

TEXTE

127/2026

Abschlussbericht

Wissenschaftliche Begleitung der wasserwirtschaftlichen Transformation des Kohleausstiegs in der Lausitz

von:

René Zahl

Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 127/2026

REFOPLAN des Bundesministerium für Umwelt,
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3721 24277 0

Abschlussbericht

Wissenschaftliche Begleitung der wasserwirtschaftlichen Transformation des Kohleausstiegs in der Lausitz

von

René Zahl
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
064844 Dessau-Roßlau

Abschlussdatum:

August 2025

Redaktion:

Fachgebiet II 2.6 - Maßnahmen des Bodenschutzes
Jörg Frauenstein, Annegret Biegel-Engler

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8059>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Wissenschaftliche Begleitung der wasserwirtschaftlichen Transformation des Kohleausstiegs in der Lausitz

Die zeitliche Entwicklung der Grundwasserressourcen nach dem Kohleausstieg in der Lausitz ist noch nicht geklärt. Die Studie geht daher der Frage nach, wie die Grundwasserneubildung in der Lausitz als natürlicher Ursprung des Grundwassers bestimmt werden kann. Es werden klassische Verfahren diskutiert, die im Wesentlichen jedoch auf hydrologisch ungestörte Bedingungen angewiesen sind, die in den bergbaulich überprägten Regionen in der Lausitz bis zum beendeten Grundwasserwiederanstieg so nicht anzutreffen sind. Entsprechend werden Grundwasserneubildungsmodelle verwendet, um eine Quantifizierung zu ermöglichen. Die Analyse der Ergebnisse zeigt jedoch, dass auch die Verwendung von Modellen ohne die Möglichkeit der Validierung an Standorten in der Lausitz zu großen Ergebnisunsicherheiten führen. Diese Unsicherheiten führen dazu, dass die Prognose der Entwicklung der Grundwasserneubildung im Zuge des fortschreitenden Klimawandels nur schwer möglich ist, und allenfalls grobe Perspektiven genannt werden können. Die Studie verweist darauf, dass für die Lausitz und den bevorstehenden Grundwasserwiederanstieg dringend genauere Kenntnisse der Grundwasserneubildung generiert werden müssen und schlägt Möglichkeiten vor, wie diese Fragen beantwortet werden können.

Abstract: Scientific monitoring of the water management consequences of the coal phase-out in Lusatia

The temporal development of groundwater resources after the coal phase-out in Lusatia has not yet been clarified. The study therefore addresses the question of how groundwater recharge in Lusatia can be determined as the natural origin of groundwater. Classical methods are discussed, but these are essentially dependent on hydrologically undisturbed conditions, which are not to be found in the regions of Lusatia affected by mining until the end of the groundwater rebound. Accordingly, groundwater recharge models are used to enable quantification. However, the analysis of the results shows that even the use of models without the possibility of validation at sites in Lusatia leads to major uncertainties in the results. These uncertainties mean that it is difficult to predict the development of groundwater recharge in the course of advancing climate change, and at best only rough prospects can be given. The study points out that for Lusatia and the forthcoming groundwater rebound, more precise knowledge of groundwater recharge urgently needs to be generated and suggests ways in which these questions can be answered.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung	11
Summary	13
1 Einleitung	15
2 Veranlassung, Zielstellung und Projektverlauf	16
3 Das Untersuchungsgebiet	18
4 Der vorbergbauliche Zustand	20
4.1 Historischer Zustand der Oberflächenwasser und mittlere Grundwasserneubildung	20
4.2 Bergbauliche Tätigkeiten und Grundwasserabsenkung in der Lausitz	21
5 Die Grundwasserneubildung in der Lausitz	23
5.1 Ausgangslage	23
5.2 Grundwasserneubildung als Teil des Landschaftswasserhaushalts	23
5.3 Modellansätze für die Grundwasserneubildungsbestimmung	26
5.3.1 Wasserbilanzrechnungen	26
5.3.2 Trockenwetterabfluss in Fließgewässern und Quellschüttungen	28
5.3.3 Grundwasserneubildung aus Lysimetermessungen	28
5.3.4 Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Standrohrspiegelhöhen in ungespannten Grundwasserleitern	30
5.3.5 Ermittlung der Grundwasserneubildung mittels natürlicher Tracer	31
5.3.6 Berechnung der Grundwasserneubildung mit Hilfe von Modellen	31
5.3.6.1 Physikalische Bodenwassermodelle	32
5.3.6.2 Empirische Modelle	32
5.3.6.3 Bodenwasserhaushaltsmodelle	34
5.3.6.4 Grundwasserströmungsmodelle	35
6 Umsetzung von Grundwasserneubildungsmodellen für die Oberlausitz in Ostsachsen	36
6.1 Klimatische Wasserbilanz der Lausitz	36
6.2 Grundwasserneubildung mit dem Ansatz von Proksch	38
6.2.1 Daten und Struktur	38
6.2.2 Ergebnisse des Sickerwassermodells von Proksch	39
6.3 Grundwasserneubildung nach dem BAGLUVA-Ansatz	42

6.4	Grundwasserneubildung nach den Landesmodellen KLiWES 1 und KLiWES 2.1 des Freistaates Sachsen	43
6.5	Vergleich der Modellergebnisse untereinander	46
6.6	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	51
7	Klimatische Veränderungen in der Lausitz	55
7.1	Motivation.....	55
7.2	Projktionen der möglichen Klimaentwicklungen	55
7.2.1	Repräsentative Konzentrationspfade	55
7.3	Das Mitteldeutsche Kernensemble	56
7.4	Umgang mit systematischen Abweichungen (BIAS) in den Klimamodellen.....	59
7.5	Ergebnisse aus den Klimaprojektionen	59
7.5.1	Historische Temperatur- und Niederschlagsdaten	60
7.5.2	Charakterisierung der Klimaprojektionen	62
7.5.3	Verwendung der Klimaprojektionen für Modellierung der Grundwasser-neubildung	65
8	Abschlussbemerkungen	67
9	Quellenverzeichnis	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht über das Untersuchungsgebiet in Ostsaschen.....	18
Abbildung 2:	Wasserhaushalt der Landschaft	24
Abbildung 3:	Saisonalität des Grundwasserstandes an einer Messstelle in Bischdorf	26
Abbildung 4:	Klimatische Wasserbilanz des südlichen Spreeeinzugsgebiets	36
Abbildung 5:	Vergleich der potentiellen Verdunstung und des mittleren Niederschlags im südlichen Spreeeinzugsgebiet.....	37
Abbildung 6:	Geländeneigung im südlichen Spreeeinzugsgebiet.....	39
Abbildung 7:	Ergebnisse des Proksch-Modells auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 - 1991.....	40
Abbildung 8:	Ergebnisse des Proksch-Modells auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1991 - 2020.....	41
Abbildung 9:	Ergebnisse des modifizierten BAGLUVA-Modells auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 -1990	42
Abbildung 10:	Ergebnisse des sächsischen Modells KliWES 1 auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 -1987	44
Abbildung 11:	Ergebnisse des sächsischen Modells KliWES 2.1 auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 -1987	45
Abbildung 12:	Direkter Vergleich der 4 Modellergebnisse.....	47
Abbildung 13:	Direkter Vergleich der 4 Modellergebnisse mit Bezug auf Grundwasserkörper.....	48
Abbildung 16:	Statistik über alle Modellergebnisse auf Teileinzugsgebietsebene	50
Abbildung 18:	Entwicklung der monatlichen Temperaturen über die letzten 60 Jahre an der Station Kubschütz	61
Abbildung 19:	Entwicklung der monatlichen Niederschläge über die letzten 60 Jahre an der Station Kubschütz	61
Abbildung 20:	Verläufe der Mittelwerte der Projektionen für den Niederschlag bis 2100	64
Abbildung 21:	Boxplots der monatlichen Niederschläge aufgeteilt in Abhängigkeit von Kalendermonat und RCP	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abflüsse der Spree am Pegel Cottbus Sandower Brücke (nach Uhlmann et al. (2023), Daten des LfU Brandenburg)	20
Tabelle 2:	Zuordnung der Bodenarten der BK50 zu den Bodentypen im Proksch-Modell	38

Tabelle 3:	Vergleich der mittleren langjährigen Neubildungsraten der verschiedenen Modellansätze für das südliche Spreeeinzugsgebiet49
Tabelle 4:	Mittelwerte der mittleren, minimalen und maximalen Neubildungsraten aus den Modellen für das gesamte Modellgebiet51
Tabelle 5:	RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht55
Tabelle 6:	Auswahl der Kombinationen von Globalmodell und Regionalmodell im Mitteldeutschen Kernensemble nebst der ausgewählten Realisierung und dem Vorhandensein historischer Läufe (his)58
Tabelle 7:	Jahresmittelwerte für die letzten vier 30jährigen Referenzzeiträume für Kubschütz60

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DIFGA	Differenzganglinienanalyseverfahren
DWD	Deutscher Wetterdienst
GOK	Geländeoberkante
GWN	Grundwasserneubildung
iDA	interdisziplinäre Daten und Auswertungen (Datenportal des Landes Sachsen)
KliWES	Projekt Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen
LEAG	Lausitz Energie Bergbau AG
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Sachsen
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
MDK	Mitteldeutsches Kernensemble -
RCP	Repräsentativer Konzentrationspfad (representative concentration path)
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission – Projekt
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH

Zusammenfassung

Mit dem Ende des Braunkohlebergbaus im Jahr 2038 wird in den Folgejahren ein großer Teil der Sumpfungswasserhebung abgeschaltet und damit der Grundwasserwiederanstieg in den letzten verbliebenen Bergbaugebieten beginnen. In den Altbergbaubereichen im Einzugsgebiet der Schwarzen Elster und vor allem im Südraum der Lausitz ist der Grundwasserwiederanstieg derweil bereits in Gang und es stellen sich allmählich die vorbergbaulichen Grundwasserstände beziehungsweise die von den Zielwasserständen der Bergbaufolgeseen abhängigen Grundwasserstände ein.

Um die wasserwirtschaftliche Planbarkeit des Grundwasserwiederanstiegs zu gewährleisten, ist eine umfassende Kenntnis der Grundwasserneubildung notwendig. Darunter versteht sich die Wassermenge, die den Grundwasserkörpern zufließt und somit die Grundwasserspeicher füllt. Zumeist handelt es sich in Mitteleuropa um Sickerwasser aus den Niederschlägen, das vor allem im Winterhalbjahr die Grundwasserkörper speist. Erst die Kenntnis der Grundwasserneubildung ermöglicht eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasser. Sie ist für die Planung des Grundwasserwiederanstiegs eine wichtige Größe, die angibt, welcher Teil des unterirdischen Porenraumes sich allein mit Wasser füllen wird. Für Grundwasserströmungsmodelle, die unter anderem zum wasserwirtschaftlichen Management der Bergbaufolgeseen genutzt werden, ist die Grundwasserneubildung eine der wesentlichen Randbedingungen. Gleichzeitig ist sie eine der hydrologischen Größen, die im Feld nur indirekt aus Abflüssen in Oberflächengewässern hinreichend genau bestimmt werden können. Die Arbeit setzte sich zum Ziel, die Grundwasserneubildung für die Lausitz zu quantifizieren und unter Einbezug der Klimaentwicklung eine Prognose über die Entwicklung der Grundwasserneubildung bis in das Jahr 2100 zu erarbeiten.

Um diese Ziele zu erreichen wurde zunächst der vorbergbauliche Zustand des Grundwassers charakterisiert. Dabei ging es um die Frage, inwiefern sich Aussagen zu vorbergbaulichen Grundwasserständen finden lassen und ob es bereits Quantifizierungen der Grundwasserneubildung gibt. Es gibt eine Reihe historischer Kartierungen, die in einem Grundwassergleichenplan zusammengetragen wurden, der für diese Fragestellung vorliegt. Historische Daten aus den 60er Jahren liefern einen Hinweis auf die Grundwasserneubildung an zwei Standorten in der Niederlausitz von 130 mm im Jahr.

Die Bestimmung der Grundwasserneubildung ist in den Bergbaubereichen der Lausitz mit klassischen Methoden gegenwärtig nicht oder nur in beschränktem Maße möglich. Niedrigwasserabflussmethoden scheitern an dem Problem, dass die Kopplung zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser in den Bergbaugebieten und auch in den Bereichen mit bereits begonnenem Wiederanstieg nicht gegeben ist. Weiterhin ist durch die intensive Steuerung der Fließgewässer und der damit einhergehenden starken anthropogenen Überprägung der Abflüsse in den Fließgewässern ein Abtrennen des natürlichen Abflusssignals nicht möglich. Die Nutzung von Grundwasserganglinien wird als Möglichkeit der Identifikation der Grundwasserneubildung angesehen. Im Rahmen des Projektes konnte jedoch keine Messstelle gefunden werden, für die eine hinreichende Unabhängigkeit vom Wasserstand benachbarter Bergbaufolgeseen bestand. Für die Gebiete, in denen der Grundwasserwiederanstieg bald beendet sein wird, kann diese Methode jedoch zu wertvollen Erkenntnissen führen.

Aus diesem Grunde wurden die Ergebnisse dreier Modellansätze (Lysimetermodell von Proksch, erweitertes BAGLUVA-Modell und die Modelle KLiWES1 und KLiWES2.1 des Landes Sachsen)

zur Berechnung der Grundwasserneubildung verglichen. Die Ergebnisse der Modelle variieren stark in der Höhe der Grundwasserneubildung und in der flächenhaften Verteilung von Gebieten mit hohen und niedrigen Neubildungsraten. Da zusätzlich aufgrund der fehlenden Bestimmungsmöglichkeiten der Grundwasserneubildung keine Daten für die Validierung der Ergebnisse in den Bereichen mit ausgeprägter Grundwasserabsenkung vorhanden sind, ist die Einschätzung der Ergebnisse der Modelle nur schwer möglich. Es bedarf dringend der Ableitung von realen in der Lausitz bestimmten Neubildungsraten. Im Mittel geben die Modelle für das südliche Spreeeinzugsgebiet eine jährliche Grundwasserneubildung von 100 bis 140 mm an.

Ein Einbezug der Klimaprojektionen des Mitteldeutschen Kernensembles für die Bestimmung der Grundwasserneubildung war ohne ein für die Lausitz validiertes Neubildungsmodell nicht möglich. Die Projektionen legen für die Niederschläge in der Lausitz eine leichte Erhöhung der Winterniederschlagsmengen nahe. Da das Winterhalbjahr der Zeitpunkt ist, in dem aufgrund der ruhenden Vegetation und damit einem Minimum an Verdunstung das meiste Sickerwasser gebildet wird, das dem Grundwasser zufließt, ist eine leichte Erhöhung der Grundwasserneubildung anzunehmen. Inwiefern jedoch die Verdunstung aus den entstehenden Bergbaufolgeseen und sich einstellenden flurnahen Grundwasserständen eine Zehrung der Grundwasserressourcen ergibt, konnte in dieser Arbeit nicht quantifiziert werden. In Hinblick auf die wasserwirtschaftliche Planung ist aber gerade die Verdunstung eine wesentliche Größe des Wasserhaushalts, die für die Wasserbilanz der Grundwasserkörper entscheidend ist.

Insgesamt sieht die Studie die Notwendigkeit, die Grundwasserneubildung für die Bergbaugebiete der Lausitz zu bestimmen. Es wird empfohlen, vor allem die Gebiete in die Analyse einzubeziehen, die bereits in wenigen Jahren den Grundwasserwiederanstieg abgeschlossen haben werden. Das betrifft vor allem den Südraum des Bergbaugebiets. Die LMBV hat für die Befüllung der Bergbaufolgeseen und den damit verbundenen Grundwasserwiederanstieg ein intensives Monitoring umgesetzt und ein umfassendes Messnetz aufgebaut. Dieses Netz sollte nach dem Erreichen der Zielwasserstände der Bergbaufolgeseen und der erfolgreichen Sicherung und Renaturierung weiterhin genutzt werden, Daten zu generieren, die für die Bestimmung der Grundwasserneubildung als sensibler Wasserhaushaltsgröße genutzt werden können. Zusätzlich könnten Daten aus Lysimetern Hinweise bezüglich der Höhe der Grundwasserneubildung liefern, die unter definierten Standortbedingungen die Sickerwassermenge messen. Neben der Einrichtung von neuen Lysimetern könnte das Finsterwalder Forschungsinstitut für Bergbaufolgeforschung (FIB) mit seinen bestehenden Lysimetern die Beantwortung dieser Fragen unterstützen.

Summary

With the coal phase-out scheduled for 2038, most of the dewatering systems will be shut down in the following years, thus initiating the groundwater rebound in the last remaining mining areas. In the old mining areas in the Schwarze Elster catchment area, and especially in the southern part of Lusatia, groundwater rebound is already underway, and groundwater levels are gradually returning to pre-mining levels or to levels dependent on the target water levels of the post-mining lakes.

In order to ensure the water management predictability of groundwater rebound, comprehensive knowledge of groundwater recharge is necessary. This refers to the amount of water that flows into the groundwater bodies and thus fills the groundwater reservoirs. In Central Europe, this is mostly seepage water from precipitation, which feeds the groundwater bodies, especially in the winter months. Only knowledge of groundwater recharge enables sustainable groundwater management. It is an important factor in planning groundwater rebound, indicating which part of the underground pore space will fill with water alone. Groundwater recharge is one of the key boundary conditions for groundwater flow models, which are used, among other things, for water management of post-mining lakes. At the same time, it is one of the hydrological variables that can only be determined with sufficient accuracy in the field indirectly from runoff in surface waters. The aim of the study was to quantify groundwater recharge for Lusatia and, taking climate change into account, to develop a forecast of groundwater recharge trends up to the year 2100.

In order to achieve these goals, the pre-mining condition of the groundwater was first characterized. The aim was to determine the extent to which statements about pre-mining groundwater levels could be found and whether there were already quantifications of groundwater recharge. There are a number of historical maps that have been compiled in a groundwater balance plan, which is available for this purpose. Historical data from the 1960s provide an indication of groundwater recharge at two locations in Lower Lusatia of 130 mm per year.

The determination of groundwater recharge in the mining areas of Lusatia is currently not possible, or only to a limited extent, using conventional methods. Low water discharge methods fail due to the problem that there is no connection between groundwater and surface water in the mining areas and also in the areas where the water level has already begun to rise again. Furthermore, due to the intensive control of watercourses and the associated strong anthropogenic influence on the discharge in the watercourses, it is not possible to separate the natural discharge signal. The use of groundwater hydrographs is considered a possible way of identifying groundwater recharge, but within the scope of the project, no measuring point could be found that was sufficiently independent of the water level of neighboring post-mining lakes. However, this method can provide valuable insights for areas where groundwater rebound will soon come to an end. For this reason, the results of three model approaches (Proksch's lysimeter model, the extended BAGLUVA model, and the KLiWES1 and KLiWES2.1 models of the state of Saxony) were compared for the calculation of groundwater recharge. The results of the models vary greatly in terms of the amount of groundwater recharge and the spatial distribution of areas with high and low recharge rates. Since, in addition, there is no data available for validating the results in areas with pronounced groundwater drawdown due to the lack of means of determining groundwater recharge, it is difficult to validate the results of the models. There is an urgent need to derive actual recharge rates determined in Lusatia. On average, the

models indicate an annual groundwater recharge of 100 to 140 mm for the southern Spree catchment area.

It was not possible to include the climate projections of the „Mitteldeutsches Kernensemble“ for determining groundwater recharge without a model validated for Lusatia. The projections suggest a slight increase in winter precipitation in Lusatia. Since the winter half-year is the time when most seepage water flows into the groundwater due to dormant vegetation and thus minimal evaporation, a slight increase in groundwater recharge can be assumed. However, the extent to which evaporation from the resulting post-mining lakes and the resulting near-surface groundwater levels will result in a depletion of groundwater resources could not be quantified in this study. With regard to water management planning, however, evaporation is a key factor in the water balance that is decisive for the water balance of groundwater bodies.

Overall, the study sees a need to determine groundwater recharge for the Lusatian mining area. It recommends that the analysis focus primarily on areas that will have completed groundwater rebound within a few years. This applies above all to the southern part of the mining area. The LMBV has implemented intensive monitoring and established a comprehensive measurement network for the filling of the post-mining lakes and the associated groundwater rebound. Once the target water levels of the post-mining lakes have been reached and successful securing and renaturation has been achieved, this network should continue to be used to generate data that can be used to determine groundwater recharge as a sensitive water balance parameter. In addition, data from lysimeters could provide information on the level of groundwater recharge, which measure the amount of seepage water under defined site conditions. In addition to installing new lysimeters, the Finsterwalde Research Institute for Post-Mining Landscapes (FIB) could investigate these questions using its existing lysimeters.

1 Einleitung

Die mit dem Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung (KVBG) vom 08.08.2020 einhergehende Entscheidung zu einem früher als bislang geplanten Kohleausstieg spätestens im Jahr 2038 führte zu einer Situation, in der zeitnahe Untersuchungsergebnisse zu den wasserwirtschaftlichen Folgen des Braunkohlentagebaugeschehens und dessen Beendigung in der Lausitz erforderlich sind. Einen ersten wichtigen Schritt zur Beantwortung der Fragen bezüglich der zukünftigen hydrologischen Verhältnisse in der Lausitz gingen Uhlmann et al. (2023) mit ihrem Gutachten zu den „Wasserwirtschaftlichen Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz“. Darin stellten sie einerseits die historische Entwicklung der Oberflächenabflüsse am Beispiel der Spree dar und zeigten auf, dass durch den Wegfall der Sumpfungswässer für die Spree ein mengenmäßiges Wasserdefizit von 126 Mio. m³ pro Jahr am Pegel Große Tränke vor Berlin zu erwarten ist. Durch Ausbau von Speichern über die bislang als Speicherbecken geplanten Restseen hinaus kann diese Menge ausgeglichen werden: Das gelingt jedoch nur, wenn Fremdwasser in das hydrologische System eingeleitet wird, um diese Speicher zu befüllen. Der Spree allein fehlt dafür eine Abflussmenge von etwa 60 Mio. m³ pro Jahr. Die Gutachter schlagen deshalb unter anderem eine Überleitung von Elbewasser in Hochwasserzeiten vor. Mit dieser Studie ist der Status quo hinreichend beleuchtet. Was in der vorangehenden Studie noch nicht erfolgte, war eine Betrachtung der möglichen bevorstehenden Klimaveränderung durch den Einbezug von Klimaprojektionen.

Das Wasser der Spree wird nicht nur gebraucht, um die Speichervolumina zu füllen und die zu schließenden Braunkohlegruben zu Bergbaufolgeseeen umzugestalten. Bei der Befüllung der verbleibenden Hohlformen ist auch zu beachten, dass ein großer Teil des eingesetzten Wassers in den durch den Bergbau entwässerten Untergrund infiltriert, um den Grundwasserabsenktrichter zu befüllen, was einer künstlichen Grundwasserneubildung gleichkommt. Inwieweit jedoch eine natürliche Grundwasserneubildung flächendifferenziert auf die Befüllung des Untergrundes wirkt, konnte bislang nicht untersucht werden. Das vorliegende Eigenforschungsprojekt des Umweltbundesamtes (FKZ 3721 24277 0) widmete sich unter anderem dieser Fragestellung. Dabei erfolgt neben der Bestimmung der Grundwasserneubildung der vergangenen Jahrzehnte auch eine grobe Darstellung der wesentlichen Projektionen der Klimagrößen, die eine direkte Bedeutung für die Grundwasserneubildung der Lausitz haben.

2 Veranlassung, Zielstellung und Projektverlauf

Mit der von Uhlmann et al. (2023) veröffentlichten Studie des Umweltbundesamtes (UBA-Texte 90/2023) wurde der Status quo der wasserwirtschaftlichen Situation in der Lausitz ermittelt und dargestellt, welche Folgen durch den für 2038 festgesetzten Kohleausstieg für die Lausitz zu erwarten sind. Die Studie beschäftigte sich in erster Linie mit der Bilanz der Oberflächengewässer. Es bestand daher die Notwendigkeit, das Augenmerk auf das Grundwasser zu legen. Das Projekt „Wissenschaftliche Begleitung der wasserwirtschaftlichen Transformation des Kohleausstiegs in der Lausitz“ wurde daher im Jahr 2021 als Eigenforschungsprojekt des Umweltbundesamtes geplant und startete mit der Bearbeitung im Mai 2022. Zielstellung war einerseits die Untersuchung des Grundwasserwiederanstiegs unter den gegebenen Bedingungen und darauf aufbauend eine Untersuchung der Grundwasserverhältnisse der Lausitz unter Beachtung der sich durch den fortschreitenden Klimawandel ändernden klimatischen Situation.

Die zentrale Frage dreht sich dabei um die natürliche Grundwasserneubildung. Deren Kenntnis ist notwendig, um die nachhaltige Nutzung einer Grundwasserressource zu gewährleisten, weil die Neubildung der limitierende Faktor ist, der die nutzbare Menge einschränkt. Die Grundwasserneubildung ist ferner für Grundwasserströmungsmodelle eine der wichtigsten Randbedingungen. Sie ist bei ungestörtem Wasserhaushalt in unserer Landschaft die maßgebliche Quelle für unsere Grundwasserressourcen. Entsprechend erklären sich die natürlichen Schwankungen der Grundwasserstände durch das Wechselspiel von Grundwasserneubildung und Grundwasserabfluss in Oberflächengewässer. Damit verbunden ist auch die Stabilität von Seewasserständen in Bergbaufolgeseen. Auch sind Trockenwetterabflüsse in Fließgewässern direkt abhängig von der Grundwasserneubildung. Und für die Lausitz ist die Grundwasserneubildung die entscheidende Größe für den laufenden und im Bereich der noch aktiven Tagebaue geplanten Grundwasserwiederanstieg. Aus diesen Gründen widmete sich diese Arbeit maßgeblich der Bestimmung der Grundwasserneubildung für die Lausitz.

Um diese Frage anzugehen wurde zunächst der vorbergbauliche Zustand der Grundwassersituation in der Lausitz betrachtet. Es ist zu erwarten, dass mit Abschaltung der Wasserhebung ein kontinuierlicher Grundwasserwiederanstieg erfolgt, der den Grundwasserabsenkungstrichter in den noch weitgehend ungestörten Bereichen wieder auf etwa die gleiche Höhe des historischen Zustands bringen wird. Anders stellt sich die Situation in den Regionen dar, in denen der geologische Untergrund für den Abbau der Braunkohle freigelegt wurde. Dort wird der sich einstellende Grundwasserstand maßgeblich von den Zielwasserständen der Bergbaufolgeseen beeinflusst werden und die hydraulischen Eigenschaften der Kippenbereiche unterscheiden sich vom anstehenden geologischen Untergrund.

Weiterhin liefert die Literatur zum vorbergbaulichen Zustand wertvolle Hinweise zur Grundwasserneubildung in der Lausitz in der Vergangenheit. Diese Zahlen dienen als Referenz, um die mit neuen Verfahren ermittelten Werte einordnen zu können.

Anschließend wurde untersucht, mit welchen Methoden die Bestimmung der Grundwasserneubildung möglich ist und welche Probleme bei der Nutzung dieser Methoden in der Lausitz auftreten. Diese Vorbereitung mündet in der Umsetzung eigener Grundwasserneubildungsberechnungen und dem Vergleich mit bereits bestehenden Lösungen. Ziel dabei war es, eine Methode zu identifizieren, die für die Berechnung langjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildung eingesetzt werden kann. Es zeigte sich jedoch im Lauf der

Projektbearbeitung, dass die größte Schwierigkeit in der Lausitz darin besteht, aus realen Messwerten verlässliche Referenzwerten für die Grundwasserneubildung zu bestimmen. Es ist festzustellen, dass aus Projektsicht keines der Modelle als besonders geeignet identifiziert werden konnte.

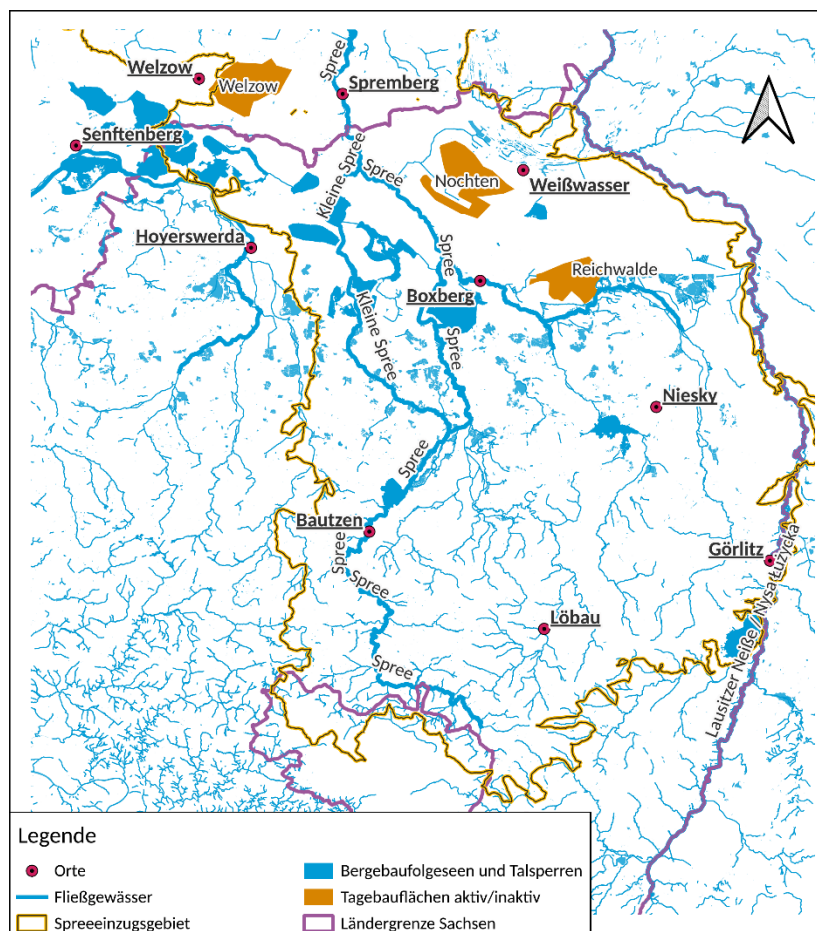
Im Anschluss wurden die Klimaprojektionen des Mitteldeutschen Kernensembles untersucht, inwieweit sie Aussagen über eine mögliche Entwicklung der Grundwasserneubildung in der Lausitz ermöglichen. Da zuvor keine Festlegung getroffen werden konnte, welches der Neubildungsmodelle als Wirkmodell zum Einsatz kommen könnte, beschränkte sich die Untersuchung der Klimaprojektionen auf rein deskriptive Aussagen zu den enthaltenen Klimagrößen, die direkte Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung haben.

Im Ergebnis stellt die Studie somit die Notwendigkeit dar, für eine verlässliche Planung der Grundwasserressourcen der Lausitz eine gezielte Quantifizierung der Grundwasserneubildung an realen Messdaten vorzunehmen.

3 Das Untersuchungsgebiet

Zur Lausitz gehören drei wesentliche Flusseinzugsgebiete. Das Gebiet der Lausitzer Neiße und nachfolgend der Oder, das Gebiet der Schwarzen Elster und das Gebiet der Spree. Da die Spree von den genannten Fließgewässern das Längste ist, und von der Wasserführung der Spree sowohl die Stadt Berlin als auch der Spreewald abhängig sind, beziehen sich die Arbeitsinhalte auf das Einzugsgebiet der Spree, darunter vor allem den Lausitzer Südraum in Sachsen. Abbildung 1 zeigt den Teil des Einzugsgebietes der Spree, in dem das Untersuchungsgebiet liegt. Es befindet sich zu einem überwiegenden Teil innerhalb des Bundesgebietes in den Ländern Sachsen und Brandenburg. Lediglich etwa 2.0 km² liegen auf tschechischem Staatsgebiet. Im Spreeeinzugsgebiet liegt eine Reihe bereits bestehender Tagebaurestseen wie der Bärwalder See, die Seen Lohsa I und Lohsa II und der Bernsteinsee auf sächsischer Seite sowie der in Flutung befindliche Cottbuser Ostsee auf brandenburgischer Seite. Mit Stilllegung der Tagebaue werden weitere Restseen im Bereich Welzow Süd, Nochten und Reichwalde entstehen (Braunkohleausschuss der Gemeinsamen Landesplanungsabteilung Berlin-Brandenburg, 2021, und Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH [LMBV], 2015 und 2016). Auch diese Gewässer werden sich im Spreeeinzugsgebiet befinden.

Abbildung 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet in Ostsaschen



Die Karte dient der Übersicht über den Modellraum und beinhaltet die Lage des Spreeeinzugsgebiets inklusiver der darin enthaltenen Fließgewässer im Osten Sachsens. Die Spree und die größten Bergbaufolgeseeen und Talsperren sind ebenfalls dargestellt. Die Darstellung des Spreeeinzugsgebiets und der Fließgewässer erfolgt auf Grundlage von Daten des LfULG. Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Die Betrachtung der Grundwasserverhältnisse mit Fokus auf die Grundwasserneubildung und die Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkung erfolgt aus diesem Grund am Einzugsgebiet der Spree. Wie beschrieben, befindet sich darin eine Vielzahl der entstehenden und bestehenden Restseen und andererseits die folgenden Flutungen hauptsächlich das Spreegebiet betreffen werden, während im Einzugsgebiet der Schwarzen Elster die Flutung der Restseen weitestgehend abgeschlossen ist, und sich derzeitige Problemstellungen in diesem Bereich vor allem mit dem Rückgang der Seewasserstände in Trockenjahren und Standsicherungsprobleme im Umfeld der Seen ergeben. Die Spree stellt darüber hinaus das wichtigste Fließgewässer für die Wasserversorgung des Spreewaldes dar. Das Biosphärenreservat Spreewald ist als UNESCO Erbe besonders erhaltenswert. Auch als touristisches Ziel (2.098.234 Übernachtungen im Jahr 2019) stellt der Spreewald einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor in der Region dar (Friedrich, o.J.).

Berlin als Unterlieger des Spreewaldes gewinnt Trinkwasser aus Grundwasservorräten, die mit Hilfe von Uferfiltration neugebildet werden. Diese Uferfiltration wird im östlichen Bereich der Stadt Berlin mit Spreewasser realisiert (Möller & Burgschweiger, 2008). Auch aus diesem Grund gilt die Spree als besonders kritischer Fluss beim Transformationsprozess in der Lausitz.

Heute hat die Spree in Niedrigwasserzeiten am Pegel Sandower Brücke in Cottbus einen Mindestabfluss von $4,13 \text{ m}^3/\text{s}$ (gemessen am 03.10.2020) (Uhlmann et al., 2023). Dieser Mindestabfluss ist nur durch die Einleitung der Sumpfungswässer aus den laufenden Tagebauen südlich von Spremberg gewährleistet. Aus der vorbergbaulichen Vergangenheit sind deutlich niedrigere Abflüsse bekannt, wie am 17.09.1911 mit $1,16 \text{ m}^3/\text{s}$ (Uhlmann et al., 2023). Mit Abschaltung der Sumpfungwasserpumpen der Tagebaue ist also für die Zukunft ein deutlicher Rückgang der Wasserführung der Spree in Niedrigwasserzeiten zu erwarten und stellt damit die Wasserversorgung des Spreewaldes und Berlins sowie die Ökologie des Gewässers vor große Herausforderungen.

Das gesamte Spreeeinzugsgebiet zu betrachten war aufgrund seiner Größe und Heterogenität im Rahmen des Projektes nicht möglich. Es erfolgte daher eine Konzentration auf den sächsischen Teil des Spreeeinzugsgebietes und damit maßgeblich der Oberlausitz.

4 Der vorbergbauliche Zustand

4.1 Historischer Zustand der Oberflächenwasser und mittlere Grundwasserneubildung

Für die Spree hat bereits das Projekt „Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz“ zu einer umfassenden Darstellung der historischen Verhältnisse beigetragen (Uhlmann et al., 2023). Der Hauptteil der Erkenntnisse wurde dabei unter Beachtung des Abflusses der Spree am Pegel Sandower Brücke in Cottbus gewonnen. Für diesen Pegel liegen Messwerte ab Ende des 19. Jahrhunderts vor. Der Zeitraum zwischen 1895 – 1920 kann dabei als vom Bergbau noch weitestgehend unbeeinflusst angesehen werden. Das heißt also, dass die Spree für diesen Zeitraum die Antwort auf die natürlichen hydrologischen Verhältnisse im Spreegebiet wiedergibt. In Tabelle 1 sind die von der Arbeitsgemeinschaft zusammengetragenen Abflüsse der Spree am Pegel Sandower Brücke aufgeführt.

Besonders zu beachten sind die Entwicklung von Höchst- und Niedrigstabflüssen, an denen sich der anthropogene Einfluss besonders stark zeigt. Die Hochwasserspitzen nehmen ab den 60er Jahren deutlich ab, was mit der zunehmenden wasserwirtschaftlichen Abflusssteuerung und dem damit verbundenen Aufbau der Talsperren Quitzdorf, Bautzen und Spremberg zu erklären ist, die in erster Linie für den Hochwasserschutz geschaffen wurden, heute zudem auch zur Niedrigwasserstützung verwendet werden.

Tabelle 1: Abflüsse der Spree am Pegel Cottbus Sandower Brücke (nach Uhlmann et al. (2023), Daten des LfU Brandenburg)

Zeitraum	NQ	MNQ	MQ	MHQ	HQ
1893 – 1920	1,16	5,97	15,14	88,87	227,00
1920 – 1960	2,40	4,95	14,21	84,17	238,00
1960 – 1990	4,95	8,83	18,84	50,13	127,00
1990 - 2020	4,13	7,19	12,40	31,22	87,80

Die Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse gibt einen Hinweis auf den natürlichen Grundwasseranteil in der frühen Phase des Bergbaus, zeigt aber andererseits auch, wie stark dieses Signal mit Beginn der industriellen Braunkohleförderung und der damit verbundenen vermehrten Sumpfungswassereinleitung verfälscht ist. Die Entwicklung der Hochwasserabflüsse spiegelt die Wirksamkeit der ab den 1960er Jahren erschaffenen Talsperren zu Hochwassersteuerung wider.

Gleichzeitig zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Niedrigwasserabflüsse ab den 1960er Jahre, der sich durch die Einleitung der Sumpfungswässer ergibt. In Anbetracht dessen, dass mit dem Braunkohleausstieg die Sumpfungswassermengen zurückgehen, geht von den Niedrigwassersituationen aufgrund anhaltender Trockenzeiten die größte Unsicherheit für die Wasserversorgung entlang der Spree aus. Während des Grundwasserwiederanstiegs wird es noch immer Bereiche geben, in denen die Spree und ihre Zuflüsse vom Grundwasser entkoppelt sind und Wasser aus den Vorflutern in den Untergrund versickert, was den Abfluss der Spree im Vergleich zu vorbergbaulichen Bedingungen zusätzlich reduziert. Dem muss durch eine angepasste Bewirtschaftung entgegengewirkt werden.

Aus den Niedrigwasserabflüssen lässt sich jedoch eine Abschätzung zur Grundwasserneubildung im Gesamteinzugsgebiet des Pegels vornehmen. Es ist bei natürlichen Bedingungen davon auszugehen, dass der mittlere Niedrigwasserabfluss den grundwasserbürtigen

Abflussanteil in einem Fließgewässer repräsentiert. Der Pegel Sandower Brücke in Cottbus liegt an Flusskilometer 231.6 und entwässert ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von 2351,28 km² (Landesamt für Umwelt [LfU] Brandenburg, 2024). Damit ergibt sich für die beiden Zeitintervalle 1893-1920 und 1920-1960 aus den mittleren Niedrigwasserabflüssen aus Tabelle 1 jeweils eine mittlere Neubildung von 80,1 mm bzw. 66,4 mm. Es ist jedoch zu beachten, dass gerade für letzteren Wert bereits ein Einfluss durch den Bergbau in Form von Grundwasserabsenkung einerseits, die zu einer Entkopplung von Fließgewässern und Grundwasser führt und damit die Entwässerung des Grundwassers verhindert und Sumpfungswassereinleitung andererseits, gerade zum Ende des Zeitraums hin, anzunehmen ist. Weiterhin ist zu beachten, dass diese Werte über die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung keine Aussage treffen können. Es gibt demnach Gebiete mit stärker ausgeprägter Grundwasserneubildung jedoch auch Bereiche mit deutlich geringerer Neubildung oder im Fall von flurnahen Wasserständen sogar mit Grundwasserzehrung. Beispielsweise sind Waldgebiete häufig Gebiete mit geringeren Neubildungsraten, weil die Pflanzen den Großteil des in den Boden infiltrierenden Wasser für den Aufrechterhalt ihres Transpirationsstromes aufnehmen. Auch Gebiete mit ausgeprägtem Gefälle und damit verbundenen Oberflächenabflüssen neigen bei geringleitenden Oberböden zu geringerer Neubildung. Dennoch können diese Zahlen als erster Anhaltspunkt für die mittlere Grundwasserneubildung in der Lausitz dienen.

4.2 Bergbauliche Tätigkeiten und Grundwasserabsenkung in der Lausitz

Der Bergbau in der Lausitz begann in einer frühen Phase im 19. Jahrhundert, bei oberflächennah anstehenden Flözen. Für diese Arbeiten war eine großflächige Absenkung des Grundwassers nicht notwendig. Erst mit dem industriellen Abbau, der ab den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts an Fahrt aufnahm, wurde die Absenkung des Grundwassers notwendig, um an die tiefer liegenden Flöze, darunter vor allem das zweite Lausitzer Braunkohleflöz zu gelangen, das in Tiefen von 35 – 120 m unter Geländeoberkante angetroffen wird (Schulze & Petzold, 2010). Das Grundwasser muss bis in entsprechende Tiefen abgesenkt werden, um auch Liegendwasserdurchbrüche zu vermeiden und einen sicheren Betrieb der Tagebaue zu gewährleisten.

Um für die spätere Planung der Rekultivierung und Renaturierung nach Beendigung der Auskohlung die ursprünglichen Grundwasserstände zu kennen, wurden im Laufe der Bergbaugeschichte in einzelnen Lausitzer Regionen die Grundwasserstände untersucht. So stammt von Keilhack ein Vergleichsplan der Grundwasserisohypsen für die Region Hoyerswerda und Senftenberg der Jahre 1908 und 1933 (Keilhack, 1934). Der Plan lag im Rahmen der Projektbearbeitung vor.

Weitere Hinweise zu den vorbergbaulichen Grundwasserständen lieferten die Arbeiten von Elze, der im Rahmen seiner Promotion unter anderem die Grundwassersituation südlich von Spremberg aufzeichnete (Elze, 1931). Weitere Untersuchungen erfolgten durch Milde, der die vorbergbaulichen Grundwasserstände das östliche Baruther Urstromtal (Milde, 1966). Für das knapp 1888 km² große Untersuchungsgebiet, schließt Milde nach Auswertungen von Wasserwerksdaten aus Cottbus und Forst sowie der Grundwasserfassung des Tagebaus Greifenhain auf ein Grundwasserdargebot von 7,8 m³/s. Umgerechnet auf das zugrundeliegende Einzugsgebiet ergibt sich eine mittlere jährliche Grundwasserneubildung von 130 mm.

Im Verlauf der 1970er und 1980er Jahre wurden durch die Bergbaubetriebe die Kartenwerke zusammengeführt und bis ins Jahr 2013 kontinuierlich ergänzt. Der letzte Arbeitsstand dieser Karte ist auf Dezember 2013 datiert und lag zur Projektbearbeitung vor. Es sind insgesamt Daten aus den Jahren 1908 – 1988 in diesem Plan enthalten. Es wurden Grundwasserstände miteinander in Beziehung gesetzt, die allein aufgrund der zeitlichen Differenz der Aufnahme dieser Daten formal nicht in Beziehung zu setzen sind. Der Plan ist also lediglich als Hinweis auf die vorbergbaulichen Grundwasserverhältnisse zu verstehen. Dennoch ist er hilfreich für die Beurteilung der Frage, welche Grundwasserstände sich in etwa einstellen werden und wie der Grundwasserstrom in der Vergangenheit ausgesehen haben könnte. Sowohl LEAG als auch LMBV, die gemeinsam diesen Plan erarbeitet haben, betonen, dass diese Karte nicht als wortwörtlich vorbergbaulicher Ist-Zustand angesehen werden kann. Für wasserwirtschaftliche Planungen sind die bekannten historischen Daten als zu unsicher und zu lückenhaft einzuschätzen.

Der Name Lausitz entstammt dem Sorbischen „łuža“ und bedeutet so viel wie feuchte Wiese. Dieser Name deutet darauf hin, dass die Lausitz aufgrund der geologischen Situation mit langsam abfließendem Grundwasser eine Reihe von Gebieten mit erhöhten Grundwasserständen hatte, etwa entlang des Spreewaldes. Das heißt, dass zu erwarten ist, dass sich nach Einstellung von rein durch die Grundwasserdynamik gesteuerten Grundwasser-verhältnissen erneut Gebiete mit geringen Grundwasserflurabständen entwickeln werden, sofern sie nicht durch künstlich erzeugte Grundwassersenkungen wie Zielwasserstände von Bergbaufolgesenkungen oder fortgeführter Grundwasserhebung betroffen sind. Auch die wasserwirtschaftliche Steuerung der Fließgewässer und die damit verbundene Verringerung der Hochwasserspitzen hat einen Einfluss auf die Ausbildung der künftigen Grundwasserstände. Gerade Hochwassersituationen können sich von den Fließgewässern ins Grundwasser durchpausen, und zu einer kurzfristigen Stagnation oder gar Umkehr der Grundwasserströmung entlang des Fließgewässers führen. Diese Eigendynamik wird für den sich künftig einstellenden Grundwasserstand anders aussehen, als in der Vergangenheit. Für die vorliegende Arbeit werden die Erkenntnisse von Milde zur Grundwasserneubildung im Baruther Urstromtal als besonders wertvoller Hinweis angesehen, weil neben der Abschätzung aus dem Spreeniedrigwasserabfluss mit 66 – 80 mm ein Wert von 130 mm gegenübergestellt werden kann, der die tatsächlichen Verhältnisse in einem klar abgrenzbaren Gebiet innerhalb der Lausitz widerspiegelt.

5 Die Grundwasserneubildung in der Lausitz

5.1 Ausgangslage

Wie in den vorangegangenen Kapiteln deutlich geworden ist, ist eine Abschätzung der Grundwasserneubildung aus historischen Daten nur schwer möglich und liefert lediglich Hinweise auf mittlere Raten für zumeist sehr große Gebiete oder Detailaufnahmen für kleine Teilbereiche. Um jedoch die Fragen beantworten zu können, welcher Anteil des Porenraumes im Untergrund sich im Zuge des Grundwasserwiederanstiegs ohne Fremdwasserzuführung mit Wasser füllt oder wie groß das Wasserdargebot des geologischen Untergrundes nach Beendigung des Wiederanstiegs eingeschätzt werden kann, ist die Kenntnis der zu erwartenden Grundwasserneubildung notwendig. Gegenwärtig besteht noch ein Wasserdefizit von rund 6 Mrd. m³ Wasser, um die bergbaulichen Hohlformen und den unterirdischen Porenraum zu befüllen (Uhlmann et al., 2023). Wie groß der Anteil der Grundwasserneubildung am Ausgleich dieses Defizits sein kann, ist bislang nicht hinreichend geklärt. Die folgenden Kapitel stellen daher die geeigneten Verfahren vor, um Grundwasserneubildung zu ermitteln und wägen die Machbarkeit für die Lausitz ab. Anschließend werden mehrere Modellverfahren vorgestellt und deren Resultate für die Lausitz ausgewertet.

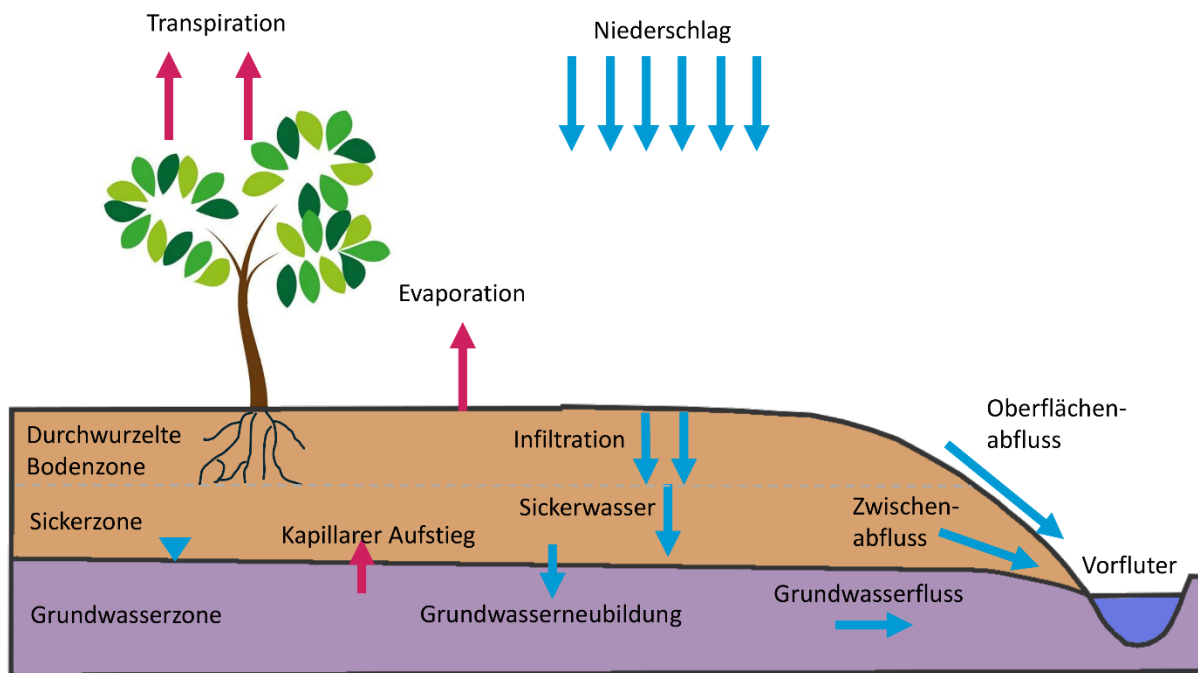
5.2 Grundwasserneubildung als Teil des Landschaftswasserhaushalts

Die Grundwasserneubildung ist ein Teilaspekt der Wasserbilanz einer Landschaft. Abbildung 2 zeigt die hydrologischen Prozesse in einem ungestörten hydraulischen System, die in ihrer Gesamtheit den Landschaftswasserhaushalt beeinflussen.

Die linke Seite der Abbildung stellt eine Wasserscheide sowohl für das Grundwasser als auch für das Oberflächenwasser dar, so dass jeglicher Gebietsabfluss über den dargestellten Vorfluter erfolgt. Für die Grundwasserneubildung sind vor allem die im linken Teil der Abbildung dargestellten Prozesse bedeutsam. Niederschlagswasser trifft auf die Bodenoberfläche und kann dort infiltrieren. Das Wasser perkoliert durch die ungesättigte Zone und erreicht den wassergesättigten Bereich im Untergrund, wo es das Grundwasser anreichert. Da das Niederschlagswasser durch Oberflächenabfluss, Interzeption, Verdunstung aus dem Boden und Transpiration durch Pflanzen sowie laterale Abflüsse im Untergrund nicht ungehindert den Grundwasserkörper erreicht, wird nicht der komplette Niederschlag in Grundwasserneubildung umgesetzt.

Auf dem Weg durch die Atmosphäre zum Boden bleibt Niederschlagswasser an Hindernissen wie Pflanzenoberflächen hängen. Diese Art des Niederschlagsrückhalts heißt Interzeption. Der Anteil des Wassers verdunstet und steht dem Bodenwasserhaushalt nicht zur Verfügung. Auf versiegelten Flächen, verdichteten Flächen und wassergesättigten Flächen in Gefällelage tritt Oberflächenabfluss auf. Das heißt, dass das Niederschlagswasser zum Teil oder vollständig oberirdisch abfließt, oder in Siedlungsflächen der Kanalisation zugeführt wird. Auf diese Weise gelangt es schnell in den Vorfluter und steht nicht zur Grundwasserneubildung zur Verfügung. In Gelände mit deutlichem Gefälle besteht außerdem die Möglichkeit der Ausbildung eines Zwischenabflusses. Dabei bewegt sich eine Sättigungsfront innerhalb der ungesättigten Zone lateral in Richtung Vorfluter.

Abbildung 2: Wasserhaushalt der Landschaft



Die Abbildung zeigt die wesentlichen Wasserflüsse in der Landschaft. Besonders zu berücksichtigen ist die Infiltration, Sickerwasserbewegung in die Tiefe und die beim Übergang ins Grundwasser folgende Grundwasserneubildung. Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Das Wasser, das in den Boden infiltriert, kann je nach Bewuchs und Jahreszeit über die Wurzel von Pflanzen aufgenommen und über die Spaltöffnungen der Grünen Pflanzenbestandteile transpiriert werden, so dass dem Boden aktiv Wasser entzogen wird. Gleichsam kann Wasser direkt aus der Bodenoberfläche verdunsten. Beide Prozesse werden unter dem Begriff Evapotranspiration zusammengefasst. Wasser, das nicht durch Evapotranspiration verloren geht, folgt der Gravitation in Richtung Grundwasser (Begriff Sickerwasser in der Abbildung). In Bereichen mit geringen Flurabständen kann darüber hinaus der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser in die ungesättigte Zone bedeutsam sein. Wird die ungesättigte Zone durch Pflanzen ausreichend entwässert ist es in Böden mit bindigen Bodenanteilen möglich, dass das Potentialgefälle zwischen Grundwasserstrom und ungesättigter Zone so ausfällt, dass Wasser aus dem Grundwasser aufsteigt. Dies stellt einen Grundwasserverlust innerhalb der Landschaft dar.

Es gilt also aus Sicht des Grundwasserkörpers die Bilanz

$$h_{GWN} = h_{SW} - h_{kA} \quad (1)$$

Das ist die Wasserbilanz des Grundwasserkörpers in Austausch mit der ungesättigten Zone, wobei h_{GWN} die Grundwasserneubildung, h_{SW} die Sickerwassermenge und h_{kA} der kapillare Aufstieg sind. Die Einheit ist jeweils Millimeter.

Die Sickerwassermenge berechnet sich aus dem Niederschlag abzüglich der oben aufgeführten Wasserverluste

$$h_{SW} = h_N - (h_I + h_{TP} + h_E + h_{OA} + h_z) = h_N - h_{AO} - h_{ET} \quad (2)$$

Es ist ersichtlich, dass der Niederschlag h_N unter natürlichen Bedingungen ohne Grundwasseranreicherung der einzige Zufluss in das System darstellt, während h_I (Interzeptionsverdunstung), h_{TP} (Transpiration), h_E (Evaporation), h_{OA} (Oberflächenabfluss) und h_Z (Zwischenabfluss) die wesentlichen Verlustterme sind. Häufig werden die Verlustterme auch als Oberflächenabfluss oder Abfluss h_{AO} und Verdunstungshöhe h_{ET} zusammengefasst. Damit gilt für die Grundwasserneubildung

$$h_{GWN} = h_N - (h_I + h_{TP} + h_E + h_{OA} + h_Z + h_{kA}) \quad (3)$$

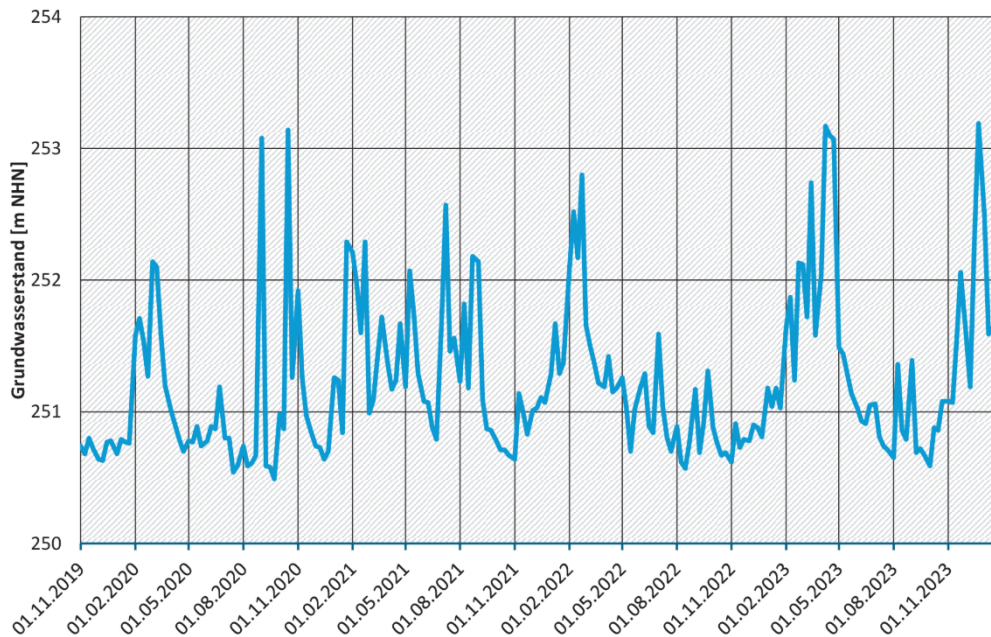
Es wurde bereits darauf verwiesen, dass einige der Prozesse eine ausgeprägte Saisonalität aufweisen. So haben Interzeption und Transpiration bei belaubten Bäumen und krautigen Pflanzen ein Maximum im Sommerhalbjahr, vor allem in der Wachstumsphase der Vegetation. Mit einer erhöhten Transpiration und damit erhöhten Entwässerung der ungesättigten Zone kann bei geringen Grundwasserflurabständen ein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser erfolgen und so Wasser an die Wurzeln der Pflanzen nachliefern. Nur wenige angepasste Arten können direkt in dauerhaft gesättigtem Boden wurzeln. Evaporation erfolgt vordergründig aus Pfützen auf gesättigtem Boden oder aus dem unbewachsenen Boden selbst, etwa Feldern nach der Ernte. In letztem Fall hat die Evaporation eine klare Saisonalität oder findet auf noch unbewachsenen Kippenflächen statt. Sofern Grundwasserstände nicht wenige Zentimeter unter der Geländeoberkante liegen, wie es beispielsweise bei Niedermooren und in der Umgebung von Oberflächengewässern bei flachen Uferbereichen der Fall ist, reißt der Evaporationsstrom bei ausbleibenden Niederschlägen schnell ab, weil die hydraulischen Leitfähigkeiten, bei abnehmenden Wassergehalten stark zurückgehen (Kutilek & Nielsen, 1994). Nicht zuletzt weist auch der Niederschlag eine Saisonalität auf.

Die Grundwasserneubildung weist aufgrund der gemäßigten klimatischen Bedingungen in Deutschland ebenfalls eine typische Saisonalität auf. Im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) entwässern die Grundwasserkörper, während im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) die Neubildungsphase verläuft. In Abbildung 3 ist das für eine Grundwassermessstelle in der Oberlausitz in Bischdorf dargestellt. Die Neubildung, die in der Abbildung als geringer werdender Wasserstand unter Geländeoberkante (GOK) erkennbar ist, findet maßgeblich in den Anfangsmonaten des Kalenderjahres statt, während im Sommerhalbjahr die Grundwasserstände bis zum Herbst sinken. Die Begründung dafür liegt in der Beschaffenheit der ungesättigten Zone. Erst wenn ausreichend Wasser in den Boden infiltriert und die Aufnahme durch Pflanzen so stark reduziert ist, dass das Wasser die wurzelfreie Zone erreicht hat, die im Mittel eine Tiefe von 0.8 m bei Grünland bis 1.2 m im Wald annimmt (Wendland et al. 2020), kann das Oberflächenwasser das Grundwasser erreichen und zu einer Neubildung führen. Dem Konzept der Feldkapazität folgend findet eine Neubildung nur dann statt, wenn der Boden einen Sättigungsgrad S

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

erreicht, dass sich ein Wassergehalt θ einstellt, der im Boden zu einem Matrixpotential kleiner als $pF = 1.8$ führt (Sponagel, 2005). Der pF -Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Saugspannung des Bodens. Ein Wert von 1.8 entspricht dabei einer Saugspannung von 63 cm. θ_s und θ_r sind der Sättigungswassergehalt bei Wasserfüllung des gesamten effektiven Porenraums und der residuale Wassergehalt.

Abbildung 3: Saisonalität des Grundwasserstandes an einer Messstelle in Bischdorf



Die Abbildung verdeutlicht die Saisonalität des Grundwasserstandes in einer Messstelle in Bischdorf. Klar zu erkennen ist die im Herbst beginnende Neubildungsphase mit den höchsten Grundwasserständen, die sich über das Winterhalbjahr erstreckt, während in der Vegetationsperiode durch abreißen des Sickerwasserzustroms die Grundwasserstände absinken. Die Darstellung erfolgte auf der Grundlage von Daten des LfULG, die aus dem „interdisziplinäre Daten und Auswertungen [idA]“-Datenportal entnommen wurden (idA Datenportal, 20.06.2024).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Der natürliche Wasserhaushalt der Lausitz ist aufgrund der Bergbautätigkeit und deren Folgen wesentlich gestört und gehorcht bis zur Einstellung eines naturnahen mittleren Zustandes zusätzlichen Prozessen. Zum einen ist die Sickerstrecke in den Bereichen der Grundwasserabsenkung deutlich größer, so dass das Wasser in der ungesättigten Zone längere Verweilzeiten aufweist. Ist das Grundwasser um Fließgewässer unter das Niveau der Gewässersohle abgesenkt, sind diese unter Umständen nicht mehr wie in Abbildung 2 mit dem Fließgewässer verbunden. Diese haben damit ihre Vorflutfunktion verloren und infiltrieren selbst in den Untergrund, sofern sie keine Abdichtung erhalten haben. Die Flüsse speisen also ebenfalls das Grundwasser und sorgen für eine Neubildung.

5.3 Modellansätze für die Grundwasserneubildungsbestimmung

Um auf die Grundwasserneubildung zu schließen, bieten sich eine Reihe von Verfahren an, deren Grundlagen im Folgenden dargestellt werden sollen. Es erfolgt gleichsam eine Einschätzung für die Eignung in der Anwendung in der Lausitz.

5.3.1 Wasserbilanzrechnungen

Mithilfe der oben genannten Gleichungen (2) und (3) lässt sich die Grundwasserneubildung rechnerisch aus den Input- und Outputgrößen des Wasserhaushalts berechnen. Für ebene Gebiete kann von einer direkten eindimensionalen vertikalen Wasserbewegung im Boden

ausgegangen werden. Ein Oberflächenabfluss ist nicht zu erwarten. Die Grundwasserneubildung lässt sich damit mittels

$$h_{GWN} = h_N - h_{tETP} \quad (5)$$

berechnen. Dabei sind h_N die Höhe des korrigierten Niederschlags und h_{tETP} die tatsächliche Evaporation des jeweiligen Standortes. Der Niederschlag wird in den Niederschlagsmessnetzen der Länder und des DWD ermittelt. Die tatsächliche Evapotranspiration ist jedoch von der Bodenart, der Menge des pflanzenverfügbaren Wassers im Boden, dem Grundwasserflurabstand, dem Bewuchs und dem Strahlungshaushalt eines Standortes sowie dem Wind abhängig. Verdunstungsmessmethoden zielen häufig nur auf die Bestimmung von verdunstendem Wasser aus Verdunstungskesseln ab. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf den Boden ist nicht ohne Korrektur möglich. Nur Lysimeter liefern solide Messwerte für die tatsächliche Verdunstung (siehe 5.3.3). Im Falle von Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss gerät dieses Verfahren schnell an seine messtechnische Grenze und ist dann maximal für kleine Gebiete bestimmbar. Eine besondere Wasserbilanzgröße ist in diesem Zusammenhang die klimatische Wasserbilanz eines Standortes, die mittels

$$h_{klim} = h_N - h_{pET} \quad (6)$$

berechnet wird, wobei h_N die in einem Gebiet fallende Niederschlagshöhe und h_{pET} die Höhe der potentiellen Evapotranspiration ist. Dieser Kennwert lässt auf die Aridität oder Humidität eines Standortes schließen. Die potentielle Evapotranspiration ist die Wassermenge, die bei gegebenem Energiehaushalt und klimatischen Bedingungen und gewähltem Bewuchs bei ausreichendem Wasserdargebot verdunsten würde. Die potentielle Transpiration lässt sich in Form der Grasreferenzverdunstung messen und auf andere Bewuchsarten mittels Korrekturfaktoren (crop factor) übertragen (Allen et al., 1998). Die klimatische Wasserbilanz wird in der Regel für hydrologische Jahre berechnet. Sie liefert damit keine Aussage zur Grundwasserneubildung, da einerseits der Saisonalität von Niederschlägen und potentieller Verdunstung keine Beachtung geschenkt wird und andererseits die potentielle Verdunstung eine starke Überschätzung der tatsächlichen Verdunstung darstellt. Im Feld fällt bei anhaltender Trockenheit der Wassergehalt in den Böden so stark, dass Pflanzen das Wasser nicht mehr entziehen können und ihren Stoffwechsel drosseln.

Der Ansatz ist prinzipiell für die Lausitz geeignet. Die Eingangsgrößen lassen sich aus meteorologischen Daten ableiten, wie sie vom Deutschen Wetterdienst (DWD) gewonnen werden. Tatsächliche Verdunstung zu berechnen gelingt für kleine Gebiete mit klar definierter Vegetation am besten, vor allem wenn die zeitliche Dynamik der Neubildung quantifiziert werden soll. Für größere Gebiete gibt es empirische Ansätze, wie beispielsweise die Verwendung der BAGROV-Beziehung (siehe 5.3.6.2). Eine direkte Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung für große Gebiete ist jedoch nur über Modellansätze möglich. Für die Lausitz kommt erschwerend hinzu, dass sich in Anlehnung an den vorbergbaulichen Zustand aber auch in Nähe der Bergbaufolgeseen geringe Flurabstände einstellen werden, so dass eine Grundwasserzehrung möglich wird. Diese zu quantifizieren ist mit diesen einfachen Ansätzen jedoch nicht möglich.

5.3.2 Trockenwetterabfluss in Fließgewässern und Quellschüttungen

Der erste Ansatz konzentriert sich auf die Vorfluter, die ein Grundwassereinzugsgebiet entwässern. Aus der Abflussganglinie des Fließgewässers wird der Basisabflussanteil abgetrennt. Diese Verfahren werden als Ganglinienseparationsverfahren zusammengefasst. Für langjährige Zeitreihen in ungestörten Einzugsgebieten gilt, dass der Basisabfluss gleich der Grundwasserneubildung ist (Kontinuitätsgesetz). Durch die Betrachtung langjähriger Zeiträume kann damit die Wirkung der Wasserspeicherwirkung in Grund- und Bodenflächenwasser vernachlässigt werden und folglich muss die Menge des neu gebildeten Grundwassers der Menge des abfließenden Wassers entsprechen.

Zur Abtrennung der Trockenwetterabflüsse stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, wovon vor allem das MoMNQ-Verfahren (Wundt, 1958, und weiterentwickelt von Kille, 1970), das Au-Linien-Verfahren (Natermann, 1951) und vor allem in Sachsen das Modell DIFGA (Schwarze, 1985) verbreitet sind. Die Verfahren dienen allesamt der Separation von Abflussganglinien von Oberflächengewässern, um auf den grundwasserbürtigen Abflussanteil zu schließen. Die Ergebniszeiträume sind dabei verschieden. Während das MoMNQ-Verfahren Aussagen über langfristige Mittelwerte liefert, sind die beiden anderen Verfahren in der Lage, Ergebnisse für Monats- oder Jahreswerte zu liefern.

Vorteil all dieser Verfahren ist, dass bei bekanntem Einzugsgebiet Aussagen über langjährige Mittelwerte der Grundwasserneubildung getroffen werden können. Für die Lausitz besteht jedoch gegenwärtig die Schwierigkeit, dass die Fließgewässer mit regelmäßiger Abflussmessung in Bereichen der Grundwasserabsenkung keinen Kontakt zum Grundwasser haben, durch die Bergbautätigkeit abgedichtet sind und außerdem einer strengen Abflusssteuerung unterliegen. Für eine quantitativ korrekte Basisabflussabtrennung müssen daher alle Fremdwassereinleitungen bekannt sein und herausgerechnet werden können. Die Abflüsse der Lausitz sind derart anthropogen überprägt, dass eine korrekte Bestimmung des Basisabflusses gegenwärtig nicht möglich ist. Die Anwendung des Modells DIFGA wird in der Nähe von bergbaulich beeinflussten Gebieten ausgeschlossen (Lünich und Steinl, 2011).

Eine weitere Methode, die sich unter Annahme einer stationären Strömung des Kontinuitätsgesetzes bedient, ist die Quellschüttungsmethode. Dabei wird der mittlere Abfluss einer Quelle gemessen. Wiederum gilt, dass die erhaltene Wassermenge der Grundwasserneubildung des Einzugsgebietes entspricht, sofern keine Fremdwasserzuführung oder Wasserentnahmen vorliegen. Die Methode ist entsprechend auf kleine Einzugsgebiete begrenzt.

5.3.3 Grundwasserneubildung aus Lysimetermessungen

Eine direkte Bestimmung der Grundwasserneubildung kann mit Hilfe von Lysimeteranlagen erfolgen. Eine Lysimeteranlage, mit deren Hilfe der Wasserfluss in der ungesättigten Zone untersucht werden kann, besteht im einfachsten Fall aus einem Metallzylinder, meist mit einer Oberfläche von 1 m² und einer Tiefe von mindestens 1,5 m, in dem ein ungestört gewonnener Bodenmonolith eingebaut ist. Um den Wasserfluss innerhalb des Bodens zu untersuchen, können Saugspannungs- und Wassergehaltssonden in verschiedenen Tiefen eingebaut werden. Mit ihrer Hilfe lassen sich die vertikalen Wasserbewegungen beobachten. Weiterhin befindet sich der Monolith auf einer Waage, um die durch infiltrierendes oder verdunstendes Wasser

entstehende Massenveränderung des Monolithen zu erfassen. Der untere Rand ist im einfachsten Fall mit einem Ablauf ausgestattet, so dass dort anfallendes Wasser frei ablaufen und aufgefangen werden kann. Eine zweite Möglichkeit, um im Lysimeterkörper die gleiche Wasserbewegung wie im Feld zu simulieren, ist der Einbau eines Saugkerzenrechs am unteren Rand. Dieser wird durch einen Saugspannungssensor im anstehenden Boden in der direkten Umgebung der Lysimeteranlage gesteuert. Ist der Boden an der Referenzsonde im Feld trockener, wird dem Monolithen Wasser entzogen und in einen wägbaren Auffangbehälter geleitet. Umgekehrt kann bei einer höheren Feuchte des umliegenden Bodens Wasser zurück in den Monolithen transportiert werden. Auf diese Weise wird die natürliche Fließdynamik des Wassers im Boden erfasst und es kann die sich einstellende Sickerwassermenge für den Standort genau abgeschätzt werden. Ein Beispiel für eine solche Anlage beschreiben Pütz et al (2016).

Die Oberfläche des Lysimeters wird analog zur umgebenden Vegetation der Lysimeterstation bepflanzt. Das im Laufe der Zeit anfallende Sickerwasser im Sickerwassertank ist bei Lysimetern mit gesteuertem unterem Rand identisch mit der Grundwasserneubildung, weil es sich um die Wassermenge handelt, die nicht durch kapillaren Aufstieg wieder verloren geht. Bei Lysimetern mit freiem Ablauf fällt mehr Sickerwasser an als im Feld, weil das abgeleitete Wasser anders als im Feld keine Möglichkeit hat, vertikal zurück transportiert zu werden. Mit Hilfe der Wägung von Sickerwasserauffang und Lysimeterkörper kann sowohl der zeitliche Verlauf als auch die Menge des Niederschlags und die tatsächliche Evapotranspiration abgeleitet werden.

Derartige Anlagen sind in der Anschaffung teuer und bedürfen einer regelmäßigen Wartung, liefern jedoch zuverlässige Einschätzungen der Sickerwassermenge für die jeweilige Boden-Bewuchs-Kombination am Standort. In der Lausitz betreibt das Finsterwalder Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB) Lysimeter. Vier wägbare Lysimeter befinden sich in Grünwalde bei Lauchhammer (Schumann et al., 2019). Davon haben zwei einen Bodenmonolithen einer Braunerde auf Sand und zwei eine Füllung mit geschütteten Kippensedimenten. Bewuchs ist Gras, wobei jedoch eines der Braunerdelysimeter ohne Bewuchs gehalten wird, um die reine Evaporation zu messen. Leider war bislang keine Möglichkeit gegeben, die Messergebnisse für die Sickerwassermengen aus diesen für verschiedene Projekte genutzten Anlagen zu erhalten.

Die Ergebnisse von Lysimetern unterliegen in ihrer Aussagekraft einigen Einschränkungen. Einerseits besitzen sie oft nur eine geringe Bautiefe, die mit dem effektiven Wurzelraum oder sogar innerhalb des Wurzelraumes endet. Weiterhin werden Lysimeter, sofern sie nicht für Wasserhaushaltsmessungen angelegt sind, häufig mit geschütteten Materialien befüllt, die nicht die Heterogenität eines gewachsenen Bodens abbilden. Eine weitere Einschränkung ist häufig der Ausbau des unteren Randes an Lysimetern. Im Feld kann Wasser sowohl kapillar aufsteigen als auch sinken. Die meisten Lysimeter sind jedoch mit einem reinen Sickerwasserauslass ausgebaut, so dass das Wasser lediglich abfließen kann. Das geschieht zumeist nur wenn Sättigung vorliegt. Im Feld ist jedoch auch eine Wasserbewegung über die durchwurzelte Zone hinaus möglich, die über die sich einstellenden Wasserpotential induziert wird, auch wenn keine Wassersättigung des Bodens vorliegt. Außerdem zwingt die Beschaffenheit der Lysimeter, die keine lateralen Flüsse zulässt, die Fließbewegung des Wassers in die vertikale Richtung, so dass im Feld auftretende Effekte wie beispielsweise die Bildung von Zwischenabfluss nicht abgebildet werden können. Die Ergebnisse sind darüber hinaus Punktergebnisse für den Einzelstandort mit seinen eigenen klimatischen Bedingungen und Bewuchseigenschaften. Sie können nicht ohne

weiteres in die Fläche übertragen werden, sind aber dennoch geeignet, als Verifizierung für Modellergebnisse herangezogen zu werden und eine Größenordnung für die Grundwasserneubildung einer Region anzugeben. Ein weiteres Problem mit Lysimetern sind die recht hohen Anschaffungs- und Wartungskosten. Das Land Sachsen besitzt eine Lysimeterstation in Brandis bei Leipzig, bei der einige der Lysimeter mit Kippenböden aus dem mitteldeutschen Revier befüllt sind (Knappe et al., 2001). Diese Lysimeter sind aber für Aussagen für die Lausitz zu weit entfernt. Die Lysimeter des Finsterwalder Institut für Bergbaufolgeforschung wurden bislang nicht für die reine Quantifizierung des Wasserhaushalts der ungesättigten Zone und damit der Analyse von Sickerwasserbildung im Feld genutzt.

5.3.4 Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Standrohrspiegelhöhen in ungespannten Grundwasserleitern

Um Grundwasserproben gewinnen zu können oder um die Dynamik des Grundwassers zu untersuchen werden Grundwassermessstellen aufgebaut. Dazu werden Bohrungen angelegt, in die ein Kunststoffrohr eingelassen wird, das an der zu untersuchenden Stelle verfiltert ist, um das Grundwasser des umgebenden Gesteins einfließen zu lassen. In Abhängigkeit des Druckes des Grundwassers steigt es innerhalb des Rohres auf. Dadurch wird es möglich, die Grundwasserdruckhöhe aufzunehmen. Liegen in einem Grundwasserleiter ungespannte Verhältnisse vor, das Grundwasser befindet sich in einem Grundwasserleiter und wird nach oben hin nicht durch eine geringleitende Gesteinsschicht begrenzt, so entspricht die Standrohrspiegelhöhe der Grundwasseroberfläche vor Ort. Liegen gespannte Grundwasserverhältnisse vor, ist es möglich, dass die Druckhöhe über der Grundwasseroberfläche liegt. Das Wasser in der Messstelle steht dann über der tatsächlichen Grundwasseroberfläche. Im ungespannten Fall ist es möglich, aus der zeitlichen Dynamik des Verlaufs des Wasserstandes im Messstellenrohr auf Grundwasserneubildungsmengen zu schließen. Ist ein lateraler Zufluss von Grundwasser ausgeschlossen und steigt das Grundwasser im Standrohr um eine Höhe x an, so beträgt die Neubildung:

$$h_{GWN} = n_{eff} * x \quad (7)$$

Die Grundwasserneubildung ist also das Produkt aus dem Anstieg der Wassersäule x multipliziert mit der effektiven Porosität n_{eff} . Letztere kann aus den Lagerungseigenschaften und der Körnung des Aquifermaterials bestimmt werden. Das Ergebnis ist für die direkte Umgebung der jeweiligen Messstelle gültig. Es ist vorausgesetzt, dass das Grundwasser an der betreffenden Messstelle einer natürlichen Dynamik unterliegt. Weiterhin müssen andere Gründe für die Änderung der Standrohrspiegelhöhe berücksichtigt werden, wie Luftdruckschwankungen, Mondphasen und Zuflüsse aus anderen Quellen. Die Wirkung dieser Einflüsse lässt sich durch Zeitreihenanalyse und durch Zuhilfenahme von meteorologischen Daten aus dem Grundwasserstandssignal herausfiltern. Bei der Betrachtung langfristiger Zeitreihen zur Bestimmung der Neubildung aus den jährlichen Schwankungen der Standrohrspiegelhöhen sind jedoch kurzfristige Effekte wie Luftdruckschwankungen vernachlässigbar.

Für die Lausitz ist dieser Ansatz bei Wahl einer geeigneten Messstelle ein guter Weg, um auf die Grundwasserneubildung zu schließen. Problematisch ist jedoch, dass ein Großteil der Grundwassermessstellen keine natürliche Dynamik zeigt. Das liegt in Tagebäunähe an der fortwährenden Förderung der Grundwasserfassungen. Im renaturierten Bereich sind die

natürlichen Dynamiken häufig von der Steuerung benachbarter Bergbaufolgeseen überprägt, die sich nicht ohne Weiteres herausfiltern lässt. Es konnte keine Messstelle identifiziert werden, die über die notwendigen Eigenschaften verfügt. Dennoch ist dieser Ansatz für die Zukunft zu überdenken und erneut zu prüfen, zumal die LMBV in ihrem „Wasserwirtschaftlichen Jahresbericht“ für 2024 aussagt, dass das Wasserdefizit von Grund- und Oberflächenwasser bereits zu 95 % ausgeglichen ist und sich im Bereich des Altbergbaus allmählich eine weitgehende ungesteuerte Grundwasserdynamik einstellen kann (LMBV, 2025).

5.3.5 Ermittlung der Grundwasserneubildung mittels natürlicher Tracer

Wasser enthält in geringen Mengen die schwereren stabilen Isotope ^2H (Deuterium) und ^{18}O . Die isotopische Zusammensetzung von Niederschlag ist abhängig von der isotopischen Zusammensetzung des ursprünglich verdampften Wassers, das den Niederschlag bildet, von der Menge des aus diesem Wasserdampf bereits gebildeten Niederschlages sowie der Temperatur bei der Entstehung des Niederschlages. Entsprechend weisen Grundwasser und Oberflächenwasser verschiedene isotopische Zusammensetzungen auf, je nachdem wie sie gebildet wurden. Es ist daher möglich, in einem Grundwasserkörper, der aus rezenten Niederschlägen neugebildet wird, den Anteil von Niederschlags- und Oberflächenwasser zu bestimmen. Mit Hilfe nicht stabiler Isotope wie ^3H (Tritium), das aufgrund der Nuklearwaffentestes noch immer in der Atmosphäre auffindbar ist, kann das Alter von Grundwasser bestimmt werden. Tritium ermöglicht aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von 12,3 a die Datierung von Grundwasseraltern von maximal 100 a, bei älteren Proben muss auf andere Isotope wie beispielsweise gelöstes ^{14}C zurückgegriffen werden, dessen Halbwertszeit von 5730 a deutlich länger ist. Über Piston-Flow (Beschreibung eines sich vorwärtsbewegenden Sättigungshorizontes im Untergrund), Exponential- oder Dispersions-Modelle lässt sich die Menge des neugebildeten Grundwassers ableiten (Scanlon et al., 2002, sowie Beyerle, 2002). Derartige Analysen sind vor allem geeignet, wenn das Grundwasser ein deutlich größeres Alter als das infiltrierende Wasser aufweist, und finden daher vor allem Anwendung in ariden und semiariden Gebieten (Beyerle, 2002).

Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Grundwasserneubildung mittels künstlicher Tracer zu bestimmen, wie etwa Stoffen die durch die Industrialisierung zeitdefiniert in die Umwelt gelangten. Auch diese Methode ist vor allem nutzbar, um das Alter von Grundwasser zu charakterisieren. Eine großflächige Ermittlung der Grundwasserneubildung für kurze Zeiträume ist mit dieser Methode allerdings nicht verhältnismäßig durchführbar und wurde deshalb für das Projekt nicht weiterverfolgt.

5.3.6 Berechnung der Grundwasserneubildung mit Hilfe von Modellen

Da die direkte Messung der Grundwasserneubildung nicht möglich ist und in der Lausitz die oben ausgeführten Ableitungsmöglichkeiten nicht direkt umgesetzt werden können, ist die Nutzung von Modellen angeraten. Das Kapitel stellt verschiedene Ansätze vor, die zur Verfügung stehen und etabliert sind. Wichtig ist dabei, dass die Modelle, wenn sie nicht direkt die Richards-Gleichung für den Fluss des Wassers durch die ungesättigte Zone für einen konkreten Standort lösen (siehe 5.3.6.1) und eine hohe Güte der dafür nötigen Parameter vorliegt, handelt es sich bei den Ergebnissen stets um großräumige Mittelwerte. Diese Mittelwerte werden zumeist auf Einzugsgebietsbasis oder auf Teileinzugsgebietsbasis angegeben. Eine standortgenaue Berechnung ist unter Nutzung derartiger Modelle nicht möglich. Entsprechend werden die Ergebnisse besser, je kleiner das betrachtete Modellgebiet gewählt wird.

5.3.6.1 Physikalische Bodenwassermodelle

Im Folgenden werden Möglichkeiten vorgestellt, mittels Modellmethoden auf die Grundwasserneubildung zu schließen. Eine physikalisch basierte Möglichkeit ist die Lösung der Richards-Gleichung, die den Wasserfluss in der ungesättigten Zone beschreibt. Eine Modellanwendung, die eindimensionale Probleme lösen kann, ist die Anwendung Hydrus 1D (Šimůnek et al., 2008).

Ein Bodenprofil wird in seine Schichtenfolge zerlegt, für die die hydraulischen Eigenschaften parametrisiert werden müssen. Vor allem die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung als auch die Wassergehalts-Leitfähigkeitsbeziehung müssen dabei vorgegeben werden. An der Oberfläche des Modellprofils wirkt eine atmosphärische Randbedingung, wobei die gemessenen Flüsse beispielsweise aus Lysimetermessungen eingegeben werden können. Alternativ kann aus Niederschlagsdaten und der potentiellen Evapotranspiration nach Penman-Monteith die obere Randbedingung ermittelt werden. Je nach Wasserverfügbarkeit ermittelt Hydrus-1D die tatsächliche Evapotranspiration zu den vorgegebenen Bedingungen. Der untere Rand kann auf die Grundwasseroberfläche gelegt werden, so dass dort Wassersättigung herrscht. Unter Vorwärtsmodellierung wird nun berechnet, wie viel Wasser den unteren Rand des Modells erreicht und wie viel Wasser kapillar aufsteigt.

Auf diesem Weg kann für einen Standort bei bekannten Parametern für Boden, Pflanzenbewuchs und meteorologischen Daten hinreichend gut die Grundwasserneubildung abgeleitet werden. Gleichzeitig ist das die größte Schwierigkeit dieses Ansatzes. Die genaue Abschätzung der hydraulischen Parameter für das gesamte Profil, zumal sowohl die Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung als auch die Wassergehalts-Leitfähigkeitsbeziehung einer Hysterese unterliegen. Diese Beziehungen zu ermitteln stellt die Kernschwierigkeit beim Umgang mit derartigen Modellen dar, zumal bekannt ist, dass die Labormethoden, die zur Ableitung der hydraulischen Eigenschaften eingesetzt werden sich häufig anders verhalten als die Beobachtungen im Feld, in denen der Wasserfluss dynamisch stattfindet (Vogel et al., 2023). Darüber hinaus ist das Ergebnis lediglich ein Ergebnis für einen Standort und kann, ähnlich wie die Lysimetermessungen nicht auf große Flächen übertragen werden.

5.3.6.2 Empirische Modelle

Eine mögliche Modellgrundlage besteht darin, Erfahrungen aus Lysimetermessungen auf die Fläche zu übertragen. Das liefern empirische Regressionsmodelle, wie etwa das von Proksch (1990). Dabei werden Ergebnisse von Lysimetermessungen auf große Flächen übertragen. Die Bodenarten und Bewuchsarten werden dafür generalisiert, um die Ergebnisse aus den Lysimetern, die zumeist lediglich eine Boden-Bewuchs-Kombination abbilden, verwenden zu können. Mit den Lysimetern, die über große räumliche Bereiche verteilt sind, und die typische Landnutzungsformen abbilden, wird dann für die verschiedenen Nutzungsarten die Niederschlags-Sickerwasserbeziehung aufgenommen und eine Regressionsanalyse durchgeführt.

Mit Hilfe von Niederschlagsdaten, Landnutzungsdaten und Bodendaten kann schnell eine Abschätzung der Grundwasserneubildung erfolgen, wobei das Ergebnis nur für langjährige Zeitreihen gilt und lediglich eine mittlere Sickerwasserrate liefert. Dieser Wert ist dennoch für die Grundwasserbewirtschaftung wertvoll, weil wasserwirtschaftliche Planungen auf Grundlage langjähriger Kennwerte erfolgen sollten. Kurzfristige Neubildungsraten sind dem gegenüberstehend für kurzfristige Extremereignisse von Bedeutung, die mit empirischen Ansätzen nicht abgedeckt werden können. Weiterhin liefern derartige Modelle keine Aussagen

zur jährlichen Neubildungsdynamik oder direkten Wasserverlusten durch kapillaren Wasseraufstieg bei flurnahen Grundwasserständen, die jedoch für die Implementierung in Grundwasserströmungsmodellen bedeutsam sind.

Einen anderen Regressionsansatz wählten Wessolek et. al. (2009). Sie nutzten das Modell GWneu (Wessolek, 1989), um für 16 Standorte mit verschiedenen Boden-Bewuchs-Kombinationen und Klimabedingungen die Sickerwassermengen bei verschiedenen Niederschlagsmengen zu berechnen. Aus den Ergebnissen wurden nichtlineare Regressionsgleichungen abgeleitet, die für die Berechnung der Sickerwassermenge bei verschiedenen Boden-Nutzungs-Kombinationen verwendet werden. Eine weitere Eigenschaft dieses Verfahrens ist, dass die Wasserverfügbarkeit im Sommer über die Struktur der Regressionsgleichung entscheidet, da die Evapotranspiration im Sommer ihr Maximum hat. Außerdem wird umfangreich die Möglichkeit der Abschätzung des kapillaren Aufstiegs von Grundwasser in die Modelle mit einbezogen.

Ein dritter Ansatz ist die Verwendung der empirisch abgeleiteten Bagrov-Beziehung (Glugla et al., 2003) zur Ableitung der tatsächlichen Verdunstung. Damit kann nach Gleichung (2) bei vernachlässigbarem Oberflächenabfluss die Grundwasserneubildung abgeleitet werden. Die Bagrov-Beziehung ist wie folgt definiert:

$$\frac{d\overline{ETa}}{d\overline{P_{korrr}}} = 1 - \left(\frac{\overline{ETa}}{\overline{ETmax}} \right)^n \quad (8)$$

Dabei sind $\overline{ETa}$ der mehrjährige Mittelwert der tatsächlichen Verdunstung bei einer mittleren Wasserverfügbarkeit aus dem korrigierten Niederschlag $\overline{P_{korrr}}$ bei der Energieverfügbarkeit vor Ort ausgedrückt durch die maximale Verdunstung $\overline{ETmax}$ bei unendlicher Wasserverfügbarkeit. Im Exponenten n verbergen sich die Informationen zu Versiegelungsgrad, Bodennutzung und Bodenbedeckung. Er wird auch als Effektivitätsparameter bezeichnet. Eine analytische Lösung der Bagrov-Beziehung existiert nicht, jedoch sind numerische Lösungen möglich. Das wurde unter anderem im Modell BAGLUVA (Glugla et al., 2003) umgesetzt, das nach Erweiterung mit einer multiplen linearen Regressionsanalyse zur Ableitung des Baseflowindex (Verhältnis von Basisabfluss zu Gesamtabfluss) für den Hydrologischen Atlas Deutschlands entwickelt wurde und entsprechend deutschlandweit Ergebnisse vorliegen (Neumann, 2009).

Diese empirischen Verfahren eignen sich gut als Ansätze in der Lausitz. Sie sind darauf ausgelegt, anhand von Niederschlagsdaten, vorhandenen Landnutzungsdaten und Bodendaten auf die Sickerwasserraten zu schließen. Letztlich bleibt jedoch auch dabei die Unsicherheit, dass einerseits die Ergebnisse des Proksch-Verfahrens an einzelnen Lysimetern gewonnen wurden und andererseits die Ergebnisse des TUB-BGR-Verfahrens an 16 Standorten auf Grundlage eines an diesen Orten kalibrierten Modells erzeugt werden, deren unmittelbare Übertragbarkeit auf andere Regionen zu hinterfragen ist. Einen robusten Schätzwert sollten diese Modelle jedoch dennoch liefern.

5.3.6.3 Bodenwasserhaushaltsmodelle

Die nächste Stufe in der Reihe der Modellrechnungen sind Bodenwasserhaushaltsmodelle. Diese unterscheiden sich von den physikalischen Bodenwassermodellen insofern, als dass sie nicht primär die Richards-Gleichung lösen, sondern vielmehr die Wasserhaushaltsgrößen meist in Form von Linearspeichern oder nichtlinearen Beziehungen abbilden. Die Prozesse werden also konzeptionell und nicht physikalisch abgebildet. Die Länder Sachsen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt, aber auch die LMBV und die LEAG nutzen für die Ableitung der Grundwasserneubildung das Bodenwasserhaushaltsmodell „ArcEGMO“ (persönliche Rücksprache mit der LMBV und der LEAG, sowie Ergebnisse aus den Landeswasserportalen der genannten Länder). Entsprechend erfolgt die Beschreibung grundlegender Eigenschaften der Bodenwasserhaushaltsmodelle anhand von ArcEGMO.

ArcEGMO wird vom Büro für Angewandte Hydrologie in Berlin gepflegt und vertrieben. Es ist aus dem Einzugsgebietsmodell EGM0 ((Becker, 1975) und (Pfützner, 1990)) hervorgegangen. Grundlegend wird das Modellgebiet in Hydrotöpfe unterteilt, worunter räumliche Einheiten verstanden werden, die gleiche hydrologische Eigenschaften aufweisen. Das Modell ist modular aufgebaut und es können, je nach Fragestellung und Datenverfügbarkeit, verschiedene Komplexitätsgrade erreicht werden. Auf Grundlage von topografischen und klimatischen Eigenschaften werden unter Zuhilfenahme von Boden und Bewuchsinformationen die Abflussformen Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss (hypodermischer Abfluss), Drainageabfluss, Abfluss aus Kanalisationen und der Grundwasserabfluss berechnet.

Bei Bedarf ist es möglich, das Sickerwasser (Perkolation) in Form eines Linearspeichermodells in verschiedene Fraktionen aufzuteilen. Dabei wird zumeist in einen Abfluss RG1 und RG2 unterschieden. RG1 wird als schneller Grundwasserabfluss bezeichnet, wie er vor allem im vergrusteten Bereich auf Kluftgrundwasserleitern beobachtet werden kann. Das ist der Bereich oberhalb der anstehenden Festgesteine, der eine physikalische und chemische Verwitterung und damit Zerkleinerung erfahren hat. RG2 ist langsamer Grundwasserabfluss von Poren und innerhalb der Klüfte von Kluftgrundwasserleitern. In Sachsen wird daher vorgeschlagen, RG1 und RG2 in Porengrundwasserleitern als eine Größe zusammenzufassen (Gebel et al., 2017). Es gilt, dass der Grundwasserabfluss gleich der Grundwasserneubildung ist.

Bodenwasserhaushaltsmodelle gelten heute als Methode der Wahl für die Modellierung der Wasserhaushaltsgrößen der Landschaft. Sie sind vielseitig anpassbar, modular aufgebaut und können eine große Anzahl hydrologischer Prozesse abbilden. Sie arbeiten großskalig auf Einzugsgebietsebene und sind deshalb auch in großflächigen Gebieten anwendbar. Sie bieten darüber hinaus die Möglichkeit, per Schnittstelle in andere Modellwerkzeuge eingebunden zu werden. ArcEGMO hat sich vor allem in den östlichen Bundesländern etabliert, während jedoch beispielsweise der Erftverband und die Länder Niedersachsen und Bremen auf das Modell GROWA bzw. in seiner Erweiterung mGROWA des Forschungszentrums Jülich setzen (AG Grundwasserneubildung des Erft Verbandes, 2012 und Ertl et al, 2019). Beide Modelle arbeiten mit ähnlichen Grundannahmen und verwenden die Fließgewässer als Grundlage zur Eichung der Modelle.

5.3.6.4 Grundwasserströmungsmodelle

Eine letzte häufig genutzte Möglichkeit der Bestimmung der Grundwasserneubildung sind Grundwasserströmungsmodelle. Die Modelle lösen die Grundwasserströmungsgleichung. Auf Grundlage eines geologischen Untergrundmodells werden die Schichtabfolgen im Modellgebiet parametrisiert (Leitfähigkeiten, Schichtmächtigkeiten, Speicherkoeffizienten, Leakage-Faktoren). Die Grundwasserneubildung ist in diesen Modellen eine Randbedingung, die zur Kalibrierung der Modelle genutzt werden kann. Andererseits kann die Neubildung durch inverse Modellierung abgeleitet werden.

Letztlich sind auch diese Modelle datenintensiv. Die Kalibrierung und Validierung der Modelle anhand von Messstellendaten und Gebietsabflüssen kann über die Anpassung von Leitfähigkeitswerten, Speicherkoeffizienten und der Grundwasserneubildung erfolgen, was die Unsicherheit der Modelle erhöht. Daraus folgt auch, dass verschiedene Parametersätze gleichartige Ergebnisse liefern können und damit nicht geklärt ist, ob die Parameter mit der Realität tatsächlich übereinstimmen. Ein Grundwasserströmungsmodell eignet sich daher am besten bei sehr gut bekannter oder einfacher geologischer Situation und für kleine Einzugsgebiete.

Für die Lausitz existieren eine Reihe Grundwasserströmungsmodelle, die im Auftrag von LEAG und LMBV aufgebaut wurden und betrieben werden. Die Analyse der Grundwasserneubildung war bei diesen Modellen jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen, so dass beim Betrieb der Modelle hauptsächlich auf die Werte der Bodenwasserhaushaltsmodelle der Landesbehörden zurückgegriffen wird.

Grundwasserströmungsmodelle sind geeignet, die Seewasserspiegel der Bergbaufolgeseen vorauszuberechnen und damit die Stabilität der Seewasserstände zu untersuchen. Sie erlauben ferner auch eine Untersuchung, wie Vorfluter und Seen auf die Grundwasserstände im Untergrund rückkoppeln. Diese Fragestellungen sind besonders für die Lausitz von großer Bedeutung, so dass eine exakte Kenntnis des zeitlichen Verlaufs und der Höhe der Grundwasserneubildung notwendig ist.

6 Umsetzung von Grundwasserneubildungsmodellen für die Oberlausitz in Ostsachsen

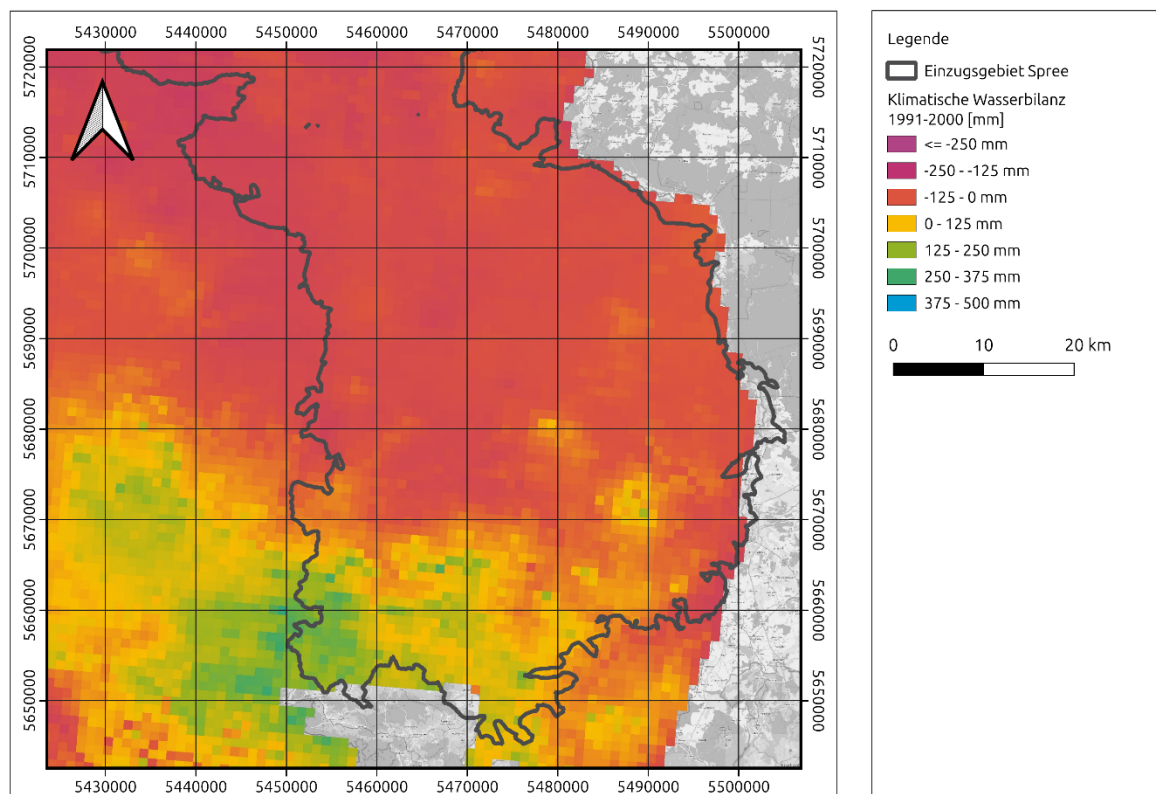
6.1 Klimatische Wasserbilanz der Lausitz

Als erster Eindruck zur möglichen Grundwasserneubildung in der Lausitz kann die klimatische Wasserbilanz berechnet werden. Sie ergibt sich mittels

$$h_{\text{klim}} = h_N - h_{ETp} \quad (9)$$

Wobei h_{klim} die klimatische Wasserbilanz als Niederschlagshöhe, h_N die langjährige mittlere Niederschlagshöhe und h_{ETp} die langjährige potentielle Verdunstung jeweils in Millimeter sind. Aus Rasterdaten des DWD mit 1000 m Auflösung für die 30jährigen mittleren Niederschläge und 30jährigen mittleren Verdunstungen der Jahre 1991-2020 wurde die klimatische Wasserbilanz berechnet.

Abbildung 4: Klimatische Wasserbilanz des südlichen Spreeeinzugsgebiets

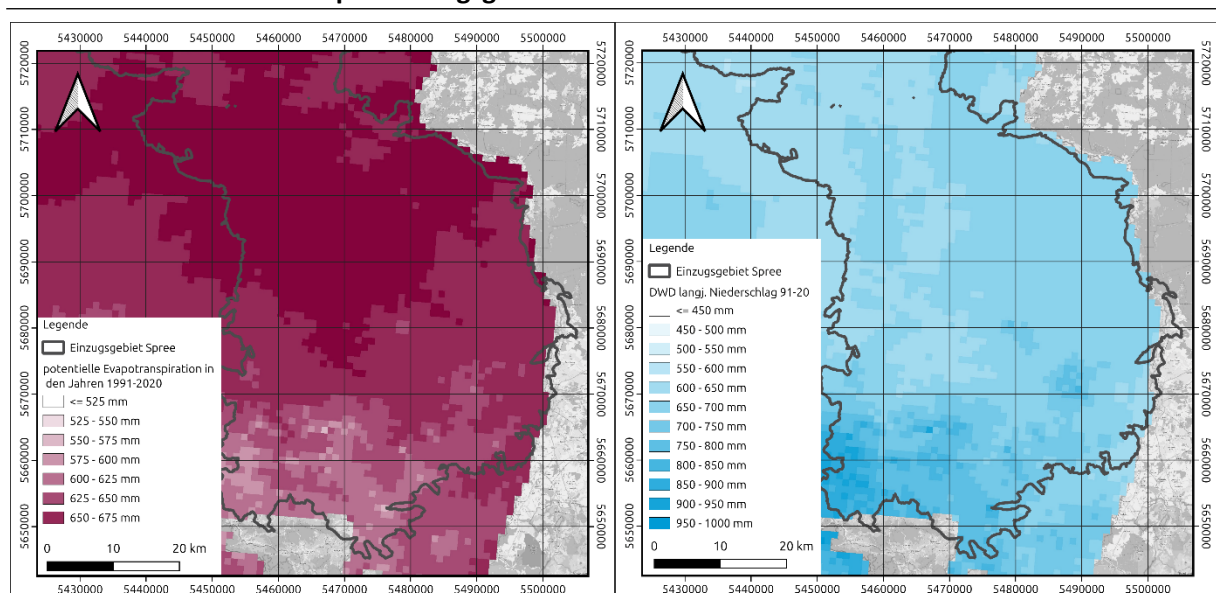


Die Abbildung zeigt die klimatische Wasserbilanz für die Lausitz. Das Spreeeinzugsgebiet ist ebenfalls dargestellt. Es ist deutlich, dass lediglich im Südraum des Spreeeinzugsgebietes eine positive klimatische Wasserbilanz besteht. Im nördlichen Bereich der Oberlausitz ist die potentielle Verdunstung mit etwa 100 mm größer als die Niederschläge. Zur Darstellung wurden Daten des DWD verwendet (Datenquellen: DWD Climate Data Center (CDC): Vieljährige Raster der potentiellen Evapotranspiration über Gras (per Kalendermonat), Version 0.x und Vieljähriges Mittel der Raster der Niederschlagshöhe für Deutschland 1981-2010, Version v1.0., 22.05.2023). Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org)

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Niederschlag und Verdunstung sind in der Lausitz die wesentlichen Größen, die die Grundwasserneubildung beeinflussen. Auch wenn die Saisonalitäten von Niederschlag und Verdunstung in der klimatischen Wasserbilanz nicht abgebildet werden, so ist sie dennoch ein Maß für die Feuchtesituation an einem Ort. Abbildung 4 zeigt die klimatische Wasserbilanz in Ostsachsen und Südbrandenburg für die Jahre 1991-2020. Während in der südlichen Oberlausitz mit Zittauer Gebirge und Lausitzer Bergland ein Niederschlagsüberschuss von bis zu 300 mm bemessen wird, verringert sich dieses nach Norden gehend deutlich und schlägt etwa auf Höhe einer West-Ost-Linie zwischen Bautzen und Görlitz um in eine negative Bilanz mit größerer potentieller Verdunstung. Nördlich dieser Linie kann aus klimatischer Sicht von einem Wassermangelgebiet gesprochen werden, wobei die klimatische Wasserbilanz wie eingangs erwähnt noch nichts über die saisonale Verteilung der Niederschläge und über die von der Wasserverfügbarkeit abhängige tatsächliche Verdunstung aussagt. Um den Wasserverlust aus freien Wasserflächen wie den in der Lausitz befindlichen Bergbaufolgeseen abzuschätzen, kann jedoch die klimatische Wasserbilanz genutzt werden.

Abbildung 5: Vergleich der potentiellen Verdunstung und des mittleren Niederschlags im südlichen Spreeeinzugsgebiet



Verteilung der potentiellen Verdunstung (links) und Niederschlagsverteilung (rechts) im südlichen Spreeeinzugsgebiet als Mittelwert der Jahre 1991-2020 (Datenquellen: DWD Climate Data Center (CDC): Vieljährige Raster der potentiellen Evapotranspiration über Gras (per Kalendermonat), Version 0.x und Vieljähriges Mittel der Raster der Niederschlagshöhe für Deutschland 1981-2010, Version v1.0., 22.05.2023). Die Angaben sind jeweils in mm. Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Ein Blick auf die Verteilung von mittlerer potentieller Verdunstung und Niederschlag in den Jahren 1991-2020 in Abbildung 5 zeigt, dass die positive Bilanz im Süden der Oberlausitz maßgeblich auf die höheren mittleren Niederschläge zurückzuführen ist. Denn, während die Niederschlagsmengen von etwa 500 – 550 mm im Norden auf bis zu 800 – 900 mm aufgrund orographischer Effekte steigen, sinkt die potentielle Verdunstung lediglich von etwa 650 – 700 mm auf 500 – 550 mm.

6.2 Grundwasserneubildung mit dem Ansatz von Proksch

6.2.1 Daten und Struktur

Das Proksch-Modell besteht aus linearen Regressionsgleichungen für die Niederschlags-Sickerwassermengen-Beziehung (Proksch, 1990), die aus Ergebnissen an Lysimeterstationen abgeleitet wurden. Sofern keine lateralen Flüsse auf der Oberfläche des Bodens oder innerhalb der ungesättigten Zone stattfinden, kann diese Sickerwassermenge als Grundwasserneubildung angesehen werden. Als Eingangsgrößen werden die Bodenbedeckung, die Bodenart und der Niederschlag in Form von Rasterdaten verwendet.

Für die Bodenbedeckung wurden Corine Land Cover Daten der Kartierung 2018 in der Version 20.1 verwendet, die über das EU Copernicus Projekt bereitgestellt werden (© GeoBasis-DE / BKG, 2023). Diese haben eine Rasterauflösung von 100 m. Weiterhin wurden die Bodendaten BK50 des Freistaates Sachsen mit Stand 2020 verwendet (Daten des LfULG, 2023). Die Vektordaten wurden in Rasterdaten konvertiert, wobei die Legendennummer als Zellenwert gespeichert wurde. Über diese Legendennummern und die Leitprofile wurde die Grobbodenart zugeordnet, durch die wiederum auf die generalisierten Bodenarten von Proksch umgestellt werden konnte. Tabelle 2 zeigt die dabei umgesetzte Zuordnung.

Tabelle 2: Zuordnung der Bodenarten der BK50 zu den Bodentypen im Proksch-Modell

Bodenart (BK50)	Bodenart im Proksch-Modell
II	Lehm
Is	lehmiger Sand
It	Lehm
Iu	Loesslehm
O	Organisch
sl	Lehm
ss	Sand
su	Loesslehm
tl	Lehm
tu	Lehm
us	Loesslehm
ut	Loesslehm

Die 12 Bodenarten der Lausitz, die in der Sächsischen BK50 vorkommen, wurden den Bodentypen im Proksch-Modell wie in der Tabelle angegeben zugeordnet.

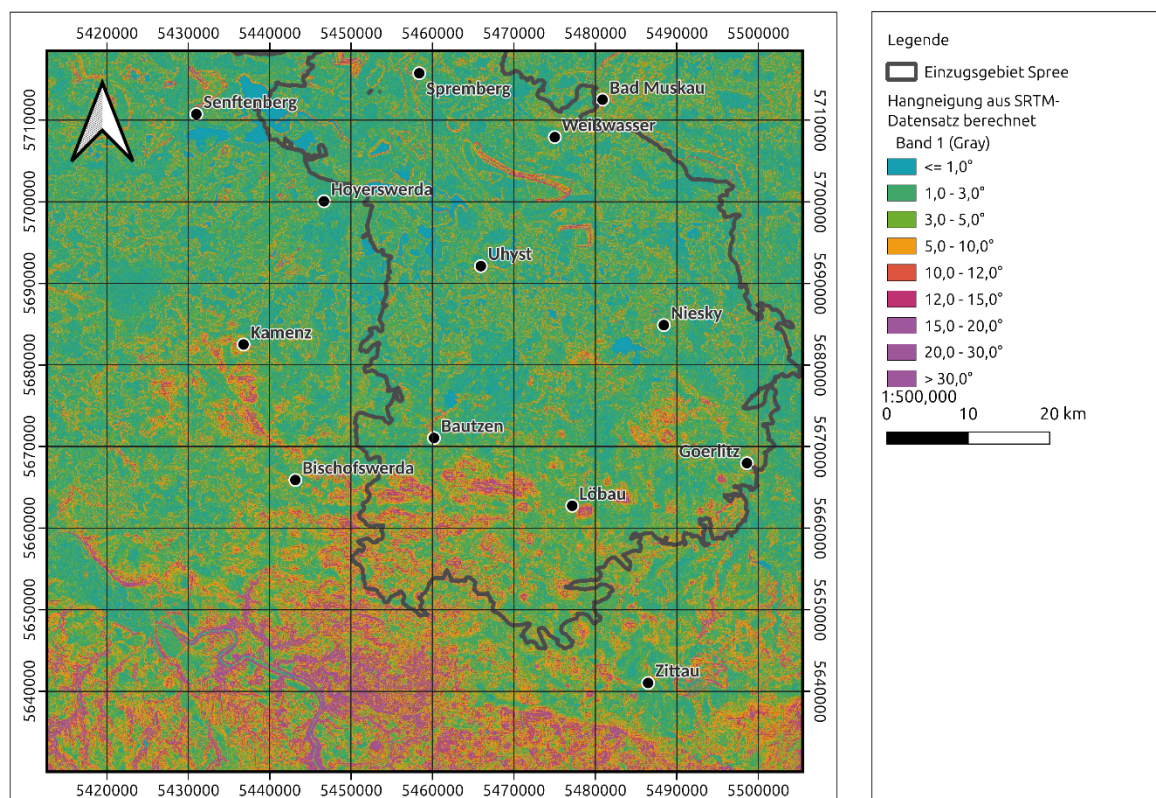
Die Niederschlagsdaten wurden als Rasterdaten mit einer Auflösung von 1000 m verwendet, die vom Deutschen Wetterdienst im Climate Data Center bereitgestellt werden (DWD Climate Data Center (CDC): Vieljähriges Mittel der Raster der Niederschlagshöhe für Deutschland 1961-1990, Version v1.0. und Vieljähriges Mittel der Raster der Niederschlagshöhe für Deutschland 1961-1990, Version v1.0., 22.05.2023). Es handelt sich dabei

um 30jährige Mittelwerte für die Zeiträume 1961-1990 sowie 1991-2020. Die Berechnungen und Darstellung wurden in QGIS in der Version 3.8.3-Zanzibar in Verbindung mit der Applikation R in der Version 4.2.0 und den Paketen *raster 3.6-3* und *rgdal 1.6-4* realisiert.

6.2.2 Ergebnisse des Sickerwassersmodells von Proksch

Zunächst bestand die Frage, ob mit einem reinen Sickerwassersmodell ohne Beachtung von Oberflächenabflüssen überhaupt gearbeitet werden kann. Um das zu überprüfen, wurde das frei verfügbare digitale Geländemodell Shuttle Radar Topography Mission [SRTM] der NASA aus dem Jahr 2013 verwendet (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems & U.S./Japan ASTER Science Team, 2019). Die Daten haben eine Auflösung von einer Bogensekunde, was in etwa einer räumlichen Auflösung von 30 m entspricht. Mit diesem Modell kann kein detailliertes Landschaftsbild abgeleitet werden, wie es für die Untersuchung kleinräumiger Einzugsgebiete nötig wäre. Für großräumige Betrachtungen wie in der vorliegenden Arbeit ist es jedoch sehr gut geeignet, einen Überblick über die Geländeeigenschaften zu erhalten. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis.

Abbildung 6: Geländeneigung im südlichen Spreeeinzugsgebiet



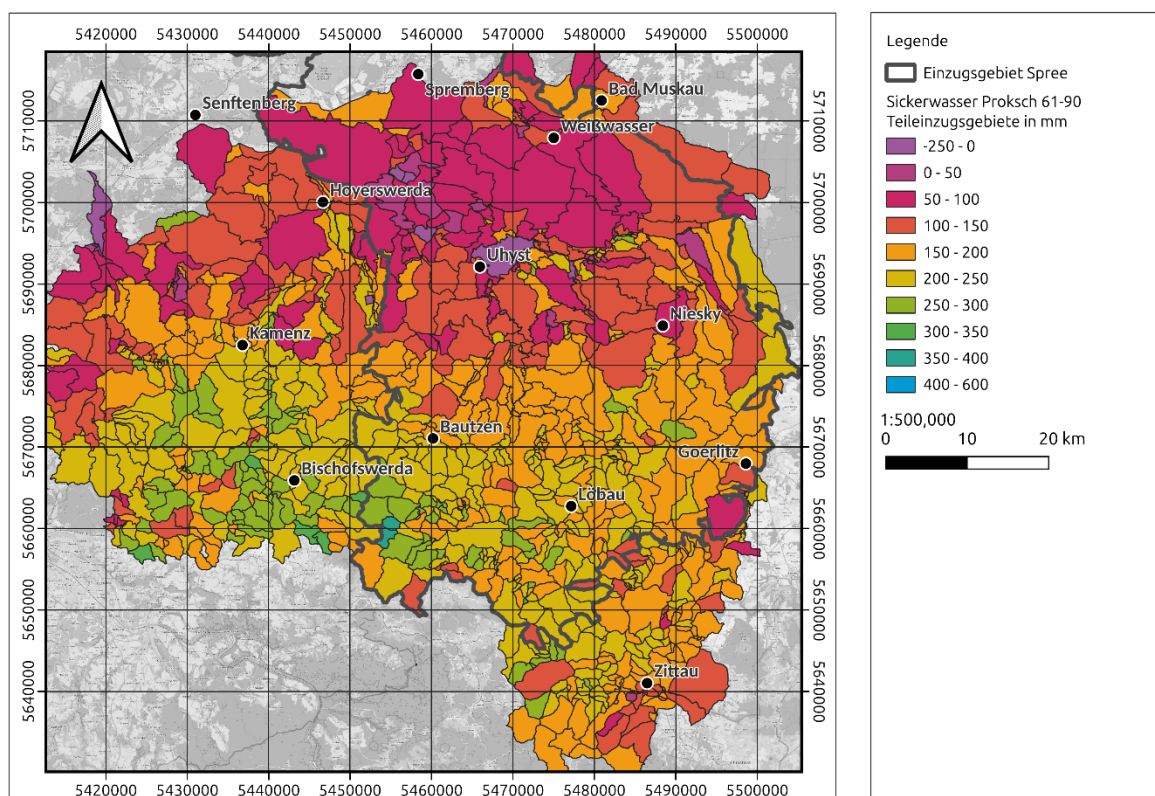
Die Abbildung zeigt die Geländeneigungen im südlichen Spreeeinzugsgebiet. Gut zu erkennen ist die Zunahme der Neigungen im Südraum im Lausitzer Bergland. Im Bereich der bestehenden Tagebaue ist das Gelände mit mittleren Neigungen von unter 5° als eben anzunehmen. Die Hangneigungen wurden aus SRTM-Daten abgeleitet (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems & U.S./Japan ASTER Science Team, 2019).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Das Gelände der dargestellten Oberlausitz ist nördlich der Verbindungslinie Bautzen-Görlitz mit Neigungswinkeln von bis zu 8 ° als flach zu bezeichnen. Ein großflächiges Auftreten von Oberflächenabflüssen ist daher nicht zu erwarten. Nach Süden in Richtung Lausitzer Bergland und Zittauer Gebirge gehend ist die Situation anders, weil das Gelände dort deutlich stärker geneigt ist. Besonders auffällig sind die Tagebaustrukturen des Tagebaus Nochten südwestlich von Weißwasser und am oberen Kartenrand der Tagebau Welzow westlich von Spremberg. Es kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass die Verwendung des Proksch-Ansatzes, der keine Oberflächenabflüsse und Zwischenabflüsse betrachtet, möglich ist und zu plausiblen Resultaten führt und die erhaltenen Sickerwassermengen als Grundwasserneubildung angesehen werden können.

Die Berechnung der Sickerwasserbildung nach Proksch erbrachte das in Abbildung 7 dargestellte Ergebnis. Die Darstellung der Grundwasserneubildung wurde dabei auf die Teileinzugsgebiete der Oberflächenwasser bezogen, wie sie auch in den Ergebnissen der KLiWES-Modelle des Landes Sachsen vorliegen. So sind die Ergebnisse untereinander vergleichbarer. Außerdem werden die berechneten Wassermengen auf größere Landschaftsbereiche generalisiert, was bei der Einordnung der Ergebnisse hilft.

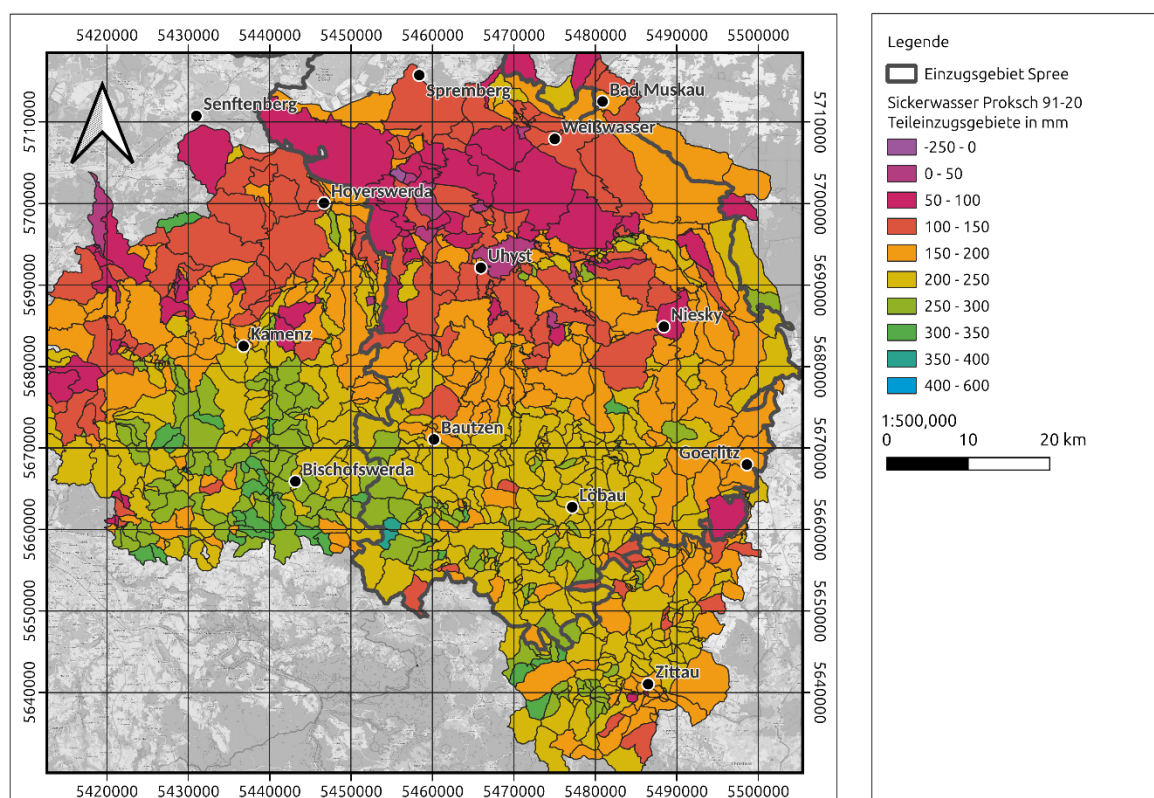
Abbildung 7: Ergebnisse des Proksch-Modells auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 - 1991



Die Ergebnisse des Proksch-Modells wurden auf die Einzugsgebietsflächen aggregiert, wie sie im Grundwasserviewer des Landes Sachsen verwendet werden. Das ermöglicht im Anschluss die Vergleichbarkeit der verschiedenen Modellansätze. Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Es ist zu erkennen, dass die Sickerwasserbildung des Proksch-Modells ein deutliches Süd-Nord-Gefälle innerhalb der Oberlausitz ergibt. Während im Raum um Bautzen und Löbau mit mittleren jährlichen Sickerwassermengen von 200 - 300 mm zu rechnen ist, ist im Bereich des Bergbaus und der bestehenden Bergbaufolgeseen im Norden des Untersuchungsgebietes mit geringen Neubildungsmengen von 0 – 150 mm zu rechnen. Dabei weist jedoch der größte Teil der Teileinzugsgebiete Sickerwassermengen von 50-100 mm auf. Grundwasserzehrung wird vom Proksch-Ansatz nicht direkt abgebildet. Die negativen Flächen bei Uhyst und nordöstlich von Hoyerswerda sind Bereiche mit direkter Nähe zu Bergbaufolgeseen. Für die Seeflächen wurde als robuste Abschätzung die klimatische Wasserbilanz angesetzt, die im nördlichen Bereich der Oberlausitz im Übergang zur Niederlausitz negativ ausfällt. Entsprechend haben diese Seen einen mitunter erheblichen Einfluss auf die Teileinzugsgebiete, in denen sie sich befinden. Es lässt sich insgesamt also festhalten, dass Neubildung stattfindet, und dass auch im Bereich des noch aktiven Bergbaus mit mittleren Neubildungsraten von bis zu 100 mm zu rechnen ist.

Abbildung 8: Ergebnisse des Proksch-Modells auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1991 - 2020



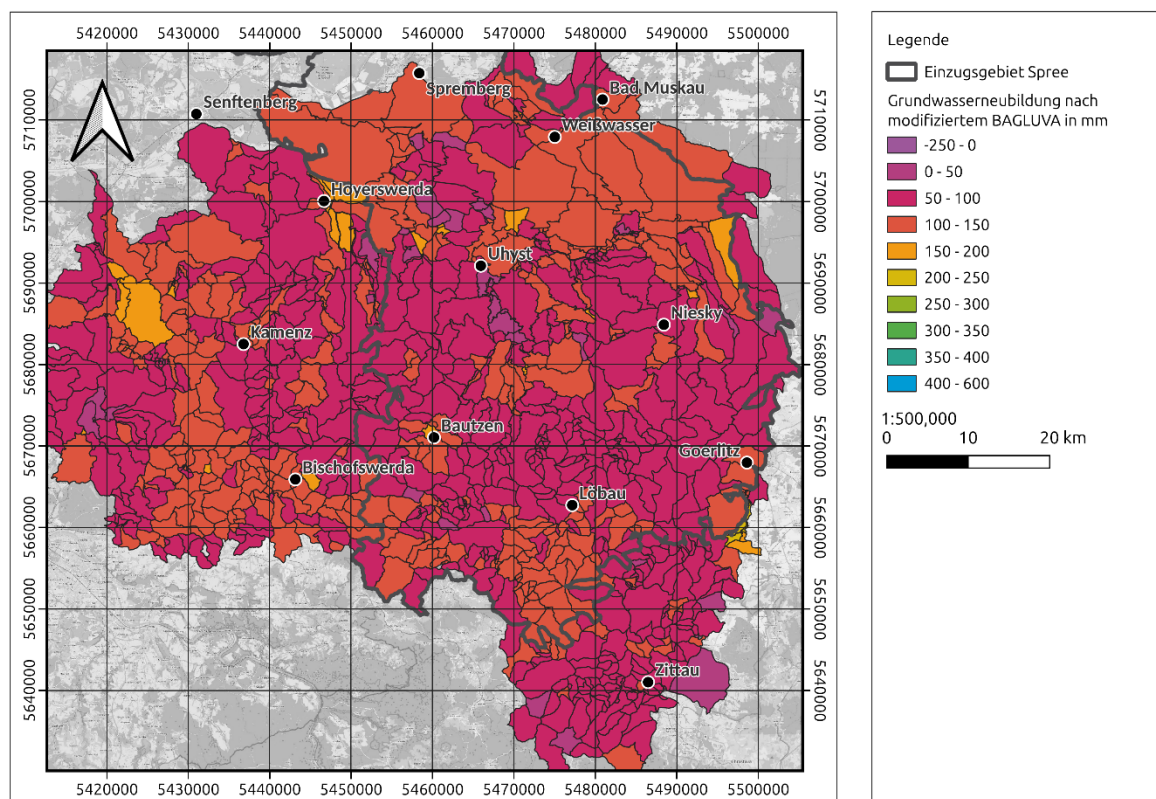
Die Ergebnisse des Proksch-Modells wurden auf die Einzugsgebietsflächen aggregiert, wie sie im Grundwasserviewer des Landes Sachsen verwendet werden. Das ermöglicht im Anschluss die Vergleichbarkeit der verschiedenen Modellansätze. Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).
Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse des Proksch-Modells bei gleicher Parameterwahl für den Zeitraum 1991-2020. Die Verteilung der Sickerwassermengen in den Teileinzugsgebieten ist vergleichbar mit dem Zeitraum davor. Es ist jedoch auffällig, dass einige der Teileinzugsgebiete in einer höheren Sickerwasserkategorie eingeordnet werden. Das ist durch die insgesamt etwas höheren mittleren Niederschläge in den Jahren 1991-2020 zu begründen.

6.3 Grundwasserneubildung nach dem BAGLUVA-Ansatz

Für den Hydrologischen Atlas Deutschlands wurde von Neumann (2009) ein neuer Ansatz zur Ermittlung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Deutschland entwickelt und umgesetzt. Grundlage für diese Berechnung ist das BAGLUVA-Modell. Die Ergebnisse werden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) als Rasterdaten mit einer Auflösung von 1000 m zur Verfügung gestellt (BGR, 2019).

Abbildung 9: Ergebnisse des modifizierten BAGLUVA-Modells auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 -1990



Die Abbildung zeigt die Grundwasserneubildung nach dem BAGLUVA-Ansatz. Auffällig ist, dass die Neubildungsrate mit hauptsächlich 0 – 100 mm niedriger ausfallen als mit dem Proksch-Ansatz. Die dargestellten Grundwasserneubildungsmengen sind Berechnungsergebnisse der BGR (BGR, 2019). Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Während das BAGLUVA-Modell den gefallen Niederschlag in die Kategorien Gesamtabfluss und tatsächliche Verdunstung aufteilt, wird in dem Ansatz von Neumann (2009) noch eine Analyse der Geländeeigenschaften durchgeführt, um den Gesamtabflussanteil in oberirdischen Abfluss und Grundwasser-neubildung aufzuteilen. Die Grundwasserneubildung wird dabei ebenfalls als Basisabfluss in Vorflutern interpretiert.

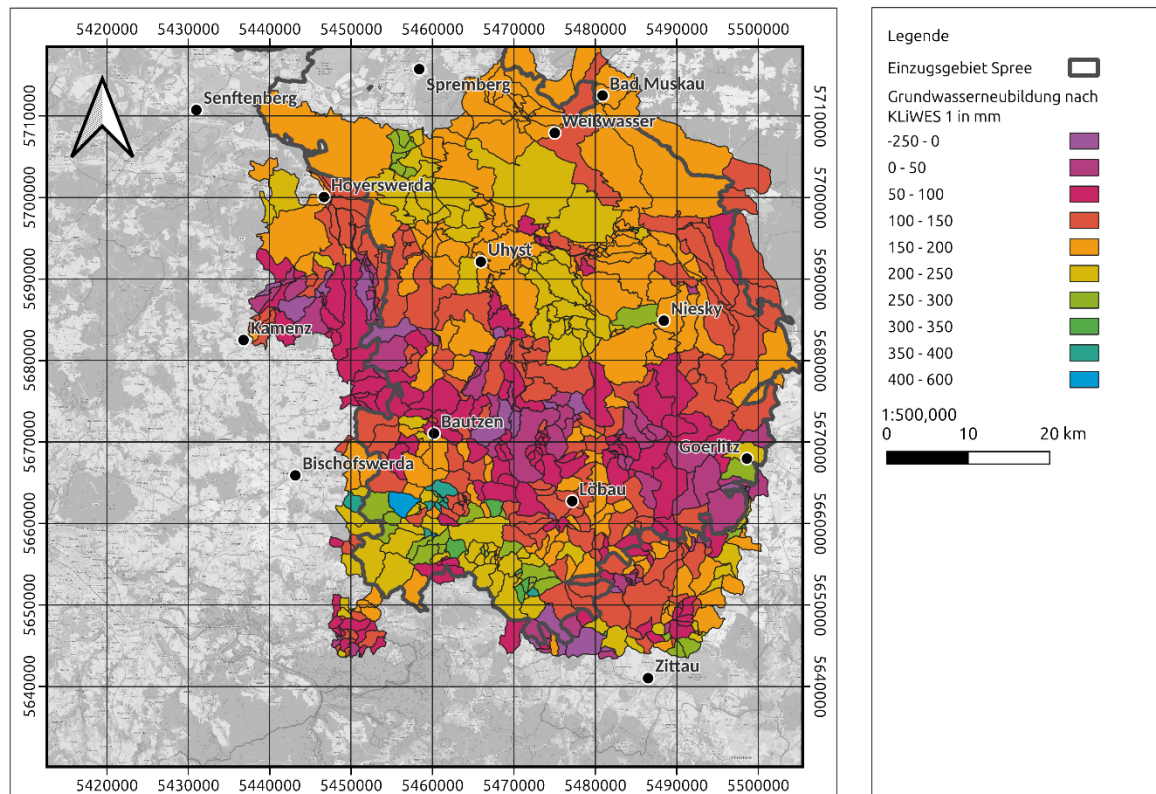
In Abbildung 9 ist das Ergebnis dieser Berechnung dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Grundwasserneubildung deutlich geringer ausfällt als im vorherigen Modell nach Proksch. Es finden sich nur sehr wenige Bereiche, in denen die Grundwasserneubildung langjährige Raten von 150 mm übersteigt. Die höheren Neubildungsraten werden dabei vor allem im Nordbereich des Untersuchungsgebietes gefunden, während im zentralen Bereich der Oberlausitz eher geringere Neubildungen von 0 -100 mm prognostiziert werden.

6.4 Grundwasserneubildung nach den Landesmodellen KLiWES 1 und KLiWES 2.1 des Freistaates Sachsen

Sachsen setzt bei der Modellierung des Wasserhaushaltes des Landes auf das Modell ArcEGMO (Hauffe et al., 2022). Wichtig bei der Beurteilung der Ergebnisse ist daher, dass es sich bei diesem Modell nicht um ein explizit für die Lausitz erarbeitetes Modell handelt. Das sächsische Wasserhaushaltsmodell wurde von der TU-Dresden für das LfULG erstellt und wird fortwährend weiterentwickelt. Die Ergebnisse dieser Modellierung liegen in zwei verschiedenen Versionen vor. Für das Projekt sind die Versionen KLiWES 1 und 2.1 genutzt worden. Unterschiede sind dabei im Wesentlichen der Einbezug neuer räumlicher Datensätze und erweiterten Kalibriermöglichkeiten. Zum Projektende standen auch die Datensätze von KLiWES 3.0 zur Auswahl, die aber nicht mehr für die Arbeit berücksichtigt wurden. In KLiWES 3.0 liegen im Unterschied zu KLiWES 2.1 auch wieder Daten für die noch vom aktiven Bergbau betroffenen Gebiete der sächsischen Lausitz vor, die in KLiWES 2.1 nicht dargestellt wurden.

Beide im Projekt untersuchte Versionen verwenden die Bodenkundliche Kartieranleitung KA5 für die Abschätzung relevanter Bodeneigenschaften. Eine für die Grundwasserneubildung besonderer Unterschied ist die Festlegung des Grundwasserflurabstandes. Während in KLiWES 1 der Flurabstand als mittlerer Grundwasserflurabstand aus dem digitalen Isohypsenplan des Landes Sachsen angesetzt wurde (Lünich & Steinl, 2011), wurde er in KLiWES 2.1 zusätzlich zur Auswahl aus dem Isohypsenplan aus den Bodeneigenschaften der Bodenkarte BK50 mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 abgeschätzt (Hauffe et al., 2022). Dadurch ergaben sich stellenweise deutlich geringere Grundwasserflurabstände als in Modellgeneration 1. Weiterhin wurden Module in die Modellierung integriert, die besser die Dynamik in Auenbereichen und die Niederschlagsbildung durch Nebel in den Sächsischen Kammlagen ermöglichen (Hauffe et al., 2022).

Abbildung 10: Ergebnisse des sächsischen Modells KLiWES 1 auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 -1987



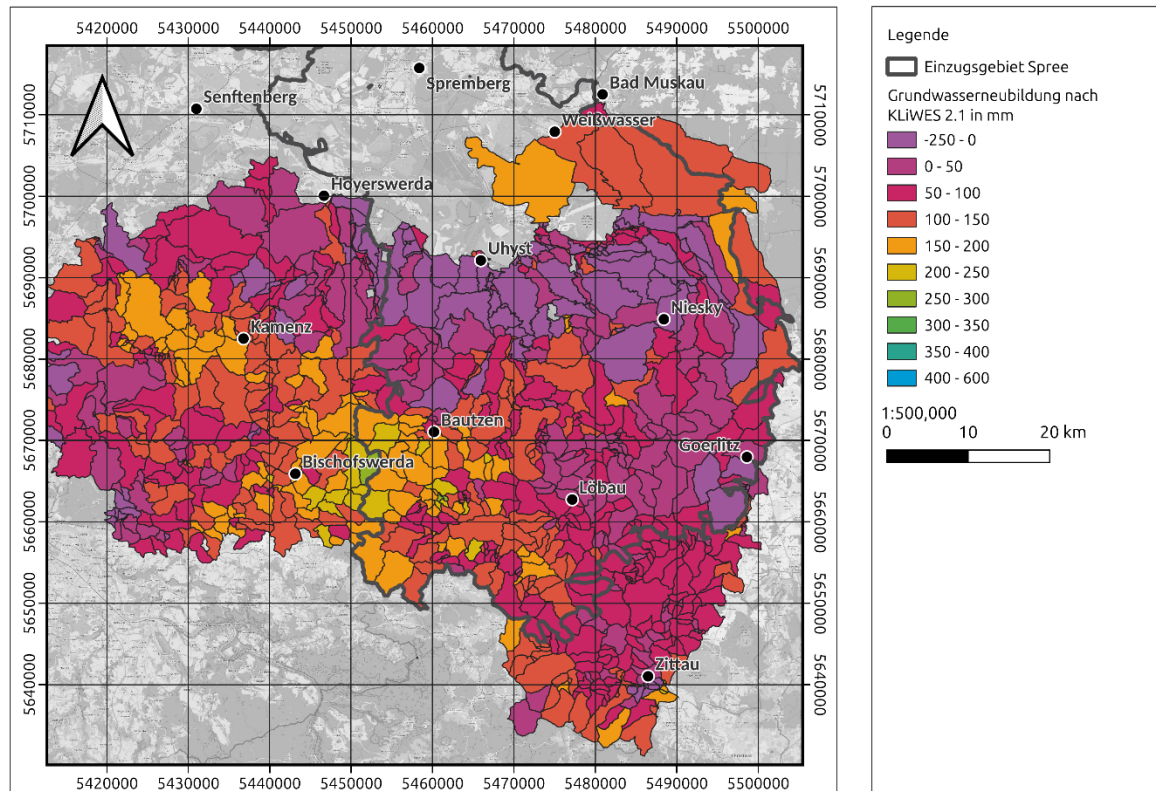
Die Abbildung zeigt die Grundwasserneubildung nach dem KLiWES1-Ansatz. Die Daten wurden dem Grundwasserneubildungsbrowser des Landes Sachsen entnommen (<https://gwn-sachsen.de/>). Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).
Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Die Kalibrierung des ArcEGMO-Modells erfolgt an DIFGA-Analysen des Landes Sachsen, die die Abflüsse in Oberflächengewässern in ihre Hauptbestandteile zerlegen. Dieses Linearspeichermodell lässt anhand von Niederschlags- und Pegeldaten Rückschlüsse auf unbekannte hydraulische Eigenschaften des Pegeleinzugsgebietes zu (Schwarze, 1985, und Lünich & Steinl, 2011). Dabei werden die Abflüsse in die Kategorien schneller und verzögerter Direktabfluss (Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss) sowie kurzfristigen und langfristigen Grundwasserabfluss unterteilt. Letztere bilden als langjähriger Mittelwert die Grundwasserneubildung. ArcEGMO folgt ebenfalls diesem Konzept. Die Ergebnisse von 114 DIFGA-Gebieten dienen in Sachsen als Kalibriergrundlage für die ArcEGMO-Modelle in KLiWES 2.1 (Details in Hauffe et al., 2022). Aufgrund des stark gestörten Wasserhaushalts liegt keines dieser Gebiete im nördlichen Bereich der Oberlausitz innerhalb des Spreeeinzugsgebietes. Im Südraum des sächsischen Teils des Spreeeinzugsgebietes sind jedoch DIFGA-Analysen vorhanden.

Das Ergebnis der Modellierung in KLiWES 1 für die Lausitz ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Neubildung in der Lausitz reicht in diesem Modell von 0 – 300 mm. Der nördliche Teil der Oberlausitz im Übergang zur Niederlausitz, in dem derzeit noch aktiver Bergbau im Tagebau

Nochten erfolgt, weist dabei die eher höheren Neubildungsraten auf. Die Teileinzugsgebiete auf der Verbindungslinie Bautzen-Görlitz im Bereich zum Lausitzer Bergland übergehend weisen deutlich geringere Neubildungsmengen von 0 – 100 mm auf und existieren sogar Einzugsgebiete mit Grundwasserzehrung, die über das ArcEGMO Modell möglich ist.

Abbildung 11: Ergebnisse des sächsischen Modells KLiWES 2.1 auf Teileinzugsgebietsebene für die Jahre 1961 -1987



Die Abbildung zeigt die Grundwasserneubildung nach dem KLiWES2.1-Ansatz. Die Daten wurden dem Grundwasserneubildungsvierer des Landes Sachsen entnommen (<https://gwn-sachsen.de/>). Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).
Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Anders stellt sich die Situation in KLiWES2.1 dar, wie in Abbildung 11 dargestellt ist. Durch die Anpassung der Grundwasserflurabstände anhand von Bodendaten weist dieses Modell deutlich mehr Gebiete mit nur geringen Grundwasserneubildungsraten sowie Grundwasserzehrgebieten auf, wie beispielsweise das Biosphärenreservat Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft südöstlich um Uhyst. Dieses zeichnet sich durch eine Reihe von Standgewässern und Böden mit Grundwassereinfluss wie Moorböden, Auenböden und Gleyen aus, die bei Einordnung über die KA 5 zu geringen Flurabständen führen. Für die Region Bautzen zeigt sich zwischen beiden Modellvarianten ein Zuwachs der Neubildung, gleichzeitig zeigen die Regionen auf der südöstlich verlaufenden Verbindungslinie Hoyerswerda-Uhyst-Niesky eine mehr als 100 mm geringere mittlere Neubildung für die Teileinzugsgebiete. Die Region des aktiven Bergbaus

wurde in dieser Modellgeneration bislang ausgeschlossen, weil sie zu stark anthropogen überprägt ist (Hauffe et al. 2022).

6.5 Vergleich der Modellergebnisse untereinander

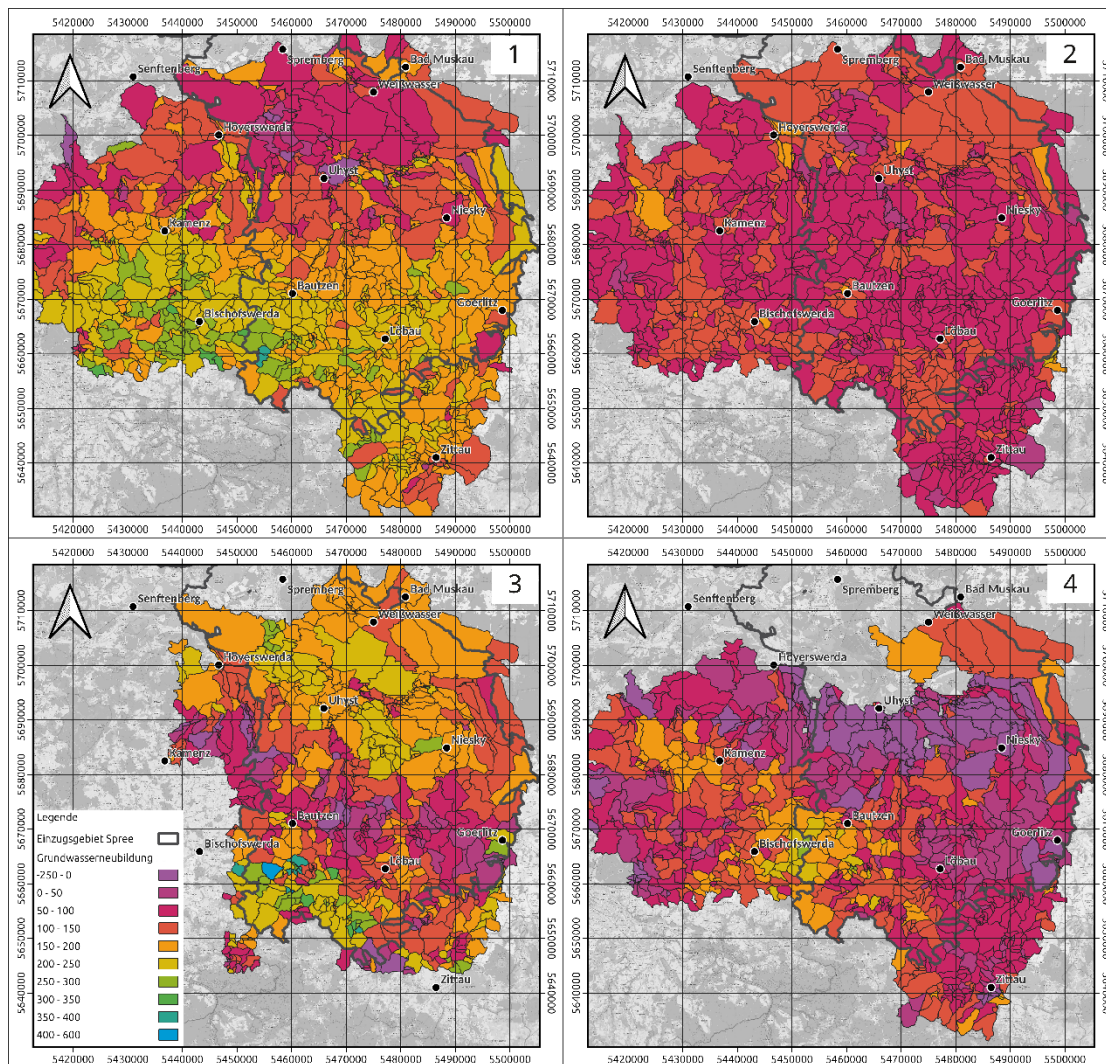
Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, weichen die Modellergebnisse deutlich voneinander ab. Das betrifft sowohl die Grundwasserneubildung in den jeweiligen Teileinzugsgebieten selbst als auch die räumliche Verteilung der jeweiligen Neubildungsmengen. Dass keine Gleichheit vorliegt, war zu erwarten. Die Modelle unterscheiden sich deutlich in ihrer Parameterwahl und in der Detailliertheit der Abbildung der hydrologischen Prozesse. Dabei steigt die Komplexität der abgebildeten Wasserhaushaltsgrößen von Proksch über BAGLUVA zu KLiWES an. Dass sich jedoch die Verteilung und Höhe der Grundwasserneubildung derart unterschiedlich darstellt, macht deutlich, dass ohne die Schaffung beziehungsweise im Fall KLiWES Erweiterung geeigneter Kalibrierungs- und Validierungsdatenstütze aus der Lausitz nur schwer entscheiden lässt, welcher Modellansatz robuste Ergebnisse für den Ist-Zustand liefern kann.

Im Folgenden werden die Unterschiede der Modellergebnisse für den Zeitraum 1961 bis 1990 (1987) noch einmal herausgearbeitet. Es wurde versucht, Gemeinsamkeiten festzustellen, um mögliche Ansätze für die weiterführende Nutzung der Modelle zu finden.

Da auffälligste Ergebnis ist die ungleichmäßige Verteilung von Flächen, die eine hohe bzw. eine geringe Grundwasserneubildung aufweisen, wie in Abbildung 12 erkennbar ist. Der Anteil der Teileinzugsgebiete, die in die Spree entwässern, ist innerhalb der blauen Markierung erkennbar. Während die Modelle Proksch und KLiWES 1 Gebiete mit hohen und niedrigen Grundwasserneubildungsraten identifizieren, überwiegen beim modifizierten BAGLUVA-Modell des Hydrologischen Atlas und dem KLiWES 2.1-Modell die Gebiete mit geringen bis mittleren Grundwasserneubildungsraten. So lässt sich in dieser Form keine klare Grundwasserneubildung für die einzelnen Teileinzugsgebiete ableiten.

Ein Problem, das die bisherige Betrachtung der Teileinzugsgebiete mit sich bringt, ist die Tatsache, dass unterirdische Einzugsgebiete des Grundwasserflusses nur bedingt mit denen des Oberflächenwassers übereinstimmen. Das heißt, die Wasserscheiden im Untergrund haben oft eine andere Lage als jene auf der Oberfläche. So wurden beispielsweise in Brandenburg für ein Einzugsgebiet der Dahme bis zu 55 % Abweichung zwischen oberirdischem und unterirdischem Einzugsgebiet festgestellt (Lahmer et al., 2000).

Abbildung 12: Direkter Vergleich der 4 Modellergebnisse



Es sind die Ergebnisse der vier Modelle dargestellt (1: Proksch, 2: BAGLUVA, 3: KliWES 1, 4: KliWES 2.1). In der Übersicht wird deutlich, dass die Ergebnisse der vier Modelle erheblich voneinander abweichen. Das Proksch-Modell ist das optimistischste, das Modell KliWES2.1 vergleichsweise am pessimistischsten. Die Verteilung der Gebiete mit hoher oder geringer Neubildung unterscheidet sich zwischen den Modellen sehr deutlich. Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).

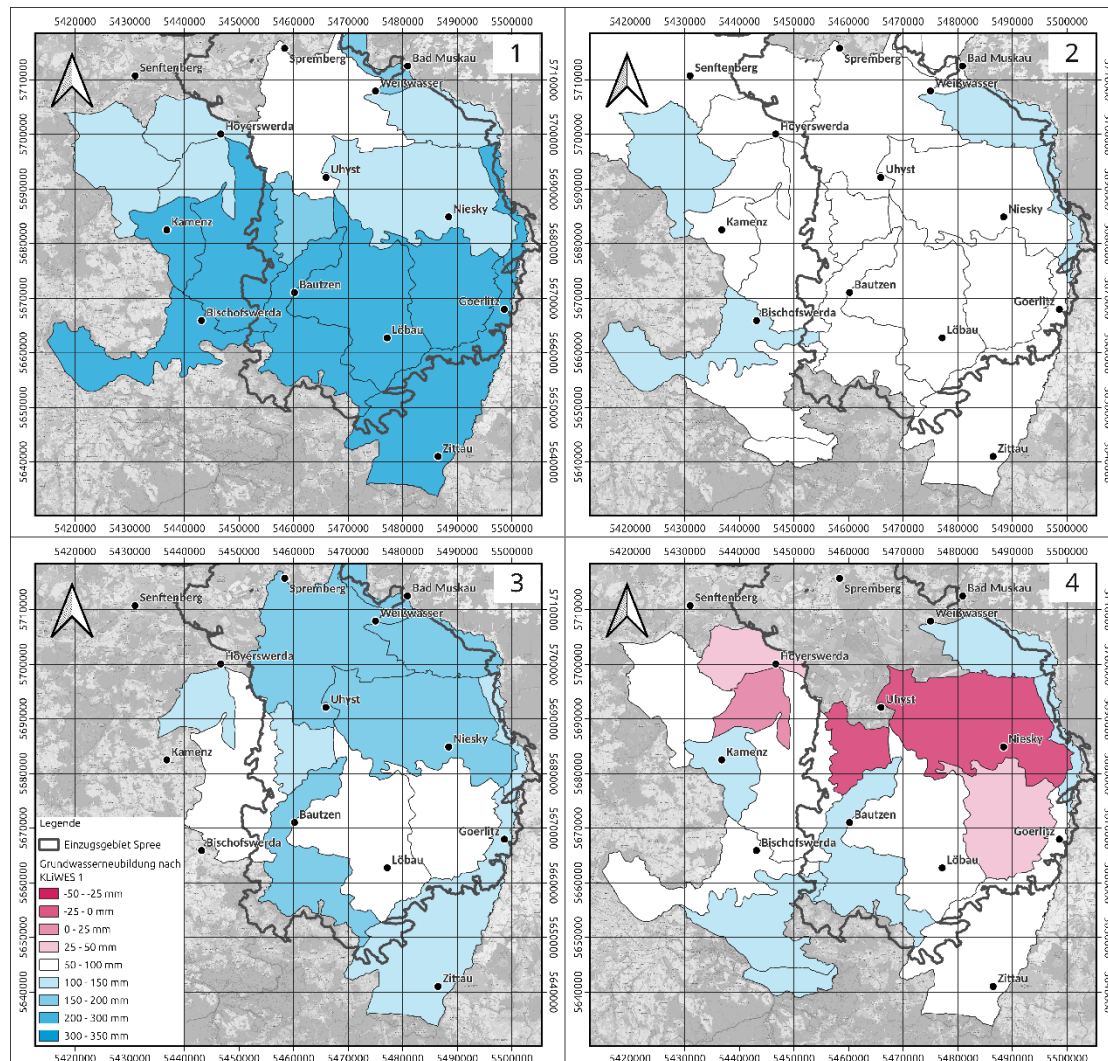
Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Um die Auswirkungen der Modellergebnisse auf dieses Problem zu untersuchen, wurden die mittleren Grundwasserneubildungen für die unter den Teileinzugsgebieten befindlichen Grundwasserkörper berechnet. In Abbildung 13 ist das Ergebnis dargestellt. Dafür wurden die räumlichen Mittelwerte aus den Grundwasserneubildungsraten der Teileinzugsgebiete auf Grundlage der Ausdehnung der Grundwasserkörper gebildet. Es wurden nur die Grundwasserkörper in die Betrachtung hineingenommen, die hinreichend gut von den Modellflächen überdeckt waren.

Es zeigt sich zunächst, dass die Ergebnisse keine Verbesserung bezüglich der Unterschiede der Ergebnisstreuung der Grundwasserneubildung liefern. Die räumliche Verteilung der

Grundwasserneubildung der Oberflächeneinzugsgebiete paust sich auch auf die Grundwasserkörper durch. KLiWES 2.1 ergibt für zwei Grundwasserkörper eine negative

Abbildung 13: Direkter Vergleich der 4 Modellergebnisse mit Bezug auf Grundwasserkörper



Es sind die Ergebnisse der vier Modelle bezogen auf die Grundwasserkörper dargestellt (1: Proksch, 2: BAGLUVA, 3: KLiWES 1, 4: KLiWES 2.1). In der Übersicht wird deutlich, dass die der vier Modelle auch in dieser Variante erheblich voneinander abweichen. Auch auf Basis der Grundwasserkörper unterscheidet sich die Verteilung der Gebiete mit hoher oder geringer Neubildung deutlich. Die Geometrien der Grundwasserkörper entstammen dem Grundwasserneubildungsviwer des Landes Sachsen (<https://gwn-sachsen.de/>). Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Neubildungsbilanz, was ohne Zustrom von Wasser durch Flusswasserversickerung oder durch Zustrom aus anderen Grundwasserkörpern ein versiegen dieser Ressourcen bedeuten würde. Gleichzeitig würde jedoch bei sinkendem Grundwasserstand auch die Möglichkeit des kapillaren Aufstiegs, der in diesen als Grund für die negative Wasserbilanz anzuführen ist, geringer werden und mit wachsendem Grundwasserflurabstand letztlich zum Erliegen kommen.

Da auf diesem Weg ebenfalls keine Vergleichbarkeit der Modellvarianten erzielt werden konnte, wurde nun für alle Modelle innerhalb des grau eingerahmten Spreeeinzugsgebiets die mittlere

Grundwasserneubildung berechnet. Es handelt sich um insgesamt 470 Teilflächen, die als Teileinzugsgebiete ausgewiesen sind und eine räumliche Ausdehnung von etwa 1800 km² besitzen (Görner & Gerber, 2013). Die berechneten Mittelwerte für die Grundwasserneubildung sind in Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 3: Vergleich der mittleren langjährigen Neubildungsraten der verschiedenen Modellansätze für das südliche Spreeeinzugsgebiet

Modell	Mittlere jährliche Grundwasserneubildung [mm]
Proksch	166
Modifiziertes BAGLUVA des HAD	93
KLiWES 1	141
KLiWES 2.1	61

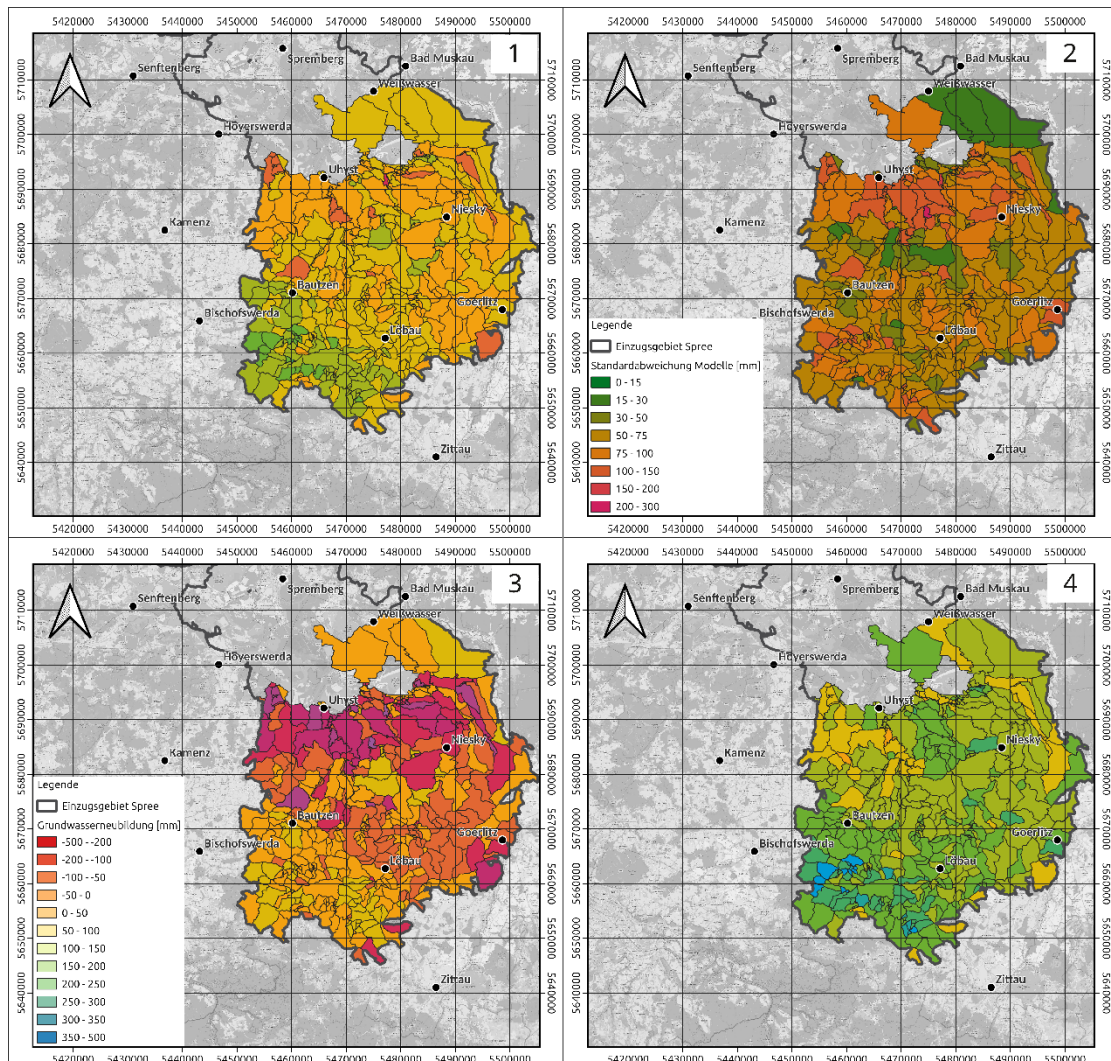
Die Tabelle zeigt die Ergebnisse für die mittlere langjährigen Neubildungsraten.

Auch diese Werte zeigen wieder die zuvor aufgefundenen Verhältnisse zwischen den einzelnen Modellen. Während Proksch und KLiWES 1 mit 141 mm und 166 mm mittlere Grundwasserneubildungsmengen auswiesen, ergeben sich mit der modifizierten BAGLUVA-Variante und KLiWES 2.1 mit 93 mm und 61 mm deutlich geringere Mengen. Wenn jedoch in Betracht gezogen wird, dass aufgrund der gering angenommen Grundwasserflurabstände in KLiWES 2.1 die Zehrung überschätzt wird fällt das Ergebnis zu niedrig für die realen Grundwasserneubildungen aus. Für das Proksch-Modell werden keinerlei laterale Wasserbewegungen betrachtet, wodurch die Ergebnisse dieses Modells als zu hoch einzuschätzen sind. Damit rücken diese beiden Extrema näher an die Ergebnisse aus dem Hydrologischen Atlas Deutschland und KLiWES 1 heran. Die großflächige Betrachtung der Ergebnisse ist daher als ähnliche Tendenz interpretierbar mit einer Grundwasserneubildung, die im Mittel bei den vorliegenden Modellen zwischen 100 und 140 mm liegen müsste.

Um die verschiedenen Ergebnisse der Modelle für die gemeinsamen Teileinzugsgebiete noch einmal näher zu betrachten, wurden daraufhin der Mittelwert, die Standardabweichung, das Minimum und das Maximum der Grundwasserneubildung berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 14 dargestellt. Oben rechts sind die Standardabweichungen dargestellt, die, aufgrund der mitunter sehr großen Unterschiede der Modellergebnisse ebenfalls sehr groß ausfallen und deutlich größer sind, als der zugehörige Mittelwert der Grundwasserneubildung für das jeweilige Teileinzugsgebiet. Die Bereiche mit der größten Differenz der Modelle liegen im nördlichen Bereich des Modellgebiets, während im nordöstlichen Bereich die beste Übereinstimmung der Modellergebnisse zu beobachten ist. Um weiterhin eine Worst-Case- und Best-Case-Betrachtung aus den Modellergebnissen abzuleiten wurden zwei Karten erstellt, die das Minimum aller Modellergebnisse für jedes Teileinzugsgebiet und das Maximum der Ergebnisse für jedes Teileinzugsgebiet zeigt. Diese Karten sind in Abbildung 16 unten dargestellt. Die Grundwasserneubildung im Minimum zeigt Gebiete mit Grundwasserzehrung im nördlichen Bereich des Modellgebiets an und im südlichen Bereich ohne Zehrung maximale Neubildungsraten von bis zu 150 – 200 mm auf. Jedoch war, wie in der Karte mit den Standardabweichungen zu sehen, gerade im Bereich der Zehrung die Abweichung der Modelle untereinander am größten. Der Blick auf die Karte mit den Maxima der Modellergebnisse zeigt

dagegen ausschließlich Teileinzugsgebiete, deren Neubildung mindestens über 100 mm, in der Regel sogar über 200 mm liegt.

Abbildung 14: Statistik über alle Modellergebnisse auf Teileinzugsgebietsebene



Die Abbildung zeigt den Mittelwert (1), die Standardabweichung (2), das Minimum (3) und das Maximum der vier Modelle für die jeweiligen Teileinzugsgebiete. Die Hintergrundkarte entstammt dem Open Street Maps Projekt (OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Aus diesen Darstellungen lassen sich erneut die Mittelwerte der Grundwasserneubildung für das komplette Gebiet ableiten. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse. Werden die Extremwerte der Modelle zugrunde gelegt, ergibt sich für das Gebiet für das Minimum eine mittlere Grundwasserneubildung von lediglich 39 mm, die in erster Linie durch die ausgedehnten Bereiche mit Grundwasserzehrung entsteht. Werden nur die maximalen Grundwasserneubildungen betrachtet, ergäbe sich eine mittlere Neubildung von 206 mm. Die mittlere Grundwasserneubildung auf Basis der Mittelwerte der Modelle liegt bei 120 mm und deckt sich damit mit den vorangegangenen Beschreibungen.

Tabelle 4: Mittelwerte der mittleren, minimalen und maximalen Neubildungsraten aus den Modellen für das gesamte Modellgebiet

Statistische Größe	Mittelwerte der Grundwasserneubildung [mm]
Mittelwert	120
Minimum	39
Maximum	206

Um einen Eindruck für die Spannweite zu bekommen, wurden die Ergebnisse der Grundwasserneubildung in Abbildung 10 gemittelt.

6.6 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das vorangegangene Kapitel hat gezeigt, dass die Modellergebnisse verschiedener Modelltypen nicht in Übereinstimmung zu bringen sind und selbst auf Teileinzugsgebietsebene keine direkt vergleichbaren Resultate liefern. Auf große Flächen wie die Oberlausitz wiederum angewendet, rücken die Ergebnisse näher zusammen und lassen eine vergleichbare Aussage zu. Das ist insofern bedeutsam, als dass die Modelle von Proksch, über Bagluva zu ArcEGMO an Komplexität, Datenbedarf und modellinterner Prozessabbildung zunehmen, aber auf großer Fläche doch ähnliche Aussagen generieren. Ein wichtiger Unterschied zwischen den drei vorgestellten Berechnungsansätzen ist, dass das Modell von Proksch und das modifizierte BAGLUVA-Modell direkt für die Bestimmung der Grundwasserneubildung ausgelegt sind. ArcEGMO jedoch bestimmt die Grundwasserneubildung im Laufe der Parameteroptimierung, durch die die verschiedenen Flusskomponenten im Modell (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, langsamer und schneller Grundwasserabfluss) so angepasst werden, dass die Ergebnisse von Pegelmessungen an Oberflächengewässern eingehalten werden. Die Grundwasserneubildung oder gar Grundwasserzehrung ist also ein indirekt aus dieser Anpassung folgendes Resultat. Das ist insofern schwieriger einzuordnen, als dass bei Optimierungsprozessen häufig mehrere Parameterkombinationen aufgefunden werden können, die zu ähnlich guten Ergebnissen bei der Modellkalibrierung führen. Die Unsicherheiten folgen also sowohl aus den Eingangsdaten selbst, wie auch aus der Parameterschätzung. Bei Proksch gehen wenige Daten ein, dafür sind aber die hydrologischen Prozesse im Feld wie Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss und der Einfluss der ungesättigten Zone nicht abgebildet, so dass dieses Modell seine größte Unsicherheit aus dem Mangel an Prozessabbildung erhält. Wie zuvor bei den Ergebnissen aufgeführt, fallen die Ergebnisse höher aus, weil Kernprozesse des Landschaftswasserhaushalts, die die Sickerwasserbildung durch laterales Abfließen von Wasser verhindern, nicht einbezogen werden. BAGLUVA in seiner modifizierten Form stellt einen Mittelweg dar, da es empirisch sowohl die tatsächliche Verdunstung als auch durch die Regressionsgleichungen einbezogenen lateralen Abflüsse berücksichtigt.

Für die Planung der Wiederbefüllung des durch den Bergbau entwässerten Porenraumes, der Bergbaufolgesen und eine Einschätzung der Stabilität dieser Wasserressourcen sind jedoch mittlere großflächige Grundwasserneubildungsraten unzureichend. Eine höhere Auflösung ist notwendig und zumindest die Teileinzugsgebietsebene, auf die die sächsischen Modelle gerechnet sind, ist zu bevorzugen. Die in dieser Untersuchung betrachteten Modelle unterscheiden sich jedoch gerade in dieser Auflösung gravierend. Während die KLiWES-Ergebnisse des Landes Sachsen mit dem hinterlegten Bodenwasserhaushaltsmodell ArcEGMO zwar eine Vielzahl an hydrologischen Prozessen abbildet, so unterscheiden sich die Ergebnisse

doch zwischen den beiden verfügbaren Versionen aufgrund der verschiedenen Umsetzungen des mittleren Grundwasserflurabstandes erheblich. Das Land Sachsen bevorzugt bei Abschätzung der Grundwasserneubildung eher das Modell KLiWES 1 (persönliche Absprache mit Udo Mellentin, Referent im Referat 43 | Grundwasser, Siedlungswasserwirtschaft des LfULG). Dieses Modell weist im Vergleich zur erneuerten Version 2.1 für die Lausitz im Mittel die höhere Grundwasserneubildung aus. Dieses Ergebnis kommt letztlich dem sehr einfachen Ansatz von Proksch nahe, jedoch ist die Verteilung dieser Wassermengen gerade zu denen im Proksch-Modell konträr. Im Bereich des Bergbaus weist das KLiWES-1-Modell die höheren Neubildungsmengen aus, während Proksch durch seine starke Sensitivität gegenüber dem Niederschlag diese eher im südlichen Bereich der Oberlausitz sieht.

Zuletzt sei erneut darauf hingewiesen, dass die Grundwasserneubildung auf die Grundwasserleiter bezogen werden muss. Die Modelle rechnen mit Oberflächendaten, KLiWES bezieht sich außerdem auf Teileinzugsgebiete der Fließgewässer. Für eine konkrete Planung und gegebenenfalls Steuerung der Grundwasserressourcen ist jedoch die Neubildung grundwassereinzugsgebietsbezogen zu betrachten. Die Eigenschaft wird von keinem der hier vorgestellten Modelle direkt erfasst, was planungsrelevante Auswirkungen haben kann. Eine Projektion der Ergebnisse für die Geländeoberfläche auf den geologischen Untergrund ist daher notwendig, um die Neubildungsverhältnisse den korrekten Grundwasserkörpern zuzuordnen, da sonst die Gefahr besteht, dass das Dargebot einzelner Gebiete über- oder unterschätzt wird.

Es ist für die Lausitz notwendig, die Modellresultate über Messwerte zu verifizieren. Eine reine Orientierung an den Basisabflüssen der Fließgewässer, aus denen die Modelle des Hydrologischen Atlas und die ArcEGMO-Modelle hervorgehen, ist für die Lausitz nicht ausreichend. Die Fließgewässer unterliegen durch die Bergbauaktivitäten und deren Nachsorge einer bilanziellen Steuerung. Über die Flutungszentrale der LMBV erfolgt eine Steuerung der Fließgewässer im Bereich des Altbergbaus zur Flutung und Stabilisierung der daraus hervorgegangenen Restseen. Die Gewässerbetten der Fließgewässer wurden mitunter abgedichtet, so dass ein Kontakt zum umgebenden Grundwasserleiter nicht erfolgen kann. Für Bereiche der Grundwasserabsenkung um die aktiven Gruben herum oder im Bereich des nicht abgeschlossenen Grundwasserwiederanstiegs ist darüber hinaus eine Kopplung der Fließgewässer an das Grundwasser nicht gegeben und die Gewässer verlieren Wasser an den Untergrund. Der Basisabfluss ist damit für die Einschätzung der tatsächlichen Neubildung ungeeignet. Es ist erforderlich, alternative Methoden zur direkten Bestimmung der Grundwasserneubildung zu nutzen. Neben einer möglichen Neuerrichtung von Lysimetern wären die Lysimeter der Lysimeteranlage des Finsterwalder Forschungsinstituts für Bergbaufolgeforschung (FIB) dafür eine wertvolle Erkenntnisquelle.

Eine weitere Möglichkeit bestünde in der Auswertung von Grundwassermessstellendaten. Gespräche mit der LMBV, die eine Reihe regelmäßig erfasster Messstellen betreibt, ergaben jedoch, dass eine Reihe der Messstellen zu stark vom gesteuerten Grundwasserwiederanstieg überprägt sind, so dass sich die natürliche Dynamik aus den Messstellendaten nicht klar abtrennen lässt. Es wird jedoch weiterhin versucht, Messstellenpaare zu finden, die eine Analyse der natürlichen Dynamik erlauben.

Zudem besteht noch die Möglichkeit, aus Wasserwerksdaten auf die Grundwasserneubildung zu schließen, sofern Grundwasser für die Trinkwasserbereitstellung genutzt wird. Voraussetzung dafür ist, dass die Fassungen durch entsprechende Messstellen ausgebaut sind, um einen Rückschluss auf die Grundwasserabsenkung zu ziehen und außerdem die hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes hinreichend gut bekannt ist.

Eine zusätzliche Möglichkeit der Verifizierung der Modellergebnisse liefern Isotopenstudien. Das Geozentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität [FAU] in Erlangen führt derzeit unter der Leitung von Robert van Geldern das IsoGW-Projekt durch. Ziel des Projektes ist die deutschlandweite isotopische Charakterisierung des Grundwassers und der Aufbau einer Datenbank (van Geldern and Gaillard, 2023). Mit diesen Daten und den Messungen der Niederschlagsdaten ließe sich ebenfalls ein großflächiger Referenzwert für die Grundwasserneubildung ableiten. Bis jedoch diese Ergebnisse zur Verfügung stehen, werden noch einige Jahre Forschungszeit nötig werden.

Diese messtechnisch ermittelten Größen können keine Verifizierung für die gesamte Lausitz liefern. Sie geben aber wertvolle Hinweise, um die Modellergebnisse für einzelne Teilräume zu überprüfen und können bei der Wahl des für die jeweilige Fragestellung geeigneten Modells helfen.

Die bislang vorgestellten Modelle unterliegen einer weiteren Einschränkung. Sie lassen sich nur bedingt zu einer zeitlich höher aufgelösten Ermittlung der Grundwasserneubildung nutzen. Wie eingangs erwähnt, unterliegt die Grundwasserdynamik jahreszeitlichen Schwankungen. Während das hydrologische Winterhalbjahr die Neubildungsperiode ist, entwässern Grundwasserkörper während des Sommerhalbjahres, weil kein oder nur ein geringer Teil des Sickerwassers die ungesättigte Zone durchquert. Lediglich das Modell ArcEGMO vermag kurzzeitige Berechnungen durchzuführen, da das Modell in Tagesschritten rechnet. Eine Abschätzung der jahreszeitlichen Grundwasserdynamik kann somit mit ArcEGMO erfolgen. Es ist jedoch vor auszusetzen, dass die errechneten Grundwasserneubildungen in den Teileinzugsgebieten tatsächlich die natürlichen Verhältnisse abbilden. Ohne Validierung der Ergebnisse mit Hilfe von realen Messdaten bleibt die Einordnung der Ergebnisse für die Lausitz ungewiss.

Ein Aspekt, der bislang aus der Betrachtung ausgeschlossen wurde, ist die Frage nach der zukünftigen Veränderung der Grundwasserneubildung durch die bevorstehende klimatische Veränderung. Die vorgestellten Modelle eröffnen verschiedenen Optionen, wie sich die Klimaentwicklung auf die Modellergebnisse auswirkt. Während das Proksch-Modell vor allem auf die sich ändernden Niederschläge und etwaige Anpassungen der Landnutzung reagiert, bezieht das BAGLUVA-Modell zusätzlich Änderungen von potentieller Verdunstung und auch Schneefall mit ein. Durch die Abbildung vielfältiger hydrologischer Prozesse eignet sich das Modell ArcEGMO, komplexe Klimaveränderungen als Input in die Modellierung aufzunehmen. Letztlich bleiben dabei die zuvor beschriebenen Schwierigkeiten bei der Einordnung der Ergebnisse auf die Teilflächen bestehen. Eine Abschätzung im Sinne einer Best-Case- und Worst-Case-Betrachtung bleibt jedoch gegeben.

Zusammenfassung des Kapitels

Bei der Analyse der Ergebnisse der vier verwendeten Modelle fiel auf, dass die Ergebnisse sich in der Quantität der Grundwasserneubildung, noch deutlicher jedoch in der Verteilung der Ergebnisse deutlich unterscheiden und nicht in Deckung zu bringen sind. Das ergibt sich auf Grundlage der verschiedenen modellinternen Herangehensweisen an die Bestimmung der Grundwasserneubildung, die verschiedenen Modellkomplexitäten und die verschiedenen Erfordernisse an die Eingangsdaten. Ohne für den bergbaulich beeinflussten Bereich in der Lausitz

auf verlässliche reale Vergleichsdaten zurückgreifen zu können, ist die Entscheidung für oder gegen einen der Modellansätze oder eine Analyse, welches Modell in welchem Teileinzugsgebiet Vor- oder Nachteile aufweist, nicht möglich.

Wenn auch für die einzelnen Teileinzugsgebiete keine klaren Aussagen generiert werden können, so ist doch für den Großraum anzunehmen, dass sich die Grundwasserneubildung im Mittel in einem Wertebereich zwischen 100 und 140 mm im Jahr bewegen müsste. Die Verteilung jedoch, die zu diesen mittleren Ergebnissen führt, kann auf Grundlage der untersuchten Modelle nicht zweifelsfrei festgestellt werden. Für wasserwirtschaftliche Fragestellungen und Bedarfe des Grundwassermanagements muss daher ortskonkret analysiert werden, wie sich die Grundwasserneubildung in diesem Raum verhält.

7 Klimatische Veränderungen in der Lausitz

7.1 Motivation

Die klimatischen Gegebenheiten weltweit ändern sich durch die seit der Industrialisierung vermehrt freigesetzten Treibhausgase. Bereits heute ist ein Temperaturanstieg im Vergleich zu vorindustrieller Zeit nachgewiesen. Mit verändertem Strahlungshaushalt und erhöhten Temperaturen geht gleichsam eine Veränderung der Luftströmungen einher. Die durch weniger Wolkenbildung erhöhte Strahlungsenergie führt dem Wasserhaushalt zusätzliche Energie zu, was zu erhöhter Verdunstung und in Kombination mit veränderten Luftströmungen zu einem veränderten Niederschlagsregime führt. Gerade die Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung und Niederschlag wirken sich auf die Grundwasserneubildung aus, die Kernelement des Eigenforschungsprojektes ist. Um für die Lausitz Vorhersagen treffen zu können, wie sich die Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt auswirken, ist es notwendig, die bereits vorhandenen Klimaszenarien auszuwerten und zu selektieren, welche sich als Randbedingungen für die Modellierung besonders eignen.

7.2 Projektionen der möglichen Klimaentwicklungen

7.2.1 Repräsentative Konzentrationspfade

Das Wissen um die laufende Klimaveränderung wächst und manifestierte sich im jüngsten sechsten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), der im März 2023 veröffentlicht wurde. Die durch die Freisetzung von Treibhausgasen hervorgerufene Erwärmung führte im Jahrzehnt 2011-2020 bereits zu einem Temperaturanstieg von 1,1°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit (Europäische Kommission, 2024).

Tabelle 5: RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht

Bezeichnung	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Treibhausgaskonzentration 2100	400 ppm CO ₂ -Äquivalente	650 ppm CO ₂ -Äquivalente	850 ppm CO ₂ -Äquivalente	1370 ppm CO ₂ -Äquivalente
Strahlungsantrieb 1850-2100	2,6 W/m ²	4,5 W/m ²	6,0 W/m ²	8,5 W/m ²
Einstufung	Sehr niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch

Übersicht über die Annahmen, die für die verschiedenen repräsentativen Konzentrationspfade getroffen wurden. Sie bilden die Grundlage der Modellierung der klimatischen Zukunft.

Zu untersuchen, wie sich die Klimakomponenten bis ins Jahr 2100 entwickeln können, ist Aufgabe der Klimaforschung. Mit dem fünften Bericht des IPCC aus den Jahren 2013/2014 wurden RCP-Szenarien (Repräsentative Konzentrationspfade, representative concentration pathways) definiert, um dieser Frage nachzugehen. Die Szenarien RCP2.6, RCP 4.5, RCP6.0 und RCP8.5 unterscheiden sich in den finalen Treibhausgaskonzentrationen aus Annahmen der Zusammensetzung des weltweiten Energieverbrauchs und der Entwicklung der Weltbevölkerung im Jahr 2100. Aus diesen Überlegungen wird die Erhöhung des Strahlungsantriebs im Vergleich zur vorindustriellen Zeit als Randbedingung für die Modelle festgelegt. In Tabelle 5 ist dargestellt, wie sich die einzelnen RCP-Szenarien bezüglich des Strahlungsantriebs

und der Treibhausgaskonzentrationen unterscheiden, ebenso eine Einschätzung der Klimawirkung der einzelnen Szenarien.

Zu beachten ist dabei jedoch, dass die bei der Definition der Szenarien bislang keine Annahmen bezüglich der sozioökonomischen Entwicklungen getroffen wurden (Riedel et al., 2021). Um eine Spannweite der möglichen Entwicklungen abzubilden, erhöht sich bei Einhaltung des RCP2.6 die Temperatur zum Ende des Jahrhunderts um weniger als 2°C, was einen Zukunftsverlauf mit ausgeprägtem globalen Klimaschutzbestreben entspricht. RCP8.5 würde für Deutschland einen Temperaturanstieg von 4°C bedeuten, was einen Verlauf ohne Klimaschutzmaßnahmen repräsentiert (Riedel et al., 2021). Ob RCP8.5 dabei tatsächlich realistisch ist, ist umstritten. Einerseits ist es nicht wahrscheinlich, dass künftig keine Klimaschutzbestrebungen unternommen werden, so dass die Annahmen als zu extrem eingestuft werden können (Hausfather & Peters, 2020). Andererseits ist es möglich, dass durch die bereits erfolgte Erwärmung in Verbindung mit häufigeren Waldbränden und dem Abtauen von Permafrost weitere Treibhausgase durch natürliche Prozesse freigesetzt werden (Schwalm et al., 2020) die dann den Emissionsschutzbestrebungen zuwiderlaufen. Für die vorliegende Arbeit wird angenommen, dass alle in den Szenarien abgebildeten Entwicklungen möglich sind. Für die wasserwirtschaftliche Situation der Lausitz sollen robuste Aussagen möglich sein, so dass gerade die möglichen Extrema im Sinne einer best-case und worst-case Betrachtung von Bedeutung sind und damit betrachtet werden sollen.

Die Entwicklung des Treibhausgasausstoßes und damit der Änderung der mittleren Temperaturen für die verschiedenen RCP ist in Fuss et al. (2014) beschrieben. Wie zu erwarten, zeigt demnach RCP2.6 mit 0.9 - 2.3°C zum Ende des Jahrhunderts die geringste Erwärmung, während für die Szenarien des RCP8.5 eine Erhöhung der mittleren Temperaturen von 3.2 - 5.4°C berechnet werden. RCP4.5 und RCP6.0 liegen im Intervall dazwischen, so dass letztlich eine Überlappung der Szenarienergebnisse entsteht und die Bandbreite von 0.9°C – 5.4°C abbildet. Es zeigt sich schon heute, dass selbst bei einer negativen Treibhausgasbilanz ab letzten Drittel des Jahrhunderts, wie es nach RCP 2.6 möglich wäre, eine Erhöhung der Temperaturen bis ins Jahr 2100 nicht rückgängig zu machen ist.

7.3 Das Mitteldeutsche Kernensemble

Die Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen erarbeiteten gemeinsam eine Auswahl der Klimaprojektionen, die zur Betrachtung der Klimafolgen in den jeweiligen Ländern Verwendung finden. Auch wenn das Land Brandenburg bei der Auswahl der Projektionen nicht direkt beteiligt ist, eignen sich die Daten dennoch für Modellbetrachtungen der Lausitz, weil ein großer Teil Brandenburgs bei der Datenauswahl ebenfalls abgedeckt wird.

Die Modellierung der möglichen klimatischen Entwicklung der nächsten 80 Jahre läuft nach folgendem Schema ab. Zunächst wird in Globalmodellen grob aufgelöst die klimatische Entwicklung der gesamten Erde simuliert. Die Ergebnisse für die Größen Temperatur und Niederschlag aus diesen Modellen geht anschließend in Regionalmodelle ein, die fein aufgelöst kleinräumige Gebiete modellieren. Im Falle des Mitteldeutschen Kernensembles ist die räumliche Auflösung 12,5 km. Die Ergebnisse liegen mit einer zeitlichen Auflösung von Tagesschritten vor. Die Klimamodelle liefern auf dieser Grundlage Projektionen, die in ihrer Gesamtheit eine Bandbreite an möglichen Klimaentwicklungen abbilden. Die Projektionen stützen sich selbst auf

Klimaszenarien, die wiederum die Wirkung verschiedener anthropogener Einflüsse wie Bevölkerungswachstum, Treibhausgasemissionen und Klimaschutzaktivitäten abbilden. Keine der Projektionen ist dabei jedoch mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit verknüpft. Die Projektionen schlagen jeweils eine der vielen möglichen Entwicklungen des Klimas vor. Alle dieser Verläufe sind dabei als gleichwertig zu betrachten (Struve et al. 2020).

Ziel der Erstellung des Mitteldeutschen Kernensembles war es, eine Auswahl aus der Vielzahl der Projektionen des Referenzensembles zu erstellen, also der Gesamtzahl aller zur Verfügung stehenden Projektionen, ohne dabei jedoch Informationen zu verlieren und weiterhin die gesamte Bandbreite abzubilden. Die Nutzung des Mitteldeutschen Kernensembles erfolgte dabei unter Berücksichtigung der gegebenen naturräumlichen Bestandteile. Für deutschlandweite Vergleiche der Klimaentwicklung bietet sich beispielsweise das Kernensemble des Deutschen Wetterdienstes an.

Die Auswahl der Projektionen, die für das Mitteldeutsche Referenzensemble ausgewählt wurden, unterlagen einer Reihe Überlegungen. So existieren für die Regionalisierung der globalen Modelle zwei grundlegende Ansätze. Das sind einerseits die dynamischen Regional Climate Models und andererseits das statistische Empirical-Statistical Downscaling. Beide Methoden sind gleichwertig und daher auch in das Mitteldeutsche Kernensemble eingegangen. Beide Ansätze sollen mit ihren jeweiligen Vorzügen und Schwächen zu gleichmäßigen Anteilen im Kernensemble vertreten sein. Die Anzahl der möglichen Ensembles sollte weiterhin auf ein für Endanwender handhabbares Maß reduziert werden, so dass insgesamt 21 Projektionen, jeweils 7 für die RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 gewählt wurden. RCP6.0 ist in der Auswahl nicht vertreten, weil für diesen Konzentrationspfad keine Regionalisierung vorlag (Struve et al., 2020) Da sich RCP6.0 jedoch der Wirkung nach zwischen RCP4.5 und RCP8.5 einfügt, wie in Abbildung 17 dargestellt ist, sind die Ergebnisse für die eine Best- und Worst-Case-Betrachtung verzichtbar.

Eine weitere Einschränkung bei der Auswahl der Projektionen war die Fähigkeit zu Abbildung der Referenzperiode, die zumeist auf die Jahre 1961 - 1990 festgelegt wird. Aus praktischen Erwägungen, dass die meisten Ergebnisse sich auf diese Periode beziehen, wurde von den Autoren des Referenzensembles an diesem Referenzzeitraum festgehalten. Projektionen, die den klimatischen Lauf dieses Zeitraums nicht hinreichend genau abdecken können, wurden daher aus der Auswahl ausgeschlossen.

Weiterhin sollten die gewählten Projektionen zwingend Ergebnisse zu folgenden Klimavariablen aufweisen:

- ▶ Tagessumme des Niederschlags
- ▶ Tagesmitteltemperatur, Maximaltemperatur und Minimaltemperatur in einer Höhe von 2 m
- ▶ Tagessumme der Globalstrahlung oder der Sonnenscheindauer
- ▶ Tagesmittel der relativen Feuchte oder spezifischen Feuchte in 2 m Höhe
- ▶ Tagesmittel der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe
- ▶ Tagesmittel des Bodenluftdrucks oder des auf Meereshöhe reduzierten Luftdrucks

Alle weiteren Klimakenngrößen können aus diesen Werten abgeleitet werden.

Aus diesen Überlegungen ergab sich die in Tabelle 6 angegebene Zusammenstellung. Es sind jeweils das antreibende Globalmodell und das Regionalmodell angegeben. Näheres zur Einordnung ist (Struve et al., 2020) zu entnehmen. Diese Modellkombination bildet das Mitteldeutsche Kernensemble.

Tabelle 6: Auswahl der Kombinationen von Globalmodell und Regionalmodell im Mitteldeutschen Kernensemble nebst der ausgewählten Realisierung und dem Vorhandensein historischer Läufe (his)

Bezeichnung	Globalmodell	Regionalmodell	Realisierung
2.6	CCCma-CanESM2_r2i1p1	DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1	his, r2
	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	KNMI-RACMO22E_v2	his, r1
	MIROC-MIROC5_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	his, r1
	MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2018_v1-r1	01
	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	his, (r)12
	CCCma-CanESM2_r4i1p1	DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1	his, r4
	MPI-M-MPI-ESM-LR_r3i1p1	DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1	his, r3
4.5	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	KNMI-RACMO22E_v1	his, (r)12
	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	KNMI-RACMO22E_v2	his, r1
	NCC-NorESM1-M_r1i1p1	DWD-EPIISODES2018_v1-r1	his, r1
	ICHEC-EC-EARTH_r2i1p1	DWD-EPIISODES2018_v1-r1	his, r2
	MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	his, r1
	CCCma-CanESM2_r5i1p1	DWD-EPIISODES-2018_v1-r1	his, r5
	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	his, (r)12
8.5	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2018_v1-r1	01
	MIROC-MIROC5_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17_v1	his, r1
	MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	DWD-EPIISODES-2018-01_v1-r1	his, r1
	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	KNMI-RACMO22E_v2	his, r1
	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CEC-WETTREG2018_v1-r1	01
	CCCma-CanESM2_r4i1p1	DWD-EPIISODES2018-01_v1-r1	his, r4
	ICHEC-EC-EARTH_r2i1p1	DWD-EPIISODES2018-01_v1-r1	his - r2

7.4 Umgang mit systematischen Abweichungen (BIAS) in den Klimamodellen

Klimamodelle weisen im Vergleich zu bestehenden historischen Messwerten systematische Abweichungen auf. Diese systematische Abweichung wird als BIAS bezeichnet. Diese Abweichungen können so minimiert werden, dass die Ergebnisse aus den Modellen die historischen Messwerte besser abbilden. Dieses Vorgehen wird als BIAS-Adjustierung bezeichnet. Grundsätzlich gibt es zwei Vorgehen bei der BIAS-Adjustierung. Im ersten Fall werden die Projektionsergebnisse derart angepasst, dass sie in Verlauf und Höhe die Messwerte widerspiegeln. Unter der Annahme, dass die dafür notwendigen Schritte auch für die Zukunft korrekt sind, werden die für die Zukunft berechneten Modellergebnisse den gleichen Anpassungen unterzogen. Da jedoch die Anpassung nur separat für die einzelnen Klimakomponenten durchgeführt werden kann, und damit die physikalischen Zusammenhänge der Klimagrößen nicht beachtet werden, wird dieses Vorgehen kritisch gesehen.

Der zweite Ansatz sieht nicht die Korrektur der Modellergebnisse aus den Klimamodellen vor, sondern vielmehr die Korrektur der Ergebnisse nach Auswertung der Klimamodelle. Dazu werden erneut die Zeiträume der Projektionen genutzt, die die Vergangenheit abbilden, für die bereits Messwerte vorhanden sind. Das hat den Vorteil, dass die Modellphysik der Klimamodelle erhalten bleibt, sich jedoch der systematische Fehler aus den Modellen weiter fortpflanzt. Häufig müssen daher individuelle Lösungen für die Betrachtungen geschaffen werden. Für die vorliegende Arbeit wird keine BIAS-Adjustierung vorgenommen, Es ist jedoch darauf zu achten, dass dadurch eine zusätzliche Unsicherheit für die Ergebnisse gilt. Dieses Vorgehen zur Verwendung der Klimadaten wird allgemein von den Ländern als der zu bevorzugende Weg gesehen (Linke et al., 2024). Auch die LMBV nutzt für ihre Planungen dieses Vorgehen. Das setzt jedoch voraus, dass das Wirkmodell, also das Modell, für welches die Klimadaten genutzt werden können, befähigt ist, die Vergangenheit bereits hinreichend genau abzubilden. Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, ist bislang keines der Modelle als klarer Favorit für die Ermittlung der Grundwasserneubildung geeignet, vor allem, weil die Kalibrierung der meisten Modelle anhand von Abflussdaten in Fließgewässern erfolgt, die in der Lausitz als zu stark anthropogen beeinflusst angesehen werden müssen. Damit ist die Bestimmung der Grundwasserneubildung in der Lausitz mit großen Unsicherheiten verbunden, da sie direkt nicht messbar ist und alle indirekten Methoden eigene große Unsicherheiten bezüglich der Grundwasserneubildung mit sich bringen. Es wird daher in dieser Arbeit zunächst der Ansatz gewählt, die Klimaszenarien des Mitteldeutschen Kernensembles direkt auszuwerten, um die Bandbreite der zu erwartenden Klimaveränderungen zu untersuchen. Entsprechend der Leitlinien der Länder werden dafür lediglich Summenparameter und langfristige Mittelwerte ausgewertet (Linke et al., 2024). Dass die Daten einen BIAS aufweisen, muss bei der Interpretation der Ergebnisse bedacht werden.

7.5 Ergebnisse aus den Klimaprojektionen

Für die insgesamt 21 Projektionen des Mitteldeutschen Kernensembles wurden vor allem die Daten zur Temperatur, zum Niederschlag und wenn die entsprechenden Ergebnisse vorhanden waren, auch der potentiellen Verdunstung ausgewertet. Diese drei Größen sind die für den Grundwasserneubildungsprozess wesentlichen klimatischen Einflussfaktoren. Da keine direkte Nutzung für die Neubildungsberechnung möglich war, werden im Folgenden wesentliche Eigenschaften der Projektionen vorgestellt, die die Grundwasserneubildung maßgeblich beeinflussen. Es muss dabei jedoch beachtet werden, dass bei der Interpretation von

Projektionsdaten die Daten nicht als gleichwertig zu tatsächlich gemessenen meteorologischen Daten gleichgesetzt werden dürfen. Für die Nutzung von Projektionsdaten ist in der Regel die Nutzung eines Wirkmodells notwendig, das die Projektionsdaten verarbeitet und Aussagen zur gewünschten Zielgröße, etwa der Grundwasserneubildung, generiert. Da für die bestehende Arbeit aufgrund der für die Lausitz fehlenden Validierungsmöglichkeit der Ergebnisse keines der Neubildungsmodelle zum jetzigen Zeitpunkt als bestmöglicher Ansatz verwendet werden kann, erfolgt die Betrachtung der mittleren Ergebnisse der Projektionsdaten selbst. Da das Einfachste in dieser Arbeit vorgestellte Grundwasserneubildungsmodell von Proksch maßgeblich von den Niederschlägen abhängig ist, kann das Niederschlagssignal allein als Hinweis für die Entwicklung der Neubildung betrachtet werden. Im Gegenzug ist eine Betrachtung der Entwicklung der potentiellen Verdunstung ebenfalls interessant, weil es als direkte Verlustgröße in die Wasserbilanz eingeht, gleichwohl nur in der Annahme, dass das Wasser für die Verdunstung überhaupt zur Verfügung steht.

Eine Auswertung der Projektionsdaten für das gesamte Untersuchungsgebiet erschien nicht sinnvoll. Es wurden daher die Daten eines Standortes in der Nähe der Ortschaft Lohsa ausgewählt, der sich westlich des Speicherbeckens Lohsa II befindet. Um historische Messdaten in die Betrachtungen mit einzubeziehen, die einen Vergleich der Projektionsergebnisse mit den klimatischen Verhältnissen in der jüngeren Vergangenheit ermöglichen, wurden die Stationsdaten des DWD für die Station Bautzen-Kubschütz ebenfalls ausgewertet. Diese Station liegt 25 km südlich der Ortschaft Lohsa und ist bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts aktiv.

7.5.1 Historische Temperatur- und Niederschlagsdaten

Der DWD hält für die Station Kubschütz vieljährige Mittelwerte bereit. Tabelle 7 fasst die Jahreswerte zusammen.

Tabelle 7: Jahresmittelwerte für die letzten vier 30jährigen Referenzzeiträume für Kubschütz

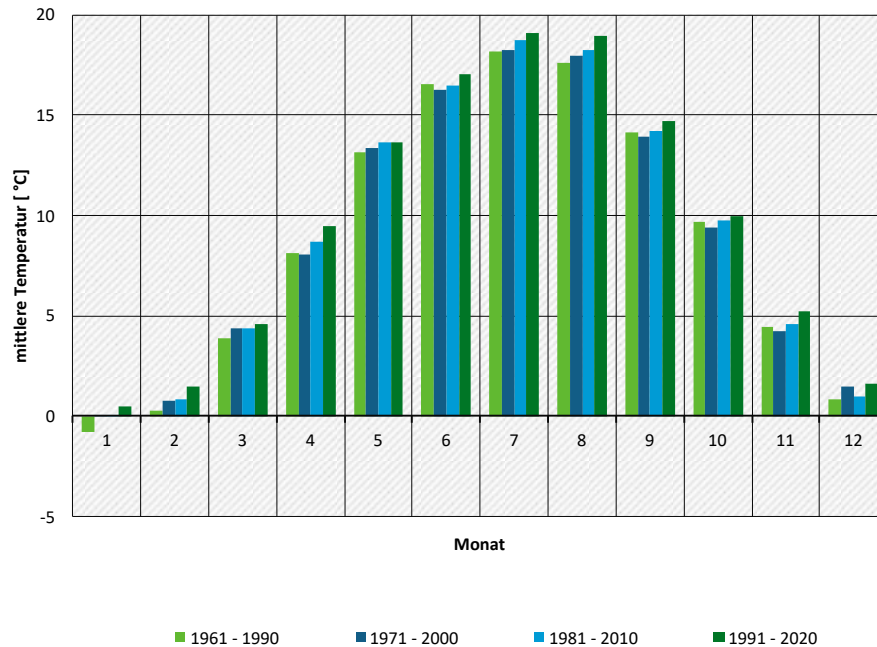
Zeitraum	Temperaturmittelwert [°C]	Niederschlagsmittelwert [mm]
1961 – 1990	8,8	674,8
1971 – 2000	9,0	662,3
1981 – 2010	9,3	650,9
1991 – 2020	9,7	651,6

Die Daten legen für die Temperatur einen Temperaturanstieg von 0,9°C nahe. Die Niederschläge haben im Mittel um 20 mm abgenommen.

Ergänzend zu den langjährigen Mittelwerten, zeigen die Abbildung 15 und Abbildung 16 die Entwicklung der Monatswerte für Temperatur und Niederschlag innerhalb der vergangenen 60 Jahre. Die mittleren Temperaturdaten zeigen einen sich abzeichnenden Anstieg für die letzten 40 Jahre. Der letzte 30jährige Zeitraum sticht besonders heraus. Entsprechend zeigen auch die Jahresmittelwerte in Tabelle 7 einen deutlichen Anstieg der Mitteltemperatur von 1961 – 1990 bis zum Zeitraum 1991 – 2020 um 0,9 °C. Die Niederschlagssituation zeigt in diesen Daten keinen eindeutigen Trend. Die zunehmende Kontinentalität des Standortes paust sich durch die im Vergleich zum Winter erhöhten Niederschläge in den Sommermonaten durch. Zwischen den Dekaden bestehen keine eindeutigen Zusammenhänge wie im Fall der Temperaturdaten. Die

Sommerniederschläge sind in den letzten beiden 30-Jahr-Zeiträumen leicht zurückgegangen im Vergleich zu den Jahrzehnten davor. Trotz der ausgeprägten Trockenjahre ab 2018 ist der mittlere Niederschlag dennoch nicht geringer als in den 30 Jahren davor.

Abbildung 15: Entwicklung der monatlichen Temperaturen über die letzten 60 Jahre an der Station Kubschütz

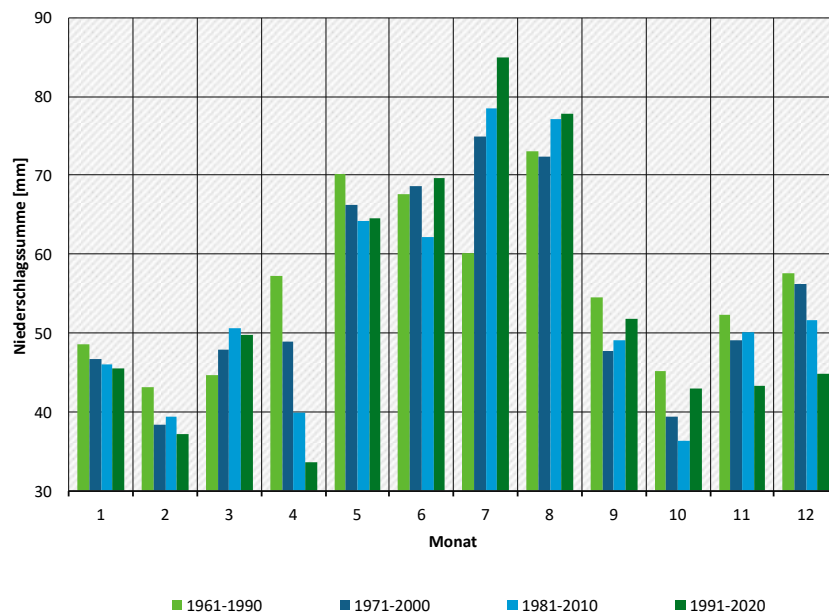


Die Grafik zeigt die Entwicklung der Monatsmitteltemperaturen für die Station Kubschütz im Laufe der letzten 60 Jahre. Auffällig ist der kontinuierliche Anstieg der Temperatur für fast alle Monate. Die Daten wurden vom DWD zur Verfügung gestellt (DWD Climate Data Center (CDC): Historische Tagesmesswerte der Station 314 Kubschütz, 03.04.2024).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Aus Neubildungsperspektive sind die geringen Niederschläge am Anfang und Ende des Jahres eine wichtige klimatische Eigenschaft. Am Anfang des Jahres haben die Böden durch die ausbleibende Transpiration der Pflanzen höhere Wassergehalte, so dass fallende Niederschläge, die nicht oberflächlich abfließen versickern und damit das Wasser innerhalb des Bodens in Richtung Grundwasseroberfläche weitschieben, ohne vorher entwässerte Porenräume auffüllen zu müssen. Aus diesem Grund umfasst der typische Neubildungszeitraum in Deutschland die letzten Wintermonate und den frühen Frühling. Die Niederschläge ab Mai neigen eher dazu, von den Pflanzen direkt aufgenommen zu werden, um deren Transpirationsstrom aufrecht zu erhalten. Der Boden wird dadurch schneller entwässert und es findet jenseits meist kleinräumig ausgeprägter präferentieller Flüsse keine Neubildung statt. Im Zeitraum 1961-1990 gab es im Januar noch einen Monat mit durchschnittlich weniger als 0 °C Lufttemperatur. Das führte zu Bodenfrösten, die eine Wasserversickerung und damit Neubildung in diesem Zeitraum auch behindert hätten. Die Diskussion innerhalb des am 08. Mai 2025 in Dessau mit Vertreter*innen aus Landesbehörden und Wissenschaft durchgeführten Fachgesprächs „Grundwasserneubildung in der Lausitz im Zuge des Klimawandels“ bestätigte diese Einschätzung.

Abbildung 16: Entwicklung der monatlichen Niederschläge über die letzten 60 Jahre an der Station Kubschütz



Die Grafik zeigt die Entwicklung der mittleren Monatsniederschläge für die Station Kubschütz im Laufe der letzten 60 Jahre. Am auffälligsten ist der Rückgang der Niederschläge im Monat April. Insgesamt waren die letzten 30 Jahre in den Wintermonaten trockener als in den Zeiträumen davor. Die Daten wurden vom DWD zur Verfügung gestellt (DWD Climate Data Center (CDC): Historische Tagesmesswerte der Station 314 Kubschütz, 03.04.2024).

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

7.5.2 Charakterisierung der Klimaprojektionen

Zunächst wurden die Ergebnisse des Mitteldeutschen Kernensembles für die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag untersucht. Die Daten wurden dem Regionalen Klimainformationssystem (ReKIS-Projekt) der Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen entnommen. Da die Regionalisierung mittels WETTREG-2018 keine Daten zur Globalstrahlung beinhaltet, wurde für diese keine potentielle Verdunstung berechnet. Für alle anderen Ergebnisse wurde die Verdunstung mit der Turc-Formel nach dem DVWK-Merkblatt 238 berechnet (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), 1996). Zuerst wurden die Ergebnisse für alle Szenarien monatsweise ausgewertet. Dabei erfolgte ein Vergleich der historischen Läufe der Modelle mit den gegenwärtigen Messwerten.

Dabei zeigte sich, dass die Temperatur die historischen Läufe der Szenarien mit ihren Mittelwerten in der Nähe der Stationsdaten liegen. Die Streuung der Projektionen hin zu geringeren Temperaturwerten ist für die historischen Läufe eher größer als zu höheren Werten. In den Projektionsrechnungen ist für alle Szenarien mit einer deutlichen Erhöhung der Temperatur zu rechnen, was erwartbar ist. In allen Monaten wird eine Verschiebung zu höheren Temperaturen angedeutet. Wintermonate mit mittleren Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes werden nur von einzelnen Projektionen vorhergesagt.

Für die Niederschläge lässt sich kein so klares Bild zeichnen, wie für die Temperaturen. Die historischen Läufe neigen vor allem in den letzten Monaten des Jahres zu größeren Werten als jene der Stationsdaten. Vor allem im Monat Juni neigen die Modelle zu eher höheren Niederschlagsmengen. Auffällig ist außerdem der August, in dem nahezu alle Modelle den

Niederschlag unterschätzen. Insgesamt wurde ersichtlich, dass die Modelle eine Tendenz zu eher stärkeren Niederschlägen haben, als sie von den Stationsdaten aufgezeichnet werden.

Zu beachten ist jedoch dabei, dass die Streuung der Niederschlagsdaten deutlich größer als bei den Temperaturmodellen ist. Die Projektionen für den zukünftigen Verlauf deuten wiederum darauf hin, dass die Niederschläge eher zunehmen werden, wobei auch hierbei die Streuung und damit Unsicherheit am größten ist. In Anbetracht dessen, dass die Referenzdaten jedoch schon eine Überschätzung andeuten, könnte die überwiegende Verschiebung zu höheren Niederschlägen auf einen Bias zurückgeführt werden. Da jedoch die Tendenz deutlich zunimmt, ist davon auszugehen, dass tatsächlich eine Erhöhung der monatlichen Niederschläge erwartet werden kann.

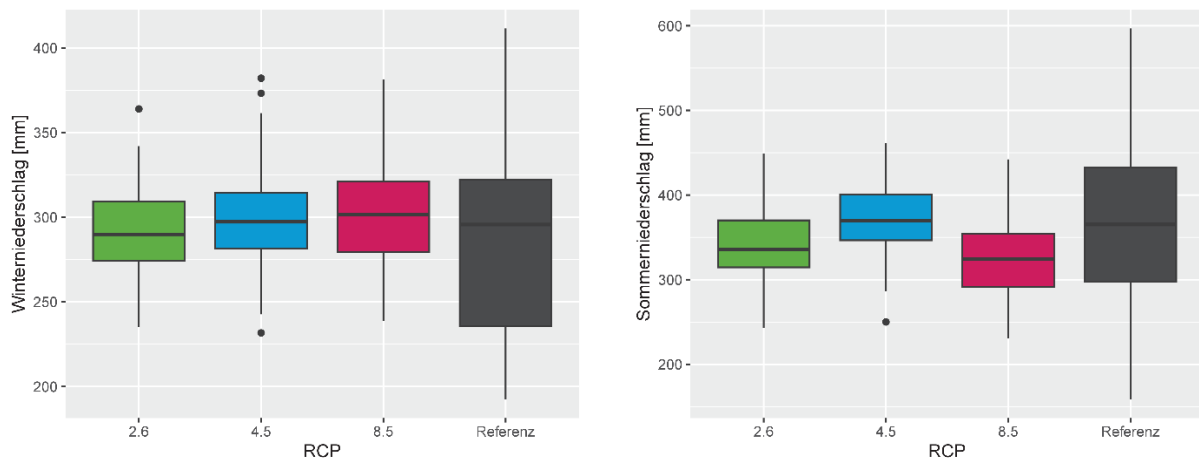
Zuletzt wurde die potentielle Verdunstung untersucht. Die historischen Verläufe sind jedoch deutlich enger gefasst als die Streuungen bei Temperatur und Niederschlag. Das deutet entweder darauf hin, dass diese Größe von den Klimaszenarien gut dargestellt werden kann, oder dass die Größe Globalstrahlung, aus der die Verdunstung maßgeblich abgeleitet wird, keinen so großen Schwankungen unterliegen kann. Letztlich stellt sie den Energiebetrag dar, der für die Verdunstung von Wasser zur Verfügung steht. Wie viel dieser Energie auf der Erdoberfläche in Verdunstung umgesetzt wird, ist maßgeblich von der geografischen Lage abhängig. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Wolkenbedeckung des Himmels. Entsprechend sind die Verdunstungen in der Zukunft in größten Teil des Jahres denen der historischen Läufe ähnlich. Lediglich in den Sommermonaten nimmt die Streuung zu, und vor allem für die Monate Juni und Juli ist ein Zuwachs an potentieller Verdunstung zu erwarten.

Um zwischen den einzelnen repräsentativen Konzentrationspfaden und deren Wirkung auf Temperatur, Niederschlag und Verdunstung zu unterscheiden, wurden im Anschluss die mittleren Verläufe der Zeitreihen der jeweiligen RCP untersucht. Da die Winterhalbjahre und die Sommerhalbjahre jeweils die hydrologischen Gewinn- oder Verlustzeiträume darstellen, erfolgte das in dieser Aufteilung.

Bei Betrachtung der Temperaturdaten fiel auf, dass die RCP 2.6 und 4.5 im Mittel keine sehr großen Unterschiede aufweisen. Anders stellt sich die Situation jedoch für die Ergebnisse des RCP 8.5 dar, die zum Ende des Jahrhunderts einen deutlichen Temperaturanstieg andeuten. Die Temperatur steigt dabei im Sommerhalbjahr deutlicher an als im Winterhalbjahr. Insgesamt liegen jedoch alle Projektionen über den Referenzdaten aus der Station Kubschütz, was für die Temperatur aus den Grundannahmen der Modelle auch zu erwarten ist.

Für die Niederschläge war die Situation weniger eindeutig. Es lässt sich aus keiner der RCP ein klarer Trend ableiten. Abbildung 17 zeigt die Verteilung der Sommer- und Winterniederschläge für die jeweiligen Mittelwerte der drei RCP für den Zeitraum 2007 bis 2100. Dem gegenübergestellt sind die Referenzdaten der Station Kubschütz von 1937 bis ins Jahr 2000. Im Vergleich fällt auf, dass sich die Niederschläge für die RCP unwesentlich vom Referenzzeitraum unterscheiden. Im Winterhalbjahr fällt auf, dass die mittleren Niederschläge des RCP 8.5 zum Ende eher über denen der RCP 2.6 und 4.5 liegen. Im Sommerhalbjahr deutet sich jedoch an, dass für RCP 8.5 geringere Niederschläge als für die beiden anderen RCP zu erwarten sind. Im Vergleich zu den realen Messdaten jedoch zeigt sich keine eindeutige Veränderung, wobei hierbei zu beachten ist, dass die Extrema der Projektionen durch die Mittelwertbildung nicht abgebildet werden.

Abbildung 17: Verläufe der Mittelwerte der Projektionen für den Niederschlag bis 2100

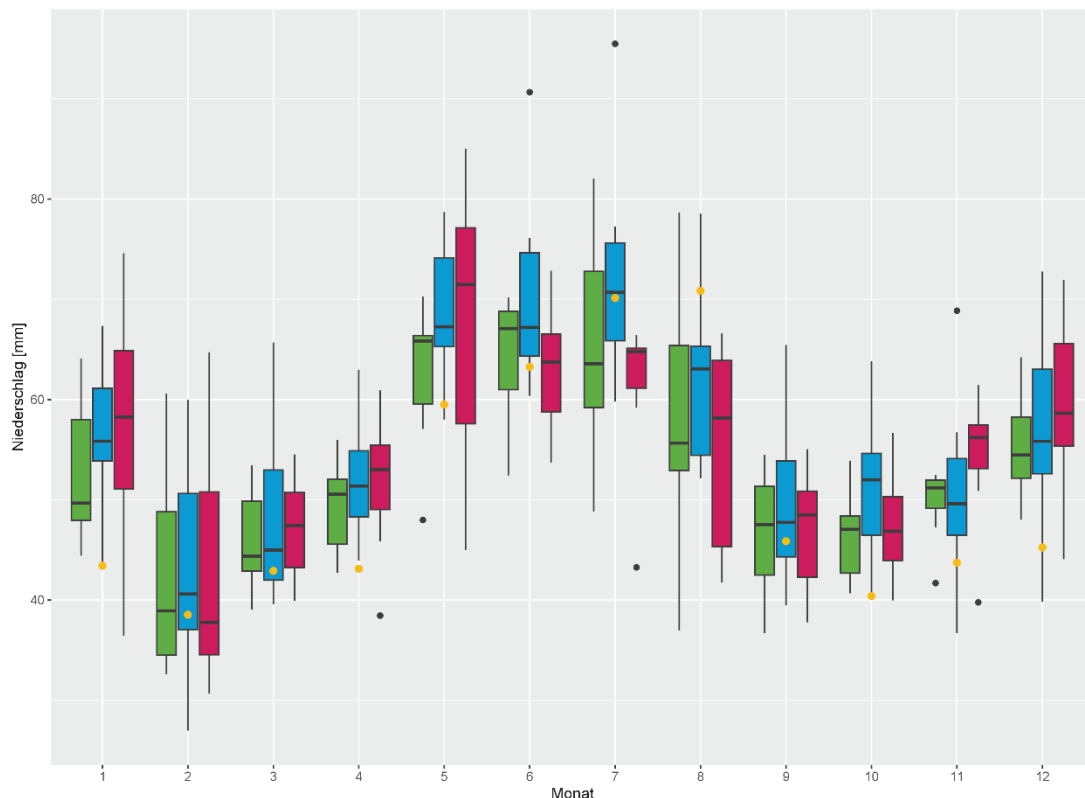


In der Abbildung sind links die Winter- und rechts die Sommerniederschlagsverteilung der jeweiligen RCP dargestellt. Für jeden RCP wurden die Halbjahresniederschläge Jahresweise mit dem Median gemittelt. Die Verteilung dieser Mittelwerte wird als Boxplots dargestellt, um eine Einschätzung der Streuung zu bekommen. Grün repräsentiert RCP2.6, Blau RCP 4.5 und Magenta RCP 8.5. In Grau dargestellt sind die real gemessenen Sommer und Winterniederschläge der Station Kubschütz. Die Daten entstammen dem ReKIS-Projekt (Projektionen) und dem DWD (DWD Climate Data Center (CDC): Historische Tagesmesswerte der Station 314 Kubschütz, 03.04.2024)

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Da diese Darstellung keine eindeutige Unterscheidung der Wirkung der RCP zulässt, wurden die Ergebnisse der Niederschlagsprojektionen noch einmal für die einzelnen Monate in Abbildung 18 dargestellt. Wie schon in der vorherigen Abbildung zu sehen, fallen im Mittel mehr Niederschläge in den Szenarien des RCP 8.5 im Herbst und Frühjahr bis zum Mai. In den Sommermonaten überwiegen eher die Niederschläge im RCP 4.5. Zu beachten ist jedoch, dass die Niederschläge aller RCP außer im August und im Februar über denen der Referenzperiode liegen. Es ist damit also für die Lausitz tendenziell von höheren Niederschlägen auszugehen, die vor allem im Winterhalbjahr fallen, was der Grundwasserneubildung zugutekäme. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Ergebnisse der Projektionen schon für die Referenzperiode erhöhte Werte anzeigen, so dass ein Teil der erhöhten Niederschlagsmenge dem BIAS der Projektionen zuzuschreiben ist.

Abbildung 18: Boxplots der monatlichen Niederschläge aufgeteilt in Abhängigkeit von Kalendermonat und RCP



Die Abbildung zeigt die Verteilung der monatlichen Niederschläge aller Klimaprojektionen des MDK für die jeweiligen RCP. Grün ist RCP 2.6, blau RCP 4.5 und Magenta RCP 8.5. Ausreißer sind schwarz dargestellt. Gelb dargestellt ist als Referenz der Niederschlagsmittelwert für die Station Kubschütz (kompletter Messzeitraum 1936 bis 2023). Die Daten entstammen dem ReKIS-Projekt (Projektionen) und dem DWD (DWD Climate Data Center (CDC): Historische Tagesmesswerte der Station 314 Kubschütz, 03.04.2024)

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Für die Verdunstung deutete sich bereits eine Erhöhung vor allem in den Sommermonaten an. Die Aufteilung der Ergebnisse nach den RCP zeigt dabei deutlich eine Erhöhung der Verdunstung in den Sommermonaten vor allem für RCP 8.5. Die größten Streuungen erreichen außer im April die RCP 2.6 und 8.5. Die Mittelwerte der einzelnen RCP liegen dabei jedoch im Vergleich zum Niederschlag nicht so stark auseinander, so dass bei allen RCP eine ähnliche Erhöhung der potentiellen Verdunstung zu erwarten ist, wobei RCP 8.5 in diesem Vergleich zumeist die höchsten Werte annimmt.

7.5.3 Verwendung der Klimaprojektionen für Modellierung der Grundwasserneubildung

Das Mitteldeutsche Kernensemble erscheint geeignet, um für Prognoserechnungen die Informationen über die zu erwartende Streuung der klimatischen Eingangsgrößen abzubilden, da sowohl trockene als auch feuchte Verläufe von den ausgewählten Projektionen abgedeckt werden. Sie stellen dennoch nur eine Auswahl der möglichen Entwicklungen dar. Wichtiger ist jedoch, dass für die verlässliche Prognose ein an der Lausitz kalibriertes und verifiziertes Berechnungsmodell für die Grundwasserneubildung vorliegen muss. Wie sich in den vergangenen Kapiteln gezeigt hat, ist das mit den bisherigen Ansätzen noch nicht vorhanden.

Das Land Sachsen bietet mit seinem Wasserhaushaltsportal für die mit Hilfe der KLiWES-Modelle gerechneten Ergebnisse bis ins Jahr 2100 an. Vom Umweltbundesamt liegt mit dem WADKlim-Projekt ebenfalls eine Abschätzung der Neubildung deutschlandweit vor (Stein et al., 2024). Diese Modelle sind in jedem Fall geeignet, eine Einschätzung zu erhalten, mit welchen Veränderungen zu rechnen ist und welche Streuung zu erwarten sein wird. Konkrete Ergebnisse für die bergbaulich beeinflussten Gebiete in der Lausitz können diese großräumig gedachten Modelle jedoch nicht liefern. Es ist daher erforderlich, dass nach der Ertüchtigung der Neubildungsberechnung für die Lausitz die Prognosen für die Lausitz erneut gerechnet werden.

Die Projektionen des Mitteldeutschen Kernensembles erscheinen geeignet, um verschiedene Klimäläufe für die Lausitz abzubilden,

Zu einer umfassenden Betrachtung des Zusammenhangs von klimatischen Bedingungen und Grundwasserneubildung können noch weitere Parameter wie Wolkenbedeckung, Frosttage und die Stärke der Niederschläge mit betrachtet werden. Problematisch ist, dass die Abdeckung dieser Faktoren in den Klimaprognosen zumeist ungenügend ist, und darum auch in der folgenden Arbeit nicht betrachtet werden kann. Extremereignisse lassen sich ebenfalls nicht hinreichend gut durch die Prognosen abbilden (Struve et al., 2020), so dass deren Wirkung auf die Grundwasserneubildung und die Oberflächenabflüsse ebenfalls nur schwer abschätzbar ist. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch vor allem bei Sommerniederschlägen von erhöhter Starkregenhäufigkeit ausgegangen werden.

Zusammenfassung des Kapitels

Die Nutzung des Mitteldeutschen Kernensembles erscheint nach Auswertung der vorliegenden Ergebnisse geeignet, die zu erwartenden klimatischen Entwicklungen für die Lausitz abzudecken. Aufgrund des Fehlens eines verlässlichen Wirkmodells, lassen sich lediglich qualitative Aussagen aus den Projektionsdaten ableiten. Die Szenarien des MDK umfassen sowohl feuchte wie auch trockene Verläufe, die eine Abschätzung der Wirkung der klimatischen Bedingungen auf die Grundwasserressourcen möglich machen. Um das untersuchen zu können, sind jedoch für die bergbaulichen Bereiche der Lausitz validierte Grundwasserneubildungsmodelle notwendig. Wie das vorangegangene Kapitel gezeigt hat, mangelt es derzeit an einer verlässlichen Datengrundlage, um den Ist-Zustand zu verifizieren. Vor diesem Hintergrund war die Umsetzung der Klimaszenarien in Neubildungsmodelle nicht zielführend.

Es zeigte sich anhand der Entwicklung der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen eine wahrscheinliche Zunahme der Niederschläge vor allem im Winterhalbjahr. Diese Annahme gilt für alle RCP, wobei die Streuung für RCP 8.5 am größten ist. Da das in Mitteleuropa der typische Grundwasserneubildungszeitraum ist, ist davon auszugehen, dass die Grundwasserneubildung insgesamt eher steigen wird. Dass gleichzeitig die Temperaturen steigen, unterstützt durch nur noch selten auftretende Frostperioden im Winterhalbjahr die Infiltration in den Untergrund. Dieser Effekt zeigt sich bereits in den Temperaturmessungen der Referenzwetterstation, die bereits in den vergangenen 30 Jahren ausschließlich monatliche mittlere Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes aufgezeichnet hat.

Gleichwohl bleibt offen, inwieweit sich Trockenperioden oder Starkniederschläge auf die Neubildung auswirken werden. Das konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht werden.

8 Abschlussbemerkungen

Grundwasserneubildung

In dieser Studie wurde gezeigt, dass die Ermittlung der Grundwasserneubildung in der Lausitz mit klassischen Methoden nur für kleine Räume aussagekräftig ist oder aufgrund der anthropogenen Überprägung der natürlichen hydrologischen Bedingungen nicht ohne weiteres möglich ist. Aus der historischen Betrachtung konnten zwei Ergebnisse abgeleitet werden. Für die historischen Niedrigwasserabflüsse am Pegel Sandower Brücke und die Arbeit von Milde (Milde, 1966) für das Baruther Urstromtal ergaben sich Neubildungsraten oberhalb des Cottbuser Pegels von rund 65 mm und innerhalb des Baruther Urstromtals von 130 mm im Jahr. Die vier ausgewerteten Modelle lagen mit ihren Ergebnissen für die Oberlausitz bei mittleren Grundwasserneubildungsraten von rund 60 bis 165 mm pro Jahr. Problematisch ist jedoch, dass sich die Ergebnisse für die einzelnen Teileinzugsgebiete zu stark voneinander unterscheiden, als dass ohne Weiteres die Wahl für eines der Modelle für eine detaillierte Betrachtung in Frage kommen kann. Darum wird in der nun fortgesetzten Bearbeitung der Fokus auf das Teileinzugsgebiet des Bergbaufolgesees Lohsa I gelegt, um an diesem Beispiel die Grundwasser- und Oberflächenwasserverhältnisse der Lausitz modellhaft zu untersuchen. Dieses Einzugsgebiet weist dafür eine Reihe Vorteile auf. Das Einzugsgebiet des Gewässers ist mit 109 km² überschaubar, vor allem unter Betrachtung der Teileinzugsgebiete. Der Bergbaufolgensee wird durch die Kleine Spree gespeist und ist bereits seit 1972 in Nutzung, zunächst als Hochwasserrückhalt für die Spree, heute als Niedrigwasserausgleich. Der vor allem sandige geologische Untergrund lässt sich gut parametrisieren. Da das Speicherbecken von der Landestalsperrenverwaltung bewirtschaftet wird, ist das Gewässer dauerhaft unter Beobachtung und es stehen entsprechende Daten zur Verfügung. Zuletzt bieten Vorarbeiten, die an der TU Bergakademie Freiberg gelaufen sind, bereits Untersuchungen zur Kopplung des Grundwassers zum See, so dass diese Erkenntnisse unmittelbar in die Interpretation der Messwerte einfließen können.

Klimaprojektionen

In Betrachtung der Klimaszenarien folgte die Auswahl der Projektionen des Mitteldeutschen Kernensembles. Da die Wahl des Modellansatzes für die Bestimmung der Grundwasserneubildung bislang zu keiner eindeutigen Entscheidung für oder gegen eines der Modelle geführt hat, ist kein passendes Wirkmodell vorhanden, um eine der Projektionen für einen feuchten oder trockenen Lauf der Zukunft zu verfolgen. Weiterhin sind die Ergebnisse für die zu erwartenden Änderungen von Verdunstung und Niederschlag im Unterschied zur Temperatur, die einen klaren Trend aufweist, möglich. Es wird daher in den weiteren Bearbeitungsschritten mit allen Projektionen gearbeitet, um die mittlere Wirkung der repräsentativen Konzentrationspfade auf die Grundwassersituation in der Lausitz zu untersuchen und robuste Abschätzungen zu generieren. Es deutet sich an, dass durch leicht erhöhte Winterniederschläge mit insgesamt wärmeren Wintermonaten ohne Frost eine Erhöhung der Grundwasserneubildung möglich sein kann, was jedoch bestätigt werden muss. Andererseits können erhöhte Temperaturen und ein sich durch veränderte Wolkenbedeckung ändernder Strahlungshaushalt eine Erhöhung der potentiellen Verdunstung nach sich ziehen. Die großen Seeflächen der Bergbaufolgeseen von insgesamt 250 km² (Uhlmann et al., 2023) und sich einstellende flurnahe Grundwasserstände können höhere Grundwasserverluste in den Sommermonaten mit sich bringen, was der Grundwasserneubildung gegenläufig ist.

Entsprechend muss die Bestimmung der Seewasserverdunstung verbessert werden und es muss in angestrebt werden, die Verdunstungslast so gering wie möglich zu halten.

Empfehlung für weitere Arbeiten

Es hat sich gezeigt, dass die Modelle auf großer Fläche zu vergleichbaren Ergebnissen führen, die in der abgebildeten Oberlausitz zwischen 100 mm bis 140 mm mittlerer jährlicher Grundwasserneubildung liegen, während sie auf Teileinzugsgebietsebene und darunter deutliche Differenzen zwischen den einzelnen Modellergebnissen aufweisen. Werden nur die Extremwerte der Modelle als Grundlage genommen, ergab sich eine Bandbreite von 39 mm bis 206 mm Neubildung für das gesamte Gebiet mit einem Mittelwert der Ergebnisse bei 120 mm. Letzterer deckte sich gut mit der Abschätzung aus den einzelnen Modellen. Die große Differenz bei Betrachtung der minimalen und maximalen Neubildungsmengen der Modelle sind Resultate der starken Überschätzung der Zehrung aus dem KLiWES 2.1 Modell und der sehr optimistischen Schätzung der Neubildung durch das Proksch Modell, so dass diese Grenzen sicherlich zu weit abgeschätzt werden. Keines der Modelle ist geeignet, die Grundwasserneubildung standortgenau vorherzusagen, was jedoch auch nicht der Kern der Modelle ist. Für derartige Fragestellungen müssen deutlich kleinskaligere Betrachtungen als die hier durchgeführten umgesetzt werden, für die wiederum eine genauere Kenntnis des zugehörigen Teileinzugsgebietes notwendig ist. Es ergab sich die unbedingte Notwendigkeit, eine Verifizierung der Modellergebnisse anhand von realen Messwerten durchzuführen. Lysimeter, Grundwasserganglinien, Wasserwerksdaten und Isotopenstudien kommen dafür in der Lausitz in Betracht. Gerade mit Lysimetern ließen sich typische Bewuchs-Boden-Kombinationen für die Lausitz experimentell untersuchen, auch wenn die Aussagen lediglich für kleine Räume eine Gültigkeit besitzen.

In den Gebieten, in denen in den kommenden Jahren der Grundwasserwiederanstieg abgeschlossen sein wird lassen sich Grundwasserganglinien für eine Untersuchung der Neubildung zurate ziehen. Der Wasserwirtschaftliche Jahresbericht 2024 der LMBV (2025) legt nahe, dass dieser Zustand für einen großen Teil der Lausitzer Seenkette bald erreicht sein wird. Diese Ergebnisse können für Bereiche mit bevorstehender Beendigung des Braunkohlebergbaus wertvolle Erkenntnisse liefern. In der Nähe von Bergbaufolgeseeen ließe sich auf diesem Wege die unterirdische Kopplung von See und Grundwasser mit diesen Methoden ebenfalls untersuchen. Es ist daher zwingend erforderlich, dass das Monitoring der hydrogeologischen Situation vor Ort weiterhin in dem zeitlich und räumlich engmaschigen Netz aus Messstellen gekoppelt mit dem Betrieb von Grundwasserströmungsmodellen erfolgt, wie es zu Zeiten des Grundwasserwiederanstiegs von der LMBV in den Altstandorten bereits betrieben wird. Auch für die in den kommenden Jahrzehnten renaturierten Gebiete ist ein striktes Monitoring der Grundwassersituation angeraten. Auf diese Weise kann eine umfassende Datenbasis erstellt werden, die schon kurzfristig für die bergbaulich geprägte Region wertvolle Hinweise liefern kann und das Verständnis des sich neu einstellenden Grundwasserfließsystems ermöglicht. Eine länderübergreifende zentrale Sammlung dieser Daten sollte angestrebt werden. Die Flutungszentrale der LMBV kann für ein solches Vorhaben als Blaupause angesehen werden. Gerade Fragen, die heute mit noch größeren Unsicherheiten belastet sind, wie etwa nach der Entwicklung der Verdunstung und der daraus resultierenden Zehrung für die Grundwasserressourcen, lassen sich mit diesen Erkenntnissen im Rahmen von Forschungsprojekten näher beleuchten. Sie liefern letztlich die Hinweise, die für eine fundierte Einschätzung notwendig sind, um die wasserwirtschaftlichen Folgen der klimatischen Veränderung in den kommenden Jahrzehnten in der Lausitz zu quantifizieren.

Fest steht, dass eine Modellierung der Wirkung der fortschreitenden Klimaveränderungen auf die Grundwasserneubildung mit noch größeren Unsicherheiten behaftet ist, als sie sich durch die Klimaszenarien an sich schon ergeben. Daher ist für die wasserwirtschaftlich sensiblen Bereiche um bestehende und künftige Bergbaufolgeseen eine Verifikation der Modellergebnisse für diese Standorte notwendig.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wäre ohne Unterstützung vieler weiterer Personen nicht möglich gewesen. Ich danke daher allen Beteiligten und Diskussionspartner*innen, die den Verlauf des Projektes begleiteten. Vor allem möchte ich mich für die fachliche Unterstützung von Prof. Dr. Traugott Scheytt von der TU Bergakademie Freiberg bedanken, der mir für die Arbeit wertvolle Denkanstöße lieferte und stets für Diskussionen zur Verfügung stand. Darüber hinaus danke ich Jörg Frauenstein für seine Expertise bei der Projektumsetzung und seiner redaktionellen Betreuung. Außerdem danke ich Annegret Biegel-Engler für Ihr offenes Ohr und ihre Hilfe bezüglich aller auftretenden Schwierigkeiten im Projektverlauf. Und zuletzt möchte ich dem Fachgebiet II 2.6 des Umweltbundesamtes für den fachlichen Austausch und verlässliche gegenseitige Unterstützung danken.

9 Quellenverzeichnis

AG Grundwasserneubildung des Erft Verbandes (2012). Flächendifferenzierte Ermittlung der Grundwasserneubildung im Rheinischen Braunkohlenrevier, Erft Verband.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.

Becker, A. (1975). EGMO-Einzugsgebietsmodelle zur Abflussberechnung, -vorhersage und -simulation. Wasserwirtschaft, Wassertechnik: wwt, 25, 316-322.

Beyerle, U. (2002). Groundwater Dating using Environmental Tracers and Black Box Models, A Survey of Methods for Analysing Groundwater Recharge in Arid and Semi-arid Regions. United Nations Environment Programme (UNEP).

BGR (2019). Mittlere Jährliche Grundwasserneubildung von Deutschland 1:1000.000 (GWN1000). Digital map data v1. BGR.

Brandenburg, L. (2024). Pegeldata Cottbus, Sandower Brücke/Spree. Pegelportal des Landes LfU. Abgerufen am 20.06.2024 auf

https://pegelportal.brandenburg.de/messstelle.php?fgid=6&pkz=5821000&thema=ws_graph#panel4

Braunkohleausschuss der Gemeinsamen Landesplanungsabteilung Berlin-Brandenburg (2021). Planverfahren Tagebau Welzow-Süd. Sitzung des Braunkohleausschusses am 04.11.2021.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), 1996. Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. GFA.

Elze, K. (1931). Hydrologische Untersuchungen im Breslau-Magdeburger Urstromtal. Bergakademie Freiberg.

Ertl, G., Bug, J., Elbracht, J., Engel, N. & Herrmann, F. (2019). Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG).

Europäische Kommission (2024). Ursachen des Klimawandels. Abgerufen am 20.09.2024

https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_de.

Friedrich, A. (o.J.). Tourismus im Spreewald. Abgerufen am 31.10.2023 von <https://www.spreewald-info.de/region/geschichte/spreewald-tourismus-aktuell.php>

Fuss, S., Canadell, J. G., Peters, G. P., Tavoni, M., Andrew, R. M., Ciais, P., Jackson, R. B., Jones, C. D., Kraxner, F., Nakicenovic, N., Le Quéré, C., Raupach, M. R., Sharifi, A., Smith, P., & Yamagata, Y. (2014). Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, 4(10), 850–853. <https://doi.org/10.1038/nclimate2392>

Gebel, M., Bürger, S., Uhlig, M., Schwarze, R. & Hauße, C. (2017). Ergebniskopplung KliWES - STOFFBILANZ in Sachsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).

Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G. & Krahe, P. (2003).

Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses, Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Görner, C. & Gerber, S. (2013). Ereignisanalyse Hochwasser im August und September 2010 und im Januar 2011 in Sachsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Hauße, C., Pahner, S., Röhm, P., Pfützner, B., Klöcking, B., Mey, S., Gabriel, M., Uhlig, M., Bürger, S., Halbfäß, S., Wagner, M., Wöhling, T., Schwarze, R. & Rehse, C. (2022). KliWES 2.0 - Klimawandel und Wasserhaushalt. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Hausfather, Z. & Peters, G.P. (2020). Emissions - the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577, 618 - 620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>

Keilhack, K. (1934). Das Grundwasser im Lausitzer Urstromtal und seine Beeinflussung durch den Braunkohlenbergbau, Ilse Bergbau Actiengesellschaft.

Kille, K. (1970). Das Verfahren MoMNO, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, Sonderheft: Hydrogeologie / Hydrogeochemie*. 89-95.

Knappe, S., Mattusch, J., Wennrich, R. & Haferkorn, U (2001). Langzeituntersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt in rekultivierten, langjährig landwirtschaftlich genutzten Kippenböden im Südraum Leipzig. In: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Materialien zum Bodenschutz 2001.

Kutilek, M. & Nielsen, D.R. (1994). *Soil Hydrology*. Catena-Verlag.

Lahmer, W., Dannowski, R., Steidel, J. & Pfützner, B. (2000). Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg. In: Landesumweltamt Brandenburg (LUA) (Hrsg.). *Studien und Tagungsberichte*, 41.

Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) (2015). *Welzow-Süd/Jänschwalde/Cottbus-Nord, Lausitzer Braunkohlenrevier Wandlungen und Perspektiven, Wandlung und Perspektiven 15*. LMBV.

Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) (2016). *Trebendorfer Felder/Nochten/Reichwalde, Lausitzer Braunkohlenrevier Wandlungen und Perspektiven, Wandlung und Perspektiven 16*. LMBV.

Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) (2025). *Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2024*. LMBV.

Linke et. al, C. (2024). Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches "Interpretation regionaler Klimamodelldaten". Landesamt für Umwelt Brandenburg.

Lünich, K. und Steinl, C. (2011). *KliWES - Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer - Teil 1: Wasserhaushalt, Kernkomponente*. Schriftenreihe des LfULG. 44/2011.

Milde, G. (1966). *Die Hydrogeologie des östlichen Baruther Urstromtales*. Freiburger Forschungshefte A.

Möller, K. & Burgschweiger, J. (2008). *Wasserversorgungskonzept für Berlin und für das von den BWB versorgte Umland (Entwicklung bis 2040)*. UBB Umweltvorhaben Dr. Klaus Möller GmbH im Auftrag der Berliner Wasserbetriebe

NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems & U.S./Japan ASTER Science Team (2019). *ASTER Global Digital Elevation Model V003 [Data set]*. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>

Natermann, E. (1951). Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflußlinie (TWL). *Wasserwirtschaft, Sonderheft*, 41.

Neumann, J. (2009). *Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland: Entwicklung und Anwendung des Makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

Pfützner, B. (1990). *Verallgemeinerungsfähige Techniken zur rechnergestütz-ten Entwicklung, Anpassung und Praxisanwendung von Einzugsgebietsmodellen*. Mitteilungen des IfW. Verlag für Bauwesen.

- Proksch, W. (1990). Lysimeterauswertung zur flächendifferenzierten Ermittlung mittlerer Grundwasserneubildungsraten. Besondere Mitteilungen deutsches gewässerkundliches Jahrbuch, 55.
- Pütz, T., Kiese, R., Wollschläger, U., Groh, J., Rupp, H., Zacharias, S., Priesack, E., Gerke, H. H., Gasche, R., Bens, O., Borg, E., Baessler, C., Kaiser, K., Herbrich, M., Munch, J. C., Sommer, M., Vogel, H. J., Vanderborght, J., & Vereecken, H. (2016). TERENO-SOILCan: a lysimeter-network in Germany observing soil processes and plant diversity influenced by climate change. *Environmental Earth Sciences*, 75(18), Artikel 1242. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6031-5>
- Riedel, T., Nolte, C., aus der Beek, T., Liedtke, J., Sures, B. & Grabner, D. (2021). Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung - Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. UBA-Texte 174/2021.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. & Cook, P.G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18-39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Schuhmann, C., Böttcher, F., Mühlner, C., Wiermann, W. & Haubold-Rosar, M. (2019). Wasserhaushaltsuntersuchungen an den wägbaren Lysimeteranlagen der Stationen Grünwalde (südliches Brandenburg) und Colbitz (Sachsen-Anhalt) als Datenbasis für die Validierung agrarmeteorologischer Wasserhaushaltsmodelle. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft.
- Schulze, H. & Petzold, H. (2010). Geologische Erkundung der Lausitz. In: R. Kühner & R. Bönisch (Hrsg.). Die geologische Entwicklung der Lausitz (S. 11 – 18). Vattenfall Europe Mining AG.
- Schwalm, E.D., Glendon, S. & Duffy, P.B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *PNAS*, 117 (33), 19656 - 19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>
- Schwarze, R. (1985). Gegliederte Analyse und Synthese des Niederschlag-Abfluß-Prozesses von Einzugsgebieten [Dissertation, TU Dresden].
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.T. & Šejna, M. (2008). Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal Special Section: Vadose Zone Modeling*, 7(2). <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- Sponagel, H. (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Stein, U., Tröltzsch, J., Vidaurre, R., Schmitt, H., Bueb, B., Reineke, J., Flörke, M., Uschan, T., Herrmann, F., Kollet, S., Wagner, N., McNamara, I., Guggenberger, T., Barjenbruch, M., Dworak, T. & Schmidt, G. (2024). Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit - Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland. UBA-Texte 143/2024.
- Struve, S., Ehlert, I., Pfannenschmidt, K., Heyner, F., Franke, J., Kronenberg, R. & Eichhorn, M. (2020). Mitteldeutsches Kernensemble (MDK) zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten – Dokumentation – Version 1.0. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU).
- Uhlmann, W., Zimmermann, K., Kaltofen, M., Gerstgraser, C., Grosser, F. & Schützel, C. (2023). Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz. UBA-Texte 90/2023
- Vogel, H.-J., Gerke, H.H., Mietrach, R., Zahl, R. & Wöhling, T. (2023). Soil hydraulic conductivity in the state of nonequilibrium. *Vadose Zone Journal*, 22(2). <https://doi.org/10.1002/vzj2.20238>
- Wendland, F., Bergmann, S., Eisele, M., Herrmann, F., Kunkel, R., Linder, B., Schöbel, T. & Schuster, H. (2020). Modellierung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone und der Fließzeiten des Grundwassers in Nordrhein-Westfalen, Teilbericht III des GROWA + NRW 2021 Kooperationprojekt des LANUV NRW.

Wessolek, G. (1989). Einsatz von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen in der Ökosystemanalyse. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, Schriftenreihe der TU-Berlin, Berlin.

Wessolek, G., Duijnisveld, W.H.M. & Trinks, S. (2009). Hydro-Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden: das TUB-BGR-Verfahren. In: G. Wessolek, M. Kaupenjohann & M. Renger (Hrsg.), Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese. Technische Universität Berlin.

Wundt, W. (1958). Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. Die Grundwässer der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung, 104. 47 – 54.