Wasserhaushalt für projizierte Klimaszenarien

Produkt 3.2.1a

Version: 1.0
Status: Endfassung
Datum: 30.04.2013

TP 3.2.1 – Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren

TP-Leiter: Dr. Franz Lennartz
Lehrstuhl für Hydrologie

Bearbeiter: Dipl. Hyd. Ruben Müller
Dipl. Hyd. Norbert Prange
Dr. Michael Wagner
Lehrstuhl für Hydrologie

Kontakt: Dr. Franz Lennartz
Lehrstuhl für Hydrologie
Institut für Hydrologie und Meteorologie
Technische Universität Dresden
Bergstraße 66
01069 Dresden
Tel.: 0351 / 46336373
Fax: 0351 / 46337162
E-Mail: franz.lennartz@tu-dresden.de

REGKLAM
Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordination: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, das dynamische Verhalten des Wasserhaushaltes im Untersuchungsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Klingenberg, hochaufgelöst abzubilden und mögliche Veränderungen aufgrund sich ändernder klimatischer Randbedingungen zu quantifizieren. Ein wesentlicher Fokus lag dabei auch auf der Betrachtung und Quantifizierung von Unsicherheiten mit denen eine derartige Untersuchung immer behaftet ist.

Dafür wurde das flächendifferenzierte, deterministische, hydrologische Modell WaSiM-ETH anhand aktuellster Daten der Topographie, Landnutzung und des Bodens für insgesamt drei Modellgebiete (A, B und C) im Untersuchungsgebiet erstellt und parametrisiert. Um das Modell zu kalibrieren, zu validieren und das Verhalten des Wasserhaushaltes im rezenten Zeitraum abzubilden, wurden die verfügbaren Wetterdaten in verschiedenen Arbeitsschritten aufbereitet.

Die automatische Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells erfolgte mittels einer multikriteriellen Optimierung für die Modellgebiete A und C. Anhand von drei Zielfunktionen wurden im Modellgebiet A insgesamt 22 und im Modellgebiet C insgesamt 16 Parameter des Boden- und Schneemoduls optimiert. Die Ergebnisse zeigen eine relativ gute Modellanpassung an beobachtete Abflüsse in beiden Modellgebieten im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum. Gleichzeitig ergibt sich aus der multikriteriellen Optimierung eine große Anzahl an Pareto-optimalen Lösungen, die aufgrund der unterschiedlichen Parametersätze zu einer Bandbreite des möglichen Abflusses auf jährlicher Basis im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum bis zu 17% führen, so beträgt z.B. bei 500mm mittlerer jährlicher Abflussspende die Schwankungsbreite +/-42,5mm. Die mögliche Schwankung des innerjährlichen Abflusses für die verschiedenen Parametersätzen kann prozentual gesehen noch deutlich größer sein.

Außerdem konnte festgestellt werden, dass selbst mit unterschiedlichen Parametersätzen, beobachtete Abflüsse auf unterschiedlichen Zeitskalen im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum nicht abgebildet werden können. Die Ursachen dafür liegen im Modell und in Fehlern der Beobachtungsdaten.

Mithilfe des kalibrierten und validieren Wasserhaushaltsmodells wurde dann der Wasserhaushalt für Klimabeobachtungsdaten und Klimadaten der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM simuliert. Es konnten mehrere Kontrollläufe und Realisierungen der beiden regionalen Klimamodelle für mehrere unterschiedliche Emissionsszenarien berücksichtigt werden. Im Ergebnis zeigten sich sowohl im projizierten innerjährlichen Verlauf und der langjährigen Entwicklung der betrachteten Wasserhaushaltsgrößen deutliche Unterschiede zwischen den Simulationen des Wasserhaushaltes mit Klimaprojektionen der beiden regionalen Klimamodelle. Der Grund dafür liegt in den Klimaprojektionen.

Um den Anteil der modell- und datenbedingten Unsicherheiten in der Abbildung des zukünftigen Wasserhaushaltes zu quantifizieren wurden die Simulationen zudem mit mehreren aus der Kalibrierung erhaltenen Pareto-optimalen Parametersätzen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass der Anteil der gesamten Unsicherheit am Abfluss für die zukünftigen Zeiträume für beide regionale Klimamodelle zwischen 10% und 30% liegt. Der Anteil der dabei aus den Realisierungen des regionalen Klimamodells stammt ist bei WETTREG2010 mit 50%-80% deutlich größer als bei CLM (15%-70%). Die Ursache dafür liegt unter anderem in der bei WETTREG2010 höheren Anzahl an Modellrealisierungen (zehn Realisierungen), als bei CLM (zwei Realisierungen).

Den größten Anteil an der Unsicherheit der Wasserhaushaltsprojektionen hat also die Wahl des regionalen Klimamodells. Bedenkt man, dass es eine Vielzahl an regionalen Klimamodellen gibt, welche nicht in die Untersuchungen eingeflossen sind, wird hier dringender, weiterer Untersuchungsbedarf deutlich.

Die gesamte Unsicherheit der Ergebnisse erhöht sich nochmals, wenn man die Unsicherheit der globalen Klimamodelle, der Emissionsszenarien und insbesondere auch die Unsicherheiten der Kopplung von Emissionsszenarien, globalen, regionalen und hydrologischen Modellen berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse stellt sich die Frage, ob eine Planung und Bemessung von robusten Anpassungsmaßnahmen überhaupt möglich bzw. zu rechtfertigen ist.

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen zeigen deutlich die Bedeutung und Dringlichkeit weiterer Forschung in diesem Bereich der Hydrologie. Eine zwingende Grundlage dafür ist die kontinuierliche Fortsetzung und Erweiterung bestehender Messkampagnen und Messnetze um Datengrundlagen für die Modellierung in ausreichender Qualität und Quantität zur Verfügung zu stellen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 2

Abbildungsverzeichnis 6

Tabellenverzeichnis 17

1. Präambel 19

2. Einleitung 20

2.1 HINTERGRUND 20
2.2 ZIELE 20

3. Das Untersuchungsgebiet 21

3.1 LAGE 21
3.2 TOPOGRAFIE 22
3.3 KLIMA 24
3.4 LANDNUTZUNG 25
3.5 BODEN 26
3.6 GEOLOGIE 28

4. Material und Methoden 30

4.1 UNTERSUCHUNGSKONZEPT 30
4.2 DAS HYDROLOGISCHE MODELL WASIM-ETH 30
4.2.1 Abflusskomponenten 31
4.2.2 Bodenmodell mit RICHARDS-Ansatz 32
4.2.3 Verdunstungsmodul 33
4.2.4 Dynamische Pflanzenphänologie 34
4.2.5 Schneemodul 35
4.3 MODELLAUFBAU 37
4.4 DATENGRUNDLAGEN, DATENAUFBEREITUNG UND PARAMETRISIERUNG 37
4.4.1 Rezente Klimabeobachtungsdaten 37
4.4.2 Lückenfüllung und Verlängerung von Klimabeobachtungsdaten 40
4.4.3 Klimamodelldaten 42
4.4.4 Regionalisierung stationsbasierter Klimadaten 45
4.4.5 Topografische Daten 56
4.4.6 Landnutzungsdaten 57
4.4.7 Bodendaten 58
4.4.8 Hydrologische Daten 59
4.5 AUTOMATISCHE KALIBRIERUNG VON WASIM-ETH 60
4.5.1 Multikriterieller Optimierungsalgorithmus 60
4.5.2 Unterteilung des Untersuchungsgebietes in Modellgebiete 61
4.5.3 Zielfunktionen der multikriteriellen Optimierung 62
4.5.4 Variablen der multikriteriellen Optimierung 63
4.5.5 Auswahl repräsentativer Lösungen für Unsicherheitsbetrachtungen 64
4.6 VALIDIERUNG VON WASIM-ETH 65
4.7 ANWENDUNG VON WASIM-ETH FÜR REZENTE UND PROJIZIERTE KLIMADATEN 65

5. Ergebnisse 67

5.1 VERGLEICH VON REZENTEN UND PROJIZIERTEN KLIMAGRÖßEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET 67
5.1.1 Saisonale Ergebnisse für Klimagrößen unter Verwendung der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM 67

5.1.2 Vergleich von Klimagrößen unter Verwendung der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM für Zeitscheiben 70
5.2 ERGEBNISSE DER AUTOMATISCHEN KALIBRIERUNG 77
5.2.1 Modellgebiet A 77
5.2.2 Modellgebiet C 81
5.3 ERGEBNISSE IM VALIDIERUNGSZEITRAUM 85
5.3.1 Modellgebiet A 85
5.3.2 Modellgebiet C 88
5.4 REPRÄSENTATIVE LÖSUNGEN ZUR UNSICHERHEITSANALYSE IM PROJEKTIONSZEITRAUM 91
5.5 VERGLEICH VON WASSERHAUSHALTSGRÖßEN UNTER REZENTEM UND PROJIZIERTEM KLIMA IM UNTERSUCHUNGSGEBIET 92
5.5.1 Saisonale Ergebnisse für Wasserhaushaltsgrößen unter Verwendung des regionalen, statistischen Klimamodells WETTREG2010 92
5.5.2 Saisonale Ergebnisse für Wasserhaushaltsgrößen unter Verwendung des regionalen, dynamischen Klimamodells CLM 100
5.5.3 Vergleich von Wasserhaushaltsgrößen unter Verwendung der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM für Zeitscheiben 105
6. Zusammenfassung 117
7. Literatur 119
8. Anhang 123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des Einzugsgebietes der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 in der REGKLAM-Modellregion (Quelle: IÖR 2010). 21

Abbildung 2: Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 mit Teileinzugsgebieten, Talsperren und Lage der Pegel. (Hintergrund: CIR Landnutzungsdaten, LfULG 2005). 21

Abbildung 3: Digitales Höhenmodell (DHM) des Untersuchungsgebietes (Basis: kombiniertes 20 Meter DHM von Sachsen und angrenzenden Bereichen Tschechiens, LfULG 2009). 22

Abbildung 4: Geländegefälle im Untersuchungsgebiet (Basis: kombiniertes 20 Meter DHM von Sachsen und angrenzenden Bereichen Tschechiens, LfULG 2009). 23

Abbildung 5: Exposition im Untersuchungsgebiet (Basis: kombiniertes 20 Meter DHM von Sachsen und angrenzenden Bereichen Tschechiens, LfULG 2009). 23

Abbildung 6: Klimadiagramm der DWD-Station Dresden-Klotzsche (ID 1048) mit mittleren Monatswerten der Temperatur und mittleren Monatssummen des nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlages im Zeitraum vom 01.01.1971 bis 31.12.2000.24

Abbildung 7: Klimadiagramm der DWD-Station Zinnwald-Georgenfeld (ID 5779) mit mittleren Monatswerten der Temperatur und mittleren Monatssummen des nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlages im Zeitraum vom 01.01.1971 bis 31.12.2000.25

Abbildung 8: Verteilung der Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet auf Basis der „Legendeneinteilung" der Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus Colorinfrarot-Bildern (LfULG 2005). 26

Abbildung 9: Verteilung der Bodentypen im Untersuchungsgebiet auf Grundlage von Daten des Fachinformationssystems Boden (BK50, LfULG 2011). 27

Abbildung 10: Überblick der geologischen Formationen im Untersuchungsgebiet auf Basis der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Sachsen im Maßstab 1:400.000 (HÜK 400, LfULG). 28

Abbildung 11: Niederschlags- und Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Tschechisch Hydrologisch-Meteorologischen Dienstes (CHMI) in der erweiterten REGKLAM-Modellregion. 40

Abbildung 12: Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 mit dem Teileinzugsgebiet des Pegels Klingenberg (Untersuchungsgebiet) und den für die multiple lineare Regression gewählten 94 Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Tschechisch Hydrologisch-Meteorologischen Dienstes (CHMI). 42

Abbildung 13: Klimamodellkette zur Bereitstellung von regionalen Klimadaten, beginnend mit Emissionsszenarien als Randbedingung (Quelle: LfULG 2010). 43

Abbildung 14: Vergleich der Stationsdichte des DWD/CHMI Datensatzes mit der Stationsdichte des WETTREG2010 Datensatzes in der erweiterten REGKLAM-Modellregion. 44

Abbildung 15: Übersicht über das CLM 3 Raster in der REGKLAM-Modellregion und die ausgewählten Rasterzellen (türkis) für die Wasserhaushaltsmodellierung mit WaSiM. 45

Abbildung 16: Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 (500x500 m Raster mit den Indizes 1 bis 655) und das Untersuchungsgebiet bis zum Pegel Klingenberg (schwarz umrandete Zellen) mit der Stationsauswahl aus DWD- und WETTREG2010 Stationen für die Regionalisierung (Kriging). 50

Abbildung 17: Tagesmitteltemperaturen der DWD/CHMI-Klimastationen, sowie die mittels OK bzw. EDK regionalisierten Tagesmitteltemperaturen aller 655 Rasterpunkte im Einzugsgebiet Hainsberg 3 über der Geländehöhe. 51

Abbildung 18: Differenzen der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.....52

Abbildung 19: Vergleich der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.....52

Abbildung 20: Mittlerer Tagesniederschlag der DWD/CHMI-Stationen, sowie die mittels OK bzw. EDK regionalisierten mittleren Tagesniederschläge aller 655 Rasterpunkte im Einzugsgebiet Hainsberg 3 über der Geländehöhe. 53

Abbildung 21: Differenzen der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.....53

Abbildung 22: Vergleich der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.....54

Abbildung 23: Mittlere relative Feuchtewerte der DWD/CHMI-Klimastationen, sowie die mittels OK bzw. EDK regionalisierten mittleren relativen Feuchtewerte aller 655 Rasterpunkte im Einzugsgebiet Hainsberg 3 über der Geländehöhe.....54

Abbildung 24: Differenzen der relativen Feuchte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.....55

Abbildung 25: Vergleich der relativen Feuchtewerte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.....55

Abbildung 26: Generalisiertes digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebietes (500m Raster). 57

Abbildung 27: In WaSiM verwendete Landnutzungsklassen für das Untersuchungsgebiet (500m-Raster). 58

Abbildung 28: Aufteilung des Untersuchungsgebietes in die Modellgebiete A, B und C. Modellgebiet A entwässert in Modellgebiet B, Modellgebiet B entwässert in Modellgebiet C. Die Fließrichtung im Schema folgt von unten nach oben. Weiterhin sind die Art und Anzahl der zu optimierenden Modellparameter je Modellgebiet angegeben. 61

Abbildung 29: Innerjährliche Entwicklung der nach RICHTER (1995) korrigierten Monatsniederschlagssumme (RRkorr), der Monatsmitteltemperatur (TA), der mittleren monatlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren monatlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 im Untersuchungsgebiet. In der ersten Zeitscheibe dargestellt ist der Mittelwert der Beobachtungsdaten aus DWD-Daten (schwarze Linie) mit Spannweite aller Einzelmonate (dunkelgraue Fläche) und als hellgraue Linie der Mittelwert der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (C20) mit Spannweite aller Einzelmonate (hellgraue Fläche). In den drei weiteren Zeitscheiben als farbige Linien dargestellt sind die Mittelwerte der pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite aller Einzelmonate. 67

Abbildung 30: Innerjährliche Entwicklung der korrigierten Monatsniederschlagssumme (RRkorr), der Monatsmitteltemperatur (TA), der mittleren monatlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren monatlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells CLM

im Untersuchungsgebiet. In der ersten Zeitscheibe dargestellt ist der Mittelwert der Beobachtungsdaten aus DWD-Daten (schwarze Linie) mit Spannweite aller Einzelmonate (dunkelgraue Fläche) und als hellgraue Linie der Mittelwert der zwei Kontrollläufe von CLM (C20) mit Spannweite aller Einzelmonate (hellgraue Fläche). In den drei weiteren Zeitscheiben als farbige Linien dargestellt sind die Mittelwerte der pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite aller Einzelmonate. 68

Abbildung 31: Vergleich der innerjährlichen Entwicklung der korrigierten mittleren Monatsniederschlagssumme (RRkorr), der Monatsmitteltemperatur (TA), der mittleren monatlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren monatlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 (W2010) und CLM im Untersuchungsgebiet. In der ersten Zeitscheibe dargestellt sind die Mittelwerte der Beobachtungsdaten aus DWD-Daten (schwarze Linie), der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (dunkelgraue Linie, W2010 C20) und der zwei Kontrollläufe von CLM (hellgraue Linie, CLM C20). In den drei weiteren Zeitscheiben als farbige Linien dargestellt sind die Mittelwerte der bei WETTREG2010 pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen und die Mittelwerte der bei CLM pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen. 69

Abbildung 32: Entwicklung der nach RICHTER (1995) korrigierten Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 im Untersuchungsgebiet. Als schwarze Linie dargestellt sind die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten bis 2010, als graue Linie der Median der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 bis 2000 (C20) mit Spannweite der zehn Realisierungen (graue Fläche) und als farbige Linien die Mediane der pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite der zehn Realisierungen.....71

Abbildung 33: Entwicklung der korrigierten Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells CLM im Untersuchungsgebiet. Als schwarze Linie dargestellt sind die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten bis 2010, als graue Linie der Median der zwei Kontrollläufe von CLM bis 2000 (C20) mit Spannweite der zwei Realisierungen (graue Fläche) und als farbige Linien die Mediane der pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite der zwei Realisierungen. 73

Abbildung 34: Vergleich der Entwicklung der korrigierten Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 (W2010) und CLM im Untersuchungsgebiet. Als schwarze Linie dargestellt sind die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten bis 2010, als graue Linien, jeweils der Median der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (dunkelgrau, W2010 C20) und der Median der zwei Kontrollläufe von CLM (hellgrau, CLM C20) bis 2000

und als farbige Linien die Mediane der zehn Realisierungen pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) von WETTREG2010 (Rottöne) und die Mediane der zwei Realisierungen pro Emissionsszenario (A1B und B1) von CLM (Grüntöne). 76

Abbildung 35: Pareto-Front als Ergebnis der MKO für das Modellgebiet A. Zielfunktion $F3$ ist durch die farbliche Kodierung der einzelnen Lösungen dargestellt. Punkte mit dickem schwarzem Rand zeigen die 59 ausgewählten Punkte für die Unsicherheitsbetrachtung im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum. 77

Abbildung 36: Verteilung der Variablen des Pareto-Satzes (116 Lösungen) für das Modellgebiet A im normalisierten Wertebereich. Die zu einer Lösung zugehörigen Variablen sind durch schwarze Linien verbunden. Die Abfolge der Variablen ist: $TTOR$ (1), TOR (2), TO (3), $C1$ (4), $C2$ (5), *CHW* (6), *CRFR* (7), $RFMin$ (8) und $RFMax$ (9) für das globale Schneemodell; $K1$(10), $K2$ (11), DR (12), KB (13), $Q0$ (14) und SDF (15) für das lokale Bodenmodul des TEZG Rehefeld; $K1$ (17), $K2$ (18), DR (19), KB (20), $Q0$ (21) und SDF (22) für das lokale Bodenmodul des TEZG Ammelsdorf und $krec,H$ (16) als globale Variable des Bodenmoduls für beide TEZG. 78

Abbildung 37: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. Der beobachtete Scheitel des Hochwassers im August 2002 ist 99 mm und der Median der Modellierung beträgt 89 mm. 79

Abbildung 38: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 79

Abbildung 39: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 80

Abbildung 40: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 80

Abbildung 41: Pareto-Front als Ergebnis der MKO für das Modellgebiet C. Zielfunktion $F3$ ist durch die farbliche Kodierung der einzelnen Lösungen dargestellt. Punkte mit dickem schwarzem Rand zeigen ausgewählte Punkte für die Unsicherheitsbetrachtung. ... 81

Abbildung 42: Verteilung der Variablen des Pareto-Satzes für das Modellgebiet C im normalisierten Wertebereich. Die zu einer Lösung zugehörigen Variablen sind durch schwarze Linien verbunden. Die Abfolge der Variablen ist: $TTOR$ (1), TOR (2), TO (3), $C1$ (4), $C2$ (5), *CHW* (6), *CRFR* (7), $RFMin$ (8) und $RFMax$ (9) für das Schneemodul und $K1$(10), $K2$ (11), DR (12), KB (13), $Q0$ (14), SDF (15), $krec,H$ (16) für das Bodenmodul. 82

Abbildung 43: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 83

Abbildung 44: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 83

Abbildung 45: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 84

Abbildung 46: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.....84

Abbildung 47: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 86

Abbildung 48: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 86

Abbildung 49: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 87

Abbildung 50: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.....87

Abbildung 51: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 89

Abbildung 52: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 89

Abbildung 53: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. 90

Abbildung 54: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.....90

Abbildung 55: Ausgewählte repräsentative Lösungen für das Modellgebiet A (links) und das Modellgebiet C (rechts). Die Zugehörigkeit von Lösungen zu einem Cluster ist durch die gleiche Farbe hervorgehoben. Repräsentative Lösungen eines Clusters sind durch den schwarzen dicken Rand und den schwarzen Mittelpunkt angezeigt. Die drei zusätzlich gewählten Lösungen für das Modellgebiet C sind durch rechteckige Markierungen hervorgehoben. Die Referenzlösung (Referenzparametersatz) als ausgeglichene Kompromisslösung je Modellgebiet ist jeweils durch einen schwarzen Punkt gekennzeichnet.....91

Abbildung 56: Schematische Beschreibung der in den Abbildungen in den beiden folgenden Kapiteln 5.5.1 (WETTREG2010) und 5.5.2 (CLM) verwendeten Boxplots.....92

Abbildung 57: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt. 93

Abbildung 58: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt. 93

Abbildung 59: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt. 93

Abbildung 60: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 95

Abbildung 61: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 95

Abbildung 62: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 95

Abbildung 63: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 96

Abbildung 64: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 96

Abbildung 65: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 96

Abbildung 66: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige im gesamten Untersuchungsgebiet. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 98

Abbildung 67: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige im gesamten Untersuchungsgebiet. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 98

Abbildung 68: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige im gesamten Untersuchungsgebiet. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 98

Abbildung 69: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 99

Abbildung 70: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 99

Abbildung 71: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 99

Abbildung 72: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt. 100

Abbildung 73: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt. 100

Abbildung 74: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 101

Abbildung 75: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 101

Abbildung 76: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 102

Abbildung 77: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 102

Abbildung 78: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat im

Untersuchungsgebiet in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 103

Abbildung 79: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat im Untersuchungsgebiet in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 103

Abbildung 80: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 104

Abbildung 81: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 104

Abbildung 82: Entwicklung von Jahreswerten der nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Schneebedeckung (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind Mediane ($Q_{0.5}$) und Spannweiten (Spw). Für den Zeitraum 1961-2010 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen mit maskiertem DWD Beobachtungsdatensatz (schwarz und hellgrau), für den Zeitraum 1961-2000 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und mit zehn Kontrollläufen von WETTREG2010 (dunkel- und mittelgrau). Ab 2001 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen von WETTREG2010..... 105

Abbildung 83: Entwicklung von Jahreswerten der korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Schneebedeckung (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind Mediane ($Q_{0.5}$) und Spannweiten (Spw). Für den Zeitraum 1961-2010 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen mit maskiertem DWD Beobachtungsdatensatz (schwarz und hellgrau), für den Zeitraum 1961-2000 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und mit zwei Kontrollläufen von CLM (dunkel- und mittelgrau). Ab 2001 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen von CLM. 110

Abbildung 84: Vergleich der Entwicklung von Jahreswerten (Mediane) der korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Schneebedeckung (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im

Untersuchungsgebiet. Für den Zeitraum 1961-2010 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen mit maskiertem DWD Beobachtungsdatensatz (schwarz), für den Zeitraum 1961-2000 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen für zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (dunkelgrau) und für zwei Kontrollläufe von CLM (hellgrau). Ab 2001 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen von WETTREG2010 (Rottöne) und pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen von CLM (Grüntöne). 116

Abbildungen im Anhang

Abbildung A 1: Modellstruktur von WaSiM-ETH (SCHULLA 2012) 123

Abbildung A 2: Von WaSiM-ETH benötigte und daraus abgeleitete räumliche Daten (NIEHOFF 2001). 123

Abbildung A 3: Datenverfügbarkeit der mittleren Tagestemperatur (TM) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression. 124

Abbildung A 4: Datenverfügbarkeit der täglichen mittleren relativen Luftfeuchte (UU) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression. 124

Abbildung A 5: Datenverfügbarkeit der täglichen mittleren Windgeschwindigkeit (FF) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression. 125

Abbildung A 6: Datenverfügbarkeit der täglichen Sonnenscheindauer (SD) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression. 125

Abbildung A 7: Datenverfügbarkeit des täglichen korrigierten Niederschlages (RRkorr) an den für die Regionalisierung ausgewählten 94 Klima- und Niederschlagsstationen vor und nach der multiplen linearen Regression. 126

Abbildung A 8: Differenzen der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650. 127

Abbildung A 9: Vergleich der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650. 127

Abbildung A 10: Differenzen der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650. 128

Abbildung A 11: Vergleich der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650. 128

Abbildung A 12: Differenzen der relativen Feuchte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650. 129

Abbildung A 13: Vergleich der relativen Feuchtewerte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650. 129

Abbildung A 14: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 130

Abbildung A 15: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 130

Abbildung A 16: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. 130

Abbildung A 17: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 131

Abbildung A 18: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. 131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendeter Jahresgang des Angstrøm Koeffizienten b (nach DVWK 1996). 39

Tabelle 2: Level der Horizonte nach der Gesamtanzahl der Horizonte eines Bodens. Die Horizonte liegen dabei von links nach rechts jeweils tiefer geschichtet. 63

Tabelle 3: Parametergrenzen der Parameter des Schneemoduls für das Modellgebiet A. 64

Tabelle 4: Parametergrenzen der Parameter des Bodenmoduls für das Modellgebiet A. 64

Tabelle 5: Parametergrenzen der Parameter des Bodenmoduls für das Modellgebiet C. 64

Tabelle 6: Entwicklung der nach RICHTER (1995) korrigierten mittleren Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind für die erste Zeitscheibe Mittelwerte aller Jahreswerte für die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten und Mittelwerte aller Jahreswerte der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010. Für die drei weiteren Zeitscheiben ist jeweils der Mittelwert aller Jahreswerte einer Zeitscheibe der pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen angegeben. 72

Tabelle 7: Absolute und relative Differenzen der betrachteten Klimagrößen in Bezug auf die Mittelwerte aus den zehn Kontrollläufen (C20) des regionalen Klimamodells WETTREG2010 in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 6. 72

Tabelle 8: Entwicklung der korrigierten mittleren Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells CLM im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind für die erste Zeitscheibe Mittelwerte aller Jahreswerte für die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten und Mittelwerte aller Jahreswerte der zwei Kontrollläufe von CLM. Für die drei weiteren Zeitscheiben ist jeweils der Mittelwert aller Jahreswerte einer Zeitscheibe der pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen angegeben. 75

Tabelle 9: Absolute und relative Differenzen der betrachteten Klimagrößen in Bezug auf die Mittelwerte aus den zwei Kontrollläufen (C20) des regionalen Klimamodells CLM in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 8. 75

Tabelle 10: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben inklusive der Parameterunsicherheit aus der Wasserhaushaltsmodellierung (Verwendung von 15 Parametersätzen) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C). 107

Tabelle 11: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zehn Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells WETTREG2010 in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 10 (15 WaSiM Parametersätze). 107

Tabelle 12: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben, für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C) für einen Referenzparametersatz (ohne Parameterunsicherheiten aus der Wasserhaushaltsmodellierung) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells WETTREG2010. 108

Tabelle 13: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zehn Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells WETTREG2010 in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 12 (1 WaSiM Parametersatz). 108

Tabelle 14: Gesamte absolute und prozentuale Unsicherheiten durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells WETTREG2010 (zehn Realisierungen für C20 und pro Emissionsszenario – A1B, B1, A2) und durch die Anzahl der Wasserhaushaltsmodellierungen (15 Parametersätze) für den Abfluss (A15) und die Verdunstung (V15). Zusätzlich sind die absoluten und prozentualen Anteile der Unsicherheiten nur durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells für einen Referenzparametersatz (A1 und V1) und die absoluten und relativen Anteile (Parameterunsicherheiten) resultierend aus der Anzahl von 15 WaSiM Parametersätzen (A15-A1 und V15-V1) an der gesamten Unsicherheit (A15 bzw. V15) angegeben. 109

Tabelle 15: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben inklusive der Parameterunsicherheit aus der Wasserhaushaltsmodellierung (Verwendung von 15 Parametersätzen) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells CLM für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C). 113

Tabelle 16: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zwei Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells CLM in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 15 (15 WaSiM Parametersätze). 113

Tabelle 17: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben, für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C) für den Referenzparametersatz (ohne Parameterunsicherheiten aus der Wasserhaushaltsmodellierung) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells CLM. 114

Tabelle 18: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zwei Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells CLM in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 17 (1 WaSiM Parametersatz). 114

Tabelle 19: Gesamte absolute und prozentuale Unsicherheiten durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells CLM (zwei Realisierungen für C20 und zwei pro Emissionsszenario – A1B, B1) und durch die Anzahl der Wasserhaushaltsmodellierungen (15 Parametersätze) für den Abfluss (A15) und die Verdunstung (V15). Zusätzlich sind die absoluten und prozentualen Anteile der Unsicherheiten nur durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells für einen Referenzparametersatz (A1 und V1) und die absoluten und relativen Anteile (Parameterunsicherheiten) resultierend aus der Anzahl von 15 WaSiM Parametersätzen (A15-A1 und V15-V1) an der gesamten Unsicherheit (A15 bzw. V15) angegeben. 115

1. Präambel

Innerhalb des BMBF Verbundvorhabens "Regionale Klimaanpassung in der Modellregion Dresden" (REGKLAM) werden im Teilprojekt 3.2.1 am Lehrstuhl für Hydrologie der TU Dresden die möglichen Auswirkungen von sich verändernden klimatischen Randbedingungen auf den Wasserhaushalt von Einzugsgebieten mit Talsperren untersucht. Dabei stehen insbesondere Aspekte der zukünftigen Gewährleistung der Versorgungssicherheit an Trink- und Brauchwasser durch Talsperren infolge von möglichen Veränderungen der Zuflusscharakteristika zu diesen Talsperren im Fokus der Betrachtungen.

Sich verändernde klimatische Randbedingungen haben Veränderungen der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften hydrologischer Systeme zur Folge. Diese wiederum beeinflussen in ihrer Summe maßgeblich den Wasserhaushalt von Einzugsgebieten. So wird eine Veränderung des Temperaturregimes das Pflanzenwachstum und damit die Verdunstung maßgeblich beeinflussen. Es sind aber auch Veränderungen zu erwarten, die zunächst weniger offensichtlich sind, aber mittelfristig das Verhalten des hydrologischen Systems stark beeinflussen. So ist zu erwarten, dass durch den Klimawandel hervorgerufene Änderungen der Bodenbiologie und Bodenchemie mit ihren zahlreichen Aus- und Wechselwirkungen auf die bodenphysikalischen Charakteristika die Abflussbildung und Abflusskonzentration und damit ebenfalls den Wasserhaushalt von Einzugsgebieten beeinflussen.

Die Abbildung des hydrologischen Systems und der darin ablaufenden Prozesse erfolgt in der Hydrologie durch den Einsatz von mathematischen Modellen. Bei der klassischen Vorgehensweise der Wasserhaushaltsberechnung werden diese Modelle anhand langer Zeitreihen von globalen, gut zu beobachtenden Größen (Niederschlag, Abfluss usw.) an das Verhalten des Gebietes angepasst. Bei dieser globalen Kalibrierung wird eine große Anzahl von Einflussgrößen, die das hydrologische Gebietsverhalten maßgeblich steuern, nur implizit erfasst. Solange sich das Verhalten des hydrologischen Systems aber nur im Bereich normaler Schwankungen des rezenten Klimas bewegt, sind die Auswirkungen dieser Vorgehensweise auf die Abbildungsgenauigkeit der so angepassten Modelle akzeptabel.

Wie gezeigt, hat der Klimawandel aber eine maßgebliche Änderung des hydrologischen Systems mit all seinen Prozessen und Wechselwirkungen zur Folge. Da uns aber keine langjährigen Zeitreihen vorliegen, die diese Veränderungen implizit beinhalten, muss davon ausgegangen werden, dass die Vorgehensweise bei der klassischen hydrologischen Modellierung des Wasserhaushaltes unter diesen Randbedingungen mit unakzeptablen Fehlern behaftet sein wird. An dieser Stelle ist anzumerken, dass ein sich dynamisch entwickelndes Klima zu Veränderungen der hydrologischen Systeme führt, welche aus heutiger Sicht nicht eindeutig zu prognostizieren sind. Daten, die einen langjährig stabilen, mittleren Systemzustand beschreiben, können wir unter diesen Bedingungen in Zukunft nicht mehr erwarten. Deshalb ist die Entwicklung von Ansätzen geboten, welche dynamische Systemveränderungen beschreiben und die dafür notwendige Datengrundlage auch verarbeiten können.

Daher haben wir bei unseren Untersuchungen in diesem Teilprojekt, neben der beantragten, klassischen Herangehensweise eine zweite Strategie verfolgt, die – so unsere Hypothese - unter diesen Bedingungen bessere Ergebnisse liefern könnte. Dafür werden – im Bereich der Einzugsgebietshydrologie – neuartige Ansätze (physiologische Pflanzenwachstumsmodelle) eingesetzt und getestet, von denen wir erwarten, dass sie unter sich verändernden klimatischen Randbedingungen eine realitätsnähere Abbildung des Wasserhaushaltes ermöglichen. Die Anwendung dieser Ansätze erfolgte exemplarisch und vergleichend mit der klassischen hydrologischen Modellierung an ausgewählten und messtechnisch instrumentierten Versuchseinzugsgebieten im Osterzgebirge. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im „Abschlussbericht zum Antrag auf Umwidmung von Unterauftragsmitteln in Personal-, Sach- und Dienstreisemittel vom 11.10.2011" nachzulesen.

Innerhalb des hier vorliegenden Produktberichtes werden, wie beantragt, die Ergebnisse der klassischen hydrologische Vorgehensweise bei der Wasserhaushaltsmodellierung nach aktuellem Stand der Technik betrachtet.

2. Einleitung

2.1 Hintergrund

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Entwicklung und Erprobung eines integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden" – kurz REGKLAM – werden Strategien für den Umgang mit den regionalen Auswirkungen des Klimawandels entwickelt. REGKLAM ist eines von sieben Modellprojekten in Deutschland. Gefördert wird REGKLAM vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten". KLIMZUG unterstützt Regionen in Deutschland dabei, regionalspezifische Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu entwickeln und umzusetzen. Die geförderten Projekte haben Vorbildfunktion für andere Regionen Deutschlands.

Aktuelle Klimaprojektionen zeigen tendenziell eine Zunahme der Temperatur, längere und extremere Trockenperioden und ein sich veränderndes Niederschlagsregime (BERNHOFER et al. 2011). Im Rahmen des REGKLAM-Teilprojektes 3.2.1 - "Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren" - werden Auswirkungen dieser projizierten sich ändernden klimatischen Randbedingungen auf den Wasserhaushalt in einem hydrologischen Talsperreneinzugsgebiet untersucht und quantifiziert. Um diesen Ansprüchen ansatzweise gerecht zu werden, wurden wie in Kapitel 1 (Präambel) erwähnt zwei Strategien verfolgt. In diesem Produktbericht wird die erste angewandte Strategie, eine „klassische" Herangehensweise nach aktuellem Stand der Technik erläutert. Die Ergebnisse dieser „klassischen" hydrologischen Modellierung kann mögliche Änderungen des Wasserhaushaltes aufzeigen, welche sich als Resultat auf die Eingabe der projizierten Klimaszenarien ergeben, ohne jedoch den Einfluss des Klimawandels auf die Prozess bestimmenden Charakteristika des Einzugsgebietes und die Unsicherheiten der Projektionen berücksichtigen zu können. Diese Strategie weist neben den Unsicherheiten aktueller Klimaprojektionen auch die fehlende Berücksichtigung wesentlicher physikalischer Prozesse und nicht berücksichtigte Rückkopplungseffekte im System Boden-Pflanze-Atmosphäre auf. Im Resultat kann so die Abflussbildung und -konzentration des durch den Klimawandel geprägten Systems nicht realitätsnah genug abgebildet werden, was die Aussagekraft des so berechneten Wasserhaushalts der unterschiedlichen Teilflächen und damit des gesamten Gebietes erheblich einschränkt.

Neben möglichen Einflüssen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt werden auch Auswirkungen auf die Charakteristik der Zuflüsse zu den Talsperren und damit Auswirkungen auf die Trink- und Brauchwasserversorgung im Einzugsgebiet bestimmt. Die Ergebnisse können dann zum Entwurf von Entwicklungsszenarien, welche die Grundlage für Anpassungs- und Mitigationsstrategien für die Talsperrenbewirtschaftung, die Rohwasseraufbereitung und das wasserbezogene Landnutzungsmanagement im Einzugsgebiet darstellen, dienen. Neben den aus der Bandbreite existierender Klimaprojektionen resultierenden Unsicherheiten stehen die Unsicherheiten der angewendeten „klassischen" deterministischen Modellierung des Wasserhaushaltes im Fokus der Untersuchungen.

2.2 Ziele

Die Ziele innerhalb des Teilprojektes sind als Produkte formuliert. Das erste Produkt (P3.2.1a) - dessen Inhalte, Vorgehensweise und Ergebnisse im vorliegenden Ergebnisbericht aufgeführt werden - umfasst die Ermittlung des Wasserhaushaltes für projizierte Klimaszenarien in einem ausgewählten Talsperreneinzugsgebiet. Dafür wird, wie bereits erwähnt, im Rahmen dieses Produktberichtes auf die „klassische" hydrologische Modellierung nach aktuellem Stand der Technik eingegangen. Die sich ergebenden Projektionen des Wasserhaushaltes werden mit dem rezent beobachteten Wasserhaushalt verglichen und signifikante Änderungssignale von einzelnen Wasserhaushaltsgrößen identifiziert. Zusätzlich werden Unsicherheiten der hydrologischen Modellierung betrachtet.

3. Das Untersuchungsgebiet

3.1 Lage

Die Auswirkungen projizierter Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt werden beispielhaft im Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz untersucht (Lupengebiet, Abbildung 1).

Abbildung 1: Lage des Einzugsgebietes der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 in der REGKLAM-Modellregion (Quelle: IÖR 2010).

Der Grund zur Auswahl dieses Gebietes ist das darin befindliche Talsperrenverbundsystem Lehnmühle-Klingenberg, welches mit den Talsperren Rauschenbach (an der Flöha) und Lichtenberg (an der Gimmlitz) maßgeblich für die Trinkwasserversorgung des gesamten Weißeritzkreises, der Stadt Freital und zu ca. 60% der Stadt Dresden verantwortlich ist.

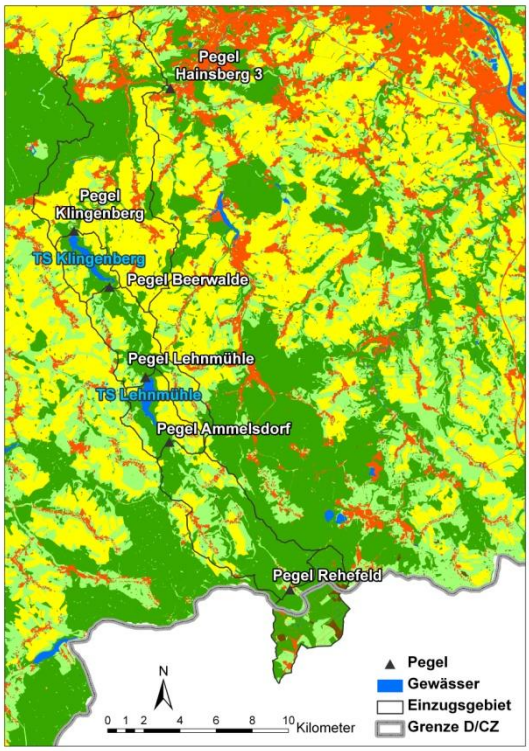


Abbildung 2: Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 mit Teileinzugsgebieten, Talsperren und Lage der Pegel. (Hintergrund: CIR Landnutzungsdaten, LfULG 2005).

Das Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz liegt südwestlich von Dresden. Es erstreckt sich mit einer Gesamtfläche von ca. 162 km² von den oberen Kammlagen des Osterzgebirges im südlichen Teil

aus ca. 909 m ü. NN bis hin zu 191 m ü. NN am Pegel Hainsberg 3 im nördlichen Teil (Abbildung 2). Die durchgeführten Untersuchungen und Simulationen des Wasserhaushaltes im Teilprojekt beschränken sich auf das Teileinzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Auslasspegel der Talsperre Klingenberg (Pegel Klingenberg) im Weiteren als Untersuchungsgebiet bezeichnet. Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von ca. 90 km². Davon befinden sich ca. 12 km² auf tschechischem Staatsgebiet.

3.2 Topografie

Das Untersuchungsgebiet besitzt ein ausgeprägtes Relief und ist von den Kammlagen des Osterzgebirges im Süden nach Norden hin abnehmend höhengegliedert. Die Höhendifferenz beträgt bis zu dem in 357 m ü. NN Höhe gelegenen Pegel Klingenberg ca. 540 m (Abbildung 3).

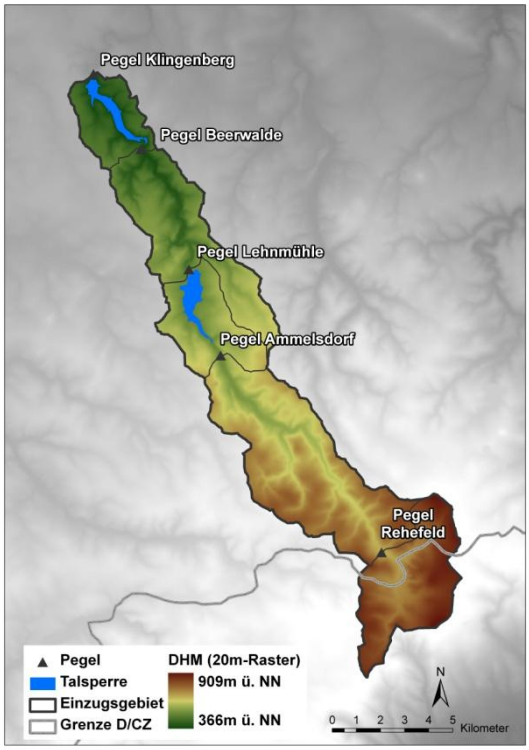


Abbildung 3: Digitales Höhenmodell (DHM) des Untersuchungsgebietes (Basis: kombiniertes 20 Meter DHM von Sachsen und angrenzenden Bereichen Tschechiens, LfULG 2009).

Durch die Hebung des Erzgebirges im Zuge der alpidischen Gebirgsbildung und die gleichzeitig stattfindende Erosion entstanden charakteristische Flusstäler. Die teilweise recht großen Höhenunterschiede zwischen den Flusstälern und den umliegenden Hängen spiegeln sich im Gefälle wider (Abbildung 4). Dieses erreicht im Einzugsgebiet an den flussnahen Hängen bis zu 45°. Das recht hohe Gefälle, die langestreckte Form mit in etwa gleichlangen Fließstrecken der linken und rechten Nebengewässer zum Hauptgerinne der Wilden Weißeritz lassen auf schnelle Gebietsreaktionen in Bezug auf stärkere lokale Regenereignisse und auch auf Schneeschmelzprozesse in den oberen Lagen schließen. Der damit verbundene vergleichsweise schnelle Abtransport von Wasser hätte Konsequenzen für die Wasserverfügbarkeit im Gebiet und damit auch auf den Wasserhaushalt.

In Abbildung 5 sind die Hauptausrichtungen des Einzugsgebietes dargestellt. Bedingt durch den Verlauf der Wilden Weißeritz von Süden nach Norden und dem daraus resultierenden Taleinschnitt ergibt sich grob eine „Teilung" des Einzugsgebietes in – in Fliessrichtung blickend – links gelegene Flächen mit einer überwiegend nördlich bis östlichen Hangneigung und rechts gelegene Flächen mit einer eher südlich bis westlichen Hangneigung.

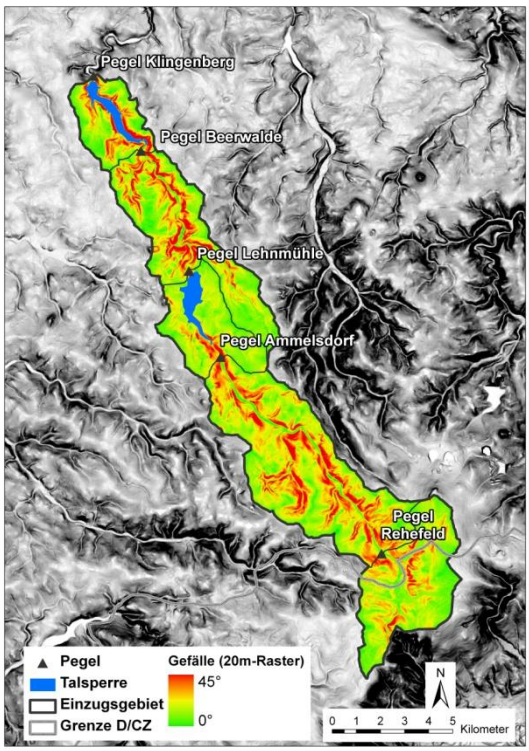
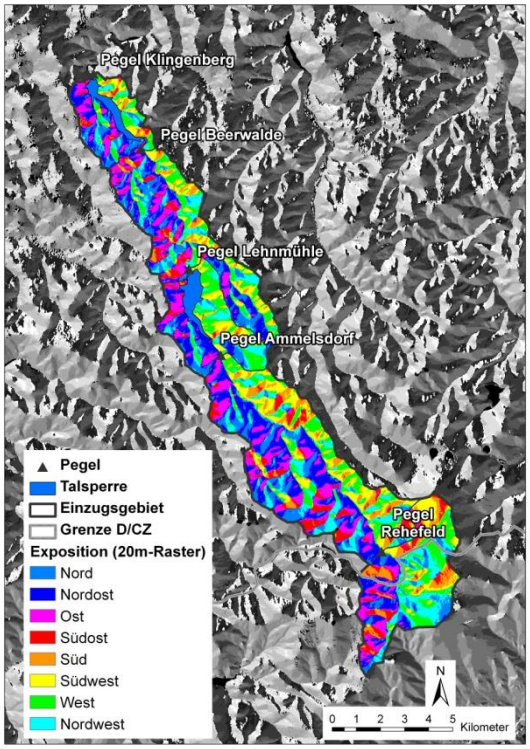


Abbildung 4: Geländegefälle im Untersuchungsgebiet (Basis: kombiniertes 20 Meter DHM von Sachsen und angrenzenden Bereichen Tschechiens, LfULG 2009).



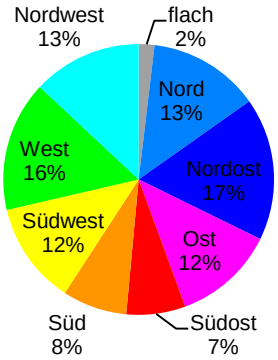


Abbildung 5: Exposition im Untersuchungsgebiet (Basis: kombiniertes 20 Meter DHM von Sachsen und angrenzenden Bereichen Tschechiens, LfULG 2009).

3.3 Klima

Das Untersuchungsgebiet befindet sich nach der genetischen Klimaklassifikation von NEEF im Übergangsklima der gemäßigten Klimazone. Das Übergangsklima, welches nur in Europa vorkommt, bildet den Übergang zwischen dem Seeklima der Westseiten und dem kühlen Kontinentalklima. Dabei wird das Klima maßgeblich durch außertropische Westwinde mit Zyklonen und Antizyklonen bestimmt. Geprägt ist das Klima durch einen jahreszeitlichen Verlauf einzelner Klimagrößen, insbesondere der Temperatur und des Niederschlages. Weitere Merkmale sind deutliche Tag- und Nachtunterschiede in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Die Temperatur ist im Winter nahe oder leicht unter dem Gefrierpunkt und erreicht ihr Maximum in den Sommermonaten. Ganzjährig fallen Niederschläge mit einem leichten Maximum im Sommer.

Aufgrund der relativ großen Höhendifferenzen im Untersuchungsgebiet gibt es lokal deutliche Unterschiede. Verdeutlicht sei dies anhand der beiden Klimadiagramme für die Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Dresden-Klotzsche, stellvertretend für die unteren Bereiche des Untersuchungsgebietes und Zinnwald-Georgenfeld, repräsentativ für die oberen Lagen des Untersuchungsgebietes (Abbildung 6 und Abbildung 7).

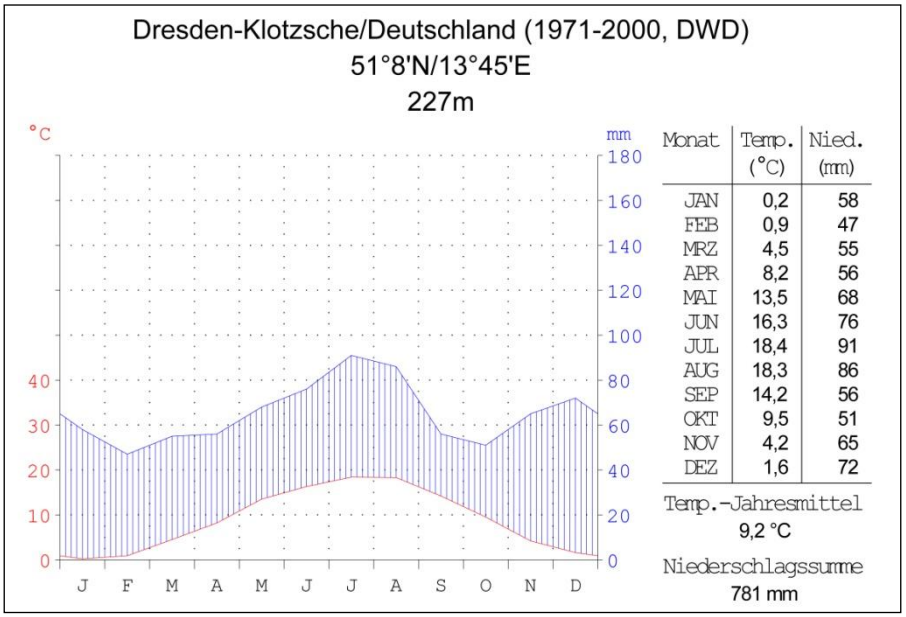


Abbildung 6: Klimadiagramm der DWD-Station Dresden-Klotzsche (ID 1048) mit mittleren Monatswerten der Temperatur und mittleren Monatssummen des nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlages im Zeitraum vom 01.01.1971 bis 31.12.2000.

Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der Temperatur mit zunehmender Höhe. Im langjährigen Jahresmittel von 1971 bis 2000 beträgt die Temperatur in Zinnwald nur noch die Hälfte der in Dresden-Klotzsche beobachteten, was einer mittleren Temperaturabnahme von ca. 0,7K pro 100m Höhenunterschied entspricht. Diese Temperaturdifferenz ist innerjährlich in etwa gleichmäßig auf die einzelnen Monate verteilt. Das hat zur Folge, dass die Monatsmittelwerte der Temperatur in den Wintermonaten unterhalb des Gefrierpunktes liegen. Umgekehrt verhält es sich bei den Niederschlägen, welche ganzjährig mit der Höhe zunehmen. Der Unterschied beträgt in der mittleren Jahressumme in etwa 360mm und verteilt sich analog zur Temperatur im Mittel relativ gleich über das gesamte Jahr.

Daraus resultierende Besonderheiten des Untersuchungsgebietes spiegeln sich höhenabhängig im Pflanzenwachstum, dem Beginn der phänologischen Phasen, der Schneeakkumulation und Schneeschmelze wider, wodurch der Wasserhaushalt des Gebietes maßgeblich beeinflusst wird.

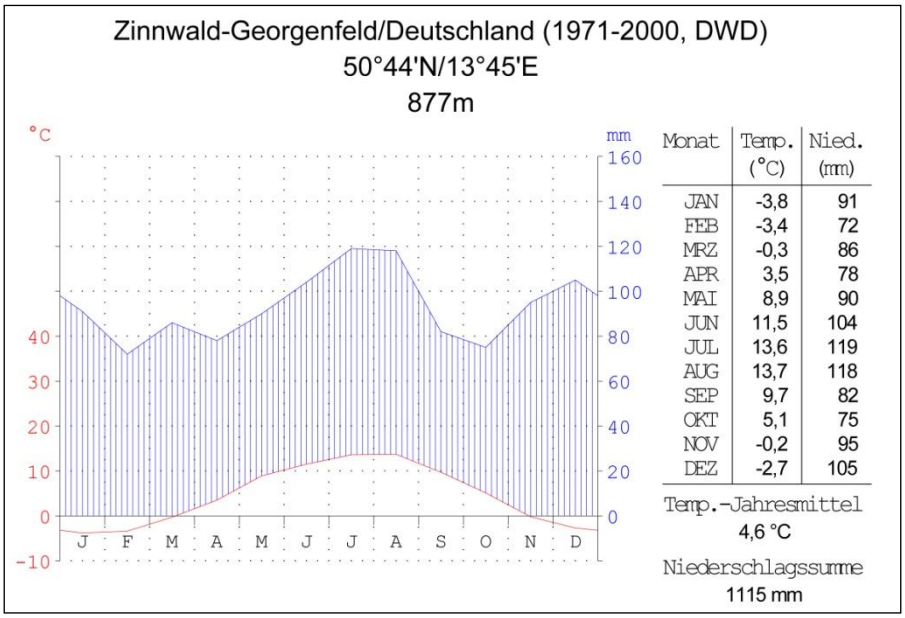


Abbildung 7: Klimadiagramm der DWD-Station Zinnwald-Georgenfeld (ID 5779) mit mittleren Monatswerten der Temperatur und mittleren Monatssummen des nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlages im Zeitraum vom 01.01.1971 bis 31.12.2000.

Weitere Details und Merkmale zum Klima im Osterzgebirge sind dem Heft 1 der REGKLAM-Publikationsreihe (BERNHOFER et al. 2009) zu entnehmen.

3.4 Landnutzung

Das Untersuchungsgebiet ist mit einer sehr gering besiedelten Fläche von ca. 3 bis 4% sehr ländlich geprägt. Die derzeitigen Hauptlandnutzungsformen, welche in etwa 90% des Gebietes ausmachen (CIR2005, siehe Kapitel 4.4.6), beschränken sich auf Acker-, Grünland- und Waldflächen. Dabei ist der Anteil von Acker- und Grünlandflächen mit jeweils ca. 20% in etwa ausgeglichen. Die Hälfte des Einzugsgebietes ist mit zum größten Teil staatlich bewirtschafteten Wäldern bedeckt. Diese ca. 50% Waldflächen verteilen sich auf 70% Nadelwälder und zu jeweils ca. 15% in Laub- und Mischwälder. Als Hauptbaumart tritt die Gemeine Fichte (Picea abies) auf. Die Verteilung der Landnutzung im Gebiet ist relief- und klimabedingt. Während die Flächen des Einzugsgebietes oberhalb 700m überwiegend bewaldet sind, nimmt der Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen in den unteren Lagen des Einzugsgebietes zu (Abbildung 8). Eine Besonderheit sind die Moorflächen des Zinnwald-Georgenfelder Hochmoores im Südosten des Untersuchungsgebietes. Flächenmäßig beträgt der Anteil am gesamten Untersuchungsgebiet ca. 1%. Aufgrund der Speicherwirkung und insbesondere auch aufgrund der teilweise aus dem Einzugsgebiet heraus entwässernden Gräben (z.B. Neugraben) können diese Moorflächen den Gebietswasserhaushalt beeinflussen.

Die zuvor angeführte Charakterisierung des Untersuchungsgebietes stellt eine Momentaufnahme dar. Im Zuge von Besiedlung, wirtschaftlicher, technologischer und kultureller Entwicklungen in der Region in den letzten Jahrhunderten befand und befinden sich die Landschaft und deren Nutzung im steten Wandel. Einen umfangreichen Überblick über die Entwicklung und Geschichte der Landschaften und Landnutzungen im Osterzgebirge gibt WEBER (2010).

Auf eine wichtige Entwicklung in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts, welche den rezenten Zeitraum der Untersuchungen unmittelbar betrifft, sei an dieser Stelle noch hingewiesen. Durch die zunehmende Industrialisierung und den Bergbau (u.a. Kohle und Eisenerz) im Osterzgebirge kam es zu einer erheblichen Zunahme von Schadstoffemissionen. Vor allem die dominierenden Fichtenreinbestände wurden durch hohe Schwefeldioxidbelastungen latent geschädigt. Zusätzliche sommerliche Trockenheit in den 80'er Jahren des 20. Jahrhunderts bewirkte eine Massenvermehrung von Sekundärschädlingen, wie z.B. dem Großen Buchdrucker – einer Borkenkäferart. Innerhalb weniger Jahre starben dadurch mehrere tausend Hektar Fichtenwald ab (WEBER 2010). Erst durch die Wiedervereinigung Deutschlands 1990, dem daraus resultierenden Zusammenbruch der

Industrie in der Region und dem Einbau von Filteranlagen in Kraftwerken und Industrieanlagen auf deutscher und tschechischer Seite konnte die Situation des Waldsterbens deutlich verbessert werden. Die möglichen Auswirkungen eines solchen massiven Waldsterbens auf die Abflussbildung, Abflusskonzentration und damit auch auf den Wasserhaushalt wurden unter anderem am Beispiel des Borkenkäferbefalls im Bayrischen Wald in den 90'er Jahren des letzten Jahrhunderts durch SCHWARZE & BEUDERT (2009) untersucht und quantifiziert.

Dass die Landnutzung im Untersuchungsgebiet innerhalb kurzer Zeiträume relativ starken Veränderungen unterliegen kann, zeigen neben den eben erwähnten Auswirkungen von Luftverschmutzungen auch die Unterschiede in den CIR-Daten der Luftbildüberfliegungen aus den Jahren 1992/93 und 2005. Dabei nahmen in den 12 Jahren die Ackerflächen auf Kosten der Grünlandflächen um ca. 8% zu. Staatliche oder durch die EU bereitgestellte Subventionen für bestimmte Feldfrüchte wie z.B. Raps und Mais begünstigten diesen Zuwachs ackerbaulich genutzter Flächen.

Die zukünftige Entwicklung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet ist sehr schwer abzuschätzen und von mehreren Faktoren abhängig. Neben möglichen direkten und indirekten Auswirkungen eines veränderten Klimas spielen ökonomische, technologische und ökologische Aspekte eine entscheidende Rolle.

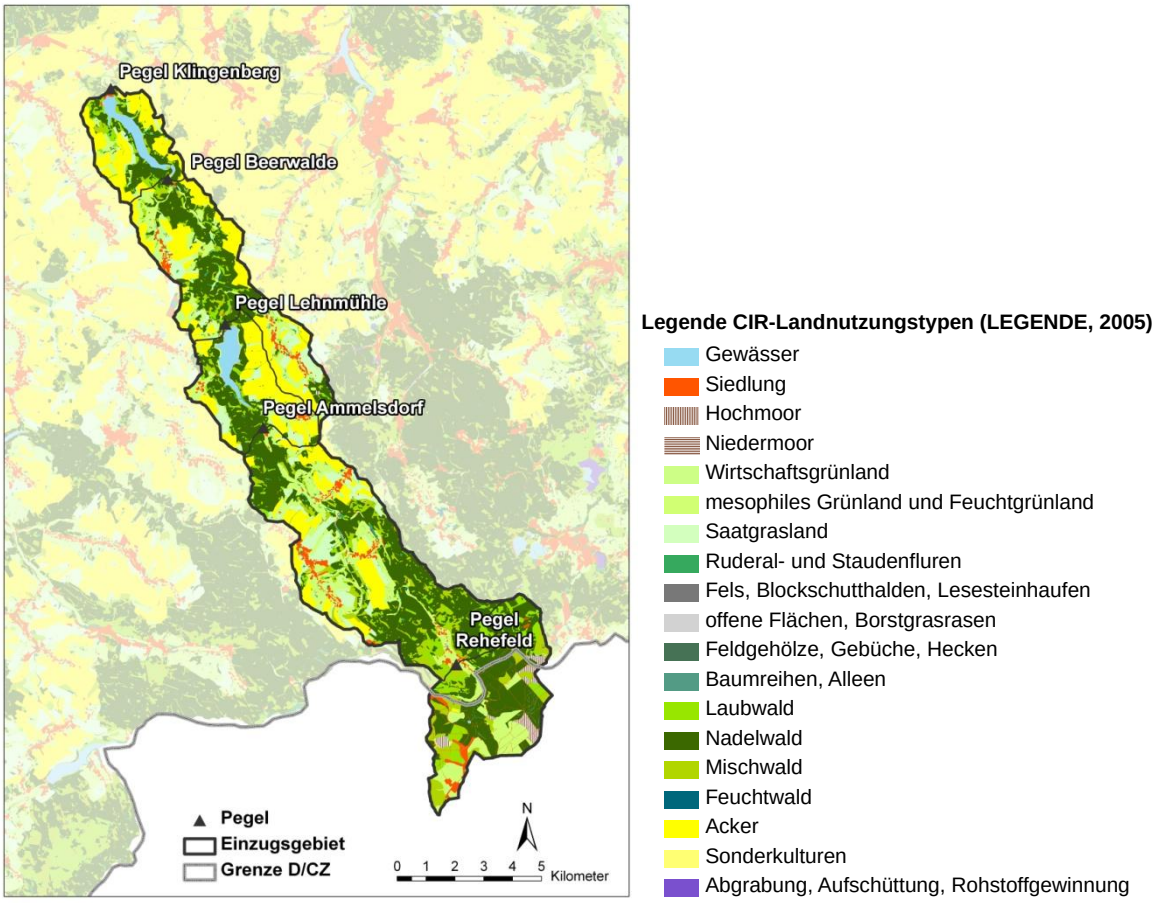


Abbildung 8: Verteilung der Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet auf Basis der „Legendeneinteilung" der Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus Colorinfrarot-Bildern (LfULG 2005).

3.5 Boden

Ausgangspunkt für die Pedogenese des Bodens im Osterzgebirge sind vorwiegend Gesteinsverwitterungsdecken des anstehenden Festgesteins, welche überwiegend während der Weichsel-Kaltzeit am Ende des Pleistozäns entstanden. Es kam innerhalb der periglazialen Verhältnisse in den Kaltzeiten des Pleistozäns zu einer flächendeckenden Entwicklung von Frostschuttdecken. Zusätzlich lagerten sich inselartig äolische Substrate, in Form von Lössderivaten bis zu Höhenlagen von

500m ü.NN im Oberboden der Schuttdecken an (MANNSFELD & RICHTER 1995). Die Unterböden enthalten dagegen einen wesentlich höheren, mit der Tiefe zunehmenden Anteil an Festgesteinsmaterial. Untersuchungen der jüngsten Vergangenheit zeigen die noch vorhandene einheitliche Ausprägung von periglazialen Lockergesteinsdecken (LEHMANN & PRÄGER 1992). Auf dem verwitterten und periglazial verlagerten Festgestein der Metamorphite und Magmatite haben sich im Laufe der letzten Jahrtausende größtenteils Braunerden, Podsole und Pseudogleye gebildet (KAULFUß & KRAMER 2000). Über dem metamorphen Gesteinen Gneis, Glimmerschiefer und Phyllit bildeten sich überwiegend sandig-lehmige Braunerden, welche heute die Grundlage für eine landwirtschaftliche Nutzung darstellen. Über magmatischen Ergussgesteinen (z.B. Porphyr) entwickelten sich häufiger Podsole und vereinzelt podsolierte Braunerden, welche fast ausschließlich forstwirtschaftlich genutzt werden (BERNHARDT 1995; MANNSFELD & RICHTER 1995).

Die Bodenbildung wird neben den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Verwitterungsdecken von weiteren Faktoren beeinflusst. Dabei spielen das Klima, das Relief, die Vegetation und anthropogene Einflüsse eine wichtige Rolle. Die Böden im Osterzgebirge sind daher nicht nur flächig, substratbedingt sondern auch horizontal, klima- und reliefbedingt differenziert (KAULFUß & KRAMER 2000; MANNSFELD & RICHTER 1995; KAULFUß 2001). Dies spiegelt sich im Untersuchungsgebiet in der Differenzierung des Bodens mit vermehrt auftretenden Podsolen in den Hoch- und Kammlagen und einem höheren Anteil an Braunerden in den mittleren und unteren Lagen wider. Eine Verteilung der Bodentypen auf Basis des amtlichen bodenkundlichen Kartenwerkes Sachsen im Maßstab 1:50.000 (BK50, LfULG, Stand 11/2011) ist in Abbildung 9 dargestellt.

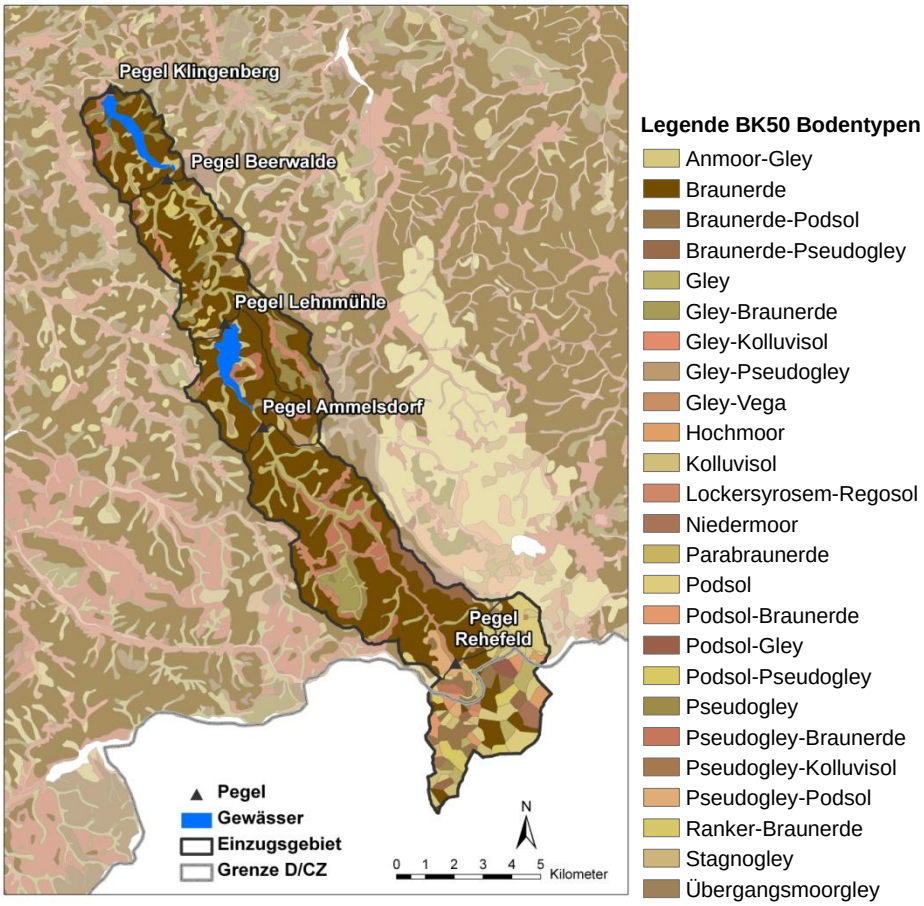


Abbildung 9: Verteilung der Bodentypen im Untersuchungsgebiet auf Grundlage von Daten des Fachinformationssystems Boden (BK50, LfULG 2011).

Neben dem relativ hohen Anteil an Braunerden (ca. 50%) sind fluviale Ablagerungen in den Flusstälern des Untersuchungsgebietes deutlich zu erkennen. Eine Besonderheit im Untersuchungsgebiet sind die Moorböden. Seit Beginn des Holozäns bildeten sich vor allem im Bereich der Quellmulden bzw. auf den Schuttdecken der ebenen Flächen in den Kammlagen Hang- und Regenmoore aus. Gegenwärtig ist die Torfbildung jedoch meist eingeschränkt und die Moore sind teilweise verheidet

und wurden melioriert (LEHMANN & PRÄGER 1992). Eine Gemeinsamkeit der Böden im Untersuchungsgebiet ist die geringe Mächtigkeit von teilweise wenigen Zentimetern bis zu ca. 2m Entwicklungstiefe.

3.6 Geologie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Erzgebirge, welches aus geologischer Sicht dem Sächsischem-Thüringischem und Nordostbayerischem Grundgebirge (Saxothuringikum) zugeordnet werden kann (WALTER 1995). Die Bildung der charakteristischen Gesteinsformationen und die Ausprägung der heutigen Form des Erzgebirges erfolgten in mehreren Etappen über einen Zeitraum von mehreren Millionen Jahren. Als eine Hauptphase gilt die variskische Orogenese vor ca. 375 bis 330 Millionen Jahren. Dabei wurden Sedimente des Paläozoikums intensiv gefaltet und empor gepresst (WAGENBRETH & STEINER 1985). Es entstanden unter dem hohen Druck Metamorphite, dabei überwiegend Gneise, aber auch Phyllite und Glimmerschiefer. Zwischen diese Metamorphite drangen im Bereich des heutigen Osterzgebirges Granite, Quarzporphyre und Granitporphyre als magmatische Ergüsse vor, was zur Bildung von Erzgängen führte, die seit dem 10. Jahrhundert bergbaulich genutzt wurden (WAGENBRETH & STEINER 1982). Insgesamt haben sich in unterschiedlichen Phasen tektonischer Orogenese verbunden mit Bruch- und Spaltenbildung durch geologische Metamorphose wertvolle Erzlagerstätten von mehr als 20 Metallen gebildet (KAULFUß & KRAMER 2000). Die zuvor erwähnten charakteristischen Gesteinsarten sind auch im Anstehenden des Untersuchungsgebietes wiederzufinden. Abbildung 10 gibt einen Überblick der Verteilung der dominierenden Gesteinsarten im Untersuchungsgebiet. Dabei nehmen Gneise den Hauptanteil von ca. 60% ein.

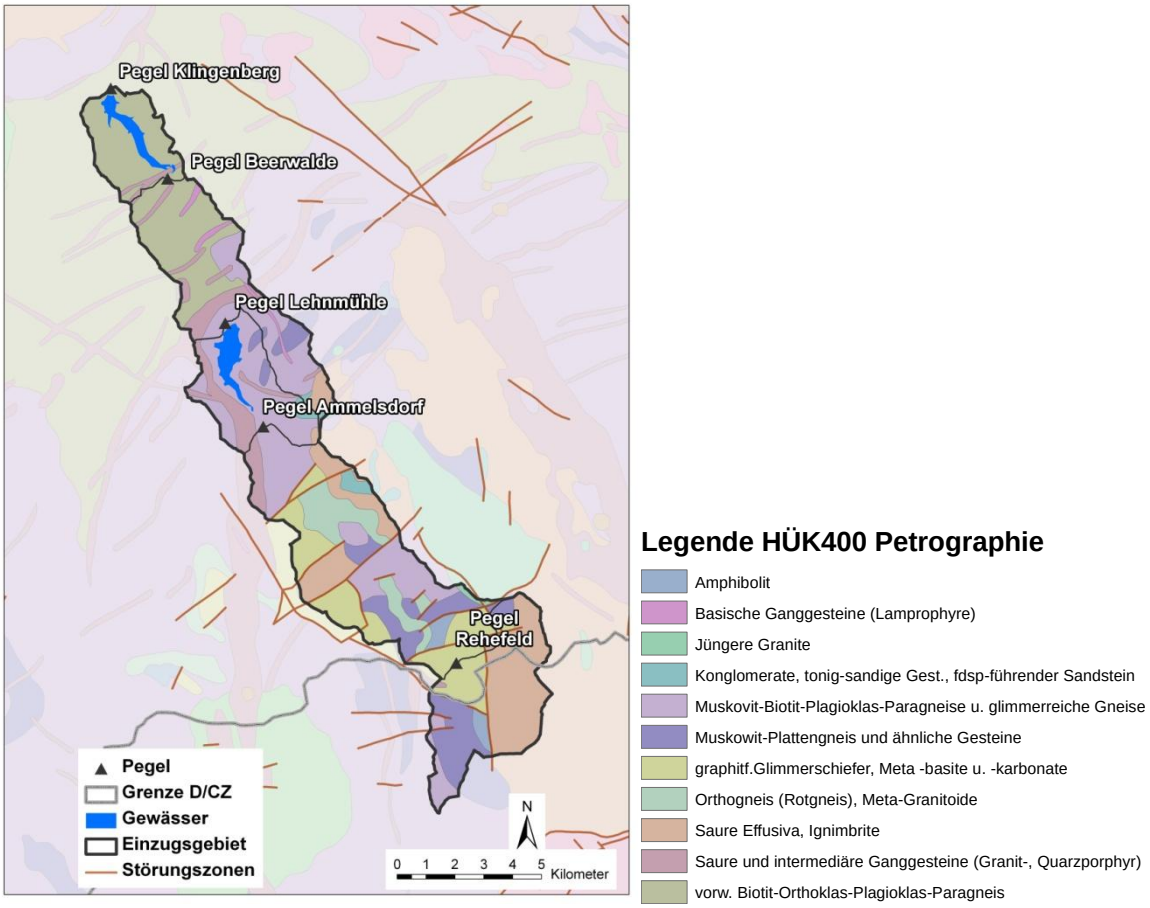


Abbildung 10: Überblick der geologischen Formationen im Untersuchungsgebiet auf Basis der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Sachsen im Maßstab 1:400.000 (HÜK 400, LfULG).

Hydrogeologisch wird das Erzgebirge als einheitliches Kluftgrundwasserleiter-System betrachtet. Es bilden sich keine großräumigen zusammenhängenden Aquifere. Fließvorgänge hängen vorwiegend

vom Relief ab und bewegen sich innerhalb der geringmächtigen Verwitterungszone zum nächsten Vorfluter. Daher sind i.d.R. oberirdisches und unterirdisches Einzugsgebiet identisch. Nur auf Kluft- und Zerrüttungszonen ist nennenswerter Grundwasserabfluss möglich, lokale Fliessbedingungen können durch den Bergbau stark beeinflusst sein (JORDAN & WEDER 1995).

Im Oberlauf der Wilden Weißeritz treten Gangstock- und deckenförmige Eruptivgesteine (postcarbonischer Granit und Quarzporphyr), Gneisformationen (Muskovit- und Biotitgneis auch bekannt als Freiberger Gneis), sowie Phyllitformation (granatführender Albitphyllit) in südöstlich streichender Richtung auf. In Flussläufen herrscht Alluvium vor. Lokal sind Moorböden und begrenzte Kalkinseln zu finden. Hydrogeologisch gesehen, sind die Porphyre gut bis stark geklüftet, weisen eine schwache Verwitterung auf und haben eine geringe Grundwasserführung. Schichtquellen treten an der Grenze zu Gneis auf. Die hochmetamorphen Gneise sind schwach bis mäßig geklüftet, weisen sandig-schluffige Verwitterungsprodukte auf und haben eine sehr geringe Grundwasserführung. Hier herrscht hypodermischer Abfluss vor. Der Phyllit hat eine geringe bis fehlende Klüftung und daher eine geringe bis fehlende Grundwasserführung. Dagegen weist das Quartär (Schotter, Schluffe) an Flussläufen eine gute Grundwasserführung auf, wenn eine größere Sedimentmächtigkeit vorhanden ist (besonders in breiten Tälern). Das örtlich auftretende Oberkarbon (bei Schönfeld) ist gut geklüftet und hat eine relativ gute Grundwasserführung.

Der Mittellauf der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Klingenberg ist durch ein Vorherrschen von Gneisformationen gekennzeichnet.

4. Material und Methoden

In den folgenden Unterkapiteln werden die grundsätzliche Vorgehensweise, das verwendete hydrologische Modell, ein objektiver Ansatz zur Modellkalibrierung, die verwendeten Daten inklusive deren Aufbereitung und die Modellparametrisierung vorgestellt und beschrieben.

4.1 Untersuchungskonzept

Für die Bestimmung des Wasserhaushaltes unter veränderten klimatischen Randbedingungen wurde ein hydrologisches Modell ausgewählt und angewendet. Eine nähere Modellbeschreibung des gewählten Modells befindet sich in Kapitel 4.2. Das Modell wurde anhand aktuellster Daten und in einer für die Untersuchungszwecke geeigneten Form für das Untersuchungsgebiet aufgebaut und parametrisiert. Es erfolgte eine Aufbereitung der Daten und eine Transformation in die vom Modell benötigten Formate. Die Beschreibung der verwendeten Datengrundlagen und deren Aufbereitung erfolgt in Kapitel 4.4. Um robuste Aussagen zu möglichen Änderungen des Wasserhaushaltes infolge der projizierten Klimaänderungen treffen zu können ist eine objektive Eichung des Modells an beobachteten Daten notwendig. Diese sogenannte Modellkalibrierung wurde anhand von beobachteten Durchflüssen mittels zwei verschiedener Gütekriterien durchgeführt. Dafür wurde ein automatisierter multikriterieller Optimierungsalgorithmus eingesetzt. Weitere Details zum multikriteriellen Optimierungs-Framework sind in Kapitel 4.5 aufgeführt. Als Ergebnis der multikriteriellen Optimierung ergaben sich mehrere Pareto-optimale Lösungen. Ein Teil dieser wurde verwendet um den Wasserhaushalt und die Anpassungsgüte im Kalibrierungs-, Validierungszeitraum und einer rezenten 30jährigen Zeitscheibe zu berechnen. Außerdem war es durch die Auswahl von mehreren Pareto-optimalen Parametersätzen und der Simulation des Wasserhaushaltes unter deren Verwendung möglich, Parameterunsicherheiten zu identifizieren. Mit einer weiter reduzierten Auswahl an Pareto-optimalen Lösungen konnten dann Klimaszenarien des statistischen Regionalmodells WETTREG2010 und des dynamischen Regionalmodells CLM gerechnet werden.

4.2 Das hydrologische Modell WaSiM-ETH

Das hydrologische Modell WaSiM (Wasserhaushalts-Simulations-Modell) ist ein rasterbasiertes, flächendifferenziertes und deterministisches Einzugsgebietsmodell. Entwickelt wurde es von SCHULLA (1997 a) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETH-Zürich). Es existieren zwei unterschiedliche Modellversionen. Die ursprüngliche Modellversion 1 verwendet im Bodenmodell den konzeptionellen TOPMODEL-Ansatz nach BEVEN & KIRKBY (1979). Dagegen wird in der Modellversion 2 der physikalisch begründete Ansatz mit der RICHARDS-Differentialgleichung (RDGL) im Bodenmodell verwendet. WaSiM befindet sich in steter Aktualisierung seitens der Modellentwickler, so werden Fehler älterer Versionen behoben, neue Fähigkeiten ergänzt oder auch Features herausgenommen. In den durchgeführten Untersuchungen kam die Modellversion 2 mit RDGL in der offiziellen Release Version 9.0.8 zum Einsatz.

Generell ist der Aufbau von WaSiM modular. Einzelne Teilmodelle können nach Bedarf zu- oder abgeschaltet werden. Die Konfiguration erfolgt über eine Steuerdatei. Als Input werden meteorologische Daten und rasterbezogene Gebietsinformationen benötigt. Minimale Voraussetzung auf meteorologischer Seite sind die Temperatur und der Niederschlag. Je nach verwendetem Teilmodell werden zusätzliche meteorologische Größen erforderlich. Im vorliegenden Fall wurden Temperatur, Niederschlag, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und relative Sonnenscheindauer genutzt (vgl. Kapitel 4.4.1). Die meteorologischen Eingangsdaten können mit WaSiM-ETH nach verschiedenen Verfahren räumlich interpoliert werden oder, wie hier geschehen, im Vorfeld räumlich interpoliert und im entsprechend benötigten WaSiM-Format zur Verfügung gestellt werden (vgl. Kapitel 4.4.4). Sämtliche vom Modell benötigte Gebietsinformationen müssen dagegen bereits räumlich verteilt vorliegen. Realisiert wird das durch ein regelmäßiges Raster mit frei wählbarer Zellgröße, ein so genanntes Grid. Notwendig sind ein digitales Höhenmodell (DHM) und jeweils ein Grid für die Bodenart und die Landnutzung im Gebiet (vgl. Kapitel 4.4.5 - 4.4.7). Außerdem wird ein Grid benötigt, in dem die zum Einzugsgebiet zugehörigen Zellen festgelegt sind (Gebietsmaske). Diese Gebietsmaske kann in Teileinzugsgebiete oder z.B. nach Höhenstufen gegliedert sein. Im Rahmen des „Preprocessings" werden mit dem Programm TANALYS (im Programmumfang von

WaSiM enthalten) weitere relevante Gebietseigenschaften anhand des DHM's berechnet. Dazu gehören u.a. das Gefälle, die Exposition und die Fliesszeiten. Die prinzipielle Modellstruktur von WaSiM ist in Abbildung Abbildung A 1 im Anhang dargestellt. Eine Übersicht zu den erwähnten räumlichen Daten enthält Abbildung A 2 im Anhang. Auf eine ausführlichere Modellbeschreibung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Modelldokumentation von SCHULLA (2012) verwiesen. Beispiele zur Anwendung des Modells finden sich in der Literatur (z.B. SCHULLA 1997 a, b und c). Im Folgenden sollen nur die für die durchgeführten Untersuchungen wesentlichen Aspekte des Modells vorgestellt werden. Dabei wird in den folgenden Unterkapiteln näher auf

- die Abflusskomponenten,
- das Bodenmodell,
- das Verdunstungsmodul,
- die dynamische Pflanzenphänologie
- und das Schneemodul

von WaSiM eingegangen.

4.2.1 Abflusskomponenten

Bevor das Wasser im Boden modelliert wird, entscheidet ein Infiltrationsmodell nach PESCHKE (1977, 1987) für jede einzelne Rasterzelle, welcher Teil des Wassers in den Boden gelangt oder direkt als Oberflächenabfluss wirksam wird. Das Infiltrationsmodell baut auf den Vorstellungen von GREEN & AMPT (1911) auf. Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Bodens, entsteht Oberflächenabfluss als Infiltrationsüberschuss. Ist die oberste Schicht des Bodens gesättigt, entsteht in dieser Zelle zusätzlicher Oberflächenabfluss als Sättigungsflächenabfluss. Beide Komponenten des Oberflächenabflusses bilden in der schneefreien Jahreszeit in WaSiM den Direktabfluss. Die Konzentration des Direktabflusses im Einzugsgebiet erfolgt über eine Flächen-Laufzeit-Funktion nach DYCK (1980) als Translationsglied. Dafür wird das Gebiet in Zonen gleicher Fliesszeiten eingeteilt. Nach der Translation wird in der untersten Fliesszeitzone am Gebietsauslass die Retention berechnet. Dieser Gebietsrückhalt wird in Form eines Einzellinearspeichers (ELS) berücksichtigt (Gleichung (1)):

$$Q_{D_i} = Q_{D_{i-1}} \times e^{-\frac{\Delta t}{k_D}} + Q_D \times \quad 1 - e^{-\frac{\Delta t}{k_D}} \qquad (1)$$

mit	Q_{D_i}	…	durch ELS transformierter Direktabfluss im Intervall i	(mm)
	$Q_{D_{i-1}}$	…	Direktabfluss aus dem vorhergehenden Intervall i-1	(mm)
	Q_D	…	im Intervall in der untersten Fliesszeitzone zur Verfügung stehende Direktabflussmenge bezogen auf das gesamte Gebiet	(mm)
	Δt	…	Zeitintervall	(h)
	k_D	…	Speicherkonstante des Direktabflussspeichers	(h)

Maßgeblichen Einfluss auf die Höhe und zeitliche Verteilung des Direktabflusses am Gebietsauslass (Abflusskonzentration) hat damit die Speicherrückgangskonstante k_D des linearen Einzelspeichers. Diese beschreibt die mittlere Verweilzeit des Wassers im Speicher (DYCK & PESCHKE 1995).

Das infiltrierte Wasser wird dann entweder über präferentielle Fließwege dem Grundwasser zugeführt oder bei entsprechend vorhandenen Stauhorizonten im Boden dem Zwischenabflussspeicher zugeführt. Der Zwischenabfluss (Interflow) wird dann für jede einzelne Zelle bestimmt und bereits dort durch einen ELS geleitet. Die Berechnung erfolgt analog zu der des ELS für den Direktabfluss (Gleichung (1)). Die Speicherrückgangskonstante k_i bestimmt die Verweilzeit im Zwischenabfluss-

speicher und hat damit Einfluss auf die zeitliche Verteilung des gebildeten Interflows (Abflusskonzentration). Der mittlere Gebiets-Interflow wird dann durch den Mittelwert aller Interflow-Komponenten aus den einzelnen Gridzellen eines (Teil-) Gebietes berechnet (SCHULLA 1998).

Beide Speicherrückgangskonstanten k_D und k_i beschreiben damit lediglich die zeitliche Verteilung des Abflusses, also die Form der Ganglinie. Bestimmt werden können sie über Ganglinienanalyseverfahren oder aus Erfahrungswerten. Empfehlenswert ist jedoch eine Kalibrierung beider Parameter innerhalb von plausiblen Parametergrenzen, um die Abflussdynamik des jeweiligen Gebietes möglichst gut wiedergeben zu können.

Für die Berechnung von Basisabfluss stehen in WaSiM zwei Varianten zur Verfügung. Auf die erste, die Anwendung des implementierten Grundwassermodells, soll hier nicht näher eingegangen werden, da dieses nicht verwendet wurde. Ohne diese Ankopplung des Grundwassermodells an die ungesättigte Zone wird der Basisabfluss als zweite Variante in WaSiM in konzeptioneller Weise ermittelt. Dabei wird die folgende Gleichung (2) angewendet.

$$Q_B = Q_0 \times K_s \times e^{\frac{(h_{GW} - h_{geo,0})}{k_B}} \qquad (2)$$

mit	Q_B	…	Basisabfluss	($m^3 \cdot s^{-1}$)
	Q_0	…	Skalierungsfaktor für Basisabfluss	(-)
	K_s	…	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	($m \cdot s^{-1}$)
	h_{GW}	…	Grundwasserspiegel	(m ü.M.)
	$h_{geo,0}$	…	Geländeoberkante (Oberkante 1.Schicht)	(m ü.M.)
	k_B	…	Auslaufkonstante für Basisabfluss	(m)

Basisabfluss kann auf allen Rasterzellen des Einzugsgebietes entstehen. Die Parameter Q_0 und k_B sind auf Empfehlung der Modellentwickler zu kalibrieren. Eine detailliertere Beschreibung der Bestimmung der drei Abflusskomponenten Direkt-, Zwischen- und Basisabfluss ist in der Dokumentation des Modells enthalten (SCHULLA 2012).

4.2.2 Bodenmodell mit RICHARDS-Ansatz

Im Gegensatz zu dem eher konzeptionellen TOPMODEL-Ansatz wird in der verwendeten WaSiM Modellversion 2 die RICHARDS-Differentialgleichung (RDGL) im Bodenmodell berücksichtigt. Dieser physikalisch begründete Ansatz teilt den Boden in jeder Rasterzelle des Gebietes in diskrete vertikale Schichten ein. Die diskretisierte Form der RDGL (Gleichung (3)) ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung für die eindimensionale vertikale Bewegung des Wassers in der ungesättigten Zone.

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta z} = q_{in} - q_{ab} \qquad (3)$$

mit	θ	…	Wassergehalt	($m^3 \cdot m^{-3}$)
	t	…	Zeit	(s)
	q	…	Spezifischer Fluss	($m \cdot s^{-1}$)
	z	…	Vertikalkoordinate	(m)
	q_{in}	…	Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht	($m \cdot s^{-1}$)
	q_{ab}	…	Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht (Interflow, …)	($m \cdot s^{-1}$)

Um die Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung (pF-Kurve) und die Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit vom Wassergehalt zu berücksichtigen, wird die Parametrisierung dieser beiden Bodenkennlinien nach VAN GENUCHTEN (1976) verwendet. Dabei werden die beiden empirischen Parameter α und n, der Restwassergehalt θ_{res}, der Sättigungswassergehalt θ_{sat} und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s für jede Bodenart benötigt. Die hydraulischen Leitfähigkeiten können zusätzlich über den empirischen Parameter k_{rec}, welcher die Abnahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe beeinflusst, variiert werden. Auch hier sei für eine ausführlichere Beschreibung auf die Modelldokumentation (SCHULLA 2012) verwiesen.

4.2.3 Verdunstungsmodul

Potentielle Verdunstung

Für die Ermittlung der potentiellen Verdunstung (potentielle Evapotranspiration) wird in WaSiM der Ansatz nach Penman-Monteith (MONTEITH, 1975; BRUTSAERT, 1982) verwendet. Diese wird in Form eines Energieflusses bzw. als Strom latenter Gleichung (4) beschrieben. Durch Division von λE in (KJ/m²) mit der latenten Verdunstungswärme λ in (KJ/Kg) kann die Verdunstungshöhe in mm Wassersäule berechnet werden (mm/m²≡Kg/m²). Die Gleichung setzt sich aus dem Strahlungsterm R_N und einem zweiten Term, welcher die Einflüsse der Vegetation, der aerodynamischen Rauhigkeit und der Luftfeuchtigkeit beinhaltet zusammen. In diesem Modellansatz wird die potentielle Verdunstung mit Hilfe der Oberflächenwiderstände landnutzungsabhängig berechnet und durch die Bodenfeuchte reduziert. Die einzelnen Größen der Gleichung (4) und deren Bestimmung wird in der Modelldokumentation (SCHULLA 2012) eingehend beschrieben.

$$\lambda E = \frac{3.6 \times \frac{\Delta}{\gamma_p} \times \ R_N - G \ + \frac{\rho \times c_p}{\gamma \times r_a} \times \ e_s - e \ \times t_i}{\frac{\Delta}{\gamma_p} + 1 + \frac{r_s}{r_a}} \qquad (4)$$

mit	λ	...	latente Verdunstungswärme $\lambda = (2500.8 - 2.372 * T)$	(KJ·Kg^{-1})
	E	...	Fluss latenter Wärme	(mm·m^{-2})
	Δ	...	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve	(hPa·K^{-1})
	R_N	...	Nettostrahlung	(Wh·m^{-2})
	G	...	Bodenwärmefluss (pauschal 0.1 bis 0.2$*$ R_N)	(Wh·m^{-2})
	ρ	...	Dichte der Luft	(Kg·m^{-3})
	c_p	...	spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	(KJ· Kg^{-1}·K^{-1})
	e_s	...	Sättigungswasserdampfdruck bei aktueller Lufttemperatur	(hPa)
	e	...	aktueller Wasserdampfdruck	(hPa)
	t_i	...	Anzahl Sekunden im Berechnungsintervall	(s)
	γ_p	...	Psychrometerkonstante	(hPa·K^{-1})
	r_s	...	Bulk-Oberflächenwiderstand	(s·m^{-1})
	r_a	...	Bulk-aerodynamischer Widerstand	(s·m^{-1})

In die Berechnung gehen unter anderem folgende Parameter mit ein und sind in der Steuerdatei des Modells anzugeben:

- die Albedo α für die Ermittlung der Nettostrahlung (-),
- die aerodynamische Rauhigkeitslänge z_0 in (m) für jede Landnutzungsform für den aerodynamischen Widerstand r_a in (s/m)
- Angaben zu den minimalen Oberflächenwiderständen der Pflanzen r_s und r_{sc} (bei voller Wasserversorgung und dichtem Bewuchs) in (s/m)
- sowie der Blattflächenindex LAI für den Oberflächenwiderstand in (m²/m²).

Bei einer Modellierung in Tagesschrittweite erfolgt innerhalb des Modells eine Unterteilung des Zeitintervalls in Tag und Nacht sowie eine Anpassung der Temperatur. Die dafür benötigten im Modell festgesetzten monatlichen maximalen Differenzen von Tages- und Nachtmitteltemperaturen wurden im Zuge dieser Untersuchungen für jede simulierte 30jährige Zeitscheibe anhand der jeweiligen für die Modellierung verwendeten Klimadaten im Vorfeld der Modellierung ermittelt und die empirisch für die Nordschweiz durch SCHULLA (1997) ermittelten Tabellenwerte („default Parametrisierung" in WaSiM-Steuerdatei) damit jeweils ersetzt. Das mittlere Aufteilungsmaß c_T und dessen Schwankungsbreite Δc_T wurden ebenfalls anhand von beobachteten Klimadaten ermittelt und für alle weiteren Berechnungen (alle Zeitscheiben, alle Klimadaten) konstant gehalten. Ebenso wurde die Abklingkonstante k_T für alle Zeitscheiben und unabhängig vom verwendeten Klimainput konstant gesetzt. Für die konkrete Umsetzung der Aufteilung in Tag und Nacht im Modell sei an dieser Stelle ebenfalls auf die Dokumentation (SCHULLA 2012) verwiesen.

Reale Verdunstung

Die reale Verdunstung (reale Evapotranspiration) einer Landoberfläche ist abhängig vom Wasserdargebot. Ist die Wasserversorgung nicht unbeschränkt gewährleistet, wird die potentielle Evapotranspiration reduziert und es ergibt sich die unter den gegebenen Bedingungen mögliche reale Evapotranspiration. In der verwendeten WaSiM Modellversion 2 mit Richards-Gleichung wird diese Reduktion durch die Berücksichtigung der Saugspannung und Bodenfeuchte des Bodens durchgeführt. Entspricht die Bodenfeuchte des Bodens der Bodenfeuchte bei Feldkapazität sind potentielle und reale Verdunstung gleich. Erreicht die Bodenfeuchte des Bodens die Bodenfeuchte beim permanenten Welkepunkt ist die reale Verdunstung null. Im Bereich zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt wird die reale Verdunstung reduziert. Neben dieser Reduktion aufgrund zu geringer Bodenfeuchte wird auch der reduzierende Einfluss von zu hoher Bodenfeuchte durch anaerobe Verhältnisse berücksichtigt. Durch die Angabe von pflanzenspezifischen Grenzsaugspannungen wird neben der Bodenart auch die Vegetation einbezogen (SCHULLA 1998).

4.2.4 Dynamische Pflanzenphänologie

Aufgrund der projizierten Temperaturzunahme ist ein früherer jährlicher Beginn der Vegetationsperiode zu erwarten. Diese Veschiebung und gegebenenfalls auch eine Verlängerung der gesamten Vegetationsperiode könnten den Wasserhaushalt durch eine zunehmende Verdunstung beeinflussen. Daher ist es wichtig, dass der Beginn der Pflanzenwachstumsphase dynamisch abgebildet werden kann. In WaSiM ist es möglich diese dynamische Pflanzenphänologie für verschiedene Landnutzungen mittels verschiedener Ansätze zu berücksichtigen. Insgesamt wurden innerhalb des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens KLIWEP (PÖHLER 2007), zu dem in WaSiM bereits vorhandenen statischen Ansatz, welcher einen festen immer wiederkehrenden Jahresgang der Pflanzenparameter festlegt, drei neue dynamische Ansätze implementiert. Dabei handelt es sich jeweils um Temperatursummenansätze, mit denen der Beginn von einzelnen phänologischen Phasen variabel anhand von Schwellenwerten und Temperatursummen ermittelt wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden neben dem statischen Ansatz für Wasserflächen und (teil-)versiegelte Flächen lediglich der zweite dynamische Ansatz ("DP2") für Waldlandnutzungen und der dritte dynamische Ansatz ("DP3") für Acker- und Grünlandflächen genutzt. Die Parametrisierung der dynamischen Ansätze für die jeweilige Landnutzung ist an die im Rahmen von KLIWEP erarbeiteten Parametrisierungen angelehnt. Einen guten Überblick über die Funktionsweise der dynamischen Phänologieansätze geben SCHULLA (2012), PÖHLER (2007) und JENNING (2010).

4.2.5 Schneemodul

Schneeakkumulation

Im Modell WaSiM wird flüssiger Niederschlag (Regen) und fester Niederschlag (Schnee) berücksichtigt. Dabei gibt es einen Übergangsbereich, in dem sowohl Schnee, als auch Regen fällt. Die Grenzen der Übergangsbereiche werden anhand der interpolierten Lufttemperatur festgelegt und die Unterscheidung des Niederschlages für jede einzelne Rasterzelle vorgenommen. Der Schneeanteil p_{Schnee} am Niederschlag wird anhand Gleichung (5) ermittelt:

$$p_{Schnee} = \frac{T_{R/S} + T_{trans} - T}{2 \times T_{trans}} \tag{5}$$

für

$$T_{R/S} - T_{trans} < T < (T_{R/S} + T_{trans}) \tag{6}$$

mit	p_{Schnee}	...	Anteil Schnee am Niederschlag	(-)
	T	...	Lufttemperatur	(°C)
	$T_{R/S}$	...	Lufttemperatur, bei der 50% des Niederschlages als Schnee fallen	(°C)
	T_{trans}	...	1/2 des Temperatur-Übergangsbereiches von Schnee zu Regen	(K)

Für $T \geq (T_{R/S} + T_{trans})$ fällt der Niederschlag vollständig als Regen und für $T \leq (T_{R/S} - T_{trans})$ vollständig als Schnee.

Schneeschmelze

Für die Berechnung der Schneeschmelze stehen in WaSiM vier verschiedene Modellansätze zur Auswahl. Neben dem Temperatur-Index-Verfahren und dem Temperatur-Wind-Index-Verfahren können das kombinierte Verfahren nach ANDERSON (1973) und ein erweitertes Kombinationsverfahren nach BRAUN (1985) genutzt werden. Innerhalb der durchgeführten Untersuchungen wurde ausschließlich das kombinierte Verfahren nach ANDERSON verwendet. Bei diesem Ansatz wird die Schneeschmelze für Temperaturen oberhalb der Schmelz-Grenztemperatur $T_{0,m}$ berechnet. Dabei wird anhand der gefallenen Niederschlagsmenge zwischen Zeitintervallen mit Niederschlag ($P \geq 2mm/d$) und ohne Niederschlag ($P < 2mm/d$) unterschieden. Fällt Niederschlag, wird die gesamte Schneeschmelze aus der Strahlungsschmelze, infolge fühlbarer Wärme, der Schmelze durch latente Wärme und der Schmelze durch Energieeintrag gebildet (Gleichung (7)).

$$M = M_R + M_S + M_E + M_P \times \frac{\Delta t}{24} \tag{7}$$

mit	M	...	gesamte Schneeschmelze	(mm)
	M_R	...	Strahlungsschmelze	(mm)
	M_S	...	Schmelze infolge fühlbarer Wärme	(mm)
	M_E	...	Schmelze durch latente Wärme	(mm)
	M_P	...	Schmelze durch Eintrag von Energie durch den Niederschlag	(mm)
	Δt	...	Zeitintervall	(h)

Diese einzelnen Schmelzanteile ergeben sich anhand der Gleichungen (8) bis (11):

$$M_R = 1.2 \times T \tag{8}$$

$$M_S = \ c_1 + c_2 \times u \ \times \ T - T_{0,m} \tag{9}$$

$$M_E = \ c_1 + c_2 \times u \ \times \frac{E - 6.11}{\gamma} \tag{10}$$

$$M_P = 0.0125 \times P \times T \tag{11}$$

mit	T	...	Lufttemperatur	(°C)
	$T_{0,m}$	...	Grenztemperatur für Einsetzen der Schneeschmelze	(°C)
	c_1	...	temperaturabhängiger Schmelzfaktor	(mm·°C^{-1}·d^{-1})
	c_2	...	windabhängiger Schmelzfaktor	([c_1] ·s·m^{-1})
	u	...	Windgeschwindigkeit	(m·s^{-1})
	γ	...	Psychrometerkonstante	(hPa·K^{-1})
	E	...	Sättigungswasserdampfdruck bei Lufttemperatur	(hPa)
	P	...	Niederschlag	(mm)

Für niederschlagsfreie Zeitintervalle wird die Schneeschmelze wie folgt berechnet (Gleichung (12)):

$$M = RMF \times \ T - T_{0,m} \ \times \frac{\Delta t}{24} \tag{12}$$

mit	M	...	gesamte Schneeschmelze	(mm)
	RMF	...	Aus RMF_{min} und RMF_{max} berechneter jahreszeitlich variabler Strahlungsschmelzfaktor	(mm·°C^{-1}·d^{-1})
	T	...	Lufttemperatur	(°C)
	$T_{0,m}$	...	Grenztemperatur für Einsetzen der Schneeschmelze	(°C)
	Δt	...	Zeitintervall	(h)

Die Veränderung des Schmelzfaktors RMF in Abhängigkeit der Jahreszeit wird durch die beiden Modellparameter RMF_{min} und RMF_{max} abgebildet. Dies geschieht in Anlehnung an den Jahresgang der Sonnenstrahlung der nördlichen Hemisphäre, welcher ein Maximum am 21.06. und ein Minimum am 21.12. jeden Jahres aufweist. An diesen beiden Terminen werden RMF_{min} und RMF_{max} festgesetzt und dazwischen wird RMF sinusförmig interpoliert (ANDERSON 1973).

Zusätzlich ist das Wasseräquivalent der Schneedecke in einen Fest- und Flüssigspeicher aufgeteilt. Der Anteil des Flüssigspeichers am Gesamtspeicher wird über einen in WaSiM auf 10% des Wasseräquivalents festgelegten Koeffizienten c_0 angegeben. Erst wenn dieser Flüssigwasserspeicher vollständig gefüllt wurde, kann Wasser von der Schneedecke abgegeben werden. Bei Temperaturen

unterhalb der Grenztemperatur $T_{0,m}$ wird ein Wiedergefrieren M_{neg} des Wassers im Flüssigspeicher berücksichtigt (Gleichung (13)).

$$M_{neg} = c_{rfr} \times RMF \times \ T - T_{0,m} \ \times \frac{\Delta t}{24} \qquad (13)$$

mit	M_{neg}	...	"negative Schneeschmelze" (wiedergefrierendes Wasser)	(mm)
	c_{rfr}	...	Koeffizient für das Wiedergefrieren	(-)
	RMF	...	Aus RMF_{min} und RMF_{max} berechneter jahreszeitlich variabler Strahlungsschmelzfaktor	(mm·°C^{-1}·d^{-1})
	T	...	Lufttemperatur	(°C)
	$T_{0,m}$	...	Grenztemperatur für Einsetzen der Schneeschmelze	(°C)
	Δt	...	Zeitintervall	(h)

Bei der Berechnung der Schneeschmelze auf Basis von Tagesmittelwerten der Lufttemperatur ergibt sich das Problem der möglichen mehrmaligen Unter- und Überschreitung dieses Mittelwertes innerhalb eines Tages, insbesondere auch aufgrund unterschiedlicher Tages- und Nachttemperaturen. Damit verbunden könnten mehrere Schmelz- und Gefrierprozesse innerhalb eines Tages nicht berücksichtigt werden. In WaSiM wird dieser Problematik mit einer Aufteilung der Temperatur in eine Tages- und Nachttemperatur und einer Schneeschmelzberechnung jeweils für den hellen Tag und die Nacht begegnet. Die gesamte Schmelze am Tag ergibt sich aus der Addition beider Teilergebnisse.

Im Modell WaSiM kann außerdem ein Teil des Schmelzwassers sofort als Direktabfluss abgeführt werden. Damit sollen schneeinnere Abflusswege einer abschmelzenden Schneedecke, welche auf teilweise gefrorenem Boden schlecht oder weniger versickern abgebildet werden. Der Anteil kann anhand des zu kalibrierenden Parameters S_{DF} angegeben werden.

Weitere Details zum Schneemodul von WaSiM sind der Modelldokumentation zu entnehmen (SCHULLA 2012).

4.3 Modellaufbau

Das Modell WaSiM wurde für das Untersuchungsgebiet (Einzugsgebiet bis Pegel Klingenberg) in einer räumlichen Auflösung von 500m x 500m erstellt. Diese, insbesondere für die oberen Lagen des Untersuchungsgebietes, doch recht grobe räumliche Auflösung stellt einen Kompromiss zwischen den, aufgrund vielfacher Modelloptimierungsläufe und langjährigen Wasserhaushaltssimulationen für mehrere Klimamodellrealisierungen, zu erwartenden Rechenzeiten und einer noch ausreichenden Abbildung der wesentlichen Gebietscharakteristika (Topographie, Boden, Landnutzung) dar. Die Generalisierung des DGM's, der Landnutzung und des Bodens auf dieses 500m Raster und die Parametrisierung der Landnutzung und des Bodens wird in den Kapiteln 4.4.5 bis 4.4.7 erläutert. Weitere von WaSiM benötigte Grids (z.B. Fliessrichtung, Fliesszeitsummen, …) wurden ausgehend von dem generalisierten 500m DGM mittels TANALYS im Vorfeld der Modellierung ermittelt. Die Verfügbarkeit, Aufbereitung und Bereitstellung der zur Modellierung benötigten Klimadaten wird in den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.4 beschrieben.

4.4 Datengrundlagen, Datenaufbereitung und Parametrisierung

4.4.1 Rezente Klimabeobachtungsdaten

Für Betrachtungen und Berechnungen des Wasserhaushaltes im rezenten Zeitraum standen Klimadaten von insgesamt 319 Stationen (259 Niederschlagsstationen und 60 Klimastationen) des Deutschen Wetterdienstes (DWD, www.dwd.de) und des Tschechisch Hydrologisch-Meteorologischem Dienstes (CHMI, www.chmi.cz) in der erweiterten REGKLAM Modellregion zur Verfügung (Abbildung 11). Die Daten wurden seitens des REGKLAM-Teilprojektes 2.1 in der REGKLAM-Klimadatenbank

bereitgestellt, aus der die Daten über eine graphische Benutzeroberfläche (REGKLAM GUI – engl. Graphical User Interface, HEIDENREICH et al. 2012a) heruntergeladen werden konnten. Die Daten lagen in täglicher Auflösung und je nach Station (Messbeginn, Datenlücken, Stationsverlegung, -schließung) maximal für den Zeitraum vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 vor.

Die für die Wasserhaushaltsmodellierung mit WaSiM-ETH erforderlichen Größen Niederschlag (mm), Tagesmitteltemperatur (°C), Windgeschwindigkeit ($m \cdot s^{-1}$), relative Luftfeuchte (%) und Sonnenscheindauer (h) standen prinzipiell zur Verfügung. Dabei lag der **Niederschlag** bereits in korrigierter Form in der Klimadatenbank vor. Die Korrektur erfolgte vereinfacht mit monatlichen Korrekturfaktoren aus RICHTER (1995) am Lehrstuhl für Meteorologie (TU Dresden). Die **Windgeschwindigkeit** musste aufgrund der Messhöhe in 10m über Grund auf die in WaSiM benötigte Messhöhe in 2m über Grund umgerechnet werden. Dies erfolgte anhand des logarithmischen Windprofils mit einer angenommenen mittleren Oberflächenbeschaffenheit von $z_0 = 0{,}03m$ (Gleichung (14), DVWK 1996). Die Umrechnung erfolgte nach der Regionalisierung der Windgeschwindigkeiten in 10m über Grund (vgl. Kapitel 4.4.4) für jede WaSiM-Rasterzelle des Untersuchungsgebietes.

$$v_{2m} = \frac{v_z \times 4{,}2}{\ln z + 3{,}5} \tag{14}$$

mit	v_{2m}	…	Windgeschwindigkeit in 2m Höhe	($m \cdot s^{-1}$)
	v_z	…	Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe z	($m \cdot s^{-1}$)
	z	…	Referenzhöhe, Messhöhe (z.B. 10m)	(m)

Die **relative Luftfeuchte** wurde durch einen Korrekturfaktor von 0,01 direkt in WaSiM von Prozent in absolute Werte umgerechnet (0%=0 und 100%=1). Desweiteren benötigt WaSiM die **relative Sonnenscheindauer**. Diese ergibt sich als Quotient aus der tatsächlich beobachteten (n) und der astronomisch maximal möglichen (N) Sonnenscheindauer (Gleichung (15), DVWK 1996).

$$SD_{rel} = \frac{n}{N} \tag{15}$$

mit

$$N = \frac{24}{\pi} \times \omega_S \tag{16}$$

mit

$$\omega_S = \arccos(-\tan \varphi \times \tan \delta) \tag{17}$$

mit

$$\delta = 0{,}409 \times \sin(\frac{2\pi}{365} \times J - 1{,}39) \tag{18}$$

mit	SD_{rel}	…	relative Sonnenscheindauer	(-)
	n	…	tatsächliche Sonnenscheindauer	(h)
	N	…	astronomisch mögliche Sonnenscheindauer	(h)
	ω_S	…	Stundenwinkel beim Sonnenuntergang	(rad)
	φ	…	geographische Breite des Standortes	(rad)
	δ	…	Deklination der Sonne	(rad)
	J	…	Julianischer Kalendertag (1…365)	(-)

Die Berechnung der relativen Sonnenscheindauer erfolgte nach der Regionalisierung der tatsächlichen Sonnenscheindauern (vgl. Kapitel 4.4.4) für jede WaSiM-Rasterzelle des Untersuchungsgebietes und eine mittlere nördliche geographische Breite von 50,85°.

In WaSiM ist es zusätzlich zur relativen Sonnenscheindauer möglich die **Globalstrahlung** zu berücksichtigen. Da diese Größe nur an wenigen Klimastationen zur Verfügung stand, wurde die Globalstrahlung nach ANGSTRØM (DVWK 1996) aus der tatsächlichen und astronomisch möglichen Sonnenscheindauer nach der Regionalisierung der tatsächlichen Sonnenscheindauern (vgl. Kapitel 4.4.4) für jede WaSiM-Rasterzelle des Untersuchungsgebietes und eine mittlere nördliche geographische Breite von 50,85° berechnet (Gleichung (19)).

$$R_G = (a + b \times \frac{n}{N}) \times R_a \qquad (19)$$

mit	R_G	...	Globalstrahlung	($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
	a	...	Angstrøm Koeffizient (hier $a = 0{,}19$)	(-)
	b	...	Angstrøm Koeffizient (siehe Tabelle 1)	(-)
	n	...	tatsächliche Sonnenscheindauer	(h)
	N	...	astronomisch mögliche Sonnenscheindauer	(h)
	R_a	...	extraterrestrische Strahlung	($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)

Tabelle 1: Verwendeter Jahresgang des Angstrøm Koeffizienten b (nach DVWK 1996).

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
$\boldsymbol{b}$	0,54	0,57	0,57	0,57	0,57	0,55	0,54	0,53	0,54	0,54	0,54	0,53

Aufgrund unterschiedlicher Stationsinbetriebnahmen, Datenlücken, Stationsverlegungen und auch Stationsschließungen gestaltete sich zum einen die zeitlich transiente Verfügbarkeit der Klimadaten an den Messstationen für den Untersuchungszeitraum ab 01.01.1961 bis 31.12.2010 und zum anderen die räumliche Verteilung der Stationen als Herausforderung.

So liegen nur zwei DWD-Niederschlagsstationen (Hartmannsdorf-Reichenau und Klingenberg TS) mit Niederschlagsdaten im Zeitraum vom 01.01.1969 bis 31.12.2006 (jeweils mit Datenlücken) unmittelbar im Untersuchungsgebiet (Abbildung 11). Die am nächsten gelegene Klimastation und maßgeblich, aufgrund der Nähe zum Gebiet und der Höhenlage (877m ü.NN), für die oberen Lagen des Untersuchungsgebietes ist die DWD Station Zinnwald-Georgenfeld, welche erst seit 01.01.1971 in Betrieb ist und erst seitdem Beobachtungsdaten mit Datenlücken insbesondere bei der Windgeschwindigkeit zur Verfügung stehen.

Um der Problematik der zeitlichen Datenverfügbarkeit entgegenzutreten wurde eine multiple lineare Regression durchgeführt. Damit konnten teilweise Datenlücken geschlossen und Datenreihen verlängert werden. Die Vorgehensweise wird im folgenden Kapitel 4.4.2 näher beschrieben.

Die geringe Stationsdichte im Untersuchungsgebiet wurde anhand einer räumlichen Interpolation der vorhandenen und vorher, soweit möglich mittels multipler linearer Regression, lückengefüllten und verlängerten Klimadaten von ausgewählten Stationen kompensiert (vgl. Kapitel 4.4.4).

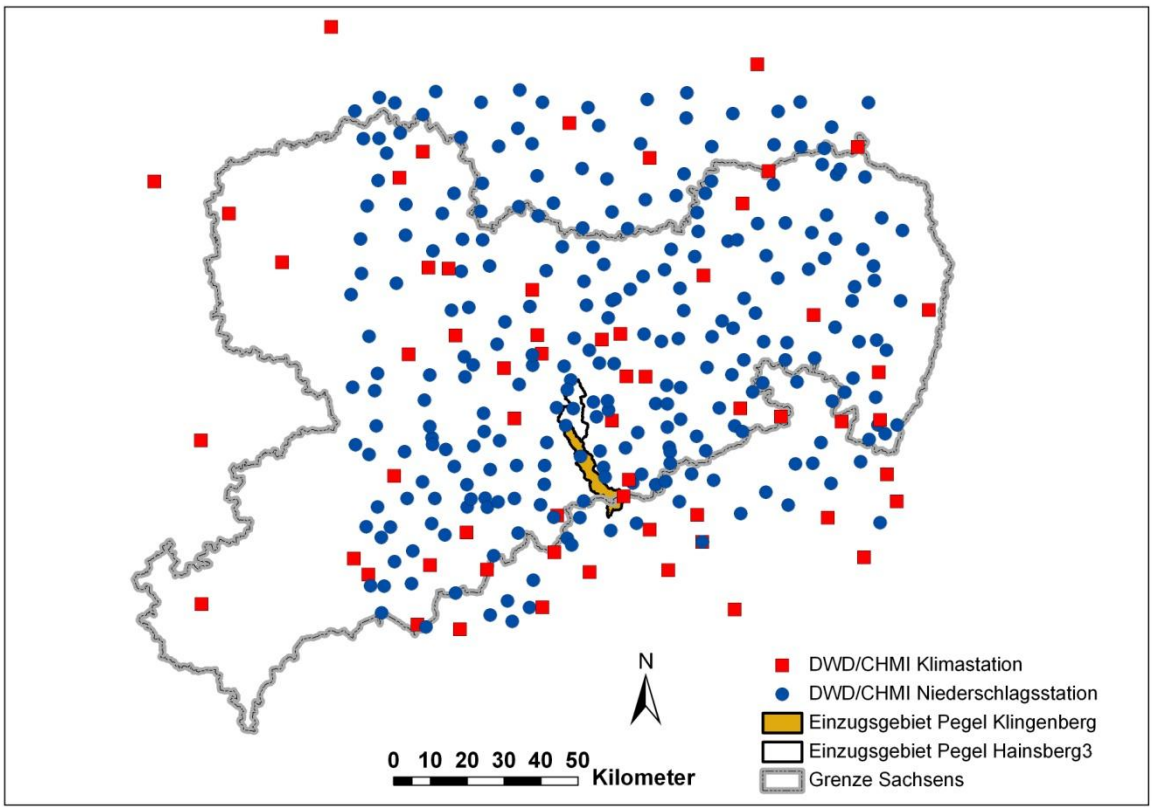


Abbildung 11: Niederschlags- und Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Tschechisch Hydrologisch-Meteorologischen Dienstes (CHMI) in der erweiterten REGKLAM-Modellregion.

4.4.2 Lückenfüllung und Verlängerung von Klimabeobachtungsdaten

Zur Füllung von Beobachtungslücken und zur Verlängerung von Klimadatenreihen wurde eine multiple lineare Regression durchgeführt. Dabei waren einige Grundlagen zu berücksichtigen:

Eine Regression hat die Eigenschaft, dass der Zusammenhang zwischen erklärenden Stationen und der abhängigen Station von einem bekannten Zeitraum auf einen unbekannten Zeitraum übertragen wird. Das birgt die Unsicherheit, dass der gefundene Zusammenhang nicht für den unbekannten Zeitraum gelten könnte.

In eine multiple lineare Regression können theoretisch beliebig viele erklärende Stationen eingehen. Mit jeder weiteren Station wird das Gütekriterium per se besser, die Modelleindeutigkeit in Bezug auf die zu berechnenden Werte jedoch schlechter. Auch ist ein multikollineares Verhalten zu erwarten, wenn die erklärenden Stationen untereinander gut korrelieren. Auch das vermindert die Eindeutigkeit des gefundenen Modells.

Der Punkt 1. wurde berücksichtigt, indem der Messzeitraum jeder Klimagröße an der abhängigen Station paritätisch in einen Kalibrierungs- und einen Validierungszeitraum unterteilt wurde. Das Regressionsmodell wurde anhand des Kalibrierungszeitraumes parametrisiert. Allerdings musste die Regression auch für den Validierungszeitraum ausreichend gut geeignet sein, damit diese angewandt werden durfte.

Für Punkt 2 wird die mögliche Anzahl erklärender Stationen auf die sieben am nächsten gelegenen Stationen beschränkt. Zusätzlich wird das adjustierte Bestimmtheitsmaß $\overline{R}^2$ mit:

$$R^2 = 1 - (1 - R^2) \times \frac{n-1}{n-p-1} \qquad (20)$$

mit	R^2	...	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	(-)
	R^2	...	Bestimmtheitsmaß	(-)
	n	...	Stichprobenumfang	(-)
	p	...	Anzahl erklärender Stationen	(-)

zur Einschätzung der Güte genutzt. Damit erhält jede zusätzliche, erklärende Station zuerst einen Nachteil in der Berechnung des Gütekriteriums und muss diesen Nachteil durch eine signifikante Informationserweiterung kompensieren. Abschwächend muss aber hinzugefügt werden, dass bei der großen Anzahl an Tageswerten und der im Vergleich dazu geringen Anzahl an erklärenden Stationen der Unterschied zwischen Bestimmtheitsmaß und adjustiertem Bestimmtheitsmaß gering ist.

Aus den im vorangegangenen Abschnitt abgeleiteten Grundlagen und weiteren, quantitativen Überlegungen ergab sich das folgende Regelwerk zur Ableitung und Anwendung der multiplen linearen Regression:

Für die Regressionsanalyse mussten mindestens 20 Jahre Beobachtungswerte vorliegen.

Der Messzeitraum wurde paritätisch in Kalibrierungs- und Validierungszeitraum geteilt.

Für den Niederschlag wurden die sieben am nächsten gelegenen Stationen herausgesucht und bezüglich der Eignung zur Regression analysiert.

Für andere meteorologische Größen wurden gleichfalls die nächsten 7 Stationen herausgesucht. Zusätzlich wurden aber zwingend die Klimastationen Dresden-Klotzsche, Zinnwald-Georgenfeld, Nová Ves v Horách, Marienberg, Chemnitz und Fichtelberg einbezogen. Diese Stationen haben langjährige Beobachtungswerte, was bei den sieben am nächsten gelegenen Stationen nicht unbedingt gegeben ist.

Es werden alle möglichen Kombinationen aus den erklärenden Stationen einzeln untersucht (jede Station einzeln, alle zweier Kombinationen, alle dreier Kombinationen usw.)

Der Überlappungszeitraum der Messwerte von abhängiger Station und allen erklärenden Stationen der aktuellen Kombination muss im Kalibrierungszeitraum mindestens 8 Jahre und im Validierungszeitraum mindestens 5 Jahre betragen. Damit werden zu kurze Datenreihen ignoriert. Gleichzeitig aber verhindern kürzere Fehlzeiträume nicht die Regressionsanalyse.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß darf 0.8 im Kalibrierungs- wie im Validierungszeitraum nicht unterschreiten

Für jeden Zeitschritt wird die jeweils beste verfügbare Kombination anhand des adjustierten Bestimmtheitsmaßes für den Kalibrierungszeitraum mit der Nebenbedingung, dass auch für den Validierungszeitraum eine ausreichende Güte erreicht wird, zur Regression genutzt.

Ein Beispiel soll die Regeln verdeutlichen. Station A wurde von 1981 bis 2010 gemessen. Die Station B hat einen Messzeitraum von 1961 bis 2010, die Station C von 1961 bis 1990 und 2000 bis 2010 sowie die Station D von 1951 bis 1998. Der Kalibrierungszeitraum ist von 1981 bis 1995 und der Validierungszeitraum von 1996 bis 2010. Die Station B kann für die Regression genutzt werden, da sie den gesamten Zeitraum der Station A überdeckt. Die Station B kann auch genutzt werden, da 10 Jahre Überlappung im Kalibrierungszeitraum und 11 Jahre im Validierungszeitraum vorhanden sind. Die Station D kann nicht genutzt werden, da zwar der Kalibrierungszeitraum komplett überdeckt wird, vom Validierungszeitraum aber nur 3 Jahre vorhanden sind. Damit ergeben sich die zu untersuchenden Kombinationen zu: A mit B (Kalibrierung 1981-1995, Validierung 1996-2010), A mit C (Kalibrierung 1981-1990, Validierung 2000-2010) und A mit B und C (Kalibrierung 1981-1990, Validierung 2000-2010).

Den sichersten Zusammenhang lieferte die Tagesmitteltemperatur, da die räumliche Variabilität dieser Größe vergleichsweise gering ist. Der Zusammenhang der Windgeschwindigkeit zwischen verschiedenen Klimastationen ist sehr gering. Daher konnten keine Datenlücken der Windge-

schwindigkeit gefüllt und vorhandene Datenreihen der Windgeschwindigkeiten nicht verlängert werden.

Da für die Beschreibung des Klimas im Untersuchungsgebiet nicht die Informationen/Klimadaten aller 319 Stationen in der erweiterten REGKLAM-Modellregion maßgeblich sind, wurden im Rahmen der Regionalisierung 94 Stationen (18 Klima- und 76 Niederschlagsstationen, Abbildung 12) welche das Klima im Untersuchungsgebiet potentiell am besten beschreiben, ausgewählt (vgl. Kapitel 4.4.4). Für diese 94 Stationen wurde die multiple lineare Regression nach oben genannten Regeln durchgeführt. Die Abbildungen im Anhang (Abbildung A 3 bis Abbildung A 7) stellen die Datenverfügbarkeit vor und nach der Regression dar.

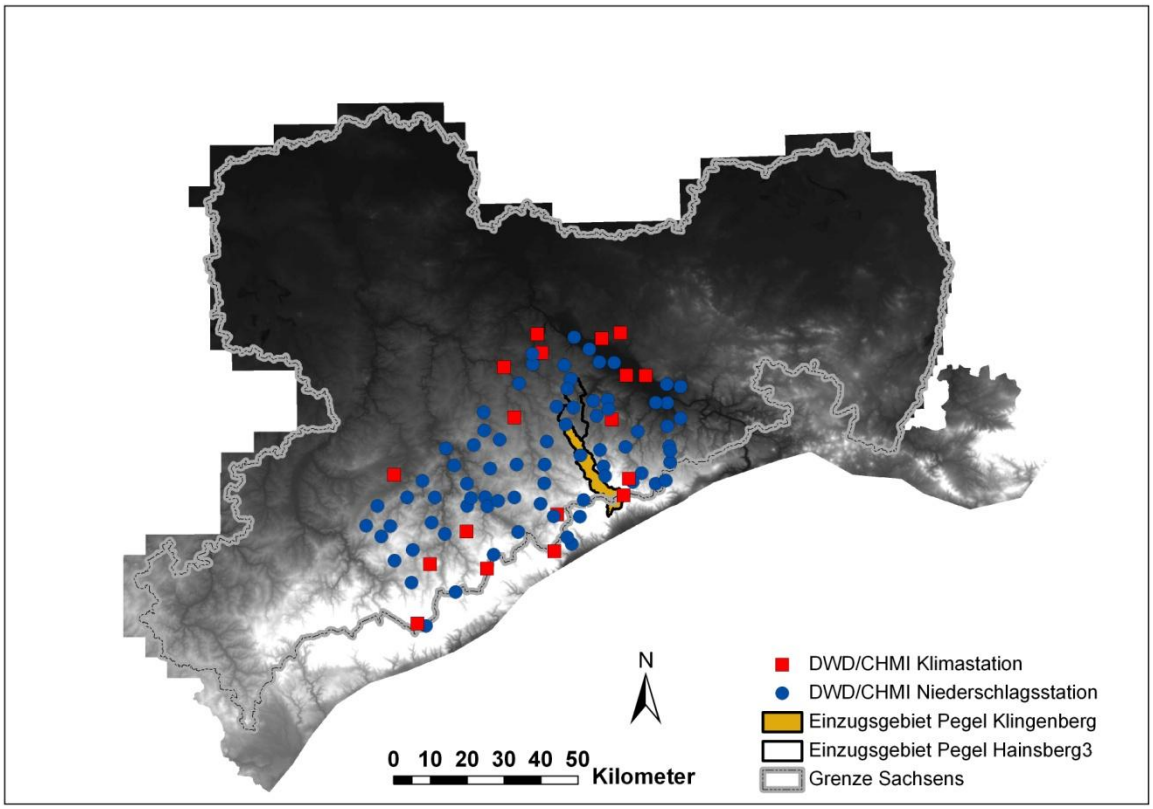


Abbildung 12: Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 mit dem Teileinzugsgebiet des Pegels Klingenberg (Untersuchungsgebiet) und den für die multiple lineare Regression gewählten 94 Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Tschechisch Hydrologisch-Meteorologischen Dienstes (CHMI).

4.4.3 Klimamodelldaten

Klimamodelle bilden das Klimasystem und darin ablaufende Prozesse und Wechselwirkungen vereinfacht ab. Zur Beschreibung des Klimasystems werden neben einfachen konzeptionellen Modellen sehr komplexe vier dimensionale globale Zirkulationsmodelle (GCMs: General Circulation Models oder Global Climate Models) entwickelt, welche das Klima und dessen mögliche Veränderung auf globalem und kontinentalem Maßstab bereits gut abbilden können. Aufgrund der Komplexität, daraus resultierender Rechenzeiten und Speicherplatzbedarf ist die räumliche Auflösung der GCMs mit 150 bis mehreren 100 Kilometern sehr gering. Um regionale Entwicklungen der potentiellen zukünftigen Klimaveränderungen besser abbilden und abschätzen zu können ist eine höhere räumliche Auflösung erforderlich. Dafür werden regionale Klimamodelle (RCMs: Regional Climate Models) verwendet. Diese skalieren die Ergebnisse von GCMs für spezifische Regionen herunter und werden daher auch „Downscaling"-Verfahren genannt. Prinzipiell wird zwischen statistischen, dynamischen und gemischten Verfahren unterschieden (BERNHOFER et al. 2011).

Aus der Vielzahl an existierenden GCMs, RCMs und deren Kombinationsmöglichkeiten ergibt sich neben den aus fehlenden oder vereinfachten Systembeschreibungen, Prozessberücksichtigungen

und Rückkopplungseffekten resultierenden Unsicherheiten eine zusätzliche Unsicherheit aufgrund der Bandbreite möglicher klimatischer Entwicklungen.

Um klimatische Veränderungen simulieren zu können ist die Kenntnis und Entwicklung von verschiedenen Randbedingungen erforderlich. Wesentliche, das Klima beeinflussende, Randbedingungen sind atmosphärische Konzentrationen von klimarelevanten Treibhausgasen und Aerosolen. Die weltweit, zukünftig mögliche Entwicklung dieser Konzentrationen wird in Form von sogenannten Emissionsszenarien (SRES, NAKICENOVIC & SWART 2000) abgeschätzt. Diese vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erstellten vier Emissionsszenario-Familien beinhalten unterschiedliche Annahmen bezüglich der zukünftigen weltweiten demographischen, wirtschaftlichen, technologischen, sozialen und umweltpolitischen Entwicklung. Insgesamt existieren 40 gleichwahrscheinliche Szenarien. Hieraus entsteht eine weitere Bandbreite an Unsicherheiten bezüglich der zukünftig möglichen Entwicklung.

Für die Berücksichtigung der zuvor genannten Unsicherheiten und die Darstellung möglicher Entwicklungsbandbreiten ist es erforderlich möglichst viele Emissionsszenarien, globale, regionale Klimamodelle und Kombinationen daraus in die Untersuchungen einzubeziehen. Einen tieferen Einblick zum Thema Unsicherheiten gibt u.a. BERNHOFER et al. (2011)

Seitens des Teilprojektes 2.1 (Lehrstuhl für Meteorologie, TU Dresden) wurden mehrere Realisierungen von statistischen und dynamischen regionalen Klimamodellen für unterschiedliche Emissionsszenarien mit dem Globalmodellantrieb ECHAM5/MPI-OM T63 Lauf 1 (ROECKNER et al. 2003, 2006) in der REGKLAM-Klimadatenbank bereitgestellt und Nutzervorgaben getroffen (HEIDENREICH 2012b). Abbildung 13 gibt einen Überblick über die zuvor beschriebene Verkettung von Emissionsszenarien mit globalen und regionalen Klimamodellen und die innerhalb REGKLAM's verfügbaren Klimamodelle.

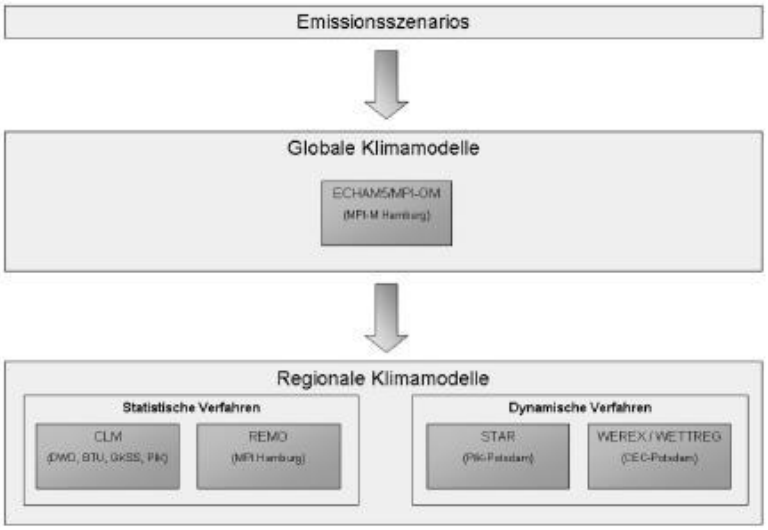


Abbildung 13: Klimamodellkette zur Bereitstellung von regionalen Klimadaten, beginnend mit Emissionsszenarien als Randbedingung (Quelle: LfULG 2010).

Aufgrund von u.a. begrenzten Rechenkapazitäten wurden innerhalb dieser Untersuchung die vorhandenen Realisierungen der beiden regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM 3 mit dem Globalmodellantrieb ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) für verschiedene Emissionsszenarien vergleichend verwendet.

Die Daten des statistischen regionalen Klimamodells **WETTREG2010** wurden durch die CEC Potsdam GmbH erstellt und analog zu den Klimabeobachtungsdaten durch das REGKLAM-Teilprojekt 2.1 (Lehrstuhl für Meteorologie, TU Dresden) in der REGKLAM-Klimadatenbank bereitgestellt. Bei WETTREG handelt es sich generell um eine WETTerlagenbasierte REGression. Der Datensatz enthält tägliche Werte von Klimaelementen im Zeitraum 1961-2100 für die Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 für ausgewählte Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Es existieren pro Emissionsszenario (ab 2001) und im Kontrollzeitraum (1961-2000) jeweils 10 Realisierungen (00, 11, 22 – 99). Die Daten von WETTREG2010 werden prinzipiell für Stationen des DWD-Messnetzes, getrennt

nach Klima- und Niederschlagsstationen, generiert. Die Stationsdichte ist im Vergleich zum DWD-Messnetz wesentlich geringer (17 Klimastationen und 165 Niederschlagsstationen in der erweiterten REGKLAM-Modellregion, Abbildung 14). Um die geringe Stationsdichte zu kompensieren wurde analog zu den Klimabeobachtungsdaten eine Regionalisierung der verfügbaren Daten vorgenommen (vgl. Kapitel 4.4.4).

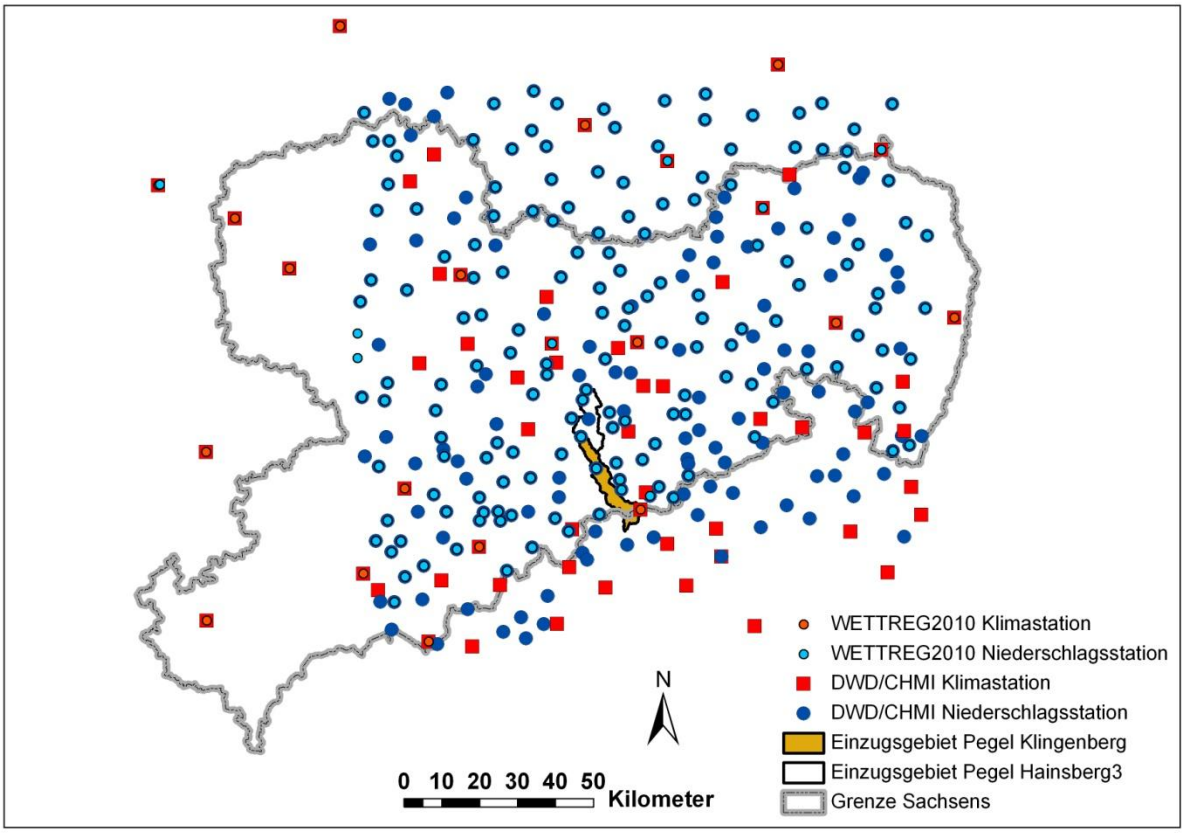


Abbildung 14: Vergleich der Stationsdichte des DWD/CHMI Datensatzes mit der Stationsdichte des WETTREG2010 Datensatzes in der erweiterten REGKLAM-Modellregion.

Analog zu den Klimabeobachtungsdaten (vgl. 4.4.1) lagen die für die Wasserhaushaltsmodellierung mit WaSiM-ETH erforderlichen Größen Niederschlag (mm, korrigiert nach RICHTER (1995)), Tagesmitteltemperatur (°C), Windgeschwindigkeit ($m \cdot s^{-1}$), relative Luftfeuchte (%) und Sonnenscheindauer (h) grundsätzlich in der REGKLAM-Klimadatenbank vor. Die Um- und Berechnung der Größen Windgeschwindigkeit, relative Feuchte, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung in das von WaSiM benötigte Format erfolgte analog zu den Klimabeobachtungsdaten, wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben.

Aufgrund der unterschiedlichen Auftraggeber, A1B im Auftrag des Umweltbundesamtes Dessau, A2 und B1 im Auftrag des Climate Service Centers Hamburg, für die Bearbeitung durch die CEC Potsdam GmbH ergab sich offensichtlich eine unterschiedliche Datenverfügbarkeit an einzelnen Stationen (HEIDENREICH 2012b). Die für die Regionalisierung ausgewählten Stationen (vgl. Kapitel 4.4.4) verfügten mit Ausnahme von Hartha-Fördergersdorf (kein Niederschlag für A2 und B1) und Marienberg (keine Sonnenscheindauer für A2 und B1) über transiente Zeitreihen der benötigten Klimaelemente von 1961-2100, so dass im Gegensatz zu den Klimabeobachtungsdaten keine Lückenfüllung und/oder Reihenverlängerung vorgenommen werden musste.

Bei **CLM 3** (Vorgängerversion des CCLM – COSMO Climate Limitated-area Model) handelt es sich um ein dynamisches downscaling Verfahren. Das hochauflösende, deterministische regionale Klimamodell wurde gemeinschaftlich durch das „Consortium for small scale Modelling" (COSMO) entwickelt. Die simulierten täglichen Klimaelemente liegen für den Zeitraum von 1960 bis 2100 in Form eines Rasters mit einer räumlichen Auflösung von 0,165° für Europa vor. Es existieren jeweils

2 Realisierungen (Modellläufe) für den Kontrollzeitraum (1960-2000) und für die beiden Emissionsszenarien A1B und B1 im Zeitraum 2001 bis 2100 (BERNHOFER et al. 2011).

Die Daten für jede Rasterzelle wurden seitens des Lehrstuhles für Meteorologie (REGKLAM Teilprojekt 2.1) in der REGKLAM-Klimadatenbank bereitgestellt. Dabei handelt es sich um Klimaelemente des sogenannten Datenstromes 3, für den die Daten auf ein reguläres 0,2° Gitter (~22km breit und ~14km lang bei 51° Breite) interpoliert wurden (HEIDENREICH 2012a, HOLLWEG et al. 2008). Analog zu den WETTREG2010 Daten lagen prinzipiell alle von WaSiM benötigten Klimagrößen vor. Neben dem modellierten Niederschlag wurde ein „angepasster Niederschlag" in der Klimadatenbank zur Verfügung gestellt. Dabei erfolgte eine Bias-Korrektur, da der modellierte Niederschlag zu hoch war und es zu häufig regnete. Die Um- und Berechnung der Größen Windgeschwindigkeit, relative Feuchte, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung in das von WaSiM benötigte Format erfolgte analog zu den Klimabeobachtungsdaten, wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben.

Für das Untersuchungsgebiet wurden die Daten von drei Rasterzellen (GP_083_122, GP_082_122 und GP_082_123) verwendet (Abbildung 15).

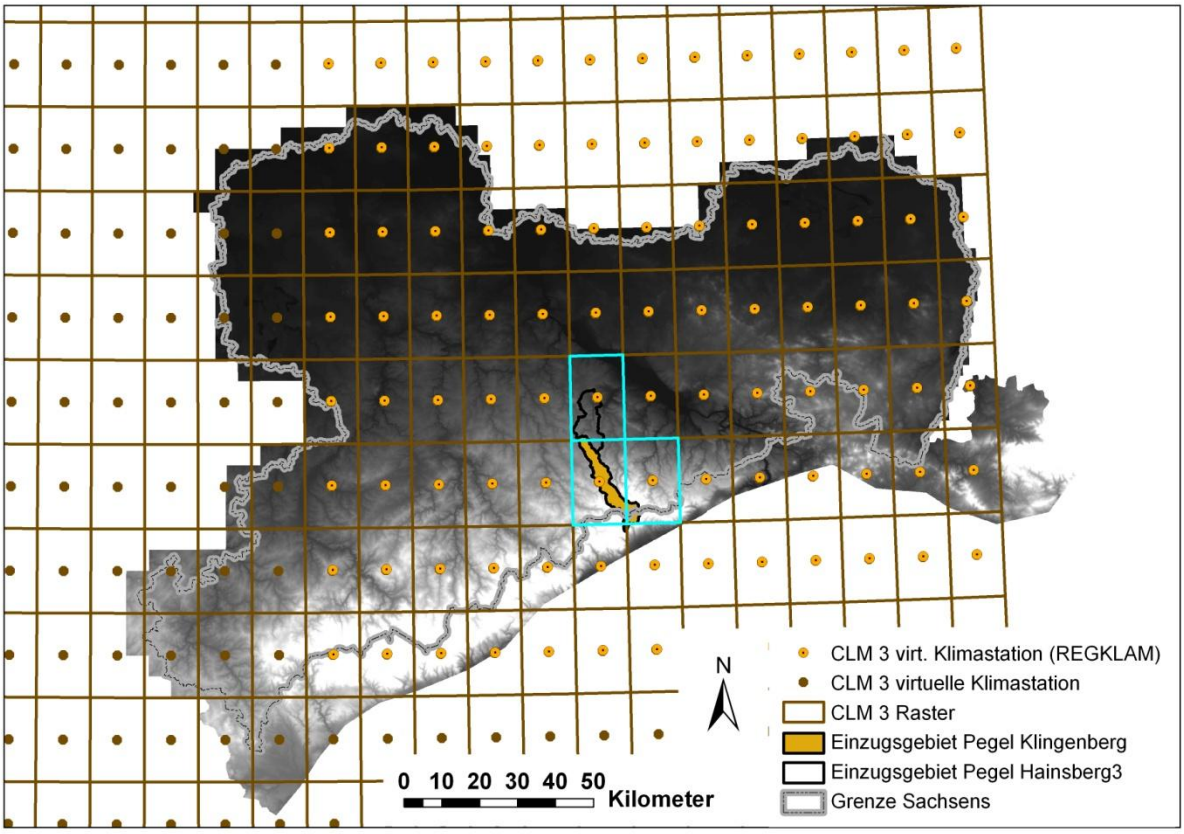


Abbildung 15: Übersicht über das CLM 3 Raster in der REGKLAM-Modellregion und die ausgewählten Rasterzellen (türkis) für die Wasserhaushaltsmodellierung mit WaSiM.

Die beiden südlich des Untersuchungsgebietes liegenden Rasterzellen (auf tschechischer Seite) wurden aufgrund der im rezenten Zeitraum deutlich geringeren Jahresniederschlagssummen nicht berücksichtigt (JENNING 2010). Flächenmäßig hat die Zelle GP_082_122 mit rund 77 Prozent den größten Anteil am Untersuchungsgebiet. Die Rasterzellen wurden über die Zellmittelpunkte (virtuelle Klimastation) in WaSiM berücksichtigt. Die Daten der virtuellen Klimastationen wurden dann über die Methode der Thiessen Polygone auf das 500m WaSiM-Raster des Untersuchungsgebietes interpoliert.

4.4.4 Regionalisierung stationsbasierter Klimadaten

Für die Regionalisierung der stationsbasierten Klimadaten (Beobachtungsdaten des DWD und Daten des regionalen Klimamodells WETTREG2010) wurde ein Kriging Verfahren angewendet. Das Kriging (benannt nach dem südafrikanischen Bergbauingenieur D. G. Krige) wurde Mitte des 20 Jahrhun-

derts von G. Matheron (Frankreich) im Bereich des Bergbaus und gleichzeitig von L. S. Gandin (Sowjetunion) im meteorologischen Bereich entwickelt und angewandt.

Es ist ein lineares Verfahren mit erwartungstreuer Schätzung von Werten an unbeobachteten Orten. Grundlage ist, dass ein Prozess intrinsisch stationär ist. Damit wird der Zusammenhang zwischen zwei Zufallsvariablen *z* an den Orten *x* nicht durch die absolute Lage, sondern nur durch den Abstand l beider Punkte voneinander bestimmt. Es kann der Zusammenhang zwischen den möglichen Kombinationen von Punkten und der jeweiligen Entfernung als räumliche Varianz *γ* bestimmt werden mit:

$$\gamma\ l\ = var[z\ x\ - z\ x + l\ ] \tag{21}$$

Für jeden Abstand l wird aus den Tupeln der Wert des Variogramms mit dem klassischen Variogrammschätzer berechnet:

$$y\ l\ = \frac{1}{n}\ \ _{n}\ (z\ x_i\ - z\ x_j\ )^2 \tag{22}$$

mit	γ	...	räumliche Varianz	(-)
	l	...	Abstand	(m)
	z	...	Zufallsvariable	(-)
	x	...	Orte	(-)
	y	...	Variogrammschätzer	(-)
	n	...	Anzahl der Tupel	(-)

In der Praxis ist zu beachten, dass insbesondere bei stationsbasierten Daten quasi keine zwei Stationen exakt den gleichen Abstand haben. Daher müssen für die Berechnung der räumlichen Varianz Klassen von Abständen gebildet werden, die zusammen auszuwerten sind. Hier wird eine variable Schrittweite genutzt, die in allen Abstandsklassen die gleiche Anzahl von Tupeln gewährleistet. Erst in der letzten Klasse werden alle restlichen Werte zusammengefasst. Der Niederschlag wird mit einer relativ hohen Stationsdichte gemessen, weshalb hierbei 30 Tupel eine Abstandsklasse bilden. Alle anderen meteorologischen Größen werden durch wesentlich weniger Stationen abgedeckt, weshalb für diese in einer Abstandsklasse nur 5 Tupel enthalten sein müssen.

Werden die berechneten räumlichen Varianzen in Abhängigkeit von der Entfernung in ein Diagramm gezeichnet, wird dieses als empirisches Variogramm oder Semivariogramm bezeichnet. An das empirische Variogramm kann eine Funktion angepasst werden, welche als theoretisches Variogramm bezeichnet wird. Als Funktionen für theoretische Variogramme werden folgende Formulierungen genutzt:

Sphärisches Variogramm

$$\gamma\ l\ = \begin{cases} sill\ \ 1{,}5 \times \frac{l}{range} - 0{,}5 \times \frac{l}{range}^{\ 3} & wenn\ \ l \leq range \\ sill & wenn\ \ l > range \end{cases} \tag{23}$$

Exponentielles Variogramm

$$\gamma\ l\ = sill\ \ 1 - \exp\ \frac{-3l}{range} \tag{24}$$

Gaussches Variogramm

$$\gamma\ l\ = sill\ \ 1 - \exp\ \frac{-3l^2}{range^2} \tag{25}$$

mit	$sill$	...	Schwellwert	(-)
	$range$	...	Aussageweite des Variogramms	(km)

Für die hier beschriebene Regionalisierung werden ausschließlich das sphärische und das exponentielle Variogramm eingesetzt. Das gaussche Variogramm ist insbesondere für nach unten begrenzte Variablen, wie z.B. Niederschlag, weniger geeignet, da häufiger negative Gewichte und damit negative Ergebniswerte mittels Kriging berechnet werden (siehe unten). Die Variablen *range* und *sill* werden durch Minimierung der quadratischen Abstände optimiert (Nelder-Mead-Simplex-Verfahren, NELDER & MEAD 1965).

Für Tageswerte meteorologischer Größen wird nur selten ein klar ansteigendes empirisches Variogramm erhalten. Vielmehr ist häufig eine große Streuung zu verzeichnen, manchmal sogar eine abnehmende Varianz mit steigender Entfernung. Das ist auf zufällige Zusammenhänge zurückzuführen. Das theoretische Variogramm wird indes stets streng monoton steigend sein.

Der Nugget-Effekt beschreibt eine Varianz bereits bei einer Entfernung von null. Damit geht das theoretische Variogramm nicht durch den Koordinatenursprung sondern schneidet die Ordinatenachse an einem positiven Wert (des sogenannten Nuggets). Dieser Effekt trägt dem Rechnung, dass es auch am Standort Unsicherheiten gibt. Dieser Nugget-Effekt wurde nicht berücksichtigt.

Nachfolgend werden kurz zwei verwendete Varianten des Kriging beschrieben:

Ordinary Kriging (OK)

Wie andere geostatistische Modelle basiert das Kriging auf der Berechnung von Gewichten zur Berechnung eines Wertes am unbeobachteten Standort. Die Gewichte der Krige-Schätzer werden so bestimmt, dass der Schätzfehler im Mittel Null ist und die Varianz des Schätzfehlers minimiert wird (z.B. BÁRDOSSY 1997). Die Gewichte des Krige-Schätzers für einen unbeobachteten Punkt werden mit der Minimierung der Varianzen unter der Nebenbedingung der Erwartungstreue berechnet. Damit ergibt sich ein lineares Gleichungssystem über alle erklärenden bekannten Punkte mit:

$$\lambda_j\, \gamma \times\ \ x_i - x_j\ \ + \mu\ =\ \gamma\ \ x_j - x \qquad i = 1, \dots, n \tag{26}$$

und

$$\lambda_j = \quad 1 \tag{27}$$

mit	λ_j	...	Krige-Gewichte	(-)
	γ	...	Variogrammwerte	(-)
	x_i	...	bekannte Punkte	(-)
	x_j	...	bekannte Punkte	(-)
	μ	...	Lagrange-Multiplikator	(-)

Für nähere Details zu dem Lagrange Multiplikator μ sei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur zu Minimierungsaufgaben verwiesen. Um das Gleichungssystem in entsprechender Software lösen zu können, wird das Gleichungssystem in Matrixschreibweise umgeformt:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}}_{=C} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix}}_{=\lambda} = \underbrace{\begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{pmatrix}}_{=D} \tag{28}$$

mit	γ_{ij}	...	Variogrammwerte	(-)
	x_i	...	erklärender Punkt	(-)
	x_j	...	erklärender Punkt	(-)
	0	...	Index, der den zu berechnenden Ort meint	(-)

Alle Variogrammwerte mit zwei gleichen Indizes (entlang der Diagonale, z.B. γ_{11}) sind gleich 0. Da das Variogramm eineindeutig umkehrbar ist, kann das Gleichungssystem mit $\lambda = C^{-1}D$ gelöst werden.

External Drift Kriging (EDK)

Die Kenntnis einer externen Variable Y, die linear mit der zu schätzenden Größe zusammenhängt, kann im Kriging einbezogen werden. Dadurch erweitert sich das oben angegebene Gleichungssystem zu:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \gamma \times \; x_i - x_j \; + \mu_1 + \mu_2 Y(x_i) \; = \; \gamma \; x_j - x \quad i = 1, \dots, n \tag{29}$$

und

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \; = \; 1 \tag{30}$$

und

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j Y(x_j) \; = \; Y(x) \tag{31}$$

bzw. in Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 & Y_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 & Y_n \\ 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ Y_1 & \cdots & Y_n & 0 & 0 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \\ Y_0 \end{pmatrix} \tag{32}$$

Kann ein nichtlinearer Trend zu einer Einflussgröße festgestellt werden, muss eine geeignete Transformation in den linearen Raum gefunden werden, bevor die Variable für das EDK genutzt wird. EDK kann ausschließlich mit linearen Trends umgehen.

In der praktischen Durchführung fiel es auf, dass die theoretischen Variogrammfunktionstypen in dem Abstandsbereich, in dem sich der Untersuchungsraum Erzgebirge befindet, mit einer Vielzahl von Kombinationen aus *range* und *sill* gleiche Funktionsverläufe aufwiesen. Ein größeres *range* konnte durch ein größeres *sill* derart kompensiert werden, dass sich die Funktionsverläufe in den interessierenden Bereichen weitgehend gleich waren. Als Folge daraus war die minimale quadratische Abweichung bei minimalem *range* und maximalem *sill* zu finden. Da das nicht plausibel ist, wurde eine plausible Aussageweite von *range* = 70 km angenommen und ausschließlich der Schwellenwert *sill* optimiert.

Für jeden Zeitschritt wurden das sphärische und das exponentielle Variogramm automatisch angepasst und dasjenige mit der geringeren quadratischen Abstandssumme gewählt.

Es musste im Vorfeld analysiert werden, ob das EDK zur Regionalisierung geeignet ist. Bei meteorologischen Größen wird primär die Geländehöhe als möglicher Trendfaktor untersucht. Es wurde festgestellt, dass im langjährigen Mittel die Größen korrigierter Niederschlag (RRkorr), die Mitteltemperatur (TM), die Minimal- und Maximaltemperatur (TN und TX), die relative Feuchte (UU) und die Sonnenscheindauer (SD) einen mehr oder minder signifikanten Trend mit der Höhe aufweisen. Für die Windgeschwindigkeit (FF) war das nicht der Fall.

Kriging ist an bekannten Punkten erwartungstreu. Das heißt, dass beim Kriging an bekannten Punkten der bekannte Wert genau getroffen wird (vorausgesetzt, das Variogramm hat keinen Nugget-Effekt). Daher bringt ein Vergleich an Stationen keinen Informationsgewinn.

Die Regionalisierung von meteorologischen Größen wurde für das gesamte Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 durchgeführt. Dabei erfolgte die Regionalisierung auf das WaSiM 500m-Raster, wobei jeder Zellmittelpunkt des Rasters eine virtuelle Klimastation darstellt. Die das Untersuchungsgebiet betreffenden Zellen (500m Raster bis Pegel Klingenberg) sind damit gleichzeitig abgedeckt. Da das Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz nur im Osterzgebirge bis zum Elbtal hinunter gelegen ist, wurde ein meteorologisch halbwegs homogen reagierendes Gebiet bestimmt, dessen Stationen in die Regionalisierung eingingen. Das Gebiet umfasst das Ost- und das mittlere Erzgebirge bis zum Elbtal hinunter. Vor allem nach Westen hin ist das Gebiet relativ groß, damit die dortigen Klimastationen mit in die Regionalisierung eingehen konnten. In Abbildung 16 sind das Einzugsgebiet bis zum Pegel Hainsberg 3 mit dem von Nordwesten nach Südosten zeilenweise indizierten Raster, das 500m Raster des Untersuchungsgebietes bis zum Pegel Klingenberg, sowie die verwendeten 94 DWD/CHMI-Stationen bzw. 56 Stationen aus WETTREG 2010 dargestellt.

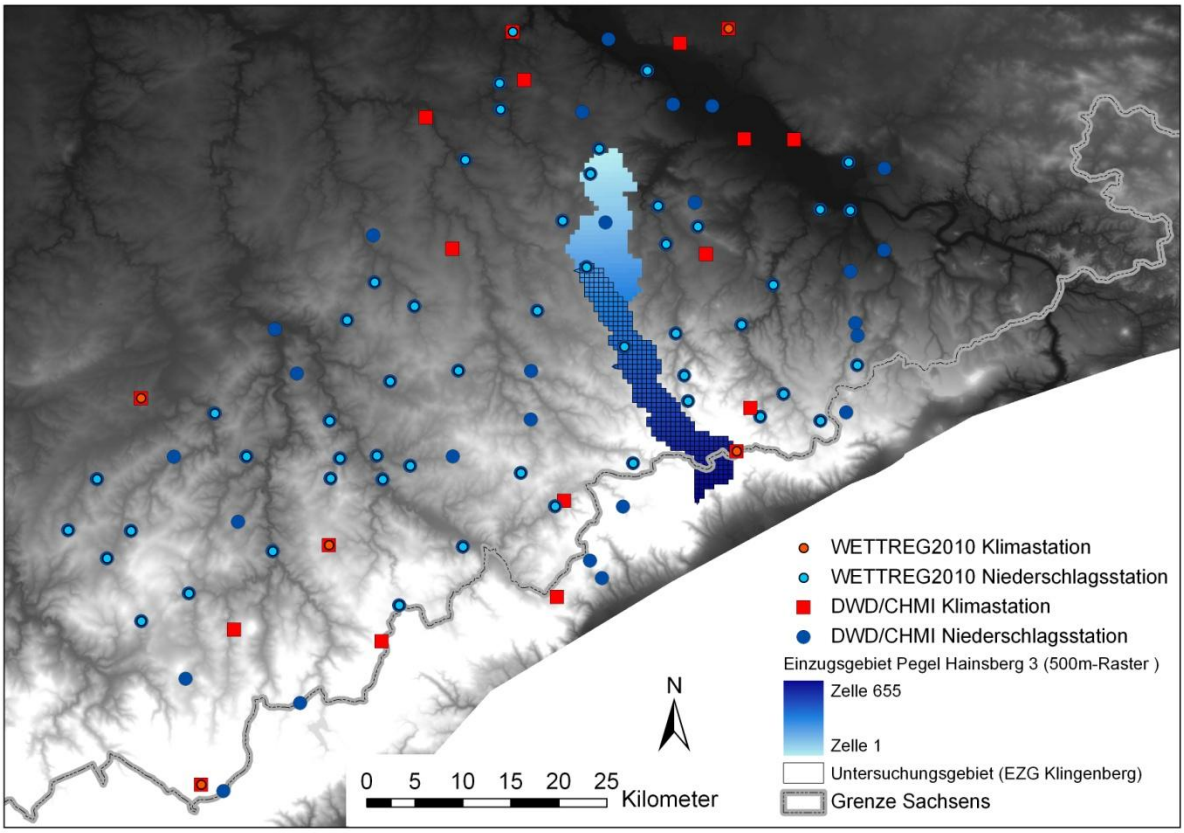


Abbildung 16: Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Hainsberg 3 (500x500 m Raster mit den Indizes 1 bis 655) und das Untersuchungsgebiet bis zum Pegel Klingenberg (schwarz umrandete Zellen) mit der Stationsauswahl aus DWD- und WETTREG2010 Stationen für die Regionalisierung (Kriging).

Bei meteorologischen Größen ist zu beachten, dass ein Trend mit der Höhe zwar im Mittel gilt, jedoch in Tagesauflösung nicht zwingend erkennbar sein muss. Daher wurden die Ergebnisse beider Regionalisierungsvarianten (OK und EDK) miteinander verglichen, um entscheiden zu können welches Verfahren gewählt werden sollte.

Abbildung 17 zeigt die Mitteltemperaturen der DWD-Klimastationen im Gebiet über der Geländehöhe (rote Kreise). Hinzu kommen die regionalisierten Mitteltemperaturen, einerseits mit EDK (grüne Punkte), andererseits mit OK (blaue Punkte). Bei den Mitteltemperaturen aus EDK geht der den Stationswerten immanente Trend direkt in das Kriging ein. Daher ergeben die Werte ein enges Band. Bei den mit OK berechneten Werten ist gleichermaßen der Trend mit der Höhe zu sehen, allerdings nicht so eng. Daran wird ersichtlich, dass die Stationsdichte der Klimastationen ausreicht, auch ohne direkte Verwendung des Trends einen plausiblen Verlauf mit der Höhe darzustellen. Die blauen Punkte streuen mehr um den linearen Trend. Das ist plausibel, da auch die Stationswerte eine ähnliche Streuung aufweisen.

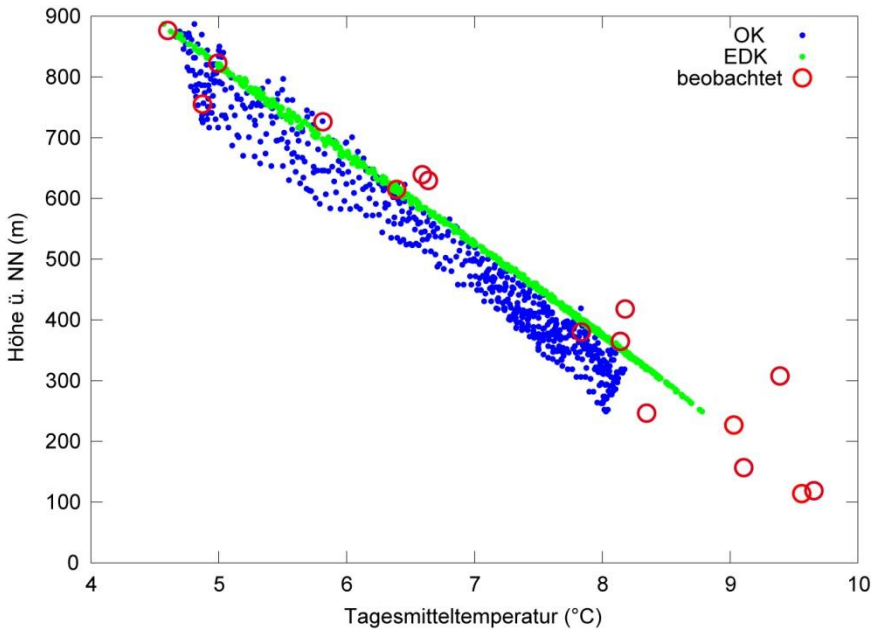


Abbildung 17: Tagesmitteltemperaturen der DWD/CHMI-Klimastationen, sowie die mittels OK bzw. EDK regionalisierten Tagesmitteltemperaturen aller 655 Rasterpunkte im Einzugsgebiet Hainsberg 3 über der Geländehöhe.

Abbildung 18 zeigt die Differenzen der Tagestemperaturen an allen Tagen per EDK bzw. OK für die Rasterzelle 100 (unterer Teil des Einzugsgebietes). Der Erwartungswert der Differenz liegt bei 0.003°C und die absoluten Differenzen überschreiten selten ein Grad Celsius. Typisch sind die charakteristischen Bereiche, wo die Tagestemperaturen aus EDK größer bzw. kleiner als die Tagestemperaturen aus OK sind. Das hängt damit zusammen, dass die Datenreihen der Klimastationen des DWD nicht lückenlos sind (vgl. Abbildung A 3). Verändert sich die Stationsauswahl, gibt es gleichfalls Unterschiede zwischen EDK und OK. Beispielsweise sind für den Rasterpunkt 100 die Stationen Nossen, Freiberg, Dresden Strehlen bzw. Hosterwitz und Dippoldiswalde-Reinberg die nächstgelegenen. Damit würden diese Stationen das größte Gewicht erhalten. An keiner dieser Stationen sind an den Tagen von 10 000 bis 15 000 (etwa 1978 bis 1991) Temperaturdaten verfügbar, weshalb weiter entfernte Stationen ein größeres Gewicht erhalten.

Diese Veränderungen auf der Grundlage der wechselnden Stationsdichte sind in der tatsächlichen Datenreihe wegen der geringen Erwartungswerte nicht als temporärer Trend zu identifizieren. Daher kann auch nicht gesagt werden, welche der beiden Regionalisierungsmethoden die plausiblere ist.

Abbildung 19 und Abbildung A 9 unterstreichen die geringen Abweichungen beider Methoden über den gesamten beobachteten Temperaturwertebereich im Zeitraum von 1951 bis 2010.

Auch in anderen Teilen des Einzugsgebietes gelten die oben beschriebenen Verhältnisse (vgl. Abbildung A 8, Temperaturdifferenzen am Rasterpunkt 650). Dort sind die Differenzen bei einem Erwartungswert von 0.08°C noch kleiner, was darauf zurückzuführen ist, dass die Station Zinnwald durch die örtliche Nähe ein sehr großes Krige-Gewicht erhält. Dadurch und da die Temperaturen dieser Station durch die vorher nur an dieser Station durchgeführte Lückenfüllung und Verlängerung weitgehend lückenlos vorhanden sind, kommt es zu geringeren charakteristischen Sprüngen in der Differenz zwischen Tagestemperatur aus EDK bzw. aus OK.

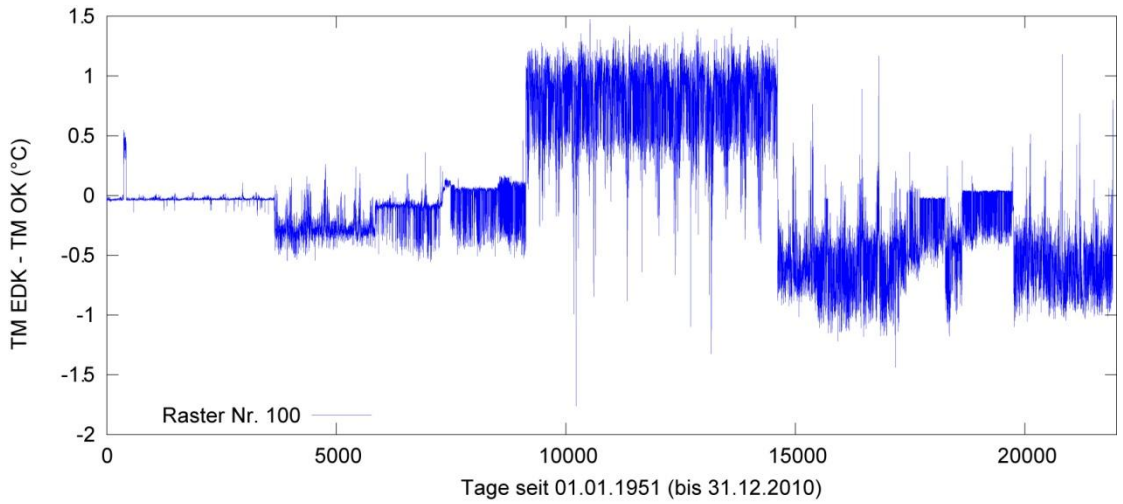


Abbildung 18: Differenzen der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.

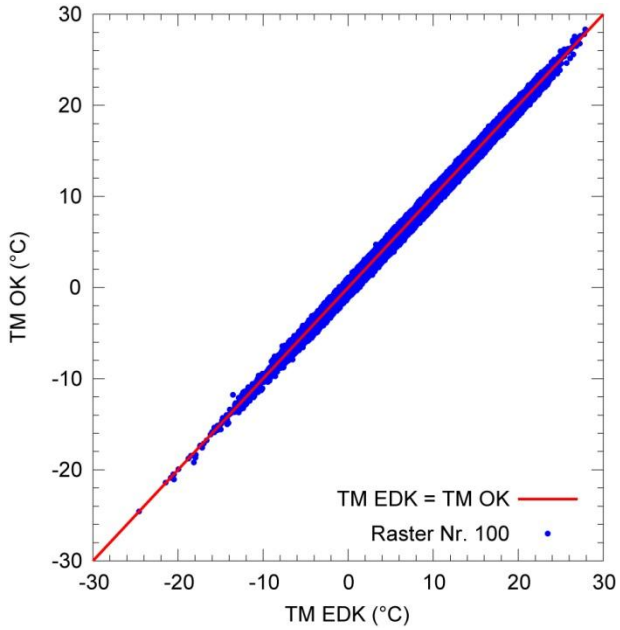


Abbildung 19: Vergleich der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.

Weiterhin diesbezüglich untersuchte Parameter sind der korrigierte Niederschlag und die relative Feuchte. Die Abhängigkeit des Niederschlages mit der Höhe ist in Abbildung 20 dargestellt. Der Zusammenhang des Niederschlages mit der Höhe ist wesentlich lockerer als bei der Temperatur, jedoch noch erkennbar. Die regionalisierten Niederschlagswerte mit OK liefern wie auch bei der Temperatur eine etwas weiter streuende Abhängigkeit mit der Höhe als die Niederschlagswerte aus EDK.

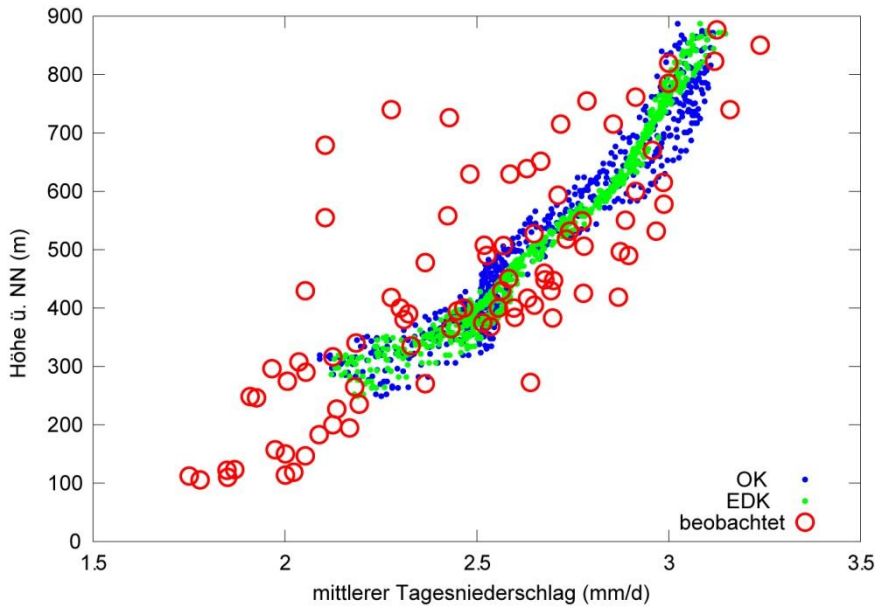


Abbildung 20: Mittlerer Tagesniederschlag der DWD/CHMI-Stationen, sowie die mittels OK bzw. EDK regionalisierten mittleren Tagesniederschläge aller 655 Rasterpunkte im Einzugsgebiet Hainsberg 3 über der Geländehöhe.

In Abbildung 21 und Abbildung A 10 werden die Differenzen zwischen den Tagesniederschlägen aus EDK bzw. OK an den Rasterpunkten 100 (Erwartungswert 0.05 mm) bzw. 650 (Erwartungswert 0.00008 mm) gezeigt. Auch diese Abbildungen unterstreichen die relativ geringen Unterschiede zwischen beiden Verfahren, sofern eine genügende Stationsdichte vorliegt.

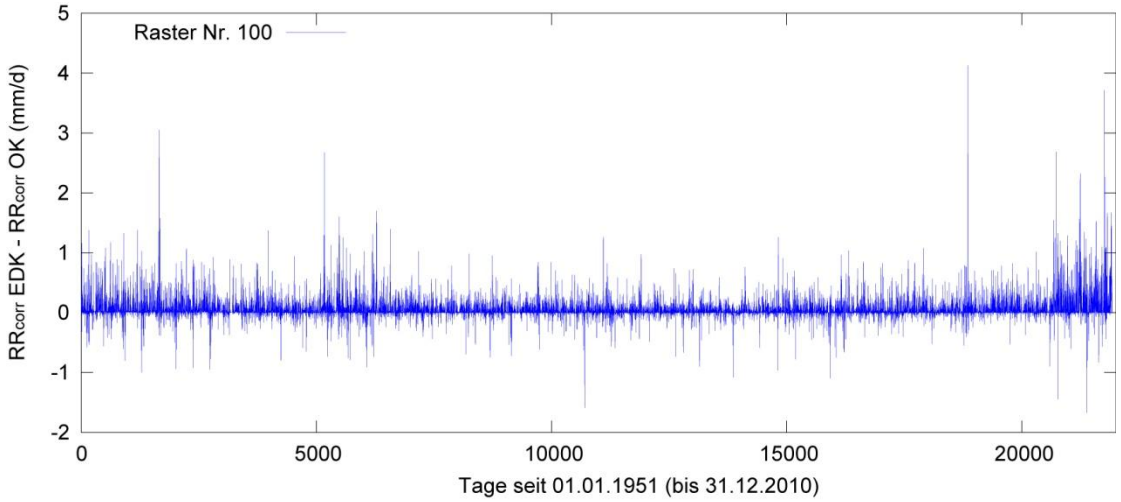


Abbildung 21: Differenzen der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.

Die Abbildung 22 und Abbildung A 11 bestätigen die geringen Unterschiede beider Verfahren über den gesamten beobachteten Niederschlagswertebereich im Zeitraum von 1951 bis 2010.

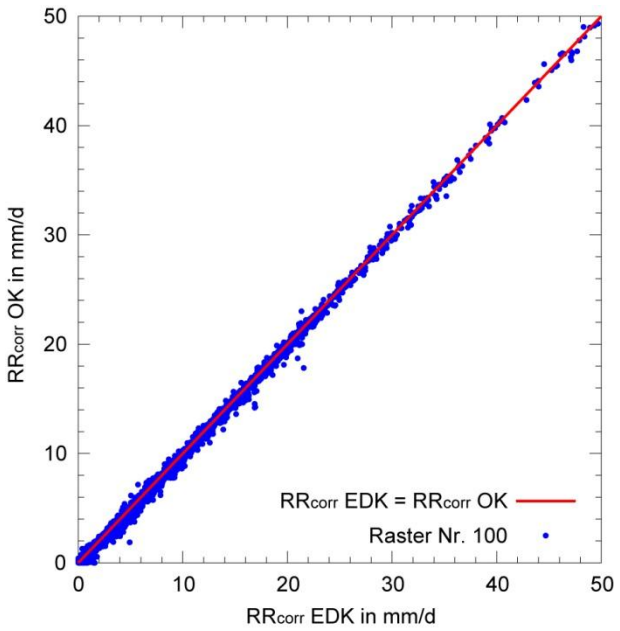


Abbildung 22: Vergleich der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.

Die relative Feuchte (Abhängigkeit mit der Höhe in Abbildung 23, Differenzen der Rasterpunkte 100 (Abbildung 24, Erwartungswert -0.15%) und 650 (Abbildung A 12, Erwartungswert -0.004%)) bringt keine neuen Erkenntnisse gegenüber denen aus der Mitteltemperatur und dem korrigierten Niederschlag. Auch hier streuen die regionalisierten Werte aus OK etwas mehr als die aus EDK, was im Hinblick auf die Stationswerte plausibel ist.

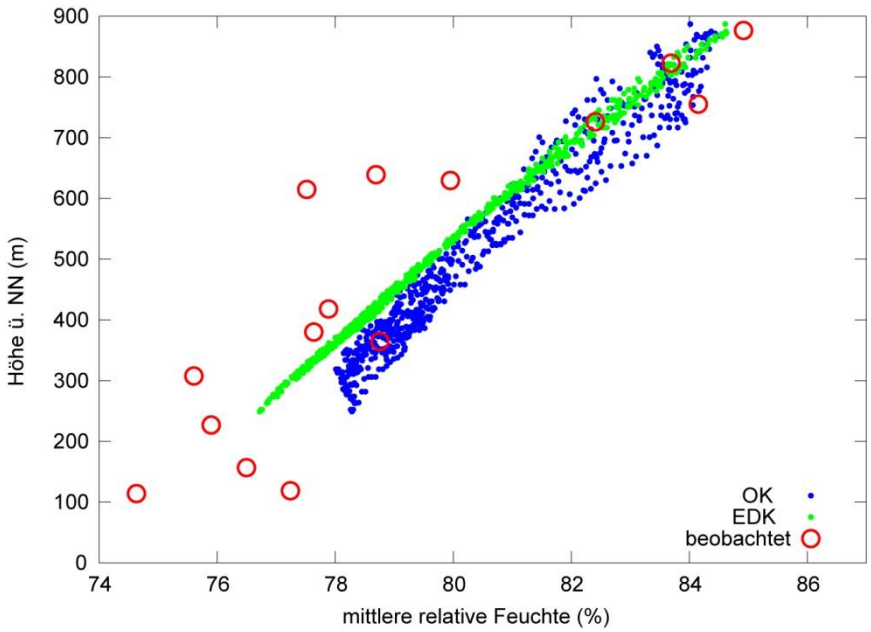


Abbildung 23: Mittlere relative Feuchtewerte der DWD/CHMI-Klimastationen, sowie die mittels OK bzw. EDK regionalisierten mittleren relativen Feuchtewerte aller 655 Rasterpunkte im Einzugsgebiet Hainsberg 3 über der Geländehöhe.

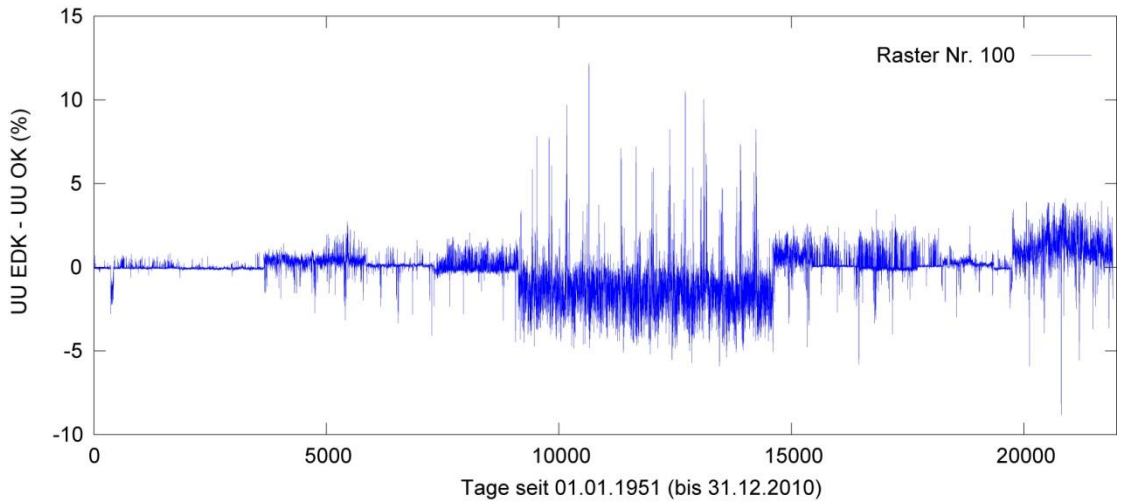


Abbildung 24: Differenzen der relativen Feuchte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.

Ein Großteil der täglichen Werte der relativen Luftfeuchte (UU) zwischen ca. 50% und 90% liegt in einem engen Bereich bis ±5% um die Linie UU EDK = UU OK (Abbildung 25 und Abbildung A 13).

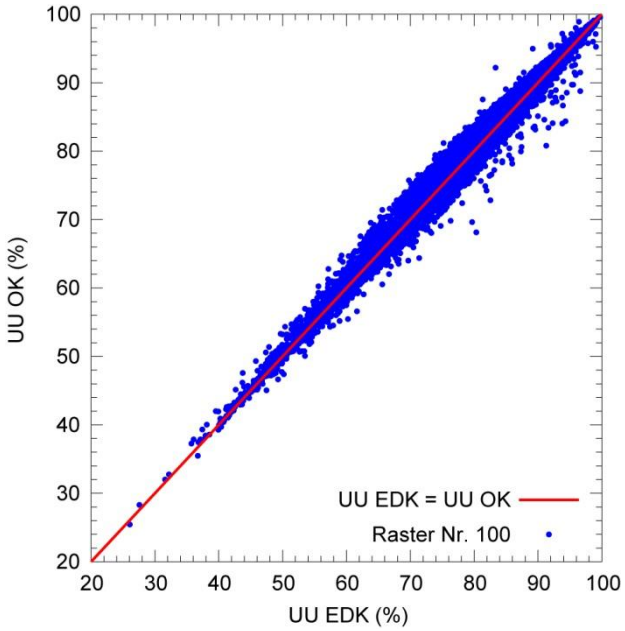


Abbildung 25: Vergleich der relativen Feuchtewerte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 100.

Aus den drei untersuchten Fällen konnte geschlussfolgert werden, dass es zu relativ geringen Abweichungen zwischen EDK und OK kommt. OK kann im vorliegenden Fall den Höhengradienten gut darstellen. Wegen der plausibleren Streuung und der damit verbundenen freieren Regionalisierung von Tagen, die nicht dem Trend entsprechen, wurde das Ordinary Kriging zur weiteren Verwendung für alle Klimagrößen außer der Temperatur angewendet. Für die Temperatur wurde aufgrund der strengeren Höhenkorrelation das External Drift Kriging verwendet.

Es ist zu beachten, dass diese Schlussfolgerung für das untersuchte Gebiet mit den dort liegenden DWD/CHMI-Stationen gilt. Ob OK entsprechende Gradienten in anderen Gebieten mit anderen Sta-

tionsdichten und anderen morphologischen Eigenschaften ähnlich darstellen kann wie EDK, muss von Fall zu Fall untersucht werden.

Auch die Daten aus WETTREG 2010 wurden regionalisiert. Dazu gab es einige Besonderheiten zu beachten, die im Folgenden näher erläutert werden.

Die Stationsdichte der Niederschlagsstationen, insbesondere aber der Klimastationen ist in WETTREG 2010 erheblich geringer (Abbildung 16). Bei den Klimastationen fällt auf, dass in der Nähe des Einzugsgebietes ausschließlich noch Zinnwald-Georgenfeld und Dresden-Klotzsche verfügbar sind. Damit ist die Informationsdichte in dem Einzugsgebiet erheblich geringer als bei DWD/CHMI-Daten. Die regionalisierte Darstellung der Mitteltemperatur im Einzugsgebiet profitiert bei den DWD-Daten besonders von der Station Dippoldiswalde, welche östlich vom unteren Drittel des Einzugsgebietes liegt. Die Station Dippoldiswalde-Reinberg liegt auf 365 mNN. Damit kann diese Station als repräsentativ für den mittleren Bereich des Einzugsgebietes der Wilden Weißeritz angesehen werden. Wird bei WETTREG 2010 die Temperatur ohne Dippoldiswalde regionalisiert, muss die Information aus Dresden und Zinnwald generiert werden. Andere Stationen erhalten wegen deren großer Entfernung beim Kriging nur sehr geringe Gewichte. Damit wird die Darstellung des Temperaturgradienten zwischen Dresden und Zinnwald bei OK quasi linear. Das entspricht jedoch nicht der Höhenverteilung, welche einen konvexen Verlauf hat (d.h. in der Mitte des Einzugsgebietes ist die Höhe geringer als der Mittelwert der Höhen von Dresden und Zinnwald). Da die Temperatur jedoch einen ausgeprägten Trend mit der Höhe hat, wird die Temperatur im unteren und im mittleren Teil des Einzugsgebietes signifikant unterschätzt (bis zu 1.3 K). Nur der Kammbereich des Erzgebirges kann plausibel dargestellt werden, da die Station Zinnwald vor Ort liegt. Aus diesem Grund wird für WETTREG 2010 die Temperatur mit EDK regionalisiert, da auf diese Weise die geringere Stationsdichte nur einen geringeren Einfluss ausübt.

Die Regionalisierung der Klimadaten ist begrenzt abhängig von der Stationsdichte. Daher erfolgte ein Vergleich der Klimadaten von DWD/CHMI und WETTREG 2010 auf derselben Stationsdichte. Die DWD/CHMI-Daten wurden neben der vollständigen Verwendung aller zur Verfügung stehenden Stationen (unmaskierter Datensatz) auch mit der geringeren Stationsdichte, welche analog in WETTREG 2010 vorhanden ist regionalisiert (maskierter DWD Datensatz). Dabei war zu beachten, dass beim Szenario A1B alle Daten vorlagen, jedoch bei A2 und B1 einige wenige für den vollständigen Zukunftszeitraum von 2001 bis 2100 fehlten (vgl. Kapitel 4.4.3). Das betraf unter den 56 ausgewählten Stationen in Marienberg (AWST) die Sonnenscheindauer und in Hartha-Fördergersdorf den Niederschlag. Daher wurden die genannten Stationen bei den jeweiligen meteorologischen Variablen nicht für die Regionalisierung verwendet (weder bei WETTREG 2010, noch bei der Regionalisierung der DWD-Daten mit reduzierter Stationsdichte).

4.4.5 Topografische Daten

Als Grundlage zur Bestimmung des Einzugsgebietes stand das erweiterte digitale Geländemodell DGM25 vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG 2009) mit einer räumlichen Auflösung von 20m x 20m zur Verfügung. Davon ausgehend wurde das Einzugsgebiet und Teileinzugsgebiete anhand der Pegelkoordinaten mit der ESRI-Software *ARCMAP* ermittelt. Die Generalisierung des 20m-Rasters in ein 500m-Raster erfolgte mit dem WaSiM Zusatztool *resample*. Dabei wurden die Höhen aller in einer 500m Zelle befindlichen 20m-Zellen gemittelt um eine neue mittlere Höhe für die 500m Zelle zu erhalten. Dadurch veränderten sich topographische Eigenschaften des Untersuchungsgebietes geringfügig. Die Einzugsgebietsfläche erhöht sich um 2,7km² auf 94,5km². Die minimale Höhe (Gebietsauslass) nimmt rund 20m zu, die maximale Höhe rund 22m ab. Die Höhenverteilung im Gebiet und die mittlere Höhe des Untersuchungsgebietes bleiben hingegen nahezu unverändert. Das veränderte Höhenmodell hat außerdem Auswirkungen auf andere topographische Eigenschaften, wie z.B. das Gefälle, die Exposition und andere von WaSiM benötigte Grids, wie z.B. die Fliessrichtung und das Fliesszeitsummengrid. Inwieweit sich diese Änderungen auf die Wasserhaushaltssimulation niederschlagen war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen und müsste separat geprüft werden.

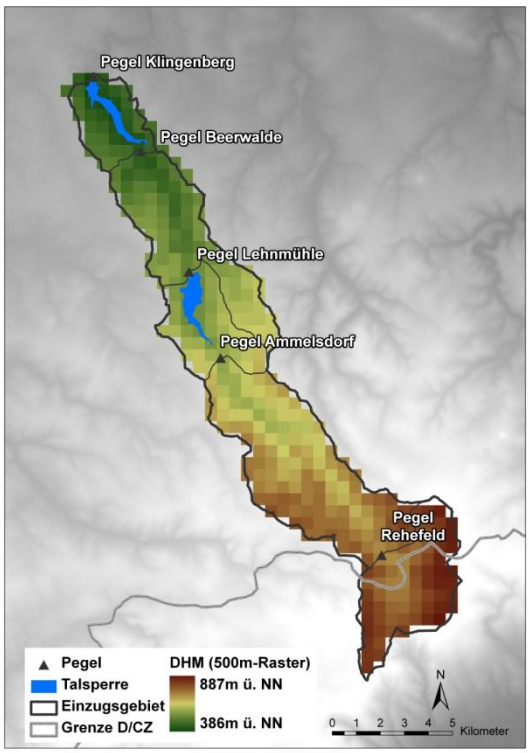


Abbildung 26: Generalisiertes digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebietes (500m Raster).

4.4.6 Landnutzungsdaten

Für die Beschreibung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet standen Daten von Luftbildüberfliegungen aus den Jahren 1992/1993 und 2005 zur Verfügung. Diese sogenannte Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus Colorinfrarot Luftbildern (im Folgenden CIR-Daten) wurde seitens des LfULG herausgegeben (LfULG 1994, 2009). Die für den Freistaat Sachsen flächendeckend vorliegenden Biotoptypen- und Landnutzungskarten wurden im Maßstab 1:10.000 erstellt. Für den tschechischen Teil des Einzugsgebietes standen Daten einer im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes EMTAL (Einzugsgebietsmanagement von Talsperren in Mittelgebirgen) durchgeführten Kartierung zur Verfügung (WALTHER 2004). Die Kartierung wurde seinerzeit den Klassen des bundeseinheitlichen ATKIS-Objektartenkataloges des ATKIS-DLM zugeordnet. Im Rahmen dieser Untersuchungen erfolgte die Zuordnung zu den gebildeten CIR-Landnutzungsklassen um eine einheitliche Beschreibung der Landnutzung auf deutschem und tschechischem Teil vornehmen zu können. Innerhalb der durchgeführten Untersuchungen wurden ausschließlich die CIR-Daten der Luftbildüberfliegung von 2005 – sowohl für den rezenten, als auch zukünftigen Zeitraum – verwendet. Es wurden keine Änderungen der Landnutzung in der Vergangenheit und keine Szenarien für zukünftig mögliche Landnutzungsänderungen berücksichtigt. Das Pflanzenwachstum, die Alterung der Vegetation und daraus resultierende veränderte Pflanzenparameter wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Für die CIR-Daten existiert eine Gruppeneinteilung (Kartiereinheiten) der Landnutzungstypen von einer allgemeinen Hauptgruppe (z.B. Wälder und Forsten) über eine Untergruppe (z.B. Nadelwald) bis hin zum Bestand (z.B. Nadelwald Reinbestand Fichte) mit dessen Ausprägung und Nutzung. Als Generalisierungsgrad wurde die „Legendennummer" der CIR-Daten verwendet. Diese setzt sich aus den drei Ziffern der Haupt-, Untergruppe und der ersten Ziffer des Bestandes zusammen. Es wurden anhand der im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Landnutzungen insgesamt 28 Landnutzungsklassen gebildet, zu denen 103 einzelne speziellere Landnutzungen anhand der Legendennummer zugeordnet wurden. Die somit flächenhaft vorliegenden Landnutzungsinformationen wurden dann auf das 500m-Raster generalisiert. Dies erfolgte analog zum DHM mit dem Tool *resample*. Dabei wurde der flächenmäßig größte Anteil innerhalb einer 500m-Rasterzelle als neue, für die jeweilige Zelle gültige Landnutzung festgelegt. Aus den ursprünglich 28 Klassen blieben nach der Generalisierung 12 Klassen im Untersuchungsgebiet übrig (Abbildung 27).

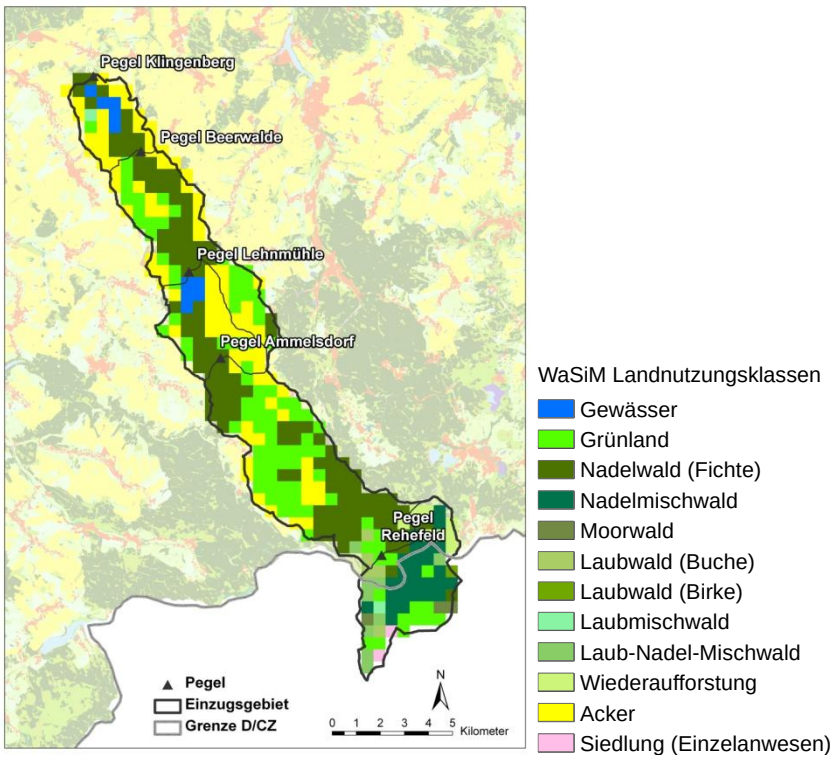


Abbildung 27: In WaSiM verwendete Landnutzungsklassen für das Untersuchungsgebiet (500m-Raster).

WaSiM ermöglicht die Berücksichtigung von mehreren Vegetationsschichten. Dieser sogenannte „multilayer-landuse" Ansatz wurde für sämtliche Waldlandnutzungsklassen berücksichtigt, indem eine grasartige Vegetationsschicht unter der „Wald-Vegetation" implementiert wurde. Damit wird den natürlichen Bedingungen im Untersuchungsgebiet Rechnung getragen. Zusätzlich wurde dieser Ansatz genutzt um Waldmischbestände zu simulieren (z.B. Nadelmischwald bestehend aus Fichte und Kiefer). Dabei wurde durch entsprechende Parametrisierung der Ansatz derart geändert, dass die Vegetationsschichten nicht untereinander (vertikal), sondern nebeneinander bei gleichem Strahlungsangebot (k_extinct=10) und ohne Reduktion des aerodynamischen Widerstandes (LAI_scale=0) im Modell berücksichtigt werden.

Außer den Gewässer- und Siedlungszellen (statischer Ansatz) wurden die Landnutzungsklassen mit den dynamischen Phänologieansätzen DP2 (für alle Waldklassen) und DP3 (Grünland, Acker und Grasschicht) simuliert. Die Parametrisierung der phänologischen Ansätze erfolgte auf Basis der Erkenntnisse des KLIWEP-Projektes („Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten **Kli**maveränderungen auf den **W**asser- und Stoffhaushalt im **E**inzugsgebiet der **P**arthe", PÖHLER et al. 2007 und CHMIELEWSKI et al. 2008). Dazu ergänzend wurden Empfehlungen und Vorgaben seitens des Modellentwicklers Dr. Jörg Schulla berücksichtigt. Für die Ackerflächen wurde ein Unikorn Ansatz verwendet. Dabei wurden die Parameter aus mehreren Parametern von Feldfrüchten (Triticale, Winterroggen, -gerste, -weizen und – raps) gemittelt und verwendet. Es erfolgte keine Berücksichtigung von Fruchtfolgen.

Die Landnutzungsparameter waren nicht Gegenstand der Modelloptimierung und blieben über den gesamten Simulationszeitraum und für alle Modellsimulationen konstant.

4.4.7 Bodendaten

Für die Beschreibung des Bodens standen für den deutschen Teil des Untersuchungsgebietes Kartenblätter des amtlichen bodenkundlichen Kartenwerkes Sachsen im Maßstab 1:50.000 (BK50) zur Verfügung. Die Kartenblätter enthalten flächenhaft Informationen zum Auftreten von Leitbodenformen. Die Charakteristiken dieser Leitbodenformen, wie z.B. Horizontaufbau, Horizontmächtigkeiten, Bodenarten der einzelnen Bodenhorizonte, Skelett-, Humusgehalt, Lagerungsdichten, etc. sind in einer Datenbank hinterlegt. Diese enthält zusätzlich auch Angaben für bis zu maximal fünf Be-

gleitböden pro Leitboden. Da das Auftreten dieser Begleitböden nur prozentual als Flächenanteil für ein Kartenblatt innerhalb der teilweise auch räumlich getrennten Flächen des Leitbodens angegeben wird und keine direkte Verortung der Begleitböden möglich ist, werden diese für die Simulationen nicht mit berücksichtigt. Für den tschechischen Teil des Untersuchungsgebietes wurden analog zur Landnutzung Daten aus dem EMTAL-Projekt verwendet. Parallel zur Kartierung der Landnutzung erfolgte für den tschechischen Teil des Einzugsgebietes der Wilden Weißeritz eine Bodenkartierung durch Herrn Dipl. Geoökologen Gregor Merting (WALTHER 2004). Dabei wurden Leitbodentypen bestimmt und es erfolgte eine Charakterisierung der Bodenhorizonte ähnlich der für die BK50 verfügbaren Eigenschaften. Die Informationen für den tschechischen Teil und der Kartenblätter des deutschen Teils wurden dann zusammengefügt. Im Anschluss erfolgte die Generalisierung der Bodenkarte des Untersuchungsgebietes mit dem Tool *„resample"* auf das 500m-Raster. Der Leitbodentyp mit dem flächenmäßig größten Anteil innerhalb einer 500m-Rasterzelle wurde dabei als der für die jeweilige Zelle gültige Leitbodentyp festgelegt. Aus 74 Leitbodentypen ergaben sich nach der Generalisierung 55 Leitbodentypen im Untersuchungsgebiet.

Die Parametrisierung der Leitböden in WaSiM erfolgte für die einzelnen Bodenhorizonte anhand der Bodenarten über die bodenkundliche Kartieranleitung (KA5, AD-HOC AG BODEN 2005). Es wurden Tabellenwerte für die van Genuchten Parameter (alpha, n, Rest- und Sättigungswassergehalt, VAN GENUCHTEN 1976) und die gesättigte hydraulische Wasserleitfähigkeit entnommen. Da letztere maßgeblich von der Lagerungsdichte abhängig ist und diese Angaben nicht für alle Bodenhorizonte verfügbar waren, wurde die Lagerungsdichte bei fehlenden Angaben über einen Ansatz nach MÜLLER & WALDECK (2011) ermittelt.

Die Simulation mit WaSiM wurde ohne Verwendung des Grundwassermoduls durchgeführt. Um numerische Probleme bei der Lösung der Richards-Differentialgleichung zu vermeiden und den modellierten Grundwasserspiegel innerhalb der Bodensäule einer Zelle zu halten, musste die tatsächliche Bodenmächtigkeit künstlich erhöht werden. Dafür wurde der letzte Bodenhorizont verdoppelt (kopiert) und nur dessen Bodenmächtigkeit anhand der verbliebenen layer (siehe folgender Absatz) vergrößert.

In WaSiM ist es möglich, den vertikalen Bodenwassertransport in den Bodenhorizonten durch Verwendung von mehreren Schichten (layer) höher aufgelöst zu simulieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle in WaSiM verwendeten Leitböden jeweils die gleiche Anzahl an layern besitzen müssen. Es wurden aufgrund der künstlichen Erhöhung der Bodenmächtigkeit pro Leitbodentyp 35 layer verwendet. Dabei wurde der oberste mineralische Bodenhorizont mit einer layer-Dicke von 0,05 Metern, die mittleren Bodenhorizonte mit 0,1 Metern und der jeweils letzte Bodenhorizont mit 0,2 Metern eingeteilt. Bei einer Horizontmächtigkeit von z.B. 20cm des obersten Bodenhorizontes wären das demzufolge vier layer. Die tatsächlichen Mächtigkeiten eines Bodenhorizontes wurden entsprechend auf- oder abgerundet um ganzzahlige Vielfache der Diskretisierungsstufen zu erhalten. Es ergaben sich Bodenmächtigkeiten der Leitböden im Untersuchungsgebiet zwischen 4 Metern und 5,5 Metern. Die originalen Bodenmächtigkeiten aus den Datenbanken der BK50 und der Kartierung auf tschechischer Seite betragen ca. 0,5 Meter bis 2,5 Meter.

Die Abnahme der gesättigten hydraulischen Wasserleitfähigkeit mit der Bodentiefe kann in WaSiM zusätzlich zu den Angaben in den einzelnen Bodenhorizonten durch den Parameter k_{rec} beschrieben werden. Dieser war Gegenstand der Optimierung und wurde anhand der Gleichung (38) (vgl. Kapitel 4.5.4) berücksichtigt. Sämtliche andere Parameter blieben analog der Landnutzungsparameter über den gesamten Simulationszeitraum und für alle Modellsimulationen konstant.

4.4.8 Hydrologische Daten

Für die Modelloptimierung und –validierung wurden Durchflussdaten verwendet. Im Modellgebiet A (Einzugsgebiet bis Pegel Ammelsdorf, vgl. Kapitel 4.5.2) standen für den Pegel Ammelsdorf lückengefüllte und vom LfULG geprüfte Durchflussdaten im Zeitraum vom 01.11.1945 bis 31.10.2011 zur Verfügung. Die Lückenfüllung in diesem Zeitraum erfolgte im Rahmen des von der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV) finanzierten Projektes HWRESA („Entwicklung einer neuen Hochwasserstatistik für Sachsen durch gekoppelte Auswertung meteorologisch-hydrologischer Daten im regionalen Bezug") am Lehrstuhl für Hydrologie der TU Dresden. Dabei konnten die Lücken im Zeitraum vom 01.11.1962 bis 31.10.1963 und 01.01.2003 bis 31.05.2003 mittels einer multiplen line-

aren Regression geschlossen werden, so dass eine durchgängige tägliche Durchflusszeitreihe verfügbar war.

Aufgrund der ungenügenden Datenlage am Pegel Klingenberg (Auslasspegel der Talsperre Klingenberg, Datenlücken vom 01.11.1977 bis 31.10.1978 und 01.11.1979 bis 18.09.2008) wurde aus Talsperrenbewirtschaftungsdaten der Talsperren Lehnmühle und Klingenberg (Zuflüsse, Abgaben, Speicheränderung) eine durchgängige Zeitreihe für den Pegel Klingenberg generiert.

4.5 Automatische Kalibrierung von WaSiM-ETH

Krause et al. (KRAUSE 2005) empfehlen die Kalibrierung und Validierung von hydrologischen Modellen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gütekriterien, welche einerseits die Abbildungsgüte verschiedener Zustände des Hydrographen berücksichtigen, als auch Gütekriterien, die Aussagen über den absoluten oder relativen Volumenfehler zulassen.

Durch modellbedingte Unzulänglichkeiten in der Abbildung relevanter hydrologischer Prozesse ist es zumeist nicht möglich, sowohl die Abflussdynamik im Niedrigwasser- und Hochwasserbereich als auch das Abflussvolumen exakt zu modellieren.

Somit ergeben sich konträre Ziele, um einerseits die Abbildungsgüte verschiedener Zustände des Hydrographen exakt zu modellieren und um andererseits den absoluten oder relativen Volumenfehler möglichst zu minimieren. Sind verschiedene Zielfunktionen bei einer Optimierung zu berücksichtigen, erweist sich eine sogenannte multikriterielle Optimierung (MKO) als geeignete Methode. Dabei ist es auch möglich konträre Zielfunktionen zu betrachten.

Es sei $\boldsymbol{x} = x_{i=1}, \dots, x_{i=n} \in \mathbb{R}^N, i = 1, \dots, N$ ein Tupel aus N Entscheidungsvariablen x_i im Variablenraum X. Mit Hilfe des Vektors der Zielfunktionen $f\ \boldsymbol{x} = f_{m=1}\ \boldsymbol{x}, \dots, f_{m=M}(\boldsymbol{x})$, mit M Zielfunktionen $f_m\ \boldsymbol{x}$ lässt sich der Entscheidungsvariablensatz in den Zielraum überführen $f_1\ \boldsymbol{x}, \dots, f_M\ \boldsymbol{x} : X \rightarrow \mathbb{R}^M$.

Ziel der MKO ist zumeist den Vektor der Zielfunktionen zu minimieren ($min\ f(\boldsymbol{x})$). Dabei wird ein Satz Pareto-optimaler Lösungen Θ gesucht, so dass $\Theta = \boldsymbol{x} \mid \boldsymbol{x} \in X \wedge \nexists\, \boldsymbol{x} \in X : \boldsymbol{x} \prec \boldsymbol{x}$. Durch das Konzept der Dominanz kann eine Rangordnung zwischen zwei Lösungen $\boldsymbol{x}$ und $\boldsymbol{x}$ hergestellt werden. Die jeweils bessere Kompromisslösung im Sinne der Pareto-Optimalität ist diejenige, welche die jeweils andere dominiert. Es gilt $\boldsymbol{x} \prec \boldsymbol{x}$ genau dann, wenn $\forall m \in 1, \dots, M : f_m(\boldsymbol{x} \leq f_m(\boldsymbol{x}))$ und $\exists m \in 1, \dots, M : f_m\ \boldsymbol{x} < f_m(\boldsymbol{x})$.

Durch die MKO lässt sich damit der Satz bestmöglichster Kompromisslösungen, dem Pareto-Satz, zwischen konträren Lösungen approximieren. Der Pareto-Satz besteht aus sogenannten Pareto-optimalen Lösungen. Pareto-optimal ist eine Lösung genau dann, wenn keine anderen Lösungen gefunden werden können, bei denen die Verbesserung einer Zielfunktion, zu einer gleichzeitigen Verbesserung der anderen betrachteten Zielfunktionen führt. Das bedeutet, die Verbesserung bezüglich einer Zielfunktion würde eine Verschlechterung mindestens einer anderen Zielfunktion zur Folge haben.

Um eine objektive Kalibrierung des Wasserhaushaltmodells WaSiM-ETH zu erzielen wird deshalb eine multikriterielle Optimierungsstrategie angewandt. Ähnliche Studien sind in der Literatur zu finden z.B. SHRESTHA & RODE (2008), DUNG et al. (2011), JOHNSEN et al. (2005), SHAFII et. DE SMEDT (2009), XU et al. (2011).

Die automatische Kalibrierung von WaSiM durch den Optimierungsalgorithmus erfolgte im Zeitraum der sechs hydrologischen Jahre 2000 bis 2005 (01.11.1999 bis 31.10.2005) mit zwei Jahren Modellvorlaufzeit (ab 01.11.1997).

4.5.1 Multikriterieller Optimierungsalgorithmus

Die verwendete evolutionäre Strategie „Multi-Objective Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy" wurde von Igel et. al (MO-CMA-ES; IGEL 2007) entwickelt. Diese basiert auf einer Weiterentwicklung des monokriteriellen „Covariance Adaptation Evolution Strategy „ Algorithmus (CMA-ES; HANSEN et al. 2006).

Der MO-CMA-ES Algorithmus ist in der freien Shark Library (IGEL 2008) enthalten. Im Produkt P3.2.1d "Multikriterielles Optimierungsverfahren zur Bewirtschaftungsplanung von Stauräumen"

des Teilprojekts 3.2.1 stellt der Algorithmus die Grundlage des neu entwickelten multikriteriellen Frameworks. Dieses Framework wurde analog zur automatischen Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells genutzt. So können mittels openMP (OPENMP 2002) bis zu 48 Modellevaluationen gleichzeitig auf dem Hochleistungsrechner des Zentrums des ZIH der TU-Dresden „ATLAS" durchgeführt werden.

Der MO-CMA-ES Algorithmus wird bei allen Optimierungen mit einem Box-Constraint Handler nach Igel et al. (IGEL 2007) betrieben.

4.5.2 Unterteilung des Untersuchungsgebietes in Modellgebiete

Durch die ungenügende Qualität und Verfügbarkeit der Durchflussbeobachtungsdaten an den durch Talsperren beeinflussten Pegeln Klingenberg und Lehnmühle wurde das Untersuchungsgebiet in drei Teileinzugsgebiete getrennt. Abbildung 28 zeigt die Aufteilung des Untersuchungsgebietes in die Modellgebiete A, B und C.

Modellgebiet A erstreckt sich über die Teileinzugsgebiete (TEZG) der Pegel Rehefeld und Ammelsdorf. Modellgebiet B beinhaltet das TEZG der Talsperre Lehnmühle unterhalb des Pegels Ammelsdorf. Das Modellgebiet B wurde aufgrund der Datenlage nicht eigenständig kalibriert und die Parametrisierung bezüglich der optimierten Parameter wurde aus dem Modellgebiet C aufgrund ähnlicher Gebietseigenschaften übertragen. Das TEZG zwischen dem Pegel Lehnmühle und dem Pegel Beerwalde bildet zusammen mit dem TEZG der Talsperre Klingenberg unterhalb des Pegels Klingenberg das Modellgebiet C.

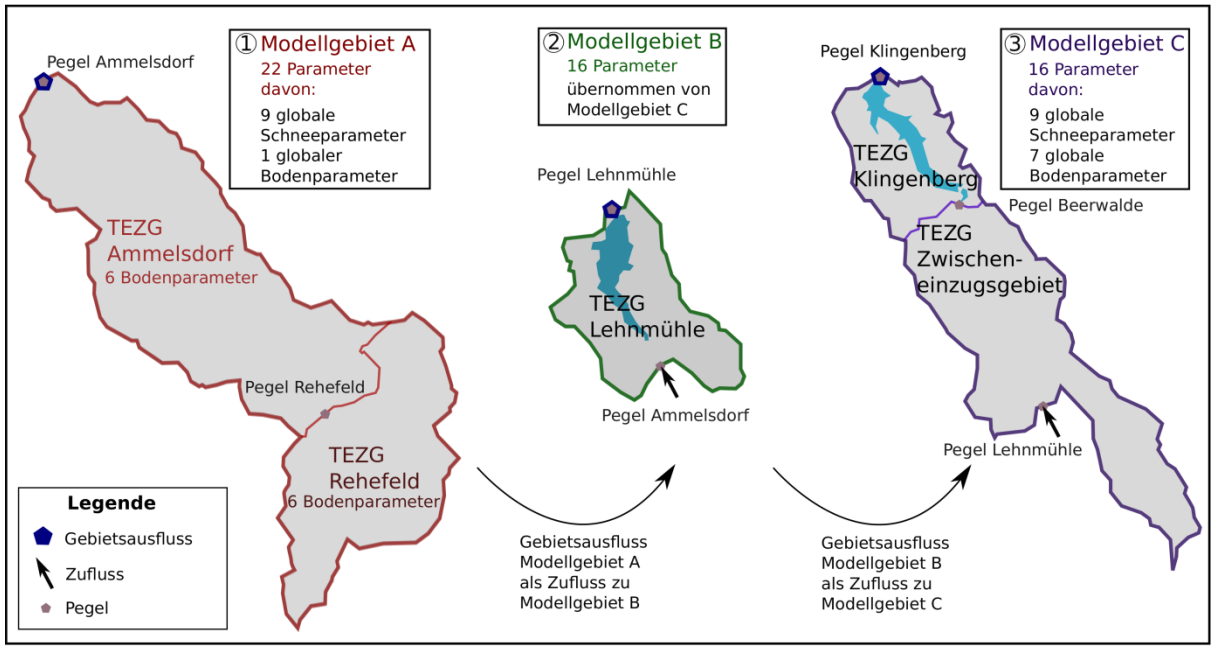


Abbildung 28: Aufteilung des Untersuchungsgebietes in die Modellgebiete A, B und C. Modellgebiet A entwässert in Modellgebiet B, Modellgebiet B entwässert in Modellgebiet C. Die Fließrichtung im Schema folgt von unten nach oben. Weiterhin sind die Art und Anzahl der zu optimierenden Modellparameter je Modellgebiet angegeben.

Für das Modellgebiet A wurden die Durchflussbeobachtungsdaten des Pegels Ammelsdorf zur Kalibrierung und Validierung verwendet (vgl. Kapitel 4.4.8). Für das Modellgebiet C konnten aus den Bewirtschaftungsdaten der Talsperren Klingenberg und Lehnmühle (vgl. Kapitel 4.4.8) Durchflussbeobachtungsdaten für die Kalibrierung und Validierung berechnet werden. Das Modellgebiet C wird an der Abflussspende des Modellgebietes C kalibriert. Die Bewirtschaftung der Talsperren wurde innerhalb der Simulationen nicht berücksichtigt, sie wurden als Gewässerzellen in WaSiM definiert, von denen Verdunstung möglich ist.

4.5.3 Zielfunktionen der multikriteriellen Optimierung

Das multikriterielle Optimierungsproblem wird mathematisch mit drei Zielfunktionen beschrieben. **Zielfunktion** $\boldsymbol{F_1}$ (Gleichung (33)) ist die dimensionslose Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE; NASH & SUTCLIFF 1970, Gleichung (34)). Diese wird zur Beschreibung der Abbildungsgüte verschiedener Zustände des Hydrographen verbreitet in der Hydrologie verwendet.

$$\boldsymbol{min}\, F_1 = \boldsymbol{min}\ -1 \times NSE\ \ ,\ \ F_1 \in\ -1, \infty \tag{33}$$

$$NSE = 1 - \frac{{}_{t=1}^{T}\ Q_O^t - Q_m^t\ ^2}{{}_{t=1}^{T}\ Q_O^t - Q_O}\ \ ,\ \ t = 1, \dots, T \tag{34}$$

Hierbei ist t der aktuelle Zeitschritt, $t = 1, \dots, T$ von insgesamt T Zeitschritten, Q_O^t der beobachtete, Q_m^t der modellierte Durchfluss und Q_O der Mittelwert aller beobachteten Durchflüsse im Betrachtungszeitraum. Da die Abweichungen von beobachteten und simulierten Werten quadratisch in die Berechnung eingehen, ist die NSE äußerst sensitiv gegenüber abweichenden Ergebnissen bei Extremabflüssen. Aus diesem Grund wird das Hochwasserereignisses im August 2002 (12.08.2002 bis 18.08.2002) im Kalibrierungszeitraum zur Berechnung der Zielfunktionen F_1 und F_2 nicht berücksichtigt. Dieses extreme Ereignis hätte anderenfalls einen unverhältnismäßig großen Einfluss auf die Parametrisierung.

Zielfunktion $\boldsymbol{F_2}$ (Gleichung (35)) setzt sich aus zwei Termen von absoluten Werten des Prozent Bias (PBIAS; GUPTA 1999; (Gleichung (36)) zusammen.

$$\boldsymbol{min}\ F_2\ = \boldsymbol{min}\ \ PBIAS_{H1}\ +\ PBIAS_{H2}\ \ ,\ F_2 \in\ 0, \infty \tag{35}$$

Wird der PBIAS über das gesamte Wasserhaushaltsjahr berechnet, können sich z.B. eine überschätzte Abflussbildung im ersten Halbjahr und eine unterschätzte Abflussbildung im zweiten Halbjahr ausgleichen (und umgekehrt). Um diesen Effekt zu vermeiden werden die beiden Halbjahre getrennt bewertet und die jeweils absoluten Werte der Halbjahre aufaddiert. Der $PBIAS_{H1}$ wird über den Zeitraum November bis April und der $PBIAS_{H2}$ wird im Zeitraum von Mai bis Oktober berechnet. Dabei ist die generelle Formel für den $PBIAS_H$ eines Halbjahres H wie folgt definiert (Gleichung (36)):

$$PBIAS_H = \frac{{}_{t=1}^{H}\ Q_O^t - Q_m^t}{{}_{t=1}^{H}\ Q_O^t} \times 100,\ \ t = 1, \dots, T \tag{36}$$

Zielfunktion $\boldsymbol{F_3}$ ist kein klassisches Gütekriterium; gewählt wurde das 25% Quantil des Grundwasserflurabstandes als mittlerer Zustand des Grundwasserspiegels im Modell (Gleichung (37)).

$$min\, F_3 = min\ \ Q_{50}\ \ Z_{GW}^t\ \ \ ,\ \ t = 1, \dots, T \tag{37}$$

Der mittlere Zustand des Grundwasserspiegels in der Simulationsperiode (angegeben in Metern unter der Geländeoberkante) hat sowohl Einfluss auf den NSE als auch auf den PBIAS. Durch die Zielfunktion F_3 werden Pareto-optimale Lösungen für den NSE und den PBIAS in unterschiedlichen mittleren Zuständen des Grundwasserspiegels ermittelt.

4.5.4 Variablen der multikriteriellen Optimierung

Optimiert wurden Parameter des Schneemoduls und des Bodenmoduls von WaSiM-ETH.

Das **Schneemodul** wurde mit dem Ansatz nach Anderson betrieben (Kapitel 4.2.5). Insgesamt neun Parameter dieses Ansatzes wurden für die Kalibrierung ausgewählt. Die Aufteilung des Niederschlages in flüssige und feste Anteile wird im Modell über die Parameter T_{OR} (Schwellenwert für den flüssigen Niederschlag) und den Parameter T_{TOR} (die Hälfte des Übergangsbereichs von Regen in Schnee) festgelegt. Die Schneeakkumulation und die Schneeschmelze wird über den Tagesgradfaktor ohne Windeinfluss C_1, den Tagesgradfaktor mit Windeinfluss C_2, der Speicherkapazität von Schnee für Wasser *CHW*, dem Koeffizienten für Wiedergefrieren *CRFR*, dem minimalen Schmelzfaktor durch Strahlung RF_{Min} und dem maximalen Schmelzfaktor durch Strahlung RF_{Max} beschrieben.

Zu kalibrierende Parameter des **Bodenmoduls** sind die Speicherrückgangskonstante des Direktabflusses K_1, die Speicherrückgangskonstante des Zwischenabflusses K_2, sowie die Speicherrückgangskonstante des Basisabflusses K_B. Weiterhin wurden der Korrekturfaktor der Transmissivität Q_0, die Entwässerungsdichte zur Generierung von Interflow D_R, der Anteil des Direktabflusses am Schmelzwasser S_{DF}, sowie die Abnahme der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe $k_{rec,H}$ parametrisiert. Der Parameter $k_{rec,H}$ ist für jeden der bis zu 7 Horizonte (H) des geschichteten Bodens im Untersuchungsgebiet zu bestimmen. $k_{rec,H}$ sollte dabei für die Horizonte monoton mit zunehmender Tiefe abnehmen um eine Reduktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Rahmen der Optimierung zu ermöglichen. Für eine Reduktion der dadurch benötigten Vielzahl an Parametern wurde eine Exponentialfunktion eingeführt mit der alle Parameter $k_{rec,H}$ der Bodentypen im Untersuchungsgebiet durch eine Proxyvariable beschrieben werden können. Der Parameter $k_{rec,H}$ im letzten Horizont jedes Bodens wurde konstant auf 0.25 festgesetzt.

Gleichung (38) beschreibt die Exponentialfunktion zur Beschreibung der Entwicklung von $k_{rec,H}$ mit der Bodentiefe.

$$k_{rec,H} = exp\ h_H \times P_{krec}\ ,\quad k_{rec,H} \in\ 0{,}253, \dots, 1{,}0 \tag{38}$$

Dabei ist P_{krec}der Proxyparameter für den gilt: $P_{krec} \in\ -0{,}2682, \dots, -0{,}001$. Der Parameter h_H ist der Level des Horizonts H und ist nach Tabelle 2 für die Horizontanzahl eines Bodens für jeden Horizont vergeben.

Tabelle 2: Level der Horizonte nach der Gesamtanzahl der Horizonte eines Bodens. Die Horizonte liegen dabei von links nach rechts jeweils tiefer geschichtet.

Horizontanzahl	Level h_H der Horizonte in Abfolge mit der Tiefe					
4	1	2	6			
5	1	2	4	6		
6	1	2	4	5	6	
7	1	2	3	4	5	6

Wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben wurde das Untersuchungsgebiet in drei Modellgebiete A, B, und C unterteilt:

Modellgebiet A

Für das Modellgebiet A, bestehend aus den Teileinzugsgebieten Ammelsdorf und Rehefeld sind 22 Parameter Gegenstand der Optimierung. Dabei werden Modellparameter des Schneemoduls, Bodenmoduls sowie einer Proxyvariablen für das Bodenmodell von WaSiM-ETH berücksichtigt. Während die neun Parameter des Schneemoduls global für beide TEZG gelten, werden die sechs Parameter des Bodenmoduls für beide TEZG getrennt optimiert. Die Proxyvariable des Bodenmoduls gilt ebenfalls global für beide TEZG. Die Parametergrenzen für die Parameter des Schneemoduls sind in

Tabelle 3 angegeben. Für die Parametergrenzen der Parameter des Bodenmoduls wird auf Tabelle 4 verwiesen.

Tabelle 3: Parametergrenzen der Parameter des Schneemoduls für das Modellgebiet A.

Parameter	T_O	T_{OR}	T_{TOR}	C_1	C_2	*CHW*	*CRFR*	RF_{Min}	RF_{Max}
Minimum	0,0	-1,0	-3,0	1E-06	1E-06	0,01	-1,0	0,0	0,0
Maximum	5,0	3,0	4,0	3	0,5	0,5	3,0	5,0	5,0

Tabelle 4: Parametergrenzen der Parameter des Bodenmoduls für das Modellgebiet A.

Parameter	K_1	K_2	K_B	Q_0	D_R	S_{DF}	P_{krec}
Minimum	0,001	0,001	0,1	0,5	6,0	0,01	-0,2682
Maximum	100	100	2,2	2,2	80	0,5	-0,001

Modellgebiet B

Für das Modellgebiet B wurden aufgrund unzureichender Daten für eine Kalibrierung des Modells im Modellgebiet und ähnlicher Gebietseigenschaften des Modellgebietes B und C die kalibrierten Modellparameter des Schneemoduls und Bodenmoduls vom Modellgebiet C übernommen.

Modellgebiet C

Für das Modellgebiet C, bestehend aus den Zwischeneinzugsgebieten Beerwalde und Klingenberg sind 16 Parameter Gegenstand der Optimierung. Davon wurden analog zum Modellgebiet A neun Parameter des Schneemoduls, sechs Parameter des Bodenmoduls und ein Parameter als Proxyvariable zur Beschreibung der Entwicklung von $k_{rec,H}$ mit der Bodentiefe berücksichtigt. Alle Parameter gelten global für beide TEZG.

Die Parametergrenzen der Parameter des Schneemoduls entsprechen denen des Modellgebietes A (vgl. Tabelle 3), für das Bodenmodul können die Parametergrenzen Tabelle 5 entnommen werden. Dabei wurde lediglich der Parameterraum der Drainagedichte D_R geringfügig verändert.

Tabelle 5: Parametergrenzen der Parameter des Bodenmoduls für das Modellgebiet C.

Parameter	K_1	K_2	K_B	Q_0	D_R	S_{DF}	P_{krec}
Minimum	0,001	0,001	0,1	0,5	8,0	0,01	-0,2682
Maximum	100	100	2,2	2,2	70	0,5	-0,001

4.5.5 Auswahl repräsentativer Lösungen für Unsicherheitsbetrachtungen

Kalibrierungs- und Validierungszeitraum

Um Parameterunsicherheiten zu identifizieren wurden nach der abgeschlossenen Optimierung optimale Kompromisslösungen aus dem erhaltenen Pareto-Satz gezogen. Hierbei werden die 30 besten Lösungen bezüglich Zielfunktion F_1 (unter der Bedingung $F_2 < 27\%$) als auch die 30 besten Lösungen bezüglich Zielfunktion F_2 (unter der Bedingung $F_1 > 0{,}3$) ermittelt. Damit stehen maximal 60 Lösungen (Parametersätze) für die Betrachtung von Parameterunsicherheiten im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum zur Verfügung. Durch die genannten Auswahlkriterien doppelt vorkommende Lösungen werden nur einmal berücksichtigt. Dadurch kann sich die maximale Anzahl von insgesamt 60 Lösungen reduzieren.

Projizierte Szenarien

Aus Gründen der enormen Rechenzeit, die benötigt würde um alle optimalen Kompromisslösungen (maximal 60, siehe oben) der Unsicherheitsbetrachtungen im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für alle Zeitscheiben, Klimamodelle, Realisierungen und Emissionsszenarien zu berechnen, wurde ein anderer Ansatz für die Unsicherheitsbetrachtungen in den projizierten Zeiträumen gewählt.

Hierbei wurden die erhaltenen Pareto Fronten der multikriteriellen Optimierung in den Modellgebieten A und C zunächst durch eine Clusteranalyse mittels Selbstorganisierenden Merkmalskarten (SOM; KOHONEN 2001) aufgeteilt. Anschließend wurden für jedes Cluster repräsentative Lösungen gesucht. Eine repräsentative Lösung ist dabei die Lösung, die zu allen anderen Lösungen im Cluster die geringste mittlere Euklidische Distanz im Variablenraum besitzt. Für das Modellgebiet C wurden zusätzlich 3 Lösungen ausgewählt um den Bereich der ausgeglichenen Kompromisslösungen (nahe dem Utopiapunkt) besser abzudecken. Für das Modellgebiet A und C ergaben sich damit jeweils 15 unterschiedliche Parametersätze. Die 15 Parametersätze des Modellgebietes C wurden aufgrund ähnlicher Gebietseigenschaften auf das Modellgebiet B übertragen.

4.6 Validierung von WaSiM-ETH

Um die im Kalibrierungszeitraum erhaltenen Lösungen zu prüfen empfiehlt sich eine Simulation mit diesen Lösungen in einem von der Kalibrierung unabhängigen Zeitraum. Diese sogenannte Modellvalidierung erfolgte im Zeitraum der fünf hydrologischen Jahre 2006 bis 2010 (01.11.2005 bis 31.10.2010) mit zwei Jahren Modellvorlaufzeit (ab 01.11.2003) anhand von Durchflussdaten für die Modellgebiete A und C. Dabei wurden alle im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtungen ausgewählten Kompromisslösungen (vgl. Kapitel 4.5.5, maximal 60 Lösungen) für die Modellvalidierung durchgerechnet.

4.7 Anwendung von WaSiM-ETH für rezente und projizierte Klimadaten

Nach abgeschlossener Kalibrierung und Validierung erfolgte die Simulation des Wasserhaushaltes mit dem Input von rezenten und projizierten Klimadaten. Die Simulation wurde in den vier REGKLAM-Zeitscheiben der hydrologischen Jahre 1962 bis 1990, 1991 bis 2020, 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 mit jeweils einem Jahr Modellvorlaufzeit durchgeführt. Es wurden für die Simulation alle, wie in Kapitel 4.5.5 beschrieben, ausgewählten Parametersätze für alle Zeitscheiben und Klimadaten verwendet.

Der rezente Zeitraum (hydrologische Jahre 1962 bis 1990) wurde zum einen mit den gekrigten Klimabeobachtungsdaten von allen verfügbaren DWD und CHMI Stationen und zum anderen mit den gekrigten Klimabeobachtungsdaten aus einem reduzierten Stationsnetz (nur DWD Stationen, die auch in WETTREG2010 vorhanden sind, vgl. Kapitel 4.4.4) simuliert. Parallel dazu erfolgte im gleichen Zeitraum die Simulation mit den zehn Kontrollläufen von WETTREG2010 und den zwei Kontrollläufen von CLM.

Die Zeitscheibe der hydrologischen Jahre 1991 bis 2020 wurde bis zum 31.12.2000 mit den zehn Kontrollläufen von WETTREG2010 und den zwei Kontrollläufen von CLM simuliert. Ab dem 01.01.2001 konnten Emissionsszenarien des IPCC berücksichtigt werden. Für WETTREG2010 waren das jeweils zehn Realisierungen für die Emissionsszenarien A1B, B1 und A2 und für CLM je zwei Realisierungen der Emissionsszenarien A1B und B1.

In den letzten beiden REGKLAM-Zeitscheiben erfolgte die Simulation analog der zweiten Zeitscheibe ab dem 01.01.2001.

Berechnung des Wasserhaushalts

Durch die, der schlechten Datengrundlage geschuldeten, Aufteilung des Untersuchungsgebietes wurden drei unabhängige Modellgebiete erstellt. Modellgebiet A entwässert wie in Kapitel 4.5.2 erläutert in Modellgebiet B, dieses wiederum in Modellgebiet C.

Da Modellgebiet A getrennt von Modellgebiet C optimiert wurde, ergaben sich demnach zwei unterschiedliche Pareto-optimale Sätze an Lösungen mit jeweils unterschiedlichen Parameterkombinati-

onen. Eine einfache Modellierung der Durchflüsse an den Auslasspegeln der Modellgebiete und die Propagation des Durchflusses in das unterliegende Modellgebiet waren aufgrund dieser unterschiedlichen Parametersätze nicht möglich.

Um eine geschlossene Wasserhaushaltssimulation über das gesamte Untersuchungsgebiet zu ermöglichen, wurde stattdessen der folgende Ansatz gewählt: Getrennt für jedes regionale Klimamodell wurde jeweils ein Parametersatz aus dem Pareto-optimalen Satz an Lösungen für das Modellgebiet C einem Parametersatz für das Modellgebiet A zugeordnet.

Hierfür wurde jeweils für jeden Parametersatz für eine Realisierung das Verhältnis aus simuliertem mittlerem Abfluss zum mittleren Niederschlag unter allen Emissionsszenarien berechnet.

Die Parametersätze der Modellgebiete A und C wurden dann nach den berechneten Verhältnissen sortiert. Für die Simulation des Wasserhaushaltes mit drei Modellgebieten wurden dann jeweils die Parametersätze mit jeweils gleichem Rang verwendet. Für das Modellgebiet B wurde das gleiche Ranking wie in Modellgebiet C verwendet.

5. Ergebnisse

5.1 Vergleich von rezenten und projizierten Klimagrößen im Untersuchungsgebiet

5.1.1 Saisonale Ergebnisse für Klimagrößen unter Verwendung der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM

In den folgenden Abbildungen wird der innerjährliche Verlauf der Klimagrößen auf Basis von Monatswerten für Beobachtungs- und Klimamodelldaten in den vier Zeitscheiben dargestellt.

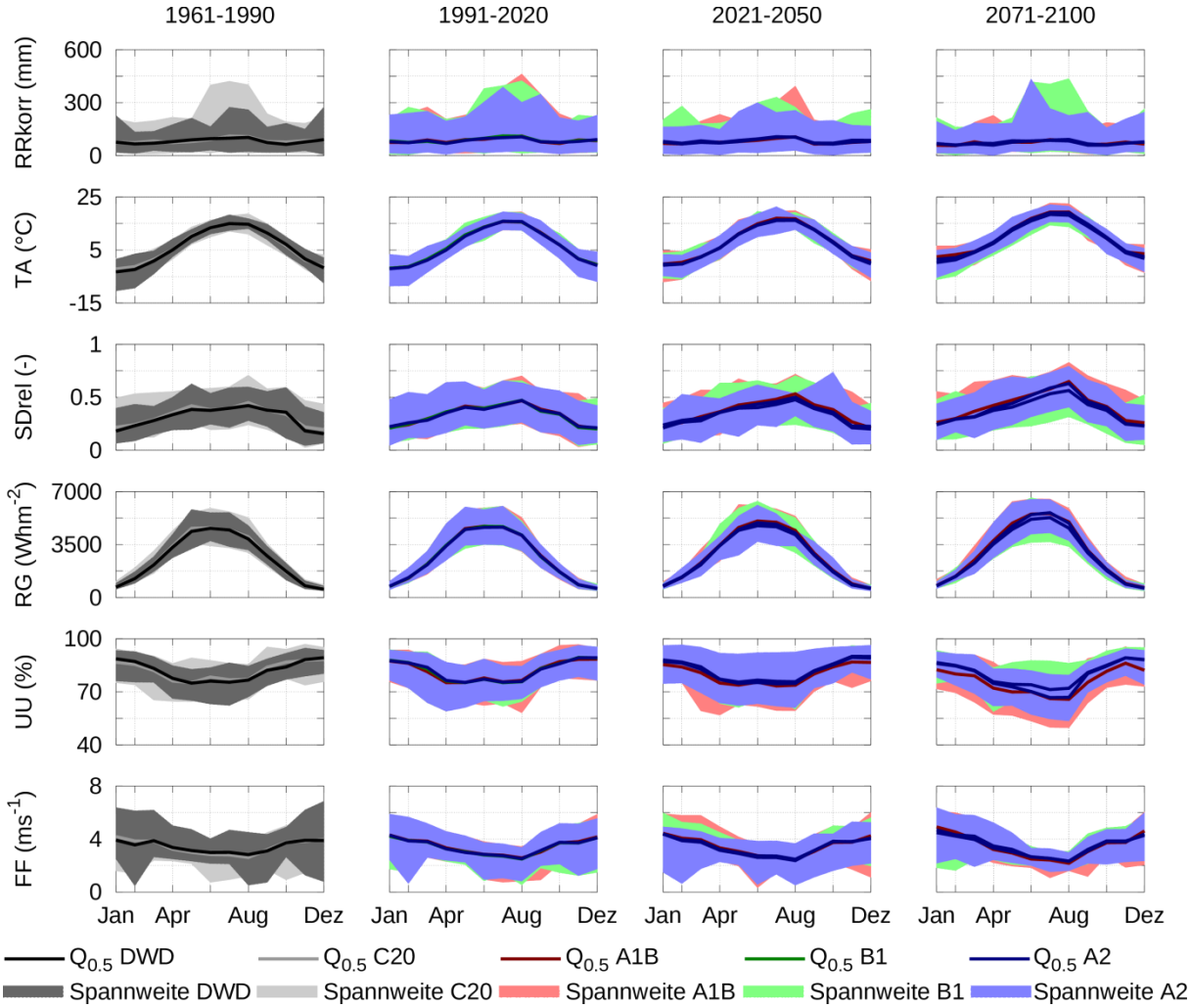


Abbildung 29: Innerjährliche Entwicklung der nach RICHTER (1995) korrigierten Monatsniederschlagssumme (RRkorr), der Monatsmitteltemperatur (TA), der mittleren monatlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren monatlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 im Untersuchungsgebiet. In der ersten Zeitscheibe dargestellt ist der Mittelwert der Beobachtungsdaten aus DWD-Daten (schwarze Linie) mit Spannweite aller Einzelmonate (dunkelgraue Fläche) und als hellgraue Linie der Mittelwert der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (C20) mit Spannweite aller Einzelmonate (hellgraue Fläche). In den drei weiteren Zeitscheiben als farbige Linien dargestellt sind die Mittelwerte der pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite aller Einzelmonate.

In Abbildung 29 sind die Ergebnisse für WETTREG2010 abgebildet. Die innerjährlichen Verläufe der beobachteten meteorologischen Größen in der Referenzperiode von 1961 bis 1990 werden im Mittel und in der Spannweite durch die zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 gut wiedergegeben. Auffällig ist das durch einzelne Kontrollläufe bedingte Maximum der Niederschläge in den Sommermonaten Juni bis August. Dieses Maximum bleibt bis zum Ende des Jahrhunderts in der Projektion von WETTREG2010 erhalten. Insgesamt ändert sich die Verteilung der Niederschläge im Jahr nicht, es erfolgt eine über das gesamte Jahr gleichmäßig verteilte Verringerung des Niederschlages. Auch bei den anderen betrachteten Größen kommt es zu keinen innerjährlichen Verschiebungen der Verteilung. Die zuvor beschriebenen Ab- oder Zunahmen einzelner Größen bis zum Ende des Jahrhunderts erfolgen relativ gleichmäßig über das gesamte Jahr verteilt. Zwischen den Emissionsszenarien sind treten kaum Unterschiede auf.

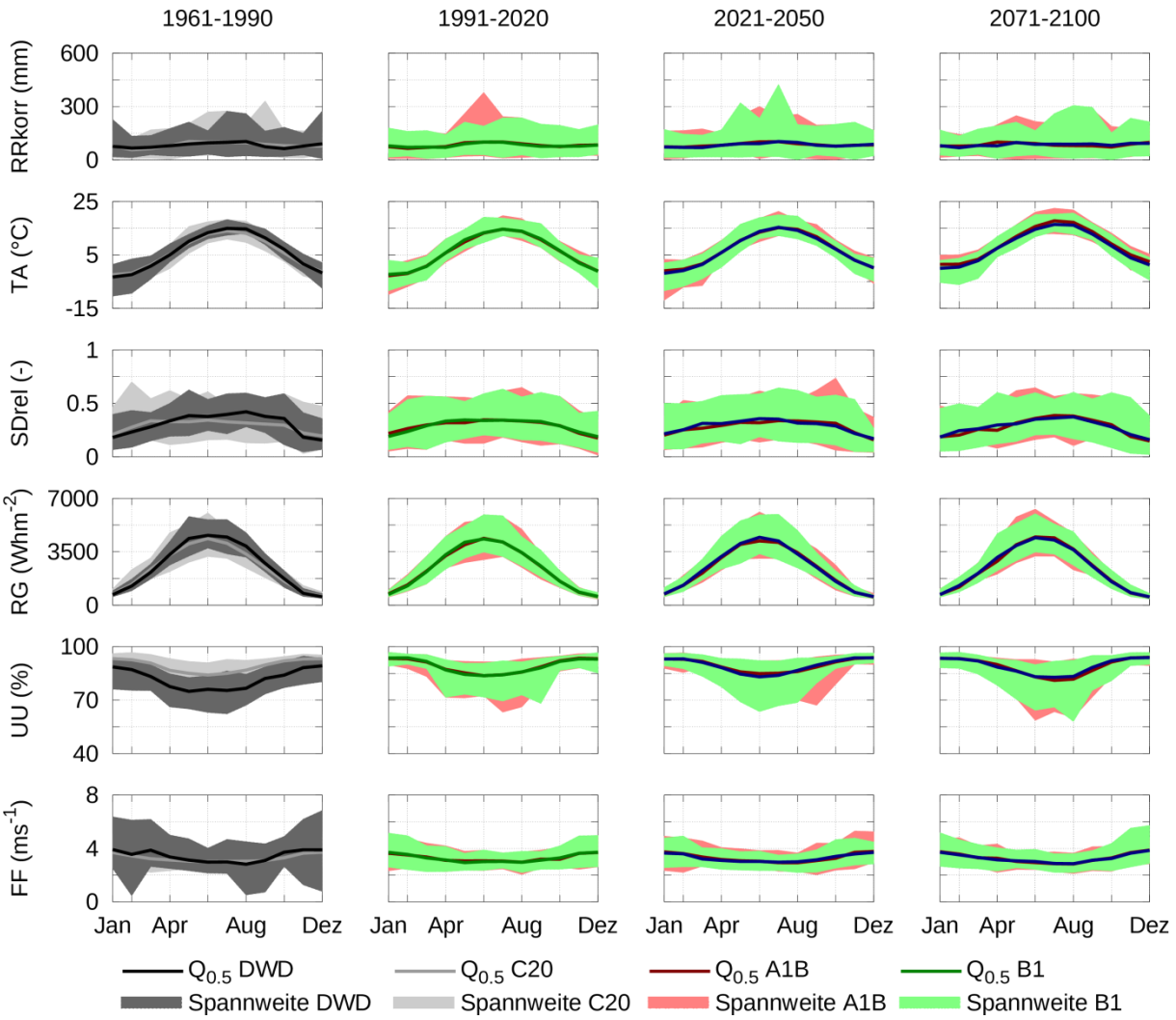


Abbildung 30: Innerjährliche Entwicklung der korrigierten Monatsniederschlagssumme (RRkorr), der Monatsmitteltemperatur (TA), der mittleren monatlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren monatlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells CLM im Untersuchungsgebiet. In der ersten Zeitscheibe dargestellt ist der Mittelwert der Beobachtungsdaten aus DWD-Daten (schwarze Linie) mit Spannweite aller Einzelmonate (dunkelgraue Fläche) und als hellgraue Linie der Mittelwert der zwei Kontrollläufe von CLM (C20) mit Spannweite aller Einzelmonate (hellgraue Fläche). In den drei weiteren Zeitscheiben als farbige Linien dargestellt sind die Mittelwerte der pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite aller Einzelmonate.

Bei CLM kommt es in der Referenzperiode zu geringen Differenzen zwischen den beiden CLM-Kontrollläufen und den beobachteten Daten (Abbildung 30). Es werden die beobachtete relative Sonnenscheindauer und Globalstrahlung im Sommer von CLM leicht unterschätzt und im Winter leicht überschätzt. Bei der Entwicklung der meteorologischen Größen in den Zeitscheiben bis 2100 sind keine Veränderungen bezüglich der innerjährlichen Verteilung und keine Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien zu erkennen.

Der Vergleich zwischen WETTREG2010 und CLM verdeutlicht die Unterschiede bezüglich der zeitlichen Entwicklung der betrachteten Klimagrößen (Abbildung 31). Auffällig ist die im Vergleich zur Temperatur schlechtere Abbildung der restlichen Klimagrößen durch die Kontrollläufe beider Klimamodelle in der Referenzperiode.

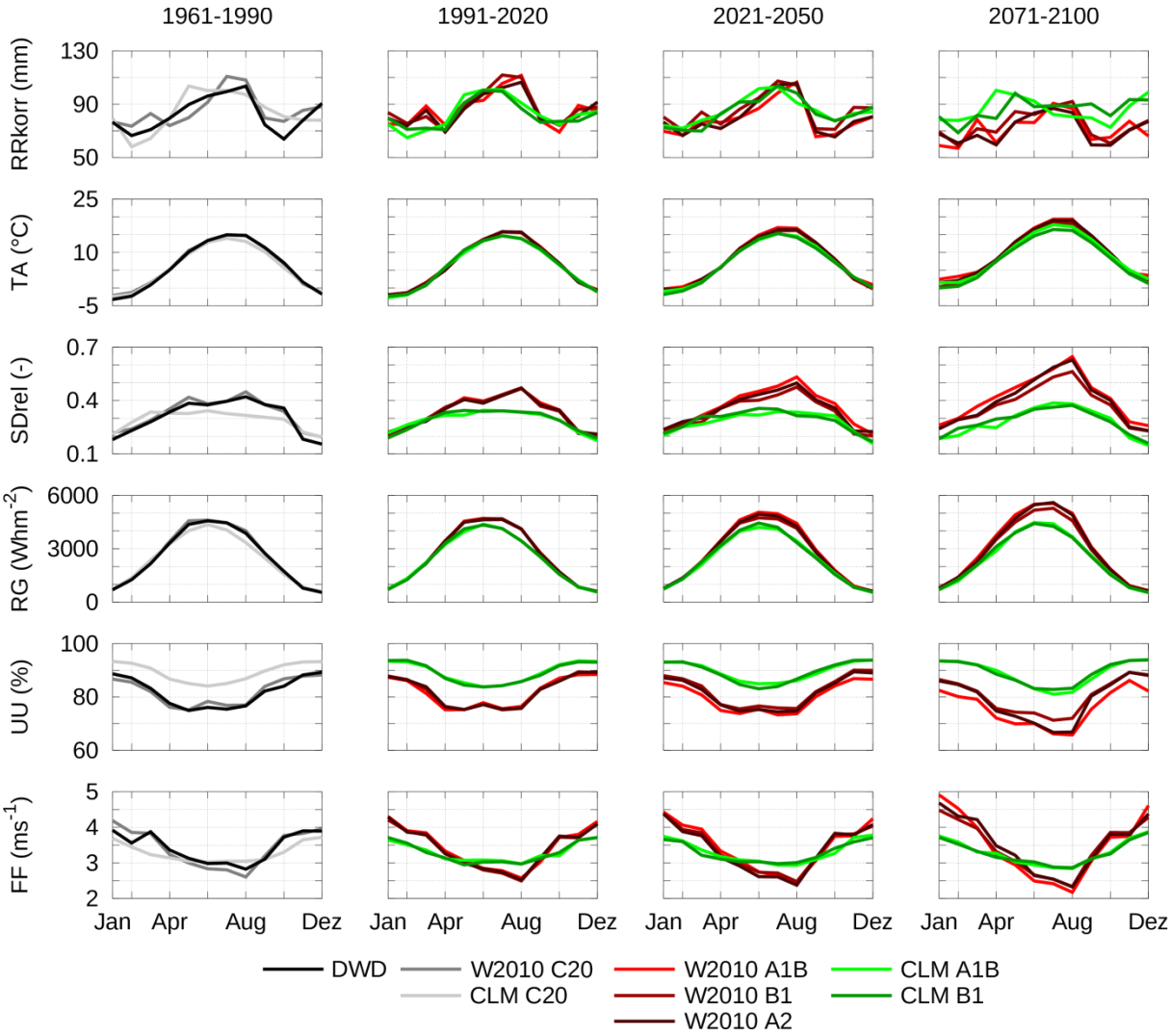


Abbildung 31: Vergleich der innerjährlichen Entwicklung der korrigierten mittleren Monatsniederschlagssumme (RRkorr), der Monatsmitteltemperatur (TA), der mittleren monatlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren monatlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 (W2010) und CLM im Untersuchungsgebiet. In der ersten Zeitscheibe dargestellt sind die Mittelwerte der Beobachtungsdaten aus DWD-Daten (schwarze Linie), der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (dunkelgraue Linie, W2010 C20) und der zwei Kontrollläufe von CLM (hellgraue Linie, CLM C20). In den drei weiteren Zeitscheiben als farbige Linien dargestellt sind die Mittelwerte der bei WETTREG2010 pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen und die Mittelwerte der bei CLM pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen.

5.1.2 Vergleich von Klimagrößen unter Verwendung der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM für Zeitscheiben

In den folgenden Abbildungen und Tabellen in diesem Kapitel sind die Entwicklungen der für die Wasserhaushaltssimulation benötigten sechs meteorologischen Größen – der nach RICHTER (1995) korrigierte Niederschlag, die Lufttemperatur, die relative Sonnenscheindauer, die Globalstrahlung, die relative Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit – in den vier REGKLAM-Zeitscheiben von 1961 bis 2100 für die beiden regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM dargestellt. Für die Beobachtungsdaten des rezenten Zeitraumes (erste Zeitscheibe von 1961-1990) dienten dabei die Klimadaten des maskierten DWD-Stationsmessnetzes (gleiche Stationen wie bei WETTREG2010) als Grundlage (vgl. Kapitel 4.4.4, Abbildung 16).

Die folgende Abbildung 32 zeigt die Klimaprojektionen des regionalen statistischen Klimamodells WETTREG2010. Dabei fällt auf, dass sowohl die beobachteten mittleren Jahreswerte, als auch deren Schwankungsbreiten der meteorologischen Größen innerhalb der ersten Zeitscheibe (Referenzperiode von 1961 bis 1990) durch die zehn Kontrollläufe (C20) von WETTREG2010 relativ gut wiedergegeben werden. Bei den Größen Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung kommt es in dieser Referenzperiode im Mittel zu leichten Überschätzungen durch das Klimamodell (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7), die relative Feuchte und Windgeschwindigkeit wird im Mittel sehr gut abgebildet. Bei den Beobachtungsdaten der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit fällt der enorme Abfall von zu Beginn der Zeitscheibe ca. 4,5 $m \cdot s^{-1}$ auf 2 $m \cdot s^{-1}$ (1975) und der danach folgende Anstieg auf. Ursachen dafür sind in der zeitlich stark wechselnden Stationsdichte mit Daten zur Windgeschwindigkeit zu suchen.

Der Niederschlag (RRkorr) geht im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990, nachdem er in der zweiten Zeitscheibe im Mittel in etwa konstant bleibt, bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich zurück. Dabei fallen die Unterschiede zwischen den drei betrachteten Emissionsszenarien sehr gering aus. Der Rückgang beträgt in der letzten Zeitscheibe im Mittel über alle drei Emissionsszenarien ca. 16% im Vergleich zu den Kontrollläufen der ersten Zeitscheibe. Lediglich das Emissionsszenario B1 projiziert einen etwas geringeren Niederschlagsrückgang von im Mittel 13%. Die durch die Anzahl von zehn Realisierungen hervorgerufene Spannweite des Niederschlages in Einzeljahren bleibt in den vier Zeitscheiben in etwa konstant.

Eine deutliche und kontinuierliche Zunahme bei allen drei Emissionsszenarien bis 2100 wird für die Lufttemperatur (TA) projiziert. Der Unterschied zwischen erster und letzter Zeitscheibe beträgt im Mittel 3,2K, was einer Zunahme von im Mittel ca. 52% entspricht. Dabei fällt das Emissionsszenario B1 mit einer Temperaturerhöhung von 2,7°C im Vergleich zu der Erhöhung bei A1B mit 3,6°C wesentlich moderater aus. Die Spannweite der Temperatur ist analog zum Niederschlag für alle drei Emissionsszenarien und über den zeitlichen Verlauf in etwa gleich.

Analog zur Temperatur wird eine kontinuierliche Zunahme der relativen Sonnenscheindauer (SDrel) um im Mittel 23% und der Globalstrahlung (RG) um im Mittel 12% projiziert. Das Szenario A1B verzeichnet hier ebenfalls den im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien größten Zuwachs, während B1 wiederum moderatere Änderungen aufzeigt.

Der Rückgang der relativen Luftfeuchte fällt im Vergleich zum Anstieg der zuvor genannten Größen etwas langsamer und insgesamt geringer aus. So gibt es für die Szenarien A2 und B1 in der zweiten und dritten Zeitscheibe im Mittel kaum Veränderungen, erst in der vierten Zeitscheibe zum Ende des Jahrhunderts erfolgt eine geringfügige Verringerung des Mittelwertes. Die Abnahme der relativen Luftfeuchte fällt nur bei A1B etwas früher und mit 7% vergleichsweise etwas größer aus.

Die Windgeschwindigkeit bleibt über den gesamten Untersuchungszeitraum im Mittel in etwa konstant. Erst in der letzten Zeitscheibe werden minimale Zunahmen von im Mittel 2% projiziert.

Die mittleren absoluten Werte der meteorologischen Größen in den einzelnen Zeitscheiben sind in Tabelle 6 und deren absolute und relative Differenzen Tabelle 7 zu entnehmen.

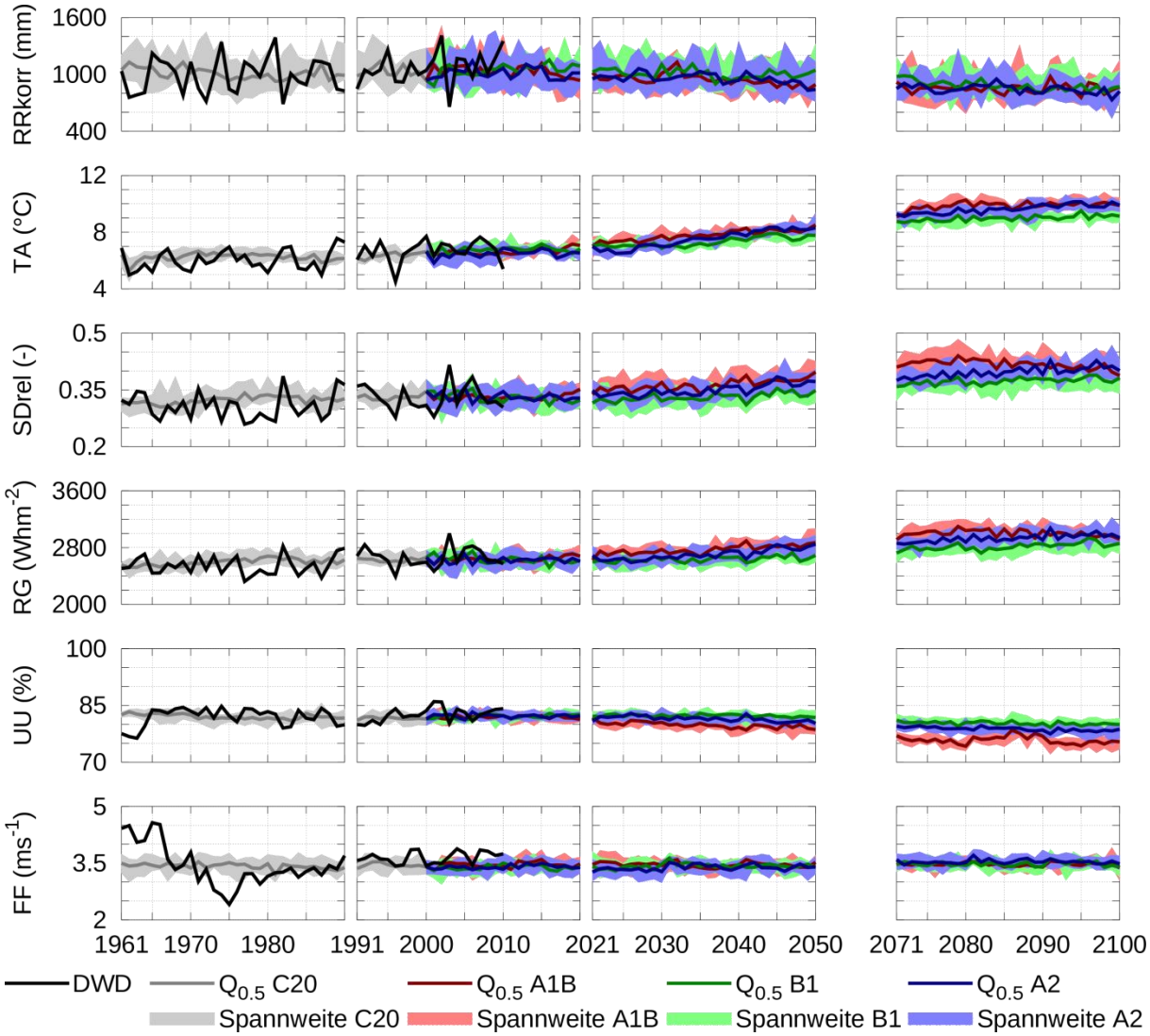


Abbildung 32: Entwicklung der nach RICHTER (1995) korrigierten Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 im Untersuchungsgebiet. Als schwarze Linie dargestellt sind die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten bis 2010, als graue Linie der Median der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 bis 2000 (C20) mit Spannweite der zehn Realisierungen (graue Fläche) und als farbige Linien die Mediane der pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite der zehn Realisierungen.

Tabelle 6: Entwicklung der nach RICHTER (1995) korrigierten mittleren Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind für die erste Zeitscheibe Mittelwerte aller Jahreswerte für die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten und Mittelwerte aller Jahreswerte der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010. Für die drei weiteren Zeitscheiben ist jeweils der Mittelwert aller Jahreswerte einer Zeitscheibe der pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen angegeben.

Klima-größen	DWD	ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – WETTREG 2010									
	1961-1990		1991 - 2020			2021 - 2050			2071 – 2100		
	Obs.	C20	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
RRkorr (mm)	989	1028	1035	1047	1028	951	1020	966	858	892	852
TA (°C)	6.0	6.2	6.5	6.6	6.5	7.8	7.3	7.5	9.9	9.0	9.6
Sdrel (-)	0.31	0.32	0.33	0.33	0.33	0.36	0.33	0.35	0.42	0.37	0.4
RG ($Wh \cdot m^{-2}$)	2548	2600	2638	2631	2624	2769	2635	2705	3002	2815	2938
UU (%)	82	82	82	82	82	80	82	81	76	80	79
FF ($m \cdot s^{-1}$)	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5

Tabelle 7: Absolute und relative Differenzen der betrachteten Klimagrößen in Bezug auf die Mittelwerte aus den zehn Kontrollläufen (C20) des regionalen Klimamodells WETTREG2010 in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 6.

Klima-größen	DWD	ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – WETTREG 2010									
	1961-1990		1991 - 2020			2021 - 2050			2071 – 2100		
	Obs.	C20	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
ΔRRkorr (mm)	-39 -4%	1028 100%	+7 +1%	+19 +2%	±0 ±0%	-77 -8%	-8 -1%	-62 -6%	-170 -17%	-136 -13%	-176 -17%
ΔTA (K)	-0.2	6.2	+0.3	+0.4	+0.2	+1.5	+1.1	+1.3	+3.6	+2.7	+3.4
ΔSdrel (-)	-0.02 -5%	0.32 100%	+0.01 +3%	+0.01 +2%	+0.01 +2%	+0.04 +13%	+0.01 +2%	+0.03 +8%	+0.09 +29%	+0.05 +15%	+0.08 +23%
ΔRG ($Wh \cdot m^{-2}$)	-51 -2%	2600 100%	+39 +1%	+32 +1%	+24 +1%	+169 +7%	+35 +1%	+105 +4%	+402 +15%	+215 +8%	+339 +13%
ΔUU (%)	0 ±0%	82 100%	±0 ±0%	±0 ±0%	±0 ±0%	-2 -3%	±0 ±0%	-1 -1%	-6 -7%	-2 -2%	-3 -4%
ΔFF ($m \cdot s^{-1}$)	0.0 ±0%	3.4 100%	±0.0 +1%	±0.0 -1%	±0.0 ±0%	0.0 +1%	±0.0 ±0%	±0.0 -1%	+0.1 +2%	+0.1 +2%	+0.1 +3%

In den Klimaprojektionen des regionalen dynamischen Regionalmodells CLM (Abbildung 33) sind deutliche Unterschiede im Vergleich zu WETTREG2010 erkennbar. In der Referenzperiode von 1961 bis 1990 werden die beobachteten Daten ähnlich gut durch die zwei Kontrollläufe von CLM, sowohl im Mittel als auch in der Bandbreite, wie durch die Kontrollläufe von WETTREG2010 abgebildet. Die im Mittel größte Abweichung in der ersten Zeitscheibe ist die mit ca. 8% höhere Luftfeuchte von CLM. Die Größen Temperatur, relative Sonnenscheindauer, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit werden mit 5-6% leicht unterschätzt. Der Niederschlag wird im Mittel und Vergleich der betrachteten meteorologischen Größen am besten abgebildet.

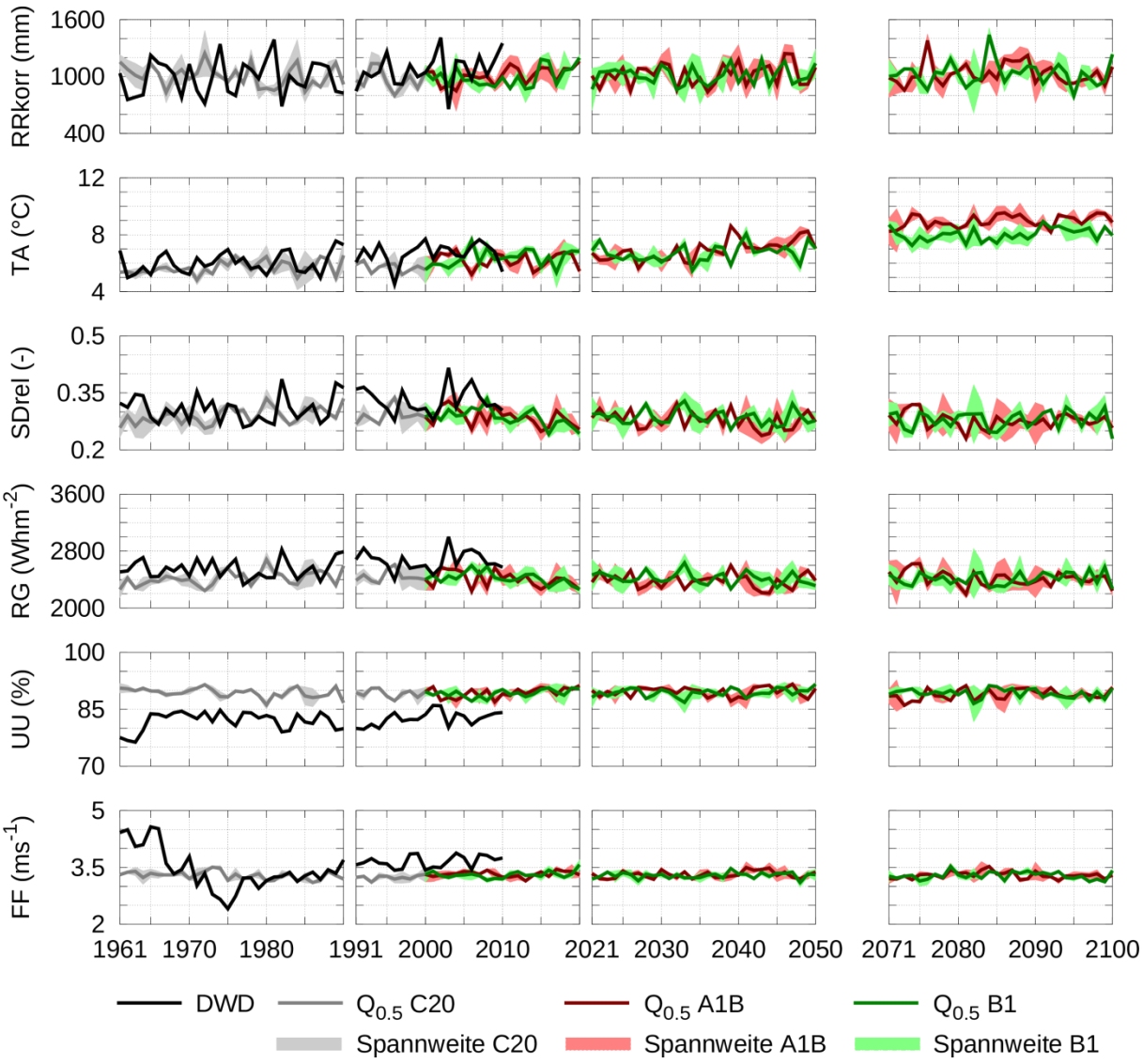


Abbildung 33: Entwicklung der korrigierten Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells CLM im Untersuchungsgebiet. Als schwarze Linie dargestellt sind die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten bis 2010, als graue Linie der Median der zwei Kontrollläufe von CLM bis 2000 (C20) mit Spannweite der zwei Realisierungen (graue Fläche) und als farbige Linien die Mediane der pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen mit jeweils farbiger Spannweite der zwei Realisierungen.

In der zweiten Zeitscheibe von 1991 bis 2020 wird weiterhin die Luftfeuchte, sowohl durch die Kontrollläufe, als auch die Realisierungen der Szenarien ab 2001, im Vergleich zur Beobachtung relativ deutlich überschätzt. Analog wird die Windgeschwindigkeit im Mittel unterschätzt. Während der Niederschlag und die Temperatur im Mittel und in der Bandbreite relativ gut wiedergegeben werden, sind die beobachtete relative Sonnenscheindauer und Globalstrahlung etwas größer als in den Modellprojektionen.

Die Entwicklung der jeweils zwei Modellrealisierungen pro Emissionsszenario von CLM bis 2100 mit den zwei Kontrollläufen der Referenzperiode vergleichend, ist festzustellen, dass sich nur die Temperatur ändert. Die Größen Niederschlag, relative Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit weisen sowohl im Zeitscheibenmittel, als auch in der Bandbreite jährlicher Extreme nahezu keine Unterschiede in den vier betrachteten Zeitscheiben auf.

Die mittleren absoluten Werte der meteorologischen Größen in den einzelnen Zeitscheiben sind in Tabelle 8 und deren absolute und relative Differenzen in Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 8: Entwicklung der korrigierten mittleren Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells CLM im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind für die erste Zeitscheibe Mittelwerte aller Jahreswerte für die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten und Mittelwerte aller Jahreswerte der zwei Kontrollläufe von CLM. Für die drei weiteren Zeitscheiben ist jeweils der Mittelwert aller Jahreswerte einer Zeitscheibe der pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen angegeben.

Klimagrößen	DWD	ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – CLM						
	1961-1990		1991 - 2020		2021 - 2050		2071 - 2100	
	Obs.	C20	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1
RRkorr (mm)	989	1007	998	986	1024	1011	1030	1032
TA (°C)	6.0	5.7	6.0	6.2	6.9	6.7	9.0	8.0
Sdrel (-)	0.31	0.29	0.29	0.29	0.28	0.29	0.28	0.28
RG ($Wh \cdot m^{-2}$)	2548	2419	2417	2427	2382	2419	2413	2411
UU (%)	82	89	89	89	90	89	89	89
FF ($m \cdot s^{-1}$)	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3

Tabelle 9: Absolute und relative Differenzen der betrachteten Klimagrößen in Bezug auf die Mittelwerte aus den zwei Kontrollläufen (C20) des regionalen Klimamodells CLM in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 8.

Klimagrößen	DWD	ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – CLM						
	1961-1990		1991 - 2020		2021 - 2050		2071 - 2100	
	Obs.	C20	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1
ΔRRkorr (mm)	-18 -2%	1007 100%	-10 -1%	-21 -2%	+17 +2%	+4 ±0%	+23 +2%	+25 +2%
ΔTA (K)	+0.3	5.7	+0.3	+0.5	+1.2	+1.0	+3.3	+2.3
ΔSdrel (-)	+0.02 +6%	0.29 100%	±0.00 -1%	±0.00 -1%	-0.01 -4%	±0.00 -1%	-0.01 -4%	-0.01 -3%
ΔRG ($Wh \cdot m^{-2}$)	+130 +5%	2419 100%	-1 ±0%	+9 ±0%	-36 -1%	+1 ±0%	-6 ±0%	-7 ±0%
ΔUU (%)	-7 -8%	89 100%	±0 ±0%	±0 ±0%	±0 ±0%	±0 ±0%	±0 -1%	±0 ±0%
ΔFF ($m \cdot s^{-1}$)	+0.2 +5%	3.3 100%	±0.0 ±0%	±0.0 ±0%	±0.0 +1%	±0.0 ±0%	±0.0 ±0%	±0.0 ±0%

In Abbildung 34 ist der Vergleich der Projektionen der beiden Regionalmodelle WETTREG2010 und CLM in den vier REGKLAM-Zeitscheiben dargestellt. Die zuvor bereits erwähnten möglichen Entwicklungen der untersuchten Klimagrößen und die Unterschiede zwischen beiden Regionalmodellen treten deutlich hervor. Während der Niederschlag bei WETTREG2010 abnimmt, bleibt er bei CLM im Vergleich zur ersten Zeitscheibe in etwa konstant. Die höheren Amplituden des Jahresniederschlages – jährliche Minima und Maxima – bei CLM begründen sich in der geringeren Anzahl an Kontrolläufen bzw. ab 2001 an der geringeren Anzahl an Realisierungen als bei WETTREG2010 pro Emissionszenario.

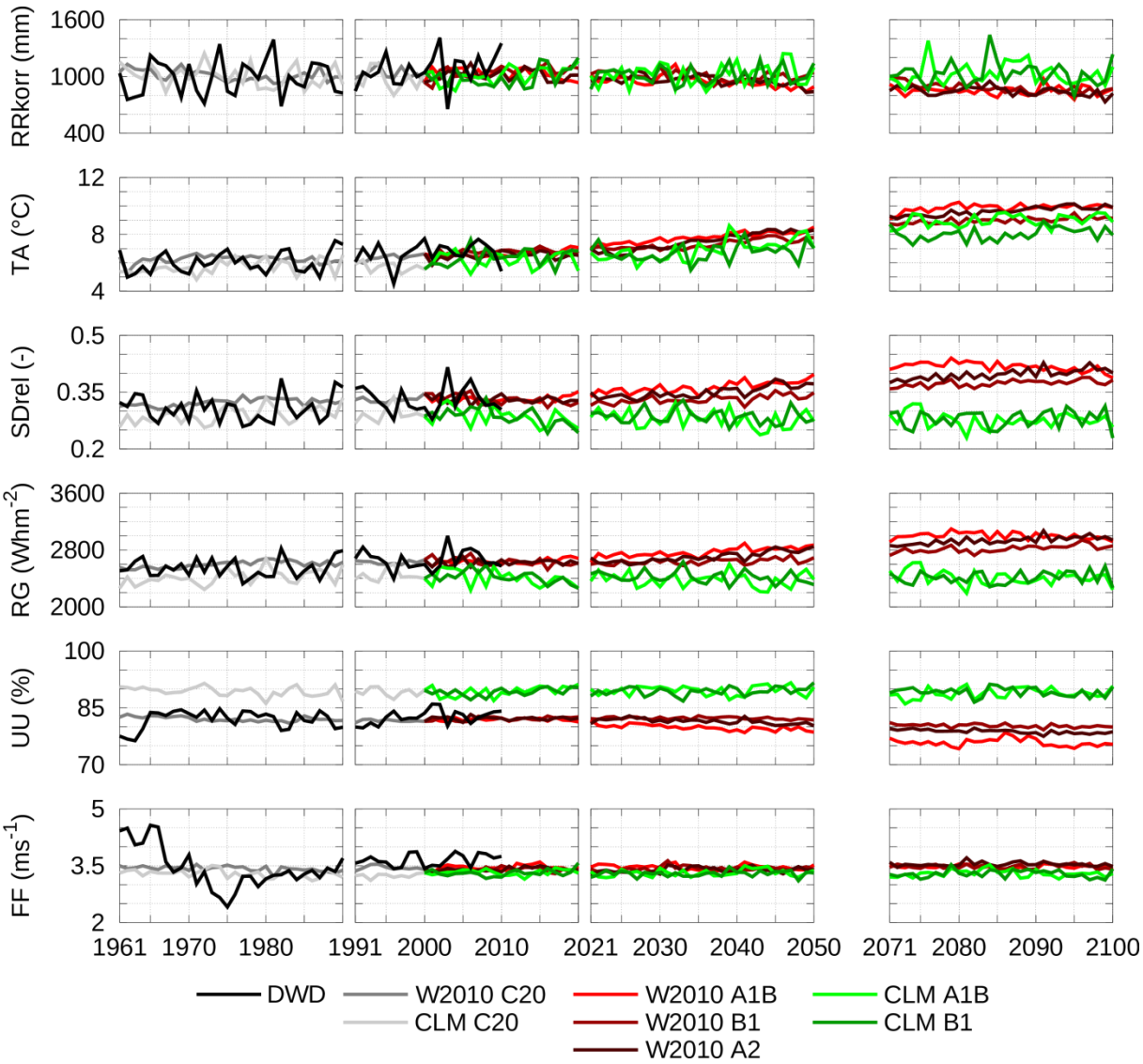


Abbildung 34: Vergleich der Entwicklung der korrigierten Jahresniederschlagssumme (RRkorr), der Jahresmitteltemperatur (TA), der mittleren jährlichen relativen Sonnenscheindauer (SDrel), der mittleren jährlichen Globalstrahlung (RG), der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte (UU) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (FF) in den vier REGKLAM-Zeitscheiben für Beobachtungsdaten (DWD) und Klimaszenarien des regionalen Klimamodells WETTREG2010 (W2010) und CLM im Untersuchungsgebiet. Als schwarze Linie dargestellt sind die Beobachtungsdaten aus DWD-Daten bis 2010, als graue Linien, jeweils der Median der zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (dunkelgrau, W2010 C20) und der Median der zwei Kontrollläufe von CLM (hellgrau, CLM C20) bis 2000 und als farbige Linien die Mediane der zehn Realisierungen pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) von WETTREG2010 (Rottöne) und die Mediane der zwei Realisierungen pro Emissionsszenario (A1B und B1) von CLM (Grüntöne).

Die Temperaturerhöhung ist bei WETTREG2010 etwas höher (Abbildung 34). Die relative Sonnenscheindauer und Globalstrahlung bleiben bei CLM nahezu konstant und nehmen bei WETTREG2010 kontinuierlich bis 2100 zu. Die relative Luftfeuchte ist bei CLM in etwa konstant, liegt aber deutlich über den Beobachtungswerten und nimmt bei WETTREG2010 in den letzten beiden Zeitscheiben ab. Die Windgeschwindigkeit bleibt bei beiden Modellen im Untersuchungsgebiet konstant.

5.2 Ergebnisse der automatischen Kalibrierung

5.2.1 Modellgebiet A

Für das Modellgebiet A (Einzugsgebiet des Pegels Ammelsdorf) ergab sich nach ca. 40.000 Modellevaluationen ein Pareto-Satz aus 116 Lösungen. Nach Abbildung 35 erstreckt sich der Wertebereich der Zielfunktionen nach Ende der Optimierung von -1,85 bis 0,78 für die Zielfunktion F_1, von 7,3 % bis 31,6 % für die Zielfunktion F_2 und von 0,6 m bis 4,0 m für die Zielfunktion F_3.

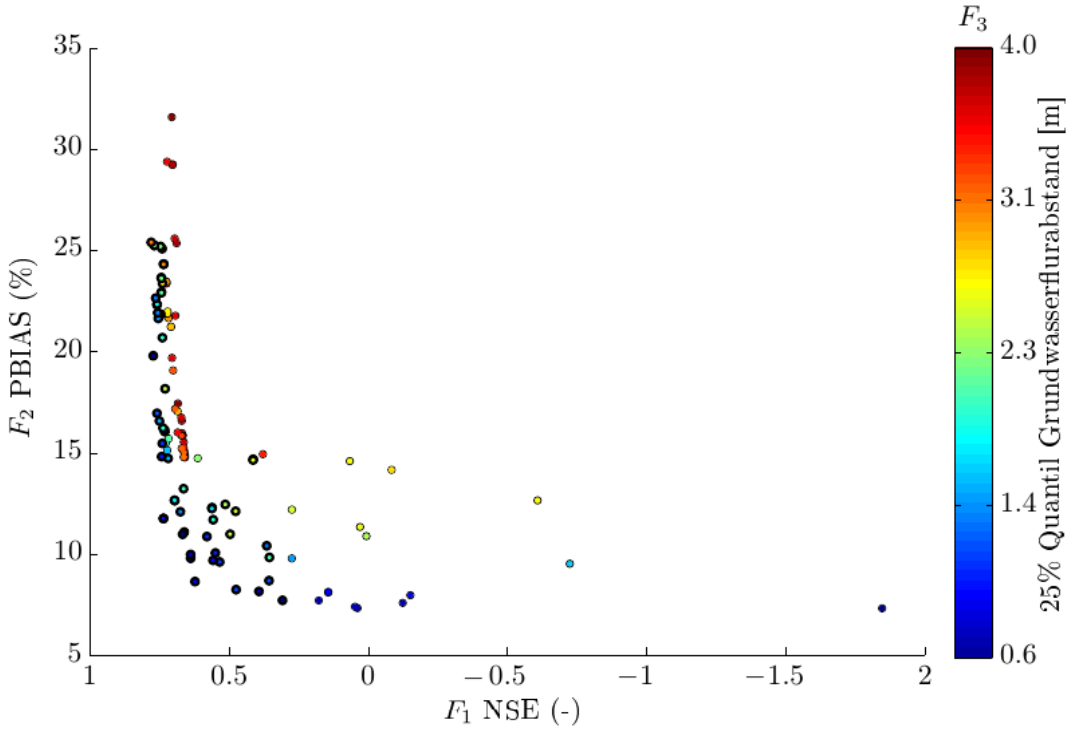


Abbildung 35: Pareto-Front als Ergebnis der MKO für das Modellgebiet A. Zielfunktion F_3 ist durch die farbliche Kodierung der einzelnen Lösungen dargestellt. Punkte mit dickem schwarzem Rand zeigen die 59 ausgewählten Punkte für die Unsicherheitsbetrachtung im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum.

Weiterhin wird ersichtlich, dass hohe Werte der Nash-Sutcliffe-Effizienz (F_1) einen vergleichsweise höheren Grundwasserflurabstand (F_3) voraussetzen. Geringe Prozent BIAS Werte (F_2) können nur bei geringen Grundwasserflurabständen erreicht werden. Lösungen mit hohen NSE und geringen PBIAS Werten sind für Modellgebiet A nur bis zu einem PBIAS von 11,5 % möglich. Für einen geringeren PBIAS müssen deutliche Kompromisse zwischen den Zielfunktionen F_1 und F_2 gemacht werden. Für die Unsicherheitsbetrachtungen ergaben sich durch eine doppelte Lösung bei der Auswahl (vgl. Kapitel 4.5.5) 59 optimale Kompromisslösungen mit Schwellwerten $F_2 < 27\,\%$ und $F_1 > 0.3$ (Abbildung 35).

Die Darstellung aller Variablensätze der Pareto-optimalen Lösungen in Abbildung 36 zeigt sehr unterschiedliche Lösungen bezüglich der normierten Variablenwerte auf. Insgesamt werden relativ oft Variablenwerte mit Maximal- und Minimalwerten gefunden.

Eine tiefere Analyse der Variablen ergab, dass lediglich ein Zusammenhang zwischen der Zielfunktion F_3 und der Speicherrückgangskonstante des Basisabflusses K_B (Variable 13) für das Teileinzugsgebiet Rehefeld besteht. Hier ist der signifikante Pearson'sche Korrelationskoeffizient 0,86.

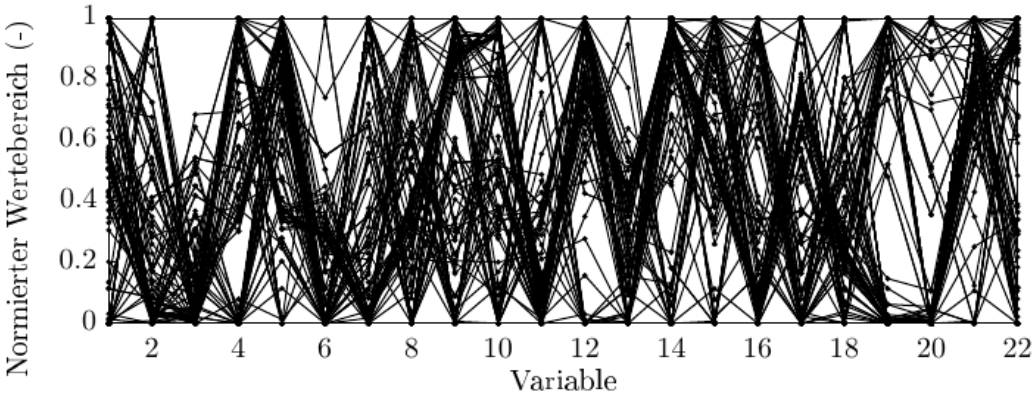


Abbildung 36: Verteilung der Variablen des Pareto-Satzes (116 Lösungen) für das Modellgebiet A im normalisierten Wertebereich. Die zu einer Lösung zugehörigen Variablen sind durch schwarze Linien verbunden. Die Abfolge der Variablen ist: T_{TOR} (1), T_{OR} (2), T_O (3), C_1 (4), C_2 (5), *CHW* (6), *CRFR* (7), RF_{Min} (8) und RF_{Max} (9) für das globale Schneemodell; K_1(10), K_2 (11), D_R (12), K_B (13), Q_0 (14) und S_{DF} (15) für das lokale Bodenmodul des TEZG Rehefeld; K_1 (17), K_2 (18), D_R (19), K_B (20), Q_0 (21) und S_{DF} (22) für das lokale Bodenmodul des TEZG Ammelsdorf und $k_{rec,H}$ (16) als globale Variable des Bodenmoduls für beide TEZG.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen für unterschiedliche zeitliche Auflösungen den Vergleich der im Modellgebiet A beobachteten Abflussspende mit den unter Verwendung der 59 ausgewählten optimalen Kompromisslösungen simulierten Abflussspenden im Kalibrierungszeitraum der hydrologischen Jahre 2000 bis 2005.

Abbildung 37 zeigt den Vergleich für tägliche Daten der Abflussspende. Insgesamt werden der Verlauf und die Dynamik der Abflussspende durch die Simulationen relativ gut wiedergegeben. Dennoch kommt es insbesondere bei größeren Abflussereignissen zu größeren Abweichungen zwischen Beobachtung und Simulation.

Analog verhält es sich bei Betrachtung der monatlichen Summen der Abflussspende (Abbildung 38). In diesem Diagramm fällt auf, dass die beobachtete Abflussspende einzelner Monate durch keine der 59 Simulationen abgebildet werden kann. Außerdem sind in den Wintermonaten höhere aus den Simulationen resultierende Bandbreiten der Abflussspende als in den Sommermonaten erkennbar.

Die Betrachtung der Jahressummen der Abflussspende in Abbildung 39 im Vergleich zwischen Beobachtung und Simulation zeigt Parallelitäten zu den Monatssummen. Einzelne hydrologische Jahre (HJ) werden durch alle Simulationen deutlich über- oder unterschätzt (z.B. HJ 2002 und HJ 2005). Die Abweichungen betragen dabei maximal bis zu ca. 12%. Die durch die Anzahl der 59 Simulationen hervorgerufenen Unsicherheiten bzw. Bandbreiten betragen ebenfalls in Einzeljahren im Kalibrierungszeitraum maximal bis zu 12% (HJ 2000).

Der innerjährliche Verlauf der Abflussspende wird bis auf den Monat Mai im Kalibrierungszeitraum sehr gut durch die Simulationen abgebildet (Abbildung 40). Hier verdeutlicht sich die bereits bei der Zeitreihe der monatlichen Abflussspenden angesprochene größere Bandbreite der simulierten Abflussspende in den Wintermonaten von November bis April im Vergleich zu den Sommermonaten. Gründe hierfür sind in der im Wasserhaushaltsmodell implementierten Abbildung der Schneeakkumulations- und Schneeschmelzprozesse sowie in der unterschiedlichen Parametrisierung des Schneemodells in den einzelnen Simulationsläufen zu suchen.

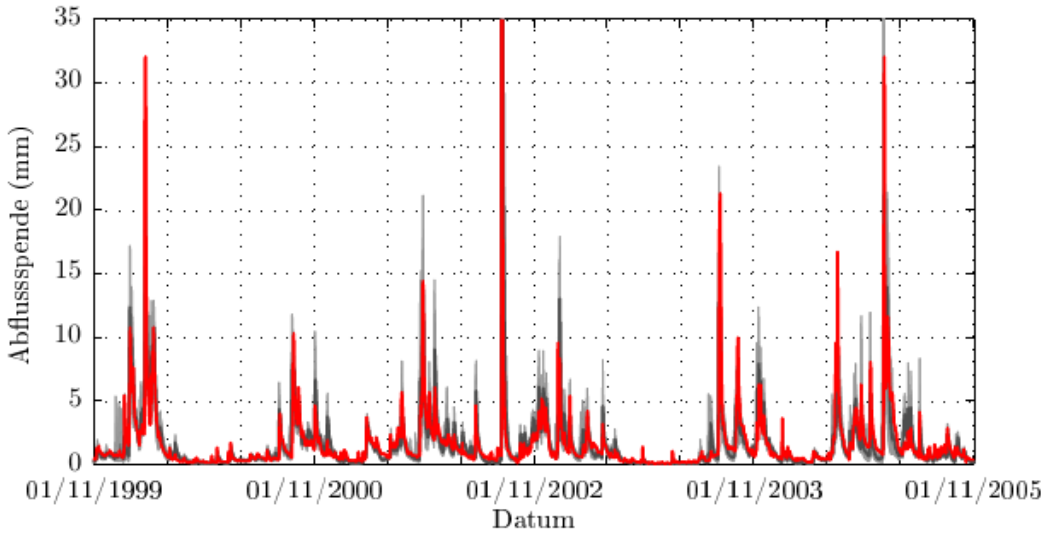


Abbildung 37: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche. Der beobachtete Scheitel des Hochwassers im August 2002 ist 99 mm und der Median der Modellierung beträgt 89 mm.

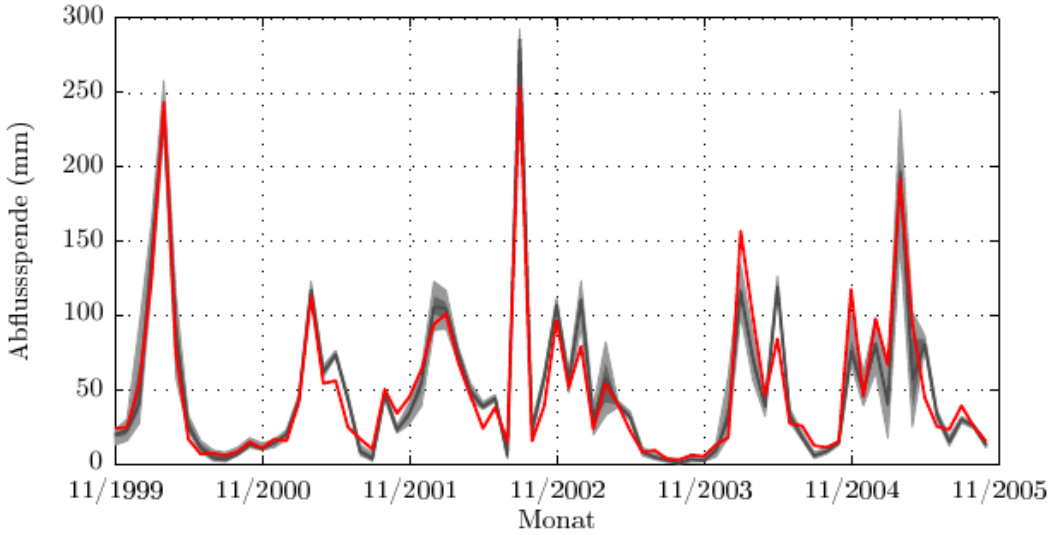


Abbildung 38: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

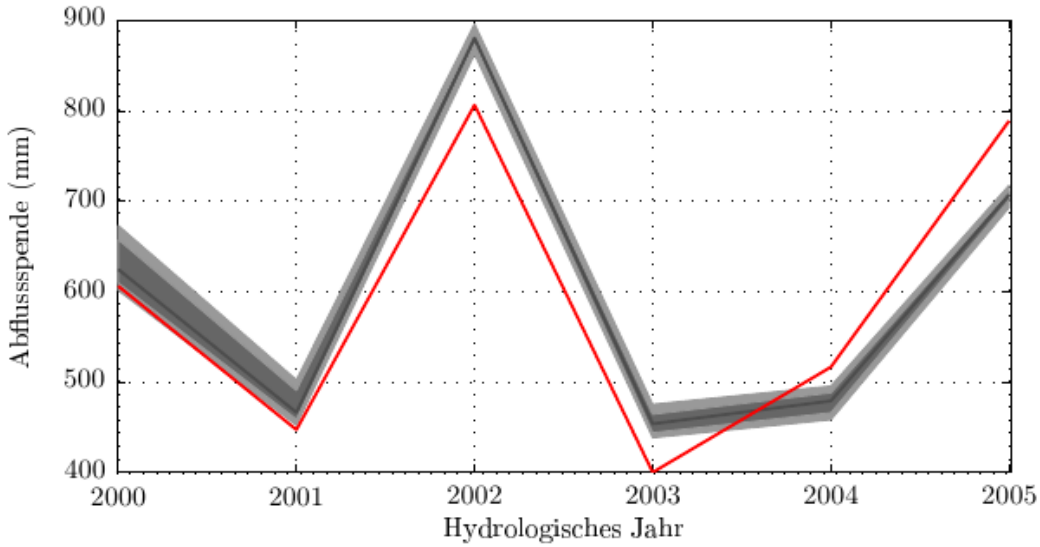


Abbildung 39: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

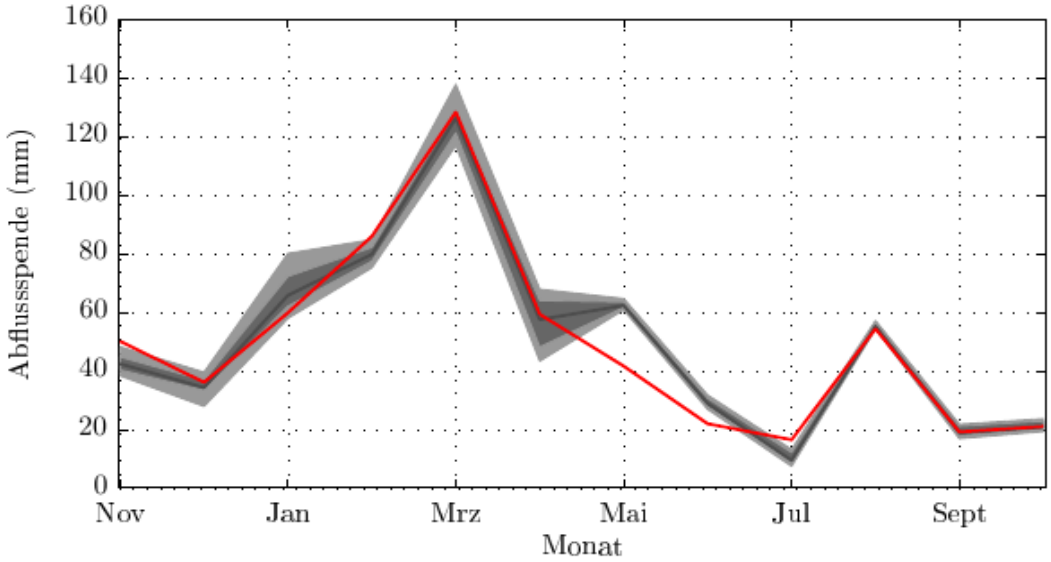


Abbildung 40: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

5.2.2 Modellgebiet C

Für das Modellgebiet C ergab sich nach ungefähr 20.000 Modellevaluationen ein Pareto-Satz mit 358 Lösungen. Nach Abbildung 41 erstreckt sich der Wertebereich der Zielfunktionen nach Ende der Optimierung von -2,76 bis 0,69 für die Zielfunktion F_1, von 0,7 % bis 44,5 % für die Zielfunktion F_2 und von 0,8 m bis 4,0 m für die Zielfunktion F_3. Die Pareto-Front deckt somit einen großen Bereich der drei Zielfunktionen ab, wobei die Pareto-Front im Bereich hoher Werte der Zielfunktion F_2 deutlich dichter mit Lösungen abgedeckt ist.

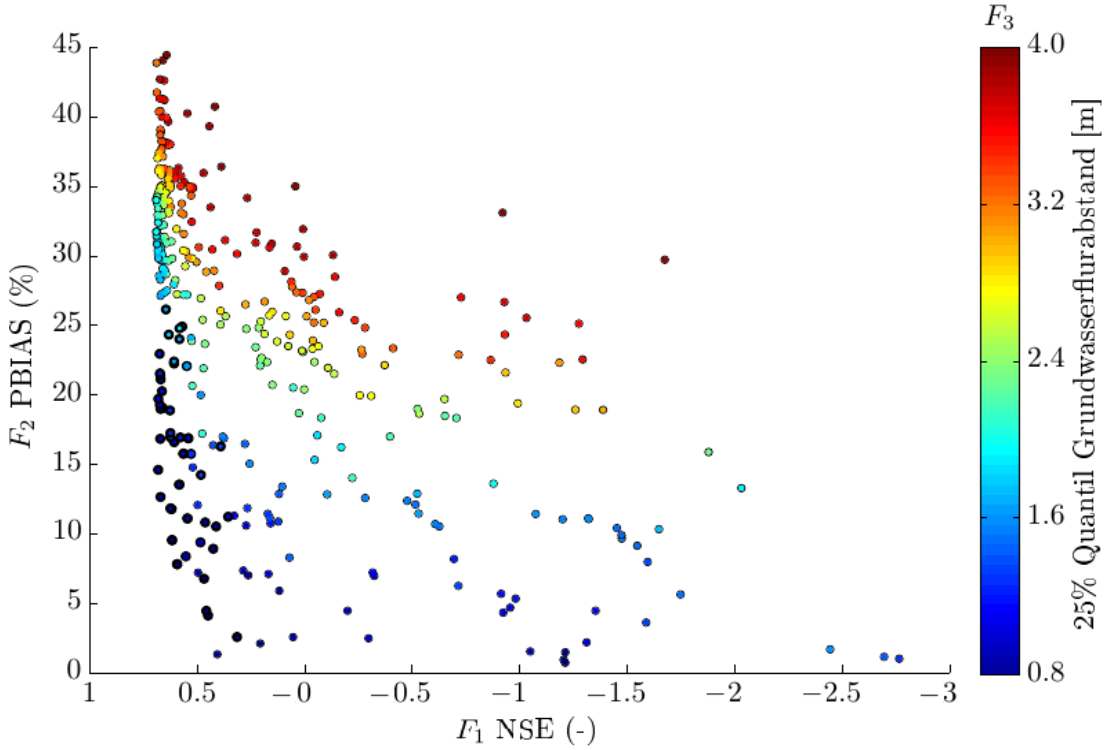


Abbildung 41: Pareto-Front als Ergebnis der MKO für das Modellgebiet C. Zielfunktion F_3 ist durch die farbliche Kodierung der einzelnen Lösungen dargestellt. Punkte mit dickem schwarzem Rand zeigen ausgewählte Punkte für die Unsicherheitsbetrachtung.

Analog wie für das Modellgebiet A gilt, dass hohe Werte der Nash-Sutcliffe-Effizienz (F_1) eine höheren Grundwasserflurabstand (F_3) voraussetzen. Geringe Werte des Prozent BIAS (F_2) können nur bei geringen Grundwasserflurabständen erreicht werden.

Lösungen mit einer hohen NSE und geringen PBIAS Werten sind für das Modellgebiet C realisierbar. Große Kompromisse zwischen den Zielfunktionen F_1 und F_2 müssen bis zu einem PBIAS von 7,5 % nicht gemacht werden. Ab einem PBIAS von ca. 25 % müssen dabei für einen optimalen Kompromiss zwischen NSE und PBIAS höhere Grundwasserspiegel im Modell in der Kalibrierungsperiode in Kauf genommen werden.

Für die Unsicherheitsbetrachtung ergaben sich durch sechs doppelte Lösungen bei der Auswahl (vgl. Kapitel 4.5.5) 54 optimale Kompromisslösungen mit Schwellenwerten $F_2 < 27\,\%$ und $F_1 > 0.3$ (Abbildung 41).

Die Abbildung aller Variablensätze der Pareto-optimalen Lösungen in Abbildung 42 zeigt im Einklang mit Abbildung 36 ebenfalls sehr unterschiedliche Lösungen mit hoher Schwankungsbreite bezüglich der normierten Variablenwerte auf. Insgesamt treten auch hier oft Variablenwerte mit Maximal- und Minimalwerten der vorgegebenen Parameterspannweiten auf.

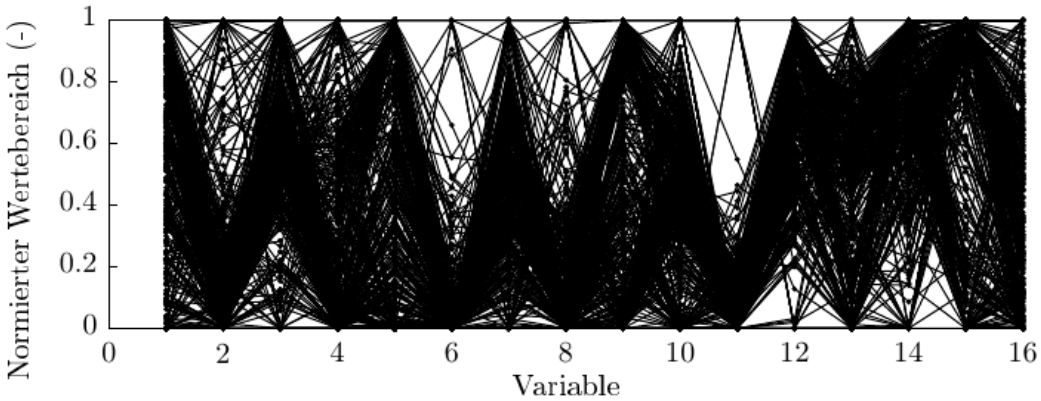


Abbildung 42: Verteilung der Variablen des Pareto-Satzes für das Modellgebiet C im normalisierten Wertebereich. Die zu einer Lösung zugehörigen Variablen sind durch schwarze Linien verbunden. Die Abfolge der Variablen ist: T_{TOR} (1), T_{OR} (2), T_O (3), C_1 (4), C_2 (5), *CHW* (6), *CRFR* (7), RF_{Min} (8) und RF_{Max} (9) für das Schneemodul und K_1(10), K_2 (11), D_R (12), K_B (13), Q_0 (14), S_{DF} (15), $k_{rec,H}$ (16) für das Bodenmodul.

Eine signifikante Korrelation zwischen der Zielfunktion F_3 und der Speicherrückgangskonstante des Basisabflusses K_B (Variable 13) mit einem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten von 0,92 ($\alpha \ll 0.5$) ist für das Modellgebiet C, analog zum Modellgebiet A feststellbar.

Der Vergleich der im Modellgebiet C beobachteten Abflussspende mit den unter Verwendung der 54 ausgewählten optimalen Kompromisslösungen simulierten Abflussspenden im Kalibrierungszeitraum der hydrologischen Jahre 2000 bis 2005 ist für unterschiedliche zeitliche Auflösungen in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Der Vergleich für tägliche Daten der Abflussspende zeigt analog zum Modellgebiet A, dass der Verlauf und die Dynamik der Abflussspende durch die Simulationen relativ gut wiedergegeben werden (Abbildung 43). Bei größeren Abflussereignissen treten auch Abweichungen zwischen der Beobachtung und den Simulationen auf.

Bei Betrachtung der monatlichen Summen der Abflussspende (Abbildung 44) fällt wie schon bei Modellgebiet A auf, dass die beobachtete Abflussspende einzelner Monate durch keine der 54 Simulationen abgebildet werden kann und deutlich über- oder unterschätzt wird. Außerdem sind in den Wintermonaten höhere aus den Simulationen resultierende Bandbreiten der Abflussspende im Vergleich zu den Sommermonaten erkennbar.

Der Vergleich der Jahressummen der Abflussspende in Abbildung 45 zeigt analog zum Modellgebiet A, dass einzelne hydrologische Jahre (HJ) durch alle Simulationen deutlich über- oder unterschätzt werden (z.B. HJ 2000 und HJ 2002). Die Abweichungen betragen dabei maximal bis zu ca. 20%. Die durch die Anzahl der Simulationen hervorgerufenen Unsicherheiten bzw. Bandbreiten betragen in Einzeljahren im Kalibrierungszeitraum maximal bis zu 17% (HJ 2004).

Der innerjährliche Verlauf der Abflussspende im Modellgebiet C wird im Kalibrierungszeitraum im Vergleich zu Modellgebiet A etwas schlechter abgebildet (Abbildung 46). Die Abflussspenden der Monate März, April und Mai werden durch alle Simulationen überschätzt, die der Monate Juni, Juli und August dagegen leicht unterschätzt. Analog zu Modellgebiet A ist die größere Bandbreite der simulierten Abflussspende in den Wintermonaten von November bis April im Vergleich zu den Sommermonaten ersichtlich. Die für das Modellgebiet A genannten Gründe, der Problematik der im Wasserhaushaltsmodell implementierten Abbildung der Schneeakkumulations- und Schneeschmelzprozesse sowie in der unterschiedlichen Parametrisierung des Schneemodells in den einzelnen Simulationsläufen sind hier gleichermaßen anzuführen.

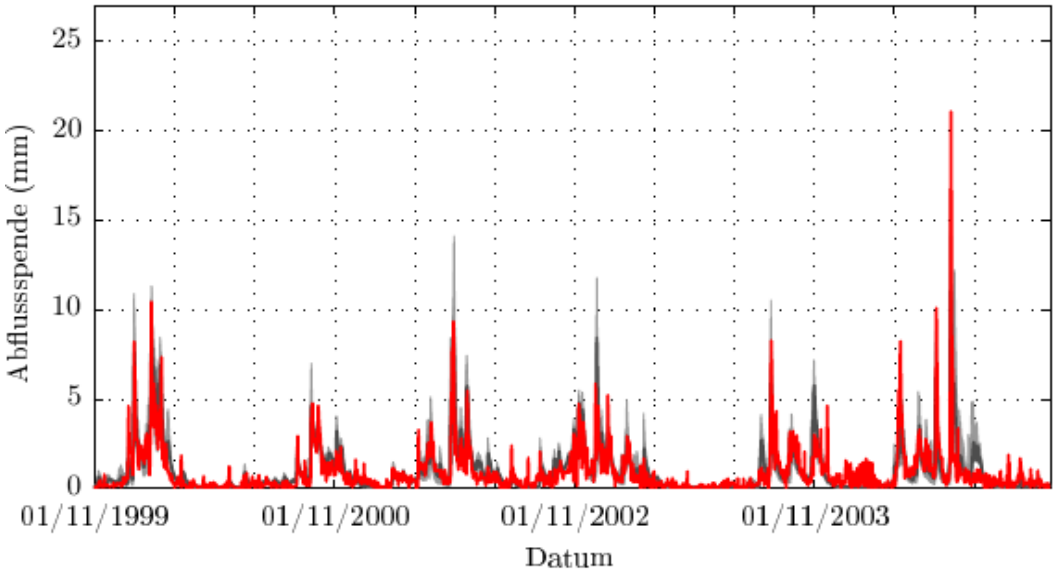


Abbildung 43: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

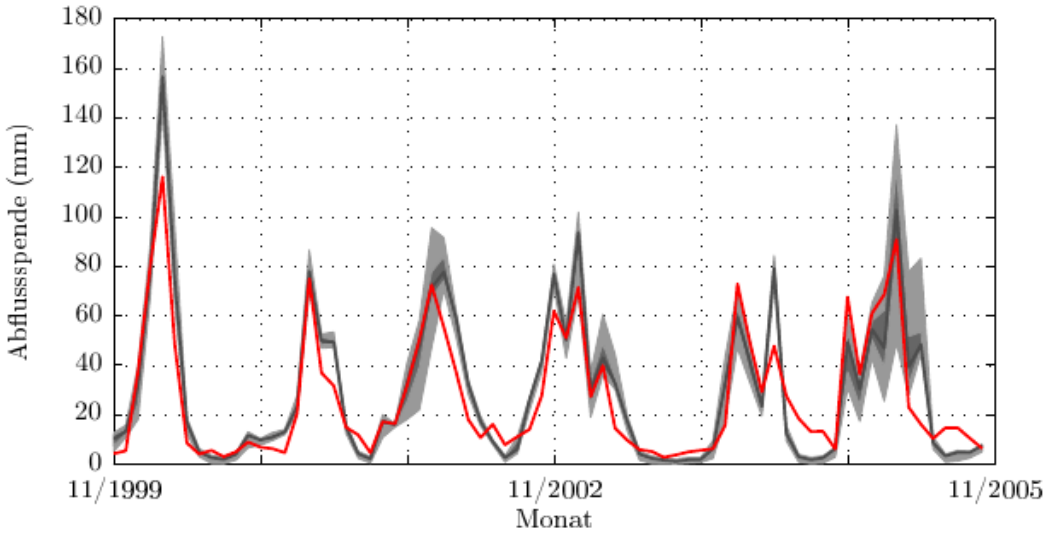


Abbildung 44: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

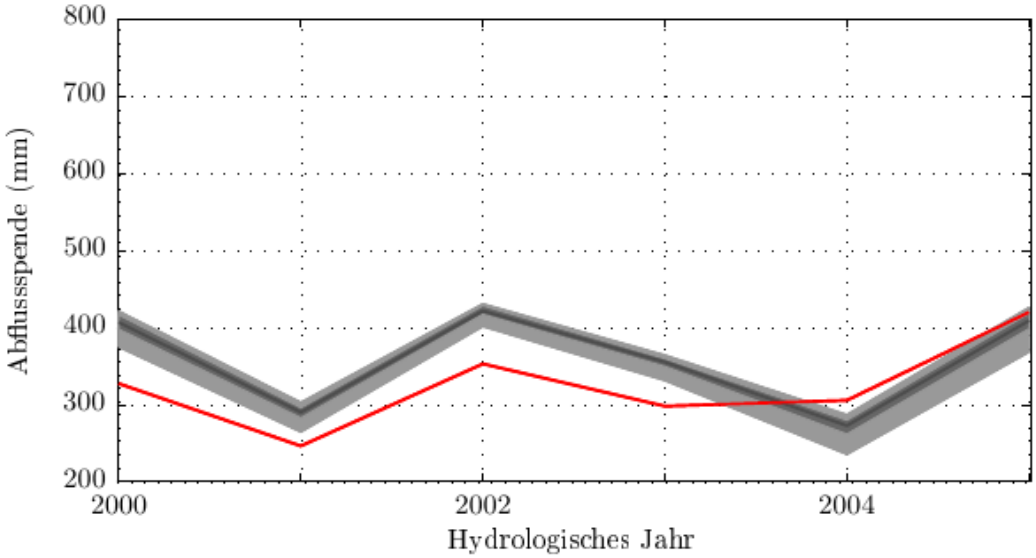


Abbildung 45: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

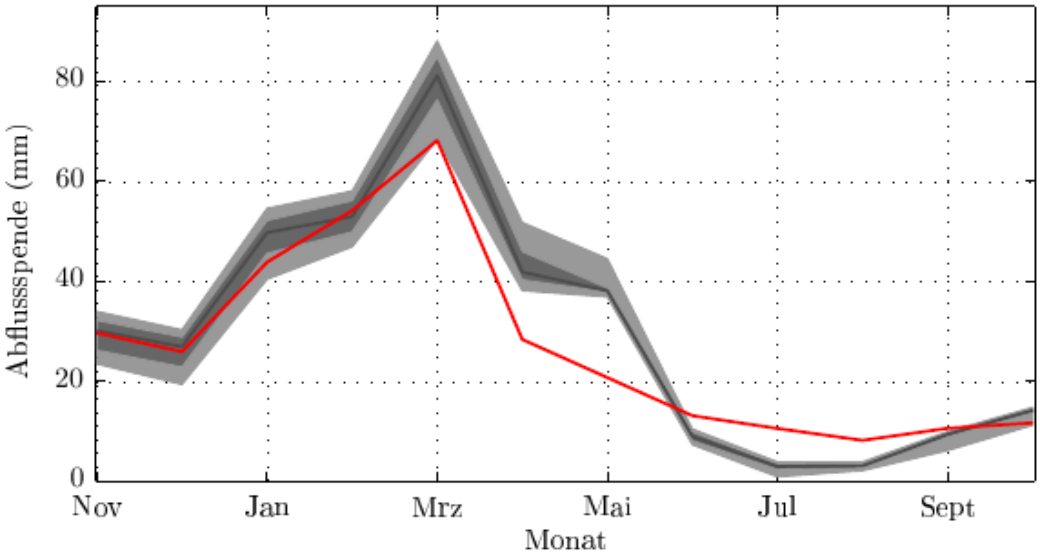


Abbildung 46: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Kalibrierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

5.3 Ergebnisse im Validierungszeitraum

5.3.1 Modellgebiet A

Die Validierung des Wasserhaushaltsmodells erfolgte anhand der im Kalibrierungszeitraum ausgewählten 59 Pareto-optimalen Lösungen (59 unterschiedliche Parametersätze) im Zeitraum der hydrologischen Jahre 2006 bis 2010. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen für unterschiedliche zeitliche Auflösungen den Vergleich der im Modellgebiet A beobachteten und mittels der 59 Parametersätze simulierten Abflussspende.

Abbildung 47 zeigt den Vergleich für tägliche Daten der Abflussspende. Die Dynamik der Abflussspende wird wie im Kalibrierungszeitraum durch die Simulationen relativ gut wiedergegeben. Bei größeren Abflussereignissen treten größere Abweichungen zwischen Beobachtung und Simulation auf.

Bei Betrachtung der monatlichen Summen der Abflussspende (Abbildung 48) ergibt sich ein ähnliches Bild. Wie auch schon im Kalibrierungszeitraum erkennbar war, kann die beobachtete Abflussspende einzelner Monate durch keinen der 59 Modellläufe simuliert werden. Die aus der Anzahl an Simulationen resultierende Bandbreite der Abflussspende ist auch hier in den Wintermonaten größer als in den Sommermonaten.

Analog zu den Monatssummen und zur Kalibrierung werden die beobachteten Jahressummen der Abflussspende in einigen Jahren durch keine Simulation wiedergegeben (Abbildung 49). Die Abweichungen betragen dabei maximal bis zu ca. 10% (HJ 2007) und die durch die Anzahl der 59 Simulationen hervorgerufenen Unsicherheiten bzw. Bandbreiten betragen in Einzeljahren im Validierungszeitraum maximal bis zu 10% (HJ 2006). Die Größenordnungen der Abweichung zwischen Beobachtung und Simulation und die der durch die Anzahl an Modellläufen hervorgerufenen Bandbreite sind damit im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum in etwa gleich.

Der innerjährliche Verlauf der Abflussspende wird wie bereits im Kalibrierungszeitraum bis auf den Monat Mai im Kalibrierungszeitraum sehr gut durch die Simulationen abgebildet (Abbildung 50). In den Wintermonaten von November bis April fällt ebenfalls die im Vergleich zu den Sommermonaten größere Bandbreite der simulierten Abflussspende auf. Gründe hierfür sind wie bereits erwähnt in der im Wasserhaushaltsmodell implementierten Abbildung der Schneeakkumulations- und Schneeschmelzprozesse sowie in der unterschiedlichen Parametrisierung des Schneemodells in den einzelnen Simulationsläufen zu suchen.

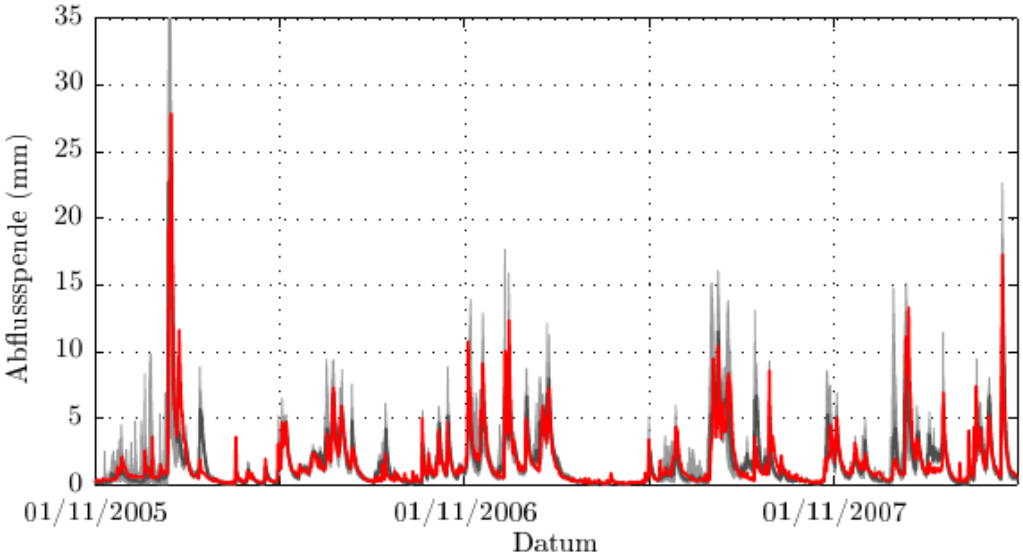


Abbildung 47: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

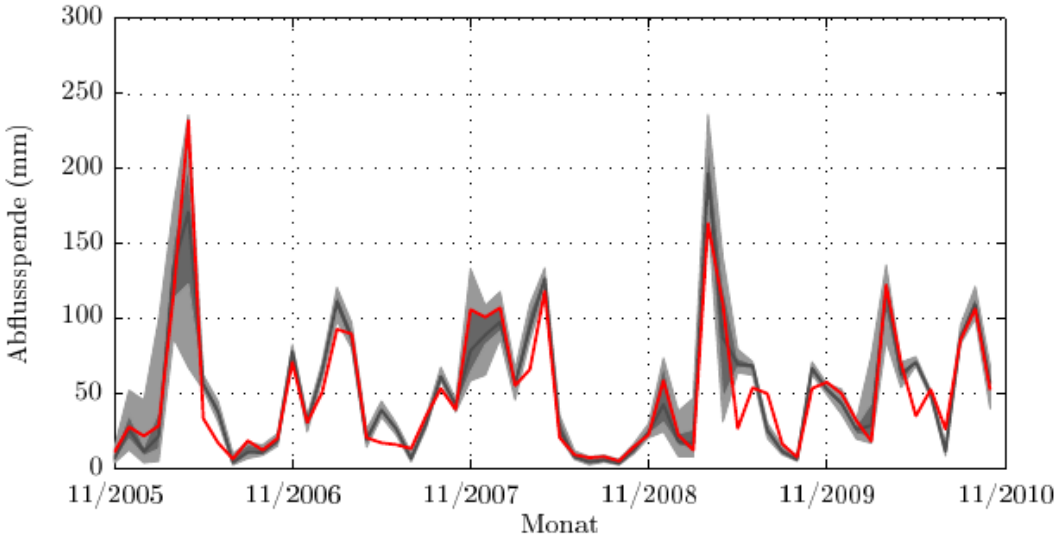


Abbildung 48: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

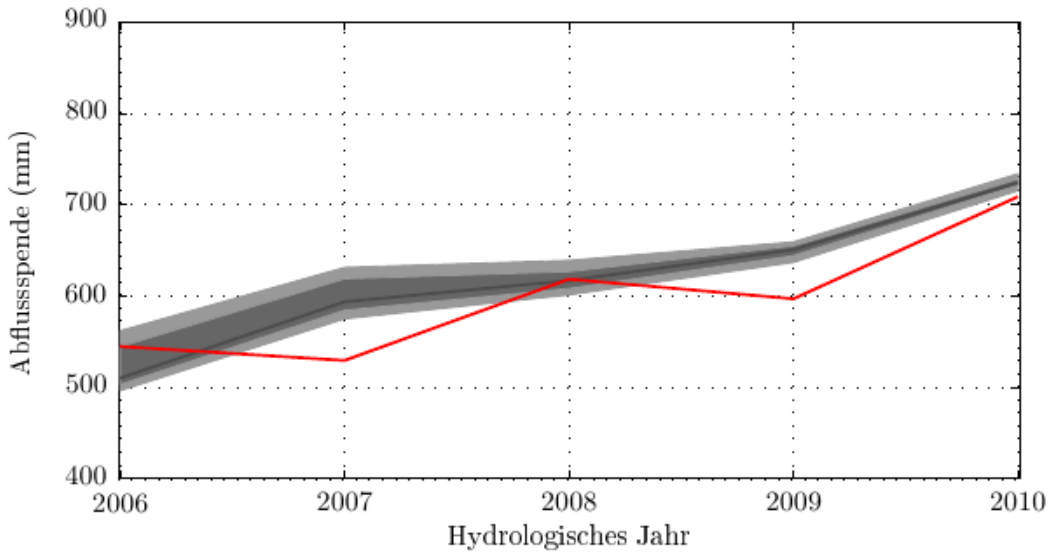


Abbildung 49: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

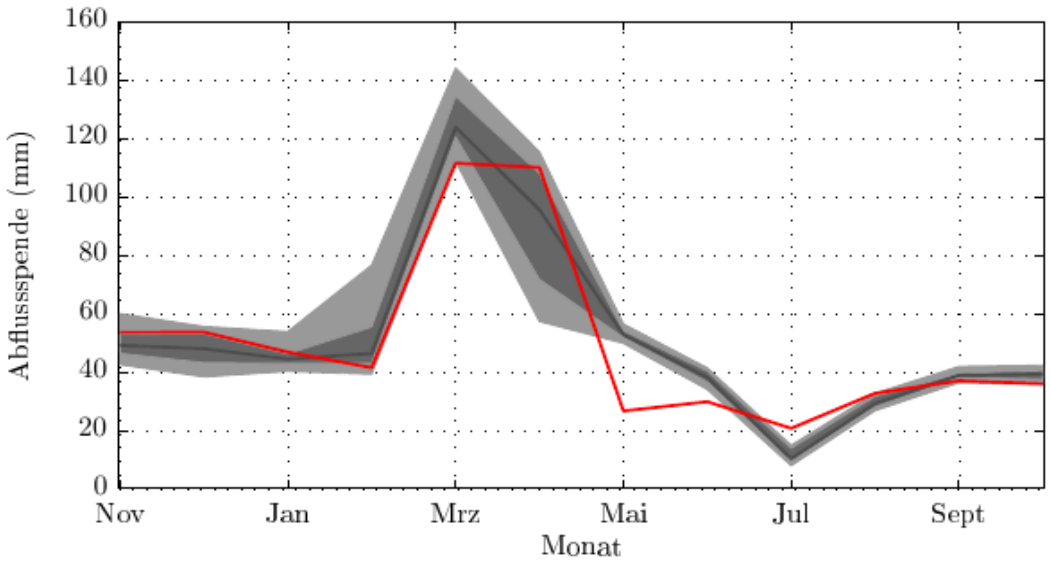


Abbildung 50: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet A für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

5.3.2 Modellgebiet C

Der Vergleich der beobachteten Abflussspende mit den im Kalibrierungszeitraum ausgewählten 54 optimalen Kompromisslösungen simulierten Abflussspenden im Validierungszeitraum der hydrologischen Jahre 2006 bis 2010 ist für unterschiedliche zeitliche Auflösungen in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Der Vergleich für tägliche Daten der Abflussspende zeigt, dass der Verlauf und die Dynamik der Abflussspende durch die Simulationen relativ gut abgebildet werden kann (Abbildung 51). Abweichungen zwischen der Beobachtung und der Simulation treten bei größeren Hochwasserereignissen auf. Eine Unterschätzung der beobachteten Abflussspende ist insbesondere im hydrologischen Jahr 2010 erkennbar.

Diese Unterschätzung wird bei Betrachtung der monatlichen Summen der Abflussspende (Abbildung 52) insbesondere ab Mitte 2009 noch deutlicher. Keine der 54 Simulationen bildet die beobachteten Werte ab. Es zeigt sich außerdem wieder die in den Wintermonaten höhere Bandbreite der simulierten Abflussspende im Vergleich zu der in den Sommermonaten simulierten.

Noch drastischer fallen die Abweichungen der simulierten und beobachteten Abflussspende für die Jahressummen aus(Abbildung 53). Einzig das hydrologische Jahr 2008 kann gut abgebildet werden. Die restlichen vier Jahre werden deutlich unterschätzt. Die Differenzen betragen dabei mit 300mm (HJ 2010) bis zu ca. 40%. Die durch die Anzahl der Simulationen hervorgerufenen Unsicherheiten bzw. Bandbreiten betragen in Einzeljahren im Validierungszeitraum maximal bis zu 15% (HJ 2009).

Die Unterschätzung der beobachteten Abflussspende zeigt sich auch im innerjährlichen Verlauf (Abbildung 54). Die Dynamik des Jahresgangs wird prinzipiell wiedergegeben, jedoch kommt es zu deutlich niedrigeren simulierten Abflussspenden in den Monaten Juni bis Februar, als beobachtet. Zusätzlich ist eine größere Bandbreite der simulierten Abflussspende in den Wintermonaten von November bis April im Vergleich zu den Sommermonaten ersichtlich. Die für das Modellgebiet A genannten Gründe, der Problematik der im Wasserhaushaltsmodell implementierten Abbildung der Schneeakkumulations- und Schneeschmelzprozesse sowie in der unterschiedlichen Parametrisierung des Schneemodells in den einzelnen Simulationsläufen sind hier gleichermaßen anzuführen.

Im Validierungszeitraum zeigten sich im Modellgebiet C die bisher größten Differenzen zwischen Beobachtung und Simulation. Neben Unzulänglichkeiten des Modells sei an dieser Stelle insbesondere auch auf die Qualität und Verfügbarkeit der hydrologischen Vergleichsdaten hingewiesen. So handelt es sich nicht um reine Durchflussbeobachtungsdaten, sondern um aus Talsperrenbewirtschaftungsdaten rückgerechnete Daten (Kapitel 4.4.8).

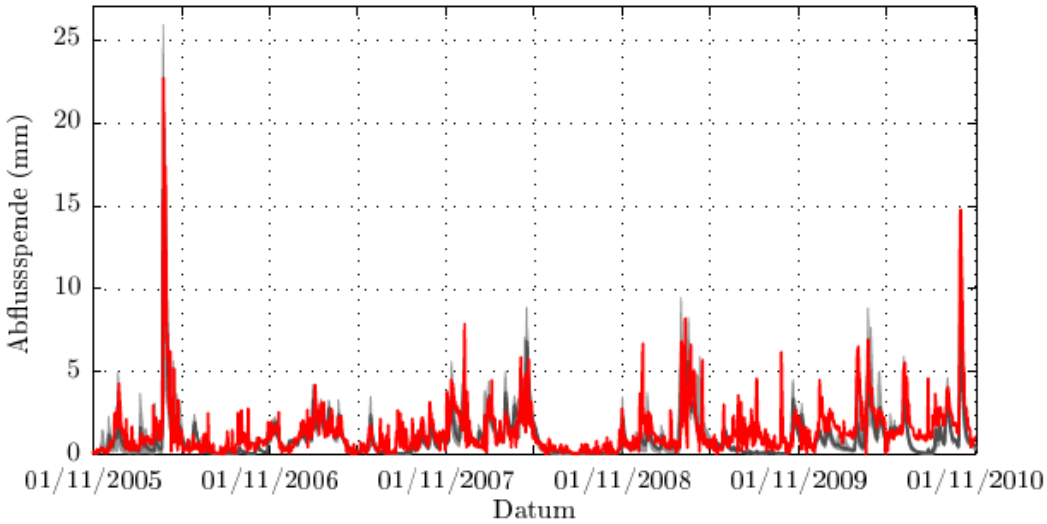


Abbildung 51: Tägliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

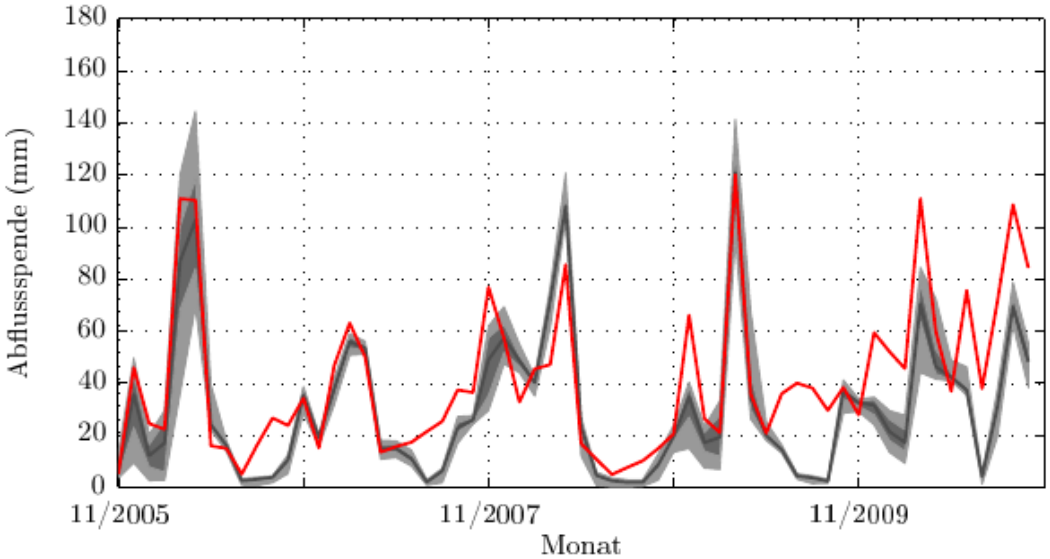


Abbildung 52: Monatliche Summe der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

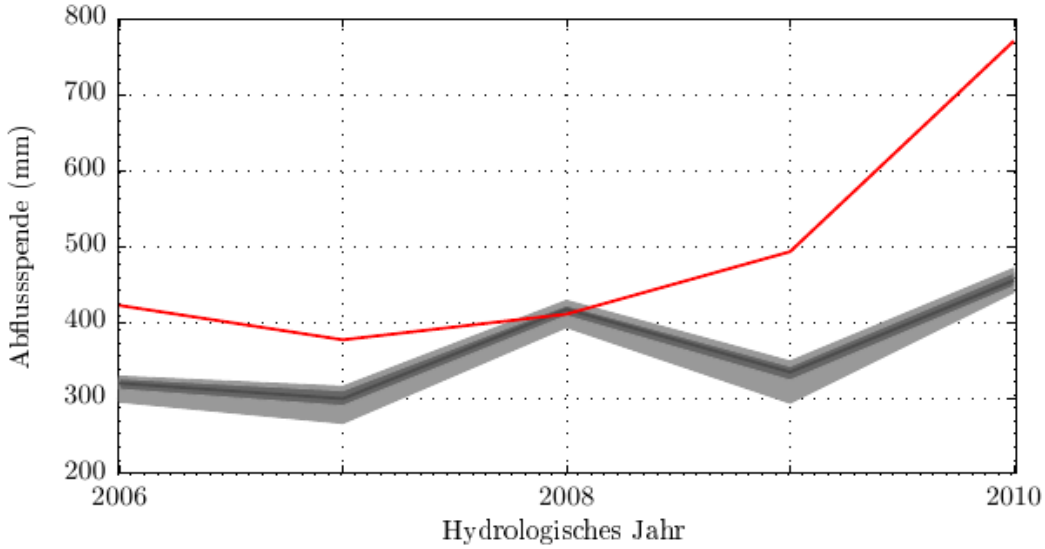


Abbildung 53: Jahressumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

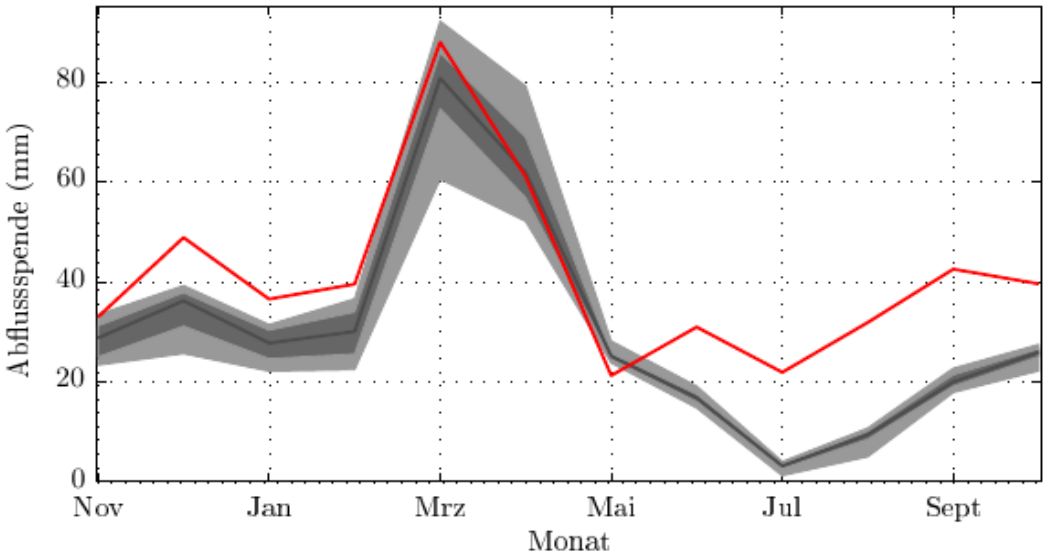


Abbildung 54: Jahresgang der mittleren Monatssumme der Abflussspende (mm) im Modellgebiet C für den Validierungszeitraum. Darstellung der Beobachtungswerte als rote Linie, des Medianes der Modellierung als dunkelgraue Linie, des Interquantils in dunkelgrauer Fläche und der Spannweite in hellgrauer Fläche.

5.4 Repräsentative Lösungen zur Unsicherheitsanalyse im Projektionszeitraum

Für die Simulation des Wasserhaushaltes mit Klimadaten des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG2010 und des dynamischen regionalen Klimamodells CLM im rezenten und zukünftigen Zeitraum wurden die in Abbildung 55 dargestellten Lösungen ausgewählt. Pro Modellgebiet (A und C) wurden insgesamt 16 Cluster gebildet. Aus ausgewählten Clustern wurden im Modellgebiet A insgesamt 15 repräsentative Lösungen ermittelt (vgl. Kapitel 4.5.5). Davon wurde eine Lösung als Referenzparametersatz definiert. Für die Wasserhaushaltssimulationen im Modellgebiet C wurden aus den 16 Clustern 12 repräsentative Lösungen ausgewählt. Um dem nicht abgedeckten Bereich niedriger PBIAS Rechnung zu tragen, wurden für das Modellgebiet C weiterhin drei zusätzliche Lösungen ausgewählt, so dass ebenfalls 15 repräsentative Lösungen für Unsicherheitsbetrachtungen zur Verfügung standen. Analog zum Modelgebiet A wurde auch hier eine Lösung aus den 15 als Referenzparametersatz definiert. Für die Simulationen im Modellgebiet B wurden die 15 Lösungen von Modellgebiet C übertragen und analog für die Modellierung verwendet.

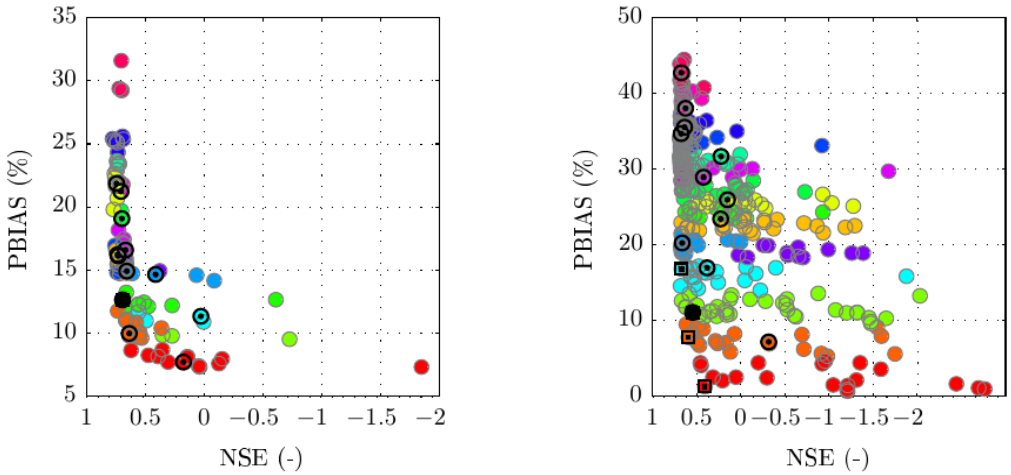


Abbildung 55: Ausgewählte repräsentative Lösungen für das Modellgebiet A (links) und das Modellgebiet C (rechts). Die Zugehörigkeit von Lösungen zu einem Cluster ist durch die gleiche Farbe hervorgehoben. Repräsentative Lösungen eines Clusters sind durch den schwarzen dicken Rand und den schwarzen Mittelpunkt angezeigt. Die drei zusätzlich gewählten Lösungen für das Modellgebiet C sind durch rechteckige Markierungen hervorgehoben. Die Referenzlösung (Referenzparametersatz) als ausgeglichene Kompromisslösung je Modellgebiet ist jeweils durch einen schwarzen Punkt gekennzeichnet.

5.5 Vergleich von Wasserhaushaltsgrößen unter rezentem und projiziertem Klima im Untersuchungsgebiet

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen vergleichend für den rezenten Zeitraum und den zukünftigen Zeitraum anhand der vier REGKLAM-Zeitscheiben für die verwendeten Parametersätze und die beiden regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM vorgestellt. Zunächst wird in den Kapiteln 5.5.1 (WETTREG2010) und 5.5.2 (CLM) der innerjährliche Verlauf verschiedener Wasserhaushaltsgrößen und deren mögliche Änderungen präsentiert. Für einen besseren Vergleich und eine verständliche Darstellung wurden Boxplots verwendet (Abbildung 56).

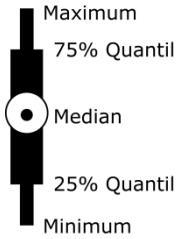


Abbildung 56: Schematische Beschreibung der in den Abbildungen in den beiden folgenden Kapiteln 5.5.1 (WETTREG2010) und 5.5.2 (CLM) verwendeten Boxplots.

In Kapitel 5.5.3 ist dann die mittlere mögliche Entwicklung von ausgewählten Wasserhaushaltsgrößen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit der Betrachtung von Unsicherheiten dargestellt und beschrieben.

5.5.1 Saisonale Ergebnisse für Wasserhaushaltsgrößen unter Verwendung des regionalen, statistischen Klimamodells WETTREG2010

Die Auswertung erfolgt für die mittlere monatliche Abflussspende, die mittlere monatliche potentielle und reale Verdunstung, die Anzahl an Schneetagen pro Monat und der mittlere monatliche Schneespeicher im gesamten Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C = Einzugsgebiet bis Pegel Klingenberg) für die vier REGKLAM Zeitscheiben (1961-1990, 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100). Die Simulation wurde in den Zeitscheiben mit jeweils 15 unterschiedlichen Parametersätzen des Wasserhaushaltsmodells und zehn Realisierungen des regionalen Klimamodells WETTREG2010 pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) durchgeführt. Im Beobachtungszeitraum (1. Zeitscheibe von 1961-1990) erfolgte die Simulation mit den 15 WaSiM Parametersätzen für den unmaskierten und den maskierten DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4) und für zehn Kontrollläufe des regionalen Klimamodells WETTREG2010. Ergebnisse zur vom Wasserhaushaltsmodell ausgegebenen mittleren monatlichen Grundwasserneubildungssumme befinden sich im Anhang (Abbildung A 14, Abbildung A 15 und Abbildung A 16).

Abfluss

Der Jahresgang und die mögliche zeitliche Entwicklung der mittleren monatlichen Abflussspende ist in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 57, Abbildung 58 und Abbildung 59). Zwischen den mittels unmaskierten und maskierten DWD Datensätzen berechneten Abflüssen sind kaum Unterschiede sichtbar. Auffälliger sind die teilweise deutlichen Abweichungen zu den beobachteten Abflüssen in der Referenzperiode von 1961 bis 1990. Dies gilt analog auch für die Resultate aus den zehn Kontrollläufen von WETTREG2010. Desweiteren ist eine deutliche Abnahme des Abflusses bis 2100 in allen Monaten erkennbar. Dabei ist die Abnahme in den Monaten April, Mai und Juni am größten. Das durch die Schneeschmelze bedingte Abflussmaximum wird mit den Daten des regionalen Klimamodells WETTREG2010 im Gegensatz zu den Beobachtungen und den Simulationen mit Klimabeobachtungsdaten bereits im März und damit einen Monat früher simuliert. Durch den im Vergleich zum Monat März stärkeren Rückgang des Abflusses im April, wäre eine Verschiebung des Abflussmaximums von April in den Monat März möglich.

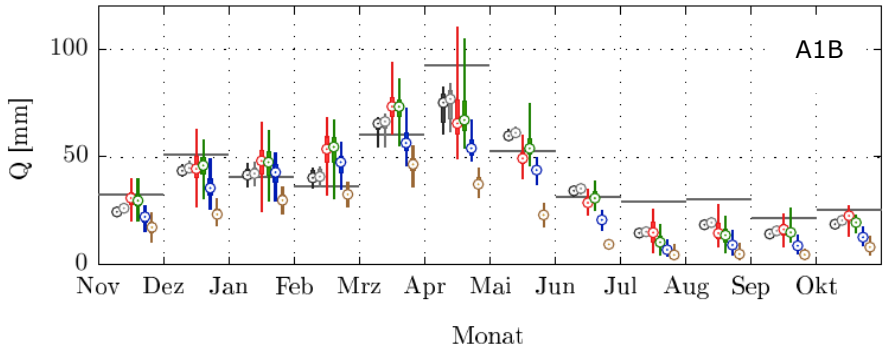


Abbildung 57: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt.

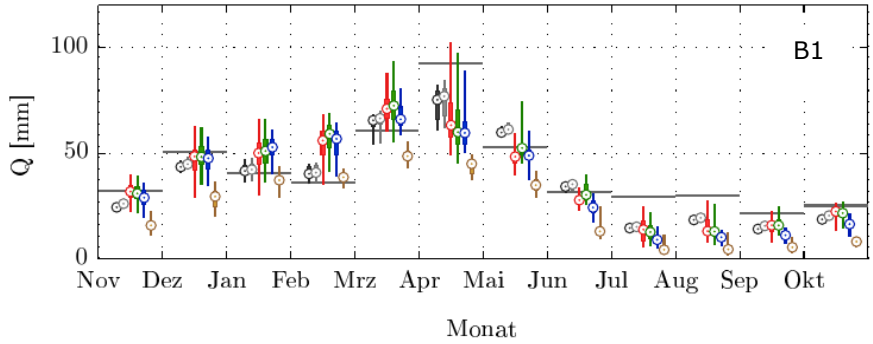


Abbildung 58: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt.

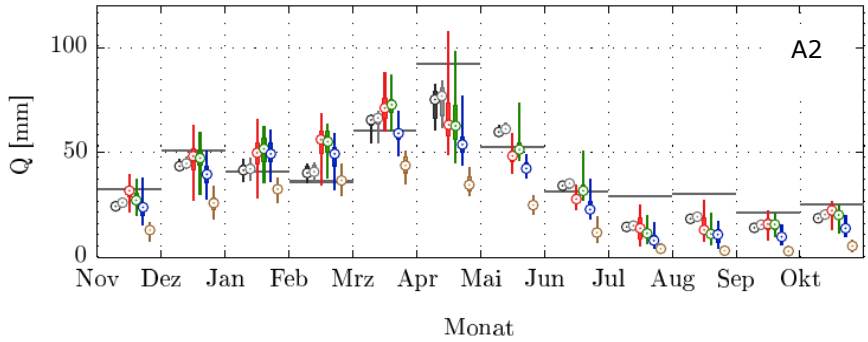


Abbildung 59: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt.

Die Unterschiede zwischen den drei betrachteten Emissionsszenarien fallen insgesamt gering aus. Der Rückgang der Abflüsse in den Monaten April, Mai und Juni fällt mit dem moderaten Szenario B1 im Vergleich zu den nahezu gleichen Szenarien A1B und A2 etwas geringer aus.

Die Bandbreite der Abflüsse, resultierend aus der Anzahl an verwendeten Parametersätzen (15 WaSiM Parametersätze) und Klimamodellrealisierungen (zehn Realisierungen von WETTREG2010), ist in den Wintermonaten von Dezember bis April generell höher als die in den Sommermonaten. Außerdem ist über das gesamte mittlere Jahr eine Abnahme der Bandbreite mit fortschreitender Zeit bis zur letzten Zeitscheibe zu verzeichnen. Die Bandbreite ist in dieser letzten Zeitscheibe beispielsweise in den Monaten Juli bis Oktober nahezu bei null. Diese Entwicklung des innerjährlichen Abflussverhaltens lässt sich mit der Entwicklung der Klimagrößen begründen (vgl. Kapitel 5.1.1). Der Niederschlag nimmt bis 2100 über das Jahr verteilt ab und in den Sommermonaten kommt es durch vergleichsweise höhere Temperaturen, höhere Strahlung und höhere Sonnenscheindauern zu einer höheren Verdunstung und dadurch zu einer zusätzlich vermehrten Abnahme des Abflusses.

Potentielle Verdunstung

Die in den einzelnen Zeitscheiben für DWD Beobachtungsdaten und Realisierungen des regionalen Klimamodells WETTREG2010 von WaSiM berechnete potentielle Verdunstung (ETP) ist in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62). Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für den maskierten und unmaskierten DWD Datensatz fallen wie schon beim Abfluss sehr gering aus. Lediglich in den Monaten Mai bis September sind die Werte der ETP aus dem unmaskierten DWD Datensatz geringfügig höher. Die Werte der ETP aus den Kontrollläufen entsprechen in etwa denen aus dem unmaskierten DWD Datensatz. Generell fallen die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien für alle Zeitscheiben sehr gering aus. Außerdem wird deutlich, dass die Anzahl der Wasserhaushaltssimulationen (15 WaSiM Parametersätze) und zehn Realisierungen von WETTREG2010 bei allen drei Szenarien keine Bandbreite der ETP hervorrufen. Die ETP nimmt bei allen drei Szenarien über das gesamte Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts zu. Die größte Zunahme erfolgt in den Monaten April bis September in der letzten Zeitscheibe von 2071 bis 2100.

Reale Verdunstung

Im Gegensatz zur potentiellen Verdunstung gibt die reale Verdunstung die unter den herrschenden Bedingungen (Klima, Wasserverfügbarkeit) tatsächliche Verdunstung an. Die Ergebnisse des innerjährlichen Verlaufs der realen Verdunstung (ETR) und dessen mögliche zukünftige Änderung sind in den Diagrammen in Abbildung 63, Abbildung 64 und Abbildung 65 dargestellt. Die ETR bleibt für alle drei Emissionsszenarien in den Monaten Oktober bis Februar über alle Zeitscheiben in etwa gleich. Bis zum Ende des Jahrhunderts, insbesondere in der letzten Zeitscheibe, nimmt die ETR analog zur ETP in den Monaten März, April und Mai zu. Während im Monat Juni die Zunahme in der Zeitscheibe von 2021 bis 2050 noch wie die der ETP ausfällt, ist die Zunahme in der letzten Zeitscheibe bereits geringer. Der auffälligste Unterschied zur ETP ist die Abnahme der Verdunstung bei allen drei Emissionsszenarien in der letzten Zeitscheibe in den Monaten Juli, August und September. Im Juli sinkt der Wert sogar unter den der Referenzperiode von 1961 bis 1990. Das bedeutet, obwohl die ETP bei allen drei Emissionsszenarien im Juli, August und September in der Zeitscheibe von 2071 bis 2100 deutlich zunimmt, nimmt die ETR ab. Grund dafür ist die verringerte Wasserverfügbarkeit aufgrund der deutlich niedrigeren projizierten Niederschläge für die letzte Zeitscheibe. Im Gegensatz zur ETP rufen die Anzahl der Wasserhaushaltssimulationen (15 WaSiM Parametersätze) und zehn Realisierungen von WETTREG2010 bei allen drei Szenarien eine kleine Bandbreite der ETR in den Monaten März bis Oktober hervor.

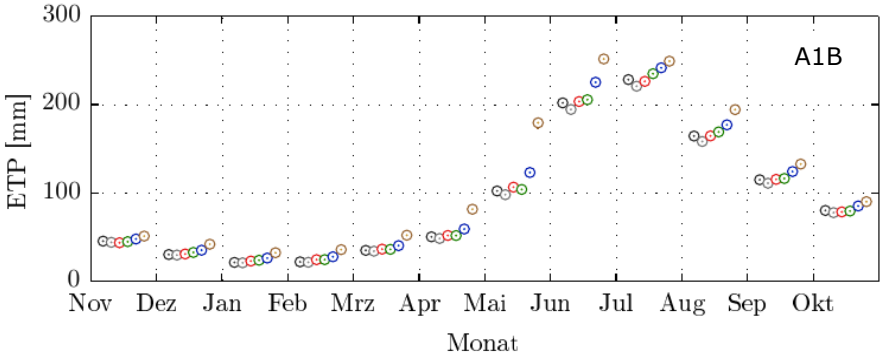


Abbildung 60: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

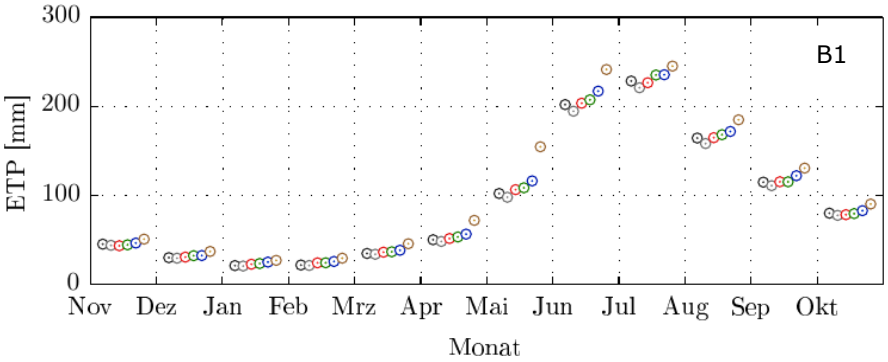


Abbildung 61: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

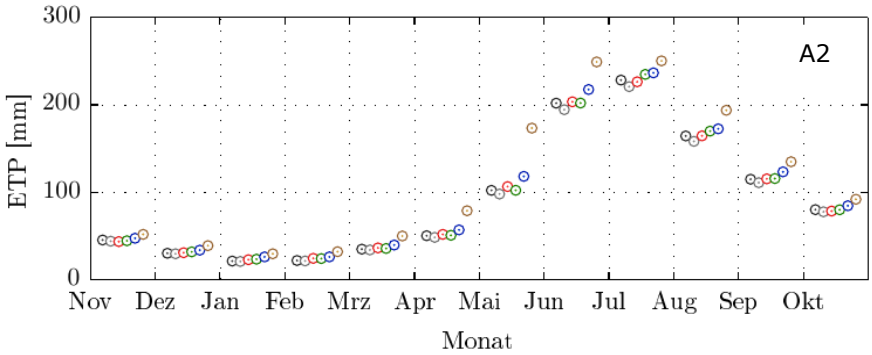


Abbildung 62: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

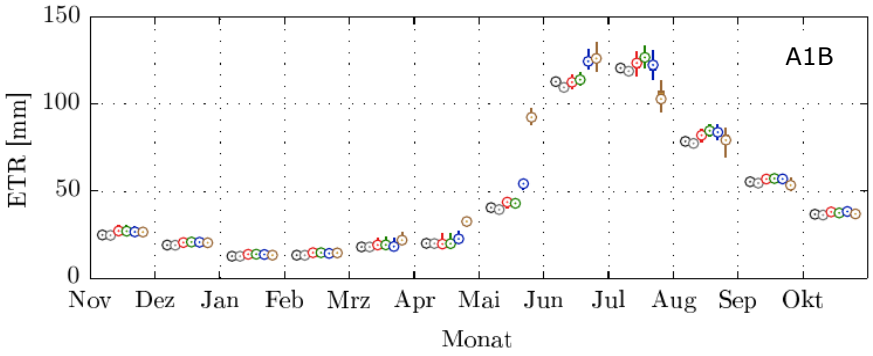


Abbildung 63: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

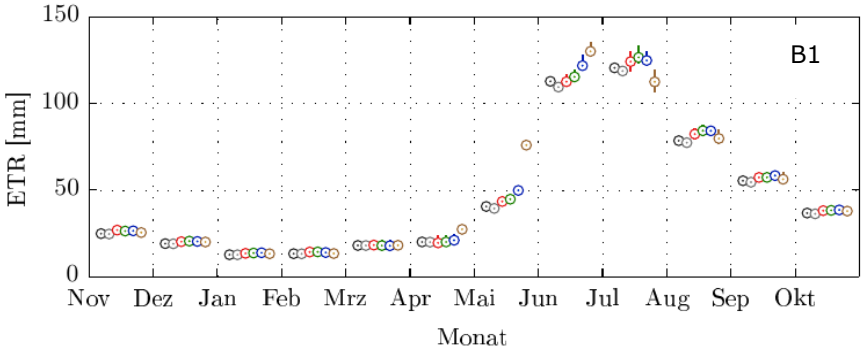


Abbildung 64: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

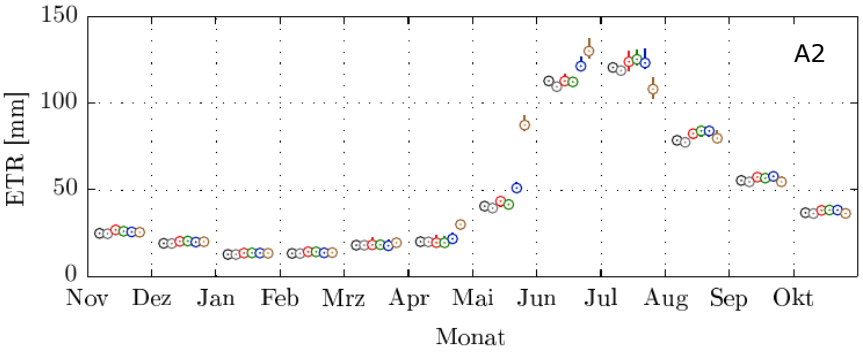


Abbildung 65: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

Schneetage

Die mithilfe des in WaSiM implementierten Schneemodells berechneten Schneetage sind für alle simulierten Zeitscheiben und Emissionsszenarien unter Verwendung der Klimadaten des regionalen Klimamodells WETTREG2010 in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 66, Abbildung 67 und Abbildung 68). Mit dem Begriff Schneetag ist keine zeitliche Angabe, sondern vielmehr eine räumliche Angabe gemeint. Die Ausgabe der Schneetage (SDAY) von WaSiM meint den Flächenanteil im Untersuchungsgebiet, der am Ende eines Zeitschrittes, also bei Modellierung in Tagesschrittweite nach einem Tag, noch mit Schnee bedeckt ist. Eine Rasterzelle in WaSiM gilt dann noch mit Schnee bedeckt, wenn das Schneewasseräquivalent am Ende des Zeitschrittes noch mehr als 5mm beträgt.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus dem maskierten und unmaskierten Datensatz in der ersten Zeitscheibe von 1961 bis 1990 sind zu vernachlässigen. Schneebedeckungen im Untersuchungsgebiet gibt es in der ersten Zeitscheibe von Oktober bis Mai. Die maximale Schneebedeckung innerhalb eines Monats wird im Januar und Februar erreicht. Die aus den 10 Kontrollläufen von WETTREG2010 und 15 Parametersätze von WaSiM resultierende Schneebedeckung weicht von der aus Beobachtungsdaten berechneten ab. So ist die Schneebedeckung aus den Simulationen mit den Kontrollläufen im November und Dezember deutlich höher, im Januar und Februar in etwa gleich und im März und April geringer. Außerdem ist die Bandbreite deutlich größer, als die aus der Simulation mit Beobachtungsdaten resultierende. Diese Bandbreite nimmt in den Zeitscheiben bis zum Ende des Jahrhunderts ab. Analog gibt es bei allen Emissionsszenarien einen starken Rückgang an Schneebedeckung im Untersuchungsgebiet. Die größten Unterschiede gibt es dabei zwischen der zweiten und dritten und zwischen der dritten und vierten Zeitscheibe. Der Rückgang beträgt dabei bis zu ca. 50%. Demnach gäbe es nach diesen Klimaprojektionen am Ende des Jahrhunderts nur noch wenig Schneebedeckung im Untersuchungsgebiet. Die Monate April und Oktober wären im Vergleich zur Beobachtung komplett schneefrei. In den Sommermonaten Juni bis September wären keine Veränderungen zu erwarten. Die Unterschiede zwischen den drei betrachteten Emissionsszenarien sind sehr gering, lediglich dass etwas moderatere Szenario B1 simuliert eine im Vergleich zu A1B und A2 etwas höhere Schneebedeckung in den einzelnen Zeitscheiben.

Schneespeicher

Prinzipiell ergibt sich bei der Betrachtung der Ergebnisse zum innerjährlichen Verlauf und der zukünftig möglichen Entwicklung des Schneespeichers (Abbildung 69, Abbildung 70 und Abbildung 71) ein ähnliches Bild wie bei der Anzahl an Schneetagen. Es gibt quasi keine Unterschiede zwischen den Ergebnissen unter Verwendung des maskierten und unmaskierten DWD Datensatzes. Der Schneespeicher aus der Simulation der zehn WETTREG2010 Kontrollläufe ist in den Monaten November und Dezember im Mittel etwas höher und in den Monaten Januar bis April niedriger als der mit DWD Daten berechnete. Die Bandbreite ist bei dem mit WETTREG Daten berechneten Schneespeicher ebenfalls größer und nimmt pro zukünftige Zeitscheibe absolut ab. Der Schneespeicher ist in den Monaten Juni bis September für alle Realisierungen und Zeitscheiben null und in den Monaten Mai und Oktober nahezu null. Insgesamt nimmt der Schneespeicher für die WETTREG2010 Realisierungen bis 2100 stark ab. Die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien fallen wie schon bei der Anzahl an Schneetagen sehr gering aus.

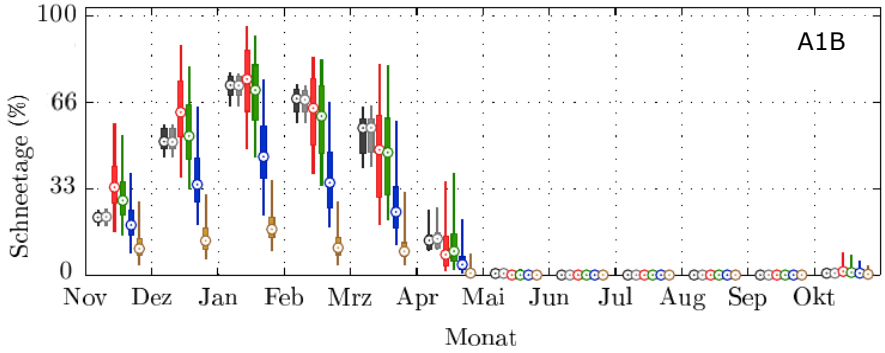


Abbildung 66: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige im gesamten Untersuchungsgebiet. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

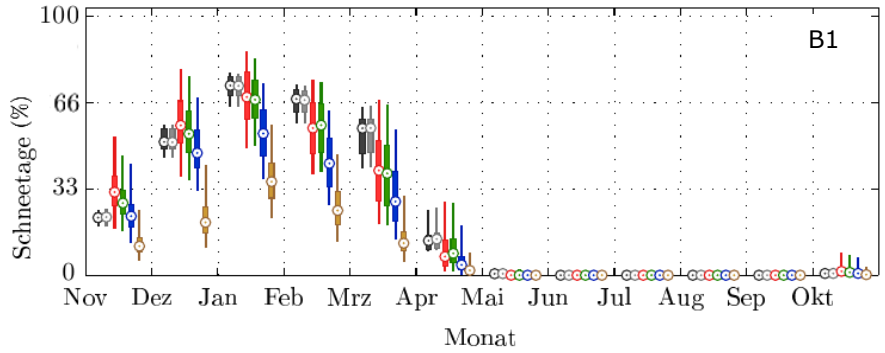


Abbildung 67: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige im gesamten Untersuchungsgebiet. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

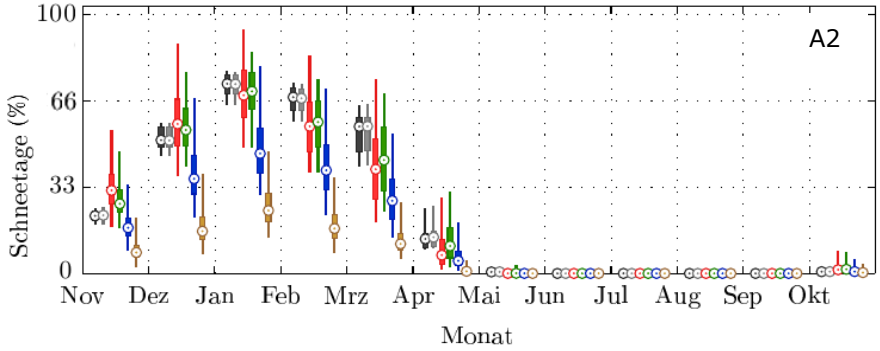


Abbildung 68: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige im gesamten Untersuchungsgebiet. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

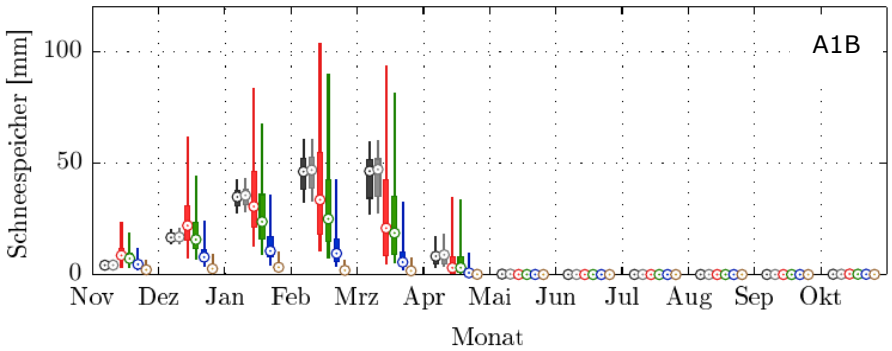


Abbildung 69: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

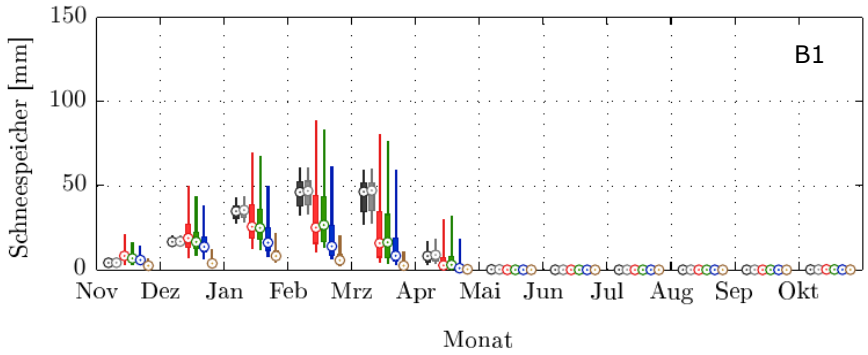


Abbildung 70: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

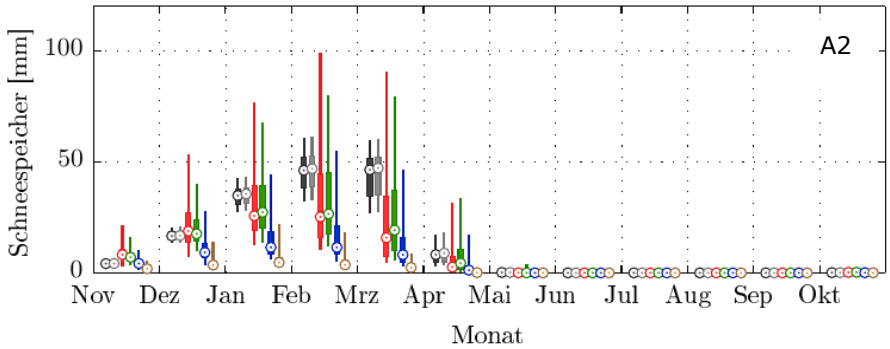


Abbildung 71: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

5.5.2 Saisonale Ergebnisse für Wasserhaushaltsgrößen unter Verwendung des regionalen, dynamischen Klimamodells CLM

Analog zum Kapitel 5.5.1 erfolgt in diesem Kapitel die Auswertung des innerjährlichen Verlaufs der gleichen Wasserhaushaltsgrößen für die Simulationen mit Daten des regionalen, dynamischen Klimamodells CLM. Betrachtet wurde wieder das gesamten Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C = Einzugsgebiet bis Pegel Klingenberg) für die vier REGKLAM Zeitscheiben (1961-1990, 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100). Die Simulation wurde in den Zeitscheiben mit jeweils 15 unterschiedlichen Parametersätzen des Wasserhaushaltsmodells und zwei Realisierungen des regionalen Klimamodells CLM pro Emissionsszenario (A1B und B1) durchgeführt. Im Beobachtungszeitraum (1. Zeitscheibe von 1961-1990) erfolgte die Simulation mit den 15 WaSiM Parametersätzen für den unmaskierten und den maskierten DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4) und für zwei Kontrollläufe des regionalen Klimamodells CLM. Ergebnisse zur vom Wasserhaushaltsmodell ausgegebenen mittleren monatlichen Grundwasserneubildungssumme befinden sich im Anhang (Abbildung A 17 und Abbildung A 18).

Abfluss

Die mögliche zeitliche Entwicklung und der Jahresgang der mittleren monatlichen Abflussspende ist in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 72 und Abbildung 73).

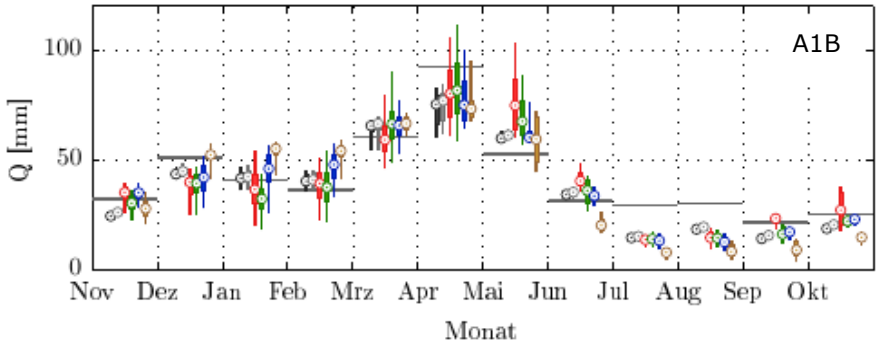


Abbildung 72: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt.

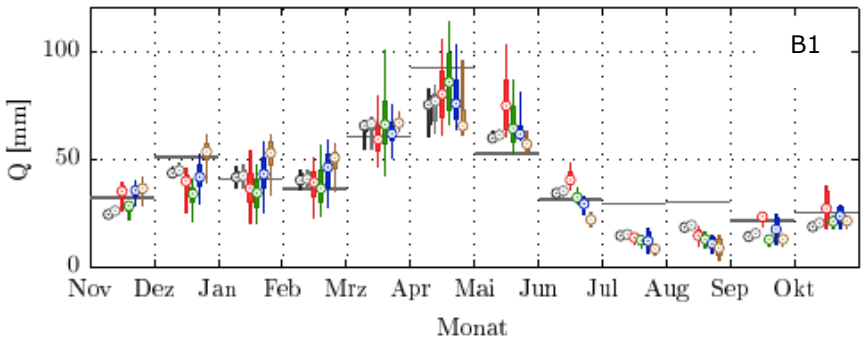


Abbildung 73: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Abflusses (Q) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM. Zum Vergleich sind die Beobachtungsdaten als schwarze Linie für jeden Monat dargestellt.

Wie schon bei der Simulation mit Daten von WETTREG2010 fallen die teilweise deutlichen Abweichungen der Kontrollläufe zu den beobachteten Abflüssen in der Referenzperiode von 1961 bis 1990 auf. Im Vergleich zur Referenzperiode nehmen die Abflüsse in den Monaten Dezember bis Februar bis 2100 im Mittel leicht zu und in den Monaten April bis Oktober hingegen leicht ab. Im Vergleich mit den Resultaten für WETTREG2010 nimmt der Abfluss bis zum Ende des Jahrhunderts demzufolge nicht gleichmäßig in allen Monaten ab. Die Unterschiede zwischen den zwei betrachteten Emissionsszenarien fallen insgesamt gering aus. Der Rückgang der Abflüsse in den Monaten Juni bis November fällt mit dem moderaten Szenario B1 im Vergleich zu dem Szenario A1B etwas geringer aus. Ähnlich wie auch bei den Ergebnissen unter Verwendung von WETTREG2010, zeigt sich, dass die Bandbreite der Abflüsse, resultierend aus der Anzahl an verwendeten Parametersätzen und Klimamodellrealisierungen, in den Wintermonaten von Dezember bis Mai generell höher, als die Bandbreite in den Sommermonaten ist.

Potentielle Verdunstung

Die sich aus den Simulationen ergebende potentielle Verdunstung (ETP, Abbildung 74 und Abbildung 75) zeigt eine ähnliche Entwicklung wie die unter Verwendung der WETTREG2010 Daten ermittelte.

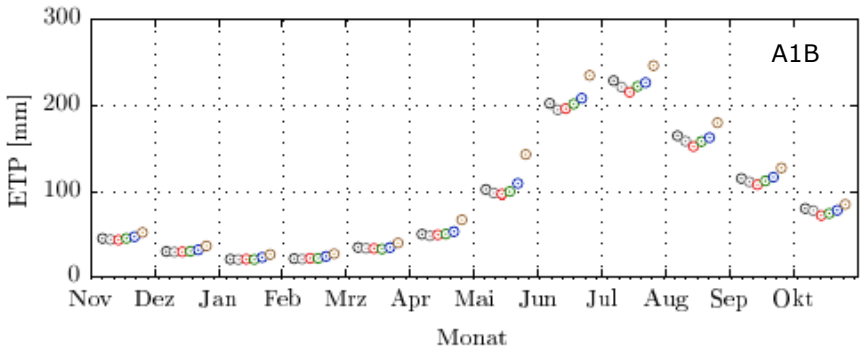


Abbildung 74: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

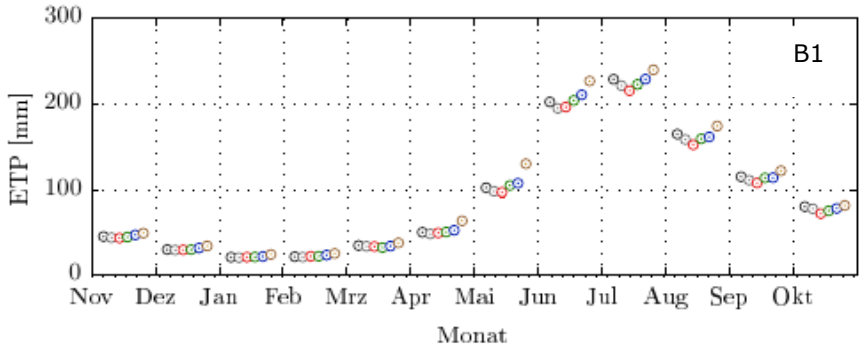


Abbildung 75: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten potentiellen Verdunstung (ETP) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

Die Werte der ETP aus den zwei Kontrollläufen von CLM mit jeweils 15 WaSiM Parametersätzen entsprechen in etwa denen aus dem maskierten DWD Datensatz. Generell fallen die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien für alle Zeitscheiben sehr gering aus. Es zeigt sich wie bereits bei den Ergebnissen für WETTREG2010 auch, dass die Anzahl der Wasserhaushaltssimulationen (15 WaSiM Parametersätze) und zwei Realisierungen von CLM bei beiden Emissionsszenarien keine Bandbreite der ETP hervorrufen. Die ETP nimmt bei beiden Szenarien über das gesamte Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts zu. Die größte Zunahme erfolgt in den Monaten April bis September in der letzten Zeitscheibe von 2071 bis 2100.

Reale Verdunstung

Die Ergebnisse des Jahresganges der realen Verdunstung (ETR) und dessen möglicher zukünftiger Änderung sind in den Diagrammen in Abbildung 76 und Abbildung 77 dargestellt.

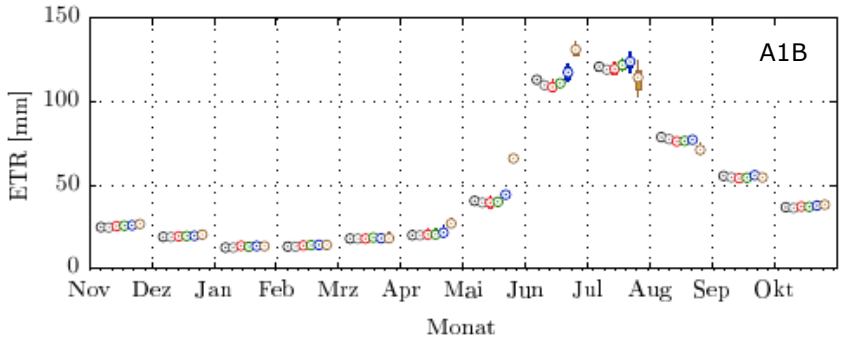


Abbildung 76: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

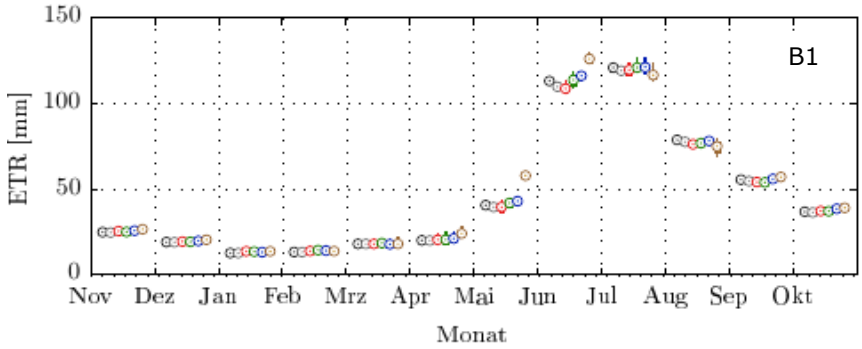


Abbildung 77: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten realen Verdunstung (ETR) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

Die ETR bleibt für beide Emissionsszenarien in den Monaten Oktober bis März über alle Zeitscheiben in etwa gleich. Bis zum Ende des Jahrhunderts, insbesondere in der letzten Zeitscheibe, nimmt die ETR analog zur ETP in den Monaten April, Mai und Juni zu. Ähnlich wie schon bei den Ergebnissen der ETR für WETTREG2010 ist die Abnahme der Verdunstung bei beiden Emissionsszenarien in der letzten Zeitscheibe in den Monaten Juli und August. Dabei sinkt der Wert der ETR, obwohl die ETP in der Zeitscheibe von 2071 bis 2100 deutlich zunimmt, unter den der Referenzperiode von 1961 bis 1990. Die Ursache dafür liegt auch hier an der verringerten Wasserverfügbarkeit aufgrund

der niedrigeren projizierten Sommerniederschläge für die letzte Zeitscheibe. Die Anzahl der Wasserhaushaltssimulationen (15 WaSiM Parametersätze) und zwei Realisierungen von CLM rufen bei beiden Szenarien nur eine sehr kleine Bandbreite der ETR hervor.

Schneetage

Die simulierte Schneebedeckung ist für alle Zeitscheiben und Emissionsszenarien unter Verwendung der Klimadaten des regionalen Klimamodells CLM in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 78 und Abbildung 79).

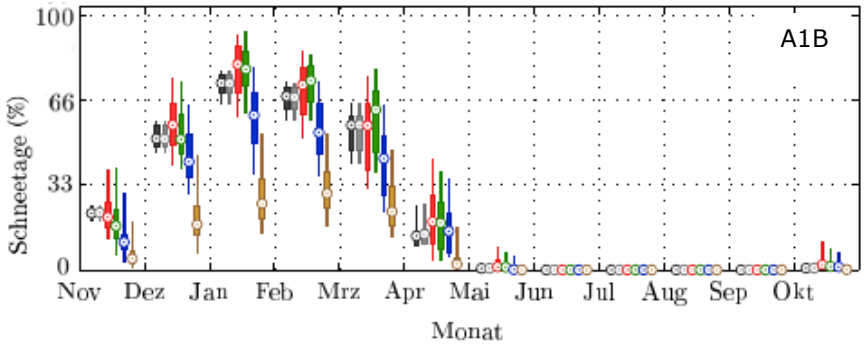


Abbildung 78: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat im Untersuchungsgebiet in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

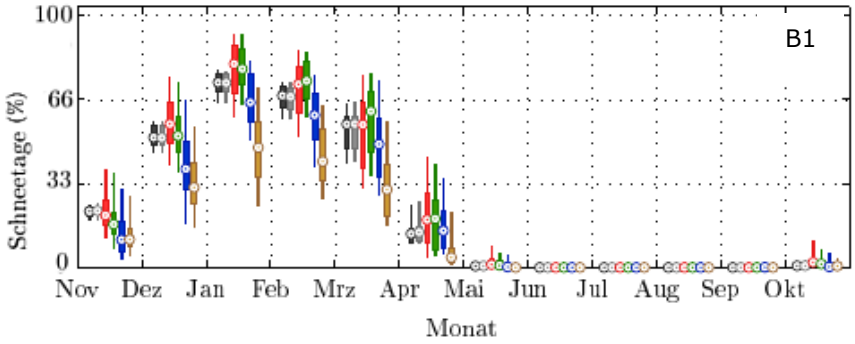


Abbildung 79: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten prozentualen Schneebedeckung (Schneetage) pro Monat im Untersuchungsgebiet in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

Schneebedeckung im Untersuchungsgebiet gibt es in der ersten Zeitscheibe von Oktober bis Mai. Die maximale Schneebedeckung innerhalb eines Monats wird im Januar und Februar erreicht. Die aus den zwei Kontrollläufen von CLM und 15 Parametersätzen von WaSiM resultierende Schneebedeckung weicht von der aus DWD Beobachtungsdaten berechneten nur geringfügig ab. Lediglich die Bandbreite ist etwas größer, als die aus der Simulation mit DWD Beobachtungsdaten resultierende. Diese Bandbreite bleibt in den Zeitscheiben bis zum Ende des Jahrhunderts in etwa konstant. Analog zu den Ergebnissen für WETTREG2010 gibt es bei beiden Emissionsszenarien einen starken Rückgang an Schneebedeckung bis zum Ende des Jahrhunderts im Untersuchungsgebiet. Die größten Unterschiede gibt es dabei zwischen der zweiten und dritten und zwischen der dritten

und vierten Zeitscheibe. Der Rückgang ist bei Vergleich der gleichen Emissionsszenarien allerding geringer als bei den Ergebnissen mit WETTREG2010. Das Maximum verschiebt sich bei A1B leicht vom Januar in den Februar. In den Sommermonaten Juni bis September treten keine Veränderungen auf. Die Unterschiede zwischen den betrachteten Emissionsszenarien sind sehr gering. Mit dem etwas moderateren Szenario B1 wird eine im Vergleich zu A1B etwas höhere Schneebedeckung in den einzelnen Zeitscheiben simuliert.

Schneespeicher

Die Ergebnisse des innerjährlichen Verlaufes und der zukünftig möglichen Entwicklung des Schneespeichers (Abbildung 69, Abbildung 70 und Abbildung 71) ergeben, analog zu den Ergebnissen für WETTREG2010, ein ähnliches Bild wie bei der Anzahl an Schneetagen. Der Schneespeicher aus der Simulation der zwei CLM Kontrollläufe bildet die sich aus den DWD Beobachtungsdaten ergebenden Ergebnisse im Mittel gut ab. Die Bandbreite ist bei dem mit WETTREG2010 Daten berechneten Schneespeicher größer und nimmt pro zukünftiger Zeitscheibe absolut betrachtet leicht ab. Der Schneespeicher ist in den Monaten Juni bis September für alle Realisierungen und Zeitscheiben null und in den Monaten Mai und Oktober nahezu null. Insgesamt nimmt der Schneespeicher analog zu den Ergebnissen für die WETTREG2010 Realisierungen bis 2100 stark, aber vergleichsweise geringer, ab. Die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien fallen wie schon bei der Anzahl an Schneetagen sehr gering aus.

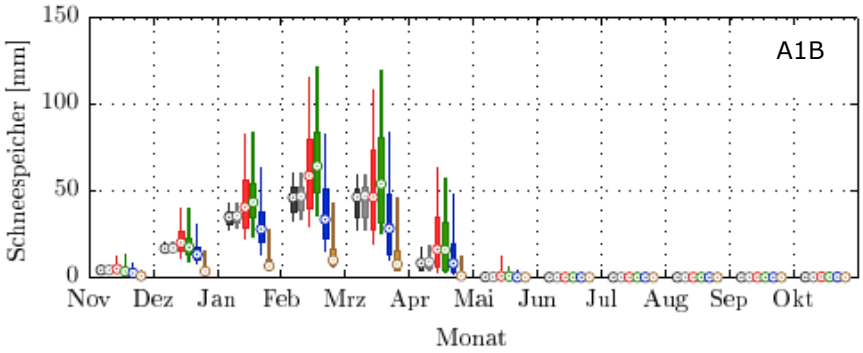


Abbildung 80: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

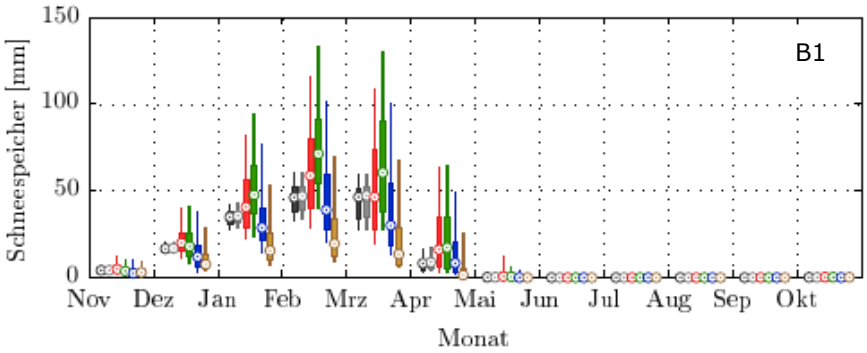


Abbildung 81: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung des mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Schneespeichers in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

5.5.3 Vergleich von Wasserhaushaltsgrößen unter Verwendung der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM für Zeitscheiben

Neben möglicher innerjährlicher Veränderungen wurde auch die mögliche langjährige Entwicklung von ausgewählten Wasserhaushaltsgrößen in den vier REGKLAM Zeitscheiben auf Basis von Jahreswerten untersucht. Die Auswertung erfolgt in den folgenden Abbildungen und Tabellen.

WETTREG2010

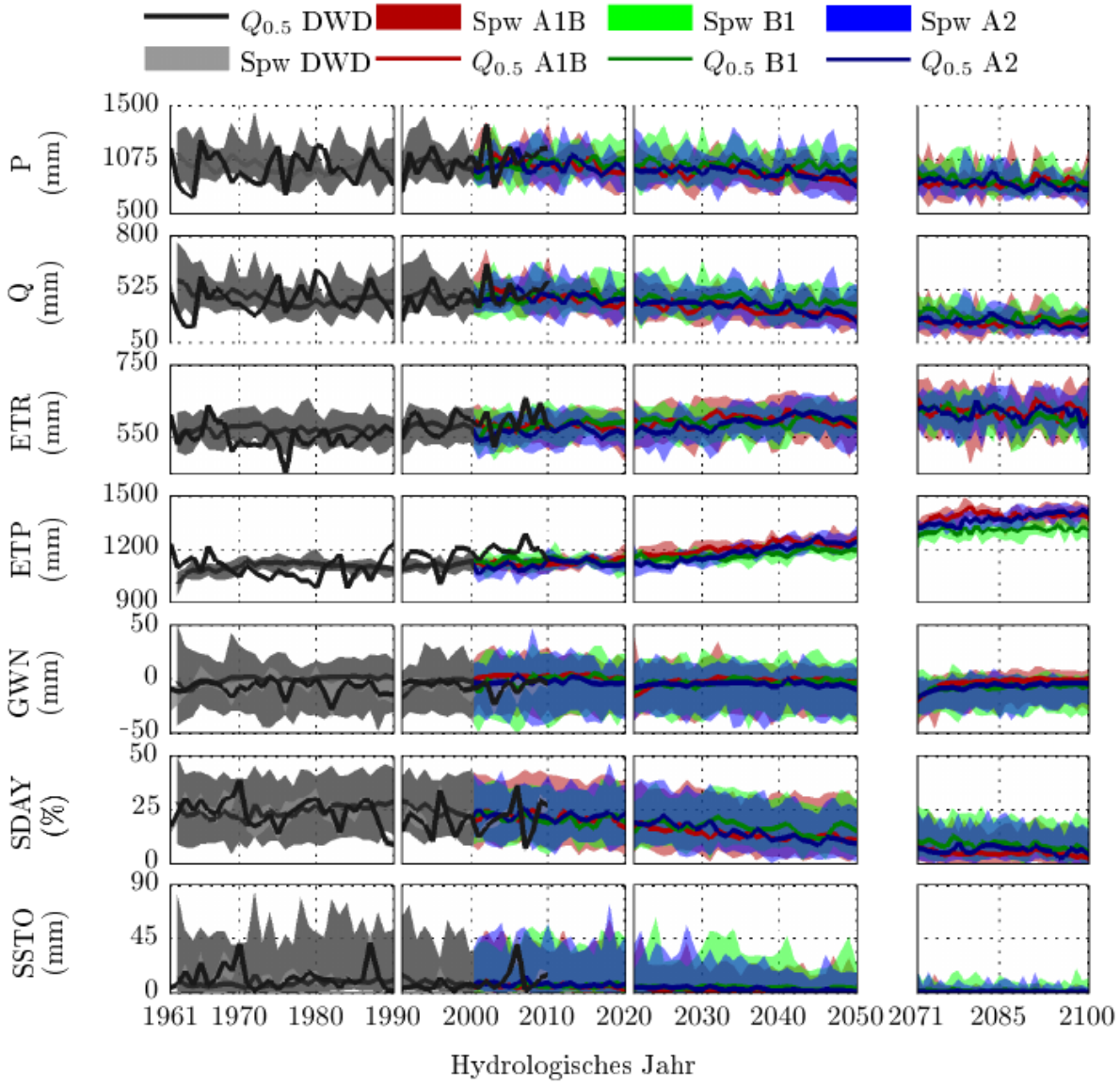


Abbildung 82: Entwicklung von Jahreswerten der nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Schneebedeckung (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind Mediane ($Q_{0.5}$) und Spannweiten (Spw). Für den Zeitraum 1961-2010 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen mit maskiertem DWD Beobachtungsdatensatz (schwarz und hellgrau), für den Zeitraum 1961-2000 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und mit zehn Kontrollläufen von WETTREG2010 (dunkel- und mittelgrau). Ab 2001 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen von WETTREG2010.

In Abbildung 82 ist die mögliche Entwicklung von Jahreswerten der nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Schneebedeckung (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im Untersuchungsgebiet angegeben. Für die Simulation wurden jeweils immer 15 Parametersätze für das Wasserhaushaltsmodell WaSiM und zehn Kontrollläufe beziehungsweise ab 2001 zehn Realisierungen pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) des regionalen statistischen Klimamodells WETTREG2010 (W2010) verwendet.

Für den Niederschlag ist zu erkennen, dass die zehn Kontrollläufe den beobachteten Niederschlag sowohl im Mittel, als auch in der Schwankungsbreite relativ gut wiedergeben. Der Niederschlag nimmt in den Projektionen von WETTREG2010 für alle drei Emissionsszenarien gleichermaßen bis zum Ende des Jahrhunderts ab. Dabei sinkt die, durch die Anzahl an Realisierungen und Simulationsläufen hervorgerufene absolute Schwankungsbreite. Betrachtet man absolute Mittelwerte in den Zeitscheiben (Tabelle 10 und Tabelle 11), so nimmt der Niederschlag im Mittel über alle drei Emissionsszenarien im Vergleich zwischen der letzten Zeitscheibe und den Kontrollläufen in der Referenzperiode (1961-1990) um ca. 17% ab. Dabei fällt der Rückgang beim Emissionsszenario B1 etwas geringer aus.

Der Verlauf des Abflusses zeigt ein ähnliches Verhalten wie beim Niederschlag. Die beobachteten und die durch DWD Beobachtungsdaten simulierten Abflussdaten werden durch die Wasserhaushaltssimulation mit den Klimadaten von WETTREG2010 sowohl im Mittel, als auch in der Bandbreite gut wiedergegeben. Der Abfluss ist im Mittel in der letzten Zeitscheibe 2071 bis 2100 bei den Emissionsszenarien A1B und A2 um nahezu 50% und bei B1 um ca. 40% kleiner im Vergleich zum Mittel der Kontrollläufe in der Referenzperiode ab (Tabelle 11). Dieser Rückgang ist im Mittel über alle drei Emissionsszenarien zu ca. 80% im Rückgang des Niederschlages zu begründen.

Die restlichen 20% sind mit der Zunahme der realen Evapotranspiration zu erklären. Die durch Simulation mit den WETTREG2010 Kontrollläufen ermittelte ETR ist in der Referenzperiode etwas höher als die sich als Restglied aus beobachtetem Niederschlag und Abfluss ergebende ETR. Die Zunahme der ETR infolge höherer Temperaturen, Sonnenscheindauern und Globalstrahlungen bis zum Ende des Jahrhunderts beträgt im Mittel über alle drei Emissionsszenarien in der letzten Zeitscheibe ca. 8% (Tabelle 10 und Tabelle 11).

Die Zunahme der ETP bis 2100 ist noch größer als die der ETR. Auffällig ist die im Vergleich zu den drei zuvor betrachteten Größen wesentlich geringere Bandbreite der möglichen Lösungen.

Aufgrund der im Wasserhaushaltsmodell vorgenommenen vereinfachten Annahme eines erweiterten Bodenprofils, einer Simulation ohne Grundwassermodell und des in der Realität vorhandenen Kluftgrundwasserleiters wird auf eine Interpretation der Entwicklung der Grundwasserneubildung an dieser Stelle verzichtet.

Die Schneebedeckung und der Schneespeicher gehen mit einer durch die Anzahl an Realisierungen und WaSiM Modellläufen hervorgerufenen großen Bandbreite deutlich bis zum Ende des Jahrhunderts zurück.

In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind vergleichsweise die absoluten Ergebnisse, absolute und prozentuale Differenzen für die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Abfluss und Verdunstung für die Wasserhaushaltssimulation mit einem Referenzparametersatz (Abbildung 55, Kapitel 5.4) anstelle der 15 WaSiM Parametersätze aufgelistet. Der Vergleich zu der Simulation mit 15 Parametersätzen zeigt, dass die Mediane für alle Zeitscheiben und Emissionsszenarien in etwa gleich sind. Demzufolge ist die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen in den Zeitscheiben und für die Emissionsszenarien bis zum Ende des Jahrhunderts bei der Simulation mit einem Parametersatz nahezu identisch. Ein auffälliger Unterschied ist die geringere Spannweite zwischen den in den Zeitscheiben simulierten mittleren minimalen und maximalen Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Abfluss und Verdunstung bei der Simulation mit nur einem WaSiM Parametersatz. Der Grund dafür ist, dass bei der Rechnung mit einem WaSiM Parametersatz lediglich die Bandbreite der zehn Realisierungen von WETTREG2010 pro Emissionsszenario (bzw. zehn Kontrollläufe in der Zeitscheibe 1961-1990) berücksichtigt werden.

Tabelle 10: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben inklusive der Parameterunsicherheit aus der Wasserhaushaltsmodellierung (Verwendung von 15 Parametersätzen) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C).

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – WETTREG 2010									
	1961 - 1990				1991 - 2020			2021 - 2050			2071 - 2100		
	Obs.	*	**	C20	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
min				978	981	1009	991	918	1008	918	832	867	822
N (mm)	**994**	**997**	**994**	**1038**	**1035**	**1034**	**1023**	**952**	**1018**	**967**	**856**	**891**	**856**
max				1064	1074	1098	1074	984	1030	993	887	912	877
min		446	432	404	397	428	421	309	407	331	197	254	201
A (mm)	**492**	**453**	**439**	**471**	**467**	**465**	**463**	**364**	**432**	**385**	**242**	**287**	**240**
max		457	444	518	510	528	521	407	456	424	285	311	273
min		540	549	553	566	567	556	579	579	573	593	598	604
V (mm)	**502**	**542**	**551**	**571**	**578**	**579**	**570**	**595**	**591**	**588**	**621**	**610**	**618**
max		547	556	587	599	597	583	618	607	605	648	629	637
min		-1	0	-21	-19	-12	-14	-15	-10	-48	-15	-12	-13
ΔS (mm)	**0**	**3**	**4**	**-9**	**-9**	**-7**	**-9**	**-6**	**-5**	**-7**	**-6**	**-6**	**-7**
max		5	6	1	-2	-2	-3	0	0	17	3	2	-1

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Tabelle 11: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zehn Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells WETTREG2010 in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 10 (15 WaSiM Parametersätze).

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – WETTREG 2010									
	1961 - 1990				1991 - 2020			2021 - 2050			2071 - 2100		
	Obs.	*	**	**C20**	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
ΔN (mm)	-44	-41	-44	**1038**	-3	-4	-15	-86	-20	-71	-182	-147	-182
	-4%	-4%	-4%	**100%**	±0%	±0%	-1%	-8%	-2%	-7%	-18%	-14%	-18%
ΔA (mm)	+21	-18	-32	**471**	-4	-6	-8	-107	-39	-86	-229	-184	-231
	+4%	-4%	-7%	**100%**	-1%	-1%	-2%	-23%	-8%	-18%	-49%	-39%	-49%
ΔV (mm)	-69	-29	-20	**571**	+7	+8	-1	+24	+20	+17	+50	+39	+47
	-12%	-5%	-4%	**100%**	+1%	+1%	±0%	+4%	+4%	+3%	+9%	+7%	+8%

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Bei der Simulation mit 15 Parametersätzen kommt die Bandbreite (Unsicherheit) aus diesen unterschiedlichen Parametersätzen hinzu und die Anzahl an Simulationen steigt von zehn auf 150 pro Zeitscheibe und Emissionsszenario. Mit dem Vergleich der Spannweiten der Simulationsergebnisse unter Verwendung von 15 und einem WaSiM Parametersatz ist es möglich, die infolge der Anzahl an Realisierungen des regionalen Klimamodells hervorgerufenen und die aufgrund der Anzahl an Parametern resultierenden Unsicherheiten zu quantifizieren. Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse dazu.

Tabelle 12: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben, für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C) für einen Referenzparametersatz (ohne Parameterunsicherheiten aus der Wasserhaushaltsmodellierung) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells WETTREG2010.

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – WETTREG 2010									
	1961 - 1990				1991 - 2020			2021 - 2050			2071 - 2100		
	Obs.	*	**	C20	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
min				978	981	1009	991	918	1008	918	832	867	822
N (mm)	**994**	**997**	**994**	**1038**	**1035**	**1034**	**1023**	**952**	**1018**	**967**	**856**	**891**	**856**
max				1064	1074	1098	1074	984	1030	993	887	912	877
min				415	407	437	430	319	416	339	211	264	211
A (mm)	**492**	**451**	**437**	**463**	**462**	**459**	**460**	**355**	**429**	**380**	**233**	**282**	**239**
max				491	492	515	507	383	443	410	255	295	255
min				566	577	575	565	595	588	582	614	608	614
V (mm)	**502**	**544**	**553**	**576**	**580**	**579**	**570**	**600**	**592**	**590**	**627**	**614**	**624**
max				577	589	588	572	607	598	596	635	620	626
min				-4	-9	-6	-8	-6	-5	-7	-5	-6	-10
ΔS(mm)	**0**	**2**	**4**	**-3**	**-4**	**-4**	**-6**	**-3**	**-3**	**-4**	**-3**	**-3**	**-5**
max				-2	-3	-2	-4	-1	-1	-1	2	2	-2

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Tabelle 13: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zehn Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells WETTREG2010 in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 12 (1 WaSiM Parametersatz).

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – WETTREG 2010									
	1961 - 1990				1991 - 2020			2021 - 2050			2071 - 2100		
	Obs	*	**	**C20**	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
ΔN (mm)	-44	-41	-44	**1038**	-3	-4	-15	-86	-20	-71	-182	-147	-182
	-4%	-4%	-4%	**100%**	±0%	±0%	-1%	-8%	-2%	-7%	-18%	-14%	-18%
ΔA (mm)	+29	-12	-26	**463**	-1	-4	-3	-108	-34	-83	-230	-181	-224
	6%	-3%	-6%	**100%**	±0%	-1%	-1%	-23%	-7%	-18%	-50%	-39%	-48%
ΔV (mm)	-74	-32	-23	**576**	+4	+3	-6	+24	+16	+14	+51	+38	+48
	-13%	-6%	-4%	**100%**	+1%	+1%	-1%	+4%	+3%	+2%	+9%	+7%	+8%

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Zunächst ist in Tabelle 14 die gesamte Unsicherheit infolge der Anzahl an Realisierungen/Kontrollläufen und der Anzahl an WaSiM Simulationen für den Abfluss und die Verdunstung (A15 bzw. V15) angegeben. Diese gesamte Unsicherheit beträgt für den Abfluss im Mittel über alle Zeitscheiben für die Daten von WETTREG2010 ca. 24% vom Median. Die Schwankung beträgt demnach im Mittel ±12%. Dabei ist der, aus den Realisierungen des regionalen Klimamodells hervorgerufene Anteil der Unsicherheit (A1) größer, als der aus den 15 WaSiM Simulationsläufen resultierende (A15-A1). Bei einer Berücksichtigung von mehr als 15 WaSiM Parametersätzen wäre es durchaus denkbar, dass sich die Anteile angleichen oder sogar umdrehen. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes konnte dies allerdings nicht geprüft werden. Auffällig ist, dass die durch die An-

zahl an Realisierungen des regionalen Klimamodells hervorgerufene Unsicherheit (A1) bis zum Ende des Jahrhunderts abnimmt, während die durch die Anzahl an WaSiM Simulationsläufen resultierende Unsicherheit zunimmt.

Tabelle 14: Gesamte absolute und prozentuale Unsicherheiten durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells WETTREG2010 (zehn Realisierungen für C20 und pro Emissionsszenario – A1B, B1, A2) und durch die Anzahl der Wasserhaushaltsmodellierungen (15 Parametersätze) für den Abfluss (A15) und die Verdunstung (V15). Zusätzlich sind die absoluten und prozentualen Anteile der Unsicherheiten nur durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells für einen Referenzparametersatz (A1 und V1) und die absoluten und relativen Anteile (Parameterunsicherheiten) resultierend aus der Anzahl von 15 WaSiM Parametersätzen (A15-A1 und V15-V1) an der gesamten Unsicherheit (A15 bzw. V15) angegeben.

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – WETTREG 2010									
	1961 - 1990				1991 - 2020			2021 - 2050			2071 - 2100		
	Obs	*	**	C20	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
A15 (mm)	-	11	12	114	113	100	100	98	49	93	88	57	72
A15 (%)	-	2%	3%	24%	24%	22%	22%	27%	11%	24%	36%	20%	30%
A1 (mm)	-	-	-	76	85	78	77	64	27	71	44	31	44
A1 (%)	-	-	-	67%	75%	78%	77%	65%	55%	76%	50%	54%	61%
A15-A1	-	11	12	38	28	22	23	34	22	22	44	26	28
A15-A1 (%)	-	100%	100%	33%	25%	22%	23%	35%	45%	24%	50%	46%	39%
V15 (mm)	-	7	7	34	33	30	27	39	28	32	55	31	33
V15 (%)	-	1%	1%	6%	6%	5%	5%	7%	5%	5%	9%	5%	5%
V1 (mm)	-	-	-	11	12	13	7	12	10	14	21	12	12
V1 (%)	-	-	-	32%	36%	43%	26%	31%	36%	44%	38%	39%	36%
V15-V1	-	7	7	23	21	17	20	27	18	18	34	19	21
V15-V1 (%)	-	100%	100%	68%	64%	57%	74%	69%	64%	56%	62%	61%	64%

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Bei der Verdunstung ist die gesamte Bandbreite (V15) insgesamt absolut und prozentual wesentlich geringer als die des Abflusses. Im Gegensatz zum Abfluss ist die aus der Anzahl an Realisierungen des regionalen Klimamodells resultierende Unsicherheit (V1) geringer, als die aus der Anzahl an WaSiM Simulationsläufen resultierende Unsicherheit (V15-V1). Die Anteile bleiben über die Zeitscheiben hinweg in etwa konstant.

CLM

Die möglichen langjährigen Entwicklungen von ausgewählten Wasserhaushaltsgrößen in den vier REGKLAM Zeitscheiben auf Basis von Jahreswerten wurden analog zu denen aus Simulationen mit WETTREG2010 für Simulationen mit Klimadaten des regionalen Klimamodells CLM untersucht. Abbildung 83 zeigt die mögliche Entwicklung von Jahreswerten der korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Anzahl an Schneetagen (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im Untersuchungsgebiet. Für die Simulation wurden jeweils immer 15 Parametersätze für das Wasserhaushaltsmodell WaSiM und zwei Kontrollläufe beziehungsweise ab 2001 zwei Realisierungen pro Emissionsszenario (A1B und B1) des regionalen dynamischen Klimamodells CLM verwendet.

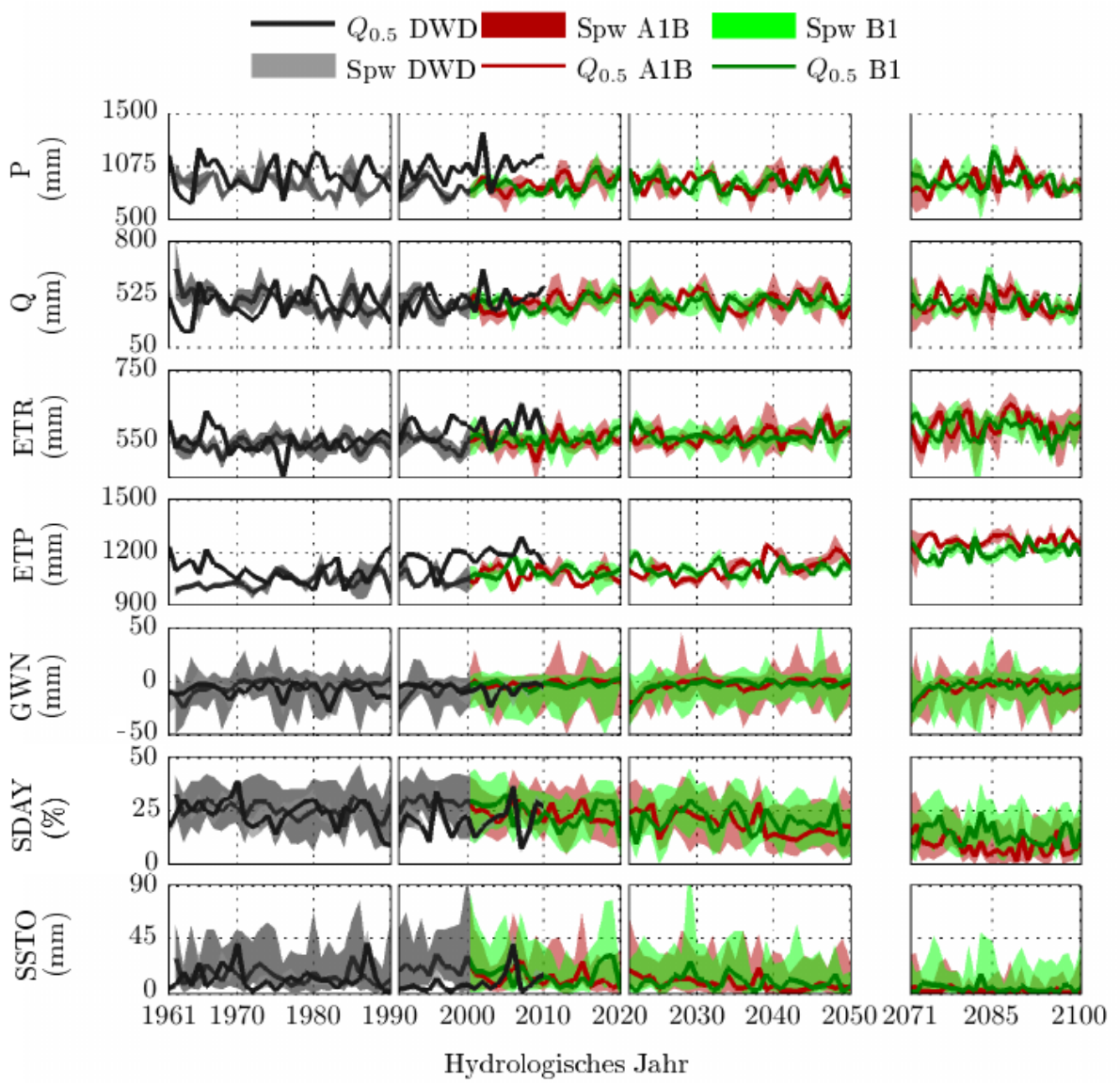


Abbildung 83: Entwicklung von Jahreswerten der korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Schneebedeckung (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im Untersuchungsgebiet. Angegeben sind Mediane ($Q_{0.5}$) und Spannweiten (Spw). Für den Zeitraum 1961-2010 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen mit maskiertem DWD Beobachtungsdatensatz (schwarz und hellgrau), für den Zeitraum 1961-2000 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und mit zwei Kontrollläufen von CLM (dunkel- und mittelgrau). Ab 2001 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen von CLM.

Die zwei Kontrollläufe bilden den beobachteten Niederschlag in der Referenzperiode von 1961 bis 1990 sowohl im Mittel, als auch in der jährlichen Schwankungsbreite relativ gut ab (Abbildung 83). In der zweiten Zeitscheibe wird der beobachtete Niederschlag im Zeitraum von 1991 bis 2010 durch die Kontrollläufe und Realisierungen ab 2001 leicht unterschätzt. Der Niederschlag bleibt in den Projektionen über die Zeitscheiben hinweg im Vergleich mit den Kontrollläufen in etwa unverändert. Die, durch die Anzahl an Realisierungen und Simulationsläufen hervorgerufene absolute Spannweite ist im Vergleich zu WETTREG2010 aufgrund der geringeren Anzahl an Simulationen wesentlich kleiner (Tabelle 15 und Tabelle 16).

Der Verlauf des Abflusses zeigt ein ähnliches Verhalten wie der des Niederschlages. Die beobachteten und die durch DWD Beobachtungsdaten simulierten Abflussdaten werden durch die Wasserhaushaltssimulation mit den Klimadaten von CLM sowohl im Mittel, als auch in der Bandbreite gut wiedergegeben. Der Abfluss nimmt im Mittel in der letzten Zeitscheibe 2071 bis 2100 bei den Emissionsszenarien A1B und B1 nur geringfügig um ca. 7% im Vergleich zum Mittel aus den Kontrollläufen in der Referenzperiode ab (Tabelle 16). Dieser Rückgang ist anders als bei WETTREG2010 nicht mit der Entwicklung der Niederschlagssumme zu begründen, da diese im Mittel in den letzten beiden Zeitscheiben sogar leicht zunimmt.

Die kleine Abnahme des mittleren Abflusses ist ausschließlich mit der Zunahme der realen Evapotranspiration zu erklären. Die Zunahme der ETR infolge höherer Temperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts beträgt im Mittel über beide Emissionsszenarien in der letzten Zeitscheibe ca. 9% (Tabelle 16).

Die ETP nimmt im Vergleich zur ETR bis 2100 kontinuierlich zu. Wie bereits bei den Ergebnissen für WETTREG2010 erkennbar, ist auch hier die Bandbreite der ETP im Vergleich zu den drei zuvor betrachteten Größen geringer.

Aufgrund der im Wasserhaushaltsmodell vorgenommenen vereinfachten Annahme eines erweiterten Bodenprofils, einer Simulation ohne Grundwassermodell und des in der Realität vorhandenen Kluftgrundwasserleiters wird auf eine Interpretation der Entwicklung der Grundwasserneubildung an dieser Stelle verzichtet.

Die Schneebedeckung und der Schneespeicher gehen mit einer durch die Anzahl an Realisierungen und WaSiM Modellläufen hervorgerufenen großen Bandbreite deutlich bis zum Ende des Jahrhunderts zurück.

Tabelle 17 und Tabelle 18 zeigen vergleichsweise die absoluten Ergebnisse, absolute und prozentuale Differenzen für die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Abfluss und Verdunstung für die Wasserhaushaltssimulation mit einem Referenzparametersatz (Abbildung 55, Kapitel 5.4) anstatt der 15 WaSiM Parametersätze.

Wie schon bei den Ergebnissen für WETTREG2010 zeigt der Vergleich zu der Simulation mit 15 Parametersätzen, dass die Mediane für alle Zeitscheiben und Emissionsszenarien in etwa gleich sind. Die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen in den Zeitscheiben und für die Emissionsszenarien bis 2100 ist bei der Simulation mit einem Parametersatz analog zu der mit 15 Parametersätzen nahezu identisch. Dadurch, dass bei der Rechnung mit einem WaSiM Parametersatz lediglich die Bandbreite der zwei Realisierungen von CLM pro Emissionsszenario (bzw. zwei Kontrollläufe in der Zeitscheibe 1961-1990) berücksichtigt wird, ist die Spannweite zwischen den in den Zeitscheiben simulierten mittleren minimalen und maximalen Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Abfluss und Verdunstung geringer, als bei der Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen.

Bei der Simulation mit 15 Parametersätzen addiert sich die Bandbreite (Unsicherheit) aus diesen unterschiedlichen Parametersätzen und die Anzahl an Simulationen steigt von zwei auf 30 pro Zeitscheibe und Emissionsszenario. Die infolge der Anzahl an Realisierungen des regionalen Klimamodells hervorgerufenen und die aufgrund der Anzahl an Parametern resultierenden Unsicherheiten können mit dem Vergleich der Spannweiten der Simulationsergebnisse unter Verwendung von 15 WaSiM Parametersätzen und einem WaSiM Parametersatz quantifiziert werden. Die Ergebnisse

dazu sind Tabelle 19 zu entnehmen. Die gesamte Unsicherheit ergibt sich für den Abfluss und die Verdunstung (A15 bzw. V15) jeweils infolge der Anzahl an Realisierungen/Kontrollläufen und der Anzahl an WaSiM Simulationen zusammen. Diese gesamte Unsicherheit beträgt für den Abfluss im Mittel über alle Zeitscheiben ca. 14% vom Median. Die Schwankung beträgt demnach im Mittel ±7%. Dabei ist der, aus den Realisierungen des regionalen Klimamodells hervorgerufene Anteil der Unsicherheit (A1) im Mittel über alle Zeitscheiben und Emissionsszenarien mit ca. 44% etwas geringer, als der aus den 15 WaSiM Simulationsläufen resultierende (A15-A1). Dieser Unterschied zu den Ergebnissen für WETTREG2010 liegt an der geringeren Anzahl an Realisierungen von CLM als bei WETTREG2010. Die Anzahl der WaSiM Parametersätze ist mit 15 Stück bei beiden identisch. Eine zu- oder abnehmende Tendenz von einer der Unsicherheiten ist im Gegensatz zu den Ergebnissen für WETTREG2010 nicht zu erkennen.

Die gesamte Bandbreite der in Tabelle 19 angegebenen Verdunstung (V15) ist insgesamt absolut und prozentual deutlich geringer als die Bandbreite des Abflusses. Die aus der Anzahl an Realisierungen des regionalen Klimamodells resultierende Unsicherheit (V1) ist hier deutlich niedriger, als die aus der Anzahl an WaSiM Simulationsläufen resultierende Unsicherheit (V15-V1). Die Anteile variieren über die Zeitscheiben hinweg.

Tabelle 15: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben inklusive der Parameterunsicherheit aus der Wasserhaushaltsmodellierung (Verwendung von 15 Parametersätzen) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells CLM für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C).

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – CLM						
	1961 - 1990				1991 - 2020		2021 - 2050		2071 - 2100	
	Obs.	*	**	C20	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1
min				983	985	954	1006	978	1016	1016
N (mm)	**994**	**997**	**994**	**1010**	**987**	**975**	**1025**	**1013**	**1024**	**1030**
max				1036	989	996	1045	1048	1031	1043
min		446	432	435	439	413	445	412	418	425
A (mm)	**492**	**453**	**439**	**486**	**461**	**444**	**474**	**465**	**452**	**458**
max		457	444	534	478	472	495	514	478	487
min		540	549	530	541	536	548	548	573	570
V (mm)	**502**	**542**	**551**	**541**	**550**	**553**	**567**	**561**	**590**	**586**
max		547	556	560	562	574	588	580	614	604
min		-1	0	-31	-30	-30	-22	-25	-26	-22
ΔS(mm)	**0**	**3**	**4**	**-20**	**-23**	**-23**	**-13**	**-16**	**-17**	**-13**
max		5	6	-8	-15	-16	-6	-4	-12	-7

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Tabelle 16: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zwei Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells CLM in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 15 (15 WaSiM Parametersätze).

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – CLM						
	1961 - 1990				1991 - 2020		2021 - 2050		2071 - 2100	
	Obs.	*	**	**C20**	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1
ΔN (mm)	-16	-13	-16	**1010**	-23	-35	+15	+3	+14	+20
	-2%	-1%	-2%	**(100%)**	-2%	-3%	+1%	±0%	+1%	+2%
ΔA (mm)	+6	-33	-47	**486**	-25	-42	-12	-21	-34	-28
	+1%	-7%	-10%	**(100%)**	-5%	-9%	-2%	-4%	-7%	-6%
ΔV (mm)	-39	+1	+10	**541**	+9	+12	+26	+20	+49	+45
	-7%	±0%	+2%	**(100%)**	+2%	+2%	+5%	+4%	+9%	+8%

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Tabelle 17: Vergleich des Medianes (fett) und der Spannweite der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (ΔS) für die vier REGKLAM-Zeitscheiben, für das gesamte Untersuchungsgebiet (Modellgebiete A, B und C) für den Referenzparametersatz (ohne Parameterunsicherheiten aus der Wasserhaushaltsmodellierung) mit den Klimainputdaten des regionalen Klimamodells CLM.

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – CLM						
	1961 - 1990				1991 - 2020		2021 - 2050		2071 - 2100	
	Obs.	*	**	C20	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1
min				983	985	954	1006	978	1016	1016
N (mm)	**994**	**997**	**994**	**1010**	**987**	**975**	**1025**	**1013**	**1024**	**1030**
max				1036	989	996	1045	1048	1031	1043
min				446	450	425	457	423	430	437
A (mm)	**492**	**451**	**437**	**476**	**453**	**438**	**466**	**459**	**441**	**450**
max				507	456	451	475	495	452	464
min				541	553	548	561	562	591	587
V (mm)	**502**	**544**	**553**	**545**	**553**	**556**	**570**	**565**	**597**	**590**
max				550	553	563	578	569	602	593
min				-13	-20	-19	-13	-16	-16	-13
ΔS(mm)	**0**	**2**	**4**	**-12**	**-19**	**-19**	**-10**	**-11**	**-14**	**-10**
max				-11	-17	-18	-8	-6	-12	-8

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Tabelle 18: Absolute und relative Differenzen (Δ) der Mediane der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A) und Verdunstung (V) in Bezug auf die Medianwerte der zwei Kontrollläufe (C20) des regionalen Klimamodells CLM in der Zeitscheibe 1961-1990 auf Basis von Tabelle 17 (1 WaSiM Parametersatz).

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – CLM						
	1961 - 1990				1991 - 2020		2021 - 2050		2071 - 2100	
	Obs.	*	**	**C20**	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1
ΔN (mm)	-16	-13	-16	**1010**	-23	-35	+15	+3	+14	+20
	-2%	-1%	-2%	**(100%)**	-2%	-3%	+1%	±0%	+1%	+2%
ΔA (mm)	+16	-25	-39	**476**	-23	-38	-10	-17	-35	-26
	+3%	-5%	-8%	**(100%)**	-5%	-8%	-2%	-4%	-7%	-5%
ΔV (mm)	-43	-1	+8	**545**	+8	+11	+25	+20	+52	+45
	-8%	±0%	+1%	**(100%)**	+1%	+2%	+5%	+4%	+10%	+8%

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

Tabelle 19: Gesamte absolute und prozentuale Unsicherheiten durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells CLM (zwei Realisierungen für C20 und zwei pro Emissionsszenario – A1B, B1) und durch die Anzahl der Wasserhaushaltsmodellierungen (15 Parametersätze) für den Abfluss (A15) und die Verdunstung (V15). Zusätzlich sind die absoluten und prozentualen Anteile der Unsicherheiten nur durch die Anzahl der Realisierungen des regionalen Klimamodells für einen Referenzparametersatz (A1 und V1) und die absoluten und relativen Anteile (Parameterunsicherheiten) resultierend aus der Anzahl von 15 WaSiM Parametersätzen (A15-A1 und V15-V1) an der gesamten Unsicherheit (A15 bzw. V15) angegeben.

WHH Größen	DWD			ECHAM5/MPI-OM T63 (Lauf 1) – CLM						
	1961 - 1990				1991 - 2020		2021 - 2050		2071 - 2100	
	Obs.	*	**	C20	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1
A15 (mm)	-	11	12	99	39	59	50	102	60	62
A15 (%)	-	2%	3%	20%	8%	13%	11%	22%	13%	14%
A1 (mm)	-	-	-	61	6	26	18	72	22	27
A1 (%)	-	-	-	62%	15%	44%	36%	71%	37%	44%
A15-A1 (mm)	-	11	12	38	33	33	32	30	38	35
A15-A1 (%)	-	100%	100%	38%	85%	56%	64%	29%	63%	56%
V15 (mm)	-	7	7	30	21	38	40	32	41	34
V15 (%)	-	1%	1%	6%	4%	7%	7%	6%	7%	6%
V1 (mm)	-	-	-	9	0	15	17	7	11	6
V1 (%)	-	-	-	30%	0%	39%	43%	22%	27%	18%
V15-V1 (mm)	-	7	7	21	21	23	23	25	30	28
V15-V1 (%)	-	100%	100%	70%	100%	61%	58%	78%	73%	82%

* unmaskierter DWD Datensatz, ** maskierter DWD Datensatz (vgl. Kapitel 4.4.4)

WETTREG2010 vs. CLM

Abbildung 84 zeigt den Vergleich zwischen den Ergebnissen aus den Wasserhaushaltssimulationen für beide regionale Klimamodelle.

Dabei werden die zuvor bereits erwähnten Unterschiede deutlich. Es ist die unterschiedliche Entwicklung des Niederschlages zu erkennen. Bei WETTREG2010 erfolgt eine mittlere Abnahme über alle drei Emissionsszenarien im Vergleich der letzten Zeitscheibe mit der ersten um ca. 16%, wohingegen der Niederschlag bei CLM im Mittel mit ca. leicht 2% zunimmt.

Der Abfluss nimmt bei CLM infolge der zunehmenden realen Evapotranspiration bis zum Ende des Jahrhunderts leicht ab. Bei WETTREG2010 erfolgt ein vergleichsweise drastischer Rückgang des Abflusses um im Mittel ca. 46% infolge der verringerten Jahresniederschläge und zunehmender realer Evapotranspiration.

Die potentielle Verdunstung nimmt für beide regionale Klimamodelle kontinuierlich zu. Dabei wird mit den Klimadaten von WETTREG2010 für alle Emissionsszenarien in der letzten Zeitscheibe ein größerer Wert als mit den Klimadaten von CLM erreicht.

Auf die Auswertung bezüglich der Grundwasserneubildung soll auch an dieser Stelle aufgrund der erwähnten modellhaften Vereinfachungen verzichtet werden.

Die Schneebedeckung und der Schneespeicher nehmen bis 2100 kontinuierlich ab. Der Rückgang fällt dabei bei WETTREG2010 deutlich größer als bei CLM aus.

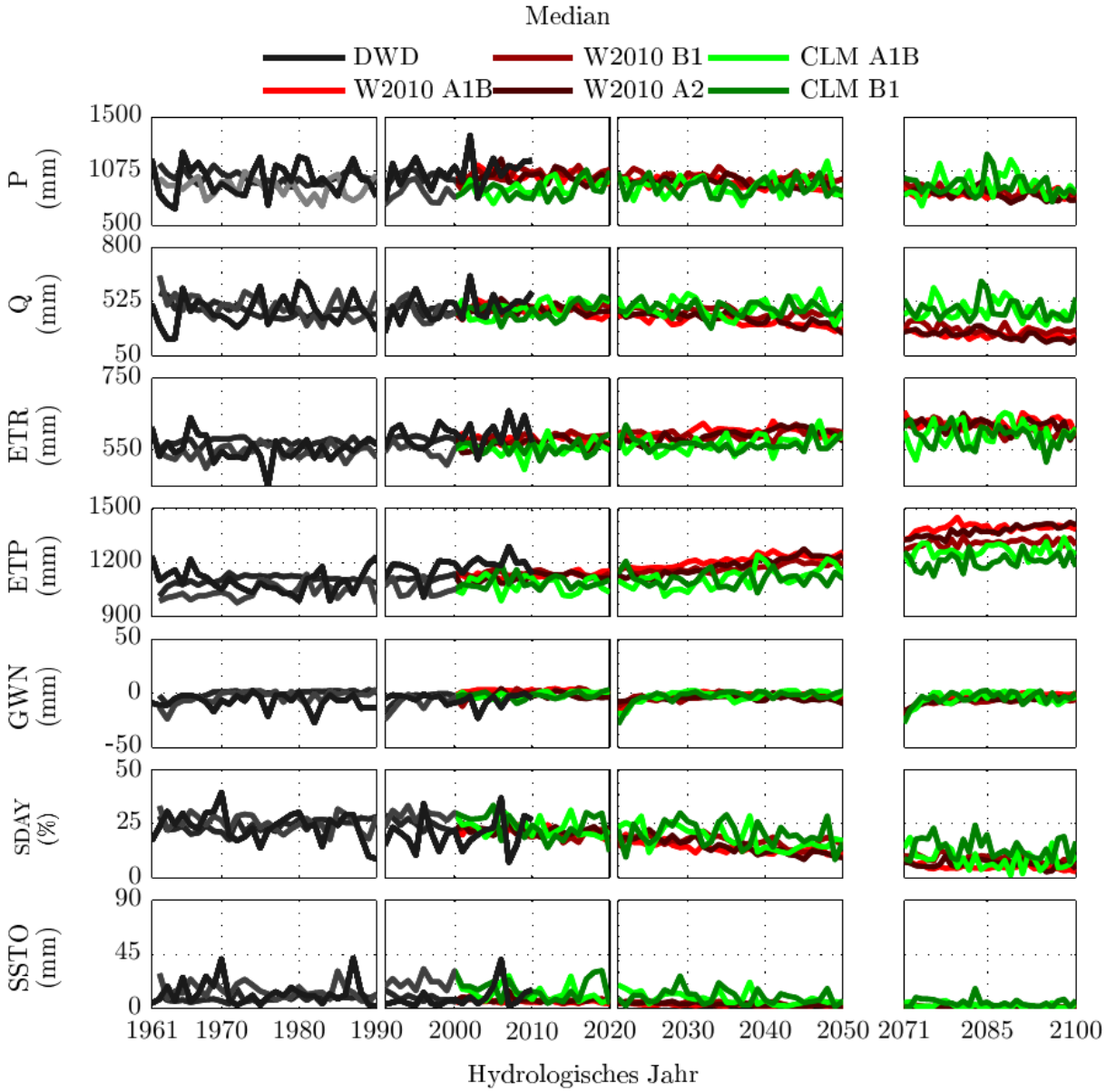


Abbildung 84: Vergleich der Entwicklung von Jahreswerten (Mediane) der korrigierten Niederschlagssumme (P), der Abflusssumme (Q), der Summe der realen und potentiellen Evapotranspiration (ETR und ETP), der Grundwasserneubildung (GWN), der Schneebedeckung (SDAY) und des Schneespeichers (SSTO) im Untersuchungsgebiet. Für den Zeitraum 1961-2010 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen mit maskiertem DWD Beobachtungsdatensatz (schwarz), für den Zeitraum 1961-2000 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen für zehn Kontrollläufe von WETTREG2010 (dunkelgrau) und für zwei Kontrollläufe von CLM (hellgrau). Ab 2001 aus Simulation mit 15 WaSiM Parametersätzen und pro Emissionsszenario (A1B, B1 und A2) zehn Realisierungen von WETTREG2010 (Rottöne) und pro Emissionsszenario (A1B und B1) zwei Realisierungen von CLM (Grüntöne).

6. Zusammenfassung

Ziel war es, den Wasserhaushalt im Untersuchungsgebiet, das Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz bis zum Pegel Klingenberg, abzubilden und mögliche Veränderungen des Wasserhaushaltes aufgrund sich ändernder klimatischer Randbedingungen zu quantifizieren. Ein wesentlicher Fokus lag dabei auf der Betrachtung von Unsicherheiten.

Dafür wurde das flächendifferenzierte, deterministische, hydrologische Modell WaSiM-ETH (vgl. Kapitel 4.2) anhand aktuellster Daten der Topographie, Landnutzung und des Bodens für insgesamt drei Modellgebiete (A, B und C) im Untersuchungsgebiet erstellt und parametrisiert (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4). Um das Modell zu kalibrieren, zu validieren und den Wasserhaushalt im rezenten Zeitraum zu ermitteln wurden Klimabeobachtungsdaten aufbereitet. Dafür wurden Stationsdaten des deutschen- und tschechischen Wetterdienstes über eine multiple lineare Regression lückengefüllt und teilweise verlängert (vgl. Kapitel 4.4.2). Die erhaltenen Datensätze wurden mittels eines Krigings auf das Raster des Wasserhaushaltsmodels im Untersuchungsgebiet interpoliert (vgl. Kapitel 4.4.4). Die automatische Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells erfolgte für einen rezenten Zeitraum mittels einer multikriteriellen Optimierung für das Modellgebiet A und C (vgl. Kapitel 4.5). Anhand von drei Zielfunktionen wurden im Modellgebiet A insgesamt 22 und im Modellgebiet C insgesamt 16 Parameter des Boden- und Schneemoduls optimiert. Die Ergebnisse zeigen eine relativ gute Modellanpassung an beobachtete Abflüsse in beiden Modellgebieten im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum (vgl. Kapitel 5.2 und 5.3). Gleichzeitig ergibt sich aus der multikriteriellen Optimierung eine große Anzahl an Pareto-optimalen Lösungen, wobei die Gütekriterien teilweise konträr sind. So gibt es Lösungen mit einer hohen Nash-Sutcliffe-Effizienz und einem hohen Prozentbias und auch Lösungen mit einem niedrigen Prozentbias und niedriger Nash-Sutcliffe-Effizienz. Daraus ergibt sich eine Bandbreite an Simulationsergebnissen für den Wasserhaushalt, welche bezüglich des Abflusses auf jährlicher Basis im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum bis zu 17% und innerjährlich deutlich höhere Werte erreicht hat. Außerdem konnte festgestellt werden, dass trotz Simulation mit mehreren Parametersätzen, beobachtete Abflüsse auf unterschiedlichen Zeitskalen im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum nicht abgebildet werden können. Ursachen dafür sind in unzureichenden Prozessbeschreibungen im Modell, Fehlern in der Modellstruktur, aber auch in den Beobachtungsdaten des Abflusses zu suchen.

Mithilfe des kalibrierten und validieren Wasserhaushaltsmodells wurde dann der Wasserhaushalt für Klimabeobachtungsdaten und Klimadaten der regionalen Klimamodelle WETTREG2010 und CLM simuliert (vgl. Kapitel 4.7). Es konnten mehrere Kontrollläufe und Realisierungen der beiden regionalen Klimamodelle für mehrere unterschiedliche Emissionsszenarien berücksichtigt werden. Um Unsicherheiten der Wasserhaushaltsmodellierung zu quantifizieren wurden die Simulationen zudem mit mehreren aus der Kalibrierung erhaltenen Pareto-optimalen Parametersätzen durchgeführt. Im Ergebnis zeigen sich sowohl im projizierten innerjährlichen Verlauf und der langjährigen Entwicklung der betrachteten Wasserhaushaltsgrößen deutliche Unterschiede zwischen den Simulationen des Wasserhaushaltes mit Klimaprojektionen der beiden regionalen Klimamodelle (vgl. Kapitel 5.5). Der Grund für die Unterschiede liegt in den Klimaprojektionen (vgl. Kapitel 5.1). So nimmt der Niederschlag bei WETTREG2010 im Vergleich der Realisierungen in der Zeitscheibe 2071-2100 mit den Kontrollläufen von 1961-1990 im Mittel um ca. 17% (~170mm) ab, während der Niederschlag bei CLM im Mittel im gleichen Zeitraum in etwa unverändert bleibt. Die in beiden Klimamodellen projizierte mittlere Zunahme der Temperatur im Untersuchungsgebiet um ca. 3°C zwischen 1961-1990 und 2071-2100 bewirkt eine ähnliche Zunahme der potentiellen und realen Verdunstung im Untersuchungsgebiet um ca. 9% (~45mm). Daraus lässt sich ableiten, dass die projizierte starke Abnahme des Abflusses im Untersuchungsgebiet bis Ende des Jahrhunderts, bei Simulation mit WETTREG2010 um bis zu 50% (~215mm), im Vergleich zum Mittel der Kontrollläufe in der Referenzperiode größtenteils der Abnahme des Niederschlages geschuldet ist. Während die vergleichsweise wesentlich geringere Abnahme des Abflusses im Untersuchungsgebiet bei Simulation mit CLM von im Mittel 6% (~30mm) bis 2100 im Vergleich zu den Kontrollläufen 1961-1990 ausschließlich aus der Zunahme der Verdunstung resultiert.

Aufgrund der zu erwartenden und in beiden Klimamodellen projizierten höheren Temperaturen sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass Niederschlag als Schnee fällt bzw. Schnee für längere Zeit im Gebiet gespeichert wird. Damit sinken die Schneeakkumulation und die Verweildauer des Schnees

im Untersuchungsgebiet. Eine im Untersuchungsgebiet über den Winter durchgängige oder gar aufbauende Schneedecke wäre demnach kaum noch zu erwarten. Daraus resultierend und aus der innerjährlichen Betrachtung der Entwicklung des Abflusses ersichtlich, verteilt sich der Abfluss mehr über alle Wintermonate und das Maximum zur Schneeschmelze im Frühjahr, sowie die Wahrscheinlichkeit und Größe winterlicher Hochwässer reduziert sich.

Die Analyse und Quantifizierung der Unsicherheiten in der Wasserhaushaltsmodellierung betreffend ergibt sich ein heterogenes Bild (vgl. Kapitel 5.5.3). Der Anteil der gesamten Unsicherheit am Abfluss aus der Anzahl an Realisierungen der regionalen Klimamodelle und verwendeten WaSiM Parametersätze zusammen beträgt für die zukünftigen Zeitscheiben für beide regionale Klimamodelle zwischen 10% und 30%. Der Anteil an dieser gesamten Unsicherheit, der nur aus den Realisierungen des regionalen Klimamodells resultierenden Unsicherheit beim Abfluss ist bei WETTREG2010 mit 50%-80% deutlich größer als bei CLM (15%-70%). Die Ursache liegt unter anderem in der bei WETTREG2010 höheren Anzahl an Modellrealisierungen (zehn Realisierungen), als bei CLM (zwei Realisierungen). Im Umkehrschluss verhält sich die aus der Anzahl an Simulationen des Wasserhaushaltsmodells resultierende Unsicherheit genau umgekehrt. Generell ist zu sagen, dass die Unsicherheit abhängig ist von der Anzahl der Realisierungen und von der Anzahl der Simulationen.

Einen weitaus größeren Einfluss auf die Unsicherheit der Wasserhaushaltsprojektionen hat die Wahl des regionalen Klimamodells. Betrachtet man die unterschiedlichen Projektionen des Abflusses für WETTREG2010 und CLM, sind die zuvor beleuchteten Unsicherheiten aus Realisierungen eines regionalen Klimamodells und aus der Anzahl an Wasserhaushaltssimulationen wesentlich geringer. Bedenkt man nun, dass es eine Vielzahl an regionalen Klimamodellen gibt, welche nicht in die Untersuchungen eingeflossen sind, ist eine weitere Erhöhung der Unsicherheit zu vermuten. Die gesamte Unsicherheit der Ergebnisse erhöht sich nochmals, wenn man die Unsicherheit der globalen Klimamodelle, der Emissionsszenarien und insbesondere auch die Unsicherheiten der Kopplung von Emissionsszenarien, globalen, regionalen und hydrologischen Modellen berücksichtigt. Somit geben die erzielten Ergebnisse lediglich einen kleinen Ausschnitt der möglichen zukünftigen Entwicklung wieder.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen stellt sich die Frage, inwieweit robuste Anpassungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet gefunden werden können bzw. überhaupt gefunden werden müssen. Von größerer Bedeutung ist es jedoch, die Grundlagenforschung zur Identifikation von systemrelevanten Prozessen, sowohl im Bereich der Klimatologie, als auch im Bereich der Hydrologie voranzubringen. Damit es möglich wird, in der Natur stattfindende Prozesse besser zu verstehen und in Modellen besser abzubilden. Eine zwingende Grundlage dafür ist die kontinuierliche Fortsetzung und Erweiterung bestehender Messkampagnen und Messnetze um Datengrundlagen für die Modellierung in ausreichender Qualität und Quantität zur Verfügung zu haben und die Entwicklung des Klimas und daraus resultierender Folgen im Auge zu behalten.

7. Literatur

AD-HOC AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Schweizerbart, Hannover.

ANDERSON (1973): National Weather Service river forecast system - snow accumulation and ablation model, National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), Tech. Mem., NWS-HYDRO-17, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, MD.

BÁRDOSSY (1997): Introduction to Geostatistics, University of Stuttgart.

BERNHARDT (1995): Osterzgebirge, In: Mannsfeld & Richter (Hrsg.) Naturräume in Sachsen. Forschung zur Deutschen Landeskunde, Selbstverlag Trier, S. 188-192.

BERNHOFER et al. (2009): Das Klima in der REGKLAM-Modellregion Dresden, REGKLAM-Publikationsreihe, Heft 1, RHOMBOS-Verlag, Berlin.

BERNHOFER et al. (2011): Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden, REGKLAM-Publikationsreihe, Heft 2, RHOMBOS-Verlag, Berlin.

BEVEN & KIRKBY (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology, Hydrological Sciences-Bulletin, Volume 24, Issue 1.

BRAUN (1985): Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland, Zürcher Geographische Schriften, ETH Zürich, 21.

BRUTSAERT (1982): Evaporation into the atmosphere. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

CHMIELEWSKI et al. (2008): Weiterentwicklung von WaSiM-ETH und COUPMODEL - Implementierung flexibler Vegetationsperioden (KliWEP Phänologie – Forstmodul), revidierter Abschlussbericht.

DUNG et al. (2011): Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data, Hydrology and Earth System Sciences, 15, 1339-1354.

DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, DVWK-Merkblatt 238.

DYCK (1980): Angewandte Hydrologie – Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen Berlin.

DYCK & PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie, 3. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.

GREEN & AMPT (1911): Studies on Soil Physics: I. The flow of air and water trough soils, Journal of Agricultural Sciences, 4.

GUPTA et al. (1999): Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration, Journal of Hydrologic Engineering, 4, 135-143.

HANSEN et al. (2006): Towards a new evolutionary computation. Advances in estimation of distribution algorithms The CMA Evolution Strategy: A Comparing Review Springer, 75-102.

HEIDENREICH et al. (2012a): REGKLAM GUI, Anwenderhandbuch und Dokumentation der Datensätze, REGKLAM Teilprojekt 2.1, unveröffentlicht, Tharandt.

HEIDENREICH et al. (2012b): Nutzervorgaben für die Verwendung von Klimaprojektionsdaten in REGKLAM, REGKLAM Teilprojekt 2.1, unveröffentlicht, Tharandt.

HOLLWEG (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios, Service Gruppe Anpassung, http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/

IGEL et al. (2007): Covariance Matrix Adaptation for Multi-objective Optimization Massachusetts Institute of Technology, Evolutionary Computation, 15(1), 1-28.

Igel (2008): Heidrich-Meisner, V. & Glasmachers, T. Shark; Journal of Machine Learning Research, 9, 993-996.

JENNING (2010): Eignung dynamischer Pflanzenphänologiemodelle für Wasserhaushaltsberechnungen im Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz unter rezentem und prognostiziertem Klima, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Hydrologie, TU Dresden, Dresden.

JOHNSEN et al. (2005): Multi-objective calibration of the land surface scheme TERRA/LM using LITFASS-2003 data, Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9, 586-596.

JORDAN & WEDER (1995): Hydrogeologie. Grundlagen und Methoden. Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg- Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen- Anhalt, Sachsen, Thüringen, 2. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

KAULFUß (2001): Kulturlandschaftsentwicklung im östlichen Erzgebirge. Glashütte-Altenberg- Schmiedeberg, Dresdner Geographische Beiträge, Sonderheft 3, Dresden.

KAULFUß & KRAMER (2000): Naturlandschaften und Nutzungspotentiale Sachsens, In: Kowalke, H. (Hrsg.): Sachsen, Perthes Länderprofile, Klett-Perthes-Verlag, Gotha.

KOHONEN (2001): Self-organizing maps, Springer Verlag, 30.

KRAUSE et al. (2005): Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, Advances in Geosciences, 5, 89-97.

LEHMANN & PRÄGER (1992): Reliefentwicklung und periglaziale Schuttdecken im oberen Erzgebirge, In: Billwitz, K., K.- D. Jäger & W. Janke (Hrsg.): Jungquartäre Landschaftsräume. Aktuelle Forschungen zwischen Atlantik und Tienschan, Berlin.

LfULG (2010): Klimaprojektionen für REGKLAM - Leitfaden und nutzerorientierter Ergebniskatalog für die Verwendung und Interpretation von Klimaprojektionsdaten, Lehrstuhl für Meteorologie (TU Dresden), Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Referat 55 – Klimaschutz und Klimawandel), Tharandt/Dresden.

MANNSFELD & RICHTER (1995): Naturräume in Sachsen. Forschung zur deutschen Landeskunde, Band 238. Zentralausschuss für deutsche Landeskunde, Selbstverlag Trier.

MONTEITH (1975): Vegetation and the atmosphere, vol. 1: Principles, Academic Press, London.

MÜLLER & WALDECK (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz – Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS), GeoBerichte 19, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Hannover.

NAKICENOVIC & SWART (2000): Special Report on Emissions Scenarios, A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, New York, USA.

NASH & SUTCLIFF (1970): River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10(3), 282-290.

NELDER & MEAD (1965): A simplex method for function minimization, In: Computer Journal 7.

NIEHOFF (2001): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala, Dissertation, Universität Potsdam.

OpenMP (2002): OpenMP Architecture Review Board , OpenMP Application Program Interface, Version 2.0", March 2002.

PESCHKE (1977): Ein zweistufiges Modell der Infiltration von Regen in geschichtete Böden, Acta hydrophysica, 22 (1).

PESCHKE (1987): Soil Moisture and Runoff Components from a Physically Founded Approach, Acta hydrophysica, 31 (3/4).

PÖHLER et al. (2007): KliWEP - Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. Weiterentwicklung von WaSiM-ETH: Implikation dynamischer Vegetationszeiten und Durchführung von Testsimulationen für sächsische Klimaregionen, Abschlussbericht Teil 5.

RICHTER (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Selbstverlag des DWD, Offenbach am Main.

ROECKNER (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: Model description, Report Nr. 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg.

ROECKNER (2006): Climate projections for the 21th Century, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg.

SCHULLA (1997a): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, Diss. ETH Nr.12018, Verlag Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

SCHULLA (1997b): Wasserhaushalts-Simulationsmodell WaSiM-ETH, Anwenderhandbuch, Geographisches Institut ETH Zürich, unveröffentlicht.

SCHULLA (1997c): Anwendung und Erweiterung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH, unveröffentlicht, Zürich.

SCHULLA (1998): Modellbeschreibung WaSiM-ETH, Verlag Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

SCHULLA (2012): Model Description WaSiM (Water balance Simulation Model), unveröffentlicht, Zürich.

SCHWARZE & BEUDERT (2009): Analyse der Hochwassergenese und des Wasserhaushalts eines bewaldeten Einzugsgebietes unter dem Einfluss eines massiven Borkenkäferbefalls, Fachartikel, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53. Jahrgang, Heft 4, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

SHAFII & DE SMEDT (2009): Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a genetic algorithm, Hydrology and Earth System Sciences, 13, 2137-2149.

SHRESTA & RODE (2008): M. Multi-objective calibration and fuzzy preference selection of a distributed hydrological model, Environmental Modelling & Software, 2008, 23, 1384 – 1395.

VAN GENUCHTEN (1976): A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sciences Society of American Journal, Vol. 44(5).

WAGNEBRETH & STEINER (1982): Geologische Streifzüge. Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg, 1. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

WAGENBRETH & STEINER (1985): Geologische Streifzüge. Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg, 2. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

WALTER (1995): Geologie von Mitteleuropa, 6. Auflage, Schweizerbart, Stuttgart.

WALTHER (2004): Kartierung der Landnutzung und des Gewässernetzes im tschechischen Teil des Einzugsgebiets der Wilden Weißeritz innerhalb des EMTAL-Projektes. Unveröffentlichte Diplomkartierung, TU Bergakademie Freiberg.

WEBER (2010): Natur des Ost-Erzgebirges im Überblick (Naturführer Ost-Erzgebirge, Band 2), Grüne Liga Osterzgebirge (Hrsg.), Sandstein Verlag, Dresden.

XU et al. (2011): Assessing the impact of climate variability on catchment water balance and vegetation cover, Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 8, 6291-6329.

8. Anhang

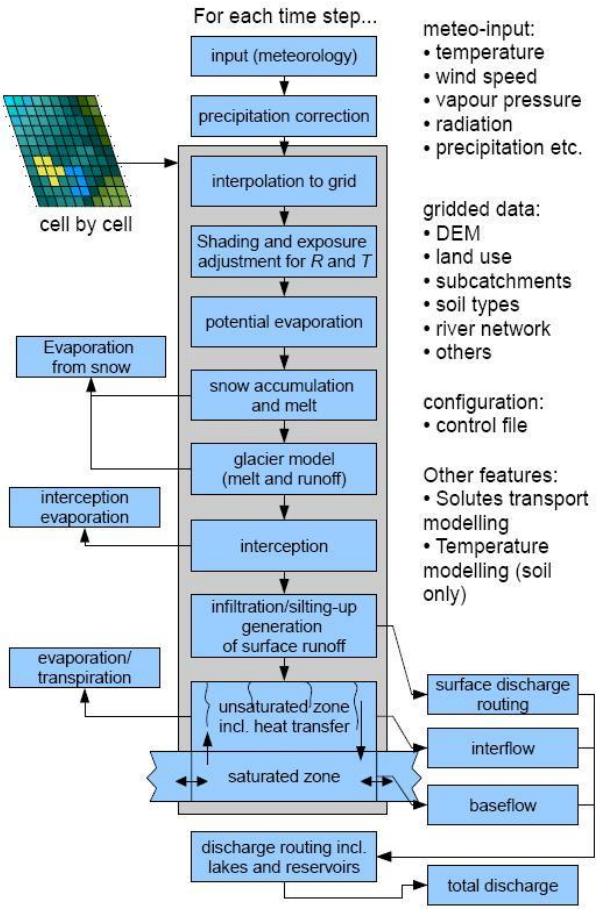


Abbildung A 1: Modellstruktur von WaSiM-ETH (SCHULLA 2012).

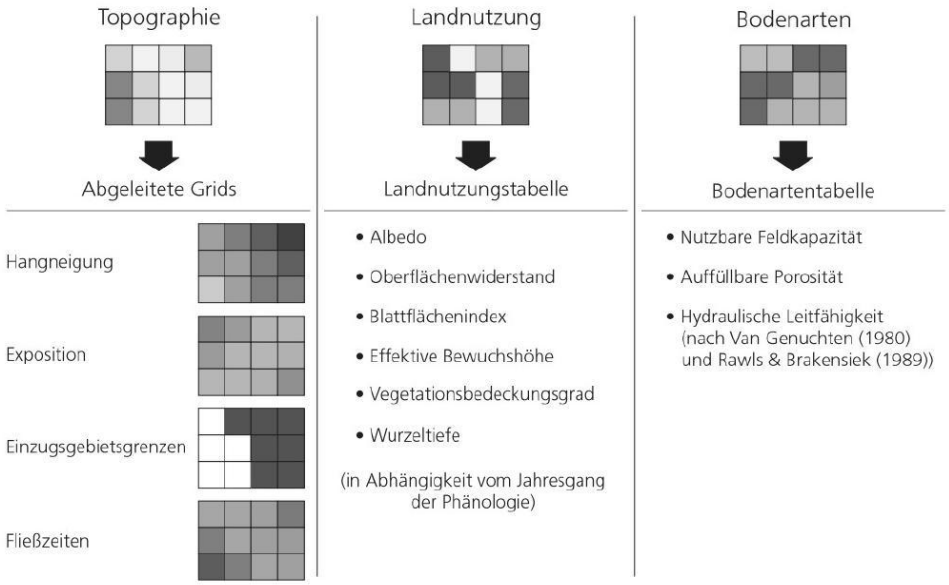


Abbildung A 2: Von WaSiM-ETH benötigte und daraus abgeleitete räumliche Daten (NIEHOFF 2001).

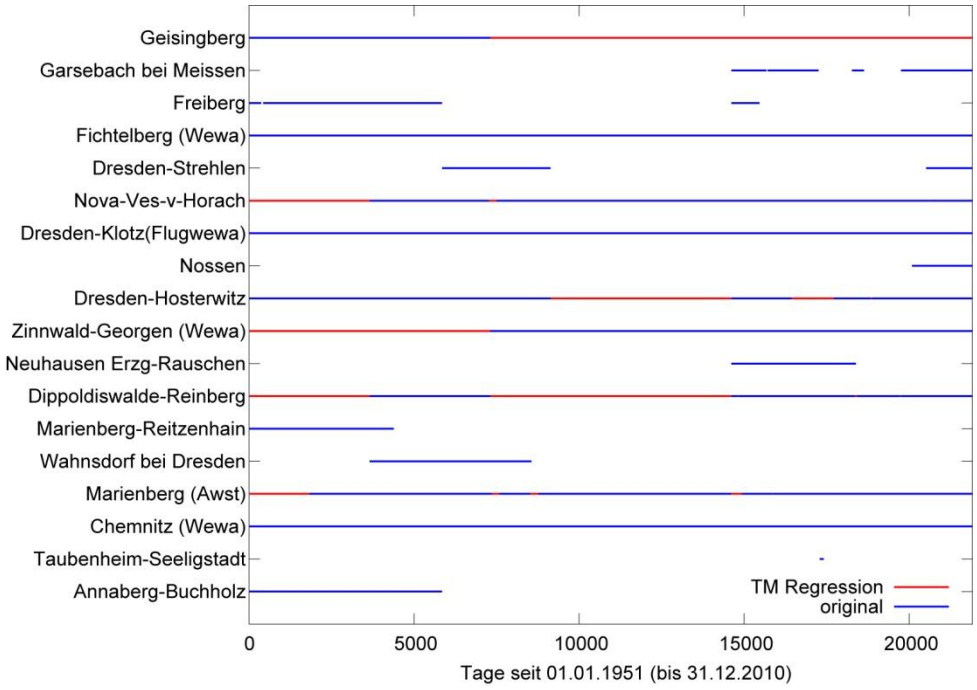


Abbildung A 3: Datenverfügbarkeit der mittleren Tagestemperatur (TM) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression.

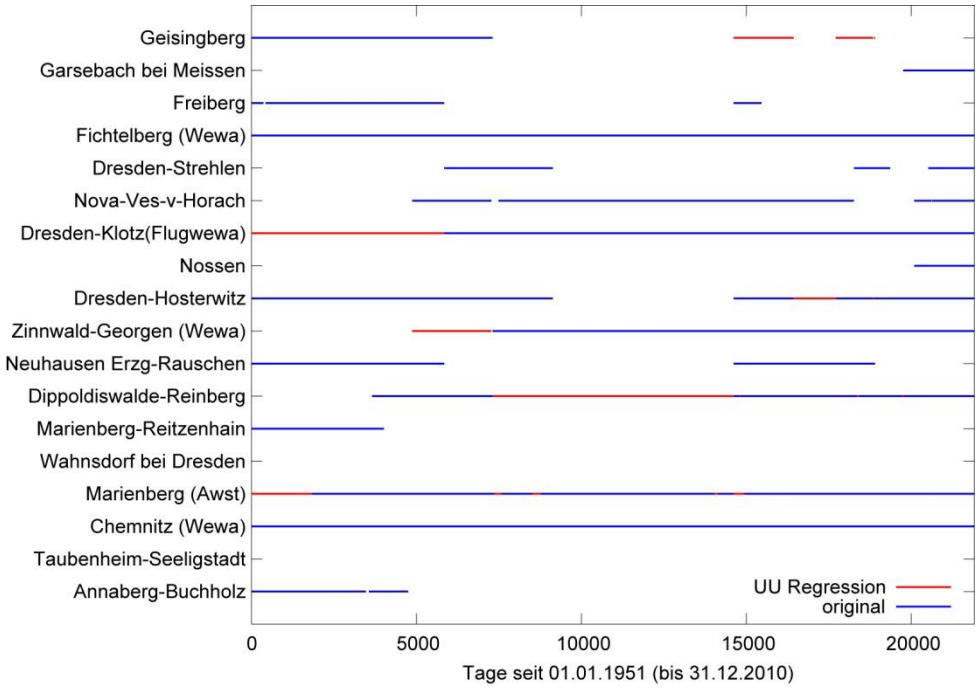


Abbildung A 4: Datenverfügbarkeit der täglichen mittleren relativen Luftfeuchte (UU) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression.

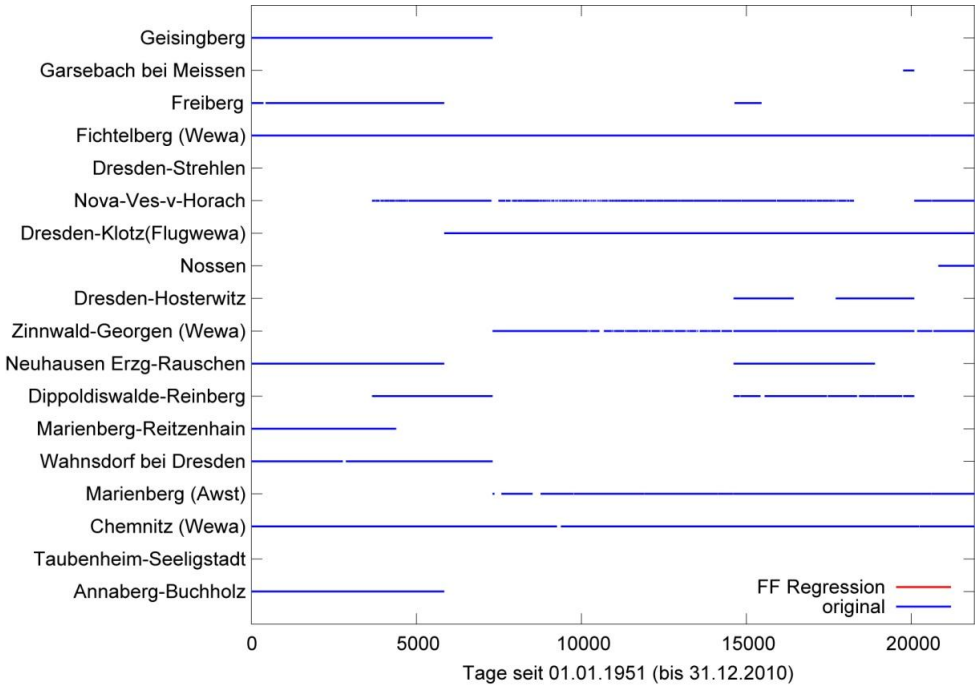


Abbildung A 5: Datenverfügbarkeit der täglichen mittleren Windgeschwindigkeit (FF) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression.

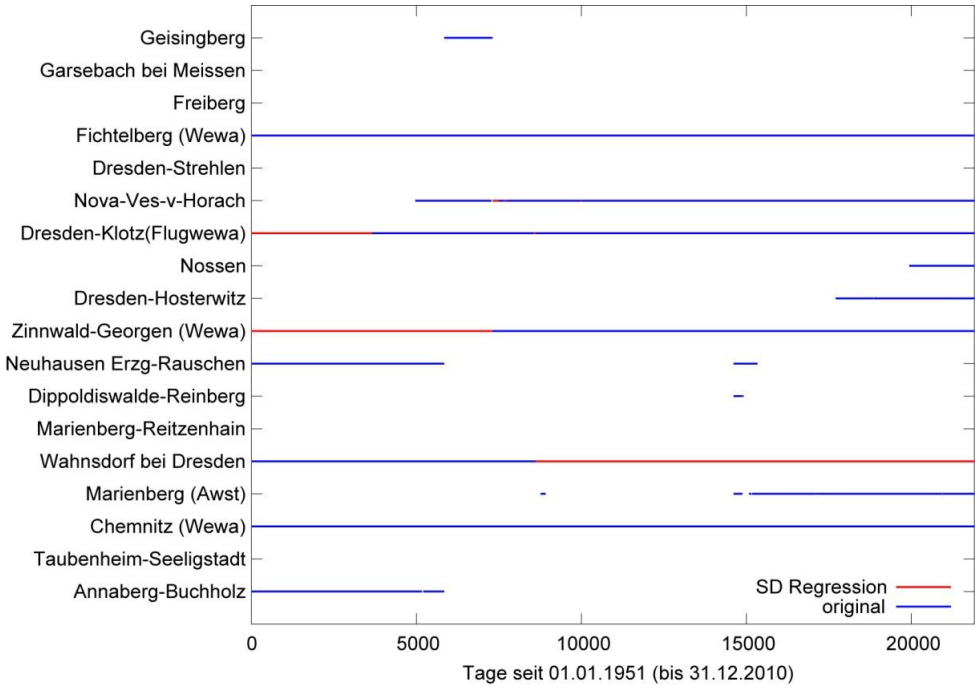


Abbildung A 6: Datenverfügbarkeit der täglichen Sonnenscheindauer (SD) an den für die Regionalisierung ausgewählten 18 Klimastationen vor und nach der multiplen linearen Regression.

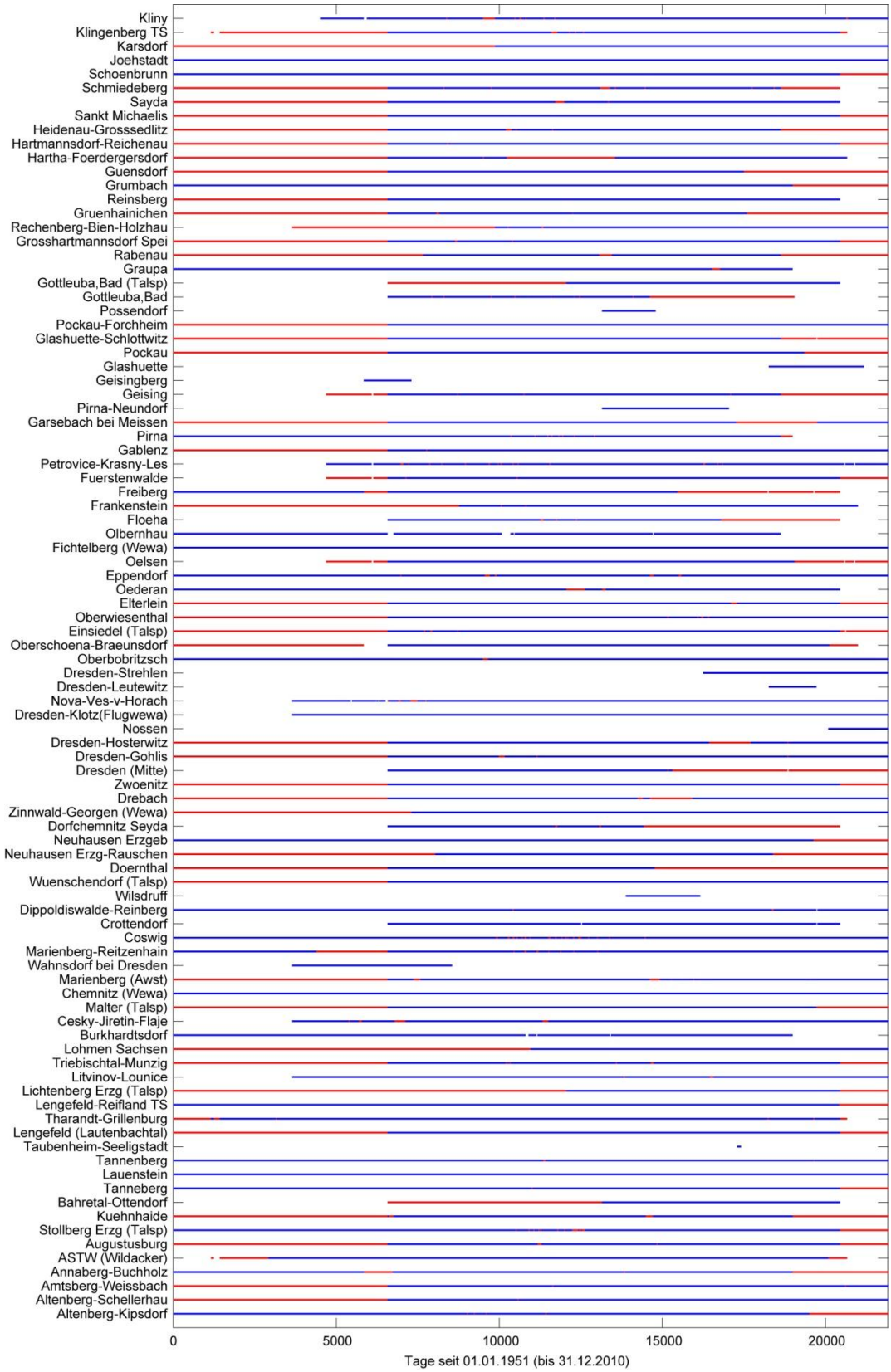


Abbildung A 7: Datenverfügbarkeit des täglichen korrigierten Niederschlages (RRkorr) an den für die Regionalisierung ausgewählten 94 Klima- und Niederschlagsstationen vor und nach der multiplen linearen Regression.

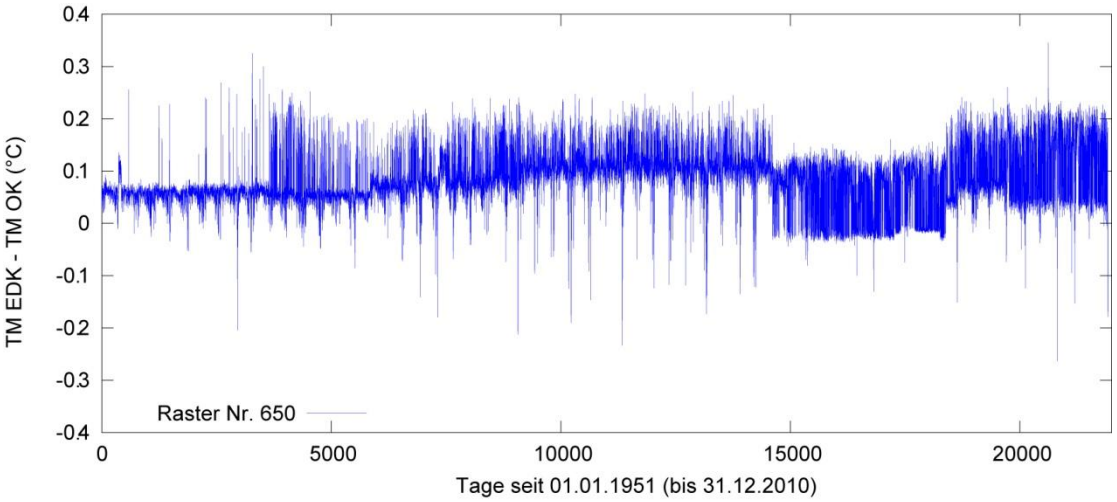


Abbildung A 8: Differenzen der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650.

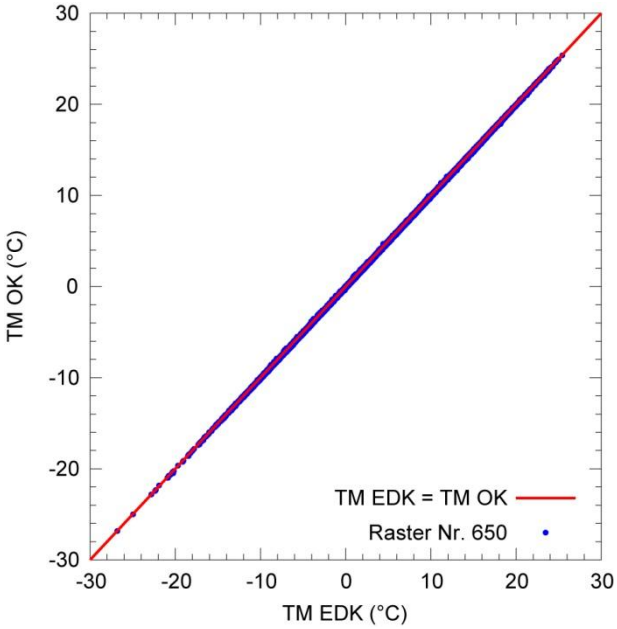


Abbildung A 9: Vergleich der Tagesmitteltemperaturen aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650.

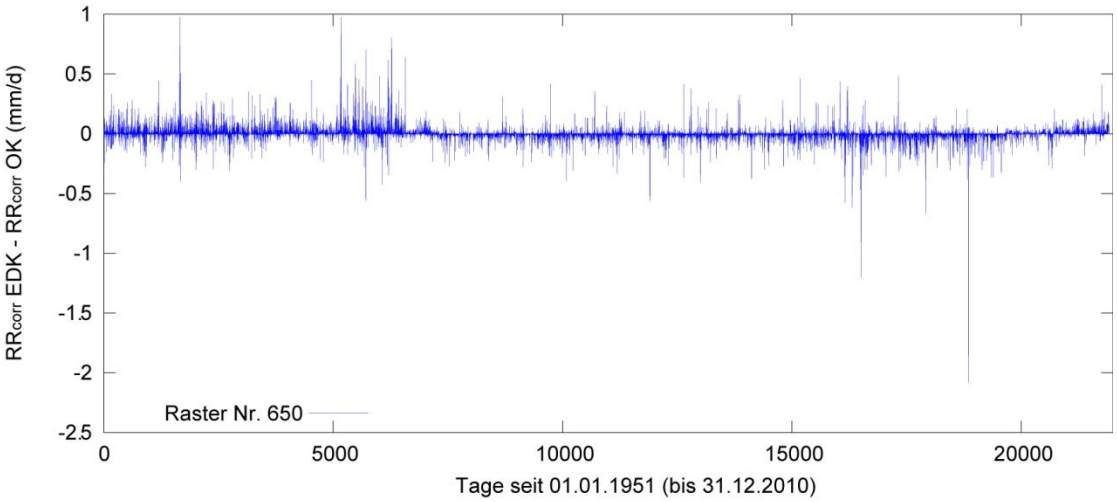


Abbildung A 10: Differenzen der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650.

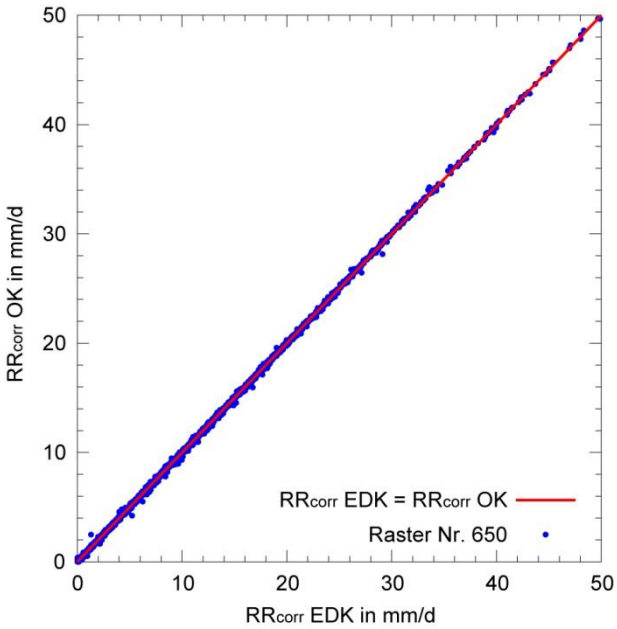


Abbildung A 11: Vergleich der Tagesniederschläge aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650.

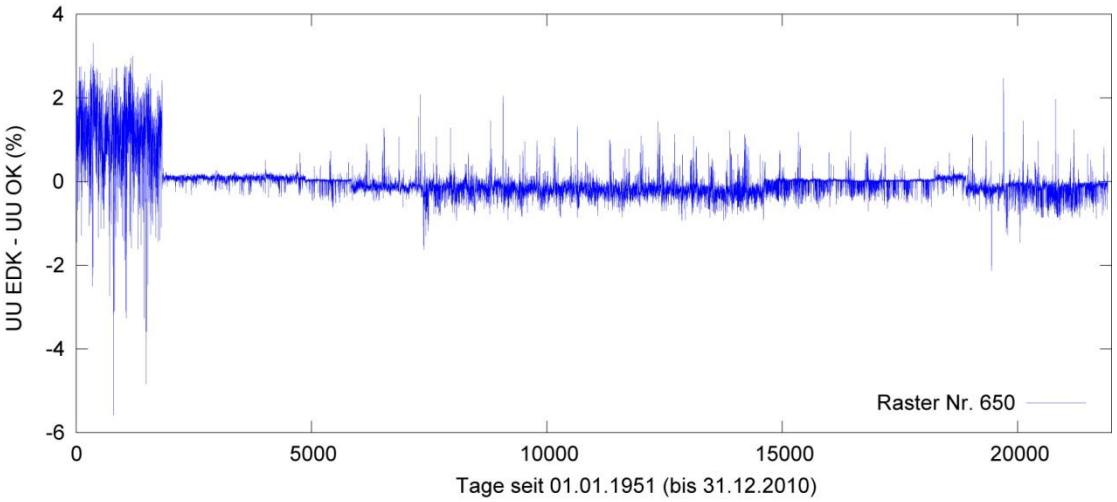


Abbildung A 12: Differenzen der relativen Feuchte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650.

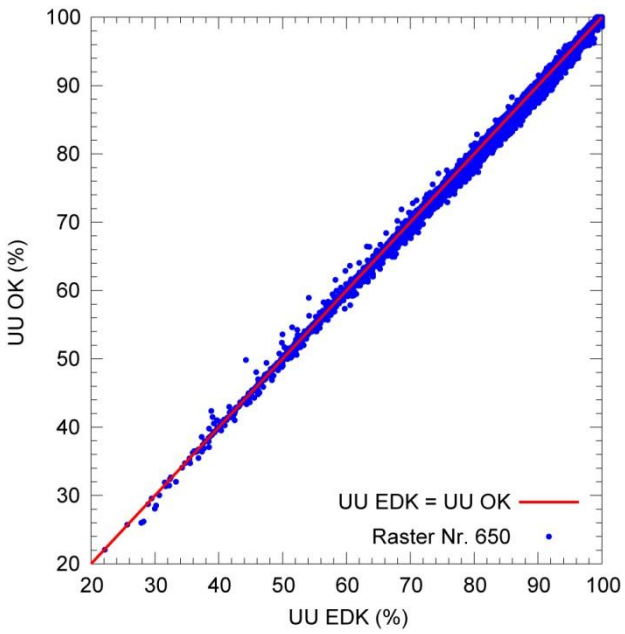


Abbildung A 13: Vergleich der relativen Feuchtewerte aus EDK und OK für alle Tage vom 01.01.1951 bis 31.12.2010 für die Rasterzelle 650.

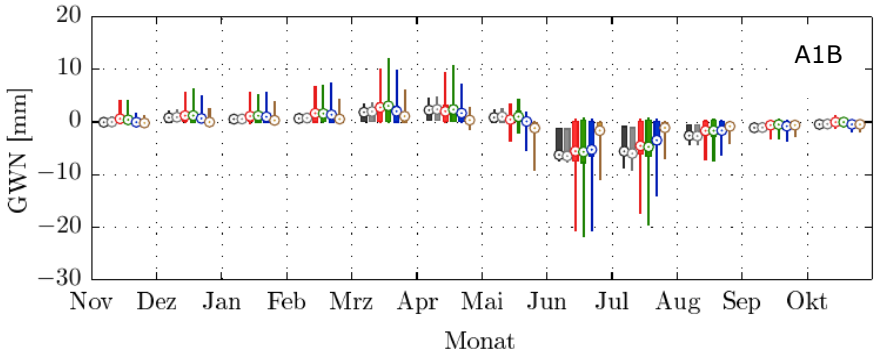


Abbildung A 14: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

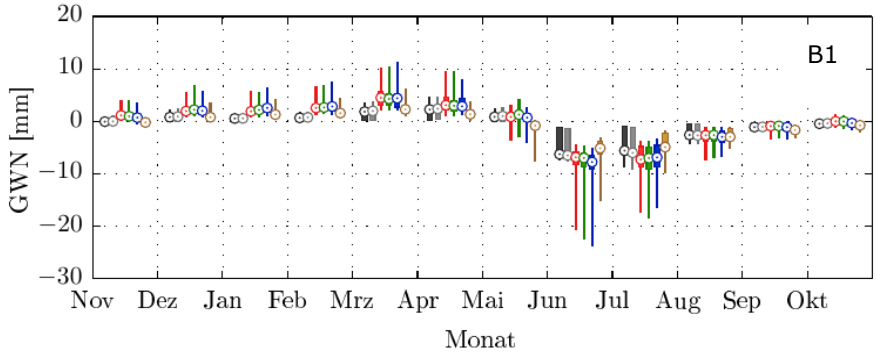


Abbildung A 15: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

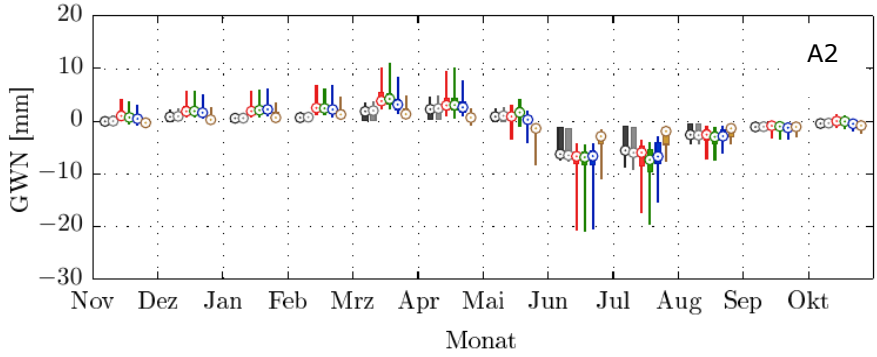


Abbildung A 16: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells WETTREG2010 für das Emissionsszenario A2. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zehn Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zehn Realisierungen von WETTREG2010.

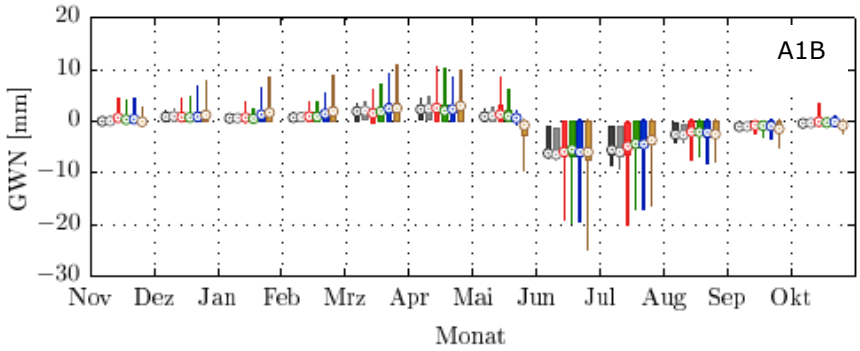


Abbildung A 17: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario A1B. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.

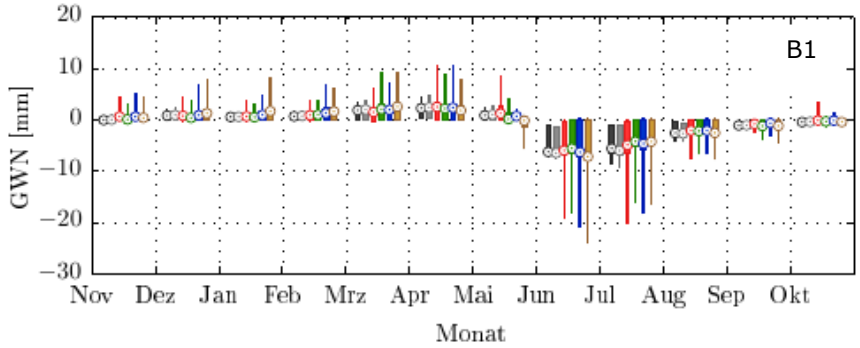


Abbildung A 18: Innerjährlicher Verlauf und Entwicklung der mit 15 WaSiM Parametersätzen simulierten Grundwasserneubildung (GWN) in den vier REGKLAM Zeitscheiben mit Daten des DWD und des regionalen Klimamodells CLM für das Emissionsszenario B1. Zeitscheibe „1961 – 1990“: schwarz (unmaskierter DWD Datensatz), grau (maskierter DWD Datensatz, rot (zwei Kontrollläufe), „1991 – 2020“: grün, „2021 – 2050“: blau und „2071 – 2100“: beige. Die letzten drei Zeitscheiben beinhalten jeweils zwei Realisierungen von CLM.