

Lausitzer Neiße

– Charakteristik und Klima der Region –

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN



Institut Meteorologii
i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut
Badawczy



Klimatische und hydrologische Modellierung, Analyse und Prognose



Unia Europejska. Europejski Fundusz Rozwoju
Regionalnego: Inwestujemy w waszą przyszłość/
Europäische Union. Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung: Investition in Ihre Zukunft



Lausitzer Neiße – Charakteristik und Klima der Region

1. Broschüre im EU-Projekt NEYMO



Leadpartner: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Projektpartner: Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft Wrocław – National
Research Institute



Europäische Union. Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung: Investition in Ihre Zukunft/
Unia Europejska. Europejski Fundusz Rozwoju
Regionalnego: Inwestujemy w waszą przyszłość



Vorwort

Das Wasser richtet sich nicht nach Ländergrenzen. Es bahnt sich seinen eigenen Weg. Weltweit gibt es 263 internationale Flussgebiete. Im Rahmen dieser Einzugsgebiete sind zahlreiche grenzüberschreitende Aktivitäten zum Schutz und zur Verbesserung der Wasserressourcen notwendig. Die Notwendigkeit für diese Aktivitäten resultiert vor allem aus der Tatsache, dass Fließgewässer keine nationalen Grenzen kennen und entsprechend nach ihren eigenen natürlichen Wegen fließen. Die politische Grenze zwischen Polen und Deutschland bedingt, dass ein großer Teil der Staatsgrenze als Grenzgewässern verläuft, die durch den Grenzfluss Oder und Neiße gebildet wird. Besonders an der Grenze zwischen den Nachbarländern Polen und Deutschland bedarf es Abstimmungen, da die Wassernutzung in beiden Ländern strengen Vorgaben unterliegt. In der deutsch-polnischen Grenzgewässerkommission arbeiten die angrenzenden Länder Deutschland und Polen bereits seit 1992 auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft eng zusammen und stimmen wasserwirtschaftliche Kenngrößen und andere Parameter ab. Das Ziel der Zusammenarbeit an polnischen und deutschen Grenzgewässern ist die rationelle Bewirtschaftung, der Schutz der Wasserressourcen und die Erhaltung der aquatischen Ökosysteme.

Ausgehend von Klimaprojektionen wird, Expertenaussagen zufolge, das Lausitzer Gebiet besonders vom Klimawandel betroffen sein. Umso wichtiger ist es, die vorhandenen Wasserressourcen effizient zu nutzen und ein geeignetes Wassermanagementkonzept zu entwickeln. Im Zuge des beobachteten Klimawandels werden zahlreiche Studien durchgeführt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Sektoren zu untersuchen. Die Betrachtung des Wasserhaushalts für das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße ist bisher nicht vollständig möglich gewesen, da lediglich die Zuflüsse zur Neiße betrachtet werden konnten. Um dem grenzüberschreitenden Charakter des Gebietes Rechnung zu tragen, müssen alle Zuflüsse und der Hauptfluss Lausitzer Neiße simuliert werden. Ein gutes Wasserressourcenmanagement kann nur betrieben werden, wenn alle Faktoren des Gesamtgebietes bekannt sind und in die Betrachtung einfließen. Dies ist nur in einem bilateralen Projekt möglich. Deshalb wurde das Projekt NEYMO ins Leben gerufen.

Inhalt der ersten gemeinsamen Broschüre im Projekt NEYMO ist die Charakterisierung des Klimas in der Grenzregion Lausitzer Neiße. Die Analyse des vergangenen und gegenwärtigen Klimas bildet die Grundlage für Untersuchungen zur möglichen Entwicklung des zukünftigen Klimas in der Region bis zum Ende des Jahrhunderts. Dazu wurde erstmals eine gemeinsame sächsisch-polnische Klimadatenbank mit Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen aufgebaut, die Ausgangspunkt für alle weiteren Projektarbeiten darstellt.

Die Analyse im Projekt umfasst schwerpunktmäßig Kennwerte, die das Niederschlagsverhalten in der Region widerspiegeln. Entwicklungen hinsichtlich der Temperatur wurden im Projekt KLAPS untersucht und werden in der vorliegenden Broschüre nicht näher ausgeführt. Informationen über das thermische Verhalten können in der Broschüre „KLAPS - Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum“ nachgelesen werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
1. Einführung in das Projekt NEYMO – Ziele und Struktur	6
2. Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	10
3. Klimaanalyse	20
4. Klimaprojektion	40
5. Ausblick	62
Literatur	64
Abbildungsverzeichnis	66
Tabellenverzeichnis	68
Impressum	69

1

Einführung

1. Einführung in das Projekt NEYMO – Ziele und Struktur

N EYMO ist das Akronym für den Langtitel des Projektes Lausitzer **Neiße/ Nysa łużycka** - Klimatische und hydrologische **M**odellierung, Analyse und Prognose. Das Projekt wird aus dem Europäischen Fonds für Regionalentwicklung (EFRE) finanziert. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen des operationellen Ziel-3-Programms zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit zwischen dem Freistaat Sachsen und Polen 2007-2013.

Eine grenzübergreifende Untersuchung von naturwissenschaftlichen Problemstellungen gestaltet sich in den meisten Fällen sehr schwierig, da die notwendigen Daten nicht nutzbar oder vorhanden sind, das Fachwissen über die Region eingeschränkt ist und das Verständnis bestimmter Methoden und Vorgänge verschieden ist.

Das Projekt NEYMO hat das Ziel für das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße die heutigen und zukünftigen klimatischen und hydrologischen Verhältnisse und die Situation der Wasserressourcen zu untersuchen. Die Abbildung des Wasserhaushalts ist besonders aufwendig und kompliziert, da das Gebiet durch Tagebaue und Wassernutzungen beeinflusst ist. Folgende Ergebnisse sollen in diesem Projekt erreicht werden:

- Gemeinsame, einheitliche Datengrundlage
- Gemeinsame Methodik (deutsche und polnische Seite)
- Kennwerte meteorologischer Beobachtungsdaten
- Modellierte Klimaprojektionen für den zukünftigen Zustand
- Entwicklung bzw. Trend der modellierten Klimadaten
- Gesamtwasserhaushalt für den Ist-Zustand mit Berücksichtigung der Wassernutzungen
- Gesamtwasserhaushalt für den zukünftigen Zustand mit Berücksichtigung der Wassernutzungen
- Entwicklung bzw. Trends für zukünftige Wasserressourcen
- Länderübergreifend abgestimmte wasserwirtschaftliche Kenngrößen
- Gestärktes (Umwelt)Bewusstsein bei Stakeholder und Öffentlichkeit
- Gemeinsame Strategien für effektives Wassermanagement im Grenzgebiet

Die Umsetzung der Zielstellung erfolgt in verschiedenen Arbeitspaketen. Prinzipiell sind die Arbeitspakete in Aufbereitung, Diagnose und Analyse der Daten organisiert, einschließlich der Klima- und Wasserhaushaltmodellierung. Die Ergebnisse werden über verschiedene Publizitätsmaßnahmen kommuniziert.

Mit dem Kick-Off-Meeting am 17.07.2012 startete das EU-Projekt in die Bearbeitungsphase und endet im Dezember 2014. Das Fördergebiet umfasst das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße auf sächsischer und polnischer Seite. Ein Teil des Einzugsgebietes liegt in der Tschechischen Republik, wo die Neiße ihren Ursprung hat. Deswegen müssen die tschechischen Quellgebiete in die

Wasserhaushaltsmodellierung mit einbezogen werden. Der brandenburgische Abschnitt wird nicht mit betrachtet, da er außerhalb der Förderregion liegt.

Der Öffentlichkeit und den Stakeholdern sollen die Ergebnisse auf verschiedenen Wegen übermittelt werden. Zum einen in öffentlichen Veranstaltungen, Broschüren, Newslettern, Flyern und zum anderen in groß angelegten Publicitymaßnahmen wie Wanderausstellung und Maßnahmenkatalog, die die Hauptergebnisse des Projektes präsentieren.

Die Abbildung 1 gibt die wichtigsten Etappen der Projektumsetzung wieder.

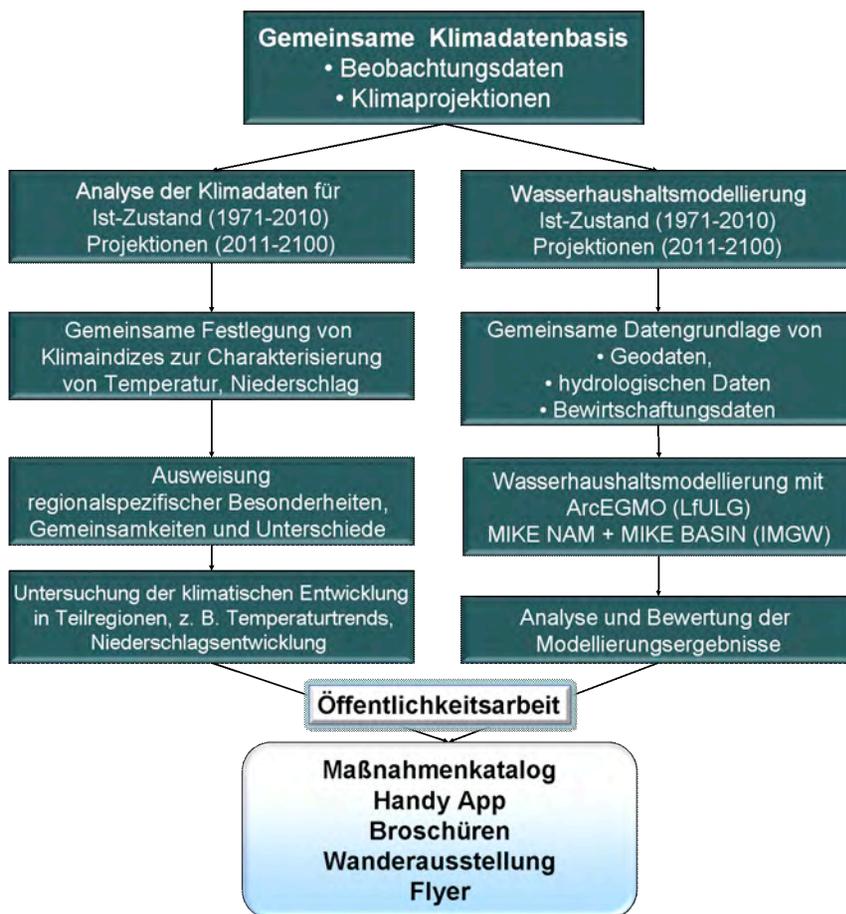


Abbildung 1: Schema der Projektumsetzung

2

Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

2. Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

2.1. Allgemeine Eigenschaften

Das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße liegt im Länderdreieck Polen-Deutschland-Tschechien (Abbildung 2). Die Fläche des untersuchten Einzugsgebiets beträgt 4935 km², wovon 9 % zu Tschechien, 33 % zu Deutschland und 58 % zu Polen gehört. Die Lausitzer Neiße ist 246 km lang. Der Fluss entspringt auf dem Gebiet der Tschechischen Republik, wo er auf einer Länge von 48,4 km fließt, bevor er die Grenze zwischen Polen und Deutschland bildet und in die Oder mündet.

Die Quellen des Flusses liegen in Tschechien, an den südwestlichen Hängen des Isergebirges in der Nähe der Ortschaft Budrichowo. Zu den wichtigsten Nebenflüssen auf der polnischen Seite gehören: Miedzianka, Witka, Czerwona Woda, Jędrzychowicki Potok, Bielawka, Żółta Woda, Skroda, Wodra und Lubsza, und auf der deutschen Seite: Mandau, Pließnitz, Floßgraben, Föhrenfließ, Malxe, Schwarze Fließ und Buderoser Mühlenfließ.

In Polen liegt das Einzugsgebiet in zwei Woiwodschaften: Niederschlesien (71,5%) und Lebus (28,5%). In Deutschland in den beiden Bundesländern Sachsen und Brandenburg.

Bezüglich der Topographie und des geologischen Aufbaus kann das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße in das Berg- und Hügelland im südlichen Teil (ca. 40 % der Fläche) und in das Tiefland im Norden (ca. 60 % der Fläche) aufgeteilt werden (Datenbasis: SRTM data, Jarvis et al. 2008).

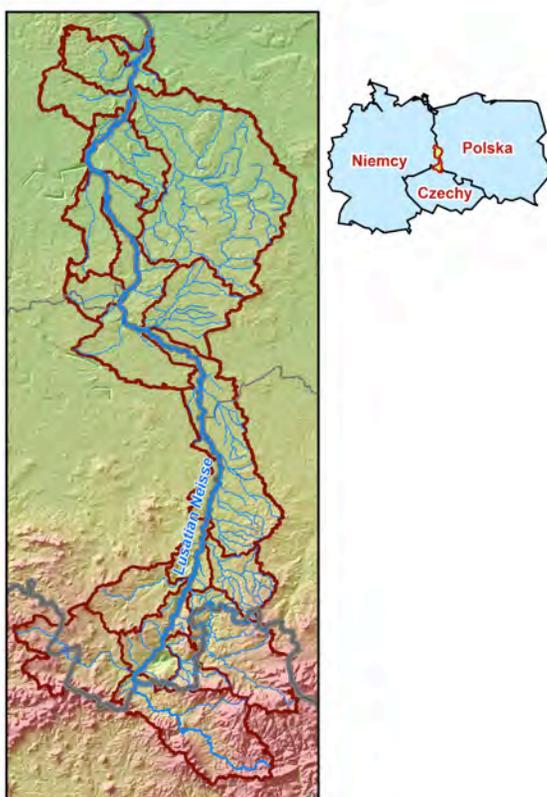


Abbildung 2: Grenzübergreifendes Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße (Datenbasis: SRTM data)

2.2. Klimatische Charakterisierung

Im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße und dessen Umgebung herrscht ein gemäßigtes Klima. Nach der Klassifikation nach Köppen liegt das Gebiet in der Zone des gemäßigt warmen Klimas mit einer gleichmäßigen Verteilung der Niederschläge.

Bestimmt wird das Klima im Untersuchungsgebiet durch die Strahlungs- und Zirkulationsparameter sowie durch geografische und anthropogene Faktoren. Zu den Strahlungsparametern, die auf den Einfall der Sonneneinstrahlung Einfluss haben, gehören u.a. der Einfallswinkel des Sonnenlichts und die Tageslänge. Aufgrund der geringen meridionalen Ausdehnung des Gebietes ist die Auswirkung dieser Faktoren auf die Variabilität der Sonneneinstrahlung vernachlässigbar. Von der Bedeutung ist jedoch die Bewölkung.

Das Klima im Untersuchungsgebiet ist stark durch die Lage in der Zone der Westwindzone geprägt. Typisch sind feuchte Luftmassen mit gemäßigten Temperaturen und die schnelle Verlagerung von Hoch- und Tiefdruckgebieten. Am häufigsten strömt feuchte, polare Meeresluft vom Atlantik heran. Bei Advektion vom östlichen Sektor strömen relativ trockene polar-kontinentale Luftmassen heran. Eher selten sind die meridionalen Zirkulationen, die das Einströmen von arktischen (vom Norden) bzw. tropischen (vom Süden) Luftmassen begünstigt. Die einströmenden Luftmassen haben unterschiedliche Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt, was vom Quellgebiet der Luftmassen abhängig ist.

Zu den geografischen Faktoren, die das Klima im Untersuchungsgebiet prägen, gehören die geografische Breite, die Entfernung vom Atlantik und von der Ostsee, die Geländestrukturierung sowie die Art der Bodenbedeckung. Einen besonders starken Einfluss haben die starken Höhenunterschiede (20 - 1603 m ü. NN) innerhalb des Untersuchungsgebietes auf die klimatischen Bedingungen. Im südlichen Teil des Gebietes führen die starken Höhenunterschiede zur Entstehung vertikal angeordneten Klimazonen, wie sie für das Bergland typisch sind. Mit der Höhenzunahme verringert sich die Temperatur, die Niederschläge vermehren und differenzieren sich in Abhängigkeit von der Geländeform und Exposition. Es können sich Kaltluftseen und lokale Zirkulationssysteme ausbilden.

Die anthropogenen Faktoren, wie z. B. Umwandlung der natürlichen Bodenbedeckung und Änderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre infolge von Schadstoffemissionen, beeinflussen vor allem das Klima der Stadt- und Industriegebiete.

2.3. Landnutzung

Die Flächen des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße werden vor allem für Land- und Forstwirtschaft genutzt. Der Anteil an Wäldern im Untersuchungsgebiet beträgt ca. 43,5 %. Der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen beträgt insgesamt ca. 45 % (Ackerland 29,5 %, Mischkulturen 8 %, Wiesen und Weiden 7,5 %) der Gesamtfläche (Abbildung 3). Der Anteil der städtischen Bebauung ist nicht größer als 5 %. Zu den größten städtischen Gebieten gehören: Liberec, Zittau, Bogatynia, Zgorzelec / Görlitz, Forst, Gubin / Guben. Ein gutes Verkehrsnetz und die Entwicklung der Grenzstädte haben einen positiven Einfluss auf den grenzüberschreitenden Tourismus,

Agrotourismus, Ökotourismus sowie auf den aktiven Tourismus (Radwege, Wanderwege, Reitwege) in Polen und in Deutschland.

Im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße befinden sich großflächige Gebiete, die anthropogen umgewandelt wurden (darunter großflächige Braunkohletagebaue). Im deutschen Teil des Einzugsgebietes sind drei Braunkohletagebaue aktiv (Nochten, Reichwalde und Jänschwalde), auf polnischen Gebiet dagegen nur der Tagebau Turów.

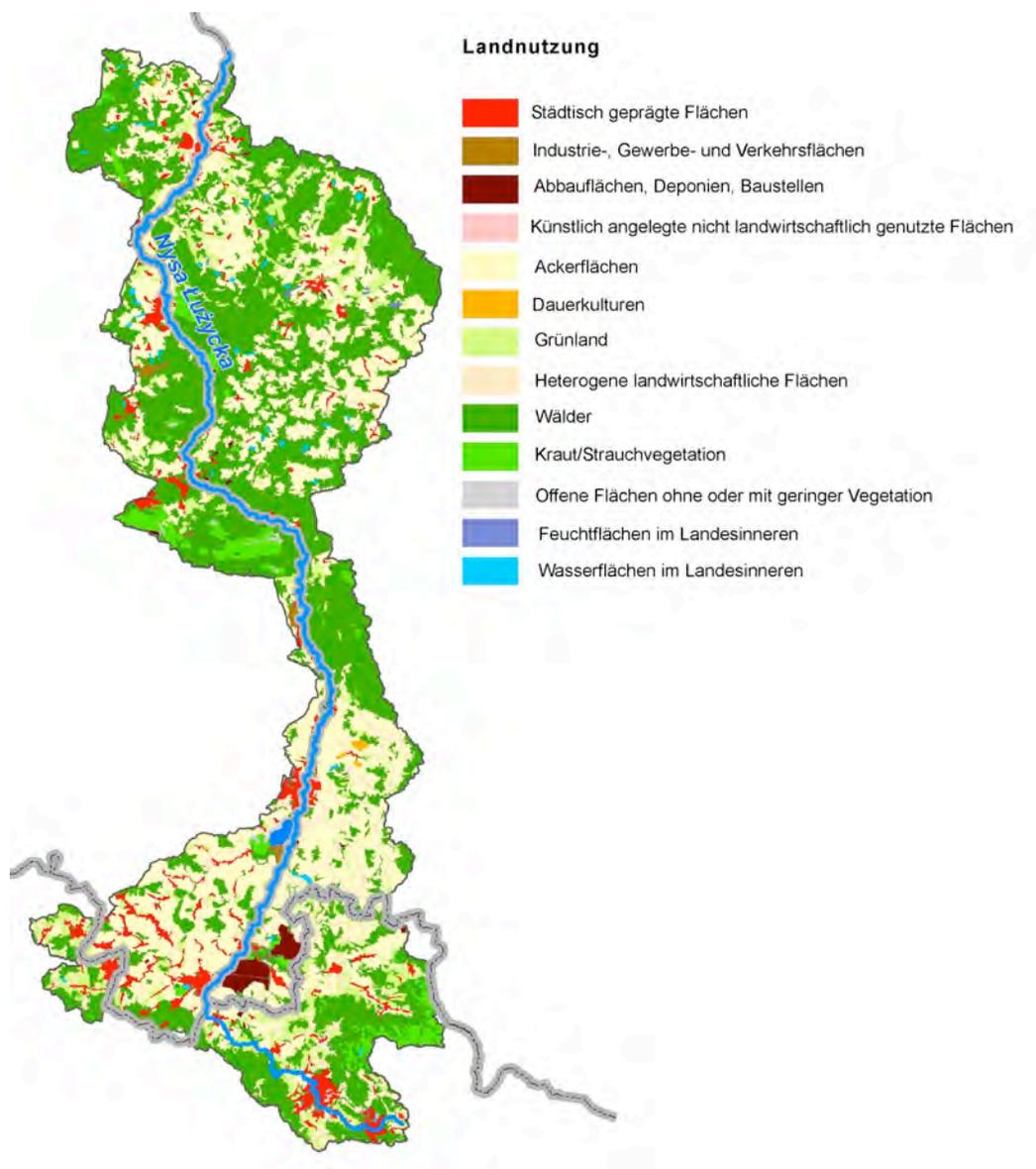


Abbildung 3: Landnutzung (Corine Land Cover 2006)

2.4. Boden

Am häufigsten vertreten im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße sind Parabraunerden. Dieser Bodentyp tritt sowohl auf deutscher wie auch auf polnischer Seite des Einzugsgebietes auf. Entlang des Flusses befinden sich vor allem Auenböden (Fluvisol). Hierbei handelt es sich um Böden aus jungem Flusssediment, die sich in der Entstehung befinden. Des Weiteren treten Braunerden, Gleye und Podsole im Untersuchungsgebiet auf. Die Verteilung der einzelnen Bodentypen ist der Abbildung 4 zu entnehmen (Datenbasis: Soil Atlas of Europe 2005).

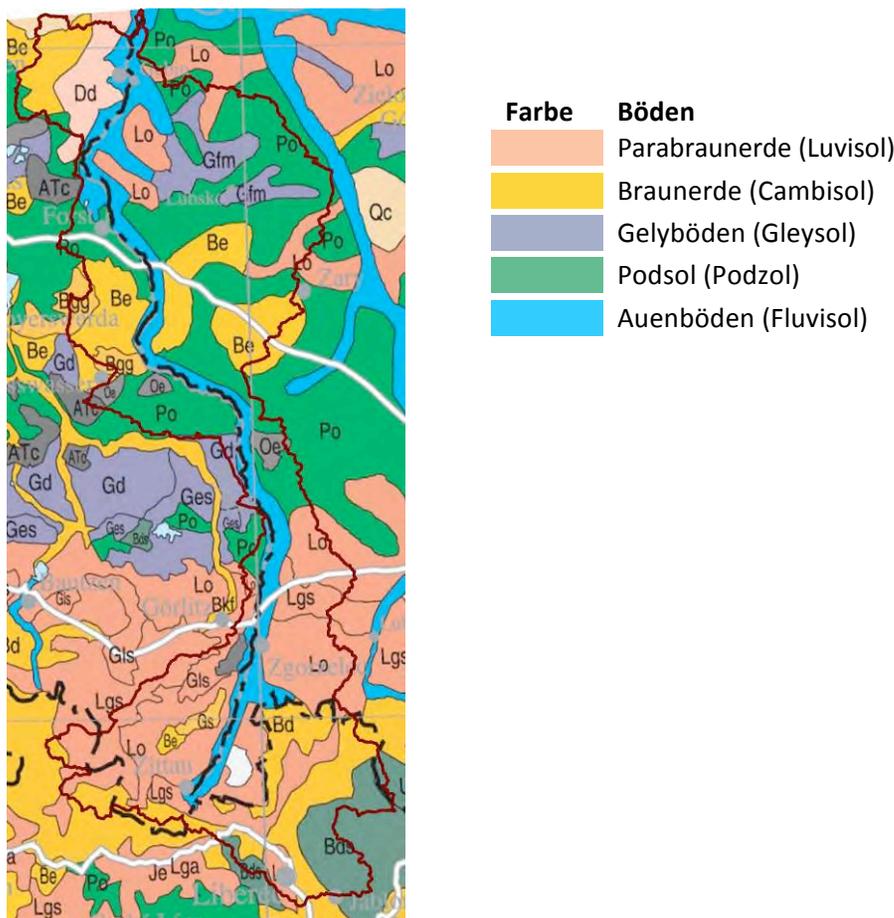


Abbildung 4: Bodentypen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße- Auszug aus dem Europäischen Bodenatlas (ESDB 2004, Panagos 2006, Panagos et al. 2012; Datenbasis: SAoE 2005)

Deutschland

Deutschland kann in sechs Hauptbereiche mit verschiedenen bodenbildenden Faktoren gruppiert werden. Für das betrachtete Einzugsgebiet steht hierbei vor allem der Übergang vom Tiefland bis in die Bergregion im Mittelpunkt. Gekennzeichnet wird diese Region durch einen Lössgürtel mit Parabraunerden und Gleyböden.

Polen

Die Verteilung der Bodentypen in Polen wird vor allem durch die Herkunft des Ausgangsmaterials und des Geländes/der Landschaft bedingt. Im Einzugsgebiet werden folgende Zonen unterschieden:

- Fluvi-glaziale Sande (Podsol)
- Breite, flache periglaziale Zonen zergliedert/zerschnitten durch breite, flache parallele Täler, welche durch Schmelzwasserströme abgeschnitten werden
- Alte, erodierte Berge und Hügel überdeckt von Löss und eiszeitlichen Ablagerungen
- bergige Zone der Sudeten

2.5. Geologie

Der geologische Aufbau des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße ändert sich entlang des Flusses, der auf fünf geologische Haupttypen aufgeteilt werden kann. Diese sind: Jizera-Karkonosze-Block (Iser- und Riesengebirge), Antiklinalzone, nordsudetische Senke, vorsudetisches Becken.

Im Oberlauf des Flusses kommen oft kristalline und metamorphische Gesteine, auf denen die Oberlausitzer Kohleflöze liegen (in der lokalen Senkung Zittau-Görlitz und mit einer Dicke von bis zu 80 m) vor. Im Mittel- und Unterlauf des Einzugsgebietes liegen großflächige Ablagerungen (ca. 100 km breit und 10 m tief). Auf diesen liegen quartäre fluvioglaziale bzw. glaziale Ablagerungen (Geschiebemergel, Lehm, Schluff, Sand, etc.).

2.6. Hydrologie

Der Hauptfluss des Einzugsgebietes, die Lausitzer Neiße, ist ein 252 km langer linksseitiger Nebenfluss der Oder. Die Lausitzer Neiße bildet auf einer Länge von 125 km die Grenze zwischen Sachsen und Polen. Ihren Ursprung hat die Lausitzer Neiße mit den Quellflüssen Weiße Neiße, Schwarze Neiße, Gablonzer Neiße, Wiesentaler Neiße im tschechischen Isergebirge. Die wichtigsten polnischen Zuflüsse sind Miedzianka, Witka, Czerwona Woda, Jędrzychowicki Potok, Bielawka, Żółta Woda, Skroda, Wodra und Lubsza. Zu den deutschen Zuflüssen gehören die Flüsse Mandau, Pließnitz, Floßgraben, Föhrenfließ, Malxe, Schwarzes Fließ und Buderoser Mühlenfließ sowie einige weitere kleine Zuflüsse.

Im Einzugsgebiet gibt es zahlreiche Pegel, an denen der Wasserstand und der Durchfluss gemessen werden. Bis zum Pegel Guben/ Gubin stehen Durchflussdaten von 11 polnischen Pegeln und 17 deutschen Pegeln zur Verfügung. Abbildung 5 zeigt schematisch die Lage der Pegel. Die Durchflussdaten liegen für den Zeitraum von 1971 bis 2010 in täglicher Auflösung vor und wurden auf Homogenität und Konsistenz geprüft. Etwaige Lücken wurden durch Regression geschlossen.

Teilweise spiegeln die Durchflusswerte nicht die natürlichen Verhältnisse wider. Die Pegelaufzeichnungen sind durch die starke anthropogene Beeinflussung verbunden mit Wasserentnahmen bzw. -einleitungen im Gebiet verfälscht. Dies muss vor allem bei der Modellkalibrierung beachtet werden.

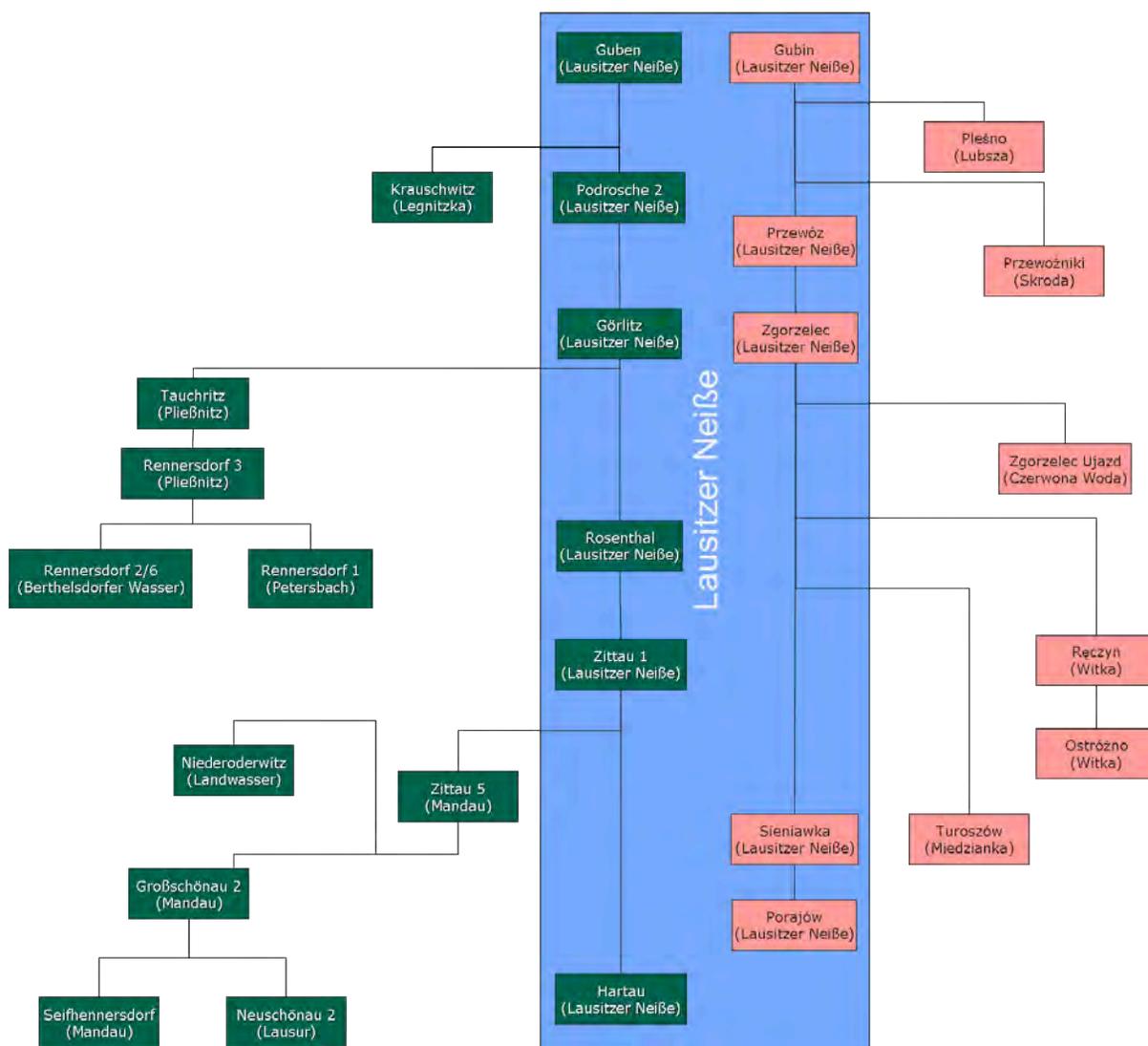


Abbildung 5: Pegelschema Lausitzer Neiße

In Tabelle 1 sind die Hauptwerte mittlerer Abfluss, mittlerer niedrigster und höchster Abfluss sowie die Abflussspende für die deutschen und polnischen Pegel entlang der Lausitzer Neiße aufgeführt. Es ist gut erkennbar, dass die Abflussspenden mit zunehmender Gebietsgröße und abnehmender Höhe, wie zu erwarten, abnehmen. Die Abflussspenden ermöglichen den Vergleich von Einzugsgebieten mit unterschiedlicher Größe.

Auf deutscher Seite befinden sich 96 Grundwassermessstellen, die Hauptwerte ab 1971 bzw. 1986 aufweisen. Davon konzentrieren sich 63 Messstellen im Raum Zittau, die im Rahmen des Tagebaumessnetzes betrieben werden. Auf polnischer Seite befinden sich 109 Messstellen.

Der Grundwasserflurabstand im Einzugsgebiet ist nach Hydrogeologischer Karte 1:50.000 mit 5 bis 10 m unter Geländeoberkante angegeben.

Tabelle 1: Hauptwerte der Pegel entlang der Lausitzer Neiße

Pegel	Fläche [km ²]	MQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	MHQ [m ³ /s]	Abflusspende q [l/(s*km ²)]
Hartau	378	5,99	1,68	68,7	15,8
Porajów	388	6,06	1,28	71,0	15,6
Zittau 1	694	9,03	2,31	128	13,01
Sieniawka	693	8,94	2,06	137	12,9
Rosenthal	879	10,6	3,08	123	12,1
Görlitz	1633	17,2	4,92	181	10,5
Zgorzelec	1630	15,5	3,47	180	9,51
Podrosche 2	2074	17,4	5,27	154	8,0
Przewóz	2108	19,3	5,43	185	9,16
Gubin	4080	28,8	9,27	179	7,06

Insgesamt ist das Einzugsgebiet durch relative hohe Verdunstungen, geringe Oberflächenabflüsse, hohe Sickerwassermengen und mittlere Grundwasserneubildungsraten charakterisiert.

Jedoch ist das Gebiet stark anthropogen beeinflusst. Zum einen durch drei aktive Tagebaue zum anderen durch zahlreiche Wasserkraftanlagen und weitere Wassernutzungen, wie Trinkwassergewinnung, Industrie, etc. Durch die aktiven Tagebaue in Turow, Reichwalde und Nochten wird der Grundwasserspiegel künstlich abgesenkt, um die Gruben trocken zu halten. Das abgepumpte Grundwasser wird direkt in die Oberflächengewässer inner- oder außerhalb des Einzugsgebietes eingeleitet. Die inaktiven Tagebaue wie Berzdorfer und Olbersdorfer See beeinflussten den Wasserhaushalt indem sie mit Oberflächenwasser geflutet wurden und der Grundwasserspiegel wieder anstieg. Aufgrund verschiedener Wassernutzungen wird ebenfalls Wasser aus den Oberflächengewässern und aus dem Grundwasser entnommen, das teilweise nicht mehr zurückgeführt wird. Durch die Wasserkraftanlagen wird lediglich der Flussverlauf auf wenigen Metern verändert.

Alle genannten Bewirtschaftungen beeinflussen den Gesamtwasserhaushalt und müssen im Rahmen einer hydrologischen Modellierung Berücksichtigung finden.

2.7. Schutzgebiete

Im Untersuchungsgebiet gibt es zahlreiche Formen des Naturschutzes, sowohl auf der polnischen wie auf der deutschen Seite. Den höchsten Rang im polnischen Teil des Einzugsgebietes haben zwei Landschaftsparks - Muskauer Faltenbogen (mit dem bilateralen Geopark Muskauer Faltenbogen) und ein Teil vom Krzesiński Park Krajobrazowy. Mehrere Teile des Untersuchungsgebiets sind (vollständig oder teilweise) Schutzgebiete Natura 2000, die vor allem für die Umsetzung der Vogelschutzrichtlinie und der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie notwendig waren. Diese liegen vor allem im mittleren und unteren Teil des Einzugsgebietes. Lokal sind in dieser Form die wichtigsten Teile des Flusses und dessen naher Umgebung geschützt.

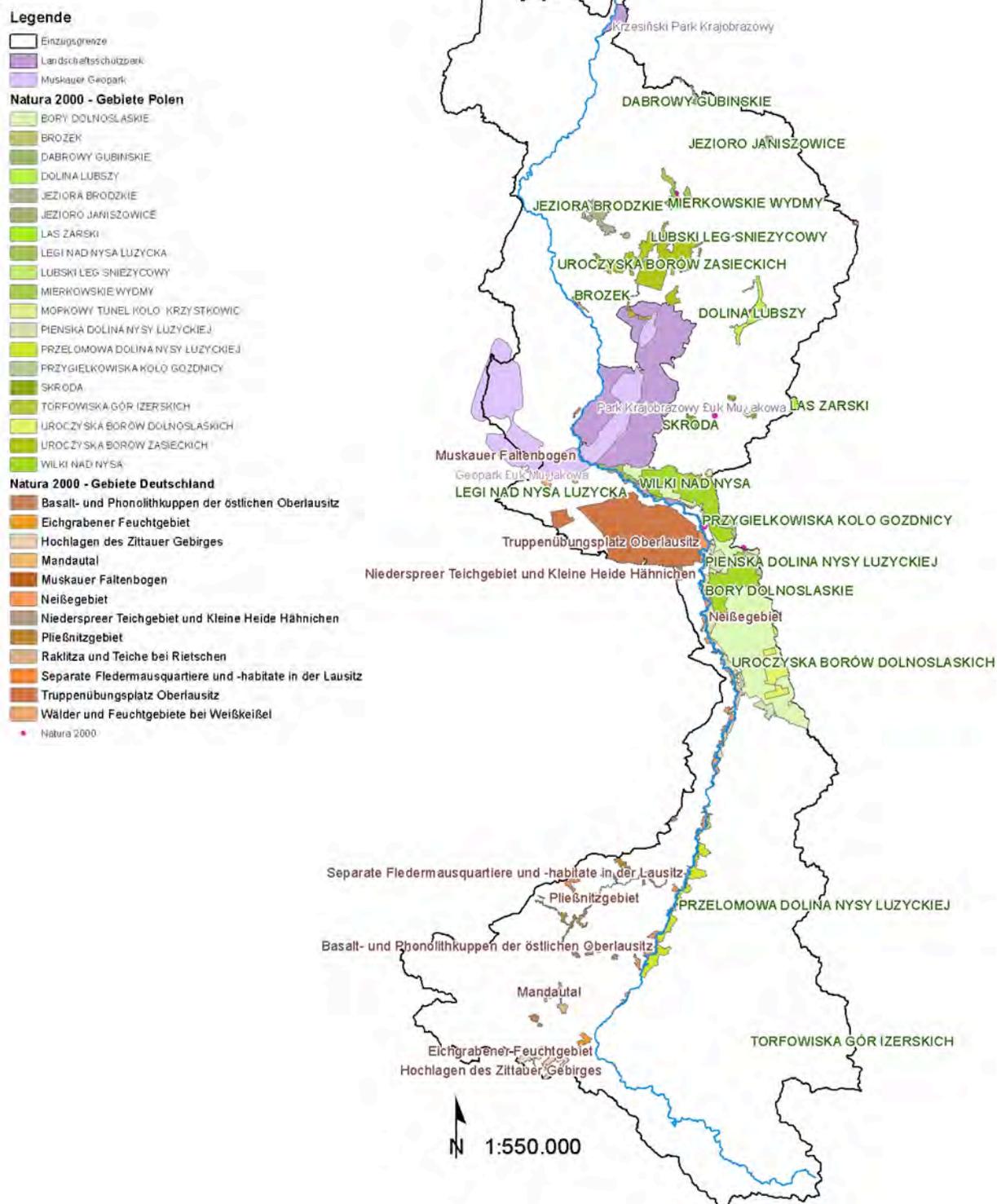


Abbildung 6: Gebiete Natura 2000 im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße (Datenquelle: BfN 2014, GeoBasis-De/BKG 2011)

3

Klimaanalyse

3. Klimaanalyse

3.1. Daten

Als Datengrundlage stehen gemessene Zeitreihen täglicher Werte verschiedener Klimaelemente (Tabelle 2) der amtlichen Messnetze Deutschlands (DWD), Tschechiens (CHMU) und Polens (IMGW-PIB) zur Verfügung. Aus der Verfügbarkeit der Daten für das Untersuchungsgebiet leitet sich der Untersuchungszeitraum von 1971 bis 2010 ab.

Tabelle 2: Primäre Klimaelemente und abgeleitete Klimagrößen (Sekundärelemente)

Klimaelement	Abkürzung	Einheit	Anzahl Stationen
Lufttemperatur-Max	TX	°C	18
Lufttemperatur-Mittel	TM	°C	24
Lufttemperatur-Min	TN	°C	27
Niederschlag	RR	mm	100
relative Luftfeuchte	RF	%	21
Sonnenscheindauer	SD	h	13
Windgeschwindigkeit-Mittel (10 m)	FF	m/s	18
Luftdruck	PP	hPa	24
Dampfdruck	DD	hPa	21
Bedeckungsgrad	NN	Achtel	13
korrigierter Niederschlag	RK	mm	100
Globalstrahlung	GS	J/cm ²	13
potenzielle Verdunstung	ET	mm	13
Gras-Referenz-Verdunstung	GR	mm	11

Für die Analyse des rezenten Klimas sowie für die Erstellung der Klimaprojektionen und der Wasserhaushaltsmodellierung werden möglichst lange, lückenlose und qualitätsgeprüfte Zeitreihen benötigt, um die Gefahr von falschen Schlussfolgerungen durch fehlerbehaftete oder inhomogene Daten zu minimieren. Folgende Schritte wurden durchgeführt, damit ein grenzübergreifender, einheitlicher und qualitativ hochwertiger Datensatz vorliegt (Bernhofer und Franke 2013):

- Plausibilitätsprüfung und Korrektur
- Lückenschließung
- Homogenitätsprüfung

Plausibilitätsprüfung und Korrektur

Für alle Klimaelemente wurden die physikalisch bedingten Grenzen der Wertebereiche überprüft und in Fällen der Grenzwertverletzung im nachfolgenden als ein fehlender Wert behandelt. Weiterhin wurden Minimum-, Mittel- und Maximumtemperatur auf ihre wertmäßige Reihung hin überprüft und ggf. korrigiert.

Lückenschließung

Die Schließung der Lücken erfolgte in 4 Stufen:

- Stations-interne Schließungen von Klimaelementen (betrifft: DD, RF, SD)
- Stations-übergreifende Schließungen von Klimaelementen (betrifft: TX, TM, TN, RR, RF, SD, FF)

- Weitere Stations-interne Schließungen von Klimaelementen (betrifft: DD, PP)
- Stations-interne Berechnung von sekundären Klimaelementen (betrifft: RK, GS, ET, GR)

Grundvoraussetzung für die Lückenschließung war eine Verfügbarkeit des jeweiligen Datensatzes von wenigstens 2/3 im Zeitraum 1971 bis 2010. Wenn mehr als 1/3 der Daten einer Datenreihe fehlten, ist eine Lückenfüllung nicht plausibel möglich und wurde daher nicht durchgeführt. Die vier Stufen der Lückenfüllung werden in der Box 1 näher erläutert.

Box 1: Stufen der Lückenfüllung

1. Stations-interne Schließungen von Klimaelementen

Unter Verwendung der Tagesmitteltemperatur lässt sich über die MAGNUS-Formel der Sättigungsdampfdruck errechnen. Je nach Datenverfügbarkeit können damit Lücken in den Zeitreihen der relativen Feuchte bzw. des Dampfdruckes geschlossen werden. Mittels eines komplexen Ansatzes kann die Globalstrahlung aus dem Bedeckungsgrad und daraus die Sonnenscheindauer abgeleitet werden (siehe auch 4.) Zur Plausibilisierung der Algorithmen zur internen Lückenschließung wurden berechnete und gemessene Werte gegenübergestellt.

2. Stations-übergreifende Schließungen von Klimaelementen

Ist eine stationsinterne Datenergänzung nicht möglich, werden benachbarte Stationen hinzugezogen. Für die Elemente RR, TN, SD, NN, RH und DD werden zu jedem Zeitschritt die drei nächstgelegenen Stationen ermittelt, die über Daten verfügen. Mittels des Interpolationsverfahrens inverse Distanzwichtung wird der fehlende Wert berechnet. Für die Elemente TM, TX und FF wird der meist bestehende Zusammenhang zwischen den Werten und der Höhenlage der Stationen ermittelt (Regression). Der Zusammenhang wird genutzt um das Klimaelement an der betreffenden und den drei umliegenden Stationen zu berechnen. Eventuell noch bestehende Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten an den umliegenden Stationen werden mittels der inversen Distanzwichtung interpoliert und zusätzlich auf die lückenhafte Station aufgeschlagen.

3. weitere Stations-interne Schließungen von Klimaelementen

Die Schließung von Lücken im 2. Schritt ermöglicht in einigen Fällen weitere Stations-interne Berechnungen.

4. Stations-interne Berechnung von sekundären Klimaelementen

Bei der Messung des Niederschlags treten Fehler auf (Wind, Verdunstung, Benetzung), von denen der windbedingte Fehler den größten Anteil hat. In Deutschland ist es üblich, den Niederschlag zu korrigieren, da z.B. für wasserhaushaltsrelevante Untersuchungen dessen Verwendung empfohlen wird. Das in Deutschland weit verbreitete Korrekturverfahren nach Richter (1995) wird genutzt.

Zur Ableitung der Globalstrahlung aus der gemessenen Sonnenscheindauer wird der semi-empirische Ansatz nach Ångström (1924) verwendet.

Die Berechnung der potentiellen Verdunstung erfolgt nach dem Ansatz von Turc-Wendling (DVWK, 1996). Dieser Ansatz benötigt eine geringe Anzahl an Eingangsvariablen (GS, TM), was bei einer unzureichenden Datenverfügbarkeit günstig ist. Die Gras-Referenz-Verdunstung wird nach dem FAO-Standard (ATV-DVWK, 2002) ermittelt und ist durch eine hohe Anzahl von Parametern (TM, RF, FF, GS) gekennzeichnet.

Die Abbildung 7 stellt die prozentualen Anteile der originalen Daten, der geschlossenen (Schließung) und verbleibenden Lücken (Lücke), der berechneten und korrigierten (aus Plausibilitätsprüfung) an den Zeitreihen der einzelnen Klimatelemente dar. Da nur sehr wenige Werte korrigiert werden mussten, ist dieser Anteil in der Abbildung 7 nicht erkennbar.

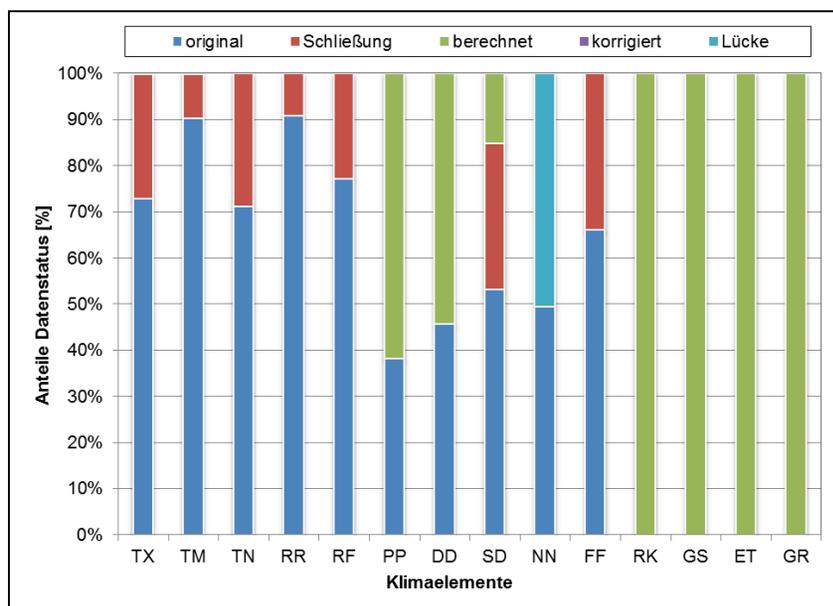


Abbildung 7: Finaler Datenstatus der einzelnen Klimatelemente, 1971-2010

Das Ergebnis der Lückenschließung wurde mit mehreren Verfahren auf Plausibilität geprüft. Dabei wurden u. a. Statistiken der originalen mit den Lücken gefüllten Datensätzen verglichen. Alle Prüfverfahren ergaben eine hohe Plausibilität der Lückenschließung, bis auf wenige Ausnahmen. Folgende der festgestellten Probleme konnten in einigen Datenreihen nicht behoben werden, weshalb die Zeitreihen von einer weiteren Verwendung ausgeschlossen wurden: Die Wind- und Temperaturdaten der Station Szrenica konnten nicht plausibel gefüllt werden. Die Werte ab Oktober 2002 sind zu gering und schwanken zwischen den Tagen zu stark. Des Weiteren wurde bei einer Prüfung festgestellt, dass die aus dem Bedeckungsgrad errechnete Globalstrahlung eine tendenzielle Unterschätzung der berechneten gegenüber der gemessenen Sonnenscheindauer aufweist. Für die Stationen Kubschütz, Slubice, Zgorzelec und Szczawno Zdroj wurden keine plausiblen Werte berechnet. Damit können für diese Stationen keine Werte für die Verdunstung und die klimatische Wasserbilanz ermittelt werden.

Homogenitätsprüfung

Die Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur wurden einem komplexen Algorithmus zur Homogenitätsprüfung unterzogen. Vor der Lückenschließung ist es das Ziel, Inhomogenitäten zu identifizieren, die z. B. durch Messgerätewechsel und Stationsverlegung entstehen. Eine erneute Prüfung nach der Lückenschließung kann Inhomogenitäten aufdecken, die durch den Lückenfüllungsalgorithmus entstanden sind. Details zur Homogenitätsprüfung sind in Box 2

zusammen gestellt. Die untersuchten Temperatur- und Niederschlagszeitreihen können nach Auswertung der Ergebnisse der Homogenitätsprüfung als weitgehend homogen angesehen werden. Lediglich die oben schon erwähnten Stationen Szrenica, Kubschütz, Slubice, Zgorzelec und Szczawno Zdroj wurden wegen Inhomogenitäten ausgeschlossen. Eine Homogenisierung der Reihen wurde nicht vorgenommen, da die Homogenitätsprüfung und Homogenisierung separat für jedes Klimaelement erfolgen würde und dies elementübergreifende Inkonsistenzen zur Folge haben kann.

Box 2: Homogenitätsprüfung

Das Prüfverfahren unterteilt sich in vorbereitende Analysen (Fehlwertanalyse und Ausreißer-Test), Stationaritätstest und relative Homogenitäts-Tests in numerischer und grafischer Form. Die verwendeten Homogenitäts-Tests sind Zweireihen-Tests die auf Vergleichen zwischen der Testreihe und einer homogenen Referenzreihe beruhen. Die numerischen Testverfahren nach Alexandersson (1986), Buishand (1982) und das Abbe'sche Homogenitätskriterium (Schönwiese, 2006) sowie die grafischen Testverfahren nach Craddock (1979), Doppelsummenanalyse (Dyck, 1976), Summendifferenzenlinien SDL (Dyck und Peschke, 1995) und der Quotientenvergleich QV nach Hann (1897) kamen zur Anwendung. Die Feststellung von Homogenität bzw. Inhomogenität der Testreihe ist oft nicht eindeutig, da die Verfahren unterschiedlich sensitiv reagieren. Daher ist eine fachkundige, subjektive Bewertung aller Testergebnisse für die jeweilige Reihe notwendig. Das größte Gewicht wird dem numerischen Alexandersson-Test zugesprochen, da dieser die Möglichkeit bietet, eine erkannte Inhomogenität zu bereinigen.

Nach der Homogenitätsprüfung und Lückenschließung liegt ein geprüfter, lückenloser und grenzüberschreitender Datensatz für die weiteren Analysen im Projekt vor. Für die Untersuchungsregion stellt dies aufgrund des grenzübergreifenden Ansatzes eine neue Qualität der Daten dar.

3.2. Methoden

Die Charakterisierung der klimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet erfolgt mit ausgewählten Kennwerten, die auf der Basis von Tagesdaten berechnet werden. Auch zur Identifizierung von Veränderungen des Klimas können diese Kennwerte verwendet werden (Nicholls und Murray, 1999; Moberg und Jones, 2005; Klein -Tank , 2009; ECA & D, 2012).

Folgende Gruppen an Kennwerten wurden analysiert:

- Niederschlag
- Temperatur
- Trockenheit
- Strahlung und Komplexe Kennwerte

Nachfolgend werden die Kennwerte definiert, wobei die im Text verwendete Abkürzung sowie in Klammern die Einheit angegeben wird. Wenn nicht speziell gekennzeichnet, werden die Kennwerte nach ECA&D (2012) berechnet.

Niederschlagskennwerte

Niederschlag RR [mm]

Summe der festen und flüssigen Niederschläge einer definierten Periode.

Tage mit Starkniederschlag – R10mm, R90p [Tage]

Anzahl der Tage mit Niederschlag größer oder gleich 10 mm bzw. Anzahl der Tage mit Niederschlag größer dem 90. Perzentil von Niederschlagstagen [Tage mit Niederschlag größer gleich 1 mm]. Das Perzentil berechnet sich aus den der Größe nach geordneten Niederschlägen der Referenzperiode 1971 bis 2000. Das 90. Perzentil wird von 90% der Daten unterschritten und demzufolge von 10 % überschritten, wobei letztere die Tage mit starken Niederschlägen sind.

Tage mit Extremniederschlag – R20mm, R95p [Tage]

Anzahl der Tage mit Niederschlag größer oder gleich 20 mm bzw. Anzahl der Tage mit Niederschlag größer dem 95. Perzentil von Niederschlagstagen. Details siehe R90p.

Tage mit Extremstem Niederschlag – R99p [Tage]

Anzahl der Tage mit Niederschlag größer dem 99. Perzentil von Niederschlagstagen. Details siehe R90p.

Höchster Tagesniederschlag - RX1day [mm]

Maximal gemessener Niederschlag an einem Tag.

Höchster 5-Tagesniederschlag - RX5day [mm]

Maximale Niederschlagsmenge, die an fünf aufeinanderfolgenden Tagen gemessen wurden.

Anteil an Starkniederschlägen - R90pT [%]

Niederschläge oberhalb des 90. Perzentils bezogen auf die Gesamtmenge der Niederschläge.

Anteil an Extremniederschlägen - R95pT [%]

Niederschläge oberhalb des 95. Perzentils bezogen auf die Gesamtmenge der Niederschläge.

Anteil an Extremstem Niederschlag - R99pT [%]

Niederschläge oberhalb des 99. Perzentils bezogen auf die Gesamtmenge der Niederschläge.

Kennwerte für Trockenheit

Häufigkeit von Trockenperioden - DPF [-]

Trockenperioden sind Perioden von mindestens 11 Tagen, an denen weniger als 1 mm Niederschlag pro Tag fallen (SMUL 2008). Gezählt wird, wie oft Trockenperioden in einem bestimmten Zeitabschnitt vorkommen.

Dauer der Trockenperioden - DPD [Tage]

Mittlere Dauer von Trockenperioden.

Standardisierter Niederschlags Index – SPI [-]

Dieser Kennwert wird auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Niederschlagsmenge berechnet (McKee et al. 1993). Damit ist er gut zwischen Regionen mit unterschiedlichen Niederschlagscharakteristika vergleichbar. Abweichungen nach oben (+) charakterisieren Feuchteperioden und nach unten (-) Trockenperioden, wobei die Skala von -3 bis +3 geht. Der SPI kann für verschiedene Bezugszeiträume in der Vergangenheit ermittelt werden, z.B. 3 Monate – typisch für eine meteorologische Trocken- und Feuchteperioden, 6 und 12 Monate typisch für eine hydrologische Trocken- und Feuchteperioden.

Temperaturkennwerte

Mittlere Lufttemperatur - TG [° C]

Mittel der täglichen mittleren Lufttemperatur.

Minimale Lufttemperatur - TN [° C]

Mittel der täglichen minimalen Lufttemperatur.

Maximale Lufttemperatur - TX [° C]

Mittel der täglichen maximalen Lufttemperatur.

Tägliche Differenz der Lufttemperatur – DTR [° C]

Differenz zwischen der maximalen und minimalen täglichen Lufttemperatur.

Extreme Differenz der Lufttemperatur – ETR [° C]

Differenz zwischen der maximalen und minimalen Lufttemperatur der betrachteten Periode.

Dauer der Vegetationsperiode - GSL [Tage]

Beträgt an 6 aufeinanderfolgenden Tagen die mittlere Lufttemperatur mehr als 5 ° C, beginnt die thermische Vegetationsperiode. Sie endet, wenn im an 6 aufeinanderfolgenden Tagen eine mittlere Lufttemperatur von 5 ° C unterschritten wird. Die Dauer der Vegetationsperiode errechnet sich aus der Differenz zwischen Beginn und Ende.

Strahlung und Komplexe Kennwerte

Sonnenscheindauer - SS [hours]

Summe der täglichen Sonnenstunden in einer bestimmten Periode.

Potentielle Evapotranspiration – PET [mm]

Sie stellt den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre dar. Unter der Annahme, dass jederzeit genügend Wasser zur Verfügung steht, wird in den meisten Fällen die maximal mögliche Verdunstung errechnet. Es wird hier der Ansatz von Turc-Wendling (DVWK, 1996) verwendet, der nur eine geringe Anzahl an Eingangsvariablen (Globalstrahlung und Mitteltemperatur) benötigt.

Klimatische Wasserbilanz - KWB [mm]

Die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ist ein klimatologisches Maß für die Wasserverfügbarkeit im Gebiet. Negative Werte deuten auf einen Niederschlagsmangel hin.

Für die ausgewählten Kennwerte werden die Mittelwerte für die Referenzperiode (1971-2000) berechnet. Um eventuelle klimatische Änderungen zu identifizieren werden lineare Trends für die Gesamtperiode (1971-2010) ermittelt. Hierbei sprechen wir von Trends, wenn der Signifikanztest nach Mann-Kendall (Schönwiese, 2006) bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10% einen signifikanten Trend feststellt. Andernfalls sprechen wir von Tendenzen. Perioden, die in dieser Broschüre untersucht werden sind:

- Meteorologisches Jahr (Januar bis Dezember)
- Meteorologisches Sommerhalbjahr (April bis September)
- Meteorologisches Winterhalbjahr (Oktober bis März)
- Frühling (März bis Mai)
- Sommer (Juni-August)
- Herbst (September bis November)
- Winter (Dezember bis Februar)

3.3. Ergebnisse der Klimaanalyse

3.3.1. Temperaturkennwerte

Die mittlere Lufttemperatur weist eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Höhe auf (Abbildung 8). Sie liegt im Jahresmittel zwischen 0,7 °C am höchsten Punkt im Untersuchungsgebiet (Schneekoppe im Riesengebirge – Station Sniezka) und 9,3 °C im Tiefland (Station Cottbus).

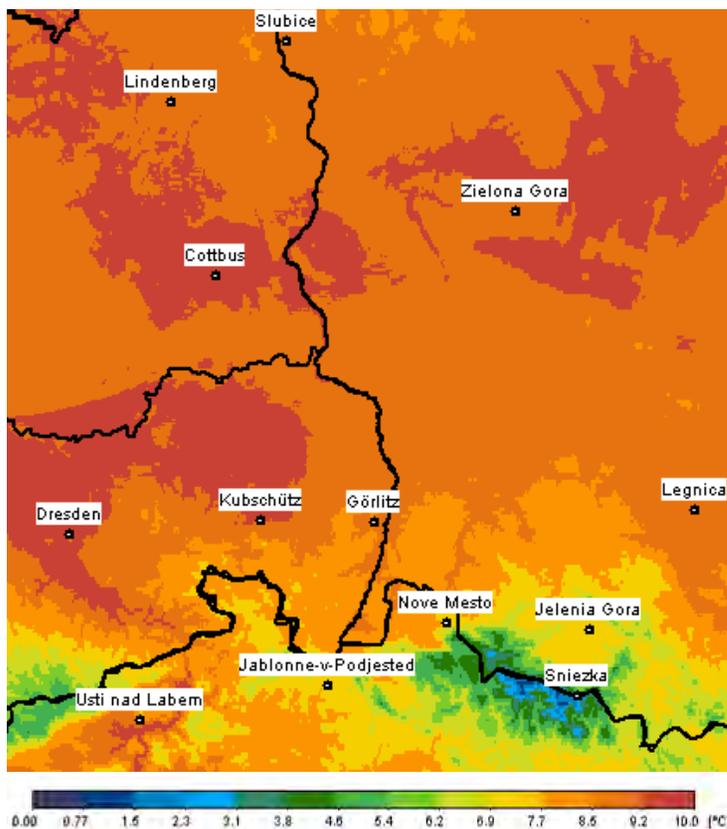


Abbildung 8: Jahresmitteltemperatur der Referenzperiode 1971-2000 (erstellt mit IDP®)

Neben der Höhe werden die thermischen Bedingungen durch die Topographie (Neigung, Hangexposition und Geländeform) beeinflusst. Konkave Formen, wie sie in Tälern und Becken vorkommen, sind kühler als konvexe Formen (Hochebene oder Bergkuppen), die auf gleicher Höhe liegen. Ursachen für die lokalen Temperaturunterschiede sind thermische Inversionen (Temperaturumkehr) verschiedener Herkunft, eine lokal differenzierte Sonneneinstrahlung oder Kaltluftentstehungs- oder -advektionsprozesse (Schmuck 1969). Die jährliche Durchschnittstemperatur in Becken und Tälern kann durch solche Prozesse 1°C niedriger sein.

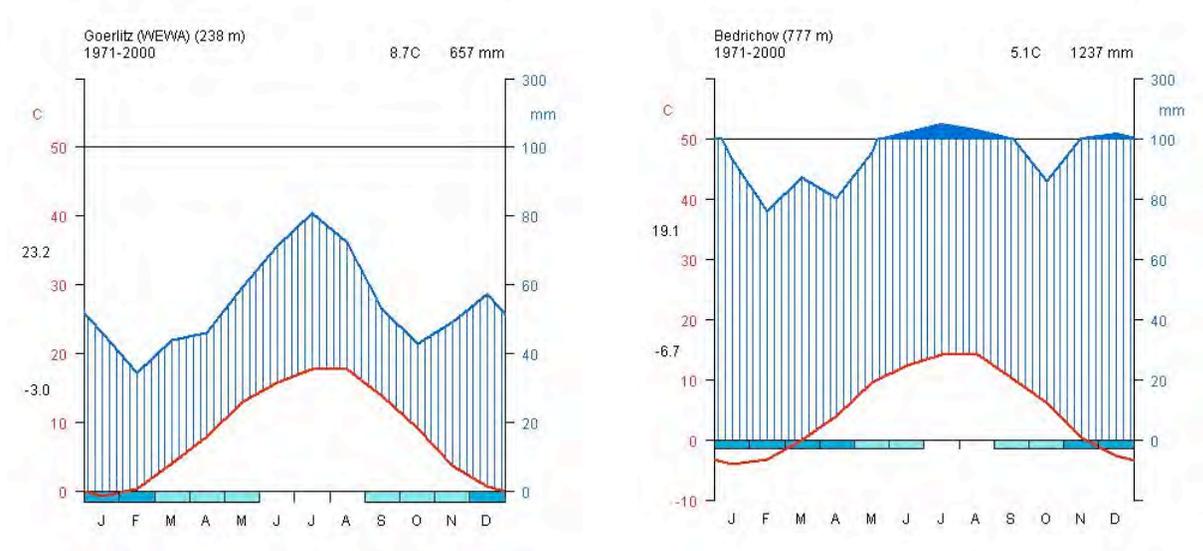


Abbildung 9: Klimadiagramme nach Walter und Lieth von 2 Stationen aus unterschiedlichen Höhenlagen des Untersuchungsgebietes. Diagrammaufbau: Oben: Station, Höhe, Periode, mittlere Jahrestemperatur und –niederschlagshöhe; Links: mittlere Temperatur; Rechts: mittlerer Monatsniederschlag; Unten: Monate und Frost gefährdete und Frost sichere Frostmonate.

Aus den Klimadiagrammen (Abbildung 9) wird ersichtlich, dass der kälteste Monat gewöhnlich der Januar (-3.9°C in Bedřichov, -0.6°C in Görlitz) und der wärmste Monat der Juli oder August ist (14°C in Bedřichov, 18°C in Görlitz). Allerdings kann aufgrund der hohen Variabilität der Zirkulation der Zeitpunkt der jährlichen Temperaturminima und -maxima abweichen. Monate, in denen der Niederschlag mindestens doppelt so hoch ist wie die Temperatur, gelten als humid, sonst als arid. Die Klimadiagramme verdeutlichen den humiden Charakter des Untersuchungsgebietes.

Weitere wichtige Merkmale der thermischen Bedingungen sind Minimum- und Maximumtemperaturen. Sie hängen sowohl von der atmosphärischen Zirkulation als auch von lokalen geographischen Faktoren (Geländeform, Landnutzung, Boden) ab. In Tabelle 3 sind die Mittelwerte über die 4 Höhenstufen Tief-, Hügel-, Bergland und Kammlagen für verschiedene Temperaturkennwerte zusammengefasst. Im Anhang 1 sind die absoluten Minimum- und Maximumtemperaturen von fünf repräsentativen Stationen im Gebiet dargestellt. Dass die Minimumtemperatur nicht nur von der Höhe abhängt, verdeutlicht die mittlere Jahresminimumtemperatur von 2.3°C in Jelenia Gora im Vergleich zur mehr als 400 m höher gelegenen Station Bedřichov (1.4°C). Gemäß dem berechneten Höhengradienten sollte die Temperatur in Jelenia Gora 0.8°C höher sein. Auch das absolute Temperaturminimum von -31.8°C (8.1.1985) in Jelenia Gora liegt 1.3°C unter dem der Station Bedřichov, was die lokalen Besonderheiten verdeutlicht.

Die mittlere tägliche Temperaturschwankung (DTR) ist im gesamten Untersuchungsgebiet im Sommer höher als im Winterhalbjahr (10.5°C , 6.5°C), wobei die Schwankungen in den Kammlagen geringer als in den tieferen Lagen sind. Die extremen Temperaturschwankungen (ETR) sind im Winter etwas höher als im Sommer, verhalten sich sonst aber sehr ähnlich zu den täglichen Schwankungen.

Die thermische Vegetationsperiode beginnt im Tief- und Hügelland Ende März und dauert bis November (ca. 240 Tage), während sie in höheren Lagen deutlich kürzer ist (siehe auch Anhang 2).

Über die 40-jährige Beobachtungsreihe weisen alle gewählten Temperaturindikatoren positive Tendenzen auf (Tabelle 3). Im Sommerhalbjahr handelt es sich bei der Mittel-, Minimum-, und Maximumtemperatur größtenteils um signifikante Trends. Die Zunahme der Mitteltemperatur betrug im Sommerhalbjahr ca. 2 °C. Im Winter liegt kein klares Signal vor. Aber nicht nur die absoluten Temperaturen erhöhten sich, sondern auch die täglichen und extremen Temperaturschwankungen. Ein Grund für größere tägliche Temperaturschwankungen können erhöhte Sonnenscheindauern (vgl. Tabelle 5) sein, die zu stärkeren Temperaturanstiegen tagsüber führen. Des Weiteren hat sich die thermische Vegetationsperiode um ca. 30 Tage verlängert.

Tabelle 3: Mittelwert der Temperaturkennwerte für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen für das Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr (J, SHJ, WHJ)

Index [Einheit]	Tiefland		Hügelland		Bergland		Kammlagen	
	0 bis 150m		151 bis 350m		351 bis 650m		>650m	
	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend
TM-J [°C]	9.0	1.2	8.4	1.0	7.8	1.1	3.6	1.2
TM-SHJ [°C]	14.7	1.9	14.1	1.8	13.4	1.9	8.9	2.0
TM-WHJ [°C]	3.3	0.6	2.6	0.3	2.1	0.3	-1.7	0.6
TX-J [°C]	13.5	1.2	12.8	0.9	11.9	1.4	7.1	1.5
TX-SHJ [°C]	20.3	2.0	19.5	1.7	18.5	2.3	12.9	2.4
TX-WHJ [°C]	6.7	0.6	6.2	0.2	5.3	0.5	1.2	0.5
TN-J [°C]	4.8	0.6	4.5	0.6	3.2	1.0	0.6	1.0
TN-SHJ [°C]	9.5	1.1	9.3	1.3	7.8	1.7	5.5	1.7
TN-WHJ [°C]	0.2	0.2	-0.2	0.1	-1.5	0.3	-4.2	0.4
DTR-J [°C]	8.7	0.6	8.3	0.3	8.8	0.4	6.1	0.5
DTR-SHJ [°C]	10.9	0.8	10.3	0.4	10.7	0.6	7.0	0.8
DTR-WHJ [°C]	6.5	0.5	6.4	0.1	6.8	0.2	5.1	0.2
ETR-J [°C]	50.0	3.4	50.0	2.3	50.4	2.1	45.1	1.6
ETR-SHJ [°C]	37.4	1.0	36.2	0.0	36.5	0.3	33.6	-0.1
ETR-WHJ [°C]	38.4	2.2	38.9	0.5	40.1	0.0	35.6	-0.6
GSL-J [d]	251	37	236	24	226	20	145	37

TM, TX, TN: Mittel-, Maximum-, und Minimumtemperaturen; DTR, ETR: Täglicher und Extremer Temperaturschwankungsbereich; GSL: Länge der thermischen Vegetationsperiode

3.3.2. Niederschlagskennwerte

Die flächenhafte Niederschlagssumme (unkorrigiert, interpoliert mittels IDP®) der Referenzperiode beträgt für die Untersuchungsregion im Mittel 643 mm. Das Gebiet ist durch kontinentales Klima geprägt, d.h. der Niederschlag nimmt mit zunehmender Entfernung vom Meer ab. Zum Vergleich: Sachsen hat ein Jahresniederschlag von 711 mm. Der Vergleich mit Sachsen bietet sich an, da die Höhenverhältnisse ähnlich sind. Nachteilig ist, dass es am Ostrand zu Überschneidungen mit dem Untersuchungsgebiet gibt. In Abbildung 10 ist der unkorrigierte mittlere Jahresniederschlag flächenhaft dargestellt. Daraus ist eine signifikante Abhängigkeit des Niederschlages von der Höhe erkennbar, wobei die höchsten jährlichen Niederschläge mit 1371 mm im Isergebirge (Jakuszyce) und die niedrigsten Niederschläge mit 515 mm im zentralen Schlesischen Tiefland (Legnica) gemessen wurden. Im Sommerhalbjahr fiel im Durchschnitt 38 % mehr Niederschlag als im Winterhalbjahr. In Tabelle 4 sind für Höhenregionen gemittelten Stationswerte aufgelistet.

Für wasserwirtschaftliche Aspekte ist der wind- und verdunstungskorrigierte Niederschlag relevant, um eine ausgeglichene Bilanz zu erzielen. Die Niederschlagssumme beträgt mit der Niederschlagskorrektur nach Richter 731 mm und ist damit um ca. 12 % höher.

Innerhalb der 40-jährigen Periode sind positive Tendenzen des Niederschlages in allen Höhenstufen zu verzeichnen (Tabelle 4). Der Zuwachs findet in beiden Jahreshälften statt, wobei die Niederschlagsabnahmen in den Kammlagen im Sommer eine Ausnahme darstellen.

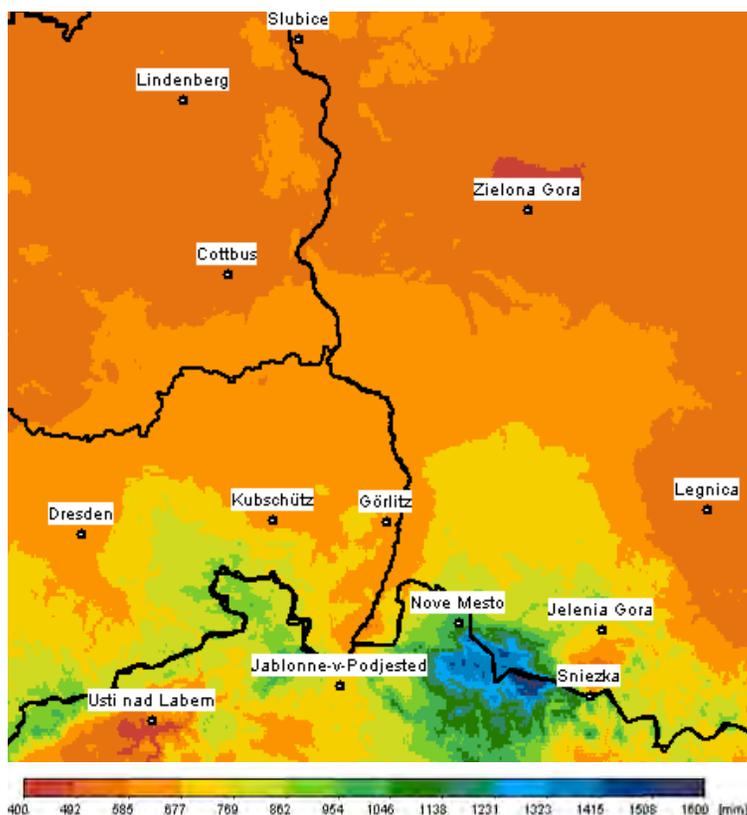


Abbildung 10: Mittlerer jährlicher unkorrigierter Niederschlag der Referenzperiode 1971-2000 (erstellt mit IDP®)

Die Analyse der Starkniederschläge verdeutlicht, dass mit zunehmender Geländehöhe die maximalen Niederschlagshöhen (RX1day, RX5day) sowie die Tage, an denen 10 und 20 mm Niederschlag bzw. die analysierten Perzentile überschritten werden, steigen (Tabelle 4). Treten Starkniederschläge der Schwellwerte 10 bzw. 20 mm überwiegend im SHJ auf, so gibt es bei den Perzentil-basierten Kennwerten kaum Unterschiede zwischen SHJ und WHJ. Perzentil-basierte Indizes bieten den Vorteil, dass Stationen unterschiedlicher Höhenlagen gut miteinander vergleichbar sind. So variiert z. B. der Jahreswert von R90p (Anzahl der Tage mit Niederschlag größer dem 90-sten Perzentil der Referenzperiode) weit weniger als der Starkregen größer 10 mm über die Höhenstufen. Das heißt, dass Stationen in unterschiedlichen Höhenlagen sich nur geringfügig in ihren spezifischen (Perzentil-basierten) Starkniederschlägen unterscheiden. Die höchsten 1-Tages und 5-Tages Niederschläge wurden in Jakuszyce (Isergebirge) beobachtet (69 mm und 139 mm).

Die Trendanalyse lässt einen – an vielen Stationen signifikanten – Anstieg der gemäßigten Starkniederschlagsindikatoren (R10mm, R90p) über das gesamte Jahr in allen Höhenstufen erkennen (Tabelle 4). Noch extremere Niederschläge (R20mm, R95p, R99p) kommen lediglich im SHJ vermehrt vor, im WHJ ist die Tendenz gegenläufig. Eine Analyse auf Basis von Jahreszeiten (Abbildung 11) verdeutlicht, dass sich insbesondere der Frühling durch klare negative und der Sommer durch positive Tendenzen auszeichnen.

Die Betroffenheit unterschiedlicher Höhenstufen auf die Änderungen von jeweils extremen Niederschlägen kann mit Perzentilen besser dargestellt werden. So nehmen zwar Tage mit mehr als 10 oder 20 mm für die Kammlagen zu, aber die Anzahl an Tagen mit wirklich relevanten (höheren) Starkniederschlägen nimmt größtenteils ab (Tabelle 4). Die Kammlagen weisen gegenüber den anderen Höhenlagen somit oft einen entgegengesetzten Trend auf.

Insgesamt wird der erhöhte Jahresniederschlag zum einen durch eine erhöhte Anzahl an Niederschlagstagen im Jahr hervorgerufen. Zum anderen ist die Niederschlagsintensität von Bedeutung: Im Sommer nimmt der Anteil von Starkregenereignissen an den Gesamtniederschlägen zu, wohingegen der Starkregenanteil im Winter abnimmt (Tabelle 4; z. B. R90pT).

Bei den maximalen 1-Tagesniederschlägen überwiegen positive Trends (2002, 2010), bei den 5-Tagesniederschlägen (1978, 1981) jedoch negative Trends. Die Angaben in Klammern verweisen auf Ereignisse, die großen Einfluss auf die Trendaussagen haben und verdeutlichen, dass die Untersuchungsperiode noch relativ kurz ist für die Ableitung von robusten Ergebnissen für Extremniederschläge. Die höchsten 1-Tages und 5-Tagesniederschläge wurde in Jakuszyce beobachtet und betragen 69 mm und 139 mm.

Tabelle 4: Mittelwert der Niederschlagskennwerte für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen für das Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr (J, SHJ, WHJ)

Index [Einheit]	Tiefland		Hügelland		Bergland		Kammlagen	
	0 bis 150m		151 bis 350m		351 bis 650m		>650m	
	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend
Niederschlag - J [mm]	608	75	701	73	861	102	1183	27
Niederschlag - SHJ [mm]	350	31	406	26	471	42	634	-21
Niederschlag - WHJ [mm]	258	31	295	38	390	52	548	45
R10mm - J [d]	13.5	2.5	17.2	1.7	23.3	3.5	35.1	3.4
R10mm - SHJ [d]	9.3	2.0	11.3	1.0	13.6	1.9	19.1	1.2
R10mm - WHJ [d]	4.3	0.3	5.9	0.6	9.8	1.5	16.0	2.4
R20mm - J [d]	3.1	0.3	4.1	-0.4	5.9	0.2	10.2	0.5
R20mm - SHJ [d]	2.6	0.7	3.3	0.1	4.1	0.3	6.5	-0.1
R20mm - WHJ [d]	0.4	-0.4	0.8	-0.4	1.8	-0.1	3.6	0.6
R90p - J [d]	11.2	1.7	12.1	0.2	13.3	1.3	15.7	0.5
R90p - SHJ [d]	5.5	1.0	6.0	0.3	6.4	0.6	7.4	0.0
R90p - WHJ [d]	5.9	0.4	6.2	0.4	7.0	0.7	8.2	0.7
R95p - J [d]	5.6	0.0	6.0	-0.3	6.7	0.5	7.9	0.0
R95p - SHJ [d]	2.7	0.7	3.0	0.1	3.2	0.4	3.8	-0.6
R95p - WHJ [d]	2.9	-0.4	3.1	-0.2	3.5	0.1	4.1	0.2
R99p - J [d]	1.2	0.3	1.2	0.0	1.4	0.2	1.6	-0.7
R99p - SHJ [d]	0.6	0.2	0.6	0.3	0.7	0.2	0.8	-0.3
R99p - WHJ [d]	0.6	-0.5	0.6	-0.5	0.7	-0.1	0.9	-0.2
R90pT - J [%]	33.1	0.2	33.4	-2.3	33.0	0.8	34.5	-0.1
R90pT - SHJ [%]	42.4	5.4	42.4	0.2	39.8	2.8	40.4	0.8
R90pT - WHJ [%]	19.5	-6.6	20.9	-6.6	24.1	-4.3	26.7	-1.9
R95pT - J [%]	21.4	-2.0	21.4	-2.4	21.0	0.6	22.2	-0.9
R95pT - SHJ [%]	29.7	1.5	29.3	-0.3	27.4	1.9	28.5	-1.1
R95pT - WHJ [%]	9.0	-6.7	10.3	-6.3	12.4	-3.6	13.6	-1.4
R99pT - J [%]	7.2	-0.1	6.9	-0.3	6.5	0.9	7.4	-1.9
R99pT - SHJ [%]	11.1	1.4	10.4	0.9	9.9	1.8	11.0	-3.0
R99pT - WHJ [%]	1.0	-2.6	1.3	-2.5	1.8	-1.4	2.2	-0.5
RX1day - J [mm]	38	-4	40	2	44	6	60	8
RX1day - SHJ [mm]	37	-3	39	2	42	7	57	6
RX1day - WHJ [mm]	18	-1	21	-2	26	1	34	1
RX5day - J [mm]	64	-10	73	-10	83	-1	116	-7
RX5day - SHJ [mm]	60	-7	68	-6	75	1	105	-5
RX5day - WHJ [mm]	37	-2	43	-4	55	1	76	-1

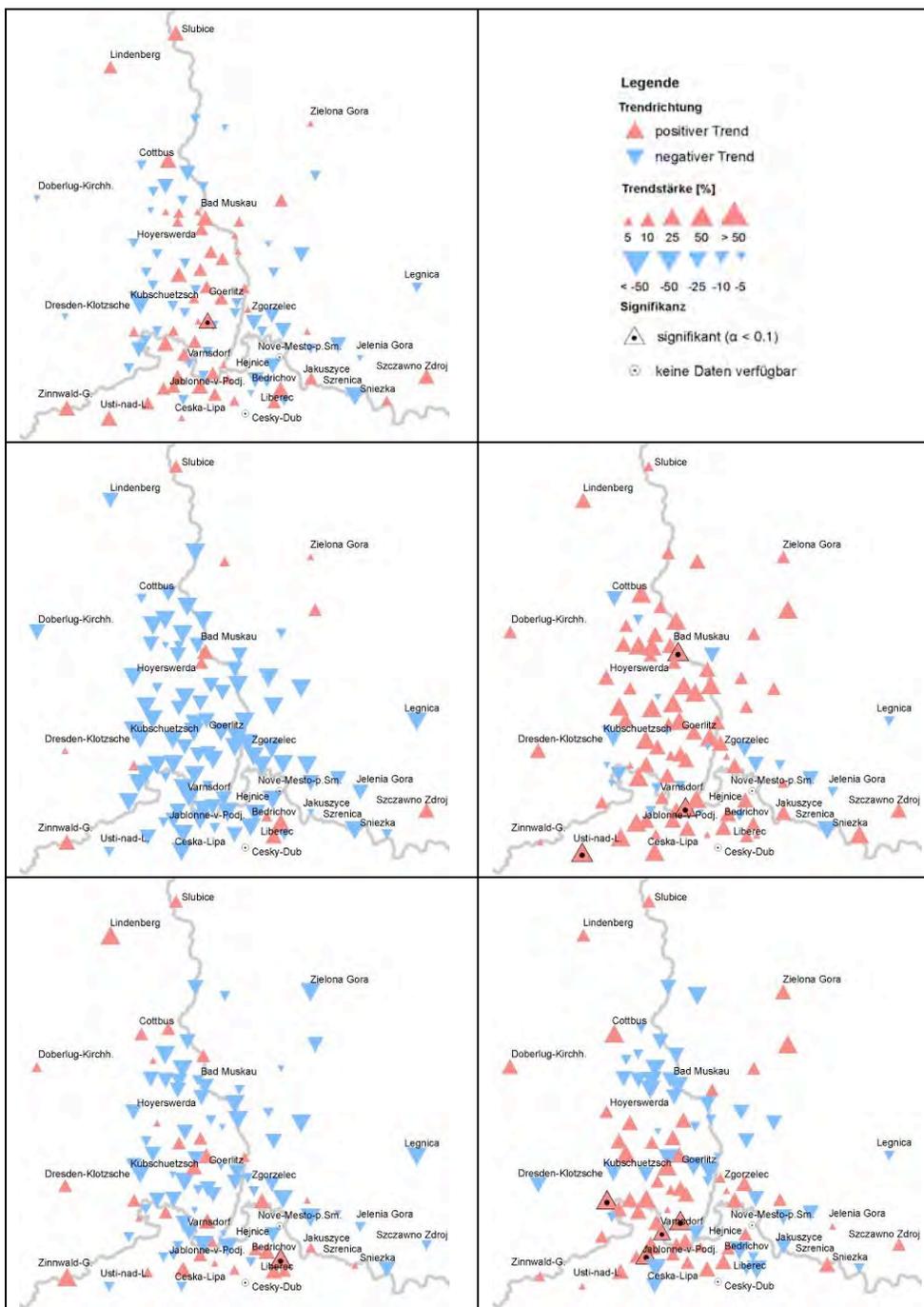


Abbildung 11: Trend des Perzentil basierten Starkniederschlagsindicators R95p
 Von links nach rechts: 1. Reihe: Jahr; 2. Reihe: Frühling, Sommer; 3. Reihe: Herbst, Winter

3.3.3. Trockenkennwerte

Es werden zum einen die auf einer mindestens 11 Tage andauernden Niederschlagsarmut basierenden Trockenperioden (DP) analysiert. Zum anderen wird der Standardniederschlagsindex (SPI) berechnet, der die Verhältnisse der vergangenen 3, 6 oder 12 Monate betrachtet. Trockenperioden kommen aufgrund einer ungünstigen kurzfristigen Verteilung des Niederschlags zustande, wohingegen der SPI eher ein Maß für die Niederschlagssumme längerfristiger Zeiträume

ist. Negative Tendenzen bzw. Abweichungen stehen für trockenere und positive für feuchtere Verhältnisse.

Trockenperioden kommen häufiger und lang anhaltender in tieferen als in höheren Regionen vor (Abbildung 12, Tabelle 5). Es nimmt demzufolge nicht nur die Niederschlagsmenge mit der Höhe zu, sondern auch die Anzahl an Niederschlagsereignissen. Im Mittel kommen im Jahr fünf Trockenperioden mit einer Dauer von 16 Tagen in den Tieflagen vor. In den Kammlagen sind es drei Perioden mit 15 Tagen Dauer. Im WHJ dauern Trockenperioden etwas länger an als im SHJ und kommen geringfügig öfter vor.

Die berechneten SPI Werte beziehen sich stets auf einen standardisierten Mittelwert für die Referenzperiode. Diese Mittelwerte des SPI für die Referenzperiode schwanken um null und sind nicht interpretierbar. Abweichungen von diesem Mittelwert können als Tendenzen/ Trends für Trocken- und Feuchtphasen interpretiert werden (Abbildung 13). In der Referenzperiode ergeben die Abweichungen Null, in der Gesamtperiode können jedoch positive oder negative Tendenzen auftreten. Trockenphasen erstrecken sich oft über alle 3 Dauerstufen (3-12 Monate), wie z. B. 05/1976 - 01/1977 und 10-12/1982. Die verschiedenen Dauerstufen können aber unterschiedlich stark ausfallen. Das Jahr 2003 war für Andauern von 3-6 Monaten des SPI sehr trocken, aber ein Extrem stellt erst der SPI12 dar (vergleichbar mit dem Herbst 1982). Im Zeitraum 03/1996 - 02/2001 treten kurz- und mittelfristig Trockenphasen auf, die sich aber nicht zu einer 12-monatigen Trockenzeit entwickelt haben.

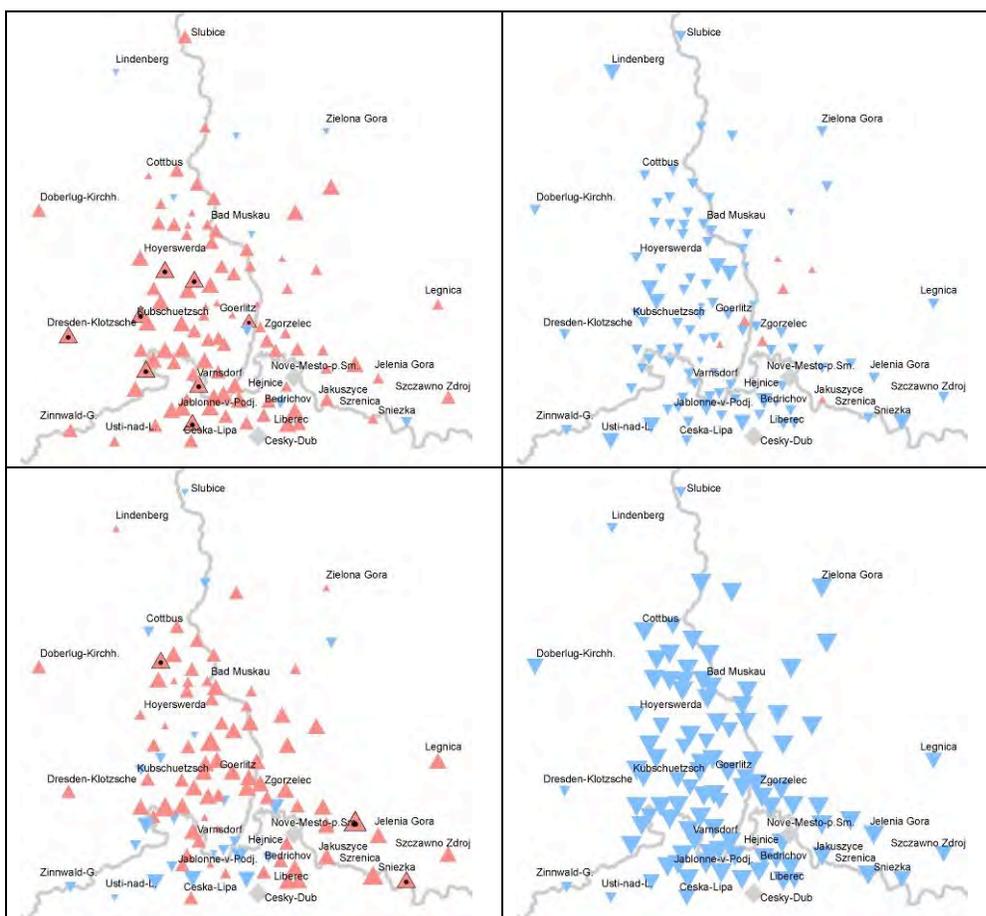


Abbildung 12: Trend der Trockenperioden (Von links nach rechts: 1. Reihe: Andauer SHJ und WHJ; 2. Reihe: Häufigkeit SHJ und WHJ (Legende siehe Abbildung 11))

Die Trendanalyse verdeutlicht, dass es zu einer Zunahme der Dauer und Häufigkeit der Trockenperioden im Sommerhalbjahr (insbesondere im Frühjahr) und einer Abnahme im Winterhalbjahr gekommen ist (Tabelle 5). Sämtliche SPI Werte weisen über alle Höhenlagen und Zeithorizonte einen positiven Trend auf, d. h. die Verhältnisse sind feuchter geworden. Die erhöhten Niederschlagsmengen fallen im Sommer zunehmend als Starkniederschläge, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die 11-tägigen Trockenperioden ebenfalls zunehmen.

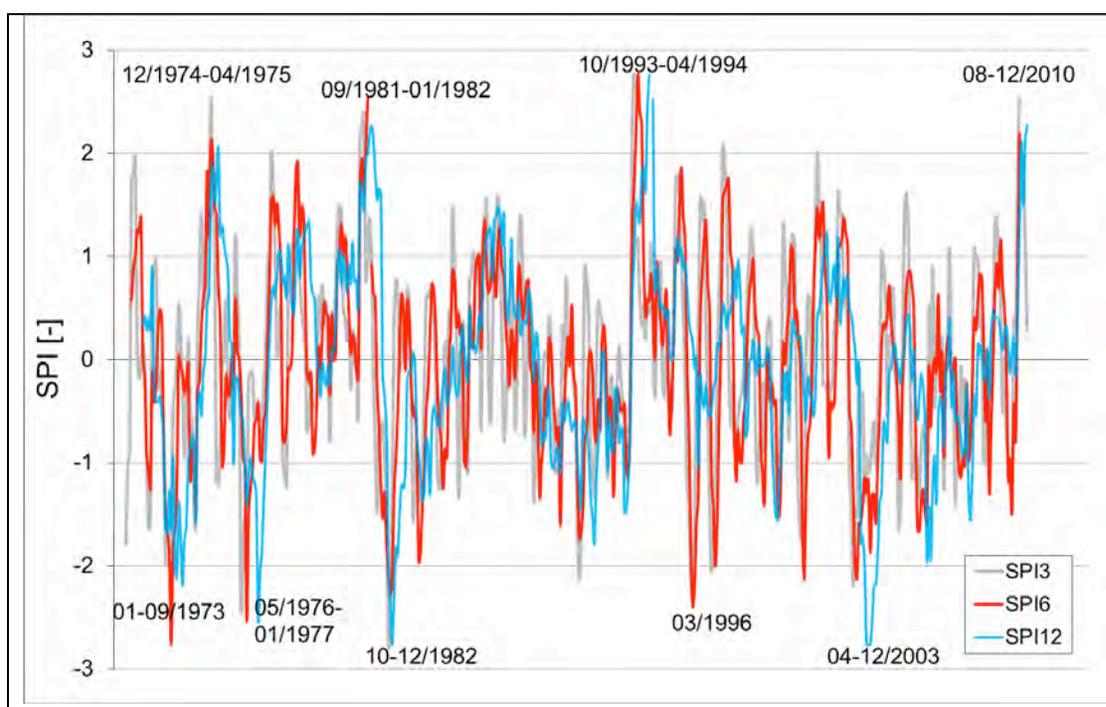


Abbildung 13: Standardisierter Niederschlagsindex SPI der vergangenen 3, 6, 12 Monate des Zeitraums 1971-2010 für die Klimastation Görlitz

Tabelle 5: Mittelwerte der Trockenindizes für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen

*Die Mittelwerte des SPI für die Referenzperiode schwanken Methoden bedingt um Null und sind nicht interpretierbar.

Index [Einheit]	Tiefeland		Hügelland		Bergland		Kammlagen	
	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend
DPD - J [d]	16.1	-0.1	15.7	0.1	15.3	0.3	14.8	0.1
DPD - SHJ [d]	15.9	2.4	15.4	2.9	14.9	3.2	14.3	1.0
DPD - WHJ [d]	16.3	-2.5	15.9	-2.0	15.6	-2.7	15.0	-1.1
DPF - J [-]	5.4	-1.1	4.7	-1.1	4.2	-1.1	2.9	-0.4
DPF - SHJ [-]	2.4	0.3	2.0	0.3	1.7	0.2	1.2	0.2
DPF - WHJ [-]	2.9	-1.7	2.7	-1.7	2.4	-1.5	1.6	-0.7
SPI3 - J [-]	*	0.3	-	0.2	-	0.3	-	0.1
SPI3 - SHJ [-]	-	0.2	-	0.1	-	0.2	-	-0.1
SPI3 - WHJ [-]	-	0.2	-	0.2	-	0.3	-	0.2
SPI6 - J [-]	-	0.3	-	0.2	-	0.3	-	0.1
SPI6 - SHJ [-]	-	0.3	-	0.2	-	0.3	-	0.1
SPI6 - WHJ [-]	-	0.2	-	0.2	-	0.3	-	0.0
SPI12 - J [-]	-	0.4	-	0.4	-	0.5	-	0.2
SPI12 - SHJ [-]	-	0.3	-	0.3	-	0.4	-	0.1
SPI12 - WHJ [-]	-	0.3	-	0.3	-	0.5	-	0.1

3.3.4. Sonneneinstrahlung

Als Maß für die Sonneneinstrahlung wird die jährliche Sonnenscheindauer analysiert. Sind im Tiefland im Mittel 1653 Stunden pro Jahr zu verzeichnen, so sind es in den höheren Lagen deutlich weniger Sonnenscheinstunden (Tabelle 6). Die orografisch bedingte Entstehung von Wolken ist hierfür die Hauptursache. Im Vergleich zum westlich gelegenen Sachsen ist durch die kontinentalere Lage des Untersuchungsgebietes die Sonnenscheindauer höher.

Die Sonnenscheindauer hat in den letzten 40 Jahren zugenommen. Auf Jahresebene sowie im Sommerhalbjahr liegen signifikant positive Trends in allen Höhenstufen vor, im Winterhalbjahr sind keine eindeutigen Tendenzen zu verzeichnen.

Tabelle 6: Mittelwerte der jährlichen Sonnenscheindauer SS für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen

Index (Einheit)	Tiefland		Hügelland		Bergland		Kammlagen	
	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend
	0 bis 150m		151 bis 350m		351 bis 650m		>650m	
SS-J (h)	1653	246	1508	280	1428	267	1377	215
SS-SHJ (h)	1191	208	1074	245	1032	263	951	211
SS-WHJ (h)	461	43	434	33	397	0	427	2

3.3.5. Verdunstung und Klimatische Wasserbilanz

Die potentielle Verdunstung¹ wird von einer Reihe von atmosphärischen Klimagrößen bestimmt. In der hier verwendeten Methode nach Turc-Wendling gehen die Temperatur und die Sonneneinstrahlung ein. Höhere Temperaturen und Sonnenscheindauern führen zu großen Verdunstungswerten im Tiefland (661 mm/a, Tabelle 7). Mit zunehmender Höhe nehmen die Verdunstungswerte ab.

In allen Jahrzeiten und über alle Höhenstufen weist die potentielle Verdunstung positive Tendenzen auf, die an vielen Stationen im Frühjahr und Sommer signifikant sind. Das deckt sich mit den Trends der Einflussfaktoren. Während im Winter nur marginale Änderungen zu verzeichnen sind, sind die relativen Veränderungen im Sommer mit umgerechnet 12 bis 15 % in den verschiedenen Höhenstufen erheblich.

Als Maß für die Wasserverfügbarkeit besitzt die Klimatische Wasserbilanz (KWB) besondere Bedeutung bei der Abschätzung der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt. Sie berücksichtigt neben der Eingangsgröße Niederschlag auch die potentielle Verdunstung. Aus Tabelle 7 wird deutlich, dass die KWB im Tiefland auf Jahresbasis negativ ist, die potentielle Verdunstung demzufolge größer ist als der Niederschlag (661/608 mm). Im Hügelland ist die KWB ausgeglichen und auf den Kammlagen positiv. Im Sommer fallen die Werte aufgrund der hohen Verdunstung wesentlich geringer aus als im Winter (Abbildung 14). Die Trends zeigen eine sich

¹ Die potentielle ist die aus klimatischer Sicht maximal mögliche Verdunstung. Es ist nicht die tatsächlich stattfindende Verdunstung.

verschärfende Situation an: im Sommer gibt es eine stark rückläufige KWB, insbesondere in den Kammlagen. Im Winter bewirken die erhöhten Niederschläge eine Zunahme der KWB, die die Defizite aus dem Sommer etwas abmindern aber nicht vollständig kompensieren können.

Tabelle 7: Mittelwerte der jährlichen potentiellen Verdunstung PET und der Klimatischen Wasserbilanz KWB für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen. Die Berechnung der KWB erfolgte für Stationen, die über die nötigen Eingangsdaten verfügen. Eine Berechnung der KWB mit dem Niederschlag aus Tabelle 4 führt zu anderen Ergebnissen, da wesentlich mehr Niederschlagsstationen zur Verfügung stehen.

Index [Einheit]	Tiefland		Hügelland		Bergland		Kammlagen	
	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend	Mittelwert	Trend
	0 bis 150m		151 bis 350m		351 bis 650m		>650m	
PET-J [mm]	661	69	635	76			518	62
PET-SHJ [mm]	527	65	501	74	keine Daten		409	62
PET-WHJ [mm]	135	3	134	1			110	-1
KWB-J [mm]	-116	-26	8	-38			543	-81
KWB-SHJ [mm]	-194	-52	-111	-53	keine Daten		172	-159
KWB-WHJ [mm]	78	14	118	6			371	78

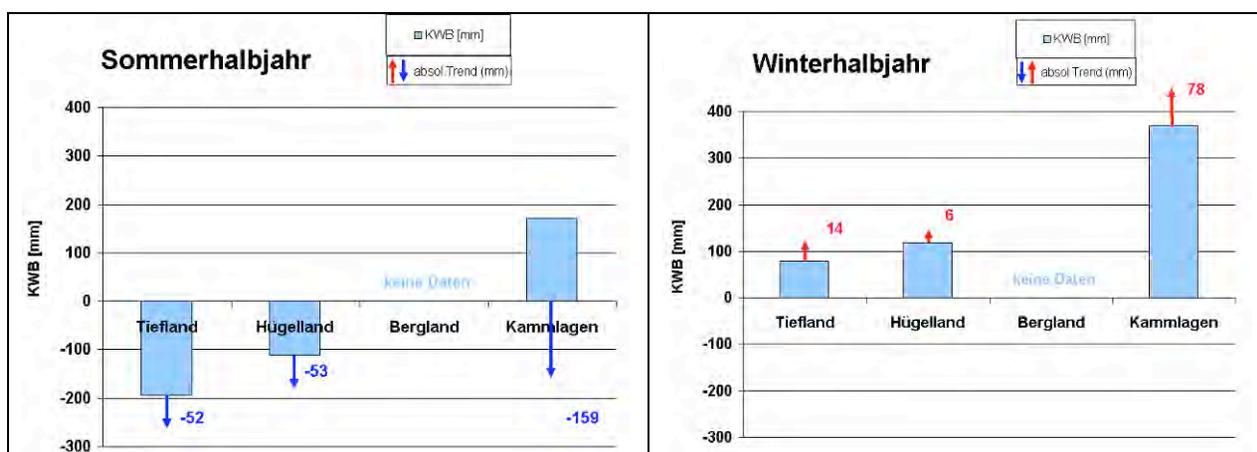


Abbildung 14: Mittelwerte der jährlichen Klimatischen Wasserbilanz KWB für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010

3.4. Schlussfolgerungen

Die Lage des Untersuchungsgebietes in einer klimatischen Übergangszone bewirkt - im Vergleich zu Sachsen - geringere Niederschläge sowie eine erhöhte Sonnenscheindauer. Die unterschiedlichen Geländehöhen verursachen starke Gradienten in den Klimatelementen, insbesondere bei der Temperatur und dem Niederschlag. So sind die tieferen Lagen wärmer, sonnenreicher und trockener als die höheren Lagen.

In der Periode 1971-2010 veränderte sich das Klima zum Teil erheblich. So nahmen an vielen Stationen die Sonnenscheindauer, die Temperatur und die potentielle Verdunstung signifikant zu. Zunehmende Tendenzen sind auch beim Niederschlag, Starkniederschlägen und Trockenperioden zu verzeichnen. Vor allem im Sommer werden durch erhöhte Temperaturen konvektive Niederschläge erzeugt, die zu starken Niederschlägen führen. Gleichzeitig treten mehr und längere kurzfristige

Trockenperioden auf. Der alternative Feuchteindex SPI, weist auf eine Auffeuchtung der letzten Jahre hin. Das bedeutet, dass zwar vermehrt Niederschlag zur Verfügung steht, aber aufgrund einer ungünstigen Verteilung vermehrt Trockenperioden auftreten. Als besonders geeigneter Indikator für feuchte und trockene Phasen erweist sich die Klimatische Wasserbilanz, da sie eine Vielzahl von klimatischen Einflussfaktoren berücksichtigt. Die Trendanalysen weisen auf ein vermindertes Wasserdargebot im Sommer und ein leicht erhöhtes im Winter hin. Die Bergkämme weisen im Vergleich zum restlichen Gebiet oft ein anderes Trendverhalten auf. Das betrifft insbesondere die (Stark)-Niederschlagsindizes. Einschränkend muss erwähnt werden, dass Trends, die auf der Grundlage von kurzen Zeitreihen ermittelt werden, sehr sensitiv auf die Zustände zu Beginn und Ende der Periode reagieren und somit gegebenenfalls nicht die Langzeittrends wieder spiegeln.

Exemplarisch sollen die Auswirkungen des sich ändernden Klimas auf einige sozioökonomische Bereiche der Gesellschaft erwähnt werden. Die Landwirtschaft profitiert von einer Verlängerung der Vegetationsperiode um ca. 30 Tage. Allerdings wirken sich gehäufte kurzfristige Trockenperioden sowie das insgesamt verminderte Wasserdargebot im Sommer in vielen Jahren negativ aus. Für die Wasserbewirtschaftung sind die positiven Tendenzen der Starkniederschläge relevant, die zu Hochwässern und Flächenerosion und somit dem Eintrag von Schwebstoffen in die Gewässer führen können. Des Weiteren bringt die erhöhte Verdunstung im Sommer sowie die Umverteilung der Niederschläge hin zu Starkregenereignissen eine größere Gefahr von Niedrigwasser hervor. Aus klimatologischer Sicht hat sich das Wasserdargebot im Winter verbessert im Sommer jedoch markant verschlechtert. Insgesamt ist eine signifikante Verschlechterung des zur Verfügung stehenden Wasserdargebotes über die letzten 40 Jahre zu beobachten. Ob diese klimatologischen Randbedingungen sich in diesem Ausmaß auf den Wasserhaushalt auswirken, ist mit hydrologischen Modellen zu prüfen. Das erfolgt in einem weiteren Schritt innerhalb des Projektes.

4. Klimaprojektion

4.1. Einführung

Der 5. Sachstandsbericht des IPCC sieht den Einfluss der menschlichen Aktivitäten auf den Klimawandel als gesichert an (IPCC 2013). Die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Stickoxide befinden sich auf einem seit mindestens 800.000 Jahren nicht erreichtem Niveau. Ursache sind primär die Verbrennung von fossilen Energieträgern und sekundär die Netto-Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen. Die wesentlichsten Folgen des Treibhausgasanstieges sind: Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans, Veränderung des Wasserhaushaltes, Abschmelzen von Gletschern, Meeresspiegelanstieg etc.

Um die zukünftige Klimaentwicklung abschätzen zu können, werden Globale Klimamodelle (GCM) verwendet. Da diese aufgrund ihres groben Berechnungsgitters zu ungenau für regionale Problemstellungen sind, werden die GCM verfeinert und sogenannte Regionale Klimamodelle (RCM) aufgebaut. Man unterscheidet zwischen statistischen und dynamischen Regionalmodellen. Statistische Modelle nutzen statistische Zusammenhänge zwischen den modellierten atmosphärischen Größen eines GCM, wie z. B. den Feuchte- oder Windverhältnissen, und den interessierenden Klimagrößen wie z. B. Niederschlag und Lufttemperatur. Dynamische Regionalmodelle sind wie die GCM 3-dimensionale Klimamodelle, die für einen begrenzten Ausschnitt des Globus mit erhöhter räumlicher Auflösung rechnen.

Das zukünftige Klima wird in sogenannten Projektionen, deren Basis Emissionsszenarien sind, abgebildet. Die Emissionsszenarien zeigen mögliche Entwicklungen der Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen unter der Annahme verschiedener globaler Faktoren (z. B. Bevölkerungsentwicklung, technisch-wissenschaftlicher Fortschritt, Wirtschaftsentwicklung, Entwicklung von Umweltethik und Gerechtigkeit) auf. Seit dem Jahr 2000 basieren die Klimaprojektionen auf den sogenannten SRES-Szenarien (Nakicenovic et al. 2000). In ihnen erfolgt eine Abschätzung des Ausstoßes von Treibhausgasen, der als Antrieb für die GCM dient (Abbildung 15).

Seit etwa 2008 erfolgte eine Novellierung der Szenario-Philosophie. Die Szenarien der Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP), welche die zeitliche Entwicklung der Konzentration von Treibhausgasen sowie der Strahlungsantriebe² abschätzt, wurde eingeführt (Moss et al. 2010). Die zugrunde liegenden sozio-ökonomischen Annahmen berücksichtigen die Bevölkerungszunahme, das Bruttosozialprodukt, den Energieverbrauch und andere Faktoren. RCP-Szenarios sind inzwischen sehr gut eingeführt und sind auch die Grundlage der aktuellen Arbeit des IPCC (Abbildung 15).

² Der Strahlungsantrieb gibt die Änderung des Energieflusses in der Atmosphäre aus dem Vergleich der Jahre 1850 und 2100 an, der durch die Treibhausgase verursacht wird. Ausgangspunkt der Szenarioentwicklung waren definierte Strahlungsantriebe am Ende des 21. Jahrhunderts (2.6, 4.5, 6.0 und 8.5W/m²). Mittels spezieller Modelle und in Kooperation mit Klima- und Wirkmodellierern wurden mögliche Bandbreiten und die zeitliche Verläufe der Strahlungsantriebe sowie der dazugehörigen Entwicklungen von Treibhausgasemissionen und chemischen Konzentrationen in der Atmosphäre entwickelt. Diese repräsentieren wiederum jeweils unterschiedliche Szenarien sozioökonomischer Entwicklungen, Landnutzungsänderungen etc.

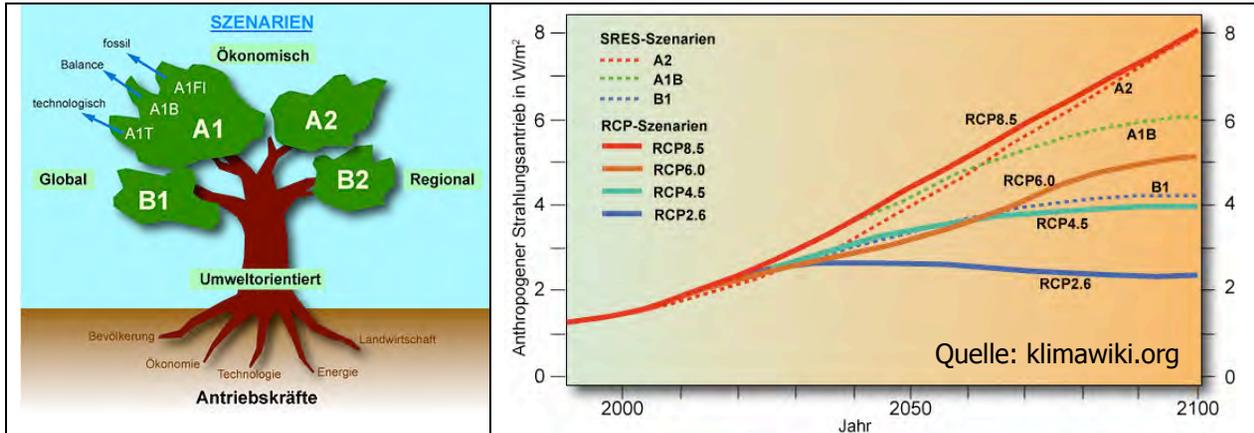


Abbildung 15: Links: Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen (SRES) (<http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/Klimaszenarien>); Rechts: Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen und Treibhausgaskonzentrationen (RCP-Szenarien, <http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>)

Im Laufe der letzten 15 Jahre etablierte sich die Strategie, Aussagen zu Klimaänderungen belastbarer zu machen, indem Ensembles von Modellresultaten betrachtet werden. Durch Darstellung der Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen können die Unsicherheiten in der Klimamodellierung berücksichtigt werden, die aus a) der Auswahl des Globalen und Regionalen Klimamodells, b) dem gewählten Treibhausgasszenario (SRES, RCP) sowie c) der Modellinitialisierung³ resultieren (Abbildung 15). Derzeit wird davon ausgegangen, dass nur unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten robuste Ergebnisse des zukünftigen Klimas und seiner Auswirkungen zu erwarten sind.

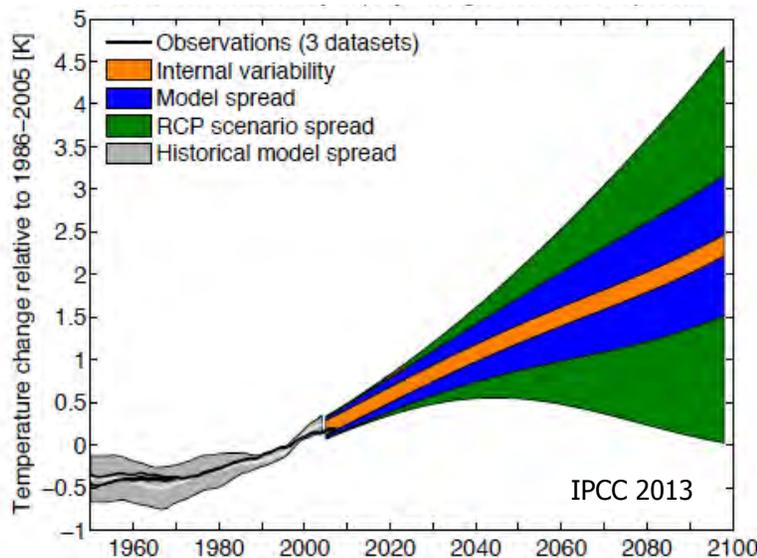


Abbildung 16: Zeitliche Entwicklung der Unsicherheiten, die auf globalen CMIP5 Ergebnissen basiert (IPCC 2013). Orange: Interne Modellvariabilität, Blau: Unterschiede zwischen Modellen, Grün: bedingt durch RCP-Szenarien, Grau: Modellunsicherheit in der Vergangenheit.

³ Bei Nutzung eines Modells und eines Szenarios werden mehrere Simulationsläufe erzeugt, die zu unterschiedlichen Zeiten im vorindustriellen Zeitraum starten. Damit werden mögliche atmosphärische Ausgangszustände berücksichtigt.

4.2. Methoden

Für die Ermittlung der zu erwartenden Klimaveränderungen im Untersuchungsgebiet wird das Regionale Klimamodell WETTREG (Version: WR13_v02) (Kreienkamp, Spekat und Enke 2013) verwendet. Seinen Antrieb bezieht WETTREG aus einem Ensemble aus Szenarioläufen von GCM. Aus finanziellen und zeitlichen Gründen konnte nur eine begrenzte Anzahl an Szenarioläufen gerechnet werden. Es wurde sich für das in Hamburg betriebene GCM ECHAM5 und MPI-ESM-LR entschieden. ECHAM wurde in der Vergangenheit schon vielfach und erfolgreich für Mitteleuropa angewandt. Das aktuelle Modell heißt MPI-ESM-LR und liefert für Sachsen plausiblere Ergebnisse als andere international anerkannte Modelle, wie HAD und MIROC. Letztere lieferten extreme Temperaturanstiege und sommerliche Trockenzeiten bis 2100. Mit WETTREG sind solche Extreme methodisch nicht umsetzbar. Als Szenarien für die Treibhausgasemissionen bzw. Konzentrationen wurde einerseits das SRES A1B verwendet, um einen Vergleich mit den zahlreich angefertigten Studien zum Klima und dessen Auswirkungen in Deutschland und Europa zu ermöglichen. Um der aktuellen Philosophie des IPCC zu folgen, wurden andererseits die RCP-Konzentrationsszenarien berücksichtigt. Um die Spannbreite zukünftiger Entwicklungen aufzuzeigen, wird empfohlen mindestens RCP 2.6 und RCP 8.5 zu verwenden⁴. Das Szenario RCP 2.6 approximiert die atmosphärischen Bedingungen unter Einhaltung des Ziels, die globale Erwärmung am Ende des 21. Jahrhunderts unterhalb von 2 Grad bezüglich des vorindustriellen Niveaus zu halten. Jedoch werden zwischendurch Temperaturen von über 2 Grad erreicht. Über Kohlendioxidabscheidung und -speicherung wird der Atmosphäre wieder soviel Kohlendioxid entzogen, dass die Temperatur wieder sinkt. Dem Szenario RCP 8.5 werden ein starkes Bevölkerungswachstum und weiterhin steigende Treibhausgasemissionen unterstellt.

Im Rahmen von NEYMO wird folgendes Ensemble des Typs Multi-Modell-Multi-Szenario genutzt:

- ECHAM5 MPI-OM A1B, Lauf 1 ("A1B")
- MPI-ESM-LR RCP 2.6, Lauf 1 ("RCP 2.6")
- MPI-ESM-LR RCP 8.5, Lauf 1 ("RCP 8.5,L1")
- MPI-ESM-LR RCP 8.5, Lauf 2 ("RCP 8.5,L2")
- MPI-ESM-LR RCP 8.5, Lauf 3 ("RCP 8.5,L3")

Da lediglich eine Auswahl von Modellen zur Analyse verwendet wird, können die Modelle nicht notwendigerweise den vollständigen Bereich möglicher Resultate und Unsicherheiten umfassen.

Die Methode der Erstellung von regionalen Klimaprojektionen mit WETTREG besteht aus drei wesentlichen Schritten (Kreienkamp et al. 2013a), die in Box 3 erläutert werden.

⁴ <http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-report-scenarios.pdf>

Box 3: Erstellung von regionalen Klimaprojektionen mit WETTREG

1. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass Wetterlagen ein Bindeglied zwischen der großräumigen und der regionalen Skala sind. Bei WETTREG werden Wertebereiche eines regionalen meteorologischen Parameters festgelegt. Es wird analysiert, welche Wetterlagen zu den einzelnen Wertebereichen gehören. In der Folge werden z. B. 12 unterschiedlich „kalte“ oder „warme“ bzw. 8 unterschiedlich „trockene“ oder „niederschlagsreiche“ Klassen gebildet. Zur Definition der klassenspezifischen Wetterlagen werden Klimadaten der Gegenwart verwendet. Als Nächstes erfolgt der Übergang von den Klimadaten zu den Ergebnissen von Klimamodellen. Diese liegen in Form von täglichen „Wetterkarten“, also der Verteilung verschiedener atmosphärischer Größen vor. Es wird nun eine objektive Ähnlichkeitssuche durchgeführt, um für die simulierten atmosphärischen Verhältnisse an einem Tag der Zukunft die ihm am besten entsprechende Klasse zu ermitteln. Es entstehen Häufigkeitsverteilungen der Klassen, die Szenario-spezifisch sind und sich im Simulationszeitraum verändern. Sie bilden den Antrieb für den zweiten Schritt.

2. Nach dem Prinzip des Setzkastens werden segmentierte Zeitreihen meteorologischer Parameter aus der Gegenwart zu neuen Zeitreihen zusammengesetzt. Dies geschieht erst einmal zufällig. Im Weiteren wird den Zeitreihen die sich ändernde Häufigkeit der Wetterlagen in der Zukunft aufgeprägt. Mit diesem stochastischen Wettergenerator werden folglich alternative Varianten des Gegenwartsclimas – in Abhängigkeit von einer Klimaprojektion, basierend auf einem Treibhausgasszenario – erzeugt.

3. Es wird davon ausgegangen, dass sich die zukünftigen Klimaänderungen in den Modellsimulationen nicht allein in „Makro-Größen“, wie etwa simulierten Wetterlagen widerspiegeln. In einem weiteren Verfahrensschritt erfolgt über statistische Regressionsbeziehungen das Einarbeiten von Änderungen physikalischer Größen direkt aus den Modellsimulationen. Für eine Zielgröße (z. B. die Temperatur in Bodennähe) wird eine Kombination aus bis zu vier verschiedenen atmosphärischen Größen ermittelt (z. B. das Geopotenzial im Niveau 850 hPa, die Strömungsdivergenz in 700 hPa), die eine bestmögliche Korrektur der synthetisierten Zeitreihen gewährleistet.

Die statistischen Verfahren sind rechentechnisch nicht aufwendig, weshalb leicht mehrere statistisch gleich wahrscheinliche Versionen einer Klimaprojektion, sogenannte Realisierungen, erzeugt werden können. Die hier berechneten 10 Realisierungen können einzeln für weitere Anwendungen genutzt werden. Oft wird vom Nutzer jedoch das Mittel der Läufe verwendet. Eine Mittelung sollte erst ab der Aggregierungsstufe Monat durchgeführt werden. Um zum Beispiel ein mittleres Klimasignal der Temperatur zu erhalten, können die Werte zu Monaten aggregiert und dann gemittelt werden. Anders bei sogenannten Kenntagen: So werden z. B. Tage mit mehr als 10 mm Niederschlag zunächst separat in den zehn Realisierungen berechnet. Anschließend wird aus den zehn Kenntage-Zählungen das arithmetische Mittel gebildet. Wenn nicht anders angegeben, wird hier das Mittel der zehn WETTREG-Läufe genutzt.

Bei ECHAM5 handelt es sich bis zum modellierten Jahr 2001 um sogenannte Re-Simulationen des Gegenwartsclimas (bis 2006 bei MPI-ESM). Diese werden zur Ermittlung von Klimasignalen benötigt, welche die Differenz zwischen den meteorologischen Parametern einer gegenwärtig simulierten und einer zukünftig simulierten Periode darstellen. Werden gemessene Daten der Gegenwart mit für die Zukunft simulierten Daten verglichen, so besteht das Risiko, dass systematische Modellfehler die Ergebnisse verfälschen.

Um zu ermitteln, ob das Änderungsverhalten einer simulierten meteorologischen Variablen ein Signal darstellt oder der natürlichen Klimavariabilität in der Gegenwart entspricht, sind die Vertrauensbereiche des Mittelwerts zu bestimmen (Kreienkamp und Spekat 2011). Mit Hilfe der Standardabweichung der Variablen innerhalb der Referenzperiode 1971-2000 erfolgt die Bestimmung der Vertrauensgrenzen des Mittelwerts. Der Vertrauensbereich gibt mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit (hier: 10 %) den Bereich an, den die zeitliche Entwicklung einer projizierten Klimavariablen verlassen muss, um als deutliches Signal bezeichnet werden zu können.

4.3. Ergebnisse

Validierung von WETTREG

Zur Überprüfung der Modellgüte werden die beobachtete und die mit WETTREG modellierte Klimatologie für den Zeitraum 1971-2000 miteinander verglichen. Ist die Differenz nahe Null, werden die klimatischen Größen adäquat abgebildet. Die Übereinstimmungen bei den beiden Simulationen ECHAM5 A1B-Lauf und MPI-ESM RCP-Lauf 1 mit den Beobachtungen sind:

- für die mittlere, minimal und maximale Lufttemperatur gut bis sehr gut ($\pm 0,3$ °C),
- für den Niederschlag gut ($\pm 5\%$, im Winter $\pm 10\%$),
- für die Sonnenscheindauer gut ($\pm 0,2$ Stunden),
- für den Wind mäßig bis gut ($\pm 0,2$ m/s, Bergland bis zu ($\pm 0,4$ m/s)

Damit ist die Güte der Modellierung vergleichbar mit vielen anderen Regionalen Klimamodellen (Jacob et al. 2007).

Klimaprojektionen

Die Auswirkungen der Klimaveränderungen werden international oft für zwei Zeitscheiben dargestellt: für die nahe Zukunft 2021-2050 und für die ferne Zukunft 2071-2100. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts ist das Klimaänderungssignal oft nicht eindeutig bzw. recht schwach. Um langfristige Anpassungen an den Klimawandel - der ab Mitte des Jahrhunderts verstärkt zum Tragen kommt - zu ermöglichen, wird hier auf die Periode 2071-2100 fokussiert. Exemplarisch werden zusätzlich Ergebnisse für die nahe Zukunft bzw. für die Gesamtperiode dargestellt. Vorteil der nahen Zukunft ist die geringere Unsicherheit bezüglich der Emissions- bzw. Konzentrationsszenarien.

Wenn im Folgenden von einem Szenariolauf gesprochen wird, z. B. A1B, so sind damit die Ergebnisse des Regionalmodells WETTREG gemeint, die den genannten Globalmodelllauf mit dem jeweiligen Szenario als Antrieb haben. Die Ergebnisse für Niederschlag und Temperatur stellen sich wie folgt dar:

- Für die *Jahresmitteltemperatur* sind bei den Szenarien A1B und RCP 8.5 Zunahmen in der Größenordnung von 3,2 - 3,7 °C in der fernen Zukunft zu erwarten (Abbildung 17). Der 3. Lauf des RCP 8.5 Szenarios ist mit einem mittleren Signal von 3,7 °C um 0,3 °C höher als die anderen zwei Läufe. Bei der RCP 2.6-Projektion ist mit 1°C ein deutlich niedrigerer Temperaturanstieg zu verzeichnen.

- Der *Niederschlag im Sommerhalbjahr* nimmt bei dem A1B und den RCP 8.5 Szenarien um rund 12 % ab (Abbildung 18). Aus dem Vergleich der drei RCP 8.5 Läufe wird die modellinterne Variabilität deutlich. Nur durch geänderte atmosphärische Anfangsbedingungen können bei sonst gleichen Modellen und Emissionsszenarien abweichende Klimasignale resultieren. Beim 3. RCP 8.5 Lauf ist die Änderung mit -15 % am ausgeprägtesten, beim 2. Lauf sind es lediglich -7 %. Demzufolge müssen extreme Konzentrationsszenarios nicht zwangsläufig zu starken Niederschlagsabnahmen führen. Beim RCP 2.6-Szenario ist zwar ebenfalls eine sommerliche Abnahme ersichtlich, jedoch nur in einer Größenordnung von 2 %.
- Die *Niederschlagszunahmen im Winterhalbjahr* unterscheiden sich nur wenig zwischen den 5 Globalmodellantrieben (Abbildung 19). Mit 3 % ist die winterliche Zunahme bei der RCP 2.6-Projektion am geringsten und mit 10 % beim 2. RCP 8.5 Lauf am höchsten.

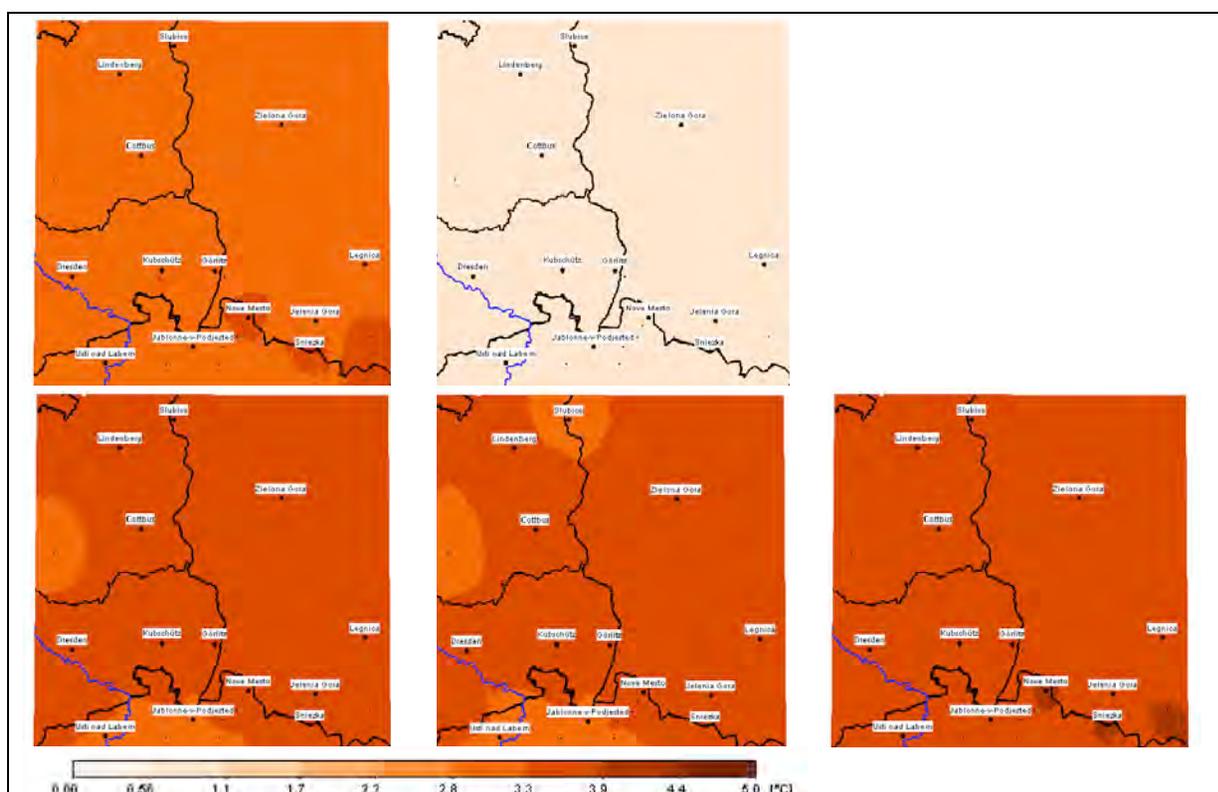


Abbildung 17: Klimaänderungssignal der Temperatur für die Periode 2071-2100 gegenüber 1971-2000. Dargestellt ist die mittlere Realisierung mit WETTREG auf der Grundlage von fünf Szenarioläufen (von links oben nach rechts unten): A1B, RCP 2.6, RCP 8.5,L1, RCP 8.5,L2, RCP 8.5,L3.

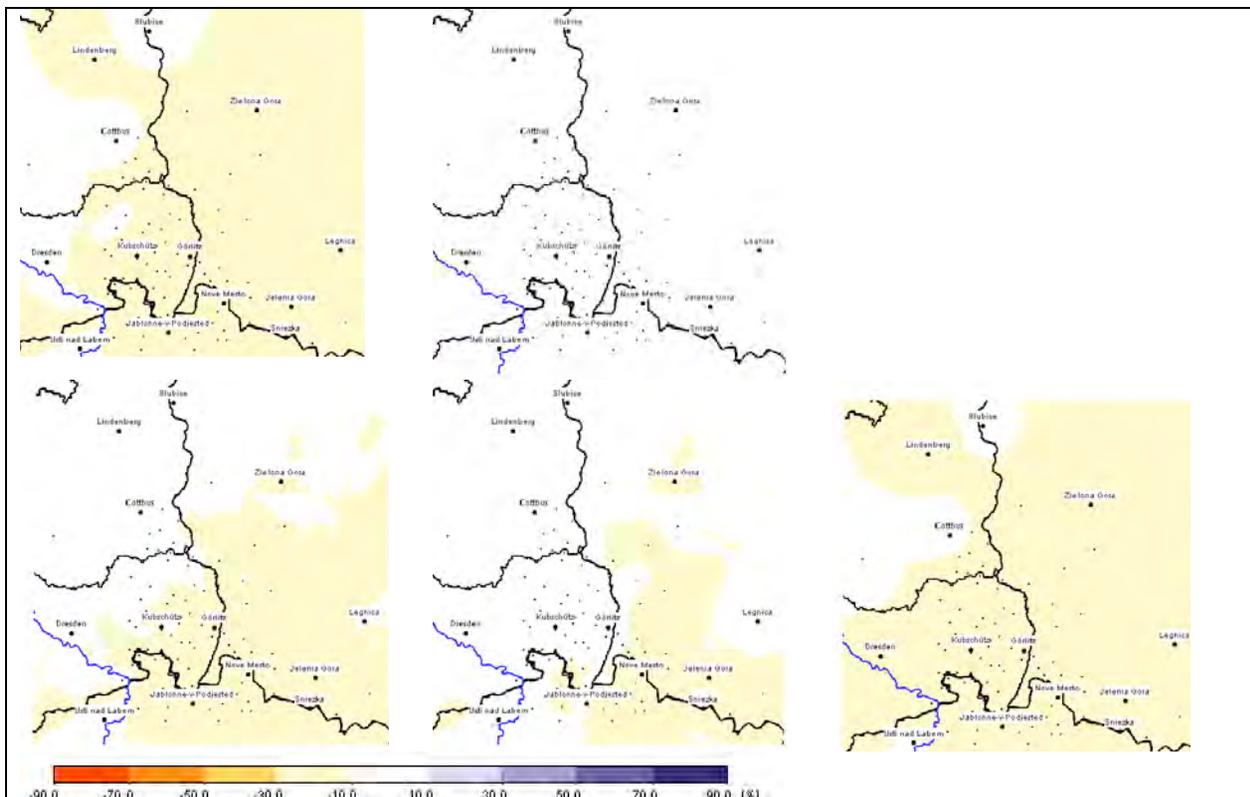


Abbildung 18: Klimaänderungssignal des Niederschlags im Sommerhalbjahr für die Periode 2071-2100 gegenüber 1971-2000. Dargestellt ist die mittlere Realisierung mit WETTREG auf der Grundlage von fünf Szenarioläufen (von links oben nach rechts unten): A1B, RCP 2.6, RCP 8.5,L1, RCP 8.5,L2, RCP 8.5,L3.

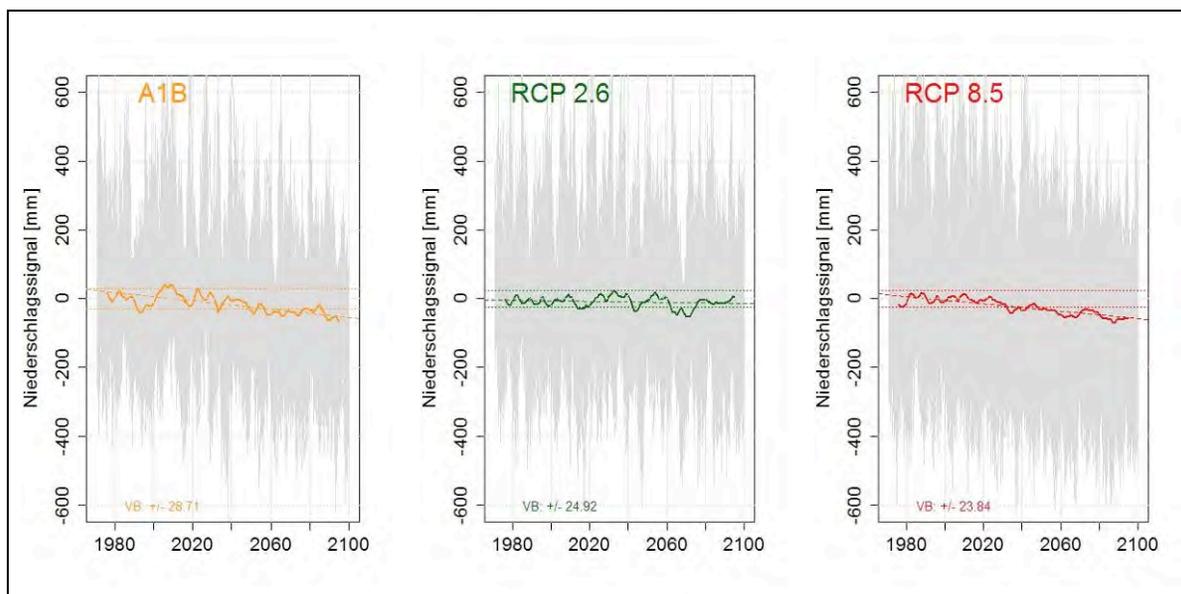


Abbildung 20: Sämtliche projizierte WETREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung des Niederschlags. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen.

Die Variabilität der Temperatur zwischen den Realisierungen eines Modelllaufs ist weniger ausgeprägt als die Variabilität des Niederschlags (Abbildung 21). Die Trends ähneln sich bei den Projektionen A1B und RCP 8.5 und betragen zwischen +3,2 und +4 °C. Ab dem Jahr 2020 übersteigt der Anstieg die natürliche Variabilität, womit ein starkes, signifikantes Temperatursignal vorliegt. Beim RCP 2.6 Szenario fällt der positive Trend mit ca. +1 °C wesentlich geringer aus. Bis Mitte des Jahrhunderts werden ein Anstieg und nachfolgend eine Stabilisierung der Temperatur projiziert. Hier greifen die für das Szenario angenommenen Reduzierungen der Kohlendioxidemissionen sowie der hypothetischen Maßnahmen für die Kohlendioxidabscheidung und -speicherung. Auffällig ist des Weiteren die verringerte mehrjährige Variabilität in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts.

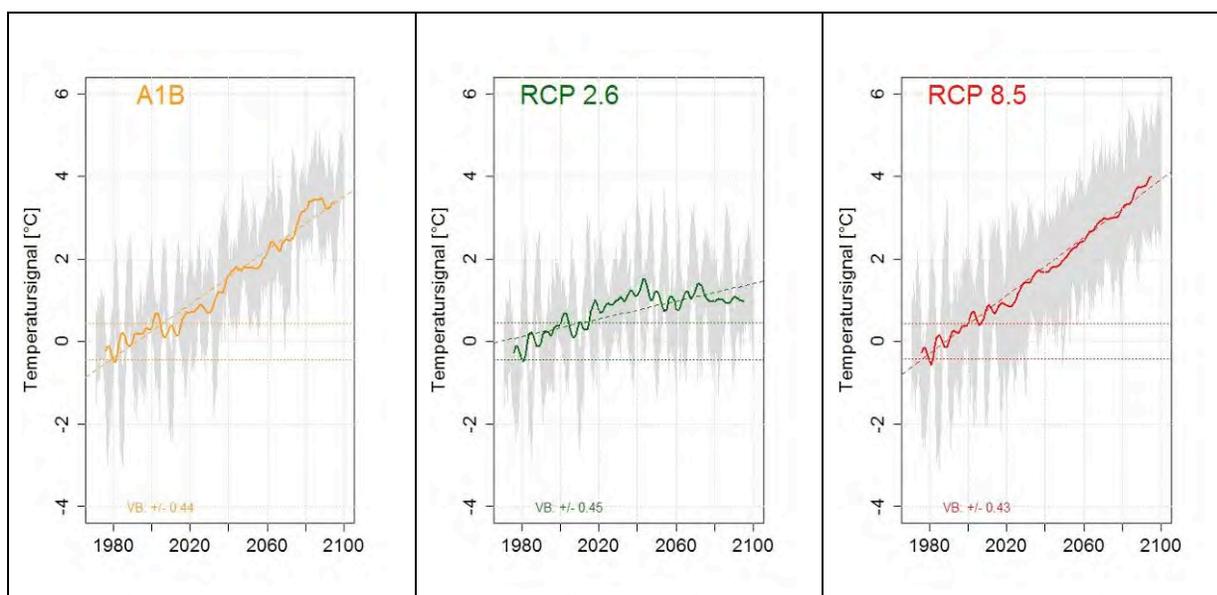


Abbildung 21: Sämtliche projizierte WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Tagesmitteltemperatur. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen.

Um die Auswirkungen der Klimaänderungen auf das Wasserregime im Einzugsgebiet abschätzen zu können, werden weitere Kenngrößen betrachtet (Abbildung 22):

- Die Sonnenscheindauer weist über die Szenarien A1B und RCP 8.5 einen signifikanten, trendhaften Anstieg um ca. 300 Stunden auf. Ein schwaches Signal von ca. 80 Sonnenstunden mehr im Jahr wird für RCP 2.6 projiziert.
- Wie ihre Einflussfaktoren Temperatur und Einstrahlung nimmt auch die potentielle Verdunstung signifikant zu: um +30 mm bei RCP 2.6 und um bis zu +110 mm bei RCP 8.5 und A1B.
- Die Klimatische Wasserbilanz – als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung – nimmt in allen Szenarien ab: bei gemäßigten zukünftigen Treibhausgaskonzentrationen um 50 mm bei starken um bis zu 200 mm. Während sich die Klimatische Wasserbilanz bei A1B und RCP 8.5 ab dem Jahr 2020 stetig vermindert, stabilisiert sie sich bei RCP 2.6.

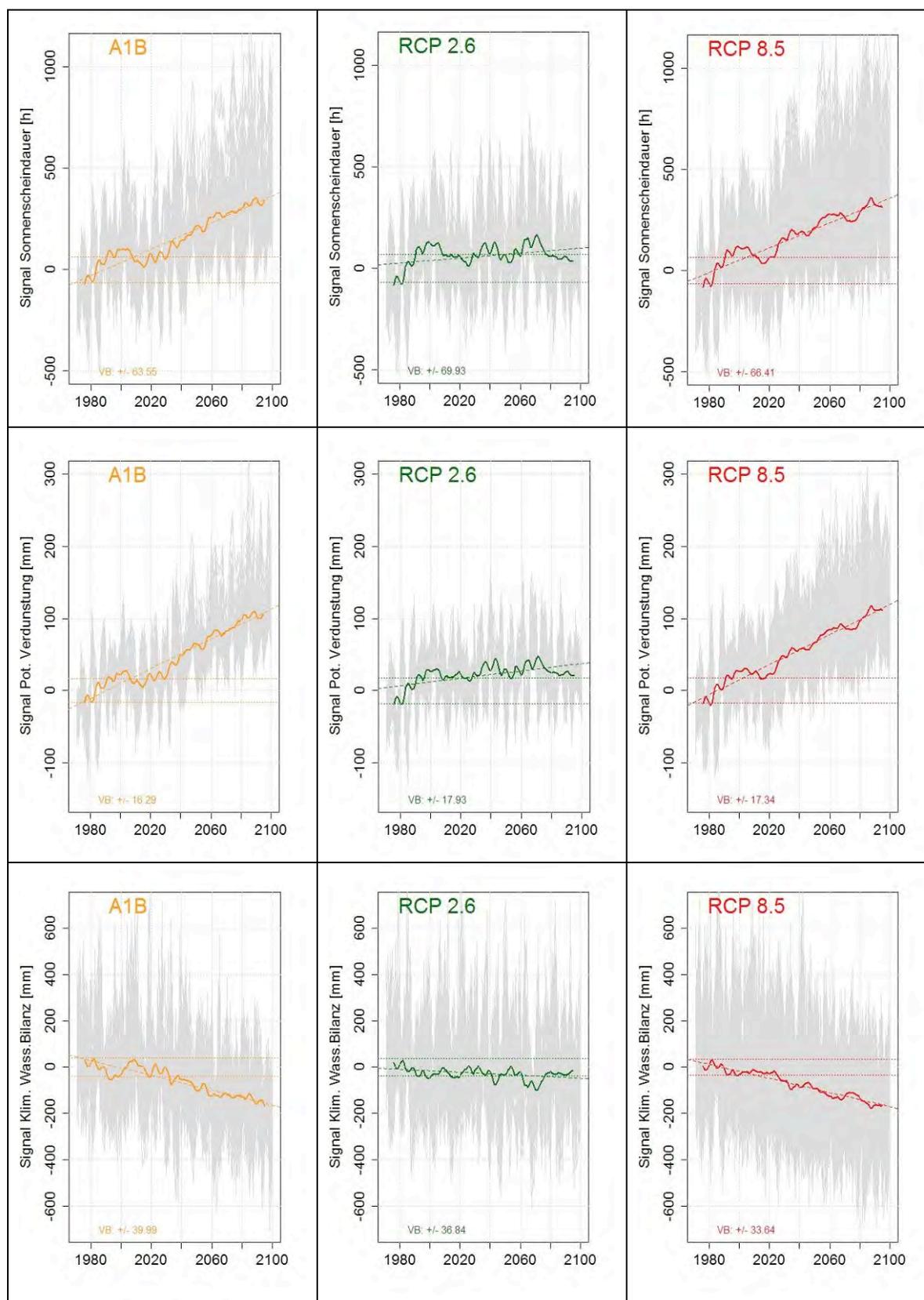


Abbildung 22: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Sonnenscheindauer, potentiellen Verdunstung und Klimatischen Wasserbilanz (Jahreswerte). Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen.

Die KWB ist von den hier gewählten Kennwerten der aussagekräftigste für die zukünftige Wasserverfügbarkeit im Gebiet. Da sich die KWB im Winterhalbjahr nicht ändert, wird im Folgenden das Sommerhalbjahr in der fernen und nahen Zukunft analysiert. Zur Untersuchung der Fragestellung, ob es regionale Unterschiede im Gebiet gibt, werden die Klimastationen die tiefer als 350 m liegen und solche die höher bzw. gleich 350 m liegen zusammengefasst.

Die KWB nimmt im Sommerhalbjahr im gesamten Untersuchungsgebiet ab (Abbildung 23). In der nahen Zukunft sind dies bei RCP8.5 und A1B zwischen 40 und 100 mm weniger. Für RCP 2.6 ist die Veränderung mit -25 bis -30 mm noch im Bereich der natürlichen Variabilität. In den höheren Regionen (>350 m) vermindert sich die Wasserverfügbarkeit stärker als in flacheren Regionen. Gegen Ende des Jahrhunderts reduziert sich das Wasserangebot bei den Szenarien RCP8.5 und A1B drastisch, im Durchschnitt über die Stationen der jeweiligen Höhenlage um 120 bis 170 mm. Sogar Reduktionen um bis zu 260 mm sind in höheren Regionen vorstellbar (RCP 8.5, L3). Beim RCP 2.6 Szenario sind die Auswirkungen mit durchschnittlich -40 mm moderat. Die absoluten Änderungen sind in höheren Lagen stets höher. Prozentual unterscheiden sich Änderungen in den Höhenlagen nur wenig.

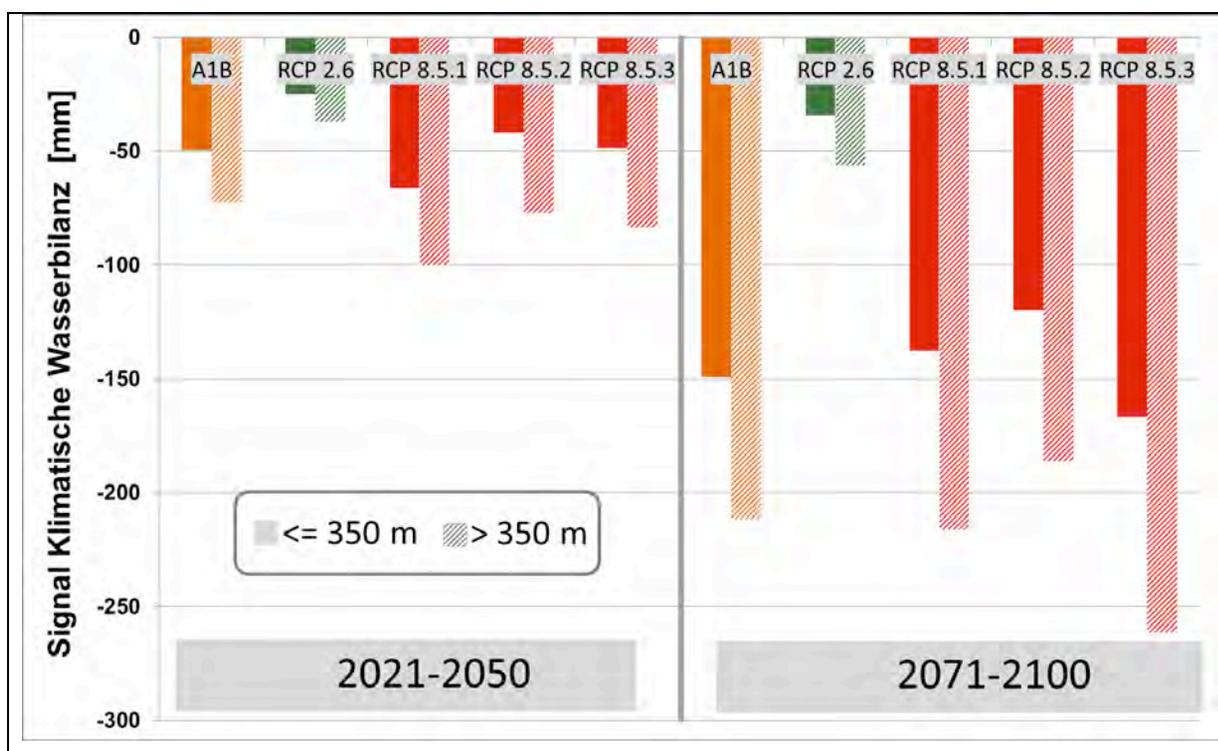


Abbildung 23: Signal der Klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr für die ferne und die nahe Zukunft. Dargestellt ist das Mittel von acht Klimastationen unterhalb von 350 m und von drei Klimastationen oberhalb von bzw. gleich 350 m.

Das zukünftige Verhalten der Starkniederschläge wird anhand der Kennwerte aus dem Kapitel 5.4 für das Mittel aller Station im Gebiet für die Halbjahre analysiert (Abbildung 24 und Abbildung 25):

- Die Anzahl der Tage mit mindestens 10 mm Niederschlag ist bis auf das Szenario RCP 2.6 für im Sommerhalbjahr rückläufig, wobei das Klimasignal nur schwach ist. Die Variabilität von Jahr zu Jahr ist sehr ausgeprägt. So kann sich die Anzahl an Starkniederschlagstagen um bis zu 40 Tage unterscheiden.

Die Trendlinie der Tage mit mindestens 20 mm Niederschlag im Sommerhalbjahr verlässt erst gegen Ende des Jahrhunderts knapp den Bereich der natürlichen Variabilität. Daher wird das Signal nicht interpretiert.

- Für den maximalen Tagesniederschlag im Sommerhalbjahr werden bei allen Projektionen bis zum Jahr 2100 keine signifikanten Tendenzen modelliert. Es werden wiederholt extreme Niederschläge simuliert, z. B. für Görlitz mehr als 80 mm pro Tag. Das sind Werte, die über den 1981 und 2002 gemessenen liegen (ca. 73 mm).

Der maximale 5-Tagesniederschlag weist - mit Ausnahme des RCP 2.6 - bei allen Projektionen negative, unterschiedlich starke Trends im Sommerhalbjahr auf. Auch dieser aufsummierte Niederschlag überschreitet des Öfteren Extremwerte, z.B. für Görlitz 160 mm (beobachtete Werte 1981: 172 mm, 2002: 118 mm).

Für alle vier Starkniederschlagsindikatoren liegen keine Klimaänderungssignale im Winterhalbjahr vor.

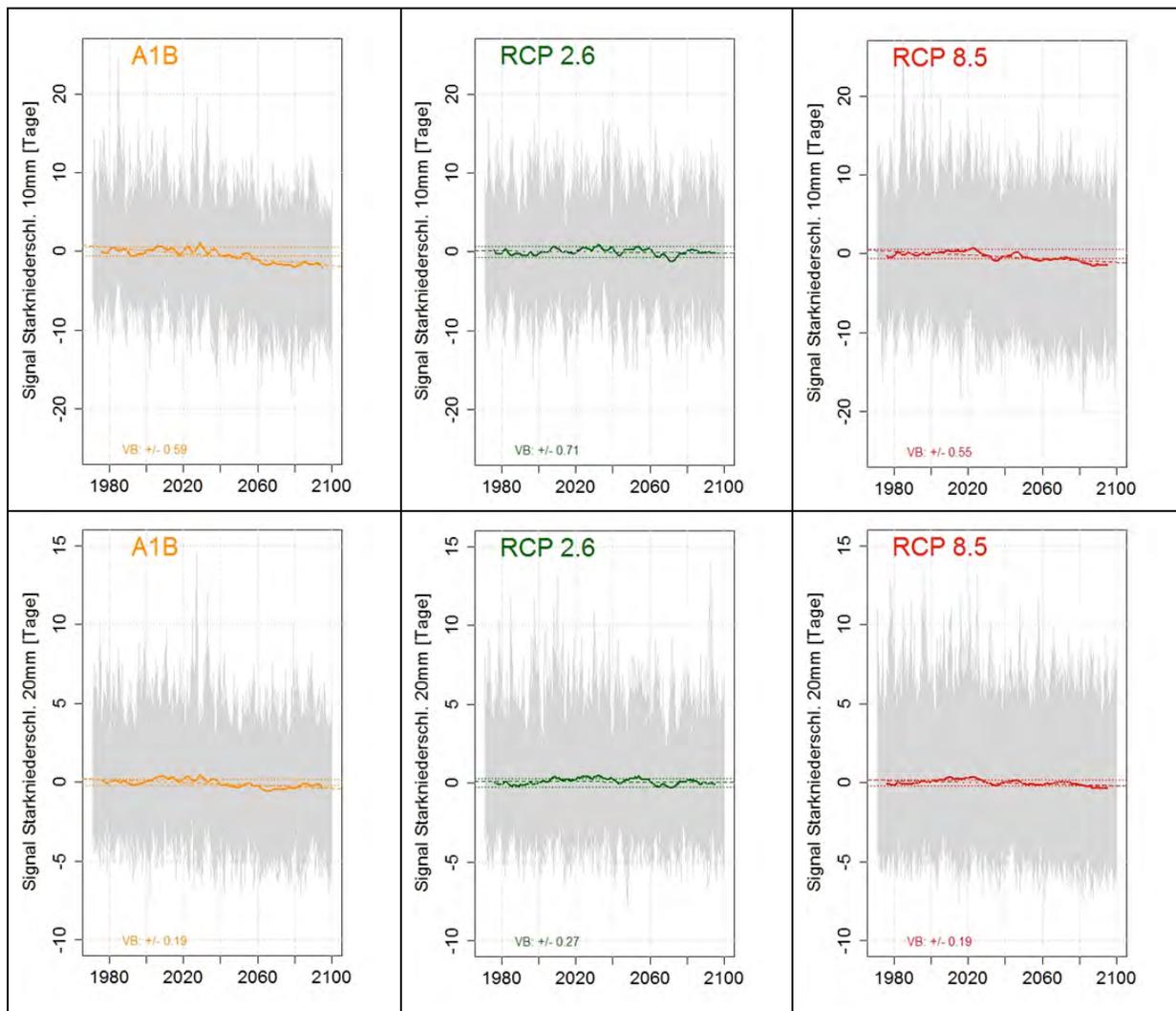


Abbildung 24: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Starkniederschläge R10mm und Extremniederschläge R20mm im Sommerhalbjahr. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen.

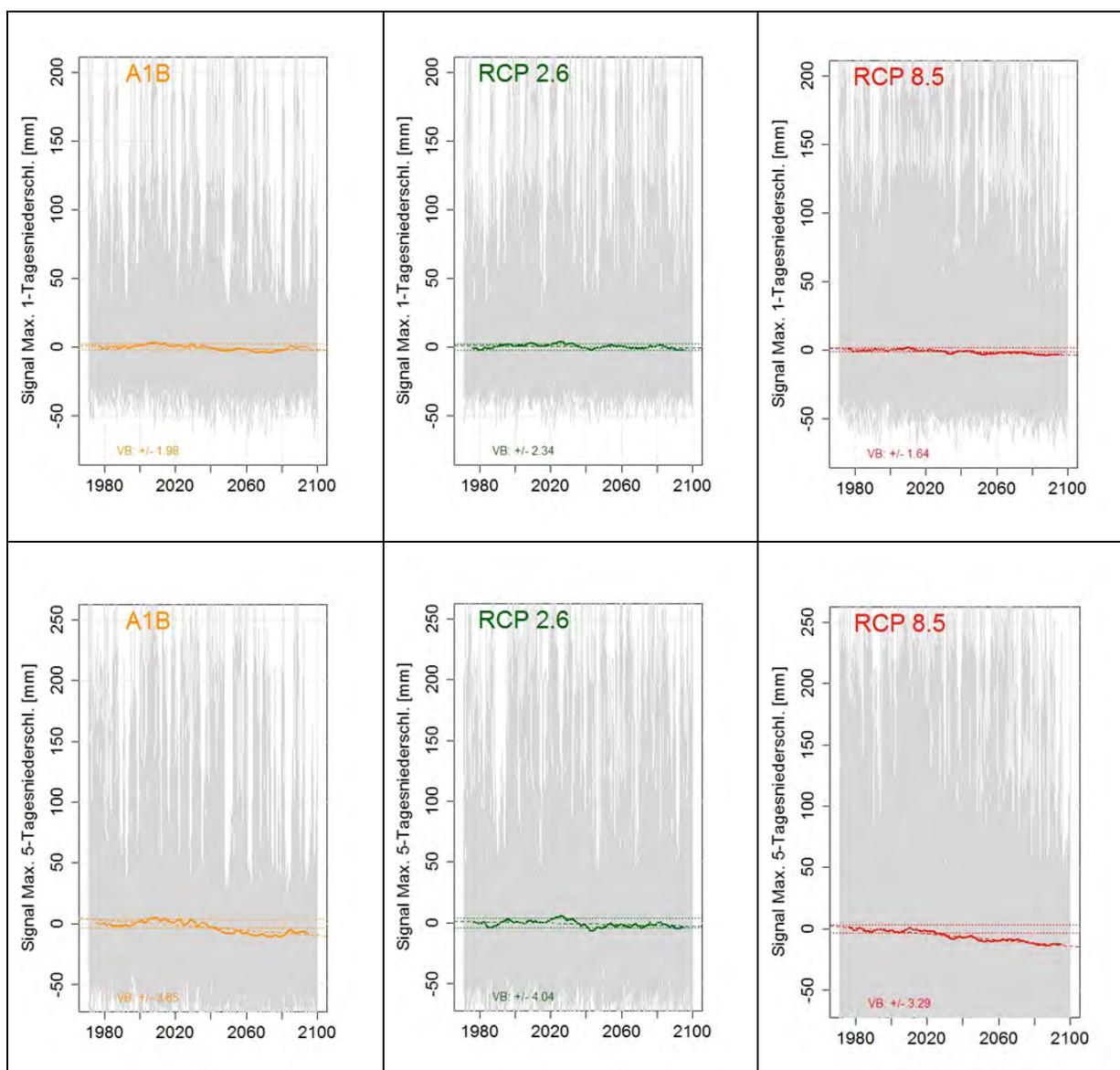


Abbildung 25: Sämtliche projizierte WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung des maximalen 1-Tagesniederschlags (RX1day) und 5-Tagesniederschläge (RX5day) im Sommerhalbjahr. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen.

Die ausschließlich auf Niederschlagsdaten beruhenden Trockenindizes Trockenperiode (DP) und Standardisierter Niederschlagsindex (SPI) werden verwendet, um Anhaltspunkte für die zukünftigen Feuchtebedingungen für Land-, Forst- und Wasserwirtschaft zu erhalten (Abbildung 26).

- Die Trockenperiodendauer weist unter keinem Szenario, weder im Sommer, noch im Winterhalbjahr Trends auf. Die Dauer schwankt zwar über die Zeit, überschreitet aber nur selten und kurz den Bereich der natürlichen Variabilität.

- Bezüglich der Häufigkeit von Trockenperioden weisen die Ergebnisse der Szenarien A1B und RCP 8.5 auf eine leichte, aber nicht signifikante Zunahme im Sommerhalbjahr hin. Keine Änderungen sind beim RCP 2.6 Lauf ersichtlich. Auch im Winterhalbjahr bleibt die Häufigkeit unverändert.
- Bei einer geringen Veränderung der Treibhausgasemissionen (RCP 2.6), bleibt der SPI12 konstant. Für die übrigen Szenarien ergibt sich ein Rückgang im Sommer- und Winterhalbjahr, der mit langfristig, zunehmend trockeneren Verhältnissen gleichzusetzen ist. In der nahen Zukunft liegen die Feuchtigkeitsverhältnisse zwar noch leicht über dem Durchschnitt, was sich mit den beobachteten Trends deckt. Nachfolgend stellt sich in der fernen Zukunft jedoch ein schwaches, negatives Signal ein. Das Ausmaß der Veränderungen wird nicht sicher projiziert, wie ein Vergleich der drei RCP 8.5 Läufe verdeutlicht (hier nicht gezeigt).

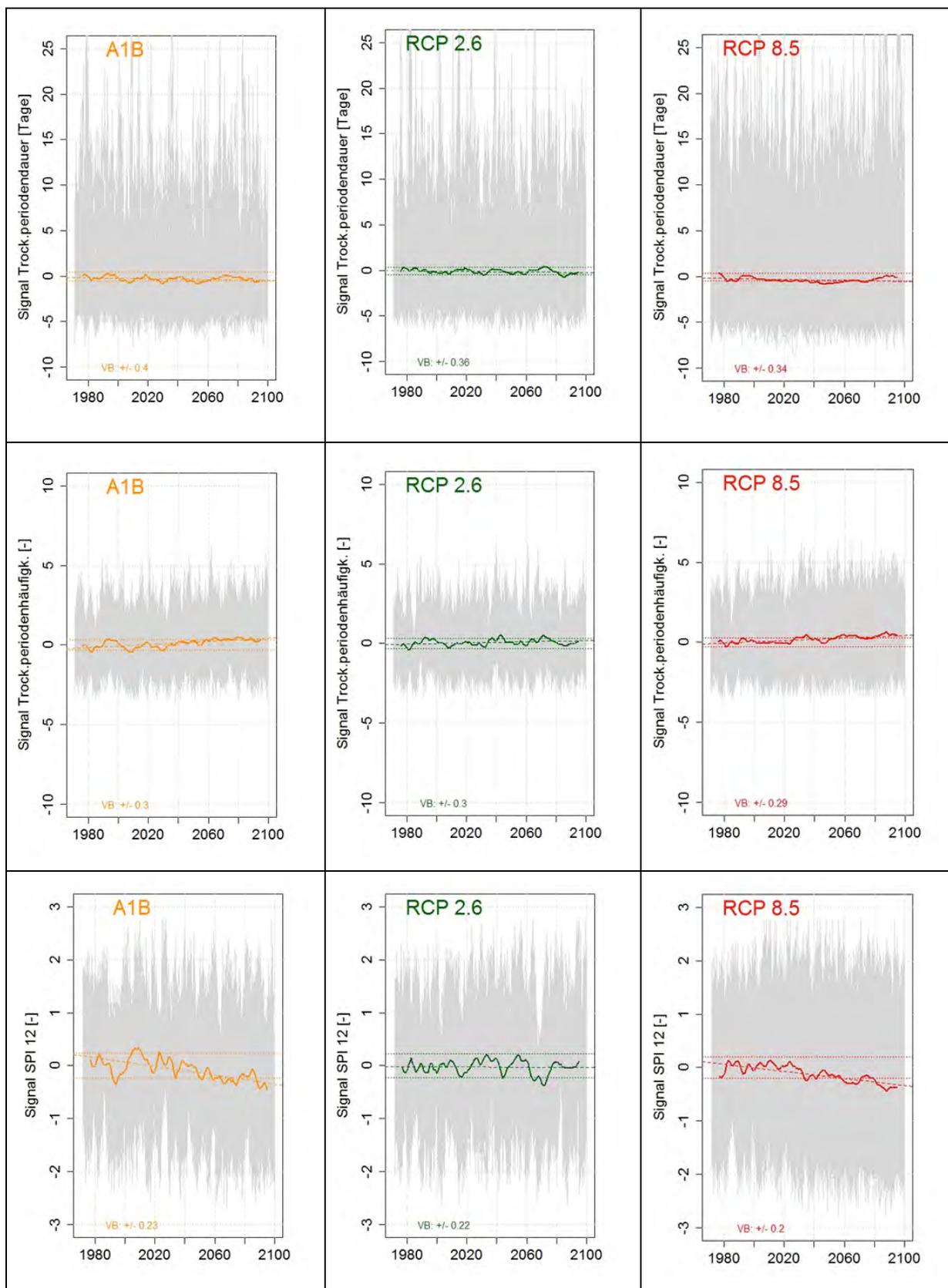


Abbildung 26: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung Trockenperiodendauer, -häufigkeit und des Standardisierten Niederschlagsindex im Sommerhalbjahr. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen.

Veränderungen werden auch beim projizierten Temperaturregime deutlich (Abbildung 27):

- So nehmen die täglichen Temperaturschwankungen zukünftig signifikant zu, besonders stark bei den A1B und RCP 8.5 Szenarien. Grund hierfür ist wahrscheinlich die ansteigende Sonnenscheindauer, die mit einer Abnahme der Bewölkung einhergeht. Neben der tendenziell erhöhten Erwärmung tagsüber kommt es zu einer gleichzeitig erhöhten nächtlichen Abkühlung.
- Die extremen Temperaturschwankungen nehmen bei den Szenarien A1B und RCP 8.5 jedoch ab. Ursache hierfür sind wahrscheinlich Änderungen in den Häufigkeiten von Wetterlagen, die im Rahmen des Projektes jedoch nicht analysiert wurden.
- Erhöhte Temperaturen in der Zukunft führen zu einer signifikanten Verlängerung der Vegetationsperiode um 30 bis 80 Tage, je nach Szenario.

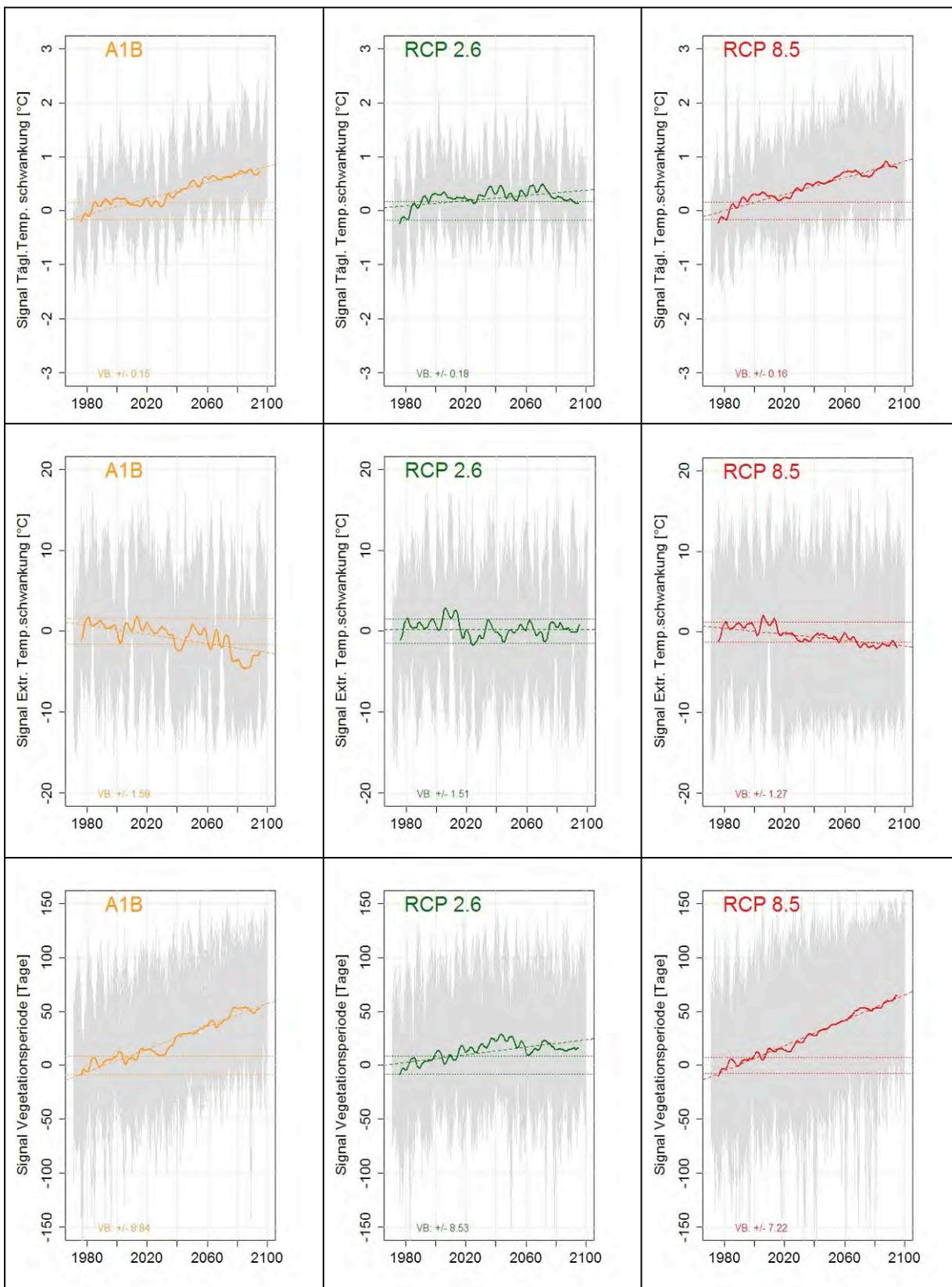


Abbildung 27: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Täglichen und Extremen Temperaturschwankungen sowie der Vegetationsperiode. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen.

4.4. Zusammenfassung

Die mit dem statistischen Regionalen Klimamodell WETTREG erstellten Szenarien ermöglichen die Betrachtung eines breiten Spektrums an möglichen Ausprägungen des zukünftigen Klimas in der Untersuchungsregion. Das dafür verwendete Ensemble aus Treibhausgasszenarios und Modellen wurde aus zeitlichen und finanziellen Gründen jedoch eingeschränkt, weshalb nicht die gesamte Bandbreite des möglichen zukünftigen Klimas abgebildet wird. Das RCP 2.6 Szenario geht von relativ geringen und das RCP 8.5 Szenario von sehr starken, aber durchaus realistischen Treibhausgasemissionen aus.

Bis Mitte des 21. Jahrhunderts sind die Veränderungen der meisten Klimavariablen noch nicht gravierend, d. h. sie verlassen oft nicht den Bereich ihrer natürlichen Variabilität. Der Fokus der Analyse liegt daher auf den Jahres- bzw. Halbjahreswerten aus dem Zeitraum 2071-2100 und in einem ersten Schritt auf dem arithmetischen Mittel aller verfügbaren Klimastationen:

- Die Jahresmitteltemperaturen steigen um 1 bis ca. 3,7 °C.
- Die täglichen Temperaturschwankungen nehmen zu, extreme Temperaturschwankungen jedoch ab.
- Die Vegetationsperiode verlängert sich um 30 bis 80 Tage.
- Sommerniederschläge sind mit 2 bis 15 % rückläufig.
- Winterniederschläge nehmen um 3 bis 10 % zu.
- Die Sonnenscheindauer steigt um 80 bis 300 Stunden pro Jahr.
- Die Potentielle Verdunstung nimmt um 30 bis 110 mm zu.
- Die Klimatische Wasserbilanz reduziert sich um 50 bis 250 mm.
- Gemäßigte Starkniederschläge nehmen im Sommerhalbjahr ab, extreme Starkniederschläge zeigen keine eindeutige Tendenz.
- Trockenperioden von mindestens 11 Tagen Dauer weisen keinen Trend in der Dauer und nur eine leicht erhöhte Häufigkeit im Sommerhalbjahr auf.
- Der über 12 Monate integrierende SPI12 bleibt konstant bzw. nimmt leicht ab und lässt somit auf zunehmend trockenere Verhältnisse schließen.

Im Vergleich zu den beobachteten Tendenzen der Vergangenheit kann festgestellt werden, dass sich die positiven Trends aus der Vergangenheit bei den Temperatur- und Einstrahlungskennwerten in der Zukunft fortsetzen. Beim Niederschlag kehrt sich der Trend jedoch um, es wird trockener. Das führt insgesamt zu einer deutlichen Verschlechterung der verfügbaren Wasserressourcen im Sommerhalbjahr. Ob sich die hydrologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet ähnlich ungünstig in der Zukunft gestalten, wird mit Hilfe eines Hydrologischen Modells geprüft (siehe Kapitel 6). Untersuchungen mit globalen Klimamodellen (IPCC 2013) weisen auf einen Rückgang des Abflusses und der Bodenfeuchte hin (Abbildung 28).

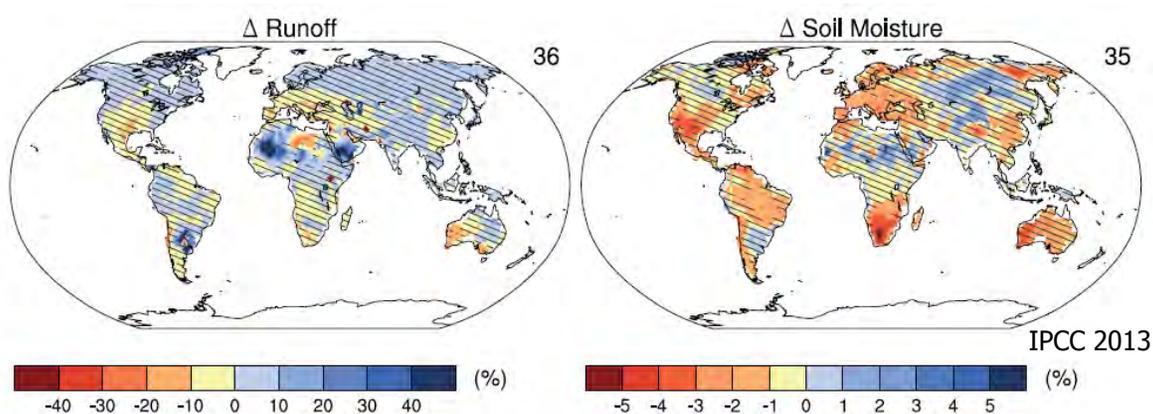


Abbildung 28: Veränderungen des Abflusses (links) und der Bodenfeuchte (rechts) für die Periode 2016-2035 im Vergleich zu 1986-2005. Grundlage sind CMIP5 Globalmodelle unter dem Szenario RCP 4.5. Die Anzahl der verwendeten Modelle ist rechts oben angegeben. Die Schraffur markiert Flächen, in denen das Klimasignal klein im Gegensatz zur modellinternen Variabilität ist (IPCC 2013).

Einschränkend wird darauf hingewiesen, dass die Untersuchungen vorerst größtenteils auf Jahresebene stattfanden. Das Verhalten im Jahresverlauf kann sehr unterschiedlich sein, wie das Beispiel der stark rückläufigen Klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr bei nahezu unveränderten Bedingungen im Winterhalbjahr zeigt. Die Unsicherheiten bei der Projektion des Klimas werden aus Vergleich von RCP 2.6 und RCP 8.5 deutlich. Die Spannweite reicht von keinen bis zu stark signifikanten Klimasignalen. Ein weiterer Teil der Unsicherheit – die interne Modellvariabilität – wird aus den Vergleichen der drei Läufe des RCP 8.5 Szenarios ersichtlich: Hier gibt es z.B. bei der Klimatischen Wasserbilanz Klimasignale im Sommerhalbjahr der fernen Zukunft die von -120 bis zu -165 mm reichen (Abb. 23). Es ist derzeit nicht möglich zu sagen, welcher der Läufe wahrscheinlicher ist, was die Bedeutung der Betrachtung von vielen Modellen, Szenarien und Rechenläufen unterstreicht.

In dieser Studie wurde auf das mittlere klimatische Verhalten auf Ebene von meteorologischen Halbjahren und das gesamte Untersuchungsgebietes fokussiert. Weitere Analysen sollten gezielt den Jahresgang der Veränderungen und mögliche regionale Unterschiede zum Inhalt haben.

5. Ausblick

Wie wirkt sich das projizierte Klima auf den Wasserhaushalt im Gebiet der Lausitzer Neiße aus? Wie reagiert das Gebiet auf weniger Niederschlag, bei gleichzeitig erhöhter Verdunstung? Verändern sich das Abflussregime und die Grundwasserneubildung? Werden Wassernutzungen unter geänderten Klimaverhältnissen beeinträchtigt sein? Diese und weitere Fragestellungen werden im zweiten Abschnitt des Projekts NEYMO, der sich mit dem Wasserhaushalt beschäftigt, untersucht. Die Ergebnisse werden in einer gesonderten Broschüre dargestellt.

Ziel dieser Etappe ist es, die Entwicklung des Wasserhaushalts unter veränderten Klimabedingungen zu berechnen und analysieren, um daraus den möglichen zukünftigen Zustand der Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße ableiten zu können. Aufgrund des starken anthropogenen Einflusses von Braunkohletagebauen und anderer Wasserbewirtschaftungen stellt eine umfassende Beurteilung der Wasserbilanz eine große Herausforderung dar. Ausgehend von der berechneten Wasserbilanz wird ein Maßnahmenkatalog erarbeitet, der für die Akteure der Region mögliche Handlungs- und Anpassungsmaßnahmen für eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen aufzeigen soll. Menschliche Tätigkeiten, die die Anfälligkeit der Ökosysteme, einschließlich der Nutzung der Wasserressourcen, beeinträchtigen, führen immer häufiger zu Änderungen im Regime der Ökosysteme und oft zu weniger günstigen Bedingungen. Mit Hilfe des Maßnahmenkatalogs soll das Bewusstsein der Wassernutzer erhöht werden und zur Umsetzung einer nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der Wasserressourcen beitragen.

Bevor die Wasserressourcen für zukünftige Bedingungen bewertet werden können, ist eine Analyse der vergangenen und gegenwärtigen Wasserbilanz erforderlich. Für alle Untersuchungen dienen die aufbereiteten meteorologischen Beobachtungsdaten und Daten aus der Projektion des Klimawandels als Eingang in Wasserhaushaltsmodelle, die für die Simulation der Wasserbilanz genutzt werden. Die genutzten Wasserbilanzmodelle sind komplexe Modelle, die den Bodenwasserhaushalt sowie die Wasserbewirtschaftungen im Gebiet der Lausitzer Neiße beschreiben. Es werden zwei verschiedene Modelle eingesetzt, die sich gegenseitig ergänzen und dabei ihre jeweiligen Stärken nutzen. Im Ergebnis existieren verschiedene Ausgabegrößen des Abflusses unter Berücksichtigung der Wassernutzungen für das Gesamteinzugsgebiet der Lausitzer Neiße.

Die gewonnenen Modellierungsergebnisse sind unter anderem hilfreich für:

- Braunkohletagebau zum Zwecke der Planung zukünftiger Aktivitäten in Bezug auf die Wasserrückgewinnung
- die Erteilung wasserrechtlicher Genehmigungen in Gemeinden, Landkreisen
- Wasserkraftwerke zum Zwecke der Planung künftiger Investitionen
- Potenzielle Anleger, deren Aktivitäten die Verwendung von Oberflächenwasser erfordern

Für weitere Analysen wird ein gekoppeltes Modellsystem, bestehend aus dem Wasserhaushaltsmodell und einem Grundwassermodell, erstellt. Das gekoppelte Modell ermöglicht die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer zu untersuchen. Die Kopplung soll zunächst nur für ein Pilotgebiet vorgenommen und getestet werden, da der Aufbau des Grundwassermodells sehr komplex ist und zunächst der Erkenntnisgewinn versus Aufwand abgeschätzt werden soll.

Die zweite Broschüre und der Maßnahmenkatalog erscheinen voraussichtlich im Herbst zum Projektende. Seien Sie auf die mögliche zukünftige Entwicklung des Wasserhaushalts, deren Folgen und mögliche Maßnahmen gespannt.



Literatur

Alexandersson H (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology* 6, S. 661-675.

Ångström A (1924): Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 50 (210), 121-126.

Atlas Podziału Hydrograficznego Polski, edited by H. Czarnecka, Warszawa 2005.

ATV-DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Merkblatt M 238, Bonn, 135 S.

ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Merkblatt M 504. Offenbach am Main, 108 S.

Bernhofer C, Franke J (2013): Aufbereitung meteorologischer Daten für die Verwendung im Klimamodell im Rahmen des Projektes Neymo. Abschlussbericht, 35 S, unveröff.

Buishand TA (1982): Some methods for testing the homogeneity of Rainfall Records. *Journal of Hydrology* 58, 11-27.

Bundesamt für Naturschutz BfN, (2009): Natura 2000 - Fauna-Flora-Habitatrichtlinie und Vogelschutzrichtlinie - Gebiete und Arten in Deutschland.

ESDB v2.0 (2004): The European Soil Database distribution version 2.0, European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN.

Craddock JM (1979): Methods for Comparing Annual Rainfall Records for Climatic Purposes. *Weather* 34, 322-346.

Dyck S (1976): *Angewandte Hydrologie Teil 1*. Verlag für Bauwesen, Berlin, 511 S.

Dyck S, Peschke G (1995): *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen, Berlin, 536 S.

European Climate Assessment & Dataset. Algorithm Theoretical Basis Document. December 2012. KNMI.

Głowicki B, 2003. Symptoms of contemporary warming in the 100-years series of temperature measurements on the Śnieżka Mountain. *Acta Univ. Wratisl.*, No 25.

Hann J (1897): *Handbuch der Klimatologie*. Engelhorn-Verlag, Stuttgart, 404 S.

IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, TF et al. (eds.)] Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jacob D et al. (2007) An inter comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Climatic Change* 81:31–52.

- Jarvis A, Hill Reuter, A Nelson, E Guevara, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Klein Tank A, Zwiers F, Zhang X. 2009. Guidelines on analysis of extreme in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72, WMO-TD No. 1500.
- Kreienkamp F und Spekat A (2011) IDP. Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse. Bedienungsanleitung Version 3.4.0.8. Bericht, Potsdam: Climate and Environment Consulting GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- Kreienkamp F, Spekat A und Enke W (2013) „The Weather Generator used in the Empirical Statistical Downscaling Method, WETTREG (Technical Note).“ Atmosphere, 2013: 169-197.
- Kreienkamp F, Spekat A und Enke W (2013a) Modellierung von Klimaprojektionen für das erweiterte Neißeinzugsgebiet im Rahmen des Projektes NEYMO (Lausitzer Neiße/ Nysa Luzycka – Klimatische und hydrologische Modellierung, Analyse und Prognose). Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- Kwiatkowski J., Hołdys T., 1985. Klimat [w:] Karkonosze polskie, red. A. Jahn, PAN Wrocław.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Conf. Proceeding of the Eighth Conf. on Applied Climatol., 17-22 Jan. 1993 Anaheim, USA.
- Moberg A, Jones P.D. 2005. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in Central and Western Europe. International Journal of Climatology. Vol. 25.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463, 747-756
- Nicholls N., Murray W. 1999. Workshop on indices and indicators for climate extremes: Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997. Breakout Group B: Precipitation. Climatic Change 42.
- Paszyński J., Niedźwiedz T., 1999. Klimat [w:] L. Starkel (red.) Geografia Polski – środowisko przyrodnicze. PWN Warszawa.
- Panagos P, Van Liedekerke M, Jones A, Montanarella L, ESDC: Response to European policy support and public data requirem. (2012) Land Use Policy, 29 (2), pp. 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003
- Panagos P The European soil database (2006) GEO: connexion, 5 (7), pp. 32-33.
- Richter D (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Eigenverlag, Offenbach (M), 93 S
- Schmuck A., 1969. Klimat Sudetów. Prob. Zagosp. Ziem Gór., z. 5(18).
- Schönwiese CD (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Gebrüder Bornträger. 4. Auflage. Berlin, Stuttgart
- SMUL (2008): Sachsen im Klimawandel – Eine Analyse. 212 S.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Projektumsetzung	7
Abbildung 2: Grenzübergreifendes Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße	10
Abbildung 3: Landnutzung (Corine Land Cover)	12
Abbildung 4: Bodentypen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße- Auszug aus dem Europäischen Bodenatlas	13
Abbildung 5: Pegelschema Lausitzer Neiße	15
Abbildung 6: Gebiete Natura 2000 im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße	17
Abbildung 7: Finaler Datenstatus der einzelnen Klimaelemente, 1971-2010	22
Abbildung 8: Jahresmitteltemperatur der Referenzperiode 1971-2000 (erstellt mit IDP®)	27
Abbildung 9: Klimadiagramme nach Walter und Lieth von 2 Stationen aus unterschiedlichen Höhenlagen des Untersuchungsgebietes. Diagrammaufbau: Oben: Station, Höhe, Periode, mittlere Jahrestemperatur und –niederschlagshöhe; Links: mittlere Temperatur; Rechts: mittlerer Monatsniederschlag; Unten: Monate und Frost gefährdete und Frost sichere Frostmonate.	28
Abbildung 10: Mittlerer jährlicher unkorrigierter Niederschlag der Referenzperiode 1971-2000 (erstellt mit IDP®)	30
Abbildung 11: Trend des Perzentil basierten Starkniederschlagsindikators R95p	33
Abbildung 12: Trend der Trockenperioden (Von links nach rechts: 1. Reihe: Andauer SHJ und WHJ; 2. Reihe: Häufigkeit SHJ und WHJ (Legende siehe Abbildung 11))	34
Abbildung 13: Standardisierter Niederschlagsindex SPI der vergangenen 3, 6, 12 Monate des Zeitraums 1971-2010 für die Klimastation Görlitz	35
Abbildung 14: Mittelwerte der jährlichen Klimatischen Wasserbilanz KWB für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010	37
Abbildung 15: Links: Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen (SRES) (http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/Klimaszenarien); Rechts: Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen und Treibhausgaskonzentrationen (RCP-Szenarien, http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien)	41
Abbildung 16: Zeitliche Entwicklung der Unsicherheiten, die auf globalen CMIP5 Ergebnissen basiert (IPCC 2013). Orange: Interne Modellvariabilität, Blau: Unterschiede zwischen Modellen, Grün: bedingt durch RCP-Szenarien, Grau: Modellunsicherheit in der Vergangenheit.	41
Abbildung 17: Klimaänderungssignal der Temperatur für die Periode 2071-2100 gegenüber 1971-2000. Dargestellt ist die mittlere Realisierung mit WETTREG auf der Grundlage von fünf Szenarioläufen (von links oben nach rechts unten): A1B, RCP 2.6, RCP 8.5,L1, RCP 8.5,L2, RCP 8.5,L3.	45
Abbildung 18: Klimaänderungssignal des Niederschlags im Sommerhalbjahr für die Periode 2071-2100 gegenüber 1971-2000. Dargestellt ist die mittlere Realisierung mit WETTREG auf der Grundlage von fünf Szenarioläufen (von links oben nach rechts unten): A1B, RCP 2.6, RCP 8.5,L1, RCP 8.5,L2, RCP 8.5,L3.	46

Abbildung 19: Klimaänderungssignal des Niederschlags im Winterhalbjahr für die Periode 2071-2100 gegenüber 1971-2000. Dargestellt ist die mittlere Realisierung mit WETTREG auf der Grundlage von fünf Szenarioläufen (von links oben nach rechts unten): A1B, RCP 2.6, RCP 8.5,L1, RCP 8.5,L2, RCP 8.5,L3. _____ 47

Abbildung 20: Sämtliche projizierte WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung des Niederschlags. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen. _____ 48

Abbildung 21: Sämtliche projizierte WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Tagesmitteltemperatur. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen. _____ 49

Abbildung 22: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Sonnenscheindauer, potentiellen Verdunstung und Klimatischen Wasserbilanz (Jahreswerte). Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen. _____ 50

Abbildung 23: Signal der Klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr für die ferne und die nahe Zukunft. Dargestellt ist das Mittel von acht Klimastationen unterhalb von 350 m und von drei Klimastationen oberhalb von bzw. gleich 350 m. _____ 51

Abbildung 24: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Starkniederschläge R10mm und Extremniederschläge R20mm im Sommerhalbjahr. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen. _____ 53

Abbildung 25: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung des maximalen 1-Tagesniederschlags (RX1day) und 5-Tagesniederschläge (RX5day) im Sommerhalbjahr. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen. _____ 54

Abbildung 26: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung Trockenperiodendauer, -häufigkeit und des Standardisierten Niederschlagsindex im Sommerhalbjahr. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen. _____ 56

Abbildung 27: Sämtliche projizierten WETTREG Realisierungen (grau), gleitendes 11-Jähriges Mittel aller Realisierungen (farbig), Trendlinie des Zeitraums 2010-2100 sowie Vertrauensbereich der mittleren Realisierung der Täglichen und Extremen Temperaturschwankungen sowie der Vegetationsperiode. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aller Klimastationen. _____ 58

Abbildung 28: Veränderungen des Abflusses (links) und der Bodenfeuchte (rechts) für die Periode 2016-2035 im Vergleich zu 1986-2005. Grundlage sind CMIP5 Globalmodelle unter dem Szenario RCP 4.5. Die Anzahl der verwendeten Modelle ist rechts oben angegeben. Die Schraffur markiert Flächen, in denen das Klimasignal klein im Gegensatz zur modellinternen Variabilität ist (IPCC 2013). _____ 60

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Hauptwerte der Pegel entlang der Lausitzer Neiße</i>	16
<i>Tabelle 2: Primäre Klimaelemente und abgeleitete Klimagrößen (Sekundärelemente)</i>	20
<i>Tabelle 3: Mittelwert der Temperaturkennwerte für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen für das Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr (J, SHJ, WHJ)</i>	29
<i>Tabelle 4: Mittelwert der Niederschlagskennwerte für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen für das Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr (J, SHJ, WHJ)</i>	32
<i>Tabelle 5: Mittelwerte der Trockenindizes für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen</i>	35
<i>Tabelle 6: Mittelwerte der jährlichen Sonnenscheindauer SS für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen</i>	36
<i>Tabelle 7: Mittelwerte der jährlichen potentiellen Verdunstung PET und der Klimatischen Wasserbilanz KWB für die Periode 1971-2000 und absolute Trends (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für vier Höhenstufen. Die Berechnung der KWB erfolgte für Stationen, die über die nötigen Eingangsdaten verfügen. Eine Berechnung der KWB mit dem Niederschlag aus Tabelle 4 führt zu anderen Ergebnissen, da wesentlich mehr Niederschlagsstationen zur Verfügung stehen.</i>	37

Impressum

- **Herausgeber:**
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
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:**
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG):
Kathleen Lünich, Thomas Pluntke, Corina Niemand

Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW-PIB):
Mariusz Adynkiewicz-Piragas, Iwona Zdralewicz, Irena Otop, Bartłomiej Miszuk, Joanna Kryza,
Iwona Lejcuś, Marzenna Strońska

- **Redaktion:**
Kathleen Lünich, Thomas Pluntke, Michael Prasser
- **Redaktionsschluss:**
12.06.2014

- **Umschlagfoto:**
Robert Kneschke
- **Druck:**
Reprogress GmbH, Dresden

- **Auflagenhöhe:**
200 Exemplare

- **Bestelladresse:**
Diese Druckschrift kann kostenfrei bezogen werden bei:
Zentraler Broschürenversand der Sächsischen Staatsregierung
Hammerweg 30, 01127 Dresden
Telefon: +49 351 2103-671
Telefax: +49 351 2103-681
E-Mail: publikationen@sachsen.de
www.publikationen.sachsen.de

Verteilerhinweis:

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von politischen Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.



Anhang 1: Das absolute Minimum (TN) und Maximum (TX) der täglichen Lufttemperatur (°C) in jedem Monat der Periode 1971 bis 2010

Monat/Jahr	Cottbus (69 m ü. NN)		Görlitz (238 m ü. NN)		Jelenia Góra (342 m ü. NN)		Bedrichov (777 m ü. NN)		Śnieżka (1603 m ü. NN)	
	TNa [°C]	TXa [°C]	TNa [°C]	TXa [°C]	TNa [°C]	TXa [°C]	TNa [°C]	TXa [°C]	TNa [°C]	TXa [°C]
Januar	-24.5 1987-01-11	16.1 1991-01-10	-27.5 1987-01-14	16.0 1991-01-10	-31.8 1985-01-08	17.0 1993-01-17	-30.5 1987-01-14	10.0 1993-01-12; 2002-01-29	-32.9 1987-01-12	10.5 1998-01-11
Februar	-23.0 1985-02-12	19.5 1990-02-21	-23.7 1985-02-12	15.9 1990-02-25	-26.2 1985-02-12; 1998-02-01	19.5 1990-02-23 1990-02-21	-27.0 1986-02-27	12.8 1990-02-23	-24.9 1991-02-06	10.1 2002-02-04
März	-20.1 1971-03-04	23.5 2010-03-26	-18.2 1971-03-04	21.1 2010-03-26	-29.6 1971-03-05	23.3 1974-03-21	-25.2 1987-03-05	17.2 1990-03-19	-25.5 1971-03-04	11.2 1981-03-31
April	-7.1 1996-04-01	29.5 2000-04-23	-6.7 1996-04-01	26.5 1993-04-27	-14.5 1977-04-01	26.9 1996-04-23	-16.6 1996-04-01	24.7 2000-04-23	-14.9 2003-04-07	14.7 2000-04-22
Mai	-2.9 1978-05-11	33.3 1971-05-18	-2.6 1978-05-11	30.4 2005-05-28	-5.5 1980-05-04	31.1 2005-05-30	-5.6 1978-05-11; 2005-05-06	27.3 2008-05-30	-12.0 1978-05-11	21.2 2009-05-26
Juni	0.7 1975-06-02	36.6 2000-06-21	0.2 1977-06-01	35.0 2000-06-21	-2.1 1975-06-02	33.5 2000-06-21	-3.3 2005-06-02	30.6 2000-06-21	-4.8 1977-06-01; 1991-06-02	22.2 1994-06-29
Juli	5.1 1979-07-03	38.0 1994-07-31	4.8 1978-07-18	35.9 1994-07-31; 2007-07-16	0.0 1988-07-01	35.4 1994-07-30	1.9 1979-07-03	33.0 1994-07-30	-1.5 1989-07-17	24.5 2005-07-29
August	3.2 1976-08-23	38.4 1992-08-09	4.1 1976-08-23	35.5 1994-08-01	0.3 1976-08-23	35.8 1994-08-01	1.0 2005-08-28	32.0 1994-08-01	-2.6 1980-08-25	23.5 1994-08-01
September	0.0 1973-09-14	33.3 1975-09-17	0.0 1977-09-18	32.1 1975-09-17	-4.0 1977-09-28	34.0 1975-09-17	-3.0 1993-09-30	28.5 1975-09-17	-5.8 2002-09-25	21.1 1975-09-17
Oktober	-7.8 1997-10-28	27.8 1985-10-04	-5.6 1991-10-30	25.0 1995-10-11	-8.7 2003-10-28	27.7 1985-10-04	-10.7 2003-10-25	22.7 1995-10-10	-12.6 2003-10-23	16.2 2001-10-14
November	-13.2 1993-11-28	19.6 2006-11-16	-14.7 1975-11-25	17.6 2002-11-16	-22.1 1988-11-23	19.5 2010-11-14	-19.0 1988-11-22	15.5 2008-11-05	-16.8 1998-11-21	13.9 2009-11-20
Dezember	-20.3 1996-12-29	15.6 1985-12-03	-22.0 1996-12-29	13.7 1985-12-06	-29.5 1996-12-29	15.6 1989-12-19	-25.7 1976-12-30	10.7 2007-12-21	-23.7 2001-12-13	12.0 2003-12-04
Jahr	-24.5 1987-01-11	38.4 1992-08-09	-27.5 1987-01-14	35.9 1994-07-31; 2007-07-16	-31.8 1985-01-08	35.8 1994-08-01	-30.5 1987-01-14	33.0 1994-07-30	-32.9 1987-01-12	24.5 2005-07-29

Anhang 2: Durchschnittliches Anfangs- und Enddatum sowie die Dauer der Vegetationsperiode des Zeitraumes 1971-2000 für ausgewählte Stationen

Station	Höhe [m ü. NN]	Vegetationsperiode		
		Beginn	Ende	Dauer
Stubice	22	24.März	11.November	233
Cottbus	69	24.März	16.November	238
Zielona Góra	192	26.März	8.November	228
Görlitz	238	25.März	9.November	230
Jelenia Góra	342	29.März	8.November	225
Bedrichov	777	21.April	17.Oktober	180
Śnieżka	1603	1.Juni	23.September	115



Abkürzung	Einheit	Begriff	Beschreibung
A1B	-	Szenario	A1B gehört zu den sog. SRES-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios). Sie berechnen die zukünftige Entwicklung des Klimas bzw. Treibhausgasemissionen auf Grundlage der Entwicklung der Bevölkerung, der Energienutzung, der Landwirtschaft usw.
DPD	-	Dauer der Trockenperioden	Mittlere Dauer von Trockenperioden
DPF	-	Häufigkeit von Trockenperioden	Trockenperioden sind Perioden von mindestens 11 Tagen, an denen weniger als 1 mm Niederschlag pro Tag fallen (SMUL 2008). Gezählt wird, wie oft Trockenperioden in einem bestimmten Zeitabschnitt vorkommen
DTR	°C	Tägliche Differenz der Lufttemperatur	Differenz zwischen der maximalen und minimalen täglichen Lufttemperatur
ECHAM	-	Akronym aus ECMWF und Hamburg	Globales atmosphärisches Zirkulationsmodell, das am Hamburger Max-Planck-Institut (MPI) für Meteorologie entwickelt wurde. Grundlage war ein Vorhersagemodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF).
ETR	°C	Extreme Differenz der Lufttemperatur	Differenz zwischen der maximalen und minimalen Lufttemperatur der betrachteten Periode
GSL	Tage	Dauer der Vegetationsperiode	Beträgt an 6 aufeinanderfolgenden Tagen die mittlere Lufttemperatur mehr als 5 °C, beginnt die thermische Vegetationsperiode. Sie endet, wenn im an 6 aufeinanderfolgenden Tagen eine mittlere Lufttemperatur von 5 °C unterschritten wird. Die Dauer der Vegetationsperiode errechnet sich aus der Differenz zwischen Beginn und Ende
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change	Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaveränderung (oft als Weltklimarat bezeichnet). Sie trägt für politische Entscheidungsträger den Stand der wissenschaftlichen Forschung zusammen.
KWB	mm	Klimatische Wasserbilanz	Die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ist ein klimatologisches Maß für die Wasserverfügbarkeit im Gebiet. Negative Werte deuten auf einen Niederschlagsmangel hin.
MHQ	m ³ /s	Mittlerer Hochwasserabfluss	Arithmetisches Mittel aus den höchsten Abflüssen (HQ) gleichartiger Zeitabschnitte für die Jahre des Betrachtungszeitraums
MNQ	m ³ /s	Mittlerer Niedrigwasserabfluss	Arithmetisches Mittel aus den niedrigsten Abflüssen (NQ) gleichartiger Zeitabschnitte für die Jahre des Betrachtungszeitraums
MQ	m ³ /s	Mittlerer Abfluss	Arithmetisches Mittel der Abflüsse für einen bestimmten Zeitabschnitt
PET	mm	Potentielle Evapotranspiration	Die potentielle ist die maximal mögliche Verdunstung. Es ist nicht die tatsächlich stattfindende Verdunstung, sondern stellt den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre dar. Unter der Annahme, dass jederzeit genügend Wasser zur Verfügung steht, wird in den meisten Fällen die maximal mögliche Verdunstung errechnet. Es wird hier der Ansatz von Turc-Wendling (DVWK, 1996) verwendet, der nur die Globalstrahlung und Mitteltemperatur benötigt.
q	l/(km ² /s)	Abflussspende	Quotient aus dem Abfluss und der Fläche des zugehörigen Einzugsgebietes
RCP2.6 RCP8.5	-	Repräsentative Konzentrationspfade	Es handelt sich um neue Szenarien, die für den 5. Sachstandsbericht 2013/14 entwickelt wurden. Bei den neuen RCP-Szenarien handelt es sich um Konzentrations-Pfade, weil bei ihnen die Treibhausgaskonzentration und der Strahlungsantrieb den Ausgangspunkt bilden und nicht wie bei den SRES-Szenarien die Entwicklung von sozio-ökonomischen Entwicklungen. Die verschiedenen Bezeichnungen weisen auf unterschiedliche Treibhausgaskonzentrationen und Strahlungsantriebe hin. RCP8.5 ist als sehr hoch einzustufen und RCP2.6 als niedrig.
R10mm	Tage	Tage mit Starkniederschlag	Anzahl der Tage mit Niederschlag größer oder gleich 10 mm

R20mm	Tage	Tage mit Extremniederschlag	Anzahl der Tage mit Niederschlag größer oder gleich 20 mm
R90p	Tage	Tage mit Starkniederschlag	Anzahl der Tage mit Niederschlag größer dem 90. Perzentil von Niederschlagstagen [Tage mit Niederschlag größer gleich 1 mm]. Das Perzentil berechnet sich aus den der Größe nach geordneten Niederschlägen der Periode 1971 bis 2000. Das 90. Perzentil wird von 90% der Daten unterschritten und demzufolge von 10 % überschritten, wobei letztere die Tage mit starken Niederschlägen sind.
R90pT	%	Anteil an Starkniederschlägen	Niederschläge oberhalb des 90. Perzents bezogen auf die Gesamtmenge der Niederschläge
R95p	Tage	Tage mit Extremniederschlag	Anzahl der Tage mit Niederschlag größer dem 95. Perzentil von Niederschlagstagen. Details siehe R90p
R95pT	%	Anteil an Extremniederschlägen	Niederschläge oberhalb des 95. Perzents bezogen auf die Gesamtmenge der Niederschläge
R99p	Tage	Tage mit Extremstem Niederschlag	Anzahl der Tage mit Niederschlag größer dem 99. Perzentil von Niederschlagstagen. Details siehe R90p
R99pT	%	Anteil an Extremsten Niederschlägen	Niederschläge oberhalb des 99. Perzents bezogen auf die Gesamtmenge der Niederschläge
RR	mm	Niederschlag	Summe der festen und flüssigen Niederschläge einer definierten Periode
RX1day	mm	Höchster Tagesniederschlag	Maximal gemessener Niederschlag an einem Tag
RX5day	mm	Höchster 5-Tagesniederschlag	Maximale Niederschlagsmenge, die an fünf aufeinanderfolgenden Tagen gemessen wurden
SHJ	-	Sommerhalbjahr	April bis September
SPI	-	Standardisierter Niederschlags Index	Dieser Kennwert wird auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Niederschlagsmenge berechnet. Damit ist er gut zwischen Regionen mit unterschiedlichen Niederschlagscharakteristika vergleichbar. Abweichungen nach oben (+) charakterisieren Feuchteperioden und nach unten (-) Trockenperioden, wobei die Skala von -3 bis +3 geht. Der SPI kann für verschiedene Bezugszeiträume in der Vergangenheit ermittelt werden, z.B. 3 Monate – typisch für eine meteorologische Trocken- und Feuchteperioden, 6 und 12 Monate typisch für eine hydrologische Trocken- und Feuchteperioden.
SS	Stunden	Sonnenscheindauer	Summe der täglichen Sonnenstunden in einer bestimmten Periode
TG	°C	Mittlere Lufttemperatur	Mittel der täglichen mittleren Lufttemperatur
TN	°C	Minimale Lufttemperatur	Mittel der täglichen minimalen Lufttemperatur
TX	°C	Maximale Lufttemperatur	Mittel der täglichen maximalen Lufttemperatur
WETTREG	-	WETTrelagenbasierte REGIONalisierungsmethode	Ein in Deutschland entwickeltes statistisches Verfahren zur Errechnung von Klimavariablen. Bei WETTREG werden statistische Zusammenhänge zwischen globalen und lokalen Klimavariablen hergestellt.
WHJ	-	Winterhalbjahr	Oktober bis März

