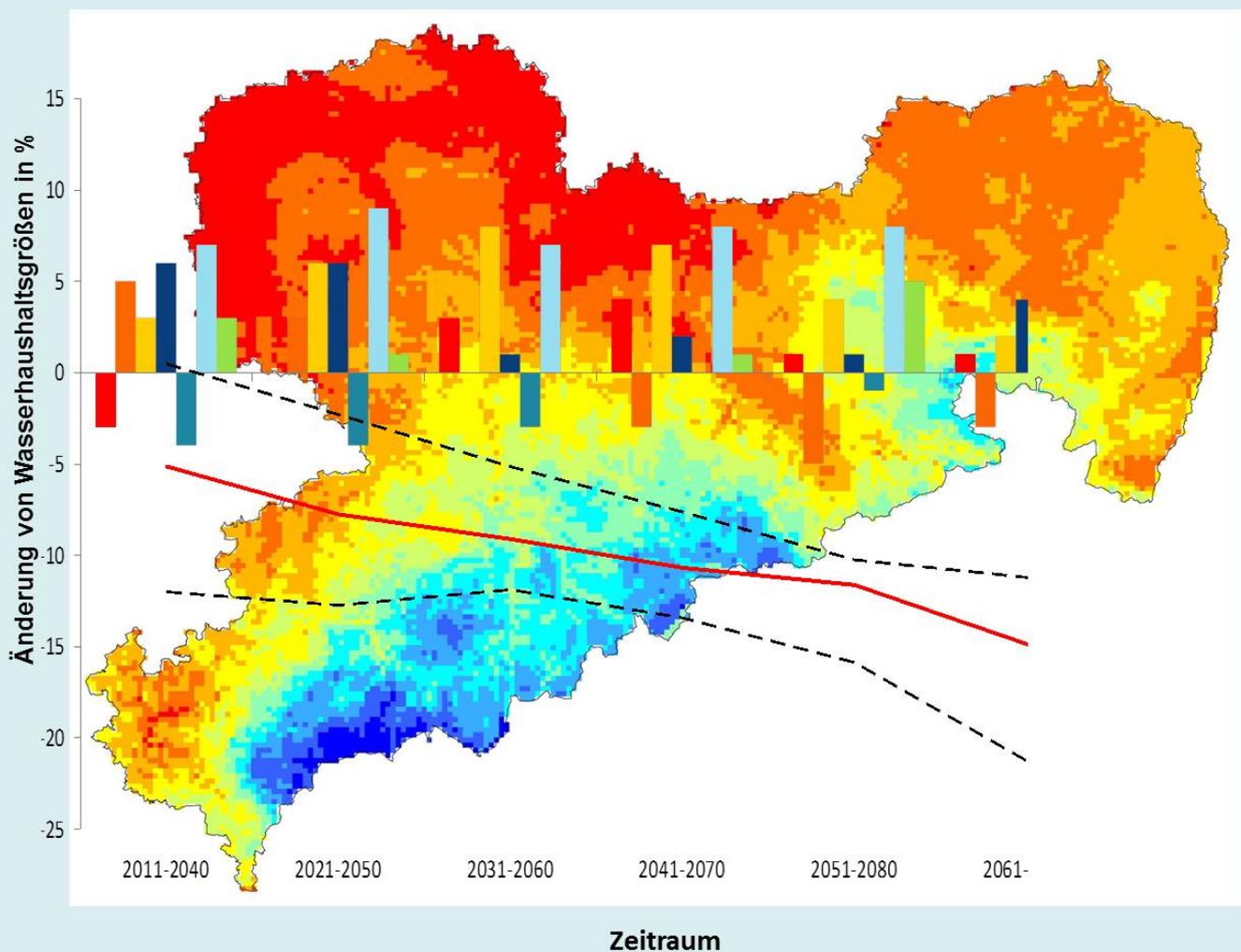


Klimawandel und Wasser- haushalt in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 32/2014



KliWES

Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen

Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist-Zustand und verschiedene Klima- bzw. Landnutzungsszenarien

Projektbearbeitung:

Dr. Robert Schwarze, Corina Hauffe, Agnes Baldy, Dr. Peter Winkler,
Dr. Werner Dröge, Dr. Michael Wagner, Patric Röhm

Projektbegleitung:

Karin Kuhn, Kathleen Lünich, Christina Steinl,
Elisabeth Böhm, Philipp Gründl, Holm Friese

1	Zielstellung und Einleitung.....	14
2	Datengrundlagen	16
2.1	Hydrologische Daten	16
2.1.1	Talsperren	17
2.1.2	Überleitungen, Entnahmen und Einspeisungen	18
2.2	Meteorologische Daten.....	18
2.3	Einzugsgebiete und Fließgewässer.....	19
2.4	Reliefinformationen.....	19
2.5	Boden.....	20
2.6	Grundwasserflurabstand	20
2.7	Drainagen.....	21
2.8	Landnutzung.....	22
2.9	Stadtflächen	22
3	Räumliche Strukturierung	23
3.1	Ausweisung von Modellregionen innerhalb Sachsens	23
3.2	Abgrenzung von Sonderflächen in den Modellregionen	24
3.3	Ausweisung von Modellierungseinheiten innerhalb der Modellregionen	26
4	Wasserhaushaltsmodell	28
4.1	Modellsystem ArcEGMO	28
4.2	Aufbau der Modelle	29
4.2.1	Ebene Modellierungseinheit	29
4.2.2	Fließgewässer und Knotenschema	30
4.2.3	Ebene Hydrotope	30
4.3	Der Begriff Grundwasserneubildung im Projekt KliWES.....	31
5	Kalibrierungs- und Validierungsstrategie	35
5.1	Sensitivitätsanalyse ausgewählter Modellparameter von ArcEGMO	36
5.2	Allgemeines zur Kalibrierung.....	36
5.3	Der Parameterraum.....	37
5.4	Die Zielfunktionen.....	38
5.5	Die Gütemaße	39
5.6	Die Optimierungsroutine.....	40
5.7	Bewertung der Kalibrierung an einem Beispiel.....	40
5.8	Regionalisierung der Modellparameter für Gebiete ohne DIFGA-Analyse	43
5.9	Validierung der Modellergebnisse	44
6	Anwendung des Modells ArcEGMO auf die sächsischen Einzugsgebiete	49
6.1	Sachsenweite Ergebnisse	51
6.1.1	Räumliche Verteilung von Wasserhaushaltsgrößen in Sachsen basierend auf dem Ist-Zustand.....	51
6.1.2	Räumliche Verteilung von Wasserhaushaltsgrößen in Sachsen basierend auf der Realisierung 66.....	54
6.1.3	Konventionen der Landnutzungsszenarien	56
6.2	Ergebnisse von ausgewählten Einzugsgebieten	57
6.2.1	Vergleich des Wasserhaushalts in verschiedenen Einzugsgebieten für den Ist-Zustand.....	59
6.2.2	Vergleich der Klimaszenarien mit dem Ist-Zustand – Klimagrößen im Beobachtungszeitraum 1961–1990.....	62
6.2.3	Vergleich der Klimaszenarien mit dem Ist-Zustand – Wasserhaushaltsgrößen im Beobachtungszeitraum 1961–1990	65
6.2.4	Entwicklung des Wasserhaushalts unter Annahme der Klimaszenarien für den Projektionszeitraum bis 2100	68
6.2.5	Entwicklung des Wasserhaushalts unter Annahme der Landnutzungsszenarien für den Projektionszeitraum bis 2100	79
6.2.6	Analyse von Niedrigwasserkennwerten.....	85
6.3	Diskussion von Unsicherheiten und Fehlern	86

6.4	Anfälligkeit des Wasserhaushalts	90
6.4.1	Differenzenkarten	91
7	IT-Lösung	96
7.1	Umsetzung des IT-Konzepts	96
7.2	Webauftritt Säule B.....	97
8	Zusammenfassung	100
9	Ausblick	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht zum Projektaufbau KliWES – Teil Wasserhaushalt.....	15
Abbildung 2:	Übersicht zu den GIS-Layern für den Aufbau des Wasserhaushaltsmodells mit ArcEGMO	16
Abbildung 3:	Potenzielle Drainageflächen – Darstellung des Anschlussgrades.....	22
Abbildung 4:	Modellregionen für KliWES	24
Abbildung 5:	Übersicht der auszugliedernden Flächen in Sachsen	25
Abbildung 6:	Baumstruktur zur räumlichen Gliederung der Modellierungseinheiten im Flusseinzugsgebiet Spree mit Angaben des Pegelnamens und der verwendeten GWKZ	26
Abbildung 7:	Räumliche Strukturierung des Flusseinzugsgebietes Spree	27
Abbildung 8:	Konzept des Modellsystems ArcEGMO (nach Klöcking 2009).....	28
Abbildung 9:	Knotenschema des Gewässernetzes am Beispiel Zescha.....	30
Abbildung 10:	Wesentliche an der Grundwasserneubildung beteiligte Prozesse (Quelle: HAD 2003)	32
Abbildung 11:	Lage der Locker- und Festgesteinsbereiche in Sachsen als Grundlage zur Anwendung der Grundwasserneubildungskonvention	35
Abbildung 12:	Anpassung der ArcEGMO Ergebnisse an DIFGA-Daten für die Größe RG.....	41
Abbildung 13:	Anpassung der ArcEGMO-Ergebnisse an DIFGA-Daten für die Größe ETR.....	42
Abbildung 14:	Anpassung der ArcEGMO-Ergebnisse an DIFGA-Daten für die Größe QG1.....	42
Abbildung 15:	Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen den mittleren jährlichen Niederschlagssummen P(DIFGA) und P(ArcEGMO) im langjährigen Mittel	44
Abbildung 16:	Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen ETR(DIFGA) und ETR(ArcEGMO) im langjährigen Mittel	45
Abbildung 17:	Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen R(DIFGA) und R(ArcEGMO) im langjährigen Mittel	46
Abbildung 18:	Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen P(Reg A) und P(ArcEGMO) im langjährigen Mittel	47
Abbildung 19:	Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen ETR(Reg A) und ETR(ArcEGMO) im langjährigen Mittel	48
Abbildung 20:	Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen R(Reg A) und R(ArcEGMO) im langjährigen Mittel	48
Abbildung 21:	Schema des Differenzenganglinienanalyseverfahrens DIFGA aus Schwarze & Beudert (2009).....	49
Abbildung 22:	Mittlere Jahressummen (1961–1990, links und 1981–2010, rechts) des Niederschlages P (regionalisierte Beobachtungsdaten) für die sächsischen Teileinzugsgebietsflächen	52
Abbildung 23:	Mittlere Jahressummen (1961–1990, links und 1981–2010, rechts) der realen Verdunstung ETR für die sächsischen Teileinzugsgebietsflächen, Datenbasis: ArcEGMO-Modellrechnung für den Ist-Zustand....	52
Abbildung 24:	Mittlere Jahressummen (1961–1990, links und 1981–2010, rechts) des Gesamtabflusses R für die sächsischen Teileinzugsgebietsflächen, Datenbasis: ArcEGMO-Modellrechnung für den Ist-Zustand....	53
Abbildung 25:	Mittlere Jahressummen (1961–1990, oben links; 1981–2010, oben rechts; 2021–2050, unten links; 2071–2100, unten rechts) des Niederschlages P der Realisierung 66 auf den sächsischen Teileinzugsgebietsflächen	54
Abbildung 26:	Mittlere Jahressummen (1961–1990, oben links; 1981–2010, oben rechts; 2021–2050, unten links; 2071–2100, unten rechts) der realen Verdunstung ETR der Realisierung 66 auf den sächsischen Teileinzugsgebietsflächen	55
Abbildung 27:	Mittlere Jahressummen (1961–1990, oben links; 1981–2010, oben rechts; 2021–2050, unten links; 2071–2100, unten rechts) des Gesamtabflusses R der Realisierung 66 auf den sächsischen Teileinzugsgebietsflächen	56
Abbildung 28:	11-jähriges gleitendes Mittel des Niederschlages P über den Zeitraum 1966–2005 für fünf sächsische Beispielgebiete	60
Abbildung 29:	11-jähriges gleitendes Mittel der realen Verdunstung ETR über den Zeitraum 1966–2005 für fünf sächsische Beispielgebiete	60

Abbildung 30:	11-jähriges gleitendes Mittel der Grundwasserkomponente RG über den Zeitraum 1966–2005 für fünf sächsische Beispielgebiete	61
Abbildung 31:	Mittlere Jahresgänge (1961–1990, links; 1981–2010, rechts) der Grundwasserkomponente RG für fünf sächsische Beispielgebiete	61
Abbildung 32:	Mittlere Lufttemperatur der Realisierungen und des Ist-Zustandes im Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf	63
Abbildung 33:	Jahressummen des Niederschlages (1961–1990) der Realisierungen und des Ist-Zustandes im Gebiet Seifhennersdorf	64
Abbildung 34:	Absolute Abweichungen der projizierten mittleren Monatssummen (1961–1990) der Grundwasserkomponente RG vom Ist-Zustand 1961–1990	66
Abbildung 35:	Aktuelle Jahressummen der Grundwasserkomponente RG der Realisierungen und des Ist-Zustandes im Zeitraum 1961–1990 im Gebiet Seifhennersdorf	67
Abbildung 36:	Räumlich differenzierte Darstellung der relativen Abweichung [%] der für die Realisierung 66 projizierten mittleren Jahressummen der Grundwasserkomponente RG (= RG1 + RG2) vom Ist-Zustand für die Reihe 1961–1990	68
Abbildung 37:	Mittelwerte der Wasserhaushaltsbilanzen für drei Realisierungen (1961–1990) gegenüber den Mittelwerten des Ist-Zustandes (Zeitraum jeweils 1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf	69
Abbildung 38:	Mittelwerte der Wasserhaushaltsbilanzen für drei Realisierungen (2071–2100) gegenüber den Mittelwerten des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf	69
Abbildung 39:	11-jähriges gleitendes Mittel der realen Verdunstung ETR über den Zeitraum 1966–2094 für die Realisierungen und den Ist-Zustand (1966–2004) im Gebiet Seifhennersdorf	70
Abbildung 40:	11-jähriges gleitendes Mittel der Grundwasserkomponente RG über den Zeitraum 1966–2094 für die Realisierungen und den Ist-Zustand (1966–2004) im Gebiet Seifhennersdorf	71
Abbildung 41:	Mittlerer Jahresgang (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) für das Gebiet Seifhennersdorf	71
Abbildung 42:	Mittlere Summe (2071–2100) der Grundwasserkomponente für das Sommer- und Winterhalbjahr der Realisierungen gegenüber dem mittleren Halbjahreswerten des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf	72
Abbildung 43:	Beispiel für Zehrung im Gebiet Schönau dargestellt anhand der Ganglinie für das Jahr 1990	74
Abbildung 44:	Jahresgang der mittleren Monatssummen (1961–1990) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang für den Ist-Zustand (1961–1990) im Gebiet Schönau	75
Abbildung 45:	11-jähriges gleitendes Mittel der Grundwasserkomponente RG über den Zeitraum 1966–2094 für die Realisierungen und den Ist-Zustand (1966–2004) im Gebiet Schönau	76
Abbildung 46:	Jahresgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Schönau	77
Abbildung 47:	Jahresgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Nemt 1	78
Abbildung 48:	Jahresgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Niedermülsen	79
Abbildung 49:	Jahresgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Cunnersdorf 1	81
Abbildung 50:	Jahresgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf	82
Abbildung 51:	Jahresgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Niedermülsen	84

Abbildung 52:	NW7-Niedrigwasserstatistik für die vier 30-Jahresperioden	85
Abbildung 53:	NW15-Niedrigwasserstatistik für die vier 30-Jahresperioden	86
Abbildung 54:	Überblick über den methodischen Ansatz und wesentliche Begriffe (nach SCHMIDT et al. 2011)	90
Abbildung 55:	Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (1961–1990) der Realisierung 66 vom Ist-Zustand (1961–1990)	92
Abbildung 56:	Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (1981–2010) der Realisierung 66 vom projizierten Ist-Zustand (1961–1990)	93
Abbildung 57:	Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (2021–2050) der Realisierung 66 vom projizierten Ist-Zustand (1961–1990)	94
Abbildung 58:	Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (2071–2100) der Realisierung 66 vom projizierten Ist-Zustand (1961–1990)	95
Abbildung 59:	Oberfläche des Internetauftritts von Säule B	96
Abbildung 60:	Interne Struktur des Webauftritts für Säule B	97
Abbildung 61:	Startseite des Wasserhaushaltsportals	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Implementierte Stauanlagen in ArcEGMO, nach Einzugsgebiet sortiert	17
Tabelle 2:	Parameter und Gütemaße für das Gebiet Seifhennersdorf.....	41
Tabelle 3:	Bezeichnung und Erläuterung der verschiedenen Realisierungen	50
Tabelle 4:	Kurze Charakteristik der Beispielgebiete	58
Tabelle 5:	Gütemaße der fünf Beispielgebiete des Zeitraums 1992–2001	58
Tabelle 6:	Gegenwärtiger Wasserhaushalt (1961–2010) an Beispielgebieten in Sachsen – Mittlere Jahressummen des Niederschlages [mm/a] und prozentuale Anteile der Wasserhaushaltsgrößen am Niederschlag	59
Tabelle 7:	Statistischer Vergleich der Klimagröße Temperatur für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf.....	63
Tabelle 8:	Statistischer Vergleich der Klimagröße Niederschlag für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf.....	64
Tabelle 9:	Mittlere Jahressummen der Wasserhaushaltsgrößen [mm/a] für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf.....	65
Tabelle 10:	Prozentuale Anteile der Wasserhaushaltsgrößen am mittleren Niederschlag für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf	66
Tabelle 11:	Statistischer Vergleich der Wasserhaushaltsgröße Grundwasserkomponente RG (= RG1 + RG2) für den Zeitraum 1961–1990 im Gebiet Seifhennersdorf	67
Tabelle 12:	Vergleich der Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Realisierungen (2071–2100) für das Gebiet Seifhennersdorf	70
Tabelle 13:	Mittelwert, Spannweite und Variationskoeffizient der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente im Gebiet Seifhennersdorf	73
Tabelle 14:	Vergleich der mittleren Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Szenarien für den Zeitraum 2071–2100 (Landnutzungsszenario Waldumbau) für das Gebiet Cunnersdorf 1.....	80
Tabelle 15:	Vergleich der mittleren Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Szenarien für den Zeitraum 2071–2100 (Landnutzungsszenario Versiegelung) für das Gebiet Seifhennersdorf	81
Tabelle 16:	Vergleich der mittleren Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Szenarien für den Zeitraum 2071–2100 (Landnutzungsszenario Flächenverbrauch) für das Gebiet Niedermülsen.....	83
Tabelle 17:	Anzahl von Niedrigwasserepisoden mit mindestens 7 bzw. 15 Tagen Dauer in Sachsen für jeweils 30-jährige Zeitreihen unter dem Einfluss projizierter Klimaänderungen – Ergebnisse für die Realisierung 66	86
Tabelle 18:	Verfügbare Datensätze je Gebiet.....	100

Abkürzungsverzeichnis

AGGNR	Aggregatnummer
Ajax	Asynchronous JavaScript and XML
ATKIS-DLM	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem des Digitalen Landschaftsmodells
BAH	Büro für Angewandte Hydrologie Berlin
BKkonz	Bodenkonzeptkarte im Maßstab 1 : 25.000
BSA200	Bodenatlas im Maßstab 1 : 200.000
BÜK1000	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 1.000.000
BÜK200	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 200.000
CG1	Kurzfristige Rückgangskonstante
CG2	Langfristige Rückgangskonstante
ΔS	Speicheränderung
DEF	Bilanzfehler
DGM	Digitales Geländemodell
DIFGA	Differenzenganglinienanalyseverfahren
Drain	Drainage ArcEGMO
DWD	Deutscher Wetterdienst
ϵ	Bilanzfehler (wird in ArcEGMO auch als Error bezeichnet)
ELS	Einzellinearspeicher
ET	Reale Evapotranspiration (Abkürzung verwendet innerhalb ArcEGMO)
ET_KORR	Korrekturfaktor für die Verdunstung
ETR	Reale Evapotranspiration
EZG	Einzugsgebiet
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FGW	Fließgewässer
FK	Feldkapazität
GeoSN	Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen
GIS	Geoinformationssystem
GMK20	Geomorphologische Karte im Maßstab 1 : 20.000
GÜK400	Geologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 400.000
GWKZ	Gewässerkennzahl
GWN	Grundwasserneubildung
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschland
HÜK200	Hydrogeologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 200.000
HW	Hochwert
HyK50	Hydrogeologische Spezialkarte im Maßstab 1:50.000
i. d. R.	in der Regel
IGHR	Hochwasserrückhalteraum einer Stauanlage [Mio. m ³]
IHM	Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden
IS	Stauraum einer Stauanlagen [Mio. m ³]
kf	Gesättigte hydraulische Feldkapazität
K_MAKRO_SKELETT	Korrekturfaktor für die Makroporen in Abhängigkeit des Skelettgehaltes
K_MAKRO_TON	Korrekturfaktor für die Makroporen in Abhängigkeit des Tongehaltes
K_MAKRO_VEGETATION	Korrekturfaktor für die Makroporen, verursacht durch Vegetation

KliWES	Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen
LAI	Leaf Area Index (Blattflächenindex)
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LK	Luftkapazität
LTV	Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
M	Mächtigkeit des Aquifers in [m]
MGW	Mittlerer Grundwasserflurabstand
MHGW	Mittlerer höchster Grundwasserflurabstand
MKR	Mischkanalisation ArcEGMO
MNGW	Mittlerer niedrigster Grundwasserflurabstand
mpfb	Makroporenanteil an der Bodenunterkante
mpft	Makroporenanteil an der Bodenoberkante
MQ	Mittlerer Durchfluss
m ü. HN	Meter über Höhennull
m ü. NN	Meter über Normalnull
n	Drainable Porosität
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NSE	Nash-Sutcliffe-Effizienz (Gütemaß)
P	Niederschlag (Allgemeine Bedeutung), im Zusammenhang mit DIFGA wird darunter stets der korrigierte Niederschlag und/oder die Wasserabgabe aus der Schneedecke verstanden
P _{bias}	Percent Bias (Gütemaß)
PSCN	Plant-Soil-Carbon-Nitrogen Model, Modul innerhalb von ArcRGMO
Q	Durchfluss
QD	Direktabfluss (Abflusskonzentration, Abfluss aus den Gebietsspeichern)
QG	Grundwasserabfluss insgesamt ohne Unterteilung in Komponenten (Abfluss aus den Gebietsspeichern)
QG1	Schneller Grundwasserabfluss (Abfluss aus den Gebietsspeichern)
QG2	Langsamer Grundwasserabfluss (Abfluss aus den Gebietsspeichern)
R	Gesamtabfluss, Summe aus RS, RG1 und RG2
RaKliDa	Rasterklimadaten
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem
RD	Direktabfluss (Abflussbildung, Zufluss zu den Gebietsspeichern)
Rest	Restglied aus der DIFGA-Analyse, bestehend aus realer Verdunstung und Änderung des Inhaltes eines nur durch Verdunstung ausschöpfbaren Speichers
RG	Gesamte Abflussbildung des Grundwasserabflusses, Summe aus RG1 und RG2
RG1	Abflussbildung des kurzfristigen Grundwasserabflusses (Zufluss zu den Gebietsspeichern)
RG2	Abflussbildung des langfristigen Grundwasserabflusses (Zufluss zu den Gebietsspeichern)
RO	Oberflächenabfluss
RH	Hypodermischer Abfluss
RS	Schnelle Abflusskomponente, zusammengesetzt aus Oberflächenabfluss, hypodermischen Abfluss, Drainageabfluss und ggf. Abfluss in die Kanalisation etc.
RW	Rechtswert
SBS	Staatsbetrieb Sachsenforst
SG1	Angaben zum Gebietsspeicher des kurzfristigen Grundwasserabflusses

SG2	Angaben zum Gebietsspeicher des langfristigen Grundwasserabflusses
SG1grenz	Aufteilungsparameter des Grundwasserspeichers
sicker	Gesamtperkolation unterhalb der Bodenmatrix (Versickerung aus der Bodenzone)
SMAX	Maximaler Speicherinhalt des schnellen Basisabflussspeichers
SMoCR200	Soil Map of the Czech Republic 1 : 200.000
t	Zeitpunkt
SQL	Structured Query Language
TG	Teileinzugsgebiet
TKR	Trennkanalisation ArcEGMO
u. ä.	und ähnliches
VEGEN	Generisches Vegetationsmodell in PSCN (ArcEGMO)
WMO	World Meteorological Organization
WMS	Web Map Service
XML	Extensible Markup Language
zmax	Maximale Tiefe der Makroporen

Glossar

ArcEGMO	Hydrotopbasiertes Wasserhaushaltsmodell der Firma BAH, EGMO – Einzugsgebietsmodell
Bearbeitete BKkonz	Originale BKkonz verschnitten mit der GMK20 sowie Lückenauffüllung durch die Nachbarschaftsanalyse nach GREIFENSTEIN (2010)
Bifurkation	Natürliche oder anthropogen verursachte Gabelung eines Flusslaufes, sodass das Wasser zwei verschiedenen Gewässerarmen zufließt
DIFGA-Einzugsgebiet	Bezeichnung für ein Einzugsgebiet, für das der Wasserhaushalt mit Hilfe von DIFGA berechnet wurde
DIFGA-Pegel	Bezeichnung für Pegel, deren Durchflussmesswerte für die Berechnung des Wasserhaushalts mittels DIFGA verwendet wurden
Einzugsgebiet	Ein Einzugsgebiet ist das Gebiet, aus dem Wasser einem bestimmten Ort zufließt. Dabei spielt es keine Rolle, ob dieser Zufluss ober- oder unterirdisch stattfindet. (DIN 4049-1, 1992)
Globaler Parameter	Bezeichnung für einen Parameter in ArcEGMO, welcher für das gesamte Modell gültig ist, und nicht nur für ein Modul
Hydrotop	Ein Hydrotop ist gekennzeichnet durch homogene Systemein- und -ausgänge und Systemeigenschaften (PFÜTZNER et al., 2007). Ein Hydrotop umfasst Flächen mit ähnlichen hydrogeologischen und hydrologischen Eigenschaften.
Kalibrierung	Bestmögliche Anpassung des Modells an die Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes für einen bestimmten Zeitraum
Klimadatenrastertool	Ist ein Mehrfachwerkzeug zur Bearbeitung (statistische Analyse, Fehlerkontrolle, Formatumwandlung) von Klimadaten entwickelt am IHM der TUD (SCHWARZE et al. 2010)
MATLAB	MATrix LABoratory ist ein Programm für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen
Melioration	kulturtechnische Maßnahme zur Bodenverbesserung im Hinblick auf Ertragssteigerung und Flächengewinnung in der Agrarwirtschaft
Modellierungseinheit	Modellierungseinheit ist im Projekt KliWES der Oberbegriff, welcher die Begriffe Hydrotop, Teileinzugsgebiet und Einzugsgebiet zusammenfasst.
Oberlieger-Unterlieger-Beziehung	“Eine allgemeingültige, rechtlich verbindliche Definition des Oberliegers und Unterliegers besteht nicht. Ein Oberlieger ist im Wasserrecht ein oberhalb eines bestimmten Punktes ansässiger Gebietsberechtigter, etwa ein Grundstückseigentümer. Der Begriff erschließt sich erst im jeweiligen Zusammenhang mit dem Unterlieger.” (BOHL 2011).
PCGEOFIM	Simulationsprogramm für Geofiltration und Geomigration PCGEOFIM der Firma IBGW@Leipzig
Pegeleinzugsgebiet	Stellt ein Einzugsgebiet dar, welches am Gebietsauslass über einen Pegel verfügt und aus einem oder mehreren Teileinzugsgebieten besteht.
Regionalisierung	Übertragung einer Eigenschaften aus einem Gebiet auf ein hydrologisch ähnliches Gebiet, in welchem diese Information fehlt. Regionale Übertragung oder flächenhafte Verallgemeinerung einer Größe oder Funktion bzw. der Parameter der Funktion innerhalb einer Skalenebene. (BECKER & SERBAN 1990)
Routing	Bei der Erarbeitung digitaler Fließgewässernetze wird darunter die Erfassung der Fließrichtung für jeden digitalen Gewässerabschnitt verstanden (geroutetes Gewässernetz).

SLOWCOMP	Grundwasserhaushaltsmodell SLOWCOMP (SCHWARZE et al. 1999 a) zur Beschreibung der Aufteilung der Perkolation aus der Bodenzone auf einzelne Grundwasserabflusskomponenten
Teileinzugsgebiet	Einzugsgebiet eines Punktes im Untersuchungsgebiet, i. d. R. im Gewässersystem
Validierung	Überprüfung der Parametereinstellung aus der Kalibrierung anhand eines weiteren Zeitraumes
Wasserdargebot	Die gesamte zur Verfügung stehende Wassermenge im Einzugsgebiet (fester und flüssiger Niederschlag, Zuflüsse etc.). (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996)
Zehrung	Übersteigen die Verluste aus den Grundwasservorräten durch kapillaren Aufstieg und die anschließende Verdunstung den Zufluss zum Grundwasserspeicher, wird dies als Zehrung bezeichnet. Der Saldo der Grundwasserkomponente wird negativ.
Zwischengebiet	Ausschnitt eines Einzugsgebietes ohne Quellgebiete

1 Zielstellung und Einleitung

Gegenwärtig spielt die Abschätzung von Auswirkungen möglicher Entwicklungen des zukünftigen Klimas in vielen Themenbereichen eine wichtige Rolle. Dies betrifft vor allem Entwicklungspläne mit großem Planungshorizont. So stellen sich Fragen wie z. B.:

- Welchen Einfluss hat der erwartete Klimawandel auf die Oberflächen- und Grundwasservorkommen in Sachsen und sind im Hinblick darauf Anpassungen in der Wasserbewirtschaftung erforderlich?
- Ist zukünftig eine umfangreichere Bewässerung auf sächsischen Ackerflächen erforderlich oder können möglicherweise einige Ackerfrüchte nicht mehr gewinnbringend angebaut werden?
- Ist unter geänderten Klimabedingungen eventuell eine Anpassung von Waldbaukonzepten auf den Forstflächen notwendig?

Im Rahmen des Projektes KliWES - Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen - sollen methodische Grundlagen für die Beantwortung derartiger Fragestellungen sowie für langfristige Planungen geschaffen werden. Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben KliWES wurde vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) 2008 ins Leben gerufen.

Aufgrund der komplexen Aufgabenstellung wurde KliWES in mehrere Teilprojekte untergliedert (Abbildung 1), wobei die Untersuchungen drei Hauptrichtungen (Säulen A, B und C) umfassen. Die hier vorgestellte Säule B bildet mit räumlich und zeitlich hochaufgelösten Wasserhaushaltsberechnungen des Modells ArcEGMO einen wesentlichen Kern von KliWES und umfasst folgende Arbeiten:

- Berechnung des aktuellen Wasserhaushalts für sächsische Einzugsgebiete mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells
- Simulation von projizierten Wasserhaushalten für sächsische Einzugsgebiete auf Basis von Klima- und Landnutzungsszenarien
- Entwicklung eines Webauftrittes zur Präsentation der Ergebnisse

Zielstellung

Ziel des Projektes sind Untersuchungen hinsichtlich möglicher Auswirkungen der mit einem regionalen Klimamodell projizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer. Die Bearbeitung der in diesem Bericht vorgestellten Themen erfolgte am Lehrstuhl für Hydrologie der Technischen Universität Dresden. Im Ergebnis liegen Wasserhaushaltsdaten für ca. 5.000 sächsische Teileinzugsgebiete und Differenzkarten (Abweichungen zwischen gegenwärtigen und projizierten Zuständen) vor. Sie werden der Öffentlichkeit über das Internet im „Wasserhaushaltsportal Sachsen“ zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse ermöglichen erste Vorstellungen zum Ausmaß zukünftiger Veränderungen im Wasserhaushalt sächsischer Einzugsgebiete, wie sie als Planungsgrundlagen für politische, bauliche und gesellschaftliche Fragestellungen zunehmend zu berücksichtigen sind.

Gliederung

Der vorliegende Bericht ist untergliedert in die Aufbereitung und Erweiterung der meteorologischen und hydrologischen Daten sowie der Geoinformationen aus der Säule A für die Nutzung im Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO (Kapitel 2). Es folgen Erläuterungen zum Aufbau der Modellraumstruktur und zur Abgrenzung von Sonderflächen (Kapitel 3). Im Anschluss werden Aufbau und Eigenschaften des Wasserhaushaltsmodells

ArcEGMO vorgestellt sowie die Erstellung der einzelnen Modelle erläutert (Kapitel 4). Die Darstellung der Kalibrierungs- und Validierungsstrategie für diese Modelle folgt in Kapitel 5. Kapitel 6 stellt typische Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen anhand von Beispielen vor. Die IT-Lösung und der Aufbau der Internetdarstellung werden in Kapitel 7 erläutert. Abschließend wird der Bericht zusammengefasst (Kapitel 8) und ein kurzer Ausblick (Kapitel 9) gegeben.

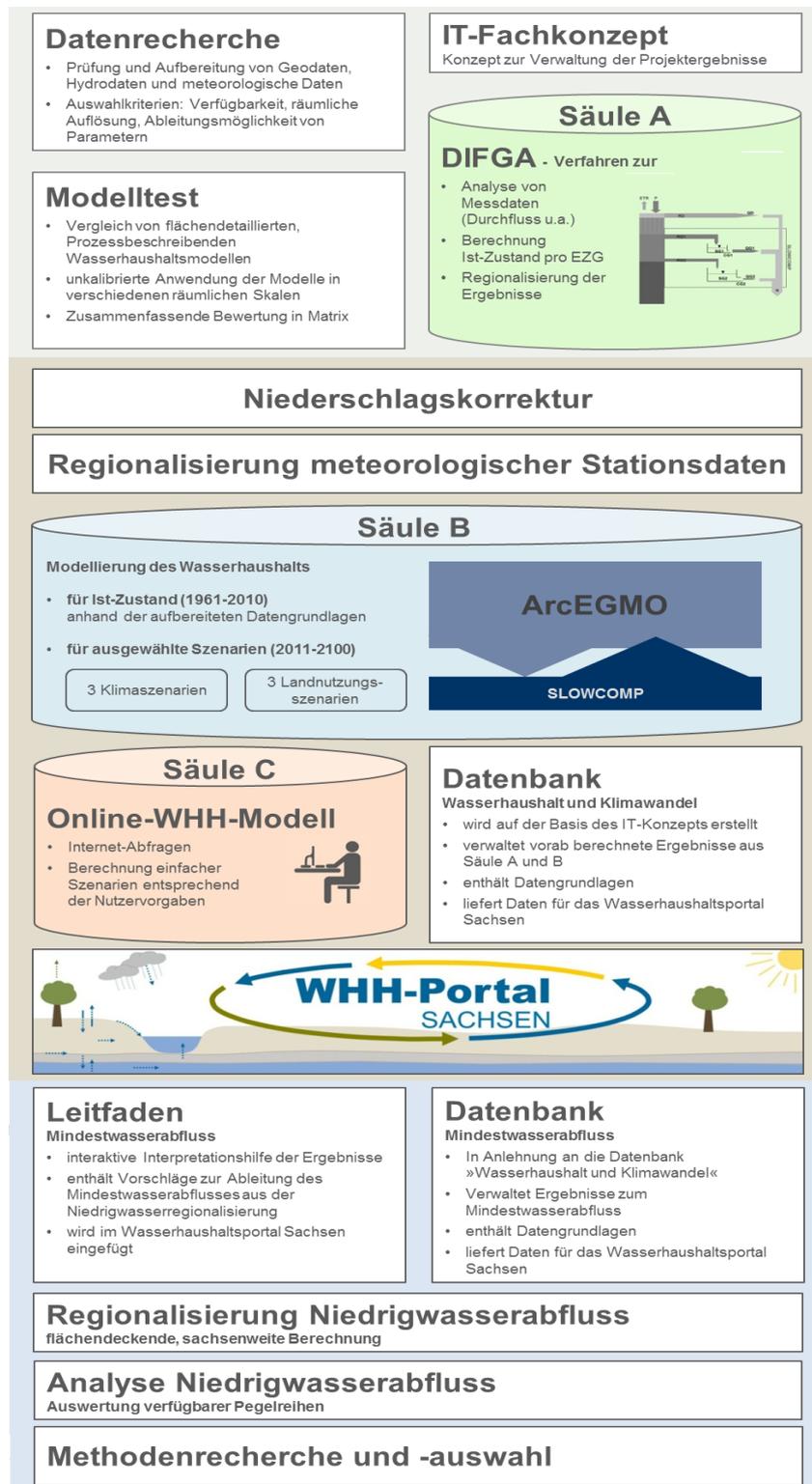


Abbildung 1: Übersicht zum Projektaufbau KliWES – Teil Wasserhaushalt

2 Datengrundlagen

Die Wasserhaushaltsberechnungen werden gemäß der in SCHWARZE et al. (2010 b) getroffenen Entscheidung im Rahmen des Teilprojektes Säule B mit ArcEGMO durchgeführt. Das Modellsystem ArcEGMO ist ein GIS-basiertes hydrologisches Einzugsgebietsmodell, weshalb bestimmte Eingangsdaten als GIS-Layer zur Verfügung stehen müssen. Die dafür notwendigen Layer können aus der Übersicht in Abbildung 2 entnommen werden. Für die Wasserhaushaltsberechnungen mit ArcEGMO ist es erforderlich, sämtliche Geoinformationen aufzubereiten und in die Projektdatenbank einzubinden. Ausgehend von dieser Datenbank werden die modellspezifischen Dateien für ArcEGMO erzeugt.

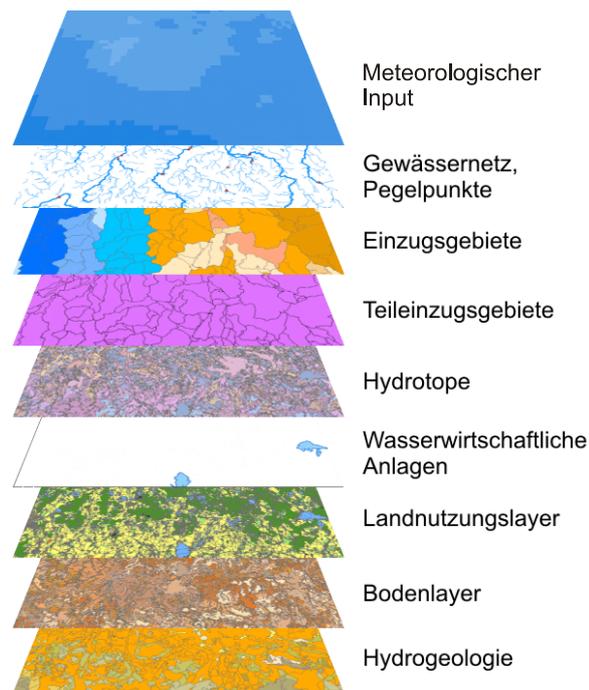


Abbildung 2: Übersicht zu den GIS-Layern für den Aufbau des Wasserhaushaltsmodells mit ArcEGMO

2.1 Hydrologische Daten

Neben den Durchflussdaten aus Säule A (Zeitraum 1951–2005; SCHWARZE et al. 2013 a) werden in Säule B (Abbildung 1; LÜNICH et al. 2011) weitere Pegeldata verwendet. Aufgrund der Verlängerung der Klimadaten bis 2010 in Säule B wurden auch die Pegeldata entsprechend ihrer Verfügbarkeit bis 2010 verlängert.

Die im sächsischen Pegelverzeichnis (LfULG 2010) aufgeführten Durchflussmessstellen stellen die Grundlage für den Pegel-Layer dar. Zu jedem Pegel ist die GWKZ des Teileinzugsgebietes angegeben, für das der Pegel den Gebietsauslass erfasst. Insgesamt wurden ca. 160 Pegeldatareihen genutzt.

Nachfolgend werden die Bewirtschaftungsdaten von Talsperren und Überleitungen erläutert, die in das Modell ArcEGMO implementiert werden.

2.1.1 Talsperren

Im Raum Sachsen sind unterschiedlichste Speicherbauwerke (Talsperren, Wehre, Hochwasserrückhaltebecken und Tagebaurestseen) sowie damit in Zusammenhang stehende Bewirtschaftungsmaßnahmen (Überleitungen, Entnahmen und Einleitungen) vorzufinden. Sie müssen für eine plausible Nachbildung des aktuellen und zukünftigen Wasserhaushalts zum Teil berücksichtigt werden.

Laut dem Stauanlagenverzeichnis von 2002 (LfUG 2002) gibt es in Sachsen 190 Stauanlagen, die durch verschiedene Betreiber wie Landestalsperrenverwaltung (LTV), Städte, Gemeinden etc. unterhalten werden. In Zusammenarbeit mit der LTV wurde festgelegt, dass in das Modell alle Speicherbauwerke mit über 1 Mio. m³ Stauraum und ausreichender Datenverfügbarkeit implementiert werden. Zur Ermittlung der betreffenden Bauwerke wird der im Stauanlagenverzeichnis aufgeführte gewöhnliche Hochwasserschutzraum IGHR vom Gesamtstauraum IS subtrahiert. Nach dieser Selektion verbleiben die in Tabelle 1 genannten Talsperren und Speicher.

Tabelle 1: Implementierte Stauanlagen in ArcEGMO, nach Einzugsgebiet sortiert

Spree	Mulde	Weißer Elster	Elbe
TS Bautzen	TS Carlsfeld	TS Dröda	TS Gottleuba
TS Quitzdorf	TS Cranzahl	TS Falkenstein	TS Klingenberg
	TS Eibenstock	TS Pirk	TS Lehmühle
	TS Lichtenberg	TS Pöhl	TS Malter
	TS Muldenberg	TS Werda	
	TS Neunzehnhain II		
	TS Rauschenbach		
	TS Saidenbach		

Die Einbindung von Speicherbauwerken in ArcEGMO erfordert Kennwerte der Stauraumaufteilung und Bewirtschaftungsdaten. Eine Liste der verwendeten Kennwerte und Daten enthält der Anlagenband, Kap. 1.1, Tabelle A1. Genauere Ausführungen dazu finden sich in PFÜTZNER et al. (2007).

Für den Beobachtungszeitraum wird die mit ArcEGMO simulierte Talsperrenabgabe durch die am Talsperrenauslass gemessene Abgabeganglinie ersetzt. Dies erfolgt für die in Tabelle 1 genannten Talsperren. Auf diese Weise kann im Modell der Einfluss der tatsächlichen Talsperrenbewirtschaftung der letzten Jahrzehnte auf den Durchfluss direkt berücksichtigt werden. Durch die Einspeisung von Messdaten ist die praktisch unmögliche modellgestützte Rekonstruktion des genauen Talsperrenbetriebs für den Beobachtungszeitraum nicht erforderlich.

Für den Projektionszeitraum (1961–2100) werden die in Tabelle 1 aufgeführten Bauwerke als ungesteuerte Talsperren implementiert. Hierfür sind Angaben zur Speicherinhaltslinie, zur Leistungscharakteristik der Grundablässe und der Hochwasserentlastung sowie allgemeine Kenndaten der Talsperren (Talsohle, Sollwasserstand, schadloser Abfluss etc.) erforderlich. Eine gezielte Steuerung durch Vorgaben von Bewirtschaftungsregeln findet nicht statt, weil eine Festlegung der zukünftigen Regeln nicht möglich ist. Ursache hierfür sind einerseits die Unsicherheiten in der Projektion zukünftiger Talsperrenzuflüsse. Andererseits ist eine Anpassung der Talsperrenbewirtschaftung unter geänderten klimatischen Bedingungen denkbar. Unter den möglichen zukünftigen Klimaänderungen können sich die Prioritäten der verschiedenen Nutzergruppen (z. B.

Trinkwasserversorger, Landwirtschaft, Hochwasserschutz) verschieben. Diese Untersuchung und Prognostizierung derartiger Entwicklung war nicht Gegenstand der Untersuchungen in KliWES.

Hochwasserrückhaltebecken stellen einen Sonderfall dar. Hochwasserereignisse laufen oft innerhalb weniger Stunden ab, weshalb für ihre exakte Berechnung eine minütliche oder stündliche Auflösung erforderlich ist. Weil im KliWES-Projekt die zeitliche Auflösung bei einem Tag liegt, werden Hochwasserrückhaltebecken nicht im Modell implementiert. Die Bewirtschaftung von Tagebaurestseen wird ebenfalls nicht berücksichtigt, weil in den Bereichen des Braunkohletagebaus separate Berechnungen mit einem hierfür geeigneten Modell außerhalb von KliWES durchgeführt werden müssen. Außerdem findet keine Implementierung von Wehren im Modell statt, weil die Erfassung und Festlegung von Steuerungsregeln im Rahmen des Vorhabens nicht möglich ist.

2.1.2 Überleitungen, Entnahmen und Einspeisungen

Überleitungen, die zum Transport von verhältnismäßig großen Wassermengen über die Einzugsgebietsgrenze hinaus dienen, verursachen Wasserdefizite oder -überschüsse in den entsprechenden Einzugsgebieten und führen zu anthropogen beeinflussten Abflüssen.

„Um Überleitungen in ArcEGMO einbeziehen zu können, sind pro Überleitung mindestens Informationen zu Entnahme- und Einspeisungsort, Entnahme- und Einspeisungsart sowie die mittleren Wassermengen in Kubikmeter pro Tag notwendig (PFÜTZNER et al. 2007).“ (SCHWARZE et al. 2013 a)

Im Projekt KliWES wurden Überleitungen recherchiert, die mengenmäßig relevante Wassermengen von einem Haupteinzugsgebiet in ein anderes leiten bzw. innerhalb eines Einzugsgebiets stattfinden. „Zur Recherche der notwendigen Informationen stand als zentrale Datengrundlage die Datenbank WAVE2008 (Datenbank der öffentlichen Wasserversorgung, Version 05A/2010) zur Verfügung. Seit ca. 1995 werden dort Genehmigungsdaten und Verlaufsdaten zu Entnahmen für die öffentliche Wasserversorgung (Oberflächen- und Grundwasser) in beschränktem Aussageumfang (Rechtsinhaber, grobe räumliche Angabe, Mengenangabe im Mittel) für verschiedene Zeiteinheiten abgelegt. Daneben werden die tatsächlichen Entnahmemengen verwaltet. Die Erhebung der Daten erfolgt durch die zuständigen Landesdirektionen. Bei der Recherche wurden zusätzlich die Berichte SMUL (2011) und BÖRKE et al. (2008) verwendet.“ (SCHWARZE et al. 2013 a)

Mit Hilfe diesen Informationen lassen sich Unklarheiten in Abflüssen beim Vergleich von Simulation und Beobachtung klären. Somit kann festgestellt werden, ob die simulierten den natürlichen Abfluss ohne Beeinflussung von Einleitungen oder Entnahmen darstellen.

2.2 Meteorologische Daten

Für die Wasserhaushaltsmodellierung benötigt ArcEGMO meteorologische Eingangsdaten in täglicher Auflösung.

Das LfULG stellte die Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes für den Beobachtungszeitraum 1961–2010 (DWD) zur Verfügung. Anschließend erfolgte die Regionalisierung dieser meteorologischen Eingangsdaten mit einem eigens entwickelten Rasterklimadatentool auf eine Rastergröße von 1.000 m x 1.000 m. Genauere Informationen zu den verwendeten Datengrundlagen und Regionalisierungsverfahren finden sich in SCHWARZE et al. (2013).

Im Rahmen des KliWES-Projekts soll die mögliche Veränderung des Klimas bis 2100 simuliert werden. Durch das LfULG erfolgte die Auswahl der meteorologischen Eingangsdatensätze für die Wasserhaushaltsberechnungen. Für die Simulation der möglichen Klimaveränderung wurden drei Realisierungen (Realisierung 00, Realisierung 66 und Realisierung 99) des statistischen Regionalklimamodells WETTREG2010 selektiert. Die Realisierungen basieren auf dem SRES-Emissionsszenario A1B (IPCC 2007 a). Bei dem übergeordneten Globalklimamodell handelt es sich um ECHAM5. Weitere Informationen zur Auswahl der Realisierungen für das KliWES-Projekt sind in LÜNICH et al. (2012) enthalten.

Die Regionalisierung der Stationsdaten der Realisierungen für den Zeitraum 1961–2100 erfolgte ebenfalls am Institut für Hydrologie der TU Dresden mit dem Rasterklimadatentool. Die im Ergebnis entstandenen Rasterdatensätze gehen in das Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO als Inputdaten ein.

2.3 Einzugsgebiete und Fließgewässer

Kartengrundlage für die Teileinzugsgebiete ist die vom LfULG zur Verfügung gestellte Karte der Teileinzugsgebiete (EzgSN040205, Stand: 05.02.2004). Die Teileinzugsgebietsstruktur wird mit Hilfe der GWKZ nach LAWA (1993) beschrieben, welche eine eindeutige Oberlieger-Untерlieger-Zuordnung ermöglicht. Die Karte wurde um alle außersächsischen Teileinzugsgebiete erweitert, die zur Berechnung des Wasserhaushalts sächsischer Einzugsgebiete notwendig sind.

Neben der Teileinzugsgebietskarte stellte das LfULG auch eine digitale Karte des sächsischen Fließgewässernetzes bereit. Dieses musste, um es im Wasserhaushaltsmodell nutzen zu können, umfassend aufbereitet werden. Das Gewässernetz muss für die Anwendung des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO geroutet sein, sodass die Fließrichtung den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht. Ebenso ist es erforderlich, dass die Gewässerabschnitte topologisch sinnvoll verlaufen und das Gewässernetz an keiner Stelle unterbrochen ist. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Fließabschnitte die Teileinzugsgebietsgrenzen nicht mehrfach kreuzen. Hinsichtlich Bifurkationen ist es für die Wasserhaushaltsberechnung unerheblich, über welchen Zweig der Bifurkation das Wasser fließt. Daher wurde das ursprünglich vermaschte Gewässernetz vereinfacht. Hierfür wurde einer der beiden Fließgewässerzweige vom Zufluss abgetrennt und als Quellgewässer behandelt. Im Ergebnis liegt keine Bifurkation mehr vor.

2.4 Reliefinformationen

Grundlage der Reliefinformationen ist das DGM25 auf der Basis der digitalen Reliefanalyse für Sachsen. Für außersächsische Gebiete innerhalb Deutschlands wurde auf die Informationen der ASTER-Daten zurückgegriffen. Aus dem Höhenraster wurden die Hangneigung (in Prozent) und die Hangausrichtung (in Klassen von jeweils 45° beginnend bei 22,5°) abgeleitet. Die Informationen der erstellten Raster gehen in die Projektdatenbank ein.

2.5 Boden

Zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften in Sachsen wurde die Bodenkonzeptkarte (BKkonz) im Maßstab 1 : 25.000 und die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5) verwendet. Die Begründung für die Auswahl dieser Karte kann in SCHWARZE et al. (2010) nachgelesen werden.

Von Vorteil ist, dass die BKkonz sachsenweit mit einer dazugehörigen Profildatenbank verfügbar ist. Allerdings sind die Ortslagen und weitere Flächen bei der Erstellung der BKkonz aus der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK100) und der Forstlichen Standortkartierung (WBK25) nicht kartiert worden.

Zur Füllung der Lücken (Ortschaften, Wasserflächen und nicht klassifizierte Flächen) in der BKkonz werden weniger aufgelöste, dafür aber flächendeckende Kartengrundlagen herangezogen:

- Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 200.000 (BÜK200)
- Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 1.000.000 (BÜK1000)
- Soil Map of the Czech Republic im Maßstab 1 : 200.000 (SMoCR200)

Alle außersächsischen Gebiete innerhalb Deutschlands können mit der BÜK200 abgedeckt werden. Ausnahme sind die Kartenblätter Cottbus und Bayreuth, welche nicht verfügbar sind (Stand: Januar 2012). Diese Blätter umfassen nur kleine Bereiche an der Grenze zu Bayern bzw. Brandenburg. Die fehlende Information musste durch die Angaben aus der BÜK1000 ersetzt werden.

Für Einzugsgebietsanteile auf tschechischer Seite wird auf die Bodeninformationen der SMoCR200 zurückgegriffen. Jedoch erfolgte die Einordnung der Böden in Tschechien nach der FAO-Bodenklassifikation von 1974 (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2008). Deponien, Gewässer und Tagebaugelände wurden nicht kartiert. Durch die sich unterscheidenden Bodenklassifikationen der deutschen und tschechischen Böden können die beiden Karten nicht ohne weiteres zusammengefügt werden. Aus diesem Grund erfolgte eine Umschlüsselung in die Bodenklassifikation der BKkonz.

2.6 Grundwasserflurabstand

Für die Wasserhaushaltsberechnungen benötigt ArcEGMO sachsenweit Daten zu den Grundwasserflurabständen (GW-Flurabstände). Die BKkonz enthält nur für einen Teil der sächsischen Fläche diese Angaben. Für Flächen außerhalb Sachsens liegen keine Daten vor. Die fehlenden Informationen mussten sinnvoll abgeleitet bzw. aus anderen Datengrundlagen übernommen werden. In diesem Zusammenhang wurde das am IHM, TU Dresden verfügbare Kartenmaterial auf seine Nutzbarkeit geprüft und – soweit möglich – für die Erstellung einer flächendeckenden Grundwasserflurabstandskarte verwendet.

Der sächsische Bodenatlas (LfUG 2007, Karte) erwies sich als geeignet, weil er Angaben der mittleren Grundwasserhöchst- und Grundwasserniedrigstände für grundwassernahe Flächen (z. B. Auen) enthält, welche aus den Go- und Gr-Horizonten (G = Grundwasser, o = oxidiert, r = reduziert) der Bodenprofile abgeleitet wurden. Die Grundwasserflurabstandskarten (LfUG 2004, Karte; Bearbeitungsstand: 3/2002 bis 5/2004), welche als „Nebenprodukt“ der Hydrogeologischen Spezialkarten (Hyk50) entstanden sind, erwiesen sich als nur

teilweise geeignet, weil nach Angaben des LfULG die in den Festgesteinsgebieten berechneten Werte in der Hyk50 zum Teil stark von den gemessenen abweichen. Daher wurden diese Informationen nur nachrangig verwendet, wenn keine Daten des sächsischen Bodenatlas oder der BKkonz vorlagen.

Eine detaillierte Beschreibung der Ermittlung der räumlichen Verteilung des Grundwasserflurabstandes ist dem Anlagenband, Kap. 1.2 zu entnehmen.

2.7 Drainagen

Drainagen beeinflussen maßgeblich den Bodenwasserhaushalt. Sie bewirken eine schnellere Entwässerung insbesondere der oberen Bodenschichten. Sie reduzieren den Oberflächenabfluss und erhöhen dafür den bodeninneren Abfluss durch die direkte Ableitung von Sickerwasser via Drainage in die Vorflut. Aufgrund der Ableitung des von den Drainagen gefassten Wassers kommt es zu einer geringeren Versickerung in die unterhalb liegenden Bodenschichten und folglich auch zu einer reduzierten Grundwasserneubildung. Flächendeckende exakte Informationen zu Lage, technischer Spezifikation und Zustand der vorhandenen Drainsysteme liegen für Sachsen nicht vor. Es wurde deshalb bei der Wasserhaushaltsmodellierung auf landwirtschaftlichen Flächen davon ausgegangen, dass auf potenziell entwässerungsbedürftigen Flächen Drainagen grundsätzlich vorliegen. Die entsprechenden Datengrundlagen über Drainagen stammen aus MÖLLER et al. (2009).

Für die Aktivierung der Drainagen in ArcEGMO wurden der Meliorationstyp, der Anschlussgrad und die Meliorationstiefe benötigt. Es musste darauf geachtet werden, dass die Drainagen nur auf drainagebedürftigen Böden und Ackerflächen oder Grünland aktiviert werden. Der Meliorationstyp wurde anhand der Informationen aus MÖLLER et al. (2009) abgeleitet. Abbildung 3 zeigt den Anschlussgrad der Drainageflächen auf (ebd.). Die Meliorationstiefe wurde in MÖLLER et al. (2009) in Abhängigkeit der Bodenart und der Landnutzung abgeschätzt.

Für die außersächsischen Einzugsgebietsanteile lagen keine Informationen über Drainage oder Meliorationsmaßnahmen vor. Aus diesem Grund wird angenommen, dass keine Drainagen vorhanden sind.

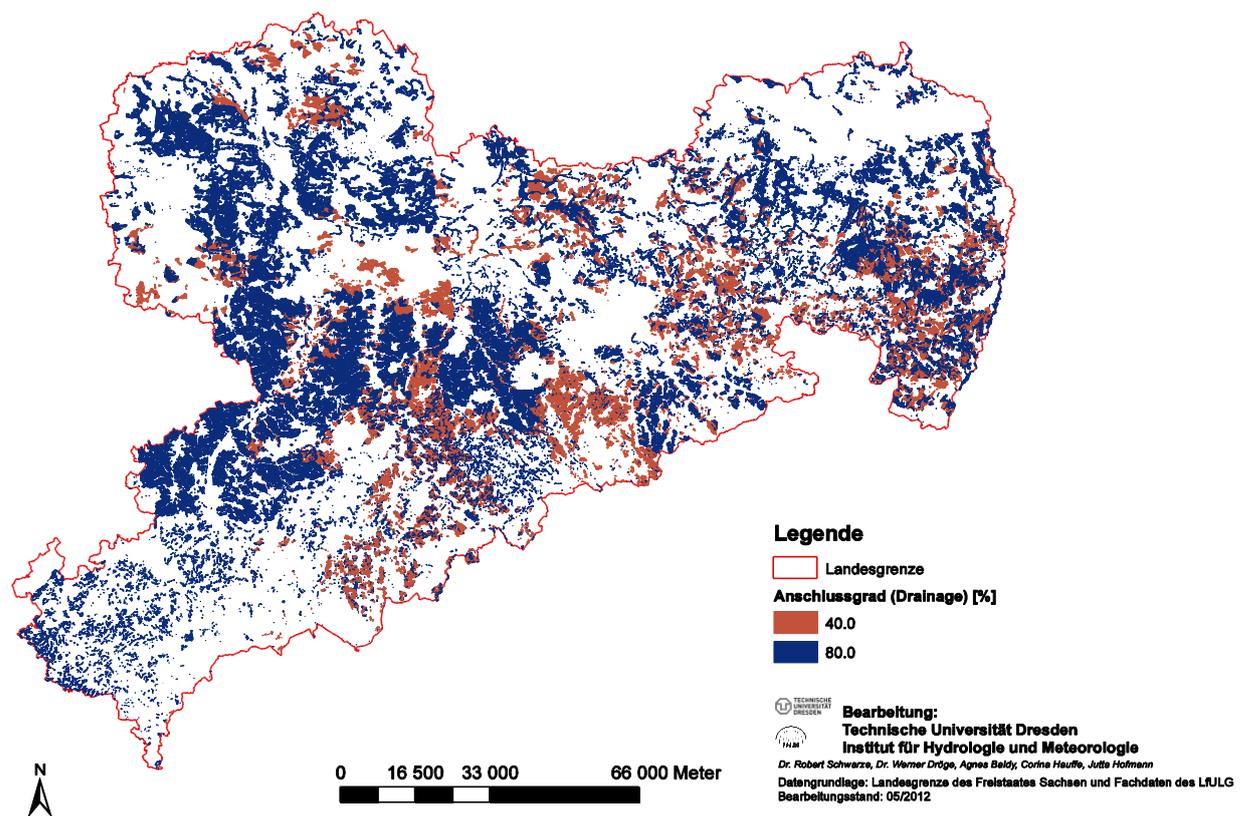


Abbildung 3: Potenzielle Drainageflächen – Darstellung des Anschlussgrades

2.8 Landnutzung

Als Datengrundlage wird das digitale Landschaftsmodell des Amtlich Topografisch-Kartografischen Informationssystems (ATKIS-DLM) genutzt. Das DLM musste vor seiner Verwendung aufbereitet werden, weil es eine Vielzahl an Objektarten aufweist, die für die sachsenweite Berechnung des Wasserhaushalts nicht benötigt werden bzw. nicht sinnvoll parametrisiert werden können. Durch eine Generalisierung wurden diese Objektarten (z. B. Brücke oder Grenzübergang) umgeschlüsselt. Sie wurden ihren Merkmalen ähnlichen Objektarten zugeordnet. Die Tabelle zur Umschlüsselung der Objektarten ist dem Anlagenband, Kap. 1.3, Tabelle A2 zu entnehmen. Weiterhin mussten auch Flächen der Objektart „4199; Fläche, z. Z. unbestimmbar“ parametrisiert werden. Ihnen wurde anhand von Satellitenaufnahmen und der TOP50 Sachsen (GeoSN 2012, Karte) eine parametrisierungsfähige Objektart zugeordnet. Details zur Bearbeitung der Landnutzungskarte werden im Anlagenband, Kap. 1.3 beschrieben.

2.9 Stadtflächen

Stadtflächen können den Wasserhaushalt durch ihren hohen Anteil versiegelter Flächen und den Anschluss an siedlungswasserwirtschaftliche Anlagen relevant beeinflussen. In der Wasserhaushaltsberechnung mit ArcEGMO nehmen größere Siedlungsgebiete eine Sonderrolle ein. Sie müssen über die Attribute Versiegelungsgrad, Anschlussgrad an die Kanalisation und Kanalisationsart (Trenn- oder Mischkanalisation) charakterisiert werden.

Die Informationen über den Versiegelungsgrad wurden aus dem „Atlas der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer“ (GEBEL et al. 2009) übernommen. Weiterhin ist der Versiegelungsgrad für die Stadt Dresden verfügbar, welcher aus der Stadtstrukturtypenkartierung Dresden (GLÖCKNER & RÜSTER 2010) herausgearbeitet worden ist. Informationen über den Anschlussgrad an die Kanalisation konnten der Karte „Anschlussgrad (gegenwärtig) an öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen in Gemeinden (Sachsen)“ (LfULG 2011b, online) entnommen werden. Über die Kanalisationsart liegen für Sachsen keine ausreichenden räumlichen Informationen vor. Weil es sich allerdings überwiegend um Mischkanalisation handelt, wurden sachsenweit alle Stadtflächen mit Mischkanalisation berechnet.

Die Zuordnung der drei oben genannten Attribute erfolgte nur für ausgewählte große Stadtflächen. Eine detaillierte Berücksichtigung aller Siedlungsflächen war wegen des außerordentlich großen Aufwandes in KliWES nicht zu bewältigen. Die Auswahl erfolgte nach den Kriterien

- Bevölkerungsdichte über 500 EWZ/km² und
- zusammenhängende Stadtfläche von mindestens 10 km².

Im Resultat wurde für 13 Städte (siehe Anlagenband, Kap. 1.4, Tabelle A3, vgl. GENESIS 2011, online) der Wasserhaushalt unter Beachtung der eingangs genannten zusätzlichen Parameter berechnet.

3 Räumliche Strukturierung

Für den Aufbau der Wasserhaushaltsmodelle wird das Untersuchungsgebiet Sachsen zunächst in Modellregionen untergliedert (Kapitel 3.1). Im Anschluss wird die Ausgrenzung von Sonderflächen (Kapitel 3.2) und die Vorgehensweise bei der Ausweisung von Modellierungseinheiten (Kapitel 3.3) behandelt. Für die automatisierte Erstellung der für ArcEGMO benötigten Modelle müssen die Modellierungseinheiten in der Projektdatenbank aufgebaut werden.

3.1 Ausweisung von Modellregionen innerhalb Sachsens

Sachsen wurde für die Berechnung des Gebietswasserhaushalts mit ArcEGMO in sieben Modellräume unterteilt. Sie entsprechen weitestgehend den großen sächsischen Flusseinzugsgebieten (Abbildung 4). Die nur kleinen Anteile an den Flusseinzugsgebieten der Saale, Wisenta, Svitavka und Eger/Ohře wurden unter der Bezeichnung „sonstige Einzugsgebiete“ zusammengefasst.

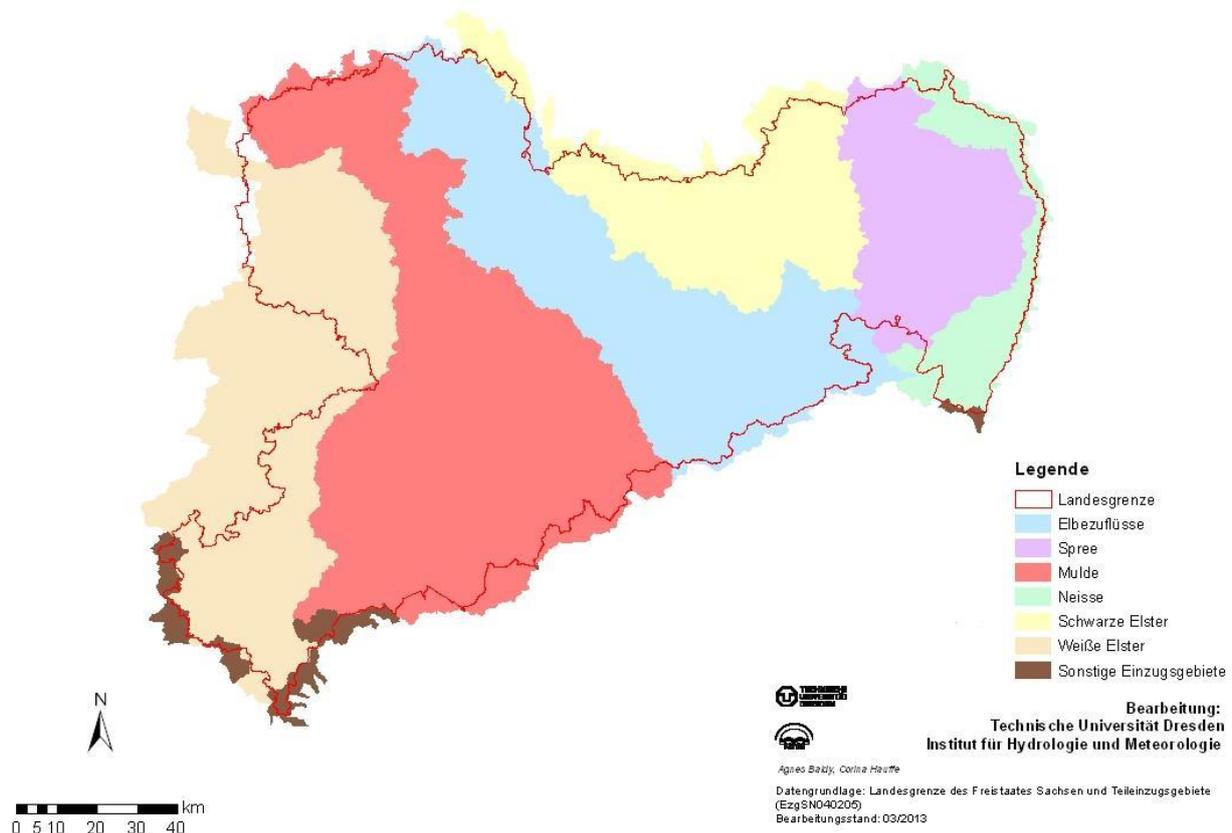


Abbildung 4: Modellregionen für KliWES

Der Berechnung des Wasserhaushalts erfolgte für alle Einzugsgebiete flächendeckend. Eine Ausnahme bildeten nur einige Sonderflächen, deren Festlegung und Abgrenzung in Kapitel 3.2 erläutert wird.

3.2 Abgrenzung von Sonderflächen in den Modellregionen

Es gibt Bereiche in Sachsen, für die eine Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen mit ArcEGMO ohne die Einbeziehung weiterer Modelle (z. B. Grundwasserströmungsmodell, hydrodynamische Modelle zur Berücksichtigung der Wechselwirkung Oberflächenwasser und Grundwasser, Bewirtschaftungsmodelle) nur eingeschränkt bzw. überhaupt nicht möglich ist. Das betrifft Flächen mit besonders starker anthropogener Beeinflussung, insbesondere durch den Bergbau, sowie Flächen mit einer ausgeprägten Beeinflussung des örtlichen Wasserhaushalts durch Wechselwirkungen mit dem Gewässer, welche in Abbildung 5 dargestellt werden.

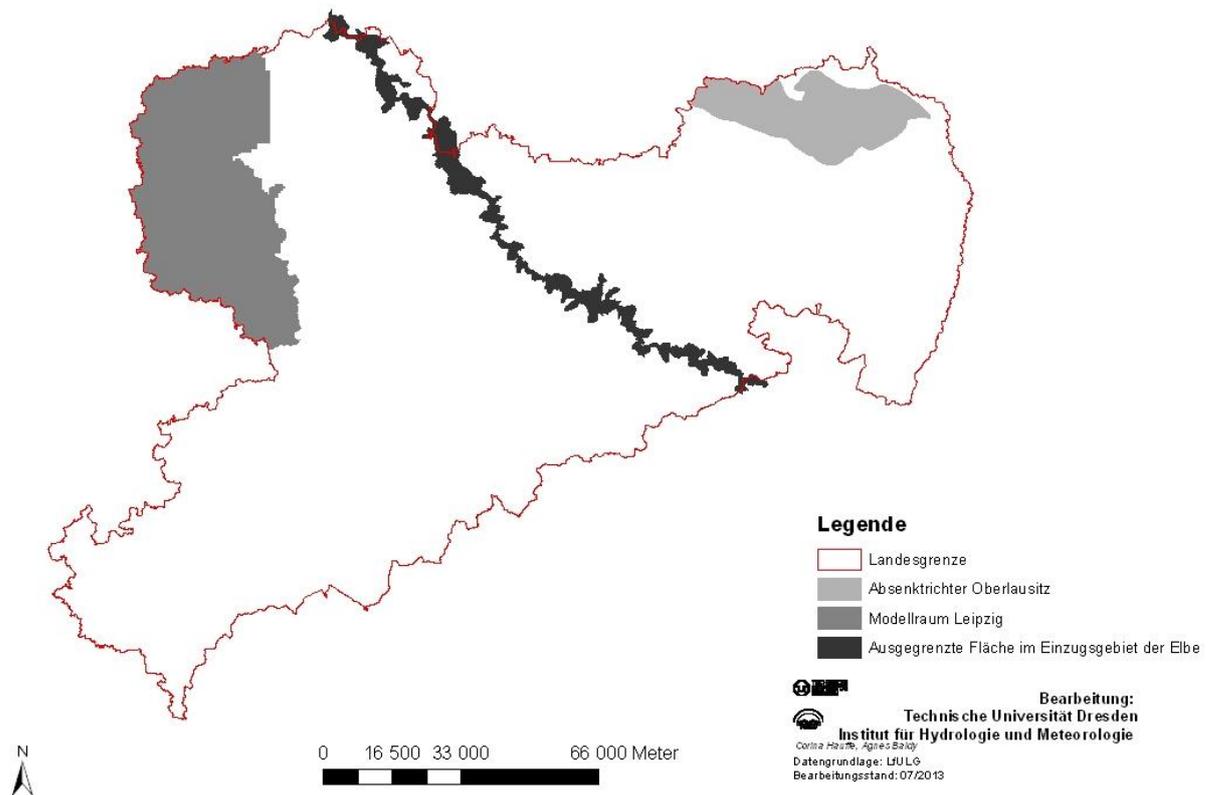


Abbildung 5: Übersicht der auszugliedernden Flächen in Sachsen

Die durch den Braunkohleabbau großräumig in Anspruch genommenen Regionen wurden in KliWES zunächst nicht explizit bearbeitet. Die Ausgrenzung dieser Flächen erfolgte über die Grenzen der Absenktrichter im Grundwasser und/oder über die Grenzen vorhandener Modelle. Für das Kohlegebiet in der Lausitzer Region liegt die Ausdehnung des Grundwasserabsenkungstrichters (LfULG 2009, Karte; Stand 2005) vor. Diese wurde für die Abgrenzung des Kohlegebietes im Lausitzer Raum herangezogen (Abbildung 5). Für das Mitteldeutsche Braunkohlenrevier um Leipzig liegt ebenfalls eine Begrenzung des Untersuchungsraumes vor, welche sich am Grundwasserabsenkungstrichter orientiert (Abbildung 5). Es ist möglich, später verfügbare Ergebnisse dieser zunächst nicht berücksichtigten Modellräume jederzeit in die Wasserhaushaltsergebnisse aus KliWES einzubinden.

Die Abgrenzung der Bergbauflächen erfolgte auf der Teileinzugsgebietsebene. Dieses Vorgehen ist für die Simulation mit ArcEGMO erforderlich, weil die Berechnung des Wasserhaushalts grundsätzlich nur für ein vollständiges Teileinzugsgebiet durchführbar ist.

Für die Überschwemmungsflächen der Elbe ist eine zuverlässige Bestimmung des Gebietswasserhaushalts mit Hilfe von ArcEGMO nicht sinnvoll, weil dieser durch die Interaktionen zwischen Abfluss in der Elbe und ihren Flussauen zu stark beeinflusst wird. Die Abgrenzung von Teileinzugsgebieten erfolgt unter der Berücksichtigung dieser Interaktionen, den Überschwemmungsflächen vom Hochwasserereignis 2002 und aus modelltechnischen Gründen.

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen werden nur für innersächsische Teileinzugsgebiete und ohne Beachtung der Sonderflächen ausgegeben. Aus diesem Grund nimmt der Ergebnisraum, welcher rund

85 % der sächsischen Gebietsfläche abdeckt, eine kleinere Fläche ein als der Bearbeitungsraum (ca. 17.300 km²).

3.3 Ausweisung von Modellierungseinheiten innerhalb der Modellregionen

Für die Berechnung des Wasserhaushalts wurden die Modellräume nach Abbildung 4 in Modellierungseinheiten unterteilt. Unter Modellierungseinheiten sind im Projekt KliWES

- Einzugsgebiete von der Quelle bis zu einem Pegel (kalibrierbar),
- Zwischeneinzugsgebiete mit Pegeln in den Oberliegern (kalibrierbar) und
- Einzugsgebiete als Quellgebiet oder Zwischeneinzugsgebiete ohne Pegel (nicht kalibrierbar)

zu verstehen. Dabei können Modellierungseinheiten sowohl aus einem als auch aus mehreren Teileinzugsgebieten bestehen.

Für die schrittweise Berechnung des Gebietswasserhaushalts ist es notwendig, die Reihenfolge, in welcher die Modellierungseinheiten simuliert werden, im Vorfeld festzulegen. Diese Berechnungsstruktur wurde ausgehend von den für die DIFGA-Analysen verwendeten Pegeln eines Flusseinzugsgebietes aufgebaut. Hinzu kamen weitere Pegel, welche über Durchflussdaten verfügen, und unbeobachtete Zwischeneinzugsgebiete.

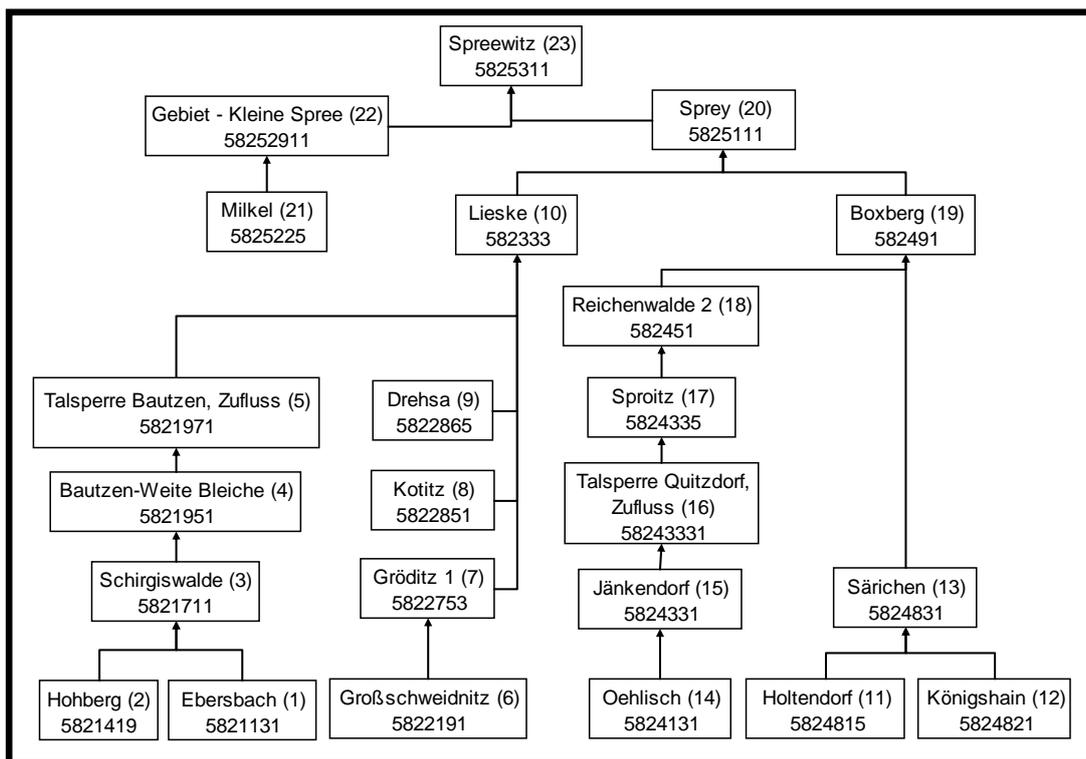


Abbildung 6: Baumstruktur zur räumlichen Gliederung der Modellierungseinheiten im Flusseinzugsgebiet Spree mit Angaben des Pegelnamens und der verwendeten GWKZ

Als Beispiel ist die räumliche Strukturierung des Modellraumes Spree in Modellierungseinheiten in der Abbildung 6 und Abbildung 7 zu sehen.

Abbildung 6

Abbildung 6 zeigt die Baumstruktur, welche die Berechnungsreihenfolge wiedergibt. Daraus geht hervor, dass nicht ausschließlich existierende Pegel für die Abgrenzung von Modellierungseinheiten verwendet werden, sondern auch fiktive Pegel (Pseudo-Pegel) eingeführt worden sind. Im Fall des Flusseinzugsgebietes der Spree war die Einführung eines solchen Pseudo-Pegels (Gebiet 22 – Kleine Spree) notwendig. Die hier vorgenommene Aufteilung einer Modellierungseinheit in „nicht tagesbaubeeinflusst“ und „tagesbaubeeinflusst“ ist für die Darstellung der Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung erforderlich.

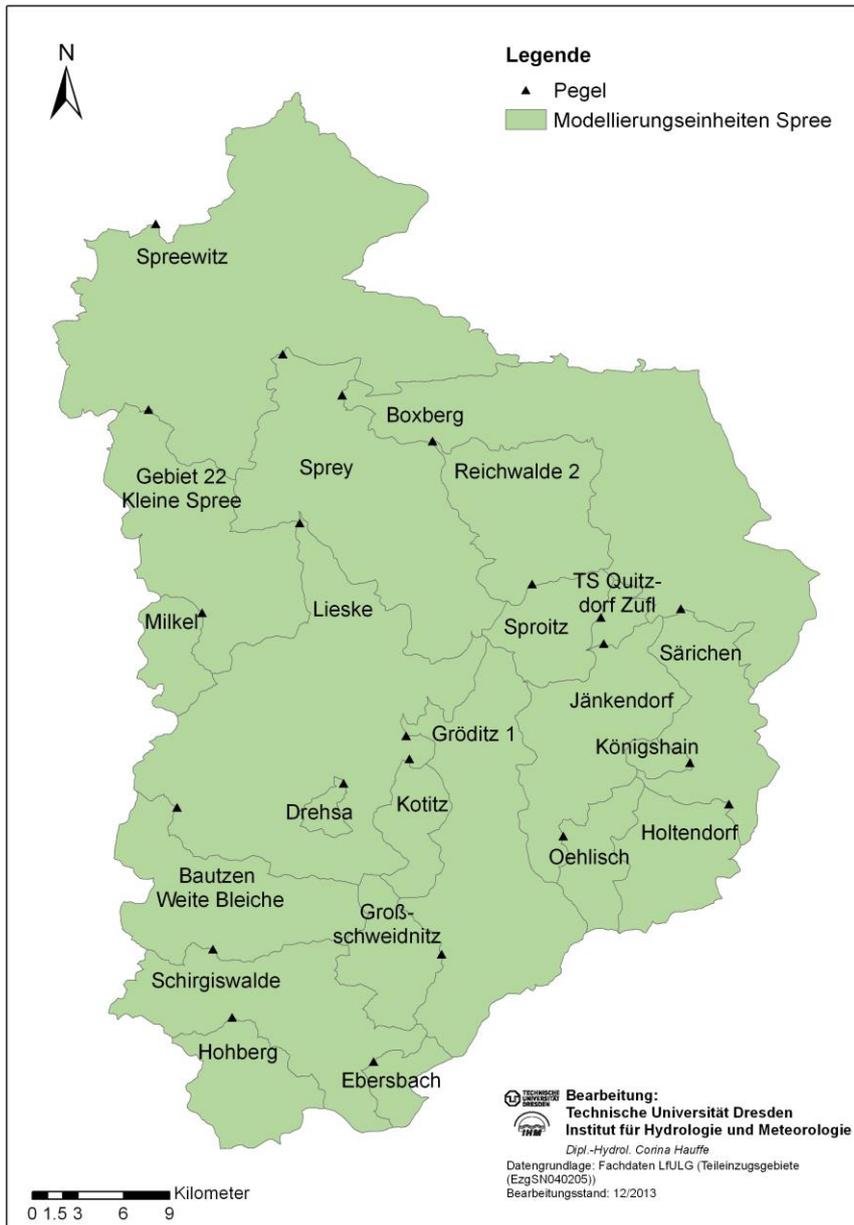


Abbildung 7: Räumliche Strukturierung des Flusseinzugsgebietes Spree

4 Wasserhaushaltsmodell

Im Rahmen eines umfangreichen Modelltests wurden vier, prinzipiell für die Anwendung in KliWES geeignete Modelle anhand definierter, unterschiedlich gewichteter Testkriterien detailliert verglichen und bewertet. Im Ergebnis des Modelltests wurde ArcEGMO als am besten geeignet für die Fragestellung ausgewählt und für die Berechnung des Wasserhaushalts in Sachsen bestimmt (SCHWARZE et al. 2010 a).

4.1 Modellsystem ArcEGMO

Das Modellsystem ArcEGMO wurde durch das Büro für angewandte Hydrologie Berlin (BAH) entwickelt. Es ist GIS-basiert und modular angelegt (Abbildung 8). Zudem ist das Modellsystem ArcEGMO offen angelegt, so dass an definierten Schnittstellen andere Modelle eingebunden werden können. „ArcEGMO[®] ist eine hydrologische Toolbox auf der Basis eines Mehr-Ebenen-Modellansatzes in Weiterentwicklung des von BECKER & NEMEC (1987) vorgeschlagenen Zwei-Domänen-Konzeptes. Für jede Modellebene wird entsprechend der räumlichen Variabilität der prozessbestimmenden Raumeigenschaften eine spezifische Raumgliederung angewendet. Die dominanten Eigenschaften sind bei den vertikalen Prozessen die Landnutzung/Vegetation sowie die Bodentypen in Verbindung mit der Topografie. Die lateralen Prozesse werden hingegen primär durch die Topografie und die hydrogeologischen Bedingungen im Untergrund bestimmt“ (LfULG 2011). Weitere Informationen zum Modellsystem ArcEGMO sind in PFÜTZNER et al. (2007) und unter BAH (2009, online) zu finden.

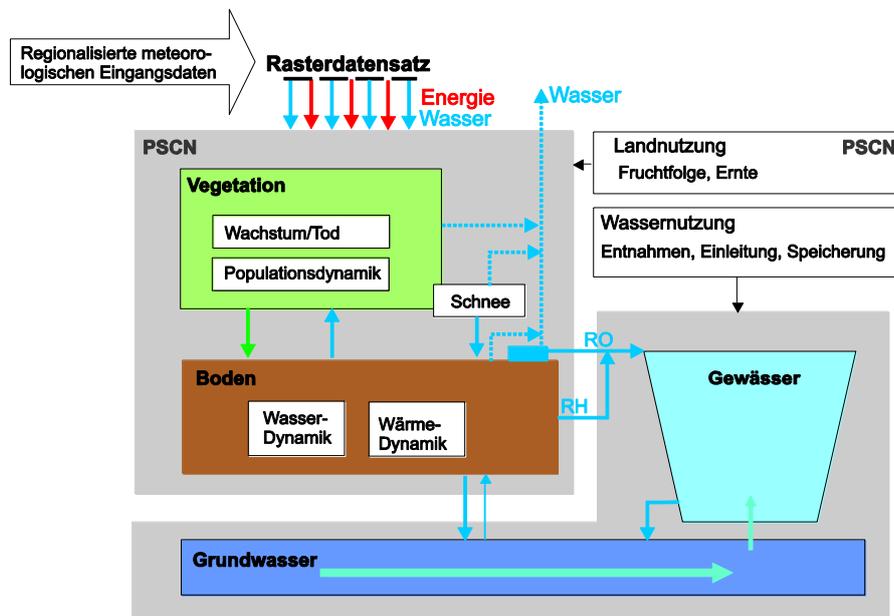


Abbildung 8: Konzept des Modellsystems ArcEGMO (nach KLÖCKING 2009)

Im Modell sind zahlreiche Modellansätze integriert, die vom Nutzer für die jeweilige Aufgabenstellung gewählt werden können. Folgende Modellansätze werden für die Umsetzung des KliWES-Projekts verwendet (PFÜTZNER et al. 2007; KLÖCKING 2012):

- Schneedynamik: Schneemodell nach KOITZSCH & GÜNTHER (1990)
- Potenzielle Verdunstung: Grasreferenzverdunstung

- Pflanzenwachstum: statisches und dynamisches Wachstumsmodell
 - Nadelwald, Grünland, Gewässer, urbane Flächen, Moor, vegetationslose Flächen: statischer Ansatz
 - Mischwald, Laubwald, Acker, Sonderkulturen: dynamischer Ansatz
- Interzeption: abflussloser Einzelspeicher mit Überlauf
- Infiltration: Ansatz nach HOLTAN (1961)
- Bodenwasserdynamik: überarbeitetes Mehrschicht-Kapazitätsmodell nach KOITZSCH (1977) und GLUGLA (1969) (KLÖCKING, 2003)
- Grundwasserabfluss: SLOWCOMP (SCHWARZE et al. 1999)
- Direktabfluss: Ansatz der Kinematischen Welle
- Fließprozesse im Gewässerbett: Einzellinearspeicheransatz

Vor der Entscheidung über die verwendeten Modellansätze wurden diese getestet. Hier wurde das Augenmerk vor allem auf das Pflanzenwachstumsmodell gelegt (siehe Anlagenband, Kap. 2.1.1). Aus dem Modell werden im Ergebnis der dynamische und statische Ansatz in Abhängigkeit des Landnutzungstyps genutzt. Für die beiden einfachen Ansätze sind die notwendigen Parameter sachsenweit ermittelbar, sodass sie für den Untersuchungsraum KliWES angewendet werden können.

ArcEGMO musste an die Anforderungen des KliWES-Projekts angepasst werden. In diesem Zusammenhang wurde eine Schnittstelle zur Nutzung von Rasterdatensätzen (s. Kapitel 2.2) geschaffen sowie das Grundwassermodell SLOWCOMP implementiert.

4.2 Aufbau der Modelle

Der Aufbau von Wasserhaushaltsmodellen benötigt modellspezifische Daten, die auf Basis von Geodaten (Kapitel 2.3 bis 2.9), hydrologischen (Kapitel 2.1) und meteorologischen Daten (Kapitel 2.2) erarbeitet werden. Aufgrund der sachsenweiten Anwendung des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO ohne Berücksichtigung von stark anthropogen beeinflussten Gebieten (Kapitel 3.2), ist eine Automatisierung bestimmter Vorgänge notwendig. Pro Modellierungseinheit muss eine spezielle Verzeichnisstruktur angelegt werden, die ArcEGMO als Projektverzeichnis für die Bearbeitung benötigt. Hierfür sind die notwendigen Parametertabellen für die Ebenen Teileinzugsgebiet und Hydrotop sowie für das Fließgewässernetz und zugehöriges Knotenschema (siehe Anlagenband, Kap. 2.2) anzugeben.

4.2.1 Ebene Modellierungseinheit

Die Bedeutung der Modellierungseinheiten wurde bereits in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Bildung der Modellierungseinheiten erfolgt automatisch anhand einer Konstruktionsvorschrift und ist für den Aufbau des Parametermodells notwendig. Die wichtigsten Punkte der Konstruktionsvorschrift, die auf der Beschreibung der Modellierungseinheiten basiert, werden im Folgenden kurz erläutert. Besitzt die Modellierungseinheit einen Pegel, muss dieser auf dem Schnittpunkt des Gebietsauslasses des Fließgewässers mit der Teileinzugsgebietsgrenze liegen. Die amtlichen Pegelkoordinaten, Layer der Teileinzugsgebiete und Fließgewässer korrespondieren nicht immer miteinander. Aus diesem Grund müssen die Pegelkoordinaten für die Berechnung ggf. manuell angepasst werden. Besitzt die Modellierungseinheit keinen Pegel, muss stattdessen der Auslass des Einzugsgebietes als virtueller Pegelpunkt verwendet werden. Handelt es sich bei der Modellierungseinheit um

ein Zwischeneinzugsgebiet, so wird bei der Wasserhaushaltsberechnung der Zufluss aus dem Oberlieger als Input verwendet.

4.2.2 Fließgewässer und Knotenschema

Nach der Aufbereitung des Fließgewässernetzes entsprechend den Anforderungen nach Kapitel 2.3 lag ein geroutetes Gewässernetz für das Gesamteinzugsgebiet sowie ein Knotenschema vor, welches Anfangs- und Endpunkte von Fließabschnitten beinhaltet. Das Knotenschema dient als Bezugsquelle für die Zuordnung von Ein-, Aus- und Überleitungen sowie zur Zuordnung von Pegeln und Stauanlagen. Das Knotenschema ist in Abbildung 9 beispielhaft für das Einzugsgebiet bis zum Pegel Zescha dargestellt.

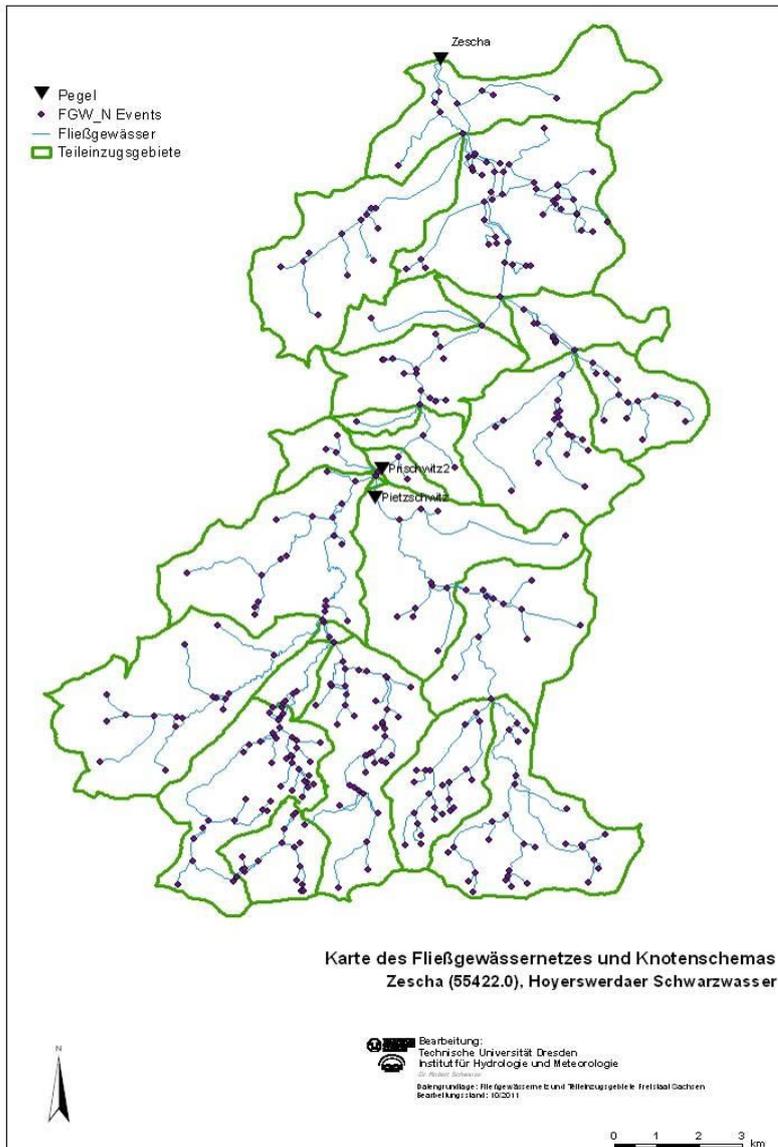


Abbildung 9: Knotenschema des Gewässernetzes am Beispiel Zescha

4.2.3 Ebene Hydrotople

Ein Hydrotople ist die kleinste bei der Modellierung berücksichtigte Raumeinheit, die hinsichtlich ihrer hydrologischen Eigenschaften als quasi homogen betrachtet wird. Mehrere Hydrotople setzen sich zu einem Teileinzugsgebiet zusammen.

Im Rahmen von KliWES wurden bei der Hydrotopbildung folgende Eigenschaften berücksichtigt: Landnutzungstyp nach ATKIS (Kapitel 2.8), Bodenart (Kapitel 2.5), hydrogeologische Einheit und zugehörige SLOW-COMP-Parameter, mittlerer Grundwasserflurabstand (Kapitel 2.6), mittlere Geländehöhe, Exposition, mittleres Geländegefälle, Zusatzinformationen in den Stadtflächen (Kapitel 2.9) sowie Zusatzinformationen auf Acker- und Grünflächen über Drainagen (Kapitel 2.7). Des Weiteren weisen die Hydrotope Informationen über Flächengröße, Fließgewässernetz und Teileinzugsgebiet, in welchem sie sich befinden, auf.

Die mit einem Test (siehe Anlagenband, Kap. 2.3) ermittelte, für die Hydrotopausweisung hinreichende Flächenmindestgröße eines Hydrotops beträgt $0,1 \text{ km}^2$.

4.3 Der Begriff Grundwasserneubildung im Projekt KliWES

Weil die Berechnung der Grundwasserneubildung GWN eine wesentliche Aufgabe im Projekt KliWES darstellt, wird nachfolgend auf den Begriff selbst sowie auf die Simulation dieser Wasserhaushaltsgröße und die vorhandenen Modellrestriktionen in ArcEGMO eingegangen.

Um den Begriff der Grundwasserneubildung zu definieren, muss vorab geklärt werden, was unter Grundwasser zu verstehen ist. Die DIN 4049-1 (1992) definiert das Grundwasser als „... unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich oder nahezu ausschließlich von der Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird“. Grundwasser ist i. d. R. dauerhaft vorhanden. Die Neigung der Grundwasseroberfläche bedingt durch Differenzen in der Grundwasserstandshöhe erzeugt ein hydraulisches Potenzial. Dadurch fließt das Grundwasser in den Hohlräumen des Gebietsuntergrundes. Grundwasser kann infolgedessen punktuell oder diffus an der Geländeoberfläche austreten (Quellen) oder unmittelbar in Oberflächengewässer hineinströmen. In diesen Fällen entsteht Grundwasserabfluss. Im deutschen Wasserrecht beschreibt das Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2009) Grundwasser als „... das unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht“. Danach muss als Sonderform auch das Stauwasser zum Grundwasser gerechnet werden. Stauwasser wird an sich nur in der Bodenkunde verwendet. Es entsteht, wenn die vertikale Versickerung durch gering wasserdurchlässige Schichten z. B. aus Schluff oder Ton bereits im Boden behindert wird. Stauwasser bildet sich primär nach länger anhaltenden Niederschlägen oder infolge der Schneeschmelze in Zeiträumen mit geringer Evapotranspiration (Winterhalbjahr). In sommerlichen Trockenperioden mit gleichzeitig hohem Pflanzenwasserbedarf und einer Lage der stauenden Schicht kleiner als ca. 130 cm unter Geländeoberkante verschwindet Stauwasser im Gegensatz zum permanent vorhandenen Grundwasser in tieferen Schichten meist. Liegt die Stausohle tiefer, wird das Wasser ggf. nicht mehr komplett durch die Vegetation gezehrt und ist dann ständig vorhandenes Grundwasser. Als Schichtenwasser wird der Abfluss des Stauwassers aus dem meist oberflächennahen, vom Hauptgrundwasserleiter unabhängigen Grundwasserkörper bezeichnet. Nicht zum Grundwasser zählen

- hygrokopisches, durch Oberflächenspannung und Kapillareffekte gebundenes unterirdisches Wasser in der ungesättigten Bodenzone (Bodenfeuchte, Haftwasser) und
- Sickerwasser in der ungesättigten Bodenzone.

Grundwasser wird in Hohlräume der Erdrinde gespeichert bzw. bewegt sich in diesen. Diese werden nach der geologischen Beschaffenheit des Untergrunds unterteilt in

- Poren (Klastische Sedimente und Sedimentgesteine wie z. B. Sand, Kies, Schluff),

- Klüfte (Festgesteine, wie z. B. Granit, Quarzit, Gneis, Sandsteine) oder
- durch Lösung entstandene große Hohlräume (Karst z. B. Kalkstein).

Die jeweils zugehörigen Grundwässer werden unterschieden in Porengrundwasser, Kluftgrundwasser und Karstgrundwasser. Mischformen sind möglich, wie z. B. Kluft-/Porengrundwasser in porösen Festgesteinen (z. B. bestimmte Sandsteine).

Die Grundwasserneubildung (GWN) wird gemäß DIN 4049-3 (1994) als "Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser" definiert. Wasser, welches aus Oberflächengewässern versickert, stellt ggf. eine weitere Quelle für die GWN dar. Gemäß HAD (2003) „... ist die Grundwasserneubildung der Wasserüberschuss, der vom korrigierten Niederschlag nach Abzug der verdunstenden und schnell abfließenden Anteile übrig bleibt. Im langjährigen Mittel entspricht dieser Rest dem aus dem Grundwasserspeicher stammenden Basisabfluss (grundwasserbürtiger Abfluss im Oberflächengewässer). Die Abbildung 10 zeigt die wesentlichen beteiligten Prozesse.

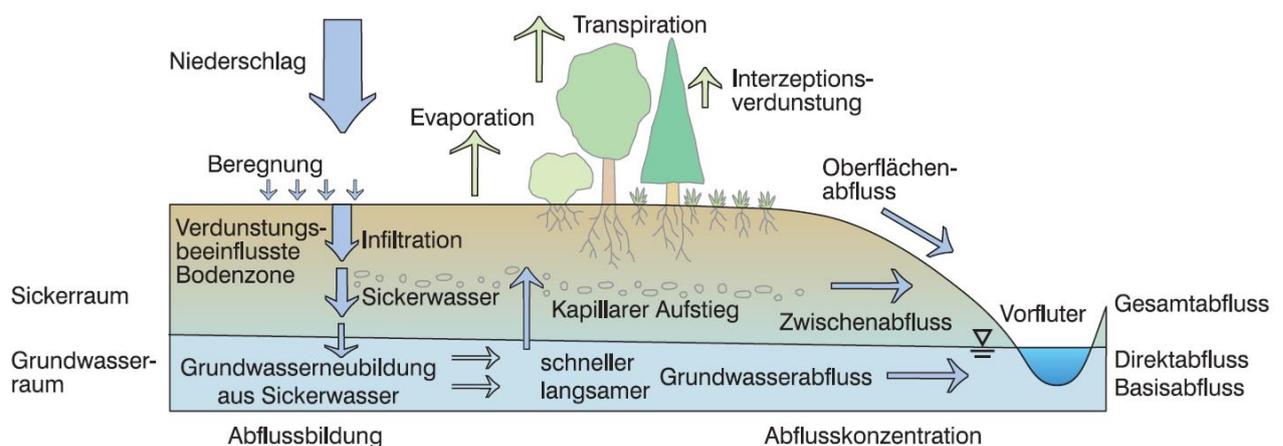


Abbildung 10: Wesentliche an der Grundwasserneubildung beteiligte Prozesse (Quelle: HAD 2003)

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen wird primär von folgenden Faktoren bestimmt:

- Klima (Menge und Verteilung des Niederschlags, Jahrgang der Evapotranspiration, Schneeschmelze)
- Boden (Infiltrationsvermögen, Wasserleitfähigkeit, Nutzbare Feldkapazität, Wassergehalt)
- Grundwasserflurabstand (kapillarer Aufstieg, Zehrung)
- Nutzungsart (Wald, Grünland, Acker etc.) und Nutzungsform (Nutzungsdichte, Ausprägungen wie Alter oder Höhe der Vegetation)
- Versiegelungsgrad

Nach dieser Einleitung stellt sich die Frage, wie die GWN unter Verwendung der Ergebnisse aus KliWES konkret zu ermitteln ist. Die Prozesse im Sickerraum nach Abbildung 10 berechnet das Bodenwasserhaushaltsmodell von ArcEGMO. Bezüglich der Festlegung der GWN ist die berechnete Versickerung aus der Bodenzone (Perkolations) die relevante Modellausgabe. Diese muss reduziert werden um den kapillaren Aufstieg, durch den Wasser aus dem Grundwasserraum zurück in den Bereich der Bodenfeuchte gelangt. Als Saldo ergibt sich für eine Berechnungsfläche (Hydrotop) zunächst eine $GWN = \text{Versickerung} - \text{kapillarem Aufstieg}$, welche den Grundwasserabfluss speist. Beim Übergang von der einzelnen Berechnungsfläche zum

Einzugsgebiet muss mit der Zehrung ein weiterer Prozess berücksichtigt werden. Zehrung tritt auf Flächen mit oberflächennahem Grundwasser auf. Ist das Grundwasser so nahe der Oberfläche, dass in Abhängigkeit von den anstehenden Böden der kapillare Aufstieg bis in den Wurzelraum der Pflanzen reicht, speist der Kapillaraufstieg aus dem Grundwasser zusätzlich zum pflanzenverfügbaren Wasser in der Bodenzone unmittelbar die Pflanzenverdunstung. Auf grundwassernahen Berechnungsflächen erreicht die reale Verdunstung dadurch Werte, die nahe bis gleich der potenziellen Verdunstung sind. In ArcEGMO wird dieses Phänomen so umgesetzt, dass auf grundwassernahen Berechnungsflächen zu jedem Zeitpunkt potenzielle Verdunstung angenommen wird. Das dafür notwendige Wasser entstammt dem Bodenwasser und der Zehrung aus dem Grundwasser. Das bedeutet, dass auf grundwassernahen Flächen der Saldo aus Versickerung und kapillaren Aufstieg/Zehrung u. U. kleiner als Null ist. Diese „negative Grundwasserneubildung“ wird ausgeglichen, indem der Grundwasserabfluss aus grundwasserfernen Flächen beim Passieren grundwassernaher Flächen gezehrt wird, bis der negative Saldo ausgeglichen ist.

In der Betrachtungsebene Einzugsgebiet errechnet sich die GWN für das Gesamtgebiet aus der Summe der Versickerung minus den kapillaren Aufstieg über alle Berechnungsflächen minus der Summe der direkten Verdunstungszehrung aus dem Grundwasser auf allen grundwassernahen Berechnungsflächen. Diese Grundwasserneubildung speist den Grundwasserabfluss RG aus dem betrachteten Einzugsgebiet. Wie Abbildung 10 zeigt, wird der Grundwasserabfluss in verschiedene Abflusskomponenten zerlegt. Die Ursachen für die Entstehung von Abflusskomponenten liegen in der Heterogenität des unterirdischen Abflussraumes. So herrschen in der Zersatzzone des Festgesteins andere geohydraulische Verhältnisse als in den Klüften und Poren des Gesteins. Beim Übergang vom Boden zum Festgestein ist häufig mit Stauwasser zu rechnen. Eine vertikale Abfolge von Grundwasserleitern und Grundwassernichtleitern hat i. d. R. die Ausbildung von mehreren übereinanderliegenden Grundwasserstockwerken (Horizonte) zur Folge. Diese nur beispielhaft genannten Phänomene führen im Grundwasserraum dazu, dass die GWN auf unterschiedlich schnell abfließende Grundwasserabflussanteile aufgeteilt werden muss. Zur Berechnung des Abflusses und seiner Anteile kommen mathematische Grundwassermodelle zum Einsatz. Dazu werden physikalisch begründete analytische oder numerische Grundwasserströmungsmodelle oder konzeptionelle Grundwasserabflussmodelle genutzt. Die sachsenweite Anwendung von Strömungsmodellen war wegen des hohen Aufwandes und der notwendigen Daten und Informationen nicht umsetzbar. Im Projekt KliWES wurde deshalb, wie auch allgemein üblich bei großräumigen Wasserhaushaltsuntersuchungen, ein Grundwasserabflussmodell genutzt. Zum Einsatz kam das Modell SLOWCOMP (SCHWARZE et al. 1999 a; HENNIG & SCHWARZE 2001). Für dieses existiert ein physikalisch begründetes Parametermodell, mit dem im Rahmen der Arbeiten zur KliWES Säule A sachsenweit die benötigten Modellparameter (Rezessionskonstanten, Aufteilungsparameter und Speicherraumkennwerte) ermittelt werden konnten. Es ist direkt in das Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO für die Berechnung der unterirdischen Abflusskomponenten implementiert.

SLOWCOMP unterteilt den aus der Grundwasserneubildung entstehenden Grundwasserabfluss RG in eine langsame Komponente RG2 und eine schneller abfließende Komponente RG1. Beide entstammen gemäß den genannten Definitionen dem Grundwasser, sodass ganz allgemein gilt:

$$GWN = RG1 + RG2$$

RG1 umfasst im Festgesteinsbereich primär Stauwasser, Schichtenwasser, Abfluss aus sehr gut und schnell drainablen Störungs- und Zersatzzonen, Karstabfluss etc. Typisch für RG1 ist das häufige und regelmäßige weitgehende Versiegen dieser Komponente in sommerlichen Trockenperioden. RG2 ist dagegen eine Komponente, die in Trockenwetterabflusszeiten oftmals als einzige verbliebene noch zum Abfluss im Oberflächengewässer führt. RG2 entstammt im Wesentlichen dem Kluft- und/oder Porenraum und ist durch dessen Spei-

chervermögen und geohydraulische Eigenschaften in Menge und Abflussverhalten geprägt. Hinsichtlich einer Bewirtschaftung verkörpert RG2 ein stabiles grundwasserbürtiges Dargebot.

Für den Lockergesteinsbereich kann gezeigt werden, dass RG1 und RG2 einem gemeinsamen Grundwasserherkunftsraum entstammen. Neben diesen für den Grundwasserabfluss aus dem für das Gebiet maßgeblichen Hauptgrundwasserleiter sind auch im Lockergesteinsbereich insbesondere in der Komponente RG1 (zeitweilig) Anteile von Abflüssen aus Stau- und Schichtenwasser möglich. RG1 versiegt im Lockergesteinsbereich deutlich seltener und kürzer als im Festgesteinsbereich.

Für die Festlegung der nutzbaren Menge an Grundwasser ist somit nicht nur die Grundwasserneubildung, sondern vor allem das stabil verfügbare und ggf. bewirtschaftungsfähige Grundwasserangebot entscheidend. So existieren in Sachsen viele Bereiche insbesondere in den Mittelgebirgen mit hohen klimatisch bedingten Grundwasserneubildungsraten. Häufig liegt aber nur ein geringes Speichervermögen im Kristallin des Untergrunds vor, welches einerseits zu relativ hohen grundwasserbürtigen Abflüssen in den Neubildungsperioden führt und andererseits sehr schnelle Rückgänge des Grundwasserabflusses in Trockenzeiten verursacht. Das wasserwirtschaftlich nutzbare Grundwasserangebot kann daher nicht zwangsläufig mit der Grundwasserneubildung gleichgesetzt werden.

Das Wasserhaushaltsportal Sachsen gibt sowohl in der Säule A (DIFGA-Ergebnisse) als auch in der Säule B (Ergebnisse verschiedener mittels ArcEGMO berechneter Wasserhaushaltsszenarien) anstatt der Grundwasserneubildung GWN die Abflusskomponenten RG1 und RG2 sowie die Summe aus beiden Größen aus.

Auch wenn unter Beachtung der genannten Definitionen für Grundwasser und Grundwasserneubildung sachsenweit an sich $GWN = RG1 + RG2$ gilt, sollte je nach Beschaffenheit des geologischen Untergrundes die Grundwasserneubildung für wasserwirtschaftliche Fragestellungen regional unterschiedlich bestimmt werden.

Im Allgemeinen sollte im Festgesteinsbereich für die Grundwasserneubildung nur die langsame Grundwasserkomponente RG2 verwendet werden. Der Grund ist, dass die Komponente RG1 nur temporär verfügbar ist, sehr starken Schwankungen unterliegt und in den Sommermonaten nur episodisch auftritt bzw. häufig komplett versiegt.

Für den Lockergesteinsbereich wird unter der Grundwasserneubildung die Summe aus der schnellen und der langsamen Grundwasserkomponente (RG1 + RG2) verstanden, weil sie in Porengrundwasserleitern überwiegend einem Herkunftsraum/Aquifer entstammen. Übergangsbereiche zwischen beiden Verfestigungen müssen hinsichtlich der Grundwasserneubildung im Einzelfall geprüft werden. Zur Bestimmung der Grundwasserneubildung wird die folgende Konvention vorgeschlagen:

- Das gesuchte Gebiet befindet sich im Lockergesteinsbereich: $GWN = RG1 + RG2$
- Das gesuchte Gebiet befindet sich im Festgesteinsbereich: $GWN = RG2$

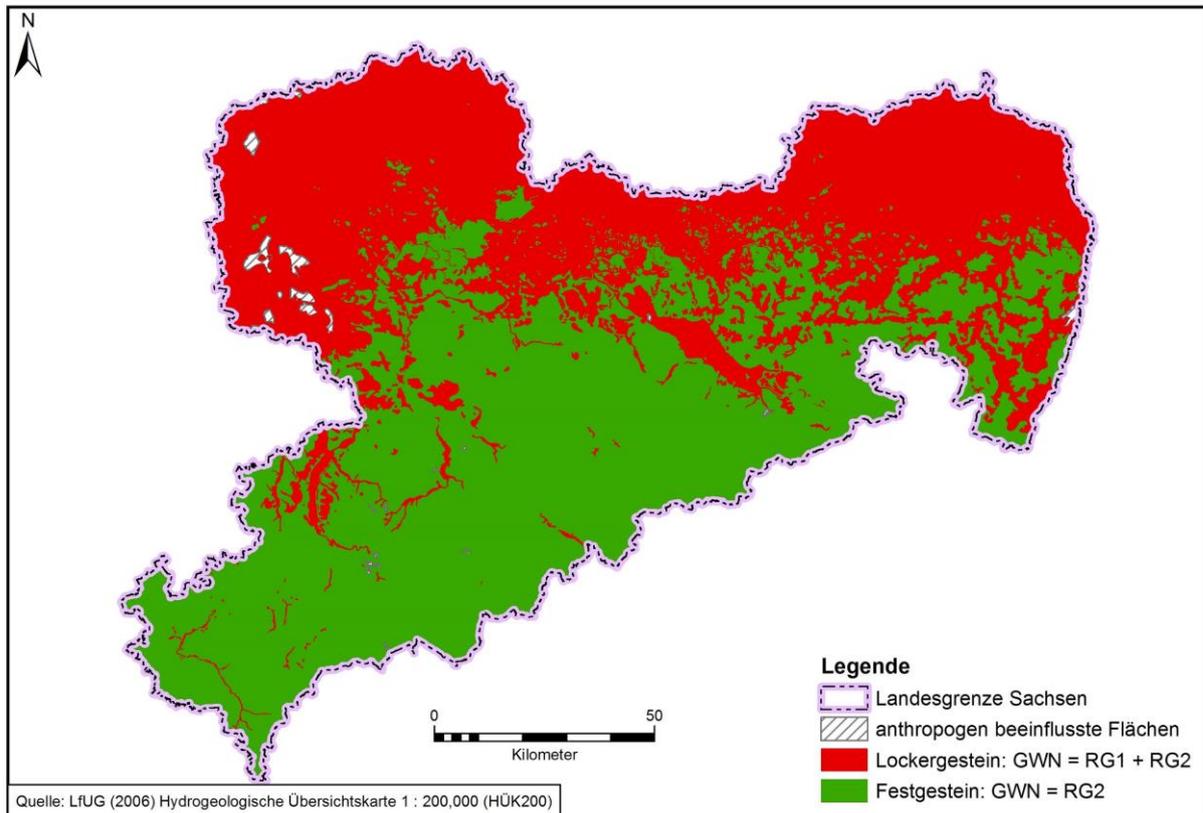


Abbildung 11: Lage der Locker- und Festgesteinsbereiche in Sachsen als Grundlage zur Anwendung der Grundwasserneubildungskonvention

Informationen, ob das gesuchte Gebiet im Locker- oder Festgesteinsbereich liegt, können der Abbildung 11 oder den zum Download zur Verfügung gestellten Shapefiles entnommen werden.

Die Konvention ist eine begründete Empfehlung. Sie entbindet nicht davon, ihre Sinnfälligkeit im konkreten Fall in Abhängigkeit von den Gebietseigenschaften und der konkreten Aufgabenstellung zu überprüfen und ggf. die GWN abweichend festzulegen.

5 Kalibrierungs- und Validierungsstrategie

Unter der Kalibrierungs- und Validierungsstrategie ist die Vorgehensweise zu verstehen, nach der eine optimale und schnelle Kalibrierung sowie Validierung von Modellparametern erfolgen kann. Generell dient die Kalibrierung der Anpassung der Modellparameter, die die hydrologischen Prozesse im Untergrund und an der Oberfläche entsprechend den im Untersuchungsgebiet vorzufindenden Gegebenheiten wiedergibt (GRUNDMANN 2010). Eine Kalibrierung des Modells an gemessenen Daten ist notwendig, weil nicht alle physikalischen Parameter flächendeckend in ausreichender Genauigkeit verfügbar sind. Beispielsweise lässt sich die Makroporosität zwar prinzipiell aus Bodenkarten ableiten, die resultierenden Werte sind aber zu ungenau, um die hydrologischen Prozesse realistisch wiederzugeben. Des Weiteren enthält das Modell konzeptionelle Parameter, die nicht oder nur punktuell durch Messungen zugänglich sind. Ein Beispiel hierfür ist die Verduns-

tungskorrektur ET_korr oder der Aufteilungsfaktor SMAX, welcher die Perkolation aus der Bodenzone auf den schnellen und langsamen Grundwasserspeicher aufteilt.

Bevor mit der Kalibrierung der Modelle begonnen werden kann, muss eine Sensitivitätsanalyse ausgewählter Modellparameter durchgeführt werden. Ausführungen hierzu sind dem nachfolgenden Kapitel zu entnehmen.

5.1 Sensitivitätsanalyse ausgewählter Modellparameter von ArcEGMO

Viele Parameter in ArcEGMO besitzen Schwankungsbreiten, die sich aus dem angewandten Verfahren ergeben. Es gibt einerseits die Gruppe konzeptioneller Parameter, die keine unmittelbare physikalische Entsprechung besitzen und daher a priori nicht genau bestimmt werden können. Als Beispiel sind die Parameter zur Schneeberechnung (Tagesgradverfahren) zu nennen. Demgegenüber steht die Gruppe zwar physikalisch begründeter, aber zeitlich und örtlich hoch variabler Parameter. Beispielsweise können Bodenparameter am Einzelstandort gemessen werden. Bereits im Feldmaßstab gibt es aber Schwankungen, die bei einem Modell-aufbau berücksichtigt werden müssen. Für die Modellkalibrierung ist es nur sinnvoll, solche Parameter gegenüber Standardwerten zu verändern, die eine signifikante Reaktion in interessierenden Ausgabegrößen produzieren, also sensitiv sind. Im Anlagenband, Kap. 3 sind die untersuchten Parameter mit ihren Spannweiten und das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse dargestellt.

Die Grundlage der durchgeführten Sensitivitätsanalyse ist die Variation einzelner Parameter, wobei alle anderen Parameter konstant bleiben. Als Beispielgebiet wird das Hoyerswerdaer Schwarzwasser bis zum Pegel Zescha genutzt. Das Gebiet ist 181 km² groß und liegt im Einzugsgebiet der Schwarzen Elster.

Im Ergebnis der Analyse konnten einige sehr sensitive Parameter ermittelt werden, die sich für die Modellkalibrierung eignen. Hierbei handelt es sich um die Parameter ET_korr (Verdunstungskorrektur), mpft, mpfb und zmax (Makroporositätsparameter) sowie die Formparameter C und D, die SMAX (Aufteilungsparameter der Perkolation) einen Jahresgang aufprägen. SMAX wird im Modell DIFGA als SG1grenz bezeichnet. Weitere Details dazu finden sich in Kapitel 5.3.

5.2 Allgemeines zur Kalibrierung

Die Grundidee der Kalibrierung eines hydrologischen Modells ist, die noch unbekannt Parameter so zu bestimmen, dass die Übereinstimmung zwischen verfügbaren Messwerten und den Ergebnissen des Modells optimal wird. Die Größen, die hier bestmöglich zur Übereinstimmung gebracht werden, werden Zielfunktionen genannt. Die Wahl der Zielfunktionen richtet sich im Allgemeinen nach den verfügbaren Messdaten. Als Parameterraum bezeichnet man die Menge jener Intervalle, innerhalb derer die Parameter bei der Optimierung schwanken dürfen. Die Intervallgrenzen sollen dabei sicherstellen, dass die Optimierung physikalisch sinnvolle Werte ergibt. Die Bestimmung der optimalen Parameter erfolgt durch Minimierung der Abweichung zwischen den gemessenen und den durch das Modell berechneten Werten einer Zielfunktion. Die Quantifizierung dieser Abweichung erfolgt durch so genannte Gütemaße. Dies sind Größen, die mit Hilfe numerischer Optimierungsverfahren minimiert werden müssen.

5.3 Der Parameterraum

Auf Basis der Sensitivitätsanalyse (siehe Anlagenband, Kap. 2) wurden folgende Parameter zur Kalibrierung ausgewählt: ET_korr (Verdunstungskorrektur), Makroporosität und SMAX (Aufteilungsparameter der Perkolation). Optimiert werden nicht diese Parameter selbst, sondern vier Korrekturfaktoren C, D, B und E. Dies wird im Folgenden kurz diskutiert:

1. SMAX: Die Analyse der DIFGA-Ergebnisse hat gezeigt, dass die Aufteilung der Perkolation aus der Bodenzone in eine schnelle und langsame Grundwasserabflusskomponente einer starken jahreszeitlichen Schwankung unterliegt. Im Allgemeinen ist die langsame Komponente in den Wintermonaten im Vergleich zur schnellen Komponente deutlich erhöht. DIFGA selbst berechnet mit SG1grenz zunächst nur einen Basiswert, welcher im Modell SLOWCOMP die Aufteilung in schnelle und langsame Grundwasserabflusskomponente steuert. Dieser entspricht dem Mittelwert von SMAX. In ArcEGMO wird dem Aufteilungsparameter SMAX zusätzlich ein Jahresgang in Form einer Sinusfunktion aufgeprägt, deren Amplitude durch einen Parameter C bestimmt wird. Weiterhin kann der Mittelwert der resultierenden Funktion durch einen weiteren multiplikativen Parameter D nach oben und nach unten verschoben werden. Zur Optimierung des Aufteilungsparameters wurde, um die DIFGA-Ergebnisse nutzen zu können, SMAX konstant belassen und stattdessen die beiden Parameter C und D variiert sowie optimiert. Ausführliche Tests haben gezeigt, dass für D eine maximale Schwankung im Intervall [0.3, 1.3] realistisch ist, während sich C im Intervall [0, D] bewegt. Ist C = 0, so gibt es keine jahreszeitlichen Schwankungen, d.h. der Aufteilungsparameter ist konstant. Im Fall das C=D ist die jahreszeitliche Schwankung maximal.
2. Makroporosität: Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde die Makroporosität durch die drei Parameter mpft, mpfb und zmax beschrieben. Dies hat den Nachteil, dass sich die Anzahl der Optimierungsparameter auf sechs erhöht, was die Rechenzeit bei der Optimierung empfindlich erhöht und fehleranfälliger macht, weil ein höherdimensionaler Parameterraum zu wesentlich langsamerer Konvergenz des numerischen Verfahrens führt und die Anzahl lokaler Minima, die nicht dem optimalen Parametersatz entsprechen, erhöhen kann. Daher wurde eine Optimierungsstrategie gewählt, die zwar den Grundgedanken der kegelförmig sich verjüngenden Makroporen beibehält (siehe Anlagenband, Kap. 2), aber mit nur einem Makroporositätsparameter B auskommt. Dazu wird zunächst ein grobes Verfahren zur Abschätzung der Makroporosität genutzt, das auf bodenkundlichen Kennwerten (Skelettanteil, Tongehalt, Lagerungsdichte, Mächtigkeit der einzelnen Bodenhorizonte) beruht und in PFÜTZNER et al. (2007) beschrieben ist. Diese Methode ergibt stark sich nach unten verjüngende Makroporen, wobei die Makroporositätswerte im Allgemeinen aber stark überschätzt werden. Daher werden diese Werte für alle Böden und alle Horizonte mit dem Korrekturfaktor B multipliziert, der sich im Intervall [0.05, 1] bewegt. Zur Anpassung der Makroporosität wird also nur der Faktor B verwendet. Diese Vorgangsweise reduziert den Parameterraum um zwei Dimensionen, behält aber das wichtige Charakteristikum der Verjüngung der Makroporen bei.
3. ET_korr: Das Modell ArcEGMO verwendet die beiden Parameter ET_korr_min und ET_korr_max um einen Jahresgang der Verdunstung zu erzeugen. Optimiert wird der Faktor E, mit dem der Mittelpunkt des Intervalls [ET_korr_min, ET_korr_max] multipliziert wird, wobei die Breite des Intervalls gleich bleibt. Auf diese Weise kann im Zuge der Optimierung dieses Intervall nach oben oder unten verschoben werden. Die Spannweite des Parameters E ist [0.5, 1.5].

Zusammenfassend ist zu sagen, dass der verwendete Parameterraum vier Dimensionen hat und die oben diskutierten Korrekturfaktoren (im Folgenden der Einfachheit halber „Parameter“ genannt) C, D, B und E enthält. Die beiden Parameter C und D beschreiben den Aufteilungsparameter des Grundwasserabflusses, E die Verdunstungskorrektur und B die Makroporosität.

5.4 Die Zielfunktionen

Im Rahmen von KliWES gibt es drei mögliche Konstellationen von Einzugsgebieten, die bei der Optimierung unterschiedliche Zielfunktionen benötigen. Erstens gibt es Einzugsgebiete, die im Rahmen von KliWES mit DIFGA analysiert wurden. Dadurch stehen Wasserhaushaltsgrößen in monatlicher Auflösung für diese Einzugsgebiete zur Verfügung. Zweitens gibt es Einzugsgebiete mit Auslasspegeln. Jedoch liegen für diese Einzugsgebiete keine Analysen mittels DIFGA vor. Durch die Regionalisierung der mittleren Wasserhaushaltsgrößen können diese Werte zur Kalibrierung genutzt werden. Drittens gibt es im Rahmen von KliWES aufgrund der stufenweisen Kalibrierung von Kopfeinzugsgebieten über Zwischeneinzugsgebiete bis hin zu den letzten betrachteten Pegeln bzw. Flussquerschnitten Einzugsgebiete ohne Pegel. Diese Einzugsgebiete können nicht anhand von Pegelinformationen kalibriert werden. Allerdings liegen hierfür mittlere Wasserhaushaltsgrößen aus der Regionalisierung (s. SCHWARZE et al. 2013 a) vor. Für diese Einzugsgebiete wird ein ähnlicher Parametersatz von unterhalb oder oberhalb liegenden Teileinzugsgebieten genutzt. Kleinere Anpassungen ergeben sich durch die Kalibrierung auf die regionalisierten, mittleren Wasserhaushaltswerte.

Ein besonderer Vorteil der angewendeten Strategie ist, dass durch die vorangegangene DIFGA-Analyse (s. SCHWARZE et al. 2013 a) nicht nur – wie vielfach üblich – an Pegeln gemessene Durchflussdaten zur Verfügung stehen, sondern auch Zeitreihen für andere Wasserhaushaltskomponenten wie Verdunstung, Grundwasserabfluss etc. Dadurch wird es möglich, das Modell ArcEGMO auch an weiteren Komponenten zu kalibrieren, also eine besonders umfassende Kalibrierungsstrategie zu verwenden. Dabei ist zu beachten, dass eine Kalibrierung an mehreren Zielfunktionen (so genannte multikriterielle Optimierung) im Vergleich zu einer Optimierung an nur einer Zielfunktion zwar i. d. R. zu schlechteren Übereinstimmungen (im Sinne der Gütemaße) führt, die Gesamtheit der hydrologischen Prozesse aber wesentlich realistischer wiedergibt.

Das verwendete hydrologische Modell erlaubt die Zerlegung der hydrologischen Prozesse und Größen in zwei Teile. Die Auswahl der Zielfunktionen beruht daher auf folgenden Überlegungen:

1. Die oberirdischen Prozesse beinhalten – stark vereinfacht gesagt – die Aufteilung des Niederschlags in schnelle Abflusskomponente RS (Oberflächenabfluss, hypodermischer Abfluss, Drainageabfluss und etwaige Verluste wie Abfluss in die Kanalisation etc.), Verdunstung ETR sowie Zufluss zu den Grundwasserspeichern RG. Wichtig ist dabei, dass hier noch keine Trennung zwischen schneller und langsamer Grundwasserkomponente stattgefunden hat, d. h. die Größen RS, ETR und RG sind unabhängig vom Aufteilungsfaktor SMAX sowie von den Parametern C und D. Deshalb ist es möglich, in einem ersten Schritt nur die Parameter E und B zu optimieren, indem ausschließlich die genannten Abflussbildungs- und Verdunstungsprozesse betrachtet werden. Weil die drei berechneten Größen RS, ETR und RG mit den DIFGA-Ergebnissen übereinstimmen sollen und gleichzeitig die Gesamtmenge des Wassers erhalten bleiben muss, genügt es, nach zwei der drei Größen zu kalibrieren. Als Zielfunktionen wurden daher die Monatssummen von ETR und RG gewählt. Die Verwendung von Monatswerten ist für Wasserhaushaltsergebnisse adäquat, weil auf diese Weise Hochwasserereignisse nicht explizit berücksichtigt werden müssen und gleichzeitig dem ausgeprägten Jahresgang der Wasserhaushaltsgrößen Rechnung getragen wird. Dadurch werden einerseits kurzzeitige Schwankungen auf Tagesbasis eliminiert (was das Auffinden des Optimums auch in numerischer Hinsicht erleichtert) und andererseits wird auf diese Weise dem ausgeprägten Jahresgang der Wasserhaushaltsgrößen Rechnung getragen.
2. Die Grundwasserprozesse umfassen die Aufteilung in eine schnelle und langsame Komponente RG1 und RG2, deren zeitliche Verzögerung in den Grundwasserspeichern mit den Speicherkonstanten CG1 und CG2 sowie deren Abfluss als QG1 und QG2. Dabei spielen Abflussbildungs- und Verdunstungsprozesse keine Rolle mehr. Es müssen nur noch laterale Abflussprozesse betrachtet werden. Daher können in die-

sem Schritt – bei festgehaltenem E und B, den Optimierungsergebnissen aus Schritt 1 – die optimalen Werte der Parameter C und D bestimmt werden. Als Zielfunktion wurde QG1 gewählt, weil diese im Gegensatz zum durch die große Speicherkonstante CG2 (üblicherweise > 350 Tage) stark geglätteten QG2 einen charakteristischen Jahresgang aufweist. Auch hier werden Monatssummen verwendet.

5.5 Die Gütemaße

Gütemaße geben die Abweichung zwischen dem Modellergebnis und einer gemessenen Zeitreihe für eine bestimmte Zielfunktion wieder. Einen Überblick über verschiedene übliche Gütemaße findet man in HALL (2001). Generell kann festgehalten werden, dass unterschiedliche Fragestellungen und unterschiedliche Anforderungen an das Modell auch unterschiedliche Gütemaße fordern. Zum Beispiel ist der häufig verwendete Nash-Sutcliffe-Koeffizient (NSE) die erste Wahl, wenn die Spitzen von Hochwasserereignissen besonders genau getroffen werden sollen: Indem die Quadrate der Abweichungen aufsummiert werden, werden größere Werte bevorzugt und somit Peaks besonders gut angepasst. Weil im vorliegenden Fall nicht Hochwasserereignisse, sondern langfristige Entwicklungen im Jahresgang der Wasserhaushaltskomponenten im Fokus stehen, wurde ein anderer Ansatz gewählt: Als erstes Gütemaß wird die Summe der Absolutwerte der Differenz zwischen Modell und DIFGA-Ergebnis verwendet. Die quadratische Funktion des NSE wird hier also durch den Absolutwert ersetzt, was dazu führt, dass Hoch- und Niedrigwasserperioden gleichermaßen berücksichtigt werden. Die normierte absolute Abweichung berechnet sich zu

$$r_{abs} = \frac{\sum_i |Z_i^{gemessen} - Z_i^{berechnet}|}{\sum_i |Z_i^{gemessen} - \bar{Z}^{gemessen}|} \quad \text{Formel 1}$$

Wobei Z die betrachtete Zielfunktion ist und \bar{Z} deren Mittelwert über den gesamten betrachteten Zeitraum. Das Optimum befindet sich bei $r_{abs}=0$.

Weil im Hinblick auf die Klimaprojektionen bis 2100 die Volumentreue des Modells besonders wichtig ist, wird als zweites Gütemaß der p_{bias} verwendet, welcher die prozentuale Abweichung der gesamten Wasservolumina im betrachteten Zeitraum beschreibt. Er berechnet sich zu

$$p_{bias} = \frac{\sum_i (Z_i^{gemessen} - Z_i^{berechnet})}{\sum_i Z_i^{gemessen}} * 100\% \quad \text{Formel 2}$$

Der optimale Wert liegt bei $p_{bias}=0$ %, wobei Werte von unter 1 % wünschenswert sind.

Im Rahmen der verwendeten Kalibrierungsstrategie müssen also für jede Zielfunktion zwei Gütemaße berechnet werden. Daher muss im ersten Kalibrierungsschritt (Optimierung von E und B) nach vier Größen optimiert werden: $r_{abs}(RG)$, $r_{abs}(ETR)$, $p_{bias}(RG)$ und $p_{bias}(ETR)$. Im zweiten Schritt (Optimierung von C und D) muss dagegen nur nach zwei Größen optimiert werden: $r_{abs}(QG1)$ und $p_{bias}(QG1)$. Diese sechs verwendeten Gütemaße und die Werte der kalibrierten Parameter sind im Anlagenband, Kap. 4.1 für alle 113 kalibrierten Gebiete tabellarisch dargestellt.

Der Zeitraum, für den die Daten angepasst wurden, umfasst die zehn Jahre vom 01.01.1992 bis zum 31.12.2001, wobei die Jahre 1990 und 1991 zur Einschwingung verwendet wurden. Längere Anpassungszeiten wären prinzipiell möglich, jedoch aus Gründen des numerischen Aufwandes und der Rechenzeit unpraktisch. Der Anpassungszeitraum endet im Jahr 2001, um eine Beeinflussung der Parameterwerte durch das außergewöhnliche Hochwasserjahr 2002 zu vermeiden. Weil ein Hochwasserereignis dieser Größe statistisch gesehen eine Auftrittswahrscheinlichkeit von etwa ein Mal in hundert Jahren hat, würde es die Ergebnisse innerhalb einer Zehn-Jahres-Reihe deutlich verzerren. Daher ist die Kalibrierung an einem Zeitraum ohne hydrologische Extreme sinnvoll.

5.6 Die Optimierungsroutine

Weil es sich bei der vorliegenden Optimierung, wie bereits erwähnt, um ein multikriterielles Problem handelt, sind hier die meisten gängigen Optimierungsverfahren nicht – oder nur mit Einschränkungen – brauchbar. Daher wurde ein speziell für multikriterielle Probleme entwickeltes Verfahren verwendet, die so genannte „covariancematrix adaptation evolution strategy“ (MO-CMA-ES). Es handelt sich um einen evolutionären Algorithmus, der in der Lage ist, auch globale Minima aufzufinden. Pro Iteration wird nicht nur ein Parametersatz ausgewertet, sondern eine ganze Population. Im vorliegenden Fall war eine Populationsgröße von 28 ausreichend. Dies ist ein Kompromiss aus numerischem Aufwand und Abdeckung des Parameterraums. Innerhalb einer solchen Population werden die Parameterwerte im Parameterraum gestreut, um auch schwer auffindbare globale Minima zu finden. Die Anzahl der Iterationen, bis die brauchbare Konvergenz erreicht wurde, schwankte je nach Gebiet zwischen 90 und 150. Eine mathematisch ausführliche Beschreibung des Algorithmus findet sich in IGEL et al. (2007).

Bei einem multikriteriellen Optimierungsproblem ist es nicht möglich, nur einen optimalen Parametersatz zu erhalten. Das Ergebnis der Optimierung ist stattdessen die sogenannte Pareto-Front, eine Punkteschar im n -dimensionalen Raum, wobei n die Anzahl der Kriterien (Zielfunktionen) ist. Jedem Punkt entspricht ein möglicher Parametersatz. Einige dieser Parametersätze bevorzugen Kriterium 1, einige andere Kriterium 2 etc. Es liegt am Benutzer, zu entscheiden, welches Kriterium entscheidender ist, bzw. ob beide gleich zu gewichten sind. Hier wurde der endgültig verwendete Parametersatz so ausgewählt, dass alle zwei bzw. vier Kriterien gleichermaßen berücksichtigt wurden. Allerdings wurden (wo möglich) Ergebnisse verworfen, die entweder einen $p_{\text{bias}} > 1\%$ aufwiesen oder deren Parameter direkt an den Grenzen des Parameterintervalls lagen, was darauf hinweist, dass der Algorithmus ein Optimum außerhalb physikalisch sinnvoller Parametergrenzen sucht. In manchen Fällen musste ein relativ schlechter r_{abs} in Kauf genommen werden (im Bereich von $r_{\text{abs}}=1$), um einen $p_{\text{bias}} < 1\%$ zu erhalten. Dadurch wird gewährleistet, dass die gesamte Wasserbilanz über längere Zeiträume hinweg plausibel ist.

5.7 Bewertung der Kalibrierung an einem Beispiel

Aus den oben genannten Gründen wurde der p_{bias} als Maß für die Bewertung der Qualität der Kalibrierung herangezogen. Dabei wird folgende Nomenklatur eingeführt: die Qualität einer Anpassung mit $p_{\text{bias}} < 1\%$ wird als „sehr gut“, mit $1\% < p_{\text{bias}} < 10\%$ als „akzeptabel“ und mit $p_{\text{bias}} > 10\%$ als „nicht zufriedenstellend“ bezeichnet. Ein Überblick über die betrachteten DIFGA-Gebiete ergibt folgendes Bild: Bei 47 % der Gebiete wurde eine „sehr gute“ Qualität der Anpassung erreicht, weitere 39 % können als „akzeptabel“ eingestuft werden und bei 14 % der Gebiete war die Anpassung „nicht zufriedenstellend“. Letzteres kann meistens auf nicht in den Karten- und Datengrundlagen enthaltene anthropogene Beeinflussungen sowie auf Rückstau oder

eventuell auftretende Messfehler in den Eingangsdaten zurückgeführt werden. In diesen Fällen wurden die Parameter händisch nachjustiert, wobei als Kriterium die bestmögliche Übereinstimmung mit dem langjährigen Gesamtabfluss herangezogen wurde.

Im Folgenden seien die Ergebnisse der Kalibrierung anhand eines Beispiels illustriert. Dazu wurde das Gebiet Seifhennersdorf im Einzugsgebiet der Neiße gewählt. In Tabelle 2 sind die optimierten Werte der Parameter und die zugehörigen Gütemaße für die jeweiligen Zielfunktionen (ETR, RG und QG1) angegeben. Daraus ist ersichtlich, dass die Anpassung der Parameter für dieses Gebiet im „akzeptablen“ Bereich liegt, während der zweite Optimierungsschritt (Parameter C und D) für sich genommen eine „sehr gute“ Anpassung aufweist.

Tabelle 2: Parameter und Gütemaße für das Gebiet Seifhennersdorf

Parameter	r_{abs}	p_{bias}
E	1.0526	0.656 (ETR)
B	0.0561	0.871 (RG)
C	0.0115	0.527 (QG1)
D	0.9624	0.0004% (QG1)

Abbildung 12 zeigt die Anpassung der mittels ArcEGMO modellierten Ergebnisse an die DIFGA-Daten für die Größe RG in Monatssummen. Obwohl bei dieser Anpassung der p_{bias} nahezu 10 % beträgt, ist eine gute Übereinstimmung zu beobachten: Der jahreszeitliche Verlauf der Größe wird von den modellierten Ergebnissen hinreichend genau wiedergegeben. Die Extrema der Kurve werden mit geringerer Genauigkeit getroffen, was darauf zurückzuführen ist, dass das Modell grundsätzlich nicht für den Hochwasserbereich aufgebaut und kalibriert ist.

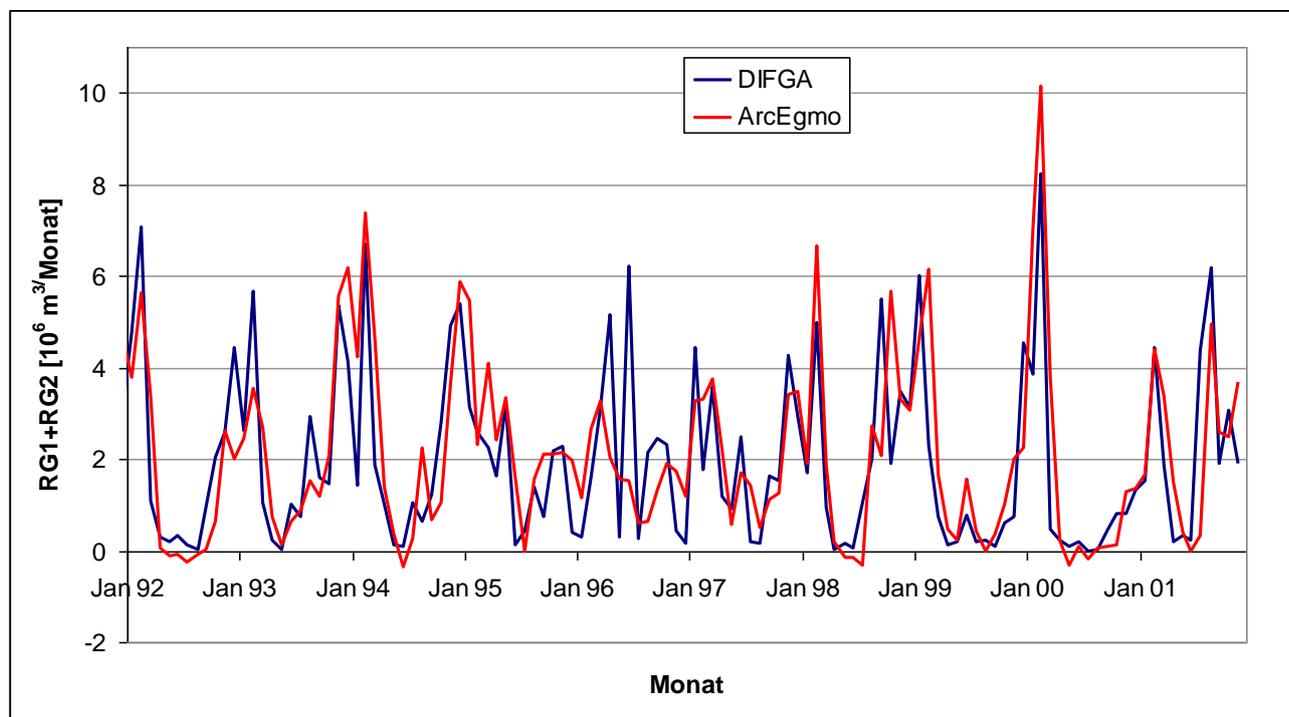


Abbildung 12: Anpassung der ArcEGMO Ergebnisse an DIFGA-Daten für die Größe RG

Abbildung 13 stellt die Anpassung der Verdunstung (ETR) und Abbildung 14 die Anpassung des schnellen Grundwasserabflusses (QG1) dar. Die Situation ist hier ähnlich wie in Abbildung 12: vor allem die Maxima der Kurven werden durch die modellierten Ergebnisse modellbedingt nicht gut wiedergegeben, während der für Wasserhaushaltsberechnungen entscheidende jahreszeitliche Verlauf sehr gut wiedergegeben wird. Die Verwendung von Monatswerten bei ETR wird durch die Verwendung des p_{bias} (der langjährige Abweichungen beschreibt) als zweites Gütemaß gerechtfertigt.

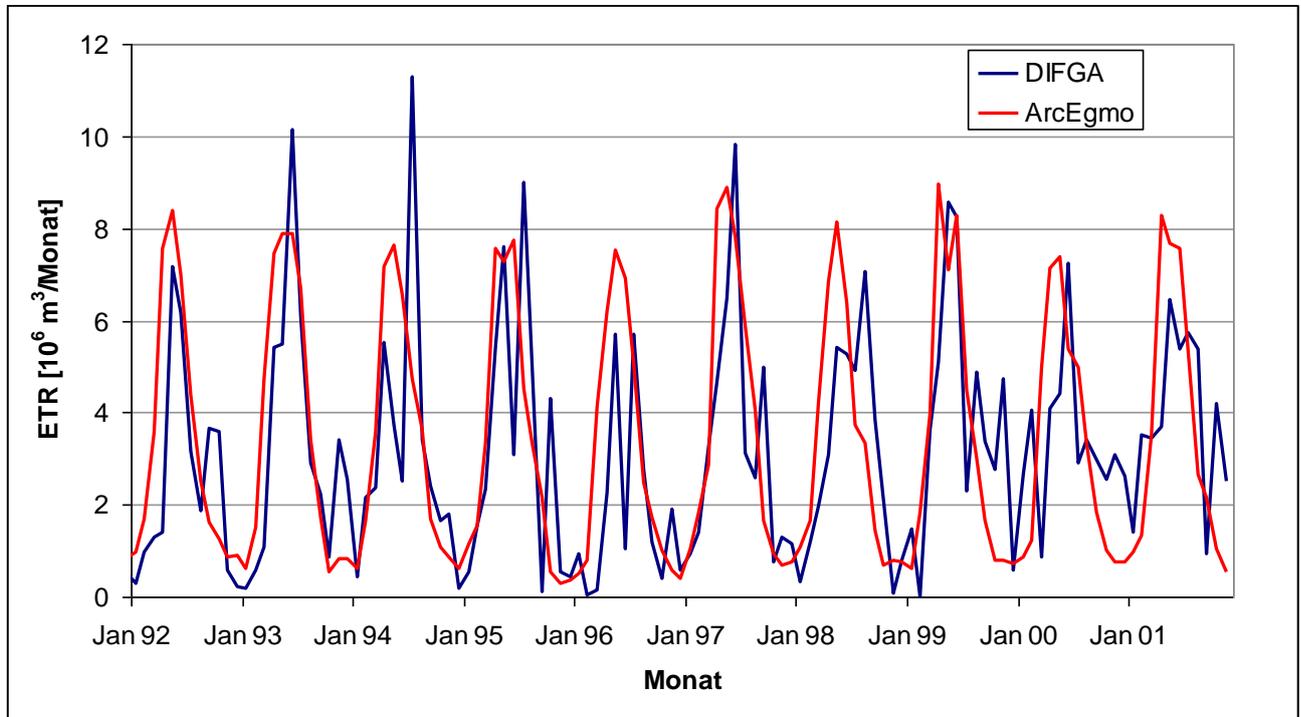


Abbildung 13: Anpassung der ArcEGMO-Ergebnisse an DIFGA-Daten für die Größe ETR

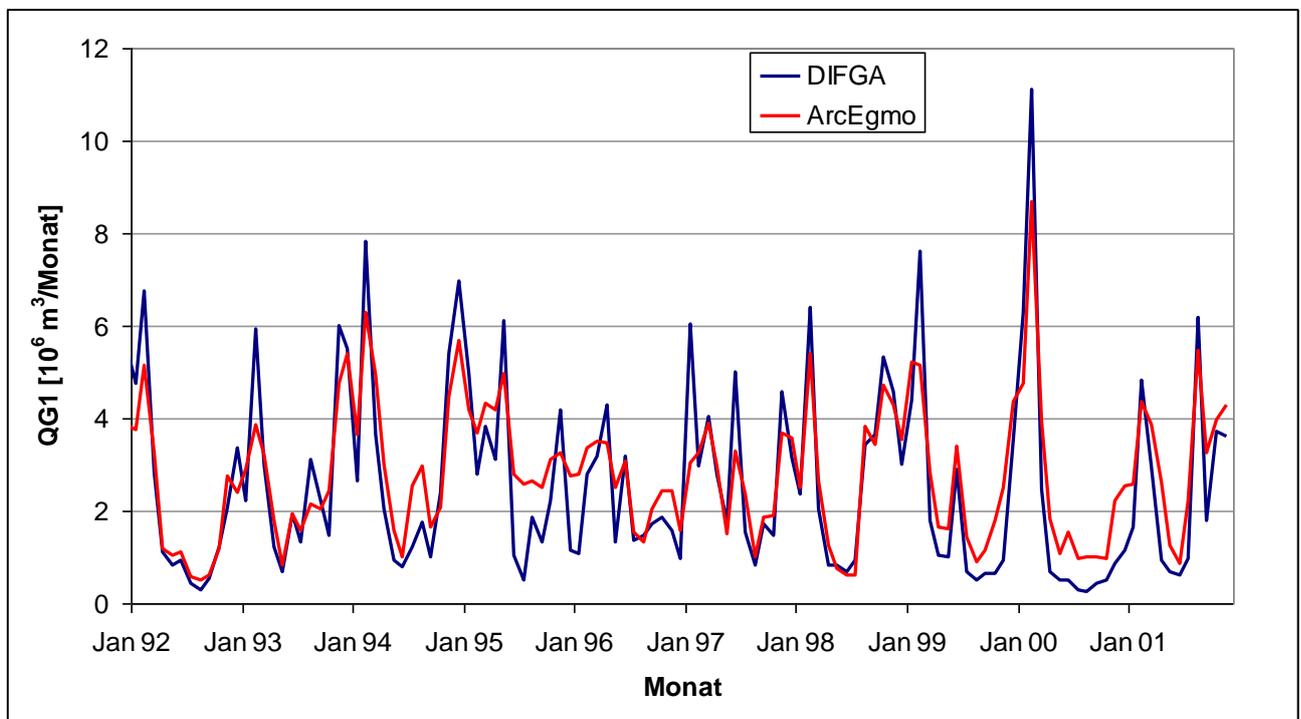


Abbildung 14: Anpassung der ArcEGMO-Ergebnisse an DIFGA-Daten für die Größe QG1

5.8 Regionalisierung der Modellparameter für Gebiete ohne DIFGA-Analyse

Die Parameter für Gebiete ohne Pegel und für Pegelgebiete ohne DIFGA-Analyse wurden durch ein Regionalisierungsverfahren bestimmt, welches im Folgenden kurz erläutert wird.

GIS-gestützte Untersuchungen haben gezeigt, dass keiner der vier Parameter eine klar erkennbare räumliche Struktur aufweist. Daher sind geostatistische Standardverfahren in diesem Fall nicht für eine Regionalisierung geeignet. Aus diesem Grund wurde ein Ansatz gewählt, der auf physikalisch begründbaren Korrelationen zwischen bestimmten Gebietseigenschaften und den Parameterwerten beruht. Das Ziel ist, mathematische Zusammenhänge zu finden, die es erlauben, die Parameter nicht kalibrierter Einzugsgebiete aus verschiedenen Gebietseigenschaften näherungsweise zu berechnen.

Als Grundlage für die Regionalisierung dienen die mit mithilfe der multikriteriellen Optimierung ermittelten Parametersätze der 113 DIFGA-Einzugsgebiete. Diese Gebiete decken etwa die Hälfte der Fläche Sachsens ab (s. SCHWARZE et al. 2012).

Es wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Die Einzugsgebiete wurden gemäß ihrer hydrogeologischen Einheit klassifiziert. Dies ist eine Einteilung nach den im Gebiet vorherrschenden geologischen Charakteristika. Die Wahl der vier Einheiten „Magmatite“, „Metamorphite“, „sonstige Festgesteine“ und „Lockergestein“ hat sich als geeignet erwiesen. Für jede der hydrogeologischen Einheiten werden also eigene Korrelationsbeziehungen erstellt. Diese Einheiten entsprechen denjenigen der DIFGA-Analyse (s. SCHWARZE et al. 2012).
2. Innerhalb einer hydrogeologischen Einheit werden verschiedene physikalisch basierte Gebietskennwerte auf ihre Korrelationen mit den vier Kalibrierungsparametern getestet. Dabei handelt es sich um multiple lineare Korrelationsbeziehungen. Dazu wurden nur Parameter von Gebieten herangezogen, deren Kalibrierung gemäß der oben eingeführten Nomenklatur als „sehr gut“ bis „akzeptabel“ eingestuft wurde. Sämtliche verwendeten Korrelationsbeziehungen sowie die darin vorkommenden Gebietskennwerte sind im Anlagenband, Kap. 4.2 angeführt.
3. Der multiple Korrelationskoeffizient dient als Maß, um die beste dieser Korrelationsbeziehungen auszuwählen. Sind die Korrelationen signifikant, so können die Werte der Parameter mittels der Korrelationsbeziehung auf die nicht kalibrierten Gebiete extrapoliert werden.

Als Beispiel sei die Korrelationsbeziehung für den Parameter C für Gebiete in der hydrogeologischen Einheit „magmatisches Tiefengestein“ angeführt, deren multipler Korrelationskoeffizient 0.7 beträgt. Der Parameter C berechnet sich hier zu

$$C_{norm} = 1.808 - 2.425 * 10^{-3} * ETR - 1.032 * KS$$

mit

$$C = C_{norm} * (D - 0.05),$$

wobei in dieser Beziehung die Gebietskennwerte ETR (langjähriges Mittel der Verdunstung) und KS (Anteil der kiesigen bis sandigen Flächen) auftreten. Die Verwendung des auf das Intervall [0,1] normierten Parameters C_{norm} hat numerische und programmiertechnische Gründe. Außerdem lässt sich durch die Verwendung normierter Werte leichter erkennen, ob der Parameter am unteren Rand (0), in der Mitte (0.5) oder am oberen Rand (1) des erlaubten Intervalls liegt.

Weil für alle Parameter und für alle hydrogeologischen Einheiten signifikante Korrelationsbeziehungen gefunden wurden, die auch physikalisch plausibel sind, konnten die nicht kalibrierten Gebiete vollständig parametrisiert werden. Dies macht eine flächendeckende Anwendung des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO für Sachsen (mit Ausnahme der ausgegrenzten Gebiete) möglich.

5.9 Validierung der Modellergebnisse

Zur Validierung der Modellergebnisse aus Säule B wurden zwei verschiedene Vorgehensweisen herangezogen:

- Gegenüberstellung der Wasserhaushaltsbilanzen der DIFGA-Analysen und der ArcEGMO-Ergebnisse (nur für DIFGA-Gebiete)
- Gegenüberstellung der regionalisierten Wasserhaushaltsbilanzen aus Säule A und der ArcEGMO-Ergebnisse (für alle Teileinzugsgebiete des Ergebnisraums)

Zunächst werden die Wasserhaushaltsbilanzen der DIFGA-Analysen aus Säule A (1951–2005) mit den ArcEGMO-Ergebnissen aus Säule B (1961–2010) verglichen. Der Vergleich basiert auf mittleren Jahressummen der jeweiligen Zeiträume. Diese Gegenüberstellung ist dementsprechend nur für DIFGA-Gebiete möglich. Die folgenden Histogramme beschreiben, mit welcher Häufigkeit Abweichungen zwischen den angegebenen Größen auftreten. Die Häufigkeit wird dabei durch die Anzahl der Gebiete beschrieben, welche in eine bestimmte Abweichungsklasse fallen. Die Abweichungen der Niederschlagswerte (Abbildung 15) ergeben sich aus den unterschiedlichen Zeiträumen und leicht geänderten meteorologischen Eingangsdatensätzen in Säule A und Säule B.

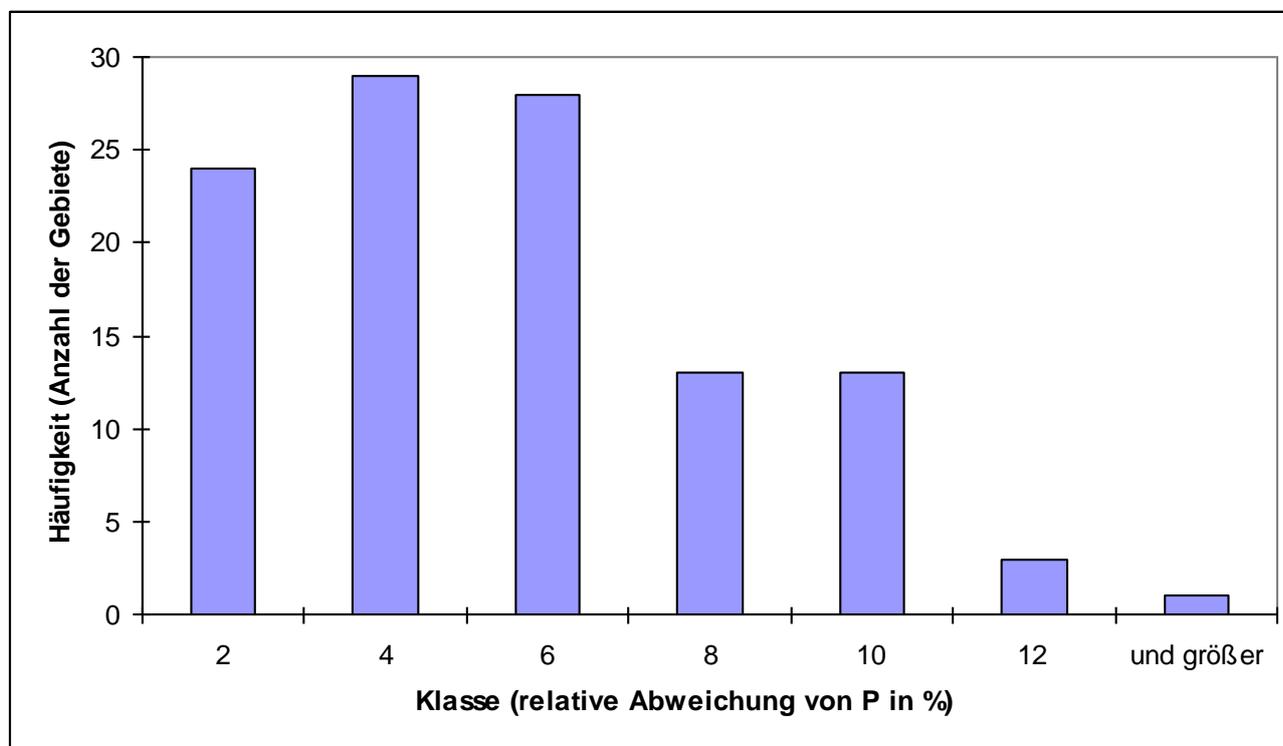


Abbildung 15: Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen den mittleren jährlichen Niederschlagssummen P(DIFGA) und P(ArcEGMO) im langjährigen Mittel

Weil die Niederschlagssummen aus Säule A und Säule B nicht identisch sind, ist der Vergleich der Absolutwerte der Wasserhaushaltsgrößen nicht sinnvoll. Im Mittel weisen die langjährigen mittleren Niederschlagssummen eine Abweichung von 4 % für ganz Sachsen auf. Diese Differenz wird durch leicht unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Erstellung der meteorologischen Eingangsdatensätze in Säule A und Säule B hervorgerufen. Um die Wasserhaushaltsgrößen miteinander vergleichen zu können, werden daher die prozentualen Anteile für die Wasserhaushaltskomponenten ETR und R vom Niederschlag ermittelt, wobei die Größe R als Summe aus RG und RS definiert ist. Die Bilanzanteile der jeweiligen Wasserhaushaltsgrößen aus Säule A und B werden gegenübergestellt und die entsprechenden Abweichungen in Prozent angegeben.

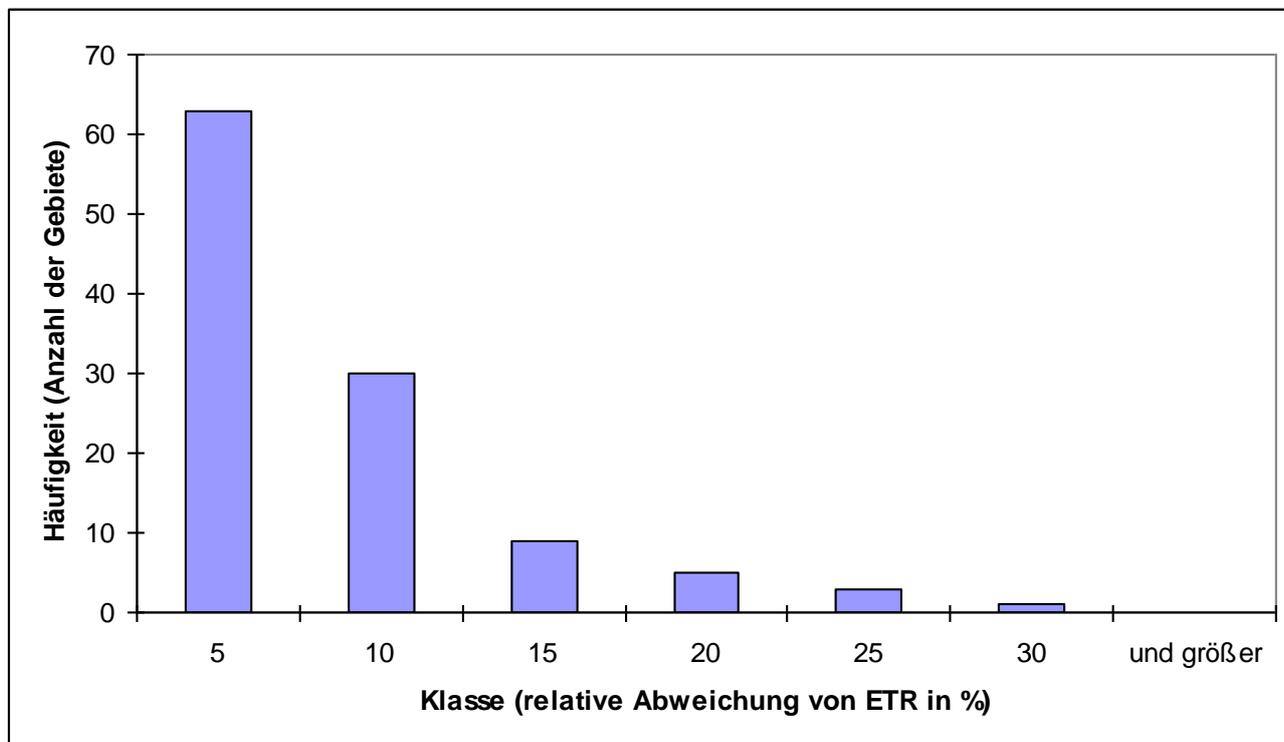


Abbildung 16: Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen ETR(DIFGA) und ETR(ArcEGMO) im langjährigen Mittel

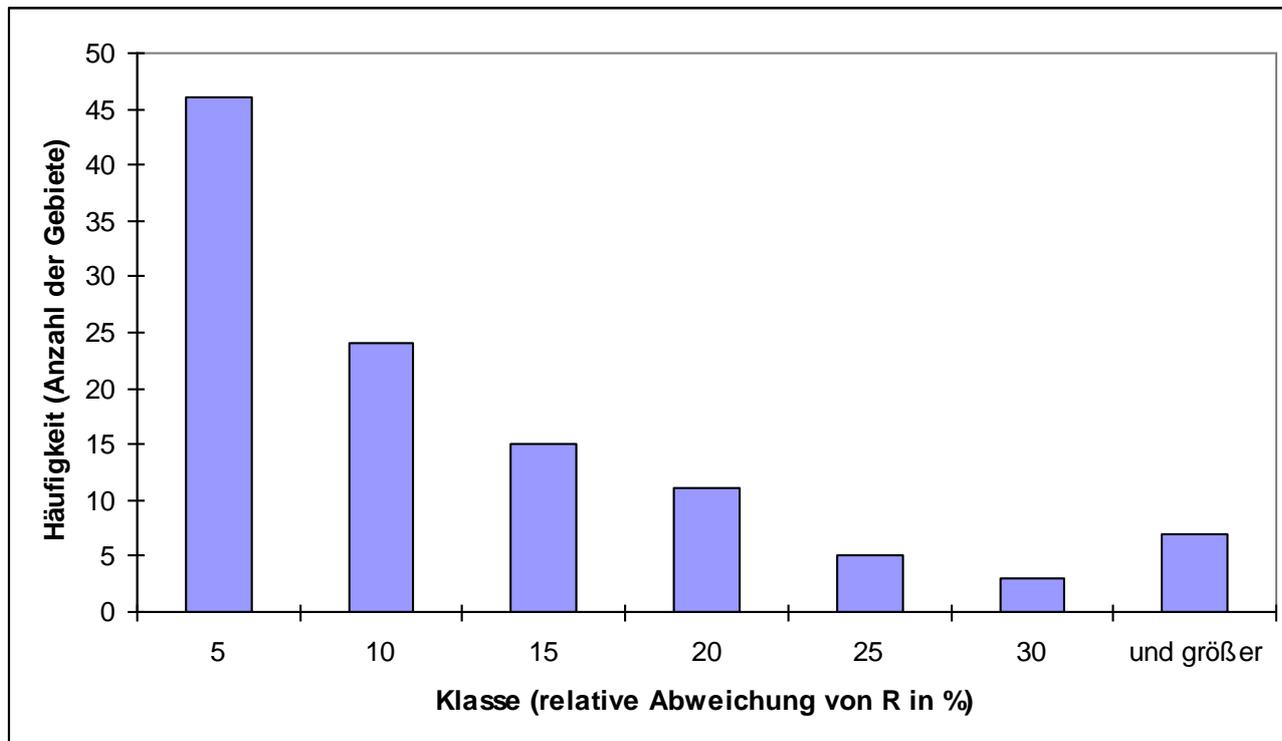


Abbildung 17: Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen R(DIFGA) und R(ArcEGMO) im langjährigen Mittel

Abbildung 16 zeigt das Histogramm für die relativen Abweichungen zwischen DIFGA- und ArcEGMO-Ergebnissen für die Verdunstung und Abbildung 17 zeigt das entsprechende Histogramm für die Größe R. Daraus ist zu sehen, dass für ETR 84 % der Gebiete eine Abweichung von unter 10 % aufweisen, während für R 74 % der Gebiete eine Abweichung von unter 15 % aufweisen. Für Gebiete mit höheren Abweichungen scheint es sinnvoll, in zukünftigen Studien die Datenbasis hinsichtlich zusätzlicher anthropogener Veränderungen zu untersuchen und gegebenenfalls zu ergänzen.

In Anlehnung an die Gegenüberstellung von DIFGA-Analysen und ArcEGMO-Ergebnissen wurden die regionalisierten Wasserhaushaltsgrößen aus Säule A (1951–2005) mit den ArcEGMO-Ergebnissen aus Säule B (1961–2010) verglichen. Es wurden hierbei die langjährigen Mittelwerte auf Einzugsgebietsebene gegenübergestellt. Weil es sich einerseits um regionalisierte Wasserhaushaltsgrößen und andererseits um Modellergebnisse aus teilweise unbeobachteten Gebieten mit regionalisierten Parametersätzen handelt, sind Abweichungen von > 30 % unvermeidbar.

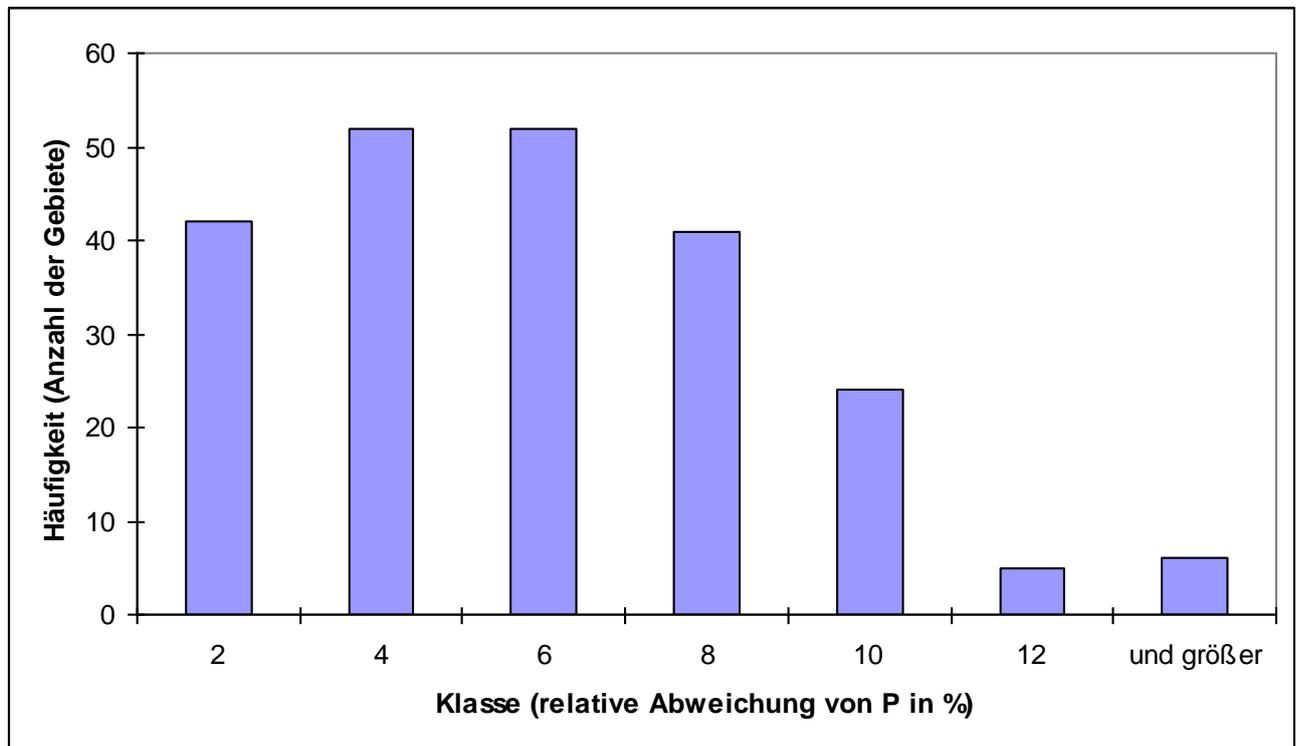


Abbildung 18: Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen P(Reg A) und P(ArcEGMO) im langjährigen Mittel

In Abbildung 18 ist das Histogramm für die relativen Abweichungen des Niederschlags zwischen den regionalisierten Ergebnissen aus Säule A (als „Reg A“ bezeichnet) und den ArcEGMO-Ergebnissen dargestellt. Letztere beruhen teilweise (bei den Gebieten ohne DIFGA Analyse) auf regionalisierten Parametersätzen. In Abbildung 18 und Abbildung 19 sind die entsprechenden Histogramme für ETR beziehungsweise R dargestellt. Die größten beobachteten Diskrepanzen treten bei R auf. Hier haben 62 % der Gebiete Abweichungen von unter 20 % und 13 % der Gebiete Abweichungen von über 50 %. Dabei ist zu beachten, dass hier die Daten zweier unterschiedlicher Regionalisierungsmethoden miteinander verglichen werden, was bei den Gebieten ohne DIFGA-Analyse zu deutlich erhöhten Unsicherheiten führt.

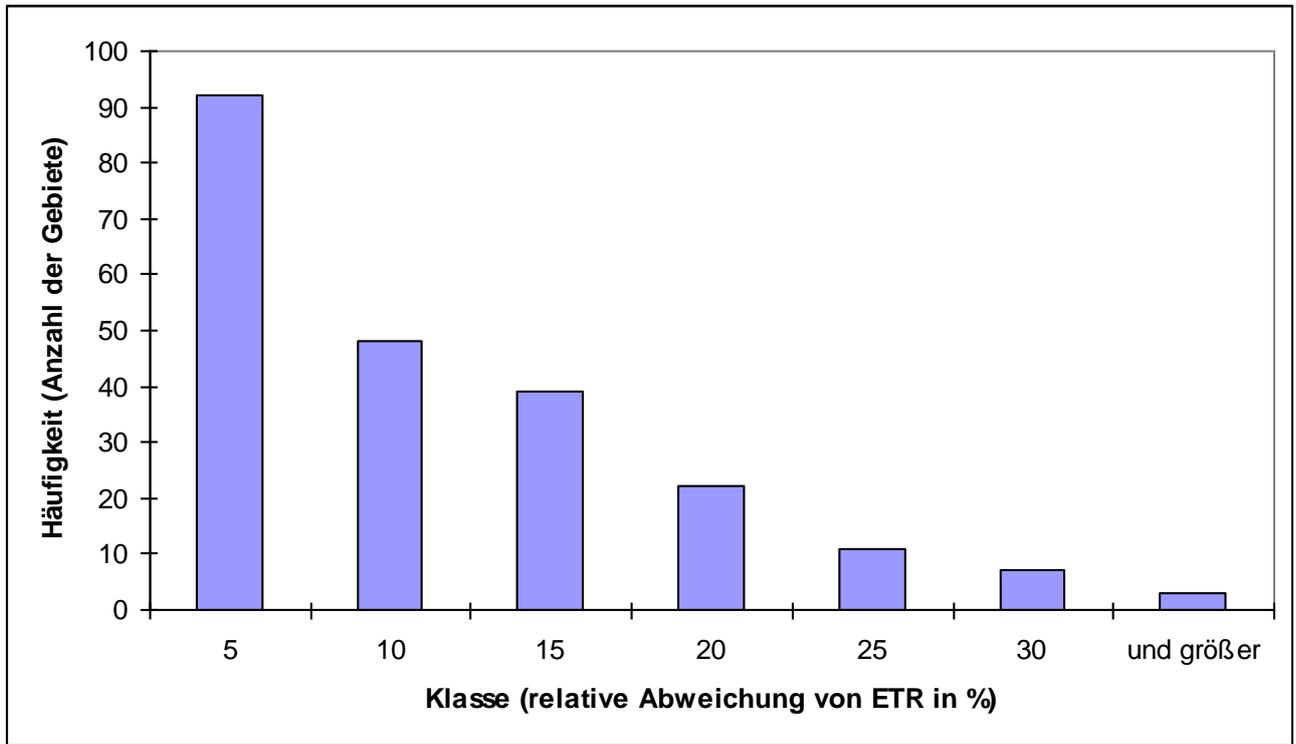


Abbildung 19: Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen ETR(Reg A) und ETR(ArcEGMO) im langjährigen Mittel

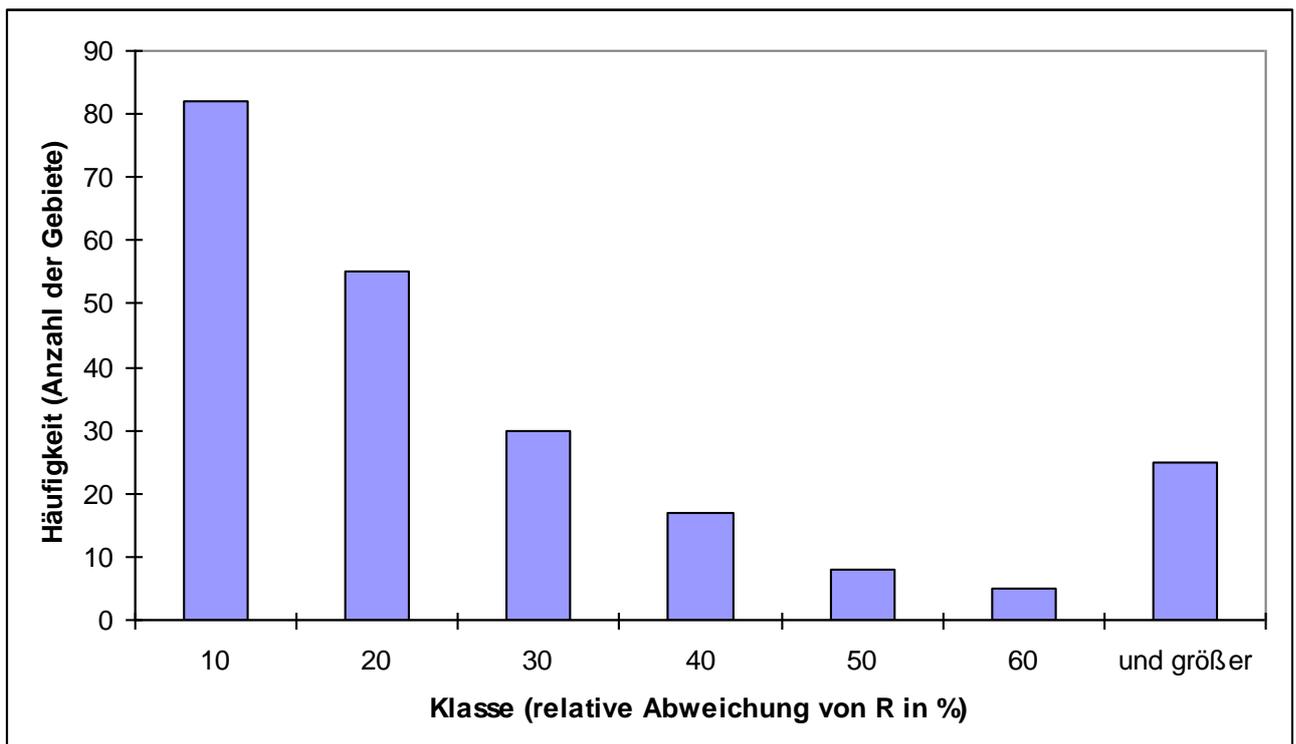


Abbildung 20: Histogramm für die Häufigkeit der relativen Abweichungen zwischen R(Reg A) und R(ArcEGMO) im langjährigen Mittel

6 Anwendung des Modells ArcEGMO auf die sächsischen Einzugsgebiete

Das Modell ArcEGMO wurde auf die sächsischen Einzugsgebiete der Weißen Elster, Schwarzen Elster, Neiße, Elbe, Mulde, Spree, Wisenta, Svitavka und Eger/Ohře, mit Ausnahme der Sonderflächen (Kapitel 3.2), angewendet. Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells wurden folgende Wasserhaushaltsgrößen in Monatssummen ermittelt:

- reale Verdunstung ETR
- schnelle Abflusskomponente RS (fasst Landoberflächenabfluss, Drainageabfluss, hypodermischen Abfluss und die Abflüsse aus der Kanalisation zusammen)
- schnelle Grundwasserkomponente RG1
- langsame Grundwasserkomponente RG2
- Grundwasserkomponente RG (stellt die Summe aus der schnellen und langsamen Grundwasserkomponente dar)
- Gesamtabfluss R (stellt die Summe aus den Grundwasserabflüssen und der schnellen Abflusskomponente dar)

Die Aufteilung der einzelnen Größen stammt aus der Konzeption von DIFGA (SCHWARZE et al. 2012). Außer der realen Verdunstung ETR stellen alle R-Komponenten in der Modellkonzeption Zuflüsse zu den Gebiets Speichern dar, wie Abbildung 21 zeigt. Die schnelle Abflusskomponente RS des Modells ArcEGMO wird in DIFGA als RD bezeichnet.

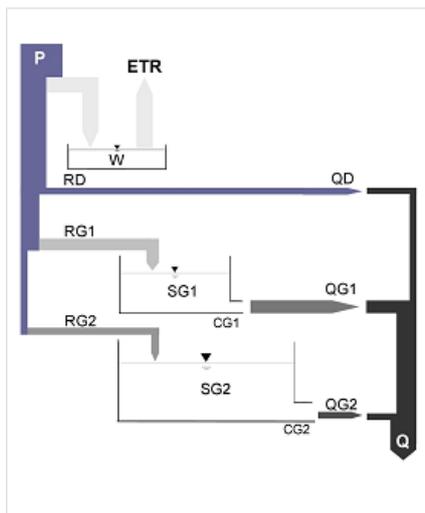


Abbildung 21: Schema des Differenzenganglinienanalyseverfahrens DIFGA aus SCHWARZE & BEUDERT (2009)

Die genannten Größen wurden sowohl für den Ist-Zustand (1961–2010) als auch für die Klima- und Landnutzungszenarien (1961–2100) modelliert (Tabelle 3). Als meteorologischer Input dienen verschiedene Rasterdatensätze (SCHWARZE et al. 2013; LÜNICH 2012). Eine ausführliche Erläuterung zu den Zusammenhängen

zwischen den Grundwasserkomponenten RG1, RG2 bzw. RG und der Grundwasserneubildung ist dem Kapitel 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Bezeichnung und Erläuterung der verschiedenen Realisierungen

Bezeichnung im Text und Abbildung	Klimainput	Landnutzungsinput	Gesamter Simulationszeitraum
Ist-Zustand	Rasterdatensatz auf Basis von Stationsdaten des Beobachtungszeitraums	Ist-Zustand (Kapitel 2.8)	1961 – 2010
Realisierung 00	Rasterdatensatz auf Basis von Stationsdaten der Realisierung 00 des WETTREG2010-Modells	Ist-Zustand (Kapitel 2.8)	1961 – 2100
Realisierung 66	Rasterdatensatz auf Basis von Stationsdaten der Realisierung 66 des WETTREG2010-Modells	Ist-Zustand (Kapitel 2.8)	1961 – 2100
Realisierung 99	Rasterdatensatz auf Basis von Stationsdaten der Realisierung 99 des WETTREG2010-Modells	Ist-Zustand (Kapitel 2.8)	1961 – 2100
Realisierung 00 F	Rasterdatensatz auf Basis von Stationsdaten der Realisierung 00 des WETTREG2010-Modells	Szenario Flächenverbrauch (Kapitel 6.1.3)	1961 – 2100
Realisierung 00 V	Rasterdatensatz auf Basis von Stationsdaten der Realisierung 00 des WETTREG2010-Modells	Szenario Versiegelung (Kapitel 6.1.3)	1961 – 2100
Realisierung 00 W	Rasterdatensatz auf Basis von Stationsdaten der Realisierung 00 des WETTREG2010-Modells	Szenario Waldumbau (Kapitel 6.1.3)	1961 – 2100

Die genannten Wasserhaushaltskomponenten stehen in folgenden Beziehungen zueinander:

- Langjährige mittlere Wasserhaushaltsbilanz: $P = ETR + R$
- Monatliche Wasserhaushaltsbilanz: $P = ETR + R \pm \Delta S \pm \varepsilon$
- Abflusskomponenten: $R = RS + RG$ mit
 - $RG = RG1 + RG2$ und
 - $RS = RO + RH + Drain + MKR + TKR$

Der Gesamtabfluss R kann negativ werden, weil ein Rückfluss (Zehrung) aus den unterirdischen Gebiets speichern möglich ist. Dies tritt vor allem in den Sommermonaten und auf grundwassernahen Flächen auf.

Die Speicheränderung ΔS und der Bilanzfehler ε werden in den nachfolgenden Ergebnisauswertungen nicht dargestellt. Die betrachteten Ergebnisse sind Mittelwerte über mindestens 30-jährige Reihen. Für langjährige mittlere Wasserhaushaltsbilanzen ist die Speicheränderung $\Delta S = 0$. Der Bilanzfehler kann vernachlässigt werden, weil er geringfügig um den Wert Null schwankt.

Neben den genannten Wasserhaushaltskomponenten wurden für den Ist-Zustand und die Klimaszenarien die Größen QS, QG1 und QG2 für ausgewählte Pegelzugsgebiete ausgegeben. Bei den drei Größen handelt es sich um die jeweiligen Abflüsse aus den Gebiets speichern (s. Abbildung 21):

- Direktabfluss QS (Abflusskonzentration, Abfluss aus den Gebiets speichern)
- Schneller Grundwasserabfluss QG1
- Langsamer Grundwasserabfluss QG2

Die Summe dieser drei simulierten Größen ergibt den Durchfluss Q , welcher dem Durchfluss am Gebietsauslass entspricht. Im Gegensatz zum Gesamtabfluss R kann die Größe Q nicht negativ werden, weil entsprechend des Speicherkonzeptes der Inhalt der Gebietsspeicher minimal Null werden kann.

Weil die Durchflüsse für 113 DIFGA-Gebiete der Säule A (SCHWARZE et al. 2012) umfangreich untersucht und ggf. aufbereitet wurden, eignen sich diese Gebiete für einen Vergleich mit den simulierten Durchflusswerten für die Berechnungen des Ist-Zustands. Aufgrund der Validierung stehen neben den sechs genannten Wasserhaushaltskomponenten auch die aktuellen Monatswerte der Größen Q_S , Q_{G1} und Q_{G2} zur Verfügung.

Für die Auswahl der aufgelisteten Wasserhaushaltskomponenten gibt es verschiedene Gründe. Einerseits sind diese Größen für eine Vielzahl von Fragestellungen relevant. Vor allem die Grundwasserkomponenten werden häufig benötigt. Andererseits lassen sich die ausgewählten Wasserhaushaltsgrößen mit den vorhandenen Komponenten der Säule A vergleichen.

Nachdem die Kalibrierung und Validierung (Kapitel 5) abgeschlossen ist, werden die mittleren Jahressummen der simulierten Wasserhaushaltsgrößen auf Teileinzugsgebietsebene vorgestellt (Kapitel 6.1). Dies geschieht einerseits für die Ergebnisse des Beobachtungszeitraumes und andererseits beispielhaft für die Wasserhaushaltsgrößen der Realisierung 66. Zudem werden die Differenzkarten vorgestellt. Aufgrund der Vielzahl an Ergebnissen werden detaillierte Analysen für verschiedene Beispielgebiete durchgeführt (Kapitel 6.2). Das nachfolgende Kapitel 6.3 befasst sich mit den Unsicherheiten und Grenzen der Ergebnisse. In Kapitel 6.4 wird kurz auf die Anfälligkeit des Wasserhaushalts gegenüber dem Klimawandel eingegangen sowie die Veränderung der Wasserhaushaltsgrößen in Form von Differenzkarten dargestellt.

6.1 Sachsenweite Ergebnisse

Nachfolgend werden sachsenweite Ergebnisse der Wasserhaushaltskomponenten auf Teileinzugsgebietsebene dargestellt.

6.1.1 Räumliche Verteilung von Wasserhaushaltsgrößen in Sachsen basierend auf dem Ist-Zustand

Die Simulation des Ist-Zustands umfasst den Zeitraum 1961–2010. Weil die Klimagrößen innerhalb dieser 50 Jahre einen Trend aufweisen, werden nachfolgend die Mittelwerte der beiden 30-jährigen Reihen, 1961–1990 und 1981–2010, dargestellt. So kann für den betrachteten Zeitraum von 1961 bis 2010 vor allem eine Zunahme der mittleren Temperaturen, ausgehend von verfügbaren Messdaten, festgestellt werden. Dies hat schon heute Auswirkungen auf die Wasserhaushaltsgrößen.

Die räumliche Verteilung der mittleren Jahressumme des Niederschlags wird in Abbildung 22 für den Zeitraum 1961–1990 (links) und 1981–2010 (rechts) gezeigt. Die Niederschlagsverteilung basiert hierbei auf regionalisierten Beobachtungsdaten und ist keine von ArcEGMO berechnete Ausgabegröße.

Es zeigt sich die für Sachsen typische Verteilung mit relativ geringen Niederschlagssummen (< 650 mm/a) im Norden und einer Niederschlagszunahme mit steigender Geländehöhe im Erzgebirge und Lausitzer Bergland. Die höchsten Werte bis maximal 1.200 mm/a werden auf dem Erzgebirgskamm erreicht. Zwischen den beiden 30-jährigen Zeiträumen gibt es hinsichtlich der räumlichen Niederschlagsverteilung nur geringfügige Unterschiede. Tendenziell liegen die langjährigen Niederschlagssummen für den Zeitraum 1981–2010 etwas über denen des Zeitraums 1961–1990. Die grauen Bereiche in der Abbildung 22 wie auch in allen nachfolgenden Abbildungen stellen Sonderflächen dar, für die im Projekt KliWES keine Wasserhaushaltsergebnisse bereitgestellt werden (Kapitel 3.2).

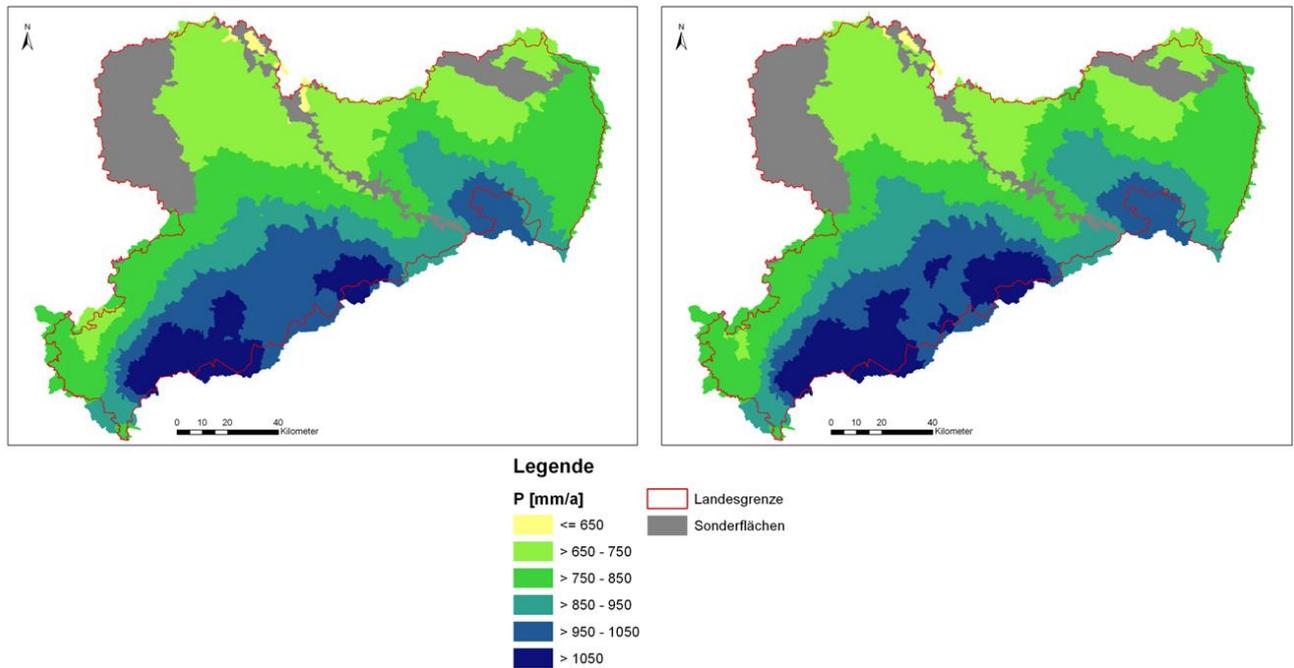


Abbildung 22: Mittlere Jahressummen (1961–1990, links und 1981–2010, rechts) des Niederschlages P (regionalisierte Beobachtungsdaten) für die sächsischen Teileinzugsgebietsflächen

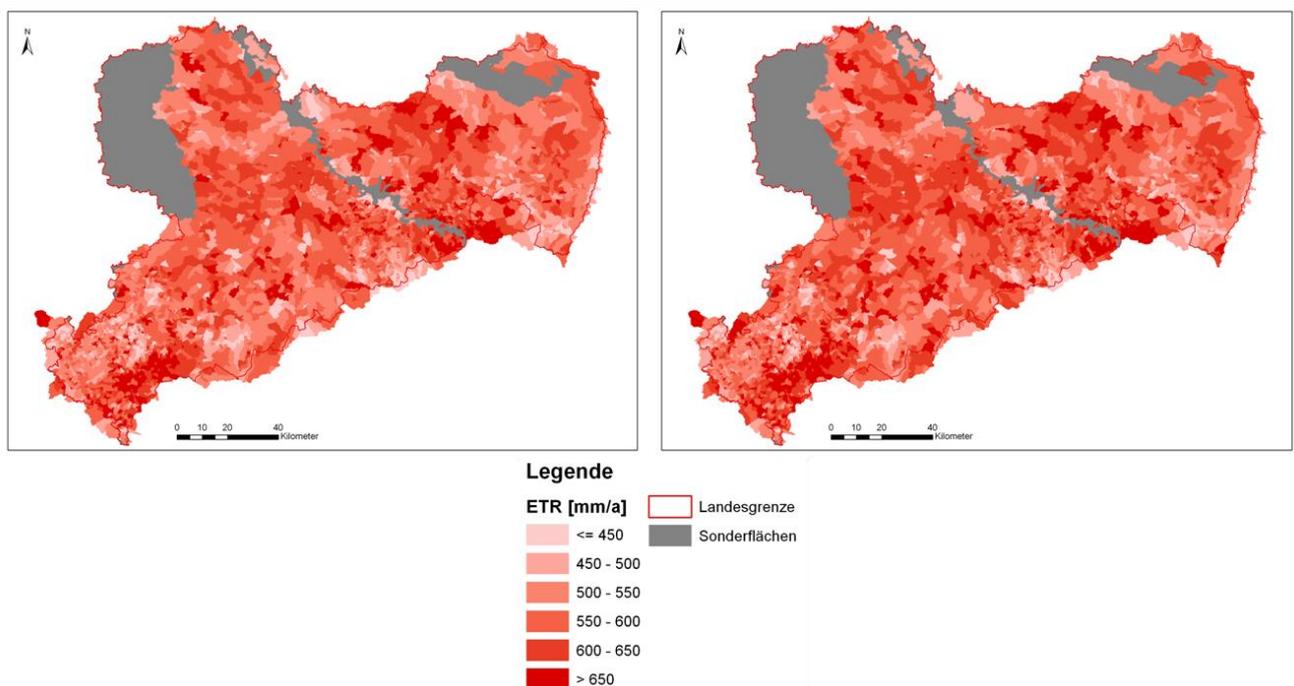


Abbildung 23: Mittlere Jahressummen (1961–1990, links und 1981–2010, rechts) der realen Verdunstung ETR für die sächsischen Teileinzugsgebietsflächen, Datenbasis: ArcEGMO-Modellrechnung für den Ist-Zustand

Demgegenüber steht eine heterogene Verteilung der langjährigen mittleren Verdunstungssummen (Abbildung 23). Ursache hierfür ist der unterschiedliche Verdunstungsanteil am Niederschlag in Abhängigkeit von der Höhe und der Landnutzung. Dies soll anhand eines Beispiels erläutert werden: Im Norden Sachsens fallen durchschnittlich rund 700 mm/a Niederschlag. Hiervon verdunsten im Mittel etwa 75 %, was 525 mm/a entspricht. In den höheren Bereichen des Erzgebirges fällt mit durchschnittlich etwa 1.000 mm/a deutlich mehr

Niederschlag. Aufgrund der geringeren Temperaturen liegt der Anteil der Verdunstung bei rund 50 % vom Niederschlag. Im Ergebnis werden für beide Regionen vergleichbar hohe Verdunstungsmengen erreicht. Den größten Einfluss auf die Verdunstung hat dementsprechend die jeweilige dominierende Landnutzung. So weisen Wasserflächen und Nadelwälder durchschnittlich eine sehr hohe Verdunstung auf. Daraus resultiert die heterogene Verteilung der mittleren Verdunstungssummen in Abbildung 23.

Der Vergleich der beiden räumlichen Verteilungen in Abbildung 23 zeigt geringfügig höhere Werte für den Zeitraum 1981–2010 gegenüber 1961–1990. Diese leicht geänderte Verteilung ergibt sich aus der geringfügig höheren Niederschlagsmenge und den höheren mittleren Temperaturen für den Zeitraum 1981–2010.

Für die Verteilung der mittleren Jahressummen des Gesamtabflusses R zeigt sich ein Süd-Nord-Gefälle mit den höchsten Abflusswerten im Westerzgebirge und den geringsten Werten in der Leipziger Börde (Nordsachsen). Diese Verteilung wird einerseits durch die topographischen Gegebenheiten Sachsens beeinflusst. Andererseits spielen die räumliche Verteilung des Niederschlags und die regional sehr unterschiedliche Verdunstung eine wichtige Rolle. So treten in höher gelegenen Gebieten größere Niederschlagsmengen P und meist geringere Verdunstungswerte ETR auf. Dies führt zu einem größeren Abflussanteil in der Wasserhaushaltsbilanz. In tiefer gelegenen Bereich sind die Niederschlagswerte geringer und der Verdunstungsanteil in der Wasserhaushaltsbilanz steigt. Daraus resultierend sinkt der Anteil der Abflusskomponente R (Abbildung 24).

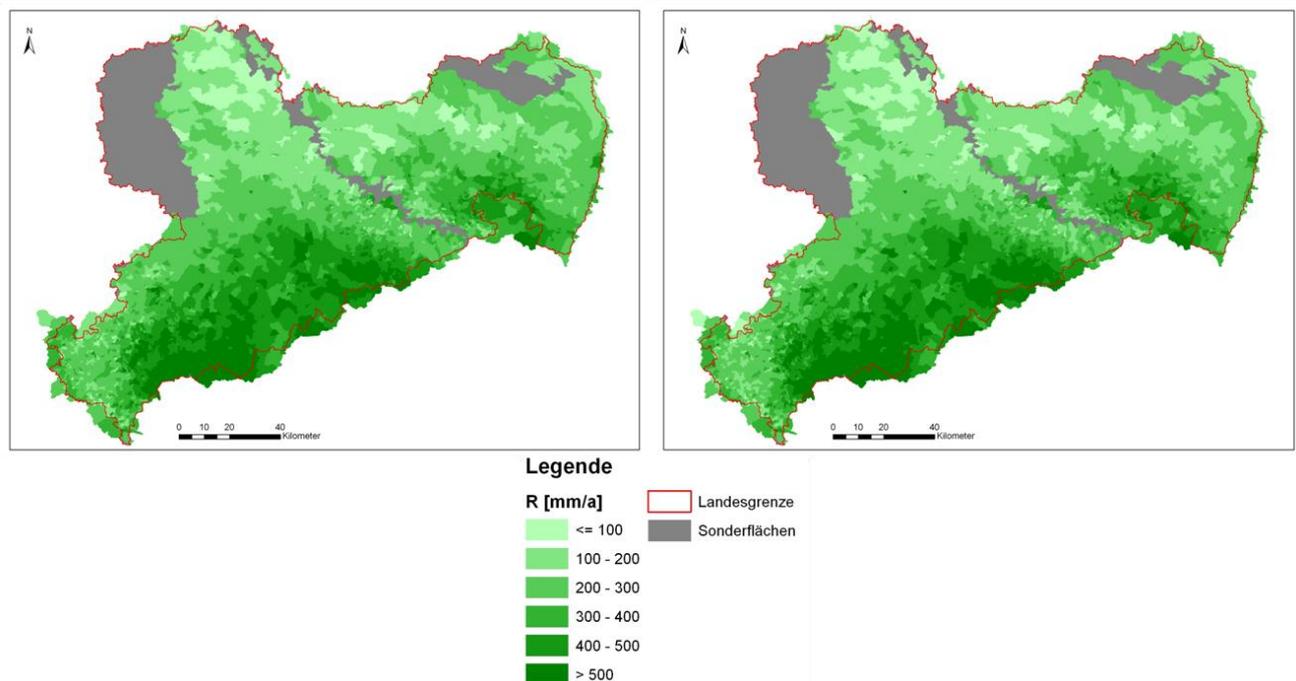


Abbildung 24: Mittlere Jahressummen (1961–1990, links und 1981–2010, rechts) des Gesamtabflusses R für die sächsischen Teileinzugsgebietsflächen, Datenbasis: ArcEGMO-Modellrechnung für den Ist-Zustand

Der Vergleich der beiden Zeiträume zeigt für die Periode 1981–2010 (Abbildung 24, rechts) im Mittel etwas höhere Gesamtabflussmengen, die mit den ebenfalls höheren Niederschlagssummen gegenüber 1961–1990 (Abbildung 22, rechts) korrespondieren. Es handelt sich allerdings überwiegend nur um geringfügige Zunahmen des Gesamtabflusses.

Die räumlichen Verteilungen der mittleren Jahressummen (1961–1990 und 1981–2010) der schnellen und langsamen Grundwasserkomponente RG1 und RG2, der Summe dieser beiden Komponenten RG und der schnellen Abflusskomponente RS für den Ist-Zustand sind im Anlagenband, Kap. 6 (Abbildungen A12 bis A15) zu finden.

6.1.2 Räumliche Verteilung von Wasserhaushaltsgrößen in Sachsen basierend auf der Realisierung 66

Die räumliche Verteilung von Wasserhaushaltsgrößen unter der Annahme des Klimawandels wird exemplarisch für die Realisierung 66 ausgewertet. Für die weiteren Realisierungen zeigen sich keine signifikant anderen Entwicklungen der Wasserhaushaltsgrößen. Üblicherweise wird im Falle von mehreren Projektionsläufen das Mittel aus diesen als Modellklimasignal bestimmt. Es ist aber zu erwarten, dass die Abweichung der einzelnen Realisierungen vom Mittel aller Realisierungen gegenüber dem Ausmaß des Änderungssignals gering ist. Daher reicht die Auswertung der ausgewählten Realisierung 66 für die grundsätzlichen Aussagen bei Verwendung von WETTREG2010 aus. Perspektivisch wäre für Aussagen von Modellspannweiten die Erweiterung der Eingangsdaten auf ein Ensemble von Klimamodellen und Emissionsszenarien sinnvoll.

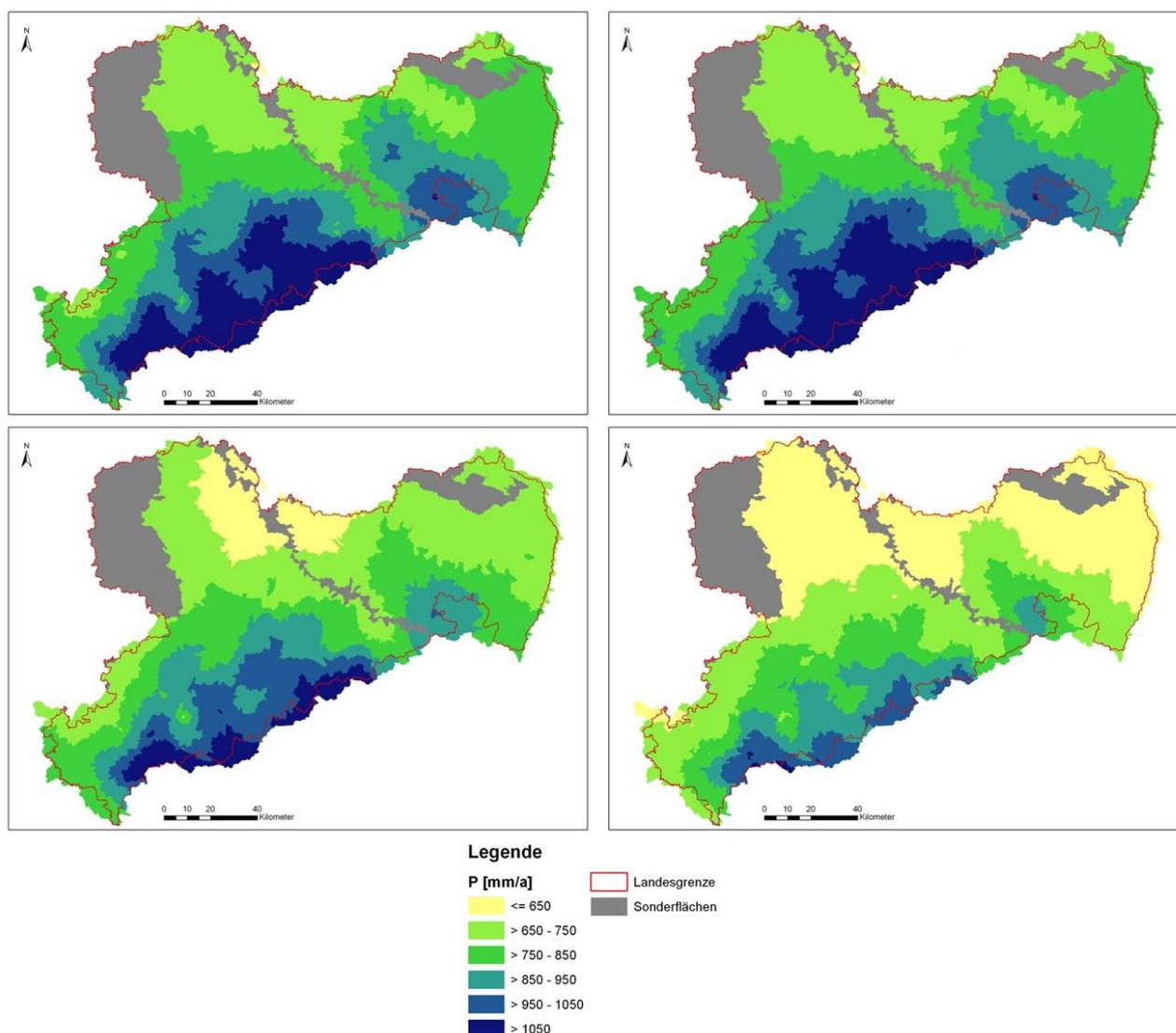


Abbildung 25: Mittlere Jahressummen (1961–1990, oben links; 1981–2010, oben rechts; 2021–2050, unten links; 2071–2100, unten rechts) des Niederschlages P der Realisierung 66 auf den sächsischen Teileinzugsgebietsflächen

In den Karten (Abbildung 25 bis Abbildung 27) ist die räumliche Verteilung der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag P, reale Verdunstung ETR und Abfluss R dargestellt. Hierbei werden die langjährigen Mittelwerte der jeweiligen Wasserhaushaltsgröße für die Zeiträume 1961–1990, 1981–2010, 2021–2050 und 2071–2100 betrachtet. Es können Vergleiche auf der Grundlage verschiedener Datengrundlagen durchgeführt werden:

- So ist einerseits der Vergleich des beobachteten Ist-Zustandes, welcher mit dem Modell ArcEGMO simuliert wurde, mit den Projektionsdaten möglich. Dies kann für die vergangenen Zeiträume von 1961–1990 und 1981–2010 durchgeführt werden.
- Andererseits können die vier oben genannten Perioden innerhalb eines Projektionsdatensatzes gegenübergestellt werden, um z. B. die mögliche zukünftige Entwicklung einer Wasserhaushaltsgröße darzustellen.

Der Vergleich der mittleren Niederschlagssummen für die Zeiträume 1961–1990 bzw. 1981–2010 des Ist-Zustandes (Abbildung 22) mit der Realisierung 66 (Abbildung 25, oben links und oben rechts) zeigt, dass sich diese nur in einzelnen Regionen leicht unterscheiden. Innerhalb der Realisierung 66 wird mit fortschreitender Zeit eine deutliche Abnahme der Niederschlagsmengen vor allem in Nordsachsen erkennbar (Abbildung 25).

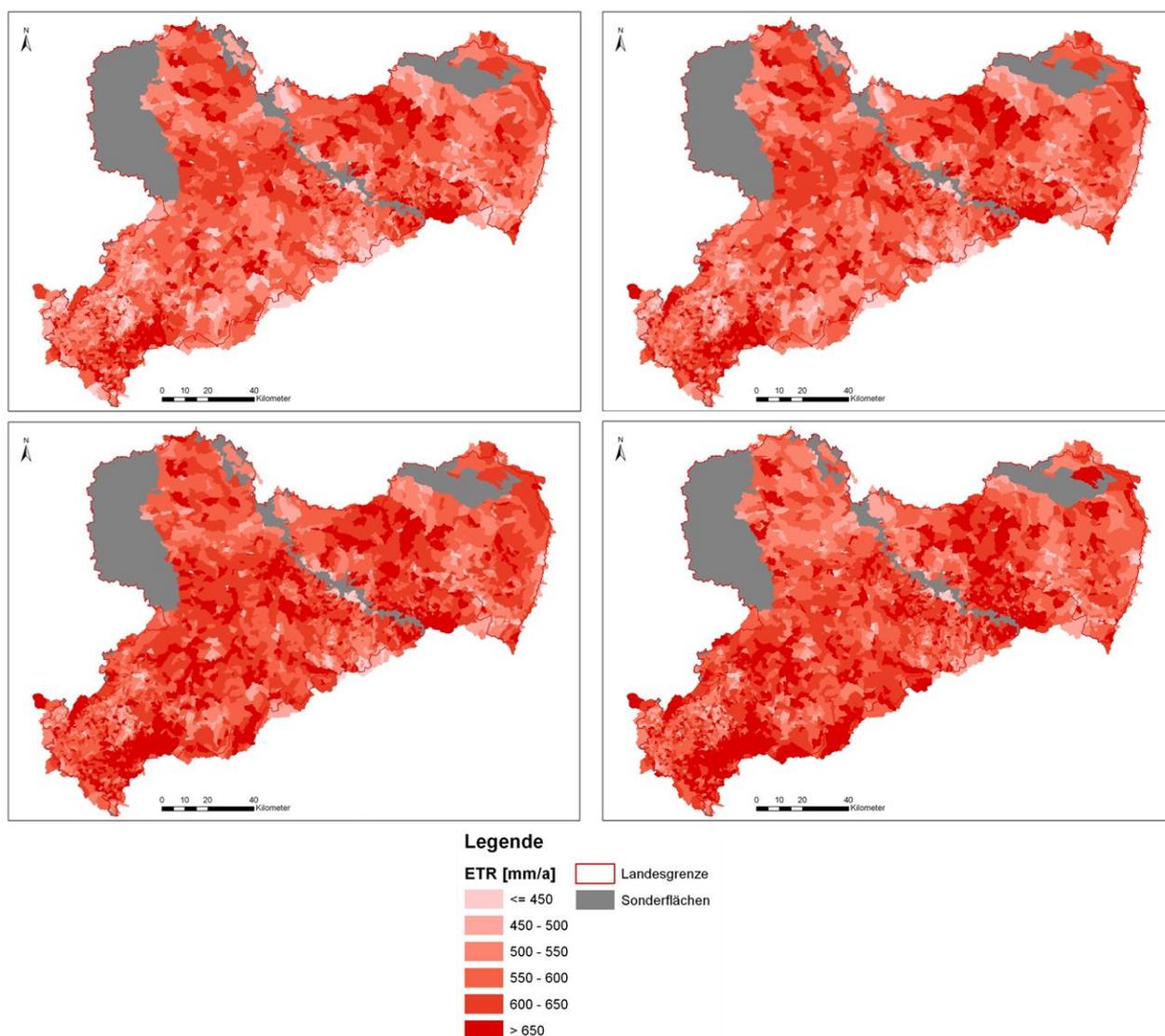


Abbildung 26: Mittlere Jahressummen (1961–1990, oben links; 1981–2010, oben rechts; 2021–2050, unten links; 2071–2100, unten rechts) der realen Verdunstung ETR der Realisierung 66 auf den sächsischen Teileinzugsgebietsflächen

Hingegen nimmt die reale Verdunstung ETR unter Annahme der Realisierung 66 in Zukunft deutlich zu (Abbildung 26). Im Ergebnis kommt es zu einer generellen deutlichen Reduktion des Gesamtabflusses R gegenüber dem Beobachtungszeitraum in ganz Sachsen, wie Abbildung 27 zeigt. Der nördliche Teil Sachsens ist allerdings besonders stark beeinflusst, weil er schon für den Beobachtungszeitraum (1961–1990, Abbildung 24) relativ die geringsten Abflusswerte aufweist.

Die Karten der räumlichen Verteilungen unter Annahme der Realisierung 66 von schneller und langsamer Grundwasserkomponente RG1 und RG2 sowie der schnellen Abflusskomponente RS befinden sich im Anlagenband, Kap. 6 (Tabelle A16 bis Tabelle A18). Dargestellt werden die langjährigen mittleren Werte (1961–2100) für diese Wasserhaushaltsgrößen.

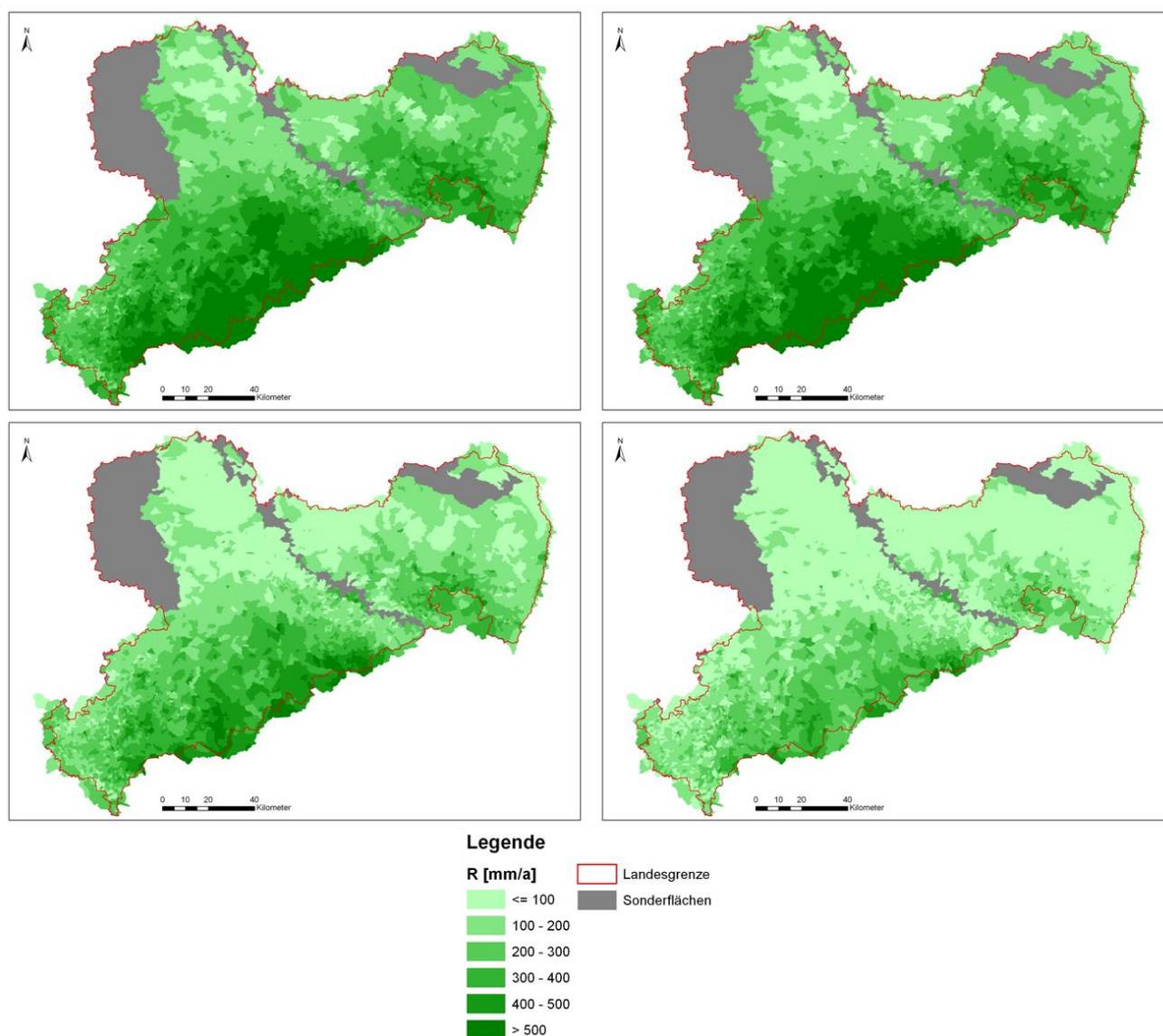


Abbildung 27: Mittlere Jahressummen (1961–1990, oben links; 1981–2010, oben rechts; 2021–2050, unten links; 2071–2100, unten rechts) des Gesamtabflusses R der Realisierung 66 auf den sächsischen Teileinzugsgebietsflächen

6.1.3 Konventionen der Landnutzungsszenarien

Das LfULG legte für KliWES drei Landnutzungsszenarien fest (LÜNICH et al. 2013). Sie wurden in Zusammenarbeit mit dem Staatsbetrieb Sachsenforst und dem IHM, TU Dresden erarbeitet. Die entwickelten Szenarien

stellen Konventionen dar und sind als „Was-wäre-wenn-Varianten“ zu verstehen. Die dargestellten Entwicklungen der Landnutzungen entsprechen nicht in allen Teilen einer realistisch zu erwartenden Entwicklung.

Entsprechend ihrer Landnutzungsänderungen wurden die Szenarien „Waldumbau“, „Versiegelung“ und „Flächenverbrauch“ benannt. Nachfolgend werden sie kurz näher erläutert. Weiterführende Informationen zu den Landnutzungsszenarien enthält LÜNICH et al. (2013).

Waldumbau

Im Landnutzungsszenario Waldumbau erfolgt die Umwandlung von Nadel- in Laubwälder. Diese Maßnahme wird allgemein aus unterschiedlichsten Gründen durchgeführt. Im Zusammenhang mit dem Projekt KliWES kann der Waldumbau der bestehenden sächsischen Wälder im Hinblick auf zukünftige klimatische Herausforderungen verstanden werden. Das bedeutet, der Waldumbau wird unter Berücksichtigung geänderter Niederschlagsverhältnisse, höherer Temperaturen und zunehmender Witterungsextreme geplant (Forst 2014, online; NABU 2014, online; Waldwissen 2014, online). Damit erfolgt die Umwandlung von standortfremden Nadelwäldern in naturnahe Laubwälder, d. h. zum Beispiel, dass reine Fichtenbestände in Misch- oder Laubwälder umgewandelt werden. Modellintern werden im Rahmen des Szenarios alle Nadelwälder, außer der potenziell natürlichen Vegetation, in Laubwälder umgewandelt.

Versiegelung

Das Landnutzungsszenario Versiegelung nimmt eine Verdichtung der Bebauung und damit eine Erhöhung des Versiegelungsgrades innerhalb der bestehenden sächsischen Städte und Ortschaften an. Für die in KliWES definierten Stadtflächen (Kapitel 2.9) wurde angenommen, dass sich der Versiegelungsgrad verdoppelt, wobei dieser aber den Maximalwert von 95 % nicht überschreitet. Für die übrigen Städte und Ortschaften wurde ein maximaler Versiegelungsgrad von 60 % für Wohnbauflächen und 90 % für Industrieflächen vom LfULG festgelegt.

Flächenverbrauch

Unter der Annahme einer Bevölkerungszunahme in 13 ausgewählten sächsischen Städten (Kapitel 2.9) wird im Rahmen des Landnutzungsszenarios Flächenverbrauch eine Ausdehnung der Stadtflächen simuliert. Grundlage für die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) ist eine Trendanalyse des Zeitraums 2000–2010. Unter der Annahme einer weiteren linearen Zunahme des Flächenverbrauchs bis 2100 von Acker- und Grünlandflächen in Siedlungsflächen ergibt sich ein Anteil der versiegelten Fläche von rund 24 % der Landesfläche.

6.2 Ergebnisse von ausgewählten Einzugsgebieten

Die detaillierte Untersuchung wird an fünf Einzugsgebieten aus unterschiedlichen Naturräumen durchgeführt, die die Heterogenität Sachsens widerspiegeln. Diese Gebiete liegen sowohl im Flachland und Gebirge als auch im Lockergesteins- und Festgesteinsbereich. Zudem sind die dominierende Landnutzung und die Anteile der grundwassernahen Flächen der Einzugsgebiete unterschiedlich (Tabelle 4).

Für die fünf ausgewählten Einzugsgebiete liegen DIFGA-Analysen aus Säule A vor (SCHWARZE et al. 2012). D. h., dass die Wasserhaushaltsmodelle dieser Gebiete auf Grundlage der verfügbaren langjährigen mittleren Wasserhaushaltsbilanzen sowie der mittleren monatlichen Werte kalibriert und optimiert wurden (Kapitel 5).

Tabelle 4: Kurze Charakteristik der Beispielgebiete

Pegelname	Seifhennersdorf	Nemt 1	Niedermülsen	Schönau	Cunnersdorf 1
Flusseinzugsgebiet	Neiße	Vereinigte Mulde	Zwickauer Mulde	Schwarze Elster	Elbe
Gewässer	Mandau	Mühlbach	Mülsenbach	Klosterwasser	Cunnersdorfer Bach
Einzugsgebietsgröße	75 km ²	57 km ²	50 km ²	105 km ²	30 km ²
Mittlere Höhe	417 m ü. NN	155 m ü. NN	369 m ü. NN	193 m ü. NN	429 m ü. NN
Messung von Q	Ab 11/1967	Ab 04/1995	Ab 11/1965	Ab 11/1975	Ab 11/1964
Naturraum	Oberlausitzer Bergland	Nordsächsisches Platten- und Hügelland	Erzgebirgsbecken	Oberlausitzer Gefilde bzw. Oberlausitzer Heide- und Teichgebiet	Sächsische Schweiz
Dominierende Landnutzung	Acker-/Grünland	Ackerland	Ackerland	Ackerland	Nadelwald
Art der Verfestigung	Festgestein	Lockergestein	Festgestein	Lockergestein	Festgestein
Hydrogeologische Einheit	Magmatisches Tiefengestein	Lockergestein	Rotliegendes, Molasse, Konglomerat	Lockergestein	Sandstein
Anteil grundwasser-naher Flächen	-	9,5 % der Gesamtfläche	36 % der Gesamtfläche	31 % der Gesamtfläche	-

Die erreichten Gütemaße der fünf Gebiete sind in Tabelle 5 dargestellt. Genauere Informationen zu den Gütemaßen finden sich im Kapitel 5.5 und Kapitel 5.7. In den Einzugsgebieten wurde hinsichtlich des p_{bias} für die Wasserhaushaltsgrößen ETR, RG und QG1 durchgängig eine sehr gute Anpassung an die DIFGA-Ergebnisse erzielt. Der p_{bias} ist deutlich kleiner als 1 %. Um Werte von $p_{bias} < 1\%$ zu erreichen, musste teilweise eine normierte absolute Abweichung r_{abs} von rund 1 in Kauf genommen werden. Dennoch lässt sich für die ausgewählten Einzugsgebiete von einer guten Anpassung sprechen.

Tabelle 5: Gütemaße der fünf Beispielgebiete des Zeitraums 1992–2001

	r_{abs} (ETR)	p_{bias} (ETR) [in %]	r_{abs} (RG)	p_{bias} (RG) [in %]	r_{abs} (QG1)	p_{bias} (QG1) [in %]
Seifhennersdorf	0,882	0,0850356	0,660	0,0766442	0,527	0,0000041
Nemt 1	1,372	0,0000106	1,269	0,0000198	0,835	0,0000029
Niedermülsen	1,023	0,0001285	0,717	0,0003419	0,593	0,0000058
Schönau	1,428	0,0000001	2,902	0,0000014	0,919	0,0003169
Cunnersdorf 1	0,984	0,0760326	0,927	0,0284901	0,595	0,0000004

Im Kapitel 6.2.1 wird der gegenwärtige Wasserhaushalt der fünf Einzugsgebiete (SCHWARZE et al. 2013) aufgezeigt. Auf die Grundwasserneubildung wird in Kapitel 4.3 eingegangen. Für das Einzugsgebiet Seifhennersdorf werden beispielhaft die Klima- und Wasserhaushaltsgrößen des Ist-Zustandes mit den drei Realisierungen verglichen (Kapitel 6.2.2 und 6.2.3). Des Weiteren werden die mittleren Wasserhaushaltsbilanzen und mittleren Monatssummen der Klima- und Landnutzungsszenarien (Kapitel 6.2.4 und 6.2.5) analysiert.

6.2.1 Vergleich des Wasserhaushalts in verschiedenen Einzugsgebieten für den Ist-Zustand

Fünf Einzugsgebiete (Tabelle 4) in unterschiedlichen Naturräumen wurden hinsichtlich der Aufteilung ihrer Wasserhaushaltskomponenten gegenübergestellt.

Das Gebiet Seifhennersdorf liegt im Lausitzer Bergland im Osten Sachsens. Nemt 1 und Schönau befinden sich im nördlichen Flachland, Niedermülsen im Vorland des sächsischen Erzgebirges. Cunnersdorf 1 liegt an der Grenze zu Tschechien im sächsischen Elbsandsteingebirge. Lagebezogen und in Abhängigkeit von den Gebietseigenschaften unterscheidet sich die Aufteilung der Wasserhaushaltskomponenten (Tabelle 6). Einzugsgebiete mit einer mittleren Höhe von über 400 m ü. NN weisen gegenüber Gebieten im Flachland höhere Jahresniederschlagssummen und einen geringeren prozentualen Anteil der realen Verdunstung auf. Folglich fällt der Anteil der Abflusskomponenten höher aus als in den Flachlandgebieten.

Das Gebiet Cunnersdorf 1 weist aufgrund des dominierenden Nadelwaldanteils eine relativ hohe reale Verdunstung von 73 % vom Niederschlag auf. Die große Blattoberfläche von Nadelwäldern führt zu einer erhöhten Transpiration sowie Interzeption und in weiterer Folge zu einem geringeren prozentualen Anteil der schnellen Abflusskomponente am Niederschlag.

Tabelle 6: Gegenwärtiger Wasserhaushalt (1961–2010) an Beispielgebieten in Sachsen – Mittlere Jahressummen des Niederschlages [mm/a] und prozentuale Anteile der Wasserhaushaltsgrößen am Niederschlag

	P [mm]	ETR [% von P]	R [% von P]	RS [% von P]	RG1 [% von P]	RG2 [% von P]	RG [% von P]
Seifhennersdorf	929	57	43	12	22	9	31
Nemt 1	706	84	16	3	7	6	13
Niedermülsen	917	65	35	13	10	12	22
Schönau	777	87	13	4	5	4	9
Cunnersdorf 1	890	73	27	2	11	14	25

In Abbildung 28 sind die 11-jährigen gleitenden Mittel des Niederschlages über den Zeitraum von 1966–2005 für die fünf Beispielgebiete dargestellt. Der Verlauf unterscheidet sich jeweils nur hinsichtlich der durchschnittlichen Niederschlagshöhe, nicht aber in der grundsätzlichen zeitlichen Entwicklung. So weist das in Nordsachsen gelegene Einzugsgebiet Nemt 1 den geringsten durchschnittlichen Niederschlag auf. Die drei höher gelegenen Einzugsgebiete Seifhennersdorf, Niedermülsen und Cunnersdorf zeigen hingegen deutlich größere mittlere Niederschlagsmengen. Über den gesamten Zeitraum betrachtet, ergibt sich eine leichte Tendenz der Zunahme des mittleren Niederschlages. Dies macht deutlich, dass die beobachteten meteorologischen Daten schon im Zeitraum von 1961–2010 einen positiven Trend der Klimasignale aufweisen.

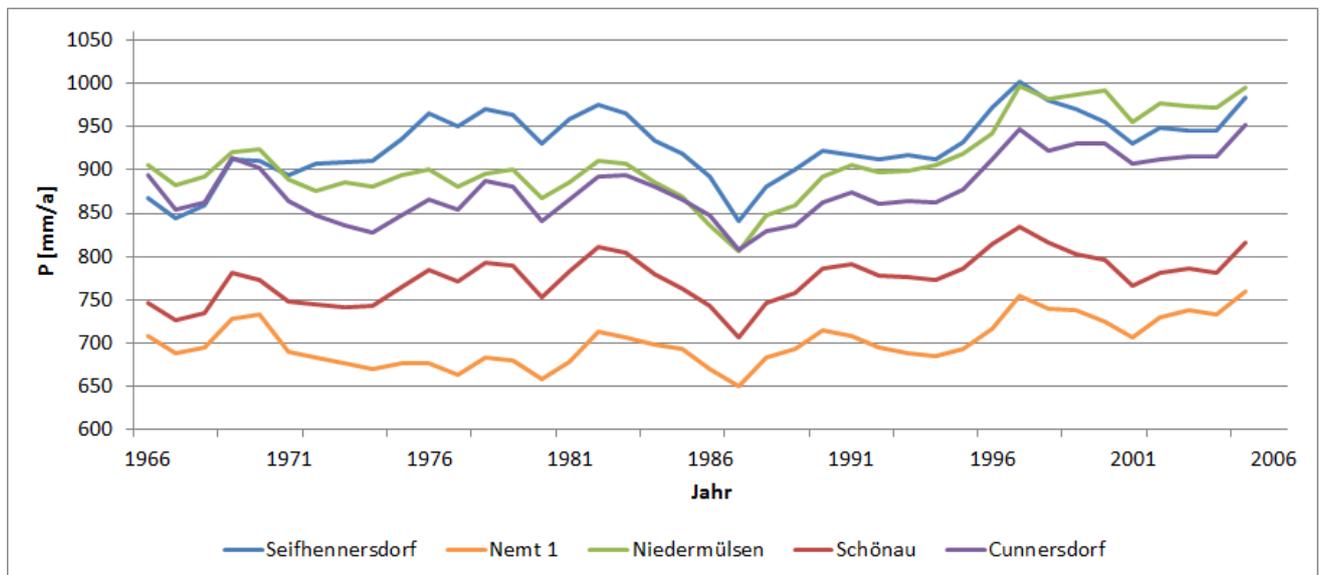


Abbildung 28: 11-jähriges gleitendes Mittel des Niederschlags P über den Zeitraum 1966–2005 für fünf sächsische Beispielgebiete

Auch die Entwicklung der Temperatur weist für diesen Zeitraum einen positiven Trend auf. Daraus resultiert eine Zunahme der mittleren realen Verdunstung, was in Abbildung 29 in Form von 11-jährigen gleitenden Mitteln dieser Wasserhaushaltsgröße für die fünf Beispielgebiete dargestellt ist. Dieser positive Trend im Zeitraum 1966–2005 ist allerdings deutlicher erkennbar als beim Niederschlag.

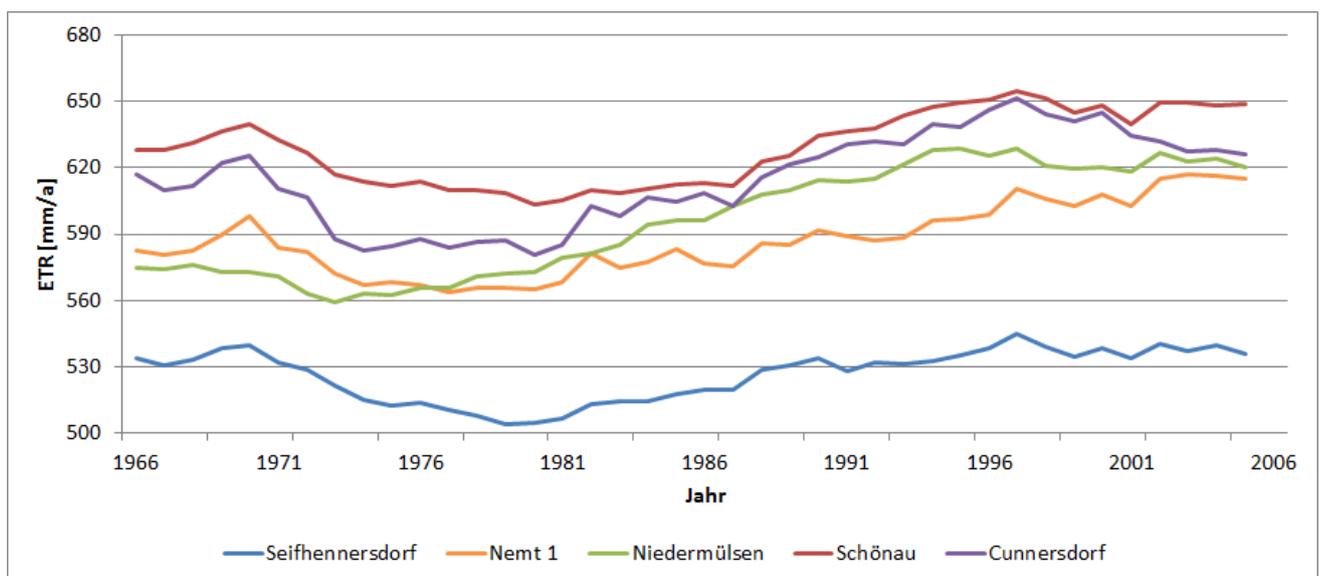


Abbildung 29: 11-jähriges gleitendes Mittel der realen Verdunstung ETR über den Zeitraum 1966–2005 für fünf sächsische Beispielgebiete

Auffällig ist der Verlauf der Ganglinie für das Gebiet Seifhennersdorf. Trotz der höchsten durchschnittlichen Niederschlagsmengen liegt die Kurve der realen Verdunstung deutlich unter den mittleren Verdunstungswerten der anderen vier Einzugsgebiete. Hierfür gibt es verschiedene Ursachen wie die mittlere Geländehöhe, die Landnutzung, das mittlere Gefälle, die Durchlässigkeit des Bodens und den Anteil grundwassernahe Flächen an der Gesamtfläche. So dominieren im Gebiet weder stark verdunstungswirksame Nadelwald- noch Versiegelungsflächen die Landnutzung sondern Acker- und Grünlandflächen. Ebenso ist der Anteil grundwassernahe Flächen mit starkem Verdunstungsanspruch sehr gering. Auch aufgrund der höheren geografischen Lage

fällt die mittlere reale Verdunstung niedrig aus. Dagegen sorgt die etwas höhere Durchlässigkeit des Bodens für ein gutes Infiltrationsvermögen im Einzugsgebiet Seifhennersdorf, was für hohe Werte der Grundwasserkomponente RG sorgt.

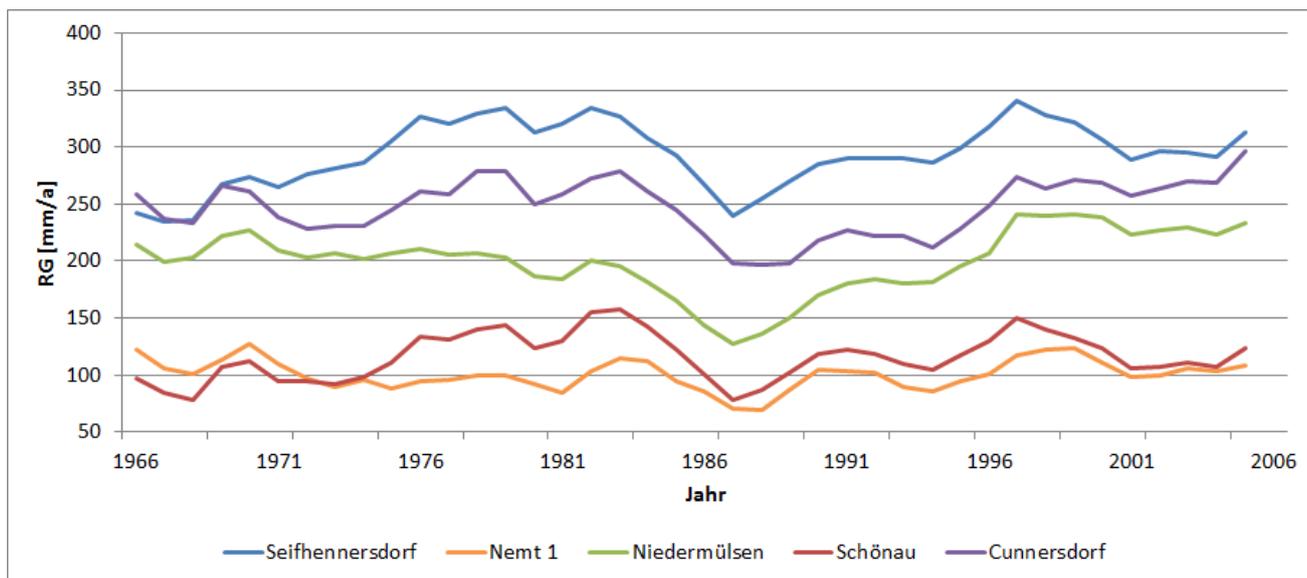


Abbildung 30: 11-jähriges gleitendes Mittel der Grundwasserkomponente RG über den Zeitraum 1966–2005 für fünf sächsische Beispielgebiete

Die 11-jährigen gleitenden Mittel dieser Wasserhaushaltsgröße für die fünf Beispielgebiete sind in Abbildung 30 zu sehen. Ein eindeutiger Trend wie bei der realen Verdunstung ist für diese Größe nicht zu erkennen. Die Niveaus der einzelnen Kurven ordnen sich entsprechend den lokalen Gegebenheiten in den Einzugsgebieten an. Die beiden nördlichen gelegenen Gebiete Nemt 1 und Schönau bilden hierbei die untere Grenze für den Verlauf der Grundwasserkomponente. Zur weiteren Betrachtung dieser Wasserhaushaltsgröße sind in Abbildung 31 die mittleren Jahressgänge für die Zeiträume 1961–1990 und 1981–2010 dargestellt.

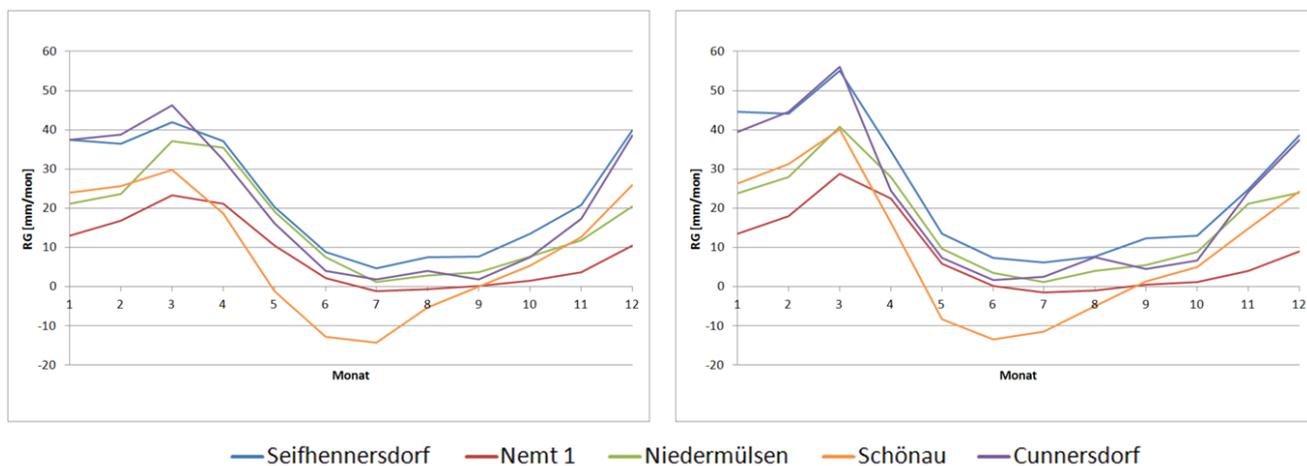


Abbildung 31: Mittlere Jahressgänge (1961–1990, links; 1981–2010, rechts) der Grundwasserkomponente RG für fünf sächsische Beispielgebiete

Diese ähneln sich grundsätzlich in den jährlichen Verläufen der mittleren Monatssummen der Grundwasserkomponente RG. Nur für März zeigt sich eine deutliche Zunahme von RG für den Zeitraum 1981–2010 gegenüber 1961–1990.

Wie in Abbildung 31 zu erkennen ist, werden die Grundwasserspeicher durch RG im Winterhalbjahr aufgefüllt. In den Sommermonaten tritt nur ein geringer oder kein Zufluss zum Grundwasserspeicher auf. Bei Betrachtung der beiden Lockergesteinsgebiete Schönau und Nemetz 1 fällt auf, dass im Sommerhalbjahr negative RG-Werte erreicht werden. Der mittlere jährliche Verlauf der Grundwasserkomponente im Gebiet Schönau unterscheidet sich wiederum deutlich von den übrigen vier Einzugsgebieten, weil im Sommerhalbjahr stark negative RG-Werte erreicht werden. Diese sind wesentlich darauf zurückzuführen, dass in den Sommermonaten die Zehrung aus dem Grundwasserspeicher die Grundwasserneubildung übersteigt. Für den aktuellen Monat wird im gesamten Zeitraum 1961–2010 ein Minimum von rund -43 mm/mon erreicht. Auf die Ursachen und die besondere Charakteristik von Schönau wird im Kapitel 6.2.4 eingegangen.

6.2.2 Vergleich der Klimaszenarien mit dem Ist-Zustand – Klimagrößen im Beobachtungszeitraum 1961–1990

Klima- und Wasserhaushaltsgrößen müssen in Zusammenhang mit Klimaszenarien stets auf Plausibilität geprüft werden. In diesem Fall wurde ein quantitativer, qualitativer und statistischer Vergleich der projizierten Ergebnisse mit den regionalisierten Beobachtungsdaten des Ist-Zustandes durchgeführt. Der Vergleich erfolgt für den Zeitraum 1961–1990, der Klimanormalperiode der WMO, als Referenzzeitspanne (LUGV 2010; CSC 2012). Er hat zum Ziel, systematische Fehler festzustellen, eine quantitative Abschätzung der Projektionsgüte zu erstellen und eine sinnvolle Interpretation der projizierten Wasserhaushaltsgrößen zu ermöglichen. Sämtliche der anhand von Beispielen vorgestellten Auswertungsmethoden lassen sich mithilfe der im Internet verfügbaren Wasserhaushaltsdaten (Kapitel 7.2) durchführen.

Für den statistischen Vergleich werden der Mittelwert, die Spannweite und der Variationskoeffizient V herangezogen. Letzterer stellt die normierte Standardabweichung dar, für die die Standardabweichung s durch den Mittelwert \bar{x} einer Reihe dividiert und anschließend mit 100 multipliziert wird.

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100$$

Formel 3

Damit lassen sich Datenreihen mit unterschiedlichen Mittelwerten und Standardabweichungen vergleichen. In diesem Fall wurde ein Vergleich zwischen Realisierungen der Klimaprojektion und den regionalisierten Beobachtungsdaten des Ist-Zustandes durchgeführt. Der Vergleich erfolgt beispielhaft für die Klimagrößen Niederschlag und Temperatur des Gebietes Seiffhennersdorf. Die grundsätzliche Entwicklung dieser beiden Größen findet sich auch für die anderen vier Beispielgebiete wieder.

Generell wird darauf hingewiesen, dass das Kontrollklima (1961–ca. 2020) der Projektionen keinen Trend aufweisen muss. Das für die Entwicklung der Klimagrößen entscheidende Treibhausgassignal wird innerhalb der Projektionen über das gesamte 21. Jahrhundert projiziert. Die Änderungen der Modellsignale sind daher nur für den Zeitraum bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu bewerten. Die im Zeitraum des Kontrollklimas aufgetretenen natürlichen Fluktuationen, Variabilitäten und Dynamiken werden von den Projektionen nicht abgebildet.

Temperatur

Der statistische Vergleich der Temperaturwerte der drei Realisierungen mit den Werten des Ist-Zustandes zeigt, dass die betrachteten statistischen Eigenschaften ähnlich sind (Tabelle 7). Bei allen drei Realisierungen ist kein systematischer Projektionsfehler festzustellen, wie auch in Abbildung 32 zu erkennen. Im Falle eines solchen Fehlers würden die Projektionsdaten im Vergleichszeitraum eine deutliche und konstant bleibende Abweichung von den Werten des Ist-Zustandes aufweisen.

Die mittlere Temperatur wird im Vergleich zum Ist-Zustand marginal überschätzt. Anhand der Spannweiten und der Variationskoeffizienten ist ersichtlich, dass die simulierten Werte für den Ist-Zustand stärker um den Mittelwert streuen als die Werte der Realisierungen. Dies ist ebenso aus den mittleren Jahreswerten der Temperatur für 1961–1990 erkennbar (Abbildung 32).

Tabelle 7: Statistischer Vergleich der Klimagröße Temperatur für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf

Tägliche Lufttemperatur				
	Mittelwert [°C]	Minimum/ Maximum [°C]	Spannweite [°C]	Variationskoeffizient [%]
Ist-Zustand	7,8	-22,1 – 27,4	50	100
Realisierung 00	8,2	-16,3 – 29,4	46	89
Realisierung 66	8,3	-14,9 – 27,6	42	89
Realisierung 99	8,2	-18,2 – 28,5	46	90

Die regionalisierten Beobachtungsdaten der Temperatur weisen einen positiven Trend im Zeitraum 1961–1990 auf. Der Temperaturtrend der drei Realisierungen in diesem Zeitraum ist ebenfalls positiv, im Gegensatz zu den Beobachtungsdaten aber geringer.

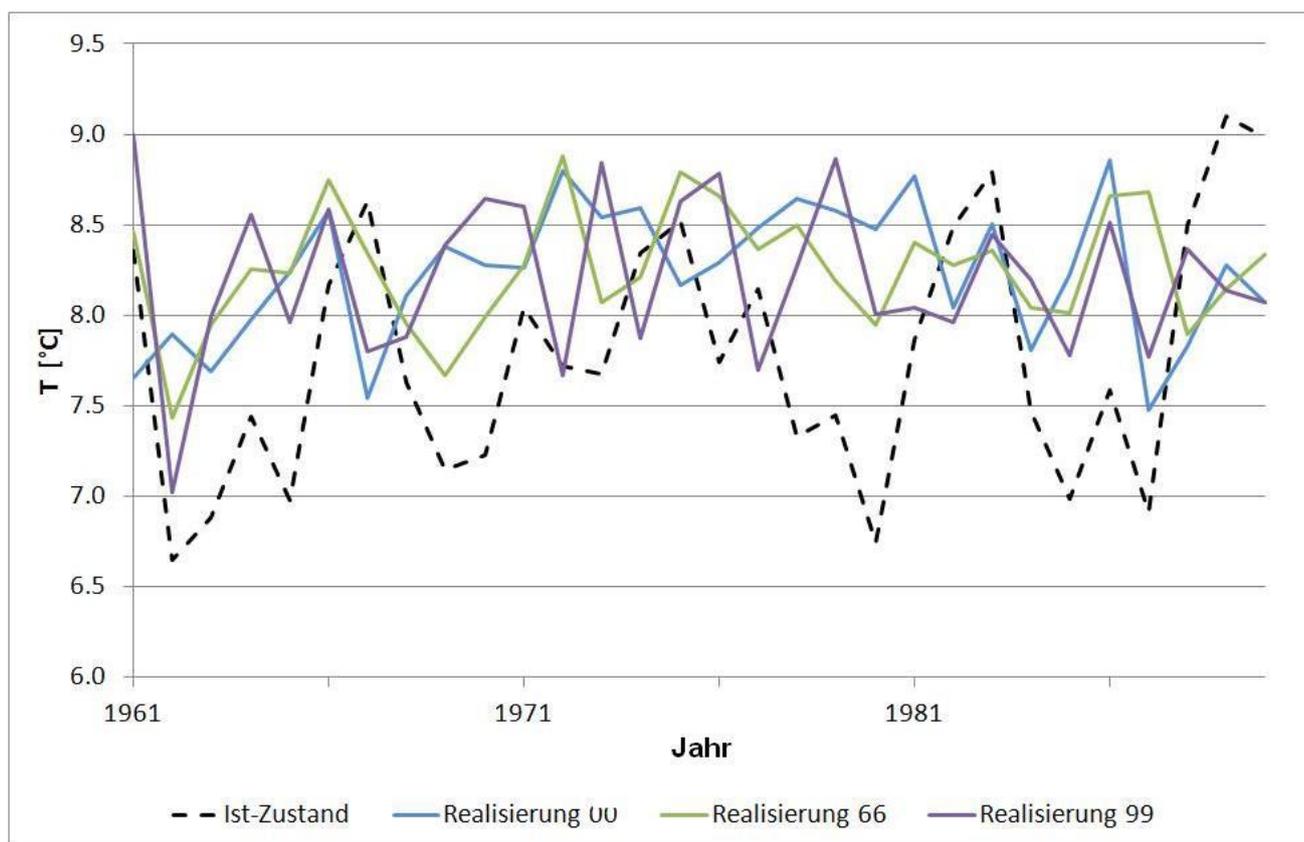


Abbildung 32: Mittlere Lufttemperatur der Realisierungen und des Ist-Zustandes im Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf

Niederschlag

Der Vergleich der gemessenen regionalisierten Niederschlagswerte mit den Realisierungen zeigt ein etwas anderes Bild. Hinsichtlich der mittleren Jahreswerte des Niederschlages (1961–1990) sind die Realisierungen

mit dem Ist-Zustand vergleichbar (Tabelle 8). Der Jahresmittelwert der Realisierung 00 liegt mit ca. 40 mm/a unterhalb des langjährigen Niederschlagsmittels des Ist-Zustands und weist damit die größte Abweichung auf. Die mittleren Monatssummen der Realisierungen liegen hingegen alle unter dem mittleren monatlichen Niederschlagswert der regionalisierten Beobachtungsdaten. Ursache hierfür sind die zum Teil deutlich geringeren Maximalniederschläge der Realisierungen. Die niedrigeren Maximalniederschläge führen zu einem geringeren Mittelwert. Außerdem sind die Spannweiten der monatlichen Niederschlagssummen für die Realisierungen kleiner als die Spannweite des Ist-Zustandes.

Tabelle 8: Statistischer Vergleich der Klimagröße Niederschlag für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf

Niederschlag					
	Mittelwert [mm/a]	Mittelwert [mm/mon]	Minimum/ Maximum [mm/mon]	Spannweite [mm/mon]	Variationskoeffizient [%]
Ist-Zustand	903	77	1 – 328	327	55
Realisierung 00	864	70	5 – 220	215	44
Realisierung 66	912	70	8 – 306	298	47
Realisierung 99	904	69	6 – 265	259	47

Anhand der Spannweiten und der Variationskoeffizienten ist ersichtlich, dass die regionalisierten Beobachtungswerte für den Ist-Zustand stärker um den Mittelwert streuen als die projizierten Werte der Realisierungen. Dies geht auch aus den aktuellen Jahressummen des Niederschlages für 1961–1990 hervor (Abbildung 33). Es kann jedoch kein systematischer Fehler festgestellt werden.

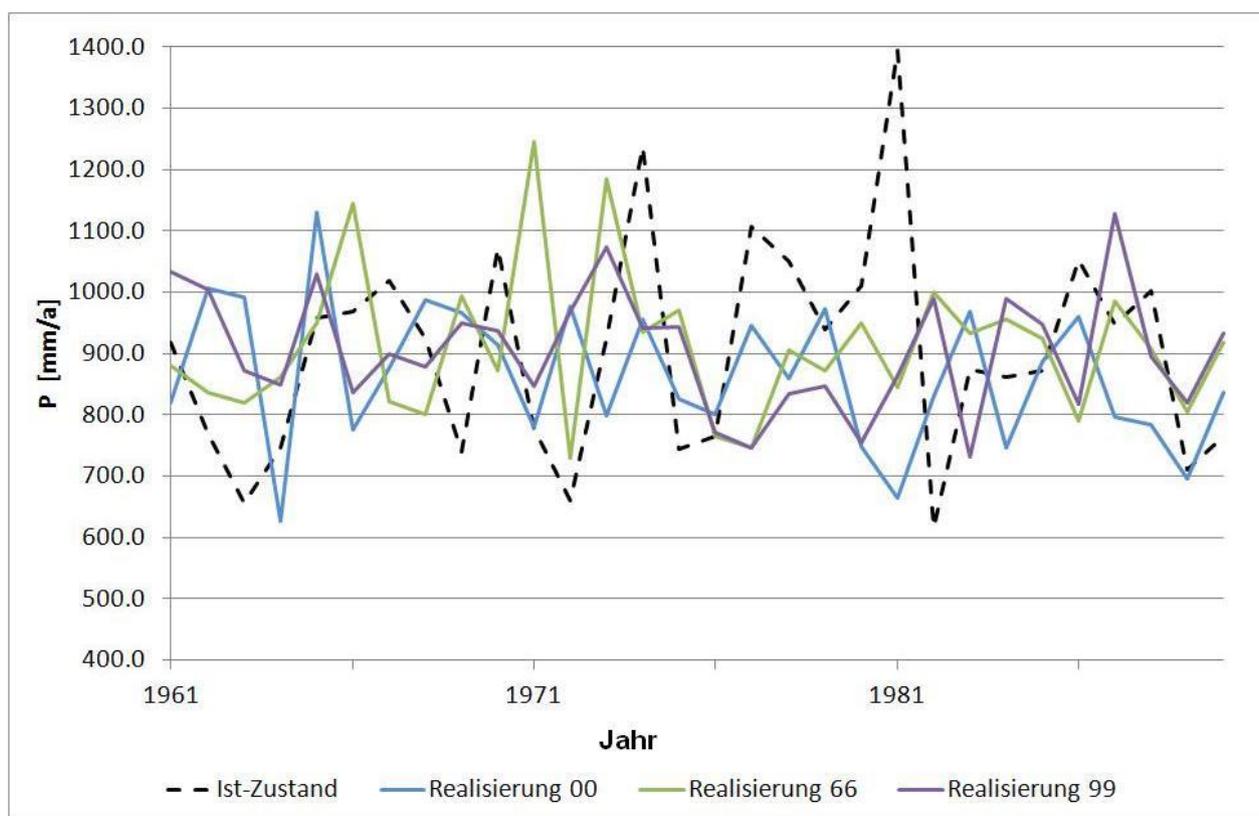


Abbildung 33: Jahressummen des Niederschlages (1961–1990) der Realisierungen und des Ist-Zustandes im Gebiet Seifhennersdorf

Allerdings unterscheidet sich die Entwicklung der projizierten Niederschläge (negative Tendenzen) vom Niederschlag des Ist-Zustandes (positiver Trend) für den Zeitraum 1961–1990.

Fazit

Für das Beispielgebiet Seifhennersdorf sind mittlere Temperatur- und Niederschlagswerte der Realisierungen mit dem Ist-Zustand vergleichbar. Die Temperatur- und Niederschlagswerte der Realisierungen weisen eine geringere Streuung auf als die regionalisierten Beobachtungsdaten (1961–1990). Systematische Abweichungen konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Grundsätzlich werden in Berechnungsmodelle die globalen klimatischen Abläufe mit den Gegebenheiten vor Ort, wie z. B. dem Relief, immer besser verknüpft und somit die Rückkopplungsprozesse mit einbezogen (SCHMIDT et al. 2011 a). Sie können das vergangene und gegenwärtige Klima aber nicht hundertprozentig nachbilden. Die Ursachen dafür sind zum einen das fehlende Wissen mancher Wirkungszusammenhänge. Zum anderen stellen CO₂-Ausstoß oder die Landnutzung keine fixen Einflussgrößen dar, sondern sind Änderungen unterworfen. Damit wird deutlich, dass im Vergleich der Beobachtungswerte mit den projizierten Werten Unterschiede auftreten können. Dies gilt für alle sächsischen Einzugsgebiete.

6.2.3 Vergleich der Klimaszenarien mit dem Ist-Zustand – Wasserhaushaltsgrößen im Beobachtungszeitraum 1961–1990

Der Vergleich der Wasserhaushaltsbilanzen des Ist-Zustandes und der drei Klimarealisierungen im Zeitraum 1961–1990 wird ebenfalls beispielhaft für das Gebiet Seifhennersdorf durchgeführt. Zusätzlich wird die Wasserhaushaltsgröße RG für diesen Zeitraum genauer dargestellt und hinsichtlich der verschiedenen meteorologischen Eingangsdatensätze (Ist-Zustand und Realisierungen) verglichen.

In Tabelle 9 sind die mittleren Jahressummen der Wasserhaushaltsgrößen für das Gebiet Seifhennersdorf des Zeitraumes 1961 bis 1990 vergleichend dargestellt. So beträgt der Niederschlag im langjährigen Mittel für dieses Gebiet knapp über 900 mm/a. Es zeigt sich hierbei, dass die mittlere jährliche Niederschlagsmenge der Realisierung 00 deutlich geringer gegenüber dem Ist-Zustand und den beiden anderen Realisierungen ausfällt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Mittlere Jahressummen der Wasserhaushaltsgrößen [mm/a] für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf

	P [mm/a]	ETR [mm/a]	RS [mm/a]	RG1 [mm/a]	RG2 [mm/a]	RG [mm/a]
Ist-Zustand	903	523	104	198	78	276
Realisierung 00	864	534	78	198	54	252
Realisierung 66	912	533	95	209	75	284
Realisierung 99	904	538	93	201	72	273

Die projizierten mittleren Jahressummen (1961–1990) der realen Verdunstung liegen dagegen für alle drei Realisierungen geringfügig über dem Wert des Ist-Zustandes. Dies führt im Ergebnis zu einem höheren Anteil der realen Verdunstung vom Niederschlag für die Realisierungen im Vergleich zum Ist-Zustand (Tabelle 10). Dementsprechend werden die anderen Größen i. d. R. unterschätzt.

Die größten Abweichungen von den mittleren Wasserhaushaltsgrößen des Ist-Zustandes ergeben sich für die Realisierung 00. Aus Abbildung 34 geht hervor, dass die Grundwasserkomponente RG der Realisierung 00 im

Vergleich zu den Werten der anderen Realisierungen im Mittel am stärksten unterschätzt wird. Die Ursache hierfür ist allerdings die insgesamt geringere mittlere Niederschlagsmenge im Zeitraum 1961–1990.

Tabelle 10: Prozentuale Anteile der Wasserhaushaltsgrößen am mittleren Niederschlag für den Zeitraum 1961–1990 für das Gebiet Seifhennersdorf

	P [mm/a]	ETR [% von P]	RS [% von P]	RG1 [% von P]	RG2 [% von P]	RG [% von P]
Ist-Zustand	903	57.9	11.5	21.9	8.6	30.6
Realisierung 00	864	61.8	9.0	22.9	6.3	29.2
Realisierung 66	912	58.4	10.4	22.9	8.2	31.1
Realisierung 99	904	59.5	10.3	22.2	8.0	30.2

Nachfolgend wird die projizierte Grundwasserkomponente RG eingehender untersucht. In der Gegenüberstellung der statistischen Eigenschaften (Tabelle 11) zeigt sich, dass die projizierten RG-Werte mit denen des Ist-Zustandes vergleichbar sind. Ein systematischer Fehler ist nicht festzustellen. Die Abweichungen bei der Betrachtung der mittleren Summen sind marginal. Anhand der Spannweite ist ersichtlich, dass die RG-Werte für den Ist-Zustand größer sind im Vergleich zu den Realisierungen. Dies ist ebenso aus den mittleren Jahressummen der Grundwasserkomponente für 1961–1990 erkennbar (Abbildung 35).

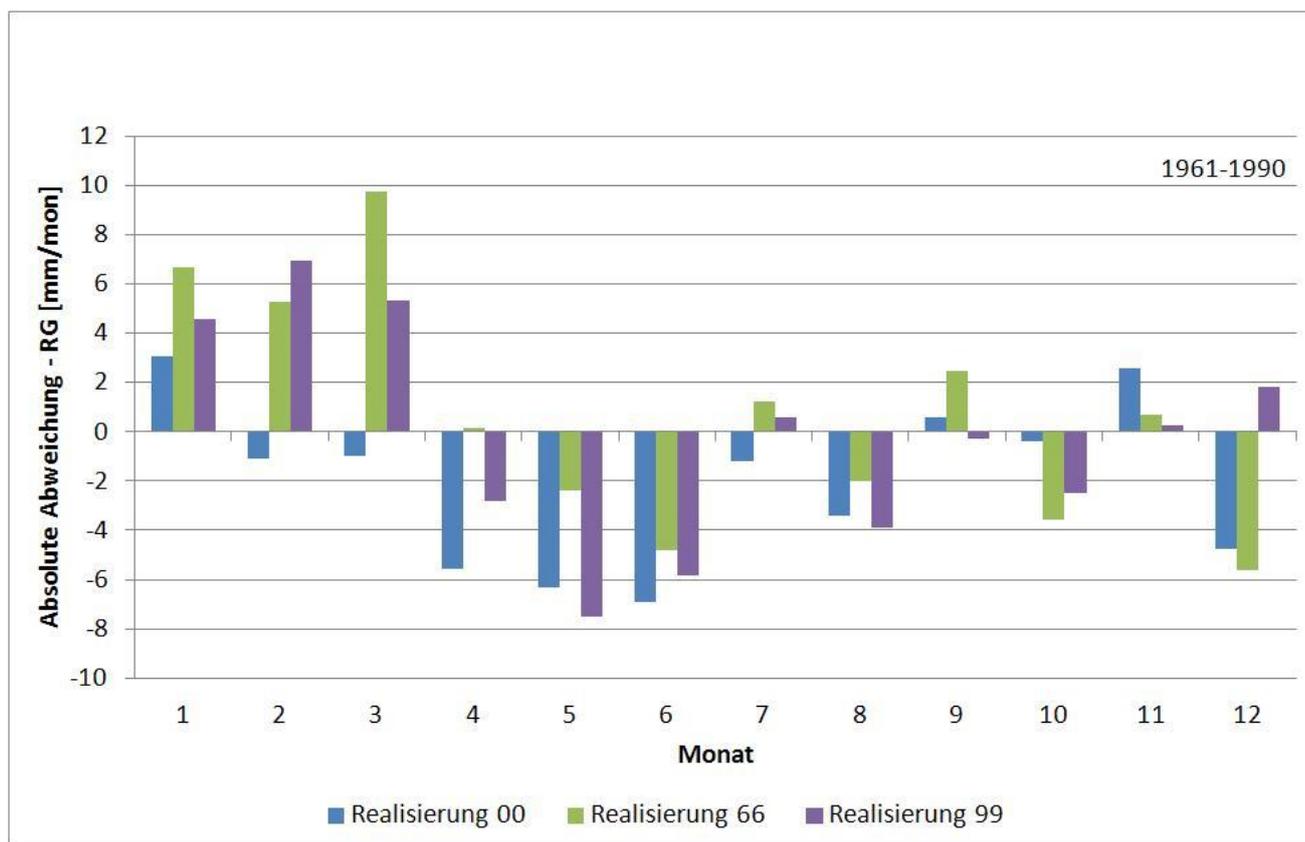


Abbildung 34: Absolute Abweichungen der projizierten mittleren Monatssummen (1961–1990) der Grundwasserkomponente RG vom Ist-Zustand 1961–1990

Für die Jahre 1977 bis 1982 weist die Grundwasserkomponente des Ist-Zustandes im Vergleich zu den anderen Jahren höhere Werte auf. Dies führt im Zeitraum 1977 bis 1982 zu einer deutlichen Auffüllung der Grundwasserspeicher, die bei den projizierten RG-Werten nicht zu beobachten ist.

Tabelle 11: Statistischer Vergleich der Wasserhaushaltsgröße Grundwasserkomponente RG (= RG1 + RG2) für den Zeitraum 1961–1990 im Gebiet Seifhennersdorf

	Mittelwert [mm/mon]	Minimum/Maximum [mm/mon]	Spannweite [mm/mon]	Variationskoeffizient [%]
Ist-Zustand	24	-11 – 149	160	102
Realisierung 00	18	-11 – 93	104	114
Realisierung 66	18	-12 – 109	121	114
Realisierung 99	17	-13 – 97	110	113

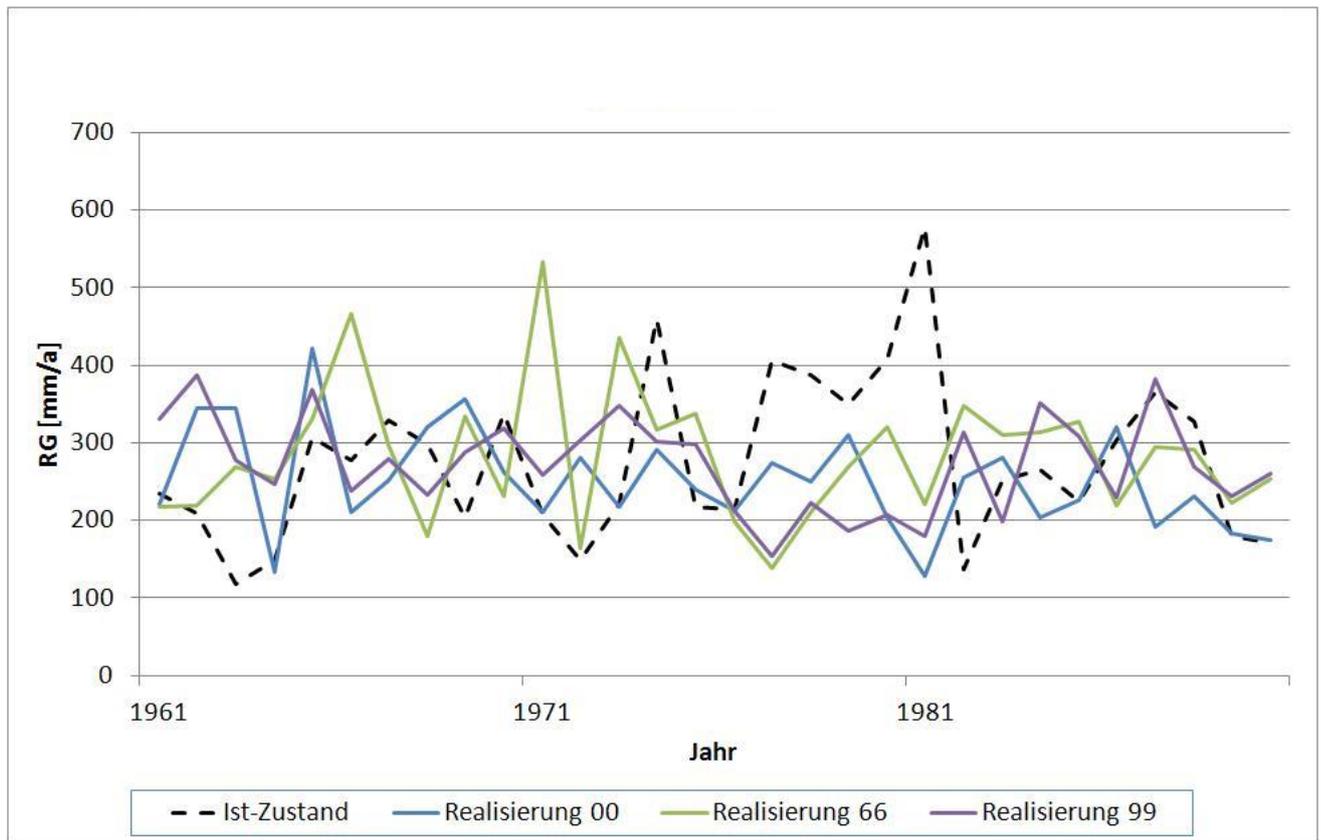


Abbildung 35: Aktuelle Jahressummen der Grundwasserkomponente RG der Realisierungen und des Ist-Zustandes im Zeitraum 1961–1990 im Gebiet Seifhennersdorf

Neben der Betrachtung der Gebietsmittelwerte können die Größen auch räumlich differenziert untersucht werden. In Abbildung 36 wird dies am Beispiel der Grundwasserkomponente für die Realisierung 66 dargestellt. Die relativen Abweichungen auf Teileinzugsgebietsebene der mittleren Jahressummen (1961–1990) für RG liegen im Bereich von maximal $\pm 25\%$ von den Werten des Ist-Zustandes.

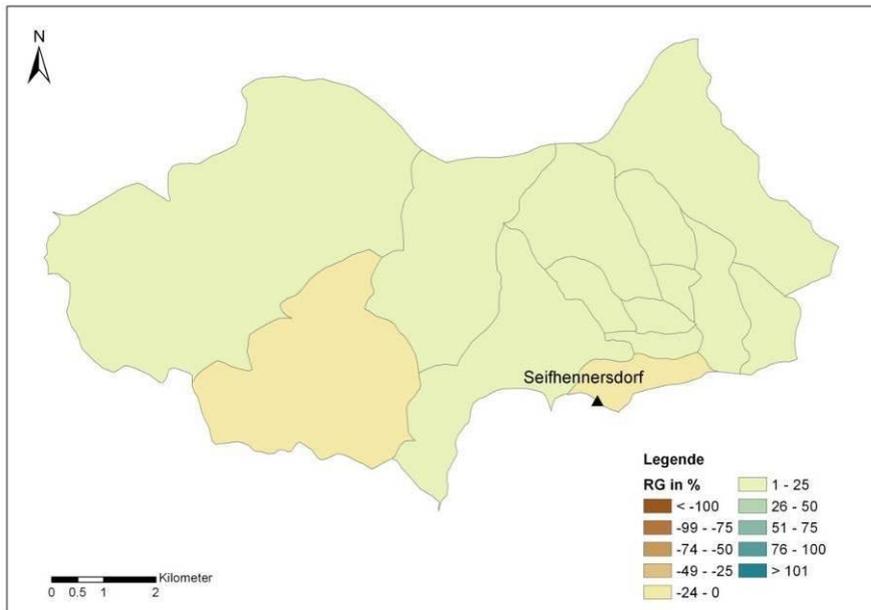


Abbildung 36: Räumlich differenzierte Darstellung der relativen Abweichung [%] der für die Realisierung 66 projizierten mittleren Jahressummen der Grundwasserkomponente RG (= RG1 + RG2) vom Ist-Zustand für die Reihe 1961–1990

Fazit

Die mittleren Monats- und Jahressummen (1961–1990) der Realisierungen sind mit denen des Ist-Zustandes vergleichbar, während deutliche Unterschiede zwischen den aktuellen Monats- und Jahressummen der Realisierungen und des Ist-Zustandes vorkommen. Weil die maximalen Niederschlagswerte der projizierten Klimadatenreihen deutlich kleiner ausfallen als die Werte des Ist-Zustandes, treten für die Realisierungen keine meteorologischen und demzufolge auch keine hydrologischen Extremwerte auf. Aus diesen Gründen sollte bei der Untersuchung der projizierten Grundwasserkomponente eine Auswertung von mittleren Summen über mindestens 30 Jahre bevorzugt werden. Diese Aussage trifft ebenso auf die anderen Wasserhaushaltsgrößen zu.

Diese Aussagen treffen auch auf die anderen sächsischen Einzugsgebiete zu. Für detaillierte Fragestellungen sind für das interessierende Einzugsgebiet separate Untersuchungen durchzuführen.

6.2.4 Entwicklung des Wasserhaushalts unter Annahme der Klimaszenarien für den Projektionszeitraum bis 2100

In diesem Kapitel wird die Entwicklung von Wasserhaushaltskomponenten unter der Annahme der drei Klimaszenarien näher betrachtet. Diese wird einerseits am Gebiet Seifhennersdorf ausführlich dargestellt und andererseits für die Gebiete Schönau, Nemet 1 und Niedermülsen exemplarisch aufgezeigt.

Entwicklung des Wasserhaushalts am Beispiel des Gebietes Seifhennersdorf

Der Wasserhaushalt ist geprägt durch die meteorologischen Eingangsdaten. Weil der Niederschlag im Rahmen der drei Realisierungen bis zum Jahr 2100 deutlich ab- und die Temperatur im selben Zeitraum zunimmt, sind hinsichtlich der Wasserhaushaltsgrößen Veränderungen zu erwarten. Unter diesen Bedingungen sollte die reale Verdunstung ansteigen und folglich die Abflusskomponenten abnehmen.

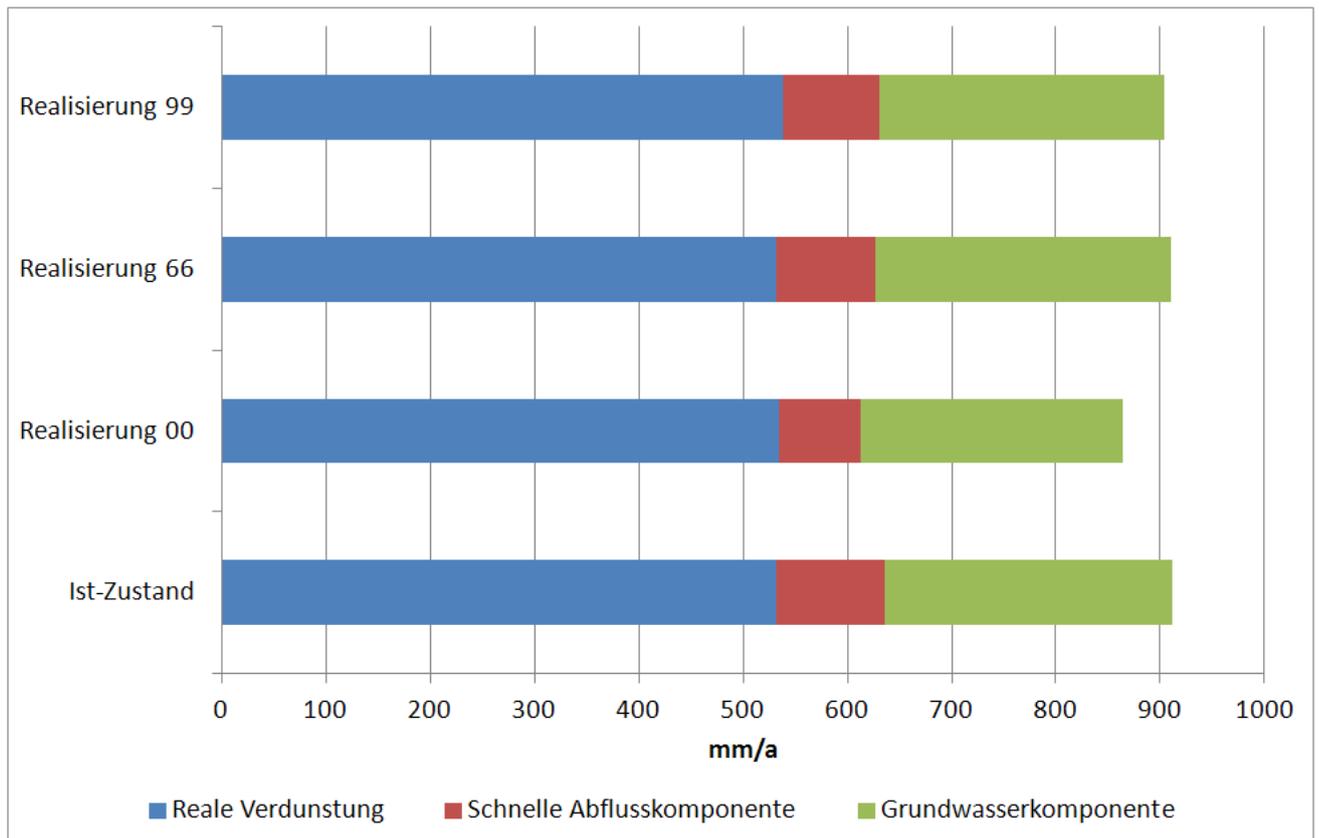


Abbildung 37: Mittelwerte der Wasserhaushaltsbilanzen für drei Realisierungen (1961–1990) gegenüber den Mittelwerten des Ist-Zustandes (Zeitraum jeweils 1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf

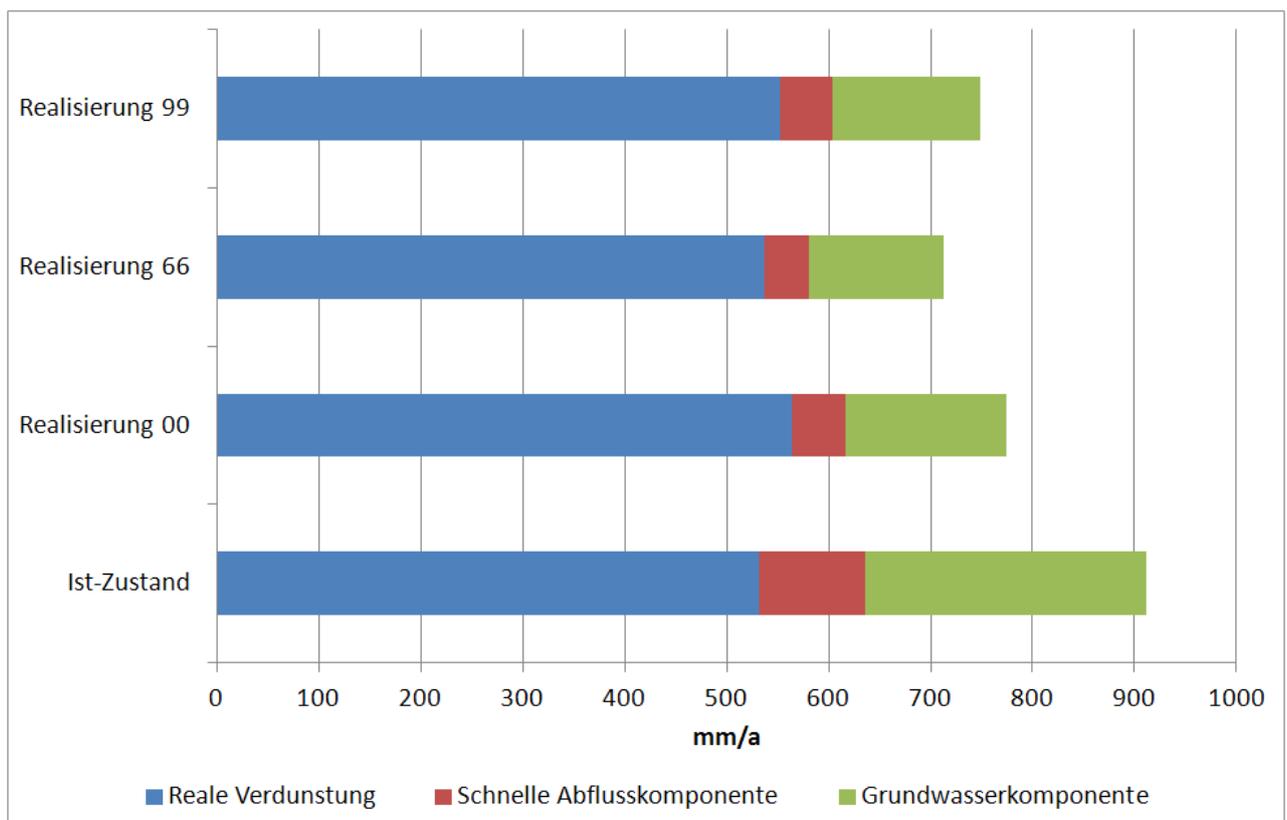


Abbildung 38: Mittelwerte der Wasserhaushaltsbilanzen für drei Realisierungen (2071–2100) gegenüber den Mittelwerten des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf

Die mittleren Wasserhaushaltsbilanzen der Zeiträume 1961–1990 (Abbildung 37) und 2071–2100 (Abbildung 38) bestätigen diese Aussage. Sie zeigen eine Abnahme des Niederschlages und eine leicht zunehmende Verdunstung. Im Gegensatz dazu nehmen sowohl die schnelle Abflusskomponente als auch die Grundwasserkomponente ab. Die prozentualen Anteile der Wasserhaushaltsgrößen vom Niederschlag sind Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Vergleich der Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Realisierungen (2071–2100) für das Gebiet Seifhennersdorf

	Zeitraum 1961–1990					Zeitraum 2071–2100				
	P [mm/a]	ETR [% von P]	R [% von P]	RS [% von P]	RG [% von P]	P [mm/a]	ETR [% von P]	R [% von P]	RS [% von P]	RG [% von P]
Ist-Zustand (1961–1990)	903	58	42	11	31	-	-	-	-	-
Realisierung 00	864	62	38	9	29	773	73	27	7	20
Realisierung 66	912	59	41	10	31	710	75	25	6	19
Realisierung 99	904	60	40	10	30	746	74	26	7	19

Der Vergleich der drei Realisierungen untereinander für den Zeitraum 1961–1990 zeigt (Abbildung 37), dass sich die Anteile der dargestellten Wasserhaushaltsgrößen reale Verdunstung ETR, schnelle Abflusskomponente RS und Grundwasserkomponente RG (= RG1 + RG2) nur geringfügig unterscheiden. Dasselbe gilt auch für den Zeitraum 2071–2100. D. h., dass alle drei Realisierungen in ihrem Änderungssignal qualitativ gleichwertig sind. Wird hingegen der Zeitraum 1961–1990 dem Zeitraum 2071–2100 gegenübergestellt, zeigt sich eine deutliche Zunahme des Verdunstungsanteils und eine Abnahme aller Abflusskomponenten.

Werden für diese beiden Wasserhaushaltsgrößen die 11-jährigen gleitenden Mittelwerte über den Zeitraum von 1966–2094 dargestellt, ist der insgesamt positive Trend der realen Verdunstung (Abbildung 39) und der negative Trend in der Entwicklung der Grundwasserkomponente (Abbildung 40) unter Annahme der drei Realisierungen deutlich zu erkennen.

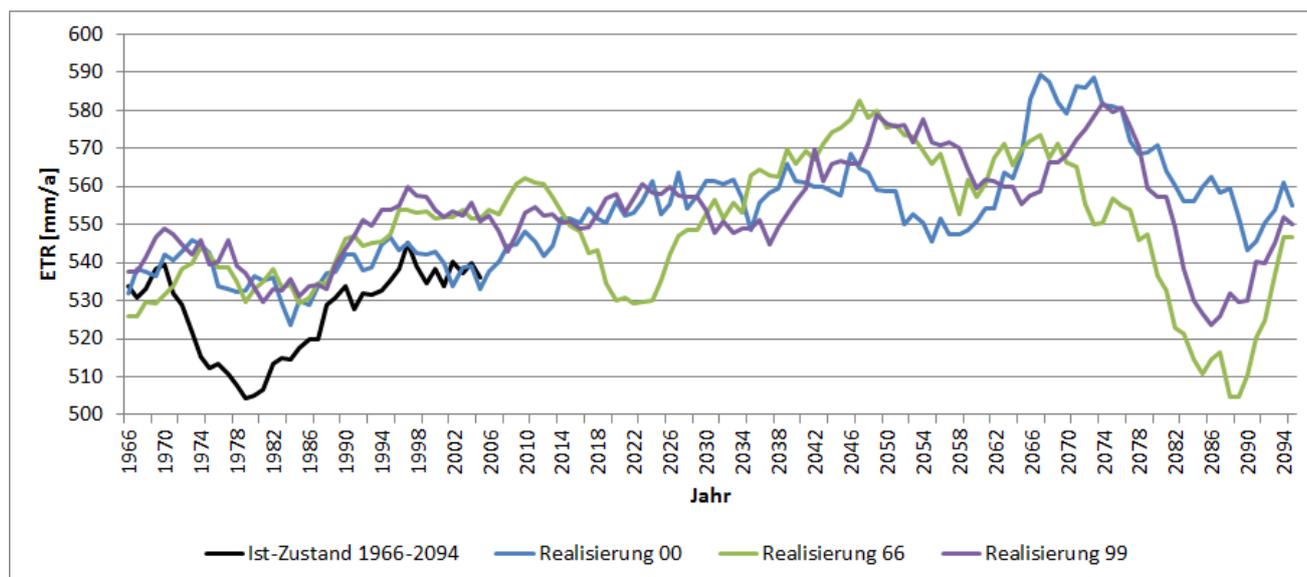


Abbildung 39: 11-jähriges gleitendes Mittel der realen Verdunstung ETR über den Zeitraum 1966–2094 für die Realisierungen und den Ist-Zustand (1966–2094) im Gebiet Seifhennersdorf

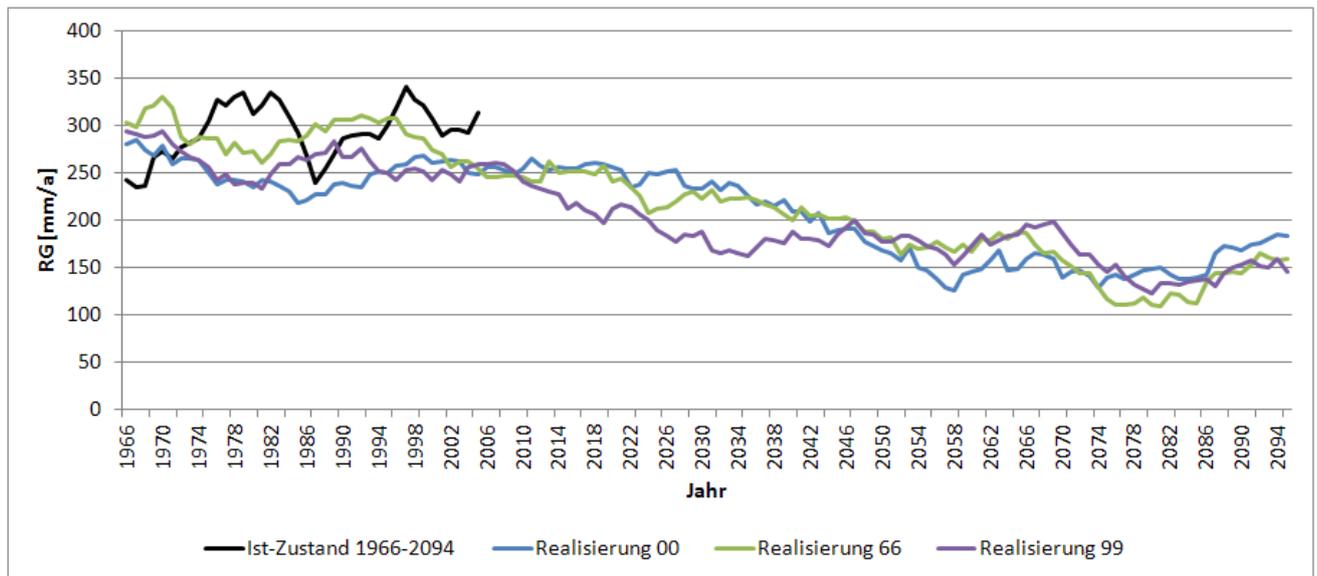


Abbildung 40: 11-jähriges gleitendes Mittel der Grundwasserkomponente RG über den Zeitraum 1966–2094 für die Realisierungen und den Ist-Zustand (1966–2004) im Gebiet Seifhennersdorf

Die Auswertung des mittleren Jahresgangs für die 30-jährige Reihe der Grundwasserkomponente von 2071–2100 (Abbildung 41) zeigt ebenfalls die über das gesamte Jahr gleichmäßig verteilte Abnahme der Grundwasserkomponente im Vergleich zum Ist-Zustand. Hierbei verhalten sich die drei Realisierungen sehr ähnlich.

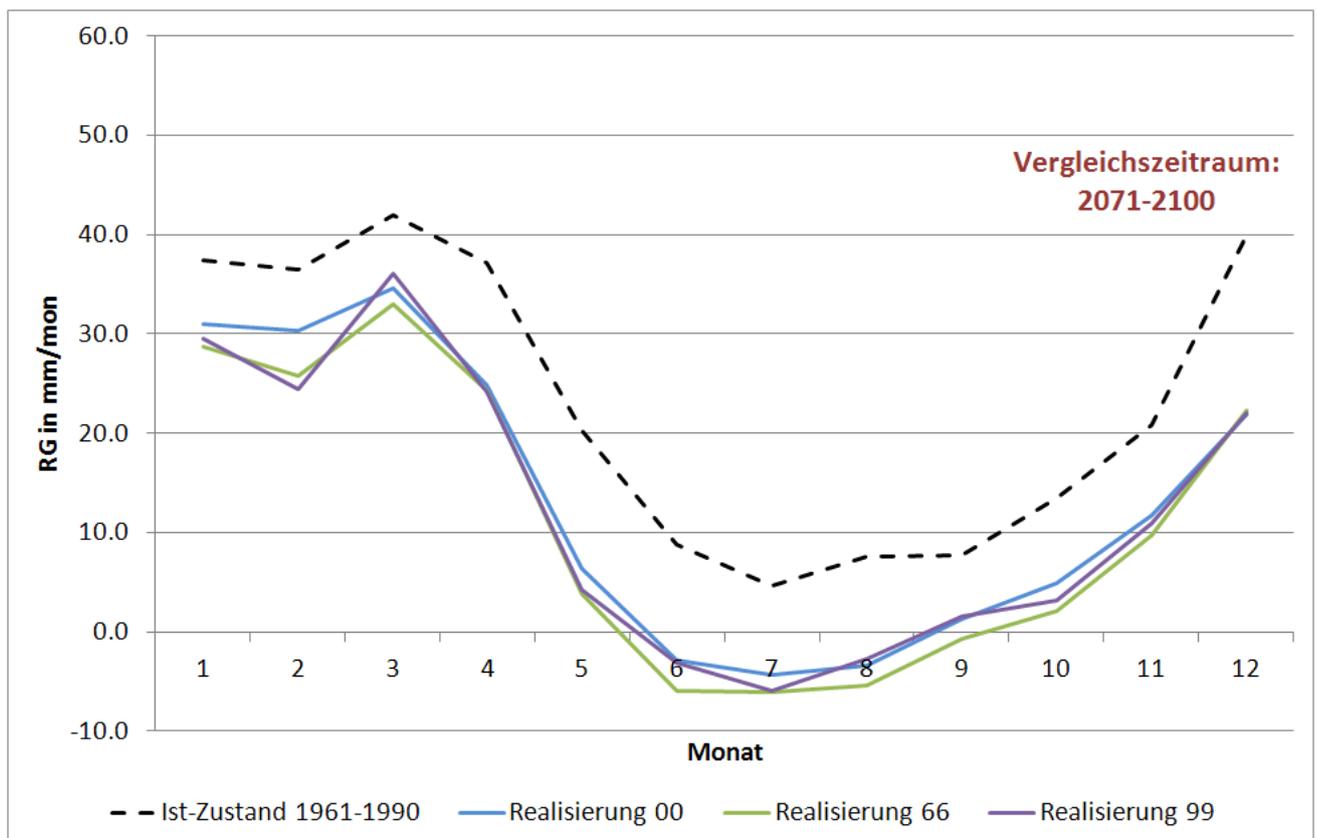


Abbildung 41: Mittlerer Jahresgang (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) für das Gebiet Seifhennersdorf

Die schwarz gestrichelte Linie in Abbildung 41 repräsentiert den Ist-Zustand 1961–1990. Sie weist für alle Monate eine positive mittlere Grundwasserkomponente auf. Demgegenüber treten unter Annahme der verwendeten Realisierungen in den Sommermonaten negative Grundwasserzuflüsse auf. D. h., im Saldo erreicht weniger Wasser durch Versickerung den Grundwasserspeicher als ihm durch Zehrung grundwassernahen Flächen entzogen wird. Die negativen mittleren RG-Werte können allerdings durch den höheren Zufluss in den Wintermonaten ausgeglichen werden, sodass die langjährige Jahressumme der Grundwasserkomponente positiv bleibt.

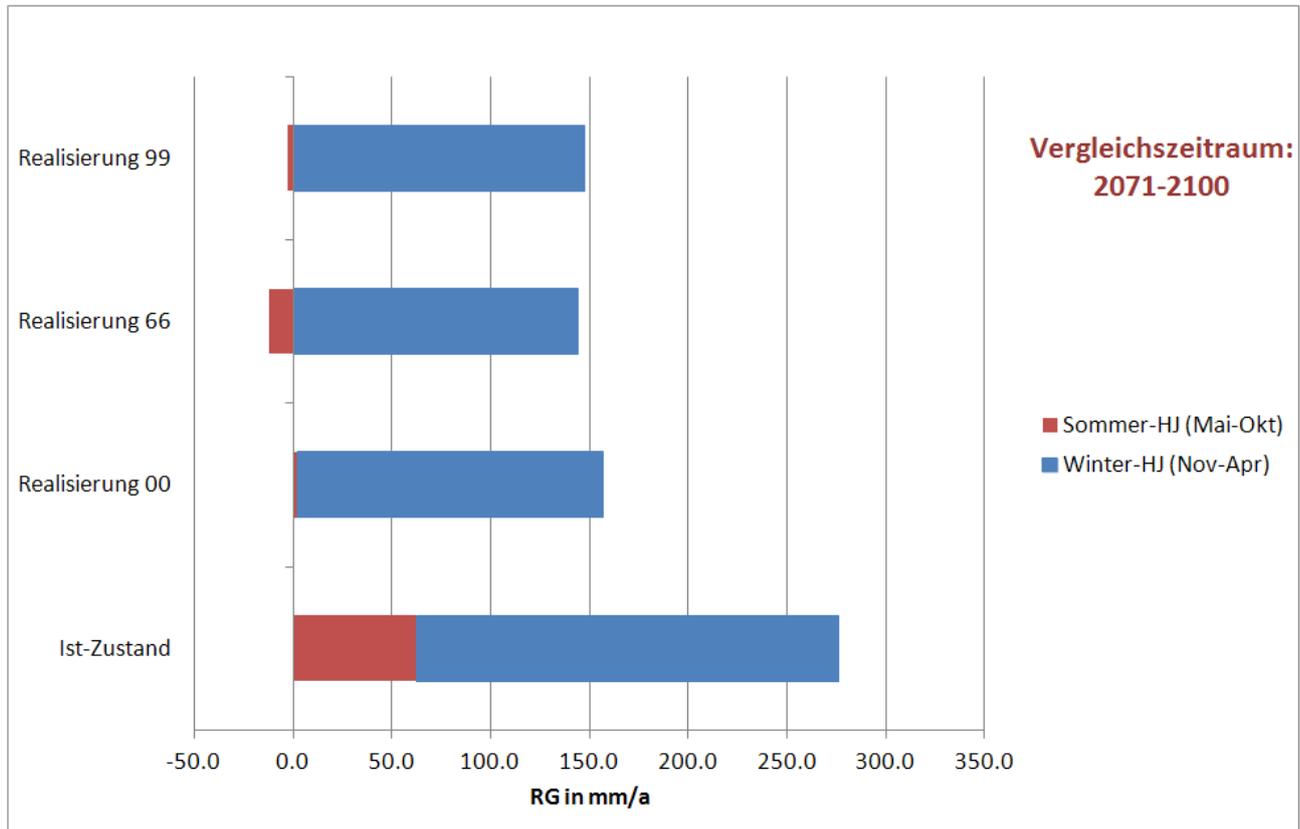


Abbildung 42: Mittlere Summe (2071–2100) der Grundwasserkomponente für das Sommer- und Winterhalbjahr der Realisierungen gegenüber dem mittleren Halbjahreswerten des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf

Ebenso ist die Abnahme von RG in der Abbildung 42 zu erkennen, welche die Sommer- und Winterhalbjahr unterteilt. Es zeigt sich, dass die Grundwasserkomponente unter der drei Realisierungen durchschnittlich um rund 10 mm/mon abnimmt im Vergleich zum Ist-Zustand. mittleren Monatssummen der Grundwasserkomponente (2071–2100) ergibt sich eine Abnahme um gegenüber dem Ist-Zustand (1961–1990). Dies kann auch der

Tabelle 13, welche die drei statistischen Kennwerte Mittelwert, Variationskoeffizient und Spannweite enthält, entnommen werden.

Tabelle 13: Mittelwert, Spannweite und Variationskoeffizient der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente im Gebiet Seifhennersdorf

	Zeitraum	Mittelwert [mm/mon]	Spannweite [mm/mon]	Variationskoeffizient [%]
Ist-Zustand	1961 – 1990	24	159	102
Realisierung 00	2071 – 2100	13	87	134
Realisierung 66	2071 – 2100	11	107	157
Realisierung 99	2071 – 2100	12	101	145

Wie aus Tabelle 13 ersichtlich, nimmt die Spannweite der drei Realisierungen 00, 66 und 99 gegenüber dem Ist-Zustand deutlich ab. Dieser Effekt ist den Eigenschaften der Realisierungen zu zuordnen, weil sie grundsätzlich deutlich weniger meteorologische und hydrologische Extremereignisse aufweisen als im Ist-Zustand beobachtet. Der Variationskoeffizient der Realisierungen des Zeitraums 2071–2100 ist hingegen größer als im Zeitraum 1961–1990. Dies ergibt sich aus der Berechnung des Variationskoeffizienten (Formel 3). Weil sich die langjährigen mittleren RG-Werte des Zeitraums 2071–2100 gegenüber dem Ist-Zustand um rund 50 % verringern, die Standardabweichungen aber nur um rund 15 % abnehmen, nehmen die Variationskoeffizienten zu.

Entwicklung des Wasserhaushalts am Beispiel des Gebietes Schönau

Das Gebiet Schönau im Einzugsgebiet der Schwarzen Elster liegt im Lockergesteinsbereich. Es verfügt über einen grundwassernahen Flächenanteil von rund 31 % der Gesamtfläche. Dieser befindet sich im nördlichen Teil des Gebietes und ist hinsichtlich der Landnutzung durch Nadelwald und Moor dominiert.

Der im Vergleich zu anderen Gebieten hohe Anteil an grundwassernahen Flächen führt im Sommer zu einer erhöhten Verdunstung. Die grundwassernahen Flächen befinden sich primär in Gewässernähe an den am tiefsten gelegenen Gebietsteilen. Der Grundwasserabfluss aus den grundwasserfernen Gebietsteilen muss auf seinem Weg zum Oberflächengewässer die grundwassernahen Bereiche passieren. Dabei gelangt das zuvor praktisch verdunstungsunbeeinflusste Grundwasser wieder unter Verdunstungseinfluss. Somit kommt es auf den grundwassernahen Flächen zu einer Zehrung aus den Grundwasservorräten. Unter Zehrung wird eine Abnahme der Grundwasservorräte durch kapillaren Aufstieg und die anschließende Verdunstung durch Vegetation verstanden. Dabei sind die Verluste größer als der Zufluss zum Grundwasserspeicher, wodurch der Saldo der Grundwasserkomponente negativ wird.

Zehrung ist überwiegend ein Phänomen der Sommermonate. Sie setzt im Frühsommer ein, wenn die Grundwasserneubildung meist zum Erliegen kommt und die Böden durch die Verdunstung zunehmend trockener werden. Die Zehrung hört i. d. R. relativ abrupt wieder auf, wenn im Herbst die Vegetation mit dem Laubfall ihre Transpiration stark reduziert. Dadurch kommt es vielfach zu einem schnellen Wiederanstieg des Durchflusses, oft auch in Zeitabschnitten ohne nennenswerten Niederschlag (s. Abbildung 43 zwischen 08.10. und 08.11.1990). Eine gute Beschreibung dieser Prozesse geben BECKER & PFÜTZNER (1986) sowie BECKER & LAHMER (1999).

Der Prozess der Zehrung kann mithilfe der gemessenen Ganglinie des Pegels Schönau beispielhaft belegt werden. In der Abbildung 43 ist die Durchflussganglinie für den Zeitraum Herbst 1989 bis Frühjahr 1991 dargestellt. Die schwarze Linie stellt die gemessenen Durchflusswerte dar. Die durchgezogene rote Linie repräsentiert die Summe aus schnellem und langsamem Grundwasserabfluss (QG1 + QG2), welche mittels DIFGA ermittelt wurde. Die rot gestrichelte abfallende Gerade, welche Ende Mai 1990 an der Durchflussganglinie ansetzt und Anfang November 1990 aufhört, steht für den ohne Zehrung zu erwartenden Abflussverlauf von QG2. Dieser lässt sich aus dem Leerlaufen des Grundwassergebietsspeichers mit der entsprechenden Rückgangskonstanten CG2 für das Gebiet Schönau berechnen. Würden keine Zehrungsprozesse den Durchfluss beeinflussen, müssten die rot gestrichelten Geraden ungefähr als untere Umhüllende an der Durchflussganglinie verlaufen. Es ist hingegen deutlich zu erkennen, dass der Durchfluss im Frühjahr 1990 mit Einsetzen der Vegetationsperiode im Vergleich zur rot gestrichelten Geraden stark abnimmt (Rückgangsverstärkung). Dieser Effekt lässt sich durch die einsetzende Zehrung auf den grundwassernahen Flächen des Gebietes Schönau erklären. Die Fläche zwischen dem tatsächlichen und hypothetischen Verlauf der Ganglinie (Abbildung 43) entspricht einer Wassermenge von mindestens 31 mm Zehrung auf den grundwassernahen Flächen des Gebietes.

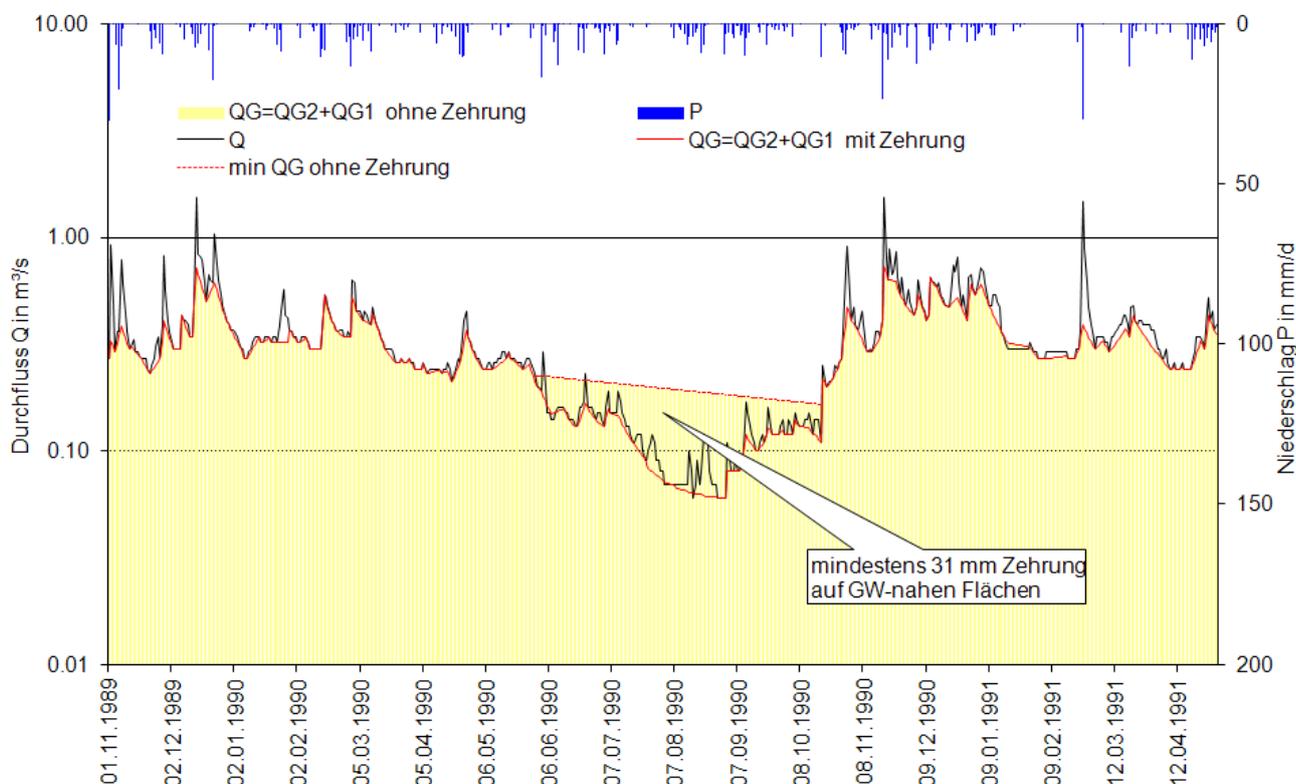


Abbildung 43: Beispiel für Zehrung im Gebiet Schönau dargestellt anhand der Ganglinie für das Jahr 1990

Der Effekt der Zehrung tritt im Gebiet Schönau in den Sommermonaten regelmäßig auf und lässt sich eindeutig mit den Gegebenheiten des Untergrundes erklären.

Wird auf den grundwassernahen Flächen ein Saldo zwischen der (meist aufgrund der Bodeneigenschaften derartiger Flächen geringen) Grundwasserneubildung und der Zehrung berechnet, so ist dieses häufig negativ. Somit wird eine „negative Grundwasserneubildung“ suggeriert, was nicht der Realität entspricht. Tatsächlich speist sich die Zehrung aus der Grundwasserneubildung der betrachteten Fläche und aus lateralen

Grundwasserzuflüssen benachbarter Gebietsflächen. Zehrung ist also nicht auf der Ebene eines einzelnen Hydrotops, sondern nur im Kontext des Gesamtgebietes zu bilanzieren.

Der Einfluss der Zehrung prägt auch den mittleren Jahresgang der Grundwasserkomponente RG des Zeitraums. Die Simulationen von RG für den Ist-Zustand wie auch für die drei Realisierungen (Abbildung 44) weisen in den Sommermonaten für das Gesamtgebiet negative Werte auf. D. h., dass die Zehrung auf den grundwassernahen Flächen größer ist als der laterale Grundwasserzufluss aus grundwasserfernen Gebieten. Der Jahressaldo im Zeitraum 1961–1990 ist dennoch positiv, weil die Zuflüsse zu den Grundwasserspeichern in den Wintermonaten größer sind als die Zehrung in den Sommermonaten.

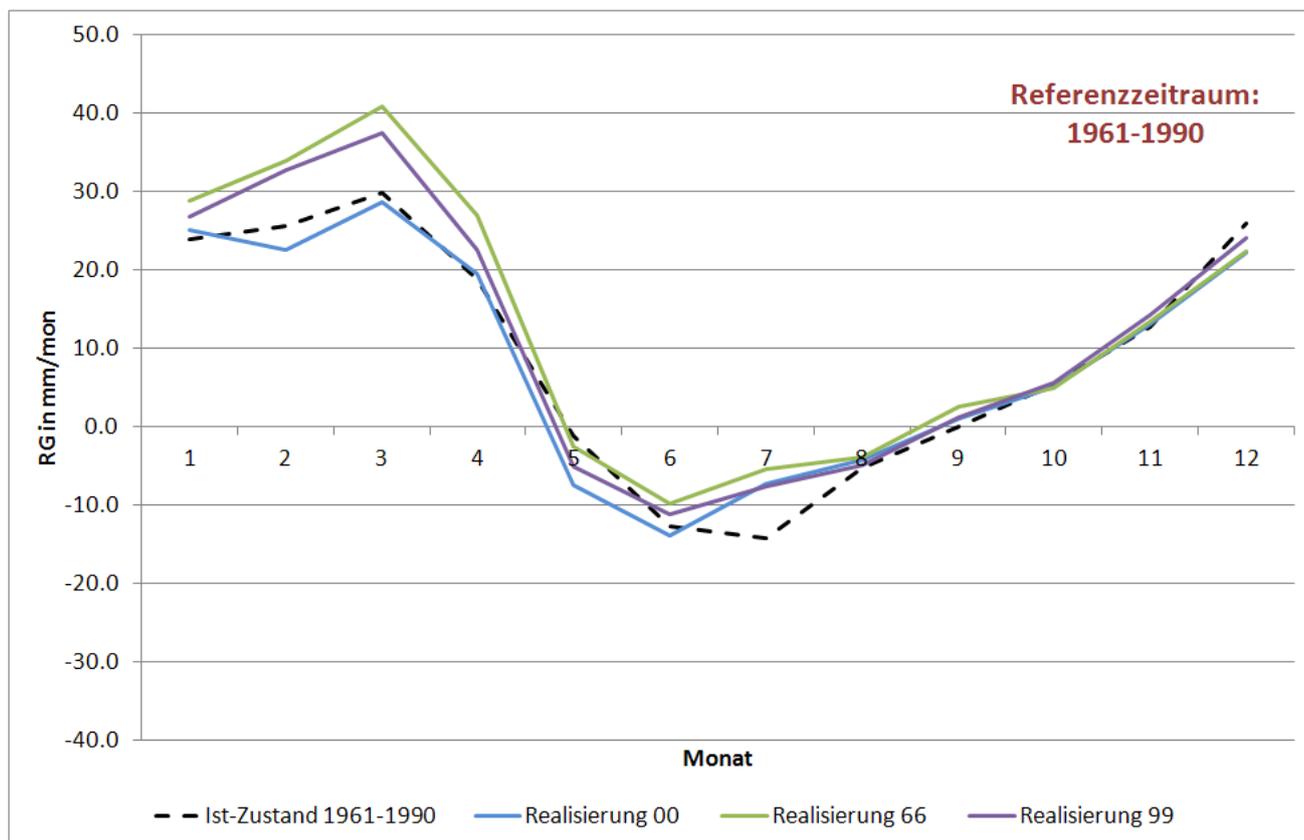


Abbildung 44: Jahresgang der mittleren Monatssummen (1961–1990) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang für den Ist-Zustand (1961–1990) im Gebiet Schönau

Um die Entwicklung der Grundwasserkomponente RG unter Annahme der drei Realisierungen zu veranschaulichen, ist in Abbildung 45 das 11-jährige gleitende Mittel von RG für den Zeitraum von 1966–2094 dargestellt. Für die nahe Zukunft von 2021 bis 2050 ist ein stark negativer Trend, d. h. eine Abnahme für RG, zu erkennen. Für die ferne Zukunft bis 2100 kann kein eindeutiger Trend, sondern vielmehr ein Stagnieren auf einem sehr niedrigen Niveau festgestellt werden.

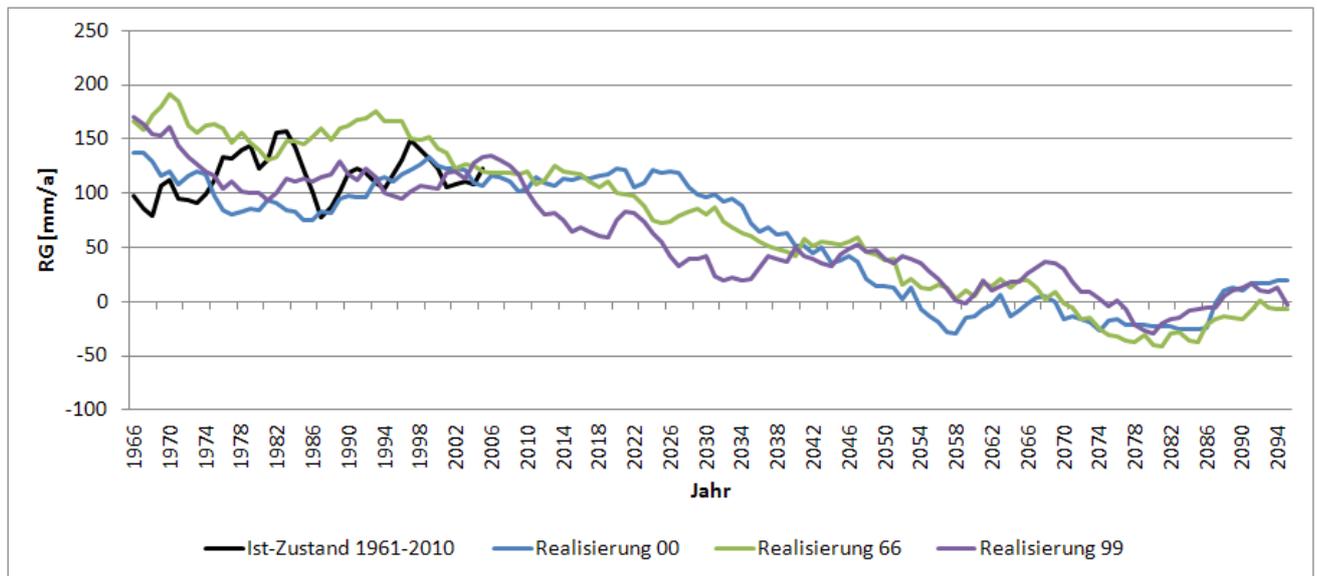


Abbildung 45: 11-jähriges gleitendes Mittel der Grundwasserkomponente RG über den Zeitraum 1966–2094 für die Realisierungen und den Ist-Zustand (1966–2004) im Gebiet Schönau

Über den Gesamtzeitraum weist die Projektion 66 den stärksten negativen Trend auf. Während RG für den Zeitraum von 1966 bis 2000 fast durchgängig die obere Grenze darstellt, verlagern sich die RG-Werte zum Ende des 21. Jahrhunderts an die untere Grenze der drei Realisierungen (Abbildung 45).

Es ist zu erkennen, dass der Jahressaldo der Grundwasserkomponente leicht negativ ausfällt, weil die Zehrung im Sommer dominiert. Werden für den Zeitraum 2071–2100 die Grundwasserzuflüsse mit der Zehrung saldiert, führt dies zu einer geringfügig negativen Grundwasserkomponente für alle drei Realisierungen. Aus der Abbildung 46 geht diese Entwicklung deutlich hervor. Unter der Annahme der drei Realisierungen der Klimaprojektion würde dies eine Reduktion der mittleren Grundwasserkomponente der Sommermonate um fast 300 % bedeuten. Die Abnahme im Winterhalbjahr, gemittelt über die drei Realisierungen, würde rund 60 % betragen.

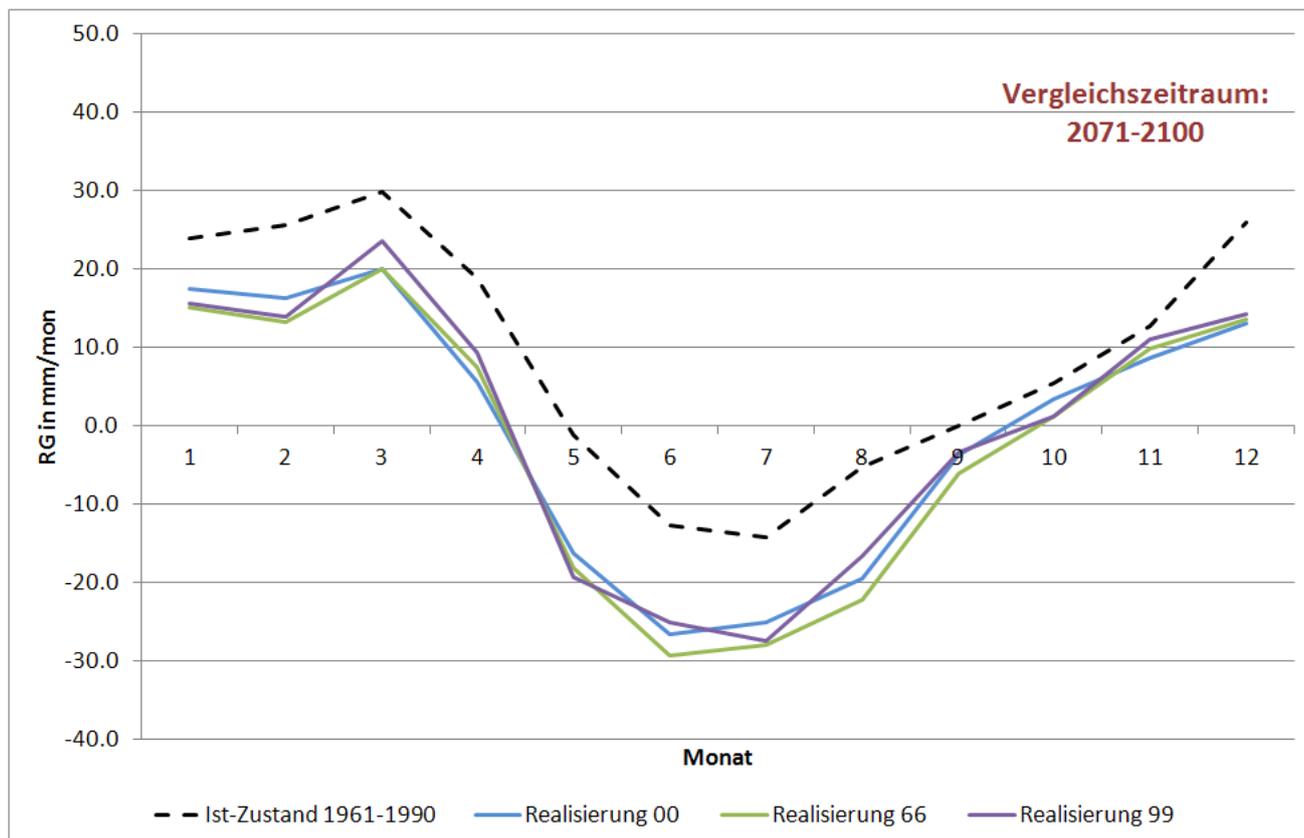


Abbildung 46: Jahrgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahrgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Schönau

Für die richtige Interpretation der Ergebnisse ist die Betrachtung der modellinternen Berücksichtigung der Grundwasserflurabstände erforderlich. Diese sind in ArcEGMO als feste Randbedingungen vorgegeben und unterliegen damit keinen Veränderungen. Trotz der starken Zehrung in den Sommermonaten des Zeitraums 2071–2100 und dem damit verbundenen allmählichen Aufbrauchen der Grundwasservorräte tritt in den Modellannahmen keine Zunahme der Grundwasserflurabstände ein. Infolge sinkende Grundwasserstände würde sich letztlich die Zehrung selbst eingrenzen und im Resultat würde sich auch bei geänderten Klimarandbedingungen eine neue mittlere Grundwasserflurabstandssituation einpegeln. Die Anpassung zwischen Neubildung, Zehrung und Lage der Flurabstände wäre nur durch Kopplung des Modells ArcEGMO mit einem Grundwasserströmungsmodell zu erreichen.

Im Ergebnis führt dieser Umstand zu einer Überschätzung der gezehrten Wassermenge auf den grundwassernahen Flächen. Es ist davon auszugehen, dass sich der tatsächliche Verlauf der Grundwasserkomponente im Sommerhalbjahr zwischen dem Verlauf des Ist-Zustandes und den drei Realisierungen (Abbildung 47) befinden würde. Die simulierten Ergebnisse der Grundwasserkomponente im Gebiet Schönau sind demnach als worst-case-Entwicklung zu betrachten.

Entwicklung des Wasserhaushalts am Beispiel des Gebietes Nempt 1

Das Gebiet Nempt 1 ist dem Gebiet Schönau hinsichtlich seiner Gebietseigenschaften sehr ähnlich. Es weist allerdings einen deutlich geringeren Anteil (ca. 10 %) an grundwassernahen Flächen auf (Tabelle 4). Wie Abbildung 47 entnommen werden kann, tritt in den Sommermonaten im Zeitraum 1961–1990 (schwarz gestrichelte Linie) zwar Zehrung auf. Diese fällt aber deutlich geringer aus als im Gebiet Schönau (vgl. Abbildung 46). Unter der Annahme der gewählten Realisierungen sinkt in Zukunft der Zufluss zum Grundwasserspeicher

und die Zehrung in den Sommermonaten verstärkt sich. Weil der Anteil grundwassernaher Flächen bei ca. 10 % der Gesamtfläche liegt, wirkt sich die Zehrung im Gebiet Nemt 1 nicht so stark aus wie im Gebiet Schönau. Der Jahressaldo beträgt für die drei Realisierungen im Mittel 30 mm/a und ist damit positiv, sodass entsprechend dieser Realisierungen die Grundwasservorräte langfristig nicht aufgebraucht werden.

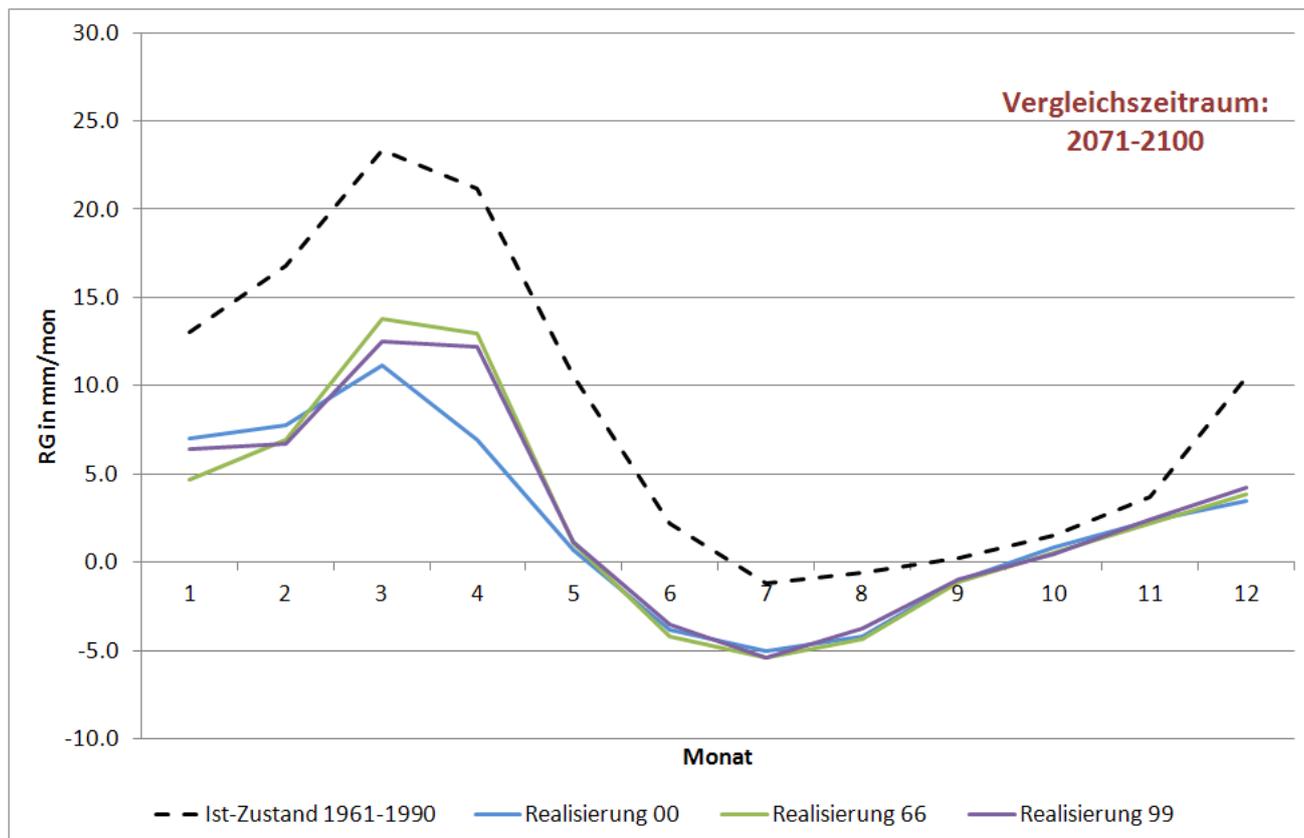


Abbildung 47: Jahresgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahresgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Nemt 1

Entwicklung des Wasserhaushalts am Beispiel des Gebietes Niedermülsen

Das Einzugsgebiet Niedermülsen befindet sich im Flusseinzugsgebiet der Mulde. Es verfügt über einen grundwassernahen Flächenanteil von rund 36 % der Gesamtfläche. Diese befinden sich entlang des von Wohn- und Siedlungsflächen dominierten Fließgewässernetzes.

Wie im Gebiet Schönau wird in Niedermülsen im Winter der Grundwasserspeicher gefüllt, während im Sommer durch die Vegetation eine Zehrung aus dem Speicher stattfindet, die zu negativen RG-Werten führt. Im Vergleich zu Schönau fällt die Zehrung nicht so hoch aus, obwohl eine größere Fläche des Einzugsgebietes grundwassernah ist. Dies liegt an der vorhandenen Landnutzung, den Wohn- und Siedlungsflächen. Weil urbane Flächen über weniger Transpirationsleistung verfügen als beispielsweise Nadelwälder, fällt die Zehrung geringer aus.

Auch hier ist eine separate Betrachtung der Grundwasserkomponente notwendig, weil im Modell ArcEGMO nur geringfügige Schwankungen der Grundwasserflurabstände um den Ausgangswert simuliert werden. Auch bei erhöhter Zehrung kommt es zu keiner nennenswerten Veränderung der Grundwasserflurabstände. Weiteres dazu ist unter Kapitel 6.2.3 zu finden.

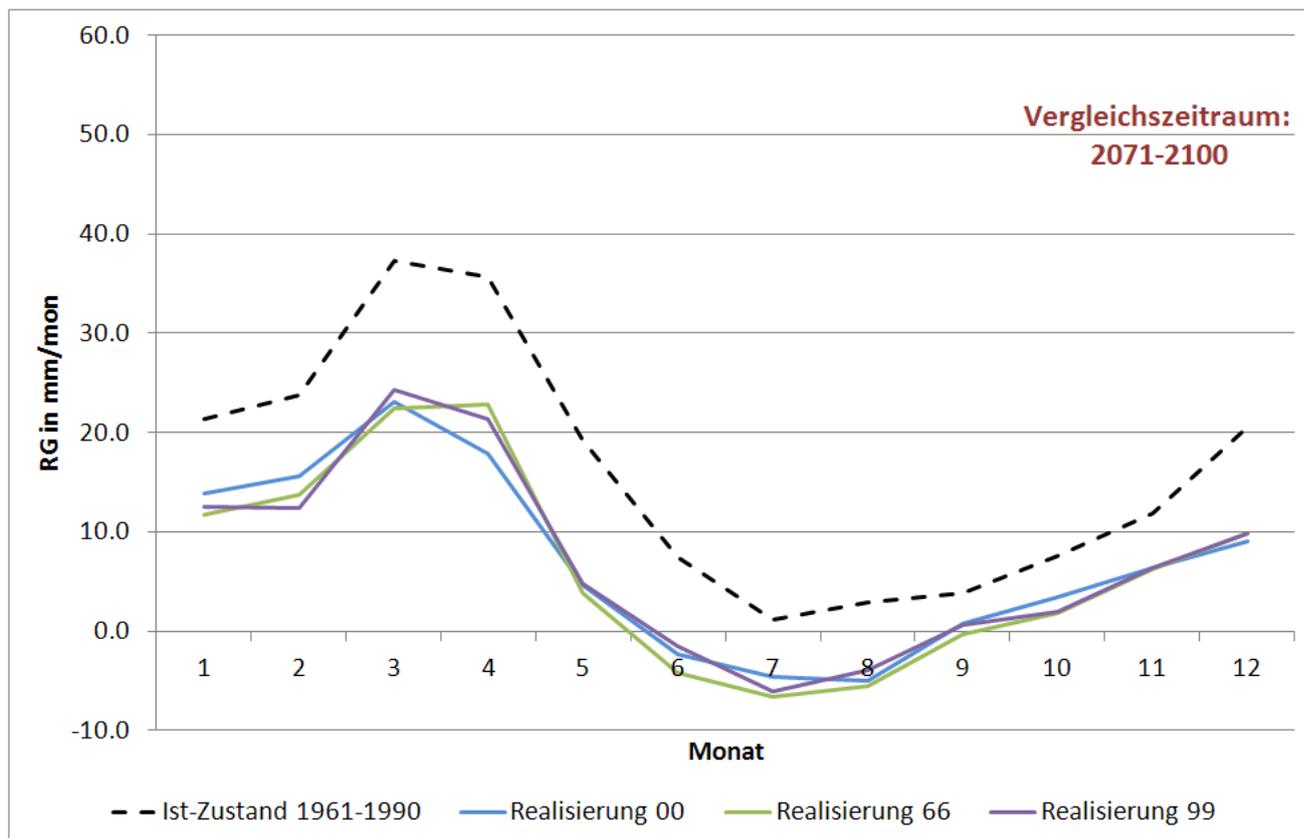


Abbildung 48: Jahrgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahrgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Niedermülsen

Fazit

Unter der Annahme von zukünftig abnehmenden Niederschlägen und steigenden Temperaturen (s. Kapitel 6.2.4) und der daraus resultierenden Erhöhung der realen Verdunstung ist für alle Einzugsgebiete eine deutliche Abnahme der Wasserhaushaltsgröße RG im gesamten Jahresverlauf zu erwarten. Unter Annahme der drei Klimarealisierungen ist davon auszugehen, dass in Zukunft in den Sommermonaten teilweise mehr Wasser aus den Grundwasserspeichern entzogen wird als durch Versickerung hinzukommt. Der Jahresmittelwert der Grundwasserkomponente ist für vier Beispielgebiete (außer Schönau) auch zukünftig größer Null.

Der Effekt der Zehrung ist in den Lockergesteinsgebieten Sachsens besonders ausgeprägt. Die grundwassernahen Flächen befinden sich vorwiegend in diesem Bereich. Bei der Interpretation der Wasserhaushaltsergebnisse des KIWES-Projekts ist der Einfluss dieser grundwassernahen Flächen gesondert zu berücksichtigen.

6.2.5 Entwicklung des Wasserhaushalts unter Annahme der Landnutzungsszenarien für den Projektionszeitraum bis 2100

Der Wasserhaushalt wurde für drei Landnutzungsszenarien (Kapitel 6.1.3) exemplarisch unter der Annahme der Realisierung 00 des WETTREG2010-Modells berechnet. Das Ziel war, die Reaktion des Wasserhaushalts auf eine veränderte Landnutzung abzubilden. Die Realisierung 00 enthält trockenere und feuchtere Phasen. Sie stellt allerdings weder den Mittelwert aus den WETTREG2010-Realisierungen noch eine untere oder obere Grenze über den Gesamtzeitraum gesehen dar. Die Betrachtung der anderen Realisierungen aus WETTREG2010 würde qualitativ zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen.

Die nachfolgenden Tabellen und Grafiken enthalten neben der Realisierung 00 mit der ursprünglichen Landnutzung des Ist-Zustandes und der Realisierung mit Landnutzungsänderung auch die Darstellung des Ist-Zustandes für den Zeitraum 1961–1990. Diese Werte dienen nur dem Vergleich und der Einordnung, werden aber im Text nicht weiter interpretiert, weil nur das Änderungssignal innerhalb einer Klimarealisierung betrachtet wird.

Wasserhaushalt unter der Annahme des Landnutzungsszenarios Waldumbau

Die Auswertung des Landnutzungsszenarios Waldumbau W erfolgt exemplarisch für das Einzugsgebiet Cunnersdorf 1 im Flusseinzugsgebiet der Elbe. Es befindet sich im östlichen Erzgebirge und ist zu rund 96 % bewaldet. Im Rahmen des Szenarios werden rund 97 % des Nadelwalds in Laubwald umgewandelt. Bei den restlichen 3 % Nadelwald handelt sich um eine potenziell natürliche Vegetation, welche unberücksichtigt bleibt. Der Einfluss dieser Landnutzungsänderung auf den Wasserhaushalt ist in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Vergleich der mittleren Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Szenarien für den Zeitraum 2071–2100 (Landnutzungsszenario Waldumbau) für das Gebiet Cunnersdorf 1

Szenario	Zeitraum	P [mm/a]	ETR [% von P]	R [% von P]	RS [% von P]	RG [% von P]
Ist-Zustand	1961 – 1990	865	70	30	2	28
Realisierung 00	1961 – 1990	855	68	32	2	30
Realisierung 00	2071 – 2100	819	79	21	1	20
Realisierung 00 W	2071 – 2100	819	76	24	1	23

Der Vergleich der Aufteilung der Wasserhaushaltskomponenten des projizierten Ist-Zustandes (1961–1990) der Realisierung 00 mit 2071–2100 derselben Realisierung zeigt einen gestiegenen Verdunstungsanteil ETR und einen reduzierten Anteil sowohl der schnellen Abflusskomponente RS als auch der Grundwasserkomponente RG (Tabelle 14). Diese Änderungen in der Aufteilung der Wasserhaushaltskomponenten fallen größer aus als die durch das Landnutzungsszenario hervorgerufenen Wasserhaushaltsänderungen im Zeitraum 2071–2100. So nimmt durch die Umwandlung von Nadel- in Laubwald (Tabelle 14, Realisierung 00 W) der Verdunstungsanteil ETR gegenüber der Realisierung 00 leicht ab und der Anteil der Grundwasserkomponente RG steigt.

In Abbildung 49 sind die mittleren Jahresgänge der Grundwasserkomponenten RG des Ist-Zustandes (1961–1990) und der Realisierung 00 mit und ohne Landnutzungsänderung (2071–2100) für das Gebiet Cunnersdorf 1 dargestellt. Die Grundwasserkomponenten der beiden Realisierungen weichen vor allem in den Sommermonaten von den Werten des Ist-Zustandes ab. Die Begründung hierfür findet sich im Kapitel 6.1. Der etwas größere Zufluss zum Grundwasserspeicher RG für die Realisierung 00 W resultiert aus der Umwandlung von Nadel- in Laubwald. Nadelwald weist einen höheren Interzeptionsspeicher auf als Laubwald. Daher hält Nadelwald mehr Niederschlag an der Blattoberfläche zurück, welcher anschließend verdunstet und nicht zum Abfluss oder zur Versickerung beiträgt. Aufgrund der geringeren Interzeptionskapazität von Laubwäldern und dem folglich etwas größeren Abflussanteil, steigt die projizierte Grundwasserkomponente der Realisierung 00 W gegenüber der Realisierung 00 leicht an.

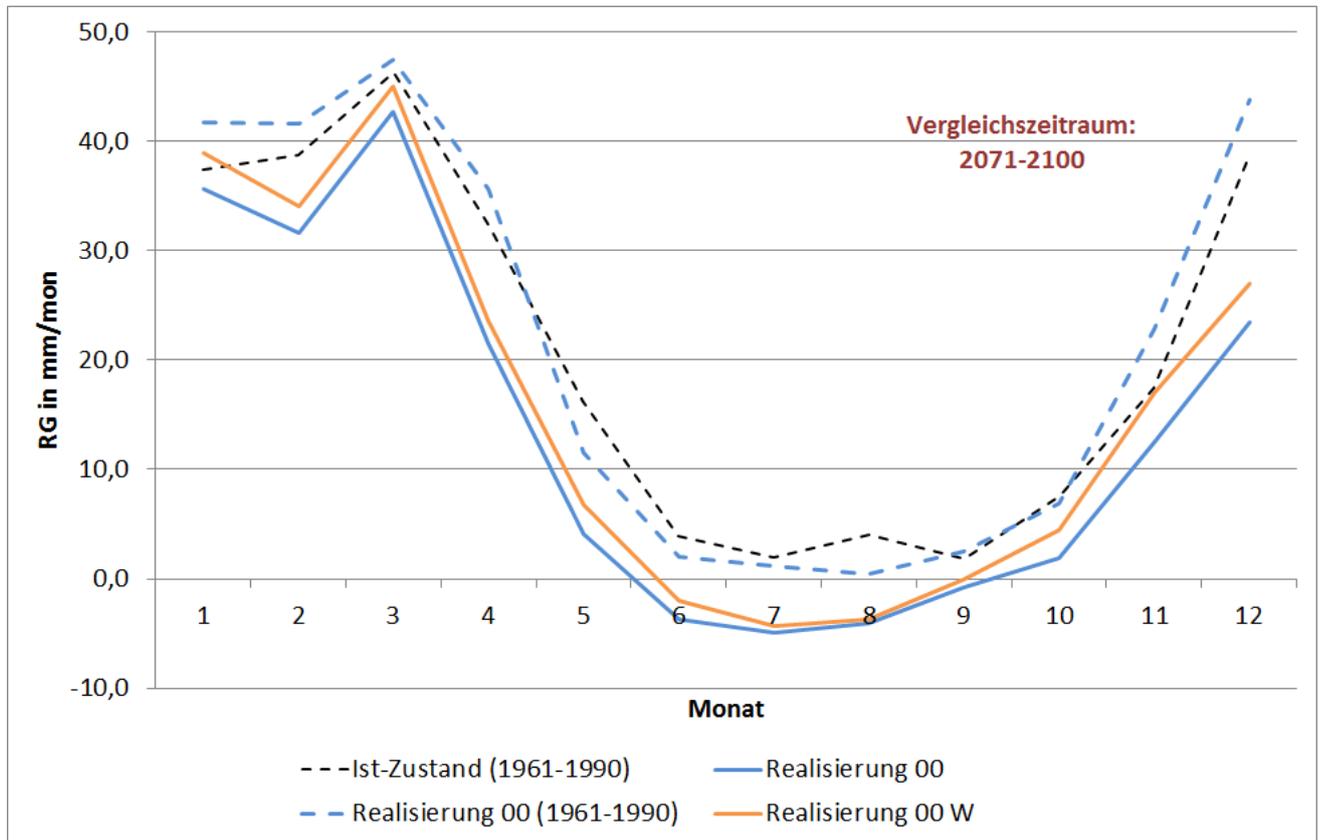


Abbildung 49: Jahrgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahrgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Cunnnersdorf 1

Wasserhaushalt unter der Annahme des Landnutzungsszenarios Versiegelung

Die Veränderungen des Wasserhaushalts unter Verwendung des Landnutzungsszenarios Versiegelung V werden am Beispiel Seifhennersdorf dargestellt. Sie beziehen sich ausschließlich auf die Industrie- und Wohnbauflächen, welche ca. 16 % der Gesamtfläche ausmachen. Dieser Wert setzt sich aus rund 0,5 % Industriefläche und rund 15,5 % Wohnbaufläche zusammen. Der Versiegelungsgrad auf den Industrieflächen beträgt im Ist-Zustand im Mittel 57,5 %. Im Rahmen des Landnutzungsszenarios wird dieser Wert um 18 % erhöht. Auf den Wohnbauflächen beträgt der mittlere Versiegelungsgrad im Ausgangszustand 20 %. Für das Landnutzungsszenario wird hingegen ein mittlerer Versiegelungsgrad von 35 % angenommen, was einer Zunahme von 75 % gegenüber dem Ausgangswert entspricht (Kapitel 6.1.3).

Tabelle 15: Vergleich der mittleren Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Szenarien für den Zeitraum 2071–2100 (Landnutzungsszenario Versiegelung) für das Gebiet Seifhennersdorf

Szenario	Zeitraum	P [mm/a]	ETR [% von P]	R [% von P]	RS [% von P]	RG [% von P]
Ist-Zustand	1961 – 1990	903	58	42	11	31
Realisierung 00	1961 – 1990	864	62	38	9	29
Realisierung 00	2071 – 2100	773	73	27	7	20
Realisierung 00 V	2071 – 2100	773	72	28	9	19

Der Einfluss des Landnutzungsszenarios Versiegelung auf die Aufteilung der Wasserhaushaltskomponenten ist in Tabelle 15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Anteil der Wasserhaushaltskomponenten ETR und R am Niederschlag für den projizierten Ist-Zustand der Realisierung 00 (1961–1990) gegenüber 2071–2100 stark ändert. Die projizierte Verdunstung nimmt deutlich zu, was zu einer erkennbaren Abnahme der Grundwasserkomponente RG und einer geringfügigen Änderung der schnellen Abflusskomponente RS führt. Der Unterschied in der Komponentenaufteilung zwischen der Realisierung 00 (Landnutzung Ist-Zustand) und der Realisierung 00 V (Landnutzung Versiegelung) ist hingegen marginal. Es gibt eine geringe Zunahme der schnellen Abflusskomponente RS im Rahmen des Landnutzungsszenarios, welche das Ergebnis des erhöhten Versiegelungsgrades ist.

Die mittleren Jahrgänge der Grundwasserkomponente für das Gebiet Seifhennersdorf werden in Abbildung 50 veranschaulicht. Es ist nur für die Wintermonate ein geringfügiger Unterschied zwischen dem Verlauf der Realisierung 00 und dem Landnutzungsszenario Realisierung 00 V zu erkennen. Dieser resultiert aus den höheren Niederschlagsmengen während des Winterhalbjahres, welche aufgrund des erhöhten Versiegelungsgrades nicht zur Versickerung gelangen.

Im Gegensatz dazu weichen diese beiden mittleren Jahrgänge (2071–2100) der Grundwasserkomponente deutlich vom projizierten Ist-Zustand (1961–1990) ab. Sie liegen im gesamten Jahresverlauf jeden Monat durchschnittlich um ca. 10 mm unterhalb den Werten der Grundwasserkomponente RG des Referenzzustandes. Ursache hierfür ist der gestiegene Versiegelungsgrad. Die Auswirkungen dieser Landnutzungsänderung sind allerdings kaum sichtbar.

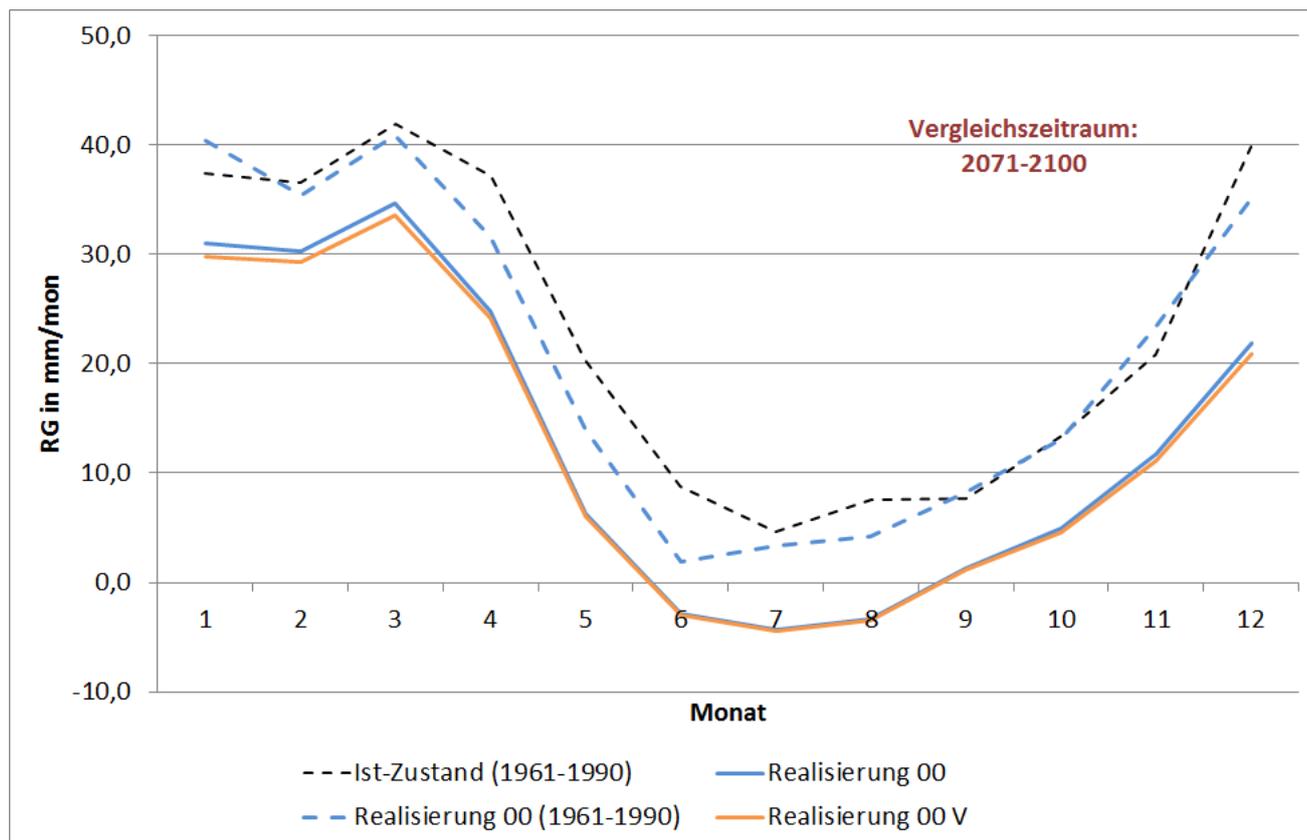


Abbildung 50: Jahrgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahrgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Seifhennersdorf

Wasserhaushalt unter der Annahme des Landnutzungsszenarios Flächenverbrauch

Die durch das dritte Landnutzungsszenario „Klimaänderung in Kombination mit Flächenverbrauch F“ hervorgerufenen Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten werden am Beispiel des Gebietes Niedermülsen vorgestellt. Es ist rund 50 km² groß und in unmittelbarer Nähe zur Stadt Zwickau gelegen. Durch die Annahme einer Ausdehnung ausgewählter Stadtflächen nimmt der Anteil der versiegelten Fläche im Gebiet Niedermülsen von zuvor 10 % der Gesamtfläche auf rund 77 % zu. Die Auswirkung dieser Erhöhung ist in den Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten deutlich erkennbar. Im Falle des Landnutzungsszenarios Flächenverbrauch sind die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt ebenso markant wie die durch das Klimaszenario allein hervorgerufenen Veränderungen der Wasserhaushaltsbilanz. Allerdings verlaufen die durch die Kombination von Versiegelung und Klimawandel hervorgerufenen Änderungen in eine andere Richtung als die Veränderungen, die bei gleichbleibender Landnutzung durch den Klimawandel induziert werden. Versiegelung in Kombination mit Klimawandel führt zu einer starken Erhöhung des Abflusses, während die Verdunstung vergleichsweise nur moderat ansteigt. Weil der Abflussanstieg allerdings primär nur durch die schnellen Komponenten erzeugt wird, bleibt der in Trockenzeiten zur Verfügung stehende Abfluss deutlich unter den Werten des Istzustandes. So ergibt der Vergleich der Realisierung 00 ohne Landnutzungsänderung mit dem Szenario Realisierung 00 F (Tabelle 16), dass sich der Verdunstungsanteil stark verringert und im Gegenzug der schnelle Abfluss RS in Folge des gestiegenen Anteils an versiegelten Flächen erhöht.

Tabelle 16: Vergleich der mittleren Wasserhaushaltsbilanz des Ist-Zustandes mit den Szenarien für den Zeitraum 2071–2100 (Landnutzungsszenario Flächenverbrauch) für das Gebiet Niedermülsen

Szenario	Zeitraum	P [mm/a]	ETR [% von P]	R [% von P]	RS [% von P]	RG [% von P]
Ist-Zustand	1961 – 1990	884	65	25	13	22
Realisierung 00	1961 – 1990	868	67	33	10	23
Realisierung 00	2071 – 2100	820	84	16	6	10
Realisierung 00 F	2071 – 2100	820	71	29	15	14

Der prozentuale Anteil von RS nimmt von 6 % (Realisierung 00) um mehr als das Doppelte auf 15 % (Realisierung 00 F) zu. Es fällt allerdings auf, dass trotz des erhöhten Versiegelungsanteils für die Realisierung 00 F auch die Grundwasserkomponente RG eine Zunahme gegenüber der Realisierung 00 für den Zeitraum von 2071–2100 aufweist. Dies zeigt auch die Abbildung 51. Das erscheint zunächst nicht plausibel, weil doch die Versiegelung eigentlich eine Verringerung der GWN bewirkt und zudem im Gebiet Niedermülsen im Szenario Flächenverbrauch ein sehr großer Gebietsanteil betroffen ist. Wie ist dieser Effekt zu erklären? Gemäß der in Kapitel 6.1.3 dargestellten Vorgehensweise umfasst die Versiegelung vormalige Acker- und Grünlandflächen sowie vegetationslose Flächen in unmittelbarer Ortsnähe. Viele dieser Flächen sind grundwassernah und wiesen deshalb vor der Versiegelung eine starke Zehrung des Grundwasserabflusses während der Sommermonate auf. Nach der Landnutzungsänderung kommt es auf dem versiegelten Flächenanteil zwar zu keiner Grundwasserneubildung, praktisch aber auch zu keiner Zehrung mehr. Die GWN ist erwartungsgemäß jedoch auch für die unversiegelt gebliebenen Flächen bedingt durch die Klimaänderung geringer als im Ist-Zustand. Weil aber die Zehrung im Gesamtgebiet stark vermindert wird, erreicht trotzdem bei der erhöhten Versiegelung bezogen auf das Gesamtgebiet mehr Grundwasserabfluss den Gebietsauslass, als wenn nur die Klimaänderung ohne Flächenverbrauch berücksichtigt wird.

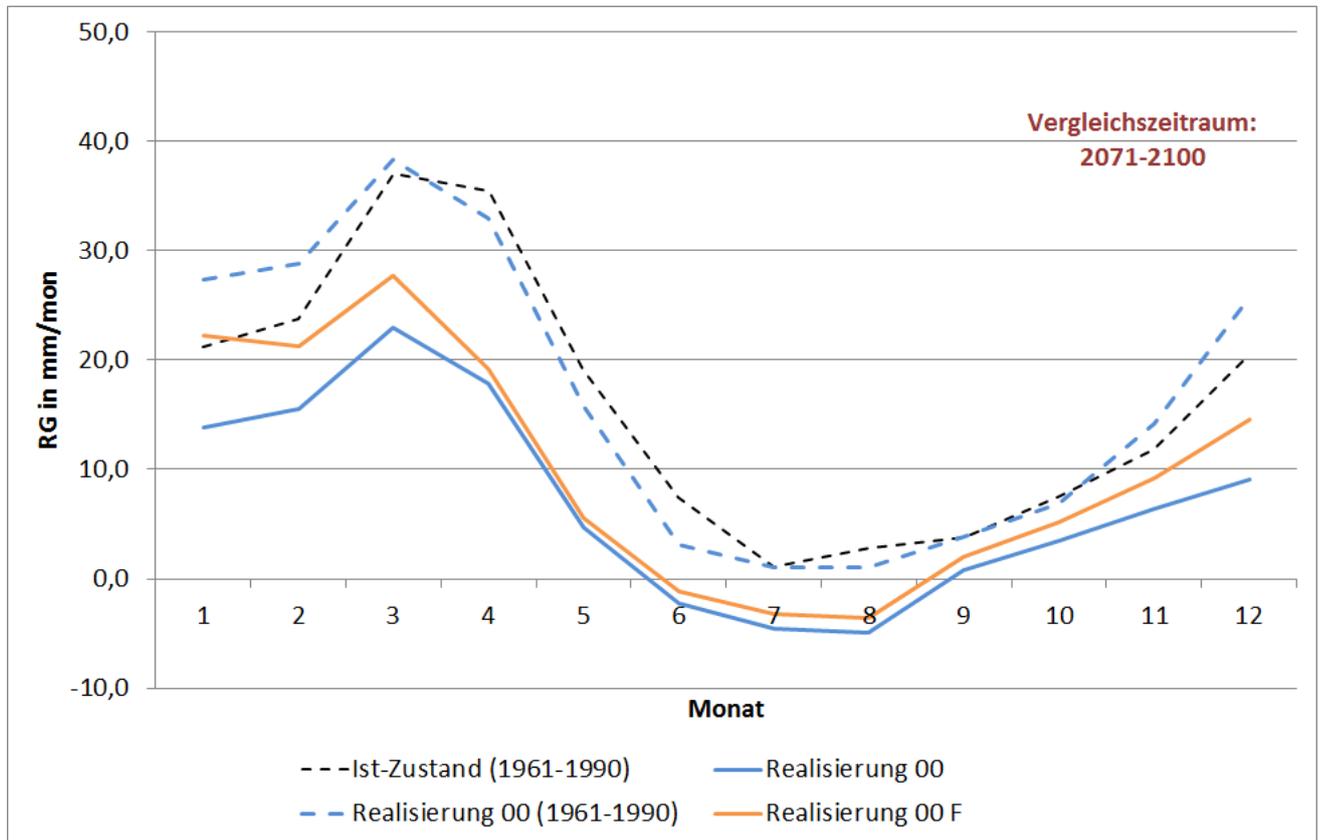


Abbildung 51: Jahrgang der mittleren Monatssummen (2071–2100) der Grundwasserkomponente der Realisierungen gegenüber dem mittleren Jahrgang des Ist-Zustandes (1961–1990) im Gebiet Niedermülsen

Fazit der Landnutzungsszenarien

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Landnutzungsszenarien Waldumbau und Versiegelung auf den Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes deutlich geringer ist als der Einfluss der Klimaänderung. Dies gilt nicht für das Landnutzungsszenario Flächenverbrauch, für das eine erkennbare Veränderung der Wasserhaushaltsgrößen auftritt. Diese ist in ihrer Größenordnung mit den durch die Klimaänderung hervorgerufenen Veränderungen der Wasserhaushaltsgrößen vergleichbar.

Hinsichtlich des geringen Einflusses der Landnutzungsszenarien Waldumbau und Versiegelung auf den Wasserhaushalt gibt es zwei Ursachen. Einerseits gelten die Landnutzungsänderungen nur für einen Teil der Gebietsfläche. Die Klimaänderungen hingegen wirken im gesamten Gebieten. Andererseits ist bekannt, dass der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt grundsätzlich eher gering ist. Nur die Versiegelung von natürlichen Flächen (z. B. Acker-, Grünland- und Waldflächen) führt zu einer deutlich veränderten Aufteilung der Wasserhaushaltskomponenten in der Bilanz. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus SCHWARZE et al. (2004).

Die vorgestellten Ergebnisse gelten für die Mittelwerte der Wasserhaushaltsgrößen in den Gebieten. Auf Teil-einzugsgebietsebene können dagegen Änderungen der Wasserhaushaltskomponenten aufgrund der geänderten Landnutzungen auftreten. Dies gilt für alle Flächen, deren Landnutzungstyp geändert wurde.

6.2.6 Analyse von Niedrigwasserkennwerten

Die Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen Häufigkeitsverteilungen (Histogramme) für Niedrigwasserperioden einer Länge von mindestens 7 bzw. mindestens 15 Tagen und länger. Die Auswertung nutzt als Beispiel die Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnung für die Realisierung 66 ohne Landnutzungsänderung. Eine Niedrigwasserperiode wird dabei als Zeitraum definiert, in dem der Durchfluss geringer ist als die Hälfte des langjährigen mittleren Durchflusses im Ist-Zustand. Wird dieses Kriterium z. B. über einen Zeitraum von 35 Tagen erfüllt, wird diesem trotzdem nur eine 7- bzw. 15-Tage-Periode zugeordnet. Erst wenn das Kriterium an wenigstens einem Berechnungszeitschritt nicht erfüllt wird, beginnt anschließend ggf. eine neue Niedrigwasserperiode. Basis der Statistik ist die Aufteilung des gesamten sächsischen Untersuchungsgebietes in 242 Teilgebiete (ArcEGMO-Berechnungseinheiten). Die Histogramme in Abbildung 52 und Abbildung 53 geben die Anzahl der Gebiete an, die eine bestimmte Anzahl von Niedrigwasserperioden pro Jahr (gemittelt über jeweils 30 Jahre) aufweisen. Ein Beispiel zur Illustration: Wenn in der NW7-Statistik im Zeitraum 1961–1990 der Balken in der Rubrik 3 der Achse „Niedrigwasserperioden“ eine Höhe von 76 auf der Achse „Häufigkeit“ hat, so bedeutet dies, dass 76 der 242 Gebiete im Mittel 3 Niedrigwasserperioden von mindestens 7 Tagen Dauer pro Jahr aufweisen.

Die Histogramme zeigen, dass sich die Anzahl der Niedrigwasserepisoden pro Jahr in Folge der Klimaänderung stark erhöht. Das betrifft sowohl die mindestens 7 als auch die mindestens 15 Tage lang anhaltenden Episoden. Dieser Effekt besitzt im Verlaufe des Untersuchungszeitraumes eine ansteigende Tendenz. Für alle 242 sachsenweit berechneten Gebiete nehmen nicht nur die Anzahl von NQ-Perioden pro Jahr, sondern auch die absolute Anzahl von NQ-Perioden innerhalb der betrachteten 30-Jahres-Abschnitte zu (siehe Tabelle 17). Praktisch bedeutet dies, dass durch die projizierte Klimaänderung insbesondere in den Sommermonaten zunehmend lange anhaltende Niedrigwassersituationen entstehen, die nur kurz von meist kleineren Hochwasserereignissen nach Starkregen unterbrochen werden. Dieser Effekt ist nicht nur auf einzelne Trockenjahre beschränkt, sondern betrifft gegenüber dem Ist-Zustand immer mehr Jahre innerhalb der betrachteten 30-jährigen Zeiträume.

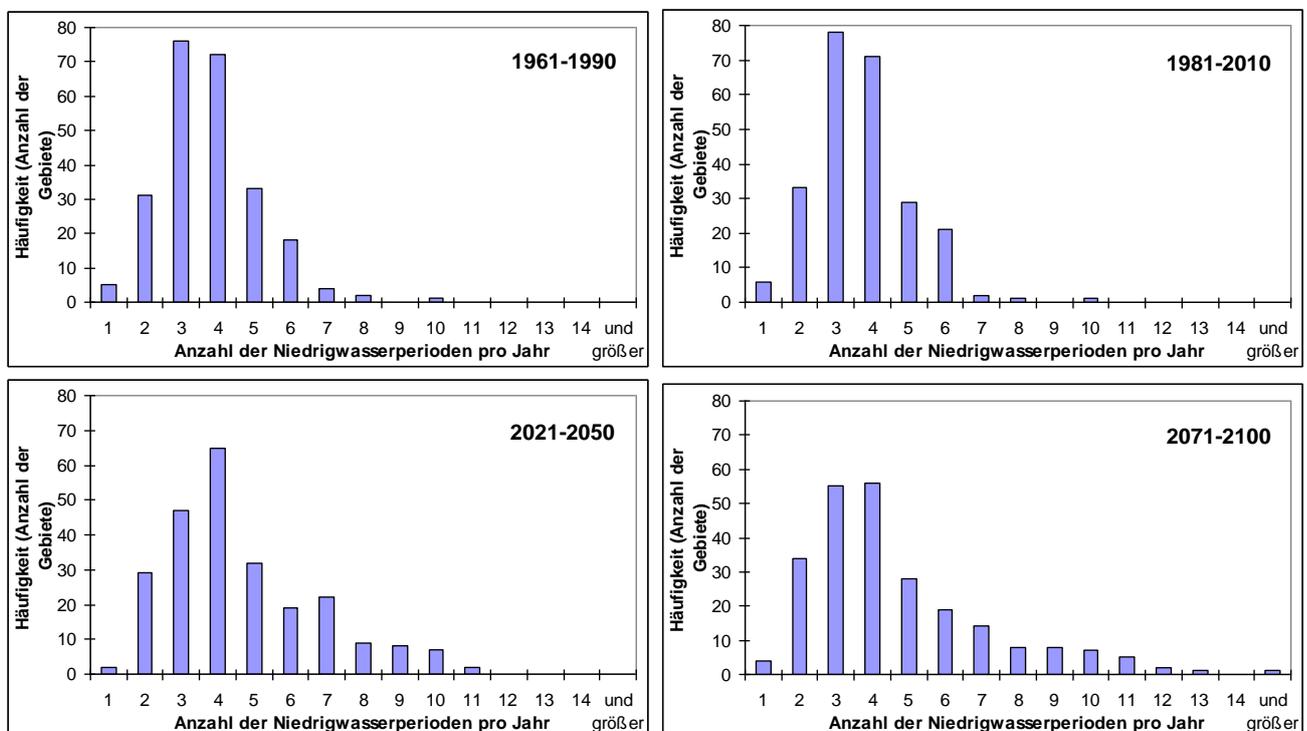


Abbildung 52: NW7-Niedrigwasserstatistik für die vier 30-Jahresperioden

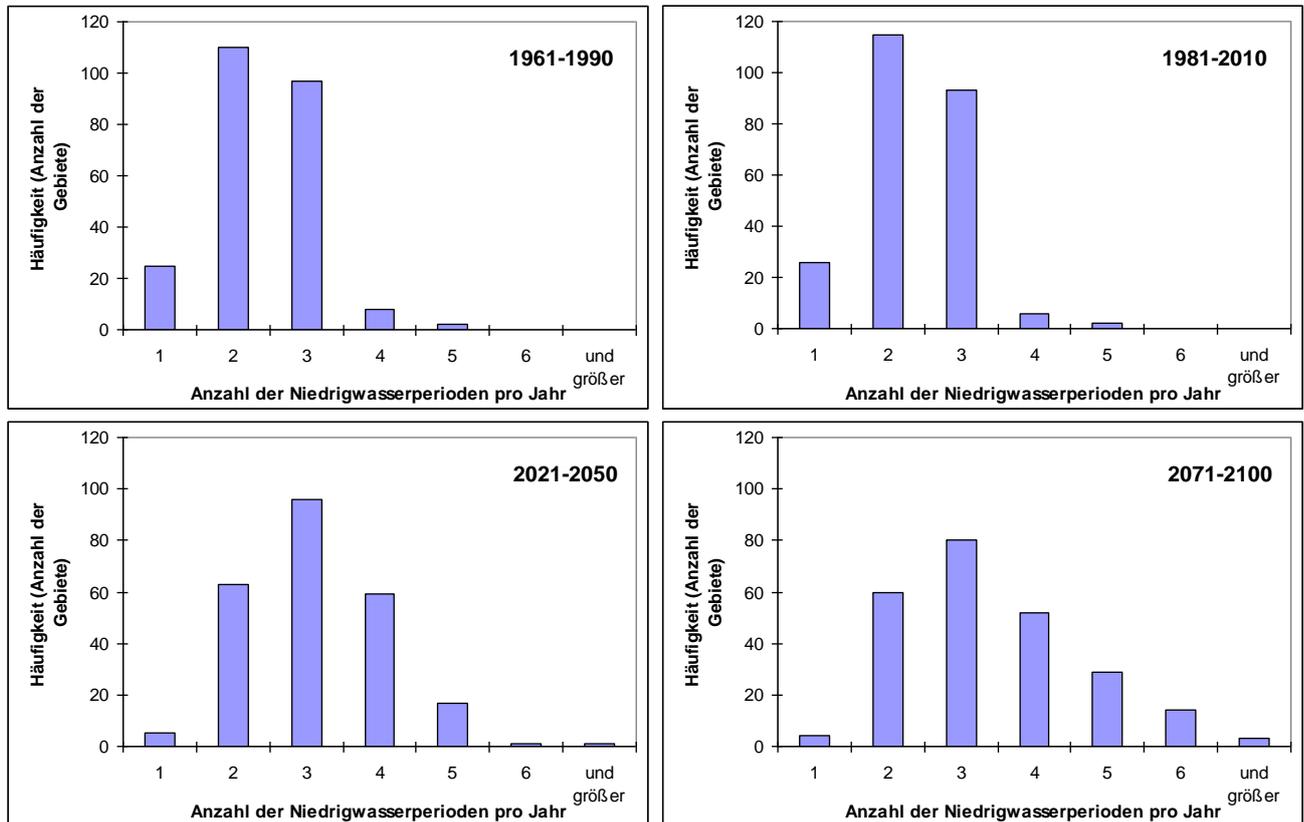


Abbildung 53: NW15-Niedrigwasserstatistik für die vier 30-Jahresperioden

Tabelle 17: Anzahl von Niedrigwasserepisoden mit mindestens 7 bzw. 15 Tagen Dauer in Sachsen für jeweils 30-jährige Zeitreihen unter dem Einfluss projizierter Klimaänderungen – Ergebnisse für die Realisierung 66

Szenario	Zeitraum	Anzahl NQ-Episoden Dauer 7d und länger	Anzahl NQ-Episoden Dauer 15d und länger
Realisierung 66	1961 – 1990	910	578
Realisierung 66	1981 – 2010	893	569
Realisierung 66	2021 – 2050	1125	753
Realisierung 66	2071 – 2100	1126	822

6.3 Diskussion von Unsicherheiten und Fehlern

Jedes mathematisch-physikalische Modell, das zur Berechnung realer Vorgänge verwendet wird, ist mit Fehlern behaftet. Dies liegt in der Komplexität und Inhomogenität natürlicher Prozesse begründet, welche zwangsläufig vereinfachende Modellannahmen notwendig macht. Darüber hinaus sind viele Eingangsdaten bereits mit Unsicherheiten behaftet. Im Folgenden werden die Fehlerquellen, welche für die durchgeführten Wasserhaushaltssimulationen relevant sind, näher erläutert.

Zunächst ist grundsätzlich darauf hinzuweisen, dass

- Realisierungen keine Vorhersagen bzw. Prognosen des zukünftigen Klimas sind. „Klimaprojektionen sind [...] zwangsläufig mit Unsicherheiten verbunden (SCHMIDT et al. 2011 a)“. Trotz der verbesserten klimati-

schen Berechnungsmodelle (LfULG 2012), in denen „die globalen klimatischen Abläufe mit den Gegebenheiten vor Ort, wie z. B. dem Relief, verknüpfen und Rückkopplungsprozesse einbeziehen, stellen Ursachen des Klimawandels wie der CO₂-Ausstoß oder die Landnutzung keine fixen Einflussgrößen dar (SCHMIDT et al. 2011 a)“. Des Weiteren sind manche Ursache-Wirkung-Zusammenhänge in der Klimaforschung noch nicht vollständig bekannt. Aus diesem Grund sind die Klimaprojektionen als mögliche Variante der Klimaentwicklung zu sehen. Infolgedessen ist ebenso die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten als mögliche zukünftige Variante unter der Annahme der Klimaprojektionen zu betrachten. Es ist immer eine Spannbreite möglicher Entwicklungen zu betrachten, die sich aus der Verwendung mehrerer Klimaprojektionen ergibt;

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

Nachfolgend werden die Unsicherheiten nach ihren Herkunftsquellen unterteilt.

Meteorologische Eingangsdaten

„Die Daten des antreibenden meteorologischen Inputs werden punktuell an räumlich verteilten Stationen gemessen (GRUNDMANN 2010).“ Neben den Beobachtungsdaten stehen auch projizierte meteorologische Größen des regionalen Klimamodells WETTREG2010 auf Stationsbasis zur Verfügung. Für eine flächendifferenzierte Modellierung ist eine Interpolation der gemessenen und projizierten Stationswerte auf den Untersuchungsraum vonnöten. Im Folgenden werden die Unsicherheiten der meteorologischen Datensätze erörtert:

- Für die Erstellung der meteorologischen Eingangsdatensätze wurden im Rahmen der Säule A teils andere Stationen verwendet als in Säule B. Dadurch kommt es zu geringfügigen Abweichungen der beiden Eingangsdatensätze für Säule A und B des Beobachtungszeitraums.
- Die Anzahl der Klima- und Niederschlagsstationen für den Beobachtungs- und Projektionszeitraum sind nicht identisch. Die Stationsdichte im Projektionszeitraum ist geringer. Dies führt dazu, dass Stützstellen für die Interpolation fehlen und zu größeren Unsicherheiten bei der Übertragung in die Fläche führen.
- Die Realisierungen von WETTREG2010 weisen keine Extremniederschlagsereignisse auf, wie sie für den Beobachtungszeitraum gemessen wurden.
- Die drei ausgewählten Realisierungen aus dem WETTREG2010-Modell enthalten keine Stationsdaten für Tschechien. Dies führt besonders auf dem Erzgebirgskamm zu Abweichungen gegenüber dem Ist-Zustand.

Weitere Ausführungen zu Unsicherheiten und Fehlern bezüglich des WETTREG2010-Modells und der Realisierungen sind LÜNICH et al. (2012) zu entnehmen.

Hydrologische Daten

Zu den hydrologischen Daten zählen zum einen die gemessenen Durchflussreihen als Vergleichsdaten und die simulierten Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten. Durchflussreihen von Pegeln unterliegen gewissen Unsicherheiten. Sie können durch Überleitungen, Talsperrenbewirtschaftung etc. beeinflusst sein. Diese anthropogenen Einflüsse können i. d. R. in Modellen nicht vollständig berücksichtigt werden, weil nötige Informationen oder Datenreihen fehlen. Daher wird in solchen Fällen das natürliche Abflussverhalten im Modell simuliert und nicht der tatsächliche anthropogen beeinflusste Durchfluss. Im KliWES-Projekt betrifft dies insbesondere Speicherbauwerke mit weniger als 1 Mio. m³ Stauraum sowie Entnahmen, Ein- und Überleitungen, welche nicht einzugsgebietsübergreifend stattfinden oder innerhalb eines Einzugsgebietes mengenmäßig

nicht relevant ($< 10\%$ MQ) sind. Die tatsächlichen Entnahme-, Ein- und Überleitungsmengen konnten für die Vergangenheit nicht jährlich bestimmt werden. Die Mengenangaben beziehen sich auf die Jahre 2008 und 2010 und stellen teilweise Genehmigungswerte und keine tatsächlichen Werte dar. Dadurch entsprechen diese Bewirtschaftungen nicht vollständig der Realität.

Die simulierten Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskomponenten weisen zu Beginn des Simulationszeitraumes Unsicherheiten, aufgrund ungenauer Kenntnisse des Gebietszustandes zu Beginn der Modellierung, auf. Dieser Gebietszustand, „ausgedrückt als Gebietsfeuchte oder Speicherfüllung, charakterisiert die Abflussbereitschaft eines Einzugsgebietes und ist einer direkten Messung nur sehr eingeschränkt zugänglich (GRUNDMANN 2010).“ Dies führt u. U. zu Beginn eines Modellierungslaufs zu Abweichungen zwischen den Modellergebnissen im Vergleich zu Referenzdaten bzw. Messwerten.

Die Simulation der berücksichtigten Talsperren (Tabelle 1) erfolgt im Rahmen der Realisierungen als ungesteuerte Becken. Die zukünftige Talsperrensteuerung kann nicht abgeschätzt werden. Ebenso enthalten die projizierten Wasserhaushaltsdaten keine Anpassung oder dynamische Änderung der Mengen zukünftiger Entnahmen, Ein- und Überleitungen.

Geodaten

Geodaten liefern die Grundlage zur Charakterisierung von Einzugsgebieten und dienen dem Aufbau und der Parametrisierung von Modellen. Sie enthalten Informationen über Landnutzung, Geländehöhen, Fließwege u. s. w. (siehe Kapitel 2). Im Folgenden werden die Datenunsicherheiten der räumlichen Informationen dargestellt:

- Die Hydrotopbildung stellt grundsätzlich eine Generalisierung der Eingangsdaten dar, welche zu einem Informationsverlust führt.
- In Folge unvollständiger Kartengrundlagen wurden Eingangsdaten aus verschiedenen Kartengrundlagen mit unterschiedlichen Maßstäben zusammengestellt. Zudem wurden mitunter Annahmen getroffen, um vollständige Eingangsdaten zu erhalten. Als Beispiele sind die Bodenkarte (Kapitel 2.5) und die Karte der räumlichen Verteilung der Grundwasserflurabstände (Kapitel 2.6) zu nennen.
- Kartengrundlagen, wie die der Geologie und Böden, basieren auf punktuellen Stichproben, die nur einen begrenzten Einblick in die räumliche Heterogenität der hydrogeologischen bzw. hydraulischen Eigenschaft eines Gebietes geben (GRUNDMANN 2010). Diese punktuellen Geoinformationen werden auf die Fläche übertragen. Bei der Erstellung der Karten erfolgt eine Klassifizierung und Generalisierung der hydrogeologischen bzw. hydraulischen Eigenschaften. „Die Klassifizierung und Generalisierung der punktuellen Messwerte in Kartenwerken nach Bodenarten und Fazies führen zu einer Bandbreite an möglichen Parameterwerten für alle Orte im EZG, für die keine Messungen vorliegen“ (GRUNDMANN 2010).
- Informationen, wie Drainagetiefe oder Grundwasserflurabstand, wurden nicht aus Messungen oder Stichproben gewonnen, sondern aus anderen Karteninformationen abgeleitet. Hierfür sind zum einen die Informationen über die Lage und Eigenschaften von Drainagen zu nennen. Diese wurden anhand von einem Kartenwerk mit potenziellen drainierten Böden aus Bodenkarten abgeleitet (Kapitel 2.5). Über die tatsächliche Lage und den Zustand der Drainagen sind keine Informationen verfügbar. Zum anderen sind die Grundwasserflurabstände aus der BSA200 zu nennen. Diese sind anhand von Bodeninformationen abgeleitet worden (LfUG 2007).
- Für die im Kapitel 2.9 aufgeführten 13 Städte wurde Mischkanalisation angenommen. Dies muss nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen.

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

Modellsystem ArcEGMO

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

- Zur Simulation des Pflanzenwachstums und damit der Transpiration, die ein Bestandteil der realen Verdunstung darstellt, wurde der dynamische und statische Ansatz im Modell ArcEGMO verwendet. Es handelt sich hierbei um relativ einfache Modellansätze (KLÖCKING 2012). Fruchtfolgen, wie auf Ackerflächen üblich, können damit nicht simuliert werden. Der komplexere VEGEN-Ansatz, der Fruchtfolgen berücksichtigt, erfordert viele Eingangsparameter, die zu ermitteln sind. Aufgrund des Arbeitsaufwandes und der vorliegenden Datengrundlage ist die Anwendung von VEGEN nicht für eine sachsenweite Parametrisierung geeignet (Kapitel 4.1).
- Im Laufe der Zeit ändert sich die Landnutzung, der Boden etc. in Einzugsgebieten infolge klimatischer Änderungen oder aufgrund des Einflusses der Menschen. Im Modell findet keine Anpassung der Vegetation, des Bodens, der Grundwasserflurabstände etc. an die geänderten Bedingungen statt. Die in der Realität vorhandene Rückkopplung zwischen klimatischen Gegebenheiten und Einzugsgebieteigenschaften wird nicht abgebildet.
- Im Modell ist kein Grundwasserströmungsmodell implementiert, das eine genauere Abbildung der Prozesse des Grundwasserabflusses sowie Interaktionen des Grundwasserkörpers mit den Oberflächengewässern und der Interaktion des zu untersuchenden Grundwasserkörpers mit den benachbarten Teilsystemen (FANK & ROCK, 2003) ermöglicht. Deswegen wird keine situationsabhängige Modellierung der Grundwasserflurabstände durchgeführt.
- Aufgrund der im Modell als nahezu unveränderlich angenommenen Grundwasserflurabstände wird bei Klimaänderung u. U. auf grundwassernahen Flächen eine zu hohe Zehrung simuliert. Genauere Informationen sind Kapitel 6.2.4 zu entnehmen.

Kalibrierung

Die verwendete Kalibrierungsstrategie beruht, wie in Kapitel 5 erläutert, auf der Anpassung an drei verschiedene Größen: ETR, RG und QG1. Diese werden an die mit DIFGA ermittelten Wasserhaushaltsgrößen angepasst. Eine solche multikriterielle Optimierung führt grundsätzlich zu stärkeren Abweichungen von den einzelnen Größen als eine Anpassung an nur eine Größe (etwa den Gesamtabfluss). Weil der Gesamtabfluss die einzelnen Wasserhaushaltsgrößen jedoch nur summarisch enthält, lässt sich bei einer solchen monokriteriellen Strategie keine Anpassung an die einzelnen Wasserhaushaltskomponenten durchführen. Daher wurde entschieden, die etwas größeren Abweichungen des multikriteriellen Ansatzes in Kauf zu nehmen, um die

Aufteilung auf die verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten möglichst realistisch und detailliert abzubilden. Die Anpassung an den Gesamtabfluss wurde im Anschluss an die multikriterielle Optimierung überprüft.

Nähere Informationen zu Unsicherheiten von DIFGA bzw. den damit ermittelten Wasserhaushaltsbilanzen enthalten die Ausführungen in SCHWARZE et al. (2012).

Regionalisierung

Für die Kalibrierung unbeobachteter Gebiete wurden teilweise Parametersätze, so sie nicht unmittelbar aus Gebieteigenschaften ableitbar waren, aus beobachteten Gebieten mittels multipler Regression übertragen (siehe Abschnitt 5.8). Weil es sich dabei um eine statistische Methode handelt, weisen die Ergebnisse einer solchen Regionalisierungsmethode für die einzelnen Gebiete naturgemäß mehr oder minder große Abweichungen von der Realität auf (Standardabweichung bzw. Varianz). Die Betrachtung der relativen Veränderungen zwischen Ist-Zustand und einer Klimaprojektion können jedoch auch für diese Gebiete als realistische Abschätzungen gelten.

6.4 Anfälligkeit des Wasserhaushalts

Unter der Anfälligkeit bzw. Vulnerabilität wird der Grad der Verletzbarkeit einer Region bzw. eines Systems verstanden, d. h. die Anfälligkeit einer Region gegenüber negativen Auswirkungen von Klimaänderungen. Die Vulnerabilität ist einerseits abhängig vom Charakter, Ausmaß und Geschwindigkeit von Klimaänderungen und -schwankungen, andererseits hat die Sensitivität und Anpassungskapazität des Systems einen Einfluss (IPCC 2007; SCHMIDT et al. 2011). Aus Abbildung 54 geht hervor, dass die Vulnerabilität aus Umfang und Intensität der klimatischen Veränderung (Exposition) sowie aus der Sensitivität der Region unter Berücksichtigung ihrer Anpassungskapazität ermittelt wird (SCHMIDT et al. 2011).

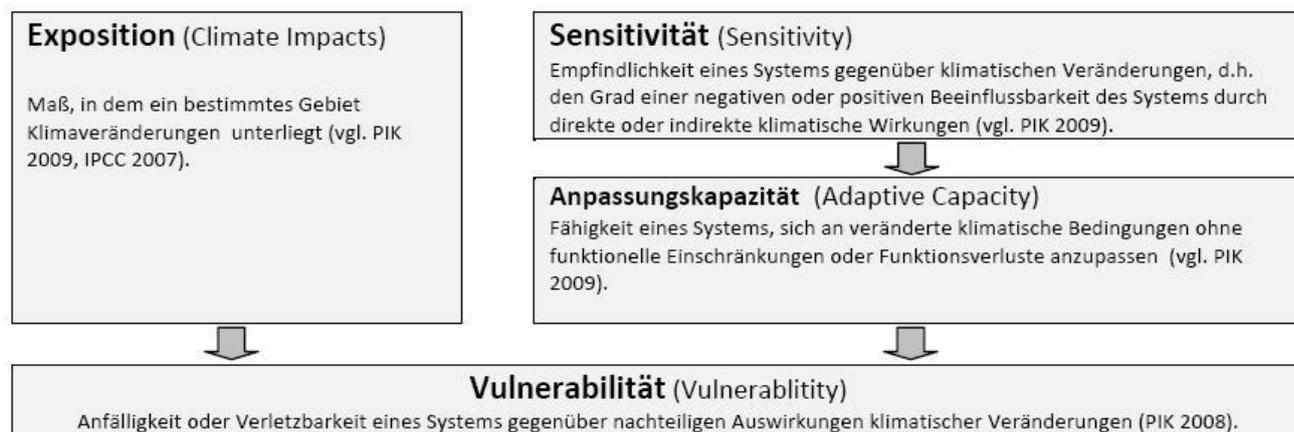


Abbildung 54: Überblick über den methodischen Ansatz und wesentliche Begriffe (nach SCHMIDT et al. 2011)

Nach SCHMIDT et al. (2011) sind zur Einschätzung der Verletzbarkeit von Regionen zunächst langjährige Messreihen und verschiedene Klimaprojektionen auszuwerten. Des Weiteren müssen Planungsräume auf Basis der Klimaänderung und naturräumlicher Grundlagen abgeleitet werden. Dabei sollen innerhalb eines Planungsraumes ähnliche Veränderungen und vergleichbare projizierte Zustände vorliegen. Somit können Schwankungen und Unsicherheiten der Projektionen weitgehend kompensiert werden, weil lediglich ähnliche Tendenzen von Bedeutung sind (SCHMIDT et al. 2011). Die Ableitung von Planungsräumen erfolgte für die Region Oberlausitz-Niederschlesien (SCHMIDT et al. 2011) und Westsachsen (SCHMIDT et al. 2011 a). Im An-

schluss erfolgt die Betrachtung thematischer Schwerpunkte, z. B. „Vulnerabilität gegenüber einer Verringerung des sommerlichen Wasserdargebots“. Die Anfälligkeit eines Systems wird unter Betrachtung der klimatischen Änderung (Exposition), Sensitivität und Anpassungskapazität ermittelt. Zur Feststellung der Exposition ist der Frage nachzugehen, welche klimatisch bedingten Risiken für die Vulnerabilität eines Systems vorliegen. Für das Beispiel „Vulnerabilität gegenüber einer Verringerung des sommerlichen Wasserdargebots“ bestehen Risiken der Verringerung der sommerlichen Niederschläge unter Berücksichtigung der vorherrschenden Verdunstungsraten, die anhand der Veränderung der klimatischen Wasserbilanz festgestellt werden kann (SCHMIDT et al. 2011). Die Sensitivität eines Systems kann sowohl naturräumlich bedingt als auch nutzungsbedingt sein. Bei der Betrachtung der natürlich bedingten Sensitivität wird der Frage nachgegangen, welche negativen Auswirkungen auf das System aufgrund der klimatischen Änderung (Exposition) zu erwarten sind. Die naturräumlich bedingte Sensitivität wird durch Geodaten, hydrologische oder meteorologische Größen bestimmt. Dafür können Kategorien, wie „sehr hohe Sensitivität“, „hohe Sensitivität“ oder „Sensitivität vorhanden“ definiert werden.

Beim Beispiel „Verringerung des sommerlichen Wasserdargebots“ ist u. a. mit einer Verringerung des Grundwasserabflusses und somit zu einem Absinken des Grundwasserspiegels zu rechnen. Für die Bestimmung der Sensitivität des Beispiels kann z. B. der Grundwasserabfluss genutzt werden. Die nutzungsbedingte Sensitivität erhöht die Sensitivität eines Systems. Bei der Betrachtung nutzungsbedingter Sensitivität sind anthropogene Einflüsse, wie wasserzehrende Nutzungen (Entnahmen zur Trink- und Brauchwassergewinnung, Grundwasserabsenkungen zur Rohstoffgewinnung), landwirtschaftliche Nutzung oder Versiegelungsgrad zu berücksichtigen. Die Anpassungskapazität eines Systems zeigt auf, welche Möglichkeiten bestehen, um die Risiken zu vermindern (Verminderungskapazität) oder auszuweichen (Ausweichkapazität) (SCHMIDT et al. 2011 a). Damit können Handlungsempfehlungen entwickelt werden. Für das Beispiel „Verringerung des sommerlichen Wasserdargebots“ bestehen durch eine angepasste Land- und Wassernutzung vielfältige Möglichkeiten, mit der Sensitivität des Systems in Zukunft umzugehen. Die Vulnerabilität wird unter Berücksichtigung der Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität abgeschätzt. Auf Basis solcher Untersuchungen kann die Vulnerabilität von Raumnutzungen (Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Fischereiwirtschaft, Wasserwirtschaft, Naturschutz, Erholung, Kulturlandschaft, Bergbaufolgelandschaften) gegenüber dem Klimawandel festgestellt werden. Detaillierte Untersuchungen der Vulnerabilität liegen u. a. für die Region Oberlausitz-Niederschlesien (SCHMIDT et al. 2011) und Westsachsen (SCHMIDT et al. 2011 a) vor. Ein weiteres aktuelles Projekt unter dem Titel „Vulnerabilitätsstudie Sachsen – Ermittlung und Priorisierung integrativer Risiken und Chancen des Klimawandels in Sachsen“ wird momentan am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) bearbeitet. Für die im Auftrag des LfULG durchgeführte Studie werden im Rahmen von KliWES weitere Klimaszenarien berechnet und für die Vulnerabilitätsstudie genutzt. Dieser Studie können grundlegende Informationen zum Thema Vulnerabilität und detaillierte regionalspezifische Ergebnisse entnommen werden.

6.4.1 Differenzenkarten

Für projizierte 30-jährige Mittelwerte verschiedener Wasserhaushaltsgrößen werden die absoluten und relativen Abweichung vom Mittelwert des projizierten Ist-Zustandes berechnet und in Kartenform dargestellt, was als Differenzenkarte bezeichnet wird. Die Differenzenkarten zeigen die räumliche Verteilung von Abweichungen für verschiedene langjährige mittlere Wasserhaushaltsgrößen.

Bevor auf die Entwicklung der Grundwasserkomponente RG für die Realisierung 66 eingegangen wird, erfolgt zunächst die Darstellung der relativen Abweichungen dieser Größe für die Realisierung 66 (1961–1990) vom beobachteten Ist-Zustand (1961–1990) in Abbildung 55. Somit können Unterschiede zwischen dem Ist-Zustand und dieser Klimarealisierung aufgezeigt werden.

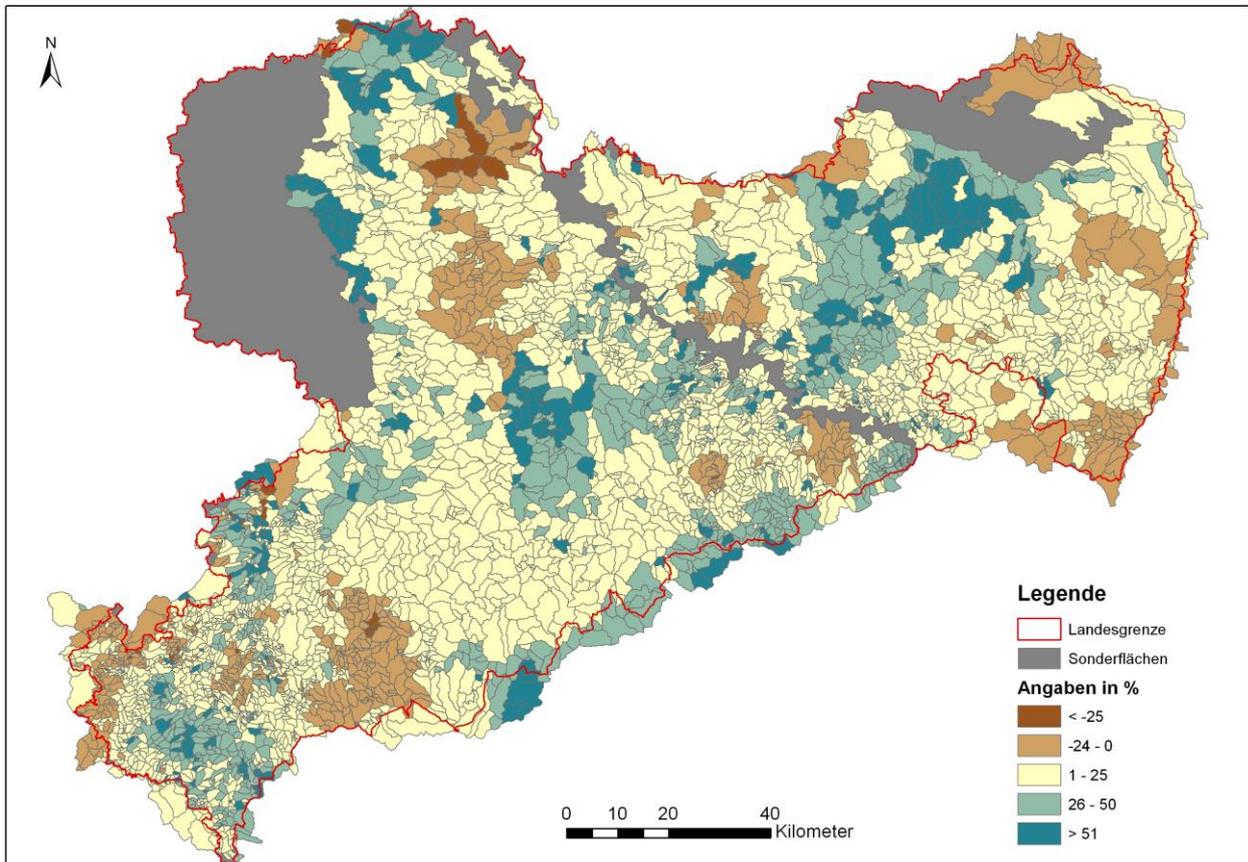


Abbildung 55: Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (1961–1990) der Realisierung 66 vom Ist-Zustand (1961–1990)

Die räumliche Verteilung der relativen Abweichungen ist heterogen und folgt keiner unmittelbar erkennbaren Struktur. Die relativen Abweichungen liegen zum überwiegenden Teil in einem Bereich von $\pm 25\%$, sodass die Realisierung 66 den Zeitraum 1961–1990 relativ gut abbildet. Die Grundwasserkomponente RG wird für den Simulationslauf der Realisierung 66 aber eher überschätzt, weil deutlich mehr Teileinzugsgebiete eine positive relative Abweichung vom Ist-Zustand aufweisen, wie Abbildung 55 verdeutlicht. Dies resultiert aus den etwas erhöhten Niederschlagsmengen, welche innerhalb der Realisierung 66 für den Referenzzeitraum vorliegen. Größere relative Abweichungen können verschiedene Ursachen haben. Zum einen unterscheiden sich die meteorologischen Eingangsdatensätze lokal, zum anderen sind Unsicherheiten bei der Parametrisierung von unbeobachteten Gebieten denkbar. Hinsichtlich der Bewertung der relativen Abweichungen für die einzelnen Teileinzugsgebiete spielen diese Unterschiede allerdings keine Rolle, weil in diesem Zusammenhang nur die tendenzielle Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen betrachtet wird.

Grundsätzlich werden für Differenzkarten nur langjährige Mittelwerte eines meteorologischen Eingangsdatensatzes gegenübergestellt. Die langjährigen Mittelwerte von 1961 bis 1990 der jeweiligen Wasserhaushaltsgröße werden hierbei als Referenz verwendet. Die im Projekt KliWES verwendeten Vergleichszeiträume sind:

- 1981–2010
- 2021–2050
- 2071–2100

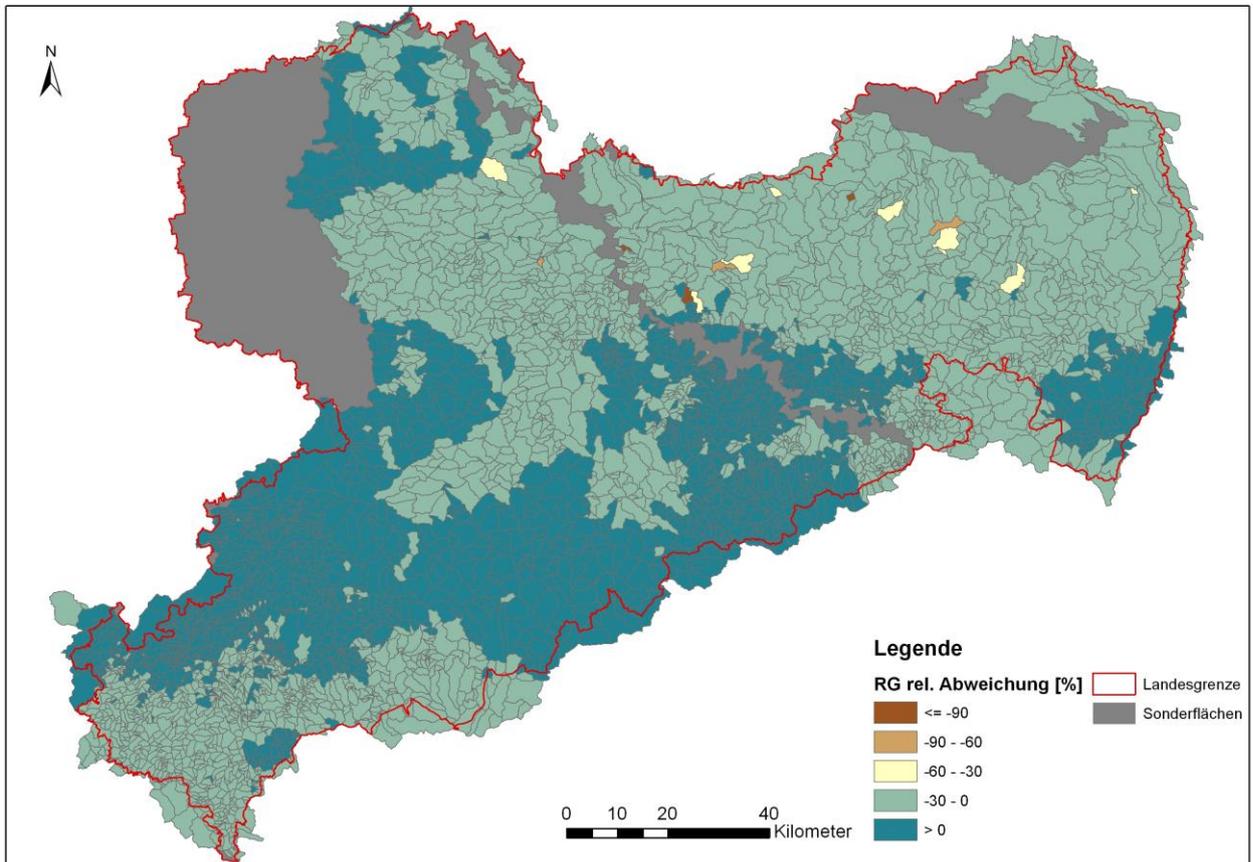


Abbildung 56: Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (1981–2010) der Realisierung 66 vom projizierten Ist-Zustand (1961–1990)

Im Falle der Karten (Abbildung 56 bis Abbildung 58) wurde als meteorologischer Eingangsdatensatz exemplarisch die Realisierung 66 verwendet. Die dargestellten Differenzkarten dieser Realisierung zeigen die relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG für drei unterschiedliche 30-jährige Zeiträume gegenüber dem projizierten Ist-Zustand der Realisierung 66 auf.

Ein Vergleich der drei Abbildungen (Abbildung 56 bis Abbildung 58) zeigt eine eindeutige Entwicklung der mittleren Grundwasserkomponente bis 2100. Während der Zeitraum 1981–2010 für die Mehrheit der Teileinzugsgebiete relative Abweichungen von $\pm 30\%$ und nur für eine sehr geringe Anzahl größere Abweichungen vom Referenzzustand ausweist, zeigt sich für 2021–2050 schon eine deutliche Abnahme der Grundwasserkomponente. Es treten für diesen Zeitraum keine positiven Abweichungen vom Referenzzustand 1961–1990 mehr auf (Abbildung 57). Für die ferne Zukunft (2071–2100) wird für ganz Sachsen eine starke Abnahme der relativen Abweichungen der Grundwasserkomponente vom Referenzzeitraum projiziert. Dies ist in Abbildung 58 zu sehen. Relative Abweichungen von -30% bis 0% treten nur noch sehr vereinzelt im Erzgebirgsraum auf. Für den überwiegenden Teil der Flächen simuliert die Realisierung 66 allerdings Reduktionen der Grundwasserkomponente von -30% und mehr. Vor allem der nördliche Teil Sachsens ist mit Abnahmen von mehr als -90% von RG gegenüber dem Ist-Zustand stark betroffen.

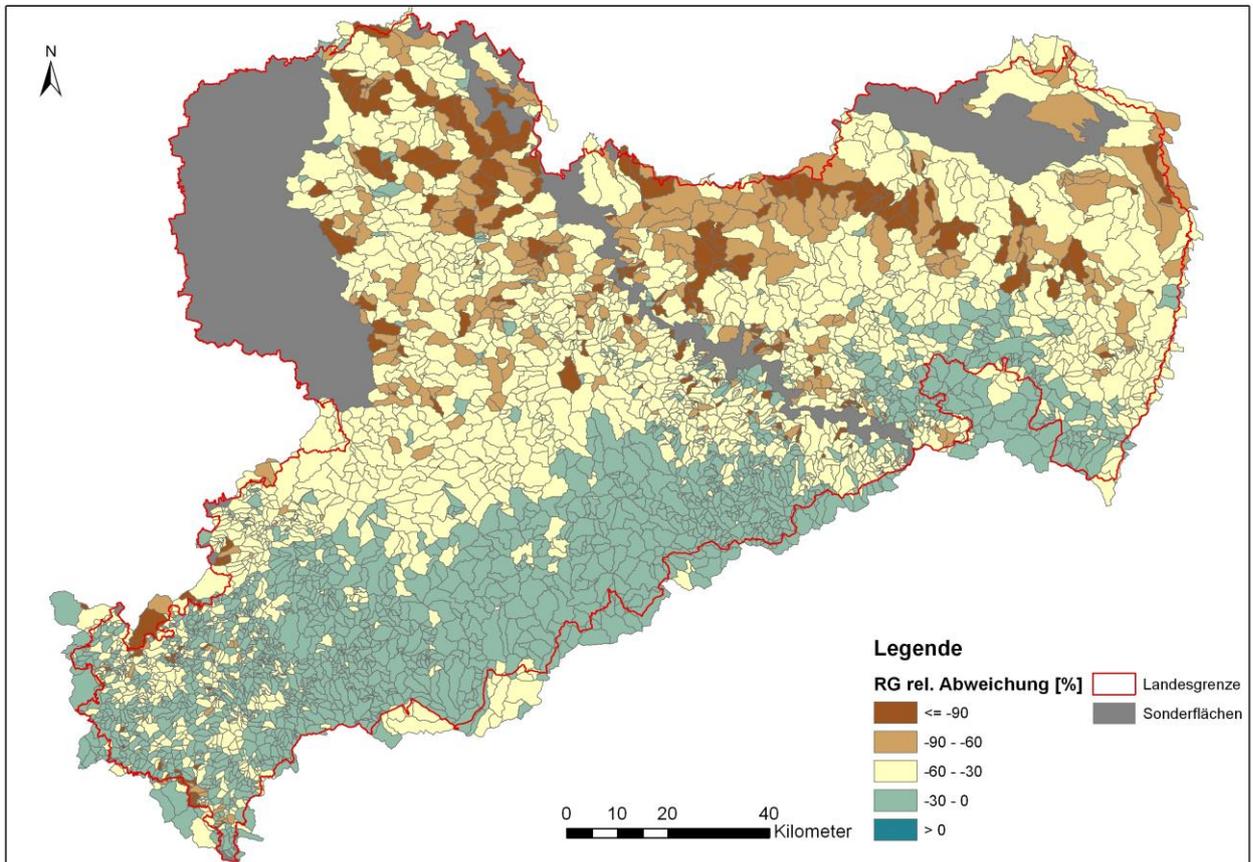


Abbildung 57: Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (2021–2050) der Realisierung 66 vom projizierten Ist-Zustand (1961–1990)

Ausschlaggebend für diese Entwicklung sind die stark abnehmenden projizierten Niederschläge und die Zunahme der Temperatur innerhalb der Realisierung 66. Deren Entwicklung, welche in ihrer räumlichen Verteilung die topologischen Gegebenheiten Sachsens widerspiegelt, führen zu einer starken Abnahme der Grundwasserkomponente RG.

Neben den relativen Abweichungen für die Grundwasserkomponente RG können dem Internetauftritt von Säule B auch absolute Abweichungen entnommen werden (Kapitel 7.2). Diese sind auch für alle weiteren unter Kapitel 6 aufgeführten Wasserhaushaltsgrößen verfügbar.

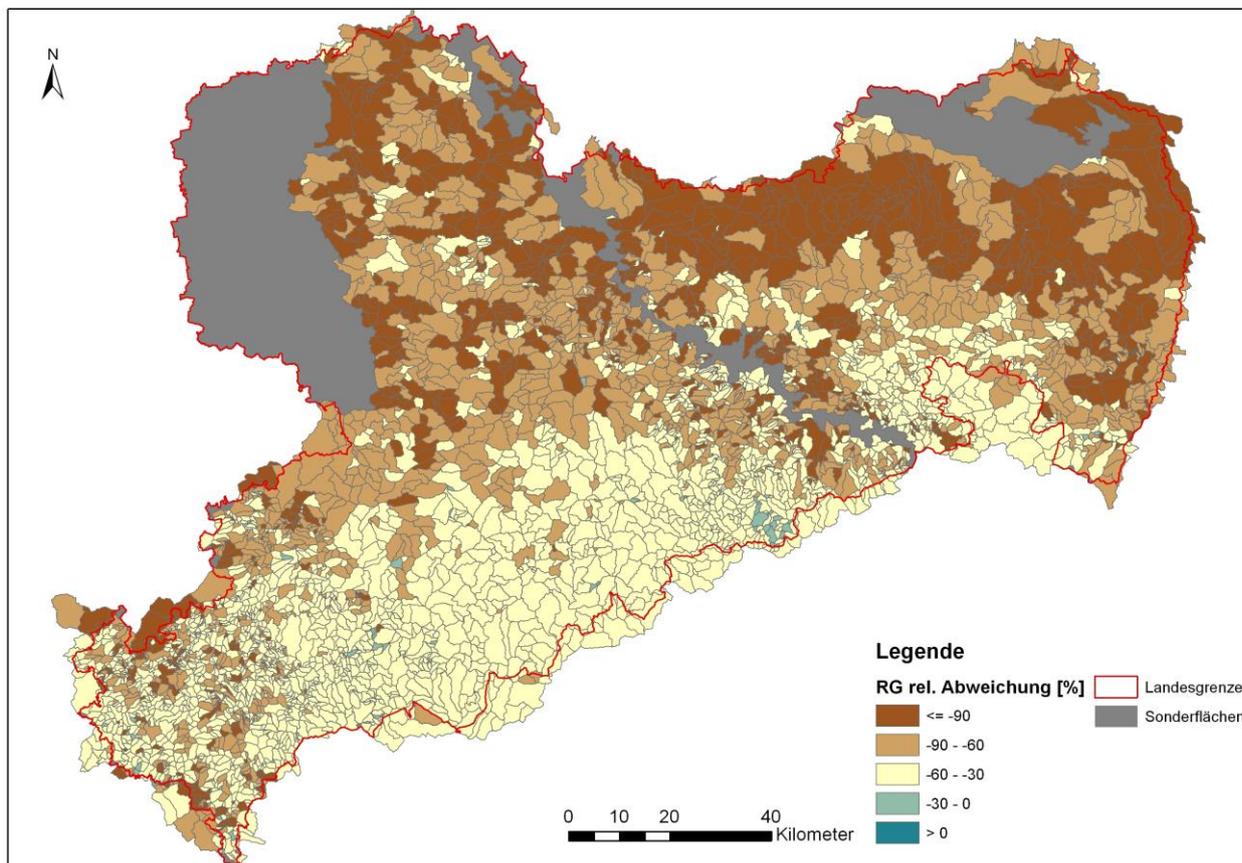


Abbildung 58: Karte der relativen Abweichungen der mittleren Grundwasserkomponente RG (2071–2100) der Realisierung 66 vom projizierten Ist-Zustand (1961–1990)

Fazit

Die relative Abweichung des Ist-Zustandes von der Realisierung 66 der Größe RG zeigt in ihrer räumlichen Verteilung für den überwiegenden Teil der sächsischen Fläche geringe Unterschiede. Bis auf wenige Ausnahmen sind die Ergebnisse vergleichbar. Stärkere Abweichungen können ihren Ursprung einerseits in den verschiedenen meteorologischen Eingangsdaten haben, andererseits auf Unsicherheiten bei der Regionalisierung der Parametersätze für unbeobachtete Gebiete (Kapitel 5.8) hindeuten.

Weil unter Annahme der Klimarealisierung 66 der Niederschlag abnimmt und die reale Verdunstung ansteigt, prägt sich dies in Form einer teils deutlichen Abnahme der Grundwasserkomponente RG durch. Die Differenzkarten für die Realisierung 66 untermauern diese Aussage. So gibt es für die nahe Zukunft (2021–2050) keine Teileinzugsgebietsfläche mehr, welche eine positive Abweichung vom Referenzzustand 1961–1990 ausweist. Stattdessen zeigt sich eine überwiegend moderate Abnahme der mittleren Grundwasserkomponente im Erzgebirgsraum und nur für einzelne Flächen in Nordsachsen ein stärkerer Rückgang. Für den Zeitraum von 2071–2100 ist hingegen eine teils drastische Abnahme der Grundwasserkomponente RG vor allem in den nördlichen Regionen Sachsens erkennbar. Diese Aussagen treffen auch auf die Realisierungen 00 und 99 zu.

7 IT-Lösung

Ein weiterer wichtiger Projektbestandteil war die Weiterentwicklung des zunächst für Säule A erarbeiteten Internetauftrittes, dem Wasserhaushaltsportal Sachsen, zur Veröffentlichung der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen. Das erweiterte IT-Konzept der Säule B unterscheidet sich in einzelnen Punkten von dem der Säule A. Die Anpassungen resultieren aus der Verwendung neuer Software, um den aktuellen Stand der Technik mit seinen Vorteilen zu nutzen und den Webauftritt effizient zu gestalten.

7.1 Umsetzung des IT-Konzepts

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierungen werden ähnlich den Ergebnissen aus Säule A im Wasserhaushaltsportal Sachsen dargestellt. Das Layout und die Bedienung orientieren sich an der interaktiven Karte der Säule A. Aufgrund der zusätzlichen Klima- und Landnutzungsszenarien wurde die Menü- und Auswahlstruktur angepasst (Abbildung 59).

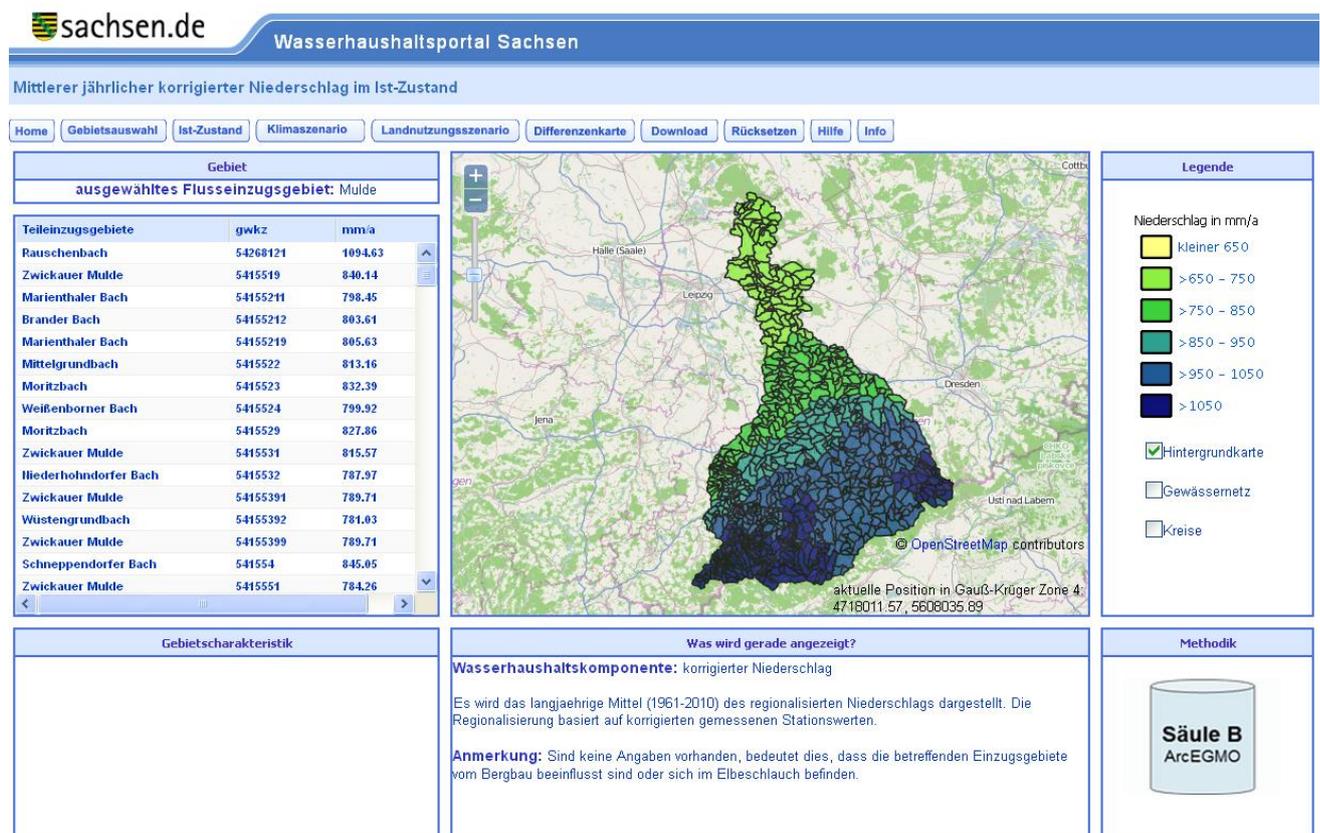


Abbildung 59: Oberfläche des Internetauftritts von Säule B

Die betrachteten Flusseinzugsgebiete gliedern sich in Einzugsgebiete und weiter in Teileinzugsgebiete. Diese stehen in einem räumlichen und hydrologischen Zusammenhang, der erhalten bleibt und abgebildet wird. Aktuelle Monatswerte der Wasserhaushaltsgrößen stehen auf Teileinzugsgebietsebene, in Form von digitalen Karten und Downloads, zur Verfügung. Wegen der Anforderungen sowohl aufgrund der Datenbeschaffenheit als auch aufgrund der Nutzung erfolgt die Datenhaltung in einer Datenbank. Dadurch werden die Beziehungen untereinander erhalten, können Geodaten gespeichert und große Mengen an Modellergebnissen gesichert

und verarbeitet werden. Als Datenquelle für das Wasserhaushaltsportal ermöglicht sie einen Mehrbenutzerzugriff und eine performante Nutzung. Alle benötigten Komponenten werden mit Open-Source-Software realisiert. Allgemein basiert das IT-Konzept auf einer serviceorientierten Architektur. Für die Datenhaltung wird die objektrelationale Datenbank PostgreSQL [postgresql 2013, online] verwendet. Die Speicherung und Verarbeitung der geografischen Objekte erfolgt dabei mit Hilfe der Erweiterung PostGIS. Die in der Datenbank gespeicherten Geodaten werden mit Hilfe des Mapserver deegree [degree 2013, online] der Firma lat/lon als Dienst zur Verfügung gestellt. Mittels der Client-Software OpenLayers [OSGeo 2013, online] und GeoExt [GeoExt 2013, online] wurde das Wasserhaushaltsportal für die Säule B implementiert. OpenLayers basiert auf JavaScript, ist unabhängig von der verwendeten Serversoftware und realisiert die Funktionalität, die mit der Kartendarstellung und Bedienung zusammenhängt. Weitere aus einem Desktop-GIS bekannte Elemente wie die Legende und eine Layerauswahl werden durch das JavaScript-Framework GeoExt realisiert. Abbildung 60 zeigt die IT-Architektur mit den verwendeten Softwarekomponenten.

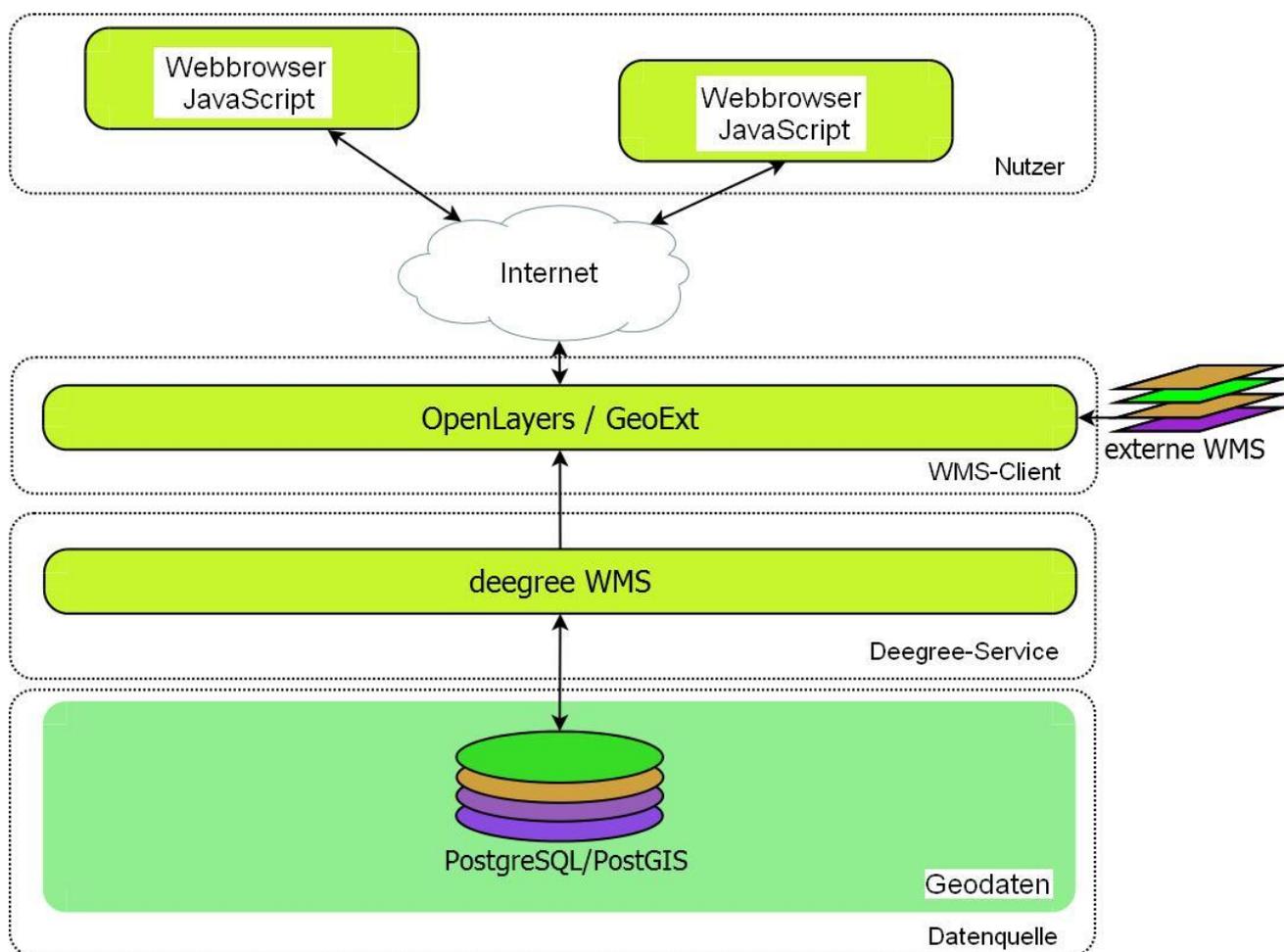


Abbildung 60: Interne Struktur des Webauftritts für Säule B

7.2 Webauftritt Säule B

Das Wasserhaushaltsportal Sachsen (Abbildung 61) wurde im Rahmen des Forschungsprojektes KliWES erarbeitet. Auf dieser Plattform, unter www.wasserhaushaltsportal.sachsen.de erreichbar, werden Ergebnisse aus dem Projekt KliWES sowie weitere Informationen und Daten zum Wasserhaushalt bereitgestellt.

- ↳ sachsen.de
- ↳ Wasser, Wasserwirtschaft
- ↳ Karten und GIS-Daten
 - ↳ Hochwasser
 - ↳ Grundwasser
 - ↳ Oberirdische Gewässer
 - ↳ Europäische Wasserrahmenrichtlinie
 - ↳ Gebietsbezogener Gewässerschutz
 - ↳ Wasserversorgung
 - ↳ Abwasserbeseitigung
 - ↳ Wasserbau
 - ↳ Geodatendownload
 - ↳ **Wasserhaushaltsportal**
 - ↳ Wasserhaushaltsdaten
 - ↳ Methodik
 - ↳ Infothek
 - ↳ Hilfe
 - ↳ Anregungen und Kritik
 - ↳ Fortschreibung

Ihr Portal auf sachsen.de

Investoren ▼

Suche und Übersicht

- ↳ Erweiterte Suche
- ↳ Übersicht

Herausgeber

- ↳ © Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- ↳ Impressum
- ↳ Rechtliche Hinweise
- ↳ Kontakt
- ↳ eSignatur
- ↳ Behördenwegweiser

Wasserhaushaltsportal



Wasser ist die wichtigste Naturressource für den Antrieb allen Lebens auf der Erde.

Die zunehmend beobachteten Veränderungen im Wettergeschehen verursachen u. a. Schwankungen im Wasserhaushalt und lösen verstärkt Diskussionen über die Ursachen, (zukünftige) Auswirkungen und Folgen des Klimawandels aus.

»Der Klimawandel bringt den Wasserhaushalt unseres Planeten durcheinander.« (stern-online)

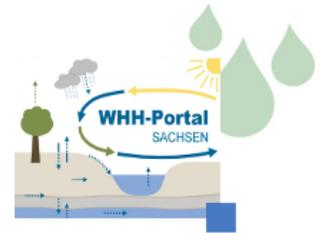
Das Wasserhaushaltsportal Sachsen stellt sachsenweite Daten für einzelne Wasserhaushaltskomponenten sowohl für den Ist-Zustand (1961–2005 bzw. 2010) als auch für bestimmte Zukunftsszenarien (2011–2100) bereit.

Die Wasserhaushaltsdaten sind Ergebnisse des Projekts KiWES. Dieses untersucht die Auswirkungen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt sächsischer Gewässereinzugsgebiete.

Das Projekt wird im Auftrag des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie von der Technischen Universität Dresden und der DHI-WASY GmbH umgesetzt.



[zurück zum Seitenanfang](#)



Ansprechpartner

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Referat 44: Oberflächen- und Grundwasser

Holm Friese

☎ Telefon: (0351) 8928-4412

✉ [E-Mail](#)

🌐 www.smul.sachsen.de/lfulg

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Referat 44: Oberflächen- und Grundwasser

Karin Kuhn

☎ Telefon: (0351) 8928-4400

☎ Telefax: (0351) 8928-4099

✉ [E-Mail](#)

🌐 www.smul.sachsen.de/lfulg

Aktuelles

Ankündigung

↳ 3. Workshop KiWES-Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen am 07.11.13 in der Sächsischen Aufbaubank, Dresden

Fortschreibung

23. September 2013: Infothek ist online – Informationen zum Thema Klimawandel und Wasserhaushalt im Überblick.

Übersicht über Updates der Daten und Neuerungen:

↳ [Fortschreibungsdokumentation](#)

Abbildung 61: Startseite des Wasserhaushaltsportals

Allgemeines zum Aufbau

Aus den Layoutvorgaben des LfULG und den gegebenen technischen Randbedingungen ergab sich in einem längeren Entwicklungsprozess die Struktur des Webauftritts. Der Internetauftritt besteht aus einem statischen und einem dynamischen Teil.

Der statische Teil beinhaltet die Einführung und weitergehende Informationen zum Projekt KiWES und dem Wasserhaushaltsportal. Der dynamische Teil des Internetauftritts beinhaltet die Zusammenstellung der Ergebnisse aus der Datenbank und die Recherche in diesem Datenbestand.

Das dynamische Verhalten wird durch dynamisches HTML realisiert. Clientseitig kommt hierbei die Scriptsprache JavaScript zum Einsatz. Für die asynchrone Datenübertragung zwischen dem Client und Server wird das Ajax-Konzept verwendet. Daten werden hierbei per XML HttpRequests ausgetauscht. Alle Geoinformationen werden über Geowebserver aus Datenbanken bereitgestellt und alle downloadfähigen Daten in einem File-Serverbereich vorgehalten.

Die Bedienung des Wasserhaushaltsportals erfolgt stufenweise. Zunächst wird das Flusseinzugsgebiet in der Menüleiste ausgewählt und im Kartenbereich dargestellt. In Abhängigkeit der ausgewählten Szenarien bzw. der Differenzkarten können die entsprechenden verfügbaren Wasserhaushaltsgrößen ausgewählt und teileinzugsgebietsbezogen graphisch dargestellt bzw. heruntergeladen werden. Über Verlinkungen sind zusätzliche Informationen und Erläuterungen zu wichtigen Komponenten verfügbar. Dieser Teil des Internetauftritts befindet sich an der TU Dresden auf einem Webserver, der für das Projekt KliWES angeschafft worden ist.

Funktionen

Folgende Funktionen beinhaltet das Wasserhaushaltsportal:

- Darstellung der mittleren Jahressummen von Wasserhaushaltsgrößen je Teileinzugsgebiete in digitalen Karten (Tabelle 18)
 - Ist-Zustand: Darstellung von mittleren Jahressummen (1961–2010) der Größen P, ETR, RS, RG1, RG2, R
 - Klimaszenarien: Darstellung von mittleren Jahressummen (1961–2100) der Größen P, ETR, RS, RG1, RG2, R unter Annahme
 - der Realisierung 00 von WETTREG2010
 - der Realisierung 66 von WETTREG2010
 - der Realisierung 99 von WETTREG2010
 - Landnutzungsszenarien: Darstellung von mittleren Jahressummen (1961–2100) der Größen P, ETR, RS, RG1, RG2, R unter Annahme der Realisierung 00 von WETTREG2010 und eines Landnutzungsszenario
 - Differenzkarten: Darstellung von absoluten und relativen Differenzen zwischen den mittleren Jahressummen (1961–1990) des Ist-Zustandes und
 - den mittleren Jahressummen (1981–2010) der Realisierung 66 von WETTREG2010
 - den mittleren Jahressummen (2021–2050) der Realisierung 66 von WETTREG2010
 - den mittleren Jahressummen (2071–2100) der Realisierung 66 von WETTREG2010für die Größen RG und RS
- Navigieren in der Karte
 - Verschieben, Vergrößern, Verkleinern
- Gebietsauswahl
- Download von Größen
 - Shapes, welche die Teileinzugsgebiete und zugehörige mittlere Jahressummen der Wasserhaushaltsgrößen (P, ETR, RS, RG1, RG2, R) für den Ist-Zustand, Klimaszenarien und Landnutzungsszenarien enthalten

- aktuelle Monatssummen der Wasserhaushaltsgrößen (P, ETR, RS, RG1, RG2, R) des Ist-Zustandes, der Klima- und Landnutzungsszenarien je Teileinzugsgebiete
- aktuelle Monatswerte der Abflussgrößen QG1, QG2 und QS je DIFGA-Gebiet für den Ist-Zustand und der Klimaszenarien

Tabelle 18: Verfügbare Datensätze je Gebiet

Datensatz	Klimainput	Landnutzungsinput
1	Ist-Zustand	Ist-Zustand
2	Realisierung 00	Ist-Zustand
3	Realisierung 66	Ist-Zustand
4	Realisierung 99	Ist-Zustand
5	Realisierung 00	Szenario Versiegelung
6	Realisierung 00	Szenario Waldumbau
7	Realisierung 00	Szenario Flächenverbrauch

8 Zusammenfassung

Das Projekt „Klimawandel und Wasserhaushalt“ (KliWES) ist ein komplexes Forschungsvorhaben, das sich aus einer Reihe von Teilprojekten zusammensetzt. Ziele des vorliegenden Teilprojektes waren erstens die Berechnung des gegenwärtigen Wasserhaushalts für den Ist-Zustand (1961–2010) und zweitens die Modellierung des projizierten Wasserhaushalts (1961–2100) mit dem Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO unter der Annahme der drei Realisierung 00, 66 und 99 des regionalen Klimamodells WETTREG2010. Weiterhin erfolgte mittels ArcEGMO die Modellierung des Wasserhaushalts unter der Annahme von drei Landnutzungsszenarien auf Basis der Klimarealisierung 00 von WETTREG2010 (1961–2100). Der rezente und zukünftig zu erwartende Wasserhaushalt in Sachsen wurde im Internet präsentiert.

Arbeiten waren sowohl zur Beschaffung und Aufbereitung der notwendigen meteorologischen, hydrologischen sowie hydrogeologischen und geologischen, bodenkundlichen, morphometrischen und topografischen Daten als auch zur Erlangung erforderlicher Informationen zur Landnutzung und zur Bewirtschaftung notwendig. Diese wurden zur Erstellung der modellspezifischen Eingangsdaten im Rahmen des Modellaufbaus benötigt. Für die 242 Modelle, welche ca. 85 % der Fläche Sachsens abdecken, wurde in Abhängigkeit der verfügbaren Referenzdaten eine Kalibrierungs- und Validierungsstrategie entwickelt und umgesetzt. Diese beinhaltete die multikriterielle Optimierung von vier ausgewählten Parametern für 113 Einzugsgebiete. Im Anschluss erfolgte die Regionalisierung der optimierten Parameter für die unbeobachteten Gebiete. Die Validierung der Ergebnisse des Ist-Zustandes (1961–2010) ergab für die meisten der 242 Modellgebiete eine gute Anpassung.

Von den Wasserhaushaltsberechnungen ausgenommen waren Tagebauggebiete in der Leipziger Region sowie im Spreeeinzugsgebiet und die Überschwemmungsflächen des Hochwassers 2002 an der Elbe. Das Modell ArcEGMO ist für die Berechnung dieser Gebiete aufgrund der vorliegenden Besonderheiten nicht geeignet.

Nach der Kalibrierung der Modelle folgte die Modellierung des gegenwärtigen und des zukünftig zu erwartenden Wasserhaushalts unter der Annahme der drei Realisierungen mit den Bezeichnungen 00, 66 und 99 des

Klimamodells WETTREG2010. Daran schloss sich die Wasserhaushaltsmodellierung von festgelegten Landnutzungsszenarien (Waldumbau, Versiegelung und Flächenverbrauch) an. Im Ergebnis der Simulationsläufe liegen je Modellregion sieben Datensätze vor. Diese umfassen die Monatssummen der Wasserhaushaltsgrößen P, ETR, R-Gesamt, RS, RG bzw. RG1 und RG2 sowie Monatswerte der Durchflusskomponenten QG1, QG2 und QS (s. Kapitel 6). Die Daten werden im Internet unter „Wasserhaushaltsportal Sachsen – Säule B“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Mithilfe der Daten können unterschiedlichste Fragestellungen bearbeitet werden. Es ist hierbei allerdings immer zu berücksichtigen, dass es sich um eine mögliche Entwicklung des zukünftigen Klimas handelt und keine größere Spannweite von Klimaveränderungen betrachtet wurde.

Die Ergebnisse auf Basis der exemplarisch zugrunde gelegten Klimaprojektion für Sachsen gehen von einer sachsenweiten zukünftigen Abnahme der mittleren Niederschlagsmengen und einer Zunahme der durchschnittlichen Temperaturen aus. Dies führt zu einer Erhöhung der realen Verdunstung. Vor allem in Nordsachsen kommt es in Folge zu einer starken Reduktion der Abfluss- und Grundwasserkomponenten. Für einzelne Einzugsgebiete im nördlichen Sachsen wurden gegen Ende des 21. Jahrhunderts negative Jahressaldi für den Zufluss zum Grundwasserspeicher berechnet. Dies würde langfristig betrachtet zu einer Abnahme der Grundwasservorräte führen.

Für die übrigen Regionen Sachsens sind die Auswirkungen der projizierten Wasserhaushaltsänderungen weniger drastisch. Vor allem der Erzgebirgsraum und das Lausitzer Bergland weisen im Rahmen der Klimarealisierungen zukünftig immer noch ausreichend Niederschlag auf, sodass anzunehmen ist, dass sich Änderungen in der Wasserhaushaltsbilanz nur auf einzelne Bereiche auswirken.

Eine genauere Betrachtung der Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen in Form von 30-jährigen Mittelwerten ergibt ein etwas differenzierteres Bild. Für den Zeitraum von 2021–2050 weichen die Wasserhaushaltsgrößen im Allgemeinen noch nicht sehr stark vom Referenzzustand (1961–1990) ab. Allerdings kann für diesen Zeitraum eine deutliche Trendentwicklung – positiv für die reale Verdunstung und negativ für die Abflusskomponenten – festgestellt werden. D. h., dass sich entsprechend der zugrunde liegenden Klimarealisierungen in diesem Zeitraum die größten Veränderungen der Wasserhaushaltsgrößen vollziehen. Die 30-jährigen Mittelwerte der fernen Zukunft (2071–2100) weisen deutliche Unterschiede gegenüber dem Referenzzustand auf. Die Trendentwicklungen der einzelnen Größen innerhalb dieser Zeitspanne sind hingegen gering ausgeprägt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Veränderung des Klimas zu deutlichen Veränderungen in den Wasserhaushaltsbilanzen der sächsischen Einzugsgebiete führt.

Die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen wirken sich in diesem Zusammenhang weniger stark auf den Wasserhaushalt aus als die Klimaszenarien. Dies gilt vor allem für die beiden Landnutzungsszenarien Waldumbau und Versiegelung. D. h., dass die Umwandlung von Nadel- in Laubwald und die weitere Verdichtung von städtischen Gebieten keine größeren Auswirkungen auf die einzelnen Wasserhaushaltsgrößen zeigen. Nur die Ergebnisse des Landnutzungsszenarios Flächenverbrauch, bei welchem die verstärkte Versiegelung von aktuell natürlichen, unversiegelten Flächen simuliert wurde, zeigten deutliche Veränderungen in der Aufteilung der Wasserhaushaltskomponenten. Besonders der Anteil der schnellen Abflusskomponente stieg im Rahmen dieses Szenarios erheblich an.

Neben diesen Untersuchungen können die Ergebnisse des KliWES-Projekts auch für allgemeine Aussagen zu Niedrigwasserkennwerten genutzt werden. Eine sachsenweite Auswertung der NQ7- und NQ15-Kennwerte zeigte unter der Annahme der Klimarealisierungen eine zukünftige Zunahme der Niedrigwasserperioden. So

wird für die Zukunft eine Häufung von Niedrigwasserperioden mit einer Dauer von mehr als 7 Tagen projiziert. Gleichzeitig sinkt der Durchfluss innerhalb dieser Perioden tendenziell.

Die ermittelten Ergebnisse können in vielfältiger Weise weiterverwendet und bewertet werden. Sie weisen allerdings auch einige Unsicherheiten auf, welche bei der Weiterverarbeitung beachtet werden müssen (vgl. Kapitel 6.3.)

- So beruhen die verwendeten Datengrundlagen oft auf punktuellen Messungen, welche auf die Fläche übertragen wurden.
- Durch die Erstellung von Hydrotopen kam es zu einer Generalisierung dieser Datengrundlagen, was unweigerlich einen Informationsverlust mit sich bringt.
- Einige erforderliche Parameter für die Simulation mit dem Modell ArcEGMO können nicht flächendeckend gemessen werden und müssen daher mit verschiedenen Ansätzen ermittelt werden.
- Die Modellansätze zur Berechnung des Wasserhaushalts können diesen nicht in seiner ganzen Komplexität abbilden.
- Die Ergebnisse von unbeobachteten Einzugsgebieten lassen sich nicht genau validieren.
- Der Grundwasserflurabstand wird im Modell ArcEGMO als nahezu konstant angenommen, was sich vor allem auf die Ergebnisse von grundwassernahen Flächen ungünstig auswirken kann.

9 Ausblick

Wie in „Säule A“ (SCHWARZE et al. 2013 a; LÜNICH et al. 2012) wurden auch die Wasserhaushaltsergebnisse der „Säule B“ der Öffentlichkeit internetbasiert zur Verfügung gestellt. Hierfür erfolgten weitere Ausgestaltungen bzw. Erweiterungen des bisherigen Webauftritts der „Säule A“ nunmehr auch für die Ergebnisdarstellungen der „Säule B“. Der „Säule B“-Teil im Wasserhaushaltsportal Sachsen wurde im Mai 2014 freigeschaltet.

Neben der freien Verfügbarkeit der Daten soll das Wasserhaushaltsportal (Säulen A und B) noch um einen weiteren Bestandteil ergänzt werden. Dieser ist im KliWES-Teilprojekt Säule C (LÜNICH et al. 2012) angesiedelt und befasst sich unter anderem mit der Berechnung von weiteren Szenarien des Klimamodells WEREX V und der entsprechenden Einbindung der Ergebnisse in das Wasserhaushaltsportal. Eine zusätzliche Erweiterung der meteorologischen Eingangsdaten auf andere globale und regionale Klimamodelle und die Berücksichtigung der neuen RCP-Klimaszenarien (IPCC 2013) wird als sinnvoll erachtet. Dies würde die Spannweite der möglichen Klimaentwicklungen umfangreicher aufzeigen.

Zentrale Aufgabenstellung der Säule C ist der Aufbau einer interaktiven Internetseite. Diese soll einem eingeschränkten Anwenderkreis die Möglichkeit bieten, nutzerspezifische Berechnungsaufträge an das Modell ArcEGMO zu stellen. Dabei soll vor allem die Variation verschiedener ausgewählter Parameter und Eingangsdaten möglich sein, die dem Nutzer standortspezifische kleinräumige Änderungen entsprechend seiner Vorgaben und die anschließende Neuberechnung des Wasserhaushalts erlauben. Änderungen sind hinsichtlich der Landnutzung, des Klimas und ausgewählter Bodenparameter vorgesehen. Für die erneute Berechnung des Wasserhaushalts unter veränderten Eingangsdaten und Parametern sollen die vorkalibrierten Modelle aus Säule B verwendet werden. Zur Erfüllung dieser Aufgabe ist die Entwicklung von Tools für die automatisierte Abarbeitung der nutzerspezifischen Anfragen und Bereitstellung der Ergebnisse erforderlich.

Zusätzlich zur weiteren Ausgestaltung des Internetauftritts der Säule B und der Entwicklung einer interaktiven Internetseite nutzerspezifische Berechnungsaufträge (Säule C), können offene Fragestellungen des KliWES-Projekts und Unsicherheiten der Ergebnisse untersucht werden. Wie in Kapitel 6.3 aufgezeigt, weisen die Wasserhaushaltsergebnisse einzelne Unsicherheiten auf. Um diese teilweise quantifizieren zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Implementierung eines Grundwasserströmungsmodells für ein ausgewähltes Einzugsgebiet mit hohem Anteil an grundwassernahen Flächen
- Implementierung eines komplexen Vegetationsmodells zur detaillierten Abbildung des Pflanzenwachstums
- Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten und der gleichzeitigen Simulation von kontinuierlichen Klima- und Landnutzungsänderungen
- Implementierung eines komplexeren Modells zur Simulation des Gewässerabflusses und Erweiterung der Kalibrierung für Hochwasserereignisse

Literaturverzeichnis

- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-hoc-AG Boden. 5. verbesserte und erweiterte Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Hannover.
- ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S.L. (2010): Soil and Water Assessment Tool – Input/Output File Documentation Version 2009, Texas. www.swatmodel.tamu.edu.
- ATV-DVWK (2002): Merkblatt ATV-DVWK-M 504 Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. In: ATV-DVWK-Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), Hennef.1
- BALDY, A. (2011): Untersuchung zur Anfälligkeit des Wasserhaushaltes in der Region Oberlausitz-Niederschlesien gegenüber dem Klimawandel. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie.
- BAUMGARTNER, A.; LIEBSCHER, H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1 – Allgemeine Hydrologie Quantitative Hydrologie. 2. Auflage, Verlag der Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- BECKER, A.; SERBAN, P. (1990): Hydrological Models for Water-Resources System Design and Operation. WMO, Operational Hydrology Report, Nr. 34. (WMO-Nr. 740), Genf.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD), 2003.
- BOHL, J. (2011): Oberlieger-Unterlieger-Probleme – Das Verhältnis von Oberliegern und Unterliegern bei Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes an (internationalen) Flussläufen. Bericht zum Rechtsworkshop des "Oberlieger-Unterlieger-Probleme" INTERREG IV B Projektes „LABEL“ am 20. und 21. Januar 2011, Dresden. www.label-eu.eu/uploads/media/DE_Rechts-WS_Bericht_FINAL.pdf
- BÖRKE, P.; DIMMER, R.; DONNER, U.; FREIWALD, A.; FRIESE, H.; HARNAPP, S.; HERBST, F.; IHLING, H.; JENEMANN, K.; KUHN, K.; MAUERSBERGER, F.; MICKEL, A.; ROHDE, S.; SPÄNHOF, B.; ZIEGLER, K. (2008): Europäische Wasserrahmenrichtlinie, Neue Impuls für Sachsen, Sächsische Beiträge zu den Entwürfen der Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme der Flussgebietseinheiten Elbe und Oder. (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- CARDOSO, M. F.; SALCEDO, R. L.; DE AZEVEDO, S. F. (1996): The simplex-simulated annealing approach to continuous non-linear optimization, Computers & Chemical Engineering. 20, 9, 1065-1080.
- DÄHNE, R. (1999): Nebeldiagnose aus meteorologischen Standarddaten für Hochlagenstandorte im Osterzgebirge. Diplomarbeit Inst. für Hydrol. und Meteorol. der Technischen Universität Dresden, Dresden, 68 S. (unveröff.)
- DIN 4049-1 (1992): Hydrologie – Teil 1: Grundbegriffe. In: (Hrsg.) Deutsches Institut für Normung e.V., DIN-Taschenbuch 211, Wasserwesen: Begriffe und Normen, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. In: (Hrsg.) Deutsches Institut für Normung e.V., DIN-Taschenbuch 211/1, Wasserversorgung, Abwassertechnik, Wasserbau. Beuth Verlag, Berlin.
- DVWK (1996): DVWK-Merkblatt 238/1996 Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. (Hrsg.) Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn.
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3., stark bearbeitete Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- DYCK, S. (1978): Angewandte Hydrologie Teil 2. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- ERBE, S. (2002): Untersuchungen zur räumlichen Verteilung und zum Trend korrigierter Niederschläge in Sachsen im Zeitraum 1071 bis 2000. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Geografie.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC (2008): Harmonized World Soil Database (Version 1.0). FAO, Rom, Italien and IIASA, Laxenburg, Österreich.

- FLEMMING, G. (1983): Verbesserung der Niederschlagsdaten im Saldenbachgebiet. Forschungsbericht im Projekt "Wasser- und Stoffhaushalt von Einzugsgebieten", April 1983, Wissenschaftsbereich Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden.
- FRANKE, J.; GOLDBERG, V.; EICHELMANN, U.; FREYDANK, E.; BERNHOFER, CH. (2004): Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany. *Climat Research*, 27, S. 145 - 150.
- FRANKE, J.; GOLDBERG, V.; MELLENTIN, U.; BERNHOFER, CH. (2006): Risiken des regionalen Klimawandels in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 55, Heft 3-4, S. 97 - 104.
- GEBEL, M.; HALBFAß, S.; FRIESE, H.; GRUNEWALD, K.; MANNSFELS, K. (2009): Atlas der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer. (Hrsg.) LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- GLÖCKNER, C. & RÜSTER, A. (2010): Entwicklung einer Strategie zur Parametrisierung hydrologischer Prozesse in urbanen Räumen auf unterschiedlichen Skalenbereichen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie.
- GOLDBERG, V.; BERNHOFER, CH. (2002): Regionalisierung von Klimatrends in Sachsen. Tagungsband zur Regionale Sächsische Klimakonferenz 05.- 06.06.2002, Annaberg.
- GREIFENSTEIN, S. (2010): Möglichkeiten für eine flächendeckende Beschreibung der Bodenzone innerhalb einer Wasserhaushaltsmodellierung für Sachsen – Parametrisierungsmöglichkeiten und Sensitivitätsstudie. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie.
- GRUNDMANN, J. (2010): Analyse und Simulation von Unsicherheiten in der flächendifferenzierten Niederschlags-Abfluss-Modellierung. *Dresdner Schriften zur Hydrologie*, Heft 8, Eigenverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- GURTZ, J. (1988): Beitrag zu den hydrologischen Grundlagen für die Gewährleistung der gesellschaftlich notwendigen Mehrfachnutzung der Wasserressourcen. Habilitation, Technische Universität Dresden, Fakultät für Bau-, Wasser-, Forstwesen, Dresden.
- HALL, M. J. (2001): How well does your Model fit the data? *Journal of Hydroinformatics* 03.1: 49-55.
- HENNIG, H. & SCHWARZE, R. (2001): Geohydraulische Interpretation des Konzeptmodells Einzellinearspeicher und Konsequenzen für die Modellierung des Grundwasserabflusses. *Wasserwirtschaft*, 90.
- IGEL, C.; HANSEN, N.; ROTH, S. (2007): Covariance Matrix Adaptation for Multi-objective Optimization, *Evolutionary Computation* 15(1): 1-28.
- IHM (2010): Angebot zur Umsetzung des Vorhabens: „KliWES – Übertragung der Ergebnisse der Vorläuferprojekte zu Wasserhaushaltsuntersuchungen in Abhängigkeit vom Klimawandel auf die Landesfläche des Freistaates Sachsen“, Teil 1: Kernkomponente. Angebot, 18.02.2010.
- IHM (2012): Informationen zum Stand der Anwendung von RAKLIDA-Datensätzen innerhalb des Projektes KliWES. Verzögerungsanzeige vom 24.04.2012, Dresden.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers*. Fifth Assessment Report, Geneva.
- IPCC (2007 a): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers*. Fourth Assessment Report, Geneva.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Synthesis Report, Working Groups I, II and III to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2007.
- KLEE, O. (1985): *Angewandte Hydrobiologie; Trinkwasser- Abwasser- Gewässerschutz*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- KLÖCKING, B. (2003): Parametrisierung und Validierung des PSCN-Moduls anhand der Messwerte der Altengottenschen Lysimeterstationen. Abschlussbericht GLOWA-Elbe I, Verbundvorhabens "Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Umwelt und die Gesellschaft im Elbegebiet

- (GLOWA-Elbe)", Teilprojekt 3: „Das Unstrutgebiet als Beispiel für einen durch intensive Landwirtschaft geprägten funktionalen Landschaftstyp im Mittelgebirgsvorland“, Berlin.
- KLÖCKING, B. (2008): Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebiets ArcEGMO: Bedienungsanleitung. (Hrsg.) BAH – Büro für Angewandte Hydrologie, München.
- KLÖCKING, B. (2009): Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebiets ArcEGMO - Theoretische Modellbeschreibung. (Hrsg.) BAH – Büro für Angewandte Hydrologie, München.
- KLÖCKING, B. (2012): Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebiets ArcEGMO - Theoretische Modellbeschreibung. (Hrsg.) BAH – Büro für Angewandte Hydrologie, München.
- KLÖCKING, B.; MEY, S.; FERBER, F.; WESSOLEK, G.; TRINKS, S. (2008): Bodenatlas Sachsen – Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt. (Hrsg.) LfULG - Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- KOITZSCH, R.; GÜNTHER, R. (1990): Modell zur ganzjährigen Simulation der Verdunstung und der Bodenfeuchte landwirtschaftlicher Nutzflächen mit und ohne Bewuchs. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 34/12, 803-810.
- KÖTHE, R.; BOCK, K.; VOGEL, E. (2005): Expertise zum Forschungsvorhaben "Digitale Reliefanalyse Sachsen". (Hrsg.) LfUG - Sächsisches Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LAWA (1993): Richtlinie für die Gebietsbezeichnung und Verschlüsselung der Fließgewässer. (Hrsg.) LAWa - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser.
- LfUG (Hrsg.) (2002): Stauanlagenverzeichnis 2001 – Talsperren, Wasserspeicher und Hochwasserrückhaltebecken im Freistaat Sachsen. (Hrsg.) LfUG - Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfUG (2004): Grundwasserflurabstandskarten; Bearbeitungsstand 3/2002 bis 5/2004
- LfUG (2006): Klimawandel in Sachsen - Sachstand und Ausblick 2005. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden.
- LfUG (2007): Bodenatlas des Freistaates Sachsen Teil 4: Auswertungskarten zum Bodenschutz – Erläuterungsheft. (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LfULG (2012): Klimaprojektionen für Sachsen auf der Basis des dynamisch-statischen Regionalmodells WETTREG2010 für die Emissionsszenarien B1, A1B und A2. (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LfULG (Hrsg.) (2011): Konzept zur Erstellung eines gekoppelten Stofftransportmodells als Prognoseinstrumentarium für die Beschaffenheitsentwicklung im Grundwasser. Schriftenreihe des LfULG, Heft 41/2011, (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LfULG (Hrsg.) (2010): Hydrologisches Handbuch – Pegelverzeichnis, Teil 1 08/2010. (Hrsg.) LfULG - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13700>
- LfULG (2008): Sachsen im Klimawandel - Eine Analyse. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LÜNICH, K.; STEINL, CH. (2011): KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer - Teil 1: Wasserhaushalt, Kernkomponente. Schriftreihe des LfULG; Heft 44/2011, (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LÜNICH, K.; SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HAUFFE, C.; BALDY, A. (2012): KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen (Klimaprojektionen) - Teil B: Klima- und Landnutzungsszenarien - Begründeter Vorschlag für die Auswahl geeigneter Klimaszenarien für die Wasserhaushaltsberechnung im Rahmen des KliWES-Projekts. (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.

- LÜNICH, K.; KRAUß, L.; BÖHM, E.; GRÜDL, P. (2013): KliWES Auswahl von Landnutzungsszenarien - Begründeter Vorschlag für die Auswahl geeigneter Landnutzungsszenarien für die Wasserhaushaltsberechnung im Rahmen des Projekts KliWES. Zwischenbericht, (Hrsg.) LfULG – Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LUGV (2010): Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg - Teil 2 – Gegenüberstellung klimatologischer Parameter mittels WettReg und WettReg2010 und deren Einordnung in das Ensemble der Regionalmodelle. - Fachbeiträge des Landesamts für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Land Brandenburg (LUGV), Heft Nr. 115.
- FANK, J. & ROCK, G. (2003): Grundwassermodell Haslacher Au zur Aufbereitung der Grundlagen für die wasserwirtschaftliche Planung der Grundwassernutzung. (Hrsg.) Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.
- MÖLLER, M.; ROSCHE, O.; STEININGER, M.; WURBS, D. (2009): Bedeutung landwirtschaftlicher Dränsysteme für den Wasser- und Stoffhaushalt“ – Teil-1: Auswertung zum potentiellen Entwässerungsbedarf und Recherche zum IST- Stand landwirtschaftlicher Entwässerungssysteme in Sachsen“, Teilvorhaben 1, Abschlussbericht. (Hrsg.) LfULG – Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- MORGENSCHWEIS, G. (2010): Hydrometrie, Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D; VEITH, T.L. (2007): Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the Asabe, 50 3.
- PAHL, S. (1996): Feuchte Deposition auf Nadelwälder in den Hochlagen der Mittelgebirge. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 198, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 143 S.
- PARAJULI, P.B. (2007): SWAT bacteria sub-model evaluation and application. Dissertation, Kansas State University, Department of Biological & Agricultural Engineering, Manhattan, Kansas, Vereinigte Staaten von Amerika.
- PIK (2009): Klimadaten und Szenarien für Schutzgebiete, Kreise Sachsen. www.pik-potsdam.de/~wrobel/sg-klima-3/nav_sn.html vom 05.10.2009.
- PFÜTZNER, B.; KLÖCKING, B.; BECKER, A. (2007): ArcEGMO GIS-gestützte hydrologische Modellierung. (Hrsg.) BAH – Büro für Angewandte Hydrologie, Berlin und Potsdam.
- QUECK, R. (2003): Fraktionierung und zeitliche Differenzierung von Depositionsraten in Waldbestände. Dissertation, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden, Dresden, 255 S.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Nr. 194, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- SCHERZER, J.; PÖHLER, H.; JASPER, K.; MÜLLER, M. (2008): KliWEP - Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet. (Hrsg.) LfULG – Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- SCHMIDT, C.; SEIDEL, A.; KOLODZIEJ, J., KLAMA, K.; SCHOTKE, M.; FRIEDRICH, M.; BERKNER, A.; CHMIELESKI, S. (2011 a): Vulnerabilitätsanalyse Westsachsen. Leipzig/Dresden, April 2011. TU Dresden im Auftrag des regionalen Planungsverbandes Leipzig-Westsachsen im Rahmen des Klima-MORO, gefördert vom BMVBS in Kooperation mit dem BBSR.
- SCHMIDT, C.; KOLODZIEJ, J.; SEIDEL, A. (2011): Vulnerabilitätsanalyse – Oberlausitz-Niederschlesien. (Hrsg.) Regionaler Planungsverband Oberlausitz-Niederschlesien Dresden.
- SCHÖNFELD, M. (2010): Einfluss der Landnutzung auf den Wasserhaushalt – Sensitivitätsstudie für die Abbildung forstwirtschaftlicher Nutzung, bei flächendeckender Parametrisierung von Wasserhaushaltsmo-

- dellen in Sachsen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie.
- SCHWARZE, R. & BEUDERT, B. (2009): Analyse der Hochwassergenese und des Wasserhaushalts eines bewaldeten Einzugsgebietes unter dem Einfluss eines massiven Borkenkäferbefalls. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 53. Jahrgang, Heft 4, 236-250.
- SCHWARZE, R. (1985): Gegliederte Analyse und Synthese des Niederschlags Abfluss Verhaltens von Einzugsgebieten. Dissertation, TU Dresden, Fak. Bau-, Wasser-, Forstwesen.
- SCHWARZE, R. (2009): Parametrisierung des SLOWCOMP-Modells für das Land Sachsen-Anhalt zur Darstellung unterschiedlich schneller Grundwasserabflusskomponenten im integrierten Konzeptmodell zum Nährstoffmanagement. (Hrsg.) Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, unveröffentlichter Bericht.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HAUFFE, C.; BALDY, A.; WAGNER, M. (2013 b): KliWES – Nebelkorrektur Erarbeitung einer Nebelkorrektur für meteorologische Daten mit einem geeigneten Verfahren im Rahmen des FuE-Projekts KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt (Klimaprojektionen). Schriftenreihe, Heft 16/2013, (Hrsg.) Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HAUFFE, C.; BALDY, A.; WINKLER, P.; HÜBSCH, M. (2013 a): KliWES Klimawandel und Wasserhaushalt (Klimaprojektionen) – Teil B: Klima- und Landnutzungsszenarien. (Hrsg.) Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden, unveröffentlichter Bericht.
- SCHWARZE, R.; HAUFFE, C.; BALDY, A.; WAGNER, M. (2013): Regionalisierung meteorologischer Stationsdaten mit einem geeigneten Regionalisierungstool im Rahmen des FuE-Projekts KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt (Klimaprojektionen). Endbericht, (Hrsg.) Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden, unveröffentlichter Bericht.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HAUFFE, C.; BALDY, A. (2012): KliWES Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen (Klimaprojektionen) – Teil A: Erarbeitung eines Prototyps für die Darstellung des Ist-Zustandes. (Hrsg.) Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Endbericht, Dresden.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HAUFFE, C.; BALDY, A. (2011): KliWES Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen (Klimaprojektionen) – Teil A: Erarbeitung eines Prototyps für die Darstellung des Ist-Zustandes. (Hrsg.) Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Zwischenbericht, Dresden.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HOFMANN, J.; SCHÖNFELD, M.; BALDY, A. (2011 a): Untersuchung zur Anfälligkeit des Wasserhaushaltes gegenüber dem Klimawandel für die Region Oberlausitz-Niederschlesien. Dresden, unveröffentlichter Bericht.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HOFMANN, J.; LÜNICH, K.; MALESKA, V.; SPITZER, S. (2010): Endbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer, Teil 1: Kernkomponente. (Hrsg.) LfULG - Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, unveröffentlichter Bericht.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HOFMANN, J.; MALESKA, V.; SPITZER, S. (2010 a): Einbeziehung weiterer Testgebiete zur Umsetzung des Forschungsvorhabens KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer, Teil 1: Kernkomponente (Arbeitspakete 4.7 und 4.11). (Hrsg.) LfULG - Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HOFMANN, J.; MALESKA, V.; SPITZER, S. (2010 b): KliWES – Übertragung der Ergebnisse der Vorläuferprojekte zu Wasserhaushaltsuntersuchungen in Abhängigkeit vom Klimawandel auf die Landesfläche des Freistaates Sachsen“, Teil 3: Wasserhaushalt – Kernkomponente Datengrundlagen, Geodaten und Sonderflächen (Optionen 1.2, 1.4, 1.5, 9.1, 9.2). (Hrsg.) LfULG - Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, unveröffentlichter Bericht.

- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; HOFMANN, J.; MALESKA, V.; SPITZER, S., LÜNICH, K. (2009): Zwischenbericht II zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer, Teil 1: Kernkomponente. (Hrsg.) LfULG - Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; MALESKA, V. (2008): Zwischenbericht I zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer, Teil 1: Kernkomponente. (Hrsg.) LfULG - Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- SCHWARZE, R. (2004): Regionalspezifische Analysen in der Festgesteinsregion. In: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Band 1, Forschungsverbund Elbe-Ökologie. (Hrsg.) Lahmer, W., Leyer, I., Weißensee Verlag, Berlin, 217 - 223.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; OPPERDEN, K. (1999): Regionalisierung von Abflusskomponenten, Umsatzräumen und Verweilzeiten für kleine Mittelgebirgseinzugsgebiete. In: Kleeberg, H.B., Mauser, W., Peschke, G. u. Streit, U. (Eds), Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998), Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Weinheim: Wiley - VCH, 345 – 370.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; OPPERDEN, K. (1999 a): Regional analysis and modelling of groundwater runoff components from catchments in hard rock areas. IAHS Publ. No. 254, pp. 221-232.
- SCHWARZE, R.; HERRMANN, A.; MÜNCH, A.; GRÜNEWALD, U.; SCHÖNIGER, M. (1991): Rechnergestützte Analyse von Abflusskomponenten und Verweilzeiten in kleinen Einzugsgebieten. - Acta Hydrophys. Berlin 35(1991) 2, 143-184.
- SCHWEIZER, W. (2009): MATLAB kompakt. 4. Auflage. Oldenbourg, München.
- SMUL (2011): Grundsatzkonzeption 2020 Öffentliche Wasserversorgung Freistaat Sachsen. unveröffentlichter Bericht.
- SMUL (2009): Klimadiagnose und Klimaprojektion für Sachsen. In: Klimawandel und Landwirtschaft - Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel. (Hrsg.) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, S. 10 - 11.
- SMUL (Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft) (2007): Fortschrittsbericht der Arbeitsgruppe Klimafolgen für den Berichtszeitraum 2006/2007. (Hrsg.) Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden.
- WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG). (Hrsg.) Bundesministerium der Justiz, Erstfassung 1957, Neufassung 2009, Zuletzt geändert durch Art. 4 Abs. 76 G v. 7.8.2013 I 31.
- WINKLER, B.; PLEINER, I.; LORENZ, H.; FLEMING, B.; MATTHES, E.; NUSCHE, H. (1999): Die Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete im Freistaat Sachsen. (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- ZIPPEL, M. (2006): Modellgestützte Bilanzierung der unterirdischen Wasserressourcen Berlins - die Grundwassersituation im weiteren Einzugsgebiet des Müggelsees. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin, Berlin, p. 40.

Weitere Quellen

- BAH, 2009, online: ArcEGMO Das Hydrologische Modellierungssystem. www.arcegmo.de. 23.11.2011, 14:00.
- BAH, 2012, mündlich: Beratung mit Herrn Pfützner (BAH Berlin) und Frau Klöcking (BAH München) insbesondere zu Problemen mit SLOWCOMP und der Bodendynamik, Berlin, 16.02.2012.
- CSC, 2012, online: Webaufttritt des Climate Service Center Germany zum Thema Klimanormalperiode. www.climate-service-center.de/033600/index_0033600.html, Zugriff am 12.11.2013.
- degree, 2013, online: lat/lon (Hg.), Home | deegree, www.deegree.org, 23.10.2013.
- Forst, 2014, online: Beitrag „Waldumbau? Warum?“ vom Webaufttritt „Thüringen Forst - Waldwandel gegen Klimawandel“, www.waldwandel-gegen-klimawandel.de/waldumbauportal/wissen/umbau/, 14.01.2014, 12:00.
- GENESIS, 2011, online: GENESIS-Online Datenbank des Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, Suchbegriff: Gebietsfläche(T,171-01), Einwohner je Quadratkilometer, Gemeinden, Gebietsstand 01.01.2010. www.statistik.sachsen.de/genonline/online?operation=begriffsRecherche&suchanweisung=Einwohner+je+Quadratkilometer&suchanweisung_language=de&x=0&y=0, 25.10.2011, 13:00.
- GeoExt, 2013, online: GeoExt Community (Hg.), JavaScript Toolkit for Rich Web Mapping Applications - GeoExt v1. 1, www.geoext.org, 23.10.2013.
- GeoSN, 2012, Karte: TOP.sachsen Karte des Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN). www.landesvermessung.sachsen.de/ias/basiskarte4/service/register. 15.02.2012, 12:00.
- LfULG, 2004, Karte: Hydrogeologische Spezialkarte 1 : 50 000. (Hrsg.) .) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LfULG, 2007, Karte: BSA – Bodenatlas des Freistaates Sachsen. (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LfULG, 2007, online: Information zu Überschwemmte Flächen im Freistaat Sachsen – Hochwasser August 2002 (Bearbeitungsstand: 11/2005), www.smul.sachsen.de/umwelt/wasser/download/UeFI_2002.pdf, 30.10.2011, 13:00.
- LfULG, 2007a, Karte: uefi_2002.shp. Überschwemmte Flächen Hochwasser August 2002, (Bearbeitungsstand 11/2007, (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfULG, 2009, Karte: GW-Absenkungstrichter.shp. GW-Absenkungstrichter für 2005, (Hrsg.) LfULG - Sächsisches Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfULG, 2011 a, online: Internetaufttritt des Forschungsprojekt KliWES vom LfULG. www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/8214.htm. 22.10.2011, 14:00.
- LfULG, 2011b, online: Sachsen Portal zur Karte „Anschlussgrad (gegenwärtig) an öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen in Gemeinden (Sachsen)“. http://portal.smul.sachsen.de/ingrid-portal/portal/_ns:YTU4fGMwfGQwfGVwbHVnaWQ9MT0vaW5ncmlkLWdyb3VwOnVtd2VsdHNuLXVkaY1kYi1zbXZG9jdXVpZD0xPTBDMUZDOUMxLUYyOEEtNDYzQS04QzYwLUI2MDk2NzE0Q0RGQw_/search-detail.psm. 28.10.2011, 13:00.
- LfULG, 2011c, online: Web-Aufttritt RaKliDa. https://141.30.160.222/RaKliDa_WebServlet/, 25.10.2011, 16:00.

NABU, 2014, online: Beitrag „Ökologischer Waldumbau – Fit für das Klima von morgen!“ von der Webseite Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU).

www.nabu.de/themen/wald/naturschutzimwald/nabuprojekt/12331.html, 14.01.2014, 12:00.

OSGeo, 2013, online: Open Source Geospatial Foundation (Hg.), OpenLayers: Home, www.openlayers.org, 23.10.2013.

postgresql, 2013, online: The PostgreSQL Global Development Group (Hg.), PostgreSQL, the world's most advanced open source database, www.postgresql.org, 23.10.2013.

PFÜTZNER, B. (2011): mdl. Mitteilung 07.12.2011.

Waldwissen, 2014, online: Beitrag „Waldbau im Zeichen des Klimawandels“ der Webseite waldwissen.de.
www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/umbau/lwf_waldbau_klimawandel/index_DE,
14.01.2014, 12:00.

Herausgeber:

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

Autoren:

Dr. Robert Schwarze, Corina Hauffe, Agnes Baldy, Michael Wagner,
Peter Winkler
Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften
Fachrichtung Hydrowissenschaften
Bergstraße 66, 01062 Dresden

Redaktion:

Holm Friese
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/
Referat Oberflächen- und Grundwasser
Zur Wetterwarte 11
Telefon: + 49 351 8928-4412
Telefax: + 49 351 8928-4099
E-Mail: holm.friese@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

31.07.2014

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

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

Verteilerhinweis

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

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

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