuchte und e_{iwc}/e_s für Novembertage von 1967-1970 und die Höhenschicht von 600 bis 800 mNHN	28
Abbildung 8: Funktionale Zusammenhänge von e_{iwc}/e_s von rH (relativer Feuchte) für den Zeitraum 1967-1986. Es wird unterschieden zwischen Monaten und Höhenschichten.	29
Abbildung 9: Funktionale Zusammenhänge von e_{iwc}/e_s von rH (relativer Feuchte) für den Zeitraum 1995-2014. Es wird unterschieden zwischen Monaten und Höhenschichten.	30
Abbildung 10: Mittlere Jahressumme des Nebelniederschlags sowie Maximale Tagessumme des Nebelniederschlags.....	31
Abbildung 11: Gegenüberstellung von ermittelten Reduktionsfaktoren (Nebelniederschlag) und mittlerer Gebietshöhe für sieben Datenpunkte	33
Abbildung 12: Vergleich der mittleren Niederschläge , mittleren Niederschläge + Nebelinput sowie mittleren Niederschläge + reduziertem Nebelinput in Abhängigkeit von der Höhe	33
Abbildung 13: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags (1961-2015) inklusive Nebel im Ausgangszustand.....	34
Abbildung 14: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags (1961-2015) inklusive angepasstem Nebel	34
Abbildung 15: Differenz der mittleren unveränderten Nebelniederschläge (1961-2015) abzüglich der angepassten mittleren Nebelwerte in ihrer räumlichen Verteilung.....	35
Abbildung 16: Entwicklung des projizierten Niederschlags der Klimarealisierungen als 20jähriges gleitendes Mittel in Sachsen und Gegenüberstellung mit den Beobachtungsdaten (Quelle: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltportal Sachsen).....	37
Abbildung 17: Entwicklung der projizierten mittleren Temperatur der Klimarealisierungen als 20jähriges gleitendes Mittel in Sachsen und Gegenüberstellung mit den Beobachtungsdaten.....	37
Abbildung 18: Übersichtskarte zur Lage von Klima- und Niederschlagsstationen in Sachsen sowie vier Testeinzugsgebieten für die Modellierung der Trockenjahre von 2018 – 2020	39
Abbildung 19: Gegenüberstellung des monatlichen Gebietsniederschlags von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS) und dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Jänkendorf 1	40
Abbildung 20: Gegenüberstellung des Gebietsniederschlags von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS) und dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Merzdorf...41	
Abbildung 21: Räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags der Jahre 2017, 2018 und 2019 basierend auf dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Jänkendorf 1	42
Abbildung 22: Gegenüberstellung der räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags 2010 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS) und dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Jänkendorf 1	42

Abbildung 23: Gegenüberstellung des Gebietsniederschlags von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS) und dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Markersbach 1	43
Abbildung 24: Gegenüberstellung der räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags 2010 basierend auf dem Referenzdatensatz und dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Markersbach 1	44
Abbildung 25: Räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags der Jahre 2017, 2018 und 2019 basierend auf dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Markersbach 1	44
Abbildung 26: Karte zum bisherigen Bearbeitungsraum im Projekt KliWES und der Landesgrenze Sachsens.....	47
Abbildung 27: Karte zum aktualisierten KliWES-2.0- Bearbeitungsraum, weiteren Projektbereichen (gelbe Fläche (NEYMO-NW); braune Fläche (Großraum Leipzig)) und der Landesgrenze Sachsens	47
Abbildung 28: Ausschnitt aus dem Testgebiet Schönau (südlicher Teil) mit Überlagerung der aktuellen Bodenkarte BK50 und der bisherigen Hydrotopstruktur auf Basis der BKKonz	49
Abbildung 29: Abhängigkeit der Rechenzeit von ArcEGMO (hier für 45 Simulationsjahre) und der Anzahl der Hydrotope bei verschiedenen Mindestgrößen (entnommen aus Schwarze et al., 2012).....	51
Abbildung 30: Lage des Beispielgebiets und der übergebenen Hydrotope	53
Abbildung 31: Selektion des Stadtgebiets Dresden , Versiegelung Dresdens	54
Abbildung 32: Vergleich der GWN mit und ohne reduzierten Kapillaraufstieg.....	55
Abbildung 33: Differenz der berechneten GWN mit und ohne reduzierten Kapillaraufstieg.....	56
Abbildung 34: Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete und Dauertestflächen Sachsens	61
Abbildung 35: Zuordnung der Hydrotope zu den Landwirtschaftlichen Vergleichsgebieten LVG	65
Abbildung 36: VEGEN-spezifische Einträge in der Hydrotopkarte und Ansteuerung durch pscn.ste	66
Abbildung 37: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte im LVG 8 1981-2015.....	67
Abbildung 38: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Winterweizen mit Stichprobenumfang	67
Abbildung 39: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Wintergerste mit Stichprobenumfang	68
Abbildung 40: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Winterraps mit Stichprobenumfang	68
Abbildung 41: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Silomais mit Stichprobenumfang.....	68
Abbildung 42: Hydrotopkarte KliWES mit Ertragspotenzial in Abhängigkeit von der Bodenwertzahl	69
Abbildung 43: Übersichtskarte der 189 Modellregionen im derzeitigen KliWES-Fortschreibungs-Projekt.....	70
Abbildung 44: Übersichtskarte der Hierarchieebenen der 189 Modellregionen	71
Abbildung 45: Übersichtskarte der 106 Modellregionen mit DIFGA-Ergebnis sowie 83 Modellregionen ohne DIFGA-Ergebnis.....	72
Abbildung 46: Anzahl Modellregionen (mit DIFGA-Ergebnis) mit größtem Flächenanteil in Landnutzungsklasse und minimale/maximale mittlere prozentuale Restglied-Abweichung (2000-2015, unkalibriertes Modell), ohne Veränderung der Verdunstungskorrektur-Faktoren	74
Abbildung 47: Anzahl Modellregionen (mit DIFGA-Ergebnis) mit größtem Flächenanteil in Landnutzungsklasse und minimale/maximale mittlere prozentuale Restglied-Abweichung (2000-2015, unkalibriertes Modell), mit Erhöhung der Verdunstungskorrektur-Faktoren für Grünland, Heide und Nadelwald	75

Abbildung 48: Übersichtskarte der 177 Modellregionen mit Optimierung und der 12 Modellregionen ohne Optimierung – aufgrund fehlender Durchflussdaten bzw. zu spät gelieferter Durchflussdaten sowie der verwendeten Pegel	76
Abbildung 49: Auswertung des mittleren prozentualen Volumenfehlers des simulierten täglichen Durchflusses (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als Volume-Score Q	79
Abbildung 50: Auswertung des mittleren prozentualen Volumenfehlers des simulierten Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als Volume-Score QG1 für 106 Modellregionen mit DIFGA-Ergebnis.....	80
Abbildung 51: Auswertung des mittleren prozentualen Volumenfehlers des simulierten Restgliedes (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als Volume-Score REST für 106 Modellregionen mit DIFGA-Ergebnis.....	81
Abbildung 52: Volume-Score-Werte je Vergleichsgröße und Modellregion (mit DIFGA-Ergebnis) für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015	82
Abbildung 53: Auswertung der Nash-Sutcliffe Effizienz des simulierten täglichen Durchflusses (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als NSE-Score logQ für 181 Modellregionen	83
Abbildung 54: NSE-Score-Werte je Vergleichsgröße und Modellregion (mit DIFGA-Ergebnis) für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015	84
Abbildung 55: Integrale Bewertung der Anpassung (Volume-Score gesamt und NSE-Score gesamt) des optimierten Modells im Vergleich zum Ausgangszustand für den Zeitraum 2000 bis 2015.....	86
Abbildung 56: Lage der ausgewählten Modellregionen für die Detailanalyse der Optimierung	87
Abbildung 57: Anzahl der Regionen mit DIFGA-Ergebnis und ausschließlich verbesserter Anpassung des Durchflusses Q, des Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 bzw. verbesserter Anpassung beider oder keiner Größe – aufgeschlüsselt für den Volume-Score sowie den NSE-Score	88
Abbildung 58: Anpassung der simulierten Ganglinien an die DIFGA-Ergebnisse für den Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 und das Restglied im Zeitraum 2000 bis 2015 als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1	89
Abbildung 59: Vergleich der beobachteten Ganglinie des Pegels Niedermülsen 1 mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation und nach der Optimierung sowie das Niederschlagsgebietsmittel des Referenzdatensatzes für den Zeitraum 2000 bis 2015	91
Abbildung 60: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses des Pegels Niedermülsen 1 mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015.....	92
Abbildung 61: Anpassung der simulierten Ganglinien an die DIFGA-Ergebnisse für den Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 und das Restglied im Zeitraum 2000 bis 2015 als Gebietssumme der Region 80 mit Pegel Königsbrück	93
Abbildung 62: Vergleich der beobachteten Ganglinie des Pegels Königsbrück mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation und nach der Optimierung sowie das Niederschlagsgebietsmittel des Referenzdatensatzes für den Zeitraum 2000 bis 2015...	95
Abbildung 63: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses des Pegels Königsbrück mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015	96
Abbildung 64: Anzahl der Regionen ohne DIFGA-Ergebnis und verbesserter Anpassung des Durchflusses Q bzw. ohne Verbesserung – aufgeschlüsselt für den Volume-Score sowie den NSE-Score.....	96

Abbildung 65: Vergleich der beobachteten Ganglinie des Pegels Neundorf mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015	97
Abbildung 66: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses des Pegels Neundorf mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015	98
Abbildung 67: Vergleich der beobachteten Ganglinie des Pegels Langenleuba (Leubabach) mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015	99
Abbildung 68: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses des Pegels Langenleuba (Leubabach) mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015	100
Abbildung 69: Vergleich der beobachteten Ganglinie des Pegels Niedermülsen 1 mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015 bzw. 1961 bis 1987 sowie das Niederschlagsgebietsmittel des Referenzdatensatzes für den Zeitraum 2000 bis 2015	102
Abbildung 70: Anpassung der simulierten Ganglinien an die DIFGA-Ergebnisse für den Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 im Zeitraum 2000 bis 2015 als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1	103
Abbildung 71: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses des Pegels Niedermülsen 1 mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation und nach der Optimierung bzgl. 2000 bis 2015 bzw. 1961 bis 1987 für den Zeitraum 2000 bis 2015	104
Abbildung 72: Entwicklung der projizierten potentiellen Verdunstung als 20jähriges gleitendes Mittel unter Einfluss der ausgewählten Klimarealisierungen in Sachsen.....	106
Abbildung 73: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (= projizierter Niederschlag minus projizierter potentieller Verdunstung) der ausgewählten Klimarealisierungen als 20jähriges gleitendes Mittel für Sachsen.....	107
Abbildung 74: Karten der projizierten klimatischen Wasserbilanz als langjährige Mittelwerte in den sächsischen Einzugsgebieten basierend auf dem RCP-8.5_1-Szenario	108
Abbildung 75: Entwicklung der projizierten realen Verdunstung als 20jähriges gleitendes Mittel unter Einfluss der ausgewählten Klimarealisierungen in Sachsen.....	109
Abbildung 76: Karten der simulierten realen Verdunstung als langjährige Mittelwerte in den sächsischen Einzugsgebieten basierend auf dem RCP-8.5_2-Szenario (Quelle Karten: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal)	110
Abbildung 77: Entwicklung des projizierten langsamen Grundwasserabflusses als 20jähriges gleitendes Mittel unter Einfluss der ausgewählten Klimarealisierungen in Sachsen (Quelle: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen).....	111
Abbildung 78: Karten des simulierten Gesamtabflusses als langjährige Mittelwerte (1961-1987, 1988-2014, 2021-2050 und 2071-2100) in den sächsischen Einzugsgebieten basierend auf dem RCP-8.5_2-Szenario (Quelle Karten: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal)	112
Abbildung 79: Tabellenauszug zur Darstellung von mittleren jährlichen prozentualen Änderungen verschiedener Klima- und Wasserhaushaltsgrößen für 10jährige Zeitscheiben gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961-1990 am Beispiel der Klimarealisierung A1B_1	113
Abbildung 80: Darstellung zur zeitlichen Entwicklung der minimalen Abflüsse aus dem langsamen Grundwasserspeicher für den Ist-Zustand (1961-2015) und die acht ausgewählten Klimarealisierungen (1961-2100).....	114

Abbildung 81: Darstellung zur zeitlichen Entwicklung der maximalen Abflüsse aus dem langsamen Grundwasserspeicher für den Ist-Zustand (1961-2015) und die acht ausgewählten Klimarealisierungen (1961-2100).....	115
Abbildung 82: Räumliche Verteilung der potentiellen Verdunstung in den Jahren 2017, 2018 und 2019 im Einzugsgebiet Schönau.....	116
Abbildung 83: Räumliche Verteilung der realen Verdunstung in den Jahren 2017, 2018 und 2019 im Einzugsgebiet Schönau	117
Abbildung 84: Differenzkarten der jährlichen realen Verdunstung (REKIS-Datensatz) von 2017, 2018 und 2019 jeweils gegenüber dem Mittelwert 2010-2015 der jährlichen realen Verdunstung aus dem Referenzdatensatz für das Einzugsgebiet Schönau	119
Abbildung 85: Gegenüberstellung der realen Verdunstung von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Markersbach 1.....	120
Abbildung 86: Gegenüberstellung des langsamen Grundwasserabflusses von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS) und dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Schönau	121
Abbildung 87: Räumliche Verteilung des langsamen Grundwasserabflusses in den Jahren 2017, 2018 und 2019 im Einzugsgebiet Schönau.....	122
Abbildung 88: Entwicklung des langsamen Grundwasserabflusses [mm/a] im Zeitraum 2010-2019 (basierend auf den Werten des REKIS-Datensatzes) in den Einzugsgebieten Schönau, Jänkendorf 1 und Merzdorf	123
Abbildung 89: Gegenüberstellung des langsamen Grundwasserabflusses von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz (rote Linie) für das Einzugsgebiet Markersbach 1	124
Abbildung 90: Ansicht der Startseite (Home) der neuen KliWES-Webanwendung	137
Abbildung 91: Ansicht des Moduls "Karten".....	139
Abbildung 92: Ansicht des Moduls "Diagramme".....	140
Abbildung 93: Ansicht des Moduls "Datenexport".....	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erforderliche Bodenparameter aus der vorhandenen Datengrundlage.....	14
Tabelle 2:	Übersetzungstabelle Trockenrohdichtestufen in Lagerungsdichtestufen in Abhängigkeit von der Bodenart	15
Tabelle 3:	Definition der Flurabstandsklassen	25
Tabelle 4:	Liste der acht im KliWES-Projekt verwendeten Klimarealisierungen	36
Tabelle 5:	Anzahl und mittlere Größe der Hydrotöpfe im Testgebiet Schönau in Abhängigkeit verschiedener Mindestgrößen, Vergleich von bisheriger und neuer Hydrotopfstruktur	51
Tabelle 6:	Geschätzte Anzahl der Hydrotöpfe für den Bearbeitungsraum (ca. 17.600 km ²) in Abhängigkeit verschiedener Mindestgrößen, Vergleich von bisheriger und neuer Hydrotopfstruktur	52
Tabelle 7:	Bodenparameter für PSCN, o/f: obligatorisch/fakultativ.....	58
Tabelle 8:	Ertragspotenzial EP in Abhängigkeit von der Bodenwertzahl BZ.....	59
Tabelle 9:	Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete LVG mit Anzahl der dort liegenden Dauertestflächen (n DTF) und zugeordneter Ackerfläche des KliWES-Modells.....	60
Tabelle 10:	Zusammenfassung der Fruchtarten zu Fruchtgruppen (FG), Kodierung laut BESyD	62
Tabelle 11:	Integration von Zwischenfrüchten (ZF) in die n-gliedrigen Fruchtfolgen (FF) pro LVG.....	62
Tabelle 12:	Anteil der angebauten Fruchtarten auf den DTF in den LVG (2000-2018)	63
Tabelle 13:	Anbaujahre pro Fruchtart und LVG in n-gliedriger Fruchtfolge	63
Tabelle 14:	Fruchtfolgen für die 12 LVG Sachsens.....	64
Tabelle 15:	Einteilung des mittleren prozentualen Volumenfehlers sowie der NSE in Klassen und Zuordnung eines Score-Wertes	77
Tabelle 16:	Übersicht der Score-Werte je Vergleichsgröße für Regionen mit bzw. ohne DIFGA-Ergebnis.....	78
Tabelle 17:	Anzahl der Modellregionen je Volume-Score-Wert für die Vergleichsgrößen Q, QG1 und REST sowie prozentualer Anteil bezogen auf die Gesamtzahl der Regionen für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015.....	81
Tabelle 18:	Anzahl der Modellregionen je NSE-Score-Wert für die Vergleichsgrößen Q, QG1 und REST sowie prozentualer Anteil bezogen auf die Gesamtzahl der Regionen für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015.....	83
Tabelle 19:	Anzahl der Modellregionen mit verbesserter, unveränderter und teilweise schlechterer Anpassung des optimierten Modells im Vergleich zum Ausgangszustand für den Zeitraum 2000 bis 2015	85
Tabelle 20:	Eigenschaften der ausgewählten Modellregionen für die Detailanalyse der Optimierung	86
Tabelle 21:	Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung der simulierten QG1- bzw. Restglied-Werte (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich der monatlichen Vergleichswerte aus DIFGA als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1	90
Tabelle 22:	Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Niedermülsen 1 (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)	90
Tabelle 23:	Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung der simulierten QG1- bzw. Restglied-Werte (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich der monatlichen Vergleichswerte aus DIFGA als Gebietssumme der Region 80 mit Pegel Königsbrück	94

Tabelle 24: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Königsbrück (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)	94
Tabelle 25: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Neundorf (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)	98
Tabelle 26: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Langenleuba (Leubabach) (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)	100
Tabelle 27: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung bzgl. Zeitraum 2000 bis 2015 bzw. 1961 bis 1987) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Niedermülsen 1 (Berechnung NSE für log. Durchfluss)	101
Tabelle 28: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher (Ausgangssituation und nach Optimierung bzgl. Zeitraum 2000 bis 2015 bzw. 1961 bis 1987) hinsichtlich der monatlichen Vergleichswerte aus DIFGA als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1	101
Tabelle 29: Entwicklung der potentiellen Verdunstung ETP [mm/a] im Zeitraum 1986-2015 (basierend auf den Werten des Referenzdatensatzes) anhand von 10jährigen Mittelwerten in den Einzugsgebieten Schönau, Merzdorf, Jänkendorf 1 und Markersbach 1	118
Tabelle 30: Entwicklung der realen Verdunstung ETR [mm/a] im Zeitraum 1986-2015 (basierend auf den Werten des Referenzdatensatzes) anhand von 10jährigen Mittelwerten in den Einzugsgebieten Schönau, Merzdorf, Jänkendorf 1 und Markersbach 1	118
Tabelle 31: Entwicklung des langsamen Grundwasserabflusses [mm/a] im Zeitraum 1986-2015 (basierend auf den Werten des Referenzdatensatzes) anhand von 10jährigen Mittelwerten in den Einzugsgebieten Schönau, Merzdorf, Jänkendorf 1 und Markersbach 1	122
Tabelle 32: Zuordnung der Hydrotope zu Fest- bzw. Lockergesteinsbereich anhand der Lithofazieseinheit	131

1 Zielstellung

Das vom LfULG beauftragte Projekt Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen (-KliWES-) befasst sich seit 2008 mit der Abbildung des Wasserhaushaltes in den sächsischen Einzugsgebieten und dem Einfluss des Klimawandels auf die verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen (Verdunstung, Grundwasserabfluss etc.).

Ziel des Vorhabens ist es, eine sukzessive Verbesserung der bisherigen landesweiten Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist- Zustand (1961 - 2010) sowie für verschiedene Klimaszenarien (1961 - 2100) zu erreichen. Hierfür sind regelmäßige Anpassungen und Weiterentwicklungen des KliWES-Projekts notwendig. Das betrifft z.B. die Aktualisierung und Fortschreibung der Zeitreihen des Wasserhaushaltes, die Aktualisierung verwendeter Klimaszenarien sowie die Berücksichtigung von Nebelniederschlägen. Außerdem sind inhaltliche Weiterentwicklungen erforderlich, die u.a. aus der Verfügbarkeit neuer Geodaten (z.B. Bodenkarte 1: 50.000) rühren.

Die im Resultat der bisherigen Arbeiten festgestellten suboptimalen Abbildungen einiger Prozesse (z.B. adaptive Anpassung von Grundwasserstand und Vegetation an zukünftig zu erwartende Klimaentwicklungen) in den bisher verwendeten Wasserhaushaltsmodellen erforderten eine Weiterentwicklung bzw. einen teilweisen Austausch der bisher genutzten Modellbausteine. Zusätzlich sollten die bisherigen IT-Lösungen für die KliWES-Webanwendungs-Module im „Wasserhaushaltsportal Sachsen“ inhaltlich und funktional überarbeitet und an aktuelle Entwicklungen hinsichtlich der Hard- und Software sowie an die Bedürfnisse der Nutzer neu angepasst werden, um das Portal zukunftsfähig zu halten.

Der vorliegende Bericht umfasst die Arbeiten von August 2019 bis April 2021. Nachfolgend wird auf die Aufbereitung der erforderlichen aktuellen Datengrundlagen (Kapitel 2), die Hydrotopbildung und den Modellaufbau (Kapitel 3) sowie die Durchführung der Optimierungsstrategie und der Wasserhaushaltsberechnungen mit dem Modell ArcEGMO (Kapitel 4) eingegangen. In den sich anschließenden Abschnitten werden Auswertungen anhand ausgewählter Beispiele der berechneten Wasserhaushaltsergebnisse (Kapitel 5) gezeigt sowie die Umsetzung der zukünftigen KliWES-Webanwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen (Kapitel 6) beschrieben. Eine Zusammenfassung schließt den Bericht ab (Kapitel 7).

2 Aufbereitung von Datengrundlagen

Die Datengrundlagen der bestehenden Wasserhaushaltsmodelle haben im Allgemeinen einen Bearbeitungsstand der Jahre 2008 bis 2013. Aufgrund der zahlreichen und umfangreichen Datennachführungen seit 2013 durch das LfULG wurde im Rahmen der sachsenweiten Wasserhaushaltsmodellierungen eine Aktualisierung notwendig. Dies betrifft die Geodatenbasis, die meteorologischen Daten für Ist-Zustand und Klimaprojektionen sowie die Durchflussdaten repräsentativer Pegel, welche zur Kalibrierung bzw. Validierung der Modellergebnisse benötigt werden. Die projektbezogene Aufbereitung der Daten wird in den Kapiteln 2.1 und 2.2 erläutert.

Für den Aufbau des Datenmodells wurden folgende Geodaten benötigt:

- Fließgewässernetz
- Landnutzung
- Boden
- Anschlussgrad
- Kanalisationsart (Misch- oder Trennkanalisation)
- Drainagen (inkl. Drainagetyp, Anteil drainierte Fläche, Drainagetiefe)
- Geologie (zur Ableitung der Lithofaziesseinheit)
- digitales Geländemodell (für die Parameter Geländehöhe, Gefälle, Ausrichtung)
- Grundwasserflurabstände
- Teileinzugsgebietsstruktur

Erläuterungen zur Ausweisung des Bearbeitungsraumes, welcher sich im Vergleich zum bisherigen Projektstand verändert hat, finden sich in Kapitel 2.4.

2.1 Aufbereitung benötigter Geodatengrundlagen

2.1.1 Fließgewässernetz

Die Grundlage bildet das Fließgewässernetz Sachsens, welches im April 2019 vom LfULG bereitgestellt worden ist. Zunächst wurden vorhandene Fehler im Shape, die mithilfe einer Topologieprüfung identifiziert werden konnten, behoben.

Das KliWES-Modellgebiet erstreckt sich zum Teil über die Grenzen Sachsens. Die im Shape vorhandenen grenzüberschreitenden Fließgewässerdaten beschränken sich zumeist auf die Hauptgewässer. Zur Vervollständigung des Datensatzes und zur Vereinheitlichung der räumlichen Auflösung wurde das Fließgewässernetz durch Gewässerdaten der umliegenden Bundesländer (Bayern, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg) sowie Tschechiens ergänzt und an das Gewässernetz Sachsens angeknüpft.

Anschließend wurde das Fließgewässernetz dahingehend bearbeitet, dass keine „losen“ Fließgewässerstücke vorliegen. Betroffene Stellen wurden entweder an das Netz angebunden oder entfernt. Verzweigungen, Abzweigungen wurden insoweit bearbeitet, dass eindeutige Fließwege für die Modellstruktur entstehen. Dazu zählt auch, dass es nur einen Gebietsauslass pro Teileinzugsgebiet geben darf. Die Gebietsein- sowie Gebietsauslässe wurden bei Abweichungen an die Teileinzugsgebietsstruktur angepasst, denn nur sie dürfen und müssen die Teileinzugsgebietsgrenze schneiden. Jegliche Fließgewässerabschnitte, die die Teileinzugsgebietsgrenze berührten oder überschritten, wurden so verschoben oder ggf. auch verkürzt, dass sie ausschließlich innerhalb des betrachteten Teileinzugsgebiets liegen. Damit sind auch im Datensatz erfasste große Überleitungen entfernt worden. Eine explizite räumliche Erfassung von Überleitungen ist für die Modellierung nicht erforderlich, da nur Informationen über den Entnahme- bzw. Einleitungsort und die Überleitungsmengen berücksichtigt werden. Des Weiteren wurden die Fließwegrichtungen kontrolliert und bei fal-

scher Ausrichtung korrigiert. Abschließend erfolgte eine Zusammenfassung des Fließgewässernetzes, so dass letztlich nur an zwingend erforderlichen Stellen (Gebietsein- und Gebietsauslässe sowie Zusammenflüsse von Fließstrecken) Knotenpunkte vorliegen. Zum Schluss wurde diesen Knotenpunkten die jeweilige Geländehöhe aus dem DGM5 (s. Abschnitt 2.1.8) zugeordnet. Ausgehend davon konnte für die Fließgewässerabschnitte das Gefälle ermittelt werden.

2.1.2 Boden

Die Datengrundlage des Bodens bildet die digitale Bodenkarte Sachsens (BK50) im Maßstab 1 : 50 000, welche mit dem Stand April 2019 vom LfULG bereitgestellt wurde. Zusätzlich zur räumlichen Struktur der Böden erfolgte die Übergabe von Informationen zu Bodenhorizonten und -profilen sowie verschiedenen Bodenparametern (Stand Juli 2019). Nach anschließender Topologieprüfung, welche nur eine geringe Anzahl von Fehlern ergab, wurden diese behoben.

Im Weiteren war die Schließung von Datenlücken (nicht definierte Böden), die Ableitung weiterer Bodenkennwerte und die Anbindung von Flächen außerhalb Sachsens erforderlich.

Schließung von Datenlücken

Die BK50 enthält eine Reihe von Flächen, welchen kein Boden zugeordnet ist. Hierbei handelt es sich um schwer bzw. nicht eindeutig zu klassifizierende Böden, welche sich unterhalb von Gewässern, stark besiedelten Gebieten, anthropogen veränderten Bereichen (Tagebaureviere) und steilen Hanglagen (Uferböschungen) befinden. Da mit Ausnahme von Böden unter Gewässern für die sich anschließenden Wasserhaushaltsmodellierungen alle Flächen definiert sein müssen, war die Ergänzung fehlender Bodendefinitionen notwendig. Dies erfolgte mit Hilfe der Bodenübersichtskarte 1 : 200.000 (BÜK200), welche zwar eine deutlich gröbere Auflösung aufweist, dafür aber flächendeckend für Deutschland vorliegt. Sie war daher auch geeignet, um die nicht durch die BK50 abgedeckten Flächen außerhalb Sachsens zu ergänzen. Um die BÜK200 in die BK50 (auf allen nicht definierten Flächen) einbinden zu können, war eine „Übersetzung“ der vorhandenen Bodenmerkmale notwendig. Hierfür wurden die Leitböden und Begleitböden herangezogen.

Ableitung weiterer Bodenkennwerte

Die begleitend zur BK50 bereitgestellten Bodenparameter dienen der Parametrisierung des Wasserhaushaltsmodells (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Erforderliche Bodenparameter aus der vorhandenen Datengrundlage

Bezeichnung in der Datengrundlage	Bedeutung
LEG_NR	Legendennummer
HOR_NR	laufende Horizontnummer des Leitbodens
UTIEF	Untere Tiefe des Horizontes in Meter
MAE	Mächtigkeit des Horizontes in Meter
BOART	Feinbodenart, Torfart
Humus	Humusstufe
SKV	Skelettvolumen gesamt in Volumen-%
TRD_ST	Stufe Trockenrohdichte, Torfausprägung
Wp	Physisches Durchwurzelungspotenzial in dm
PF42%	Wassergehalt Feinboden bei pF 4,2 in Volumen-%
PF25%	Wassergehalt Feinboden bei pF 2,5 in Volumen-%
PF18%	Wassergehalt Feinboden bei pF 1,8 in Volumen-%
GPV%	Gesamtporenvolumen Feinboden in Volumen-%

Aus den gegebenen Parametern konnten die weiteren benötigten Parameter „Nutzbare Feldkapazität“ sowie „Luftkapazität“ nach den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\text{Nutzbare Feldkapazität (nFK)} = \text{PF25\%} - \text{PF42\%}$$

$$\text{Luftkapazität (LK)} = \text{GPV\%} - \text{PF18\%}$$

Aus der gegebenen Datengrundlage nicht direkt berechenbare erforderliche Parameter waren die Lagerungsdichte (LD) sowie die gesättigte Wasserleitfähigkeit (Kf) des Bodens. Die Ableitung dieser Parameter erfolgte unter Zuhilfenahme folgender Literatur:

- DWA Regelwerk (2016),
- Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (AD-HOC-AG Boden, 2005)
und
- der Studie von Müller & Waldeck (2011).

Das DWA-Regelwerk (2016, Tabelle 2) bietet eine Übertragung von mittleren Trockenrohdichten (TRD in g/cm³) in Lagerungsdichtestufen (LD-Stufe). Den im Datensatz verfügbaren Trockenrohdichtestufen (td1 bis td5) wurden daher zunächst die mittleren Trockenrohdichtewerte zugeordnet. Ergänzend zum DWA-Regelwerk wurde auch eine Umrechnungstabelle der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 verwendet, da nicht immer einer TRD-Stufe eine entsprechende LD-Stufe zugeordnet werden konnte. Dies traf auf die verschiedenen Sande zu. Für diese liegt im Datensatz der BK50 eine weitere Unterteilung in verschiedene TRD-Stufen vor, während die Umrechnungstabelle der KA5 (TRD-Stufen in LD-Stufen) nur über die Klasse Reinsand verfügt. Hier wurde allen Sanden die LD-Stufe von Reinsand zugordnet. Es ergab sich danach folgende Übersetzung (s. Tabelle 2):

Tabelle 2: Übersetzungstabelle Trockenrohdichtestufen in Lagerungsdichtestufen in Abhängigkeit von der Bodenart

Bodenart	Ld1	Ld2	Ld3	Ld4	Ld5
Ss	td1	td3	td4	td5	td5
Sl2	td1	td2	td4	td5	td5
Sl3	td1	td2	td3	td4	td5
Sl4	td1	td2	td3	td4	td5
Slu	td1	td2	td3	td4	td5
St2	td1	td2	td3	td4	td5
St3	td1	td2	td3	td4	td5
Su2	td1	td2	td4	td5	td5
Su3	td1	td2	td4	td5	td5
Su4	td1	td2	td3	td4	td5
Ls2	td1	td2	td3	td4	td5
Ls3	td1	td2	td3	td4	td5
Ls4	td1	td2	td3	td4	td5
Lt2	td1	td2	td3	td4	td5
Lt3	td1	td1	td3	td4	td4
Lts	td1	td2	td3	td4	td5
Lu	td1	td2	td3	td4	td5
Uu	td1	td2	td3	td4	td5
Uls	td1	td2	td3	td4	td5

Bodenart	Ld1	Ld2	Ld3	Ld4	Ld5
Us	td1	td2	td3	td4	td5
Ut2	td1	td2	td3	td4	td5
Ut3	td1	td2	td3	td4	td5
Ut4	td1	td2	td3	td4	td5
Tt	td1	td1	td2	td3	td4
Tl	td1	td1	td2	td3	td4
Tu2	td1	td1	td2	td3	td4
Tu3	td1	td1	td3	td4	td4
Tu4	td1	td2	td3	td4	td4
Ts2	td1	td1	td2	td3	td4
Ts3	td1	td2	td3	td4	td4
Ts4	td1	td2	td3	td4	td5

Für organische und anthropogen beeinflusste Böden, deren TRD-Stufen im Datensatz mit td0, O (Oberboden) und k6 (Kohle) gekennzeichnet sind, konnte in der Literatur keine Übersetzung in LD-Stufen gefunden werden. Letztendlich wurde für diese drei TDR-Stufen, welche generell nur auf 0.6 % der Gesamtfläche vorliegen, pauschal ein mittlerer Lagerungsdichtewert von 1,4 g/cm³ festgesetzt.

Mit den abgeleiteten LD-Stufen und den dazugehörigen Bodenarten ließ sich im Anschluss die gesättigte Wasserleitfähigkeit mittels DWA Regelwerk (2016, Tabelle 12) abschätzen. Ausgenommen hiervon waren die Torfe, da die Abschätzung der gesättigten Wasserleitfähigkeit von der Torfart, der Zersetzungsstufe und dem Substanzvolumen abhängig ist. Aus der Datengrundlage sind Torfart sowie Zersetzungsstufe bekannt, mit deren Hilfe die Substanzvolumenstufe (SV-Stufe) abgeschätzt wurde (Müller & Waldeck, 2011). Die Abschätzung der gesättigten Leitfähigkeit in Torfen erfolgte letztlich über das DWA Regelwerk (2016, Tabelle 14).

Anbindung von Flächen außerhalb Sachsen

Für alle außerhalb Sachsens gelegenen Bereiche des Bearbeitungsraumes (s. Kapitel 2.4) erfolgten Recherchen zu verfügbaren Bodendaten. Die Landesbehörden der Bundesländer Thüringen und Sachsen-Anhalt stellten der Professur für Hydrologie, TU Dresden Bodenkarten zur Verfügung.

Die Bodengeologische Konzeptkarte Thüringens (BGKK100, Maßstab 1 : 100.000) lag für zwei einzelne Kacheln vor, wobei nicht alle Flächen abgedeckt waren. Die Karten wurden mit folgendem Hinweis zur Verfügung gestellt: „Die Kartierungseinheiten der Bodengeologischen Übersichtskarte sind als Bodengesellschaften konzipiert. Das Gliederungsschema bezieht sich ganz wesentlich auf die Substrateigenschaften der Ausgangsgesteine, in Auen und Niederungen auf den Grundwassereinfluss. Ein Vergleich mit den inhaltlichen Anforderungen im Sinne der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 4) ist nicht sinnvoll. Eine näherungsweise Angleichung der Leitbodenformen an die Nomenklatur der KA 4 wurde der Legendenkartei nachträglich beigelegt. (TLUBN)“. Aufgrund dieser Ausführungen und der teils fehlenden Abdeckung des Bearbeitungsraumes in Thüringen wurde die BÜK200 als Grundlage verwendet und nur ausgewählte Kartierungseinheiten (Moore, Auen und Feuchtegebiete sowie Löss) der BGKK100 mit verschnitten.

Für den in Sachsen-Anhalt befindlichen Teil des Bearbeitungsraumes konnte die Vorläufige Bodenkarte 1 : 50.000 (VBK50) genutzt werden. Sie verfügt über die Attribute Leitbodentyp sowie Substrattyp. Es bestand eine gute Passfähigkeit der räumlichen Strukturen mit der BK50, so dass die Anbindung an die BK50 unkompliziert erfolgen konnte. Für den in Brandenburg liegenden Teilbereich wurde auf die BÜK200 zurückgegriffen, da für diese Flächen keine Bodenkarte durch die Landesbehörde zur Verfügung gestellt wurde.

Im Grenzbereich zu Tschechien konnte nur teilweise auf eine aktuelle Bodenkarte (SOIL_CR50) zurückgegriffen werden, welcher durch das LfULG bereitgestellt wurde. Die betreffenden Flächen decken Teilbereiche der sächsischen Schweiz und des Lausitzer Berglands ab. Die Böden der SOIL_CR50 sind nach der FAO (2006) klassifiziert. Für eine vollständige Abdeckung des Bearbeitungsraum in Tschechien musste daher auf die alte Bodenkarte Soil Map of the Czech Republic im Maßstab 1 : 200.000 (SMoCR200) zurückgegriffen werden, welche der Auftragnehmer 2009 erhielt. Der tatsächliche Bearbeitungsstand der Karte konnte allerdings nicht ermittelt werden. Die Einordnung der darin aufgeführten Böden basiert auf der FAO-Bodenklassifikation (FAO, 1974).

Die FAO-Klassifikation unterscheidet sich grundlegend von der deutschen Bodenklassifikation. Da es sich allerdings um die einzigen verfügbaren Bodenkarten handelte, wurden die räumlichen Strukturen an die BK50 angebunden. Die Übersetzung der Böden erfolgte einerseits unter Zuhilfenahme der FAO (1974 und 2006), der KA5 sowie der Studie von Schuler et al. (2010) und andererseits durch einen Abgleich der aneinandergrenzenden Flächen auf deutscher und tschechischer Seite.

2.1.3 Landnutzung

Für die Definition der Landnutzung, der damit verbundenen Auenbereiche sowie der Versiegelungsgrade von Siedlungsflächen lagen die nachfolgenden Datensätze vor:

- ATKIS-BasisDLM (Stand 2019)
- CORINE Landcover (CLC, Stand 2018) aus dem Datenportal "Copernicus Global Land Service"
- Auenbereiche Landcover (VHR Landcover, Stand 2012) aus dem Datenportal "Copernicus Global Land Service"
- Versiegelungsgrad Landcover (20x20m Raster, Stand 2015) aus dem Datenportal "Copernicus Global Land Service"
- Versiegelungsgrad Sachsen (5x5m Raster, Stand 2018)

Der vom LfULG bereitgestellte Datensatz des ATKIS-BasisDLM deckt die Fläche Sachsens vollständig ab, umfasst aber nicht den außerhalb Sachsens liegenden Bearbeitungsraum. Er wurde auf Topologiefehler geprüft und die festgestellten Unstimmigkeiten korrigiert. Der Rasterdatensatz (5x5m) zum Versiegelungsgrad liegt ebenfalls nur innerhalb Sachsens vor. Die Bereiche außerhalb Sachsens wurden daher durch die gröber aufgelösten CORINE-Landcover-Daten sowie die Datensätze zu den Auenbereichen und Versiegelungsgraden ergänzt, welche dem Portal „Copernicus Global Land Service“ entstammen.

Die Daten der Auenbereiche aus dem VHR Land-Cover/ Land Use beschränken sich auf die Abbildung mittlerer und großer Flusssysteme. Die Abgrenzung der Auenbereiche basiert auf einem komplexen räumlichen Modellierungsansatz, aus dem der potentielle Auenbereich unter Ausschluss anthropogenen Einflusses hervorgeht. Der vorliegende Auenbereich ist letztlich eine Kombination aus dem potentiellen Auenbereich und der tatsächlichen Ausdehnung von Ufermerkmalen (naturnahe Ufervegetation, Altarme, Flussufer, etc.), die aus Fernerkundungsdaten hervorgehen (Copernicus Website, 2019a). Die Landcover-Karte der Auenbereich wurde auch innerhalb Sachsens verwendet. Es erfolgte ein Verschnitt des ATKIS-BasisDLM mit den Auenbereichen zur Integration dieses für die Modellierung wesentlichen Gebietsmerkmals.

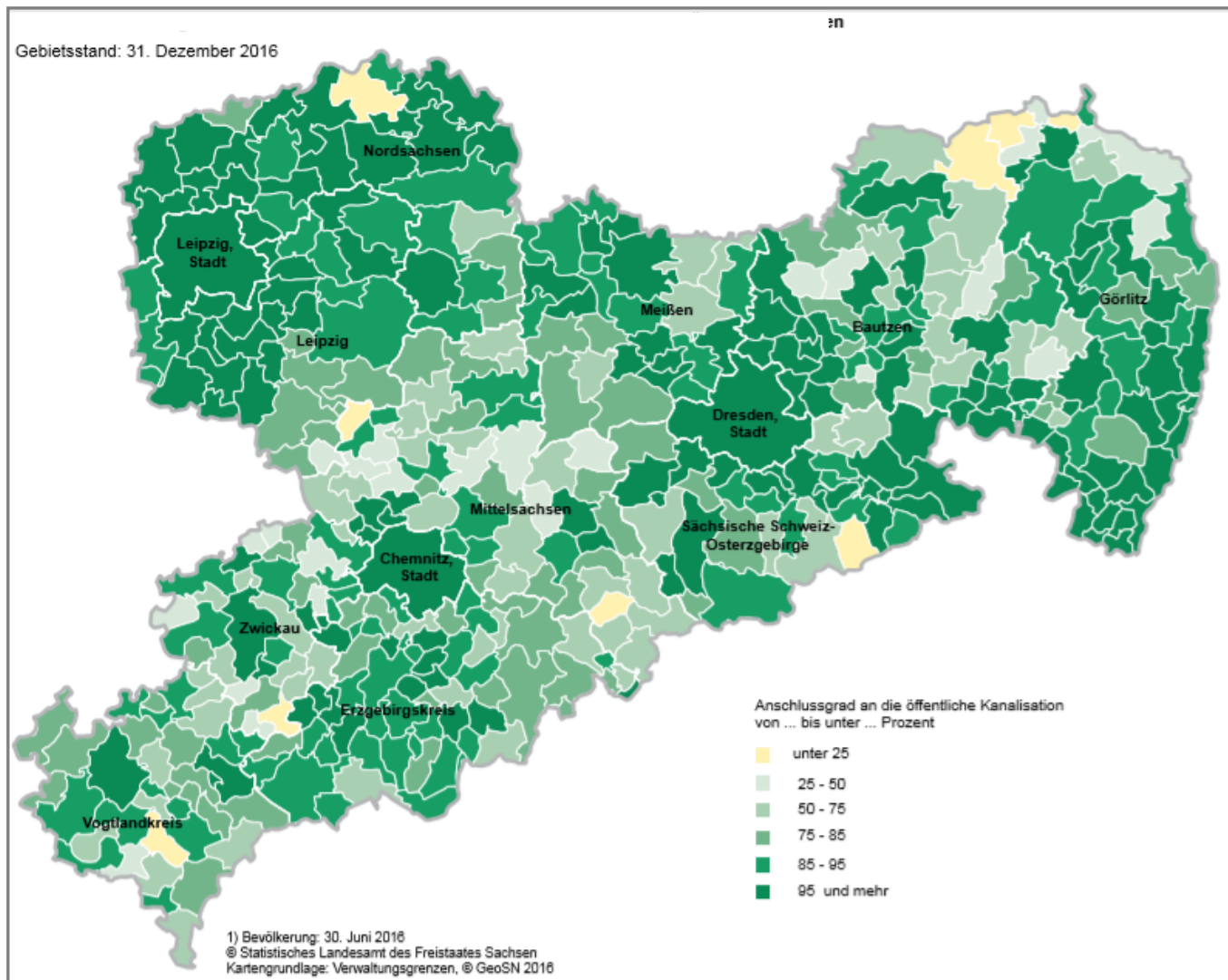
Zusätzlich wurden einige Landnutzungsarten aus ATKIS und CORINE generalisiert und mit Nachbarflächen zusammengefasst, da sie entweder hydrologisch nicht relevant waren oder zu fein aufgelöst vorlagen. Im letzten Schritt erfolgte eine Überprüfung auf die Stimmigkeit von Landnutzungs- und Bodeninformationen, damit keine unrealistischen Merkmalskombinationen auftreten.

2.1.4 Geologie

Hinsichtlich der Geologie und den damit verbundenen Lithofaziesseinheiten stellte das LfULG einen Datensatz zu Fließgewässerlandschaften bereit. Dieser basiert auf der Hydrogeologischen Übersichtskarte 1 : 400.000 (HÜK400) und weist die Lithofaziesseinheiten entsprechend der dominierenden hydrogeologischen Klasse aus. Eine detailliertere Untergliederung ergab sich bei Verwendung der Hydrogeologischen Übersichtskarte 1 : 200.000 (HÜK200, Stand Mai 2016) sowie der Geologischen Übersichtskarte 1 : 200.000 (GÜK200, Stand 2007), welche genau wie die HÜK400 deutschlandweit Daten liefern. Der Verschnitt beider Kartengrundlagen sowie die anschließende Aufbereitung lieferte letztlich die benötigten Lithofaziesseinheiten für den gesamten Bearbeitungsraum.

2.1.5 Anschlussgrad

In ArcEGMO wird die oberirdische Abflusskomponente in Abhängigkeit der Flächeneigenschaften differenziert betrachtet. Nicht an das Kanalnetz angeschlossene, unversiegelte oder versiegelte Flächen bilden Oberflächenabfluss, welcher einem Gewässer zufließt. Dagegen wird der Abfluss von versiegelten und teilversiegelten Flächen mit Kanalisationsanschluss als Kanalisationsabfluss berechnet. Hierfür sind Angaben zum Anschlussgrad der Flächen an die Kanalisation notwendig, welche für Sachsen allerdings nicht flächendifferenziert verfügbar sind. Stattdessen gibt es Angaben zum Anschlussgrad der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation (Abbildung 1) und zum Anschlussgrad der Bevölkerung an die Abwasserentsorgung. Beide werden ebenfalls als Anschlussgrad bezeichnet. Die Verteilung der Anschlussgrade der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation hat ein ähnliches räumliches Muster, wie die für ArcEGMO benötigten Anschlussgrade der Flächen an die Kanalisation. Daher wurde alternativ diese Größe verwendet.



Quelle: © Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen - Statistischer Bericht Q I 1 - 3j/16, Seite 33

Abbildung 1: Anschlussgrad an die öffentliche Kanalisation im Freistaat Sachsen 2016 nach Gemeinden

Die Angaben zum Anschlussgrad der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation werden vom statistischen Landesamt im Dreijahresrhythmus auf Gemeindeebene erhoben und dokumentiert (Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2018). Eine räumlich stärkere Differenzierung ist also nicht möglich. Da die Anschlussgrade im Modell in Abhängigkeit der Flächenversiegelung ausgewertet werden, ergibt sich durch die Vorgabe flächendifferenzierter Versiegelungsgrade eine stärkere Heterogenität innerhalb der Gemeinden. Die gegebenen Anschlussgrade werden auf das gesamte sächsische Modellgebiet übertragen, aber nur auf den versiegelten Flächen ausgewertet. Das bringt den Vorteil, dass bei einer Erweiterung der versiegelten Flächen der Anschlussgrad nicht neu recherchiert werden muss, sondern bereits für die Fläche zur Verfügung steht.

Entwicklung der Anschlussgrade an die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sowie Trinkwasserdurchschnittsverbrauch nach NUTS 2-Regionen¹⁾

Jahr	Bevölkerung 30.06. ²⁾	Anschlussgrad an			Durchschnitts- verbrauch von Trinkwasser je Einwohner und Tag
		öffentliche Trinkwasser- versorgung	öffentliche Kanalisation	öffentliche Abwasser- behandlungs- anlagen	
	Anzahl	%			Liter
Chemnitz, NUTS 2-Region¹⁾					
1991	1 738 299	95,9	79,0	51,4	123,2
1995	1 692 970	97,1	78,3	60,0	80,6
1998	1 654 765	97,7	79,2	66,5	80,9
2001	1 602 921	98,5	81,1	71,4	80,5
2004	1 553 406	98,4	82,4	74,4	79,4
2007	1 583 809	98,6	83,7	77,2	79,0
2010	1 532 967	98,8	85,4	80,2	79,5
2013	1 473 647	99,0	86,7	82,3	79,0
2016	1 458 797	98,8	87,8	83,9	85,4
Dresden, NUTS 2-Region¹⁾					
1991	1 798 300	95,0	73,2	61,0	148,6
1995	1 761 287	97,1	74,8	64,8	105,2
1998	1 735 992	97,4	80,6	76,1	96,7
2001	1 695 745	98,6	85,2	81,8	95,1
2004	1 667 676	98,9	88,1	85,5	93,3
2007	1 651 397	99,3	90,7	88,3	89,3
2010	1 627 763	99,4	92,2	90,3	88,1
2013	1 588 363	99,6	93,1	91,4	91,5
2016	1 599 091	99,4	93,9	92,3	93,5

1) In der aktuellen Fassung der NUTS-Klassifikation (EU-Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik) entsprechen die NUTS 2-Regionen den ehemaligen Direktionsbezirken.

2) bis 2004 Bevölkerungsstand 31.12.

Quelle: © Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen - Statistischer Bericht Q I 1 - 3j/16, Seite 10

Abbildung 2: Entwicklung der Anschlussgrade an die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sowie Trinkwasserdurchschnittsverbrauch nach NUTS2-Regionen (Ausschnitt)

Entwicklung der öffentlichen Abwasserentsorgung

Merkmal	Einheit	1991	2007	2010	2013	2016	Veränderung
							2016 : 2013
							%
Wohnbevölkerung ab 2007: 30.06.; 1991: 31.12.	Anzahl	4 678 877	4 234 014	4 153 631	4 041 663	4 078 397	0,9
An die öffentliche Kanalisation angeschlossene Wohnbevölkerung	Anzahl	3 669 501	3 775 536	3 762 434	3 700 788	3 772 768	1,9
Anschlussgrad	Prozent	78,4	89,2	90,6	91,6	92,5	x

Quelle: © Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen - Statistischer Bericht Q I 1 - 3j/16, Seite 9

Abbildung 3: Entwicklung der öffentlichen Abwasserentsorgung (Ausschnitt)

Der Anschlussgrad hat sich aber in den letzten 30 Jahren sehr verändert. In Abbildung 2 ist die zeitliche Entwicklung der Anschlussgrade in den NUTS-Regionen Chemnitz und Dresden von 1991 bis 2016 dargestellt. Da sich die Angaben auf die NUTS 2-Regionen beziehen, für die sich die Gebietseinheiten von den Flächen der Gemeinden unterscheiden, kommt es für Dresden zu einem etwas abweichenden Anschlussgrad (93,9% statt 99,4%). Anhand der Abbildung 2 soll aber nur die zeitliche Veränderung der Anschlussgrade verdeutlicht werden. In beiden Regionen stieg der Anschlussgrad um etwa 20% mit der Zeit an.

In Abbildung 3 ist die Entwicklung der Anschlussgrade für Sachsen zusammengefasst und auch hier zeigt sich ein deutlicher Zuwachs der Anschlussgrade mit der Zeit um etwa 15%.

Für die Modellparametrisierung bedeutete das, dass ein Zustand festgelegt werden musste, der mit dem Modell abgebildet werden sollte, da der Anschlussgrad nicht als dynamische Eingangsgröße vorzugeben ist. Der Modellierungszeitraum für den Istzustand reicht von 1961-2015, also > 50 Jahre in denen sich die Anschlussgrade aber auch die anderen Eingangsgrößen verändert haben. Da das Projektziel die Abbildung des Wasserhaushaltes in den sächsischen Einzugsgebieten und dem Einfluss des Klimawandels auf die verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen ist – also auch Zukunftsszenarien zu betrachten sind – machte es Sinn, den aktuellsten Anschlussgrad zu verwenden. Das ist in diesem Fall der Datenbestand von 2016. Nach dem dreijährigen Aktualisierungsrhythmus wäre für 2019 eine neue Datengrundlage zu erwarten, die gegenwärtig aber noch nicht zur Verfügung steht. Es wurde also die Datengrundlage der Datenbasis von 2016 verwendet.

2.1.6 Kanalisationsart

Neben dem Anschlussgrad sind in ArcEGMO zusätzlich Daten zur Kanalisationsart erforderlich, da der Kanalisationsabfluss separat für die Misch- bzw. Trennkanalisation simuliert wird. Angaben zu den unterschiedlichen Kanalnetzen lagen nur auf Kreisebene und nicht auf Gemeindeebene vor (Stand 2016). Diese konnten den statistischen Berichten des Landes Sachsens (SMUL, 2018) entnommen werden. Eine Unterteilung in Misch- und Trennkanalisation konnte anhand der Länge [km] des jeweiligen Kanalsystems erfolgen. Für das Modell ist die Angabe der dominierenden Kanalisationsart ausreichend.

In Gesamtsachsen hat sich sowohl der Anschlussgrad als auch die dominierende Kanalisationsart über die letzten 30 Jahre stark verändert. Die Länge des Kanalnetzes hat sich mehr als verdoppelt. Der größte Zuwachs erfolgte dabei bezüglich des Trennsystems, die Mischkanalisation wurde dagegen nur geringfügig erweitert (Abbildung 4).

Entwicklung der öffentlichen Abwasserentsorgung

Merkmal	Einheit	1991	2007	2010	2013	2016	Veränderung 2016 : 2013
							%
Wohnbevölkerung ab 2007: 30.06.; 1991: 31.12.	Anzahl	4 678 877	4 234 014	4 153 631	4 041 663	4 078 397	0,9
An die öffentliche Kanalisation angeschlossene Wohnbevölkerung	Anzahl	3 669 501	3 775 536	3 762 434	3 700 788	3 772 768	1,9
Anschlussgrad	Prozent	78,4	89,2	90,6	91,6	92,5	x
An öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen angeschlossene Wohnbevölkerung	Anzahl	2 782 935	3 569 158	3 600 948	3 570 229	3 658 923	2,5
Anschlussgrad	Prozent	59,5	84,3	86,7	88,3	89,7	x
An industrielle bzw. Abwasserbehandlungs- anlagen im Ausland angeschlossene Wohnbevölkerung	Anzahl	-	14 419	13 792	13 295	13 828	4,0
Anschlussgrad	Prozent	-	0,3	0,3	0,3	0,3	x
Länge des Kanalnetzes	km	11 213,4	24 898,8	26 333,2	27 102,3	28 118,8	3,8
Mischsystem	km	7 933,2	9 844,3	9 954,1	9 959,8	9 955,5	0,0
Trennsystem	km	3 280,2	15 054,5	16 379,1	17 142,5	18 163,3	6,0
Schmutzwasserkanäle	km	2 257,7	10 130,7	11 042,0	11 473,4	12 070,3	5,2
Regenwasserkanäle	km	1 022,5	4 923,8	5 337,1	5 669,1	6 093,0	7,5

Quelle: © Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen - Statistischer Bericht Q I 1 - 3j/16, Seite 9

Abbildung 4: Entwicklung der öffentlichen Abwasserentsorgung (Ausschnitt)

In den Kreisen Chemnitz, Erzgebirge, Mittelsachsen, Vogtland und Zwickau, Dresden und Leipzig ist das Mischsystem vorrangig und wurde dementsprechend in das Modell übernommen, während in Bautzen, Görlitz, Meißen, Sächsische Schweiz- Osterzgebirge und Nordsachsen die Trennkanalisation dominiert (Abbildung 5) und in das Modell integriert wurde.

Öffentliche Kanalisation¹⁾ 2016 nach Kreisfreien Städten und Landkreisen

Kreisfreie Stadt Landkreis Land	An öffentliche Kanalisation angeschlossene Bevölkerung ²⁾		Kanalnetz insgesamt	Davon		
				Misch- system	Trennsystem	
	Anzahl	%			km	
					Schmutz- wasserkanäle	Regen- wasserkanäle
Chemnitz, Stadt	242 164	98,5	980,4	607,1	203,5	169,8
Erzgebirgskreis	305 446	88,3	2 716,9	1 362,8	820,8	533,3
Mittelsachsen	249 862	80,2	2 001,4	821,3	811,5	368,6
Vogtlandkreis	201 765	87,0	1 914,3	909,8	623,0	381,5
Zwickau	282 174	87,2	1 972,4	1 198,0	458,3	316,1
Dresden, Stadt	540 471	99,4	1 805,2	916,3	529,4	359,5
Bautzen	270 801	88,6	3 251,7	430,2	1 862,0	959,5
Görlitz	240 771	93,0	3 078,6	192,2	2 215,2	671,2
Meißen	226 105	92,5	2 154,5	654,5	979,0	521,0
Sächsische Schweiz- Osterzgebirge	224 143	90,9	2 092,7	351,3	1 229,6	511,8
Leipzig, Stadt	560 838	99,4	1 642,0	925,9	415,6	300,5
Leipzig	241 100	93,3	2 211,4	962,1	796,5	452,8
Nordsachsen	187 128	94,6	2 297,3	624,0	1 125,9	547,4
Sachsen	3 772 768	92,5	28 118,8	9 955,5	12 070,3	6 093,0

1) Die regionale Zuordnung erfolgt nach dem Standort des Kanalnetzes.

2) Einschließlich 13 828 Einwohner mit Anschluss an industrielle bzw. ausländische Abwasserbehandlungsanlagen.

Quelle: © Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen – Statistischer Bericht Q I 1 - 3j/16, Seite 9

Abbildung 5: Öffentliche Kanalisation 2016 nach Kreisfreien Städten und Landkreisen (Aufteilung in Misch- und Trennkanalisation in km)

2.1.7 Drainagen

Für die Drainagen liegt ein Datensatz von Steiniger et al. (2013) vor, welcher für Sachsen die potentiell drainagebedürftigen Acker- und Grünlandflächen ausweist. Da es keinen aktuelleren Datensatz gibt (z.B. zu tatsächlich vorhandenen Drainagen bzw. dem Zustand der Drainsysteme), wird auf die bisher verwendete Datengrundlage zurückgegriffen. Eine zusätzliche Aufbereitung erfolgte nicht. Für Flächen außerhalb Sachsens sind keine Angaben vorhanden, so dass diese Bereiche ohne Drainagen betrachtet werden.

Insgesamt wäre eine Erfassung tatsächlich vorliegender Drainagen sowie eine Überarbeitung der drainagebedürftigen Acker- und Grünlandflächen wünschenswert.

In der Arbeit von Steiniger et al. (2013) wurde die BKkonz als Kartengrundlage verwendet, um eine potentielle Drainagebedürftigkeit abzuleiten. Es konnte in Hauffe et al. (2019) gezeigt werden, dass teils erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Bodenkarten BKkonz und BK50 auftreten. Es ist daher anzunehmen, dass es zu Abweichungen der drainagebedürftigen Flächen kommen würde.

2.1.8 Digitales Geländemodell

Das durch das LfULG bereitgestellte ATKIS DGM5 (Arbeitsstand Mai 2019) deckt nur die Fläche Sachsens ab. Im Rahmen einer Datenprüfung konnten keine inhaltlichen Fehler identifiziert werden. Für eine Abdeckung des gesamten Bearbeitungsraumes war die Ergänzung um die Flächen außerhalb Sachsens notwendig. Hierfür wurde das europäische Digitale Geländemodell (EU-DEMv1.1; Copernicus Website, 2019c) mit einer Auflösung 20x20m Rastern herangezogen, auf 5x5m disaggregiert und angebunden. Eine Prüfung ergab eine ausreichende Passfähigkeit des zusammengesetzten Datensatzes. Basierend darauf erfolgte im Anschluss die Ableitung der weiteren Reliefparameter Gefälle und Ausrichtung.

2.1.9 Grundwasserflurabstände

Die Grundwasserflurabstände wurden durch das LfULG bereitgestellt. Sie liegen einerseits als Isohypsen für Lockergesteinsbereiche, Lössgebiete sowie als unsicher bezeichnete Bereiche vor und andererseits als 50x50m Raster mit derselben räumlichen Abdeckung wie die Isolinien (Stand Frühjahr 2016). Eine genauere Betrachtung des Rasterdatensatzes wurde bereits durchgeführt, welche Hauffe et al. (2019) entnommen werden kann.

Für den Festgesteinsbereich wie auch die zu berücksichtigenden Flächen außerhalb Sachsens war die Ableitung der Informationen zu Grundwasserflurabständen aus der Bodenkarte und ggf. aus den Datengrundlagen der Auenbereiche erforderlich. Für die Ableitung des Grundwasserflurabstandes aus der Bodenkarte BK50 wurden zwei Merkmale ausgewertet:

- die Grundwasserbeeinflussung der Bodenschichten und
- die Zugehörigkeit zu Auen.

Die Bodenhorizonte der zusammengesetzten Bodenkarte wurden auf ihre Grundwasserbeeinflussung hin untersucht. Zunächst wurden alle grundwasserbeeinflussten Horizonte selektiert und auf ihre Ausprägung hin analysiert.

Generell erfolgte eine Unterscheidung zwischen zwei großen Gruppen – Gr- und Go-Horizonten:

- Gr-Horizont: Grundwasserbeeinflusster Horizont mit reduzierenden Verhältnissen, weist eine blau- oder grüngraue Färbung auf, da er ständig wassergesättigt und anoxisch ist.
- Go-Horizont: liegt über dem Gr-Horizont dort, wo es durch Sauerstoffzufuhr zur Oxidation der im aufsteigenden Grundwasser gelösten Stoffe (Eisen Fe und Mangan Mn) kommt. Der Go-Horizont ist zumindest periodisch durchlüftet, da er im Schwankungsbereich des Grundwassers bzw. im Kapillarsaum des Grundwassers liegt.

Die Grenze zwischen diesen beiden Schichten wurde als Grundwasseroberfläche gewertet, da der Kapillaraufstieg im ArcEGMO-PSCN-Modell zusätzlich in Abhängigkeit der Bodenarten berücksichtigt wird.

Horizonte mit fossilen oder reliktschen Merkmalen einer Grundwasserbeeinflussung wurden bei der Analyse ausgeschlossen.

Anschließend wurden die Böden im Auenbereich auf vernässte Horizonte untersucht. Dazu wurden die über die Hydrotopdatenbasis definierten Auenbereiche selektiert und die dort vorkommenden Bodenhorizonte gesichtet. Für einige dieser Böden konnte eine Vernässung einer Schicht aus den Horizontangaben abgeleitet und deren Tiefe als Grundwasseroberfläche definiert werden. Wenn keine wasserführenden Schichten im Profil vorkamen, wurde die Unterkante des Profils als Grundwasserflurabstand verwendet. Die Übertragung der so ermittelten Grundwasserflurabstände erfolgte aber nur auf die im Auenbereich liegenden Flächen. Für alle außerhalb gelegenen Bodenprofile und Profile ohne Grundwasserbeeinflussung wurde ein Flurabstand von 10 m angenommen (Abbildung 6).

Tabelle 3: Definition der Flurabstandsklassen

FLURAB_ID	FLURAB_MAX	FLURAB_REP
1	0,3	0,2
2	0,5	0,4
3	0,7	0,6
4	0,9	0,8
5	1,2	1
6	1,7	1,5
7	2,2	2
8	3,5	3
9	6	5
10	10	10

Für die Übergabe an das Modell wurden die Flurabstände in 10 Klassen unterteilt und den Hydrotopen über die entsprechende ID zugordnet. Die Flurabstandsklassen sind mit ihrer oberen Klassengrenze (Flurab_max) und ihrem repräsentativen Flurabstand (Flurab_rep) definiert, wie Tabelle 3 zeigt. Der repräsentative Flurabstand wird im Modell für die Berechnung verwendet.

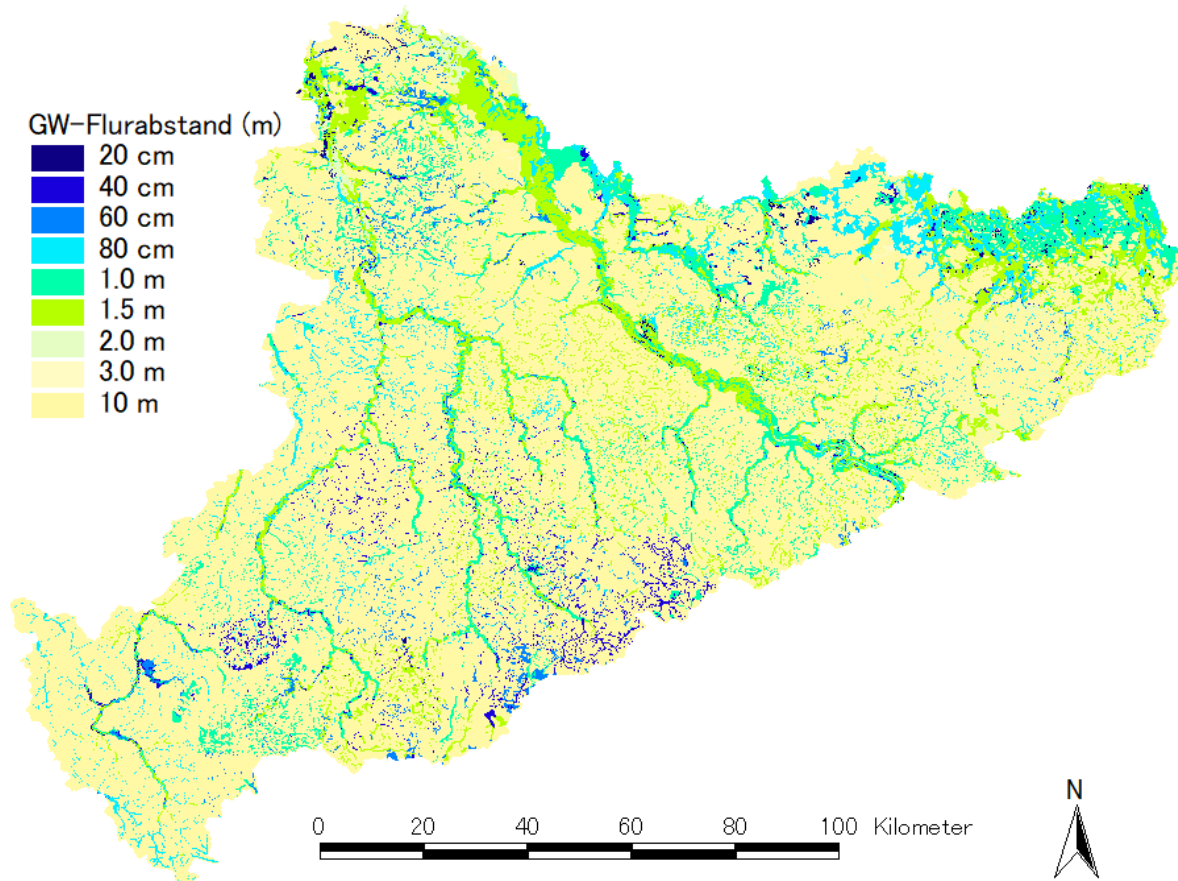


Abbildung 6: Aus den Bodenprofilen abgeleitete Grundwasserflurabstandsklassen

Anhand der räumlichen Verteilung der Flurabstände wird deutlich, dass der Flurabstand in den Auen, vor allem in der Elb-Aue, bei 1,5 m liegt. Dieser Wert erscheint eher hoch und hat seine Ursache in den verfügbaren Datengrundlagen. Denn wiesen die Böden der BK50 in den zuvor bestimmten Auenbereichen keine vernässten Horizonte auf, so erfolgte die Ableitung der Grundwasserflurabstände aus den Hydroisohypsen. Diese lagen allerdings häufig unterhalb der angegebenen Bodenprofilertiefen (1,2 bis 1,5 m).

Fazit

Die Grundwasserflurabstände konnten aus den verschiedenen Datengrundlagen flächendeckend für das gesamte Landesmodell abgeleitet werden.

Um das Modell weiter zu qualifizieren könnte für die grundwassernahen Standorte auch ein Jahresgang der Grundwasserflurabstände über saisonale Zeitreihen vorgegeben werden, der das natürliche Schwankungsverhalten der Grundwasserstände aus dem Grundwasserhoch- und Grundwasserniedrigstand (MHGW und MNGW) nachstellt. Die Definition der Schwankungsbereiche könnte den Angaben der Bodenkarte entnommen werden. Dieses Vorgehen wurde im Landesmodell Sachsen-Anhalt erprobt (BAH, 2018).

Für die Klimaprojektionen wäre auch die Vorgabe eines zeitlich abfallenden Trends für die dynamischen Flurabstände denkbar. Die Stärke eines Trends müsste allerdings erst recherchiert werden. Ebenso könnte in den bergbaugeprägten Regionen der Grundwasserwiederanstieg über Zeitreihen vorgegeben werden.

2.1.10 Teileinzugsgebiete

Die ebenfalls durch das LfULG bereitgestellte Teileinzugsgebietsstruktur (Stand Oktober 2019) deckt den Bearbeitungsraum vollständig ab. Voruntersuchungen zu Änderungen in den Gebietsstrukturen gegenüber einem älteren Datensatz (Stand 2013) zeigten teils deutliche Unterschiede. Es haben sich einerseits die Anzahl der Teileinzugsgebiete verändert wie auch andererseits die räumlichen Grenzen verschoben (Hauffe et al., 2019).

Eine topologische Überprüfung des neuen Datensatzes der Teileinzugsgebiete ergab keine Fehler.

2.2 Aufbereitung der meteorologischen und hydrologischen Datengrundlagen

2.2.1 Referenzdatensatz

Als meteorologische Eingangsdaten für den Zeitraum 1961 – 2015 wurde der Referenzdatensatz RDS für Sachsen herangezogen. Es handelt sich hierbei um einen Rasterdatensatz mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km, welcher über das ReKiS-Portal frei verfügbar ist. Als Input für das Wasserhaushaltsmodell wurden folgende meteorologische Größen im Tagesschritt benötigt:

- Korrigierter Niederschlag P
- Nebelniederschlag FP
- Mittlere Lufttemperatur LT sowie
- minimale und maximale Lufttemperatur TN/TX
- relative Luftfeuchte rF
- Globalstrahlung GS
- Windgeschwindigkeit in 2m über der Geländeoberfläche FF2

Mit Ausnahme des Nebelniederschlags sind alle genannten Größen im Referenzdatensatz enthalten. Der Nebelniederschlag liegt im ReKiS-Portal als separater Datensatz vor und deckt den Zeitraum von 1967 – 2014 ab. Informationen zur Ableitung der Nebelniederschläge finden sich in Bernhofer et al. (2017) sowie im Abschnitt 2.2.2. Da der Nebelniederschlag einen kürzeren Zeitraum als der Referenzdatensatz abdeckt, war eine Methodik zu entwickeln, welche eine Verlängerung um die Jahre 1961 – 1966 sowie 2015 ermöglicht. Die Beschreibung der Vorgehensweise enthält Abschnitt 2.2.2. Darüber hinaus wurde im Rahmen verschiedener Wasserhaushaltsmodellierungen festgestellt, dass die Nebelniederschläge in den Kammlagen des Erzgebirges sehr große Werte aufweisen, welche sich nachteilig auf die Wasserhaushaltsberechnungen auswirken. Ausführungen zur Korrektur des Nebelniederschlags finden sich in Abschnitt 2.2.3.

Für alle anderen genannten Größen erfolgte die Interpolation basierend auf den Messwerten der Niederschlags- und Klimastationen auf das 1 x 1 km Raster am Lehrstuhl für Meteorologie, TU Dresden. Detaillierte Angaben zur Entwicklung und Erstellung des Referenzdatensatzes sowie zu den darin enthaltenen meteorologischen Daten können Bernhofer et al. (2019) entnommen werden.

Ergänzend zur Aufbereitung der Nebelniederschläge erfolgten Untersuchungen zur Auswirkung von Rasteraggregationen des RDS. Hierfür wurden neben der gegebenen Rastergröße von 1 x 1 km auch Auflösungen von 2 x 2 km sowie 5 x 5 km getestet, um ggf. einen kleineren Datensatz zu erhalten. Dies würde einen schnelleren Datenzugriff ermöglichen, aber auch zu einer geringeren räumlichen Auflösung der meteorologischen Daten führen.

2.2.2 Statistisches Nebelmodell

Alle angegebenen Formeln zur Berechnung des Nebels bzw. der zugrundeliegenden Größen entstammen Bernhofer et al. (2017). Die Formel zur Berechnung des Nebels lautet:

$$P_{Nebel} = lwc \cdot 0.0164 \frac{u_v}{\sqrt{\frac{LAI}{h}}}$$

mit dem Nebelniederschlag P_{Nebel} in mm/s, dem Flüssigwassergehalt der Luft lwc in kg/m^3 , der Windgeschwindigkeit in Wipfelhöhe u_v in m/s, der Vegetationshöhe h in m und dem Blattflächenindex LAI in m^2/m^2 . Für die Windgeschwindigkeit in Wipfelhöhe wird folgende, auf dem logarithmischen Windprofil basierende Formel genutzt:

$$u_v = u_{10} \frac{\ln\left(\frac{z_b}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z_v - d}{z_{0v}}\right)}{\ln\left(\frac{z_b}{z_{0v}}\right) \ln\left(\frac{z_{10}}{z_0}\right)}$$

u_{10} ist die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in m/s, $z_0 = 0.05$ m bestimmt die Rauigkeitslänge von Gras und z_b ist die Höhe der internen Grenzschicht mit $z_b = 0.334F^{0.875}z_0^{0.125}$. z_v ist die aktuelle Vegetationshöhe in m, $d = 2/3 z_v$ stellt die Verschiebungshöhe dar, $z_{0v} = 0.1 z_v$ ist die Rauigkeitslänge der aktuellen Vegetation, $z_{10} = 10$ m bezeichnet die Messhöhe des Windes und F ist die Streichlänge des Windes und wurde in Bernhofer et al. (2017) konstant mit 5000 m eingesetzt. Für das hier entwickelte statistische Modell wird die gleiche Vegetationshöhe wie in Bernhofer et al. (2017) entstammend aus dem Datensatz der Global Forest Canopy Height (SDAT, 2019d) genutzt. Der LAI wird konstant mit 3 parametrisiert. Der Flüssigwassergehalt wird nach folgender Formel berechnet:

$$lwc = \frac{e_{lwc}}{R_w \cdot T}$$

mit der individuellen Gaskonstante für Wasser $R_w = 461.52$ J/kg/K und der Temperatur T in K. Der Äquivalentdruck des Flüssigwassergehaltes muss für die Einheitentreue in Pa angegeben werden und berechnet sich mit $e_{lwc} = e - e_s$ mit dem aktuellen Partialdruck des Wassers e und dem Sättigungsdampfdruck e_s . Letzterer kann z.B. mit der Clausius-Clapeyron-Formel berechnet werden. Eine gute Näherung ermöglichen die Formeln nach Goff und Gratch (1946), welche in Bernhofer et al. (2017) beschrieben werden.

Die Herausforderung bei der Berechnung von e_{lwc} liegt darin, dass Nebel relative Luftfeuchtigkeiten über 100 % bedingt. Da diese nur von sehr wenigen Stationen gemessen werden können, weichen Bernhofer et al. (2017) auf die Regionalisierung des Mischungsverhältnisses von Luft und Wasser aus. Wegen potentieller Drift werden vor der Regionalisierung die Stationen mit über 98 % Luftfeuchtigkeit entnommen. In der ursprünglichen Berechnung wurden Stundenwerte der benötigten meteorologischen Größen genutzt. Diese liegen für die Zeiträume 1961-1966 sowie in den später genutzten Klimaszenariodaten nicht vor. Daher wird mit dem statistischen Modell versucht, eine möglichst enge Beziehung zu Tageswerten zu finden.

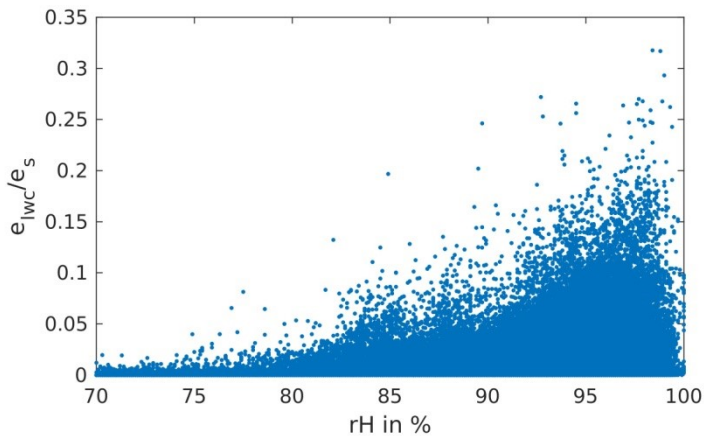


Abbildung 7: Tagesdaten von relativer Feuchte und e_{lwc}/e_s für Novembertage von 1967-1970 und die Höhengschicht von 600 bis 800 mNHN

Wie in Abbildung 7 beispielhaft für Novembertage der Höhengschicht von 600-800 mNHN dargestellt, gibt es eine relativ scharf begrenzte Umhüllende der Tupel von relativer Feuchte rH und der normierten Größe e_{lwc}/e_s . Diese Information soll genutzt werden, um das statistische Nebelmodell in Abhängigkeit von aktuellen meteorologischen Größen aufzubauen.

Das aus den meteorologischen Daten vorgegebene Raster wird unterteilt in Höhengschichten mit Grenzen alle 200 m (0-200 m, 200-400 m usw.). An die Punktwolke von e_{lwc}/e_s zu rH (vgl. Abbildung 7) wird eine Funktion des Typs

$$\frac{e_{lwc}}{e_s} = \frac{1}{d} a \frac{rH - b}{c}$$

mit vier freien Parametern (hier a , b , c und d genannt) angepasst (Bedingung: monotone Steigung). Als unteres Limit, ab welchem kein Nebel mehr berechnet wird, wird das 5 % Quantil der relativen Feuchte an Tagen mit Nebelniederschlag genutzt. Das obere Limit wird gesetzt durch das 90 % Quantil aller Werte von e_{lwc}/e_s in der jeweiligen Höhengschicht und dem jeweiligen Monat. Dieser Grenzwert ist notwendig, da eine Ausgleichfunktion des oben dargestellten Funktionstyps je nach Wertekonstellation im Bereich von rH nahe 100 % unplausibel steigen kann.

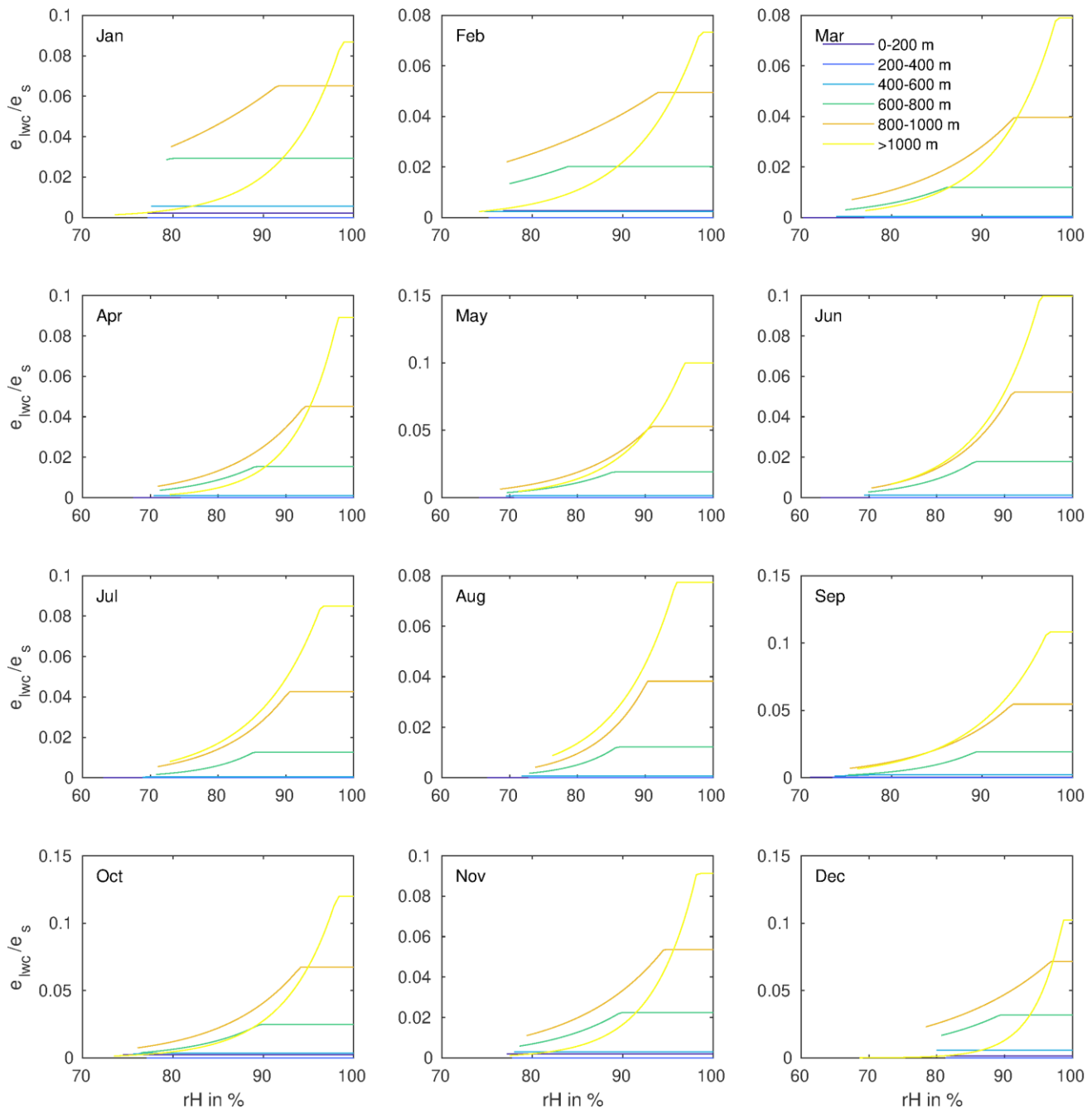


Abbildung 8: Funktionale Zusammenhänge von e_{lwc}/e_s von rH (relativer Feuchte) für den Zeitraum 1967-1986. Es wird unterschieden zwischen Monaten und Höhenschichten.

Die verfügbare Zeit mit Nebelniederschlägen nach Bernhofer et al. (2017) von 1967-2014 wird in zwei Teilzeiträume von 1967-1986 bzw. 1995-2014 analysiert. Einerseits ist das rechentechnisch vorteilhaft. Andererseits kann die frühere Periode gut für die Jahre 1961-1966 herangezogen werden. Die neuere Periode wird hingegen für 2015 und für die Klimaprojektionen (s. Abschnitt 2.2.4) genutzt. Die angepassten Funktionen sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. Mit den dargestellten Ausgleichsfunktionen kann für jede Rasterzelle (Höhenwert), jeden Monat und jeden Tageswert der relativen Feuchte ein Wert von e_{lwc}/e_s berechnet werden. Daraus kann mit der Temperatur e_{lwc} berechnet werden. Daraus folgen ein Wert für den Flüssigwassergehalt (mit Temperatur) und anschließend der Nebelniederschlag (mit Windgeschwindigkeit).

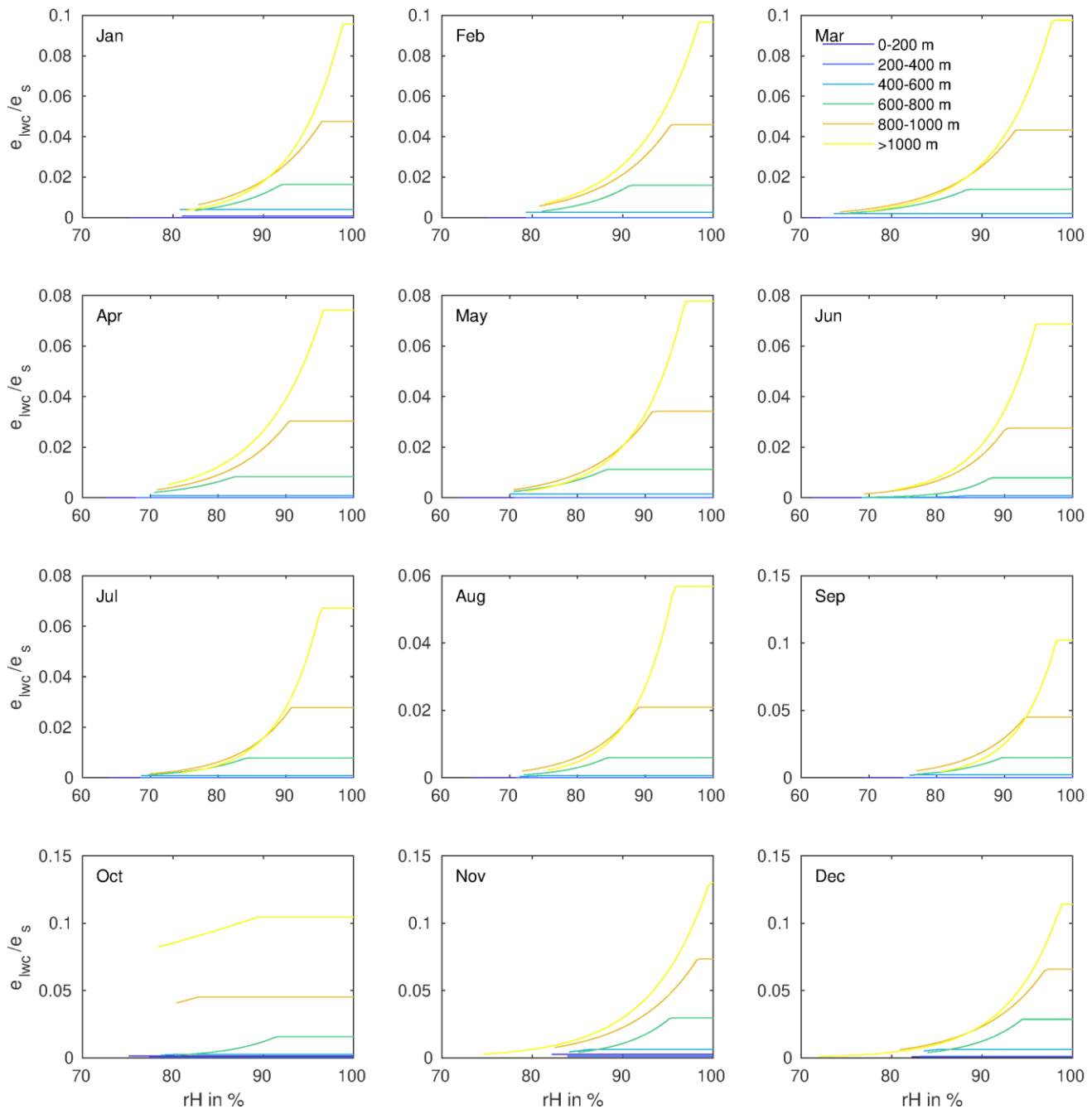


Abbildung 9: Funktionale Zusammenhänge von e_{lwc}/e_s von rH (relativer Feuchte) für den Zeitraum 1995-2014. Es wird unterschieden zwischen Monaten und Höhenschichten.

Die mit diesem Modell berechneten Nebelniederschläge (jeweils für beide Perioden – 1967-1985 bzw. 1995-2014 – reanalysiert) zeigen noch charakteristische Abweichungen zu den ursprünglichen Nebelniederschlägen. Summarisch wird etwas zu viel Nebelniederschlag simuliert. Außerdem zeigt der Jahresgang im statistischen Modell tendenziell eine Überschätzung in den kälteren Monaten und eine Unterschätzung in den wärmeren Monaten. Damit beide Effekte verhindert werden können, wird ein Quantil Mapping je Monat und Rasterzelle als Biaskorrektur (Piani et al., 2010) vorgeschlagen. Dabei werden an beide Nebelwertkollektive nichtparametrische Verteilungsfunktionen mittels Kernel Density Estimation (mitunter auch Kernel Density Smoothing für die Dichtefunktion genannt und anschließend integriert, Wilks, 2006) mit Gauss-Kernel angepasst. Aus beiden Datensätzen können über gleiche Quantile Zuordnungstabellen (Lookup-Tabellen) aufgebaut werden.

Mithilfe der beschriebenen Methoden können auf statistischer Basis Nebelniederschläge für alle Rasterzellen berechnet werden. Die mittleren Jahressummen bzw. die maximalen Tagessummen des Nebelniederschlags im Zeitraum 1967-1986 werden in Abbildung 10 vergleichend für beide Nebelmodelle dargestellt. Es ist anzumerken, dass in den Nebeldaten nach Bernhofer et al. (2017) von einer minimalen Vegetationshöhe von 0,1 m ausgegangen wird. Für das statistische Modell hingegen wird der Global Forest Height Datensatz unverändert genutzt. Im Erzgebirgsbereich werden deshalb einige Punkte mit relativ hoher Abweichung beider Nebeldatensätze gefunden. Da in der nächsten Version des Nebelniederschlags ebenfalls der unveränderte Datensatz der Waldhöhe verwendet werden wird (Körner, 2019), wurde auf einen Minimalwert für das statistische Nebelmodell verzichtet.

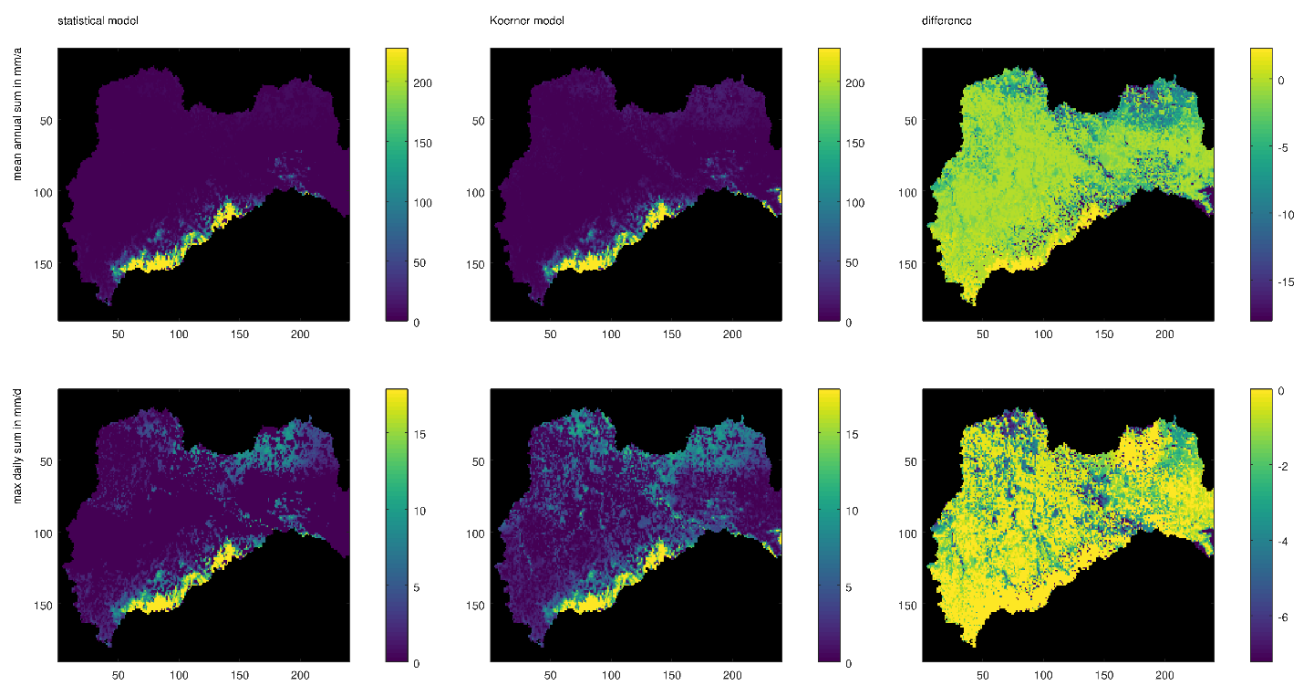


Abbildung 10: Obere Reihe: mittlere Jahressumme des Nebelniederschlags, untere Reihe: maximale Tagessumme des Nebelniederschlags. Linke Spalte: statistisches Nebelmodell, mittlere Spalte: Modell nach Bernhofer et al. (2017), rechte Spalte: Differenz (positive Werte für höhere Werte des statistischen Modells). Gültigkeit für den Zeitraum 1967-1986.

2.2.3 Korrektur des Nebelniederschlags

Im bereitgestellten Referenzdatensatz (1961-2015) wurde der darin enthaltene Niederschlagsinput um Nebelniederschläge ergänzt, welche dem ReKIS-Portal entstammen (Bernhofer et al., 2017). Im Rahmen von hydrologischen Wasserhaushaltssimulationen zeigte sich allerdings in den Kammlagen des Erzgebirges, dass mit dem zusätzlichen Input aus dem Nebelniederschlag mitunter keine stimmigen Wasserhaushaltsbilanzen mehr erreicht werden konnten. Wasser, welches ohne Nebelkorrektur zuvor teils gefehlt hatte und eine „Lücke“ in der Bilanz verursachte, war nun in zu großen Mengen vorhanden und konnte weder durch Verdunstung noch Abfluss in ausreichenden Menge aus dem System „abgeführt“ werden. Vor allem eine Abbildung von Niedrigwasserperioden mit geringen Durchflusswerten war damit nicht möglich. Da dieser Effekt nur in einem Bereich oberhalb von ca. 800 m NHN auftrat und sich in allen anderen Gebieten stimmige WHH-Simulationen ergaben, sollte auch weiterhin mit dem Datensatz gearbeitet werden. Die notwendige Weiterentwicklung des Datensatzes zum Nebelniederschlag, beruhend auf Messungen, Analysen und der Ermittlung von physikalisch basierten Ansätzen, kann allerdings nicht innerhalb kurzer Zeitspannen erfolgen. Um dennoch vor Projektabschluss zu einem Ergebnis zu gelangen, ergab sich die Anforderung zur Verwen-

dung eines relativ einfachen und wenig zeitintensiven Ansatzes zur Reduktion der teilweise sehr hohen Nebelniederschläge in den Kammlagen. In Abstimmung mit dem Referat 51 (Klima) sowie dem Referat 44 (Oberflächenwasser, Wasserrahmenrichtlinie) des LfULG wurde das Verfahren festgelegt.

Es erfolgte zunächst die Auswahl von geeigneten Pegelgebieten für weitere Untersuchungen. Hierbei zeigte sich, dass kein Pegelgebiet eine mittlere Gebietshöhe von > 900 m NHN aufwies. Da diese Gebietslagen für die Untersuchungen wesentlich waren, wurde entschieden, auf die Teileinzugsgebietsebene überzugehen. Für diese Raumebene konnten in vier Pegelgebieten insgesamt sieben Kopfgebiete mit mittleren Höhen von >900 m NHN ermittelt werden:

- Zwei Teileinzugsgebiete im Pegelgebiet Wiesa
- Ein Teileinzugsgebiet im Pegelgebiet Sachsendgrund
- Drei Teileinzugsgebiete im Pegelgebiet Aue 1
- Ein Teileinzugsgebiet im Pegelgebiet Annaberg 1

Für die Untersuchung erfolgten für die vier genannten Pegelgebiete Wasserhaushaltsberechnungen im Zeitraum 1990 bis 2001 unter Verwendung des Referenzdatensatzes und Nebelniederschlagsinputs. Relevante Ausgabegröße für die sieben Teileinzugsgebiete waren:

- der Grundwasserspeicher GW,
- der Bodenwasserspeicher BW sowie
- die potentielle Verdunstung ETP und reale Verdunstung ETR.

Für letztere wurde die Differenz ermittelt: $ET = ETP - ETR$. Denn während ETP über den Simulationszeitraum keine großen Veränderungen erfährt, ändert sich ETR mit der zunehmenden Wassermenge im System. Anschließend wurde für alle Größen (GW, BW, ET) die Änderung zwischen Anfangszustand (t_1) und Endzustand (t_2) errechnet und aufaddiert.

$$\text{Speicheränderung} = \Delta(GW_{t_2} - GW_{t_1}) + \Delta(BW_{t_2} - BW_{t_1}) + \Delta(ET_{t_2} - ET_{t_1})$$

Die so ermittelte Speicheränderung für jeden der sieben Datenpunkte (Teileinzugsgebiete) über den Simulationszeitraum wurde im Anschluss mit dem dazugehörigen Nebelbeitrag FP ins Verhältnis gesetzt:

$$R = \frac{FP - \text{Speicheränderung}}{FP}$$

Beträgt der Reduktionsfaktor 1, so ergibt sich keine Veränderung des Nebelniederschlags. Ist $R < 1$ folgt daraus eine notwendige Verringerung des Nebelbeitrags gegenüber dem Ausgangsdatensatz, um eine Zunahme der Wassermenge im System zu vermeiden.

Eine Darstellung der resultierenden Datenpaare aus Reduktionsfaktor R und mittlerer Gebietshöhe der Teileinzugsgebiete enthält Abbildung 11. Die daraus abgeleitete lineare Regressionsbeziehung lieferte für Höhen >900 m NHN einen mittleren Reduktionsfaktor, mit welchem die Nebelniederschläge der entsprechenden Rasterzellen im Referenzdatensatz angepasst wurden.

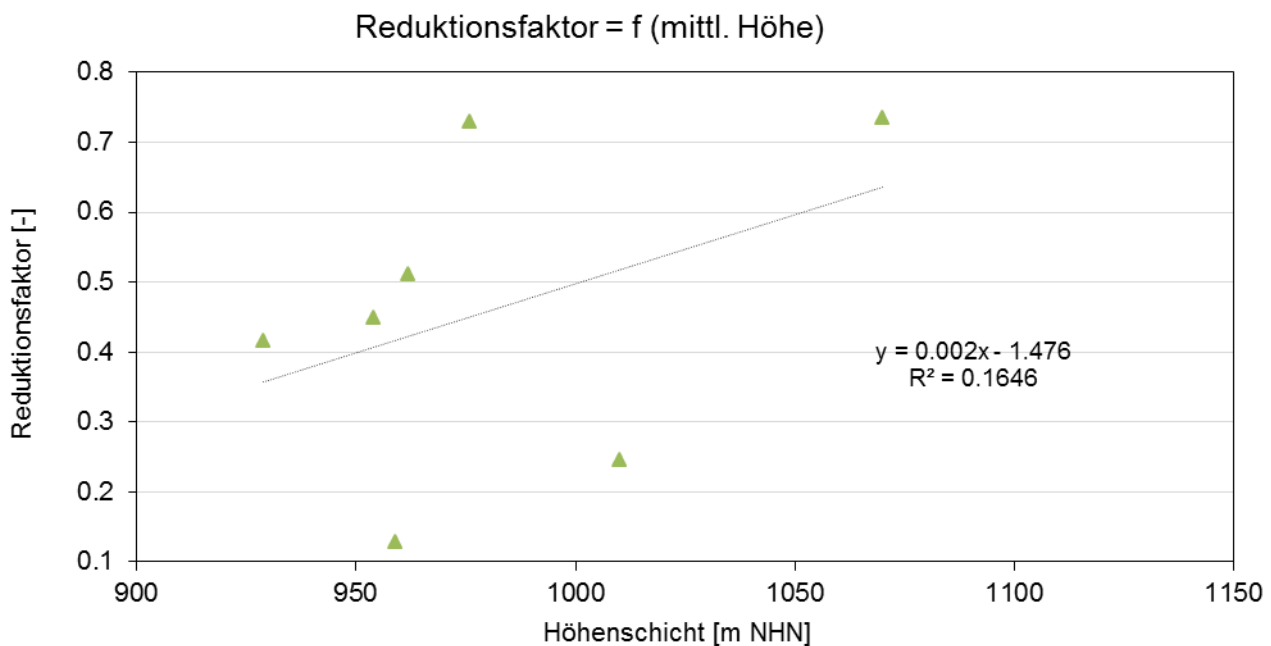


Abbildung 11: Gegenüberstellung von ermittelten Reduktionsfaktoren (Nebelniederschlag) und mittlerer Gebietshöhe für sieben Datenpunkte

Nebelniederschläge < 800 m NHN wurden nicht verändert. Für Nebelbeiträge zwischen 800 – 900 m NHN erfolgte die Ableitung eines mittleren Reduktionsfaktors aus den beiden Kurvenverläufen (<800 m NHN und >900 m NHN), um einen nahtlosen Anschluss zu gewährleisten. Das Ergebnis der Nebelniederschlagsreduktion und der Vergleich mit dem ursprünglichen Datensatz ist in Abbildung 12 zu sehen.

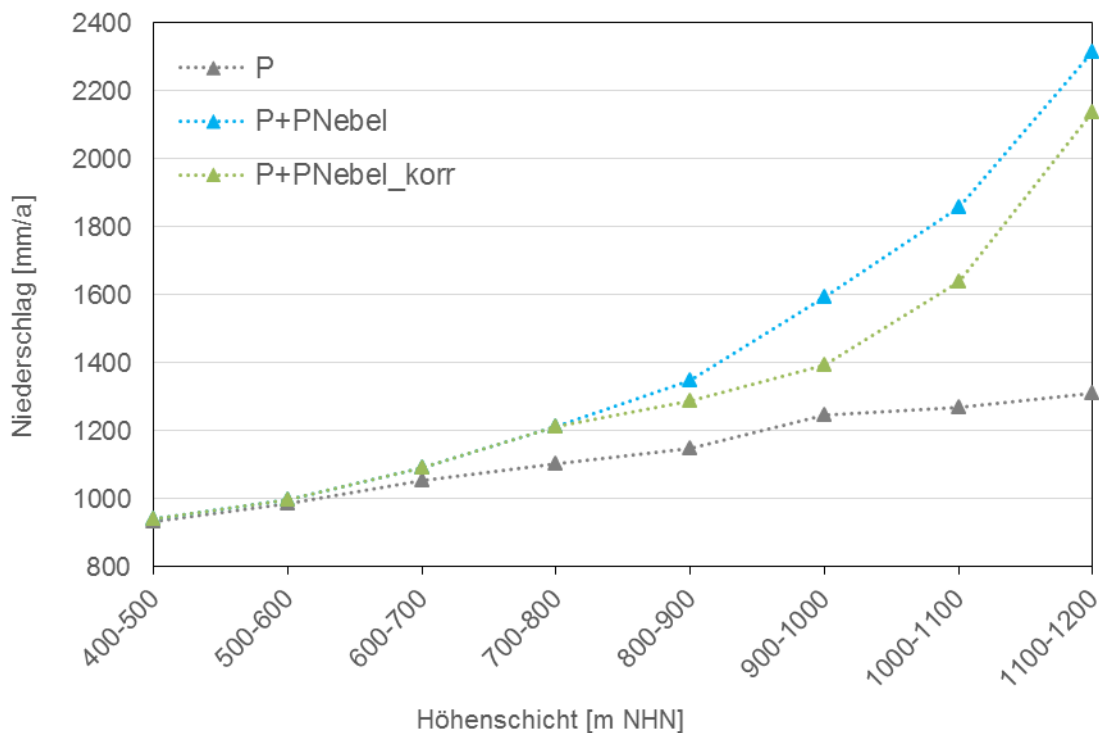


Abbildung 12: Vergleich der mittleren Niederschläge (P, grau), mittleren Niederschläge + Nebelinput (P+PNebel, blau) sowie mittleren Niederschläge + reduziertem Nebelinput (P+PNebel_korr, grün) in Abhängigkeit von der Höhe

Für die Höhenstufen 900-1000 m NHN, 1000-1100 m NHN sowie 1100-1200 m NHN ist eine deutliche Reduktion des Nebelniederschlags von jeweils rund 200 mm/a erkennbar. Bis zu einer Höhe von 1000 m NHN ergibt sich nun ein mittlerer Jahresniederschlag von 1400 mm/a, was als realistisch angesehen werden kann. Für die Höhenstufe 1100-1200 m NHN erscheint der Niederschlagsinput (inkl. Nebel) allerdings immer noch sehr hoch. Da diese Höhenstufe mit ihrem Flächenanteil in Sachsen aber keine Rolle spielt, wurde das Resultat als hinreichend angesehen.

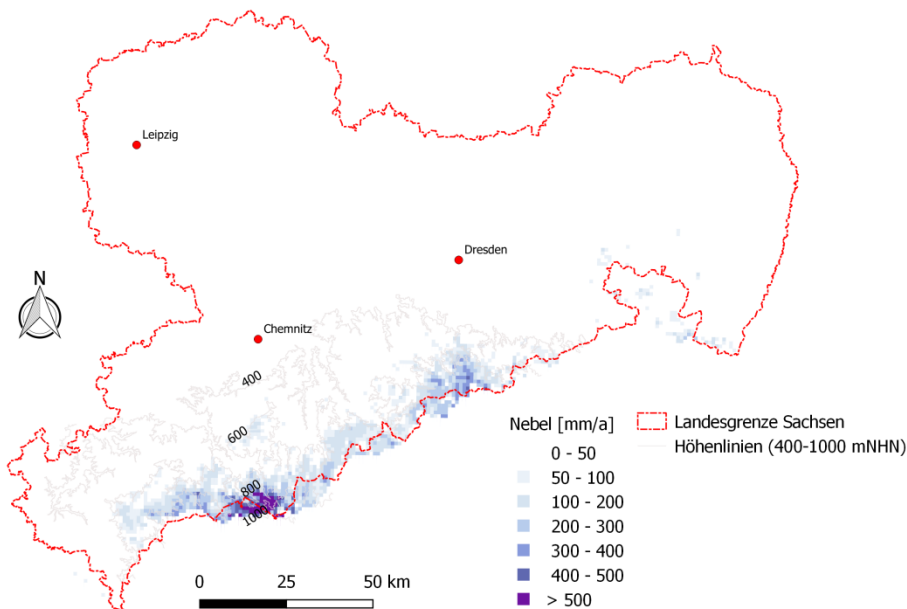


Abbildung 13: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags (1961-2015) inklusive Nebel im Ausgangszustand

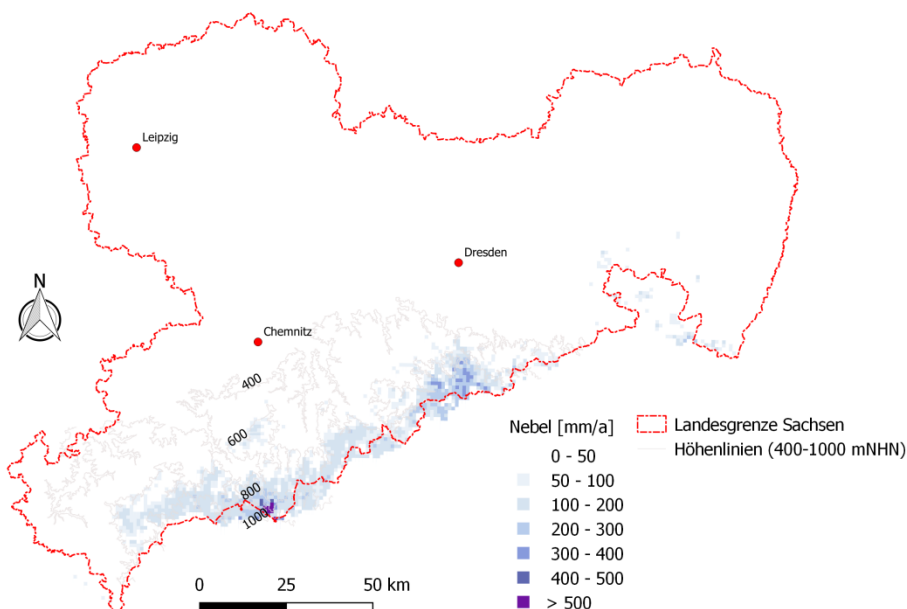


Abbildung 14: Räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags (1961-2015) inklusive angepasstem Nebel

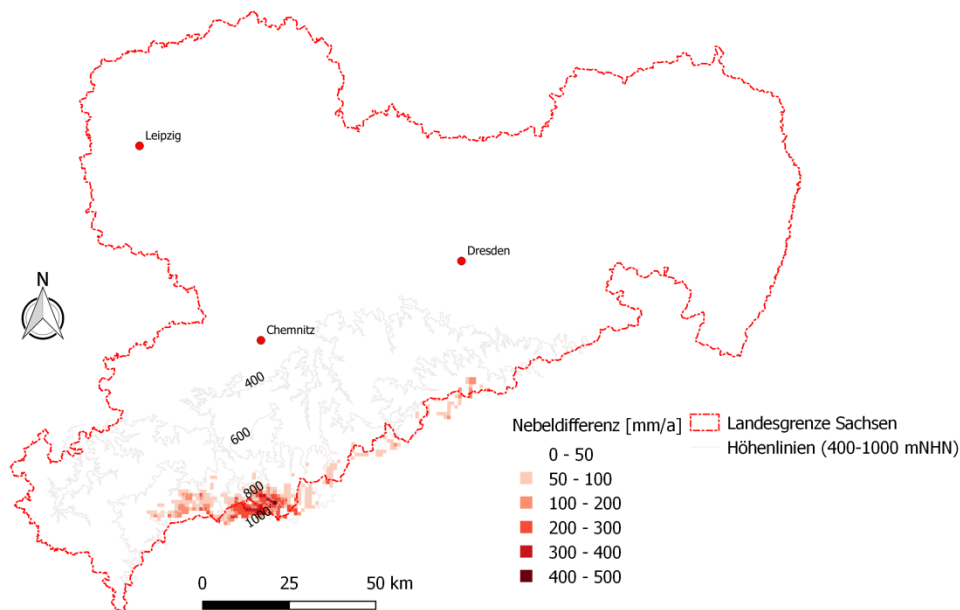


Abbildung 15: Differenz der mittleren unveränderten Nebelniederschläge (1961-2015) abzüglich der angepassten mittleren Nebelwerte in ihrer räumlichen Verteilung

Die Abbildung 13 bis Abbildung 15 verdeutlichen noch einmal die Auswirkungen der Nebelniederschlagsreduktion in ihrer räumlichen Verteilung. Der Effekt beschränkt sich auf den Erzgebirgskamm und kommt vor allem im Gebiet um den Fichtelberg zum Tragen. Er wirkt sich aber in der Mulde auch auf die Unterliegergebiete aus, welchen nun realistische Mengen aus den Oberliegern zufließen. Dies ergaben die abschließenden Untersuchungen.

Es ist anzumerken, dass es sich bei den durchgeführten Arbeiten um ergänzende Punkte handelte, welche nicht Gegenstand des ursprünglichen Projektauftrags waren. Die Notwendigkeit dieser Arbeiten zur Ermittlung von plausiblen Wasserhaushaltsergebnissen wurde dargelegt und mit dem Auftragnehmer abgestimmt. Die Durchführung erfolgte im Austausch gegen die in der Leistungsbeschreibung unter Arbeitspaket 3 angeführten Aufgaben (s. Abschnitt 2.3). Diese waren nicht mehr erforderlich aufgrund einer Änderung im Rahmen der Optimierungsstrategie.

2.2.4 Klimaprojektionen

Für die Modellierung der projizierten hydrologischen Verhältnisse in den sächsischen Einzugsgebieten wurden meteorologische Eingangsdaten benötigt. Hierfür erfolgte die Bereitstellung von acht Klimarealisierungen, welche durch das LfULG, Referat Klima aus einem größeren Ensemble ausgewählt und vom Lehrstuhl für Meteorologie, TU Dresden als interpolierte Rasterdatensätze übergeben wurden. Eine Übersicht der Klimarealisierungen enthält Tabelle 4. Bei den acht ausgewählten Realisierungen handelt es sich um zwei Datensätze, welche dem A1B-Szenario (IPCC, 2007) folgen, sowie um sechs Projektionen, welche den aktuellen RCP-Szenarien (IPCC, 2014) entstammen. Sie decken den Zeitraum von 1961 – 2100 ab und weisen die gleichen meteorologischen Eingangsgrößen auf täglicher Basis wie der Referenzdatensatz (s. Abschnitt 2.2.1) mit Ausnahme des Nebelniederschlags auf. Um bezüglich des Nebels konsistente Bedingungen zwischen dem Referenzdatensatz und den Klimarealisierungen zu schaffen, wurden die Klimadatensätze um die korrigierten und mit dem statistischen Nebelmodell (s. Abschnitt 2.2.2 und Abschnitt 2.2.3) ermittelten Nebelniederschläge ergänzt.

Die räumliche Auflösung beträgt wie beim Referenzdatensatz 1 x 1 km Rasterweite, da die stationsbasierten meteorologischen Größen mit demselben Regionalisierungsverfahren am Lehrstuhl für Meteorologie, TU Dresden interpoliert wurden.

Zum Hintergrund der Klimaszenarien sowie den zugrundeliegenden Modellen soll an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung gegeben werden, welche Spekat & Enke (2020, S. 7) entnommen ist. „Methodisch wird zur Abschätzung des Klimawandels eine Kette verschiedener Modelle eingesetzt. Plausible Annahmen zu zukünftigen Veränderungen von Bevölkerung, Wirtschaft, Technologie und anderen fundamentalen Steuerfaktoren werden in Form von Szenarios entwickelt. Die Steuerfaktoren nehmen Einfluss auf den Ausstoß und den atmosphärischen Bestand von Treibhausgasen. Diese wiederum dienen als Antrieb für globale Klimamodelle, die großräumige Klimaentwicklungen auf Grund des sich ändernden Anteils an Treibhausgasen simulieren.“ Im Rahmen des Ensembles kamen verschiedene Globalmodelle wie zum Beispiel das Community Land Model (CLM) und das MPI-ESM mit ECHAM 5 (EH5) bzw. ECHAM 6 (EH6) zum Einsatz. Weitergehende Informationen zu CLM können Lawrence et al. (2018) sowie der Internetseite <https://www.cesm.ucar.edu/models/clm/> entnommen werden. Details zum Modell MPI-ESM finden sich in Giorgetta et al. (2013) sowie unter <https://mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>.

Den globalen Klimamodellen schließen sich in der Modellkette regionale Klimamodelle an. Damit lassen sich räumlich grob aufgelöste Ergebnisse globaler Klimamodelle auf die regionale Ebene mit höherer Auflösung übertragen. Als regionales Klimamodell kam bei allen Klimaprojektionen die statistische Regionalisierungsmethode WEREX VI zum Einsatz, welche in Spekat & Enke (2020) umfänglich beschrieben ist.

Die modellinternen Bezeichnungen der acht Klimarealisierungen innerhalb von WEREX VI finden sich in Tabelle 4, Spalte 2. Für die weitere Nutzung im KliWES-Projekt wurde auf die jeweiligen Modellbezeichnungen verzichtet und eine neue Kennung vergeben, welche in Tabelle 4, Spalte 1 aufgeführt ist.

Tabelle 4: Liste der acht im KliWES-Projekt verwendeten Klimarealisierungen

Kennung im KliWES-Projekt	Kennung in WEREX VI	(RCP-) Szenario
A1B_1	CLMr1A1B	A1B
A1B_2	EH5r1A1B	A1B
RCP2.6_1	EH6r2R26	R2.6
RCP2.6_2	EH6r1R26	R2.6
RCP4.5_1	EH6r1R45	R4.5
RCP4.5_2	EH6r2R45	R4.5
RCP8.5_1	Ca2r1R85	R8.5
RCP8.5_2	EH6r2R85	R8.5

Ganz allgemein lässt sich sagen, dass die ausgewählten Realisierungen den oberen Rand (RCP-Szenario 8.5), einen mittleren Verlauf (RCP-Szenario 4.5) sowie den unteren Rand (RCP-Szenario 2.6) der klimatischen Entwicklung widerspiegeln. Damit stellt das RCP-Szenario 8.5 die ungünstigste Entwicklung dar. Die beiden zusätzlichen A1B-Datensätze sollen vor allem dem Vergleich mit den neuen RCP-Szenarien dienen, da sie bisher häufig in der Betrachtung zukünftiger klimatischer Entwicklungen verwendet wurden.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die acht Klimarealisierungen zwischen 1961 – 2015 nicht den Beobachtungsdaten entsprechen. Bei jedem Projektionsdatensatz handelt es sich um einen zufallsgenerierten Lauf der meteorologischen Größen, welcher nur hinsichtlich seiner statistischen Kennwerte mit den Beobachtungsdaten vergleichbar ist. Dies zeigen exemplarisch die beiden nachfolgenden Abbildungen, welche

die projizierte Entwicklung des Niederschlags (Abbildung 16) und der mittleren Temperatur (Abbildung 17) als 20jähriges gleitendes Mittel der Klimarealisierungen und der Beobachtungsdaten (Ist-Zustand) für Sachsen gegenüberstellen. Die Werte des Ist-Zustands weichen dabei in ihrem Verlauf teils deutlich erkennbar von den verschiedenen Realisierungen ab. Und während sie sich bei der Temperatur zwischen 1961 - 2015 den Realisierungen annähern, nimmt beim Niederschlag die Abweichung teilweise zu.

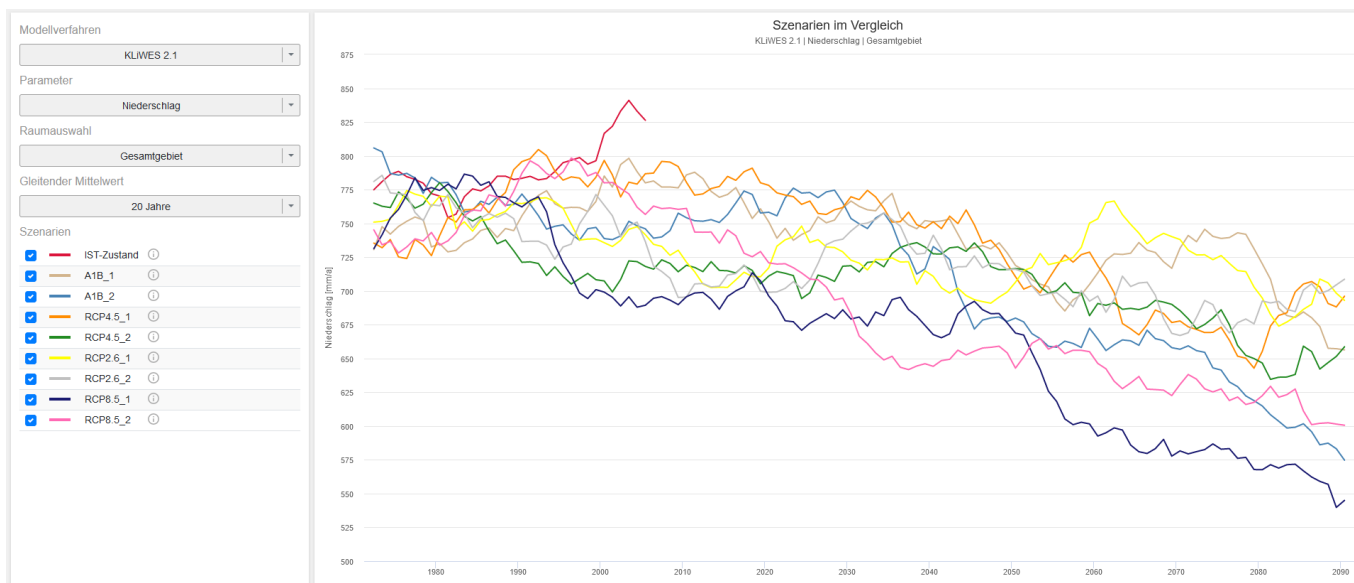


Abbildung 16: Entwicklung des projizierten Niederschlags der Klimarealisierungen als 20jähriges gleitendes Mittel in Sachsen und Gegenüberstellung mit den Beobachtungsdaten (Quelle: neue KLIWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen)

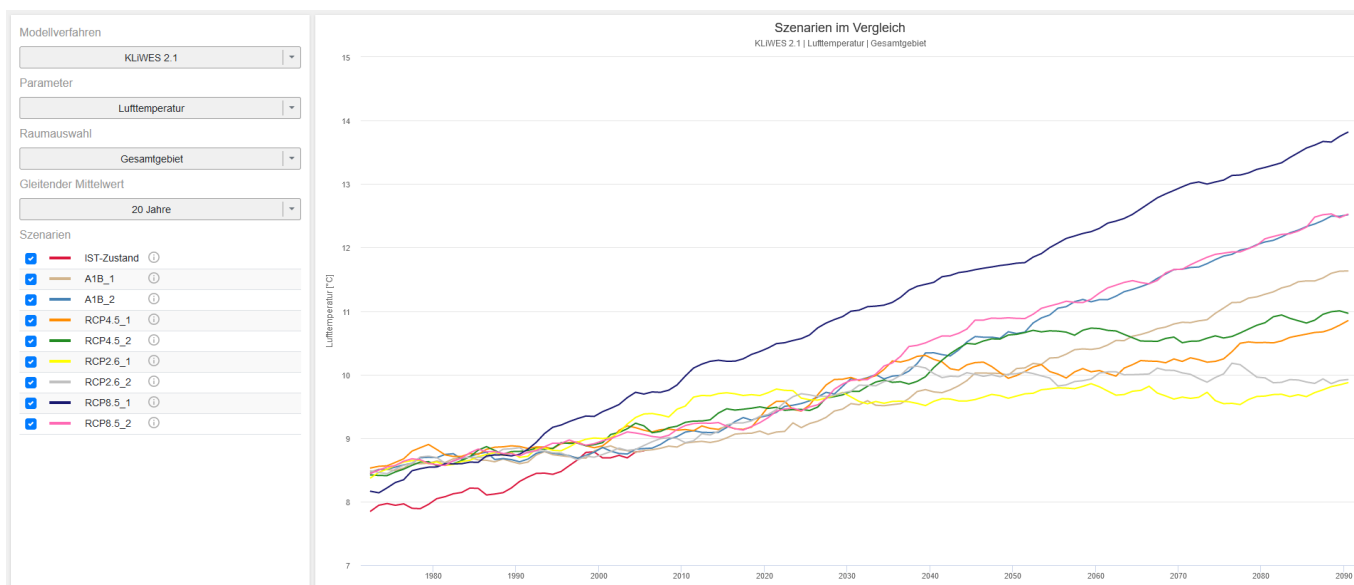


Abbildung 17: Entwicklung der projizierten mittleren Temperatur der Klimarealisierungen als 20jähriges gleitendes Mittel in Sachsen und Gegenüberstellung mit den Beobachtungsdaten (Quelle: neue KLIWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen)

Ganz allgemein weisen alle acht Realisierungen bis 2100 eine Abnahme der jährlichen Niederschläge auf (s. Abbildung 16), wobei die Stärke des Trends teils sehr unterschiedlich ist und insgesamt eine große Spannweite gegen Ende des 21. Jahrhunderts vorliegt.

Gleichzeitig zeigt die projizierte Entwicklung der Lufttemperatur (Abbildung 17) einen Temperaturanstieg, welcher in allen acht Klimarealisierungen auftritt. Die Realisierung RCP8.5_1 weist dabei die deutlichste Zunahme der mittleren Lufttemperatur und gleichzeitig den stärksten Rückgang des Niederschlags bis 2100 auf (Abbildung 17, dunkelblaue Linie). Die Klimaprojektion RCP2.6_1 hat hingegen einen vergleichsweise moderaten Rückgang des Niederschlags und die geringste Zunahme der mittleren Lufttemperatur (Abbildung 16 und Abbildung 17, orange Linie).

Umfangreichere Informationen und Hintergründe zu den Klimamodellen, den verwendeten Datengrundlagen sowie den Klimarealisierungen können Spekat & Enke (2020) entnommen werden. Weitergehende Angaben zu den Klimaszenarien finden sich im 4. und 5. IPCC-Report (IPCC, 2007 und 2014).

2.2.5 Meteorologischer Eingangsdatensatz zur Simulation der Trockenjahre 2018 und 2019

Der für den Ist-Zustand verwendete meteorologische Eingangsdatensatz (Referenzdatensatz) deckt gegenwärtig den Zeitraum zwischen 1961 – 2015. Um den Einfluss und die Auswirkungen der Trockenjahre zwischen 2018 und 2019 für vier ausgewählte Einzugsgebiete simulieren zu können, war daher die Erstellung eines zusätzlichen Eingangsdatensatzes erforderlich. Grundlage dieses Datensatzes sind im ReKiS-Portal verfügbare tägliche Beobachtungsdaten im Zeitraum zwischen dem 01.01.2010 bis zum 28.02.2020 von Niederschlags- und Klimastationen. Das Jahr 2020 konnte nicht vollständig berücksichtigt werden, da zum Zeitpunkt der Datenabfrage und Bearbeitung dieses Projektabschnitts die Beobachtungsdaten im ReKiS-Portal nur bis zum 28.02.2020 vorlagen.

Für jedes der vier Pegelinzugsgebiete (Jänkendorf 1, Markersbach 1, Merzdorf, Schönau) wurden mehrere Niederschlagsstationen sowie jeweils mindestens zwei Klimastation herangezogen. Eine Übersichtskarte zur Lage der Pegelinzugsgebiete sowie der Niederschlags- und Klimastationen enthält Abbildung 18.

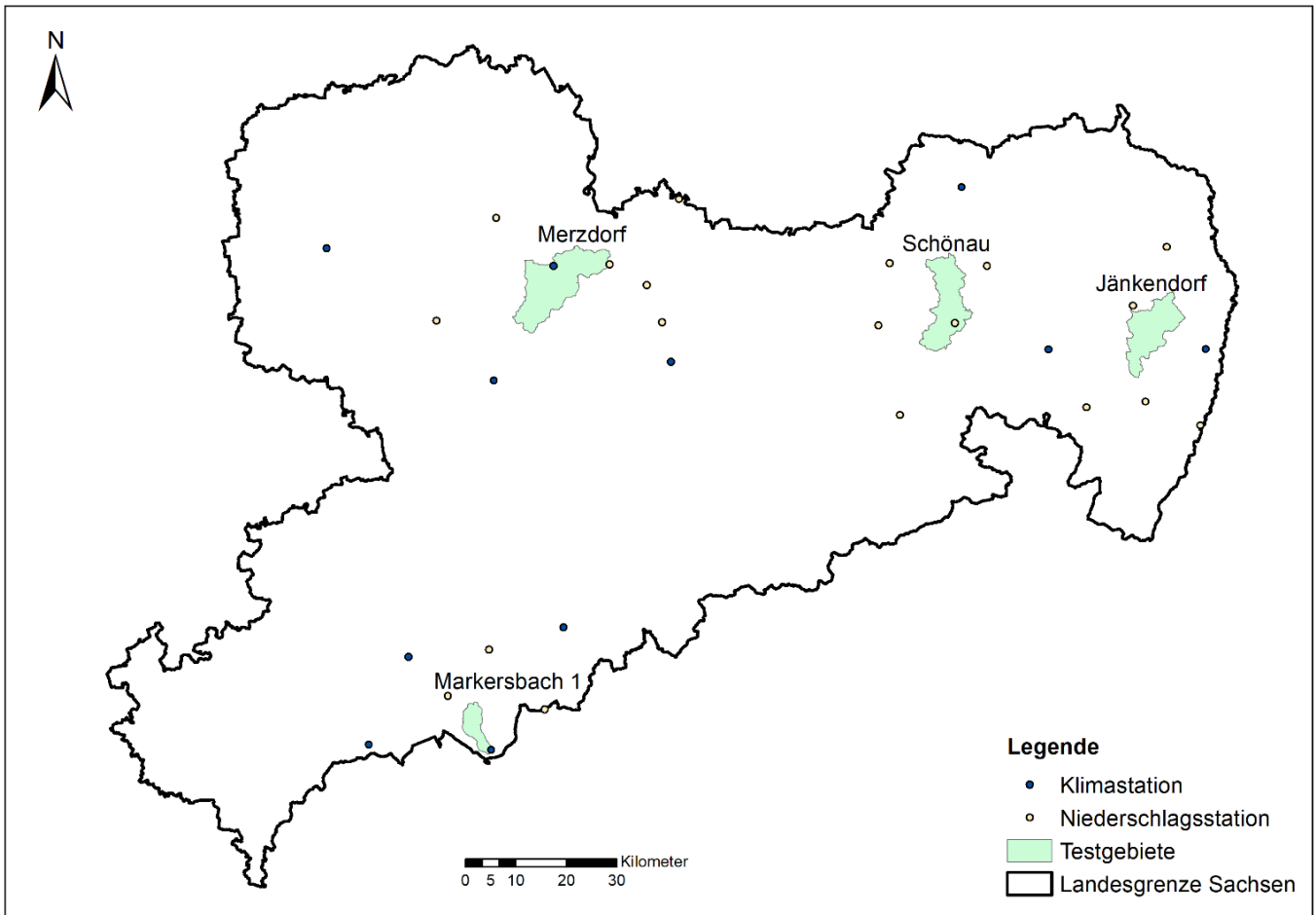


Abbildung 18: Übersichtskarte zur Lage von Klima- und Niederschlagsstationen in Sachsen sowie vier Testeinzugsgebieten für die Modellierung der Trockenjahre von 2018 – 2020

Die Datenreihen wurden auf Vollständigkeit bzw. Lücken geprüft. Das Vorliegen aller notwendigen meteorologischen Größen für die Wasserhaushaltsmodellierung war hierbei von Bedeutung. Abgesehen von der Größe Windgeschwindigkeit war dies gegeben. Einige Klimastationen wiesen allerdings keine Messwerte der Windgeschwindigkeiten auf. Es musste daher sichergestellt werden, dass in jedem Einzugsgebiet mindestens eine Klimastation Windgeschwindigkeiten erfasste und diese Reihen durchgängig sind. In den Gebieten Markersbach 1 mit vier Klimastationen und Merzdorf mit drei Klimastationen traten diesbezüglich keine Lücken aus. Für die Gebiete Schönau mit zwei Klimastationen (Hoyerswerda und Kubschütz-Bautzen) sowie Jänkendorf 1 mit ebenfalls zwei Klimastationen (Görlitz und Kubschütz-Bautzen) mussten hingegen die Messreihen der Windgeschwindigkeit aufbereitet werden, da an der Station Kubschütz-Bautzen kein Wind gemessen wird. Um die Lücken in den Winddaten der Stationen Hoyerswerda und Görlitz zu schließen, wurden diese mit der Klimastation Dresden-Klotzsche zunächst auf Korrelationen überprüft. Im Ergebnis zeigte sich eine hohe Korrelation von 0,84 zwischen Dresden-Klotzsche und Hoyerswerda sowie von 0,83 zwischen Dresden-Klotzsche und Görlitz. Ausgehend von diesen hohen Korrelationen, welche einen deutlichen Zusammenhang zwischen den Windmessreihen ausdrücken, erfolgte eine Regressionsanalyse. Mithilfe der ermittelten Regressionsgleichungen wurden die Lücken in den Winddaten der Klimastationen Hoyerswerda und Görlitz geschlossen.

Darüber hinaus war für alle vorhandenen Windgeschwindigkeiten die Umrechnungen von 10m auf 2m über der Geländeoberfläche notwendig. Hierfür wurde folgende Gleichung verwendet:

$$FF(2m) = FF(10m) * \frac{\ln\left(\frac{2m - d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10m - d}{z_0}\right)}$$

Für die Rauigkeitslänge z_0 wurde entsprechend der DWD-Messtandards ein Wert von 0,02m eingesetzt, für die Verdrängungshöhe d ein Wert von 0,1m.

Im Gegensatz zum Referenzdatensatz und den Klimaprojektionen erfolgte für die Stationsdaten keine räumliche Interpolation auf Raster. Stattdessen wurden die Stationsreihen mithilfe des im Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO implementierten Quadrantenverfahrens räumlich interpoliert. Genauere Ausführungen zum Verfahren können der Dokumentation zu ArcEGMO entnommen werden. Die Interpolation der meteorologischen Daten erfolgte jeweils für die einem Testgebiet zugeordneten Stationen, so dass im Ergebnis vier Datensätze vorlagen.

Um die Güte der erzeugten Datensätze und die Pass- bzw. Anschlussfähigkeit zum Referenzdatensatz zu prüfen, wurden die meteorologischen Eingangsdatensätze der Testgebiete für den Zeitraum von 2010 bis 2015 dem Referenzdatensatz gegenübergestellt. Die Eingangsdatensätze der Testgebiete werden nachfolgend als REKIS-Daten bezeichnet.

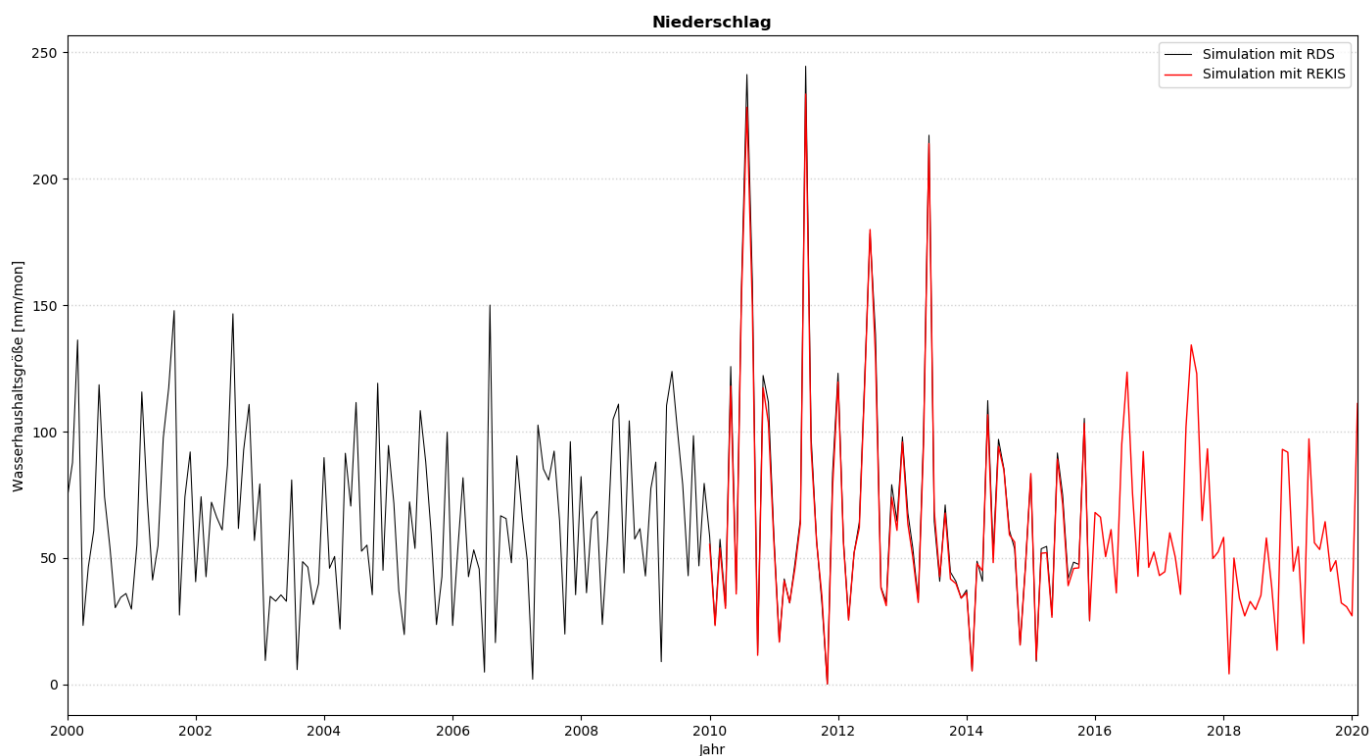


Abbildung 19: Gegenüberstellung des monatlichen Gebietsniederschlags von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz (rote Linie) für das Einzugsgebiet Jänkendorf 1

Für die drei Einzugsgebiete Merzdorf, Jänkendorf 1 und Schönau konnte eine gute Passfähigkeit zum Referenzdatensatz festgestellt werden. Dies zeigen exemplarisch die Abbildung 19 für das Gebiet Jänkendorf 1 und Abbildung 20 für das Gebiet Merzdorf. Darin ist der Verlauf der monatlichen Gebietsniederschläge im Zeitraum zwischen 2000 und 2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS) und dem Datensatz basierend auf den Stationswerten aus dem ReKiS-Portal dargestellt. Um Überlappungszeitraum von 2010 bis 2015 sind die Verläufe der beiden Kurven nahezu deckungsgleich.

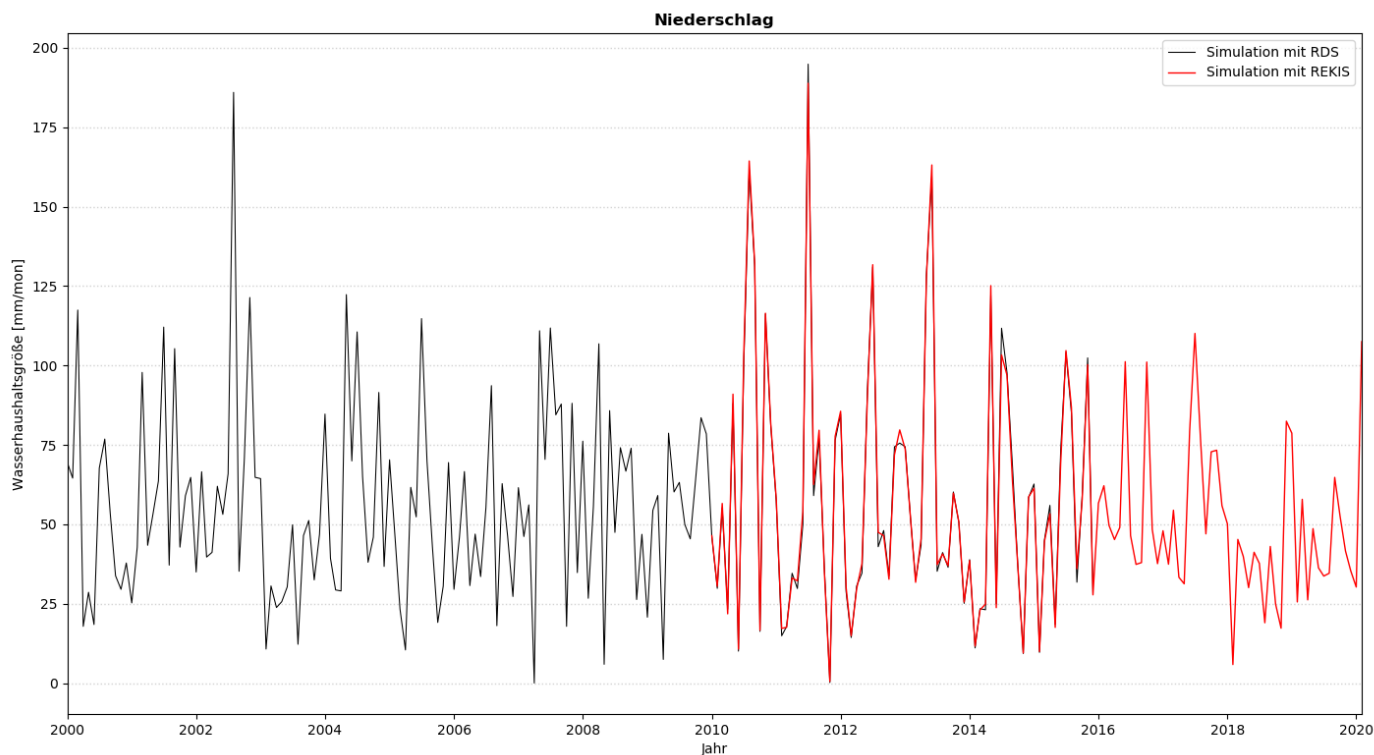


Abbildung 20: Gegenüberstellung des Gebietsniederschlags von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz (rote Linie) für das Einzugsgebiet Merzdorf

Auffallend sind die hohen Niederschlagsmengen im Zeitraum von 2010 bis 2014 (s. Abbildung 19 und Abbildung 20) mit Werten von teils > 125 mm/mon. Für Jänkendorf 1 ergibt sich für den genannten Zeitraum ein durchschnittlicher jährlicher Niederschlag von ca. 850 mm/a. Das Jahr 2010 weist dabei mit rund 1000 mm/a einen besonders hohen Wert auf, wie auch die räumliche Verteilung des Niederschlags im Gebiet Jänkendorf 1 zeigt (s. Abbildung 22). Die Jahre 2015 bis 2017 liegen im Mittel (ca. 770 mm/a) nur leicht darunter. Demgegenüber sind die Jahre 2018 mit rund 480 mm/a und 2019 mit etwa 630 mm/a Jahresniederschlag sehr trocken, wie in Abbildung 21 dargestellt ist.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch im Einzugsgebiet Merzdorf (s. Abbildung 20), in welchem die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge von 2010 bis 2014 rund 730 mm/a und in den Jahren von 2015 bis 2017 ca. 690 mm/a beträgt. Im Gegensatz dazu weisen die Jahre 2018 und 2019 einen Jahresniederschlag von rund 440 mm/a bzw. 550 mm/a auf.

Der Verlauf des monatlichen Gebietsniederschlags von 2000-2020, basierend auf dem Referenzdatensatz und dem REKIS-Datensatz, im Einzugsgebiet Schönau ist mit den Gebieten Jänkendorf 1 und Merzdorf vergleichbar.

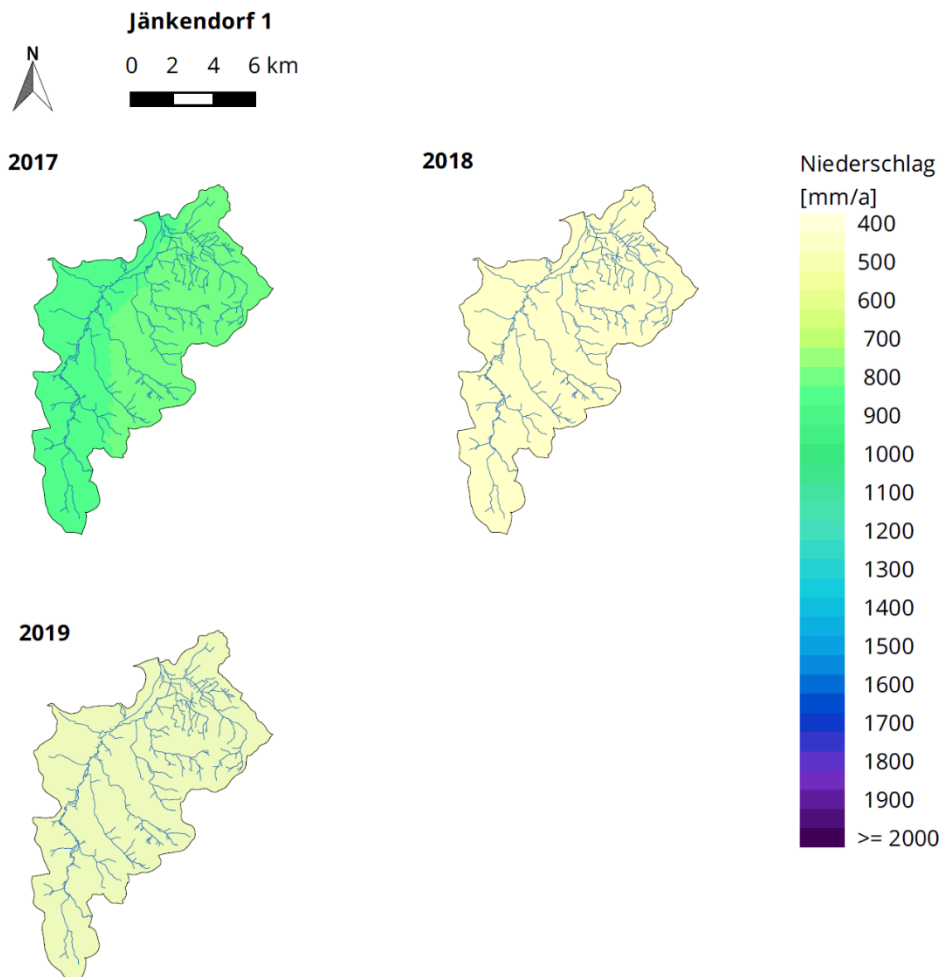


Abbildung 21: Räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags der Jahre 2017, 2018 und 2019 basierend auf dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Jänkendorf 1

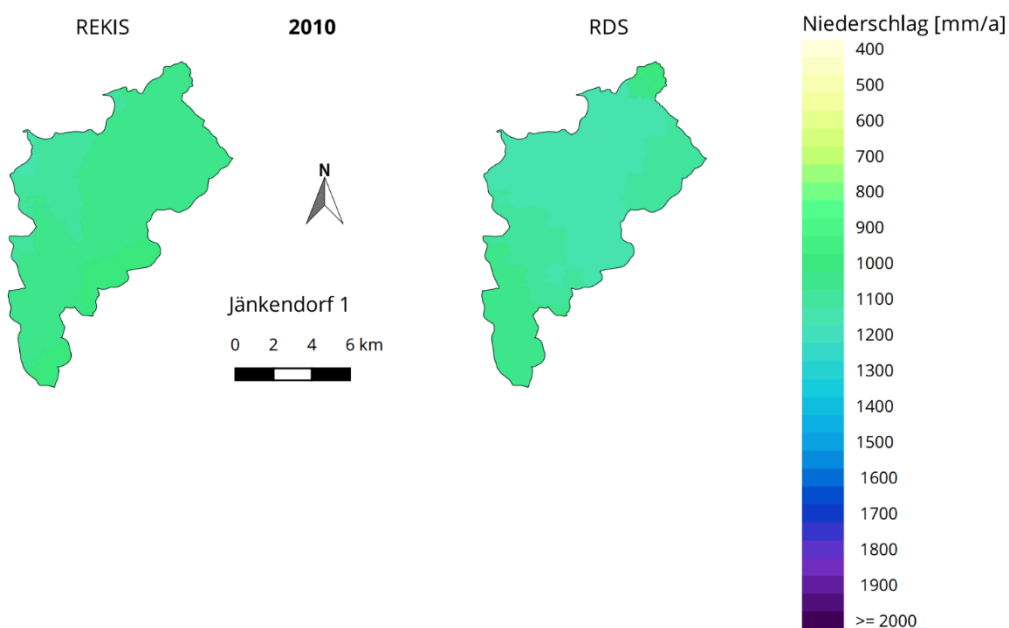


Abbildung 22: Gegenüberstellung der räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags 2010 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, rechts) und dem REKIS-Datensatz (links) für das Einzugsgebiet Jänkendorf 1

Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Gebietsniederschläge weisen beide Datensätze (RDS und REKIS) eine große Ähnlichkeit auf, wie in Abbildung 22 am Beispiel des Jahresniederschlags von 2010 für das Einzugsgebiet Jänkendorf 1 zu sehen ist. Dies trifft auch auf die weiteren Jahre von 2011 bis 2015 zu. Das gleiche Bild zeigt sich in den beiden Gebieten Merzdorf und Schönau.

Da in allen drei Einzugsgebieten keine starke orographische Gliederung vorliegt, konnten ausgehend von den Stationsdaten aus dem ReKiS-Portal und der modellinternen Interpolationsmethode plausible Datensätze für die Gebiete generiert werden. Damit waren sie für den Einsatz in der hydrologischen Modellierung der Trockenjahre 2018 und 2019 geeignet.

Anders stellt sich die Situation im orographisch stark gegliederten Einzugsgebiet Markersbach 1 dar, welches unmittelbar am Fichtelberg liegt (s. Abbildung 18). Während der Verlauf der monatlichen Gebietsniederschläge im Zeitraum zwischen 2000 und 2020 für den RDS und den REKIS-Datensatz noch eine gute Passfähigkeit andeutet (s. Abbildung 23), zeigen sich in der räumlichen Verteilung der Gebietsniederschläge am Beispiel des Jahres 2010 große Unterschiede (s. Abbildung 24).

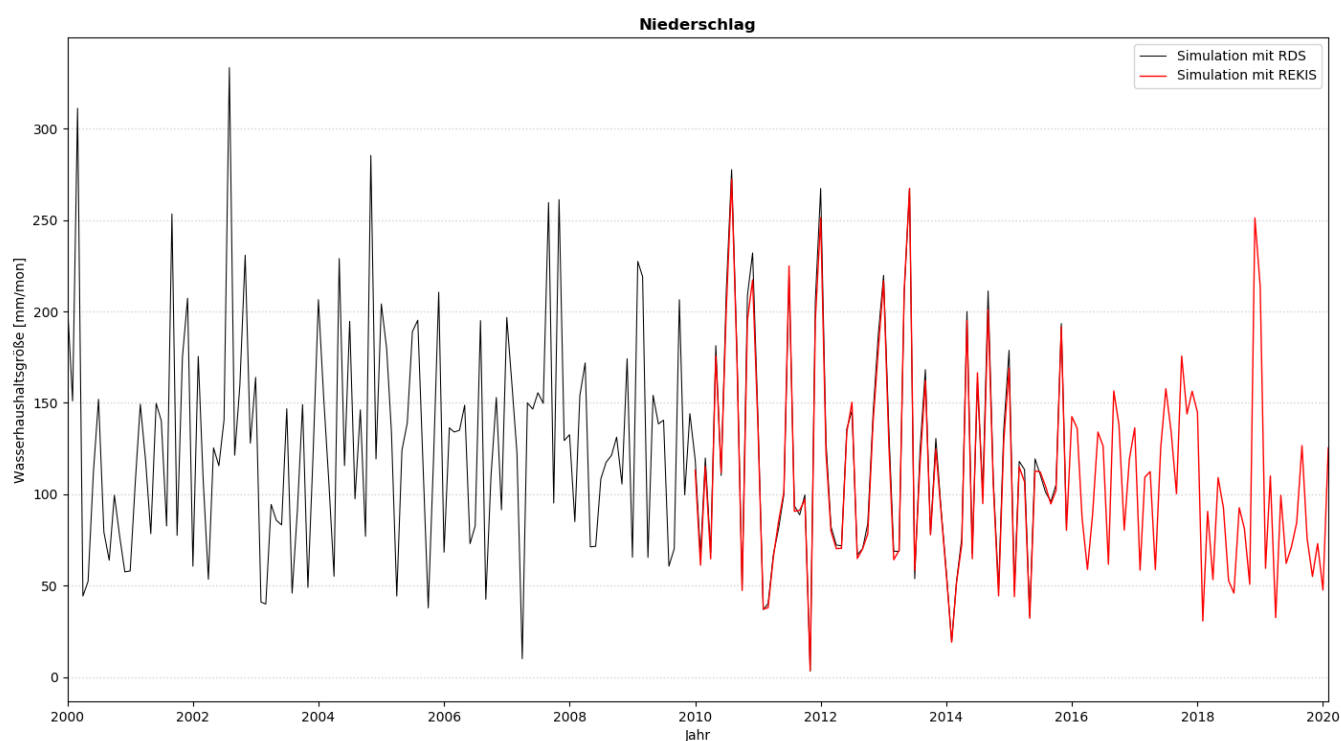


Abbildung 23: Gegenüberstellung des Gebietsniederschlags von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz (rote Linie) für das Einzugsgebiet Markersbach 1

Das ausgeprägte Nord-Süd-Gefälle des Einzugsgebietes spiegelt sich auch in der Niederschlagsverteilung basierend auf dem RDS wider. Der Jahresniederschlag, beispielhaft für das Jahr 2010 dargestellt (Abbildung 24, rechte Darstellung), liegt im nördlichen Einzugsgebietsteil im Bereich von 1100 mm/a bis 1200 mm/a. In den Kammlagen treten hingegen über 2000 mm/a auf. Demgegenüber weisen die Jahresniederschläge entsprechend des ReKiS-Datensatzes eine deutlich geringe Spannweite zwischen 1500 mm/a bis über 2000 mm/a auf. Das Nord-Süd-Gefälle ist in der räumlichen Verteilung der Niederschläge im ReKiS-Datensatzes zwar erkennbar (Abbildung 24, linke Darstellung), fällt aber gegenüber dem Referenzdatensatz geringer aus.

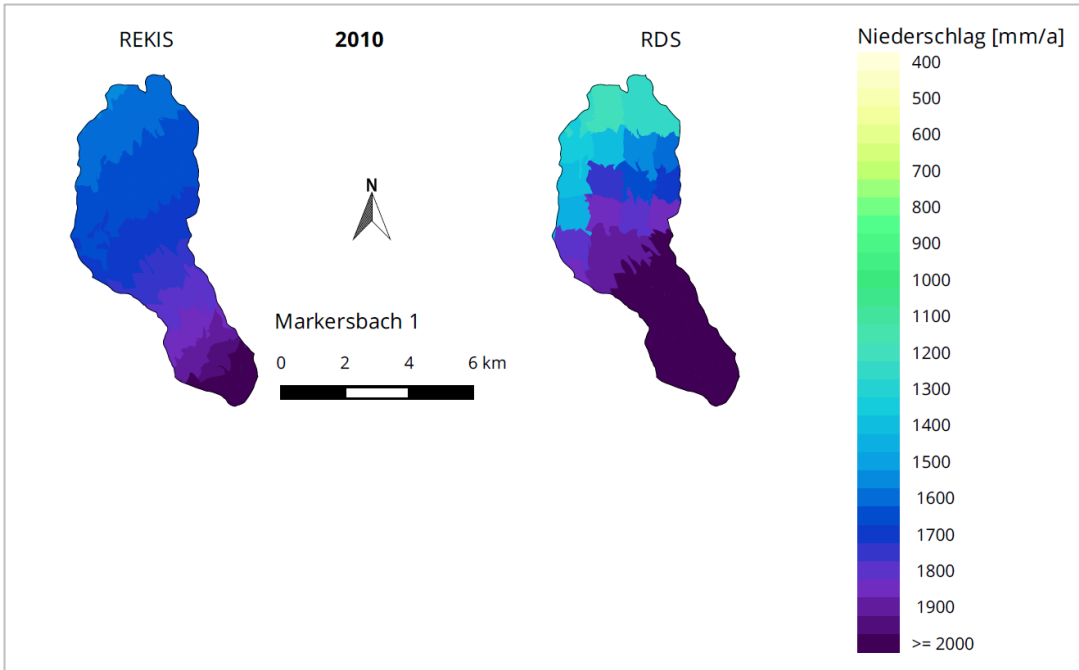


Abbildung 24: Gegenüberstellung der räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags 2010 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, rechts) und dem REKIS-Datensatz (links) für das Einzugsgebiet Markersbach 1

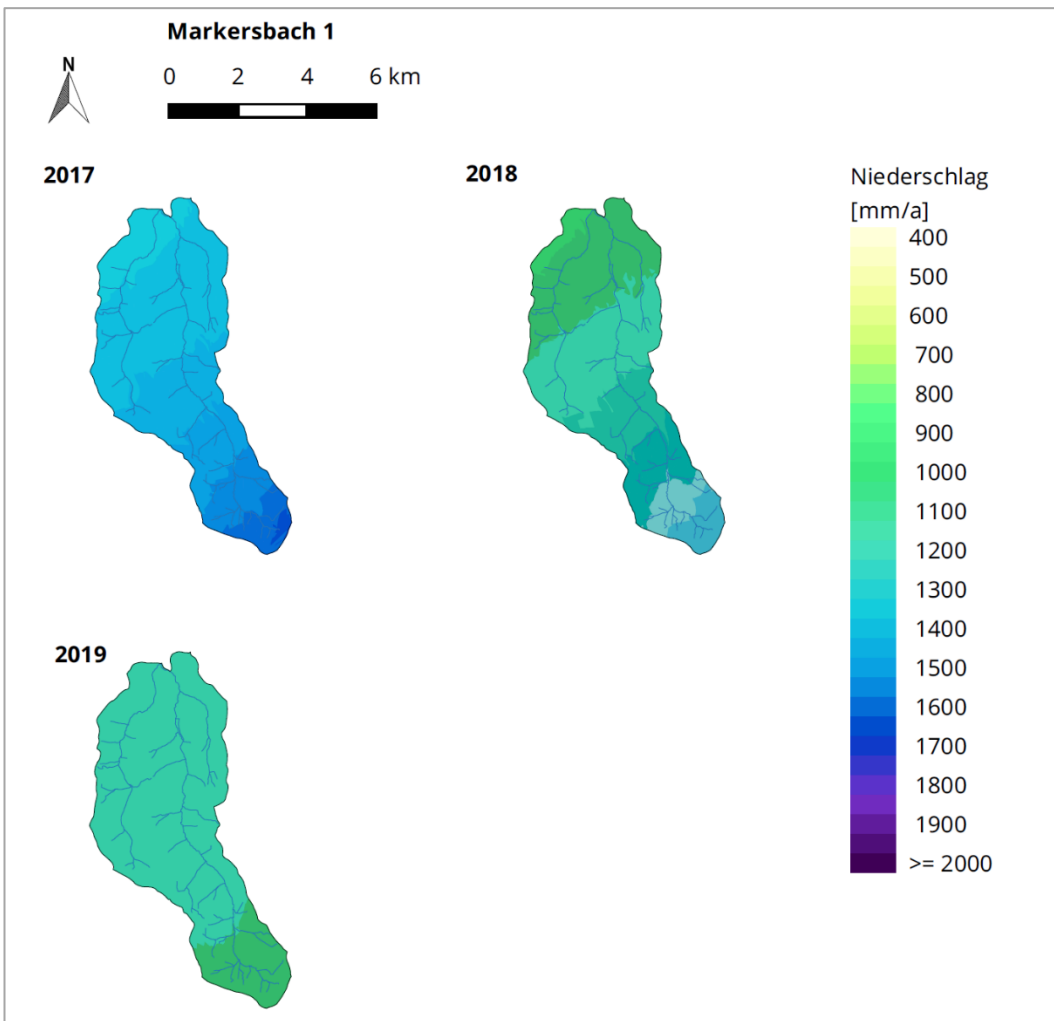


Abbildung 25: Räumlichen Verteilung des Gebietsniederschlags der Jahre 2017, 2018 und 2019 basierend auf dem REKIS-Datensatz für das Einzugsgebiet Markersbach 1

Der Rückgang der Niederschläge in den Jahren 2018 und 2019 gegenüber den Werten des Zeitraums von 2010 bis 2017 ist, ebenso wie in den anderen drei Einzugsgebieten, deutlich zu erkennen (s. Abbildung 23 und Abbildung 25).

Im Ergebnis zeigen sich für die zeitlichen Verläufe des Gebietsmittelniederschlags für Markersbach 1 zwar vergleichbare Werte, wie Abbildung 23 zeigt, die räumliche Verteilung weicht aber deutlich voneinander ab. Damit bietet der Datensatz, basierend auf den Stationswerten aus dem ReKiS-Portal und der modellintern durchgeführten Interpolation der Stationswerte, nur eine begrenzte Aussage für die Bewertung der Trockenjahre 2018 und 2019. An dieser Stelle wäre ein komplexeres Regionalisierungsverfahren für die Stationsreihen notwendig, um den orographischen Gegebenheiten Rechnung zu tragen. Dies war im Rahmen des Projekts nicht vorgesehen.

2.2.6 Durchflussdaten

Um für die spätere Modellkalibrierung und -validierung möglichst aktuelle Durchflussdaten zu nutzen, wurde u.a. auf das iDA-Portal des LfULG zurückgegriffen. Ebenso erfolgten Datenbereitstellungen unmittelbar durch das LfULG und die Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV). Für drei Pegel außerhalb der sächsischen Landesgrenze im Flussgebiet der Weißen Elster lieferte das Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) die erforderlichen Daten. Zusätzlich wurden auch bereits am IHM, TU Dresden vorhandene Durchflussreihen verwendet. Diese endeten im Allgemeinen im Jahr 2010 bzw. 2014 und wurden bis 2015 verlängert, sofern aktuelle Daten an den betreffenden Pegeln vorlagen.

Alle Durchflussdaten wurden einer umfangreichen Prüfung auf Lücken und Datenfehler unter Berücksichtigung von eventuell vorliegenden Einflussfaktoren (soweit bekannt) unterzogen. Beeinflussungen wurden erfasst und im Falle des Rothschnöberger Stollns an den Pegeln Munzig und Garsebach herausgerechnet.

Weiterführende Erläuterungen hinsichtlich des Einsatzes zu Kalibrierungs- bzw. Validierungszwecken sind in Kapitel 3.4 zu finden.

2.3 DIFGA-Analysen

Entsprechend der Aufgabenstellung war eine Aktualisierung der DIFGA-Analysen sowie eine Regionalisierung von ermittelten DIFGA-Parametern durchzuführen. Bei den DIFGA-Analysen handelt es sich um eine Methode zur Ableitung von verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen aus Beobachtungsdaten von Niederschlag und Durchfluss. Zusätzlich werden drei Parameter zur Beschreibung der Grundwasserspeicher ermittelt. Hierbei handelt es sich um die Speicherkonstanten eines schnellen und eines langsamen Grundwasserspeichers (CG1 und CG2) sowie um einen Aufteilungsparameter (SG1grenz), welcher den Zufluss zum jeweiligen Speicher bestimmt. Eine genaue Beschreibung des Verfahrens kann Schwarze (1985) sowie Schwarze et al. (2014) entnommen werden.

Analysen des Wasserhaushalts sächsischer Einzugsgebiete wurden bereits im vorangegangenen KiWES-Projektteil mit dem DIFGA-Verfahren erstellt. In der aktuellen Studie wurde auf dieselben 114 Pegel Einzugsgebiete, auch als DIFGA-Gebiet bezeichnet, zurückgegriffen. Die Analyse erfolgte für den Zeitraum von 1961 – 2015. Im Zusammenhang mit der Aufbereitung der Eingangsdaten für die DIFGA-Analysen wurde der korrigierte Niederschlag um den Nebelniederschlag ergänzt, um konsistente Eingangsdaten für DIFGA-Analysen und Wasserhaushaltsberechnungen für den Beobachtungszeitraum zu erlangen und damit eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Genauere Angaben zum Nebelniederschlag finden sich im Abschnitt 2.2.2 sowie 2.2.3.

Das bisherige DIFGA-Gebiet Cranzahl wurde nach eingehenden Untersuchungen der Durchflussreihe und dem festgestellten großen Einfluss des Hanggrabens, welcher nicht herausgerechnet werden konnte, aus dem Datenbestand genommen. Demgegenüber konnte mit dem Pegelgebiet Ortrand (Gewässer: Pulsnitz) ein neues DIFGA-Gebiet hinzugefügt werden. Die Gesamtanzahl der DIFGA-Gebiete liegt damit weiterhin bei 114 Einzugsgebieten.

Die erstellten DIFGA-Analysen dienen im KliWES-Projekt u.a. als Grundlage für die Optimierung der ArcEGMO-Modelle (s. Abschnitt 4.1). Zudem wurden die ermittelten Speicherparameter der Grundwasserspeicher (CG1, CG2 und SG1grenz) im Anschluss in die Wasserhaushaltsmodelle übernommen. Um diese neben den DIFGA-Gebieten auch für alle weiteren Flächen Sachsens zu erhalten, wurden im vorangegangenen KliWES-Projektteil Regressionsbeziehungen erstellt und die drei genannten Parameter auf alle weiteren Teileinzugsgebiete Sachsens übertragen. Die Methodik ist in Schwarze et al. (2014) ausführlich beschrieben. Dasselbe Vorgehen war auch im Rahmen der aktuellen KliWES-Studie geplant. Hierfür sollten die bereits bestehenden Regressionsbeziehungen überarbeitet werden, um die aktualisierten Datengrundlagen einzubinden. Im Ergebnis wäre jedem sächsischen Teileinzugsgebiet ein Parametersatz zur Beschreibung der Grundwasserspeicher zugeordnet worden. Letztlich wurde in der Bearbeitung ein davon abweichendes Vorgehen gewählt, welches nachfolgend beschrieben wird.

Ausgangspunkt war das Vorliegen eines großen Bestandes an bereits durchgeführten DIFGA-Analysen am IHM, TU Dresden. Im Ergebnis jeder DIFGA-Analyse lagen u.a. die Parameter CG1, CG2 und SG1grenz vor. Zudem war jedem untersuchten Pegelinzugsgebiet im Rahmen der Analyse eine dominierende Lithofaziesseinheit (auch hydrogeologische Einheit) zugeordnet worden. Grundlage für die Zuordnung der Lithofaziesseinheiten waren die HÜK200 sowie die GÜK200 (s. Abschnitt 2.1.4). Eine Übersicht der hydrogeologischen Einheiten enthält Tabelle 32. Für einen Großteil der hydrogeologischen Einheiten lagen jeweils etwa 20 bis 30 DIFGA-Analysen mit den abgeleiteten Parametern CG1, CG2 und SG1grenz vor. Diese stammten aus dem KliWES-Projekt sowie aus anderen am IHM, TU Dresden durchgeführten Studien.

Basierend auf den umfangreich vorliegenden DIFGA-Analysen erfolgte nun eine Auswertung der drei Parameter CG1, CG2 und SG1grenz für jede hydrogeologische Einheit. Hierbei wurden der Median, der minimale sowie der maximale Wert für CG1, CG2 und SG1grenz ermittelt. Die Verknüpfung der Lithofaziesseinheiten mit den Medianwerten von CG1, CG2 und SG1grenz ermöglichte die Integration dieser Parameter in die HÜK200/GÜK200. Mit der Einbindung in die Geodatengrundlage gingen die Parameter direkt mit in die Hydrotopbildung ein (s. Kapitel 3). Somit war eine Regionalisierung der Grundwasserspeicherparameter für die Teileinzugsgebietsebene nicht mehr erforderlich.

2.4 Festlegung Bearbeitungsraum

Der bisher verwendete Bearbeitungsraum (siehe Abbildung 26) wurde im Rahmen der aktuellen Projektphase angepasst. In den vorangegangenen, bis Ende 2016 abgeschlossenen KliWES-Teilprojekten fanden der Elbeschlauch im Bereich der Überflutungsflächen des Hochwassers von 2002 sowie die vom Braunkohlenbergbau beeinflussten Gebiete im Leipziger Raum und Lausitzer Raum bislang keine Berücksichtigung. Einerseits konnten die dort ablaufenden Prozesse mit der damals verfügbaren ArcEGMO-Version (Stand 2013) teilweise nicht abgebildet werden. Dies betraf z.B. die Wechselwirkungen von Grund- und Oberflächenwasser auf Auenflächen. Andererseits sind umfangreiche Standortinformationen und komplexe Grundwasser-Strömungsmodelle erforderlich, um die relevanten Wasserhaushaltsprozesse in den stark anthropogen beeinflussten Gebieten der Tagebaureviere in der Lausitz und im Großraum Leipzig hinreichend belastbar abbilden zu können. Daraus resultierten „Lücken“ im bisherigen Ergebnisraum, welche in Abbildung 26 als weiße Flächen dargestellt sind.

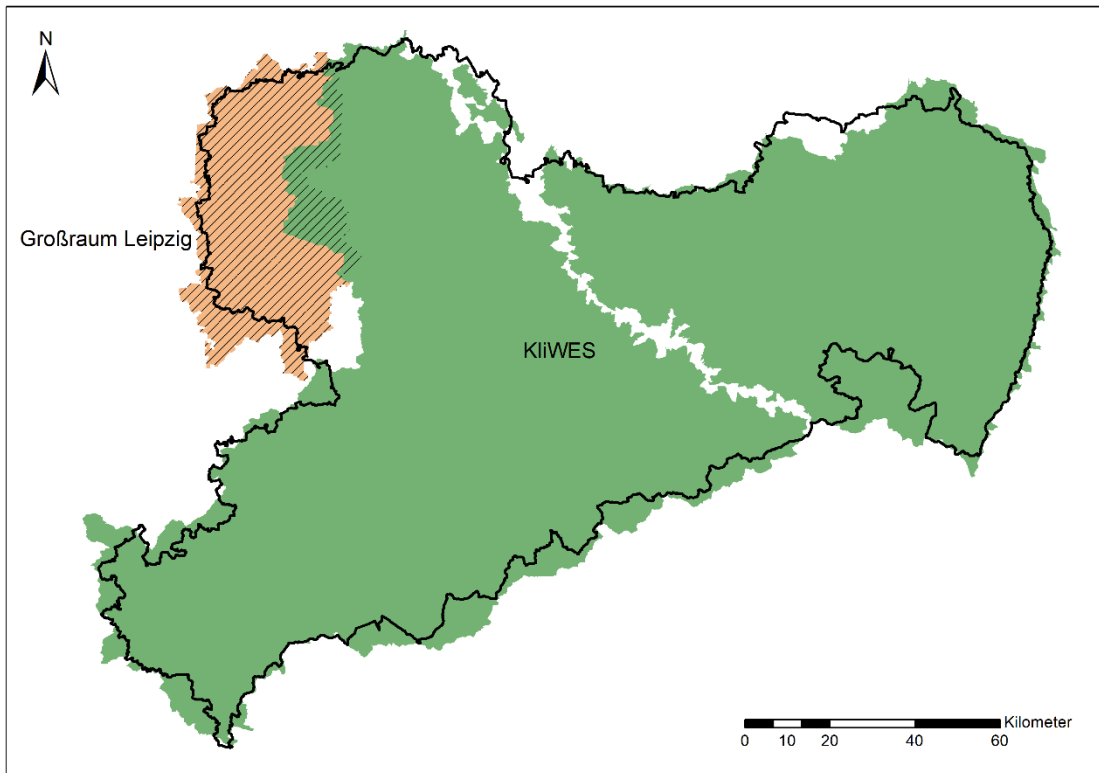


Abbildung 26: Karte zum bisherigen Bearbeitungsraum im Projekt KiiWES (dunkelgrüne Fläche) und der Landesgrenze Sachsens (schwarze Linie)

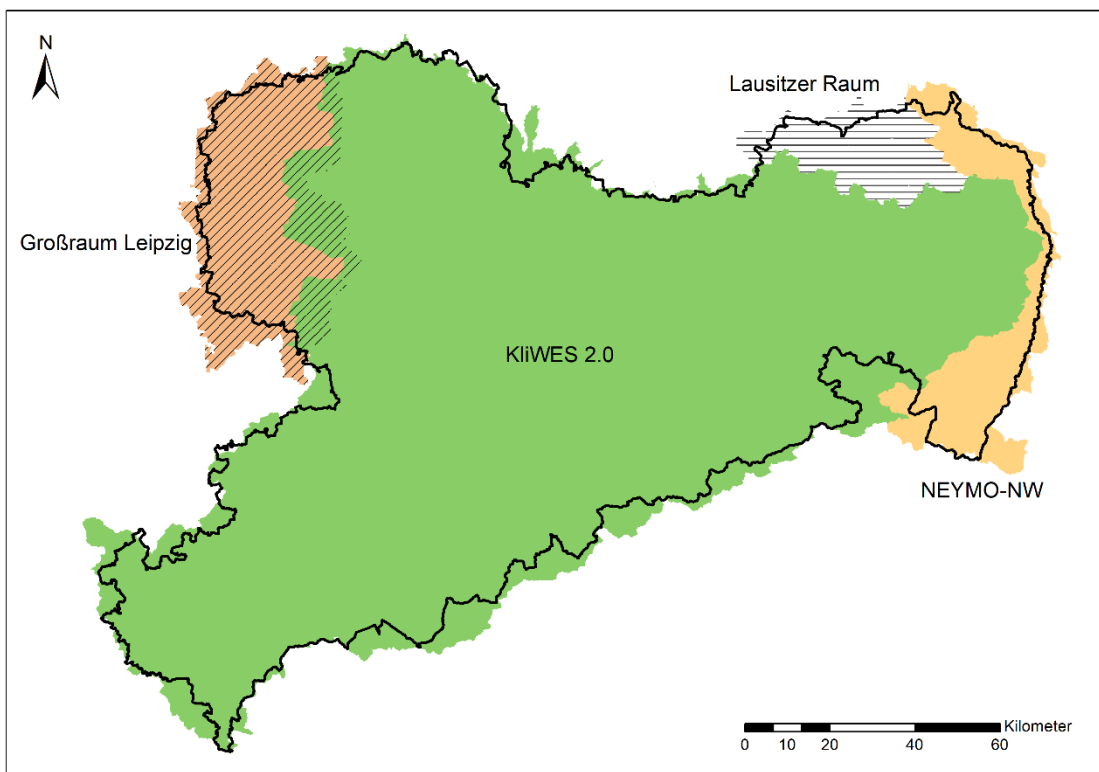


Abbildung 27: Karte zum aktualisierten KiiWES-2.0-Bearbeitungsraum (hellgrüne Fläche), weiteren Projektbereichen (gelbe Fläche (NEYMO-NW); braune Fläche (Großraum Leipzig)) und der Landesgrenze Sachsens (schwarze Linie)

Für den Großraum Leipzig konnte im Rahmen eines LfULG-Projekts durch IGBW Leipzig und BAH Berlin (Mansel et al., 2019) eine regionalspezifische Wasserhaushaltsmodellierung realisiert werden. Im Anschluss erfolgte die Übernahme der Ergebnisse in das Wasserhaushaltsportal Sachsen. Der Ergebnisraum dieses Projekts ist in Abbildung 26 als braune Fläche gekennzeichnet. Der tatsächliche Bearbeitungsraum war etwas größer und ist durch die schwarz schraffierte Fläche zu erkennen. Hierdurch gab es eine gewünschte Überlappung mit dem KliWES-Raum, welche in Abbildung 26 die grüne Fläche mit schwarzer Schraffur verdeutlicht.

Die Grenze dieser Projektbearbeitungsräume im Leipziger Gebiet muss aus methodischen und inhaltlichen Gründen vorerst beibehalten werden. Die bisher noch bestehende Lücke zwischen diesen beiden Räumen im südlichen Randbereich des Leipziger Gebietes wurde nun durch eine Erweiterung des derzeitigen KliWES-Bearbeitungsraumes geschlossen. Dies zeigt Abbildung 27.

Für das Flusseinzugsgebiet der Lausitzer Neiße erfolgten die Wasserhaushaltsberechnungen im Rahmen des international (EU) konzipierten NEYMO-NW-Projekts am LfULG. Da hierfür ebenfalls das Modell ArcEGMO verwendet wurde, sind somit auch für die sächsischen Gebietsteile des Flusseinzugsgebietes der Lausitzer Neiße weitestgehend konsistente Ergebnisse zu erwarten, welche mit in die KliWES-Anwendung des Wasserhaushaltsportals Sachsen integriert werden sollen. Aufgrund der Verwendung desselben Modells mit möglichst den gleichen Ansätzen und ähnlichen Datengrundlagen wurde hier ein Überlappungsbereich als nicht notwendig erachtet. Die Übergabe der Daten und Ergebnisse aus dem NEYMO-NW-Projekt an IHM, TU Dresden erfolgte bereits. Die Integration in das Wasserhaushaltsportal wird angestrebt.

Für das Lausitzer Tagebaurevier wird eine ähnliche Lösung wie im Leipziger Raum angestrebt, mit einer eigenständigen Modelllösung und der anschließenden Übernahme der Ergebnisse in das Wasserhaushaltsportal. Hierzu wurde eine Ausgrenzung des vom Braunkohlentagebau beeinflussten Gebietes in der Lausitz vorgenommen, welches in Abbildung 27 als gelbe Fläche mit schwarzer Schraffur dargestellt ist. Die Informationen zur Ausgrenzung des Tagebaureviers stammen aus zwei verschiedenen Datengrundlagen. Zum einen handelte es sich um die BK50 (s. Kapitel 2.1.2), in welcher anthropogen beeinflusste Böden ausgewiesen werden, und zum anderen um Karten aus dem Geodatenportal der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV). Das Kartenmaterial enthält Informationen zu den Bereichen, in denen die Bergaufsicht durch die LMBV beendet wurde und den geotechnischen Sperrbereichen. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die durch den Braunkohlentagebau beeinflussten Gebiete ziehen.

3 Hydrotopbildung und Modellaufbau

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. Die bisher verwendete Hydrotopstruktur stammt aus dem Jahr 2012 (Schwarze et al., 2012). Im Zuge der KliWES-Fortschreibung erfolgte ein Neuaufbau der Hydrotopstruktur aufgrund der umfangreich aktualisierten Geodatenbasis (s. Abschnitt 2.1).

Vergleiche zwischen den alten und den aktualisierten Datengrundlagen zeigten teils erhebliche Abweichungen auf, sowohl inhaltlich als auch in den räumlichen Strukturen, wie in Hauffe et al. (2019) dargelegt wird. Exemplarisch soll hier die Überlagerung der aktuellen Bodenkarte BK50 mit der alten Hydrotopstruktur auf Basis der BKkonz für das Testgebiet Schönau in Abbildung 28 gezeigt werden. In einem Großteil der Hydrotope befindet sich mehr als ein Bodenpolygon. Damit war die Integration der neuen Datengrundlagen in die vorhandene Hydrotopstruktur nicht sinnvoll und sehr zeitaufwändig. Aufgrund dessen erfolgte für den aktuellen Bearbeitungsraum des KliWES-Fortschreibungs-Projektes eine erneute Hydrotopbildung u.a. mit Bezug zur aktuellen Bodenkarte BK50.

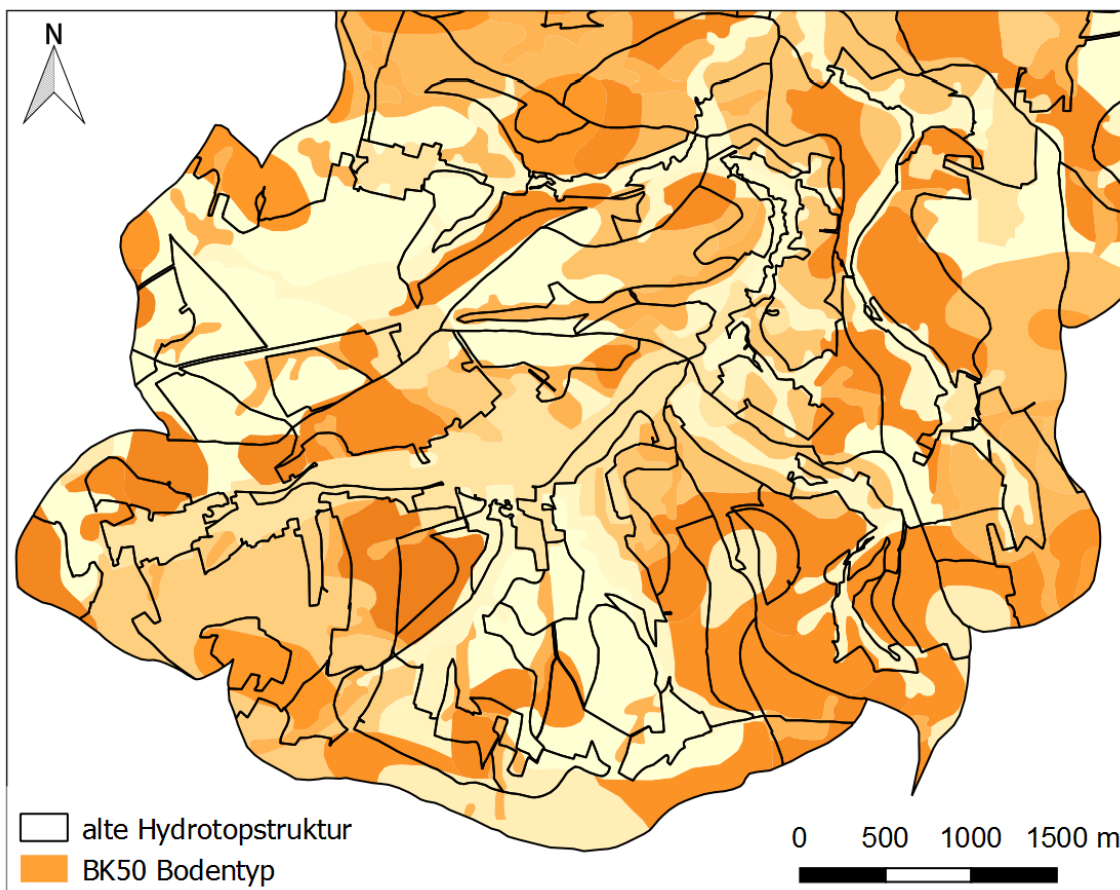


Abbildung 28: Ausschnitt aus dem Testgebiet Schönau (südlicher Teil) mit Überlagerung der aktuellen Bodenkarte BK50 und der bisherigen Hydrotopstruktur auf Basis der BKkonz

Da mehr Datengrundlagen als zuvor in die Bildung der Hydrotope eingingen, wurde deren Verschneidung sowie die sinnvolle Attributierung der entstandenen Hydrotope untersucht. Im Folgenden wird die Hydrotopbildung schrittweise erläutert, wobei der Fokus auf den methodischen Unterschieden bzw. Weiterentwicklungen gegenüber der alten Version liegt.

Die Bildung der Hydrotope basierte auf vier Datengrundlagen:

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

Letztere kam hinzu, da für die Modellierung von Auenflächen in ArcEGMO (s. Abschnitt 3.2) eine Anbindung der Lithofazieseinheit je Hydrotop anstatt je Teilgebiet benötigt wurde. Die separate Ausweisung der Auenflächen erfolgte mithilfe von Informationen aus dem Landcover-Datensatz für Auenbereiche (s. Abschnitt 2.1.3).

Durch die Verschneidung der Datengrundlagen im Rahmen der Hydrotopbildung entstanden einerseits Kleinstflächen. Andererseits ergaben sich in Gebieten mit überwiegend grob aufgelösten Datengrundlagen aber auch vergleichsweise große Hydrotope von mehreren Quadratkilometern. Diese entstanden überwiegend in Einzugsgebietsteilen auf tschechischer Seite. Die dort vorliegenden Höhenunterschiede innerhalb der Hydrotopgrenzen konnten nicht gut abgebildet werden. Um dem entgegenzuwirken, erfolgte in den Gebirgsregionen (> 600 m NHN) eine Berücksichtigung des digitalen Geländemodells. Aus diesem wurden Isolinien mit Abständen von 50 Höhenmetern abgeleitet und bei der Verschneidung der einzelnen Datengrundlagen hinzugezogen.

Die Vielzahl von Kleinstflächen resultierte wiederum vor allem aus der hohen Auflösung der Landnutzung. Daher war eine anschließende Generalisierung erforderlich, welche immer eine Abwägung zwischen möglichst genauer Abbildung der realen Verhältnisse, vorhandener Geodatenbasis und der benötigten Modellrechenzeiten darstellt. Dieser Kompromiss spiegelt sich in der Festlegung einer Mindestgröße der Hydrotope wider, für welche nochmals Untersuchungen anhand des Testgebietes Schönau durchgeführt wie auch bereits vorliegende Betrachtungen aus einer früheren Projektphase herangezogen wurden.

In Schwarze et al. (2012) erfolgten Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Mindestgröße auf die Rechenzeit von ArcEGMO für ehemalige Testgebiete im Einzugsgebiet der Spree. Betrachtet wurde eine Simulationsdauer von 45 Jahren. Wie zu erwarten, erhöht sich die Rechenzeit von ArcEGMO bei abnehmender Mindestgröße der Hydrotope (s. Abbildung 29). Außerdem ist erkennbar, dass sich die Rechenzeiten für die Mindestgrößen von 10.000 m², 100.000 m² und 250.000 m² kaum unterschieden. Dies sprach bei gleichzeitiger Betrachtung von Tabelle 5 für eine durchschnittliche Mindestgröße von höchstens 10.000 m². Bei Überschreitung dieser Grenze geht die höhere Auflösung der neuen Datengrundlage weitestgehend verloren. Gleichzeitig verringert sich die Rechenzeit von ArcEGMO aber nur minimal.

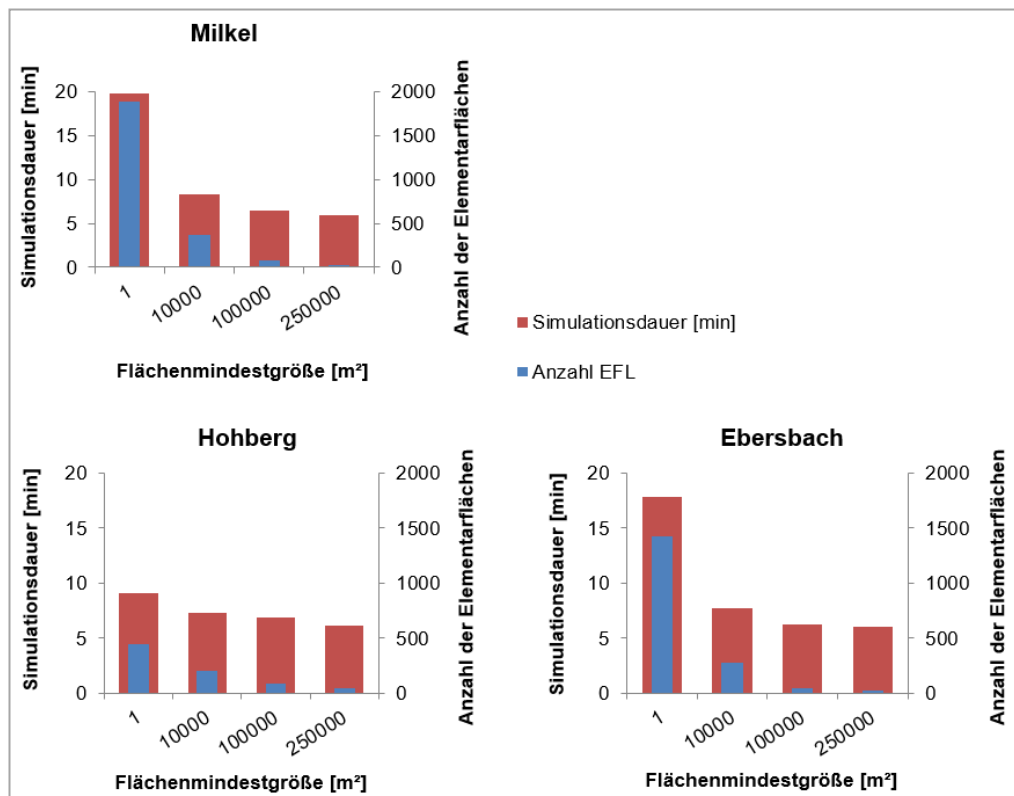


Abbildung 29: Abhängigkeit der Rechenzeit von ArcEGMO (hier für 45 Simulationsjahre) und der Anzahl der Hydrotope bei verschiedenen Mindestgrößen (entnommen aus Schwarze et al., 2012)

Ausgehend von dieser Untersuchung wurden Hydrotope mit verschiedenen Mindestgrößen (< 100.000 m²) für das Testgebiet Schönau (s. Tabelle 5) erstellt, um einen Eindruck von der zu erwartenden Hydrotopanzahl zu erhalten. Durch die Nutzung der neuen, detaillierteren Datengrundlagen sowie die Verwendung von weiteren Daten-Layern bei der Hydrotopbildung ergab sich im Gegensatz zur bisherigen Methode eine deutlich größere Hydrotopanzahl. Tabelle 5 zeigt die jeweilige Hydrotopanzahl bei Festlegung von drei verschiedenen Mindestgrößen – von 100 m² bis 100.000 m². Das Testgebiet Schönau wies in der bisherigen Hydrotopstruktur 259 Hydrotope auf. Demgegenüber ergaben sich mit der aktualisierten Datengrundlage insgesamt 282 Hydrotope bei einer Mindestgröße von 100.000 m².

Tabelle 5: Anzahl und mittlere Größe der Hydrotope im Testgebiet Schönau in Abhängigkeit verschiedener Mindestgrößen, Vergleich von bisheriger und neuer Hydrotopstruktur

Hydrotopstruktur	Mindestgröße [m ²]	Anzahl Hydrotope in Schönau	mittlere Größe [m x m]
Bisher	> 100.000	259	639 x 639
mit neuer Datengrundlage	ohne	10139	101 x 101
	> 100	9038	107 x 107
	> 1000	6608	125 x 125
	> 10.000	2024	227 x 227
	> 100.000	282	608 x 608

Für die verschiedenen Varianten wurde die Hydrotopenzahl des Testgebiets (105 km²) auf die Fläche des gesamten Bearbeitungsraumes (ca. 17.600 km²) linear skaliert (s. Tabelle 6).

Tabelle 6: Geschätzte Anzahl der Hydrotopen für den Bearbeitungsraum (ca. 17.600 km²) in Abhängigkeit verschiedener Mindestgrößen, Vergleich von bisheriger und neuer Hydrotopstruktur

Hydrotopstruktur	Mindestgröße [m ²]	Anzahl Hydrotopen Bearbeitungsraum
Bisher	> 100.000	ca. 47.000
mit neuer Datengrundlage	ohne	ca. 1,7 Mio.
	> 100	ca. 1,5 Mio.
	> 1000	ca. 1,1 Mio.
	> 10.000	ca. 340.000
	> 100.000	ca. 47.000

Da sich die Rechenleistung im Laufe der Zeit kontinuierlich weiterentwickelt hat, spielte die Hydrotopenzahl letztendlich für die Modellrechenzeit eine eher untergeordnete Rolle. Da dieser Einfluss nicht mehr so groß ist, wurde als Flächenmindestgröße 100 m² gewählt. Für die Fläche des gesamten Bearbeitungsraumes ergab sich im Resultat eine Anzahl von ca. 1,35 Mio. Hydrotopen.

Die Anbindung der entstandenen Kleinstflächen von < 100 m² im Rahmen der Hydrotopbildung sollte an Nachbarflächen mit ähnlichen Eigenschaften erfolgen. Im abgeschlossenen KliWES-Projektteil wurde lediglich eine Vereinigung ohne Überprüfung hinsichtlich ihrer Eigenschaften von Kleinstfläche und Nachbarfläche angewendet. Mit der nun realisierten Vorgehensweise wurden für jede Kleinstfläche alle zugehörigen Nachbarhydrotopen mit der gleichen Landnutzung selektiert. Aus dieser Menge der potentiell geeigneten Nachbarhydrotopen wurde das mit der größten Hydrotopfläche für die Vereinigung ausgewählt.

Auf diese finale Hydrotopstruktur mussten im letzten Schritt repräsentative Werte für weitere Parameter (s. Abschnitt 3.1) übertragen werden. Hierbei handelte es sich im Folgenden um:

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

3.1 Übertragung von weiteren Gebietseigenschaften auf die Hydrotope

Die Übertragung der Angaben zum Anschlussgrad und dem Kanalisationstyp wurde im Büro für Angewandte Hydrologie BAH Berlin zunächst anhand eines Beispielgebietes getestet und durchgeführt. Abbildung 30 zeigt den dafür verwendeten Ausschnitt mit den neu erstellten Hydrotopen und einen Umriss der Stadtfläche von Dresden, wobei im nördlichen Stadtgebiet noch keine Hydrotope vorlagen.

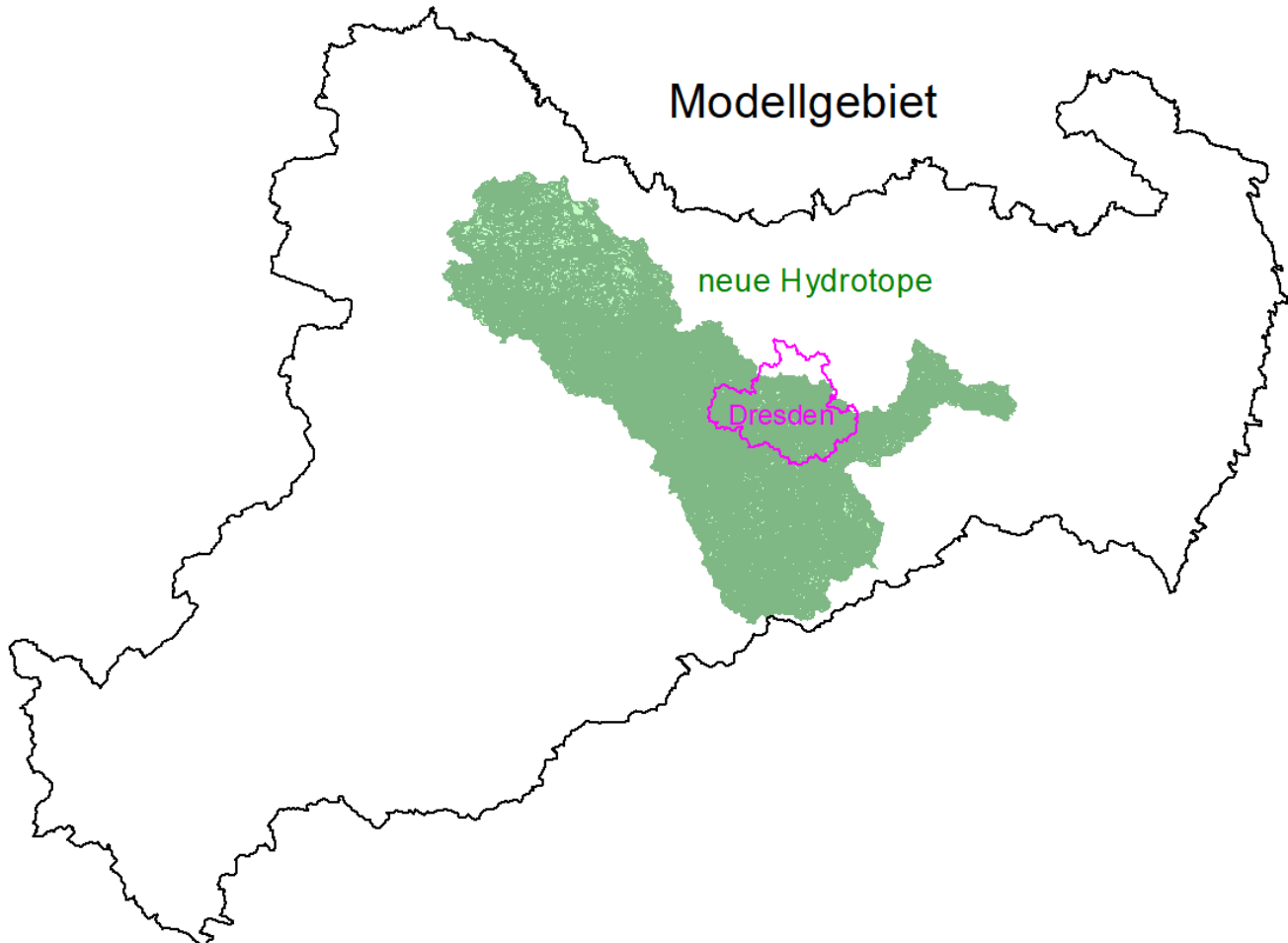


Abbildung 30: Lage des Beispielgebiets und der übergebenen Hydrotope

Für die Bearbeitung wurde aus den neuen Hydrotopen die Flächen des Stadtgebiets Dresden selektiert und mit zwei neuen Spalten versehen:

- „Anschluß“ mit Werten von 0-1 (1 entspricht 100%) und
- „Kanal“ mit Angaben von 1 für Misch- und 2 für Trennkanalisation.

Die Spalte „Kanal“ wurde für Dresden mit „1“ = Mischkanalisation aufgefüllt. Die Spalte „Anschluß“ erhält den Wert 0.99 für den Anschlussgrad von 99,4 der 2016 für Dresden ermittelt wurde.

Der im Modell ermittelte Kanalisationsabfluss orientiert sich an dem Muster der Versiegelung (Abbildung 31, rechts). Der Anschlussgrad und die dominierende Kanalisationsart sind mit der Zeit veränderlich. Als Referenzjahr wurde das Jahr 2016 verwendet.

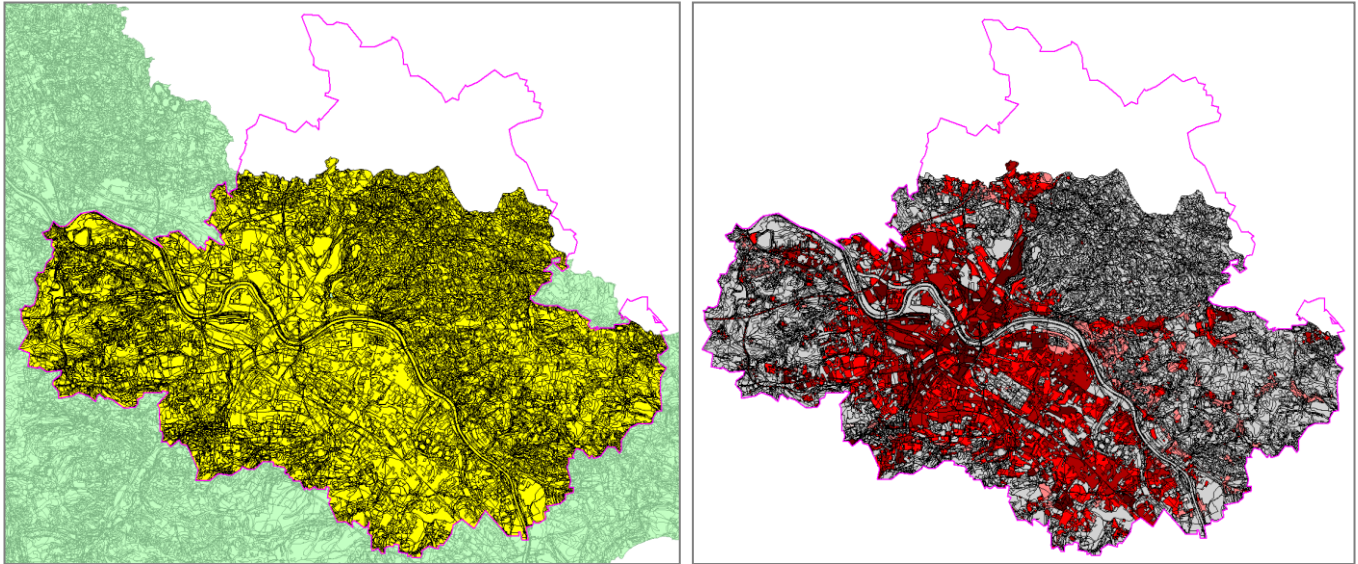


Abbildung 31: Selektion des Stadtgebiets Dresden (links), Versiegelung Dresdens (rechts)

Das zunächst testweise durchgeführte Vorgehen wurde mit Vorliegen der gesamten Hydrotopstruktur auf alle weiteren Stadtflächen angewendet.

Neben Kanalisationstyp und Anschlussgrad wurden den gebildeten Hydrotopen zudem repräsentative Werte für Hangneigung, mittlere Geländehöhe und häufigste Ausrichtung basierend auf dem digitalen Geländemodell mittels zonaler Statistik zugewiesen. Dieselbe Methodik wurde für die Zuweisung der Grundwasserflurabstände und der Drainagen genutzt.

Abschließend erfolgte eine Überprüfung der zugeordneten Gebietseigenschaften auf eventuell unplausible Merkmalskombinationen. Als Beispiel sei hier die Abstimmung von Grundwasserflurabständen und Drainagen genannt. So war zu prüfen, ob der Grundwasserspiegel oberhalb von Drainagen liegt. Ggf. wurde der Grundwasserflurabstand so angepasst, dass er sich knapp unterhalb der Drainage befindet.

3.2 Parametrisierung des Auenmodells

Auenbereiche werden durch sehr hohe und (sofern ausreichend Feuchte vorhanden ist) oft potenzielle Verdunstung charakterisiert. Dadurch ergibt sich oft eine negative Wasserbilanz. Zum Verständnis ihres Wasserhaushaltes sind die Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern sowie zwischen Grundwasser und Bodenwasser von Bedeutung. Teilweise treten auch externe, d.h. gebietsfremde Speisungen (Grundwasserentlastung) auf. Diese Eigenschaften verlangen eine besondere Parametrisierung der in den Auen auftretenden Bereiche.

Die Interaktion zwischen Grundwasser und Bodenwasser kann konzeptionell abgebildet werden. Der Grundwasserflurabstand wird dabei indirekt über die Füllung des Einzellinearspeichers beschrieben. Der kapillare Aufstieg wird dementsprechend reduziert, wenn die GW-Speicherfüllung sinkt.

Im Modell ist dies über den „KapRed-Ansatz“ möglich, mit dem die kapillare Ausschöpfung grundwasser-naher Standorte neben der klimatischen Situation nicht nur von der Durchwurzelungstiefe und dem Flurabstand abhängig ist, sondern auch von dem aktuellen Füllungsstand des Grundwasserspeichers.

Insbesondere in Gebieten mit angespannter Wasserhaushaltssituation (z.B. in Tieflandgebieten mit hohem Anteil an grundwassernahen Flächen oder in Gebieten mit bindigen Böden) wirkt sich die Integration des „KapRed-Ansatzes“ auf die Ergebnisse des Wasserhaushalts, vor allem auf die reale Verdunstung und die Grundwasserneubildung aus. In Gebieten mit einem geringen Anteil an grundwassernahen Flächen zeigt der Einsatz des „KapRed-Ansatzes“ kaum eine oder keine Veränderung der Ergebnisse, was auch der Realität entspricht. Daher kann der Ansatz flächendeckend angewendet werden und muss nicht auf die Auenbereiche begrenzt sein.

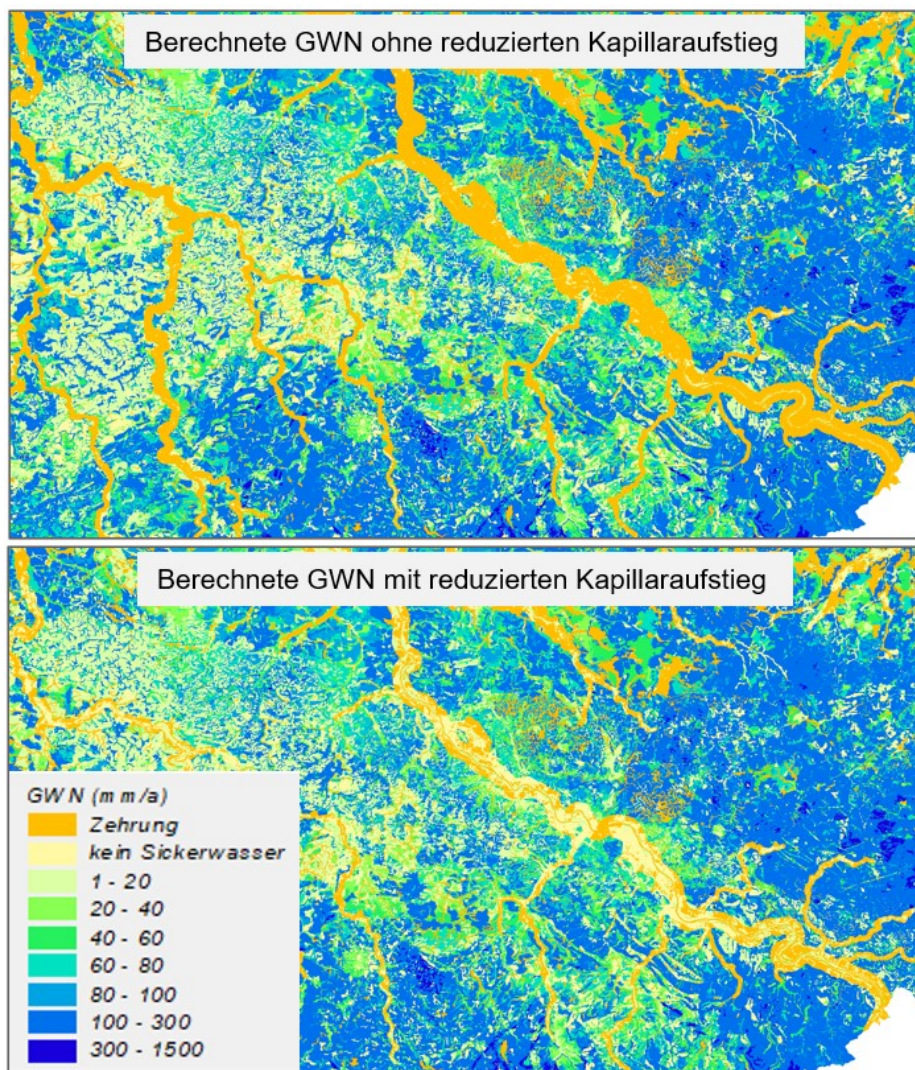


Abbildung 32: Vergleich der GWN mit und ohne reduzierten Kapillaraufstieg

In der Darstellung der Ergebnisse der Grundwasserneubildung mit beiden Methoden erkennt man, dass durch den reduzierten Kapillaraufstieg die Zehrungen im Nahbereich der Gewässer deutlich reduziert werden (Abbildung 32).

Deutlicher erkennt man die Unterschiede der Grundwasserneubildung durch die Reduzierung des Kapillaraufstiegs, wenn man die Differenz aus den beiden Ergebnissen in Abbildung 33 betrachtet. Diese können lokal bis zu 150 mm/a ausmachen liegen im Mittel bei etwa 50 mm/a.

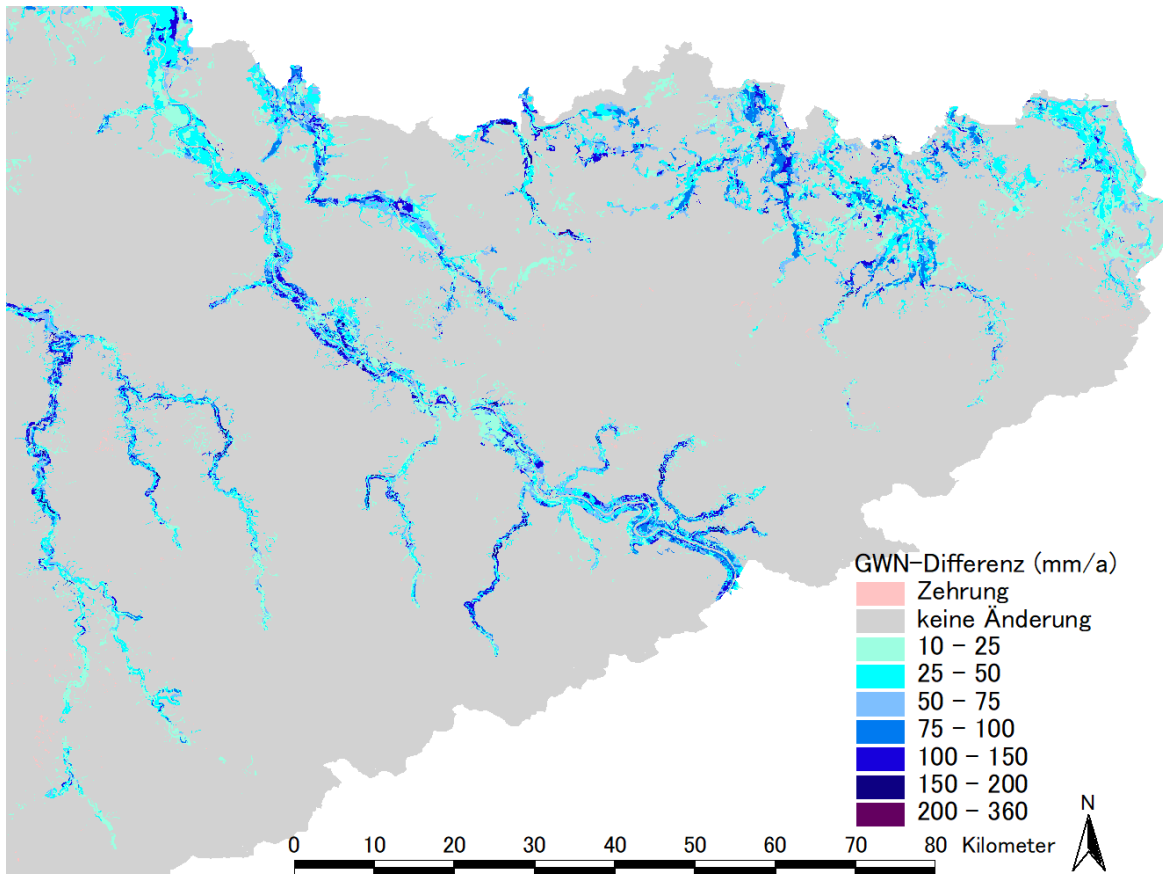


Abbildung 33: Differenz der berechneten GWN mit und ohne reduzierten Kapillaraufstieg

Neben dem KapRed-Ansatz wäre für grundwassernahe Flächen auch die Ableitung von mittlere Jahresgänge aus der Bodenkarte (Sinusfunktion zwischen dem Höchststand im März und dem Tiefststand im August/September) eine Möglichkeit zur Reduktion des Kapillaraufstiegs in Zehrungsphase (s. Kapitel 2.1.9). Dies wird dadurch ebenfalls in den Sommermonaten reduziert. Dabei wird allerdings nicht (wie mit dem KapRed-Ansatz) die aktuelle Feuchte-Situation berücksichtigt.

Fazit

Die Modellierung von Flussgebietsauen kann durch zusätzliche Ansätze verbessert werden. Im Falle einer zu starken Ausschöpfung der Auenregionen wäre der KapRed-Ansatz einzusetzen. Mit diesem wird die kapillare Nachlieferung in Abhängigkeit vom aktuellen Füllungsstand des Grundwasserspeichers beschrieben, die letztlich auch einen Jahresgang unter Berücksichtigung der konkreten Feuchtesituation abbildet.

3.3 Nutzung des Vegetationsmoduls VEGEN

3.3.1 Modellkonzept des Vegetationsmoduls VEGEN

ArcEGMO-PSCN enthält vier unterschiedliche Vegetationsmodelle, die sich den zwei Gruppen „gesteuerte Modelle“ und „Feedback-Modelle“ zuordnen lassen. Bislang wurde im Rahmen von KliWES ein Modell genutzt, das über zeitvariable Randbedingungen (vorgegebene Zeitfunktionen der Entwicklung phänologischer Kennwerte) gesteuert wird. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass der Einfluss der Witterung und der übrigen Standortbedingungen auf die aktuelle Pflanzenentwicklung vernachlässigt wird. Deshalb soll anstelle dieses Ansatzes (VM 8) das „Feedback-Modell“ VEGEN, ein generisches Wachstumsmodell auf der Basis eines Wärmesummenansatzes zur Simulation der phänologischen Entwicklung (Klößing et al., 2009) genutzt werden. Mit diesem Modell lassen sich auch die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit von den aktuellen Standortbedingungen und somit auch die Ertragsauswirkungen des Klimawandels auf den Ertrag für verschiedene Böden berechnen. Es handelt sich hierbei um eine vereinfachte Version des EPIC-Wachstumsmodells (Williams et al., 1989), wie sie auch in SWAT2000/2005 (Neitsch et al., 2005) enthalten ist. Obwohl dieses Modell einen deutlich höheren Bedarf an Eingangsdaten hat, konnte es schon erfolgreich für makroskalige Untersuchungen auf Landesebene eingesetzt werden (Pfützner et al., 2013).

Die phänologische Modellierung folgt der „Heat Unit Theory“. Dieser Temperatursummenansatz beruht auf der Annahme, dass das Wachstum der Vegetation vor allem von der Temperatur gesteuert wird (Boswell, 1926). Bei jeder Pflanze muss eine festgelegte Basistemperatur erreicht werden, bevor das Wachstum beginnt. Über dieser Schwellentemperatur beschleunigt sich das Wachstum mit steigenden Temperaturen bis zu einer Optimaltemperatur. Steigt die Tagesmitteltemperatur über die Optimaltemperatur, verlangsamt sich das Wachstum bis zu einer Maximaltemperatur, oberhalb derer schließlich das Wachstum endet. Eine „Heat Unit“ (HU) ist dabei die Differenz aus der Mitteltemperatur eines bestimmten Tages und der pflanzenspezifischen Minimaltemperatur. Die Ausbildung bestimmter phänologischer Stadien erfolgt anhand pflanzenspezifischer kumulierter HU. Die Entwicklung des Blattflächenindex nimmt eine zentrale Stellung im Modell ein. Alle übrigen Vegetationsgrößen (Biomasse, Ertrag, Wurzeltiefe, etc.) sowie die potenzielle Nährstoff- und Wasseraufnahme werden direkt oder indirekt in Abhängigkeit vom LAI berechnet.

Das Pflanzenwachstum erfolgt proportional der aktuell aufgenommenen photosynthetisch aktiven Strahlung (Monteith, 1977). Sie wird durch Stress (Temperatur, Wasser- und Nährstoffmangel) begrenzt.

Bei den mehrjährigen bzw. den Winterfruchtarten erfolgt die Berücksichtigung der Vegetationspause im Winter bei Unterschreitung einer minimalen (sortenunabhängigen) Tageslänge TD, die sich aus der kürzesten Tageslänge im Jahr für einen Standort plus einem, vom Längengrad abhängigen Summanden (= 1 h für Längengrad > 40 ° Nord oder Süd) ergibt.

Wird nur der Wasserhaushalt simuliert (C/N-Modell von ArcEGMO-PSCN ist deaktiviert), so wird von einer optimalen Nährstoffversorgung des Pflanzenbestandes ausgegangen.

3.3.2 Eingangsdaten für das Vegetationsmodell VEGEN

Das Vegetationsmodell VEGEN stellt im Vergleich zur bisher in KliWES genutzten Modellversion von PSCN keine höheren Ansprüche an die räumlichen Eingangsdaten zur Beschreibung der topographischen, pedologischen und klimatischen Eigenschaften der zu modellierenden Räume. Die benötigten Bodenparameter sind in Tabelle 7 enthalten. Dabei sind nur die mit „o“ in der Spalte „o/f“ gekennzeichneten Parameter zwingend erforderlich. Die übrigen Parameter werden bei Nichtvorhandensein entweder als Standardwerte gesetzt oder entsprechend der Vorgaben der KA4/KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) berechnet.

Tabelle 7: Bodenparameter für PSCN, o/f: obligatorisch/fakultativ

Parameter	Bezeichnung	Zuordnung	Dimension	Steuerwort	o/f	Standard
EP	Ertragspotential	EFL	-	ERTRAGSPOTENTIAL**		2
	Horizonnummer	Bodentyp	-	HORIZONNUMMER*	o	
	Horizontmächtigkeit	Bodentyp	mm	SCHICHTMAECHTIGKEIT*	o	
	Durchwurzelungsintensität	Bodentyp	-	WURZELINTENSITAET*		1
	Bodenart	Bodentyp	-	BODENART*	o	
pt	Trockenrohdichte	Bodentyp	g/cm ³	LAGERUNGSDICHTE*	o	
Skelett	Skelettanteil	Bodentyp	Vol. %	SKELETTANTEIL*		0
Ton	Tongehalt	Bodentyp	Masse %	TON*		KA4/KA5
	Schluffgehalt	Bodentyp	Masse %	SCHLUFF*		KA4/KA5
	Sandgehalt	Bodentyp	Masse %	SAND*		KA4/KA5
WP	Welekepunkt	Bodentyp	Vol. %	WELKEPUNKT*		KA4/KA5
FK	Feldkapazität	Bodentyp	Vol. %	FELDKAPAZITAET*		KA4/KA5
PV	Gesamtporenvolumen	Bodentyp	Vol. %	PORENVOLUMEN*		KA4/KA5
MK	Makroporen	Bodentyp	%	MAKROPOROSITAET*		f(Skelett, Ton, Vegetation)
k	Gesättigte Leitfähigkeit	Bodentyp	mm/h	HYD_LEITFAEHIGKEIT*		KA4/KA5

* in ... \GIS\describe\efl.sdf / BODEN_TABELLE

** in ... \arc_egmo\pscn\pscn.ste/ EFL-Karte

Die Ausweisung des Ertragspotenzials der Böden EP in drei Klassen dient einer standortspezifischen Anpassung der Vegetationsentwicklung besonders in makroskaligen Modellanwendungen. So kann die Adaption der Vegetation bzw. des Managements an die Standortbedingungen (Verdunstungs-

bedarf, Sortenauswahl, etc.) im Modell erfasst werden. Basis hierfür ist die Bodenbewertung landwirtschaftlich nutzbarer Böden (s. BLfS, 2009). Es wird zwischen drei Klassen unterschieden (Tabelle 8), die auch zu unterschiedlichen Durchwurzelungstiefen ein und derselben Vegetationsart führen.

Tabelle 8: Ertragspotenzial EP in Abhängigkeit von der Bodenwertzahl BZ

EP	BZ	Kriterien
1 (gering)	<40	Geringe Durchwurzelungstiefe, hoher Ton- und/oder Sandanteil, hoher Skelettanteil, geringer pH-Wert, geringer Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser, vernässt
2 (mittel)	40 – 65	Mittlere Durchwurzelungstiefe, sandig-lehmige bis schluffig-tonige Textur, mittlerer Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser, zeitweise vernässt, geringer pH-Wert
3 (hoch)	65 - 100	Hohe Durchwurzelungstiefe, sandig-lehmige bis schluffig-tonige Textur, hohe Wasserspeicherkapazität, Kapillaraufstieg aus dem Grundwasser, geringer Steingehalt

Die Erfassung des realen Managements auf den landwirtschaftlichen Flächen des Untersuchungsgebietes ist von entscheidender Bedeutung für die Simulationsgüte des VEGEN-Modells. Benötigt werden Informationen:

- zum Fruchtartenspektrum (Fruchtfolgen),
- zu den Bearbeitungsterminen (Saat, Düngung, Grünschnitt, Ernte) und
- den Düngermengen und -formen (nur bei aktivem C/N-Modell).

In der Regel kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese Angaben für jeden Einzelschlag verfügbar sind. Außerdem wäre diese Datenflut für meso- bis makroskalige Modellanwendungen nicht mehr handhabbar. Andererseits kann für kleinskalige Anwendungen z.B. auf Betriebsebene eine möglichst exakte Verarbeitung aller vorhandenen Informationen erforderlich werden. Deshalb wurde ein Managementmodell für VEGEN entwickelt, das entsprechend der Aufgabenstellung und Datenverfügbarkeit eine flexible Verarbeitung erlaubt. Alle Verfahren zur Erfassung der Bewirtschaftung der landwirtschaftlich genutzten Flächen greifen auf dieselben Basisdaten zu, die um weitere Informationen ergänzt werden können.

Die Basisdaten (Stammdaten) stellen eine Sammlung von durchschnittlichen Eigenschaften der gebräuchlichsten Fruchtarten und Wirtschaftsdünger in Deutschland dar. Als Grundlage wurden dafür die von den Ländern veröffentlichten Richtwerte für die Umsetzung der Düngeverordnung und die Empfehlungen des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) herangezogen. Weitere Parameter, wie z.B. die Umsatz- und Humusreproduktionskoeffizienten der organischen Düngertypen und der Ernte- und Wurzelreste (EWR), wurden der Literatur entnommen.

Liegen räumlich detailliertere Informationen zur Fruchtartenverteilung (z.B. jährliche Anbaustatistik auf Kreisebene oder Bewirtschaftungsszenarien) vor, so können den einzelnen Flächen eines Landnutzungstyps mittels eines geostatistischen Verfahrens („Fruchtfolgengenerator“) unterschiedliche Fruchtfolgen zugeordnet werden. Die Berechnung des Managements der einzelnen Fruchtarten erfolgt wie beim Standardmanagement. Dieses Verfahren eignet sich besonders für mesoskalige Modellanwendungen.

Daneben gibt es Schnittstellen für die Verarbeitung von regional vorhandenen räumlich und zeitlich hochaufgelösten Bewirtschaftungsdaten der landwirtschaftlichen Flächen (z.B. aus dem Datenspeicher InVeKoS oder aus Ackerschlagkarteien).

3.3.3 Ableitung regionstypischer Fruchtfolgen für Sachsen¹

Als räumliche Basis für die Ableitung regionstypischer Fruchtfolgen, die die derzeitigen Anbauverhältnisse im Freistaat Sachsen flächendeckend widerspiegeln, dienen die 12 Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete (LVG), die auf der Basis der naturräumlichen Gliederung Sachsens abgeleitet wurden (Winkler et al., 1999, Tabelle 9).

Tabelle 9: Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete LVG mit Anzahl der dort liegenden Dauertestflächen (n DTF) und zugeordneter Ackerfläche des KiWES-Modells

LVG	LVG-Bezeichnung	Böden	N DTF	Fläche [km ²]	Ackerfl. [km ²]
1	Lausitzer Heide- und Teichlandschaft	leichte bis mittlere Böden (D 1 ... D 5)	95	3182	739
2	Lausitzer Platte, Zittauer Becken und Oberlausitzer Bergland	mittlere Böden (D 4/5; Lö 4 ... 6; V5/7)	152	2038	727
3	Elbsandsteingebirge und Zittauer Gebirge	mittlere Böden (Lö 3 - Lö 6; V 7/8)	48	786	219
4	Nördliche Erzgebirgsabdachung	Verwitterungsböden (V 7/8)	110	1339	502
5	Erzgebirgskamm	Verwitterungsböden (V 5/8/9)	110	1926	289
6	Zwickauer-Chemnitzer Hügelland	Verwitterungsböden (V 2 ... V 6, V 9)	63	1222	427
6a	Elsterbergland		73	1067	445
7	Mittelsächsisches Hügelland	mittlere Böden (Lö 4 - Lö 6)	78	1301	728
8	Mittelsächsische Platte	mittlere bis beste Böden (D 5, Lö 3 ... Lö 6)	233	2530	1494
9	Leipziger Tieflandsbucht	mittlere bis beste Böden (D 4 ... D 6; Lö 1 bis Lö 5)	101	1868	391
10	Düben-Dahlener Heide	leichte Böden (D 2 ... D 4)	114	961	372
11	Sächsische Elbtalniederung	alluviale Böden (AL 3)	39	244	159

Als Grundlage zur Erfassung der Bewirtschaftung der Ackerflächen in diesen LVG wurden die Messreihen der Sächsischen Dauertestflächen (DTF) genutzt. „Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie betreibt seit 1990 ein Nitratmessnetz, das jährlich ca. 1.000 fest eingemessene Dauertestflächen (DTF) in Praxisschlägen umfasst. Von diesen werden jeweils im Frühjahr zu Vegetationsbeginn und im Spätherbst Bodenproben aus einer Tiefe von 0 bis 30 cm und 30 bis 60 cm entnommen und auf Nitratstickstoff untersucht. Zudem werden von allen Flächen jährlich schlagspezifische Bewirtschaftungsdaten erfasst.

¹ In Zusammenarbeit mit Hans-Joachim Kurzer, LfULG, Referat 72 Pflanzenbau

Durch die gleichmäßige Verteilung der DTF über Sachsen entspricht die Anzahl der DTF der untersuchten Kategorien im Wesentlichen ihrem prozentualen Anteil an der landwirtschaftlich genutzten Ackerfläche in Sachsen.“ (aus Kurzer & Kolbe, 2016). Insgesamt stehen die Daten von 1322 Dauertestflächen (davon 54 mit Dauergrünland) zur Verfügung. Eine Unterscheidung zwischen Flächen in oder außerhalb von Wasserschutzgebieten (WSG) oder im Ökolandbau erfolgte nicht. Jedoch mussten einige Flächen von den weiteren Analysen ausgeschlossen werden, wenn die Zeitreihen zur Bewirtschaftung zu kurz waren.

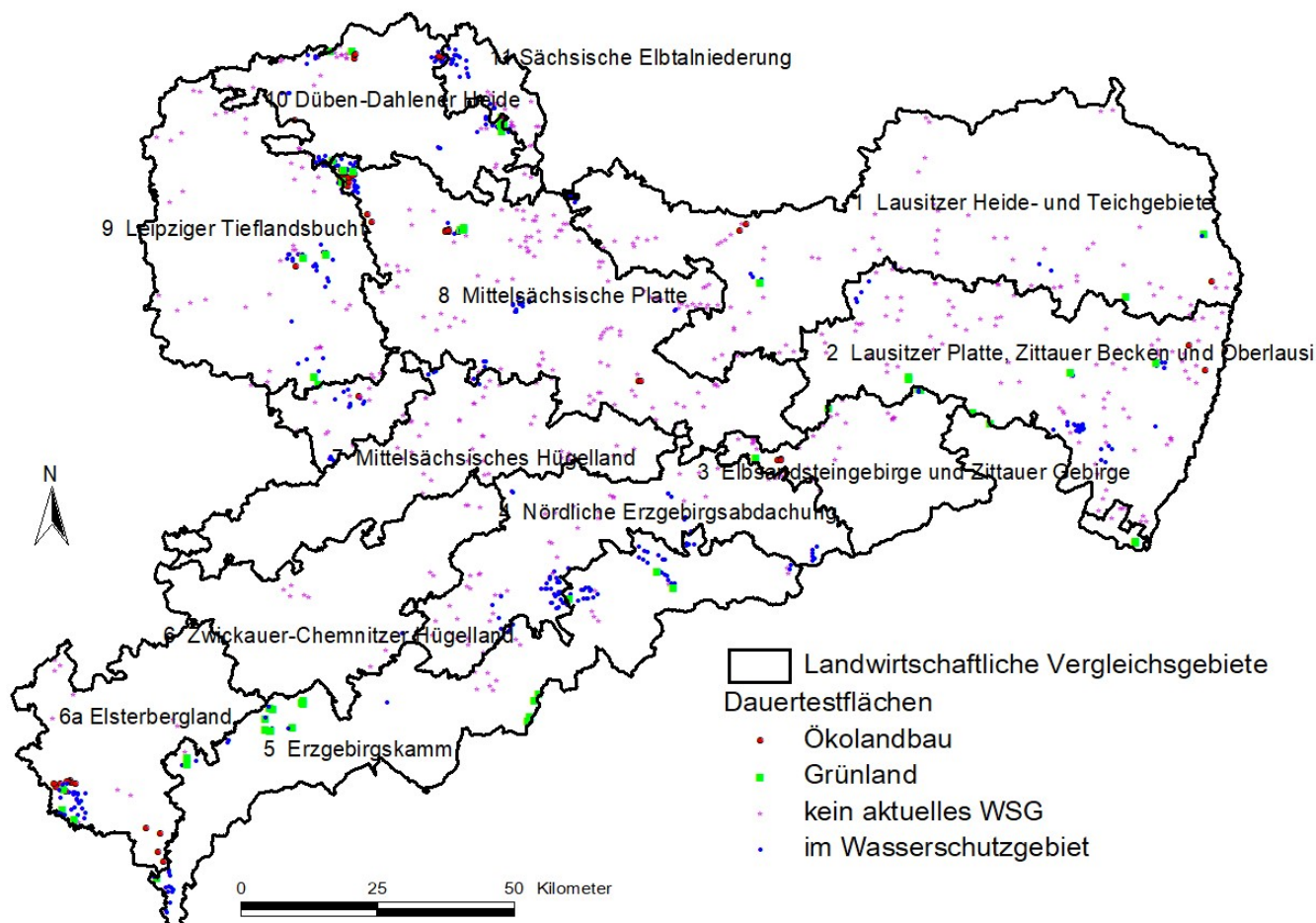


Abbildung 34: Landwirtschaftliche Vergleichsgebiete und Dauertestflächen Sachsens

Im ersten Arbeitsschritt erfolgte die Zuordnung der DTF zu den Landwirtschaftlichen Vergleichsgebieten (Abbildung 34, Tabelle 9). Danach erfolgte die Analyse der Häufigkeit der angebauten Fruchtarten im Zeitraum 2000-2018 für die einzelnen LVG. Fasst man die einzelnen Fruchtarten zu Fruchtgruppen zusammen (Tabelle 10), ergeben sich die in Tabelle 12 angegebenen Anbauanteile. Um diese Anbauverhältnissen in einer Fruchtfolge pro LVG wiederzugeben, wurden Fruchtfolgen mit 27 bis 31 Gliedern gewählt. Somit können auch Fruchtarten mit einem Anbauanteil von 1,8-5 % bei der Modellierung berücksichtigt werden. Tabelle 13 enthält die Anbaujahre und die Länge der so für die einzelnen LVG abgeleiteten Fruchtfolgen. Der Anbau von Getreide als Ganzpflanze und von sonstigen Fruchtarten wird entsprechend des geringen Flächenanteils nicht mehr berücksichtigt.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Fruchtarten zu Fruchtgruppen (FG), Kodierung laut BESyD

ID	Fruchtgruppe	Name	Fruchtarten (BESyD-ID)
101	WW	Winterweizen	101 – 105
110	WRo	Winterroggen	110
120	WG	Wintergerste	120, 125
150	SoGetr	Sommergetreide	130 – 165
170	KM	Körnermais	170
190	Tritical	Wintergetreide ohne WW	190 – 195
301	KöLeg	Körnerleguminosen	301 – 308
401	WRaps	Winterraps	401
403	SÖI	Sommerölrüchte	403 – 409
701	K	Kartoffeln	701 – 707
801	ZR	Zuckerrüben	801 – 902
1008	KGras	Kleegras	1000 – 1008, 1012 – 1027, 1108 – 1227
1028	AGras	Ackergras	1011, 1028 – 1029
1030	SM	Silomais	1030
1040	GGanz	Getreide Ganzpflanze	1031 – 1041
	Sonst.	Sonstige	2000 – 9999

Seit 2010 liegen für die Sächsischen Dauertestflächen (DTF) Informationen zum Zwischenfruchtanbau vor. Anhand dieser Daten wurden analog zum Vorgehen bei den Hauptfrüchten die Häufigkeit des Zwischenfruchtanbaus pro VGL abgeleitet und die Fruchtfolgen der Hauptfrüchte um Zwischenfrüchte (ZF) ergänzt. Die Zuordnung erfolgte nach guter fachlicher Praxis, also vor Sommergerste (150), Körnermais (170) oder Silomais (1030), wie in Tabelle 14 zu sehen ist.

Tabelle 11: Integration von Zwischenfrüchten (ZF) in die n-gliedrigen Fruchtfolgen (FF) pro LVG

LVG	n (DTF)	ZF-Anbau 2010-2018	Anteil ZF am Gesamtanbau 2010-2018 [%]	Jahre mit ZF in FF	n (FF)
1	107	98	10,2	3	31
2	152	102	7,5	2	29
3	43	23	5,9	2	27
4	111	85	8,5	3	30
5	111	72	7,2	2	30
6	63	22	3,9	1	31
6a	74	70	10,5	3	28
7	78	32	4,6	1	28
8	240	171	7,9	2	29
9	119	70	6,5	2	30
10	114	93	9,1	3	29
11	39	28	8,0	2	29

Tabelle 12: Anteil der angebauten Fruchtarten auf den DTF in den LVG (2000-2018) [%], n: erfasste Anbaujahre

LVG	n	WW	WRo	WG	SoGetr	KM	Tritical	KöLeg	WRaps	SÖI	K	ZR	KGras	AGras	SM	GGanz	Sonst.
1	1579	12,3	22,2	14,2	2,0	1,9	7,5	1,5	16,0	2,0	2,2	0,4	0,8	2,0	14,0	0,3	0,6
2	2634	35,0	1,9	17,9	5,6	0,9	1,0	0,8	20,0	0,2	1,3	3,7	0,4	0,7	10,1	0,3	0,2
3	739	34,6	1,4	11,4	11,4	3,1	1,9	1,4	16,9	0,7	3,9	1,8	3,9	0,8	4,6	0,4	1,9
4	1862	13,4	3,3	13,6	18,5	0,2	7,1	0,6	18,5	0,0	1,7	0,1	5,1	3,3	13,4	0,9	0,4
5	1781	4,7	1,7	11,0	26,1	0,0	12,0	2,5	15,4	0,2	0,5	0,0	8,9	3,6	10,2	1,5	1,7
6	910	24,6	2,7	15,1	13,3	0,2	1,9	1,0	18,4	0,2	3,6	0,0	3,3	5,9	8,9	0,3	0,5
6a	1174	14,5	3,9	12,3	21,5	0,0	8,3	2,4	18,3	1,2	0,0	0,1	4,8	1,8	10,1	0,9	0,0
7	1267	33,4	0,5	13,7	5,9	1,5	1,3	1,1	20,4	0,0	2,9	2,8	1,2	4,4	10,3	0,4	0,3
8	3920	32,8	3,1	14,9	2,7	2,9	4,0	0,5	17,1	0,2	2,7	4,4	4,0	1,7	6,8	0,3	1,9
9	1666	33,1	3,1	16,8	1,4	3,5	3,5	0,5	21,3	0,0	2,2	4,3	1,1	1,7	7,1	0,1	0,4
10	1786	20,7	10,9	18,8	2,2	1,7	8,2	0,9	16,1	0,8	0,4	3,0	5,7	1,3	8,0	0,4	1,0
11	711	36,0	1,5	15,3	2,8	5,8	1,1	0,1	19,3	0,3	0,0	6,2	1,4	0,0	9,7	0,0	0,4

Tabelle 13: Anbaujahre pro Fruchtart und LVG in n-gliedriger Fruchtfolge (FF)

LVG	n (FF)	WW	WRo	WG	SoGetr	KM	Tritical	KöLeg	WRaps	SÖI	K	ZR	KGras	AGras	SM
1	31	4	7	4	1	1	2	0	5	1	1	0	0	1	4
2	29	11	1	5	2	0	0	0	6	0	0	1	0	0	3
3	27	10	0	3	3	1	1	0	5	0	1	1	1	0	1
4	30	4	1	4	6	0	2	0	6	0	0	0	2	1	4
5	30	1	1	3	8	0	4	1	5	0	0	0	3	1	3
6	30	7	1	5	4	0	1	0	6	0	1	0	1	2	3
6a	27	4	1	4	6	0	2	1	5	0	0	0	1	1	3
7	27	10	0	4	2	0	0	0	6	0	1	1	0	1	3
8	28	10	1	4	1	1	1	0	5	0	1	1	1	1	2
9	29	10	1	5	0	1	1	0	6	0	1	1	0	2	2
10	28	10	1	5	0	1	1	0	6	0	1	1	0	1	2
11	29	10	0	5	1	2	0	0	6	0	0	2	0	0	3

Tabelle 14: Fruchtfolgen für die 12 LVG Sachsens, ID s. Tabelle 10, FFG: Fruchtfolgeglied

	Landwirtschaftliches Vergleichsgebiet LVG											
FFG	1	2	3	4	5	6	6a	7	8	9	10	11
1	110	150	120	120	190	120	1028	150	1008	120	101	101
2	401	101	801	401	150*	1008	401	120	701	101	120	120
3	1030*	120	101	120	120	150	101	1028	401	1030*	401	150
4	403	401	1030*	1030*	401	120	1030*	101	1030*	801	120	101
5	1030	101	101	401	150*	401	150	401	101	101	101	1030
6	110	1030	401	150	1008	150	120	120	150	120	120	101
7	150*	101	101	401	1008	1030	401	1030	120	101	101	401
8	110	120	120	101	150	120	120	101	1028	1028	120	801
9	120	401	401	1030*	1030	701	190	120	101	1028	801	101
10	401	101	101	101	401	101	301	401	801	101	1030	120
11	101	120	1008	110	150	150	120	101	101	120	401	401
12	120	401	190	401	401	1028	1030*	1030	120	401	701	101
13	190	101	101	190	150	1028	150	101	101	101	101	1030*
14	401	1030*	150	120	1030	101	150	401	401	1030*	120	120
15	1030	101	101	1008	150	401	1030	101	190	701	101	401
16	190	801	401	1008	190	101	101	120	101	101	401	101
17	101	401	120	101	120	401	150*	401	1030*	401	101	101
18	401	101	150	150	401	101	120	101	101	101	401	401
19	1030	120	170*	101	150	1030*	110	801	401	120	190	101
20	110	401	101	401	1030	401	401	401	120	110	401	120
21	1028	101	401	150	1008	190	1008	101	101	101	101	1030*
22	110	1030*	101	1028	190	120	190	1030*	401	401	110	101
23	170*	101	150	1030*	101	401	150	101	101	101	170*	401
24	120	150	101	150	150	101	101	401	120	401	101	170
25	401	401	401	401	120	401	401	101	401	101	401	120
26	101	101	101	120	110	101	401	701	101	401	101	401
27	101	120	701	150	190	1030	101	150	170	120	1028	101
28	110	101		190	1028	150	150	101	101	170	101	170
29	110	110		150	401	101			110	190	1030*	801
30	120			1030	190	120				401		
31	701				301	110						

* nach Zwischenfrucht

Diese repräsentativen Fruchtfolgen (Tabelle 14) können auch außerhalb des Projektes KliWES für die Untersuchung unterschiedlichster Fragestellungen genutzt werden.

3.3.4 Verortung der Fruchtfolgen im KliWES-Modell

Entsprechend ihrer Lage wurden die Elementarflächen der vorliegenden Hydrotopkarte dem entsprechenden Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiet (LVG) zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt über eine räumliche Verknüpfung (spatial join) der Teileinzugsgebiete mit der LVG-Karte. Bereiche außerhalb der LVG-Kartierung (z.B. Tschechische Gebietsteile) wurden dem nächstgelegenen LVG zugeordnet (Abbildung 35).

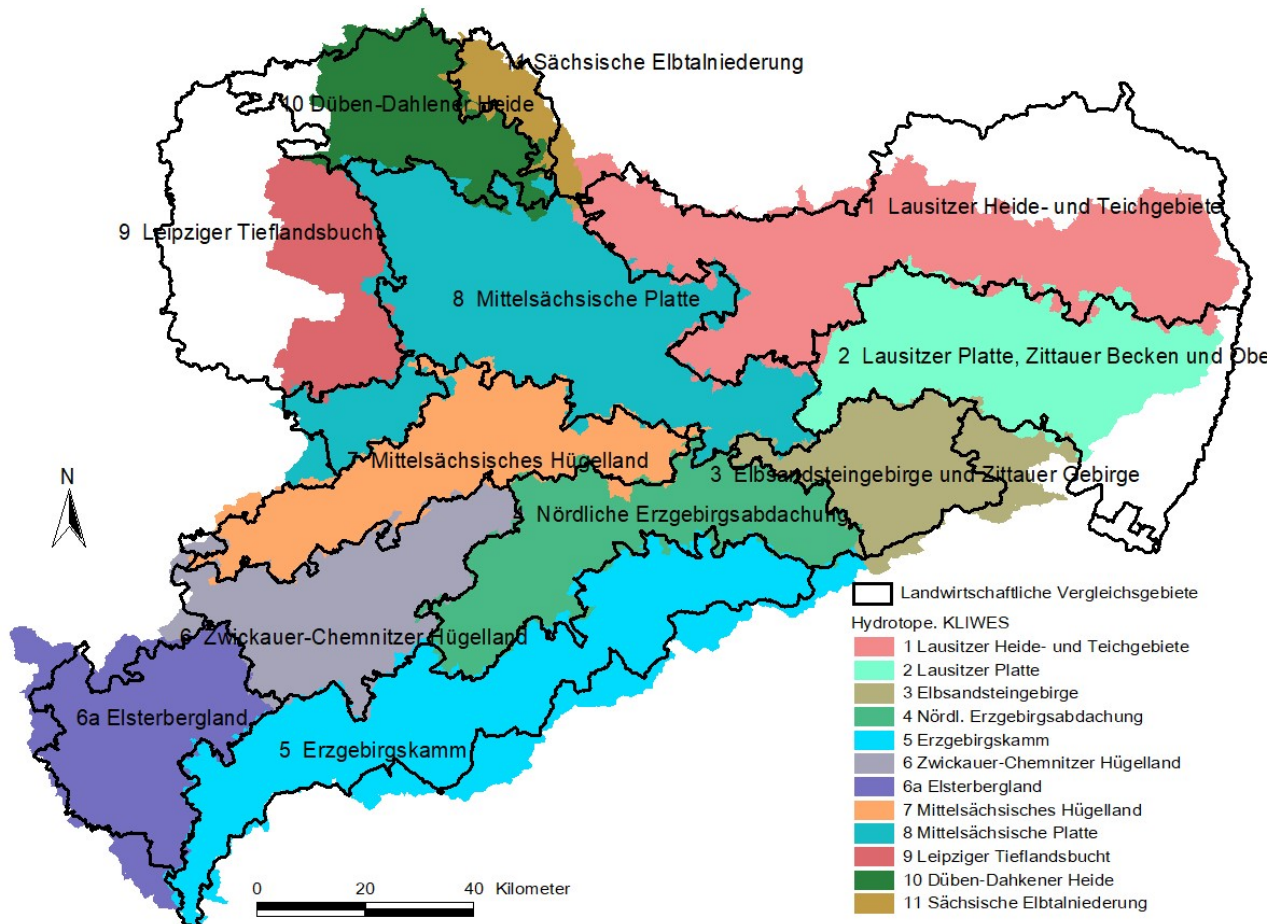


Abbildung 35: Zuordnung der Hydrotope zu den Landwirtschaftlichen Vergleichsgebieten LVG

Allen ackerbaulich genutzten Flächen (LNTZ-ID = 1510) wurde nun die Fruchtfolge für „ihr“ LVG zugeordnet. Damit eine gleichmäßige räumliche Verteilung der angebauten Fruchtarten entsprechend des Anbauverhältnisses laut Tabelle 12 pro LVG gewährleistet ist, wurde die gesamte Ackerfläche eines LVG (Spalte „Ackerfl. [km²]“ in Tabelle 9) in n Klassen nahezu gleicher Fläche entsprechend der Anzahl n der Fruchtfolgeglieder pro LVG unterteilt. Diesen wurde das entsprechende Fruchtfolgeglied (FFG in Tabelle 14) als Einstiegspunkt in die Fruchtfolge bei Simulationsstart zugewiesen. Diese Erweiterungen der EFL(Hydrotop)-Karte und die Ansteuerung in ArcEGMO-PSCN sind in Abbildung 36 dargestellt.

Flurab_id	Ertrag	Area	Litho_end	Teg_id	Gkz	Aspeca	Lntz_id	Meli_id	LWVG	FF	FFG	Nlzz	Agz
4	2	282.77124023400	22	1952	5824669	214	1620	0	1	-9999	1	0	0
5	2	984.47729492200	100	1616	5822887	327	1430	0	2	-9999	1	0	0
10	3	6879.01623535000	1	2038	537334644	216	1510	0	8	8	1	79	81
6	2	4741.05810547000	8	2633	54214919	303	1620	0	4	-9999	1	0	0
10	2	397.00292968800	16	1279	5371399	353	1510	14	3	3	5	48	42
10	3	2361.38293457000	16	893	537334631	147	1510	0	8	8	1	70	66
10	2	31423.15307620000	7	843	582116	23	1210	0	3	-9999	1	0	0
6	1	160680.92675799999	22	5107	582465	315	1210	108	1	-9999	1	35	36
4	2	364.46484375000	100	3519	582291	81	1210	0	1	-9999	1	41	43
10	2	3849.72192383000	4	841	5371473	290	1210	0	3	-9999	1	0	0
10	2	779.82153320300	1	1258	5373172	351	1510	0	8	8	1	0	0
10	2	21902.92626950000	7	2876	582248	264	1420	0	2	-9999	1	0	0
10	2	20063.75268550000	1	598	53719294	20	1640	0	8	-9999	1	0	0
10	2	139.54003906300	1	2056	538492219	262	1510	0	1	1	6	48	50
10	2	4411.25610352000	22	1622	5381139	16	1900	0	1	-9999	1	0	0
10	2	5408.35400391000	22	3483	538122	187	1510	0	2	2	5	43	38

```
#####
PSCN
-----
NUTZUNG_TABELLE          ASCII LNTZ_korr.tab
NUTZUNGS_IDENTIFIKATION LNTZ_ID
MAX_BEDECKUNGSINDEX     BED_MAX // maximaler Vegetations-Bedeckungsgrad [%]
MIN_BEDECKUNGSINDEX     BED_MIN // minimaler Vegetations-Bedeckungsgrad [%]
MAX_BLAETFLAECHEINDEX   LAI // Blattflächenindex bei Bestandesschluss (Bedeckung=100)
MIN_INTERZEPTIONSKAPAZITAET INTC_MIN
MIN_VERDUNSTUNGSKORREKTUR ET_KORR_MIN // spezifische Korrektur der Grasreferenzverdunstung (min)
MAX_VERDUNSTUNGSKORREKTUR ET_KORR_MAX // spezifische Korrektur der Grasreferenzverdunstung (max)
*FRUCHTFOLGE_LNTZ      Ffolge // Verweis auf Standard-Fruchtfolgen-Tabelle für einen Landnutzungstyp
*MODELL                 Modell8
MODELL                  VEGEN
                        // Vegetationsmodell:
                        // 1: VEGEN-Modell für forst-/landwirtschaftliche Kulturen
                        // 3: 4C-Modell für Wald und Forst
                        // 8: Zeitfunktion der Wurzeltiefe und des LAI
                        // 9: statisches Modell (keine C/N-Dynamik)
-----
*** zusätzliche Rauminformationen fuer PSCN aus EFL-Karte *****
ERTRAGSPOTENTIAL        Ertrag // für alle Vegetationsmodelle
*BESTANDESDICHTE        Bd // Bodeneigenschaft
                        // räumliche Unterersetzung der in der Landnutzungstabelle
                        // angegebenen Bestandesdichte (0,1)
//----- nur Input für Vegetationsmodell 1(VEGEN) und 3(4C)
SCHLAG                   FF // Verweis auf Fruchtfolgen-Tabelle
FRUCHTFOLGEGLIED        FFG
-----
STEUERDATEI_VEGEN      vege.ste
-----
```

Abbildung 36: VEGEN-spezifische Einträge in der Hydrotopkarte und Ansteuerung durch pscn.ste

3.3.5 Regionsspezifische Ableitung der VEGEN-Parameter

Die in Kapitel 3.3.2 angeführten Basisdaten für die Simulation der erfassten Fruchtgruppen (Tabelle 10) stehen aus vorhergehenden Modellanwendungen in Sachsen (Lysimeterstation Brandis, Projekt ReArMo) zur Verfügung. Sie sind in der Input-Datei CROPPARAMETER_VEGEN „...\\VEGEN\\Vegen_Parameter.txt“ enthalten.

Zusätzlich benötigt werden mittlere agronomische Termine (Saat und Ernte) und die benötigten Wärmemengen für die einzelnen Fruchtarten der Fruchtfolgen innerhalb der LVGs. Diese Parameter sind Inhalt der Managementtabelle MANAGEMENT_VEGEN „...\\VEGEN\\Management_BESyD.txt“.

Als Basis für die Ableitung mittlerer Saat- und Erntetermine dienten wieder die Managementdaten der Sächsischen Dauertestflächen (DTF) von 2010 bis 2018. Nach Integration dieser Daten in das Modell erfolgte die Simulation für jedes LVG für den Zeitraum 1980-2015. Ziel war die Ableitung der benötigten Wärmemengen und der Überprüfung der simulierten Ernteerträge anhand der Erträge auf den DTF.

Dazu wurden für jede ackerbaulich genutzte Elementarfläche in diesem LVG die simulierten akkumulierten Wärmeeinheiten am Erntetermin 1981-2015 statistisch analysiert und die Mediane in die Management-Tabelle übernommen. Als Beispiel zeigt Abbildung 37 die Ergebnisse für die Mittelsächsische Platte (LVG 8).

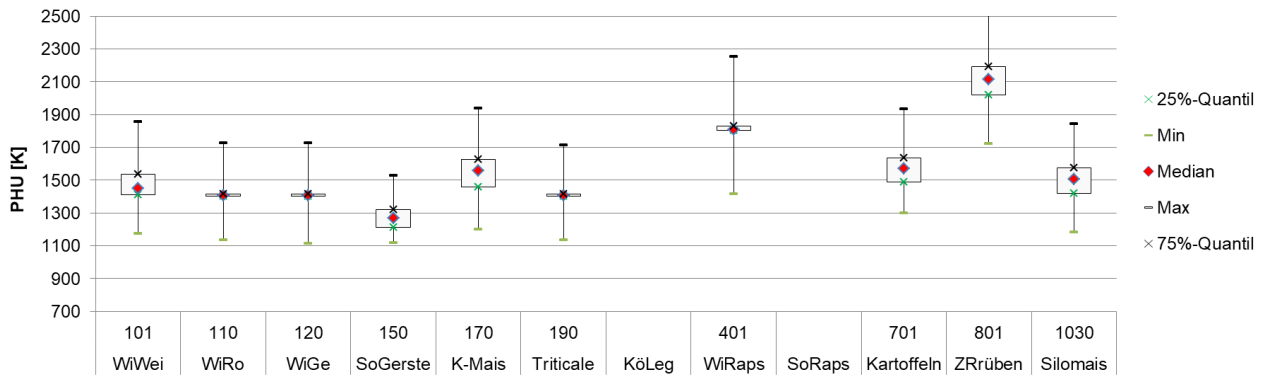


Abbildung 37: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte im LVG 8 1981-2015

Entsprechend der unterschiedlichen meteorologischen Verhältnisse innerhalb eines LVG als auch in den einzelnen Jahren treten recht starke Streuungen der simulierten Werte auf. Jedoch sind für die Mehrzahl der Fruchtarten die Interquartilsabstände (75%-Quantil – 25%-Quantil), die 50% der Werte enthalten, klein. Stärkere Streuungen treten bei Mais, Kartoffeln und Rüben auf. Dabei muss beachtet werden, dass bei der Ableitung der mittleren Erntetermine dieser Fruchtarten (mit Ausnahme von Silomais), der Stichprobenumfang für viele Vergleichsgebiete sehr klein war.

Stellt man die statistischen Ergebnisse für die Fruchtarten, die in den Fruchtfolgen aller LVGs vorkommen, gegenüber (Abbildung 38 bis Abbildung 41), so zeigt sich beim Wintergetreide nur ein geringes Streuungsmaß. Die höhere Streuung bei Raps und besonders Silomais weist darauf hin, dass hier ggf. noch einmal eine Anpassung in einzelnen Modellräumen sinnvoll ist, wenn genauere Daten vorhanden sind.

Auch wenn eine Fruchtart in der Fruchtfolge eines LVG nicht vorkommt (z.B. Körnerleguminosen und Sommerraps im LVG 8), wurden auch für diese Fruchtarten die Managementparameter anhand der Werte in benachbarten LVG abgeschätzt.

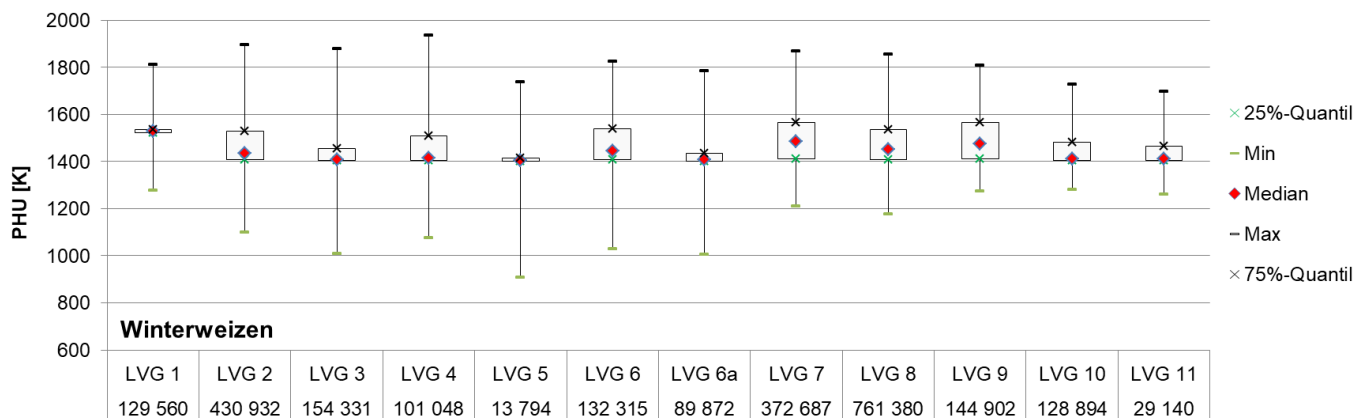


Abbildung 38: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Winterweizen mit Stichprobenumfang

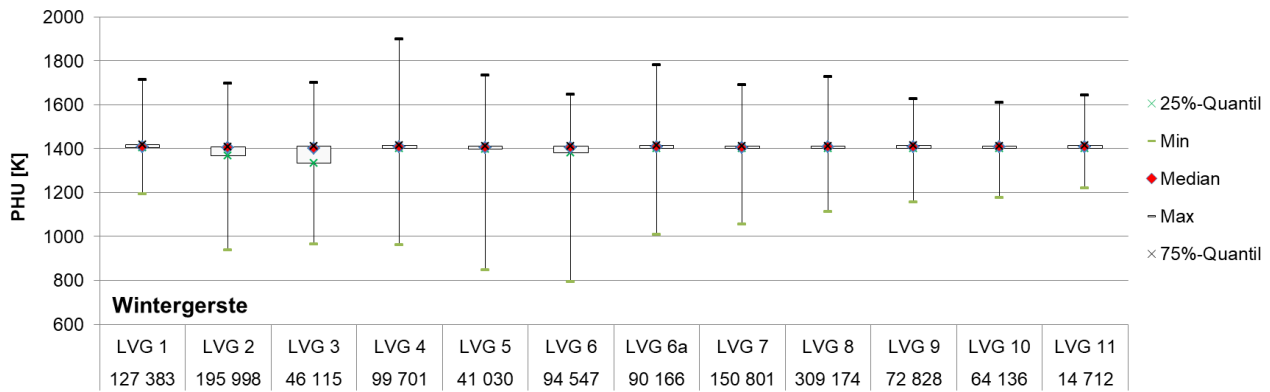


Abbildung 39: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Wintergerste mit Stichprobenumfang

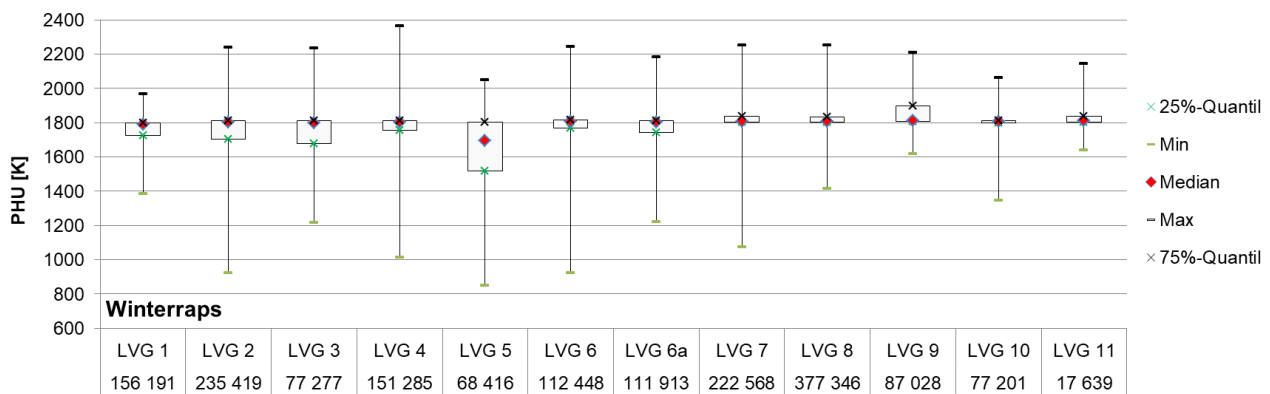


Abbildung 40: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Winterraps mit Stichprobenumfang

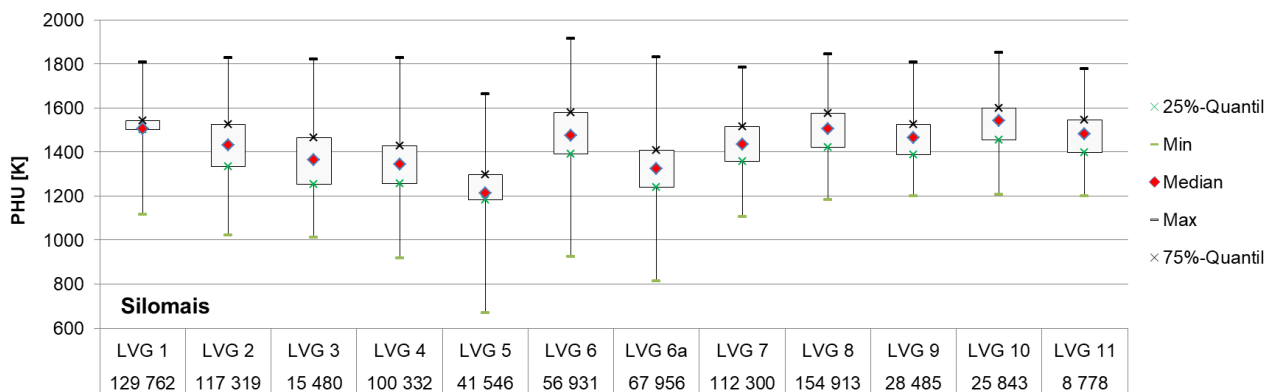


Abbildung 41: Simulierte Wärmemengen bei der Ernte Silomais mit Stichprobenumfang

Diese mittleren Managementparameter pro Landwirtschaftlichem Vergleichsgebiet (LVG) können natürlich nicht die Adaption der Vegetation bzw. des Managements an die lokalen Standortbedingungen (Verdunstungsbedarf, Sortenauswahl, etc.) wiedergeben. Eine Möglichkeit zum Ausgleich bietet die im Modell vorgesehene Berücksichtigung des Ertragspotenzials eines Standortes (s. Abschnitt 3.3.2). Basis hierfür ist die Bodenbewertung landwirtschaftlich nutzbarer Böden (LfULG, 2014). Vom LfULG, Referat 42 „Boden, Altlasten“ (Dr. A. Bräunig und R. Benning) wurde dafür der aktuelle Bearbeitungsstand der Bodenschätzung (BoschaeFGDB_20191202.gdb) zur Verfügung gestellt. Die dort enthaltenen Attribute „N-Grundzahl“ und „N-AG-Zahl“ wurden den landwirtschaftlich genutzten EFL-Flächen der Hydrotopkarte zugewiesen (Abbildung 36, Attribute Ngz und Agz). Nach Klassifizierung entsprechend Tabelle 8 wurde daraus das Ertragspotenzial abgeschätzt. Lagen keine Wertzahlen vor, so wurde von mittleren Bedingungen ausgegangen (Ertragspotenzial = 2).

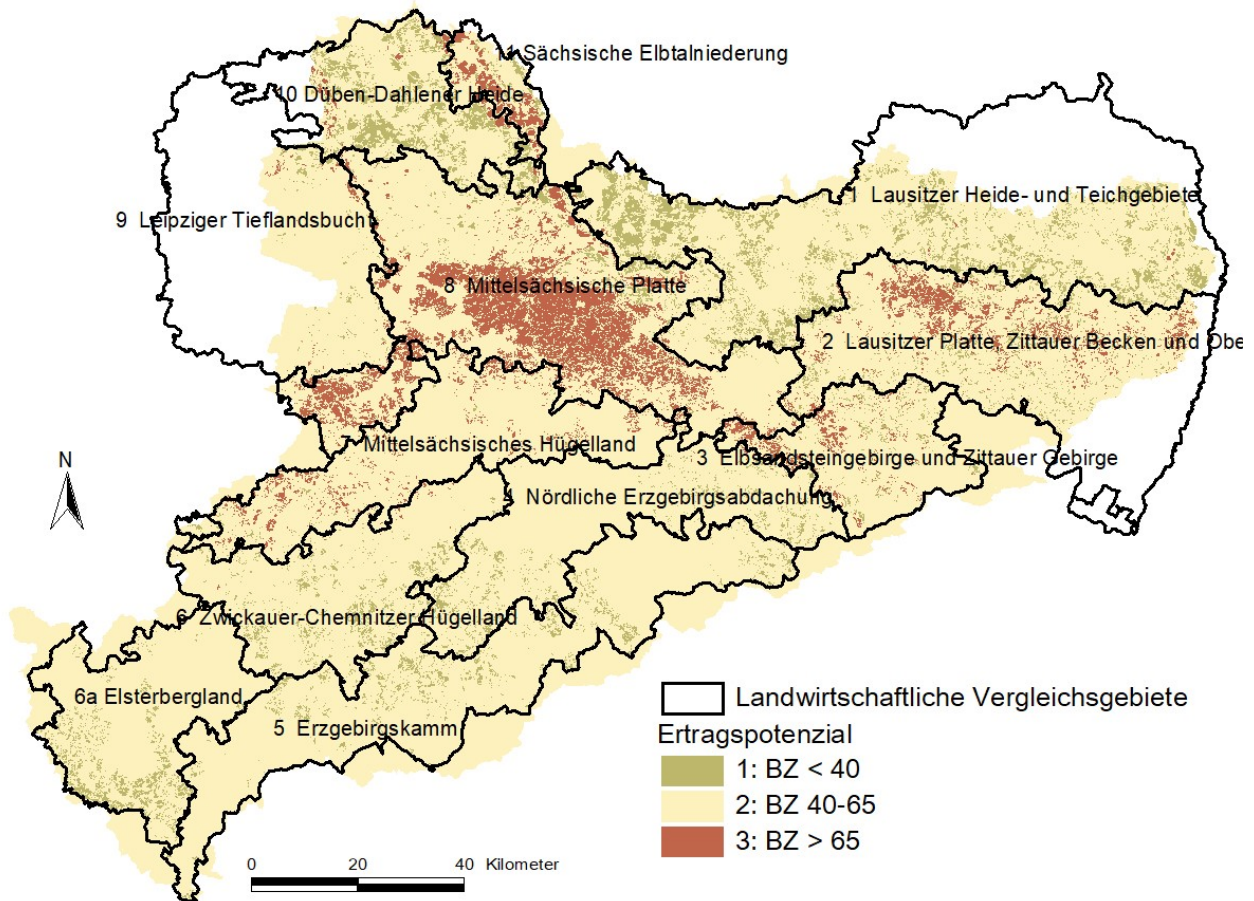


Abbildung 42: Hydrotopkarte KliWES mit Ertragspotenzial in Abhängigkeit von der Bodenwertzahl (BZ = N-Grundzahl)

3.4 Untergliederung des Bearbeitungsraums in Modellregionen

Nach dem Aufbau des Datenmodells für den Bearbeitungsraum (s. Abschnitt 2.4) und der Integration aller Parameter in das Modell ArcEGMO wurde mit der Untergliederung in Modellregionen begonnen. Wesentlich für die Festlegung der Gebietsauslässe war das Vorhandensein eines Pegels mit ausreichend langer und möglichst lückenfreier Durchflussmessreihe zwischen den Jahren 2000 bis 2015. Dieses Kriterium traf potentiell auf 189 Pegel zu, welche als Gebietsauslässe der Modellregionen festgelegt wurden. Eine Übersichtskarte der entstandenen Modellregionen enthält Abbildung 43.

Die modellinterne Untergliederung des Datenmodells und die hierarchische Verknüpfung der Ober- und Unterliegergebiete erfolgte weitestgehend automatisiert sowie in enger Abstimmung zwischen BAH und IHM, TU Dresden. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden durch BAH neue Routinen programmiert und integriert, um den Ablauf noch stärker zu optimieren und den erforderlichen Zeitaufwand weiter zu minimieren. Abschließend erfolgte ein Test auf Lauffähigkeit sowie inhaltliche Plausibilität. Die im Ergebnis vorliegenden Gebietsstrukturen erlauben Simulationen als Gesamtmodell wie auch Einzelrechnungen für ausgewählte Modellregionen.

Die insgesamt 189 Regionen des Datenmodells erstrecken sich über 11 Hierarchieebenen, wobei die erste Ebene alle 100 Kopfgebiete umfasst. In jeder nachfolgenden Ebene befinden sich jeweils die direkten Unterlieger-Regionen. In Abbildung 44 ist die Gliederung der Hierarchieebenen im Bearbeitungsraum dargestellt.

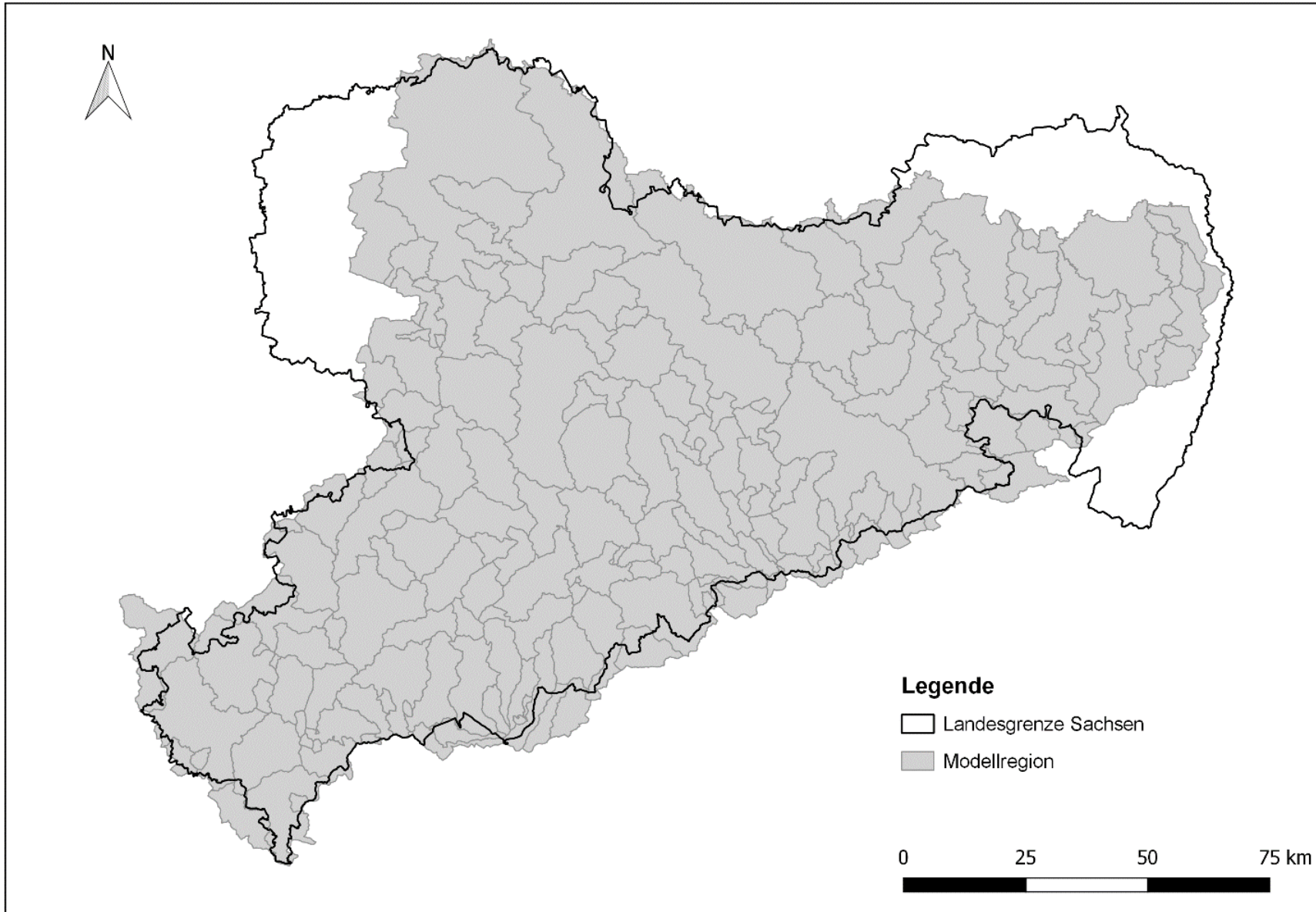


Abbildung 43: Übersichtskarte der 189 Modellregionen im derzeitigen KiWES-Fortschreibungs-Projekt

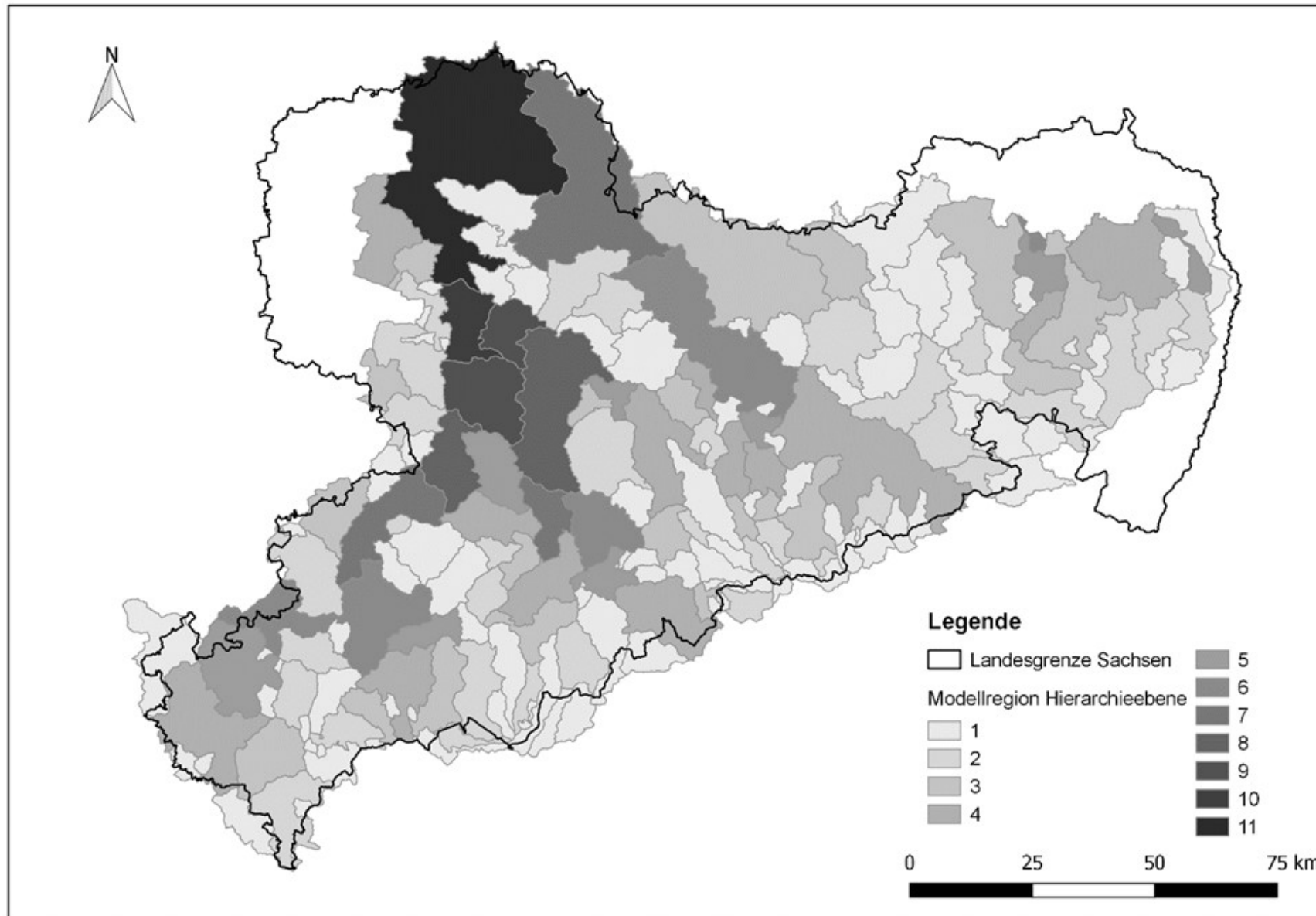


Abbildung 44: Übersichtskarte der Hierarchieebenen der 189 Modellregionen (Ebene 1 = Kopfgebiete)

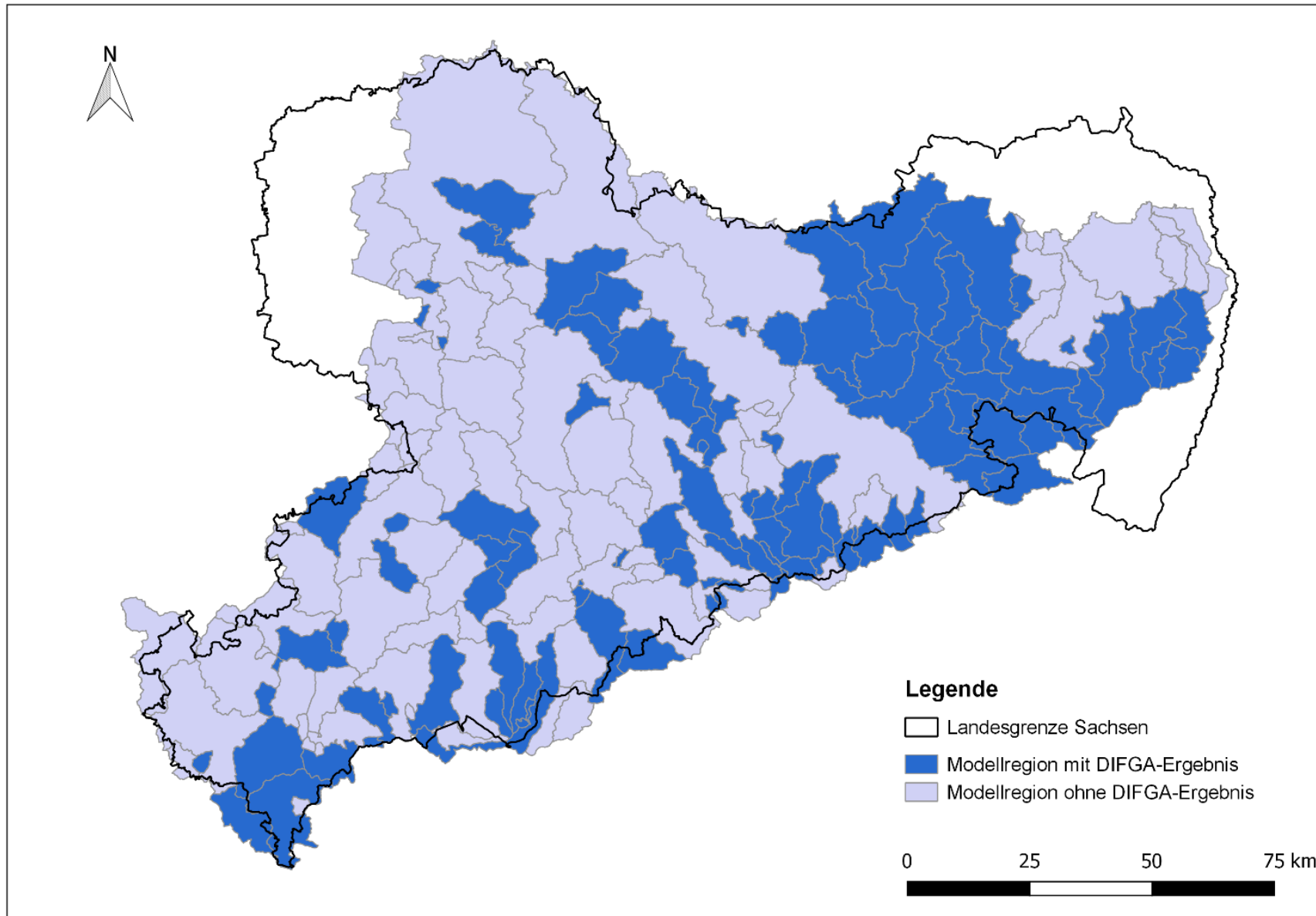


Abbildung 45: Übersichtskarte der 106 Modellregionen mit DIFGA-Ergebnis sowie 83 Modellregionen ohne DIFGA-Ergebnis

4 Wasserhaushaltsberechnungen

4.1 Optimierungsstrategie

4.1.1 Allgemeines Vorgehen

Das für den Bearbeitungsraum aufgebaute und in Regionen untergliederte Modell ArcEGMO wird einer Kalibrierung unterzogen, mit dem Ziel, eine möglichst realitätsnahe Abbildung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen wie z.B. Verdunstung und Grundwasserabfluss zu erreichen. Letztgenannte Größen liegen für die Mehrzahl der Regionen als Ergebnis von DIFGA-Analysen vor (s. Abbildung 45). Des Weiteren soll der simulierte Durchfluss eine gute Anpassung an die Beobachtungsdaten vor allem im Niedrigwasser-Bereich darstellen.

Die in Hauffe et al. (2019) anhand von repräsentativ ausgewählten sächsischen Modelltesteinzugsgebieten entwickelte Optimierungsstrategie wird aufgegriffen und an die landesweite Datenstruktur sowie die zwischenzeitlich aktualisierte ArcEGMO-Modellversion angepasst. Die Kalibrierung erfolgt separat je Modellregion. Dabei werden die Hierarchieebenen schrittweise bearbeitet, beginnend bei den Kopfgebieten. Die Optimierung der drei Modellparameter umfasst:

- Aufteilungsparameter der zwei Grundwasserspeicher (ein Parameter),
- Speicherkonstante des schnellen Grundwasserspeichers (ein Parameter) sowie
- Rückgangsexponent des Einzellinearspeichers für den Gerinneabfluss (ein Parameter).

Im Vergleich zur bisherigen Optimierungsstrategie (s. Schwarze et al., 2014 und Hauffe et al., 2016) werden folgende Parameter für den gesamten Bearbeitungsraum einheitlich (d.h. nicht regionsspezifisch) definiert:

- Verdunstungskorrektur (zwei Parameter),
- Makroporosität je Bodenhorizont (ein Parameter) und
- Lagerungsdichte je Bodenhorizont (ein Parameter).

In den DIFGA-Regionen ermöglichte das jeweils noch nicht kalibrierte Modell bereits eine zufriedenstellende Anpassung des simulierten Restglied (Verdunstung plus Bodenspeicheränderung) an die Ergebnisse der DIFGA-Analyse auf Monatsbasis. Abbildung 46 zeigt die Spannbreite der prozentualen Restglied-Abweichungen der Simulation von den DIFGA-Werten für den Zeitraum 2000 bis 2015 vor der Optimierung. Dabei ist jede Region über ihre flächenmäßig größte Landnutzungsklasse erfasst. Für 80 Prozent der Modellregionen mit DIFGA-Ergebnis liegt die mittlere prozentuale Restglied-Abweichung unter 20 Prozent. Die größten Abweichungen ergeben sich für Regionen, in denen Grünland, Heide oder Nadelwald dominiert. Aufgrund dessen werden die voreingestellten Verdunstungskorrektur-Faktoren für diese Landnutzungsklassen im gesamten Bearbeitungsraum um 20 Prozent leicht erhöht, wodurch die Restglied-Abweichungen betragsmäßig sinken (s. Abbildung 47).

Die Makroporosität war bisher Optimierungsparameter, da sich dieser Parameter in einer bereits im Jahr 2012/2013 durchgeführten Sensitivitätsanalyse (s. Schwarze et al., 2014) als sehr sensibler Bodenparameter herausstellte. Da für diesen Parameter im Allgemeinen nur grobe Richtwerte für alle Bodenhorizonte existierten, wurde er als Optimierungsparameter im Bodenmodell herangezogen. In der jetzt angepassten Strategie wird der Parameter vorab durch ArcEGMO basierend auf den Bodeneigenschaften jedes Horizontes berechnet. Auch die nahezu lückenlos vorliegende Lagerungsdichte, welche nun als Information aus der Bodenkarte BK50 hervorgeht, wird während der Kalibrierung nicht verändert. Sie nimmt üblicherweise mit zunehmender Bodentiefe ebenfalls zu.

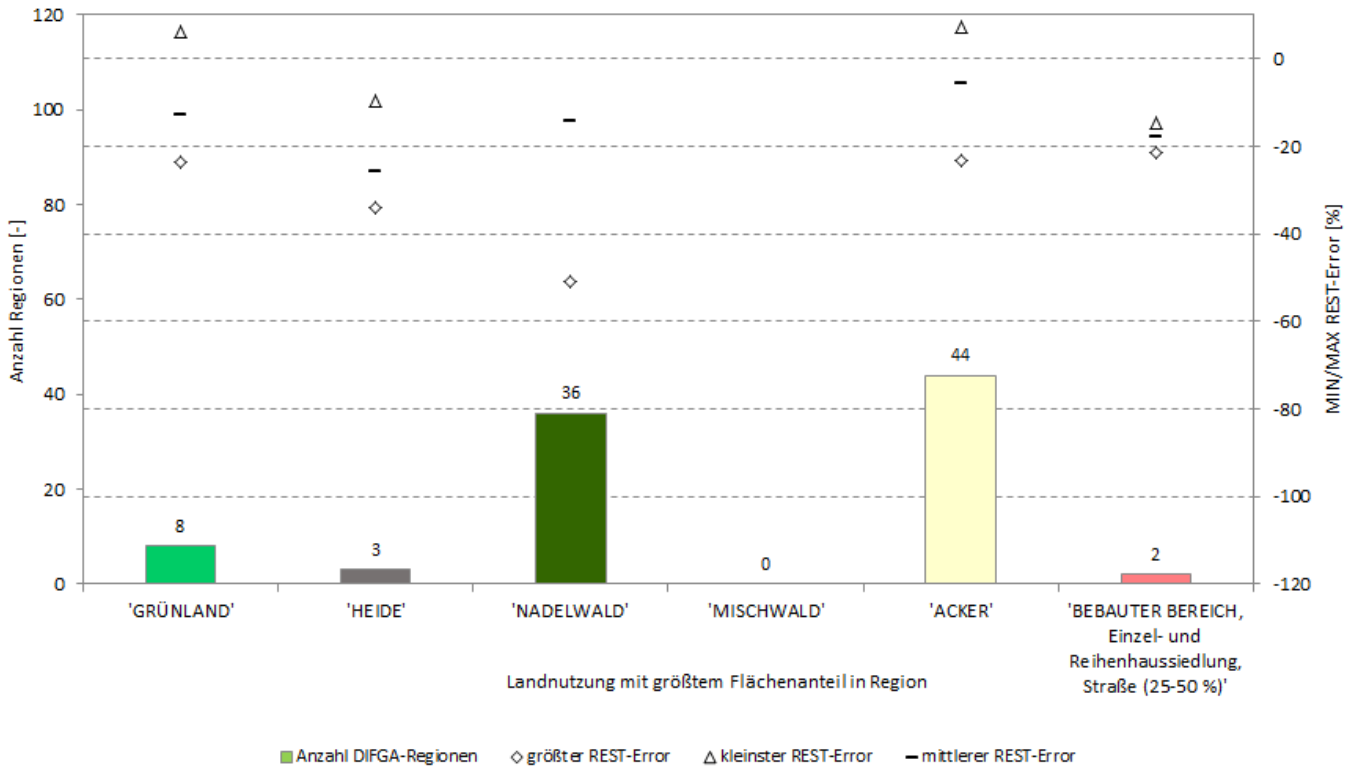


Abbildung 46: Anzahl Modellregionen (mit DIFGA-Ergebnis) mit größtem Flächenanteil in Landnutzungs-kategorie und minimale/maximale mittlere prozentuale Restglied-Abweichung (2000-2015, unkalibriertes Modell), ohne Veränderung der Verdunstungskorrektur-Faktoren

Die drei ausgewählten Modellparameter werden gleichzeitig, d.h. in einem einstufigen Verfahren optimiert, wobei folgende Vergleichsgrößen für Regionen mit DIFGA-Ergebnis genutzt werden:

- täglicher gemessener Durchfluss Q,
- Dauerlinie auf Basis des logarithmierten täglich gemessenen Durchflusses $\log(Q)$ sowie
- Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 auf monatlicher Basis (DIFGA-Ergebnis).

Die letztgenannte Größe QG1 liegt ausschließlich für Regionen mit DIFGA-Ergebnis vor. Sie wird im Rahmen der Optimierung der ArcEGMO-Ausgabe für RG1 gegenübergestellt, welche modellintern ebenfalls den Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher repräsentiert. Bei Regionen ohne DIFGA-Ergebnis wird die Optimierung nur für die zwei Vergleichsgrößen Durchfluss und Dauerlinie realisiert.

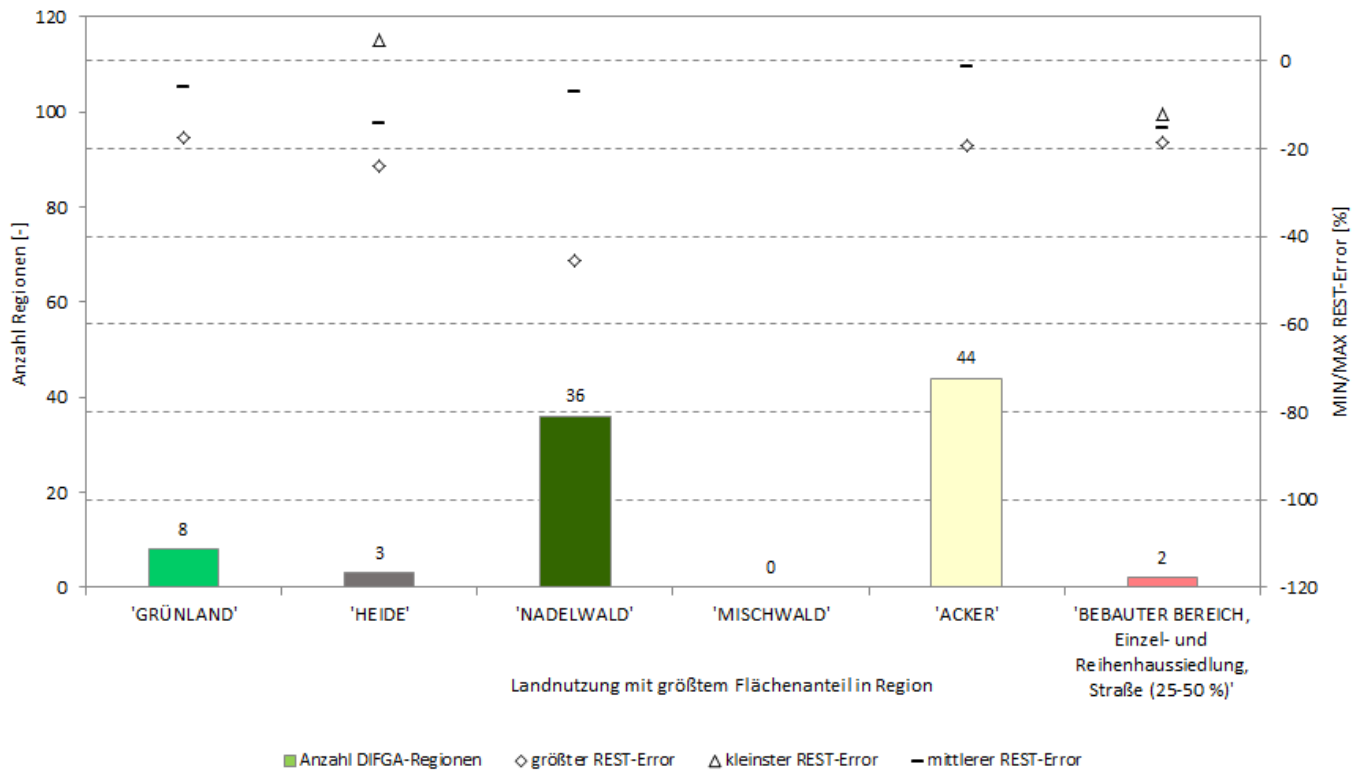


Abbildung 47: Anzahl Modellregionen (mit DIFGA-Ergebnis) mit größtem Flächenanteil in Landnutzungs-kategorie und minimale/maximale mittlere prozentuale Restglied-Abweichung (2000-2015, unkalibriertes Modell), mit Erhöhung der Verdunstungskorrektur-Faktoren für Grünland, Heide und Nadelwald

Zur Einschätzung der Modellanpassung während der Optimierung kam die Residuenquadratsumme SSE (sum of squared errors) als Gütekriterium zum Einsatz:

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

Hierbei steht x_i für die jeweilige beobachtete Vergleichsgröße zum Zeitpunkt i und y_i für die entsprechende simulierte Modellausgabe zum selben Zeitpunkt i . Zu beachten ist, dass die gemessene sowie die simulierte Durchflussreihe hier jeweils logarithmiert in die Betrachtung eingehen. Die Logarithmierung des Durchflusses dient der stärkeren Betonung von Niedrigwasserereignissen bzw. der Reduzierung des Einflusses von Hochwasserereignissen auf die Anpassungsgüte. Für $SSE = 0$ ist die simulierte Reihe mit der gemessenen identisch. Je größer der Wert für SSE , desto größer die Abweichung zwischen simulierter Modellausgabe und der Zielgröße.

Aufgrund der Vielzahl zu optimierender Regionen wurde die Kalibrierung monokriteriell durchgeführt. Diese Strategie ist bei nur drei Kalibrierparametern wesentlich effektiver und zeitsparender als ein multikriterielles Verfahren. Letzteres hätte die Fertigstellung der Optimierung innerhalb des zeitlichen Projektrahmens unmöglich gemacht.

Es erfolgt jeweils eine Aufsummierung der SSE-Werte für die drei (bei Region mit DIFGA-Ergebnis) bzw. zwei (bei Region ohne DIFGA-Ergebnis) Vergleichsgrößen zu einer einzigen resultierenden Zielgröße. Diese stellt somit die Summe der Abweichungen von den Modellsimulationen und den zugehörigen Vergleichsgrößen dar und wird im Rahmen der Optimierung minimiert:

$$\min F = \min[\text{sum}(SSE(\log Q^x, \log Q^y), SSE(\text{Dauerlinie}(\log Q)^x, \text{Dauerlinie}(\log Q)^y), SSE(RG1^x, RG1^y))]$$

Der Wertebereich von F liegt zwischen $[0, \infty]$, wobei 0 das Optimum darstellt.

Optimiert wurde für den Zeitraum 2000 bis 2015, da dieser die aktuellen klimatischen Bedingungen am besten wiedergibt. Außerdem traten in diesem Zeitraum keine großräumigen und für den Wasserhaushalt gravierenden Landnutzungsänderungen auf, wie z.B. das Waldsterben im Erzgebirge in den 80er Jahren.

Insgesamt werden 177 Modellregionen der oben beschriebenen Optimierung unterzogen (s. Abbildung 48, grüne Flächen). Für die restlichen 12 Modellregionen bzw. deren Pegel lagen zum Beginn der Optimierung keine vollständigen Durchflussdaten im betrachteten Zeitraum 2000-2015 vor (s. rote bzw. gelbe Flächen). Für vier von den 12 Regionen wurden Durchflussdaten nachgeliefert (s. Abbildung 48, gelbe Flächen), jedoch zu spät, um sie in der Optimierung noch nutzen zu können. Alle Modellregionen ohne Optimierung behalten somit ihre unveränderte Ausgangsparametrisierung. Hinsichtlich der Modellierung ist für das Flussgebiet der Elbe eine Besonderheit zu beachten. Da sich deren Quellgebiet außerhalb des Bearbeitungsraumes befindet, ist das Einlesen einer beobachteten Durchflussganglinie am Modellrand (Pegel Schöna) notwendig (s. Abbildung 48, roter Pfeil).

Die Validierung der optimierten Modelle erfolgt anhand von sechs zusätzlichen Pegeln (s. Abbildung 48, gelbe Kreise). Diese wurden bei der Optimierung aufgrund von räumlicher Nähe zu anderen Pegeln oder zu kurzen Durchflussreihen nicht berücksichtigt.

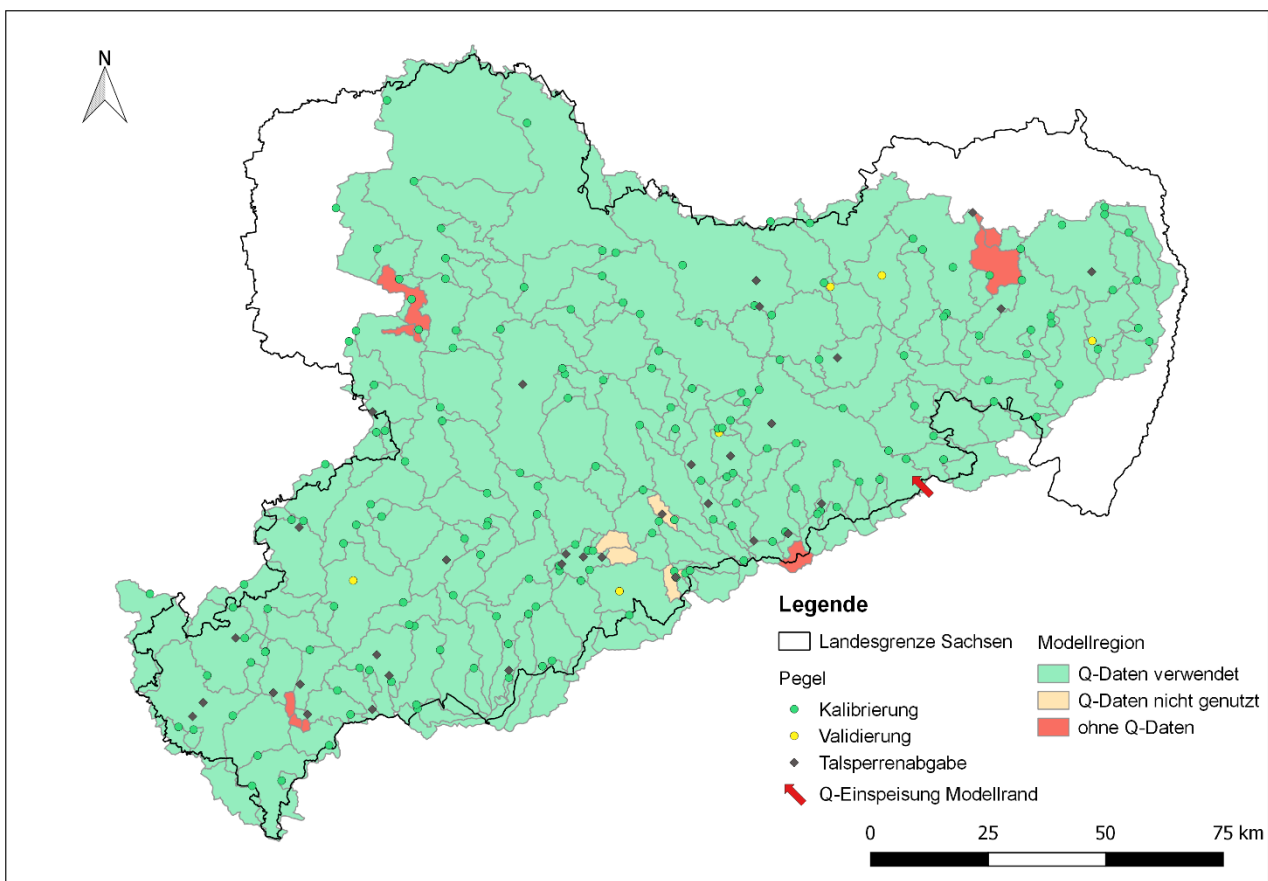


Abbildung 48: Übersichtskarte der 177 Modellregionen mit Optimierung (grün) und der 12 Modellregionen ohne Optimierung – aufgrund fehlender Durchflussdaten (rot) bzw. zu spät gelieferter Durchflussdaten (gelb) sowie der verwendeten Pegel

4.1.2 Verfahren zur Auswertung der Optimierung

Während der Optimierung kommt die Residuenquadratsumme (SSE) als Gütemaß zum Einsatz, um den optimalen Parametersatz für jede Modellregion zu ermitteln (s. Abschnitt 4.1.1). Die Bewertung der Anpassungsgüte im Zeitraum von 2000 bis 2015 für das bereits optimierte Modell erfolgt mit zwei weiteren Kriterien:

$$\text{Mittlerer prozentualer Volumenfehler (mean percent error)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \cdot 100$$

und

$$\text{Nash-Sutcliffe Effizienz (Nash-Sutcliffe efficiency) NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}$$

Dabei steht x_i für die jeweilige beobachtete Vergleichsgröße zum Zeitpunkt i und y_i für die entsprechende simulierte Modellausgabe zum selben Zeitpunkt i . Der Volumenfehler wird als Abweichung des simulierten vom beobachteten langjährigen Mittelwert berechnet und dient der Beurteilung der mengenmäßigen Abbildung der Vergleichsgröße durch das Modell. Demgegenüber kann mit der NSE vor allem eingeschätzt werden, wie gut das Modell die Vergleichsgröße zeitlich sowie in ihrer Höhe annähert. Die nachfolgenden drei Vergleichsgrößen werden für alle Regionen mit DIFGA-Ergebnis betrachtet:

- tägliche Durchflüsse Q am Pegel,
- monatliche QG1-Werte aus DIFGA (Vgl. mit RG1 in ArcEGMO) sowie
- monatliche REST-Werte aus DIFGA (Vgl. mit Verdunstung plus Bodenspeicheränderung in ArcEGMO).

Besitzt eine Region kein DIFGA-Ergebnis entfallen die beiden letztgenannten Vergleichsgrößen. Zu beachten ist, dass für die Bestimmung der NSE die logarithmierten täglichen Durchflusswerte genutzt werden, um den Fokus auf die Anpassung im Niedrigwasserbereich zu legen.

Aufgrund der Vielzahl an Modellregionen und der damit einhergehenden hohen Anzahl an Gütemaßen wird ein Scoring-System zur Kategorisierung der Anpassungsgüte konzipiert (s. Tabelle 15). Aus dem mittleren Volumenfehler ergibt sich der Volume-Score und aus der NSE resultiert der NSE-Score. Der Wertebereich der Scores erstreckt sich dabei von null (schlechte Anpassung) bis fünf (sehr gute Anpassung). Jeder Modellregion werden somit zwei Score-Werte pro Vergleichsgröße zugeordnet (s. Tabelle 16). In Summe besteht der Gesamtscore für Regionen mit DIFGA-Ergebnis aus drei und für Regionen ohne DIFGA-Ergebnis aus einem Score-Wert.

Tabelle 15: Einteilung des mittleren prozentualen Volumenfehlers sowie der NSE in Klassen (untere Grenze offen, obere Grenze geschlossen) und Zuordnung eines Score-Wertes

mittlerer Volumenfehler		Volume-Score	NSE		NSE-Score
von [%]	bis [%]		von [-]	bis [-]	
	<= -80	0		<= 0	0
-80	-60	1	0	0,2	1
-60	-40	2	0,2	0,4	2
-40	-20	3	0,4	0,6	3
-20	-10	4	0,6	0,8	4
-10	10	5	0,8	1	5
10	20	4			
20	40	3			
40	60	2			
60	80	1			
> 80		0			

Tabelle 16: Übersicht der Score-Werte je Vergleichsgröße für Regionen mit bzw. ohne DIFGA-Ergebnis

Region	Score	Vergleichsgröße			Gesamtscore	max. Gesamtscore
mit DIFGA-Ergebnis	Volume/NSE	Q / log Q	QG1	REST	\sum 3 Einzelscores = Volume/NSE-Score gesamt	15 (3 x 5)
ohne DIFGA-Ergebnis	Volume/NSE	Q / log Q	-	-	Einzelscore = Volume/NSE-Score gesamt	5 (1 x 5)

4.2 Ergebnisse der Optimierung

Die Bewertung der Modellgüte erfolgt zu Beginn für den Ausgangszustand ohne Veränderung der Startparametrisierung. Nach abgeschlossener Optimierung wird die Modellgüte auf Basis der optimierten Parameterwerte mit der anfänglichen Modellgüte verglichen. Dabei stützt sich die Auswertung auf das in Abschnitt 4.1.2 vorgestellte Scoring-System mit Vergabe eines Volume- und NSE-Scores je Modellregion für eine oder mehrere Vergleichsgrößen. Die Ergebnisse werden zunächst für den gesamten Projektraum und danach für ausgewählte Regionen vorgestellt.

4.2.1 Ergebnisse im gesamten KliWES-Projektraum

Modellgüte im Ausgangszustand

Für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell wird ein Simulationslauf mit allen Modellregionen im Zeitraum von 2000 bis 2015 durchgeführt. Mithilfe der Ergebnisse kann das initiale Modellverhalten im Optimierungszeitraum regionspezifisch eingeschätzt werden. Die Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die Auswertung des mittleren prozentualen Volumenfehlers als Volume-Score je Vergleichsgröße Q, QG1 und REST. Für die Pegel der in Abbildung 49 grau eingefärbten acht Modellregionen (jeweils ohne DIFGA-Ergebnis) liegen keine beobachteten Durchflussdaten im Optimierungszeitraum vor. Somit sind diese von der Vergabe der Score-Werte stets ausgenommen.

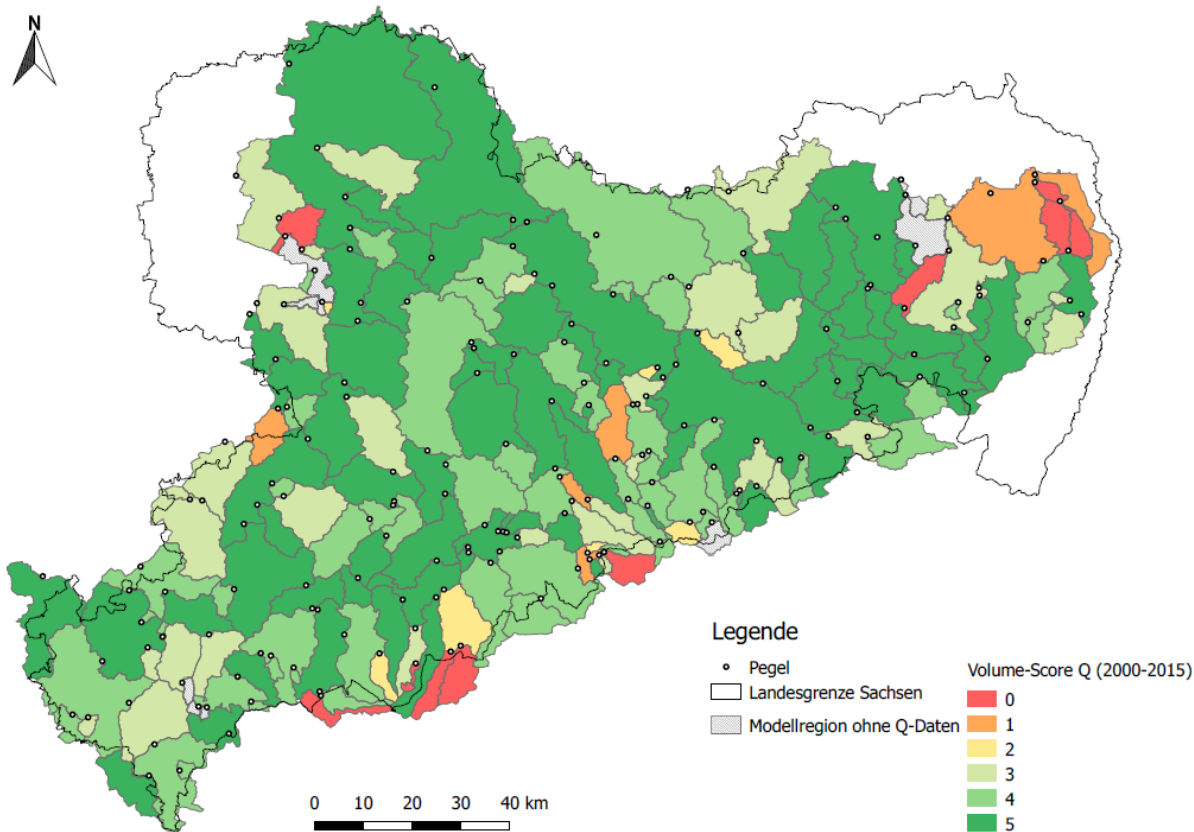


Abbildung 49: Auswertung des mittleren prozentualen Volumenfehlers des simulierten täglichen Durchflusses (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als Volume-Score Q (0 = Betrag Volumenfehler größer 80 Prozent, 5 = Betrag Volumenfehler maximal 10)

Für alle Vergleichsgrößen ergibt sich ein überwiegend positives Bild hinsichtlich der volumetrischen Anpassung der noch nicht optimierten Modellausgabe auf Regionsebene. Bezüglich des Durchflusses (s. Abbildung 49) erreichen bereits 71 Prozent der Modellregionen einen Volume-Score von mindestens vier (Betrag mittlerer Volumenfehler maximal 20 Prozent) (s. Tabelle 17). Für 22 Modellregionen liegt der Volume-Score Q bei null bis zwei (Betrag mittlerer Volumenfehler größer 40 Prozent). Letztere liegen größtenteils im Randbereich des anthropogen stark beeinflussten Lausitzer Bergbaugebietes sowie der durch Talsperrenabgaben, Überleitungen und Umfluten beeinflussten Pegel im Bereich des Erzgebirgskamms. Bei der Betrachtung von QG1 (s. Abbildung 50) besitzt die Mehrzahl der Regionen mit DIFGA-Ergebnis (74 Prozent) einen Volume-Score von mindestens drei (Betrag mittlerer Volumenfehler kleiner als 40 Prozent) (s. Tabelle 17). Es fällt auf, dass vor allem flächenmäßig größere Regionen mit höherer Hierarchieebene QG1 aus DIFGA weniger gut nachbilden. Die Modellergebnisse für das simulierte Restglied (s. Abbildung 51) weisen nahezu für alle Regionen eine sehr gute Anpassung an die DIFGA-Daten auf. Denn 92 Prozent der Modellregionen erhalten einen Volume-Score von mindestens vier (s. Tabelle 17).

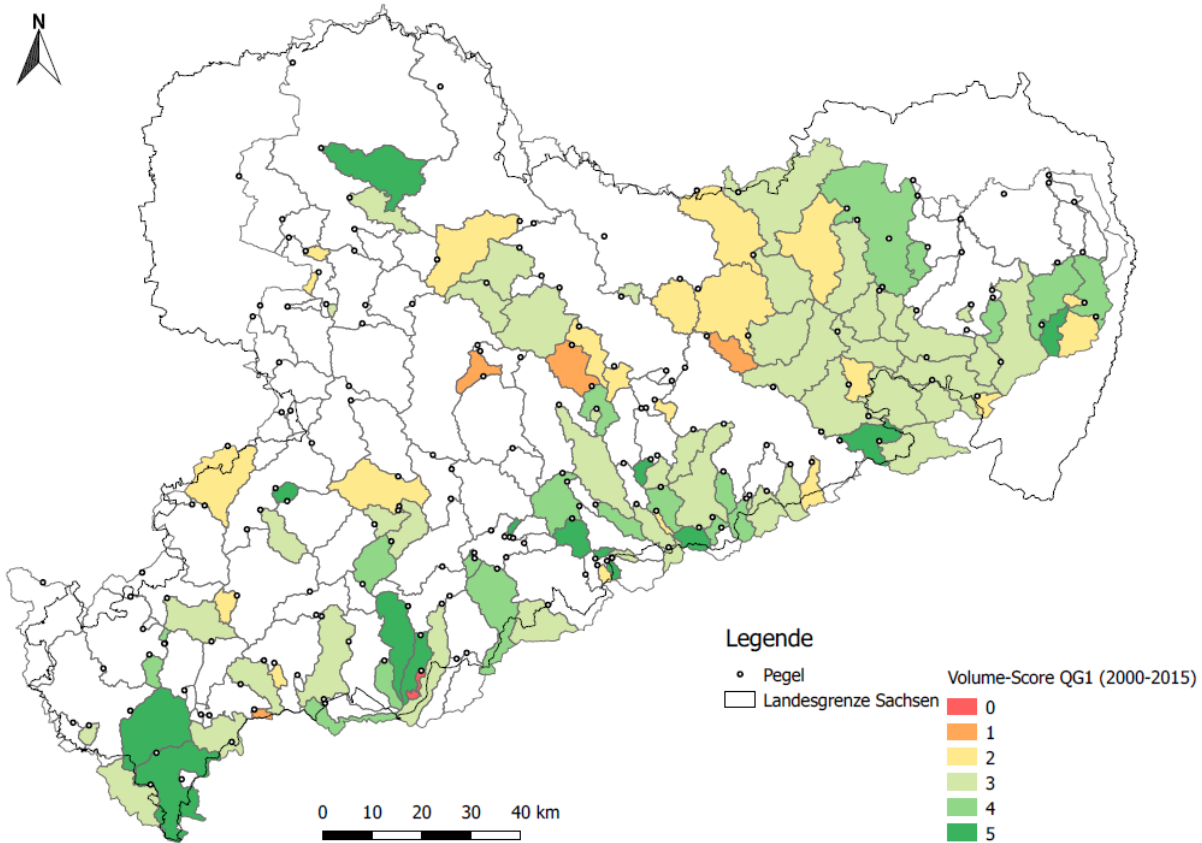


Abbildung 50: Auswertung des mittleren prozentualen Volumenfehlers des simulierten Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als Volume-Score QG1 (0 = Betrag Volumenfehler größer 80 Prozent, 5 = Betrag Volumenfehler maximal 10 Prozent) für 106 Modellregionen mit DIFGA-Ergebnis

Tabelle 17: Anzahl der Modellregionen je Volume-Score-Wert für die Vergleichsgrößen Q, QG1 und REST sowie prozentualer Anteil bezogen auf die Gesamtzahl der Regionen (181 Regionen mit Durchflussdaten bzw. 106 Regionen mit DIFGA-Ergebnis) für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015

Volume-Score Q			Volume-Score QG1		
Q	Anzahl Regionen	Anteil [%]	QG1	Anzahl Regionen	Anteil [%]
0	9	5	0	1	1
1	6	3	1	4	4
2	7	4	2	22	21
3	31	17	3	45	42
4	54	30	4	19	18
5	74	41	5	15	14
Summe	181	100	Summe	106	100

Volume-Score REST		
REST	Anzahl Regionen	Anteil [%]
0	0	0
1	0	0
2	1	1
3	8	8
4	26	25
5	71	67
Summe	106	100

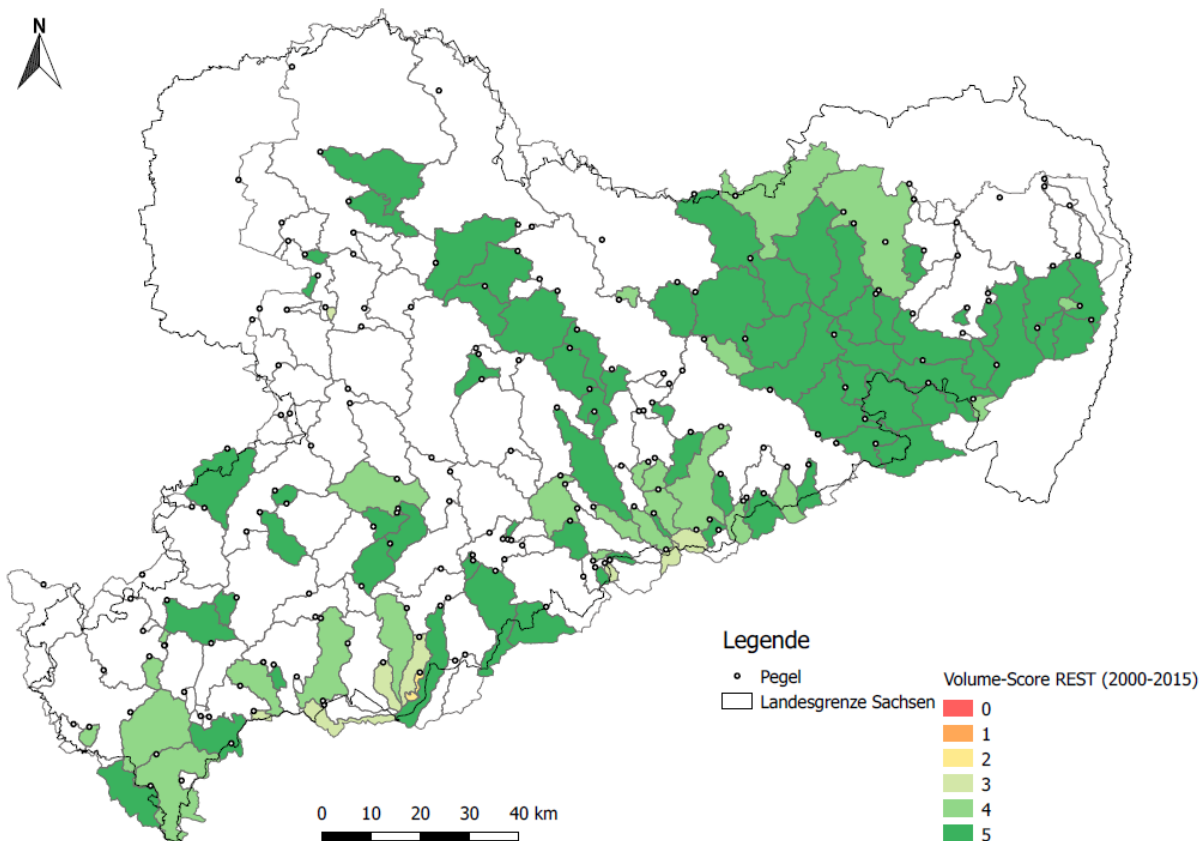


Abbildung 51: Auswertung des mittleren prozentualen Volumenfehlers des simulierten Restgliedes (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als Volume-Score REST (0 = Betrag Volumenfehler größer 80 Prozent, 5 = Betrag Volumenfehler maximal 10 Prozent) für 106 Modellregionen mit DIFGA-Ergebnis

In Abbildung 52 ist die Aufsummierung der drei Volume-Scores bezüglich Q, QG1 und REST für alle Regionen mit DIFGA-Ergebnis ersichtlich. Für die überwiegende Anzahl der Regionen liegt der Gesamtscore bei mindestens 12 von maximal 15 zu erreichenden Punkten, bei einer größtenteils ausgeglichenen Verteilung auf die Einzelscores. Alle restlichen Regionen erlangen mindestens Gesamtscore sieben. Die einzige Ausnahme bildet die Region des Pegels Cranzahl (ID 10), deren Gesamtscore aufgrund starker (aber nicht ausreichend mit Daten belegter) anthropogener Beeinflussung deutlich niedriger ist.

Abbildung 53 zeigt die Auswertung des NSE-Scores für die Vergleichsgröße des logarithmierten täglichen Durchflusses logQ im gesamten KliWES-Projektraum ohne Optimierung des ArcEGMO-Modells. Im Vergleich zur volumetrischen Anpassung sind die Ergebnisse wesentlich durchwachsener, wobei 54 Prozent der Regionen einen NSE-Score für logQ von mindestens drei (NSE größer als 0,4) erreichen (s. Tabelle 18). Auch hier fallen neben einigen Regionen in Nord- und Mittelsachsen das Lausitzer Bergbaugebiet sowie Bereiche des Erzgebirgsvorlands und -kamms als Problemgebiete auf.

Für die Vergleichsgröße QG1 sieht die Verteilung der NSE-Score-Werte ähnlich aus (s. Tabelle 18). Es erhalten 43 Prozent der Regionen (mit DIFGA-Ergebnis) einen NSE-Score QG1 von mindestens drei. Dagegen sticht die Anpassung des simulierten Restgliedes hinsichtlich des NSE-Scores positiv hervor (s. Tabelle 18). Von allen Regionen mit DIFGA-Ergebnis erzielen 76 Prozent einen NSE-Score REST von mindestens drei.

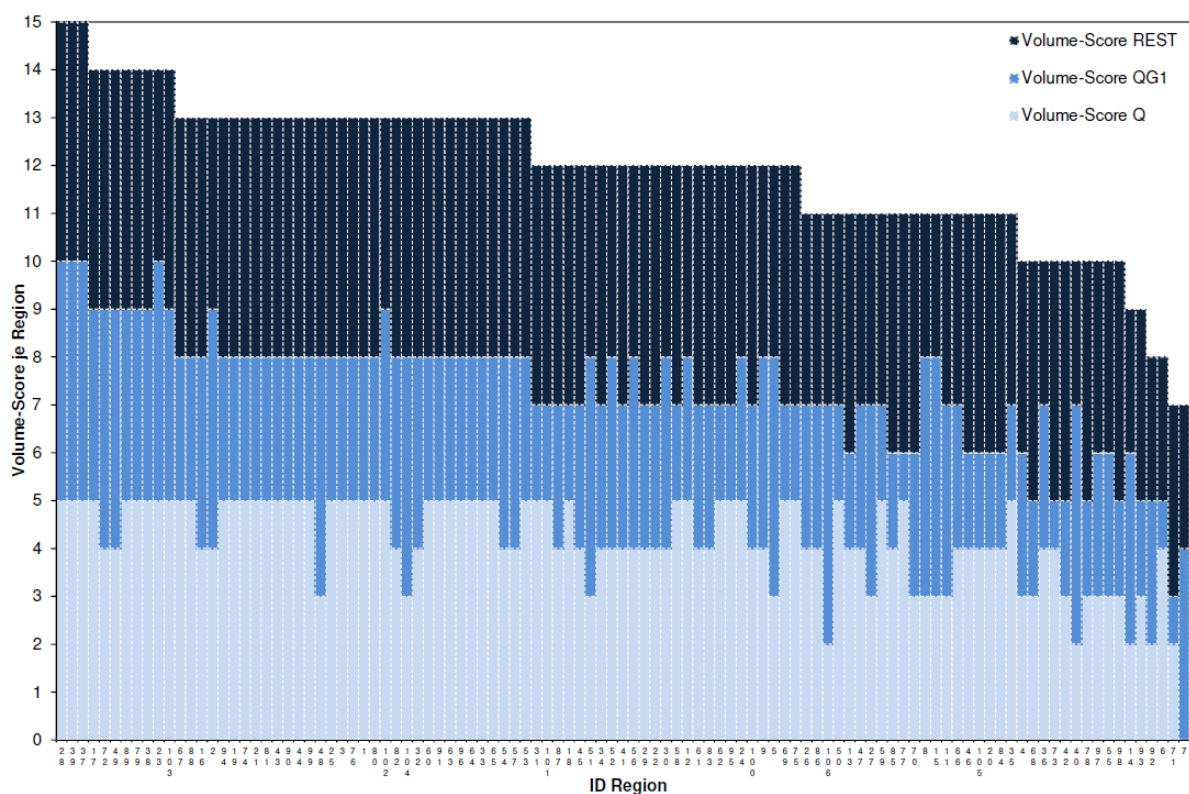


Abbildung 52: Volume-Score-Werte je Vergleichsgröße und Modellregion (mit DIFGA-Ergebnis) für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015

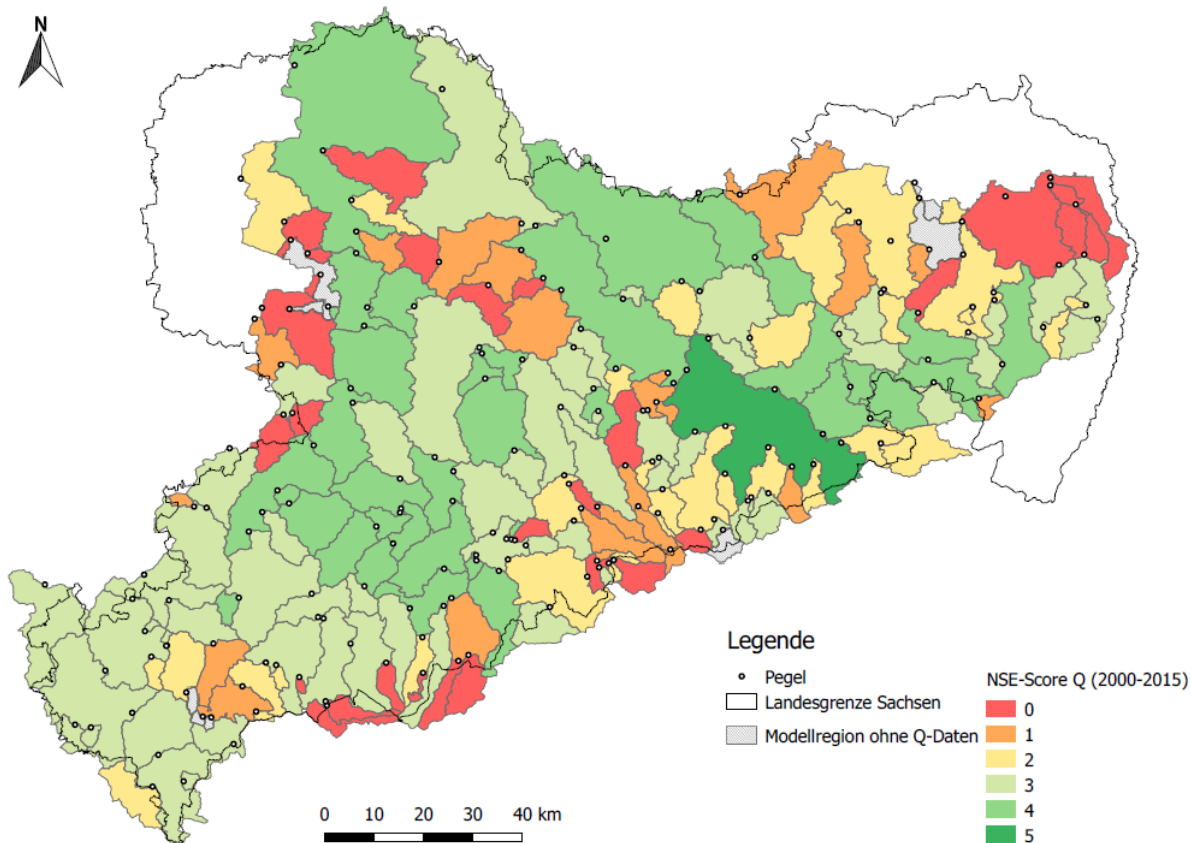


Abbildung 53: Auswertung der Nash-Sutcliffe Effizienz des simulierten täglichen Durchflusses (Zeitraum 2000 bis 2015, nicht kalibriertes ArcEGMO-Modell) als NSE-Score $\log Q$ (0 = NSE kleiner oder gleich null, 5 = NSE größer als 0,8) für 181 Modellregionen (acht Regionen ohne Durchflussdaten)

Tabelle 18: Anzahl der Modellregionen je NSE-Score-Wert für die Vergleichsgrößen Q, QG1 und REST sowie prozentualer Anteil bezogen auf die Gesamtzahl der Regionen (181 Regionen mit Durchflussdaten bzw. 106 Regionen mit DIFGA-Ergebnis) für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015

NSE-Score $\log Q$			NSE-Score QG1		
NSE-Score	Anzahl Regionen	Anteil [%]	NSE-Score	Anzahl Regionen	Anteil [%]
0	28	15	0	8	8
1	26	14	1	22	21
2	31	17	2	30	28
3	59	33	3	37	35
4	36	20	4	9	8
5	1	1	5	0	0
Summe	181	100	Summe	106	100

NSE-Score REST		
NSE-Score	Anzahl Regionen	Anteil [%]
0	1	1
1	5	5
2	20	19
3	78	74
4	2	2
5	0	0
Summe	106	100

Zusammenfassend zeigt Abbildung 54 die Aufsummierung der drei NSE-Scores bezüglich logQ, QG1 und REST für alle Regionen mit DIFGA-Ergebnis. Dabei entspricht die Sortierung der Regionen der Reihenfolge in Abbildung 47, das heißt von links nach rechts mit abnehmendem Volume-Gesamtscore. Es ist erkennbar, dass eine gute volumetrische Anpassung der Simulationen ohne Optimierung nicht zwangsläufig eine vergleichbar gute Anpassung bezüglich der Nash-Sutcliffe Effizienz bedeutet. Der maximal erreichte NSE-Gesamtscore liegt mit einem Wert von elf deutlich unter dem Niveau des Volume-Gesamtscores.

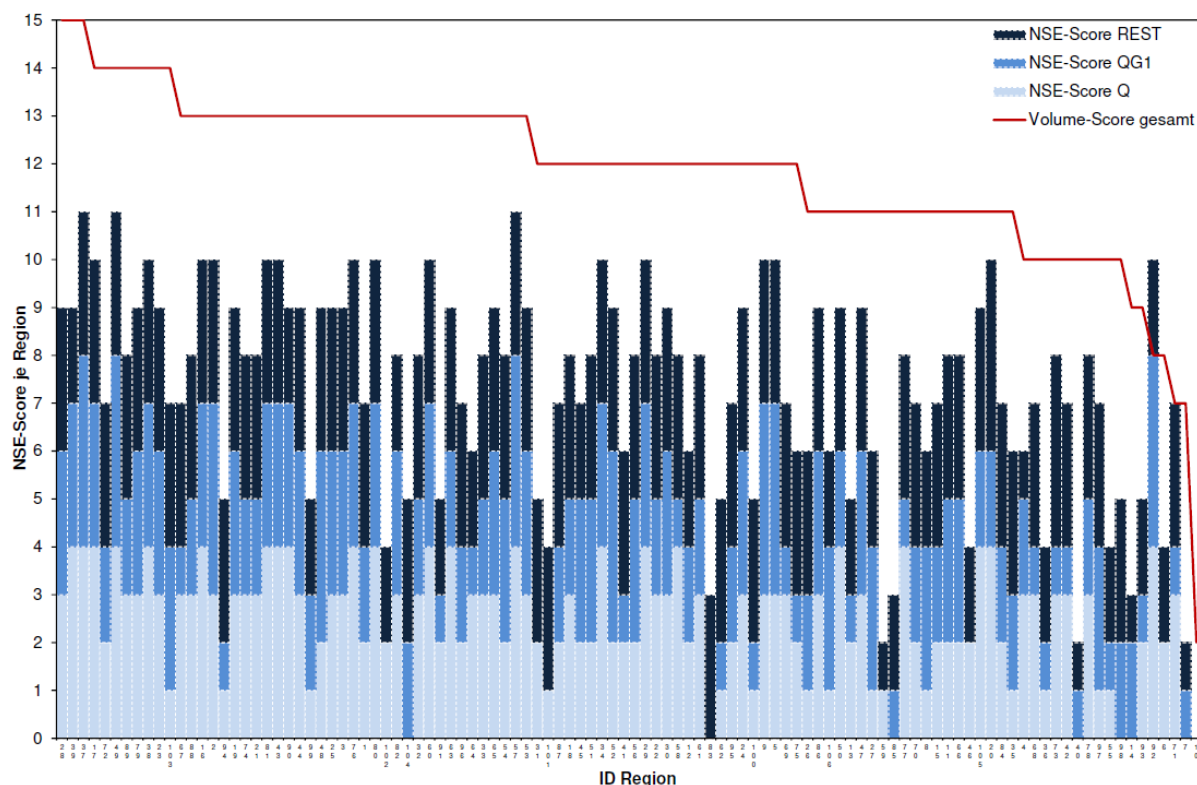


Abbildung 54: NSE-Score-Werte je Vergleichsgröße und Modellregion (mit DIFGA-Ergebnis) für das nicht kalibrierte ArcEGMO-Modell im Zeitraum 2000 bis 2015, Regionen von links nach rechts mit abnehmendem Volume-Gesamtscore (Sortierung wie in Abbildung 52)

Modellgüte mit Optimierung

Wie in Abschnitt 4.1.1 bereits erläutert, sind 177 von den insgesamt 189 ausgewiesenen Modellregionen im KliWES-Projektraum für die Optimierung vorgesehen. Bei den restlichen 12 Modellregionen mit fehlenden bzw. verspätet erhaltenen Durchflussdaten im Optimierungszeitraum erfolgt keine Veränderung der initialen Modellparameter (s. gelbe bzw. rote Flächen in Abbildung 48).

Weiterhin ergab die Analyse der Modellgüte im Ausgangszustand für neun Regionen (davon zwei mit DIFGA-Ergebnis) eine ungenügende Anpassung hinsichtlich der Vergleichsgrößen. Dabei lagen der Volume-Score bzw. der NSE-Score bei insgesamt null oder eins. Hierfür können beispielhaft diese Regionen genannt werden:

- Pegel Johanngeorgenstadt 2 (Region sieben), Pegel Cranzahl (10) sowie Pegel Schmalzgrube (108) im Bereich des Erzgebirgskamms mit einem stark abweichenden Basisabflussniveau zwischen simuliertem und beobachtetem Durchfluss, was durch vorliegende Gräben und Überleitungen verursacht wird.
- Pegel Albrechtshain 1 (187) mit einer sehr starken Reaktion auf Niederschlag und infolgedessen einer simulierten Durchflussganglinie mit sehr vielen nicht beobachteten Ausschlägen. Es ist davon auszugehen, dass die Trinkwasserentnahmen durch das Wasserwerk Naunhof, welche nicht im Modell abgebildet werden, eine wesentliche Ursache für die geringen Score-Werte sind.
- Pegel Hähnichen (152), Pegel Rietschen 3 (154) und Pegel Rietschen 1 (155) im anthropogen beeinflussten Lausitzer Braunkohlegebiet, welche durch Umfluten beeinflusst sind.

Somit wurde eine Optimierung in diesen Fällen als nicht sinnvoll erachtet und die initiale Modellparametrisierung beibehalten. Weiterhin ist zu beachten, dass ausschließlich für die von der Optimierung betroffenen Regionen statt dem simulierten Durchfluss stets der beobachtete Durchfluss an den Unterlieger weitergegeben wird, um dessen Optimierung nicht zu beeinflussen.

Eine erste Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse für die verbliebenen 168 Modellregionen liefert Tabelle 19. Darin ist ersichtlich, wie sich die Anpassung bezüglich des mittleren Volumenfehlers und der Nash-Sutcliffe Effizienz in Form des Volume-Score gesamt bzw. NSE-Score gesamt (Summe der Score-Werte über eine bzw. drei Vergleichsgrößen für Regionen ohne bzw. mit DIFGA-Ergebnis) im Rahmen der Optimierung verändert hat. Einen räumlichen Überblick bezüglich der Werte aus Tabelle 19 ermöglicht Abbildung 55.

Für alle Regionen mit DIFGA-Ergebnis muss beachtet werden, dass die Optimierung der ausgewählten Modellparameter (Parameter für Grundwasserabfluss und Gerinneabfluss, s. auch Abschnitt 4.1.1) die Anpassung des Restgliedes nicht beeinflusst. Der Gesamtscore wird dennoch über alle drei Vergleichsgrößen (Q, QG1 und REST) gebildet, um die Vergleichbarkeit zwischen Ausgangszustand und optimiertem Modell zu gewährleisten.

Tabelle 19: Anzahl der Modellregionen mit verbesserter, unveränderter und teilweise schlechterer Anpassung des optimierten Modells im Vergleich zum Ausgangszustand für den Zeitraum 2000 bis 2015

Zeitraum 2000 bis 2015	Verbesserung der Anpassung			Anpassung unverändert	tw. Verschlechterung der Anpassung		
	+	+	gleich		-	-	gleich / +
Volume-Score gesamt	+	+	gleich	gleich	-	-	gleich / +
NSE-Score gesamt	+	gleich	+	gleich	-	gleich / +	-
Anzahl Regionen	68	17	32	23	2	23	3
Summe Regionen		117		23		28	

Insgesamt ergibt sich ein positives Bild mit einer Verbesserung der Anpassung im Optimierungszeitraum (2000 bis 2015) für 117 Modellregionen bzw. 70 Prozent (Abbildung 55, grüne Flächen). Dabei können für 68 Modellregionen, wovon 61 Regionen ein DIFGA-Ergebnis besitzen, sowohl Volume-Score gesamt als auch NSE-Score gesamt erhöht werden. Die in Abbildung 55 gelb eingefärbten Flächen weisen auf eine unveränderte Anpassung hin. Dies sind vor allem Modellregionen, welche bereits ohne Optimierung relativ hohe Score-Werte erzielen. Bei 23 von 28 in Abbildung 55 rot dargestellten Modellregionen (s. auch Tabelle 19) führt die Optimierung zu einer Erhöhung des NSE-Score gesamt auf Kosten eines niedrigeren Volume-Score gesamt. Dieses Phänomen betrifft hauptsächlich Regionen ohne DIFGA-Ergebnis an Zwickauer und Freiburger Mulde, Schwarzer Elster und Schwarzer Schöps.

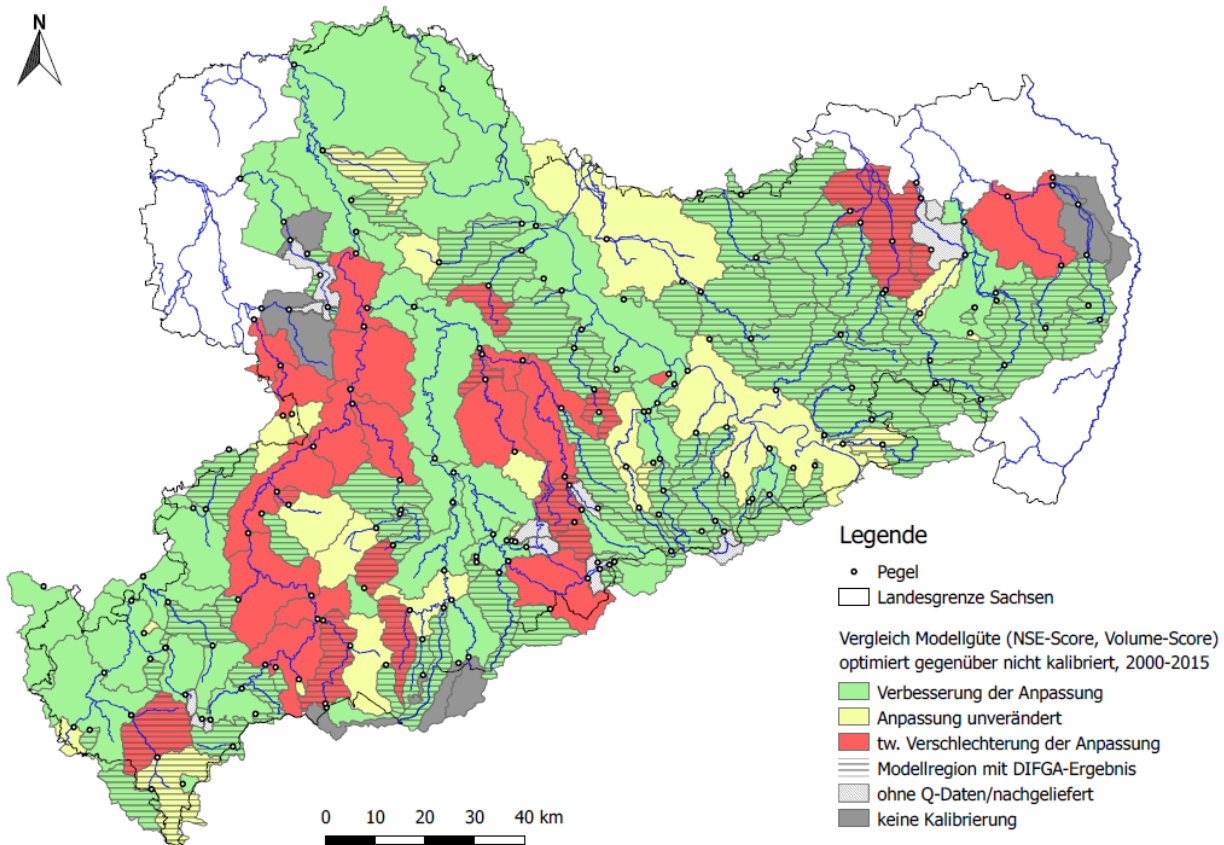


Abbildung 55: Integrale Bewertung der Anpassung (Volume-Score gesamt und NSE-Score gesamt) des optimierten Modells im Vergleich zum Ausgangszustand für den Zeitraum 2000 bis 2015 (Verbesserung der Anpassung = mindestens ein Gesamtscore-Wert steigt, Anpassung unverändert = beide Gesamtscore-Werte gleich, teilweise Verschlechterung der Anpassung = mindestens ein Gesamtscore-Wert sinkt)

4.2.2 Ergebnisse für ausgewählte Modellregionen

Neben der Klassifizierung der Modellregionen bezüglich des Volumenfehlers und der Nash-Sutcliffe Effizienz wird in diesem Abschnitt die Anpassung der simulierten an die beobachteten Ganglinien je Vergleichsgröße visuell betrachtet. Dies erfolgt für vier Modellregionen (s. Tabelle 20), welche jeweils in verschiedenen Flussgebieten liegen (s. Abbildung 56). Mithilfe der ausgewählten Regionen können stellvertretend für den gesamten KliWES-Projektraum sowohl die positiven Ergebnisse als auch noch bestehende Schwierigkeiten der Optimierung aufgezeigt werden.

Tabelle 20: Eigenschaften der ausgewählten Modellregionen für die Detailanalyse der Optimierung

Region	Pegel	Flussgebiet	Hierarchieebene	DIFGA-Ergebnis	AE [km ²]
33	Niedermuelsen 1	Mulde	1	ja	49,2
80	Koenigsbrueck	Schwarze Elster	1	ja	91,9
131	Neundorf	Elbe	2	nein	52,3
168	Langenleuba (Leubabach)	Weißer Elster	1	nein	35,0

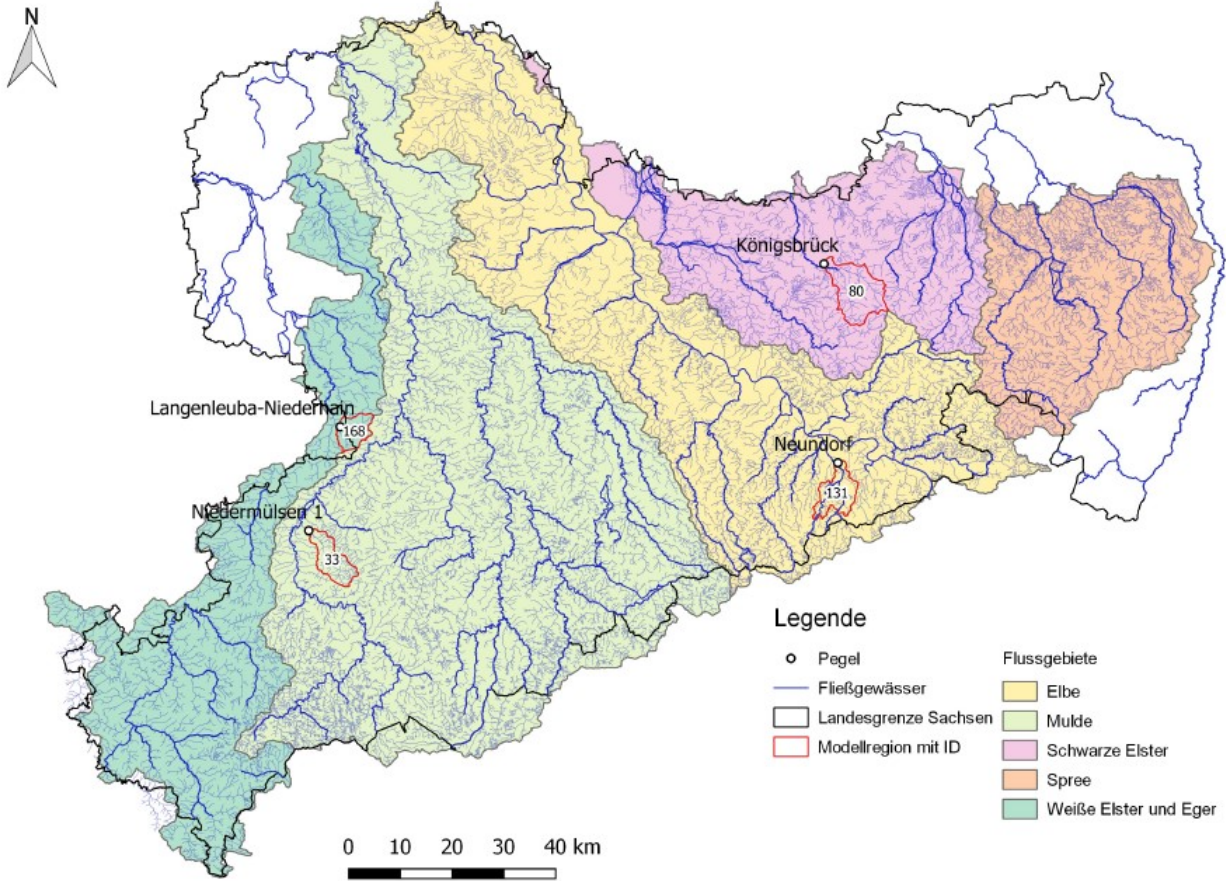


Abbildung 56: Lage der ausgewählten Modellregionen (rot umrandet) für die Detailanalyse der Optimierung

Region 33 – Niedermülsen 1

Die Region 33 (Pegel Niedermülsen 1) ist ein Kopfgebiet mit DIFGA-Ergebnis im Flusseinzugsgebiet der Mulde. Es liegt mit einer Größe von ca. 49 km² im Erzgebirgsbecken (s. Abbildung 56), wobei das Rotliegend die dominierende Lithofazies darstellt.

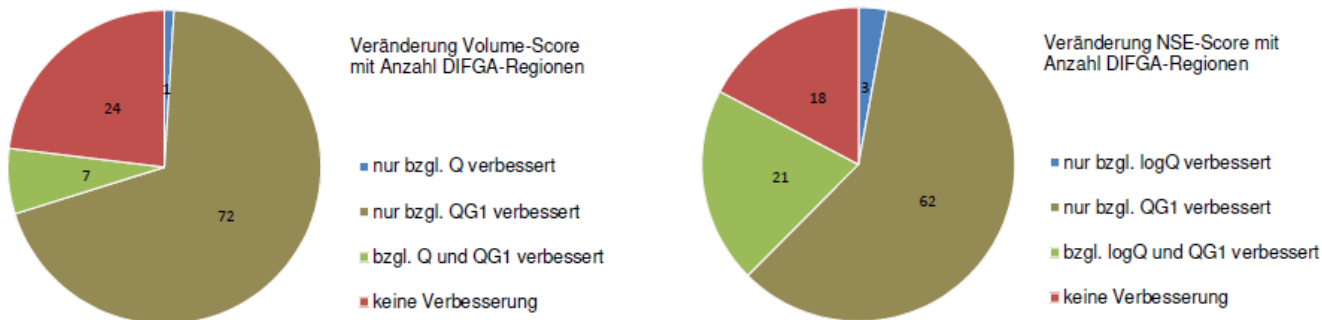


Abbildung 57: Anzahl der Regionen mit DIFGA-Ergebnis (Summe 104) und ausschließlich verbesserter Anpassung des Durchflusses Q (blau), des Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 (dunkelgrün) bzw. verbesserter Anpassung beider (hellgrün) oder keiner Größe (rot) – aufgeschlüsselt für den Volume-Score (links) sowie den NSE-Score (rechts)

Infolge der Optimierung steigt der Volume-Score gesamt um zwei auf 15 von 15 Punkten. Der NSE-Score gesamt erhöht sich ebenfalls um zwei Punkte auf 10 von 15. Ein Blick auf die Aufteilung des Gesamtscores bezüglich der einzelnen Vergleichsgrößen zeigt, was für die Mehrzahl der Regionen mit DIFGA-Ergebnis gültig ist: Die Optimierung verbessert primär die Anpassung des Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 (s. Abbildung 57 dunkelgrüner und hellgrüner Anteil). Für Region 33 steigt der Volume-Score QG1 um zwei Punkte und der NSE-Score QG1 um einen Punkt. In Abbildung 58 (oben) sind die simulierten monatlichen QG1-Werte den Ergebnissen der DIFGA-Analyse gegenübergestellt.

Vergleich mit DIFGA, Region 33

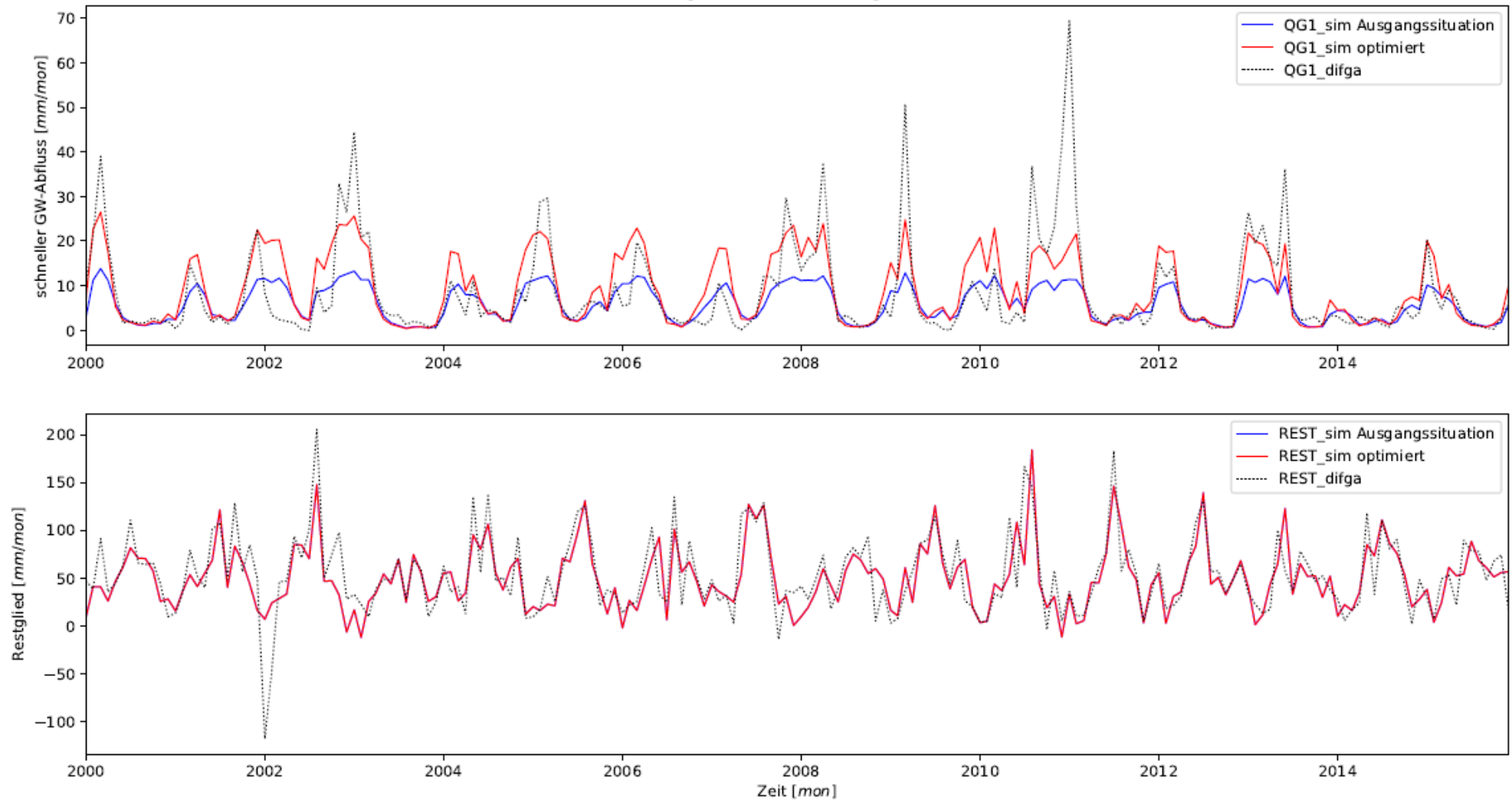


Abbildung 58: Anpassung der simulierten Ganglinien (blau = nicht kalibriert, rot = optimiert) an die DIFGA-Ergebnisse für den Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 (oben) und das Restglied (unten) im Zeitraum 2000 bis 2015 als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1, Modellausgaben des simulierten Restglied (entspricht Verdunstung plus Bodenspeicheränderung) unterscheiden sich nicht, da die Verdunstungsparameter nicht optimiert werden

Die simulierte QG1-Ganglinie mit Optimierung besitzt eine wesentlich bessere Anpassung an die DIFGA-Werte, sowohl hinsichtlich der Dynamik als auch des Volumens. Ein Blick auf die Gütekriterien in Tabelle 21 bestätigt diese Aussage. Da keine Verdunstungsparameter optimiert werden, unterscheiden sich die in Abbildung 58 (unten) gezeigten Ganglinien des simulierten Restglied nicht voneinander. Diese weisen bereits eine relativ gute Anpassung auf (s. Tabelle 21).

Tabelle 21: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung der simulierten QG1- bzw. Restglied-Werte (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich der monatlichen Vergleichswerte aus DIFGA als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1

Gütemaß	Einheit	Abfluss schneller Grundwasserspeicher QG1		Restglied REST
		Ausgangssituation	optimiert	Ausgangssituation/optimiert
Root-mean-squared error RMSE	mm	8,59	7,09	26,10
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	0,34	0,55	0,58
Mittelwert DIFGA	mm	8,50		53,68
Mittelwert simuliert	mm	5,97	9,20	50,11

In Abbildung 59 ist die simulierte Durchflussganglinie im Vergleich zu den Beobachtungswerten am Pegel Niedermülsen 1 dargestellt. Das optimierte Modell liefert ein verbessertes Rückgangsverhalten im Mittelwasserbereich sowie eine stärkere Annäherung an das beobachtete Niedrigwasserniveau. Bestätigt wird dies durch einen Anstieg der NSE von 0,57 auf 0,68 (s. Tabelle 22) sowie bei der Betrachtung der Dauerlinie (s. Abbildung 60). Da sich die Nash-Sutcliffe Effizienz aus den logarithmierten Durchflüssen berechnet, ist sie weniger sensitiv bezüglich der Abbildungsdefizite im Hochwasserbereich. Denn die Ereignisspitzen sind nicht im Fokus der hier durchgeführten Optimierung.

Tabelle 22: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Niedermülsen 1 (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)

Gütemaß	Einheit	Durchfluss Q (bzw. logQ)	
		Ausgangssituation	optimiert
Root-mean-squared error RMSE	m ³ /s	0,56	0,54
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	0,57	0,68
Mittelwert DIFGA	m ³ /s	0,43	
Mittelwert simuliert	m ³ /s	0,43	0,43

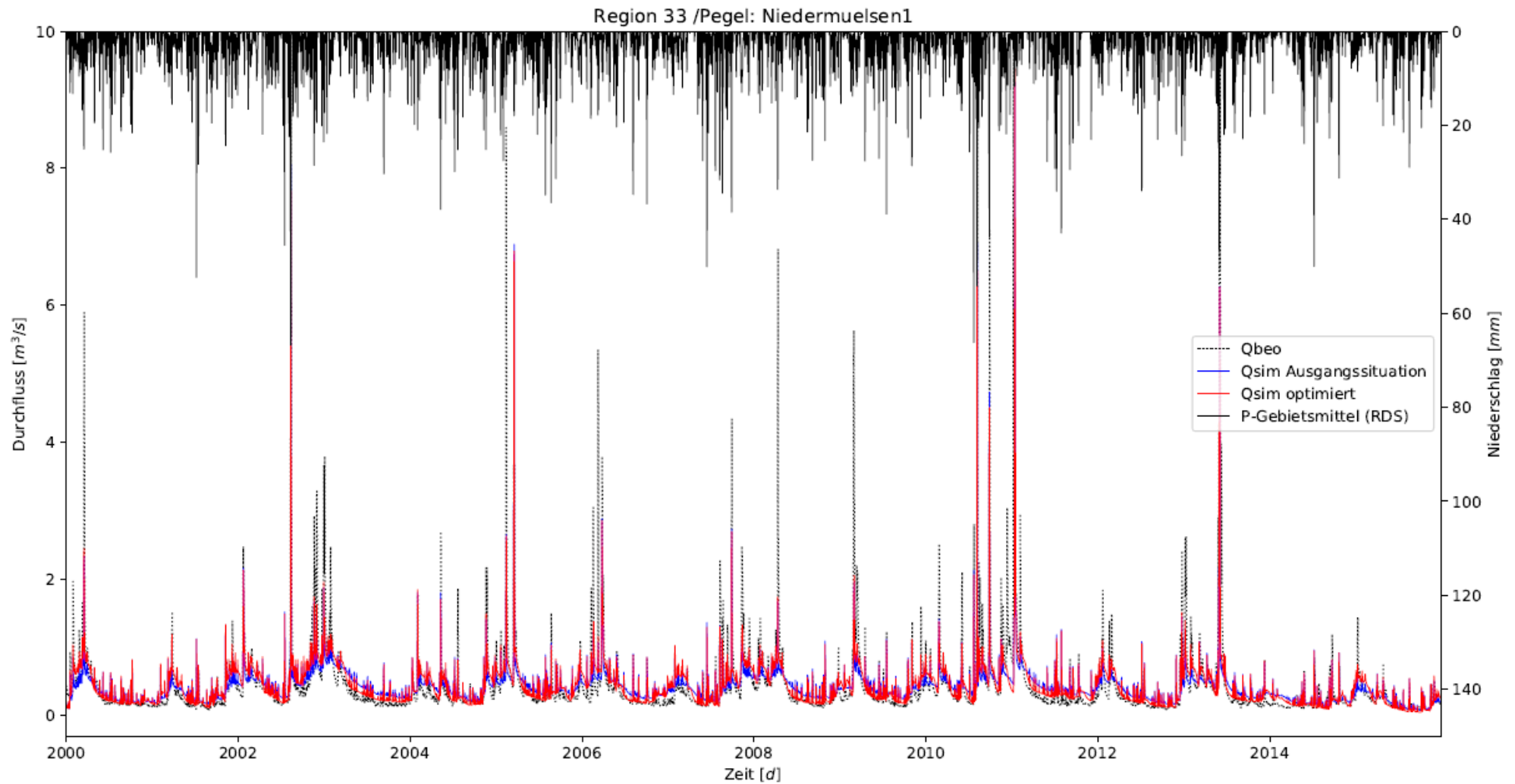


Abbildung 59: Vergleich der beobachteten Ganglinie (schwarz strichliert) des Pegels Niedermuelsen 1 mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) sowie das Niederschlagsgebietsmittel des Referenzdatensatzes (schwarz) für den Zeitraum 2000 bis 2015

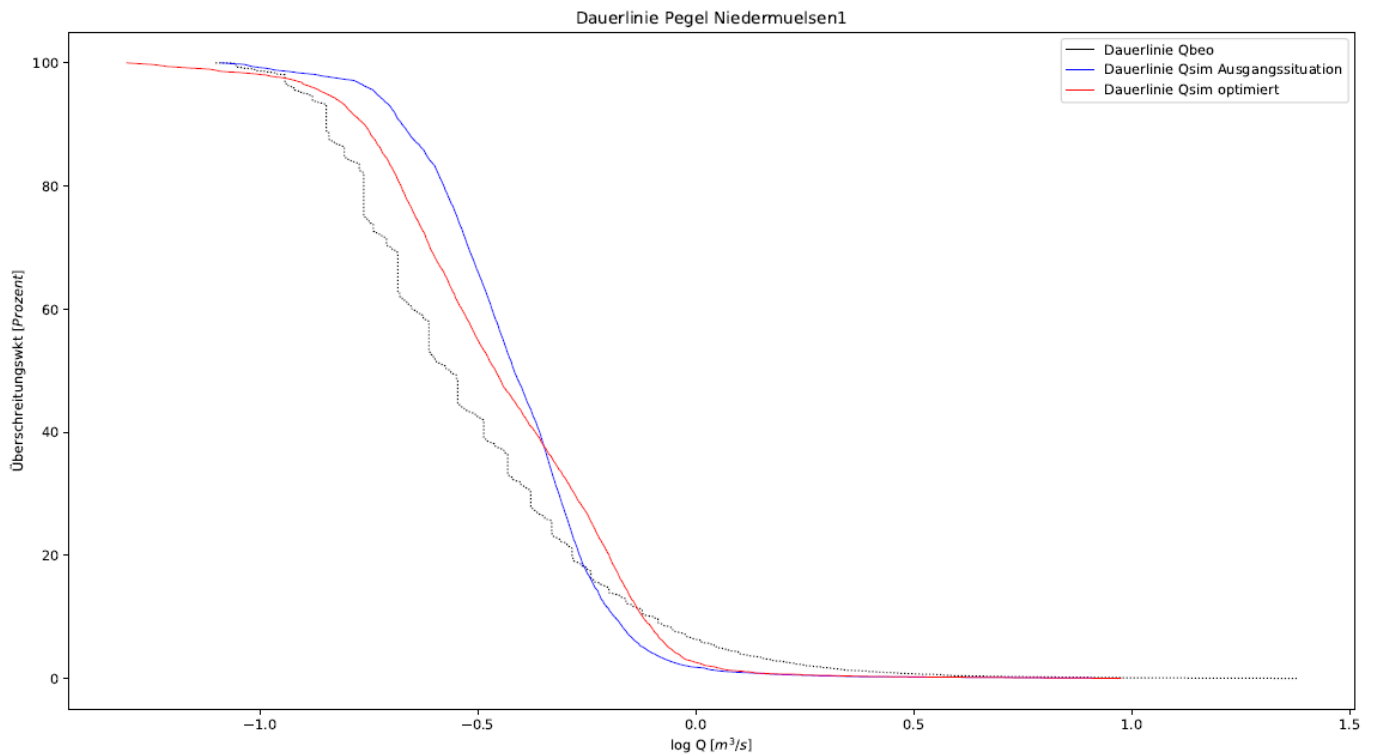


Abbildung 60: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses (schwarz strichliert) des Pegels Niedermülsen 1 mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) für den Zeitraum 2000 bis 2015

Region 80 – Pegel Königsbrück

Die Region 80 ist ebenfalls ein Kopfgebiet mit DIFGA-Ergebnis im Flusseinzugsgebiet der Schwarzen Elster. Es umfasst Teile des Westlausitzer Hügel- und Berglandes sowie der Königsbrück-Ruhlander Heiden (s. Abbildung 56). Bis zum Pegel Königsbrück beträgt die Einzugsgebietsfläche ca. 92 km², wobei magmatisches Tiefengestein die dominierende Lithofazies darstellt.

Ähnlich wie bei Region 33 bzw. der Mehrzahl der Regionen mit DIFGA-Ergebnis verbessert die Optimierung hier vorrangig die Anpassung des Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 (s. Abbildung 61 oben und Tabelle 23). Die Erhöhung des Volume-Score gesamt um eins auf 14 von 15 sowie die Erhöhung des NSE-Scores gesamt um eins auf 11 von 15 ist allein auf die Vergleichsgröße QG1 zurückzuführen.

Abbildung 62 zeigt die simulierte Durchflussganglinie im Vergleich zu den beobachteten Werten am Pegel Königsbrück. Hinsichtlich des Volumens liefert bereits das nicht optimierte Modell eine sehr gute Anpassung (s. Tabelle 24). Dagegen können die Phasen des Durchflussrückgangs auch mit Optimierung nicht immer gut nachgebildet werden (s. auch Dauerlinie in Abbildung 63). Eine Ursache könnte hier das generelle Modellverhalten mit einer zu starken Reaktion auf Niederschlagsinput sein. Die hohe Zahl an nicht beobachteten Ausschlägen des simulierten Durchflusses erschwert dabei die Optimierung vor allem bei sinkenden Durchflüssen. Das genannte Phänomen tritt auch bei wenigen weiteren Regionen im KliWES-Projektraum auf.

Vergleich mit DIFGA, Region 80

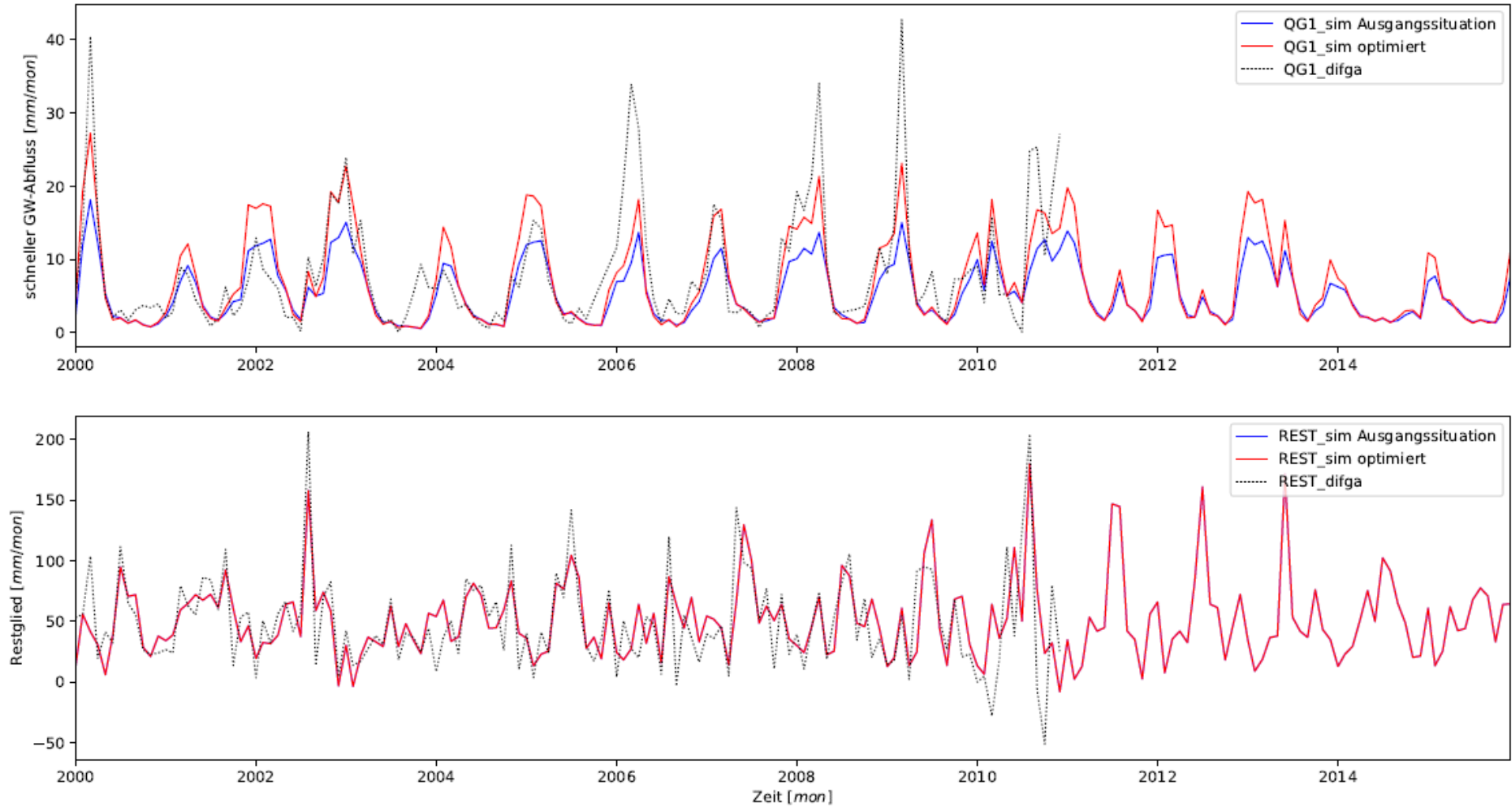


Abbildung 61: Anpassung der simulierten Ganglinien (blau = nicht kalibriert, rot = optimiert) an die DIFGA-Ergebnisse für den Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 (oben) und das Restglied (unten) im Zeitraum 2000 bis 2015 als Gebietssumme der Region 80 mit Pegel Königsbrück, Modellausgaben des simulierten Restgliedes (entspricht Verdunstung plus Bodenspeicheränderung) unterscheiden sich nicht, da die Verdunstungsparameter nicht optimiert werden

Tabelle 23: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung der simulierten QG1- bzw. Restglied-Werte (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich der monatlichen Vergleichswerte aus DIFGA als Gebietssumme der Region 80 mit Pegel Königsbrück

Gütemaß	Einheit	Abfluss schneller Grundwasserspeicher QG1		Restglied REST
		Ausgangssituation	optimiert	Ausgangssituation/optimiert
Root-mean-squared error RMSE	mm	5,99	4,90	28,16
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	0,45	0,63	0,48
Mittelwert DIFGA	mm	8,28		48,98
Mittelwert simuliert	mm	5,54	7,17	50,73

Tabelle 24: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Königsbrück (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)

Gütemaß	Einheit	Durchfluss Q (bzw. logQ)	
		Ausgangssituation	optimiert
Root-mean-squared error RMSE	m ³ /s	0,60	0,57
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	0,61	0,62
Mittelwert DIFGA	m ³ /s	0,78	
Mittelwert simuliert	m ³ /s	0,71	0,71

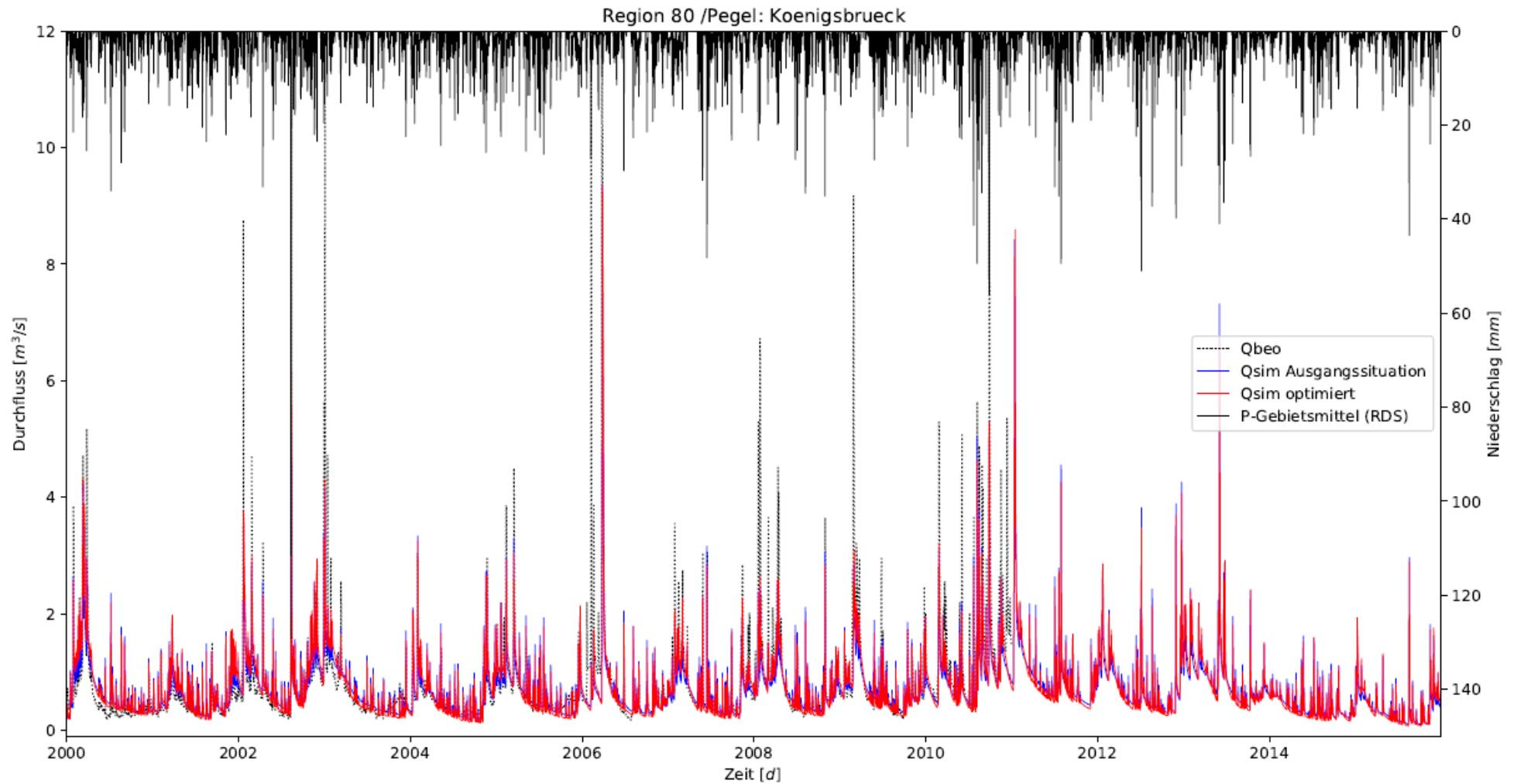


Abbildung 62: Vergleich der beobachteten Ganglinie (schwarz strichliert) des Pegels Königsbrück mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) sowie das Niederschlagsgebietsmittel des Referenzdatensatzes (schwarz) für den Zeitraum 2000 bis 2015

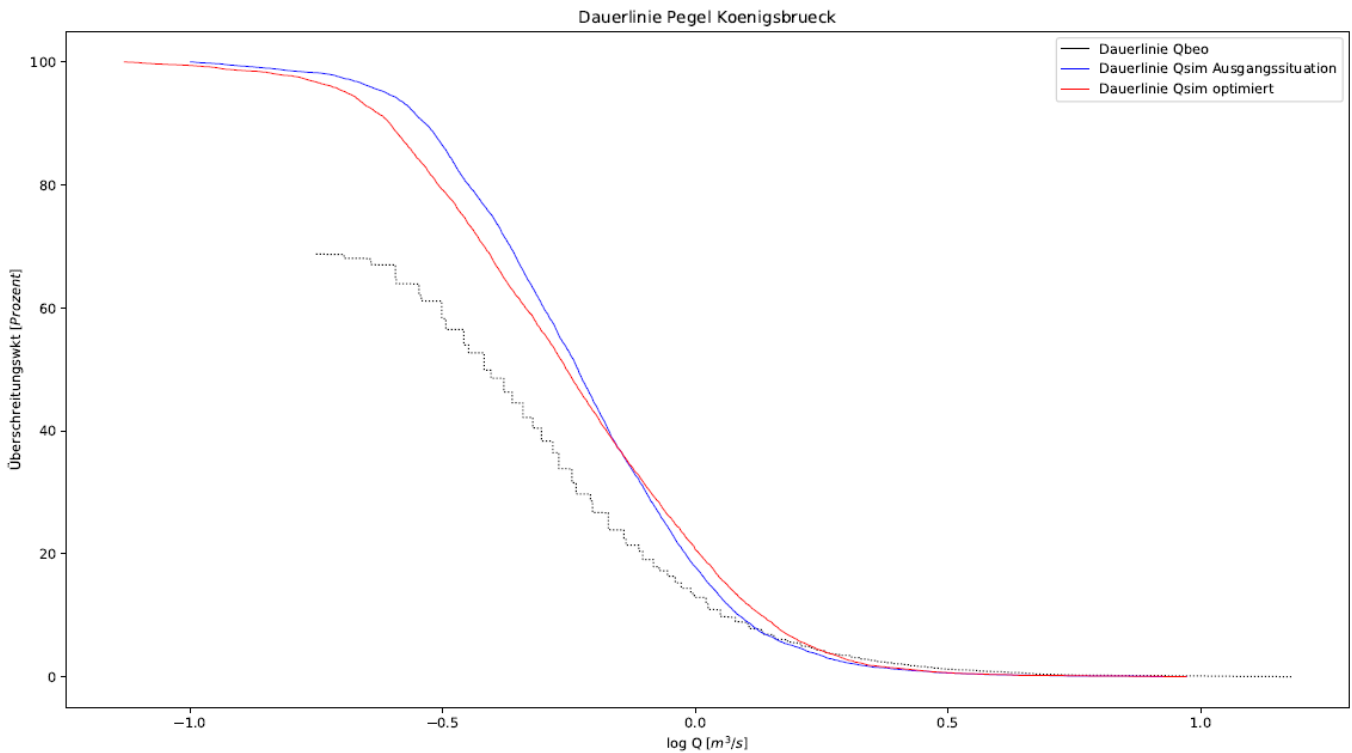


Abbildung 63: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses (schwarz strichliert) des Pegels Königsbrück mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) für den Zeitraum 2000 bis 2015

Region 131 – Pegel Neundorf

Die Region 131 ohne DIFGA-Ergebnis liegt im Flusseinzugsgebiet der Elbe auf Hierarchieebene zwei (ein Oberlieger). Das ca. 52 km² große Einzugsgebiet bis Pegel Neundorf am Randes des Osterzgebirges (s. Abbildung 56) umfasst mehrere Lithofazies wie Sandstein, magmatisches Tiefengestein sowie die Metamorphite Gneis und Schiefer.

Die Ergebnisse am Pegel Neundorf stehen stellvertretend für alle Regionen ohne DIFGA-Ergebnis mit gleichzeitiger Erhöhung des Volume-Score Q sowie des NSE-Score logQ infolge der Optimierung (s. Abbildung 64, blauer Anteil). Konkret steigt hier der Volume-Score Q um zwei Punkte auf fünf von fünf und der NSE-Score logQ um einen Punkt auf drei von fünf. Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die verbesserte Anpassung des simulierten Durchflusses bezüglich Volumen und Dynamik vor allem im Rückgangs- und Niedrigwasserbereich. Ein Blick auf die Gütemaße in Tabelle 25 bestätigt die getroffenen Aussagen.

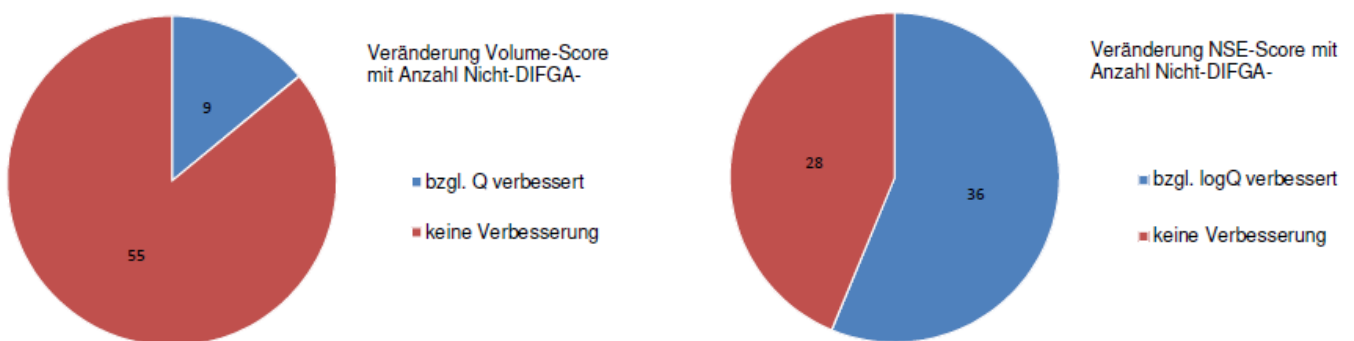


Abbildung 64: Anzahl der Regionen ohne DIFGA-Ergebnis (Summe 64) und verbesserter Anpassung des Durchflusses Q (blau) bzw. ohne Verbesserung (rot) – aufgeschlüsselt für den Volume-Score (links) sowie den NSE-Score (rechts)

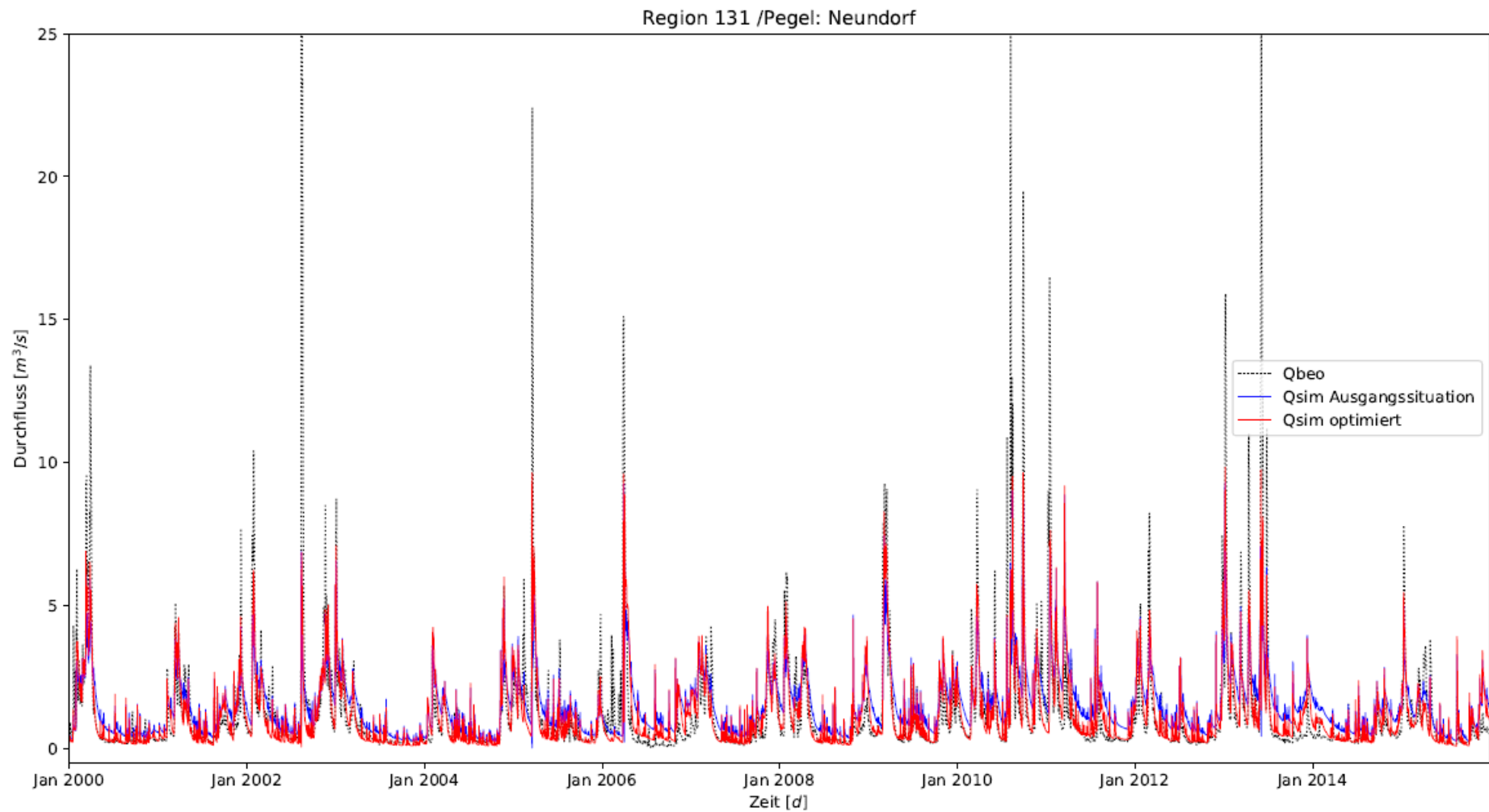


Abbildung 65: Vergleich der beobachteten Ganglinie (schwarz strichliert) des Pegels Neundorf mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) für den Zeitraum 2000 bis 2015

Tabelle 25: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Neundorf (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)

Gütemaß	Einheit	Durchfluss Q (bzw. logQ)	
		Ausgangssituation	optimiert
Root-mean-squared error RMSE	m ³ /s	2,09	1,93
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	0,26	0,61
Mittelwert DIFGA	m ³ /s	1,22	
Mittelwert simuliert	m ³ /s	1,47	1,14

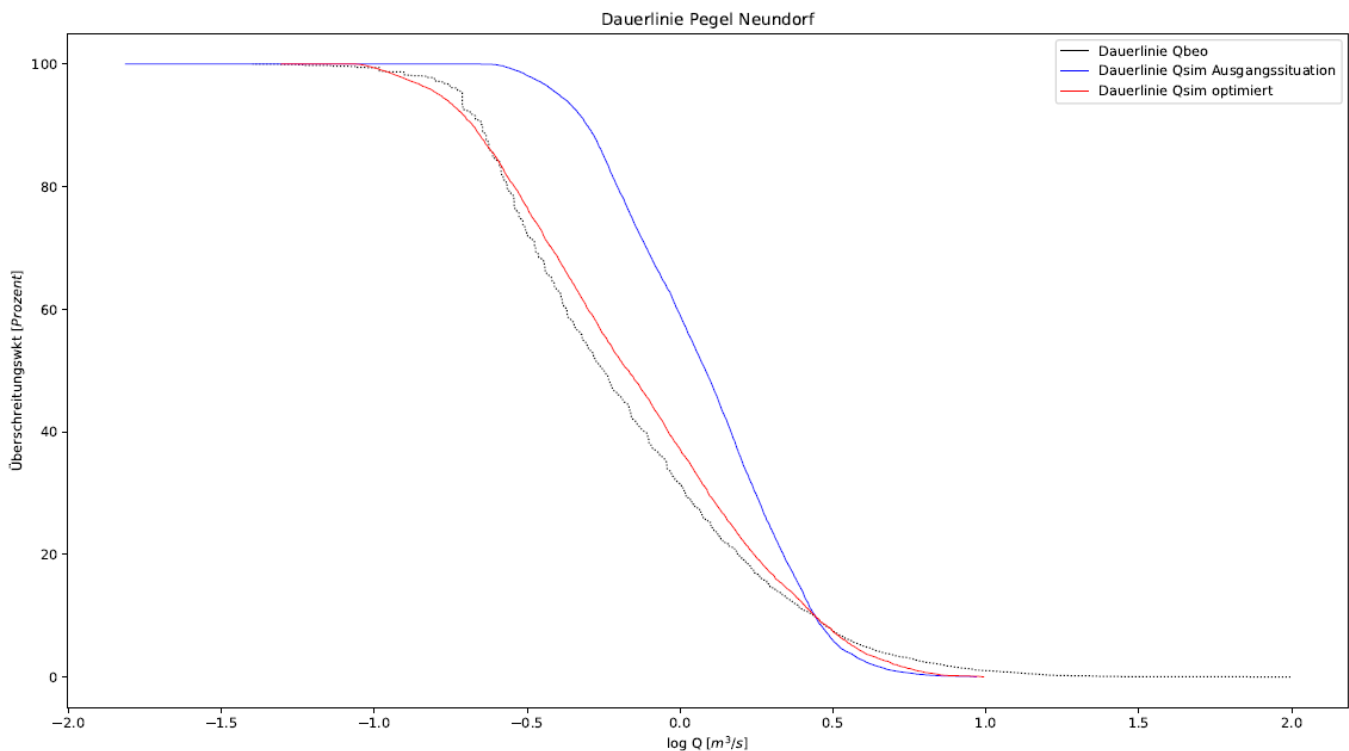


Abbildung 66: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses (schwarz strichliert) des Pegels Neundorf mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) für den Zeitraum 2000 bis 2015

Region 168 – Langenleuba (Leubabach)

Abschließend werden die Ergebnisse der Region 168 bis zum Pegel Langenleuba (Leubabach) im Flusseinzugsgebiet der Weißen Elster vorgestellt. Das ca. 35 km² große Kopfgebiet ohne DIFGA-Ergebnis befindet sich im Ostthüringischen Lösshügelland (s. Abbildung 56) mit Löss als dominierender Lithofazieseinheit.

Für Region 168 bewirkt die Optimierung keine Veränderung von Volume-Score Q (vier von fünf) und NSE-Score logQ (null von fünf). Sie repräsentiert damit den in Abbildung 64 rot dargestellten Anteil der Nicht-DIFGA-Regionen ohne Verbesserung der Score-Werte.

Dabei ist jedoch anzumerken, dass die volumetrische Anpassung des simulierten Durchflusses für diese Regionen bereits im nicht kalibrierten Zustand hinreichend gut ausfällt. Somit besteht nur noch ein geringes Steigerungspotential bezüglich des Volume-Score Q. Diese Aussage lässt sich für Region 168 bei Betrachtung der simulierten und beobachteten Durchflussganglinien am Pegel Langenleuba (Leubabach) (s. Abbildung 67) bestätigen.

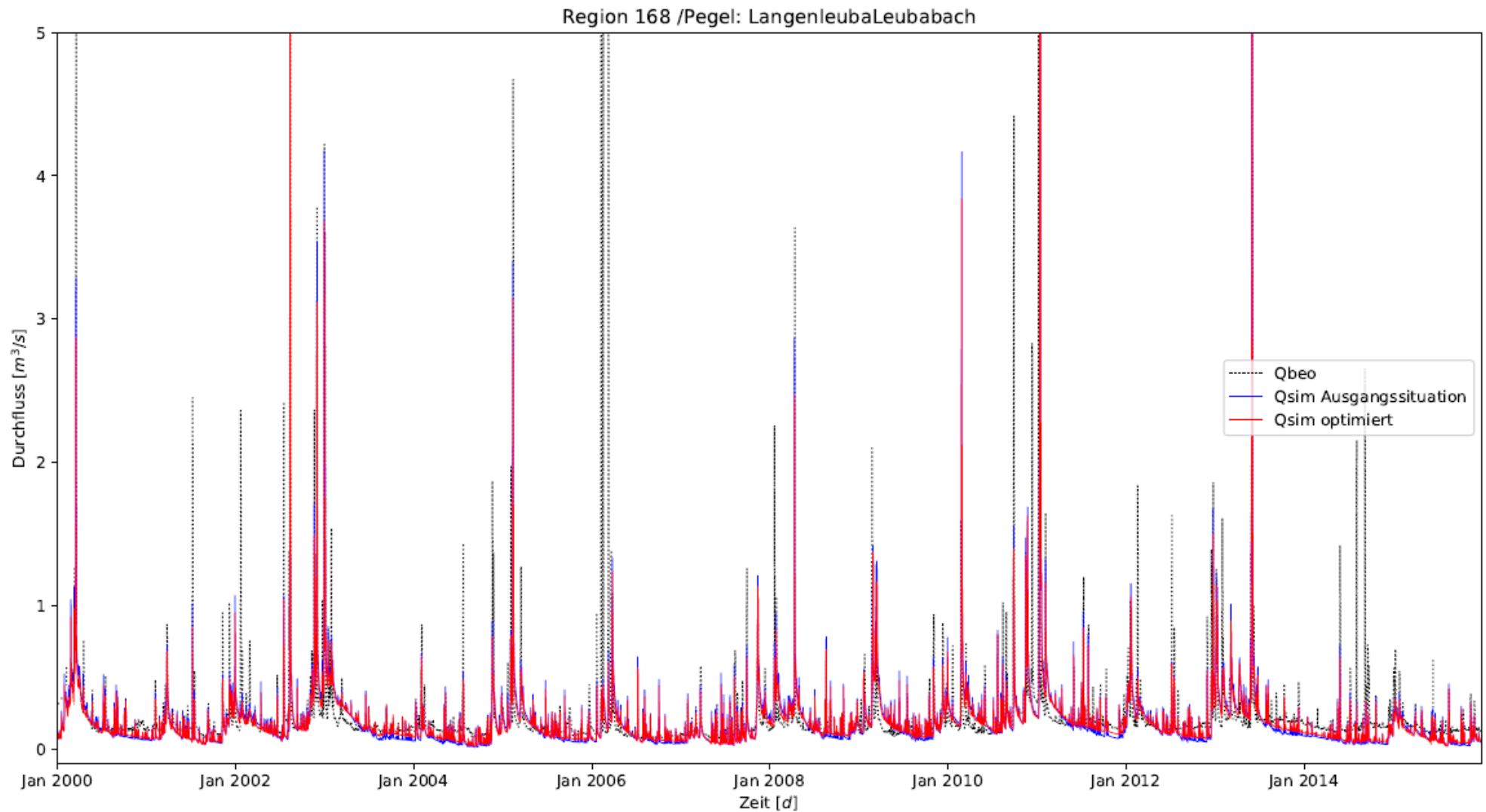


Abbildung 67: Vergleich der beobachteten Ganglinie (schwarz strichliert) des Pegels Langenleuba (Leubabach) mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) für den Zeitraum 2000 bis 2015

Das beobachtete Durchflussmittel liegt etwa bei $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ und wird sowohl von dem nicht kalibrierten als auch dem optimierten Modell mit ca. $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$ relativ gut getroffen (s. Tabelle 26). Defizite bestehen dagegen bei der Abbildung einiger Rückgangs- und Niedrigwasserperioden. Hier bewirkt die Optimierung nahezu keine Verbesserung, was auch die niedrige NSE für den logarithmierten Durchfluss (s. Tabelle 26) sowie die Dauerlinie (s. Abbildung 68) bestätigt. Die Ursachen sind möglicherweise sehr vielschichtig und nicht eindeutig voneinander abgrenzbar. Zu nennen sind einerseits nicht quantifizierte Messunsicherheiten in den Eingangsdaten wie Niederschlag und Durchfluss sowie Unsicherheiten in der Modellparametrisierung. Des Weiteren ist denkbar, dass das Wasserhaushaltsmodell in den betreffenden Regionen nicht alle relevanten hydrologischen Prozesse vollständig abbilden kann. Dies muss jedoch erst mit weiteren Untersuchungen abgeklärt werden.

Tabelle 26: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Langenleuba (Leubabach) (Berechnung NSE für logarithmierten Durchfluss)

Gütemaß	Einheit	Durchfluss Q (bzw. logQ)	
		Ausgangssituation	optimiert
Root-mean-squared error RMSE	m^3/s	0,35	0,32
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	-0,55	0,00
Mittelwert DIFGA	m^3/s	0,22	
Mittelwert simuliert	m^3/s	0,19	0,19

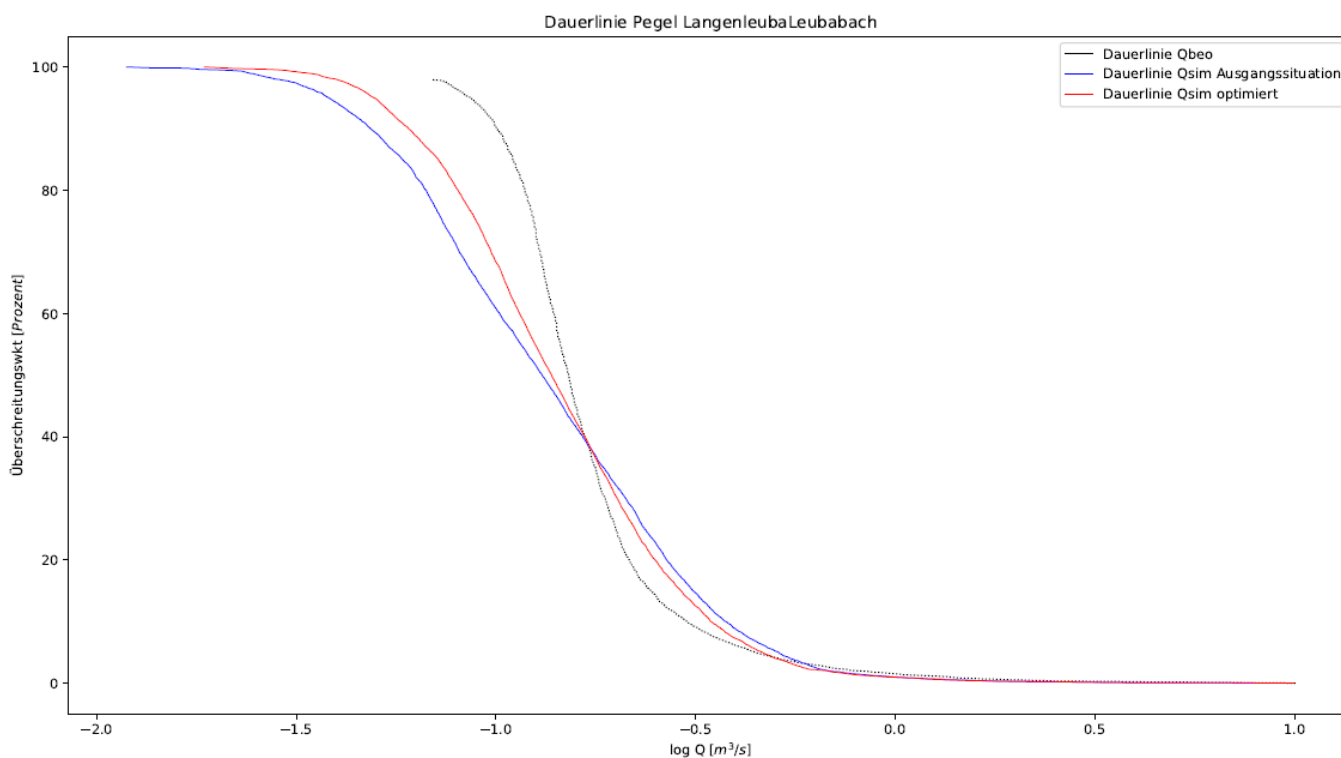


Abbildung 68: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses (schwarz strichliert) des Pegels Langenleuba (Leubabach) mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung (rot) für den Zeitraum 2000 bis 2015

4.2.3 Ergebnisse für den Optimierungszeitraum 1961 bis 1987

Der gewählte Optimierungszeitraum von 2000 bis 2015 berücksichtigt bestmöglich die aktuellen klimatischen Verhältnisse. So sollen die kalibrierten Modellparameter auch für Simulationen mit Klimaprojektionen bis 2100 nutzbar sein. Um die Relevanz der Wahl eines geeigneten Optimierungszeitraums zu untersuchen, wird die Kalibrierung für zwei Modellregionen anhand der Jahre 1961 bis 1987 vergleichend durchgeführt. Die Auswahl der beiden Modellregionen richtet sich nach mehreren Kriterien: Es kommen nur Kopfgebiete mit DIFGA-Ergebnis in Frage, um eine Beeinflussung durch Oberlieger auszuschließen und die Anpassung hinsichtlich der drei Vergleichsgrößen beurteilen zu können. Des Weiteren sind Einzugsgebiete im Erzgebirge ausgeschlossen, da hier das Waldsterben in den 80er-Jahren den Wasserhaushalt stark beeinflusst. Außerdem sollten keine Hochwasserrückhaltebecken oder ähnliche wasserwirtschaftliche Anlagen zwischen den beiden Optimierungszeiträumen errichtet worden sein. Somit fiel die Wahl auf die bereits vorgestellte Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1 sowie Region 80 mit Pegel Königsbrück (s. Abbildung 56). Die Abbildung 69 zeigt die Anpassung der simulierten Durchflussganglinien für das nicht kalibrierte Modell bzw. die zwei optimierten Modelle (bzgl. Zeitraum 2000 bis 2015 und Zeitraum 1961 bis 1987) an die Beobachtungsdaten des Pegels Niedermülsen 1. Es sind geringfügige Unterschiede der Optimierungsvarianten in den Hochwasserspitzen zu sehen. Die Anpassung im Mittel- und Niedrigwasserbereich ist nahezu identisch, was auch bei Betrachtung der Dauerlinien (s. Abbildung 71) sowie der Gütemaße in Tabelle 27 bestätigt wird. Etwas größere Unterschiede bestehen hinsichtlich der Simulation des Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher (s. Abbildung 70). Hier liegt die für den Zeitraum 2000 bis 2015 optimierte Modellvariante mit einem QG1-Mittelwert von 9,2 mm näher an dem QG1-Mittelwert von 8,5 mm aus DIFGA (s. Tabelle 28). Die bezüglich 1961 bis 1987 optimierte Modellvariante liefert eine schlechtere volumetrische Anpassung mit einem QG1-Mittelwert von 10,4 mm. Auf die Darstellung des simulierten Restgliedes wird verzichtet, da sich dessen Ergebnisse nicht von denen in Abbildung 61 unterscheiden.

Tabelle 27: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Durchflusses (Ausgangssituation und nach Optimierung bzgl. Zeitraum 2000 bis 2015 bzw. 1961 bis 1987) hinsichtlich des beobachteten täglichen Durchflusses am Pegel Niedermülsen 1 (Berechnung NSE für log. Durchfluss)

Gütemaß	Einheit	Durchfluss Q (bzw. logQ)		
		Ausgangssituation	optimiert (2000-2015)	optimiert (1961-1987)
Root-mean-squared error RMSE	m ³ /s	0,56	0,54	0,55
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	0,57	0,68	0,67
Mittelwert beobachtet	m ³ /s	0,43		
Mittelwert simuliert	m ³ /s	0,43	0,44	0,44

Tabelle 28: Gütemaße (Zeitraum 2000 bis 2015) für die Anpassung des simulierten Abflusses aus dem schnellen Grundwasserspeicher (Ausgangssituation und nach Optimierung bzgl. Zeitraum 2000 bis 2015 bzw. 1961 bis 1987) hinsichtlich der monatlichen Vergleichswerte aus DIFGA als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1

Gütemaß	Einheit	Abfluss schneller Grundwasserspeicher QG1		
		Ausgangssituation	optimiert (2000-2015)	optimiert (1961-1987)
Root-mean-squared error RMSE	mm	8,59	7,09	7,28
Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE	-	0,34	0,55	0,52
Mittelwert DIFGA	mm	8,50		
Mittelwert simuliert	mm	5,97	9,20	10,36

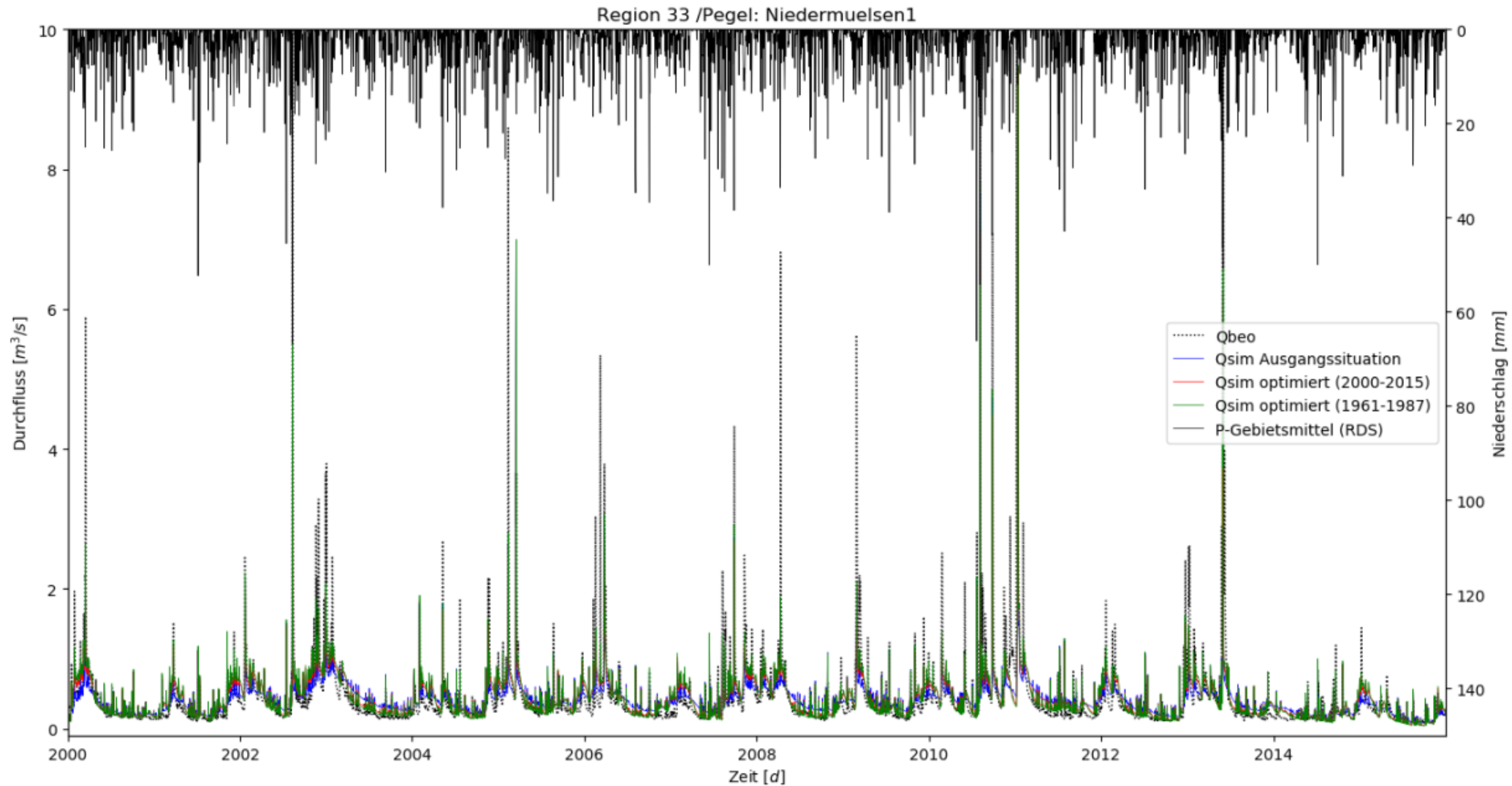


Abbildung 69: Vergleich der beobachteten Ganglinie (schwarz strichliert) des Pegels Niedermülsen 1 mit dem simulierten Durchfluss in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung für den Zeitraum 2000 bis 2015 (rot) bzw. 1961 bis 1987 (grün) sowie das Niederschlagsgebietsmittel des Referenzdatensatzes (schwarz) für den Zeitraum 2000 bis 2015

Vergleich mit DIFGA, Region 33

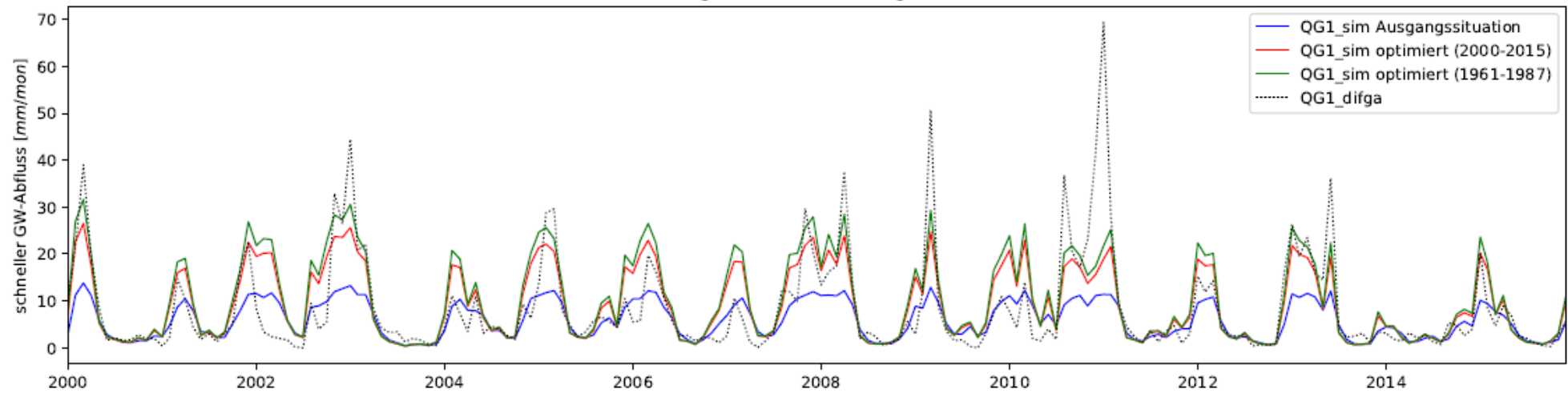


Abbildung 70: Anpassung der simulierten Ganglinien (blau = nicht kalibriert, rot = optimiert für 2000 bis 2015, grün = optimiert für 1961 bis 1987) an die DIFGA-Ergebnisse für den Abfluss aus dem schnellen Grundwasserspeicher QG1 im Zeitraum 2000 bis 2015 als Gebietssumme der Region 33 mit Pegel Niedermülsen 1

Dauerlinie Pegel Niedermülsen1

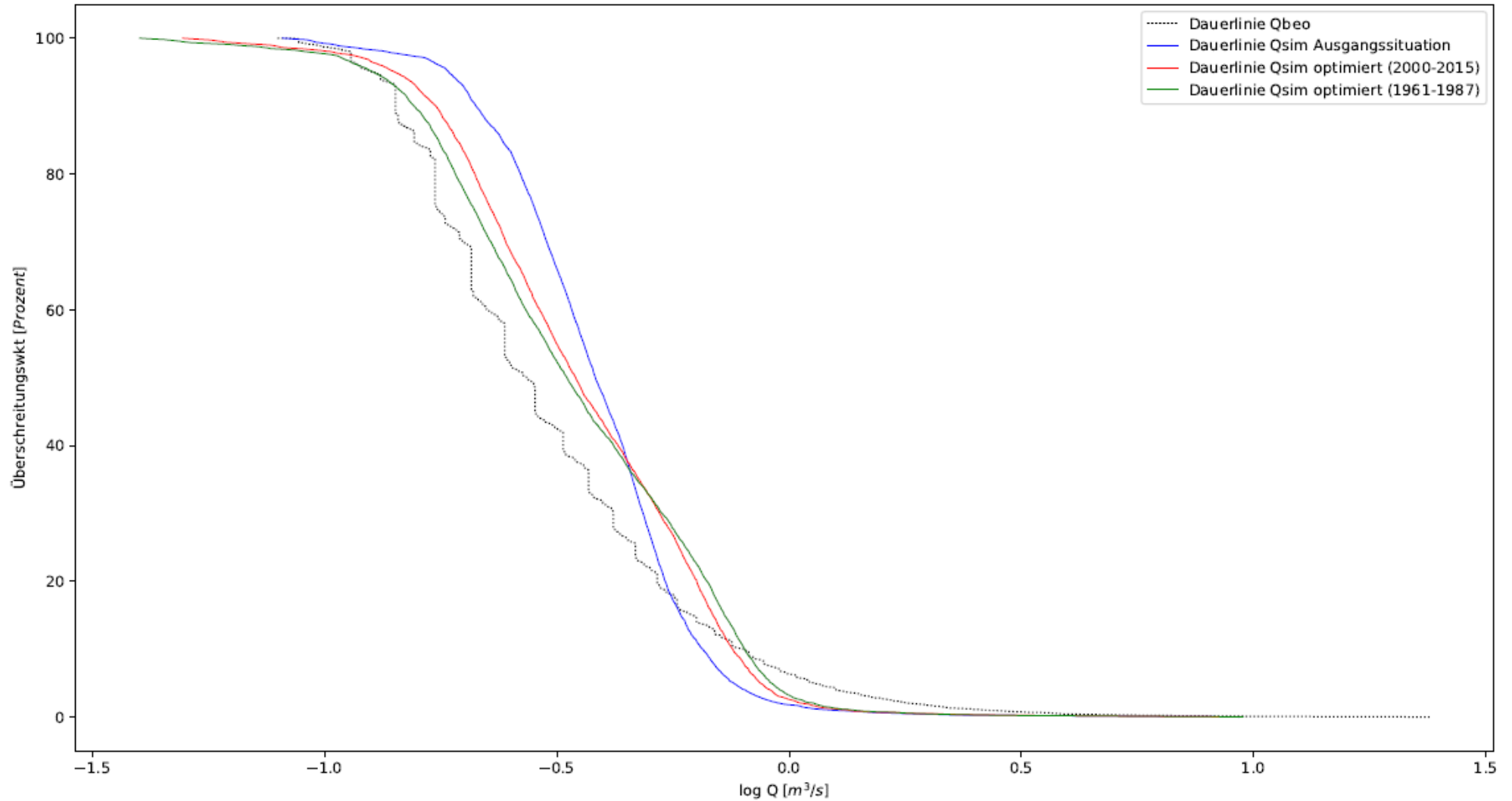


Abbildung 71: Vergleich der Dauerlinie des beobachteten Durchflusses (schwarz strichliert) des Pegels Niedermülsen 1 mit den Dauerlinien des simulierten Durchflusses in der Ausgangssituation (blau) und nach der Optimierung bzgl. 2000 bis 2015 (rot) bzw. 1961 bis 1987 (grün) für den Zeitraum 2000 bis 2015

Für die Region 80 mit Pegel Königsbrück ergeben sich ähnliche Schlussfolgerungen im Vergleich der zwei optimierten Modelle.

Zusammenfassend wird anhand der untersuchten Einzugsgebiete festgestellt, dass die Wahl des Optimierungszeitraums die Durchflussanpassung am Pegel nur wenig beeinflusst. Hinsichtlich der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten wie z.B. QG1 sind die Unterschiede wesentlich größer. Um dies jedoch für den gesamten KliWES-Projektraum einschätzen zu können, müssten wesentlich mehr Regionen in den Vergleich einbezogen werden.

5 Wasserhaushaltsergebnisse

Das Kapitel 5 umfasst die Auswertung der Wasserhaushaltsergebnisse für den gesamten Untersuchungsraum sowie für einzelne Einzugsgebiete. Die Ergebnisse sollen einen Überblick zu den erzeugten Daten geben. Aufgrund des Umfangs der Ergebnisse kann allerdings nur ein allgemeiner Überblick anhand von ausgewählten Beispielen gegeben werden.

5.1 Auswertung von Ergebnissen der Klimaprojektionen im gesamten Untersuchungsraum

Zur Abbildung allgemeiner Tendenzen verschiedener simulierter Größen bis 2100 finden sich nachfolgend mehrere Graphiken (Abbildung 72 bis **Abbildung 78**), welche jeweils den mittleren Verlauf bzw. die räumliche Verteilung für den Modellraum in Sachsen wiedergeben. Die Graphiken und Karten wurden der neuen KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal (s. Abschnitt 6) entnommen.

Zunächst wird auf die potentielle Verdunstung eingegangen, bei welcher es sich um die Grasreferenzverdunstung (Allen et al., 1998; FAO Penman-Monteith) handelt. In **Abbildung 72** ist diese als 20jähriges gleitendes Mittel dargestellt. Zu Beginn des Beobachtungszeitraums liegen die Werte der potentiellen Verdunstung der acht verwendeten Realisierungen bei rund 600 mm/a und weisen dann einen zunehmenden Trend auf. Der Verlauf der potentiellen Verdunstung basierend auf den Beobachtungsdaten (**Abbildung 72**, Ist-Zustand, rote Linie) liegt hingegen deutlich unterhalb der verschiedenen Realisierungen. Die Abweichung beträgt teilweise 50 mm/a. Die Ursache hierfür ist in den meteorologischen Eingangsdaten zu finden, welche in die Berechnung der Grasreferenzverdunstung eingehen. Hierbei handelt es sich um die mittlere Lufttemperatur, die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit.

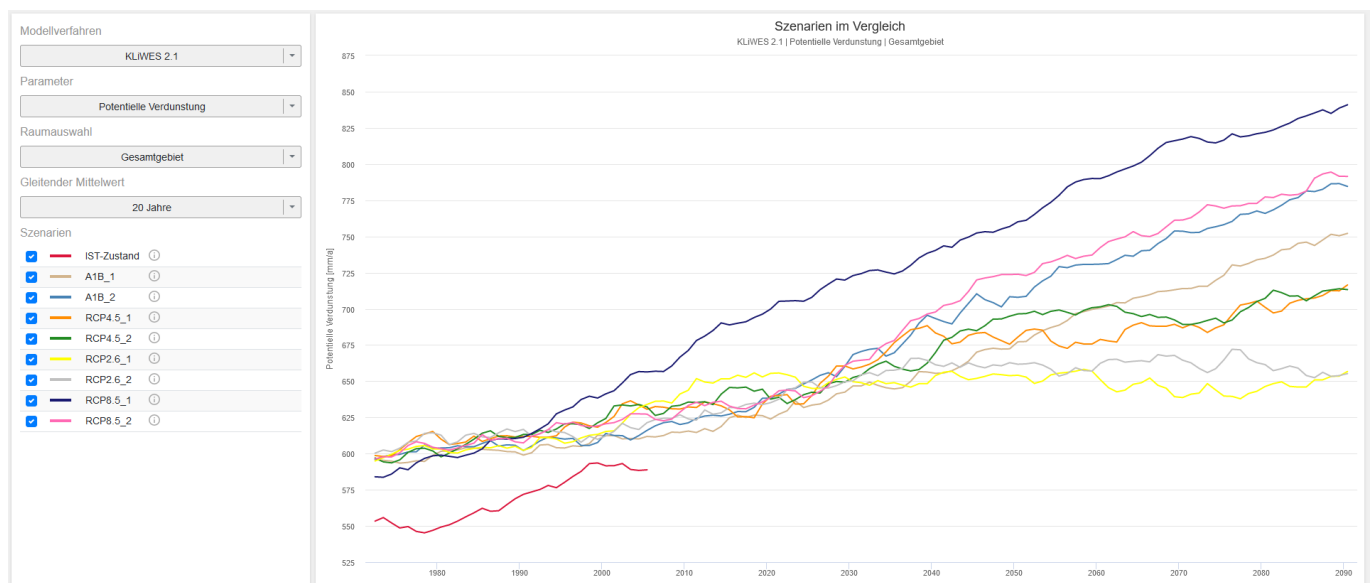


Abbildung 72: Entwicklung der projizierten potentiellen Verdunstung als 20jähriges gleitendes Mittel unter Einfluss der ausgewählten Klimarealisierungen in Sachsen (Quelle: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen)

Vor allem bei der mittleren Temperatur gibt es Abweichungen zwischen dem Ist-Zustand und den Realisierungen. So liegen die mittleren Lufttemperaturen der Beobachtungsdaten durchschnittlich um 0.5 C° geringer im Vergleich zu den Realisierungen (s. **Abbildung 17**). Dies bewirkt geringere Werte der potentiellen Verdunstung.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.4 gezeigt wurde, nimmt die mittlere Lufttemperatur in allen acht ausgewählten Realisierungen (s. Tabelle 4) zu. Dies führt im Ergebnis auch zu einem teils erheblichen Ansteigen der potentiellen Verdunstung. Die Realisierung RCP8.5_1 (Abbildung 72, dunkelblaue Linie) stellt mit ihrem Verlauf ein „worst case scenario“ dar. Die potentielle Verdunstung steigert sich für diese Projektion von ausgangs ca. 600 mm/a auf fast 850 mm/a gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Demgegenüber projiziert das vergleichsweise moderate Szenario RCP2.6_1 einen Anstieg der durchschnittlichen potentiellen Verdunstung von ca. 600 mm/a (1988 – 2014) auf etwa 650 mm/a (2071 – 2100).

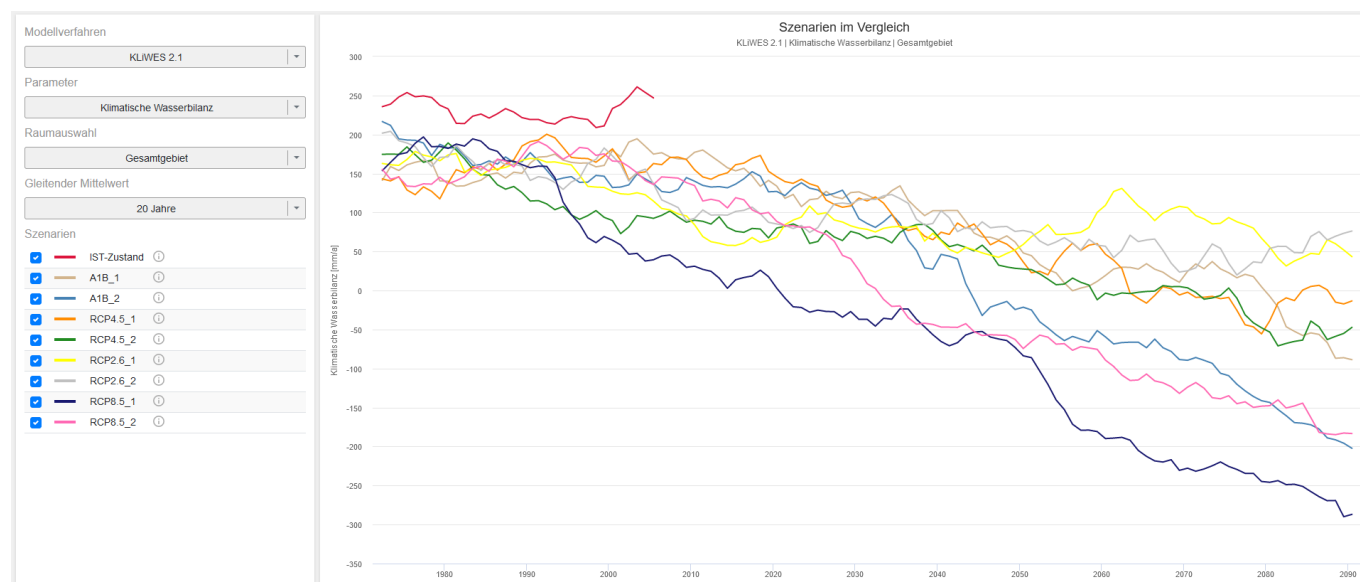


Abbildung 73: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz (= projizierter Niederschlag minus projizierter potentieller Verdunstung) der ausgewählten Klimarealisierungen als 20jähriges gleitendes Mittel für Sachsen (Quelle: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen)

Um einen Eindruck vom zukünftige zu erwartenden Wasserdargebot zu erhalten, wird die Größe der klimatischen Wasserbilanz KWB verwendet. Sie stellt die Differenz von Niederschlag minus potentieller Verdunstung dar. Ihr projizierter Verlauf als 20jähriges gleitendes Mittel des Ist-Zustands und der acht Klimaprojektionen über den Modellraum Sachsens ist in Abbildung 73 zu sehen. Der mittlere Verlauf der klimatischen Wasserbilanz für den Ist-Zustand liegt hier über den Verläufen der Realisierungen. Dies ist vor allem auf die geringere potentielle Verdunstung des Ist-Zustands (1961-2015) im Mittel über Sachsen gegenüber den Realisierungen zurückzuführen.

Es ist zudem für alle Klimarealisierungen ein negativer Trend festzustellen, was einer Abnahme des potentiellen Wasserdargebots entsprechen würde. Die projizierten Auswirkungen der klimatischen Veränderungen sind für die drei Realisierungen A1B_1, RCP8.5_1 und RCP8.5_2 am stärksten. Diese drei Projektionen weisen spätestens ab 2050 im Mittel negative Werte für die klimatische Wasserbilanz auf. Dies würde einem erheblichen Wassermangel gleichkommen. Vor allem die RCP8.5_1-Realisierung fällt wiederum mit einem starken Rückgang auf, welcher für den Zeitraum von 2071 – 2100 einen mittleren Wert von rund -130 mm/a für die klimatische Wasserbilanz ergibt.

Die übrigen fünf Realisierung weisen zwar entsprechend der Modellierungen auch gegen Ende des 21. Jahrhunderts projizierte Werte von > 0 mm/a, aber auch hier zeigt sich ein deutlicher Rückgang von durchschnittlich 50% gegenüber dem Zeitraum des Ist-Zustands.

Um die Entwicklung auch für den Raum Sachsens zu verdeutlichen, sind in Abbildung 74 vier Karten dargestellt, welche die langjährigen Mittelwerte der klimatischen Wasserbilanz für die Zeitabschnitte der Vergangenheit von 1961 – 1987 und 1988 – 2014 sowie für die Zukunft von 2021 – 2050 und 2071 – 2100 wiedergeben. Grundlage der Werte ist die Realisierung RCP8.5_1. Hierbei fällt auf, dass bereits im Zeitraum von 1988 – 2014 der Norden Sachsens Werte von unter 50 mm/a für die klimatische Wasserbilanz - als Maß für das Wasserdargebot - aufweisen (s. Abbildung 74, dunkelrote Flächen). Zum Ende des 21. Jahrhunderts dominieren dann die Flächen mit weniger als 50 mm/a den Großteil des untersuchten Raums in Sachsen. Nur für die Kammlagen des Erzgebirges würde es dieser Klimarealisierung folgend noch ein nennenswertes Dargebot geben.

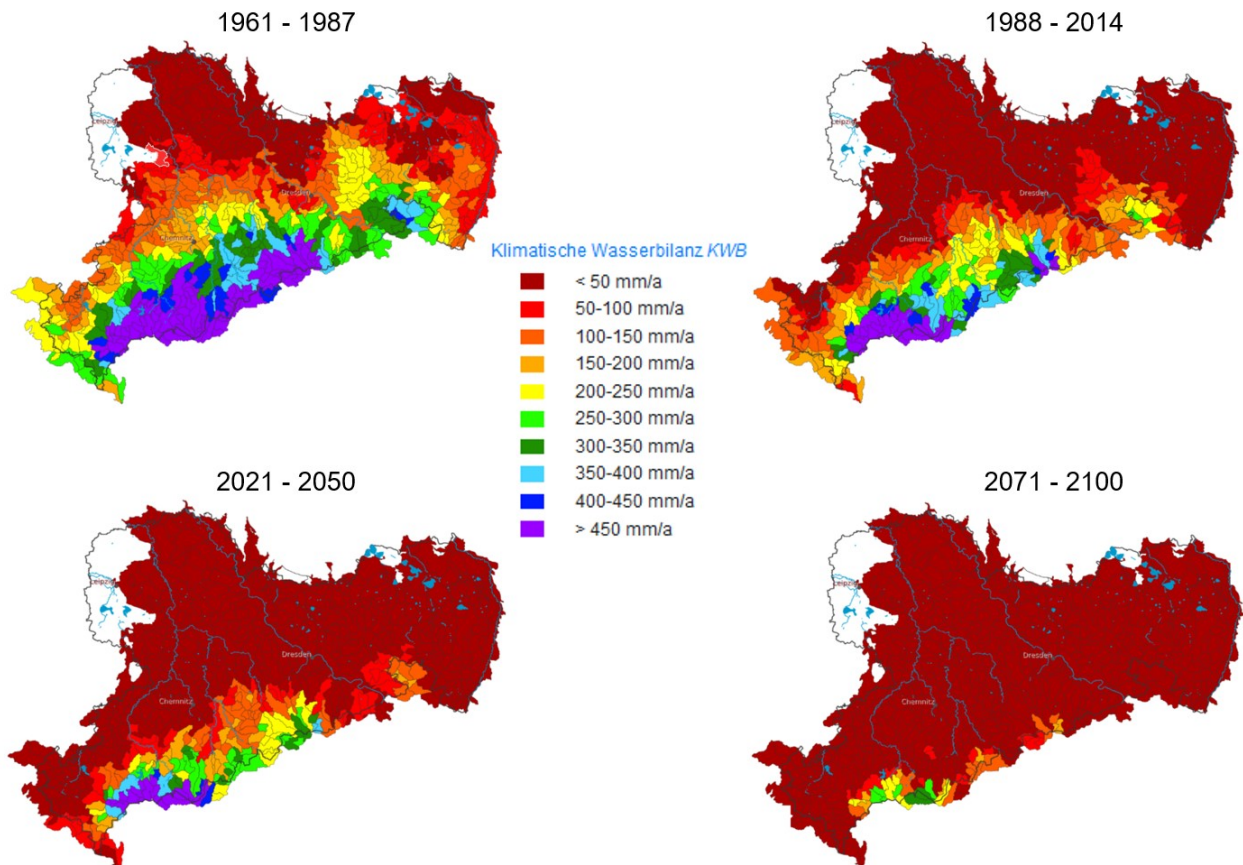


Abbildung 74: Karten der projizierten klimatischen Wasserbilanz als langjährige Mittelwerte (1961-1987, 1988-2014, 2021-2050 und 2071-2100) in den sächsischen Einzugsgebieten basierend auf dem RCP-8.5_1-Szenario (Quelle Karten: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal)

In Abbildung 75 ist die Entwicklung der projizierten realen Verdunstung als 20jähriges gleitendes Mittel bis 2100 unter Einfluss der ausgewählten Klimarealisierungen in Sachsen dargestellt.

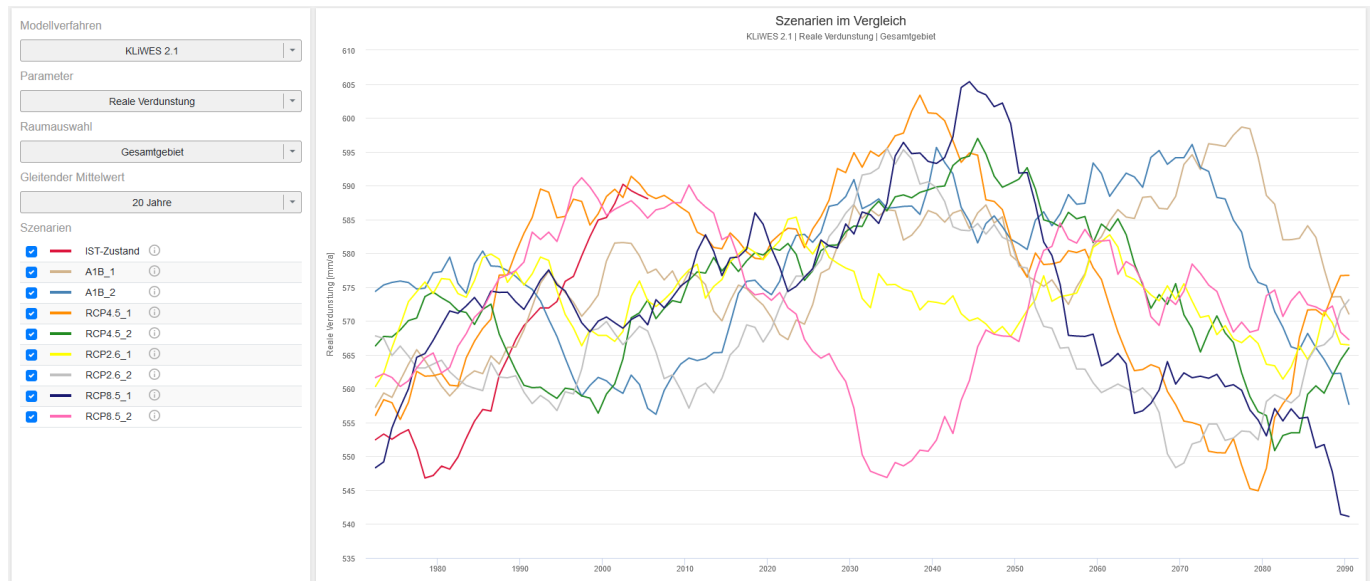


Abbildung 75: Entwicklung der projizierten realen Verdunstung als 20jähriges gleitendes Mittel unter Einfluss der ausgewählten Klimarealisierungen in Sachsen (Quelle: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen)

Die Verläufe der acht Realisierungen sind recht unterschiedlich, teilweise sogar gegensätzlich. Für die Mehrzahl der Klimaprojektionen kommt es bis Mitte des 21. Jahrhunderts zu einer leichten Zunahme der realen Verdunstungswerte. Danach schlägt der Trend um, was auf die rückläufigen projizierten Niederschläge (s. Abbildung 16) und die damit limitierten Wasservorräte zurückzuführen ist. Insgesamt schwanken die Verdunstungswerte über den Betrachtungszeitraum der Klimarealisierungen nur in einem Wertebereich zwischen rund 540 mm/a und 600 mm/a.

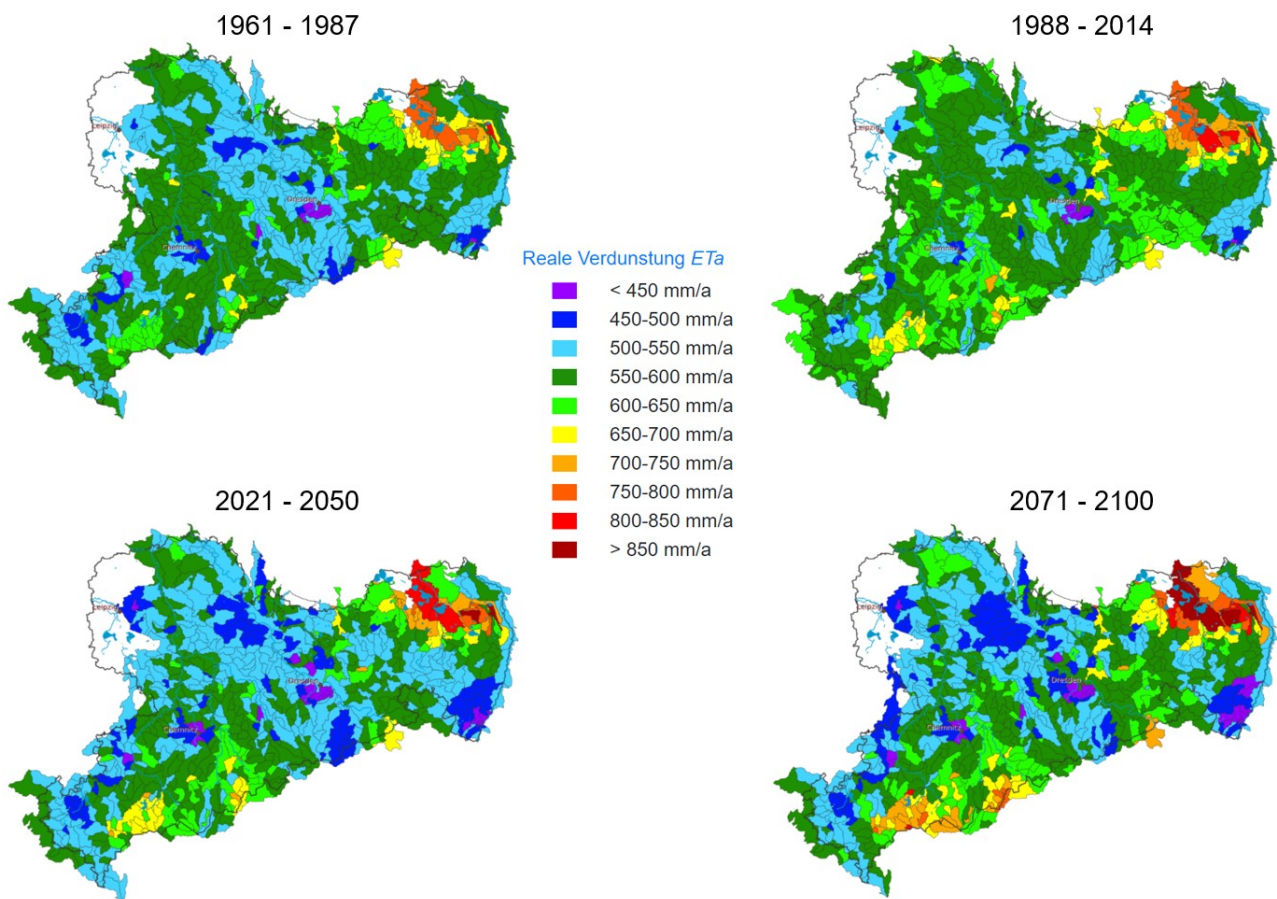


Abbildung 76: Karten der simulierten realen Verdunstung als langjährige Mittelwerte (1961-1987, 1988-2014, 2021-2050 und 2071-2100) in den sächsischen Einzugsgebieten basierend auf dem RCP-8.5_2-Szenario (Quelle Karten: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal)

Um wiederum die zeitliche Entwicklung sowie räumliche Verteilung der realen Verdunstungswerte in Sachsen zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 76 exemplarisch für die Klimarealisierung RCP8.5_2 vier Karten, welche aus der neuen KliWES-Webanwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen entstammen. Es ist eine recht heterogene Verteilung der realen Verdunstung erkennbar, welche maßgeblich durch die Landnutzungseigenschaften und die Grundwasserstände geprägt werden. Auch hier zeigt sich, dass es nur zu begrenzten Veränderungen der realen Verdunstung kommt, wobei der Norden Sachsens insgesamt stärker betroffen ist.

Als nächstes schließt sich eine Betrachtung des langsamen Grundwasserabflusses an. In Abbildung 77 sind hierzu die 20jährigen gleitenden Mittelwerte des langsamen Grundwasserabflusses für den Ist-Zustand sowie die acht Realisierungen dargestellt. Wie bereits für die zuvor betrachteten Wasserhaushaltsgrößen gibt es auch hier Abweichungen zwischen den Werten des Ist-Zustands und den Realisierungen. So befindet sich der Verlauf des durchschnittlichen langsamen Grundwasserabflusses für den Ist-Zustand über den Werten der Realisierungen.

Ausgehend von den verwendeten Klimarealisierungen und den darin projizierten abnehmenden Niederschlägen und steigenden Temperaturen sinkt der projizierte Abfluss aus dem langsamen Grundwasserspeicher in Sachsen, wie in Abbildung 77 dargestellt ist.

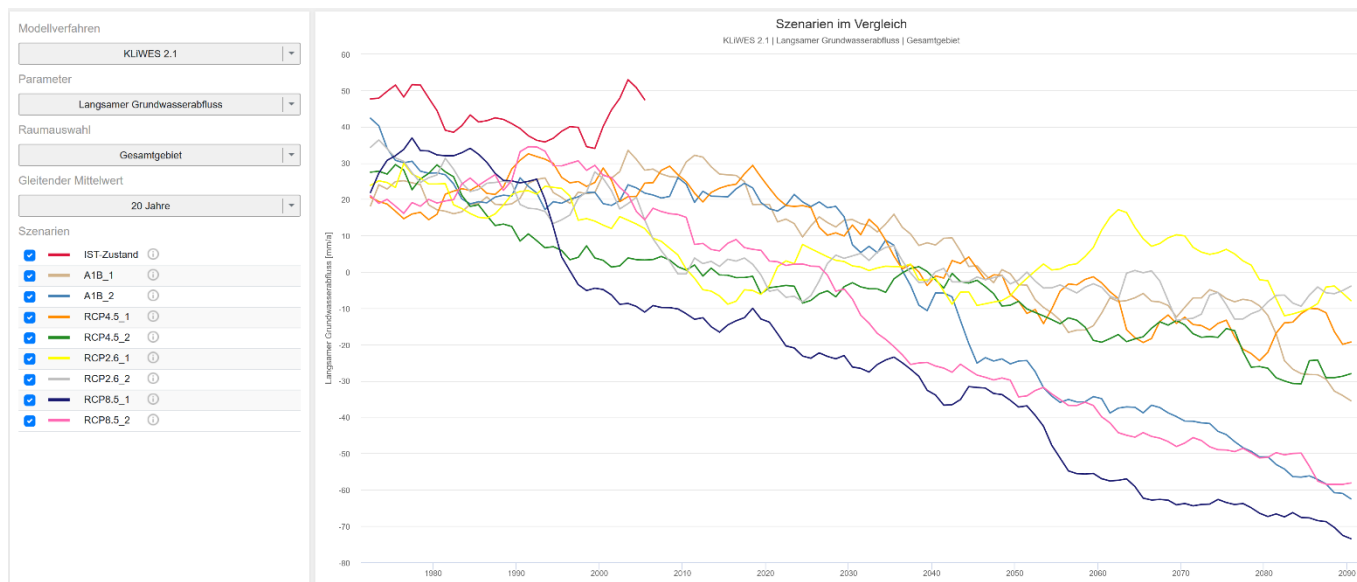


Abbildung 77: Entwicklung des projizierten langsamen Grundwasserabflusses als 20jähriges gleitendes Mittel unter Einfluss der ausgewählten Klimarealisierungen in Sachsen (Quelle: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen)

Für den Beobachtungszeitraum weisen die jeweiligen Verläufe bereits überwiegend einen negativen Trend auf. Zum Ende des 21. Jahrhunderts ergeben sich für alle Realisierungen negative Werte des langsamen Grundwasserabflusses, was eine Reduktion der Grundwasservorräte und damit ein Absinken der Grundwasserstände zur Folge hätte. Die Realisierung RCP8.5_1 weist mit rund -70 mm/a projiziertem Abfluss aus dem langsamen Grundwasserspeicher gegen Ende des Jahrhunderts einen Minimalwert auf.

Die Entwicklung der Abflüsse ist hierbei regional sehr verschieden, auch wenn insgesamt alle Bereiche Sachsens basierend auf den Wasserhaushaltsmodellierungen einen negativen Trend aufweisen. Dies soll anhand der Abbildung 78 exemplarisch für den Gesamtabfluss veranschaulicht werden. Grundlage der Karten ist die Klimarealisierung RCP8.5_2, welche die stärksten Veränderungen der klimatischen Einflussgrößen aufweist. Die vier dargestellten Karten enthalten die langjährigen Mittelwerte des Gesamtabflusses für die Zeitabschnitte der Vergangenheit von 1961 – 1987 und 1988 – 2014 sowie für die Zukunft von 2021 – 2050 und 2071 – 2100. Der Gesamtabfluss stellt dabei die Summe aller Abflusskomponenten dar:

- Landoberflächenabfluss inkl. Dränabfluss
- Abfluss über Trenn- und Mischkanalisation
- Hypodermischer Abfluss
- Schneller und langsamer Grundwasserabfluss

Entsprechend der zuvor beschriebenen Veränderungen der klimatologischen und hydrologischen Größen ergibt sich flächendeckend eine Reduktion der Gesamtabflüsse. Während im Zeitraum 1988 – 2014 der mittlere Gesamtabfluss in Sachsen bei rund 220 mm/a (für Realisierung RCP8.5_2) liegt, wird für 2071 – 2100 nur noch ein mittlerer Abfluss von ca. 60 mm/a projiziert. Dies entspricht in etwa einer Reduktion um zwei Drittel. Demgegenüber projiziert das moderate Klimaszenario RCP2.6 nur einen Rückgang von rund 20% des Gesamtabflusses zum Ende des 21. Jahrhunderts verglichen mit dem Zeitraum 1988 – 2014.

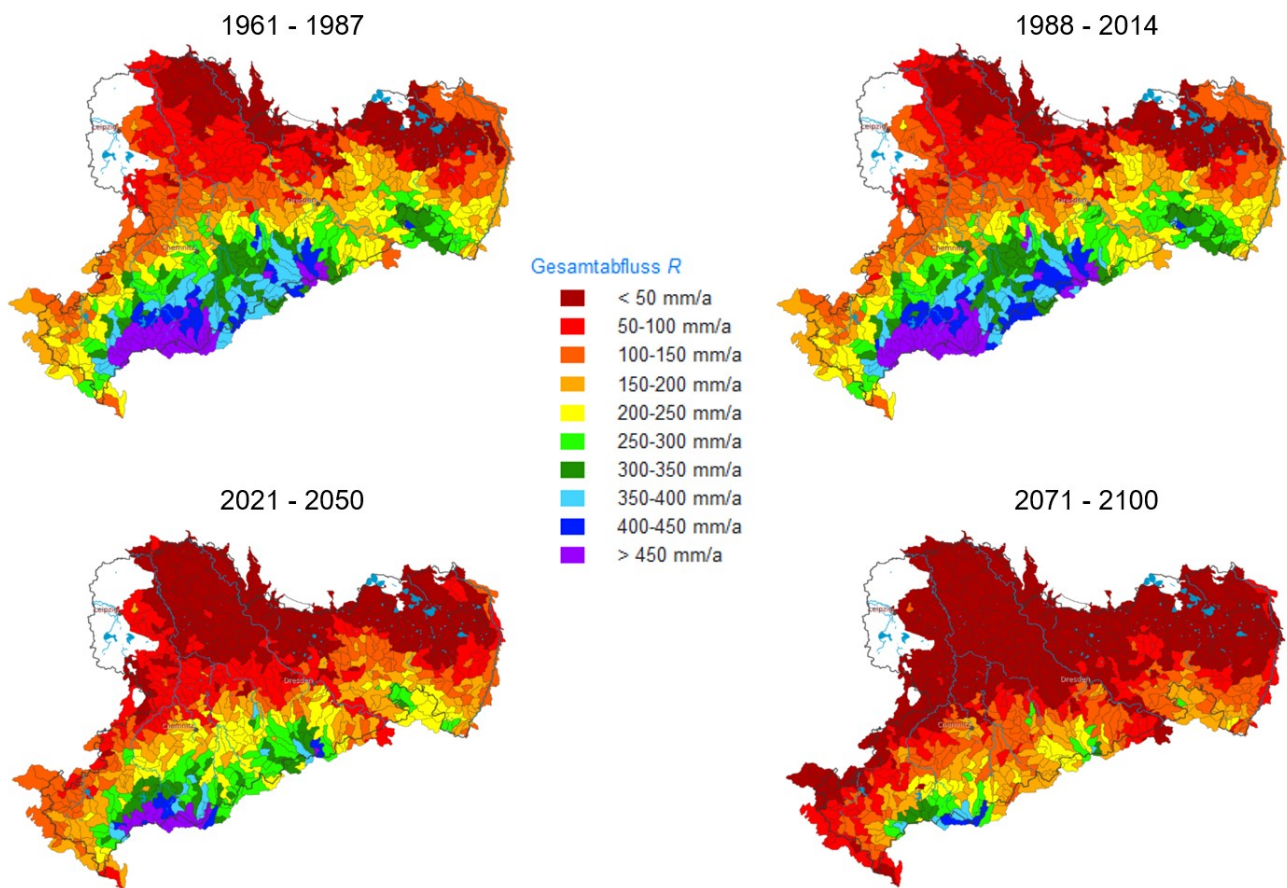


Abbildung 78: Karten des simulierten Gesamtabflusses als langjährige Mittelwerte (1961-1987, 1988-2014, 2021-2050 und 2071-2100) in den sächsischen Einzugsgebieten basierend auf dem RCP-8.5_2-Szenario (Quelle Karten: neue KliWES-Anwendung im Wasserhaushaltsportal)

Die nachfolgenden Abbildungen sollen ergänzend noch einen Überblick zu weiteren möglichen Auswertungen der projizierten meteorologischen Größen und der simulierten Wasserhaushaltsergebnisse bieten. So sind Auswertungen zu minimalen und maximalen Veränderungen möglich, wie sie die Abbildung 80 und Abbildung 81 am Beispiel des langsamen Grundwasserabflusses zeigen. Dargestellt sind die zeitlichen Entwicklungen der minimalen und maximalen Abflüsse aus dem langsamen Grundwasserspeicher für den Ist-Zustand (1961-2015) und die acht ausgewählten Klimarealisierungen (1961-2100). Zudem ist für jedes Jahr der Monat des minimalen bzw. maximalen Abflusses miterfasst. Diese Betrachtung wurden für den gesamten Untersuchungsraum durchgeführt.

Die bereits zuvor vorgestellten Auswertungen können auch für jedes der modellierten Einzugsgebiete (s. Abbildung 43) durchgeführt werden. Ebenso können z.B. die mittleren prozentualen Abweichungen verschiedener Größen vom Vergleichszeitraum 1961-1990 bestimmt werden. Dies ist exemplarisch für die Realisierung A1B_1 in Abbildung 79 aufgezeigt. Auch Betrachtungen der jahreszeitlichen Veränderungen können Gegenstand von weiteren Detailuntersuchungen sein.

Eine nutzerspezifische Auswertung der Ergebnisse des KliWES-Projekts bietet die neue Anwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen, welche zukünftig alle aktualisierten Projektergebnisse zum Download bereitstellt (s. Kapitel 6).

Region	A1B_0				A1B_1				mittlere jährliche prozentuale Änderung gegenüber IST-Mittelwert																													
	IST-Mittelwert				2020-29				2030-39				2040-49				2050-59				2060-69				2070-79				2080-89				2090-2099					
	pi	ep	wb	lt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt	Δpi	Δep	Δwb	Δlt		
	mm/a			°C	%				%				%				%				%				%				%									
Weißer Elster																																						
1	Bad Elster 1	1	798	614	195	6.1	3	14	-34	24	-6	21	-94	30	-3	21	-80	33	-8	28	-121	38	-8	32	-136	48	-4	32	-117	51	-11	41	-173	63	-19	40	-204	65
4	Bobenneukirchen	1	743	604	142	6.6	8	14	-19	19	2	12	-42	14	8	15	-19	23	0	21	-90	28	-1	20	-90	31	-2	27	-126	36	2	31	-124	44	4	32	-113	48
9	Gospersgrün	1	699	617	84	7.4	27	11	137	16	13	9	41	10	21	12	83	19	10	17	-41	23	14	16	-4	25	4	24	-139	30	8	27	-131	36	15	27	-76	40
11	Neuensalz	1	790	623	170	7.1	8	12	-6	17	-3	10	-50	11	4	13	-29	20	-4	18	-85	24	-3	17	-79	26	-10	25	-139	31	-5	28	-125	38	-1	28	-105	41
85	Großbardau	1	696	656	41	8.7	2	11	-146	14	-5	9	-230	10	0	14	-228	17	-10	17	-444	20	-7	17	-391	23	-11	24	-572	26	-11	28	-640	32	-4	26	-480	35
92	Glasten	1	664	778	-113	8.5	10	11	-21	13	-1	10	-71	9	5	14	-65	17	-6	18	-157	20	-3	17	-135	22	-7	24	-210	26	-7	28	-241	32	2	28	-181	35
98	Großsteinberg	1	688	647	42	8.8	1	12	-167	14	-4	10	-231	10	-2	15	-254	18	-10	18	-441	20	-7	18	-394	23	-12	24	-571	26	-12	29	-645	32	-3	27	-472	35
110	Schönwind 2	1	887	633	267	6.3	4	12	-15	18	-3	10	-35	12	-3	14	-41	22	-7	20	-69	27	-6	19	-68	29	-9	26	-91	33	-10	31	-105	42	-5	30	-86	45
115	Langenreinsdorf	1	719	616	104	8.0	2	9	-41	13	-5	8	-85	8	-3	11	-88	17	-7	16	-144	20	-7	16	-142	23	-13	23	-225	28	-11	27	-235	35	-7	27	-204	38
140	Ramoldsreuth	1	737	588	151	6.6	3	15	-43	20	-1	13	-57	14	6	15	-32	24	-3	22	-102	29	-3	21	-98	31	-5	28	-133	37	-2	32	-136	45	1	33	-120	49
143	Rodewisch 1	1	921	641	302	6.8	10	10	8	10	-4	8	-32	5	2	11	-19	14	-5	18	-53	19	-2	17	-46	21	-10	25	-86	26	-6	29	-80	34	-1	29	-64	37
167	Rodlera	1	680	637	43	7.5	12	12	2	16	3	10	-116	10	9	13	-55	19	2	18	-237	23	2	17	-219	25	-5	25	-451	29	0	28	-418	36	5	28	-343	39
168	Langenleuba-Niederhain	1	725	618	107	8.4	6	10	-18	14	-6	10	-101	10	-3	14	-103	18	-6	18	-144	22	-6	17	-139	24	-10	25	-212	29	-11	28	-241	35	-5	28	-194	37
169	Langenleuba-Niederhain	1	729	616	113	8.4	5	10	-26	14	-7	10	-100	10	-5	13	-107	18	-7	17	-137	21	-6	17	-131	24	-12	24	-210	29	-14	28	-241	35	-6	27	-190	38
170	Beucha	1	664	653	11	8.7	8	11	-158	14	-2	9	-634	10	4	13	-547	17	-7	17	-1378	20	-4	16	-1164	23	-8	23	-1832	26	-8	27	-2075	32	0	26	-1505	35
188	Werda ZP	1	1035	660	459	6.1	6	10	-5	12	-3	9	-27	6	0	12	-22	17	-7	20	-49	22	-5	19	-44	25	-10	27	-67	30	-7	31	-66	39	-2	31	-54	43
192	Läwitz	1	729	591	140	6.7	4	19	-62	21	-1	17	-80	15	5	20	-58	25	-3	26	-125	30	-3	25	-120	32	-6	33	-173	37	-7	37	-195	45	-1	37	-163	49
2	Adorf 1	2	847	629	231	6.4	6	12	-12	18	-1	10	-33	13	1	14	-33	22	-5	20	-71	27	-4	19	-69	29	-6	26	-95	34	-7	30	-109	42	-2	30	-90	46
19	Mylau	2	806	635	173	7.6	11	11	10	12	-2	9	-44	7	4	12	-27	15	-3	18	-79	19	-1	17	-64	22	-9	25	-133	26	-5	28	-127	33	0	28	-102	36
107	Kesselschlag 1	2	681	656	26	8.7	9	10	-27	14	-1	9	-254	9	4	13	-218	17	-5	16	-548	20	-2	16	-470	23	-6	23	-739	27	-7	27	-867	33	2	26	-611	35
116	Streitwald 1	2	679	646	34	8.5	9	10	-1	14	-2	9	-208	10	2	13	-207	18	-3	16	-384	21	-3	16	-368	24	-6	23	-577	28	-7	27	-662	34	1	26	-494	37
129	Neukirchen 1	2	738	635	104	8.1	3	10	-38	11	-3	8	-71	6	0	12	-75	15	-5	16	-136	18	-3	16	-118	21	-10	24	-220	25	-6	27	-213	32	-3	27	-184	35
139	Hasenmühle	2	874	636	246	7.1	7	11	-4	13	-5	9	-45	8	1	12	-29	17	-7	18	-70	21	-4	17	-61	23	-13	24	-110	28	-8	28	-103	35	-3	28	-84	38
189	Naunhof	2	668	664	5	8.8	5	12	-859	14	-1	10	-1564	10	2	14	-1634	17	-7	18	-3317	20	-5	17	-2973	23	-8	24	-4396	26	-9	28	-5023	32	0	27	-3611	35
5	Oelsnitz	3	846	627	230	6.7	7	12	-9	17	-2	10	-35	11	2	13	-29	21	-5	19	-73	25	-4	18	-68	28	-9	25	-103	32	-6	29	-104	40	-2	29	-87	44

Abbildung 79: Tabellenauszug zur Darstellung von mittleren jährlichen prozentualen Änderungen verschiedener Klima- und Wasserhaushaltsgrößen für 10jährige Zeitscheiben gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961-1990 am Beispiel der Klimarealisierung A1B_1

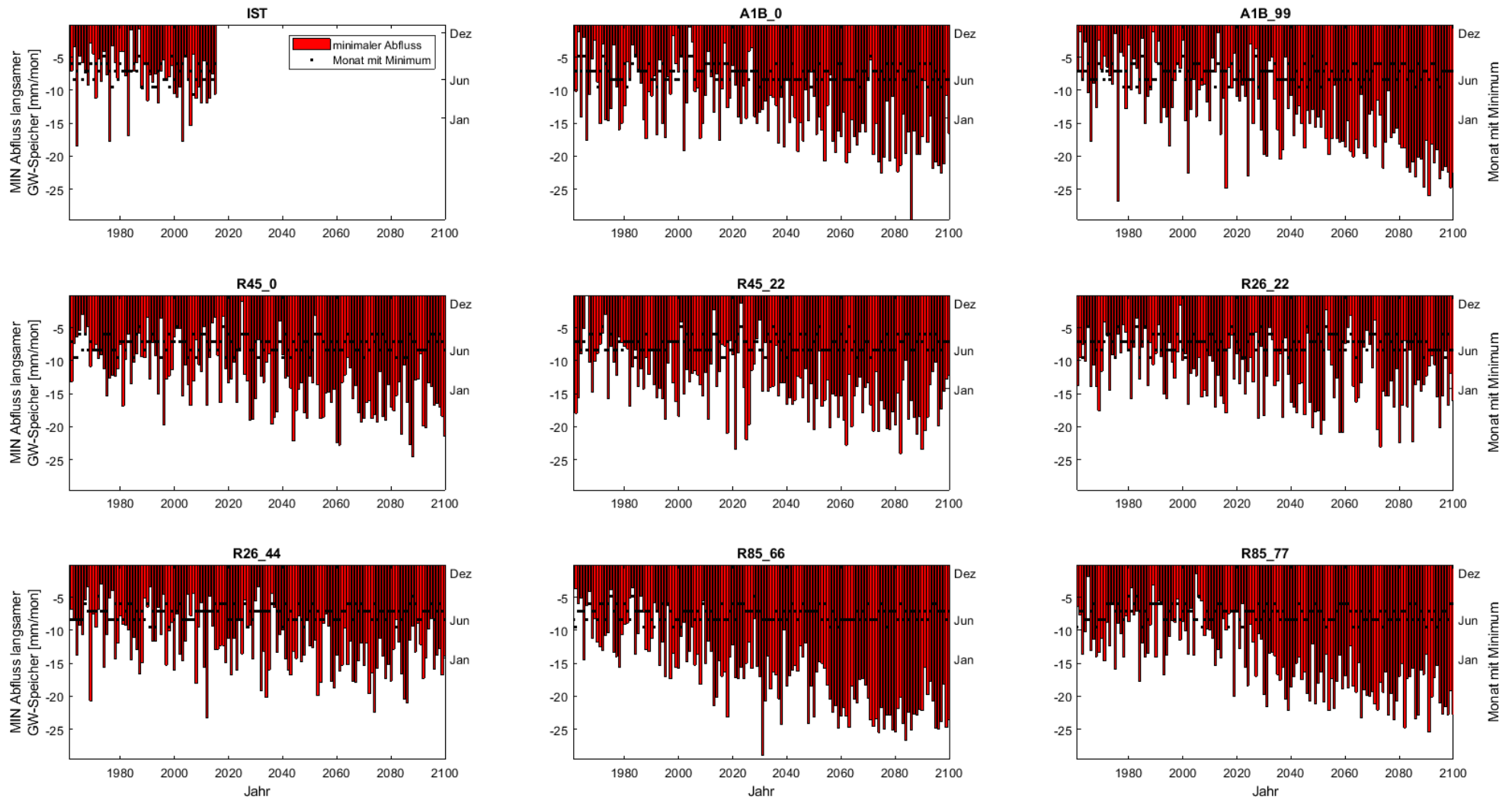


Abbildung 80: Darstellung zur zeitlichen Entwicklung der minimalen Abflüsse aus dem langsamen Grundwasserspeicher für den Ist-Zustand (1961-2015) und die acht ausgewählten Klimarealisierungen (1961-2100)

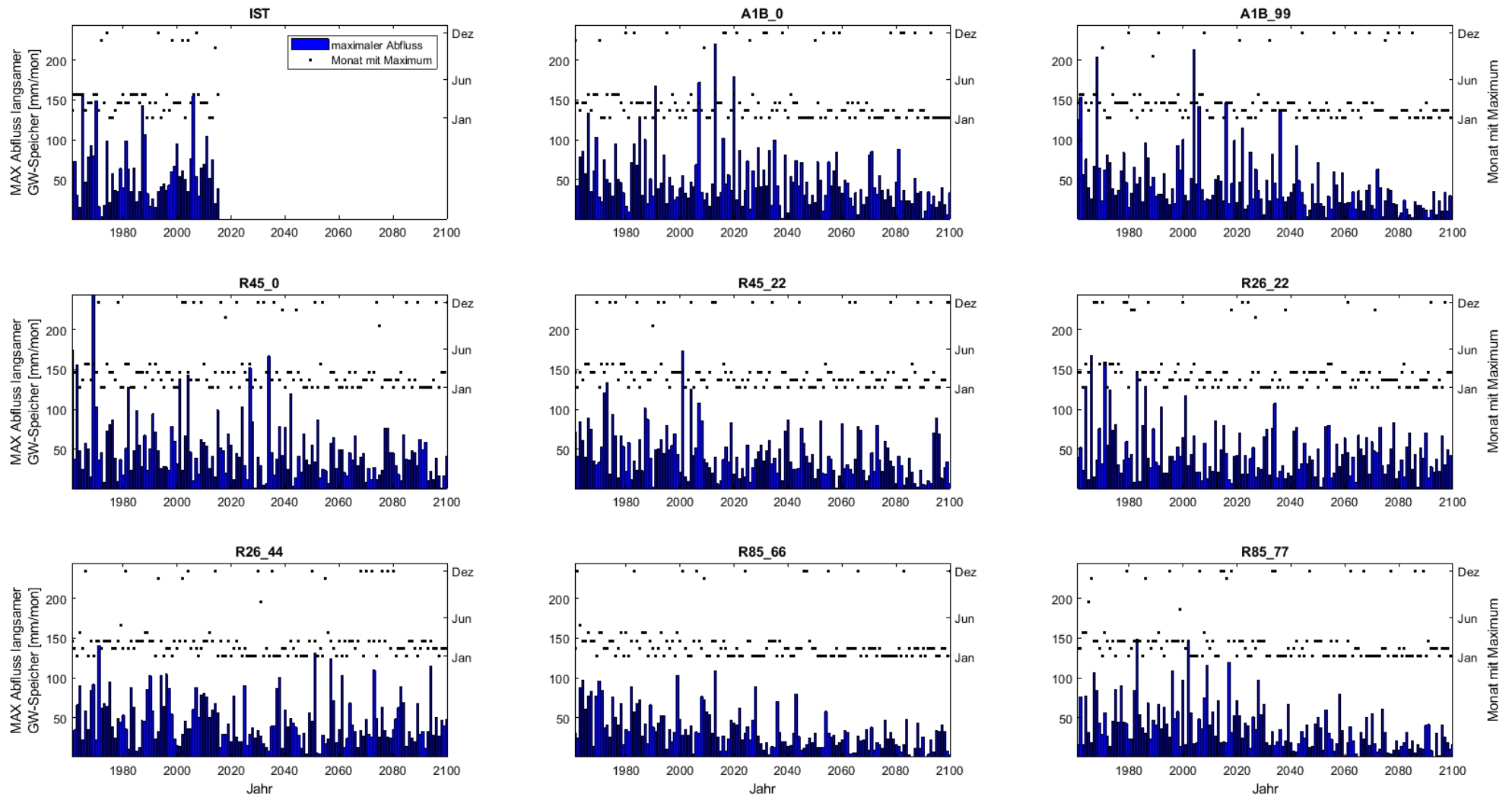


Abbildung 81: Darstellung zur zeitlichen Entwicklung der maximalen Abflüsse aus dem langsamen Grundwasserspeicher für den Ist-Zustand (1961-2015) und die acht ausgewählten Klimarealisierungen (1961-2100)

5.2 Auswertung von Ergebnissen für die Trockenjahre 2018 und 2019

Ergänzend zu den Wasserhaushaltsberechnungen für Ist-Zustand (Referenzdatensatz) und Klimaprojektionen erfolgten weitere Wasserhaushaltsmodellierungen für den Zeitraum 2010 bis 2019 basierend auf einem weiteren meteorologischen Eingangsdatensatz. Erläuterungen zu diesem Datensatz finden sich in Abschnitt 2.2.5. Die Wasserhaushaltsmodellierungen für die betrachteten Pegelinzugsgebiete Jänkendorf 1, Markersbach 1, Merzdorf und Schönau sollen nachfolgend anhand der drei Ergebnisgrößen potentielle Verdunstung, reale Verdunstung sowie Abfluss aus dem langsamen Grundwasserspeicher ausgewertet werden. Da die Ergebnisse der drei Gebiete Jänkendorf 1, Merzdorf und Schönau vergleichbar sind, wird jeweils nur auf das Gebiet Schönau detailliert eingegangen.

Beginnend mit der potentiellen Verdunstung zeigt sich am Beispiel des Gebiets Schönau ein hoher Verdunstungsanspruch von rund 750 mm/a für die Jahre 2018 und 2019, welcher in Abbildung 82 dargestellt ist. Dieser begründet sich vornehmlich durch die hohen Temperaturen. Das Jahr 2017 erreicht mit einem Wert von ca. 650 mm/a eine deutlich geringere potentielle Verdunstung.

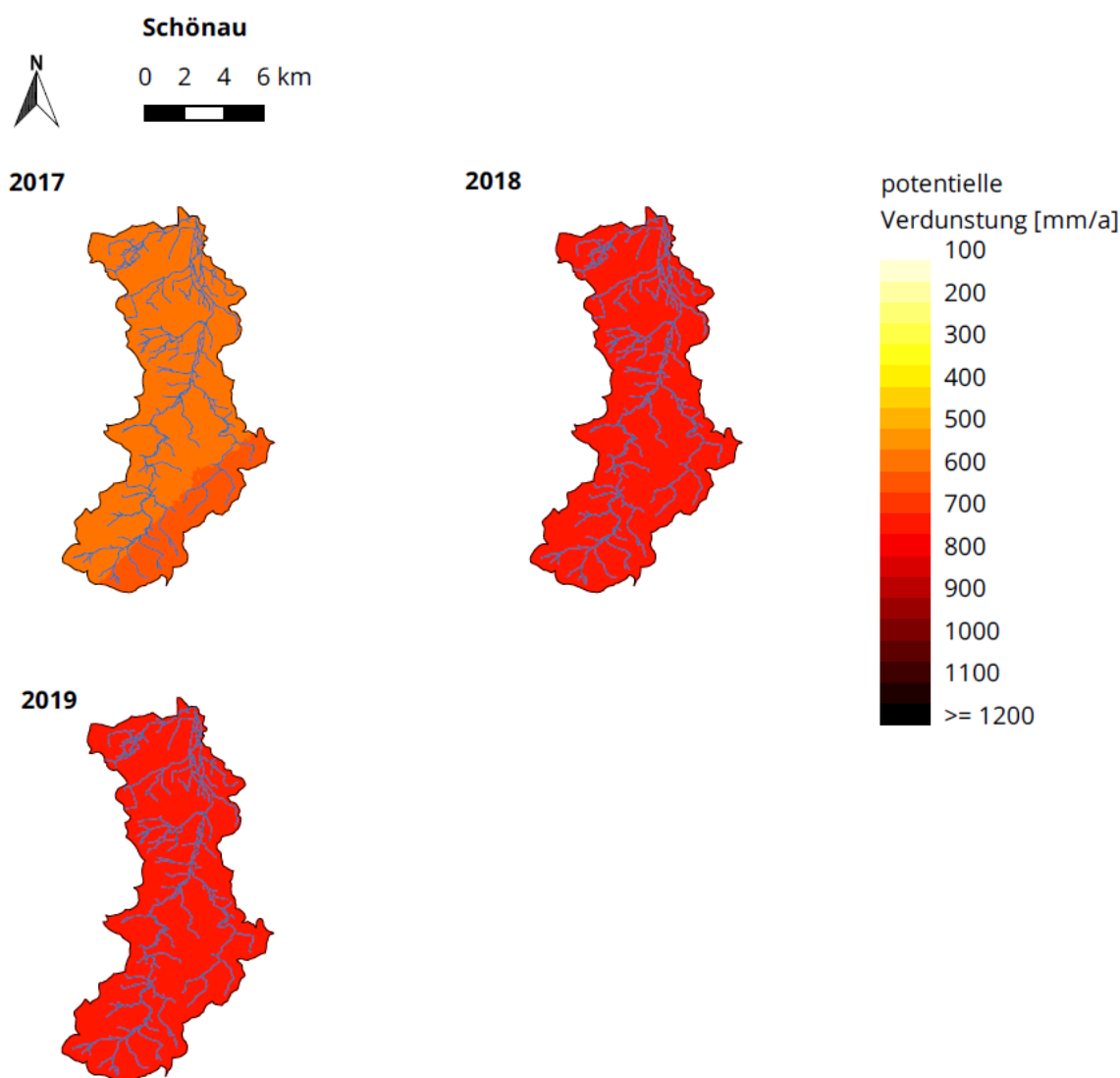


Abbildung 82: Räumliche Verteilung der potentiellen Verdunstung in den Jahren 2017, 2018 und 2019 im Einzugsgebiet Schönau

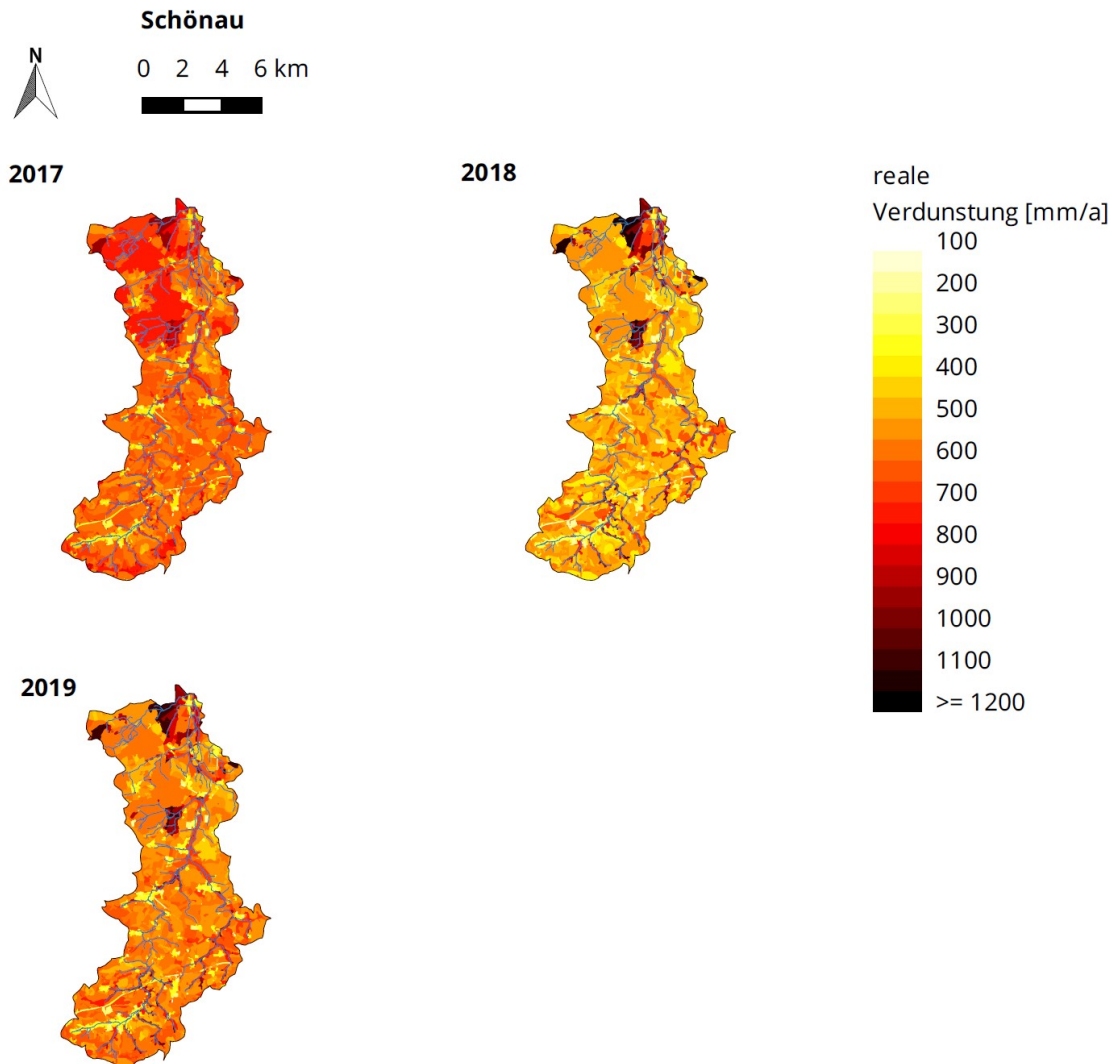


Abbildung 83: Räumliche Verteilung der realen Verdunstung in den Jahren 2017, 2018 und 2019 im Einzugsgebiet Schönau

Da die meteorologischen Größen, welche für die Berechnung der potentiellen Verdunstung benötigt werden, in ihrer räumlichen Verteilung sehr homogen sind, ergibt sich auch für die physikalisch mögliche Verdunstung im Einzugsgebiet eine sehr gleichförmige Verteilung. In der Betrachtung der realen Verdunstung tritt hingegen eine wesentlich stärkere Differenzierung auf, wie Abbildung 83 zeigt, da die vorliegenden Landnutzungseigenschaften berücksichtigt werden. Zudem zeigt sich, dass die reale Verdunstung mit rund 640 mm/a nur geringfügig unter der potentiellen Verdunstung liegt und der Verdunstungsanspruch im Jahr 2017 damit nahezu erfüllt werden kann. D.h., dass ausreichend Wasser zur Verdunstung vorhanden ist. Demgegenüber liegt die reale Verdunstung in den Jahren 2018 und 2019 mit ca. 540 mm/a bzw. 590 mm/a deutlich niedriger als die Werte der potentiellen Verdunstung. Die hohen Werte der potentiellen Verdunstung in diesem Zeitraum schlagen sich aufgrund des Wassermangels im Einzugsgebiet nicht in der realen Verdunstung nieder. Nur einzelne grundwassernahe Flächen (dunkelrot) im nördlichen Bereich des Gebietes heben sich hervor und weisen sehr hohe Verdunstungsmengen auf (s. Abbildung 83), da keine Wasserlimitierung vorliegt.

Im Vergleich der drei Jahre ist damit die reale Verdunstung für 2017 im Gebietsmittel am höchsten, obwohl dieses Jahr den niedrigsten Wert bei der potentiellen Verdunstung aufweist.

Tabelle 29: Entwicklung der potentiellen Verdunstung ETP [mm/a] im Zeitraum 1986-2015 (basierend auf den Werten des Referenzdatensatzes) anhand von 10jährigen Mittelwerten in den Einzugsgebieten Schönau, Merzdorf, Jänkendorf 1 und Markersbach 1

10jähriges Mittel von ETP [mm/a]	Schönau	Merzdorf	Jänkendorf 1	Markersbach 1
1986-1995	598	596	600	494
1996-2005	601	592	601	474
2006-2015	615	620	617	511

Zur Einordnung der Werte ist in Tabelle 29 die Entwicklung der potentiellen Verdunstung im Zeitraum 1986-2015 (basierend auf dem Referenzdatensatz) anhand von 10jährigen Mittelwerten aufgeführt. Spalte 2 zeigt die Werte für das Einzugsgebiet Schönau. Für die Zeitscheiben von 1986-1995 sowie 1996-2005 liegt die potentielle Verdunstung bei rund 600 mm/a. Im Zeitraum 2006-2015 zeigt sich bereits ein Anstieg auf rund 615 mm/a, was durch die Zunahme der mittleren Temperatur begründet ist. Damit liegt der Wert der potentiellen Verdunstung mit rund 650 mm/a im Jahr 2017 (Gebiet Schönau) bereits über den langjährigen Mittelwerten.

Dieselbe Entwicklung der potentiellen Verdunstung findet sich in den Einzugsgebieten Jänkendorf 1, Markersbach 1 und Merzdorf, welche ebenfalls in Tabelle 29 aufgeführt sind.

Tabelle 30: Entwicklung der realen Verdunstung ETR [mm/a] im Zeitraum 1986-2015 (basierend auf den Werten des Referenzdatensatzes) anhand von 10jährigen Mittelwerten in den Einzugsgebieten Schönau, Merzdorf, Jänkendorf 1 und Markersbach 1

10jähriges Mittel von ETR [mm/a]	Schönau	Merzdorf	Jänkendorf 1	Markersbach 1
1986-1995	586	536	583	621
1996-2005	595	537	602	603
2006-2015	604	568	618	636

Daneben soll auch die Entwicklung der mit dem Wasserhaushaltmodell ArcEGMO ermittelten realen Verdunstung im Zeitraum 1986-2015 (Eingangsdaten: Referenzdatensatz) anhand von 10jährigen Mittelwerten in Tabelle 30 aufgezeigt werden. Auch hier liegt die reale Verdunstung des Jahres 2017 mit rund 640 mm/a über den Mittelwerten der Zeitscheiben 1986-1995, 1996-2005 sowie 2006-2015. Da es in den Jahren zwischen 2010 und 2015 hohe Niederschlagsmengen gab und auch das Jahr 2017 ausreichend Niederschlag bringt (s. Abschnitt 2.2.5), ist das Wasserdargebot im Einzugsgebiet Schönau ebenfalls hoch, so dass viel Wasser verdunstet werden kann. So liegt die reale Verdunstung um ca. 40 mm/a höher als im Mittel der Jahre 2006-2015 (s. Tabelle 30) bzw. um ca. 30 mm/a höher im Vergleich zum Zeitraum 2010-2015 (s. Abbildung 84). Abbildung 84 stellt die Differenzen zwischen der jährlichen realen Verdunstung (REKIS-Datensatz) von 2017, 2018 und 2019 jeweils gegenüber dem Mittelwert 2010-2015 der jährlichen realen Verdunstung (Referenzdatensatz) in ihrer räumlichen Verteilung für das Einzugsgebiet Schönau dar. 2018 und 2019 weisen die überwiegenden Flächen hingegen eine negative Differenz von rund 100 mm/a auf mit Ausnahme der grundwassernahen Flächen, welche eine deutliche Zunahme der realen Verdunstung zeigen.

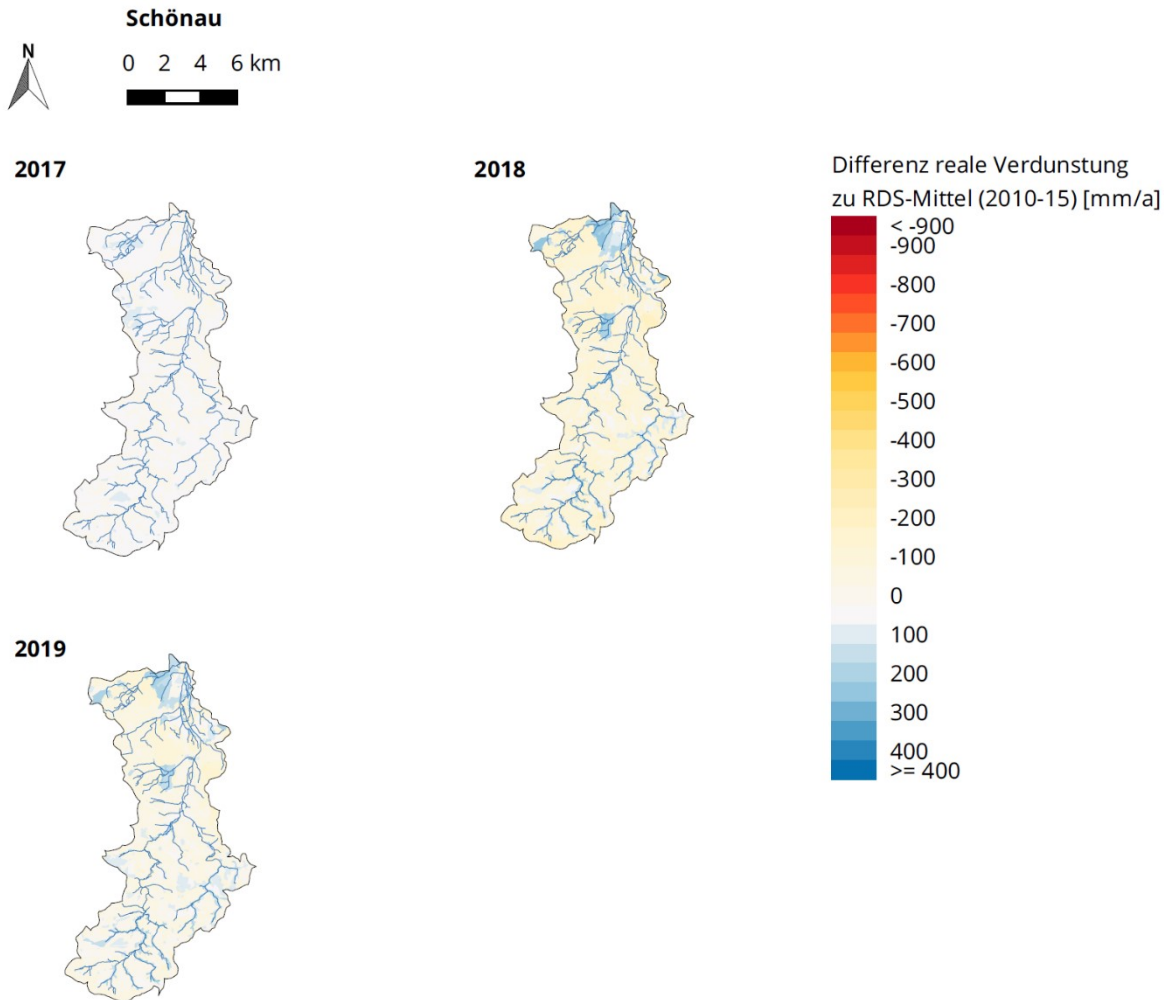


Abbildung 84: Differenzkarten der jährlichen realen Verdunstung (REKIS-Datensatz) von 2017, 2018 und 2019 jeweils gegenüber dem Mittelwert 2010-2015 der jährlichen realen Verdunstung aus dem Referenzdatensatz für das Einzugsgebiet Schönau

Für das Gebiet Markersbach 1 ist die Entwicklung nicht so stark ausgeprägt, ob wohl auch in diesem Gebiet der Jahresniederschlag in den Jahren 2018 und 2019 abnimmt (s. Abbildung 23). Da die jährlichen Niederschlagsmengen aber weiterhin über 1000 mm/a liegen, kommt es nicht zu einer Wasserlimitierung. Die Auswirkungen auf die reale Verdunstung sind somit nur sehr begrenzt, wie Abbildung 85 zeigt. Anhand des Verlaufs monatlichen Verdunstungswerte lässt sich erkennen, dass im Sommer 2018 die reale Verdunstung durch den fehlenden Niederschlag zwar etwas geringer ausfällt, im Sommer 2019 aber ein Maximalwert erreicht wird. Dieser begründet sich durch ein hohes Niederschlagsdargebot im Winter 2018/2019 (s. Abbildung 23).

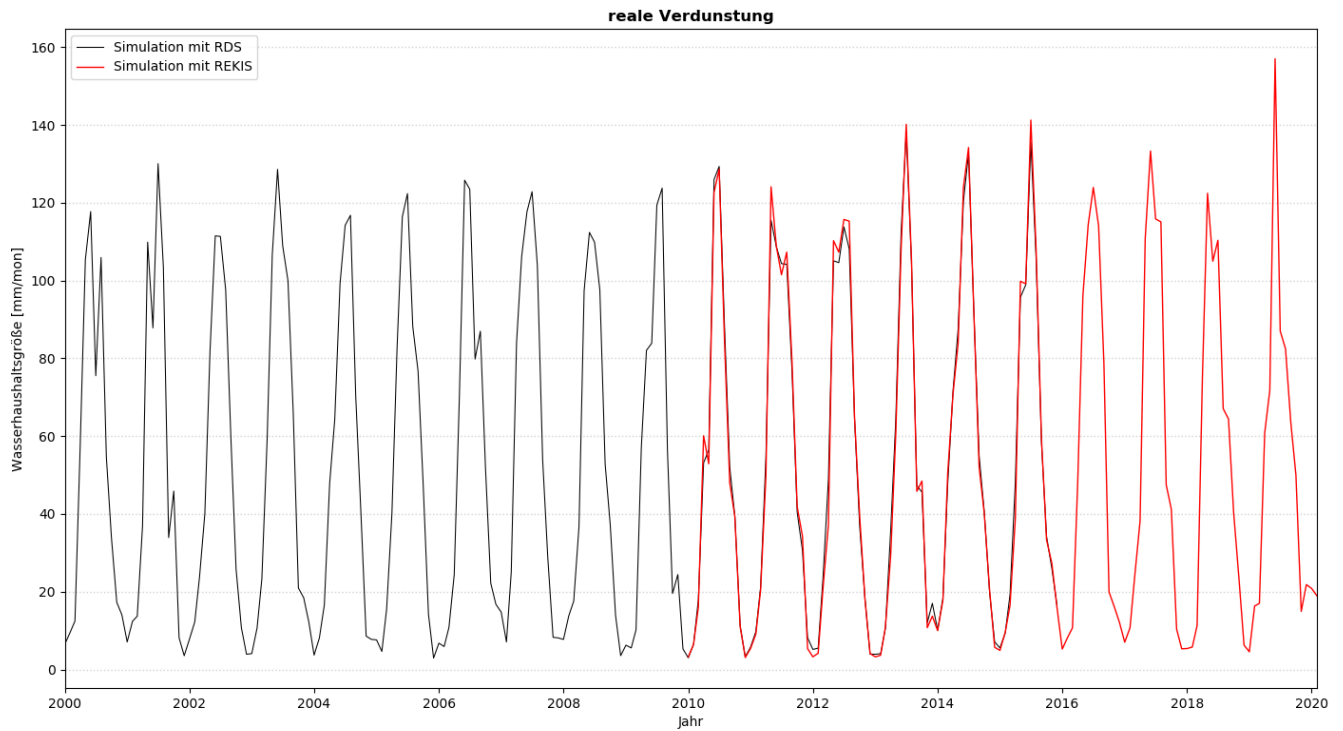


Abbildung 85: Gegenüberstellung der realen Verdunstung von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz (rote Linie) für das Einzugsgebiet Markersbach 1

Neben der Auswertung der potentiellen und realen Verdunstung für die Trockenjahre 2018 und 2019 soll auch die Entwicklung des langsamen Grundwasserabflusses betrachtet werden. Abbildung 86 gibt hierzu die Entwicklung des langsamen Grundwasserabflusses als Monatswerte zwischen 2000 und 2020 wider.

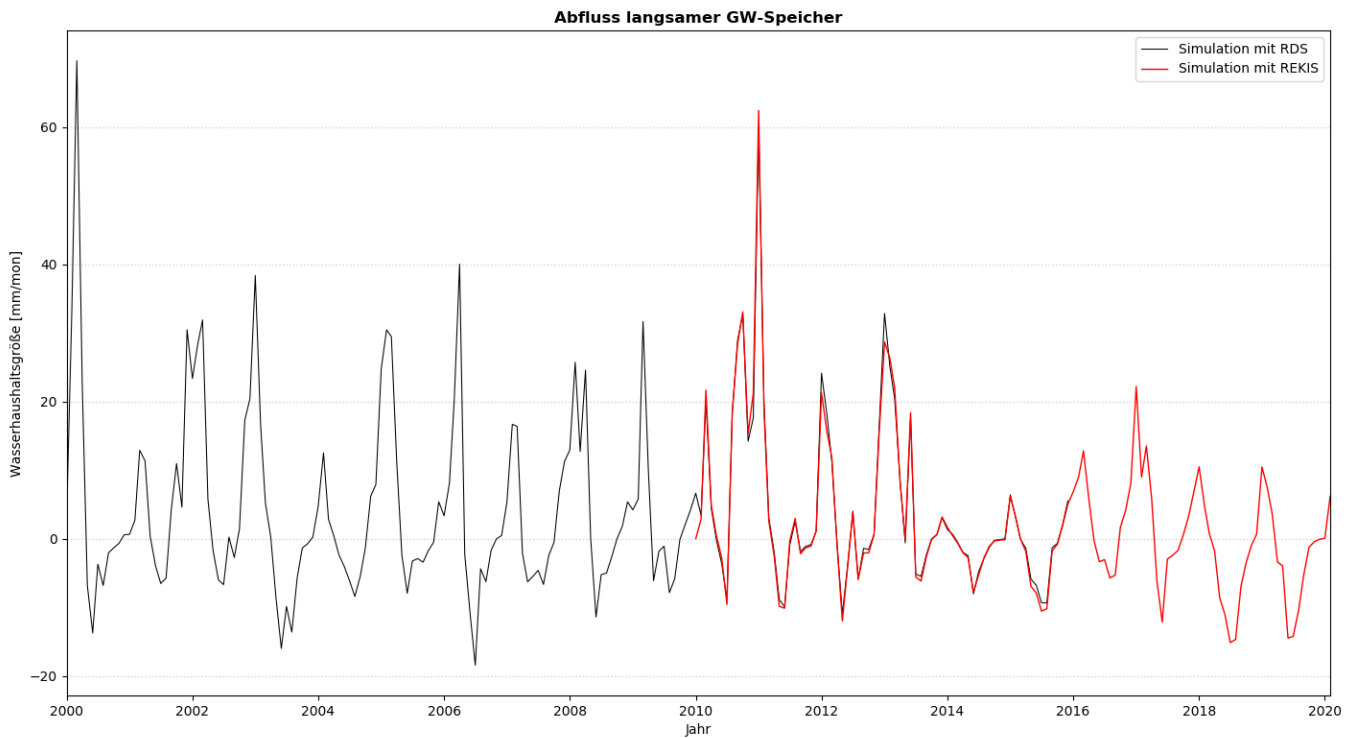


Abbildung 86: Gegenüberstellung des langsamen Grundwasserabflusses von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz (rote Linie) für das Einzugsgebiet Schönau

Positive Werte bedeuten hierbei, dass es zu Grundwasserabfluss kommt. Negative Werte treten auf, wenn durch starke Verdunstung bzw. einen großen Wasserentzug durch die Vegetation die Zehrung aus dem Grundwasser den Zufluss zum Grundwasser übersteigt und sich somit ein negativer Saldo ergibt. Dieser Effekt spielt besonders auf grundwassernahen Flächen eine Rolle und tritt im Allgemeinen in den Sommermonaten auf.

In Abbildung 86 ist zu erkennen, dass bereits ab 2014 die Grundwasserabflüsse aus dem langsamen Grundwasserspeicher zurückgehen, da das Jahr 2014 mit rund 600 mm/a Jahresniederschlag vergleichsweise trocken war.

Ebenso wird ersichtlich, dass der langsame Grundwasserabfluss in den Jahren 2018 und 2019 durch Zehrungsprozesse überwiegend negative Abflüsse aufweist. Als Saldo für das Einzugsgebiet Schönau ergeben sich für 2018 rund -30 mm/a und für 2019 ca. -20 mm/a langsamer Grundwasserabfluss. Diese negative Bilanz führt letztendlich zu einem Absinken der Grundwasserstände, wie es in den vergangenen Jahren bereits in den Grundwassermessreihen beobachtet wurde.

Das Jahr 2017 weist mit rund 35 mm/a langsamem Grundwasserabfluss als Gebietsmittel zumindest noch einen leicht positiven Saldo auf.

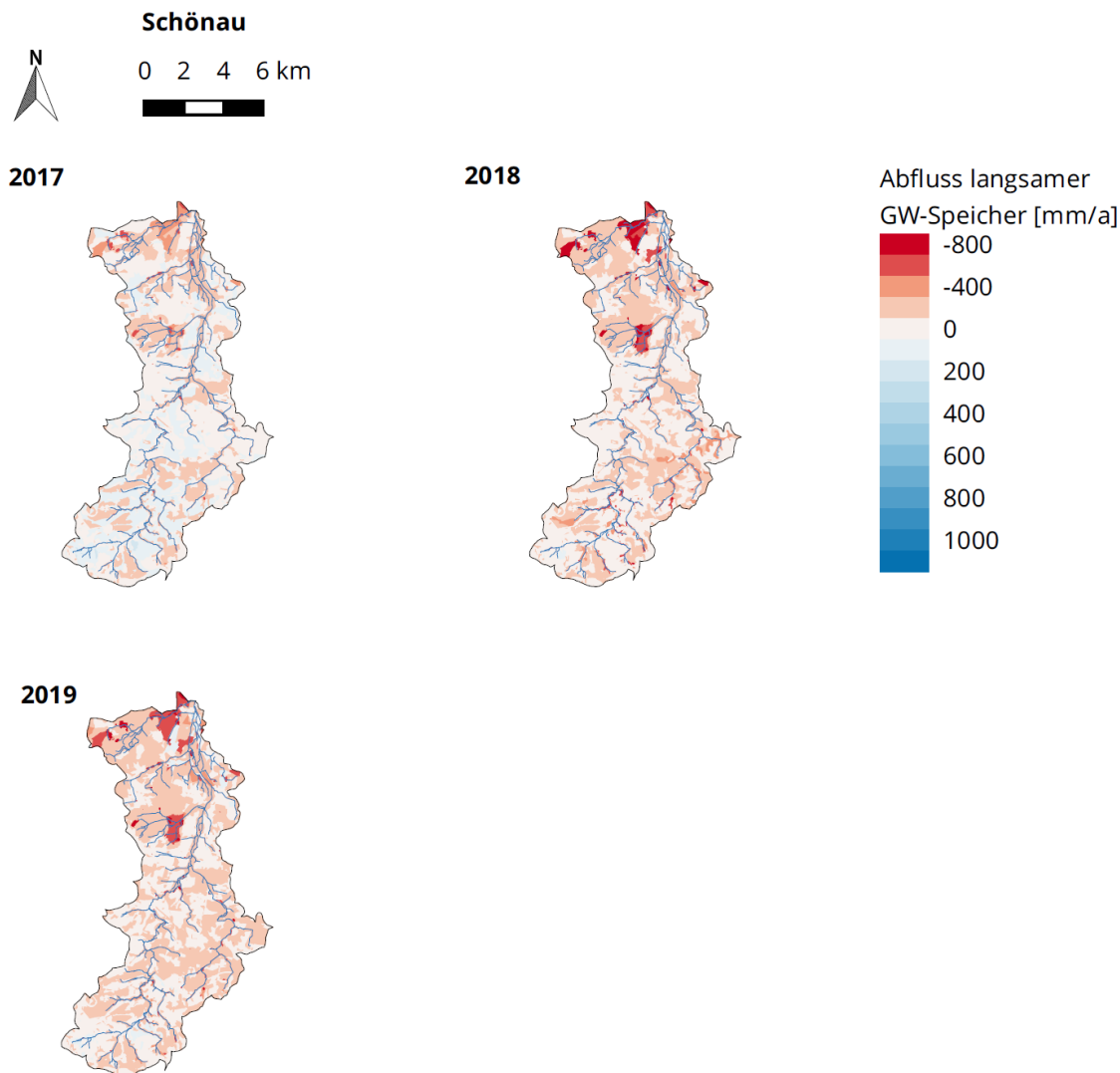


Abbildung 87: Räumliche Verteilung des langsamen Grundwasserabflusses in den Jahren 2017, 2018 und 2019 im Einzugsgebiet Schönau

Die räumliche Verteilung der mit ArcEGMO berechneten langsamen Grundwasserabflüsse der 2017, 2018 und 2019 im Gebiet Schönau, wie in Abbildung 87 dargestellt, lässt für 2018 und 2019 kaum Unterschiede erkennen. Der überwiegende Anteil der Flächen weist negative Grundwasserabflüsse auf (Abbildung 87, rot markierte Flächen).

Tabelle 31: Entwicklung des langsamen Grundwasserabflusses [mm/a] im Zeitraum 1986-2015 (basierend auf den Werten des Referenzdatensatzes) anhand von 10jährigen Mittelwerten in den Einzugsgebieten Schönau, Merzdorf, Jänkendorf 1 und Markersbach 1

10jähriges Mittel [mm/a]	Schönau	Merzdorf	Jänkendorf 1	Markersbach 1
1986-1995	67	26	39	224
1996-2005	57	23	34	315
2006-2015	45	28	53	360

Die 10jährigen Mittelwerte des langsamen Grundwasserabflusses in Tabelle 31 erlauben eine Einordnung der Werte aus den Jahren 2017, 2018 und 2019. Im Gebiet Schönau zeigt sich ein deutlich rückläufiger Trend, während im Gebiet Merzdorf nur geringfügige Schwankungen vorliegen. Die Einzugsgebiete Jänkendorf 1 und Markersbach 1 weisen im Zeitraum 2006-2015 deutlich höhere Werte des langsamen Grundwasserabflusses auf als in den Vorjahren, was maßgeblich durch die hohen Niederschlagsmengen in den Jahren 2009 bis 2013 verursacht wird.

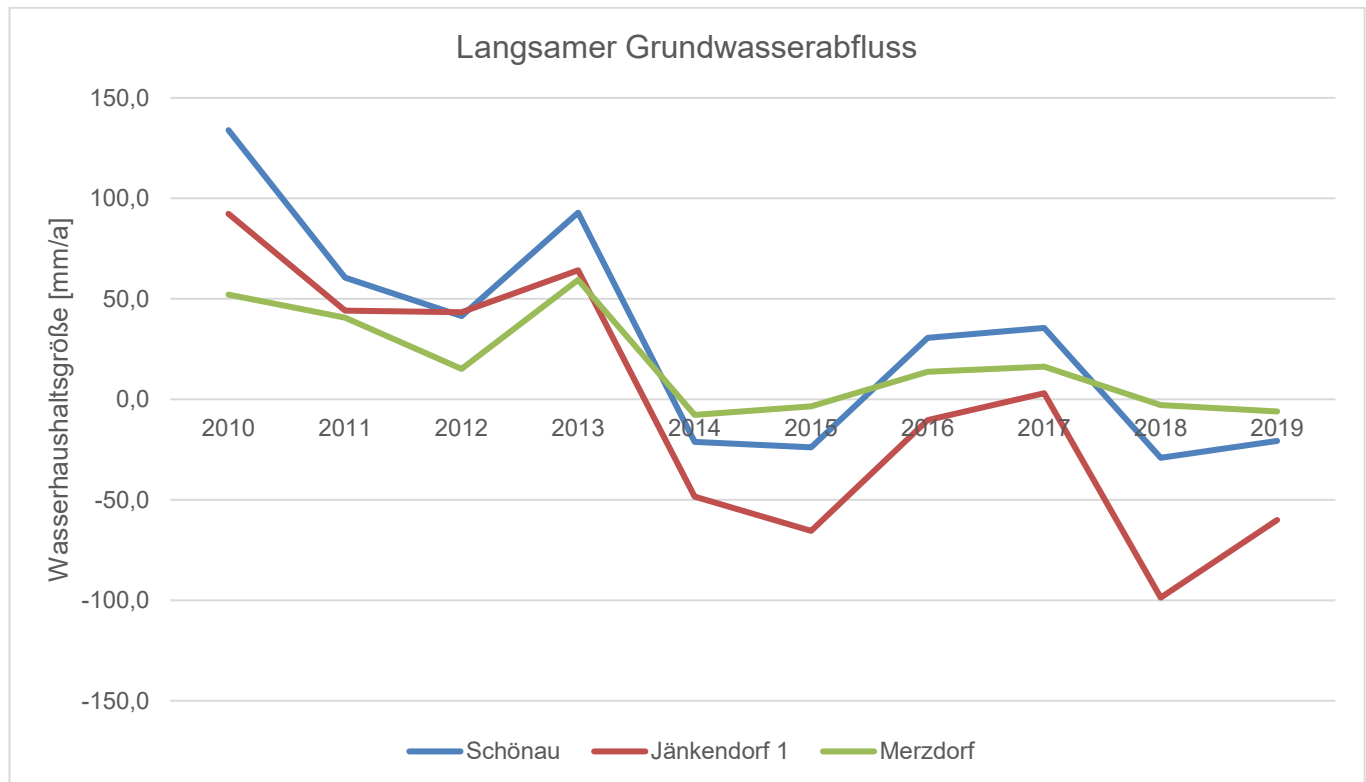


Abbildung 88: Entwicklung des langsamen Grundwasserabflusses [mm/a] im Zeitraum 2010-2019 (basierend auf den Werten des REKIS-Datensatzes) in den Einzugsgebieten Schönau, Jänkendorf 1 und Merzdorf

Eine Gegenüberstellung der zeitlichen Entwicklung des simulierten langsamen Grundwasserabflusses in den Jahren 2010 bis 2019 für die drei Einzugsgebiete Schönau, Jänkendorf 1 und Merzdorf lässt den negativen Trend klar erkennen, wie Abbildung 88 entnommen werden kann. Das Gebiet Jänkendorf 1 weist hierbei den stärksten Rückgang auf und ergab für das Jahr 2018 einen simulierten Grundwasserabfluss von -100 mm/a, was eine erhebliche Reduzierung der Grundwasservorräte bedeutet.

Ergänzend soll auch das Gebiet Markersbach 1 betrachtet werden. Wie bereits bei der potentiellen und realen Verdunstung sind die Auswirkungen der Trockenjahre 2018 und 2019 im Gebiet Markersbach 1 deutlich geringer, was auch auf den langsamen Grundwasserabfluss zutrifft, dessen Verlauf auf monatlicher Basis zwischen 2000 bis 2020 in Abbildung 89 zu sehen ist. Der jährliche Saldo ist trotz der Zehrung in den Sommermonaten 2018 und 2019 positiv.

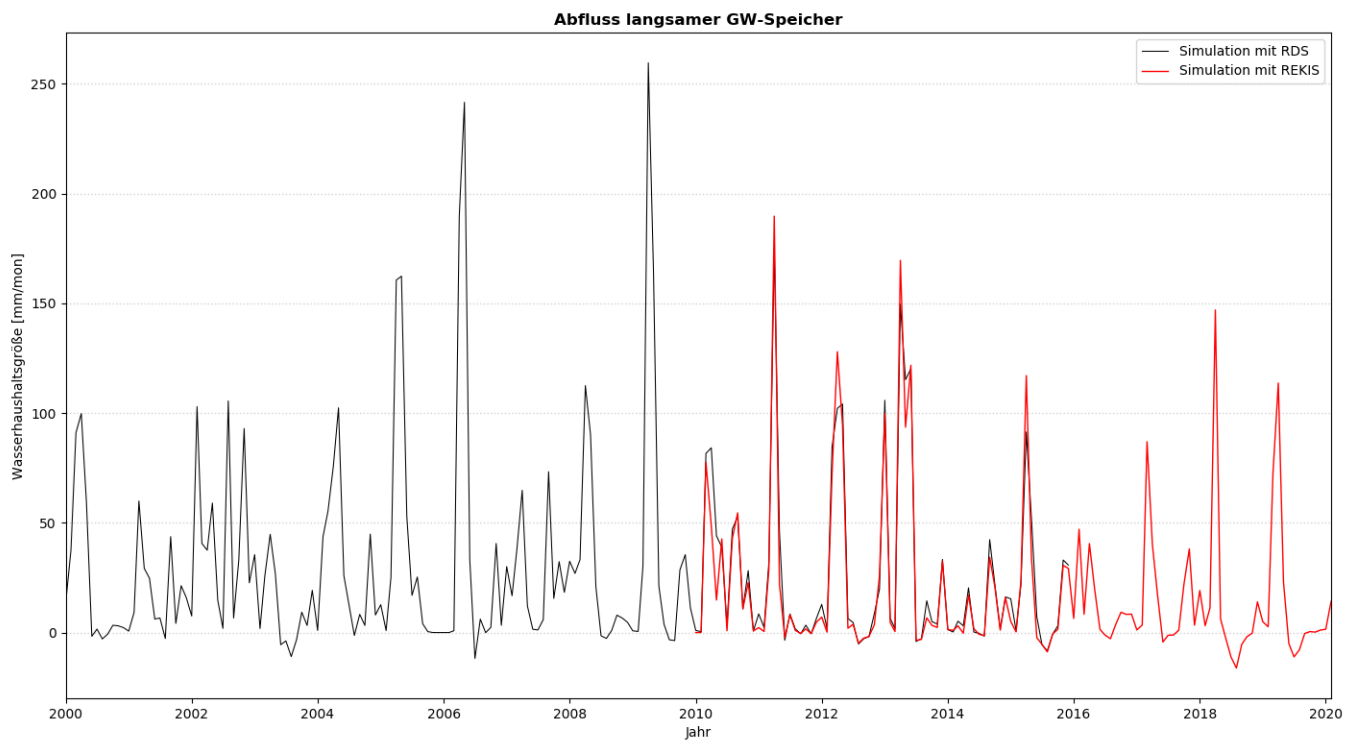


Abbildung 89: Gegenüberstellung des langsamen Grundwasserabflusses von 2000-2020 basierend auf dem Referenzdatensatz (RDS, schwarze Linie) und dem REKIS-Datensatz (rote Linie) für das Einzugsgebiet Markersbach 1

Die Folgen der Trockenjahre 2018 und 2019 auf den Gebietswasserhaushalt der Einzugsgebiete Jänkendorf 1, Markersbach 1, Merzdorf und Schönau konnten hier aufgezeigt werden. Die Auswirkungen des Wassermangels und der gestiegenen Temperaturen sind in allen Gebieten, mit Ausnahme von Markersbach 1, sehr deutlich erkennbar.

5.3 Diskussion von Unsicherheiten und Defiziten

Im Rahmen der Aufbereitung der Datengrundlagen sowie der Umsetzung der Optimierungsstrategie und den Wasserhaushaltsberechnungen gibt es eine Reihe von Aspekten, welche zu Ungenauigkeiten und Unsicherheiten in den Ergebnissen führen. Dies ist unvermeidlich, da einerseits die Datengrundlagen selbst Unschärfen aufweisen und die Komplexität der Natur nicht vollständig erfassen können. Andererseits sind auch die Wasserhaushaltsmodellierungen nur eine vereinfachte Abbildung der natürlichen Prozesse. Um die im Projekt ermittelten Ergebnisse einordnen und bewerten zu können, sind daher nachfolgend Unsicherheiten benannt sowie noch bestehende Defizite aufgeführt. Der nachfolgende Text ist zum größten Teil ein Auszug aus der Veröffentlichung Schwarze et al. (2014). Die Aussagen haben nach wie vor Gültigkeit.

Zunächst ist grundsätzlich darauf hinzuweisen, dass Realisierungen keine Vorhersagen bzw. Prognosen des zukünftigen Klimas sind. „Klimaprojektionen sind [...] zwangsläufig mit Unsicherheiten verbunden (Schmidt et al., 2011)“. Trotz der verbesserten klimatischen Berechnungsmodelle (LfULG, 2012), in denen „die globalen klimatischen Abläufe mit den Gegebenheiten vor Ort, wie z. B. dem Relief, verknüpfen und Rückkopplungsprozesse einbeziehen, stellen Ursachen des Klimawandels wie der CO₂-Ausstoß oder die Landnutzung keine fixen Einflussgrößen dar (Schmidt et al., 2011)“. Des Weiteren sind manche Ursache-Wirkung-Zusammenhänge in der Klimaforschung noch nicht vollständig bekannt. Aus diesem Grund sind die Klimaprojektionen als mögliche Variante der Klimaentwicklung zu sehen. Infolgedessen ist ebenso die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten als mögliche zukünftige Variante unter der Annahme der Klimaprojektionen zu betrachten. Es ist immer eine Spannbreite möglicher Entwicklungen zu betrachten, die sich aus der Verwendung mehrerer Klimaprojektionen ergibt.

- dass die ermittelten Durchflussdaten nicht zur Abschätzung von zukünftigen Eintrittswahrscheinlichkeiten für Hochwasserereignisse geeignet sind, weil das Modell ArcEGMO nicht für diesen Zweck kalibriert wurde.
- dass es während eines Simulationslaufs keine sukzessiven Anpassungen z. B. der Landnutzung an die sich ändernden klimatischen Bedingungen bis zum Jahr 2100 gibt.

Nachfolgend werden die Unsicherheiten nach ihren Herkunftsquellen unterteilt.

Meteorologische Eingangsdaten

„Die Daten des antreibenden meteorologischen Inputs werden punktuell an räumlich verteilten Stationen gemessen (Grundmann, 2010).“ Neben den Beobachtungsdaten des Referenzdatensatzes standen auch acht Klimaprojektionen zur Verfügung. Im Folgenden werden die Unsicherheiten der meteorologischen Datensätze erörtert:

- Die Anzahl der Klima- und Niederschlagsstationen für den Beobachtungs- und Projektionszeitraum sind nicht identisch. Die Stationsdichte im Projektionszeitraum ist geringer. Dies führt dazu, dass Stützstellen für die Interpolation fehlen und zu größeren Unsicherheiten bei der Übertragung in die Fläche führen.
- Lokale bzw. kleinräumige Niederschlagsereignisse sind bei der Interpolation von Stationsdaten nicht darstellbar.
- Die Eingangsdaten des Nebelniederschlags sind (noch) als unsicher zu betrachten. Der verfügbare Datensatz im ReKiS-Portal weist in den Kammlagen des Erzgebirges teils sehr hohe Nebelniederschläge auf, welche in der hydrologischen Modellierung problematisch waren. Die entwickelte Methode zur Korrektur des Nebelniederschlags stellt nur eine Übergangslösung dar. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen.

Weitere Ausführungen zu Unsicherheiten und Fehlern bezüglich des WEREX VI-Modells und der Realisierungen sind Spekat & Enke (2020) zu entnehmen.

Hydrologische Daten

Zu den hydrologischen Daten zählen zum einen die gemessenen Durchflussreihen als Vergleichsdaten sowie die simulierten Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten. Durchflussreihen von Pegeln unterliegen gewissen Unsicherheiten. Sie können durch Überleitungen, Talsperrenbewirtschaftung, etc. beeinflusst sein. Hinweise zu Beeinflussungen finden sich z. B. im sächsischen Pegelverzeichnis (2014).

Diese anthropogenen Einflüsse können i. d. R. in Modellen nicht vollständig berücksichtigt werden, da nötige Informationen oder Datenreihen fehlen. Daher wird in solchen Fällen das natürliche Abflussverhalten im Modell simuliert und nicht der tatsächliche anthropogen beeinflusste Durchfluss.

Die simulierten Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten weisen zu Beginn des Simulationszeitraumes Unsicherheiten, aufgrund ungenauer Kenntnisse des Gebietszustandes zu Beginn der Modellierung, auf. Dieser Gebietszustand, „ausgedrückt als Gebietsfeuchte oder Speicherfüllung, charakterisiert die Abflussbereitschaft eines Einzugsgebietes und ist einer direkten Messung nur sehr eingeschränkt zugänglich (Grundmann, 2010).“ Dies führt u. U. zu Beginn eines Modellierungslaufs zu Abweichungen zwischen den Modellergebnissen im Vergleich zu Referenzdaten bzw. Messwerten. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, wird das erste Simulationsjahr grundsätzlich zweimal berechnet. Dabei dient der Modellzustand am Ende der ersten Berechnung als Startparametrisierung für den zweiten Lauf.

Geodaten

Geodaten liefern die Grundlage zur Charakterisierung von Einzugsgebieten und dienen dem Aufbau und der Parametrisierung von Modellen. Sie enthalten Informationen über Landnutzung, Geländehöhen, Fließwege u. s. w. (siehe Kapitel 2.1). Im Folgenden werden die Datenunsicherheiten der räumlichen Informationen dargelegt:

- Die Hydrotopbildung stellt grundsätzlich eine Generalisierung der Eingangsdaten dar, welche zu einem Informationsverlust führt.
- In Folge unvollständiger Kartengrundlagen wurden Eingangsdaten aus verschiedenen Kartengrundlagen mit unterschiedlichen Maßstäben zusammengestellt. Zudem wurden mitunter Annahmen getroffen, um vollständige Eingangsdaten zu erhalten. Als Beispiele sind die Bodenkarte (Kapitel 2.1.2) und die Karte der räumlichen Verteilung der Grundwasserflurabstände (Kapitel 2.1.9) zu nennen.

Kartengrundlagen, wie die der Geologie und Böden, basieren auf punktuellen Stichproben, die nur einen begrenzten Einblick in die räumliche Heterogenität der hydrogeologischen bzw. hydraulischen Eigenschaft eines Gebietes geben (Grundmann, 2010). Diese punktuellen Geoinformationen werden auf die Fläche übertragen. Bei der Erstellung der Karten erfolgt eine Klassifizierung und Generalisierung der hydrogeologischen bzw. hydraulischen Eigenschaften. „Die Klassifizierung und Generalisierung der punktuellen Messwerte in Kartenwerken nach Bodenarten und Fazies führen zu einer Bandbreite an möglichen Parameterwerten für alle Orte im EZG, für die keine Messungen vorliegen“ (Grundmann, 2010).

- Informationen, wie Drainagetiefe oder Grundwasserflurabstand, wurden nicht aus Messungen oder Stichproben gewonnen, sondern aus anderen Karteninformationen abgeleitet. Hierfür sind folgenden Informationen zu nennen:
 - Die Grundwasserflurabstände sind aus Angaben zu den Bodenhorizonten der BK50 (s. Abschnitt 2.1.2) abgeleitet worden.
 - Lage und Eigenschaften von Drainagen wurden aus einem Kartenwerk zu potentiell drainagebedürftigen Acker- und Grünlandflächen entnommen (s. Abschnitt 2.1.7). Über das tatsächliche Vorhandensein, die genaue Lage und den Zustand der Drainagen sind keine Informationen verfügbar. Abweichungen in den zugrundeliegenden Bodenkarten BKKonz (bei den potentiell drainierten Böden) und BK50 (im Rahmen dieser Studie) stellen weitere Unsicherheiten dar.
- Zur Ableitung der im Abschnitt 2.1.5 und 2.1.6 aufgeführten Datengrundlagen Anschlussgrad und Kanalisationsart wurde mit statistischen Angaben gearbeitet, da es keine frei verfügbaren ortsgenauen Informationen gibt. Die abgeleiteten Datengrundlagen müssen daher nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen.

Da sich die schnelle Abflusskomponente RS aus dem hypodermischen Abfluss sowie dem Oberflächen-, Drainage- und dem Kanalisationsabfluss zusammensetzt, ist sie eine relativ unsichere Ergebnisgröße. Denn für Drainagen und Kanalisation konnten nur allgemeine und pauschale Annahmen getroffen werden. Außerdem handelt es sich bei RS um eine nach Regenereignissen temporär auftretende Größe. Aufgrund dessen sind die Ergebnisse für die schnelle Abflusskomponente RS nur unter Berücksichtigung dieser Aspekte zu verwenden.

Modellsystem ArcEGMO

Modelle wie das Modellsystem ArcEGMO sind eine vereinfachte Abbildung der realen Verhältnisse. Natürliche Prozesse werden im Modell mit Hilfe von Randbedingungen über mathematische Gleichungen beschrieben (Abstraktion). „Bestimmte Randbedingungen werden auch bewusst vereinfacht, wenn die Datenlage es nicht anders zulässt oder auch mit den Vereinfachungen eine hinreichende Genauigkeit gewährleistet ist“ (Zippel, 2006). „Werden hierbei wesentliche Prozesse nicht berücksichtigt oder in ihrem Wirkungsmechanismus nicht adäquat beschrieben, so ergeben sich Einschränkungen in der Eignung und der Flexibilität des Modells bei der Anpassung auf die Daten“ (Grundmann, 2010). Die Vereinfachungen im Modell ArcEGMO werden am Beispiel des Pflanzenwachstums und der Entwicklung des Grundwasserflurabstandes aufgezeigt:

- Zur Simulation des Pflanzenwachstums und damit der Transpiration, die ein Bestandteil der realen Verdunstung darstellt, 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) erfordert viele Eingangsparameter, die zu ermitteln waren (Kapitel 3.3). Fruchtfolgen, wie auf Ackerflächen üblich, können damit simuliert werden. Die verwendeten Fruchtfolgen sind jedoch keine standortgenaue Rekonstruktion der Anbauverhältnisse seit 1961.
- Im Laufe der Zeit ändert sich die Landnutzung, der Boden etc. in Einzugsgebieten infolge klimatischer Änderungen oder aufgrund des Einflusses der Menschen. Beispielhaft soll hier das Waldsterben im Erzgebirgsraum (beginnend in den 1970er Jahren bis in die 1990er Jahre) genannt werden, welches im Rahmen der Modellierung nicht simuliert wird. Im Modell findet keine Anpassung der Vegetation, des Bodens etc. an die geänderten Bedingungen statt. Die in der Realität vorhandene Rückkopplung zwischen klimatischen Gegebenheiten und Einzugsgebietseigenschaften wird nicht abgebildet.
- Es besteht im Wasserhaushaltsmodell keine Kopplung mit einem Grundwasserströmungsmodell, welche eine genauere Abbildung der Prozesse des Grundwasserabflusses sowie der Interaktionen des Grundwasserkörpers mit den Oberflächengewässern und der Interaktion des Grundwasserkörpers mit benachbarten Teilsystemen ermöglichen würde. Deswegen wird keine situationsabhängige Modellierung der Grundwasserflurabstände durchgeführt. Um dennoch ein eventuelles Absinken von Grundwasserständen auf grundwassernahen Flächen durch Zehrungsprozesse möglichst realitätsnah abbilden zu können, erfolgte die Implementierung des KapRed-Ansatzes (s. Abschnitt 3.2) in das Modell ArcEGMO. Hierbei wird der Kapillaraufstieg reduziert, was im Ergebnis einem Absinken der Grundwasserstände gleichkommt.

Kalibrierung

Die verwendete Kalibrierungsstrategie beruht, wie in Kapitel 4.1 erläutert, auf der Anpassung an drei verschiedene Größen: Q , Dauerlinie bezüglich $\log Q$ und $QG1$. Für Letztere erfolgt eine Anpassung an die mit DIFGA ermittelten Werte. Eine solche multikriterielle Optimierung führt grundsätzlich zu stärkeren Abweichungen von den einzelnen Größen als eine Anpassung an nur eine Größe (etwa den Gesamtabfluss). Da der Gesamtabfluss die einzelnen Wasserhaushaltsgrößen jedoch nur summarisch enthält, lässt sich bei einer monokriteriellen Strategie keine Anpassung an die einzelnen Wasserhaushaltskomponenten durchführen. Daher wurde entschieden die etwas größeren Abweichungen des multikriteriellen Ansatzes in Kauf zu nehmen, um die Aufteilung auf die verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten möglichst realistisch und detailliert abzubilden. Die Anpassung an den Gesamtabfluss wurde im Anschluss an die multikriterielle Optimierung überprüft. Aus Zeitgründen wurden dem verwendeten Algorithmus letztendlich nicht alle drei Zielgrößen einzeln präsentiert, sondern die Summe der Zielfunktionen. Durch diese Zusammenfassung konnte die benötigte Optimierungszeit pro Modellregion auf ein annehmbares Maß reduziert werden.

Nähere Informationen zu Unsicherheiten von DIFGA bzw. den damit ermittelten Wasserhaushaltsbilanzen finden sich in Schwarze et al. (2012).

Validierung

Einzugsgebiete ohne Pegelinformationen wurden nicht kalibriert und dementsprechend auch nicht validiert, da die Vergleichsdaten fehlten. Sie sind hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit daher kritisch zu betrachten.

6 Wasserhaushaltsportal Sachsen

6.1 Zielstellung

Im Rahmen der Fortschreibung des Projektes KliWES der TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Lehrstuhl für Hydrologie (TUD), wurden die bisherigen KliWES-Anwendungen im Wasserhaushaltsportal Sachsen durch eine Neuentwicklung ersetzt. Entsprechende technologische Vorarbeiten wurden von der VisDat geodatentechnologie GmbH (VisDat) im Rahmen der Entwicklung der Webumgebung STOFFBILANZ Viewer (Gebel et al., 2020) bzw. GWN Viewer (Gebel et al., 2018) für den Freistaat Sachsen erbracht. Auf bereits vorhandene Bausteine und Konzepte kann in der neu aufzusetzenden Anwendung somit Bezug genommen werden.

Technologisch und inhaltlich orientiert sich die aufzusetzende Anwendung insbesondere an den Funktionalitäten des GWN Viewers. Die Entwicklung der Webanwendung erfolgt zunächst auf einem lokalen Server von VisDat und wird dann sukzessive auf den Webserver des ZIH übertragen. Auf dem Server der TU D wird für VisDat ein temporärer Remote-Zugang eingerichtet.

Die in der neuen KliWES-2.0- Webanwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen hinterlegten Daten werden von der TUD bereitgestellt. VisDat beschreibt und definiert die Standards für die Datenübergabe (Filesystem, Datenstruktur, Datenformat).

Folgende Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens erbracht:

- Datenübergabe von TUD nach VisDat nach definierten Übergabestandards
- Preprocessing der übergebenen Daten, Aufbau einer Datenhaltung
- Entwicklung der Webanwendung auf einem lokalen Server von VisDat (Testumgebung)
- Installieren bzw. kompilieren von Softwarebibliotheken sowie Implementierung der Anwendung auf dem ZIH-Server (Produktivumgebung).

Ursprünglich war vorgesehen die von TUD übergebenen Daten von:

- ArcEGMO Ist-Zustand (Perioden 1961-1987, 1988-2015)
- DIFGA Ist-Zustand (Perioden 1961-1987, 1988-2015)
- ArcEGMO Projektionen (Perioden 1961-1987, 1988-2015, 2021-2050, 2071-2100)

auf ein 100 m Raster zu übertragen, auf dessen Grundlage die Daten auf unterschiedliche Raumebenen aggregiert werden. Von diesem Konzept wurde aufgrund der unerwartet großen Zahl von Hydrotopen (ca. 1,5 Mill.) und des sich damit ergebenden hohen Prozessierungsaufwandes und langer Rechenzeiten abgewichen. Im hier alternativ beschrittenen Weg werden die Hydrotople bzw. deren Informationen unter vektorieller Verschneidung flächengewichtet auf die entsprechenden Raumeinheiten übertragen, so dass eine Unschärfe durch die Rasterung (nach Dominanzprinzip) vermieden wird. Ein weiterer Grund für den Strategiewechsel in der Datenverarbeitung besteht darin, dass die vorgesehene Rasterauflösung zur Abbildung der kleinteiligen Hydrotopstrukturen nur noch bedingt geeignet gewesen wäre.

6.2 Datengrundlagen und -prozessierungen

6.2.1 Datenübergabeformat

Die vom Modell ArcEGMO bzw. DIFGA ausgegebenen Daten der unterschiedlichen Modellläufe wurden von der TUD in ein von VisDat definiertes Übergabeformat gebracht und zum Download für VisDat bereitgestellt.

6.2.2 Übergebene Dateninhalte aus der ArcEGMO-Modellierung

Folgende Parameter aus der ArcEGMO-Modellierung, wurden als Grundlage für die Prozessierung und Integration auf Basis von ca. 1,4 Mio. Hydrotopen für den Projektraum in einer monatlichen Auflösung für die unten genannten Modellläufe übergeben:

- Korrigierter Niederschlag P [mm]
- Nebelniederschlag FP [mm]
- Bodenfeuchte BF [mm]
- Lufttemperatur LT [°C]
- Relative Luftfeuchte rF [%]
- Potentielle Verdunstung ETp [mm]
- Klimatische Wasserbilanz KWB [mm]
- Reale Verdunstung ETa [mm]
- Landoberflächenabfluss inkl. Dränabfluss RO [mm]
- Abfluss über Trenn- und Mischkanalisation KR [mm]
- Hypodermischer Abfluss RH [mm]
- Sickerwasser (RG1+RG2) [mm]
- Schneller Grundwasserabfluss RG1 [mm]
- Langsamer Grundwasserabfluss RG2 [mm]
- Gesamtabfluss R [mm]

Für jedes Hydrotop liegt die Information vor, ob er einem Lockergesteins- oder Festgesteinsgrundwasserleiter zugeordnet ist. Für eine Zuordnung im Lockergesteinsbereich wird die

- Grundwasserneubildung GWN [mm]

aus der Summe von RG1 und RG2 gebildet. Für den Festgesteinsbereich berechnet sich die GWN allein aus der Komponente RG2. Die Zuordnung erfolgt über die jeweilige Lithofazies-ID (Tabelle 32).

Tabelle 32: Zuordnung der Hydrotupe zu Fest- bzw. Lockergesteinsbereich anhand der Lithofazies-einheit

Lithofazies-ID für ArcEGMO	Lithofazieseinheit bei DIFGA	Zuordnung Festgestein	Zuordnung Lockergestein
1	Löß	X	
2	Lockergestein unklassifiziert		X
3	Sandstein (GWG)	X	
4	Sandstein (GWL)	X	
5	Rotliegendes, Konglomerat, Molasse	X	
6	Wechselagerungen	X	
7	Magmatisches Tiefengestein	X	
8	Metamorphite Gneis	X	
9	unklassifiziert Festgestein	X	
10	Metamorphite Fels	X	
11	Pyroklastika	X	
12	Grauwacke	X	
13	Magmatisches Ergussgestein	X	
15	Metamorphite Schiefer	X	
16	Kalkstein	X	
17	Zechstein	X	
18	Tonstein	X	
21	Lockergestein Kies		X
22	Lockergestein sandig, kiesig		X
23	Lockergestein sandig, schluffig		X
24	Lockergestein schluffig, tonig		X
88	anthropogen		X
99	Standgewässer	X	
100	Auen		X
101	Moor	X	

Die Parameterdatensätze wurden für folgende Modellläufe (Szenarien) für die Weiterverarbeitung und Integration in das Wasserhaushaltsportal in monatlicher Auflösung von der TUD übergeben:

- Ist-Zustand, 1961-2015,
- A1B_1, 1961-2100,
- A1B_2, 1961-2100,
- RCP4.5_1, 1961-2100,
- RCP4.5_2, 1961-2100,
- RCP2.6_1, 1961-2100,
- RCP2.6_2, 1961-2100,
- RCP8.5_1, 1961-2100,
- RCP8.5_2, 1961-2100.

Die Modellläufe basieren hinsichtlich ihrer meteorologischen Eingangsdaten auf unterschiedlichen Klimaprojektionen (außer Ist-Zustand) und sind nach diesen benannt. Weitere Informationen hierzu sind in Spekat & Enke (2020) enthalten.

6.2.3 Übergebene Dateninhalte aus der DIFGA-Modellierung

Folgende Datensätze aus der DIFGA-Modellierung wurden als Grundlage für die Prozessierung und Integration auf Basis der DIFGA-Gebiete (H1, H2, H3, H4) in einer monatlichen Auflösung für die Modellierung

- DIFGA Ist-Zustand, 1961-2014, monatlich,

übergeben:

- Niederschlag P
- Zufluss zum Direktabflussspeicher RD
- Zufluss zum schnellen Grundwasserabflussspeicher RG1
- Zufluss zum langsamen Grundwasserabflussspeicher RG2
- Verdunstung als Bilanzrest ETR
- Schneller Grundwasserabfluss QG1
- Langsamer Grundwasserabfluss QG2
- Direktabfluss QD
- Gesamtabfluss Q
- Rückgangskonstante der schnellen Abflusskomponente CG1
- Rückgangskonstante der langsamen Abflusskomponente CG2
- Speicherbegrenzung des Zuflusses zum Speicher der schnellen Abflusskomponente SG1Grenz

Für jedes DIFGA-Gebiet liegt die Information vor, ob es einem Lockergesteins- oder Festgesteinsgrundwasserleiter zugeordnet ist. Für eine Zuordnung im Lockergesteinsbereich (nach Dominanzprinzip) wird die

■ Grundwasserneubildung GWN

aus der Summe von RG1 und RG2 gebildet. Für den Festgesteinsbereich berechnet sich die GWN allein aus der Komponente RG2. Die Zuordnung erfolgt über die jeweilige Lithofazieseinheit (siehe Tabelle 1).

Die Daten aus der DIFGA-Modellierung wurden für die vier Hierarchie-Ebenen H1 bis H4 in die KliWES-Webanwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen integriert. Eine Auswertung, Analyse und ein Export dieser Daten ist auch nur auf der jeweiligen DIFGA-Ebene möglich. Eine Aggregation auf andere Geometrie-Ebenen wurde bewusst nicht vorgenommen, da dies teilweise nur unter Inkaufnahme großer Unschärfen möglich wäre und fachlich kritisch zu hinterfragen ist. Alle Daten aus der ArcEGMO-Modellierung können hingegen auf die DIFGA-Gebiete bezogen werden, so dass ein direkter Vergleich von DIFGA-Ergebnissen mit den Ergebnissen von ArcEGMO möglich ist.

6.2.4 Prozessierung der ArcEGMO-Hydrotopdaten und DIFGA-Daten

Die aus der Modellierung mit ArcEGMO übergebenen Daten auf Hydrotopeebene wurden flächengewichtet auf die Raumebenen der KliWES-Webanwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen aggregiert. Als höchst mögliche Auflösung wird dabei die Raumebene der

■ Teileinzugsgebiete

bereitgestellt, welche in der aktuellen Struktur (Stand: Oktober 2020) vom LfULG zur Verfügung gestellt wurde. Als weitere, für den Nutzer verfügbare Ebenen für die Visualisierung, Analyse und den Datenexport werden die nachfolgend genannten räumlichen Einheiten vorgehalten:

- OWK,
- GWK,
- DIFGA-Gebiete H1,
- DIFGA-Gebiete H2,
- DIFGA-Gebiet H3,
- DIFGA-Gebiete H4,
- Flussgebietseinheit,
- Koordinierungsraum,
- Planungseinheit,
- RAG,
- Landesdirektion,
- Kreis,
- Gemeinde.

Menge und Umfang der raum-zeitlichen Daten erfordern ein hohes Maß an Automatisierungsroutinen, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten und Fehler beim Handling zu vermeiden.

In einer Preprocessing-Routine wurden die von der TUD übergebenen originalen Daten aus den Modellläufen von ArcEGMO für das Wasserhaushaltsportal aufbereitet, indem die ca. 1,5 Mill. Hydrotope als kleinste gemeinsame Geometrie mit allen übergeordneten Raumebenen (z.B. OWK, Kreis) verschnitten wurden. Aus den vorliegenden Verschnitten wurden dann die Ergebnisse flächengewichtet auf die jeweiligen Raumeinheiten übertragen. Folglich sind Auswertungen der ArcEGMO-Ergebnisse auf allen vorgehaltenen Geometrie-Ebenen möglich:

Die in der Preprocessing-Routine transformierten Vektordaten wurden für jeden Monat in einem komprimierten HDF5-Format abgelegt. Die HDF5-files wurden mit NumPy bearbeitet. NumPy ist eine Programm-bibliothek für die Programmiersprache Python, die eine einfache Handhabung von Vektoren, Matrizen oder generell großen mehrdimensionalen Arrays ermöglicht. Neben den Datenstrukturen bietet NumPy auch effizient implementierte Funktionen für numerische Berechnungen an.

Für die ebenfalls übergebenen Daten aus der DIFGA-Modellierung wurde beim Preprocessing auf die Erzeugung der Verschnitte verzichtet, da diese Daten nur auf der vorgegebenen DIFGA-Gebietsebene visualisiert, analysiert und exportiert werden sollen.

Im Rahmen einer Postprocessing-Routine wurde dann das Aggregieren von Einzelmonatsrechnungen auf eine mehrjährige Periode automatisiert vorgenommen. Technologischer Hintergrund für diese Art der Datenverarbeitung und -bereitstellung ist die Speicherung der spatio-temporalen Daten als sogenannte ndarrays. Dies sind n-dimensionale Arrays, hier mit 2 Raumdimensionen (x, y) und einer Zeitdimension (t). Die ndarrays wurden dann entsprechend der Raum- und Zeitauswahl mittels der Python3-NumPy-Bibliothek statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse (2d-Arrays als Karten oder statistische Tabellen) werden an das Wasserhaushaltssportal ausgeliefert.

In der praktischen Durchführung wird die Prozessierung durch vorhandene topologische Inkonsistenzen zwischen dem Layer der mit ArcEGMO modellierten Hydrotope und den übrigen Einzugsgebietsgeometrien erheblich erschwert. So ergeben sich beim Matching der Hydrotope z.B. mit den Teileinzugsgebieten minimale, aber vorhandene Überlappungs- oder Lückenbereiche. Dies hat dann unerwünschte Auswirkungen insbesondere an den Außenrändern des Projektraums. Hier werden z.B. Teileinzugsgebiete, die faktisch nicht zum modellierten Projektraum gehören, aufgrund einer trotzdem gegebenen Überschneidung mit Hydrotopen mit Modellwerten versehen. Besonders schwerwiegende Fehlzuordnungen ergeben sich im Grenzbe-reich zu den Nachbarländern, da hier teilweise sehr große Teileinzugsgebiete liegen, die von den modellierten Hydrotopen nur minimal abgedeckt sind.

Um diese Inkonsistenzen zu umgehen, wurde beim Verschneiden der Hydrotopgeometrie ein 2%-Kriterium eingesetzt. Im Ergebnis bedeutet dies z.B., dass ein brandenburgisches Teileinzugsgebiet beim Durchlauf der sich anschließenden Prozessierungsroutinen nur dann mit Werten aus der Modellierung gefüllt wird, wenn mehr als 2% seiner Gesamtfläche eine Überschneidung mit modellierten Hydrotopen aufweist. Die Visualisierung der Modellergebnisse beschränkt sich unter dieser statisch gesetzten Rahmenbedingung weitgehend auf den Projektraum. Gleichzeitig werden Datenverluste und Informationslücken im Projektraum gering gehalten. Eine Veränderung oder Optimierung dieses Abschneidekriteriums ist bei zukünftigen Datenuploads (z.B. im Rahmen der Einbindung der Modelle für das Leipziger Großraummodell sowie das sächsische Neißengebiet) möglich, muss aber vor dem Start der Prozessierung erfolgen.

6.3 Softwareentwicklung

6.3.1 Konzeptionelle Vorüberlegungen

Ein erster Schritt innerhalb der Softwareentwicklung bestand darin unter den Projektbeteiligten Anforderungen zu erfassen, die das System später erfüllen muss. Die Abläufe, ausgehend von der Datenübergabe, Prozessierung, Speicherung und Visualisierung bis hin zur Auswertung von Daten und deren Export, mussten konzeptionell geplant und strukturiert werden. Durch das Vorhandensein eines durch die Neuentwicklung abzulösenden Webportals, sind Inhalte und Rahmenbedingungen, die minimal zu berücksichtigen sind, bereits definiert. Die Neuentwicklung geht allerdings sowohl inhaltlich als auch technologisch über das bestehende Portal hinaus. Zudem liegen mit dem von VisDat betriebenen GWN-Viewer bzw. dem STOFFBILANZ-Viewer bereits Webanwendungen vor, die technologisch auf dem neuesten Stand der Technik angesiedelt sind und hier als Vorbild fungieren. Inhaltlich orientiert sich die zu entwickelnde Anwendung insbesondere am GWN-Viewer und enthält folgende Funktionalitäten:

- Kartenmodul mit Auswahl eines Parameters je Periode für ein Referenzmodell und ein Vergleichsmodell, Differenzenkarte, Histogramm mit statistischen Kennwerten, Einbindung administrativer und topographischer Layer, Raumauswahl über alle administrativen Layer, Einbau eines Raumfilters, Freitextsuche,
- Diagrammmodul zum Vergleich von unterschiedlichen Modellläufen für einen ausgewählten Parameter und Raum,
- Exportmodul zur Durchführung eines Datenexports für einen oder mehrere definierte Parameter eines Modelllaufes und eine Raumebene für eine gewählte Periode (langjährige Mittelwerte) oder eine Zeitreihe (monatliche oder jährliche Auflösung).

Im Rahmen der Umsetzung müssen große Geodatenbestände mit komplexen Algorithmen automatisiert in einer Serverumgebung verarbeitet werden. Über eine Webanwendung müssen die Projektdaten schließlich ansprechend für die Nutzer bereitgestellt werden. Der Zugang soll ohne Login möglich sein. Eine Projekt- und Nutzerverwaltung wird nicht benötigt, da Sessions nicht gespeichert werden müssen.

Die Realisierung des IT-Systems hält aus Sicht der Softwareentwicklung mehrere grundlegende Bestandteile bereit, die sich in den nachfolgenden Unterkapiteln wiederfinden.

6.3.2 Bereitstellung von Test- und Produktivumgebung

Um ein Client-Server-System zu erstellen, auf das die Projektbeteiligten und nach Projektabschluss die Endnutzer Zugriff haben, wurde von der TUD die entsprechende Serverhardware im Rechenzentrum des ZIH bereitgestellt.

Für das Aufsetzen der Anwendung wurde eine zweistufige Vorgehensweise gewählt. Zunächst wurde ein lauffähiges System auf einer lokalen Entwicklungsplattform erstellt und getestet, welches dann im weiteren Verlauf des Projektes auf den Webserver des ZIH übertragen wurde.

Für die Testumgebung wurde auf einen lokalen bereits konfigurierten Server von VisDat zurückgegriffen. Das Produktivsystem wurde dann auf einem Server des ZIH aufgesetzt. Die für das System notwendigen Softwarebibliotheken (bspw. Apache, PostgreSQL/POSTGIS, Mapserver, Mapproxy, GDAL, Python, Docker) wurden installiert bzw. kompiliert.

Die Test- und Produktivumgebung wurde serverseitig unter Linux Betriebssystemen mit der Container-Technologie Docker entwickelt. Dadurch lassen sich beteiligte Serverprogramme inklusive ihrer verwendeten Bibliotheken organisiert in virtuellen Containern kapseln, was zu einer Entkoppelung vom verwendeten Betriebssystem führt. Das System kann dadurch mit vergleichsweise geringem Aufwand auf andere Serverstrukturen, bspw. wenn Skalierungen notwendig werden, übertragen werden.

6.3.3 Datenhaltung

Im Projekt wurde eine zweigleisige Datenhaltung verfolgt. Um eine Minimierung der Datenmenge und performante Schreib- und Lesezugriffe zu erhalten, erfolgte die Speicherung der Modelldaten im Filesystem. Dabei wird als Format für Speicherung und Prozessierung sowie als Grundlage für die Visualisierung in Webanwendungen NetCDF verwendet. NetCDF nutzt das HDF5-Format und zeichnet sich durch sehr effiziente Möglichkeiten der Datenkompression, bei gleichzeitig indiziertem und selektivem Zugriff auf mehrdimensionale Daten aus.

Das HDF5-Format ist ein global genutzter Standard für die effiziente Speicherung und Verarbeitung von geowissenschaftlichen Massendaten. Dieses Format bildet die Grundlage für die Visualisierungen über den Mapserver sowie die vorgeschaltete Prozessierung von Daten im Wasserhaushaltsportal. Als universelle Datenstruktur ermöglicht das HDF5-Format die Abbildung von mehrdimensionalen Daten bzw. Bildern sowie die effiziente Ausführung von Algorithmen in Python/NumPy. Die Ablage der Dateien erfolgt in einem Filesystem und zugehörigen Verweisen in der Datenbank. Die Nutzung der sehr effizienten binären HDF5/netCDF Formate in Kombination mit der Virtual Raster Technology (VRT) von GDAL ermöglicht es somit sehr große Datenmengen vorzuhalten und dynamisch mit kurzen Reaktionszeiten über den Mapserver auszuwerten. Weiterhin ist damit auch bereits die Grundlage geschaffen, um perspektivisch neue Funktionen und Erweiterungen integrieren zu können.

Projekt- und Nutzerdaten, Sachdaten, Konfigurationsdaten, etc. werden hingegen in einer PostgreSQL Datenbank gehalten. Hier übertreffen die Vorteile relationaler Datenbanken eine Speicherung im Filesystem.

6.3.4 Erstellung der Webanwendung

Technologische Umgebung

Die clientseitige Entwicklung der Webanwendung erfolgte mit modernen JavaScript-Frameworks, wie Bootstrap, jQuery, OpenLayers, u.a. Serverseitig wurden Softwarepakete wie Mapserver, Mapproxy und GDAL eingesetzt. Serverseitige Programmiersprachen sind PHP und Python.

Datenstruktur und -inhalte

Die neue WebGIS-Anwendung unter dem Dach des „Wasserhaushaltsportal Sachsen“ wurde als Expertensystem konzipiert und entwickelt. Der Nutzer ist hier der Endkunde, bspw. ein Ingenieurbüro mit entsprechendem Fachwissen. Der Nutzer kann Raum- (Karten) und erläuternde Sachdaten in Diagrammform zu seinem Projektgebiet einsehen. Die Daten des Projekts können vom Nutzer exportiert werden. Dabei legt der Nutzer Formate (Modelllauf (Szenario), Raum, Zeit) und ggf. Projektionen fest.

In der Anwendung sind die Daten hierarchisch strukturiert. Die oberste Ebene bildet das „Modell“. Ein Modell setzt sich aus dem Modellverfahren (ArcEGMO oder DIFGA), dem verwendeten Szenario (IST-Zustand, A1B_1, RCP4.5_1, ...) und einer Zeitspanne (bspw. 1961-1987) zusammen. Nähere Informationen zu den Klimaprojektionen finden sich bei Spekat & Enke (2020). Für jedes Modell existieren zahlreiche Parameter. Parameter können bspw. der Niederschlag oder der Grundwasserabfluss sein. Die einzelnen Modelle können jeweils unterschiedliche Parameter enthalten.

Die Parameter der ArcEGMO-Modellierungen können auf den im System hinterlegten Raumeinheiten dargestellt werden. Eine Raumeinheit ist eine Auswerteebene und kann bspw. die Ebene der Kreise oder Gemeinden, aber auch eine naturräumlich oder wasserwirtschaftlich definierte Ebene wie die Ebene der Oberflächenwasserkörper (OWK) sein. Die Übertragung der Daten aus den ArcEGMO-Modellen erfolgt von der originären Raumebene der ArcEGMO-Hydrotope flächengewichtet auf andere Raumebenen (bspw. Kreise, Teileinzugsgebiete). Die ArcEGMO-Hydrotope selbst werden nicht dargestellt, sondern dienen nur als Datenquelle für alle übergeordneten Raumebenen. Die Ergebnisse aus den DIFGA-Analysen können nur auf der Ebene der DIFGA-Gebiete visualisiert werden. Eine Übertragung der Daten auf andere Raumebenen ist nicht möglich.

6.3.5 Startseite

Zunächst wurde eine Startseite (Home) eingerichtet, wobei auf ein Login- bzw. Logout-Menü verzichtet wurde, so dass der Nutzer direkt in die Anwendung gelangt bzw. sich beim Verlassen nicht abmelden muss. Nach dem Aufruf gelangt der Nutzer über die Icons in der Bildmitte (Abbildung 90) in die derzeit vorhandenen Module

- Karten,
- Diagramme und
- Datenexport.

Die Startseite enthält zudem kurze Informationen zum Hintergrund, den Inhalten und Nutzungsmöglichkeiten des Portals.

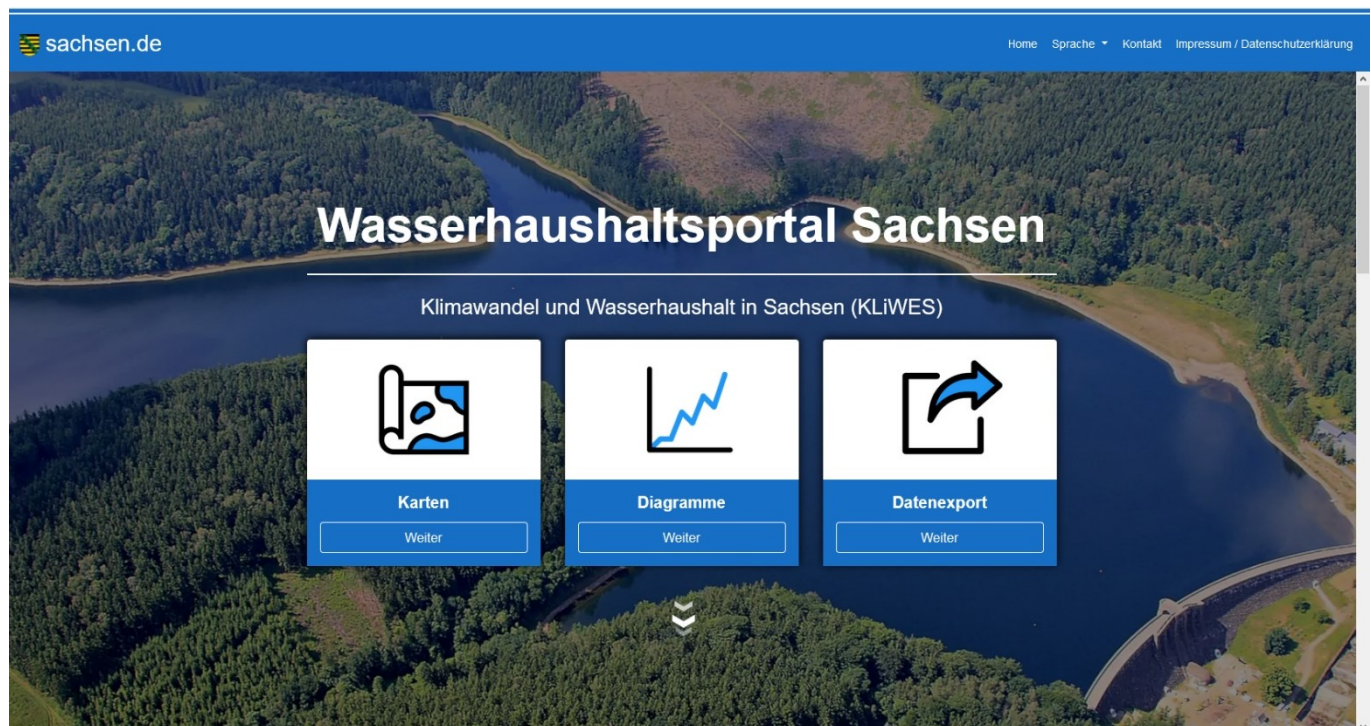


Abbildung 90: Ansicht der Startseite (Home) der neuen KLiWES-Webanwendung

6.3.6 Modul Karten

Beim Betätigen des Icons "Karten" öffnet sich das Kartenmodul.

Die Select-Menüleiste oberhalb des Kartenfensters beinhaltet die Auswahlfelder:

- Raumauswahl
- Modell
- Vergleichsmodell
- Differenzenkarte und
- Raumfilter.

Über die Raumauswahl kann eine Raumkategorie (Teileinzugsgebiet, OWK, Kreis, Gemeinde, ...) ausgewählt werden, auf deren Ebene die Darstellung der Parameter (Niederschlag, Gesamtabfluss, ...) erfolgt.

Im Auswahlfeld „Modell“ erfolgt die Auswahl von Modellverfahren (ArcEGMO, DIFGA), verwendetem Szenario (Ist-Zustand, A1B_1, RCP4.5_1, ...) und einer Zeitspanne (bspw. 1988-2015). Diese Modellauswahl definiert, welche Parameter im Layerbaum auf der linken Seite der Anwendung selektierbar sind.

In der Anwendung können Parameter über die Bildung von Differenzenkarten miteinander verglichen werden. Dabei können nur gleiche Parameter in Differenz zueinander gesetzt werden (Niederschlag Modell A mit Niederschlag Modell B). Von unterschiedlichen Parametern kann im System keine Differenzenkarte gebildet werden (z. B. Niederschlag mit Grundwasserneubildung).

Die Auswahl eines Vergleichsmodells wirkt sich nur aus, wenn die Auswahl „Differenzenkarte“ auf „an“ steht. Dabei wird vom gewählten Parameterdatensatz des Modells der entsprechende Parameterdatensatz des Vergleichsmodells abgezogen.

Über den „Raumfilter“ lässt sich die Visualisierung und Auswertung der Daten auf einen bestimmten Raum einschränken.

Beim Modulaufruf erscheint zunächst nur die Select-Menüleiste zur Vornahme der Raumauswahl sowie der Auswahl des Modells. Durch Anklicken des Buttons rechts neben der Menüleiste zur Auswahl für das Modell öffnen sich die weiteren oben genannten Select-Menüleisten für die erweiterte Anwendung.

Auf der linken Seite der Anwendung befindet sich der Layerbaum. Dieser gruppiert die Layer in die Ordner „Raumeinheiten“, „Topographie“ sowie „Wasserhaushalt“. Im Ordner Raumeinheiten sind alle im System hinterlegten Raumeinheiten vorhanden. Wie oben bereits erläutert sind die originalen hoch aufgelösten ArcEGMO-Hydrotope (also der modellierte Raum) nicht im Wasserhaushaltsportal sichtbar. Über den Layer "Modellgebiet ArcEGMO" erhält der Nutzer aber eine Information zur räumlichen Ausdehnung des modellierten Projektraums. Somit kann der Nutzer einschätzen, ob ein z.B. an der Außengrenze Sachsen gelegenes mit Werten belegtes Polygon überwiegend im Projektraum verortet ist oder nur mit einem geringen Flächenanteil in den Projektraum hineinragt.

Im Ordner "Topographie" können Informationen wie Schummerung, Luftbilder und Hintergrundkarte ausgewählt werden.

Im Ordner „Wasserhaushalt“ sind alle Parameterlayer hinterlegt, die im ausgewählten Modell verfügbar sind. Es kann immer nur ein Parameter angeklickt werden. Eine Parameterbeschreibung ist über den Infobutton rechts neben dem Parameter im Layerbaum abrufbar.

In der rechten unteren Ecke der Anwendung befindet sich eine Liste mit flächenungewichteten statistischen Werten (Mittelwert, Median, ...) zum angezeigten Kartenbild. Darüber befindet sich ein Histogramm, welches die Verteilung des Vorkommens der Legendenklassen wiedergibt. Es gilt zu beachten, dass hier keine räumliche Verteilung wiedergegeben wird, sondern eine Gruppierung der im Layer vorhandenen Einzelwerte (keine Flächenwichtung).

In der Karte werden Wasserhaushaltsdaten und weitere Hintergrundinformationen in Sachsen visualisiert. Über eine räumliche Suche lassen sich Objekte von Raumeinheiten auffinden. Per Mausklick in die Karte erhält man Informationen zum ausgewählten Parameter sowie den Begleitparametern. Zudem wird der zeitliche Verlauf der Werte des gewählten Wasserhaushaltsparameters angezeigt.

Oberhalb der Karte befindet sich die Funktionsleiste mit „Freitextsuche“, „Hoverauswahl“, „Vergrößern“, „Verkleinern“, „Volle Ausdehnung“ und „Vollbild“.

Einen Überblick über die Anordnung und Funktionen des Kartenmoduls gibt Abbildung 91.

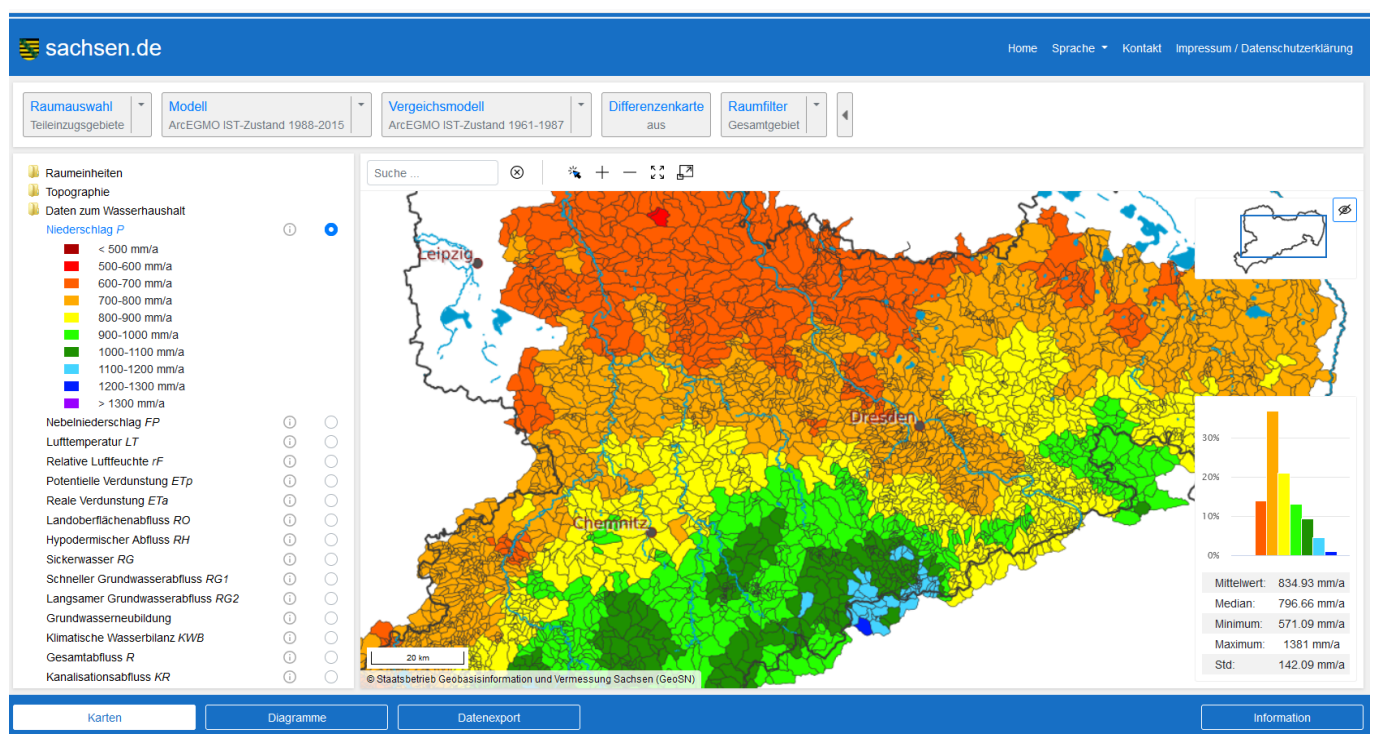


Abbildung 91: Ansicht des Ansicht des Moduls "Karten"

6.3.7 Modul Diagramme

Hier erhält der Nutzer einen Einblick in die zu erwartende zukünftige Entwicklung der einzelnen Parameter des Wasserhaushalts in Sachsen (Abbildung 92).



Abbildung 92: Ansicht des Moduls "Diagramme"

Im Diagramm erfolgt der Vergleich auf Basis verschiedener Szenarien. Die Szenarien (IST-Zustand, verschiedene Klimaszenarien) können an der Unterseite des Diagramms einzeln ausgeschaltet oder hinzu gewählt werden. Der Nutzer kann die Auswertung auf bestimmte Gebiete über eine Raumauswahl einschränken. Wahlweise können die Originaldaten oder gleitende Mittelwerte ausgegeben werden.

6.3.8 Modul Datenexport

Der Nutzer hat im Modul "Datenexport" die Möglichkeit, den hinterlegten Datenbestand zum Wasserhaushalt herunterzuladen. Die Oberfläche ist interaktiv gestaltet, so dass die Auswahl an einer Stelle, Auswirkungen auf die Auswahlmöglichkeiten an anderer Stelle haben kann. Beispielsweise existieren für das Modellverfahren ArcEGMO andere Parameter und Szenarien als für die DIFGA-Analysen. Die Selektion von Modellverfahren, Szenario und Parameter ist selbsterklärend. Die weiteren Auswahlmöglichkeiten werden im Folgenden erläutert.

Durch die Auswahl einer Raumebene im Abschnitt Raumauswahl werden die zu exportierenden Daten für die gewählte Raumebene exportiert. Der Raumfilter ermöglicht es, die Daten für einzelne Raumeinheiten innerhalb der ausgewählten Raumebene einzuschränken. So kann beispielsweise bei der Raumauswahl "Kreise" über den Raumfilter der Erzgebirgskreis selektiert werden. Wird der Raumfilter nicht genutzt (Raumfilter steht auf "aus"), so werden alle Kreise einbezogen.

Einen Sonderfall stellt die Ebene der Teilezugsgebiete als kleinste Raumebene dar. Hier kann die Filterung nicht nur über Teilezugsgebiete, sondern auch über alle anderen verfügbaren Raumebenen und die entsprechenden Raumeinheiten erfolgen.

Beispiel: Die Raumauswahl steht auf Teileinzugsgebiete. Im Raumfilter wird erst die Raumebene Gemeinden selektiert und im zweiten Schritt die Raumeinheit Niederwiesa. Als Exportergebnis erhält man Daten zu allen Teileinzugsgebieten in der Gemeinde Niederwiesa.

Die Daten können in zwei räumlichen Projektionen exportiert werden:

- 31468 - DHDN / 3-degree Gauss-Krüger Zone 4
- 25833 - ETRS89 / UTM Zone 33N

Die Auswahl des Datentyps kann zwischen langjährigen Mittelwerten oder Zeitreihen erfolgen. Damit einher geht eine entsprechende Struktur der zu exportierenden Daten. Bei langjährigen Mittelwerten besteht das heruntergeladene Zip-File aus einer Esri-Shapedatei mit der selektierten Raumebene. Die ausgewählten Parameter sind als Spalten in der Attributtabelle der Shapedatei angelegt und beziehen sich auf die gewählte Zeitspanne.

Die Auswahl von Zeitreihen kann in einer monatlichen oder jährlichen Auflösung erfolgen. Die hier zum Download bereitgestellten Datenmengen können vergleichsweise groß werden (v.a. bei Monatswerten). Deshalb erfolgt der Download über ein TAR-Archiv in dem mehrere Zip-Files hinterlegt sind. In dem mit der Raumebene bezeichneten Zip-File befindet sich die geometrische Grundlage in Form eines Esri-Shapefiles (bspw. Kreise.zip). Die weiteren Zip-Files beinhalten die zugehörigen Parameterdaten in Form von CSV-Files. Die Spalte „id_area“ ist der Verbindungsschlüssel zur geometrischen Grundlage. Einen Überblick über den Aufbau des Moduls "Datenexport" gibt Abbildung 93.

Abbildung 93: Ansicht des Moduls "Datenexport"

7 Zusammenfassung

Mit der Fortführung des KliWES-Projektes im Zeitraum von August 2019 bis April 2021 wurden mehrere Ziele verfolgt. Die wesentlichen waren hierbei:

- Die Verwendung von aktualisierten (Geo)Datengrundlagen
- Die Nutzung aktueller Klimaszenarien sowie die Berücksichtigung von Nebelniederschlägen
- Die Anwendung von weiterentwickelten Modellbausteinen im Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO
- Die Umsetzung einer verbesserten Optimierungsstrategie und die Anpassung der Optimierungsziele (gute Abbildung von Niedrigwasserphasen)
- Aktualisierung und Fortschreibung der Zeitreihen des Wasserhaushaltes
- Aufbau einer hinsichtlich Inhalt und Funktionalität vollständig überarbeiteten KliWES-Webanwendung unter dem Dach des Wasserhaushaltsportals Sachsen

Um diese Ziele zu erreichen und letztlich der breiten Öffentlichkeit ein zukunftsfähiges Portal mit belastbaren Wasserhaushaltsergebnisse zur Verfügung stellen zu können, wurden u.a. folgende Arbeiten in Rahmen der Projektbearbeitung durchgeführt:

- Prüfung, Aufbereitung (ggf. Homogenisierung) und Parametrisierung der Geodatengrundlage
- Entwicklung eines Ansatzes zur Modifizierung des Nebelniederschlags sowie Umsetzung des Ansatzes
- Prüfung und Aufbereitung von acht Klimaprojektionen und Ergänzung um den Nebelniederschlag
- Erstellung eines zusätzlichen meteorologischen Eingangssdatensatzes für den Zeitraum 2010 bis 2019 und Durchführung von Wasserhaushaltsberechnungen für ausgewählte Testgebiete zur Untersuchung der hydrologischen Entwicklung zwischen 2010 bis 2019
- Integration und Parametrisierung des KapRed-Ansatzes zur Reduktion des Kapillaraufstiegs bei starker Zehrung auf grundwassernahen Flächen
- Ableitung von Fruchtfolgen und Parametrisierung des VEGEN-Moduls (Vegetationsmodell in ArcEGMO)
- Weiterentwicklung der Methodik zum weitestgehend automatisierten Modellaufbau sowie Anwendung der Methodik
- Aufbau einer möglichst automatisiert ablaufenden Optimierung und Durchführung der Optimierung von Modellregionen
- Durchführung von Wasserhaushaltsberechnungen für das Gesamtmodell unter Nutzung des Referenzdatensatzes und der Klimaprojektionen
- Übergabe der Ergebnisse von der TUD an VisDat und Integration in die neue KliWES-Webanwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen
- Umsetzung des Konzepts für die neue KliWES-Webanwendung im Wasserhaushaltsportal Sachsen, das heißt u.a. Aufbau der Datenstruktur, Anpassung der Software-Lösung an die sehr umfangreichen Ergebnisse

Für die Realisierung und Erreichung der Projektziele erfolgten eine Reihe von Weiterentwicklungen. So wurde z.B. im Rahmen dieses Projekts ein für Sachsen bisher noch nicht vorhandener Datensatz zu Fruchtfolgen für die landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete ab 1961 abgeleitet.

Von den Wasserhaushaltsberechnungen waren aktive und ehemalige Braunkohletagebauegebiete in der Lausitz sowie im Leipziger Raum ausgeschlossen. Auch das Einzugsgebiet der Neiße wurde nicht modelliert, da hierfür separate Wasserhaushaltsberechnungen im Rahmen des NEYMO-NW-Projekts erfolgten, welche zukünftig mit in das neue Wasserhaushaltsportal Sachsen integriert werden sollen.

Für die Wasserhaushaltsberechnungen kam das Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO zum Einsatz. Das für den gesamten KliWES-Projektraum aufgebaute Modell ArcEGMO ist bereits unter Nutzung der Startparametrisierung in der Lage, die volumetrische Aufteilung der Wasserhaushaltskomponenten für die Mehrzahl der Modellregionen sehr gut, das heißt entsprechend der Beobachtungsdaten bzw. der Ergebnisse aus

DIFGA, abzubilden. Die regionsspezifische Optimierung ermöglicht für 70 Prozent aller Modellregionen eine weitere Verbesserung der Anpassung hinsichtlich Volumen und bzw. oder Dynamik der simulierten Größen. Bezüglich des Durchflusses lag dabei der Fokus auf einer adäquaten Abbildung des Rückgangsverhaltens im Mittel- und Niedrigwasserbereich. Für einige anthropogen sehr stark beeinflusste Modellregionen wie z. B. im Lausitzer Braunkohlegebiet sind aufgrund fehlender Daten zu Einleitungen, Entnahmen o.ä. die erhaltenen Wasserhaushaltsergebnisse nur sehr eingeschränkt belastbar. Der gewählte Optimierungszeitraum von 2000 bis 2015 gibt die aktuellen klimatischen Verhältnisse entsprechend der Datenverfügbarkeit bestmöglich wider. Dies zeigt der Vergleich mit Modellergebnissen, welche basierend auf einem anderen Optimierungszeitraum (1961 bis 1987) erzeugt wurden.

Die im Anschluss an die Optimierung durchgeführten Wasserhaushaltsberechnungen nutzten einerseits den Referenzdatensatz als meteorologischen Input für den Beobachtungszeitraum von 1961 – 2015. Andererseits wurden die projizierten hydrologischen Entwicklungen mittels acht ausgewählter Klimarealisierungen (1961 - 2100) berechnet. Hierbei kamen sechs RCP-Szenarien sowie zwei SRES-Szenarien zur Anwendung. Alle Projektionen weisen einen negativen Trend für die Niederschlagsmengen sowie einen positiven Trend bei der Entwicklung der Temperaturen auf. Mit den acht Szenarien kann eine größere Bandbreite an möglichen zukünftigen Entwicklungen abgedeckt werden. Das RCP-Szenario RCP2.6 stellt hierbei einen relativen moderaten Verlauf der Klimaentwicklung dar, während das Szenario RCP8.5 einen sehr starken Anstieg der Temperaturen bei gleichzeitig ausgeprägtem Rückgang des Niederschlags aufweist.

Die Auswirkungen auf die berechneten Wasserhaushaltsgrößen bilden dementsprechend ebenfalls eine größere Bandbreite ab. Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass der Norden Sachsen von den projizierten Folgen des Klimawandels deutlich stärker betroffen sein wird als die höheren Lagen des Erzgebirges.

Detaillierte Betrachtungen der Wasserhaushaltsergebnisse ermöglicht die neue KiWES-Webanwendung im Rahmen des Wasserhaushaltsportals Sachsen. Durch den Download der Ergebnisse in monatlicher Auflösung für verschiedene Raumebenen kann der Nutzer eigene Auswertungen durchführen und die Daten für spezifische Fragenstellungen heranziehen.

Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse Unsicherheiten und Defizite aufweisen, welche in der weiteren Verarbeitung der Daten berücksichtigt werden sollten. Vor allem wird darauf hingewiesen, dass es sich um Modellierungen in einem größeren Raum handelt, welche lokale Besonderheiten unter Umständen nicht im Detail abbilden. Es sind daher z.B. bei Standortuntersuchungen auch ergänzende Informationen/Messdaten heranzuziehen, sofern diese vorhanden sind.

8 Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage, 438 S., Hannover. Schweizer-Bart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998): *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy, 300 pp.
- BAH (2018): *Wasserhaushaltsmodellierung für Sachsen-Anhalt 2017*. Im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STEUERN (BLfS) 2009: *Merkblatt über den Aufbau der Bodenschätzung*, digital verfügbar (23.04.2020): https://www.finanzamt.bayern.de/Informationen/Steuerinfos/Weitere_Themen/Bodenschätzung/Merkblatt-ueber-den-Aufbau-der-Bodenschätzung.pdf
- BERNHOFER, C., KÖRNER, P. & SCHWARZE, R. (2017): *Modellierung abgesetzter Niederschläge*. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Schriftenreihe, Heft 9/2017.
- BERNHOFER, C.; PLUNTKE, T.; BARFUS, K.; HEIDENREICH, M.; KRONENBERG, R.; HAUFFE, C.; WAGNER, M.; SCHWARZE, R.; GUTZMANN, B. (2019): *Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes*. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Schriftenreihe, Heft 7/2019.
- BOSWELL, V.G. (1926): *The Influence of Temperature upon the Growth and Yield of Garden Peas*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 23:162-168.
- DWA REGELWERK (2016): *Arbeitsblatt DWA-A 920-1. Bodenfunktionsansprache - Teil 1: Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushaltes*. (Hrsg.) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. -DWA-, Hennef.
- FAO (1974): *Soil Map of the World 1 : 5.000.000, Volume 1*. (Hrsg.) United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Unesco. Paris 1974.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. (2007): *The Shuttle Radar Topography Mission*, Rev. Geophys., 45, RG2004.
- GEBEL M., BÜRGER S., UHLIG M., HALBFAß S. (2018): *Projektion der Grundwasserneubildung anhand vorhandener Wasserhaushaltsdaten für den Ist-Zustand und die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100*. Abschlussbericht (unveröff.). (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- GEBEL M., BÜRGER S., UHLIG M., HALBFAß S. (2020): *Dynamische Bilanzierung der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer im Zeitraum 2016 bis 2021 – Phase 4*. Studie im Auftrag des LfULG, unveröff. Abschlussbericht, Dresden.
- GIORGETTA, M. A., et al. (2013): *Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5*, J. Adv. Model. Earth Syst., 5, 572–597, doi:10.1002/jame.20038.
- GOFF, J. A.; GRATCH, S. (1946): *Low-pressure properties of water from –160 to 212 °F*. In: Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, pp 95–122, presented at the 52nd annual meeting of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, New York, 1946.
- GRUNDMANN, J. (2010): *Analyse und Simulation von Unsicherheiten in der flächendifferenzierten Niederschlags-Abfluss-Modellierung*. Dresdner Schriften zur Hydrologie, Heft 8, Eigenverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden.

- GURTZ, J. (1988): Beitrag zu den hydrologischen Grundlagen für die Gewährleistung der gesellschaftlich notwendigen Mehrfachnutzung der Wasserressourcen. Habilitation, Technische Universität Dresden, Fakultät für Bau-, Wasser-, Forstwesen, Dresden.
- HAUFFE, C., MÜLLER, R., WINKLER, P., BALDY, A., SCHWARZE, R., SCHÜTZE, N. (2016): Strategie zur Kalibrierung großräumiger Wasserhaushaltsmodelle sowie Ergebnisse für Ist-Zustand und Klimaszenarien in Sachsen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 1 (2016).
- HAUFFE, C., WAGNER, M., PAHNER, S., SCHWARZE, R., PFÜTZNER, B., KLÖCKING, B., MEY, S., RÖHM, P., WÖHLING, T., REHSE, C. (2019): Fortschreibung KliWES Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen - Säulen A, B und C: Überprüfung und Anpassung von Methoden und Verfahren in Verbindung mit deren Anwendung in repräsentativ ausgewählten sächsischen Modelltesteinzugsgebieten. Studie im Auftrag des LfULG, unveröff. Abschlussbericht, Dresden.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IUSS WRB (2015): World Reference Base for Soil Resources 2014 (Update 2015) - International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rom.
- KATATA, G., NAGAI, H., WRZESINSKY, T., KLEMM, O., EUGSTER, W. & BURKARD, R. (2008): Development of a Land Surface Model Including Cloud Water Deposition on Vegetation. Journal of Applied Meteorology and Climatology 47, Nr. 8 (2008): 2129–46. doi:10.1175/2008JAMC1758.1.
- KLÖCKING, B. (2012): Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO. [Online] 2012.
- KLÖCKING, B., WENSKE, D.; KNAB, G.; PFÜTZNER, B.; REINICKE, F.; IHLING, H.; ROST, A.; HAFERKORN, U. (2018): ReArMo – Ein Modellverbund zur Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers hinsichtlich Menge und Beschaffenheit. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, (Hrsg.) Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA, Heft 39.18, S. 215-225.
- KÖRNER, P. (2019): mündliche Mitteilung von Philipp Körner (Mitarbeiter an der Professur für Meteorologie, TU Dresden).
- KURZER, H.-J, KOLBE, H. (2016): Monitoring auf Nitrat-Dauertestflächen. In: Barth, N., Tannert, R., Kurzer, H.-J., Kolbe, H., Andreae, H., Jacob, F., Haferkorn, U., Rust, M., Grunert, M. 2016. Stickstoffmonitoring sächsischer Böden, (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 37-50.
- LAWRENCE, D.M., et al. (2018): The Community Land Model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty. in prep for J. Adv. Model. Earth Sys.
- LfULG (2014): Bodenbewertungsinstrument Sachsen. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Ad hoc AG „Bodenschutzplanung“, März 2009, Aktualisierung: Januar 2010, Oktober 2014.
- SMUL (2018): Lagebericht 2018 zur kommunalen Abwasserbeseitigung und zur Klärschlamm Entsorgung im Freistaat Sachsen. (Hrsg.) SMUL - Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft.
- MANSEL, H., KACIREK, H., PFÜTZNER, B., MEY, S., HESSE, P., SCHWARZE, R., HAUFFE, C., RÖHM, P. (2019): Berechnung des Wasserhaushaltes im Tagebaugelände um Leipzig auf Basis eines Ensembles von zehn Klimaprojektionen für die Säule B des Wasserhaushaltsportales, Abschlussbericht. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).

- MONTEITH, J.L. (1977): Climate and efficiency of crop production in Britain, Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B 281, 277-329.
- MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). (Hrsg.) Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover. Version 2017.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R. (2005): Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation Version 2005 (<http://www.brc.tamus.edu/swat/>). USDA Agricultural Research Service at the Grassland, Soil and Water Research Laboratory in Temple, Texas, USA, Section 5 and 6, 275-324.
- PEGELVERZEICHNIS (2014): Hydrologisches Handbuch – Pegelverzeichnis Teil 1. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- PFÜTZNER, B. (2002): Modelldokumentation ArcEGMO. [Online] 2002. <http://www.arcegmo.de>. ISBN 3-00-011190-5.
- PFÜTZNER, B., KLÖCKING, B., SCHUMANN, A., HESSE, P. (2013): Klimafolgenstudie 2012 - Wasser: Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt, Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Heft 5 (Band 1), ISSN 0941-7281, 176 S.
- PIANI, C., HAERTER, J. O., COPPOLA, E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theor. Appl. Climatol. 99, p. 187-192.
- SCHMIDT, C.; SEIDEL, A.; KOLODZIEJ, J., KLAMA, K.; SCHOTTKE, M.; FRIEDRICH, M.; BERKNER, A.; CHMIELESKI, S. (2011): Vulnerabilitätsanalyse Westsachsen. Leipzig/Dresden, April 2011. TU Dresden im Auftrag des regionalen Planungsverbandes Leipzig-Westsachsen im Rahmen des Klima-MORO, gefördert vom BMVBS in Kooperation mit dem BBSR.
- SCHULER, U., BARITZ, R., WILLER, J., DILL, H. (2010): A revised approach to classify parent material for soil mapping. (Hrsg.) Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Version 1.2, Draft.
- 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., HAUFFE, C., BALDY, A., WAGNER, M., STEINL, C., LÜNICH K. (2012): KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen (Klimaprojektionen). Abschlussbericht unveröffentlicht.
- 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.
- SPEKAT, A. & ENKE, W. (2020): Regionale Klimaprojektionen für Sachsen - WMSax2.0 Bereitstellung eines Ensembles regionaler Klimaprojektionen für Sachsen. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Schriftenreihe, Heft 3/2020.
- STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN (2018): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung im Freistaat Sachsen 2016, Statistischer Bericht - Q I 1 - 3j/16. (Hrsg.) Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, Kamenz 2018. https://www.statistik.sachsen.de/download/statistische-berichte/bericht_statistik-sachsen_q-i-1_wasserversorgung-abwasserentsorgung-oeffentlich.xlsx
- 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.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194.

- WILKS, D. S. (2006): Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second edition, Academic Press.
- WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; KINIRY, J.R.; SPANEL, D.A. (1989): The EPIC crop growth model. Transactions of the ASAE 32, 497-511.
- WINKLER, B.; PLEINER, I.; LORENZ, H.; FLEMING, B.; MATTHES, E.; NUSCHE, H. (1999): Die Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete im Freistaat Sachsen. (Hrsg.) Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- ZIPPEL (2006): Modellgestützte Bilanzierung der unterirdischen Wasserressourcen Berlins - die Grundwassersituation im weiteren Einzugsgebiet des Müggelsees. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin, Berlin, p. 40.

Webseiten:

- Copernicus Website (2019a): <https://land.copernicus.eu/user-corner/publications/rz-flyer-a4/view>, letzter Zugriff 18.03.2019
- Copernicus Website (2019b): <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/status-maps>, letzter Zugriff 18.03.2019
- Copernicus Website (2019c): <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>, letzter Zugriff 17.04.2017
- SDAT (2019d): https://webmap.ornl.gov/wcsdown/dataset.jsp?ds_

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
(LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: + 49 351 2612-0; Telefax: + 49 351 2612-1099

E-Mail: lfulg@smekul.sachsen.de; www.lfulg.sachsen.de

Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft. Diese Veröffentlichung wird finanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushalts.

Autoren:

Corina Hauffe, Sofie Pahner, Patric Röhm, Dr. Michael Wagner,
Dr. Thomas Wöhling, Carolin Rehse

Professur für Hydrologie, TU Dresden

Bergstraße 66, 01069 Dresden

Telefon: + 49 351 463-33931

E-Mail: hydrologie@tu-dresden.de

Dr. Bernd Pfützner, Dr. Beate Klöcking, Dr. Silke Mey

Büro für Angewandte Hydrologie Berlin und München

Köberlesteig 6, 13156 Berlin

Telefon: + 49 30 499137-02

E-Mail: bah@bah-berlin.de

Dr. Michael Gebel, Mario Uhlig, Stephan Bürger,

Dr. Stefan Halbfaß

VisDat datentechnologie GmbH

Am Ende 14, 01277 Dresden

Telefon: + 49 351 20965-40

E-Mail: info@visdat.de

Redaktion:

Holm Friese

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft
und Geologie LfULG)

Referat Oberflächenwasser, Wasserrahmenrichtlinie

Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden

Telefon: + 49 351 8928-4412

E-Mail: holm.friese@smekul.sachsen.de

Auflage:

1. Auflage

Redaktionsschluss:

10.06.2022

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

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

Verteilerhinweis

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

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de