



Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014–2020

Deponieworkshop Zittau-Liberec 2017

Deponiebau - EU-Wasserrahmenrichtlinie - Stoffströme und Deponierückbau

09.-10. November 2017



Skládkový workshop Žitava-Liberec 2017

Výstavba skládek - Směrnice EU, kterou
se stanoví rámec pro činnost Společenství
v oblasti vodní politiky -
látkové proudy a odtěžování skládek

9.-10. listopadu 2017

Untersuchung und Modellierung des Wasserhaushaltes im Muskauer Bergpark

Průzkum a modelování vodního režimu v Mužákovském parku

Patrik Oettel¹; Volkmar Dunger², Uwe Bartholomäus³

Kurzfassung

Der durch den Alauntonabbau morphologisch stark geprägte Muskauer Bergpark nahe der Stadt Bad Muskau wird heute als Parklandschaft genutzt, die zum Großteil von Altholzbeständen und einigen Grünflächen gekennzeichnet ist. Im Zuge der wasserhaushaltlichen Betrachtung wurde der Boden zunächst mittels Bohrstockkartierung aufgenommen, wobei neben dem natürlich gewachsenen Sandboden auch die bergbaulich beeinflussten Bereiche sichtbar wurden. Eine computergestützte Modellierung des Wasserhaushaltes für den Ist-Zustand im langjährigen Mittel ergab eine reale Verdunstung von ca. 500 mm/a, was bei einem Niederschlag von 680 mm/a einen Anteil von 75 % ausmacht. Der Oberflächenabfluss spielt mit <1 % des Niederschlags kaum eine Rolle. Die restlichen 25 % sind folglich Sickerwasser. Zudem wurden die Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels anhand verschiedener Realisierungen des Klimaszenarios A1B für 2021-2050 und 2071-2100 betrachtet. Dabei zeigt sich eine Verringerung des Niederschlags um bis zu 15 % sowie eine Erhöhung der realen Verdunstung, welche eine drastische Reduzierung der Sickerwassermengen um bis zu 85 % zur Folge haben. Diese Ergebnisse sind im Rahmen zukünftiger Maßnahmenplanungen besonders in der Landschaftspflege zu berücksichtigen.

Abstrakt

Mužákovský horský park, morfologicky významně utvářený těžbou oxidu hlinitého, je dnes využíván jako park, porostlý z velké části starými dřevinami a zelení. V rámci hydrologického průzkumu byla nejprve provedena pedologická inventarizace půd pomocí vrtné tyče, kdy kromě přirozeně vyvinuté písčité půdy jsou patrné rovněž oblasti, ovlivněné těžební činností. Z počítačového modelu vodního režimu stávajícího stavu v dlouholeté střední hodnotě vyplynul reálný výpar cca 500 mm/a, což v případě srážek 680 mm/a činí podíl 75 %. Povrchový odtok ve výši srážek <1 % téměř nehraje žádnou roli. Zbývajících 25 % tedy představuje infiltraci. Kromě toho byly na základě různých realizací klimatického scénáře A1B pro roky 2021-2050 a 2071-2100 vyhodnoceny dopady projektované klimatické změny. Zde se ukazuje snížení srážek o až 15 % a zvýšení reálného výparu, což povede k drastickému snížení množství infiltrované vody až o 85 %. Tyto výsledky je nutno zohlednit především při plánování budoucích opatření především v oblasti péče o krajinu.

¹SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg;
E-mail: patrick.oettel@saxonia-freiberg.de

²TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Freiberg;
E-mail: dungerv@geo.tu-freiberg.de

³Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung, Zittau;
E-mail: u.bartholomaeus@hszg.de

1 Einleitung

Wasser ist die Grundlage vieler Vorgänge in der Natur und natürlicher Erscheinungen. Sein Vorkommen bestimmt maßgeblich die Gestalt einer Landschaft, die sowohl Lebensraum im ökologischen Sinne als auch Nutzungsgrundlage des Menschen darstellt. Somit handelt es sich beim Wasserhaushalt als regionale Ausprägung des allgemeinen Wasserkreislaufes um eine zentrale Eigenschaft eines Gebietes. Das Zusammenspiel der Wasserhaushaltsgrößen wie Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicheränderung bestimmt über Dargebot und Entnahme. Dessen Ausdruck in Form der Wasserbilanz als Quantifizierung ist immer an räumliche und zeitliche Bedingungen gebunden. Im Sinne einer Überblicksbetrachtung ist es nicht sinnvoll, bestimmte Perioden zu beleuchten. Hierfür sind Aussagen über mittlere Verhältnisse besser geeignet. Die Erstellung einer mittleren Wasserhaushaltsbilanz dient der Erfassung und Bilanzierung des Wasserdargebotes für langfristige Verhältnisse [1]. Auf der Grundlage langjähriger meteorologischer Messreihen ist die Ermittlung solch einer mittleren Wasserbilanz mithilfe von Bodenwasserhaushaltsmodellen möglich. Die Modellierung erfordert einige Eingangsparameter, die stark vom Untersuchungsgebiet abhängen und die Gebietseigenschaften widerspiegeln.

Das betrachtete Gebiet wird von der Stiftung „Fürst-Pückler-Park Bad Muskau“ verwaltet und ist Teil des Geoparks Muskauer Faltenbogen. Das nahe der Stadt Bad Muskau befindliche Areal wird als Bergpark bezeichnet. Die Besonderheit liegt in dem dort über ein paar Jahrhunderte betriebenen Bergbau, der maßgeblich die Morphologie und Beschaffenheit geprägt hat. Angesichts dieser Nutzungsgeschichte sind die wasserhaushaltlichen Verhältnisse durchaus von Interesse.

Derzeit wie künftig sind die Auswirkungen des globalen Klimawandels verstärkt in den Blick geraten. Da die Lausitzer Region bereits zu einer der niederschlagsärmeren Regionen gehört, wird durch die klimatische Entwicklung eine weitere Verschärfung erwartet [2]. In welchem Maß sich die Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt des Muskauer Bergparks auswirkt, war auch Gegenstand der Untersuchung.

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Geographische Lage

Der Muskauer Bergpark gehört zur Einheit des Geoparks Muskauer Faltenbogen und befindet sich im nordöstlichsten Teil Sachsens ca. 3 km entfernt von der Grenze zu Brandenburg und direkt an der Neiße, der Grenze zur Republik Polen. Er liegt südwestlich des Stadtzentrums von Bad Muskau.

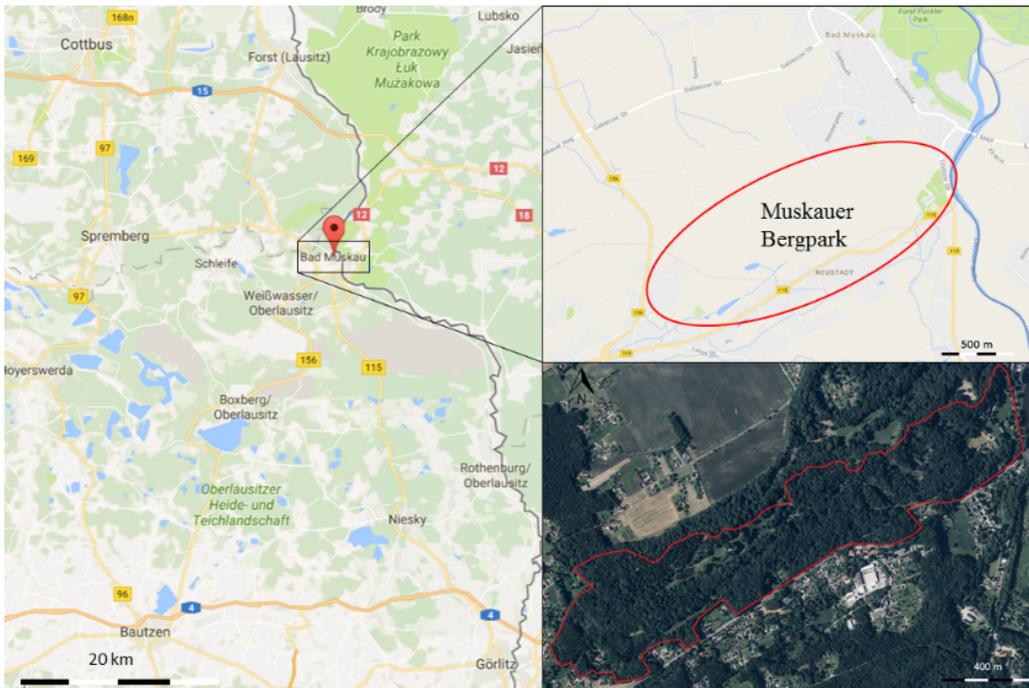


Abbildung 1: Geografische Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes (Quelle: Google Maps; Satellitenbild: Landesvermessungsamt Sachsen).

Im Westen und Südwesten erstreckt sich das Untersuchungsgebiet bis zur Ortschaft Krauschwitz und wird im Süden durch die Bundesstraße 115 begrenzt (siehe Abbildung 1). Die Entfernung zur Kreisstadt Görlitz beträgt knapp 50 km und zur nächst größeren Stadt Cottbus auf brandenburgischer Seite ungefähr 36 km. Der Muskauer Bergpark umfasst eine Fläche von mehr als 1,2 km², wobei in der Untersuchung nur der südliche Abschnitt des ehemaligen Alaunwerkes und des Badeparks betrachtet wird. Das in Abbildung 1 rechts unten dargestellte Gebiet nimmt eine Fläche von 0,8 km² und damit zwei Drittel des Bergparkes ein.

2.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet gehört zur besonderen geologischen Struktur des Muskauer Faltenbogens, dessen Hauptstrang südlich von Bad Muskau verläuft. Die an ein Hufeisen erinnernde, nach Norden offene Ausprägung ist das Ergebnis der Überlagerung verschiedener Eisvorstöße während der Elster- und Saale-Kaltzeit. Die entscheidenden Deformations- oder glazialtektonischen Prozesse fanden während der Elstereiszeit zu Anfang des zweiten Gletschervorstoßes statt [3]. Der Gletscher hatte eine Mächtigkeit von 300 m über der Erdoberfläche. Die dadurch erzeugte Auflast wirkte bis in die Tiefe des 2. Lausitzer Flözes (2. Miozäner Flözkomplex), was eine starke Faltung der Lockergebirgsschichten nach sich zog [4]. An der Spitze des Eispanzers hingegen kam es zu Bruchvorgängen, deren Folge eine Stauchendmoräne aus sogenannten aufgerichteten tektonischen Schuppen war. Das Auftreten von Grundbrüchen unter der Auflast des Eises und das klassische Aufstellen von Schuppen erfolgten analog. Ersteres stellt jedoch den Hauptbildungsprozess dar, sodass man auch von einer Grundbruchmoräne sprechen kann [5]. Eisvorstöße der Elster- und Saalekaltzeit überprägten den Muskauer Faltenbogen. Zusammen mit eiszeitlichen Winden wurden Sedimente abgetragen und die steilen Bereiche stark eingeebnet.

2.3 Böden

Die Grundlage für die bodenkundliche Charakterisierung bildet die digitale Bodenkarte von Sachsen im Maßstab 1:50.000 [6]. Laut dieser finden sich im Untersuchungsgebiet vier verschiedene Bodentypen (siehe Abbildung 2). Der überwiegende Teil des Gebietes ist laut BK50 ein Podsol aus sedimentärem Sand. Die Verwitterung und vertikale Verlagerung von Eisen, Aluminium und organischen Stoffen unter humidem Klima prägen diesen Bodentyp.



Abbildung 2: Vorherrschende Bodentypen im Untersuchungsgebiet laut Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 [7].

Den zweiten Rang hinsichtlich des Flächenanteiles belegt der Bodentyp Gley-Kolluvisol aus umgelagertem Sand über glazigenen Sand. Laut BK50 erstreckt sich dieser über die gesamten Hänge entlang der nördlichen Gebietsgrenze. Bei der Genese stehen hier zwei Prozesse im Vordergrund: Vergleyung und Umlagerung. In den südwestlichen bis südlichen Randbereichen sowie einem Großteil des Badeparks im Osten tritt ein Regosol auf. Dessen Entwicklung geht auf kalkarmes und sehr lockeres Ausgangssubstrat zurück, aus dem sich nur sehr geringmächtige Horizonte gebildet haben [7]. Ein kleiner Teil des Untersuchungsgebietes ist als Erdniedermoor aus organogenem Niedermoortorf gekennzeichnet. Dieser befindet sich rund um den Weinbergteich inmitten des Bergparkes.

2.4 Klima

Bad Muskau und seine Umgebung gehören zum Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße, welches von einem gemäßigt warmen Klima geprägt ist [8]. Mit Bezug auf die Referenzperiode 1981 – 2010 wird als langjährig mittlere Jahressumme ein Niederschlag von 637 mm für die Station Bad Muskau angegeben [9]. Der meiste Niederschlag fällt mit 80 mm im Monat Juli und das Niederschlagsminimum von 40 mm liegt im Monat Oktober (siehe Abbildung 3). Die Jahresmitteltemperatur beträgt für den genannten Referenzzeitraum an der Station Bad Muskau 9,2 °C [9]. Die tiefsten Temperaturen treten im Januar mit -0,1 °C auf, der wärmste Monat ist im Mittel der Juli mit 19 °C (siehe Abbildung 3).

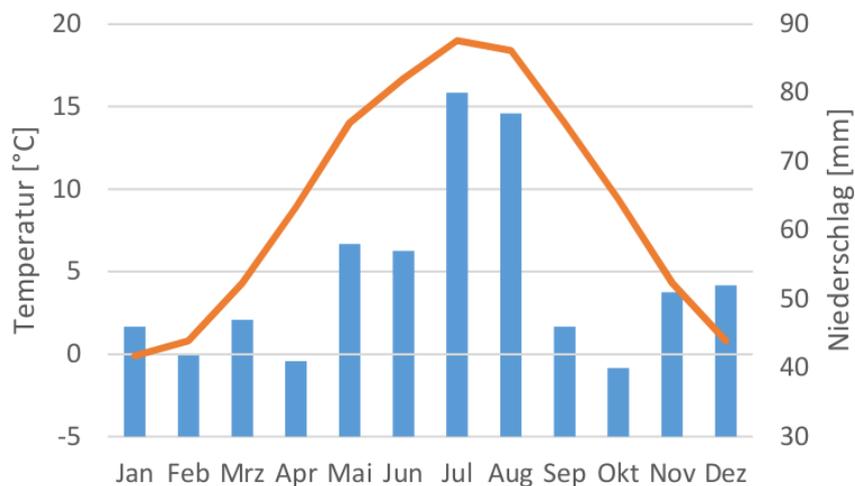


Abbildung 3: Klimadiagramm aus den Werten des DWD der Station Bad Muskau für den Referenzzeitraum 1981-2010.

2.5 Historische Entwicklung und anthropogener Einfluss

Der Muskauer Bergpark unterlag in den letzten 500 Jahren zahlreichen anthropogenen Eingriffen und Nutzungen, welche zusammen mit den glazialen Prozessen die Morphologie geprägt haben. Den größten und längsten Einfluss hatte der Alaunbergbau, dessen Beginn in der Standesherrschaft Bad Muskau unklar ist, jedoch erstmals in einer Verkaufsurkunde von 1595 erwähnt wird [10]. In erster Linie erfolgte der Abbau von Alauntonen. Diese Schichten enthalten eine Menge Ton, Schluff sowie Pyrit und besitzen eine schwärzlich-graue bis pechschwarze Farbe. Sie sind sehr brüchig und haben eine schiefrige Struktur. Alaun als Mineral ist ein hydratisiertes Salz der Verbindung von Kalium und Aluminium mit Sulfat [11]. Aller Wahrscheinlichkeit nach enthielten die Alauntonen jedoch nur wenig an reinem Alaun. Den Alauntonen folgend wurden Stollen in den Berg getrieben und je nach Verlauf vom Stollen aus abgeteufelt, welcher mit dickeren Balken abgestützt wurde [12]. Anschließend schüttete man das gewonnene Material zu Halden auf, wo es über mehrere Jahre „reifen“ konnte und schließlich in der Alaunhütte aufbereitet wurde [13]. Somit war die Aufhaltung ein wichtiger Produktionsschritt und keine Nebenerscheinung. Denn erst durch die Verwitterung des Haldenmaterials kam es zu einigen Mineralneubildungen, darunter vermutlich verstärkt auch Alaun. Es wurde früher überwiegend bei der Textilherstellung und -verarbeitung eingesetzt [14]. Im Jahre 1865 wird der Alaunbergbau im Muskauer Bergpark nach über 250-jährigem Betrieb des Alaunwerkes eingestellt [12].

Bereits während des Alaunwerkbetriebes gibt es Ansätze, den von Fürst Hermann von Pückler-Muskau angestrebten Parktourismus im Zuge seiner landschaftsgestalterischen Tätigkeit in Bad Muskau mit dem Alaunbergbau zu verbinden [15]. Hierzu gehörte die Errichtung einer Kur- und Heilbadeanstalt, welche dem Alaunwerk vorgelagert und im östlichen Teil des Bergparkes zu finden war. Heute sind davon noch einige wenige Gebäude erhalten wie der Kuppelpavillon. Der sogenannte Badepark wird am 23. Juni 1823 eingeweiht und auf den Namen Hermanns-Bad getauft [13]. Die vielseitig angelegte Heilanstalt schließt unter anderem die bereits seit 1820 bekannte Eisenvitriol-Quelle ein [10]. Sie entspringt in ungefähr 8 m Tiefe im damaligen Abbaugelände des Alaunwerkes, wo sich pyrithaltige Braunkohleflöze mit Alauntonen und anderen Schichten abwechseln.

Die Spuren des Alaunbergbaues sind bis heute in der Geländemorphologie sichtbar, wo sich Aufschüttungen und Bruchfelder mit natürlichen Steilhängen und Tälern abwechseln. Die anthropogenen Formationen lassen sich dabei von den natürlichen in den wenigsten Fällen ein-

deutig abgrenzen. Andeutungen in diese Richtung werden bei der Untersuchung des Geländes deutlich, deren Vorgehensweise im Folgenden erläutert wird.

3 Geländearbeiten

3.1 Gewässer- und Nutzungskartierung

Im Untersuchungsgebiet finden sich vier Stillgewässer (siehe Abbildung 4): der Weinbergteich im Nordwesten, die Vexierlache in der Mitte, die Wiesera im Süden und in der südwestlichsten Ecke eine kleinere Wasseransammlung, von der kein Name bekannt ist. Zwischen Weinbergteich und Vexierlache sowie dem kleineren Feuchtgebiet und der Wiesera existieren Verbindungen in Form von oberirdischen, wasserführenden Gräben.

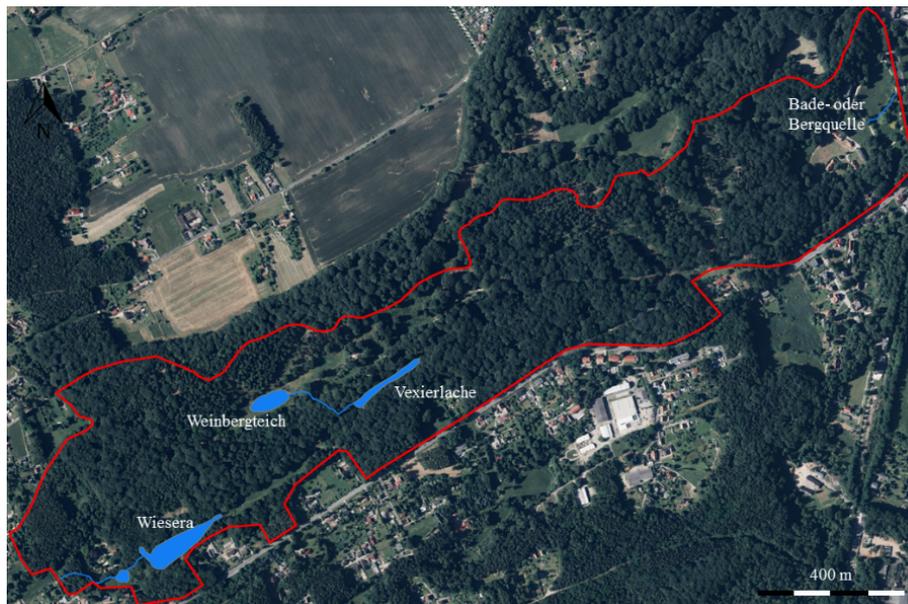


Abbildung 4: Oberflächengewässer im Untersuchungsgebiet.

Der Weinbergteich wird lediglich vom Niederschlag und oberflächennahen Abflüssen gespeist, da kein Zulauf ausfindig gemacht werden kann. Der vorhandene Ablauf ist eingefasst und gedrosselt. Das abfließende Wasser mündet nach ca. 175 m in die Vexierlache, welche keinen erkennbaren, künstlichen Ablauf besitzt. Die südwestliche, kleine Wasseransammlung verfügt über einen teilweise verrohrten Bach als Zulauf, dessen Ursprung außerhalb des Untersuchungsgebietes liegt. Neben diesen Gewässern existiert die bereits in den vorherigen Kapiteln mehrfach erwähnte, offen verlaufende Quelle im Badepark.

Bei der Durchführung der Nutzungskartierung werden lediglich die modellierungsrelevanten Parameter

- Nutzung/Bewuchsart (Gewässer, Wiese, Laub-, Nadel-, Mischwald, Siedlung)
- Bestandsaufbau (ein- oder mehrschichtig)
- Bestandsentwicklung (spärlich, normal, üppig)
- Wuchsform (forstwirtschaftliche Klassifizierung entsprechend des BHD nach MARKGRAF 1984 in Jungwuchs, Dickung, Stangen- oder Altholz)

aufgenommen. Die Abgrenzung der einzelnen Gebiete unterschiedlichen Alters und Bewuchsentwicklung erfolgte zusätzlich mithilfe des Luftbildes vom Landesvermessungsamt Sachsen

(GeoSN) per WMS-Layer im QGIS. Deutlich sichtbare Strukturwechsel in der Satellitenbild-draufsicht werden im Vergleich mit den Geländeaufnahmen den entsprechenden Wuchsformen und Beständen zugeordnet.

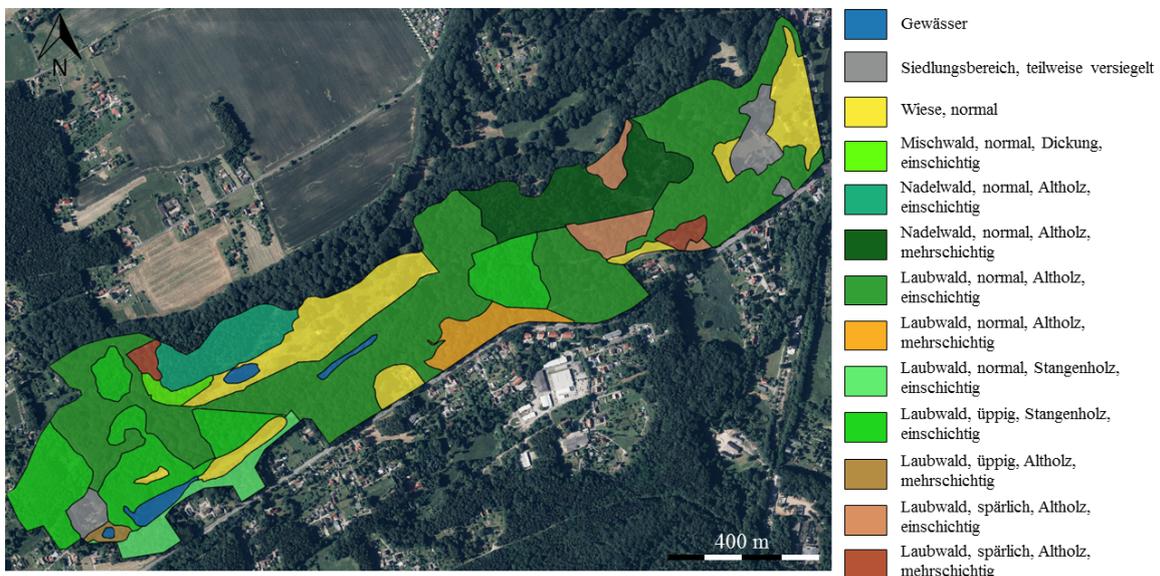


Abbildung 5: Karte der Nutzungs- und Besuchskarten im untersuchten Abschnitt des Bergparks (Grundkarte: Satellitenbild des Landesvermessungsamtes Sachsen).

Wie Abbildung 5 zeigt, ist der überwiegende Teil des Gebietes bewaldet, vorrangig mit Laub- und teilweise auch mit Nadelgehölzen (z.B. Kiefern). Aufgrund der Vielzahl an alten Bäumen (BHD > 20 cm) ist das „Altholz“ die häufigste Wuchsform. Nur ein kleiner Teil des Gebietes weist einen mehrschichtigen Aufbau auf, der nur aus wenigen Kräutern und Gräsern besteht, sodass fast ausschließlich ein einschichtiger Aufbau vorliegt. Der Großteil wurde hinsichtlich der Bestandsentwicklung als „normal“ eingestuft, da sich im Gelände ein Waldbestand erkennen lässt, der weder sehr dicht noch äußerst licht erschien. Neben den eingangs im Kapitel erwähnten Gewässern und den Waldbereichen finden sich im Untersuchungsgebiet Grünländer und kleinere Siedlungsbereiche vor allem im Bereich des Badeparks. Für die Wiesen wurde nach augenscheinlichen Merkmalen ebenfalls eine normale Bestandsentwicklung angenommen.

3.2 Bohrstockkartierung

Die Bohrstockkartierung diente der Überprüfung der Angaben der BK 50 (siehe Kapitel 2.3). Im gesamten Untersuchungsgebiet wurde an 51 Stellen der oberste Meter Boden mittels Bohrstock kartiert (siehe Abbildung 6) und die Bodenarten der Schichten entsprechend DIN EN ISO 14688-1 [16] mithilfe der Fingerprobe bestimmt sowie der Humusgehalt entsprechend der Methode nach Bodenkundlicher Kartieranleitung [17] abgeschätzt. In der Umgebung jedes aufgenommenen Bohrpunktes wurden außerdem weitere Bohrstöcke eingeschlagen und ausgewertet. Dies diente der Überprüfung und Festlegung des für einen bestimmten Bereich repräsentativen Profils (siehe Kapitel 4.1.1) sowie als Anhaltspunkt zur Abgrenzung unterschiedlicher Böden.

Es wird aus der Bohrstockkartierung ersichtlich, dass der Großteil des Arealen wie erwartet aus sandigem Boden besteht. Hierbei gibt es jedoch lokale Unterschiede. Im südwestlichen und überwiegenden Teil deutet das Profil auf natürlich gewachsenen Boden hin. Hier wurde immer wieder das gleiche Profil vorgefunden. Bis auf die obersten 15 cm Boden, welche mehr Schluff und Ton enthalten und einen klar erkennbaren, humosen Ah-Horizont besitzen, besteht

der Rest aus einem sandigen und schwach schluffigen Substrat (Sandboden 2). Im Gegensatz dazu weist der Nordosten deutlich variabelere Schichtabfolgen auf.

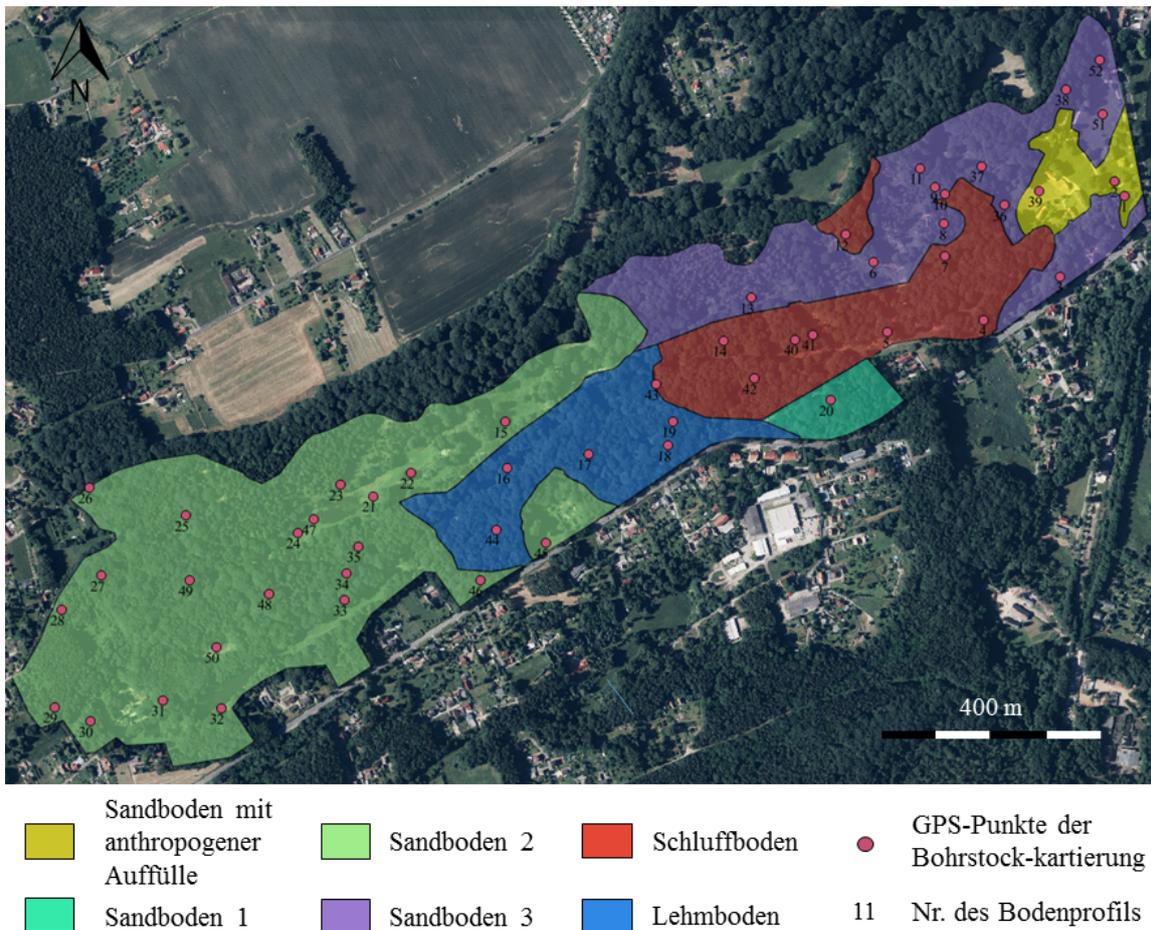


Abbildung 6: Aufnahmepunkte der Bohrstockkartierung und abgegrenzte Bodenbereiche.

Der dominierende Sand enthält einige schluff- und tonreichere Partien, deren Anordnung sich innerhalb der Profile unterscheidet. Die Ausprägung eines mit Humus angereicherten Ah-Horizontes ist kaum vorhanden. Im Bereich des Badeparkes ganz im Osten kommt ein merklich anthropogen gestörter Boden zum Vorschein. Hier schließt sich eine Auffüllschicht aus Kohle- und Ziegelbruchstücken dem schluffigen, gering humosen Oberboden an, bevor wiederum der Sand im unteren Teil des Profils ansteht.

Das als Sandboden 1 markierte Areal wird als eigenständig betrachtet, da es räumlich von den anderen beiden Sandböden getrennt vorgefunden wird und beim Geländeerundgang als eine Art morphologische Einheit erscheint.

Im mittleren Teil des Untersuchungsgebietes ändert sich der Boden im Vergleich zum Rest. In dem als Schluffboden in Abbildung 6 gekennzeichneten Areal ist die Struktur des vorgefundenen Bodenmaterials in fast allen Bohrstockprofilen identisch. Der Schluffanteil dominiert die Kornzusammensetzung während der Sandanteil deutlich geringer, aber dennoch spürbar ist. Der Tongehalt ist auch höher als in den anderen Bereichen. Mit Bezug auf die morphologische Beschaffenheit des ausgewiesenen Teilgebietes lässt sich vermuten, dass es sich dabei um abgelagertes Haldenmaterial handelt, welches während des Abbaus der Alauntone angefallen ist. Der in Abbildung 6 als Lehmboden bezeichnete Bereich erhält seinen Namen als Folge der Mittelung punktuell sehr heterogener Profile. Das Spektrum reicht hier von schluffigem Sand bis fettem Ton, was im Durchschnitt im Bereich von Lehm angesiedelt werden kann.

Die Bohrstockkartierung lieferte insgesamt Hinweise auf die eingangs vermutete Heteroge-

nität des Gebietes, die in einigen Bereichen deutlicher zur Geltung kommt. Vor allem im Bereich des ehemaligen Alaunwerkes unterscheiden sich die Profile teilweise stark auf engerem Raum. Diese Tatsache erschwerte letztlich auch die Abgrenzung, welche jedoch für die Hydrotopeinteilung im Vorfeld der Modellierung notwendig und in Abbildung 6 dargestellt ist. Im Zuge der Modellierung wurde jeweils ein Profil ausgewählt oder erstellt, das die Bodenverhältnisse in den einzelnen Bereichen widerspiegelt. Der detaillierte Schichtaufbau dieser repräsentativen Profile ist in Kapitel 4.1 erläutert.

3.3 Durchflussmessung

Der Durchfluss der bereits in Kapitel 2.5 angesprochenen Heilquelle im Badepark sollte für die Kalibrierung der Modellierungsergebnisse herangezogen werden. Die Quelle wird am westlichen Rand des Badeparks in einem Brunnenschacht gefasst (siehe Abbildung 7).

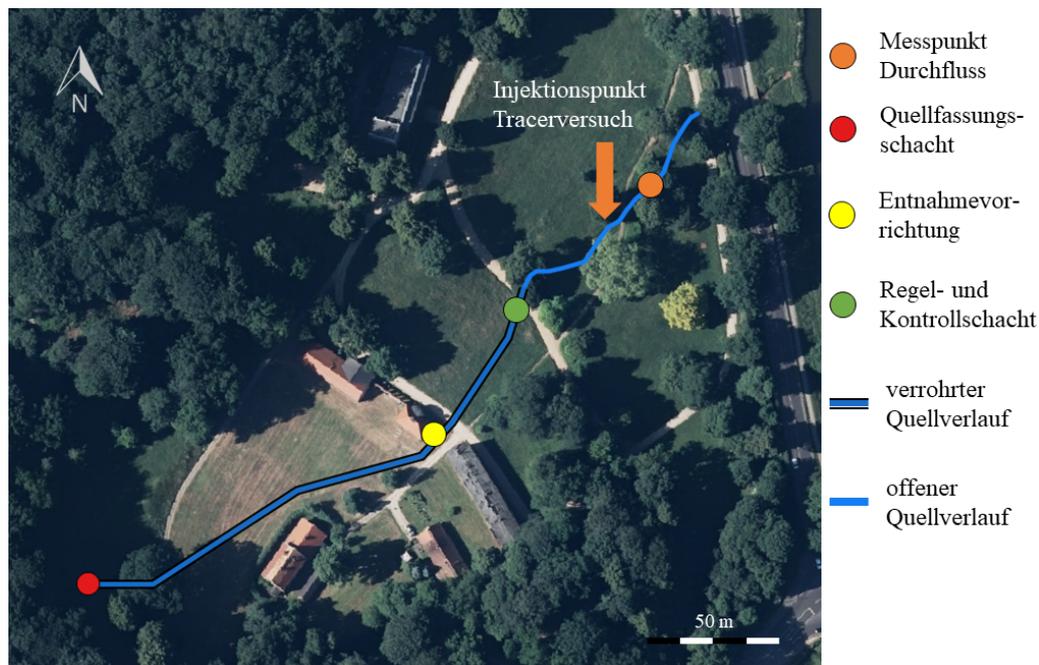


Abbildung 7: Verlauf der Eisenvitriolquelle im Badepark inklusive Einrichtungen (Satellitenbild: Landesvermessungsamt Sachsen).

Von dort aus verläuft sie ca. 200 m verrohrt und unterirdisch bis sie schließlich nahe des ehemaligen Kuppelpavillons und Badehauses an die Oberfläche tritt und als offenes Gerinne weiterfließt. Nach ungefähr 90 m unterquert der Quellbach die Görlitzer Straße und mündet schließlich in die Neiße. Wie Abbildung 7 zeigt, gibt es neben dem Brunnenschacht zur Fassung zwei weitere Einrichtungen: eine Entnahmestelle zur Verkostung bei Führungen und ein Regel- und Kontrollschacht zur Wartung.

Entsprechend des Messvorhabens wird ein Messpunkt innerhalb der offen fließenden Strecke gewählt (siehe Abbildung 7). An diesem wurde der Durchfluss mittels hydrometrischer Flügelmessung auf Basis elektromagnetischer Sensorik und einer Tracermessung mit NaCl als Momentimpuls bestimmt. Die Messungen erfolgten an drei Tagen mit ähnlicher Witterung. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse beider angewendeter Verfahren machte deutlich, dass der mittlere Durchfluss im Beobachtungszeitraum im Bereich von 1,8 bis 2,0 l/s lag.

4 Wasserhaushaltsmodellierung des Ist-Zustands

4.1 Modellwahl und Parametrisierung

4.1.1 Hydrotopeninteilung

Für die Bilanzierung des Wasserhaushalts wurde das konzeptionelle Boxmodell BOWAM verwendet, welches sich durch eine gute Handhabung und in zahlreichen Untersuchungen bewährt hat. Neben einer Vielzahl an Eingangsparametern (siehe [18]) ist für die Modellierung eine Unterteilung des Gebiets in Hydrotopen erforderlich. Dies wurde mithilfe der Geoinformationssoftware QGIS und ArcGIS realisiert, indem die einzelnen Ergebnislayer der Bewuchs- und Bohrstockkartierung sowie Informationen zur Morphologie (Exposition anhand des digitalen Geländehöhenmodells von Sachsen) überlagert wurden. Dies ergab schließlich eine Anzahl von 100 Hydrotopen im Untersuchungsgebiet. Die notwendigen geographischen Informationen wie Höhenlage, Handlänge und Neigung konnten ebenfalls aus dem digitalen Geländemodell von Sachsen per GIS-Anwendung gewonnen werden. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, wurde für jeden Bodenbereich in Abbildung 6 ein repräsentatives Bodenprofil hinterlegt, welches letztlich Eingang in die Modellierung und bei den Hydrotopen Verwendung findet. Hierbei wurden entweder Mittelwerte der Bodenarten der einzelnen Schichten gebildet oder im Fall von Sandboden 1 und 2 (Abbildung 6) die vorgefundenen Profile verwendet. Tabelle 1 zeigt den Schichtaufbau der repräsentativen Profile.

Tabelle 1: Schichtaufbau der im BOWAM verwendeten repräsentativen Profile

Bereich	Sandboden 1	Sandboden 2	Sandboden 3	Sandboden mit Auffüllung	Lehmboden	Schluffboden
Schicht 1						
Mächtigkeit	0,6 m	0,05 m	0,2 m	0,1 m	0,2 m	0,3 m
Bodenart	Su2	Slu	Su3	Slu	Uls	Uls
Humus	1 %	2 %	1 %	2 %	1 %	0 %
Schicht 2						
Mächtigkeit	0,2 m	0,1 m	0,35 m	0,35 m	0,4 m	1,2 m
Bodenart	Sl3	Su2	Su3	Auffülle	Ls3	Ut3
Humus	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Schicht 3						
Mächtigkeit	0,7 m	1,35 m	0,95 m	1,05 m	0,9 m	
Bodenart	Su2	Su2	Su2	Su2	Lts	
Humus	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	

Die pedologischen Parameter wie beispielsweise Feldkapazität, kf-Wert oder kapillare Steighöhe werden programmintern in Abhängigkeit von der Bodenart, dem Humusgehalt und der Lagerungsdichte erzeugt. Letzteres wurde aufgrund fehlender Informationen für alle Schichten als „mittel“ eingestuft. Somit konnte gewährleistet werden, dass der Wasserhaushalt nicht ohne nachvollziehbaren Anhaltspunkt zusätzlich beeinflusst wird. Für die verwendeten Bodenprofile wurde eine Gesamtmächtigkeit von 1,5 m angenommen (siehe Tabelle 1), da dies der im Modell hinterlegten Wurzeltiefe von Bäumen (Wuchsstadium Altholz) entspricht. Dadurch ist vor allem eine genauere Berechnung der realen Evapotranspiration möglich. Hierfür wurde die Mächtigkeit der jeweils untersten Schicht vergrößert, obwohl die aufgenommenen Bohrstockprofile nur bis in eine Tiefe von 1 m reichen. Grund zu der Annahme gibt die in der überwiegenden Anzahl der Profile vorgefundene Homogenität der untersten Schicht und die Geländemorphologie, was auf eine größere Mächtigkeit hindeutet. Die pedologischen Eigenschaften der Ziegelauffülle wurden anhand von Literaturwerten für größtenteils Bauschutt und

Hausmüll sowie mithilfe der Dokumentation des Programms BOWAM abgeleitet.

4.1.2 Meteorologische Eingangsdaten

Grundlegende Voraussetzung für die Modellierung des langjährigen mittleren Verhaltens ist eine entsprechend lange Messreihe. Je länger die meteorologische Reihe, desto besser sind die Bedingungen für die Simulation. Um zudem eine möglichst hohe Simulationsgenauigkeit zu erreichen, wurde die kleinste zeitliche Diskretisierung gewählt, welche in den verfügbaren Daten vorhanden war. Obwohl der DWD Daten als Tageswerte der Station Bad Muskau verzeichnet hat, konnte im Rahmen der Untersuchung nur teilweise auf diese zurückgegriffen werden. Die Station Bad Muskau ist seit dem Jahr 1927 in Betrieb, verfügt jedoch hauptsächlich über Niederschlagswerte. Sowohl für die Lufttemperatur als auch für die relative Luftfeuchte fehlten Messwerte mehrerer Jahre, sodass selbst die minimalen Anforderungen der Modellierung nicht erfüllt waren. Darum musste neben der Station Bad Muskau eine nächstgelegene Station in Betracht gezogen werden, wofür die Stationen Cottbus und Görlitz infrage kamen. Die Station Görlitz weist mit 656 mm Niederschlag als langjähriges Jahresmittel eine geringere Differenz zu Bad Muskau auf (637 mm) als Cottbus mit nur 586 mm. Die Temperatur weicht im langjährigen Mittel bei beiden Stationen um $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ von den $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Bad Muskau ab. Aus den angeführten Gründen und der Nähe zur Lausitzer Neiße wurden folglich die Station Görlitz und deren Messdaten verwendet. Hierfür waren Tageswerte der meteorologischen Messgrößen Lufttemperatur, Sonnenscheindauer, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit verfügbar. Jedoch wiesen diese einige Lücken auf oder waren erst ab bestimmten Jahren verfügbar. Für den Modellierungszeitraum des Ausgangszustandes wird daher eine ausreichend lange Reihe (mindestens 30 Jahre) gesucht, die keine Fehldaten in den benötigten Messgrößen beinhaltet. Aufgrund der Datenlage kam prinzipiell der Zeitraum ab 1951 infrage, da ab hier erst die Sonnenscheindauer an der Station Görlitz aufgezeichnet wurde. Der besseren Vergleichbarkeit wegen umfasste der für die Modellierung festgelegte Zeitraum die hydrologischen Jahre 1961 bis 1990, was der internationalen Referenzperiode laut Weltorganisation für Meteorologie entspricht [19]. Der Niederschlag für diesen Zeitraum wurde von der Station Bad Muskau übernommen. Da es sich dabei um fehlerbehaftete Messwerte handelte, mussten diese korrigiert werden. Hierfür wurde die vom DWD vorgeschlagene, pauschale Erhöhung um 10 % ausgewählt [20], da keine konkreteren Informationen vorlagen. Die Korrektur erfolgte modellintern. Für die Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit sowie Sonnenscheindauer wurden die Messwerte der Station Görlitz verwendet.

5 Simulationsergebnisse

Auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse für die einzelnen Hydrotope konnte das langjährige wasserhaushaltliche Verhalten des gesamten Untersuchungsgebietes ermittelt werden, welchem das vordergründige Interesse galt. Hierfür wurden die Simulationsergebnisse entsprechend des Flächenanteils der Hydrotope an der Gesamtfläche gewichtet und auf diese Weise für jede Wasserhaushaltsgröße das langjährige Mittel gebildet (siehe Tabelle 2). Obwohl es Hydrotope mit Spitzenwerten von über 500 mm/a an Oberflächenabfluss (RO) gibt (versiegelte Flächen), spielen diese aufgrund ihres geringen Flächenanteils eine untergeordnete Rolle. Der Anteil des RO am Niederschlag ist mit unter 1 % äußerst gering. Weiterhin stellt man fest, dass mit 504 mm (75 %) ein Großteil des Niederschlags wieder verdunstet, sodass schließlich die restliche Menge (25 %) als unterirdischer Abfluss in tiefere Bodenbereiche versickert. Zur besseren Einordnung der Simulationsergebnisse für das langjährige Mittel kann der Hydrologische Atlas von Deutschland [21], der Niederschlags-Abfluss-Atlas der ehemaligen DDR [22] sowie das Wasserhaushaltsportal von Sachsen [23] (WHHP-SN) herangezogen werden.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse des langjährigen mittleren Wasserhaushaltes für das Untersuchungsgebiet und den Zeitraum von 1961 bis 1990 sowie Vergleichswerte aus Kartenwerken (alle Werte in mm/a).

Verfahren/Quelle	P	ETPU	ETPK	ETR	RO	RU(R)
BOWAM	672	625	619	504	3	166
HAD	600-700	600-650	–	450-500	–	75-125
NAU	673	–	–	–	–	(200)
WHHP-SN	650-750	–	–	490-540	–	(200-300)

P - Niederschlag, ETPU – potentielle Verdunstung, ETPK – standortangepasste potentielle Verdunstung, ETR – reale Verdunstung, RO – Oberflächenabfluss, RU – unterirdischer Abfluss (Sickerwasser)

Die Gegenüberstellung des simulierten langjährigen Mittels mit den Vergleichswerten der verschiedenen Quellen zeigt in erster Linie eine gute Übereinstimmung. Der Niederschlag und die potentielle liegen innerhalb der im HAD vorgefundenen Schwankungsbereiche. Das langjährige Mittel im BOWAM liegt leicht außerhalb des Schwankungsbereiches. Der Bereich für den RU wurde aus dem HAD grafisch ermittelt und gestaltete sich als schwierig. Im Vergleich mit BOWAM wird hier keine Übereinstimmung erzielt. Im Fall des Niederschlags stimmt der Wert des BOWAM nahezu komplett mit dem des N-A-U-Atlas überein, obwohl dieser einen komplett anderen Zeitraum zur Grundlage hat (1921-1940). Da der N-A-U-Atlas nur den Gesamtabfluss R berücksichtigt, ist es logisch, dass dieser größer ist als der RU im BOWAM. Wie groß jedoch die restlichen Abflüsse sind, welche den Gesamtabfluss bilden, kann nicht abgeschätzt werden, sodass die Bewertung von RU sich dadurch schwierig gestaltet. Beim Vergleich mit dem WHHP-SN liegen sowohl der Wert des Niederschlags als auch der realen Verdunstung aus dem BOWAM im unteren Teil des Schwankungsbereiches. Wie bereits beim NAU-Atlas lässt sich der RU schwer vergleichen, da auch hier nur der Gesamtabfluss angegeben ist.

5.1 Kalibrierung

Neben der Plausibilitätsprüfung der Modellergebnisse mithilfe verschiedener Datenquellen sollte der Versuch einer Kalibrierung unternommen werden. Reell gemessene Werte sollten dabei mit den Simulationsergebnissen einer Wasserhaushaltsgröße verglichen und somit die Güte der Modellierung abgeschätzt werden. Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, wurde dafür die Quelle im Badepark herangezogen werden.

Vor dem Austrittspunkt der Quelle befindet sich der bereits erwähnte Kontroll- und Regelschacht, in dem ein regulierbarer Schieber installiert ist. Aufgrund des hohen Gehaltes an Eisen(II)-sulfat kommt es immer wieder zur Ablagerung von Ausfällungsprodukten. Die Schieberereinrichtung dient der Spülung des Systems, welche zweimal pro Jahr durchgeführt wird, um eventuelle Ablagerungen zu entfernen, was an zwei Tagen im Jahr erfolgt. Den Rest des Jahres ist der Durchfluss in der Art geregelt, dass die Rohrleitung immer mit Wasser gefüllt und keine Luft im System ist. Auf diese Weise wird nach Angaben der Parkstiftung der Wasserstand im Fassungsschacht der Quelle annähernd konstant gehalten, sodass auch im offenen Gerinne immer Wasser fließt. Deshalb wurde in einer Näherung davon ausgegangen, dass die Menge an Wasser, welche im Brunnenschacht gefasst wird, auch im offenen Gerinne ankommt. Diese Umstände sollten trotz begrenzter Messungen einen Rückschluss auf langjährige Verhältnisse ermöglichen.

Dem Durchfluss im offenen Gerinne wurde die Menge an unterirdischem und oberirdischem Abfluss gegenübergestellt. Da die hydrogeologischen Verhältnisse und demzufolge auch das unterirdische Einzugsgebiet unbekannt sind, kann lediglich das oberirdische Einzugsgebiet der Quelle zu Grunde gelegt werden. Die Größe des Einzugsgebietes beläuft sich auf 136.544 m².

Mithilfe derer lässt sich der Mittelwert des Durchflusses von rund 2 l/s in mm/a umrechnen (siehe Gleichung (5)).

$$\frac{2 \frac{l}{s}}{136,544 m^2} \cdot 60s \cdot 60min \cdot 24h \cdot 365d = 461 \frac{l}{m^2 a} = 461 \frac{mm}{a} \quad (5)$$

Die Umrechnung des Durchflusses ergibt rund 460 mm/a. Die Summe der gewichteten Abflüsse (RO + RU) ergibt 155 mm/a im langjährigen Mittel. Die Gegenüberstellung macht deutlich, dass der Durchfluss der Quelle ungefähr dreimal so groß ist wie der simulierte Abfluss der Hydrotupe. Dieser große Unterschied deutet darauf hin, dass die Quelle nicht allein durch den RU der Hydrotupe im oberirdischen Einzugsgebiet gespeist wird und das unterirdische Einzugsgebiet wahrscheinlich größer ist. Da die Plausibilitätsprüfung des RU der Modellierung erfolgreich ist, liegt der Schluss nahe, dass es unterirdische Zuflüsse gibt, welche die Quelle mit Wasser versorgen. Diese wahrscheinlich diffusen und möglicherweise dem Bergbau geschuldeten Abflüsse können somit tiefer im Abbauggebiet liegen. Dies unterstützt zumindest ein Bericht in den Unterlagen der Parkstiftung, in welchem erwähnt wird, dass selbst bei hoher Pumpleistung der Wasserstand im Brunnenschacht nahezu unverändert blieb. Dadurch werden eine hohe Wasserwegsamkeit und ein Nachströmen aus den ehemaligen Stollen oder Störzonen des Alaunabbaus vermutet. Somit ist die Kalibrierung nur von geringem Erfolg, was die Bestätigung der Modellierungsergebnisse betrifft.

6 Abschätzung von Veränderungen im Wasserhaushalt in der Zukunft

6.1 Vorgehensweise

Die bisher getroffenen Aussagen und Angaben zum mittleren, langjährigen Verhältnis beziehen sich ausschließlich auf den Ist-Zustand, wobei sich der Modellierungszeitraum aufgrund der verfügbaren Daten lediglich bis 1990 erstreckt. Mit Hinblick auf den anthropogen bedingten Klimawandel, welcher als gesichert angesehen wird [24], sind dessen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt aus heutiger Sicht von besonderem Interesse.

Die zukünftigen klimatischen Änderungen werden häufig für die Zeitscheiben der nahen Zukunft 2021-2050 und fernen Zukunft 2071-2100 ermittelt so auch in dieser Untersuchung. Bezüglich der Entwicklung der Treibhausgasemissionen wird das SRES-Szenario A1B gewählt, da dieses den Mittelweg zwischen einer hohen (Szenario A2) und einer niedrigen Emission (B1) darstellt. Mithilfe des regionalen, statistischen Klimamodells WETTREG [25], welches mit den Ergebnissen des dynamischen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM und tatsächlichen Beobachtungsdaten bestückt wird, wurde das Klima von 1961 bis 2100 für verschiedene Stationen simuliert. Dabei wurden aus den Primärdaten (z.B. Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer, ...) der nationalen Wetterdienste wurden je nach Messspektrum der Station weitere Klimagrößen wie Globalstrahlung, Gras-Referenzverdunstung, usw. abgeleitet. Die quantitative Ausprägung der Klimaelemente wurde in insgesamt 10 Realisierungen (00,...,99) umgesetzt, welche die natürliche Schwankungsbreite der klimatischen Entwicklung repräsentieren und somit eine höhere Sicherheit der Simulationsergebnisse bieten [26]. Alle verwendeten Daten entstammen dem Regionalen Klimainformationssystem (ReKIS) für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen.

Zur Abschätzung der Klimaänderungen im Untersuchungsgebiet des Muskauer Bergparks werden die beiden Stationen Krauschwitz und Görlitz herangezogen, für welche die Ergebnisse der jeweils 10 Realisierungen als Tageswerte vorliegen. Krauschwitz ist wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt die nächstgelegene Ortschaft von Bad Muskau. Aufgrund der Nähe zu Bad Muskau erscheint die Auswahl für die Modellierung als geeignet. Für Krauschwitz liegen jedoch lediglich Niederschlagswerte der 10 Realisierungen vor. Diese werden nach Analyse des Zeitraumes 1961-1990, der in den Realisierungen enthalten ist, mithilfe eines Faktors an die

für Bad Muskau beim Ist-Zustand verwendeten Werte angepasst. Die restlichen meteorologischen Daten für die Zukunftsmodellierung werden der Station Görlitz entnommen, die bereits bei der Simulation des Ist-Zustandes verwendet wurde und der Einsatz somit naheliegend ist. Für Görlitz liegen in den Realisierungen alle notwendigen meteorologischen Daten vor, um den Wasserhaushalt zu simulieren. Um den Aufwand einer ersten Abschätzung in einem angemessenen Umfang zu halten, wurde der Wasserhaushalt nur für zwei gebietsrepräsentative Hydrotope simuliert. Das Hydrotop Nr. 4 spiegelt dabei die am häufigsten vorkommenden Parameter hinsichtlich Bewuchs, Boden und Exposition wider und das Hydrotop Nr. 65 fungiert als Gegenbeispiel. Für jedes dieser beiden Hydrotope wird der Wasserhaushalt aller 10 Realisierungen sowohl für den Zeitraum 2021-2050 als auch 2071-2100 modelliert.

6.2 Ergebnisse

Die Modellierung des zukünftigen Wasserhaushalts der beiden Hydrotope liefert die in Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse. Hierbei handelt es sich um die Mittelwerte aus den jeweils 10 Realisierungen für jede Zeitscheibe. Stellt man diese dem langjährigen Mittel gegenüber wird deutlich, dass sich der Wasserhaushalt der beiden Hydrotope verändert. Bereits für die nahe Zukunft 2021-2050 verringert sich der Niederschlag im Mittel um 5 %. Die Temperatur steigt um 1,6 °C. Noch deutlicher wird es im Zeitraum 2071-2100, in dem sich eine Abnahme von 15 % im Niederschlag und eine Zunahme der Temperatur von 3,5 °C gegenüber dem Ist-Zustand von 1961-1990 einstellen. Zudem geht aus dem Vergleich der meteorologischen Ausgangsdaten in Tabelle 4 hervor, dass sich bei den Mittelwerten der Größen Sonnenscheindauer und Globalstrahlung eine Zunahme verzeichnen lässt.

Tabelle 3: Modellierungsergebnisse für die Veränderungen im Wasserhaushalt in der nahen und fernen Zukunft zweier repräsentativer Hydrotope.

Zeitraum	Hydrotop	P	ETPU	ETPK	ETR	RO	RU
1961-1990	4	672	625	577	465	1	206
Ist-Zustand	65	672	626	615	534	0	138
2021-2050	4	641	715	652	514	0	127
Nahe-Zukunft	65	641	716	703	582	0	60
2071-2100	4	574	836	760	508	0	66
Ferne-Zukunft	65	574	837	822	555	0	20

P – Niederschlag, ETPU – potentielle Verdunstung, ETPK – standortangepasste potentielle Verdunstung, ETR – reale Verdunstung, RO – Oberflächenabfluss, RU – unterirdischer Abfluss (Sickerwasser)

Für die relative Luftfeuchte wird hingegen eine Abnahme prognostiziert. Diese Umstände haben die höhere potentielle Verdunstung in Tabelle 3 zur Folge. Die reale Verdunstung dagegen nimmt im Zeitraum 2021-2050 gegenüber dem Ist-Zustand um max. 10 % zu, sinkt aber in der fernen Zukunft wieder, weil hier das Wasserdargebot des Niederschlags limitierend ist. Beträgt der Anteil der ETR am Niederschlag im Ist-Zustand noch 70 % bzw. 80 % (Hydrotop 65), liegt er in der nahen Zukunft bereits bei 81 % bzw. 91 %. In der fernen Zukunft macht die ETR sogar bis zu 97 % des Niederschlags aus. Beide Hydrotope produzieren unter den gegebenen Bedingungen im Mittel keinen Oberflächenabfluss. Ausgehend von den geringeren Niederschlägen und der höheren Verdunstung wirkt sich die Klimaänderung am stärksten auf die Sickerwassermenge aus. Während im Zeitraum 1961-1990 mit 206 mm (Hydrotop 4) bzw. 138 mm (Hydrotop 65) noch vergleichsweise viel Wasser in tiefer Bodenschichten versickert, reduziert sich diese Menge zwischen 2021 und 2050 um 38 % unter Nr. 4 und um 56 % bei Nr. 65. In der fernen Zukunft betragen die RU-Werte lediglich noch 32 % bzw. 15 % vom Ist-Zustand. Der Anteil des RU am Niederschlag verschiebt sich von 30 % (Hydrotop 4) und 20 %

(Hydrotop 65) im Ist-Zustand hin zu 11 % bzw. 3 % in der fernen Zukunft.

Tabelle 4: Vergleich der meteorologischen Eingangsdaten für die Modellierung des Ist-Zustands und in der Zukunft.

Zeitraum	Temperatur [°C]	Rel. Luftfeuch- te [%]	Sonnen- scheindauer [h]	Global- strahlung [J/m²]
1961-1990	8,2	79	4,5	982
2021-2050	9,8	76,2	4,9	1002
2071-2100	11,7	72,9	5,7	1117

Im Bericht zum NEYMO-Projekt findet sich eine Klimaprojektion für das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße, in dem sich auch der Muskauer Bergpark befindet. Diese basiert auch auf den Simulationen mit dem Modell WETTREG 2013. Unter Verwendung des Szenarios A1B wurde die Klimaentwicklung für den Zeitraum 2071-2100 modelliert und anschließend mit 1971-2000 verglichen. Der Fokus lag auf dieser Zeitscheibe, da die Änderungen im Zeitraum 2021-2050 häufig schwach ausgeprägt [26] bzw. nicht eindeutig sind [2]. Jedoch werden in der nahen Zukunft bereits Trends hin zu höheren Verdunstungsmengen und niedrigeren Abflüssen verzeichnet [27]. Das mittlere Klimaänderungssignal der Temperatur ergab eine Zunahme um 2,8 - 3,2 °C. Für den Niederschlag zeigte sich eine Abnahme um 12 %, was das Sommerhalbjahr angeht. Für das Winterhalbjahr wurde eine geringe Zunahme von etwa 5 % prognostiziert. Damit liefert die Klimaprojektion des NEYMO-Projektes vergleichbare Ergebnisse wie die für das Untersuchungsgebiet umgesetzte Klimasimulation im BOWAM. Die Niederschlagsänderung ist mit -15 % gleichwie die Temperaturänderung mit 3,5 °C nur geringfügig stärker ausgeprägt.

7 Fazit

Im Zuge der wasserhaushaltlichen Betrachtung eines anthropogen geprägten Gebietes wie dem Muskauer Bergpark ergab die genauere Charakterisierung in Form von Kartierungen, dass ein großer Anteil von Waldflächen vorliegt. Diese werden von Altbaumbeständen dominiert und weisen nur vereinzelt einen mehrschichtigen Aufbau sowie üppigen Bewuchs auf. Daneben finden sich Wiesen als auch wenige versiegelte Flächen sowie einige Gewässer. Hinsichtlich des Bodens kommen über vor allem im Südwesten natürliche Profile zum Vorschein. Je weiter man Richtung Osten geht, desto stärker wird der anthropogene Einfluss anhand der Schichtabfolgen deutlich. Morphologisch erkennbare Halden konnten auch mithilfe der Bohrstockaufnahme identifiziert werden sowie die Veränderungen im Badepark anhand vorgefundener Auffüllschichten. Demnach ist das Gebiet viel heterogener als die BK50 vermuten lässt.

Die Wasserhaushaltsmodellierung liefert im langjährigen Mittel im Vergleich zu anderen Quellen plausible Ergebnisse. Bei einem Niederschlag von rund 680 mm/a über den Zeitraum 1961-1990 fallen um die 75 % der realen Verdunstung zu. Mit weniger als 1 % spielt der Oberflächenabfluss im Bergpark keine Rolle. Die restlichen 25 % des Niederschlags versickern in tiefer Bodenschichten, da im oberen Bereich kein hypodermischer Abfluss auftritt.

Der prognostizierte Klimawandel mit Wahl des Szenarios A1B bewirkt merkliche Änderungen im Wasserhalt für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100. Wie gezeigt wurde, verringert sich die Niederschlagsmenge um bis zu 15 % in der fernen Zukunft während sich die reale Verdunstung aufgrund begünstigender Entwicklungen der meteorologischen Größen erhöht. Somit steigt der Anteil der Verdunstung auf über 90 %, wodurch sich gleichzeitig der Anteil der Sickerwassermenge entsprechend verringert. Diese Veränderungen könnten sich demnach in einer Zunahme des Trockenstresses der Vegetation äußern, welches gegebenenfalls angepasste Maßnahmen in der Parkpflege nach sich zieht. Insgesamt wurde somit die Prognose trockenerer Verhältnisse in der Niederlausitz ein weiteres Mal bestätigt.

Literaturverzeichnis

- [1] DYCK, S.: *Hydrologische Prozesse und Systeme, Niederschlag-Abfluß-Beziehungen, Wasserhaushalt*. Zentralstelle für das Hochschulfernstudium, 1. Auflage, 1. Ausgabe, Dresden, 63 S., 1980
- [2] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE: *Lausitzer Neiße - Wasserressourcen der Region, EU-Projekt Neymo*. Dresden, 134 S. 2014
- [3] KUPETZ, A. ; KUPETZ, M.: *Wanderungen in die Erdgeschichte*. Pfeil, München, 224 S. 2009
- [4] CRAMER, R.: *Allgemeine geologische Verhältnisse des weiteren Gebietes*. Preußische Geologische Landesanstalt: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Berlin, S. 5–8. 1928
- [5] KUPETZ, A. ; KUPETZ, M. ; RASCHER, J.: *Der Muskauer Faltenbogen*. Gesellschaft für Geowissenschaften - Arbeitskreis Geoparke, Freiberg, 35 S. 2004
- [6] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE: *Bodenkarte 1:50.000, zuletzt geprüft am: 24.08.2016 um 10:12 Uhr*. <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/28325.htm#article28327>
- [7] SCHEFFER, F.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Aufl. / neu bearb. von Hans-Peter Blume, Ellen Kandeler, Karl Stahr, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, XIV, 569 S. 2010
- [8] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE: *Lausitzer Neiße - Charakteristik und Klima der Region*. EU-Projekt Neymo, Dresden, 69 S. 2014
- [9] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Langjährige Mittelwerte, zuletzt geprüft am: 25.08.2016 um 09:36 Uhr*. URL:http://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/langj_mittelwerte.html?nn=16102&lsbId=343278
- [10] SCHANZE, W.: *Zur Geschichte des ehemaligen Alaunbergwerkes zu Muskau. Abhandlungen und Berichte des Naturkundemuseums Görlitz*, S. 10–13, 1980/81
- [11] MÖRBE, J.: *Ausführliche Geschichte und Chronik von der Stadt und der freien Ständesherrschaft Muskau. Für alle Freunde der Geschichte und des Alterthums nach glaubwürdigen Quellen*, Müller, Muskau, VI, 248 S. 1861
- [12] HAHMANN, H.-G.: *Zur Gewinnungstechnologie im ehemaligen Alaunbergwerk zu Muskau. Abhandlungen und Berichte des Naturkundemuseums Görlitz*, S. 1–9, 1980/81
- [13] FÖRSTER, F.: *Das Ende des Muskauer Alaunwerks und der Beginn des Braunkohlenbergbaus auf dem Muskauer Faltenbogen*. Abhandlungen und Berichte des Naturkundemuseums Görlitz, S. 36–44. 1987
- [14] POHL, N.: *Umweltgeschichte Sachsens. Ausgewählte Text- und Bilddokumente*, Edition Leipzig, Leipzig, 320 S. 2013

- [15] PÜCKLER-MUSKAU, H.: *Andeutungen über Landschaftsgärtnerei, verbunden mit der Beschreibung ihrer praktischen Anwendung in Muskau*. Hallberger, Stuttgart. 1834
- [16] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR INDUSTRIENORMEN 14688-1: *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung*. Beuth Verlag, Berlin. 2013
- [17] AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN: *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Bundesanst. für Geowiss. und Rohstoffe, 5., verb. und erw. Aufl. Schweizerbart i. Komm., Stuttgart und Hannover, 438 S. 2005
- [18] DUNGER, V.: *Dokumentation des Modells BOWAM (Version 2002) zur Simulation des Wasserhaushaltes in der wasserungesättigten Bodenzone (Aerationszone) Windows-Oberfläche Eingabeteilmodell BOWAMINP - 04/2002, BOWAMINP-Oberfläche: 04/2006, Freiberg*. 2006
- [19] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: *Guide to climatological practices*. WMO-No. 100, Genf. 2011
- [20] RICHTER, D.: *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers*. Dt. Wetterdienst, Offenbach am Main, 93 S. 1995
- [21] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Bonn, 172 S. 2000
- [22] INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT: *Niederschlag-Abfluss-Unterschied-Atlas 1921 bis 1940 über das Gebiet der DDR, Maßstab 1 : 200 000*. Berlin,. 1958
- [23] SCHWARZE, R. ; DRÖGE, W. ; WAGNER, M. ; SPITZER, S. ; MALESKA, V. ; KUHN, K.: *Untersuchung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Sachsen - Lösungsansatz, Analyse Ist-Zustand, Daten- und Parametermodell*. In: *Modelltest.6Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Hydrology and water resources management, Germany*, (2016), S. 38–56
- [24] IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York, 1535. 2013
- [25] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: *Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG 2010*. Berichte an Umweltbundesamt. 2010
- [26] BERNHOFER, C. ; MATSCHULLAT, J. ; BOBETH, A.: *Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden*. Rhombos Verl. Berlin. 2011
- [27] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: *KliWES - Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen - Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist-Zustand und verschiedene Klima- bzw. Landnutzungsszenarien*. Schriftenreihe des LfULG, Dresden. 2014