

# LöschH<sub>2</sub>O

Erstellung einer GIS-gestützten Pilotstudie zur Untersuchung der waldbrandgefährdeten Wald- und Schutzgebiete im Freistaat Sachsen mit dem Ziel der Identifikation von geeigneten Flächen für die Schaffung von Löschwasserreservoirs (LöschH<sub>2</sub>O)

Abschlussbericht



SACHSEN



Die Maßnahme wird mitfinanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



# Impressum

---

## Abschlussbericht

### LöschH<sub>2</sub>O

Erstellung einer GIS-gestützten Pilotstudie zur Untersuchung der waldbrandgefährdeten Wald- und Schutzgebiete im Freistaat Sachsen mit dem Ziel der Identifikation von geeigneten Flächen für die Schaffung von Löschwasserreservoirs (LöschH<sub>2</sub>O)

### Erstellt im Auftrag von

#### Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft

Wilhelm-Buck-Straße 2  
D-01097 Dresden

Tel: +49 351 564-0  
Fax: +49 351 564-20007

Poststelle@smekul.sachsen.de  
www.smul.sachsen.de

## Durchführung

### Projektleitung

Dipl.-Wi.-Ing. Florian Lehnert  
Florian.Lehnert@dbi-gruppe.de  
Tel: +49 3731 4195-358

### Kontakt

DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH  
Fachgebiet Energieversorgungssysteme  
Karl-Heine-Straße 109/111  
D-04229 Leipzig

[www.dbi-gruppe.de](http://www.dbi-gruppe.de)

## Autoren

### DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Fachgebiet Energieversorgungssysteme

Dipl.-Wi.-Ing. Florian Lehnert  
B.Sc. Patrick Heinrich



## Laufzeit

19.07.2021 bis 28.02.2023

Das diesem Forschungsbericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Freistaates Sachsen unter dem Förderkennzeichen **100593013** gefördert.

### Zuwendungsgeber:

Sächsische Aufbaubank im Namen des Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den o.g. Autoren.





# Inhalt

---

Danksagung	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis	VIII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Zielstellung der Studie	2
<b>2 Aufbau einer Geodatenbank zu relevanten GIS-Daten für die Wald- und Schutzgebiete in Sachsen</b>	<b>4</b>
2.1 Zusammenstellung von GIS-Daten zu sächsischen Wald- und Schutzgebieten	4
2.1.1 Digitales Landschaftsmodell DLM 50	5
2.1.2 Corine Land Cover Daten	6
2.2 Charakterisierung und Analyse der sächsischen Wald- und Schutzgebiete	6
2.3 Status quo der Waldbrandgefahrenklassen für Sachsen	8
<b>3 Hocho aufgelöste rasterbasierte Analyse zur Entwicklung von Hitze- und Dürreperioden in Sachsen</b>	<b>10</b>
3.1 Analyse von Temperaturentwicklungen in Sachsen	14
3.1.1 Entwicklung der durchschnittlichen Jahrestemperatur in Sachsen	14
3.1.2 Entwicklung von Hitzetagen in Sachsen	17
3.2 Analyse der Niederschlagsentwicklungen in Sachsen	20
3.3 Analyse der Entwicklung von Windgeschwindigkeiten in Sachsen	24
3.4 Einordnung der klimatologischen Auswertung in den Kontext der Aufgabenstellung	26
3.5 Aufbau einer Bewertungsmatrix für die klimatische Entwicklung sowie Identifikation der besonders gefährdeten Gebiete	27
3.6 Bewertung des zukünftigen Klimas	28
<b>4 GIS-gestützte Zusammenstellung von restriktiven und selektiven Faktoren zur Identifikation der besonders gefährdeten Gebiete</b>	<b>31</b>
4.1 Standorte der sächsischen Feuerwehren	33
4.2 Wasservorkommen	35
4.2.1 natürliche Wasservorkommen	36
4.2.2 künstliche Wasservorkommen	39
4.3 Infrastrukturdaten	40
4.4 Tourismus / Faktor Mensch	41

# Inhalt

---

5	GIS-basierte Verschneidung der factorspezifischen Geodaten mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten	43
5.1	Auswertung des Faktor Klima	44
5.1.1	Szenario R 4.5	44
5.1.2	Szenario R 8.5	45
5.2	Auswertung Standorte der sächsischen Feuerwehren	46
5.3	Auswertung zu den Wasservorkommen	47
5.3.1	natürliche Wasservorkommen	47
5.3.2	künstliche Wasservorkommen	48
5.4	Auswertung der Infrastrukturdaten	49
5.5	Auswertung des Tourismus / Faktor Mensch	51
6	Aufbau einer Bewertungsmatrix für die Interpretation der Ergebnisse sowie der Dringlichkeitsplanung	53
6.1	Entwicklung der Bewertungsmatrix und Durchführung eines Rankings	53
6.2	Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung des zukünftigen Löschwasserbedarfs	55
7	Optionen für lokale Löschwasserentnahmestellen	61
8	Öffentlichkeitsarbeit, Workshop sowie Veröffentlichung der Ergebnisse	63
9	Zusammenfassung und Ausblick	65
	Literaturverzeichnis	67

# Danksagung

---

Ohne die Unterstützung zahlreicher Akteure wäre es nicht möglich gewesen, das Projekt im anvisierten Zeitraum und in dem Detailgrad erfolgreich zu bewerkstelligen. Wir möchten daher gern die Gelegenheit nutzen, allen am Projekt beteiligten Unterstützern für das außerordentlich hohe Engagement und die Kooperationsbereitschaft zu danken.

So gilt unser Dank zunächst dem Landesfeuerwehrverband Sachsen e.V. für den vorab erstellten LOI zur Projektskizze.

Eine besondere Widmung möchten wir dem Kreisbrandmeister des Landratsamt Sächsische Schweiz-Osterzgebirge Herrn Karsten Neumann aussprechen. Durch Ihre unkomplizierte Art und Input zum Projekt konnten jederzeit spezialisierte Ansprechpartner gefunden und ein großer Interessentenkreis aufgebaut werden. Vielen Dank für die abgehaltenen Meetings, Hinweise und Anregungen durch Ihre fachliche Expertise.

Weiterhin möchten wir uns bei allen Workshopteilnehmern für die angenehme Diskussion zu den Projektergebnissen danken. Der gemeinsame Dialog hat gezeigt, dass der interdisziplinäre Austausch zwischen verschiedenen Organisationen und Menschen einen nachhaltigen Impuls zu drängenden Fragen innerhalb von Sachsen leisten kann.

Wir bedanken uns bei:

- Katrin Müller (Sachsenforst, Abt. 5)
- Andreas Rümpel (sächs. Waldbrandkommission)
- Jörg Fleischer (Sachsenforst, Abt. 5)
- Karsten Neumann (LRA sächs. Schweiz-Osterzgebirge, Kreisbrandmeister)
- Thomas Beier (SMEKUL, Ref. 52)
- Falk Böttcher (dt. Wetterdienst, Abt. Agrarmeteorologie)
- Lutz Delling (Stadt Groitzsch, Brandschutz)

Ebenso möchten wir uns auch bei dem Sächsischen Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL) bedanken, welches mit dem Förderprogramm „Nachhaltig aus der Krise“ über die Sächsische Aufbaubank (SAB) die finanziellen Mittel für dieses Vorhaben bereitgestellt hat.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	sächsische Wald- und Schutzgebiete aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM50), Datendownload nach [3], eigene Darstellung	5
Abbildung 2:	Verteilung der Waldformen in Sachsen, Daten nach [3, 5]	7
Abbildung 3:	Waldbrandgefahrenklassen (Stand: 2022) in Sachsen, Daten nach [1], eigene Darstellung	8
Abbildung 4:	Änderung des globalen Mittels der oberflächennahen 2-Meter-Lufttemperatur nach [11]	11
Abbildung 5:	Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur für die definierten Klimaszenarien in Sachsen, Daten nach [12], eigene Darstellung	15
Abbildung 6:	absolute Differenz der durchschnittlichen Jahrestemperatur ( $\Delta T$ ) zwischen 2020 und 2050 in K	16
Abbildung 7:	Entwicklung von Hitzetagen ( $> 30\text{ °C}$ ) für die definierten Klimaszenarien in Sachsen, Daten nach [12], eigene Darstellung	18
Abbildung 8:	absolute Differenz der Hitzetage ( $\Delta HT$ ) zwischen 2020 und 2050	19
Abbildung 9:	Entwicklung der Summe des Jahresniederschlags in mm für die definierten Klimaszenarien in Sachsen, Daten nach [12], eigene Darstellung	21
Abbildung 10:	absolute Differenz der Summe des Jahresniederschlags in mm zwischen 2020 und 2050	22
Abbildung 11:	Entwicklung der mittleren Windgeschwindigkeiten für die definierten Klimaszenarien in Sachsen für das Jahr 2050, Daten nach [12], eigene Darstellung	24
Abbildung 12:	prozentuale Abweichung der mittleren Windgeschwindigkeit in % zwischen 2020 und 2050	25
Abbildung 13:	Bewertung des zukünftigen Klimas für das definierte Klimaszenario R 4.5 im Jahr 2050 in Sachsen	28
Abbildung 14:	Bewertung des zukünftigen Klimas für das definierte Klimaszenario R 8.5 im Jahr 2050 in Sachsen	30
Abbildung 15:	ausgewählte Einflussfaktoren für die Identifikation der besonders gefährdeten Gebiete	31
Abbildung 16:	Verteilung der Standorte der sächsischen Feuerwehren, Daten nach [17]	33
Abbildung 17:	Entfernungsanalyse auf Basis der sächsischen Feuerwehrstandorte	34
Abbildung 18:	Übersicht der analysierten Wasservorkommen	35
Abbildung 19:	Übersicht der natürlichen Gewässer, Daten nach GeoSN [3]	37
Abbildung 20:	Entfernungsanalyse auf Basis der sächsischen natürlichen Wasservorkommen	38
Abbildung 21:	Entfernungsanalyse auf Basis der sächsischen künstlichen Wasservorkommen [17]	39
Abbildung 22:	Entfernungsanalyse auf Basis des sächsischen Straßennetzes [3]	40
Abbildung 23:	Auswertung der Intensität von touristisch Ankünften je Gemeinde in Sachsen, Daten nach [19]	42
Abbildung 24:	Überblick über die betrachteten Einflussfaktoren für den Aufbau der Ergebnismatrix für die Dringlichkeitsplanung	43
Abbildung 25:	Verschneidung und Bewertung des Faktor Klima (Szenario R 4.5) mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten	44

Abbildung 26:	Verschneidung und Bewertung des Faktor Klima (Szenario R 8.5) mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten	45
Abbildung 27:	Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung der sächsischen Feuerwehrstandorten zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten	46
Abbildung 28:	Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung von natürlichen Wasservorkommen zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten	47
Abbildung 29:	Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung von künstlichen Wasservorkommen zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten	48
Abbildung 30:	Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung des öffentlichen Straßennetzes zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten	49
Abbildung 31:	Verschneidung und Bewertung des Faktors Tourismus / Mensch auf die sächsischen Wald- und Schutzgebiete	51
Abbildung 32:	Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung bezogen auf die Waldfläche innerhalb der Gemeinde auf Basis des Klimaszenario R 4.5 für die sächsischen Wald- und Schutzgebiete	55
Abbildung 33:	Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung bezogen auf die Waldfläche innerhalb einer Gemeinde auf Basis des Klimaszenario R 8.5 für die sächsischen Wald- und Schutzgebiete	58

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anteile der Waldformen in Sachsen, Daten nach [5]	7
Tabelle 2:	RCP-Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht nach [8, 10]	11
Tabelle 3:	Klimaelemente der ReKIS-Klimadaten inkl. Einflussauswahl zur Klimabewertung [13]	13
Tabelle 4:	Bewertungsmatrix für das zukünftige Klima in Sachsen	27
Tabelle 5:	Charakterisierung der Legendeneinträge für die Bewertung des Klimas	28
Tabelle 6:	Charakterisierung der Legendeneinträge für die Bewertung des Tourismus/Faktor Mensch	41
Tabelle 7:	Bewertungsmatrix für die Dringlichkeitsplanung	53
Tabelle 8:	Detailauswertung der identifizierten Waldflächen auf Basis des Klimaszenarios R 4.5	56
Tabelle 9:	Detailauswertung der identifizierten Waldflächen auf Basis des Klimaszenarios R 8.5	59
Tabelle 10:	grobe Preisindikation für die Errichtung von Löschwasserzisternen (Preis: Stand 2022) nach [21]	62

# Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzungen</b>	<b>Erläuterung</b>
CLC	Corine Land Cover
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5 deutsch: international vereinbartes Modellvergleichsprojekt für die standardisierte Klimasimulation
DBI	DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH
DLM	digitales Landschaftsmodell
EOF	Erdoberfläche
ESM	Earth System Model deutsch: Erdsystemmodell
ETRS 89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
GeoSN	Landesamt für Geobasisinformation Sachsen
GIS	Geoinformationssystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Kelvin
LK	Landkreis
MPI	Max-Planck-Institut
OSM	Open Street Map
ppm	Parts per million deutsch: Anteil pro Million
r2	zweiter Modelldurchlauf
RCP	Representative Concentration Pathway deutsch: repräsentativer Klimapfad
ReKIS	regionales Klimainformationssystem
SAB	sächsische Aufbaubank
SächsWaldG	sächsisches Waldgesetz
UTM	Universal Transverse Mercator - Koordinatensystem

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Motivation und Hintergrund

Die Begrenzung der Folgen des anthropogenen Klimawandels ist eine der größten globalen Herausforderungen der heutigen Zeit. In diesem Kontext werden die Anstrengungen der Bewältigung der Klimawandelfolgen deutlich. In den letzten Jahren sind die Auswirkungen der extremen Wetterlagen zunehmend eine Belastung für die Umwelt geworden. Der Schutz der Natur, insbesondere dem Wald, nimmt daher einen zentralen Punkt im gesellschaftlichen Denken ein. Die letzten Jahre waren von langen Hitze- und Dürreperioden geprägt, die erhebliche Auswirkungen auf die sächsischen Wälder und Schutzgebiete hatten. In diesem Kontext steigt das Waldbrandrisiko in Sachsen zunehmend. In den letzten Jahren hat sowohl die Anzahl der Waldbrände, aber auch die Fläche der abgebrannten oder beschädigten Wälder im Freistaat Sachsen zugenommen [1]. Der Waldanteil von 27 % bezogen auf die Gesamtfläche stellt den Freistaat Sachsen vor zukünftige Probleme, die mit dem Klimawandel und den negativen klimatischen Entwicklungen einhergehen [2]. Aus diesem Grund hat der Freistaat das Konjunktur- und Förderprogramm (Mehrwert-Initiative) „Nachhaltig aus der Krise“ initiiert, in dem sich auch das Projekt LöschH<sub>2</sub>O eingliedert. Erklärte Ziele der Förderung waren die Klimawandelfolgenbewältigung sowie die Stärkung von Vorsorge und Umgang mit Extremwetterereignissen in Sachsen. Diesem Bestreben folgend, ordnet sich die Pilotstudie mittels Geoinformationssysteme (GIS) inhaltlich in diesen Bereichen ein, in dem sie das Ziel der Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die sächsischen Wald- und Schutzgebiete adressiert. Die mögliche Entwicklung soll unter Beachtung der bestehenden Klassifizierung der Waldbrandgefahren in Sachsen in die Zukunft projiziert werden. Zu diesem Zweck ist es notwendig, eine Klimaprognose für die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag sowie die Windgeschwindigkeit auszuwerten und auf die Waldgebiete zu übertragen. Hierzu dienen regionale Klimamodelle als Grundlage. Der Detailgrad der Analysen wird infolge inhaltlicher Anreicherungen durch weitere begünstigende und limitierende Faktoren (Standorte der sächs. Feuerwehren, Wasservorkommen, Infrastrukturnetz, etc.) weiter erhöht. In diesem Zusammenhang fand daher bereits im Vorfeld der Antragstellung eine Prüfung von relevanten Geodaten statt, welche aus Sicht der Studienersteller unter dem Gesichtspunkt der Bedeutung für das Waldbrandrisiko ausgewählt wurden. Im Rahmen der Analysen können dann in einem nächsten Schritt besonders waldbrandgefährdete oder risikobehaftete Wald- und Schutzgebiete in Sachsen ausgewiesen werden. Die Ergebnisse sollen darüber hinaus den Austausch und die Förderung von Präventionsmaßnahmen im Kontext der Löschwasserbereitstellung in Zukunft zielführend unterstützen. Damit kann sowohl die zu leistende Arbeit der sächsischen Feuerwehren als auch der Schutz des ökologischen sowie ökonomischen Wertes des Waldes unterstützt werden. Hierbei wird

als Untersuchungsraum der Studie modellhaft das gesamte Staatsgebiet des Freistaates Sachsen erfasst und dadurch eine fundierte, einheitliche Abschätzung für den Bedarf an zusätzlichen Löschwasserentnahmestellen ermöglicht. Das Vorhaben ist somit als unabhängige und wissenschaftliche Entscheidungshilfe für zukünftige Investitionsentscheidungen im Lichte der Waldbrandprävention einzustufen. Die differenzierte Betrachtung der Optionen der Löschwasserentnahmestellen (beispielweise Löschwasserzisternen oder -brunnen) wird nicht explizit betrachtet. Für derartige Entscheidungen sind stets Detailprüfungen der baulichen und naturschutzrechtlichen Richtlinien in Gestalt einer umfangreichen Vorort-Planung durchzuführen. Die Ergebnisse der GIS-Pilotstudie werden daher auf der administrativen Ebene der Gemeinden ausgewertet, um einerseits öffentliche Entscheidungsträger auf die Problematik aufmerksam zu machen und andererseits bei der Planung zu unterstützen.

## 1.2 Zielstellung der Studie

Wesentliches Hauptziel der Studie ist es, ein proaktives Planen und Errichten von zusätzlichen Löschwasserentnahmestellen zur Verhinderung bzw. Eingrenzung von (Groß-)Waldbränden in den sächsischen Wald- und Schutzgebieten anzuregen. In diesem Zusammenhang werden die zukünftigen klimatischen Einflüsse szenarienbasiert antizipiert und mit weiteren Informationen im Kontext der Waldbrandrisiken angereichert. Die Auswertung der ermittelten waldfächenspezifischen Ergebnisse dient als erste Indikation, in welchen Gebieten oder Gemeinden eine begründete Detailplanung erforderlich ist.

Um eine erfolgreiche Projektbearbeitung zu gewährleisten, sind folgende Arbeitsschritte im Projekt durchzuführen:

AP 1: Aufbau einer Geodatenbank zu relevanten GIS-Daten für die Wald- und Schutzgebiete in Sachsen

- Recherche und Implementierung von relevanten Geodaten
- Charakterisierung und Analyse der sächsischen Wald- und Schutzgebiete
- Ermittlung des Status quo der Waldbrandgefahrenklassen in Sachsen

AP 2: hochaufgelöste rasterbasierte Analyse zur Entwicklung von Hitze- und Dürreperioden in Sachsen

- Identifikation von geeigneten hochauflösenden Stations- und Rasterdaten für Klimaszenarien
- Analyse von Temperaturentwicklungen in Sachsen
- Analyse von Niederschlagsentwicklungen in Sachsen
- Analyse der Entwicklung von Windgeschwindigkeiten in Sachsen
- Aufbau einer Bewertungsmatrix für das zukünftige Klima

AP 3: GIS-gestützte Zusammenstellung von restriktiven und selektiven Faktoren zur Identifikation der besonders gefährdeten Gebiete

- Recherche und Implementierung von relevanten Geodaten in die DBI-GIS-Datenbank
  - Standorte der sächsischen Feuerwehren
  - bestehende Wasservorkommen (natürliche und künstliche)
  - Infrastrukturdaten Sachsen
  - Tourismus / Faktor Mensch
- Zusammenführung der bewertungsrelevanten Faktoren

AP 4: GIS-basierte Verschneidung der factorspezifischen Geodaten mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

- Ergebnisauswertung der bewertungsrelevanten Faktoren
- Erzeugung von aussagefähigem Kartenmaterial

AP 5: Aufbau einer Bewertungsmatrix für die Interpretation der Ergebnisse sowie der Dringlichkeitsplanung

- Identifikation maßgeblicher Bewertungsfaktoren
- Durchführung eines Rankings anhand der bewertungsrelevanten Faktoren
- Ergebnisauswertung der Dringlichkeitsplanung inkl. Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an Löschwasserentnahmestellen
- Erzeugung von aussagefähigem Kartenmaterial

AP 6: Öffentlichkeitsarbeit, Workshop sowie Veröffentlichung der Ergebnisse

- Veranstalten eines Ergebnisworkshops mit wesentlichen Akteuren sowie weiteren Entscheidungsträgern
- Präsentation der Ergebnisse (Vorträge) auf einschlägigen Veranstaltungen
- Veröffentlichung der Ergebnisse durch webbasierte Anwendung

## 2 Aufbau einer Geodatenbank zu relevanten GIS-Daten für die Wald- und Schutzgebiete in Sachsen

Für die Bearbeitung der Studie LöschH<sub>2</sub>O sind zur Erreichung der Zielstellung wesentliche Geodaten erforderlich. Für die Betrachtung der sächsischen Wald- und Schutzgebiete wird dabei auf die Daten des Landesamts für Geobasisinformation Sachsen (GeoSN) zurückgegriffen [3]. Die öffentlich zugänglichen Daten beinhalten das digitale Landschaftsmodell (DLM). In den Digitalen Landschaftsmodellen des Freistaat Sachsens wird die Landschaft mit Hilfe von Objekten (z. B. Verkehrswege, wie Straßen, Wege oder Schienenbahnen; Siedlungsgebiete, wie Wohn- oder Gewerbeflächen; Vegetationsflächen, wie Waldflächen; Gewässer, wie Flüsse oder Seen) geodatenbasiert beschrieben. Grundlage ist dabei das amtlichen Lagereferenzsystem ETRS89\_UTM33, welches die Lage und Ausdehnung von Objekten durch UTM-Koordinaten festlegt. Neben den Polygonen werden darüber hinaus noch die qualitativen und quantitativen Eigenschaften der Objekte mittels verschiedener Attribute konkretisiert. Diese Attribute sind im dazugehörigen ATKIS-Objektartenkatalogen (ATKIS-OK) eindeutig definiert.

### 2.1 Zusammenstellung von GIS-Daten zu sächsischen Wald- und Schutzgebieten

Für den Aufbau der Geodatenbank für das Projekt LöschH<sub>2</sub>O kommen mehrere der Objekte zum Tragen. In einem ersten Schritt sollen hierbei die Verteilung und die Arten der Waldflächen charakterisiert werden, um Informationen über die Waldstruktur zu erhalten. Ziel ist es, den sächsischen Waldbestand näher zu definieren. Die Geodaten werden im intern verwendeten Geoinformationssystem von ERSI ArcGIS erhoben, aufbereitet, systematisiert und ausgewertet. Neben den Daten des GeoSN finden weitere Datenquellen im Rahmen der Pilotstudie LöschH<sub>2</sub>O ihre Berücksichtigung.

Diese sind unter anderem:

- Corine Land Cover 2018 (CLC 2018)
- OpenStreetMap – Deutschland (OSM Deutschland)
- vielfältige Eigenrecherchen, welche in die DBI-Datenbank integriert wurden

Zur Verschneidung der oben genannten Datenquellen wird ein GIS-Modell entwickelt, welches die verschiedenen Datenformate und -quellen miteinander kombiniert und in einer einheitlichen Geodatenbank abspeichert.

### 2.1.1 Digitales Landschaftsmodell DLM 50

Das DLM 50 steht als freier Geodatendownload seit Ende 2009 flächendeckend zur Verfügung. Dabei handelt es sich um eine Ausgliederung aus dem Basis-DLM und beinhaltet eine inhaltliche Generalisierung sowie Vereinheitlichungen und Vereinfachungen der geometrischen Strukturen [4]. Das Landschaftsmodell wird turnusmäßig alle 5 Jahre aktualisiert. Trotz seiner Vereinfachungen eignet es sich insbesondere für thematische Analysen und Anwendungen mit Übersichtscharakter im regionalen Bereich. Die für die Analysen der hier vorlegten Studie LöschH<sub>2</sub>O benötigten Waldflächen sind auch im DLM 50 vollständig geokodiert enthalten. In der Feature-Class „veg\_02f“ sind die Polygone der Waldflächen gelistet und werden unter der Objektart „AX\_Wald“ aus dem Datensatz extrahiert und in das Geodatenformat der DBI-GIS-Datenbank umgewandelt. In Summe beträgt die Waldfläche des DLM 50 rund 5.433 km<sup>2</sup>. Verglichen mit den statistischen Angaben des Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft beträgt die reine Waldfläche circa 5.210 km<sup>2</sup>. Die Abweichungen begründen sich in der Datenstruktur des DLM 50, wobei alle mit Bäumen bewachsenen (bewaldeten) Gebiete ebenso enthalten sind. Die Verteilung im Freistaat Sachsen ist allerdings inhomogen wie die folgende Abbildung 1 zeigt.

#### Legende

 sächsische Wald- und Schutzgebiete

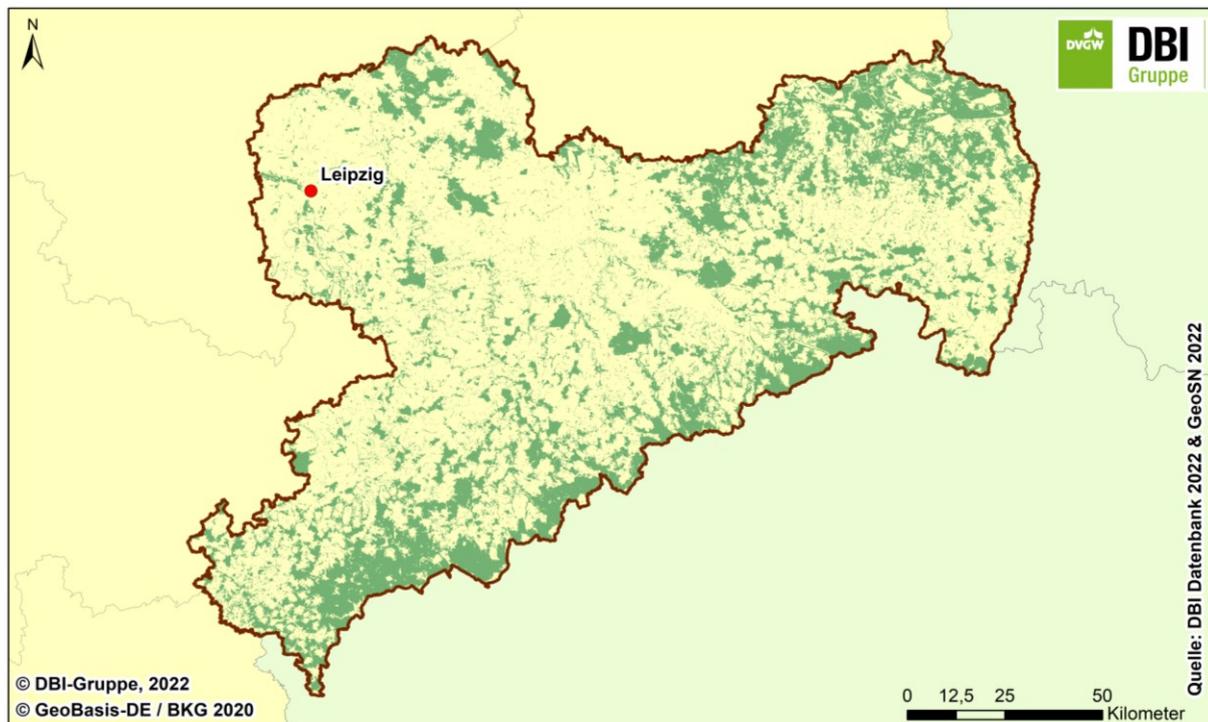


Abbildung 1: sächsische Wald- und Schutzgebiete aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM50), Datendownload nach [3], eigene Darstellung

Die Abbildung 1 lokalisiert die walddreichsten Landkreise in Sachsen im Erzgebirgskreis, im Landkreis (LK) Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Vogtlandkreis und in den nordöstlichen Landkreisen Bautzen und Görlitz. In Summe ist in Sachsen knapp ein Drittel der Landesfläche bewaldet (27 %) [2].

### 2.1.2 Corine Land Cover Daten

Der europäische Copernicus-Landüberwachungsdienst (CLC) stellt frei verfügbare Geodaten zum Monitoring der Landoberfläche zur Verfügung [5]. Diese Geodaten sind Teil der DBI-GIS-Datenbank und verfügen teilweise über detailliertere Daten als die des GeoSN. Insbesondere bei den Informationen zur Waldart werden den Waldflächen spezifische Attribute beigefügt. Im Wesentlichen wird in der Studie zwischen 4 Waldarten unterschieden:

- Nadelwald
- Laubwald
- Mischwald
- sonstige Wald- oder Schutzgebiete

Die Informationen zur Waldart sind den jeweiligen Polygonen angehängt und können daher die Daten des DLM 50 durch eine Überschneidung zielführend anreichern. In Summe betragen die sächsischen Waldflächen des CLC 2018 rund 5.457 km<sup>2</sup> und liegen damit nur knapp über dem Wert der Waldfläche aus dem GeoSN, was die Nutzung der Datenbasis des DLM 50 untermauert.

## 2.2 Charakterisierung und Analyse der sächsischen Wald- und Schutzgebiete

Zur Charakterisierung der Geodaten für die Wald- und Schutzgebiete, die als Basisdatensatz für die weiterführenden Analysen dienen, werden demnach die Rohdaten des DLM 50 mit den Klassenbezeichnungen zur Waldart angereichert und ausgewertet. Die Kategorie der sonstigen Waldarten stellt eine Zusammenfassung mehrerer Unterkategorien dar. Solche sind zum Beispiel:

- Heiden und Moorheiden
- Flächen mit spärlicher Vegetation
- Wald-Strauch-Übergangsstadien

Für eine erste Analyse werden die Waldarten in Sachsen kartografisch ausgewertet. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die wesentlichen Hauptkategorien inkl. ihrem prozentualen Anteil aufgelistet.

Tabelle 1: Anteile der Waldformen in Sachsen, Daten nach [5]

Waldart	Fläche in km <sup>2</sup>	Flächenanteil in %
Nadelwälder	3.695	68,0
Laubwälder	767	14,1
Mischwälder	479	8,8
Sonstige	491	9,1

Die Daten zeigen, dass mit zwei Dritteln der überwiegende Anteil der sächsischen Wälder mit Nadelhölzern bewaldet ist. Weitere 14,1 % sind mit Laubwäldern und rund 9 % mit Mischwäldern bewirtschaftet. Die nachfolgende Abbildung 2 soll die Waldarten in Sachsen kartografisch darstellen.

### Legende

sonstige Laubwälder Mischwälder Nadelwälder

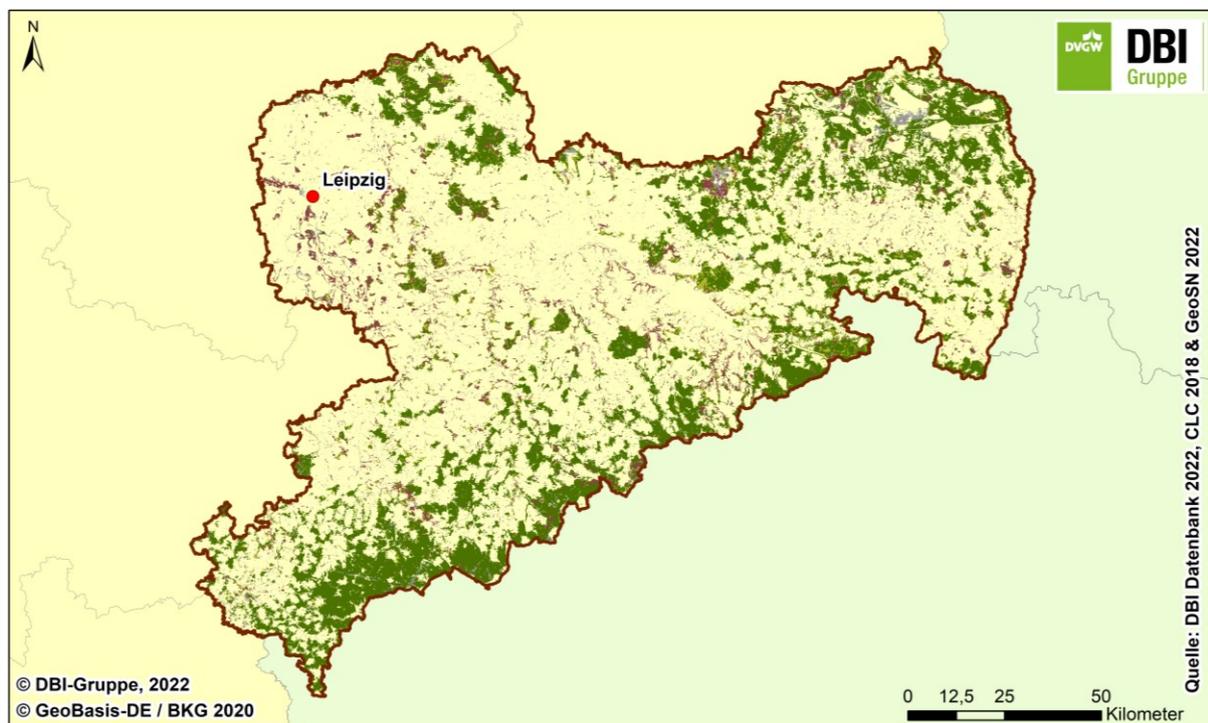


Abbildung 2: Verteilung der Waldformen in Sachsen, Daten nach [3, 5]

Verteilt über ganz Sachsen zeigt sich, dass vor allem der Erzgebirgskamm einen Großteil des Nadelwaldanteils ausmacht. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der biologischen Vielfalt ist der hohe Anteil von Nadelwald kritisch einzustufen, da sie weniger anpassungsfähig, im Vergleich zu Misch- oder reinen Laubwäldern sind. Viele Laubwälder sind im Landkreise Leipzig vorhanden.

## 2.3 Status quo der Waldbrandgefahrenklassen für Sachsen

Ziel dieses Arbeitsschritts war das Abbilden des Status quo aktueller Einschätzungen über das Waldbrandrisiko in Sachsen. Dazu wird als Datenbasis die forstwirtschaftliche Übersichtskarte des Sachsenforst mit den Waldbrandgefahrenklassen zum Stichtag 01.01.2022 verwendet. Die veröffentlichte Karte visualisiert die Forstbezirke, den Wald nach sächsischen Waldgesetz (SächsWaldG) sowie die Waldbrandgefahrenklassen. In Sachsen wird das Waldbrandrisiko in 3 Kategorien A bis C eingeteilt [1]. Die untenstehende Abbildung 3 visualisiert die Daten des Sachsenforst.

### Legende

■ A - Gebiet mit hoher Waldbrandgefahr    
 ■ B - Gebiet mit mittlerer Waldbrandgefahr    
 ■ C - Gebiet mit geringer Waldbrandgefahr

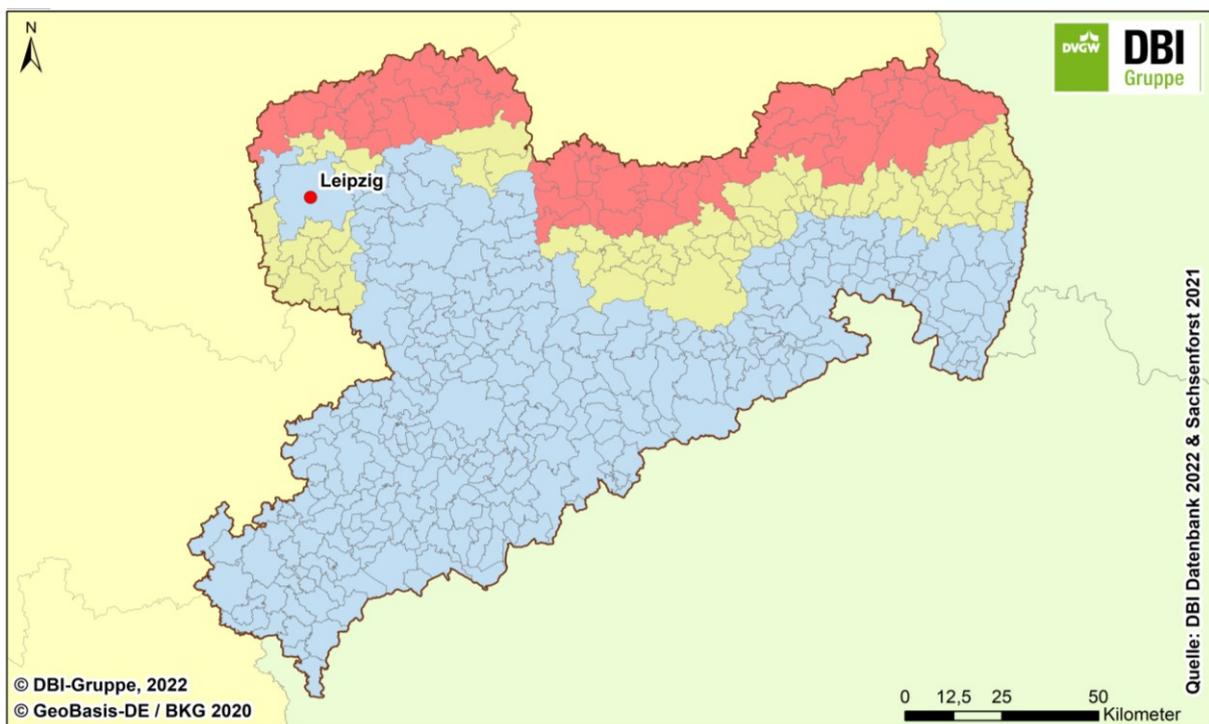


Abbildung 3: Waldbrandgefahrenklassen (Stand: 2022) in Sachsen, Daten nach [1], eigene Darstellung

Die dargestellten Waldbrandgefahrenklassen in Abbildung 3 erfolgen auf administrativer Gemeindeebene. Es wird deutlich, dass es eine klare Nord-Südgefälle in Sachsen gibt. Während den nördlichen Gemeinden an den Landesgrenzen zu Sachsen-Anhalt und Brandenburg eine hohe Waldbrandgefahrenklasse attestiert werden kann, sind die Gemeinden im Süden flächendeckend mit geringer Gefahr ausgewiesen. Die Klassifizierung erfolgt auf Basis langjähriger Erfassung und Statistiken über auftretende Waldbrände in Sachsen [1]. Darüber hinaus finden auch Zünd- und Brennbereitschaft der Waldstrukturen sowie regionale Standort- und Klimaverhältnisse eine Berücksichtigung. Durch die Einstufung der Wälder in Sachsen in die 3 Waldbrandgefahrenklassen wird es den kommunalen Behörden ermöglicht, Vorsorgemaßnahmen im Rahmen des Sächsischen Gesetzes über den Brandschutz, Rettungsdienst und Katastrophenschutz sowie des Waldgesetzes

für den Freistaat Sachsen umzusetzen [1]. Ziel der nachfolgenden Analysen ist eine quantitative Prognose bzw. eine Validierung der Waldbrandgefahrenklassen vor dem Hintergrund der Klimawandelfolgenbewältigung. Die Bearbeitung des Projekts LöschH<sub>2</sub>O verfolgt im Wesentlichen das Ziel, diesen Status quo mittels zukünftiger Klimaprognosen sowie weiterführenden Analysen zu möglichen Einflussparametern (Faktoren) auf das Waldbrandrisiko kritisch zu beleuchten.

Die durch den Sachsenforst publizierten Waldbrandgefahrenklassen bilden dabei den Status quo für die Analysen und sind ein erster Indikator, welche Regionen in Sachsen potenziell gefährdete Waldflächen besitzen. Um den Einfluss des Klimawandels abzubilden, werden die Klimamodellierungen genutzt, um zukünftig gefährdete Regionen auszuweisen und eine vorausschauende Planung des Löschwasserbedarfs zu ermöglichen.

### 3 Hochaufgelöste rasterbasierte Analyse zur Entwicklung von Hitze- und Dürreperioden in Sachsen

Für die Beurteilung der Folgen durch die zukünftigen klimatischen Entwicklungen in Sachsen wird die Klimamodellierung des Sächsischen WEREX-Ensemble herangezogen. Die Untersuchung zur potenziellen Entwicklung des zukünftigen Klimas ist hochkomplex, da es zahlreiche Einflussgrößen gibt, die in Wechselwirkung zueinanderstehen und basiert daher auf allgemeinen Berechnungen und Simulationen von Globalmodellen. Aus diesem Grund gibt es für die Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen eine zentrale Plattform (Regionales Klimainformationssystem „ReKIS“) zur Bereitstellung von hochauflösenden Stations- und Rasterdaten zu Klimainformationen [6]. ReKIS dient als Datengrundlage für diverse Studien sowie Projekte und hat demzufolge auch Verwendung in der vorliegenden Betrachtung des LöschH<sub>2</sub>O gefunden. Über die Kontakte des Deutschen Wetterdienstes (Abt. Agrarmeteorologie) sowie des sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landschaft und Geologie konnten die Studienersteller direkt auf die Daten des ReKIS über die TU Dresden zugreifen.

Die verfügbaren (Simulations-)Daten des Ensembles basieren auf den Szenarien RCP (2.6, 4.5 und 8.5) sowie SRES (A1B) innerhalb des Zeitraums von 2016 bis 2100. Die Daten bestehen aus stationsbezogenen Zeitreihen (Wetterstationen) mit Tageswerten für Klimaelemente (beispielsweise Temperatur, Niederschlag, etc.). Dabei wird modellhaft ein definiertes Rechteck über die sächsische Staatsfläche gezogen und tägliche Klimadaten für definierte Raster erzeugt [7]. Um eine besonders detaillierte räumliche Auflösung zu ermöglichen, werden 1 km x 1 km große Raster generiert und für die Bearbeitung verwendet [6, 7].

Im WEREX-VI Ensemble stehen sieben verschiedene Datensätze zu Klimadaten zur Verfügung. Nach Rücksprache mit Fachexpert:innen wird für die Klimaprojektionsdaten des LöschH<sub>2</sub>O der Datensatz des „WEREX-VI\_CMIP5\_MPI-ESM-r2“ verwendet:

- CMIP5           ...       *Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5*  
deutsch: international vereinbartes Modellvergleichsprojekt für die standardisierte Klimasimulation
- MPI             ...       Max-Planck-Institut
- ESM            ...       Earth system modell, deutsch: Erdsystemmodell
- r2              ...       zweiter Modelldurchlauf

Im Rahmen des 5. Sachstandberichts des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) aus dem Jahr 2013/2014 sind sogenannte repräsentative Konzentrationspfade (Representative

Concentration Pathways – RCP) entwickelt worden. Dabei werden vier Szenarien (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5) als repräsentativ eingestuft. Ursächlich hierfür ist, dass diese Szenarien die Treibhausgaskonzentration und den Strahlungsantrieb als Ausgangspunkt nutzen und eine sehr große Bandbreite von, in der Wissenschaft veröffentlichten, Szenarien abbilden [8, 9]. Die folgende Tabelle 2 charakterisiert die vier Szenarien anhand der Treibhausgaskonzentration und des Strahlungsantriebs.

Tabelle 2: RCP-Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht nach [8, 10]

Bezeichnung	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 2.6
Treibhausgaskonzentration im Jahr 2100	1.370 ppm CO <sub>2</sub> -äq	850 ppm CO <sub>2</sub> -äq	650 ppm CO <sub>2</sub> -äq	400 ppm CO <sub>2</sub> -äq
Strahlungsantrieb 1850 bis 2100	8,5 W/m <sup>2</sup>	6,0 W/m <sup>2</sup>	4,5 W/m <sup>2</sup>	2,6 W/m <sup>2</sup>

Für den Datensatz des aus dem ReKIS verwendeten ESM-Modell stehen die unterschiedlichen Klimaprojektionspfade des IPCC für die drei Szenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 zur Verfügung. Der Strahlungsantrieb beschreibt die Intensität der Auswirkungen des Klimawandels sowie die Temperaturerhöhungen gegenüber der Vergangenheit. Die Modellierung erfolgt für die Jahre 2001 bis 2100. Die Szenarien werden in der nachfolgenden Abbildung 4 kurz erläutert.

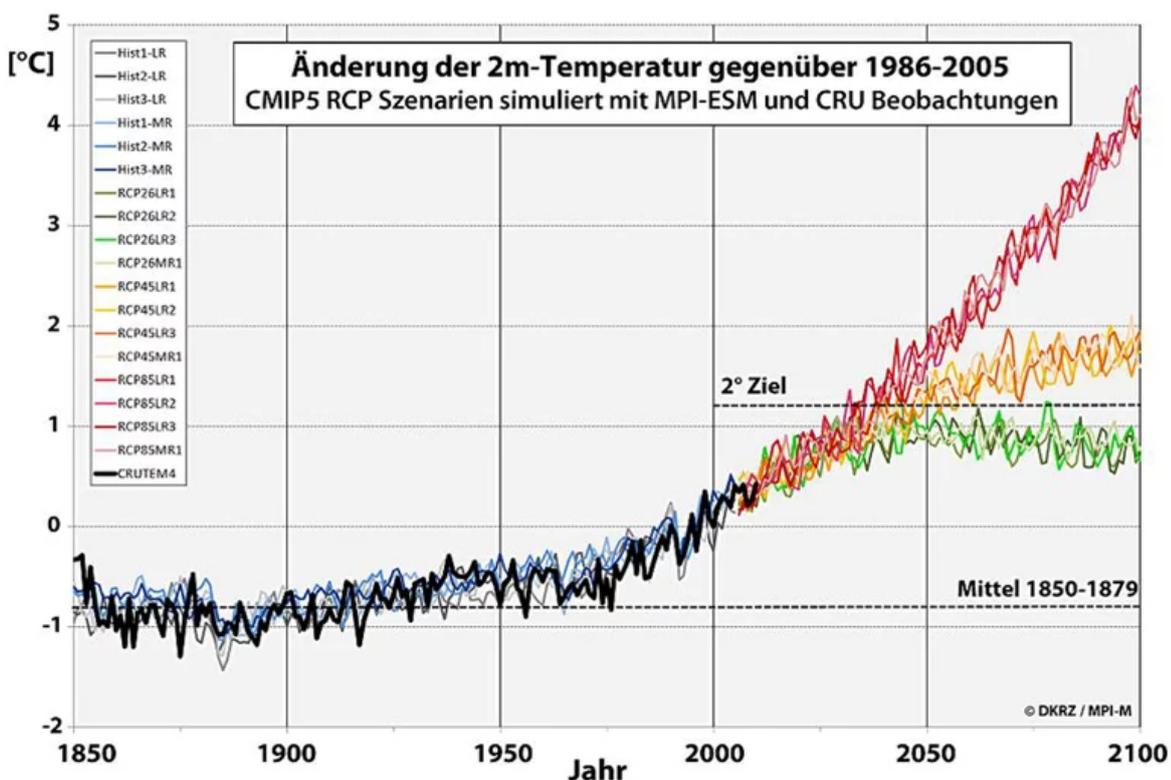


Abbildung 4: Änderung des globalen Mittels der oberflächennahen 2-Meter-Lufttemperatur nach [11]

Die in Abbildung 4 dargestellten Simulationsdurchläufe können als Klimaprojektion in drei Szenarien unterteilt werden. In Grün dargestellt wird das Szenario RCP 2.6, in Gelb das Szenario RCP 4.5 sowie in Rot das Szenario RCP 8.5. Es wird deutlich, dass das Szenario RCP 4.5 eine Welt bis 2100 abbildet, welche die Temperaturerhöhung auf etwas über 2°C ( $\Delta T = 2 \text{ K}$ ) im Vergleich zum Mittel der Jahre 1850 bis 1879 begrenzen kann. Für diese Zielerreichung müssen die THG-Minderungsziele der Staaten eingehalten werden. Das Szenario RCP 8.5 wiederum zeigt, dass bei ausbleibendem Klimaschutz die Auswirkungen des Klimawandel zu starken Temperaturerhöhungen führen. Dieses Szenario beschreibt den größten Strahlungsantrieb.

In den nachfolgenden Analysen werden die definierten Szenarien sowohl unter RCP 4.5 als auch nur R 4.5 (basierend auf den bereitgestellten Daten) betitelt, wobei immer von dem gleichen Szenario gesprochen wird. Zur Abschätzung der Klimawandelfolgen, die im LöschH<sub>2</sub>O betrachtet werden sollen, erfolgt im Detail die Auswertung der Rasterdaten für das Szenario R4.5 (mittlerer Strahlungsantrieb) und R8.5 (sehr hoher Strahlungsantrieb). Diese inhaltliche Einschränkung begründet sich neben der aktuellen Klimaentwicklung auch in der begrenzten Rechenkapazität der komplexen GIS-Modelle seitens Implementierung dieser Datenmengen ins GIS. Die durch die TU Dresden übergebenen und vorprozessierten WEREX VI-Rasterdaten sind weit über 200 GB groß und müssen zeitaufwändig via komplexer Python-Skripte in die vorhandene GIS-Datenbank der DBI Gas- und Umwelttechnik eingelesen werden [12]. Hierzu kommen verschiedene Verarbeitungswerkzeuge zum Einsatz, um einerseits die an jede Rasterzelle angehängenen Daten beizubehalten und andererseits das notwendige Geokoordinatensystem zu projizieren. Im Ergebnis werden für Sachsen rund 19.200 Rasterzellen im Format und der Ausdehnung von 1 km x 1 km mit allen Klimaelementen importiert.

Im Folgenden werden die spezifischen Klimatelemente vorgestellt, die Teil der zur Verfügung gestellten ReKIS-Daten sowie im Rahmen der Aufgabenstellung des Projekts als relevant eingestuft worden sind. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Klimatelemente der ReKIS-Klimadaten inkl. Einflussauswahl zur Klimabewertung [13]

Element	Einheit	Einfluss auf das Waldbrandrisiko
<b>Lufttemperatur (Mittelwert)</b>	Tageswerte in °C	<b>X</b>
<b>Lufttemperatur (Min.)</b>	Tageswerte in °C	
<b>Lufttemperatur (Max.)</b> → Hitzetage	Tageswerte in °C	<b>X</b>
<b>Niederschlag</b>	Tageswerte in mm	<b>X</b>
<b>Niederschlag</b> → regenfreie Tage	Tageswerte in mm	
<b>Windgeschwindigkeit (mittel)</b>	Tageswerte in m/s	<b>X</b>

Von den rund 15 Klimaparametern wird sich im Rahmen des LöschH<sub>2</sub>O auf die Temperatur, den Niederschlag und die Windgeschwindigkeit fokussiert. In Rücksprache mit Fachexperten (Kreisbrandmeister & Landesbranddirektor) erfolgt die Auswertung der in Tabelle 3 gekennzeichneten Elemente (siehe Spalte: Einfluss auf das Waldbrandrisiko) [13]. Diese sollen die Basis für die Prognose des Klimas auf Basis der Prognosedaten in Sachsen bilden.

Die Auswertung der 19.200 Rasterzellen erfolgt modellhaft in 10-Jahresschritten, beginnend mit dem Jahr 2020 und endend mit dem Jahr 2050. Da es sich bei den vorliegenden Daten um modellierte Zahlenreihen handelt und das zukünftige Wetter zu mehr Extrema neigt, wird eine Datenglättung umgesetzt. Für jeden 10-Jahresschritt erfolgt die Datenmittelung +/- 3 Jahre um den Jahreswert. Das heißt, der Datenwert für 2020 setzt sich aus dem arithmetischen Mittel der Jahre 2017 bis 2023 zusammen. Somit können vereinzelt auftretende (jährliche) Extrema die Analysen weniger negativ oder positiv beeinflussen und fundierte Aussagen aus den Trends abgeleitet werden. Darüber hinaus werden die Daten jährlich ausgewertet und es erfolgt keine Betrachtung einer „Waldbrandzeit“ (Monate: Juni bis September/Oktober). Diese methodische Spezifizierung war nicht Teil der beantragten Projektskizze, kann aber bei einer detaillierteren Auswertung zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse führen. Im Folgenden werden die einzelnen Methodiken zur Auswertung der Klimatelemente vorgestellt und das Kartenmaterial ausgewertet.

### 3.1 Analyse von Temperaturentwicklungen in Sachsen

Einen großen Einfluss auf das zukünftige Waldbrandrisiko hat die Temperaturentwicklung in den nächsten Jahren. Durch einen Temperaturanstieg wärmen sich nicht nur die Wälder auf und es erhöht sich die Verdunstung/Austrocknung, auch steigt das Risiko von zufälligen Waldbrandursachen durch den steigenden Strahlungsantrieb. Generell gilt, dass steigende Hitzeperioden und zunehmende Dürre das Waldbrandrisiko fördern.

#### 3.1.1 Entwicklung der durchschnittlichen Jahrestemperatur in Sachsen

Der erste Auswertungsschritt sieht die Analyse der Entwicklung der durchschnittlichen Jahrestemperatur in Sachsen vor. Wie eingangs beschrieben, erfolgt die Auswertung der Rasterdaten für die Szenarien R 4.5 und R 8.5, da diese beiden Szenarien die zukünftigen (Klima-) Trends bestmöglich abbilden, da sowohl ein mittlerer als auch ein sehr hoher Strahlungsantrieb durch die Klimaszenarien abgedeckt werden.

Die in Abbildung 5 dargestellten Karten visualisieren die Entwicklung der durchschnittlichen Jahrestemperatur. Im Jahr 2020 liegt die Jahrestemperatur in beiden Szenarien bei rund 9,5 °C. Bis zum Jahr 2050 zeigen die Grafiken, dass im definierten Szenario R 4.5, die mittlere Jahrestemperatur um rund 1,3 K steigt. Im Szenario R 8.5 ergibt sich ein  $\Delta T$  der Temperatur von mehr als 1,4 K. Diese Tendenz begründet sich in dem gewählten Betrachtungszeitraum bis 2050. Ausgehend von der Abbildung 4 wird deutlich, dass bis 2050 die Unterschiede in der Temperaturerhöhung geringfügig sind und sich erst bis 2100 große Differenzen ergeben.

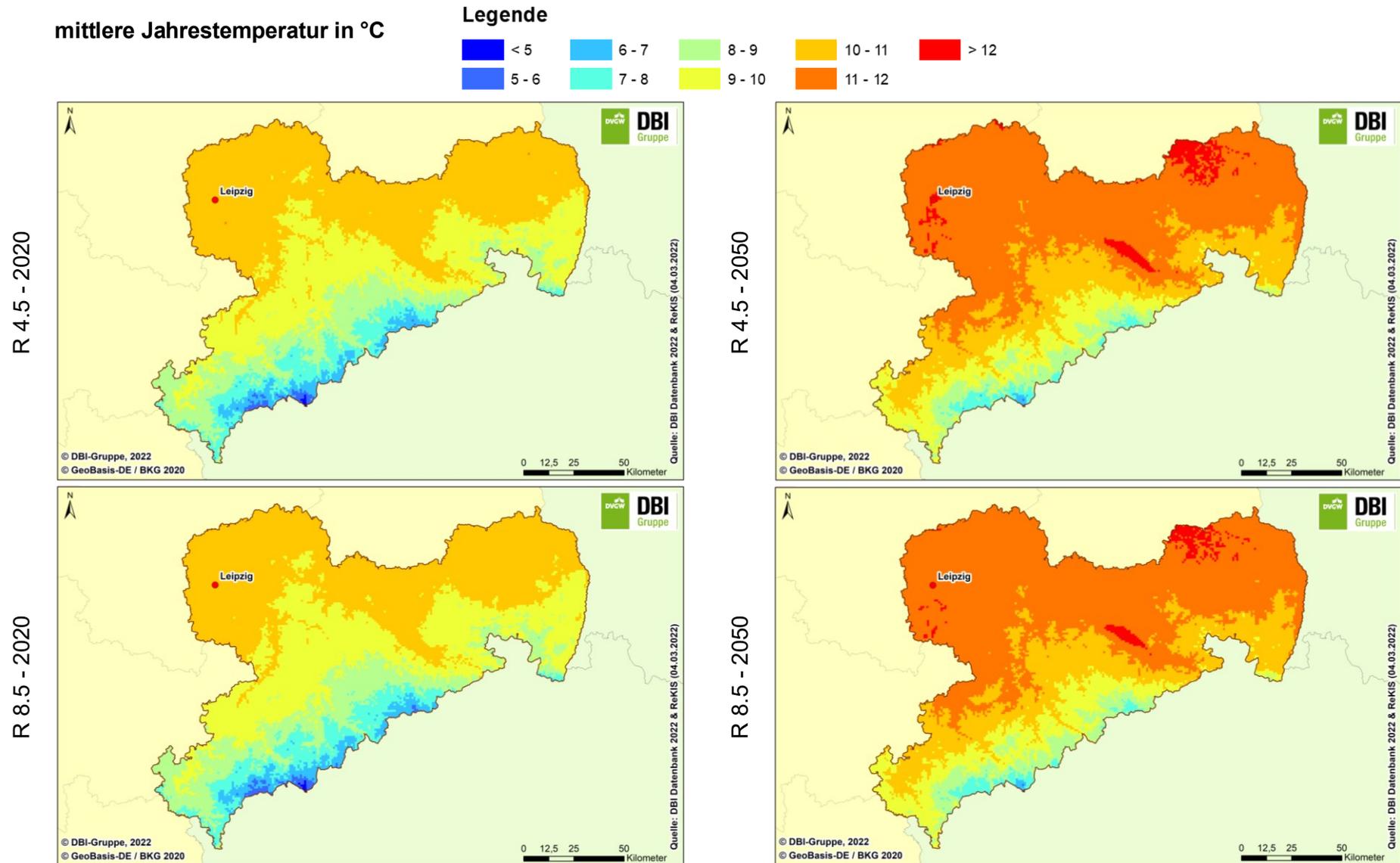


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur für die definierten Klimaszenarien in Sachsen, Daten nach [12], eigene Darstellung

Es wird deutlich, dass es ein klares Nord-Süd-Gefälle in Bezug auf die durchschnittlichen Jahrestemperaturen in Sachsen gibt. Die Region des Erzgebirges weist aufgrund der Höhenlage seit Jahren geringere Jahrestemperaturen auf. Die Analyse zeigt, dass sachsenweit mit höheren Temperaturen und damit einhergehender höherer Verdunstung zu rechnen ist. Die durchschnittliche Jahrestemperatur steigt in allen Rasterzellen über die Jahre bis 2050. Primär in Nordsachsen sowie in der Elbregion zwischen Meißen und Dresden sind zukünftig die höchsten mittleren Jahrestemperaturen zu erwarten. Neben der Kartendarstellung aus der Abbildung 5 soll das tatsächliche (absolute) Delta der Temperatur innerhalb der beiden Szenarien über den gesamten Betrachtungszeitraum in allen Rasterzellen analysiert werden. Die Differenz des Temperaturanstiegs für die betrachteten 30 Jahre ist in der nachfolgenden Abbildung 6 dargestellt.

### Differenz der durchschnittlichen Jahrestemperatur zwischen 2020 und 2050 in K

#### Legende

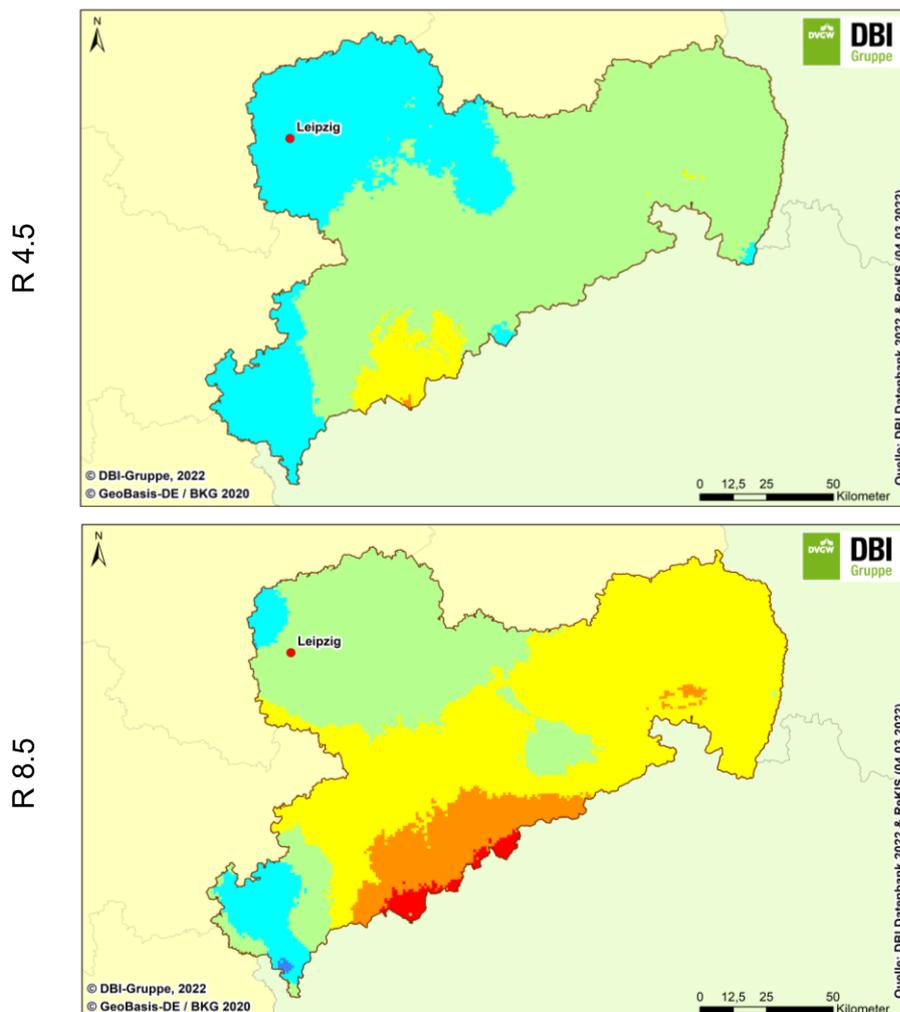
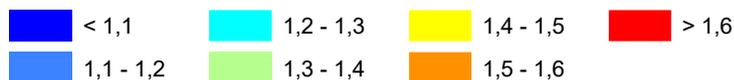


Abbildung 6: absolute Differenz der durchschnittlichen Jahrestemperatur ( $\Delta T$ ) zwischen 2020 und 2050 in K

Die Grafiken der Abbildung 6 zeigen, dass im Szenario R 4.5 das  $\Delta T$  zwischen 1,2 K und 1,6 K im Betrachtungszeitraum liegt. Die größten absoluten Temperaturanstiege sind dabei im Erzgebirgslandkreis zu verzeichnen. Die Aussage wird im Szenario R 8.5 mit dem deutlich größeren Strahlungsantrieb weiter verstärkt. In diesem Modelldurchlauf (R 8.5) steigt das  $\Delta T$  stärker innerhalb des Freistaates Sachsen. In diesem Szenario sind im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren Temperaturanstiege der durchschnittlichen Jahrestemperatur von mehr als 1,6 K im Erzgebirge möglich. Auf Basis des  $\Delta T$  kann geschlussfolgert werden, dass die Erzgebirgsregion von den größten klimatischen Auswirkungen, bezogen auf die durchschnittliche Jahrestemperatur, betroffen sein wird.

Neben der reinen Temperaturentwicklung sollen auch die punktuellen Extrema (Hitzetage) des Klimas sowohl innerhalb des Betrachtungszeitraums als auch die absolute Differenz abgebildet werden. Die methodische Herangehensweise wird im Kapitel 3.1.2 vorgestellt.

### 3.1.2 Entwicklung von Hitzetagen in Sachsen

Ein heißer Tag oder Hitzetag ist per Definition ein Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur  $> 30\text{ °C}$  beträgt. In der Meteorologie ist die Anzahl der Hitzetage ein Maß für die Güte (Intensität) des Sommers. [14]

Im Kontext des Waldbrandrisikos stellen die Hitzetage oder eine Periode von Hitzetagen eine unmittelbare Gefahr dar. An solchen Tagen ist die Waldbrandgefahrenstufe oftmals im oberen Bereich (Stufe 4/5). Darüber hinaus sind sie ein Anzeichen für wärmere Sommer und längere Trockenphasen und verstärken somit auch das Risiko von Waldbränden. Zusätzlich steigt durch diese Phasen das brennbare Material in Form von mehr Streu durch die dann bereits geschwächten Bäume, demnach mehr abgestorbenes Pflanzenmaterial wie Laub, welches auf dem Waldboden landet.

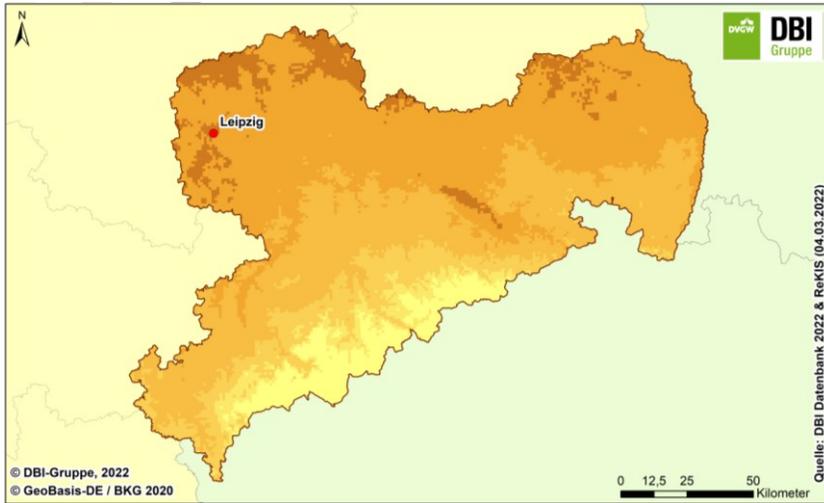
In der nachfolgenden Abbildung 7 erfolgt die grafische Ergebnisdarstellung für die Hitzetage der WEREX VI-Klimamodellierungen. Zu diesem Zweck wird im Rahmen der Bearbeitung ein Auswertungsskript erarbeitet, welches die Tageswerte in  $\text{°C}$  einer jeden Rasterzelle für die betreffenden Jahre iteriert und die Hitzetage auszählt, bewertet und anschließend projiziert. Diese Zähler je Rasterzelle bilden die Auswertungsbasis der Kartendarstellungen. Am vorliegenden Beispiel werden die Klimawandelfolgen besonders deutlich (siehe Abbildung 7).

Anzahl der Hitzetage (> 30 °C)

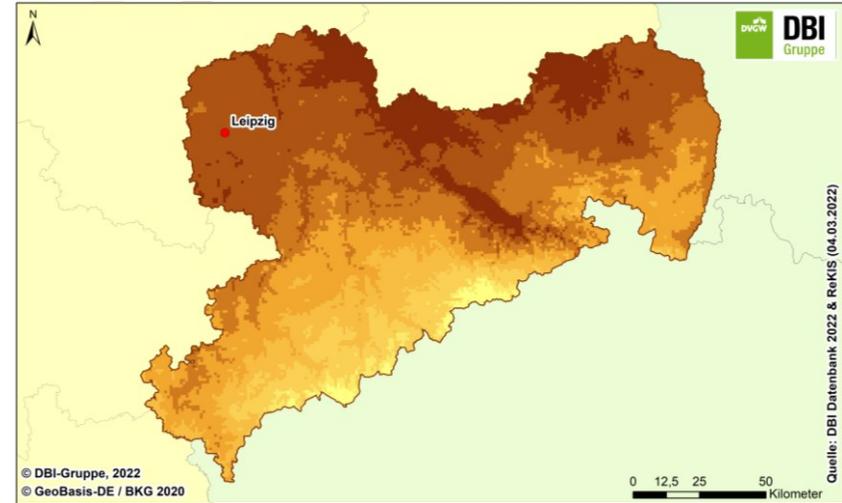
Legende



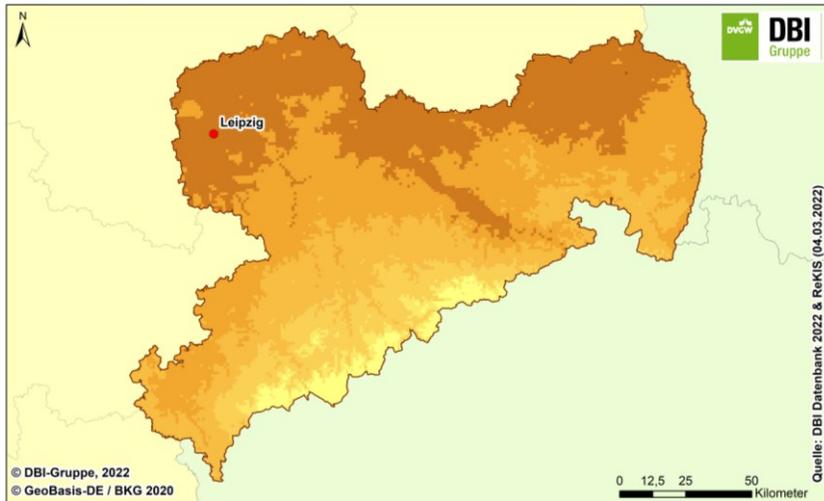
R 4.5 - 2020



R 4.5 - 2050



R 8.5 - 2020



R 8.5 - 2050

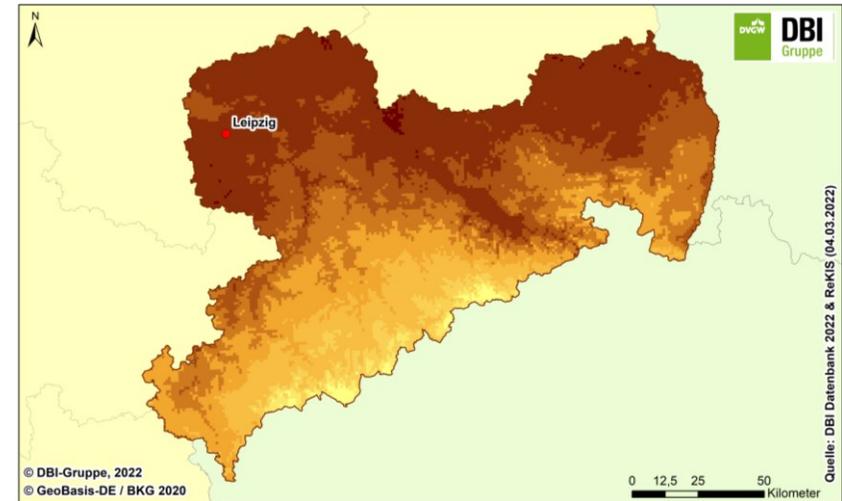


Abbildung 7: Entwicklung von Hitzetagen (> 30 °C) für die definierten Klimaszenarien in Sachsen, Daten nach [12], eigene Darstellung

Während im Szenario R 4.5 im Jahr 2020 im Schnitt nur 9 Hitzetage auftreten, so sind es bei der Prognose bis 2050 bereits 17 Hitzetage. Damit findet nahezu eine Verdopplung innerhalb von 30 Jahren statt. Für die Auswertung des Szenarios R 8.5 kann ebenfalls eine Verdopplung attestiert werden (im Jahr 2050 rund 19 Hitzetage). Der maximale Wert an Hitzetagen innerhalb einer Rasterzelle weist für das Szenario R 4.5 bereits 2050 einen Wert von mehr als 30 auf. Demnach ist davon auszugehen, dass sich die Länge und Intensität von Hitze- und Dürreperioden in Sachsen in den nächsten Jahren massiv erhöhen werden. Neben der Kartendarstellung aus der Abbildung 7 sind das tatsächliche (absolute) Delta der Hitzetage innerhalb der beiden Szenarien über den gesamten Betrachtungszeitraum in allen Rasterzellen zu analysieren. Die Differenz ist für die betrachteten Jahre in der nachfolgenden Abbildung 8 dargestellt.

### Differenz der Anzahl (n) der Hitzetage zwischen 2020 und 2050

#### Legende

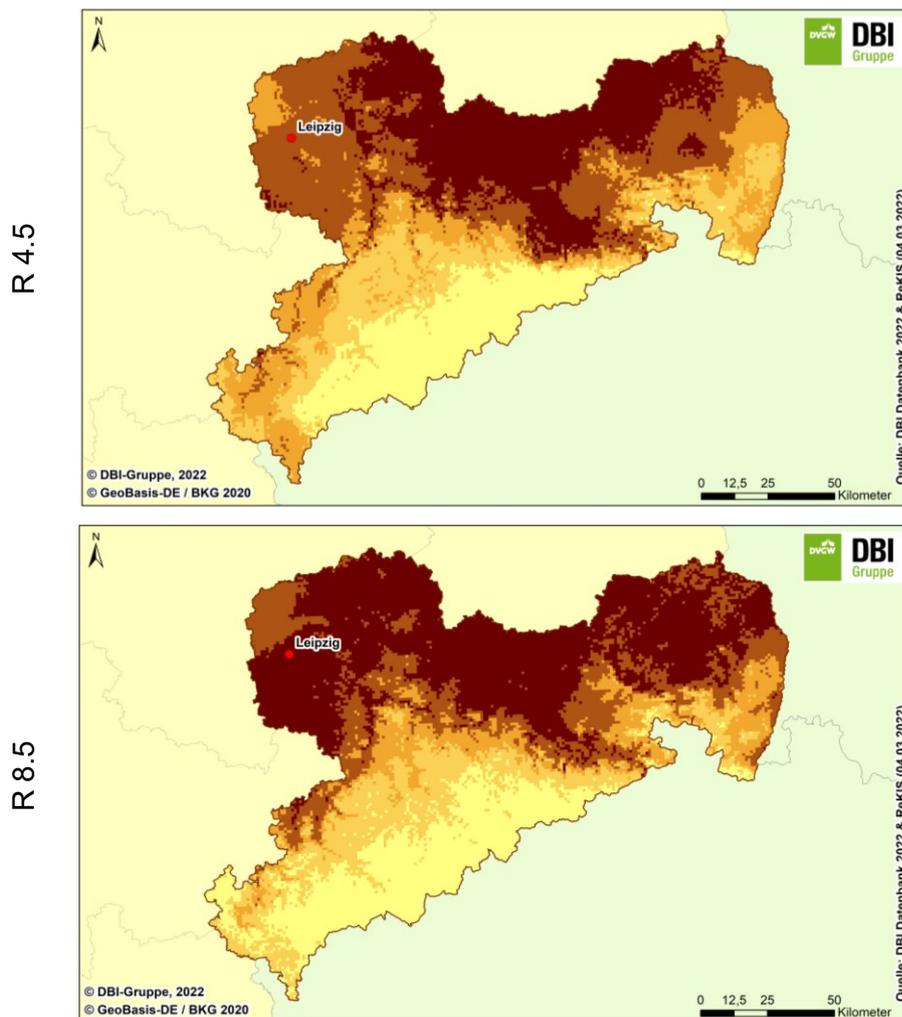
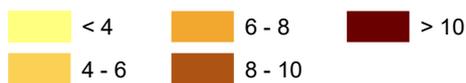


Abbildung 8: absolute Differenz der Hitzetage ( $\Delta$  HT) zwischen 2020 und 2050

Vergleichbar zu der Auswertung der mittleren Jahrestemperatur gibt es ein starkes Nord-Südgefälle in Sachsen. Im Szenario R 4.5 wird es in weiten Teilen Nordsachsens (LK Nordsachsen, LK Meißen, LK Bautzen und Stadt Dresden) in den nächsten Jahren zu einer Erhöhung von mehr als 10 Hitzetagen kommen. Dabei gibt es eine optische Trennung des sächsischen Tieflandes von den Mittelgebirgsregionen, in denen die absolute Zunahme von Hitzetagen kleiner vier bleibt. Im Szenario R 8.5 werden die Regionen mit den höchsten Zunahmen in Nordsachsen zusätzlich um Gebiete aus dem Landkreis Leipzig und der Stadt Leipzig erweitert.

Die Auswertung der Prognose der temperaturbedingten Einflüsse auf das Waldbrandrisiko gleicht zu großen Teilen den aktuell definierten Waldbrandgefahrenklassen (Sachsenforst - Abbildung 3). Jedoch führt die Prognose zur Aussage, dass die hohe (und ggf. auch die mittlere) Waldbrandgefahrenstufe auch in deutlich südlichere Regionen Sachsens vorstößt (siehe Elbregion zwischen Meißen und Dresden). Daraus kann abgeleitet werden, dass die klimatischen Einflüsse auf das Waldbrandrisiko zunehmen werden.

### 3.2 Analyse der Niederschlagsentwicklungen in Sachsen

Neben der Temperatur hat auch der Niederschlag einen wesentlichen Einfluss auf das zukünftige Waldbrandrisiko in Sachsen. Durch die zeitlichen Veränderungen in den Niederschlagsereignissen (weniger Niederschläge, aber ergiebiger) verändert sich der Wasserhaushalt der sächsischen Wälder. In der Analyse zu den Niederschlagsentwicklungen soll dieser Umstand untersucht werden. Zu diesem Zweck werden die Rasterdaten mit den Tageswerten zum Niederschlag (in mm) der WEREX VI-Klimamodellierungen erneut mittels Skripts ausgewertet. Dabei wird einerseits die Summe des Jahresniederschlags gebildet und andererseits werden zusätzlich noch die regenfreien Tage gezählt. Die Auswertung zu den Niederschlägen erfolgt dann im Kontext der Aufgabenstellung zur Summe der Jahresniederschläge.

Die vorliegenden Daten vergegenwärtigen, dass bei den Niederschlagsentwicklungen ebenso klare Tendenzen auftreten wie bei zu den zuvor ausgewerteten Temperaturentwicklungen. In den zwei untersuchten Klimaszenarien R 4.5 und R 8.5 fallen die Jahresniederschläge je Betrachtungsjahr. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Auswirkungen des veränderten Niederschlagsaufkommens ebenso Auswirkungen auf die sächsischen Wälder haben.

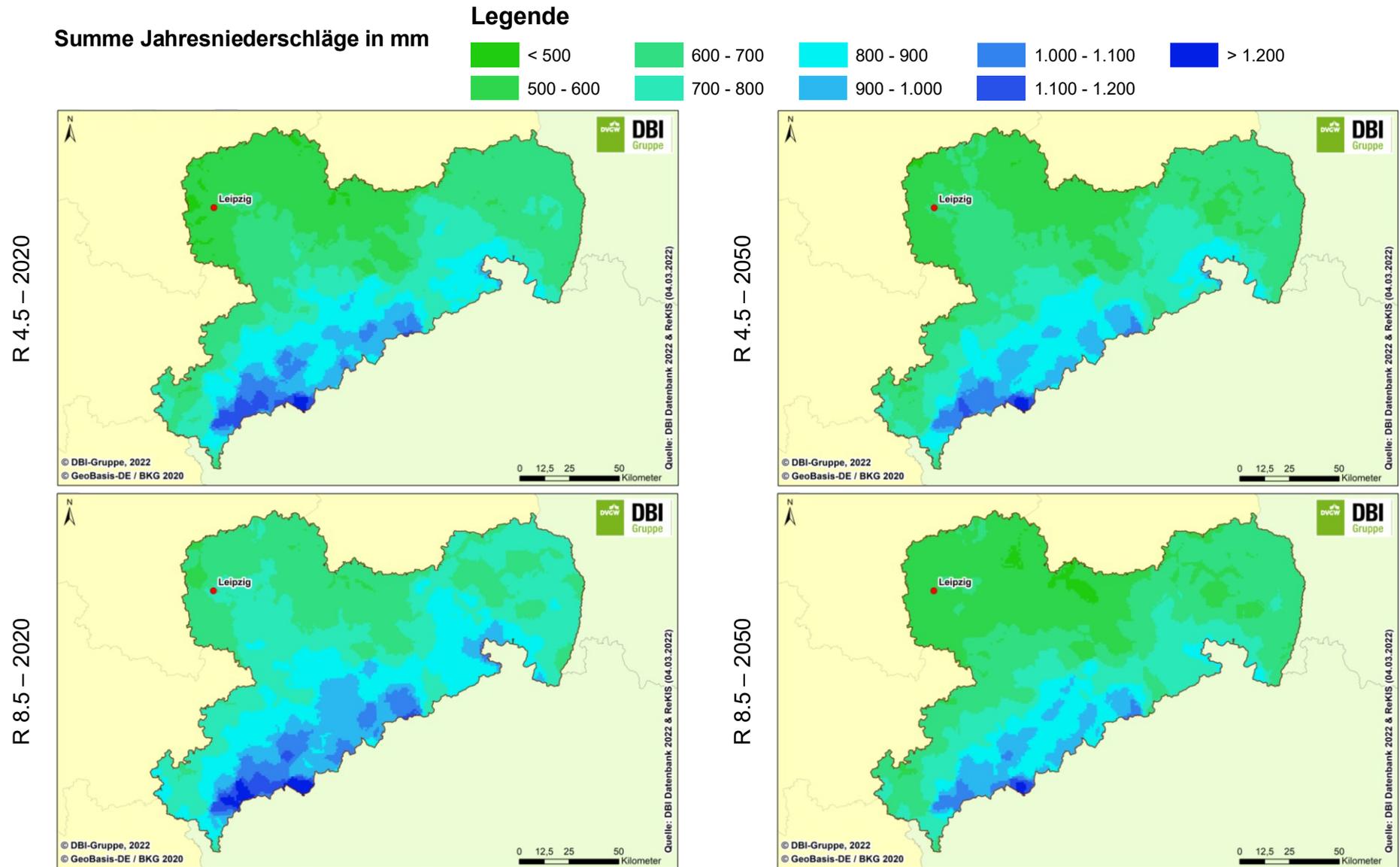


Abbildung 9: Entwicklung der Summe des Jahresniederschlags in mm für die definierten Klimaszenarien in Sachsen, Daten nach [12], eigene Darstellung

Es wird deutlich, dass im Szenario R 4.5 im Jahr 2050 primär die Region des Erzgebirgskamms deutlich weniger Niederschläge zu erwarten hat in Bezug auf das Ausgangsjahr 2020. Im Szenario R 8.5 sind die Veränderungen stärker ausgeprägt: gerade im Nordwesten Sachsens in der Region um die Stadt Leipzig sind deutlich weniger Niederschläge im Jahr zu erwarten. Neben der Kartendarstellung aus der Abbildung 9 soll das tatsächliche (absolute) Delta der Niederschläge innerhalb der beiden Szenarien über den gesamten Betrachtungszeitraum in allen Rasterzellen analysiert werden. Die Differenz ist für die betrachteten Jahre in der nachfolgenden Abbildung 10 dargestellt.

### Differenz der Summe des Jahresniederschlags in mm zwischen 2020 und 2050

#### Legende

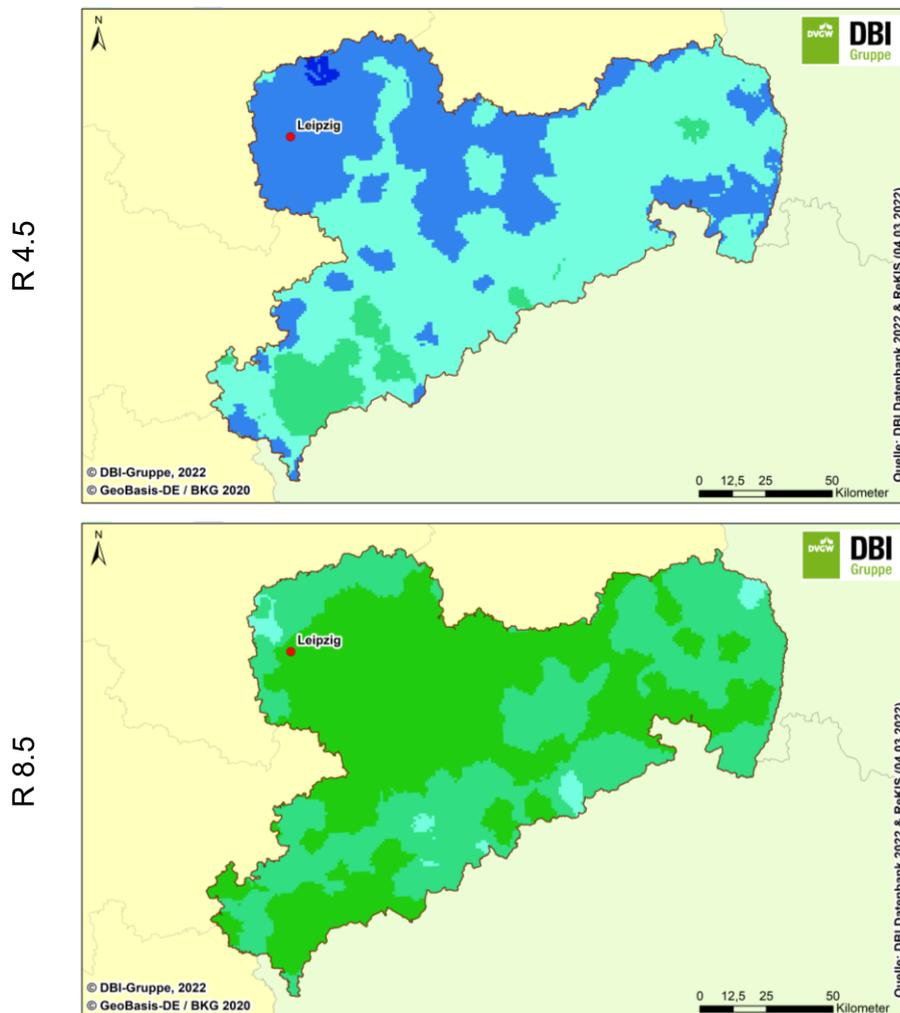


Abbildung 10: absolute Differenz der Summe des Jahresniederschlags in mm zwischen 2020 und 2050  
Die vorliegenden Daten der absoluten Differenz der Jahresniederschläge innerhalb eines Szenarios zeigen die Unterschiede der Klimamodellierungen. Während es im Szenario R 4.5 sowohl Regionen

gibt, in denen die Niederschläge sinken (grüne Farbgebung), so gibt es auch zahlreiche Regionen, in denen eine leichte Zunahme auf Basis der Daten ausgewiesen werden kann. Die Daten im R 4.5 schwanken von einer Abnahme des Niederschlags (- 95 mm) bis zu einer Zunahme (+ 65 mm), liegen aber im Mittel über alle Rasterzellen in Sachsen leicht im negativen Bereich (- 10 mm). Die Aussage aus Abbildung 9, dass die Niederschläge abnehmen, kann demnach bestätigt werden. Konträr dazu stellt sich die Auswertung der absoluten Deltas der Summe der Jahresniederschläge für das Klimaszenario R 8.5 dar. In dieser Auswertung wird deutlich, dass flächendeckend für Sachsen die Niederschläge sinken. Keine der ausgewerteten Rasterzellen weist eine Zunahme der Niederschläge auf. Die maximale Abnahme der Niederschläge beträgt fast 200 mm und im Mittel über alle Rasterzellen sinken die Niederschläge um rund 100 mm. Diese Auswertung zeigt die massiven Auswirkungen des Szenarios mit dem Strahlungsantrieb von 8,5 W/m<sup>2</sup>. In dieser Betrachtung wird deutlich, wie signifikant die negativen Auswirkungen auf die sächsischen Wald- und Schutzgebiete bereits im Jahr 2050 werden können. Darüber hinaus sei an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen, dass die wesentlichen Auswirkungen bis zum Jahr 2100 eintreten werden.

Wie eingangs beschrieben, werden auch die regenfreien Tage durch das Skript ausgewertet (Tage mit 0 mm Niederschlag). Die Auswertung zeigt, dass in beiden Szenarien rund 227 Tage im Jahr niederschlagsfrei bleiben. Damit gibt es an rund 62 % der Tage im Jahr keinen Niederschlag und es stützt die These, dass sich die Zeit der Trockenperioden in Sachsen erhöht. Dies hat wiederum wesentliche Auswirkungen auf den Waldboden und das Waldbrandrisiko, da das Aufkommen von sehr trockenem, brennbarem Material in Bodennähe als Zunder für potenzielle Waldbrände steigt.

### 3.3 Analyse der Entwicklung von Windgeschwindigkeiten in Sachsen

Als dritter Wetterparameter wird ergänzend zu der Temperatur und dem Niederschlag zusätzlich noch die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 Metern über der Erdoberfläche ausgewertet. Die Diskussion über die Verwendung der Klimaparameter mit einigen Fachexperten (u.a. Landesbranddirektor) ergab, dass aus deren Sicht die Windgeschwindigkeit eine große Auswirkung auf die Ausbreitung eines Waldbrandes hat und damit direkt auch das Risiko erhöht, dass große Flächenbrände entstehen [13]. Um diesem Fakt inhaltlich gerecht zu werden und neben der Entstehung auch die Ausbreitung zu adressieren, wird die rasterspezifische Windgeschwindigkeit ausgewertet (siehe Abbildung 11).

#### Mittlere Windgeschwindigkeiten 10 m ü. EOF (in m/s) für das Jahr 2050

##### Legende

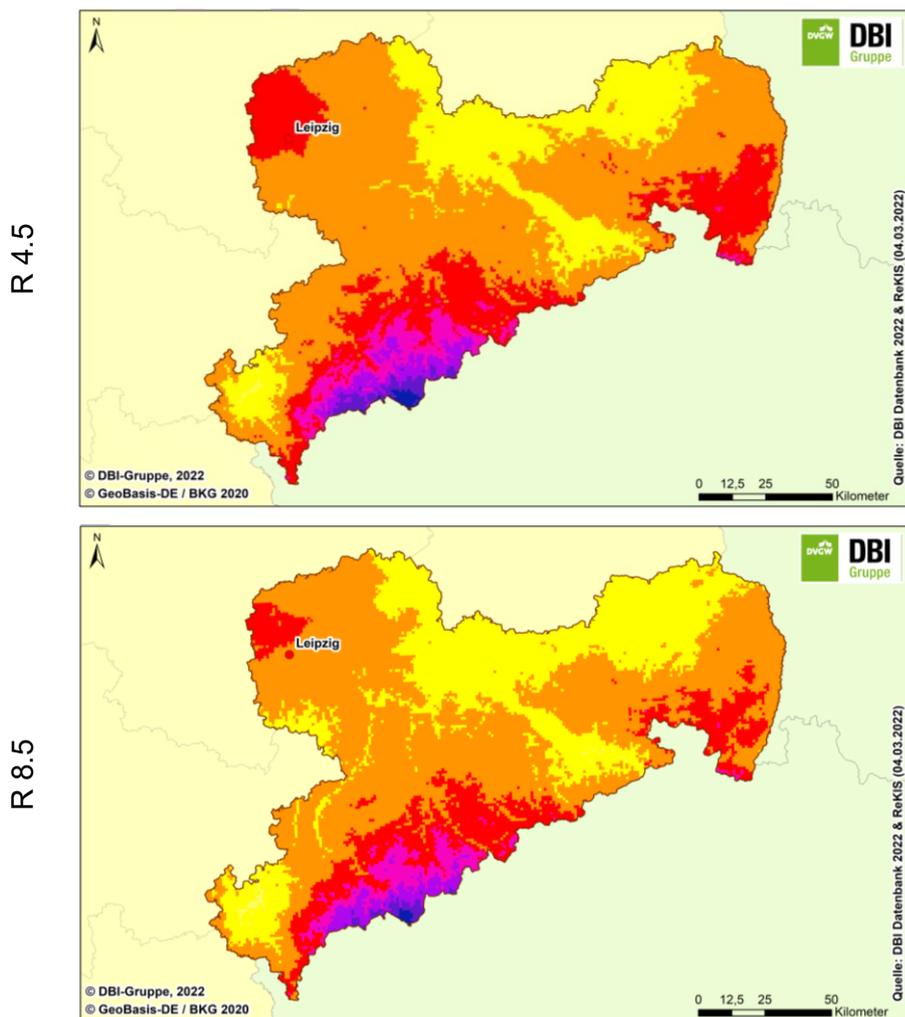


Abbildung 11: Entwicklung der mittleren Windgeschwindigkeiten für die definierten Klimaszenarien in Sachsen für das Jahr 2050, Daten nach [12], eigene Darstellung

Gemäß der Datenbasis können nur punktuelle Änderungen zwischen den Szenarien erkannt werden. Beide Grafiken zeigen einen vergleichbaren Farbverlauf. Von hohen mittleren Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s ist vor allem im Erzgebirgskreis auszugehen. In den sächsischen Tiefländern betragen die mittleren Windgeschwindigkeiten maximal 2,5 m/s. In beiden untersuchten RCP-Szenarien existiert auf den ersten Blick nur eine sehr geringe Abweichung untereinander über den Betrachtungszeitraum. Zur Identifikation der tatsächlichen Abweichungen werden diese innerhalb der beiden Szenarien über den gesamten Betrachtungszeitraum (2020 bis 2050) bestimmt und detailliert ausgewertet. Die Differenz ist für die betrachteten Jahre in der nachfolgenden Abbildung 10 als prozentuale Abweichung bezogen auf das Jahr 2020 dargestellt.

**Prozentuale Änderung der mittleren Windgeschwindigkeiten 10 m ü. EOF bezogen auf das Jahr 2020 in %**

**Legende**

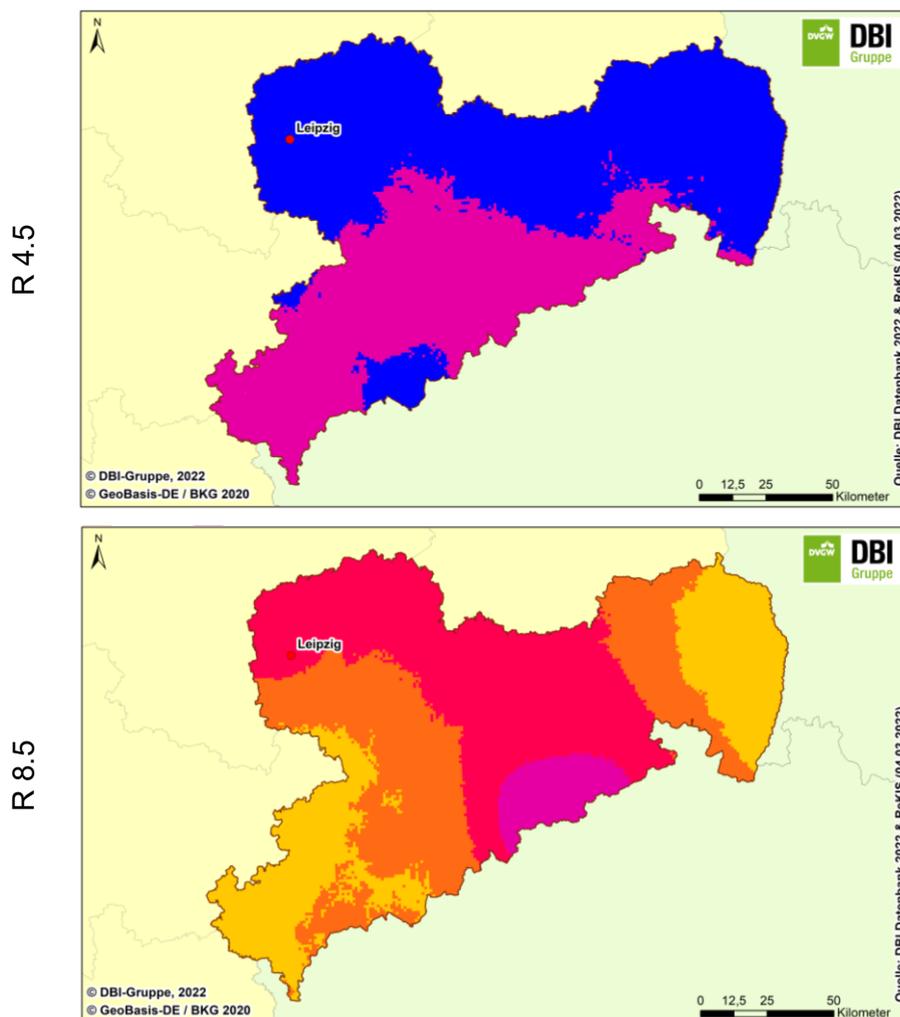


Abbildung 12: prozentuale Abweichung der mittleren Windgeschwindigkeit in % zwischen 2020 und 2050

Die Daten der Abbildung 12 zeigen, dass im Szenario R 4.5 die Windgeschwindigkeiten in allen Rasterzellen steigen. Dabei erhöht sich die mittlere Windgeschwindigkeit um rund 5 % im Vergleich zum Jahr 2020. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die prozentuale Abweichung der Windgeschwindigkeiten im Szenario R 8.5. Die Grafik spiegelt wider, dass die Windgeschwindigkeiten in diesem Szenario tendenziell kleiner werden (im Mittel -2,0 %). Da beide prozentualen Abweichungen jedoch unter 5 % liegen, kann geschlussfolgert werden, dass unabhängig der beiden betrachteten Szenarien der Einfluss der mittleren Windgeschwindigkeit nicht durch den steigenden Strahlenantrieb beeinflusst wird. Im nachfolgenden Kapitel wird die weiterführende Methodik zur Bewertung der Klimadaten erläutert.

### 3.4 Einordnung der klimatologischen Auswertung in den Kontext der Aufgabenstellung

Die bisherigen Analysen zu den klimatologischen Einflussfaktoren können gemäß den vorangegangenen Ausführungen auf zwei unterschiedlichen Wegen bewertet werden. Aus klimatologischer Perspektive sind nur auf Basis der Delta-Werte beziehungsweise der relativen Abweichungen robuste Aussagen über die Entwicklung des zukünftigen Wetters (Abbildung 6, Abbildung 8, Abbildung 10 und Abbildung 12) ableitbar. Dies gilt, da die stationsbezogenen Zeitreihen mit Tageswerten für die Klimaelemente nur innerhalb der Szenarien R 4.5 sowie R 8.5 methodisch modelliert wurden.

Konträr dazu finden für die Bewertung des zukünftigen Waldbrandrisikos jedoch die absoluten Ableitungen aus den vier Auswertungsgrafiken (Abbildung 5, Abbildung 7, Abbildung 9 und Abbildung 11) im vorliegenden Projekt LöschH<sub>2</sub>O Anwendung. Im Kontext der Aufgabenstellung ist es wesentlich, Wald- oder Schutzgebiete zu identifizieren, in denen beispielsweise eine hohe mittlere Jahrestemperatur auf Basis der szenarienspezifischen ReKIS-Daten (R 4.5 und R 8.5) zu erwarten ist. Gleiches gilt auch für die Auswertung des Niederschlags. Es ist essenziell Gebiete auszuweisen, in denen es eine geringe jährliche Niederschlagssumme gibt, unabhängig davon, wie sich diese zuvor im Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2050 entwickelt hat.

Im vorliegenden Projekt wird daher explizit keine klimatologische Perspektive eingenommen (d.h. der Bezug auf Deltawerte). Vielmehr wird infolge einer engen Abstimmung mit Fachexperten auf die Absolutverhältnisse von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit abgestellt. Die zugehörigen Absolutwerte sind vor dem Hintergrund des Projektziels geeignete Gradmesser für die Abschätzung der Entwicklung des Waldbrandrisikos und die Identifikation besonders gefährdeter Gebiete.

### 3.5 Aufbau einer Bewertungsmatrix für die klimatische Entwicklung sowie Identifikation der besonders gefährdeten Gebiete

In diesem Kapitel erfolgt die Bewertung der drei Klimaparameter Temperatur (durchschnittliche Jahrestemperatur und Hitzetage), Niederschlag (Summe Jahresniederschlag) und der Windgeschwindigkeit. Zur ganzheitlichen Bewertung des Faktors Klima wird eine Bewertungsmatrix aufgebaut. Zu diesem Zweck werden die vier Auswertungsgrafiken (Abbildung 5, Abbildung 7, Abbildung 9 und Abbildung 11) mittels Geoinformationssystem überlagert und anhand eines definierten Bewertungssystems analysiert. Die gewählte Bewertungsmatrix ist in der nachfolgenden Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Bewertungsmatrix für das zukünftige Klima in Sachsen

Klimaparameter	Bewertungspunkte Klima				
	1	2	3	4	5
<b>Temperatur</b>					
⊙ Jahrestemperatur	< 7	7 - 9	9 - 10	10 - 11	> 11
Hitzetage	< 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	> 25
<b>Niederschlag<sup>1</sup></b>					
∑ Jahresniederschlag	> 1.000	700 - 1.000	< 700		
<b>Windgeschwindigkeit</b>					
	< 3,0	3,0 - 4,5	> 4,5		

<sup>1</sup>...beim Niederschlag erfolgt die Bewertung spiegelbildlich

Tabelle 4 zeigt das entwickelte und breit abgestimmte Bewertungssystem für das zukünftige Klima bis 2050. Aufgrund der großen Bedeutung von langen und trockenen Hitze- und Dürreperioden wird der Einfluss der Temperaturparameter höher bewertet im Vergleich zum Niederschlag sowie der Windgeschwindigkeit. Das Punktesystem ermöglicht eine differenzierte Entscheidung zu jeder Rasterzelle aus den WEREX VI-Klimamodellierungen. Nach dem Aufsummieren erfolgt die quantitative Einordnung der Summe je Rasterzelle zur Auswertung im GIS. Die Tabelle 4 zeigt, dass minimal 4 Punkte und maximal 16 Punkte erreicht werden, wobei ein höherer Wert für eine Verschärfung der aktuellen Situation und damit für einen negativen Einfluss des zukünftigen Klimas auf das Waldbrandrisiko spricht. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der rasterbasierten Klimaauswertungen mittels Kartendarstellungen visualisiert und erläutert.

### 3.6 Bewertung des zukünftigen Klimas

Die Auswertung des Faktors Klima erfolgt anhand der Bewertungsmatrix aus Kapitel 3.5. Die jeweilige Summe der Bewertungspunkte stellt dabei die Basis der Analyse dar. Die Einordnung in die Kategorien der Legende erfolgt anhand quantitativer Einschätzungen. Die Charakterisierung der Legendeneinträge auf Basis der Bewertungsmatrix ist in der nachfolgenden Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Charakterisierung der Legendeneinträge für die Bewertung des Klimas

Legendenbezeichnung/ Bewertung	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
Bewertungspunkte	≤ 6	7 bis 8	9 bis 10	11 bis 13	≥ 14

Die Tabelle 5 zeigt, dass von den maximalen Bewertungspunkten (16 Punkten) für das Klima ab einer Summe von 14 Punkten die Einordnung in die Kategorie „sehr schlecht“ erfolgt. In solchen Rasterzellen sind sowohl die Temperatur-, die Niederschlags- und die Windgeschwindigkeitsbewertung so hoch bzw. niedrig, dass von einem großen klimatischen Risiko im Kontext des Waldbrandrisikos auszugehen ist. Im Ergebnis kann für das gewählte Referenzszenario R 4.5 die Kartendarstellung der nachfolgenden Abbildung 13 exportiert werden.

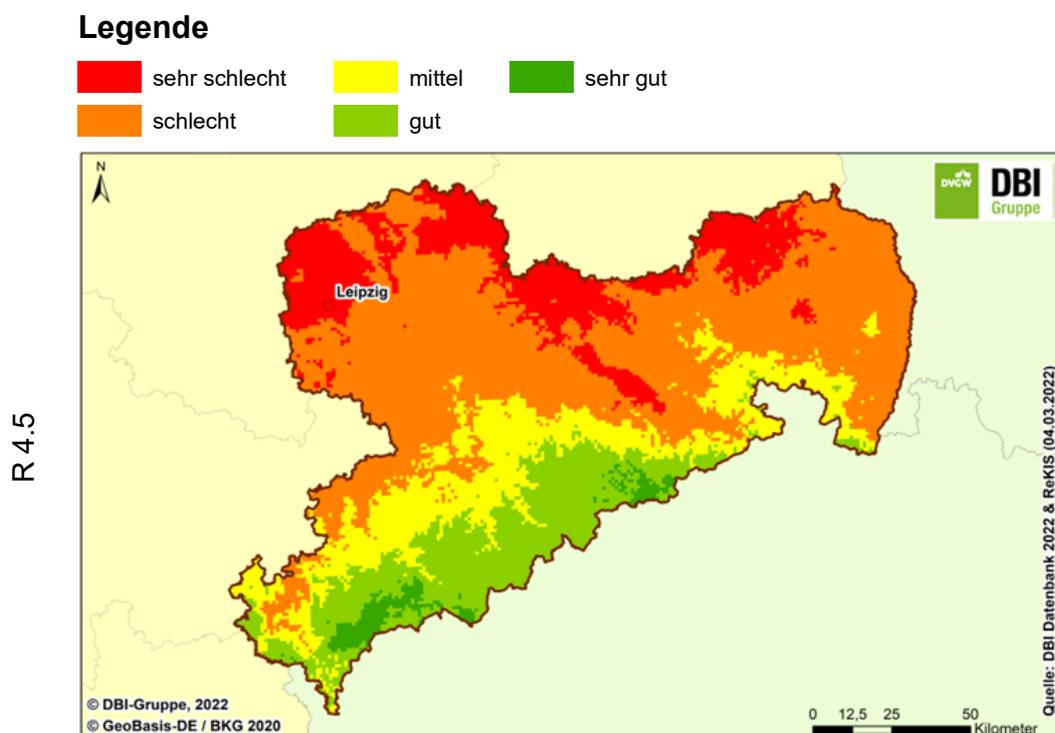


Abbildung 13: Bewertung des zukünftigen Klimas für das definierte Klimaszenario R 4.5 im Jahr 2050 in Sachsen

Es ist ersichtlich, dass bereits im Szenario R 4.5 große Teile Sachsens im Jahr 2050 mit negativen Klimawandelfolgen, bezogen auf das Waldbrandrisiko, zu rechnen haben. Primär die Regionen Nordsachsens insbesondere in den Grenzgebieten zu den Bundesländern Brandenburg und

Sachsen-Anhalt sowie die Region Leipzig und die Elbregion Meißen-Dresden stehen vor großen Herausforderungen (Kategorie: „sehr schlecht“). Dort beträgt die Bewertungssumme aus der Bewertungsmatrix mindestens 14 Punkte. Dies ist ein Indikator dafür, dass in diesen Regionen mit deutlich längeren Hitze- und Dürreperioden zu rechnen ist. Ferner sind alle Rasterzellen mit einer Summe von 11 Punkten oder mehr der Kategorie „schlecht“ zugeordnet. Auch in diesen Gebieten steigt das Waldbrandrisiko durch die klimatischen Entwicklungen bis 2050. Es zeigt sich, dass bei einem Vergleich der Ergebnisse der Modellierungen zum Thema Klima mit der Kartendarstellung aus der Abbildung 3 (Status quo der Waldbrandgefahrenklassen des Sachsenforst) das bestehende Nord-Südgefälle innerhalb von Sachsen eine weitere Intensivierung erfährt. Gemeinden, die 2021 noch der mittleren Waldbrandgefahrenklasse (gelb) oder niedrigen Waldbrandgefahrenklasse (blau) zugeordnet werden, werden in den nächsten Jahren, aus klimatischer Sicht (unter Annahme der Bewertungsmatrix aus dieser Studie) höher einzustufen sein. Dieser Trend ist besonders in der Elbregion zwischen Meißen und Dresden sehr eindrücklich nachvollziehbar. Während aus der Abbildung 3 hervorgeht, dass für diese Gebiete die niedrigste Waldbrandgefahrenklasse nach den Daten des Sachsenforst gilt, so verstärken sich die Auswirkungen des Klimawandels hier am deutlichsten.

Ergänzend zur Auswertung des Szenarios R 4.5, wird auch das R 8.5 detailliert untersucht. Wie eingangs bei der Szenarienvorstellung beschrieben, vollziehen sich in diesem Szenario flächendeckend noch stärkere Auswirkungen des Klimas. Die Einordnung der Legendeneinträge aus Tabelle 5 wird unter den gleichen Bedingungen erneut angewendet. Die Ergebnisse der Auswertung zeigt die nachfolgende Abbildung 14.

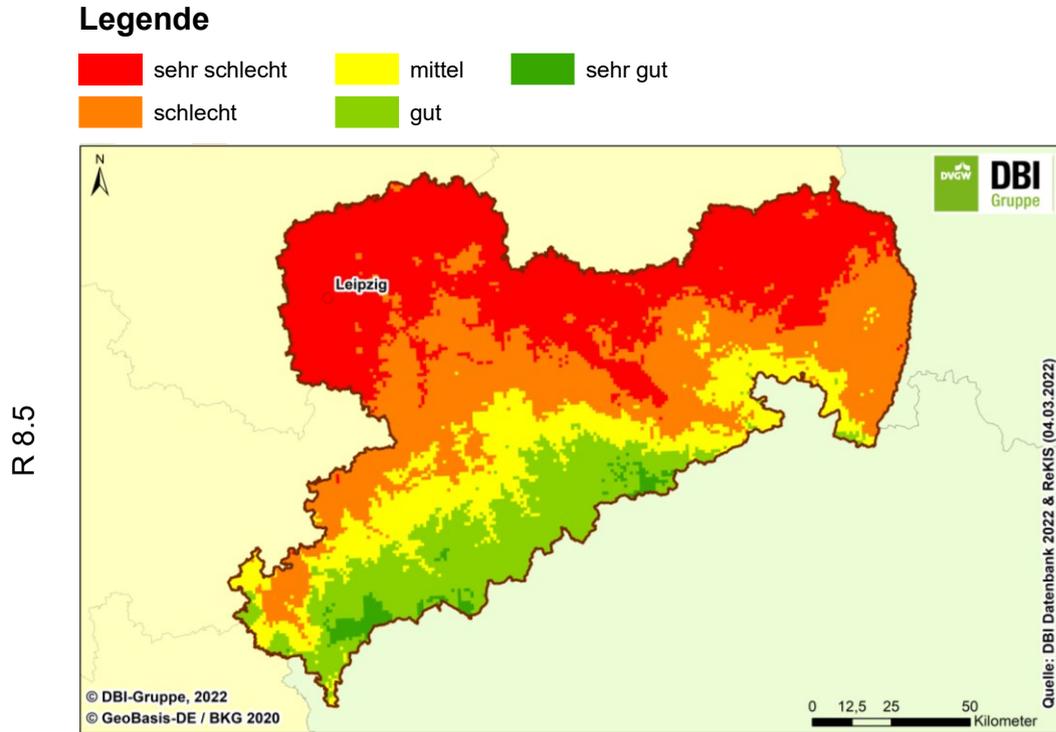


Abbildung 14: Bewertung des zukünftigen Klimas für das definierte Klimaszenario R 8.5 im Jahr 2050 in Sachsen

Die Verschärfung der negativen Klimawandelfolgen, bezogen auf das Waldbrandrisiko, werden im Szenario R 8.5 sehr deutlich. Neben den Regionen, die bereits im Szenario R 4.5 als „sehr schlecht“ und somit als besonders gefährdet identifiziert wurden, reihen sich darüber hinaus weite Teile Westsachsens sowie diverse Gemeinden bis an das Erzgebirge heran ein. In diesem Szenario ist mehr als die Hälfte der Fläche des Freistaats in die Kategorien „sehr schlecht“ oder „schlecht“ einzuordnen. Diese Klassifizierungen sind gleichbedeutend mit einem hohen Waldbrandrisikos. Im folgenden Kapitel werden weitere Faktoren vorgestellt sowie ihr Einfluss auf das zukünftige Waldbrandrisiko evaluiert.

## 4 GIS-gestützte Zusammenstellung von restriktiven und selektiven Faktoren zur Identifikation der besonders gefährdeten Gebiete

Neben dem Faktor Klima finden im vorliegenden Projekt LöschH<sub>2</sub>O noch weitere Einflussfaktoren Beachtung. Zu diesem Zweck werden die in der Abbildung 15 dargestellten Faktoren auf ihren Einfluss für die sächsischen Wald- und Schutzgebiete untersucht. Die Auflistung und Wahl der Faktoren erfolgte in Abstimmung mit Fachexperten, die der DBI Gas- und Umwelttechnik als Begleitung im Projekt zur Verfügung standen. Die letztendliche Wahl der Faktoren soll dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit aufweisen. Vielmehr war es das Ziel, sich der Problemstellung mittels GIS und unter Beachtung der Zeit- und Ressourcenplanung des Projekts bestmöglich zu nähern.



Abbildung 15: ausgewählte Einflussfaktoren für die Identifikation der besonders gefährdeten Gebiete

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, solche Wald- oder Schutzgebiete in Sachsen zu identifizieren, wo einerseits das Waldbrandrisiko durch diese Faktoren steigt oder andererseits bei einem Brandfall kein oder nur wenig Löschwasser vorhanden ist. Die obenstehende Abbildung 15 zeigt neben dem Faktor Klima (im Uhrzeigersinn) als zweiten Faktor die Standorte der sächsischen Feuerwehren. Hierbei sollen die Analysen der Geodaten unter dem Aspekt der Handlungsschnelligkeit bei einem Waldbrand geführt werden. Die zentrale Fragestellung ist demnach: Wie weit liegen die Wald- und Schutzgebiete in Sachsen von einer Feuerwehr entfernt oder anders: Wie lange dauert es im Einsatzfall, bis die Einsatzkräfte vor Ort sind?

Neben der Handlungsschnelligkeit wird auch das Thema der bestehenden Wasservorkommen analysiert. Zu diesem Zweck werden die Optionen zur Löschwasserversorgung aus künstlichen Wasservorkommen (Hydranten) sowie natürlichen Wasservorkommen (Flüsse, Seen, Teiche etc.) untersucht. Dabei steht die Frage im Fokus: Wo ist eine potenzielle Löschwasserentnahmestelle in der Nähe?

Einen besonderen Fokus bilden im Folgenden noch die Infrastrukturdaten Sachsens, die im Hinblick auf die Erreichbarkeit der sächsischen Wald- und Schutzgebiete analysiert werden. Zentrale Fragestellung ist dabei: Wie gut erreichbar ist eine Waldfläche oder anders: Wie gut (oder wie nah) kommen die Einsatzkräfte an den Einsatzort (Zugänglichkeiten für die Brandbekämpfung)? [15]

Abschließend wird eine Analyse des Tourismus / Faktors „Mensch“ im Rahmen des zukünftigen Waldbrandrisikos angestellt. Der Mensch ist in Deutschland für mehr als 90 % der Waldbrände durch vorsätzliches oder fahrlässiges Handeln verantwortlich. Er ist daher die Hauptursache für Entstehen von Waldbränden.[15, 16]

## 4.1 Standorte der sächsischen Feuerwehren

Zur Analyse der Standorte der sächsischen Feuerwehr erfolgt die Auswertung auf Basis der in der OpenStreet Map (OSM) enthaltenen Standortdaten [17]. Die OSM-Datenbank ist eine öffentlich verfügbare Datenbank, in der die Geodaten durch die Eintragung der Mitglieder selbst stattfindet und somit lizenzfrei ist. Die Einträge sind mit verschiedenen Kennwerten und Attributen inkl. Geokoordinaten gelistet. Für die im Projekt angestrebte Auswertung werden die sächsischen Standorte zu „fire station“ (englisch) aus dem Datensatz extrahiert [17]. Zur Eliminierung von fehlerhaften oder doppelten Datensätzen werden die Geodaten nach dem Import in die DBI-GIS-Datenbank noch händisch aufbereitet. Zu solchen Dopplungen kann es kommen, wenn beispielweise neben dem Fahrzeughaus noch ein weiteres Gerätehaus einer Feuerwehr in der Umgebung vorhanden ist. Der exportierte Datensatz des Ergebnisses beinhaltet rund 1.600 Standorte von sächsischen Feuerwehren. Es findet keine explizite Unterscheidung hinsichtlich Berufsfeuerwehren, freiwilligen Feuerwehren oder Werksfeuerwehren statt. Vielmehr ist davon auszugehen, dass im Kontext des Katastrophenschutzes bei einem Großalarm alle verfügbaren Kräfte mobilisiert werden. Die im Rahmen des Projekts genutzten Standorte visualisiert die nachfolgende Abbildung 16.

### Legende

- ▲ Standorte der sächsischen Feuerwehren

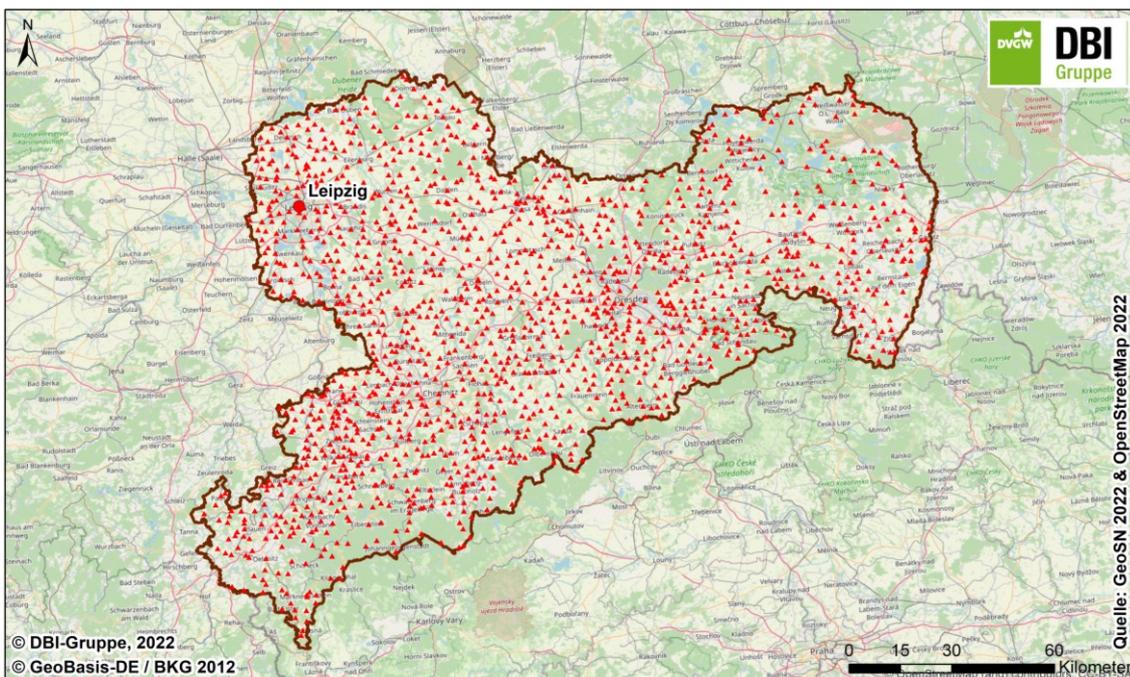


Abbildung 16: Verteilung der Standorte der sächsischen Feuerwehren, Daten nach [17]

Die vorliegende Grafik gibt Auskunft über die Verteilung der sächsischen Feuerwehren im Gebiet des Freistaates Sachsen. Auf den ersten Blick ergibt sich ein sehr homogenes Bild. Jedoch sind primär die Gebiete in Nordost-Sachsen sowie am Erzgebirgskamm im Vergleich zum sächsischen

Inland, ob der strukturellen Ausprägung (sehr ländlich geprägte Regionen), spärlicher ausgestattet. Für die methodische Vorgehensweise erfolgt ausgehend von den geokodierten Standorten eine GIS-gestützte Entfernungsanalyse. Zu diesem Zweck werden für jeden Standort der Datenbank Radien gezogen, die eine Erreichbarkeit von Waldflächen bzw. die potenzielle Handlungsschnelligkeit der Einsatzkräfte modellhaft abbilden soll. Dabei werden alle Standorte, unabhängig ihres Typs (Berufsfeuerwehr, freiwillige Feuerwehr, Werksfeuerwehr) gleichberechtigt in die Betrachtungen einbezogen. Es erfolgt demnach keine Bewertung nach technischer Ausrüstung oder Personalstärke, da diese Daten im Rahmen der Datenakquise nicht beschafft werden konnten. Nach der Erstellung der Radien werden die entstehenden Flächen gleicher Radien bei einer Überlagerung zusammengefasst und farblich differenziert in der nachfolgenden Abbildung 17 dargestellt.

**Legende: Entfernung des Standort in km**

- Standorte der sächsischen Feuerwehren
- < 1 km
- 1 km - 2 km
- 2 km - 3 km
- 3 km - 4 km
- 4 km - 5 km
- 5 km - 7,5 km
- > 7,5 km

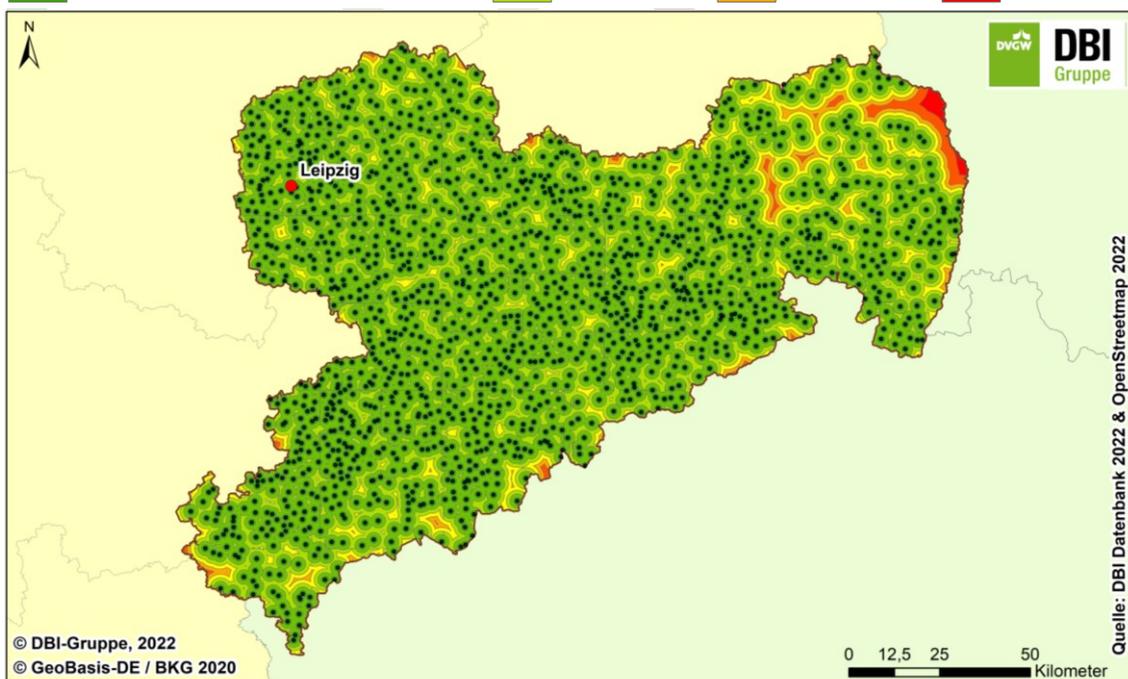


Abbildung 17: Entfernungsanalyse auf Basis der sächsischen Feuerwehrstandorte

Als Haupttendenz lässt sich erkennen, dass die Verteilung der Standorte dazu führt, dass im Umkreis von rund 5 km fast jeder Ort in Sachsen durch eine Feuerwehr erreichbar ist. Von dieser Erkenntnis abweichend, gibt es in der sächsischen Lausitz sowie um die Kohleregion Boxberg große Flächen, für die die zuvor getroffene Aussage nicht gilt. Darüber hinaus gibt es in den Grenzregionen des Freistaats kleine Gebiete mit einer orangen/roten Färbung (siehe Legende). Einige davon sind jedoch methodisch bedingt, da nur Standorte von sächsischen Feuerwehren als Teil der GIS-Analyse fungieren und keine länderübergreifenden (Tschechien und Polen) oder bundeslandübergreifende (Bayern, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg) Standorte weiterer Feuerwehren mit in die Modellierung einfließen. Für die Ableitung bezogen auf das

Waldbrandrisiko sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass die Entfernungsanalyse nur die direkten Entfernungen berücksichtigt, nicht aber die Infrastrukturdaten (Straßenwege). Daher kann es in der Realität sein, dass die eigentliche Strecke sich um den Faktor 1,5 bis 2 erhöhen kann. Die Verschneidung des Ergebnisses mit den Waldgebieten erfolgt im Kapitel 5.

## 4.2 Wasservorkommen

Der zweite Faktor für die Beurteilung zur Prognose des zukünftigen Waldbrandrisikos sind die bestehenden Wasservorkommen, die zur potenziellen Löschwasserbereitstellung zur Verfügung stehen. Ziel ist es, die Regionen zu identifizieren, die (weit) entfernt von solchen Wasservorkommen sind und demnach vorrangigen Bedarf für die zusätzliche Bereitstellung von Löschwasser haben. Zu diesem Zweck werden die Wasservorkommen in die natürlichen und die künstlichen, gemäß der untenstehenden Abbildung 18, unterteilt.

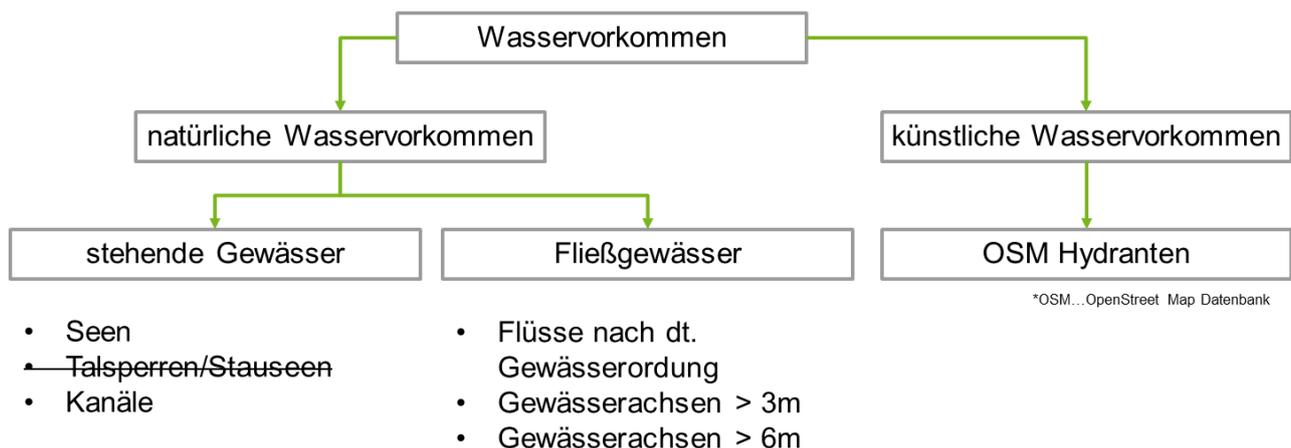


Abbildung 18: Übersicht der analysierten Wasservorkommen

Die Unterteilung der natürlichen Wasservorkommen folgt der Gliederung der Rohdaten des digitalen Landschaftsmodells (DLM 50). Dabei wird in die stehenden Gewässer und in die Fließgewässer unterschieden. Innerhalb der beiden Kategorien werden weitere spezifische Parameter definiert, die im nachfolgenden Kapitel 4.2.1 detailliert beschrieben werden. Die Übersicht der Abbildung 18 zeigt, dass beispielweise Talsperren und Stauseen nicht Teil der Betrachtungen sind, da sie dem vordringlichen Trinkwasserbedarf unterliegen und daher nicht zur Löschwasserbereitstellung dienen. Bei den künstlichen Wasservorkommen fokussiert die Rohdatenbereitstellung erneut die OSM-Datenbank als wesentliche Datenquelle.

#### 4.2.1 natürliche Wasservorkommen

Die Geodaten des DLM 50 unterscheiden sich im Kontext der natürlichen Wasservorkommen in Polygone-Features (Flächen wie Gewässer, Seen, Teiche, Kanäle sowie die Flüsse nach dt. Gewässerordnung mit einer Flussbreite von > 42 m) und Polyline-Features (Linien wie Flüsse mit Gewässerachsen zwischen 3 m bis 12 m Wasserbreite) [3]. Per Definition der Objektklassifizierung sind stehende Gewässer (AX\_stehenden\_Gewässer) „natürliche oder künstliche mit Wasser gefüllte, allseitig umschlossene Hohlformen der Landoberfläche ohne unmittelbaren Zusammenhang zum Meer“ [3]. Im Projektkontext des LöschH<sub>2</sub>O werden diese Polygone als wesentliche Option für die Löschwasserbereitstellung identifiziert. Um Talsperren, die für die Trinkwasserbereitstellung genutzt werden, fälschlicherweise nicht als Option zu integrieren, erfolgt skriptbasiert die Eliminierung aller Datensätze, die das Wort „sperre“ im Namensatz enthalten [18]. Dazu werden alle Namensbezeichnungen von einem Modell in Buchstaben zerlegt und bei einer Übereinstimmung aus dem Datensatz entfernt. In einem zweiten Aufbereitungsschritt werden die so eliminierten Daten händisch auf ihre Richtigkeit geprüft. Das Ergebnis dieser Aufbereitung stellt den Rohdatensatz für die nachfolgenden Analysen dar. Die vorgestellten Daten zu den stehenden Gewässern werden mit den weiteren Rohdaten zu den Fließgewässern angereichert.

Fließgewässer sind per Definition „geometrisch begrenzte, oberirdische, auf dem Festland fließende Gewässer, die die Wassermengen sammeln, die als Niederschläge auf die Erdoberfläche fallen oder aus Quellen austritt, und in ein anderes Gewässer, ein Meer oder in einen See transportiert“ [3]. Für die zu selektierenden Fließgewässer, werden in Abstimmung mit den Fachexperten der Auswahlparameter auf eine Mindestflussbreite (Gewässerachse - BRG) von mehr als 3 m festgesetzt. Damit wird gewährleistet, dass wesentliche Wassermengen (ganzjährlich) in den Fließgewässern vorhanden sind und sich für ein Anstauen zur Bereitstellung von Löschwasser eignen. Die grafische Übersicht zu allen ausgewählten natürlichen Gewässern ist in der nachfolgenden Abbildung 19 dargestellt.

## Legende

- stehende\_Gewässer
- Fließgewässer
- Fließgewässer (Breite zwischen 3m bis 6m)
- Fließgewässer (Breite zwischen 6m bis 12m)

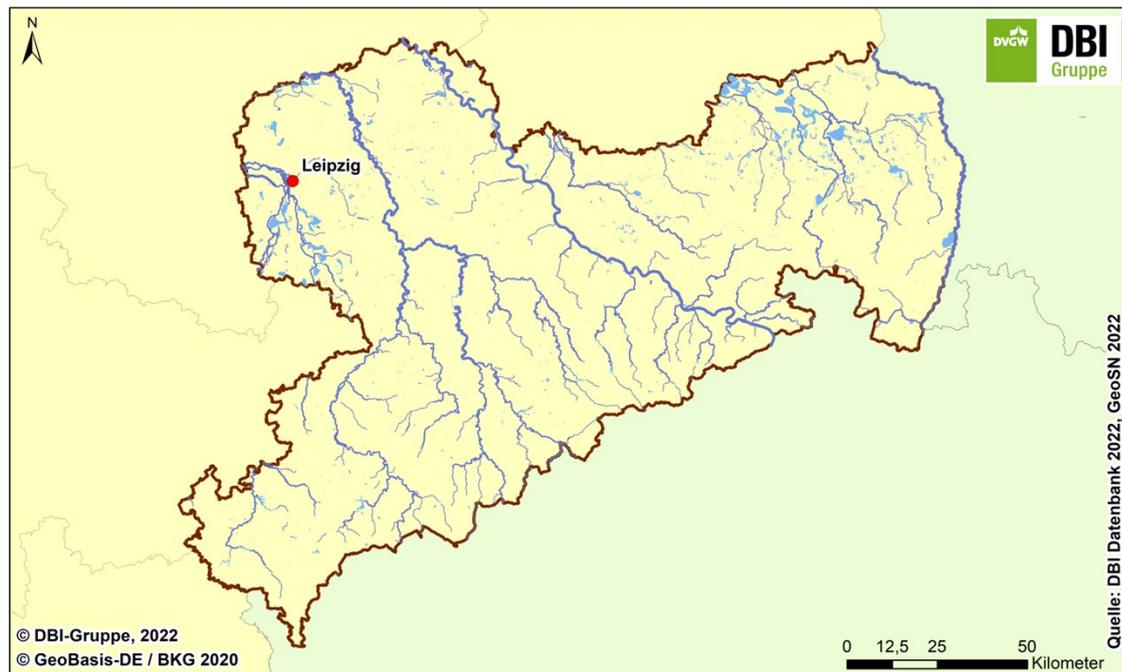


Abbildung 19: Übersicht der natürlichen Gewässer, Daten nach GeoSN [3]

Es zeigt sich, dass sich das Gewässernetz in Sachsen aus vielen Flüssen und Seen zusammensetzt. Im Wesentlichen sind die stehenden Gewässer wie die Lausitzer Seenplatte sowie die Leipziger Seenplatte im Süden von Leipzig erkennbar. Neben mehreren kleinen und mittleren Flüssen (zuvor unter Gewässerachsen vorgestellt) sind die größten Flüsse nach deutscher Gewässerordnung die Elbe sowie die Zwickauer und Freiberg Mulde. Mit dem Ziel der Identifikation von Löschwasserentnahmestellen im direkten Umfeld von potenziell gefährdeten Wald- oder Schutzgebietsflächen wird erneut eine GIS-gestützte Entfernungsanalyse vergleichbar der Analyse zu den sächsischen Feuerwehrstandorte durchgeführt. Dafür werden die stehenden Gewässer und die Fließgewässer zu einem Datensatz zusammengefügt und um die Polygon- oder Polyline-Feature Radien erstellt. Damit soll eine potenzielle Wasserverfügbarkeit im Umkreis zu den natürlichen Wasservorkommen modelliert werden. Als definierte Radien werden 100 m, 250 m, 500 m und 1.000 m festgelegt. Das Ergebnis der Modellierung kann der nachfolgenden Abbildung 20 entnommen werden.

**Legende: Entfernung um die Gewässer in m**

<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:blue; border:1px solid black;"></span> 100 m	<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:lightblue; border:1px solid black;"></span> 250 m - 500 m
<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:lightblue; border:1px solid black;"></span> 100 m - 250 m	<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:yellow; border:1px solid black;"></span> 500 m - 1000 m

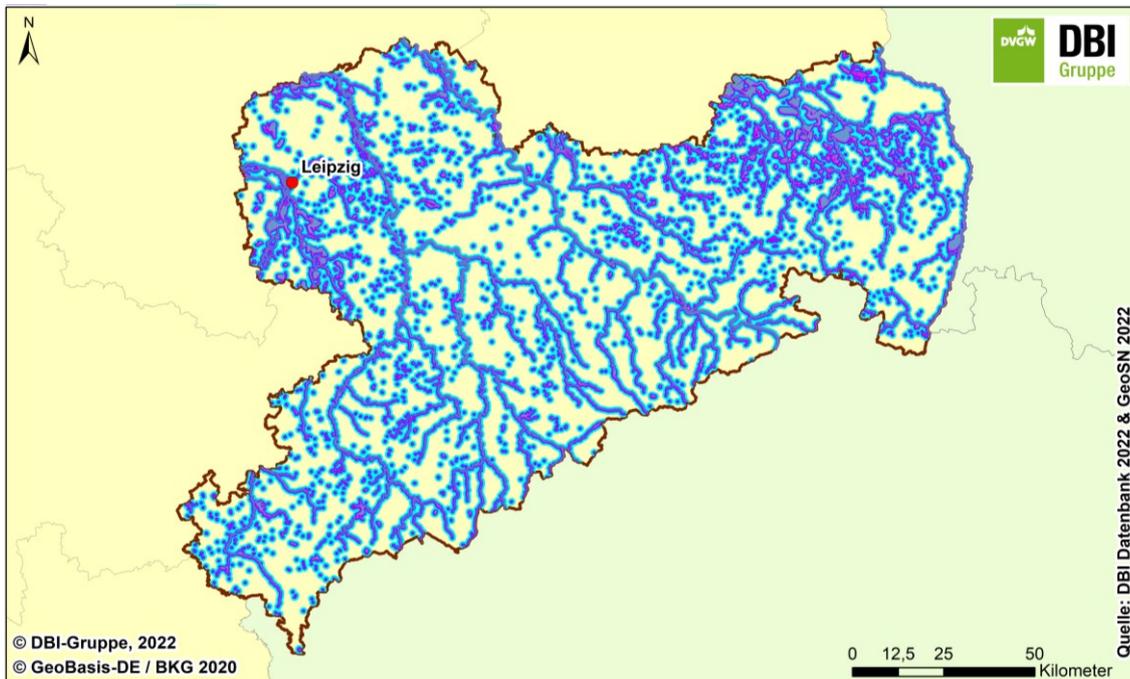


Abbildung 20: Entfernungsanalyse auf Basis der sächsischen natürlichen Wasservorkommen

Es zeigt sich, dass durch die dargestellte Entfernungsanalyse die Regionen identifiziert werden können, die abseits bestehender Wasservorkommen lokalisiert sind. Solche Gebiete sind beispielweise in Nordsachsen sowie nördlich von Leipzig. Ferner zeigt die Grafik, dass die sächsischen stehenden Gewässer und Fließgewässer sowie deren erstellten Einflussflächen in Abhängigkeit der Radien große Teile der Freistaatfläche einnehmen. Die so erstellten Flächen visualisieren in welchen Gebieten Sachsens die Löschwasserversorgung durch bestehende Wasservorkommen zielführend unterstützt werden kann. Solche Gebiete haben keine derartige Dringlichkeit zum Aufbau von weiteren Löschwasserentnahmestellen, die im Projekt untersucht werden sollen. Neben den natürlichen Wasservorkommen ist es bei (Feuerwehr-) Einsätzen üblich auf bestehende künstliche Wasservorkommen zu vertrauen und insbesondere aus dem öffentlichen Trinkwasserversorgungsnetz (Hydranten) Löschwasser zu beziehen. Zu diesem Zweck werden diese im folgenden Kapitel detailliert untersucht.

#### 4.2.2 künstliche Wasservorkommen

Zur Analyse der Standorte der künstlichen Wasservorkommen erfolgt die Auswertung auf Basis der in der OpenStreet Map (OSM) enthaltenen Daten zu Hydranten [17]. In vorangegangenen Kapiteln wurde die OSM-Datenbank detailliert charakterisiert und vorgestellt. Die Einträge, die für die Beurteilung der Verfügbarkeit von künstlichen Wasservorkommen aus dem öffentlichen Trinkwasserversorgungsnetz wesentlich sind, gehen aus der Kategorie der „fire\_hydrant“ inkl. der Geokoordinaten hervor [17]. Für die im Projekt angestrebte Auswertung werden die sächsischen Standorte der Hydranten aus dem Datensatz extrahiert. Nach dem Import in die DBI-GIS-Datenbank erfolgt eine händische Aufbereitung zur Eliminierung von fehlerhaften Datensätzen. Der exportierte Datensatz beinhaltet rund 20.000 Standorte. Für die Entfernungsanalyse, vergleichbar der natürlichen Wasservorkommen, werden die definierten Radien erneut auf 100 m, 500 m und 1.000 m festgelegt. Abweichend der Nutzung der Radien der natürlichen Wasservorkommen findet aufgrund der räumlichen Nähe von Hydranten zueinander keine Verwendung des Radius von 250 m statt. Dies begründet sich in den sehr komplexen Geometrien, die bei der folgenden Überlagerung entstehen. Die genutzten Standorte inkl. deren Entfernungsanalyse sind in der nachfolgenden Grafik visualisiert.

**Legende: Entfernung um die Hydranten in m**

< 100 m     100 m - 500 m     500 m - 1000 m

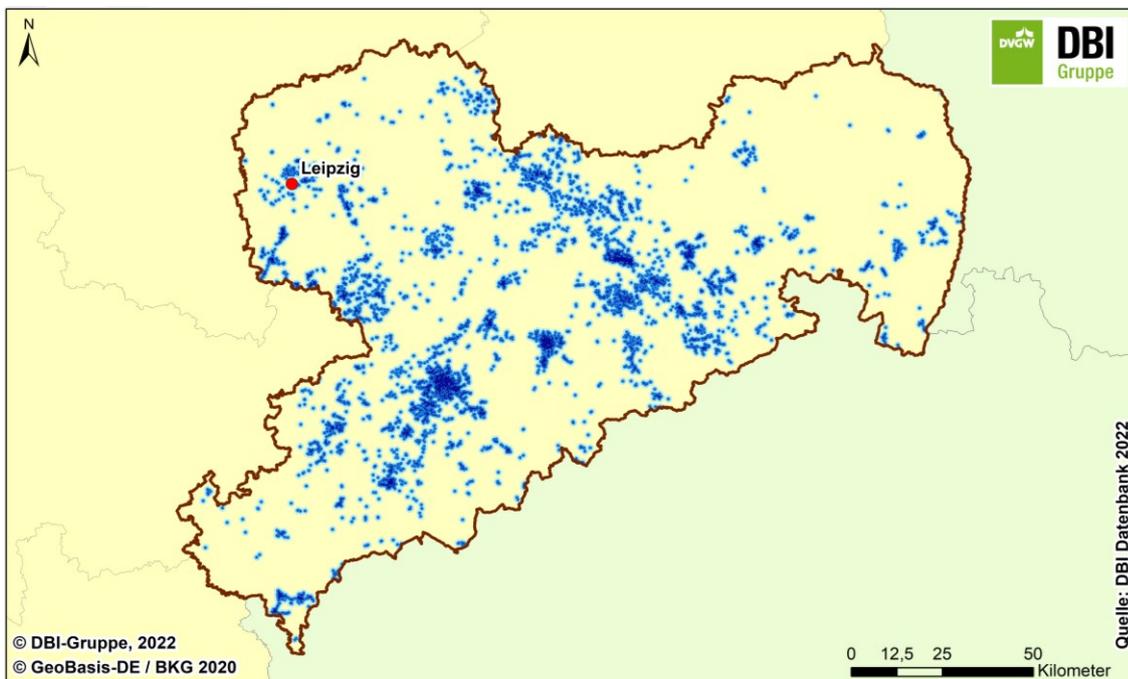


Abbildung 21: Entfernungsanalyse auf Basis der sächsischen künstlichen Wasservorkommen [17]

Abbildung 21 zeigt, dass die frei verfügbaren Daten der OSM-Datenbank wahrscheinlich Datenlücken aufweisen. Primär in den sächsischen Großstädten kann dagegen eine gute Datenlage attestiert werden. Die Verschneidung der Ergebnisse mit den Waldgebieten erfolgt im Kapitel 5.

### 4.3 Infrastrukturdaten

Zur Analyse der Erreichbarkeit einer gefährdeten Wald- oder Schutzgebietsfläche wird neben der Nähe zu den sächsischen Feuerwehrstandorten auch das öffentliche Straßennetz in die Betrachtung mit einbezogen. Zu diesem Zweck werden die Daten des sächsischen DLM 50 zu den Straßen mittels der Objektbezeichnung „ver\_01\_f“ in die DBI GIS Datenbank importiert [3]. Teil der Geodaten (AX\_Strasse) sind neben den Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreis- sowie Gemeindestraßen, auch weitere befestigte Straßen, wie die sogenannte Objektklasse der Hauptwirtschaftswege (AX\_Straßenachse mit der Widmung 5211). Als Hauptwirtschaftsweg definiert sich „ein Weg mit fester Fahrbahndecke zur Erschließung eines oder mehrerer Grundstücke, der für den Kraftverkehr zu jeder Jahreszeit befahrbar ist.“ [3]. Beide Klassen ermöglichen somit die Nutzung durch die sächsische Feuerwehr, da sie mindestens mit 3,5 t Gesamtgewicht befahrbar sind. Dieser Datensatz wird erneut mittels GIS-basierter Entfernungsanalyse mit den definierten Radien von 50 m, 100 m und 200 m durchgeführt. Das Ergebnis der Modellierung ist in der nachfolgenden Abbildung 22 ersichtlich.

**Legende: Entfernung um das Straßennetz in m**

■ 50 m    ■ 50 m - 100 m    ■ 100 m - 200 m

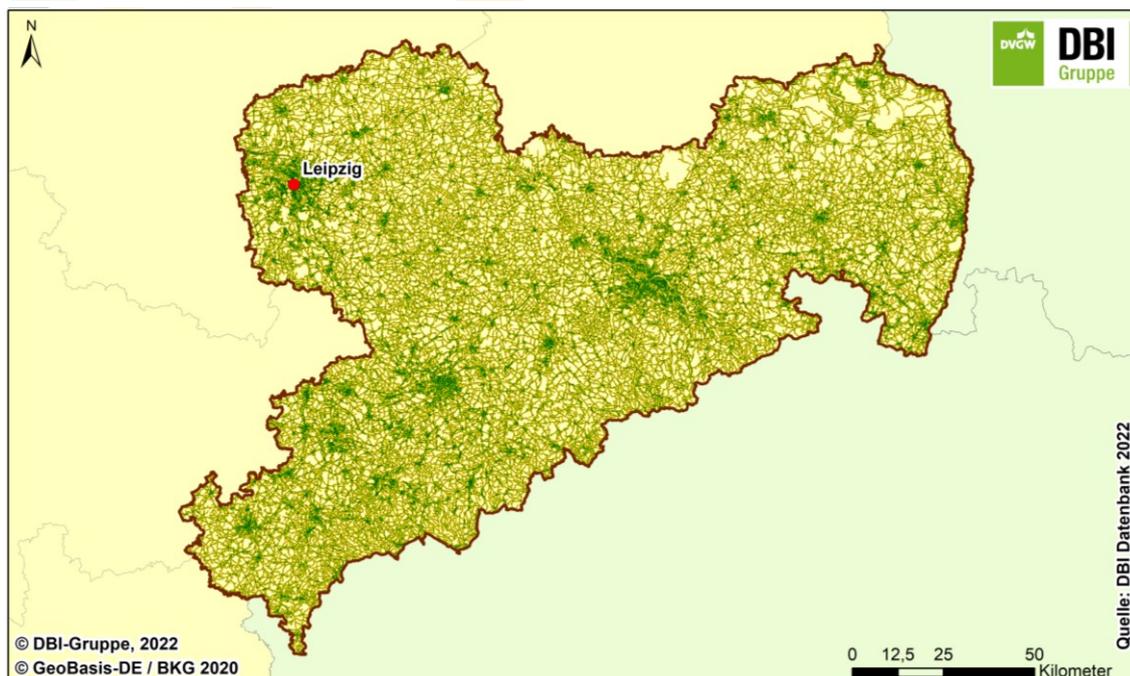


Abbildung 22: Entfernungsanalyse auf Basis des sächsischen Straßennetzes [3]

Aus der Abbildung 22 geht hervor, dass es eine gute bis sehr gute infrastrukturelle Abdeckung durch das öffentliche Straßennetz in Sachsen gibt. Die sächsischen Großstädte stechen farblich aus der Grafik hervor (grüne Färbung). Die größten nicht oder sehr schlecht erreichbaren Flächen sind die Königsbrücker Heide sowie die Braunkohlegebiete in der Region Boxberg.

Ziel der Analyse ist es, die Waldflächen zu identifizieren, welche trotz der Kombination der verschiedenen Straßentypen (siehe oben) in einem Umkreis von 200 m schwer oder nicht erreichbar sind. Die Optionen der Befahrbarkeit sind durch das zulässige Gesamtgewicht der Einsatzfahrzeuge begrenzt, weshalb auch weitere, bspw. land- oder forstwirtschaftlich genutzte Straßen oder Wege nicht Teil der Betrachtung sind. Die Verschneidung der Ergebnisse mit den Waldgebieten erfolgt im Kapitel 5.

#### 4.4 Tourismus / Faktor Mensch

In Sachsen werden seit vielen Jahren Statistiken zur Anzahl und Entstehung von Waldbränden geführt. Die meisten Waldbrandereignisse gab es im Jahr 1992 mit der größten Brandkatastrophe bei Weißwasser (Sachsen). In diesem Kontext fand in Vorbereitung der Aufgabenstellung des LöschH<sub>2</sub>O sowie in der Erstellung der Skizze eine literaturbasierte Recherche statt. Dabei zeigt eine statistische Auswertung zum Thema Waldbrände in den letzten Jahren, dass der durchschnittliche Waldbrand fahrlässig von einem Menschen verursacht wird [16]. Nur rund 4 % der Waldbrände entstehen in Folge natürlicher Faktoren, wie beispielsweise einem Blitzschlag. Aus diesem Grund ist es notwendig, den Faktor Mensch als wesentliche Brandursache zielführend zu analysieren.

Der Freistaat Sachsen führt einen jährlichen statistischen Bericht über ausgewählte Strukturdaten, welcher frei verfügbar online veröffentlicht wird [19]. Da sich im Zuge der Corona-Pandemie die wesentlichen touristischen Aktivitäten zum Ruhen gekommen sind, stützt sich die Analyse auf vergangene Daten aus dem Vor-Corona Jahr 2019. Im Kontext des Tourismus gibt eine gemeindespezifische Untersuchung über die jeweilig angebotenen Beherbergungseinrichtungen, angebotene Gästebetten, Ankünfte sowie Übernachtungen in Sachsen. In Summe weist die Statistik für Sachsen für das Jahr 2019 mehr als 2.000 geöffnete Beherbergungseinrichtungen, die mehr als 125.000 Gästebetten anbieten, aus. Ferner werden rund 4,8 Mio. Ankünfte von Touristen erfasst, die zu mehr als 13,5 Mio. Übernachtungen im Freistaat führen. Auf Basis der Ankünfte je Gemeinde wird ein, bezogenen auf die Gemeindefläche, spezifischer Wert in angereiste Touristen pro Hektar modellhaft abgebildet. In einem zweiten Analyseschritt werden die aus der nachfolgenden Tabelle 6 quantitativen Bewertungen je Gemeinde vergeben.

Tabelle 6: Charakterisierung der Legendeneinträge für die Bewertung des Tourismus/Faktor Mensch

Legendenbezeichnung Touristenaufkommen	keine Aussage	gering	mittel	hoch
Touristen pro Hektar	keine Erfassung / keine Angabe	≤ 1	1 bis 5	> 5

Die Auswertung der Daten zeigt die untenstehende Abbildung 23.

### Legende

keine Aussage    gering    mittel    hoch

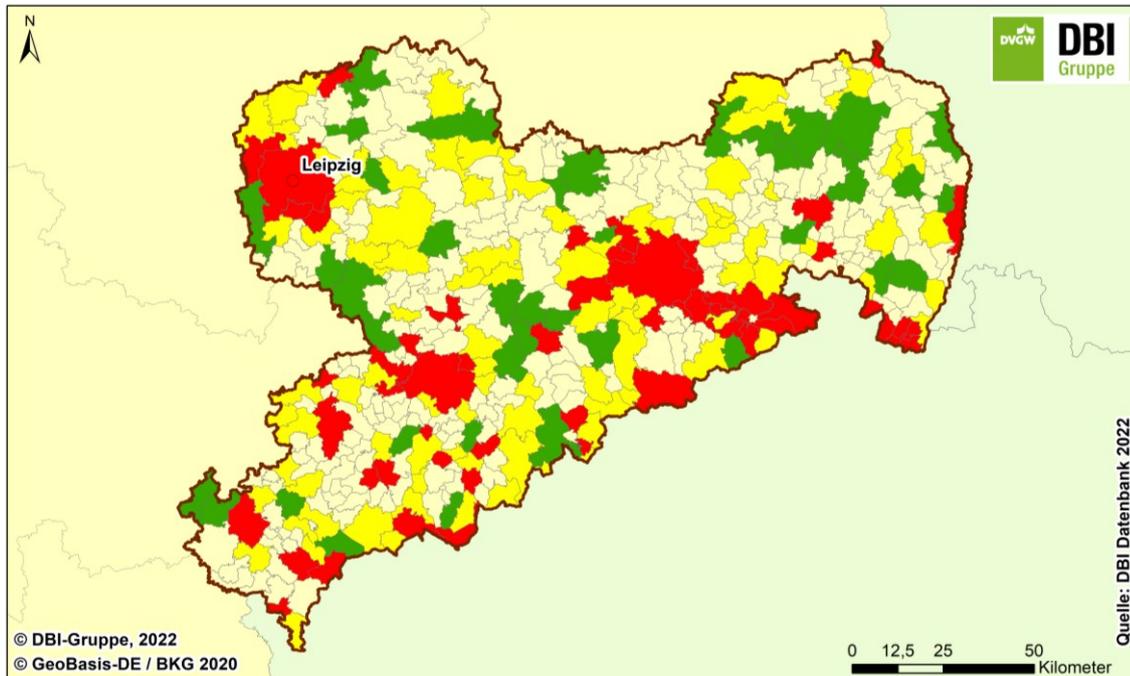


Abbildung 23: Auswertung der Intensität von touristisch Ankünften je Gemeinde in Sachsen, Daten nach [19]  
Die Daten der touristischen Statistik zeigen die sächsischen Hotspotgemeinden, in denen, gemäß der Berechnung, viele tägliche touristische Ankünfte pro Flächeneinheit auftreten. Die Grafik veranschaulicht, dass neben den sächsischen Großstädten, wo tendenziell aus diversen Kulturaspekten viele Touristen hinreisen, auch weitere ländlich geprägte Regionen mit ausgedehnten Wald- und Erholungsgebieten intensiv (Legende: „hoch“) bereist werden. In solchen Gebieten, wie beispielsweise der Sächsischen Schweiz, ist die Gefahr eines fählässigen Handels durch den Menschen deutlich höher und hat damit direkte Auswirkungen auf das Waldbrandrisiko. Gemeinden, in denen der Legendeintrag „keine Aussage“ ermöglicht, weist die Statistik entweder keine Daten auf oder es sind keine erfasst worden. Es ist ersichtlich, dass dies für rund die Hälfte aller Gemeinden in Sachsen gilt. Die Verschneidung der Ergebnisse mit den Waldgebieten erfolgt im Kapitel 5.

## 5 GIS-basierte Verschneidung der faktorspezifischen Geodaten mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

In diesem Kapitel erfolgt die GIS-basierte Verschneidung der vorgestellten Geodaten zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten aus dem Kapitel 2 mit den für diese Studie ausgewählten Faktoren der Kapitel 3 & 4. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, Aussagen über das zukünftige oder bestehende Waldbrandrisiko abzuleiten. Aus dieser Bewertung soll dann die abschließende Dringlichkeitsplanung für die zukünftig vorsorgende Löschwasserbedarfsplanung abgeleitet werden.

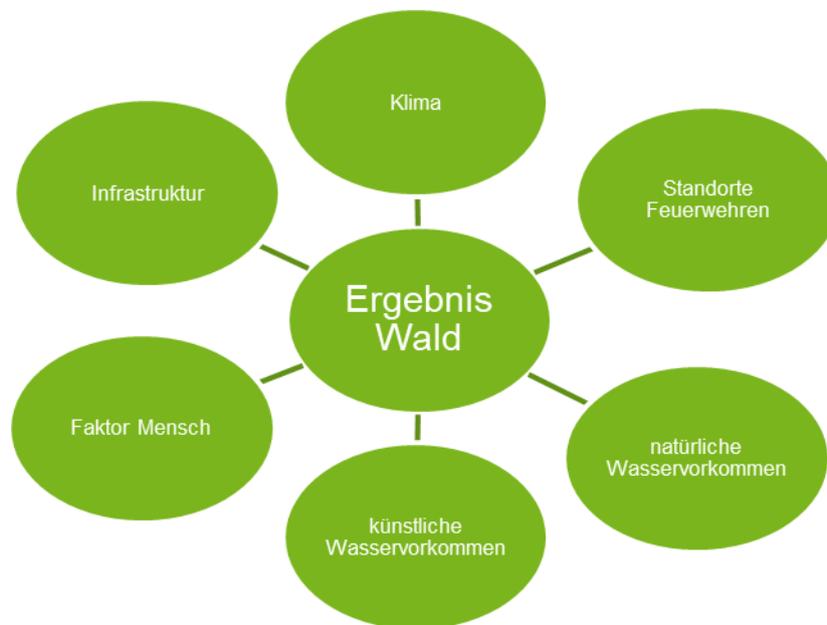


Abbildung 24: Überblick über die betrachteten Einflussfaktoren für den Aufbau der Ergebnismatrix für die Dringlichkeitsplanung

Die Einflussfaktoren werden mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten im GIS überlagert und jede spezifische Wald- oder Schutzgebietsfläche erhält die zuvor modellierten Kennwerte (bspw. die Entfernungsradien). In einem zweiten Schritt erfolgt die quantitative Bewertung anhand einer eigens definierten Charakteristik. Diese wird, je untersuchten Faktor, detailliert in den Unterkapiteln erläutert. Die Bewertung ist immer unter dem Gesichtspunkt des zukünftigen Waldbrandrisikos bzw. der potenziell entstehenden Brandlast oder der Eingriffsgeschwindigkeit durch die Feuerwehr zu interpretieren. Das Wording orientiert sich dabei an einem simplen Ranking: „sehr schlecht“, „schlecht“, „mittel“, „gut“ und „sehr gut“. Um die potenziell gefährdetsten Wald- oder Schutzgebiete, in denen das Waldbrandrisiko zukünftig weiter ansteigt oder bereits sehr hoch ist zu identifizieren, wird detailliertes Kartenmaterial erzeugt.

## 5.1 Auswertung des Faktor Klima

Die Auswertung des Faktors der zukünftigen klimatischen Entwicklungen erfolgt gemäß der bereits definierten Legende, die ableitend aus der Bewertungsmatrix der einzelnen Klimaparameter ausgewiesen wird (Tabelle 4). Das Bewertungssystem basiert auf den qualitativen Einschätzungen zu der Entwicklung der durchschnittlichen Jahrestemperatur, den Hitzetagen, der jährlichen Gesamtniederschlagsmenge sowie den mittleren Windgeschwindigkeiten. Die Ergebnisdarstellungen der Abbildung 13 und Abbildung 14 werden gemeinsam mit dem Geodatensatz zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten (Abbildung 1) überlagert und im Folgenden ausgewertet.

### 5.1.1 Szenario R 4.5

Die GIS-basierte Verschneidung der Wald- und Schutzgebiete mit den Rasterdaten der WEREX VI- Klimamodellierungen kann für das Szenario R 4.5 aus der nachfolgenden Abbildung 25 entnommen werden.

#### Legende

<span style="color: red;">■</span> sehr schlecht	<span style="color: yellow;">■</span> mittel	<span style="color: green;">■</span> sehr gut
<span style="color: orange;">■</span> schlecht	<span style="color: lightgreen;">■</span> gut	

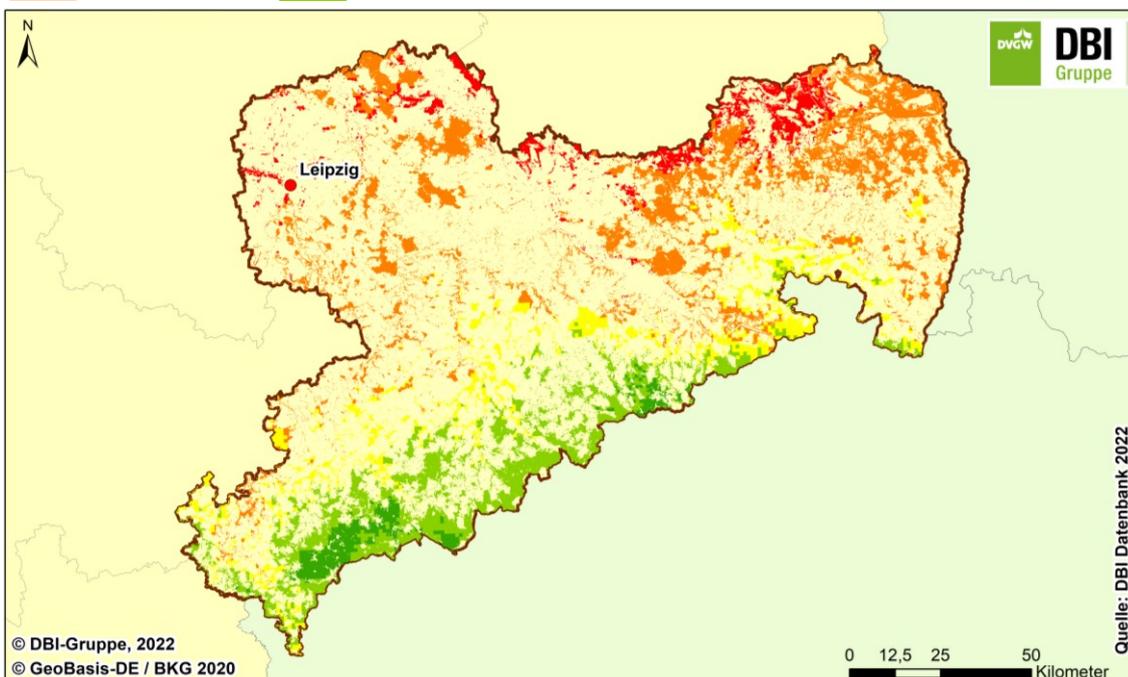


Abbildung 25: Verschneidung und Bewertung des Faktor Klima (Szenario R 4.5) mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

Die Auswertung zeigt, dass die negativen Auswirkungen der zukünftigen Klimaentwicklung sehr große Waldflächen primär in Nordsachsen betreffen. Die Legende ist demnach zu interpretieren als Indikator für beispielsweise „sehr schlechte“ und „schlechte“ klimatische Bedingungen im Kontext

des zukünftigen Waldbrandrisikos. In solchen Gebieten treten in den nächsten Jahren lange und intensive Hitze- und Dürreperioden auf, weshalb die Bewertung als negativ eingestuft wird. Die Grafik zeigt bereits für das Szenario R 4.5, dass große Waldgebiete der Landkreise Görlitz und Bautzen als sehr gefährdete Gebiete mit dem vordringlichen Handlungsbedarf auszuweisen sind. Ferner kann das auch für, flächenmäßig kleiner Gebiete im Nordwesten des Freistaats, attestiert werden (Landkreise Leipzig und Nordsachsen). Regionen, wie die Sächsische Schweiz, in denen es in den vergangenen Jahren große und schwere Waldbrände gegeben hat, stechen auf Basis der Analysen der Klimaparameter (noch) nicht so stark hervor.

### 5.1.2 Szenario R 8.5

Die Auswertung des sehr hohen RCP-Szenarios R 8.5 visualisiert eindrucksvoll wie stark die klimatischen Auswirkungen die nördlichen Wald- und Schutzgebiete treffen können. Die untenstehende Abbildung 26 zeigt den deutlichen Übergang vormals als nur „schlecht“ eingestufter Waldflächen (siehe Abbildung 25), die sich durch die szenarienspezifischen Verschärfungen in die Kategorie „sehr schlecht“ eingliedern. Damit ist rund die Hälfte aller sächsischen Wald- und Schutzgebiete mit negativer klimatischer Tendenz bis 2050 versehen. Besonders deutlich zeigt sich hier das bestehende Nord-Südgefälle in Sachsen.

#### Legende

	sehr schlecht		mittel		sehr gut
	schlecht		gut		

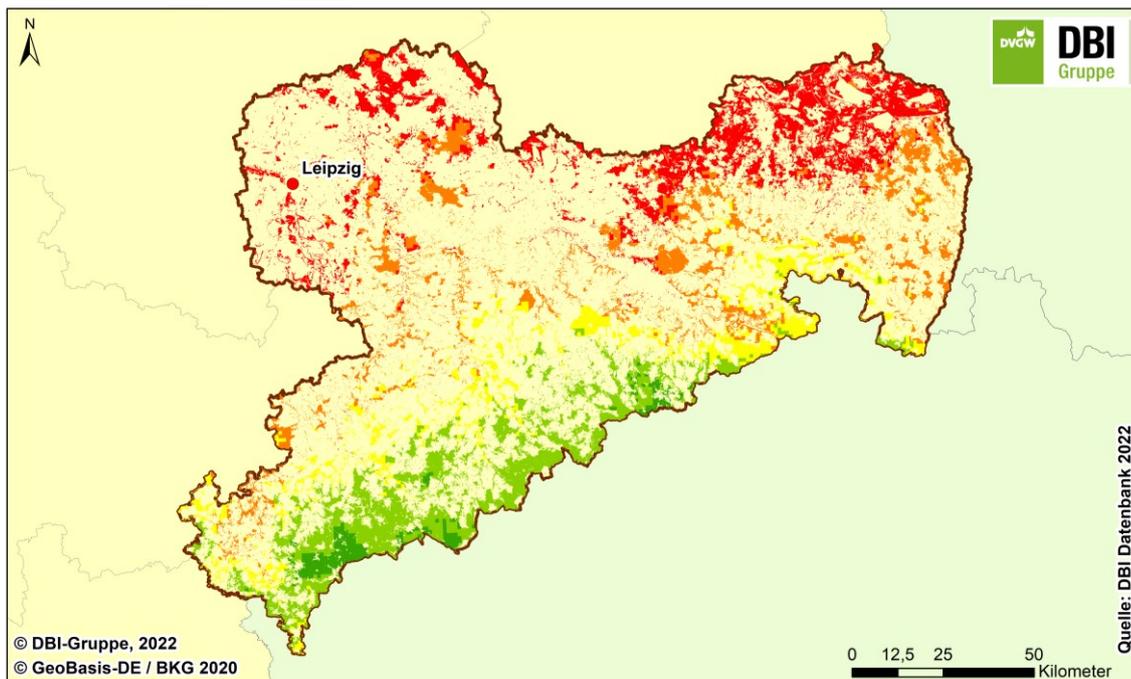


Abbildung 26: Verschneidung und Bewertung des Faktor Klima (Szenario R 8.5) mit den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

## 5.2 Auswertung Standorte der sächsischen Feuerwehren

Die Auswertung des Faktors der Standorte der sächsischen Feuerwehren erfolgt gemäß der Ergebnisdarstellungen der Abbildung 17 und wird gemeinsam mit dem Geodatensatz zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten (Abbildung 1) überlagert und im Folgenden ausgewertet. Das Bewertungssystem basiert auf den qualitativen Einschätzungen zu den Entfernungsradien, die eine Modellierung der Handlungsschnelligkeit/Anfahrtszeit bei einem Waldbrand abbilden sollen. Das Ergebnis des GIS-Modells kann aus der nachfolgenden Abbildung 27 entnommen werden.

### Legende

<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> sehr schlecht	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></span> mittel	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: green; border: 1px solid black;"></span> sehr gut
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></span> schlecht	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black;"></span> gut	

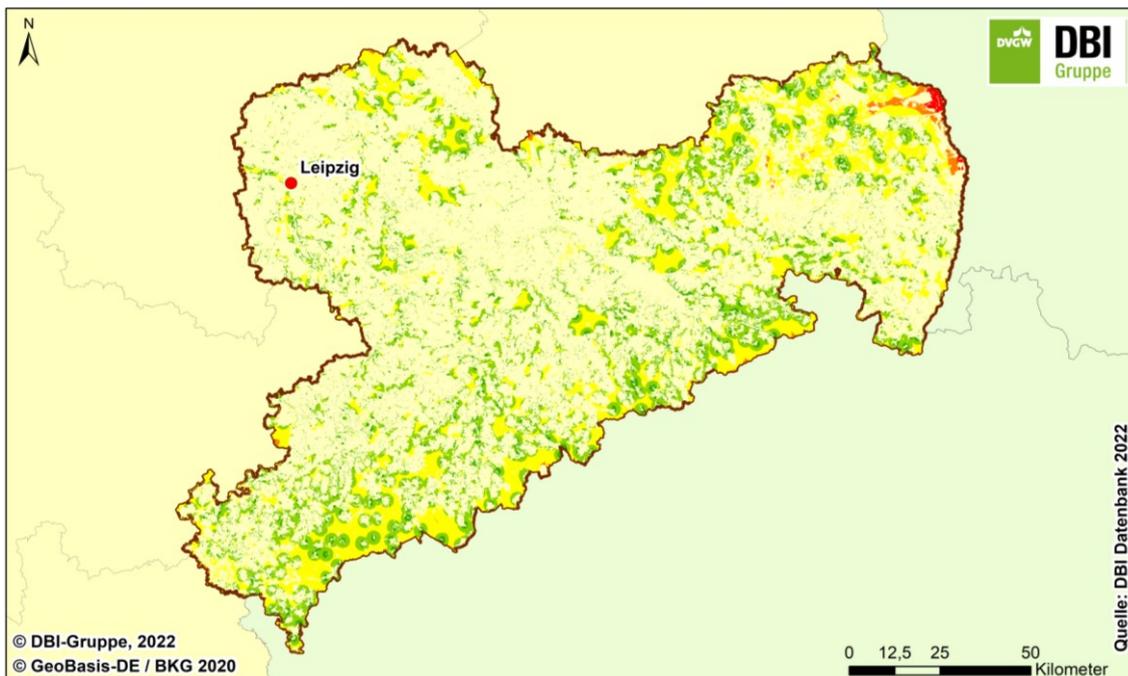


Abbildung 27: Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung der sächsischen Feuerwehrstandorte zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

Die Daten zeigen, dass nur einige wenige Wald- und Schutzgebiete die negative Bewertung „schlecht“ oder „sehr schlecht“ erhalten. Basierend auf den definierten Entfernungsradien werden alle ab 5,0 km bis 7,5 km als „schlecht“ sowie bei Entfernungen > 15 km als „sehr schlecht“ definiert. Diese Wald- oder Schutzgebiete sind derartig weit von dem Standort einer sächsischen Feuerwehr entfernt, dass davon auszugehen ist, dass es sehr lange dauert, bis es zu einem geordneten Löschangriff kommen kann (insb. im Braunkohlerevier Boxberg). Diese quantitativen Aussagen lassen sich nur für die vorliegende Modellierung treffen und können in der Realität und bei tatsächlichen Waldbränden von dieser Analyse abweichen. Die vorliegenden Daten dienen dabei nur als Abschätzung der Entfernung von Einsatzort und den Standorten der Feuerwehren in Sachsen.

## 5.3 Auswertung zu den Wasservorkommen

Neben der Handlungsschnelligkeit wird auch das Thema der Nähe der Wald- und Schutzgebiete zu bestehenden Wasservorkommen analysiert. Damit sollen mögliche Optionen der Löschwasserbereitstellung vor-Ort identifiziert werden, um solche (Wald-)Gebiete auszuwählen, die über keine Wasserquellen und somit vordringlichen Bedarf über zukünftige Löschwasserentnahmestellen verfügen. Diese Bewertung ist ein wesentlicher Baustein für die Dringlichkeitsplanung.

### 5.3.1 natürliche Wasservorkommen

Die Auswertung der natürlichen Wasservorkommen erfolgt gemäß der Ergebnisdarstellungen der Abbildung 20 und wird gemeinsam mit dem Geodatensatz zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten (Abbildung 1) überlagert und im Folgenden ausgewertet. Das Bewertungssystem basiert auf den qualitativen Einschätzungen zu den Entfernungsradien um die Gewässer. Das Ergebnis der GIS-Arbeiten kann aus der nachfolgenden Abbildung 28 entnommen werden.

#### Legende

<span style="color: red;">■</span> sehr schlecht	<span style="color: yellow;">■</span> mittel	<span style="color: green;">■</span> sehr gut
<span style="color: orange;">■</span> schlecht	<span style="color: lightgreen;">■</span> gut	

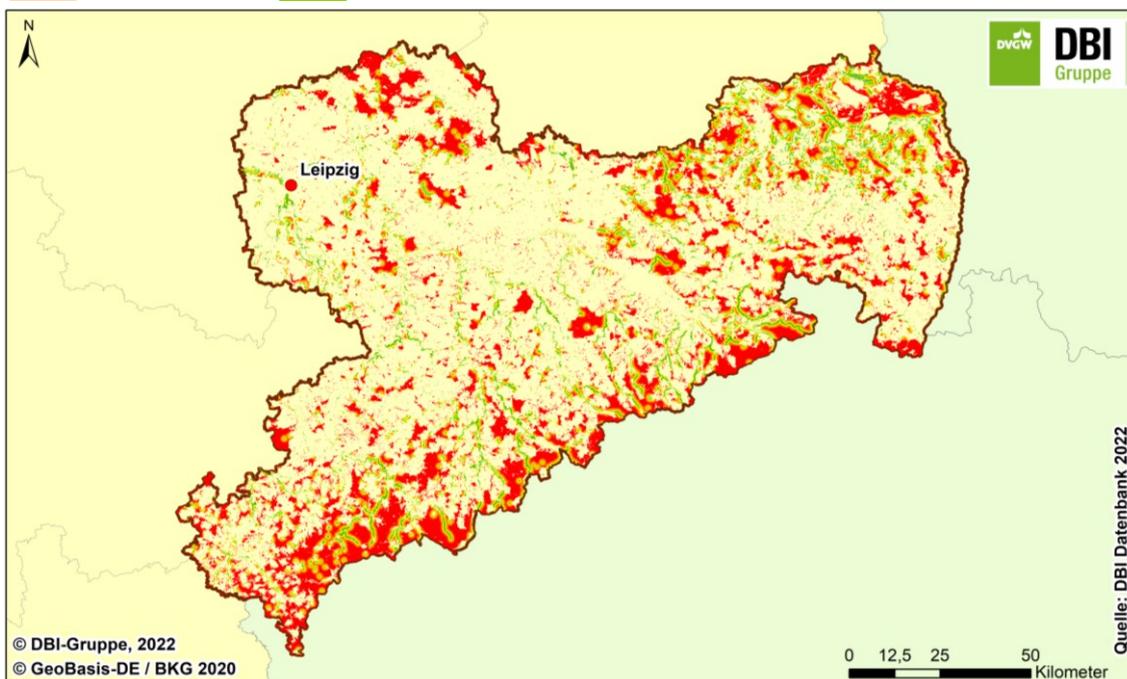


Abbildung 28: Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung von natürlichen Wasservorkommen zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

Die modellierten Daten auf Basis der natürlichen Wasservorkommen zeigen, dass mehr als die Hälfte der Wald- und Schutzgebiete in Sachsen die negative Bewertung „schlecht“ oder „sehr schlecht“ erhalten. Basierend auf den definierten Entfernungsradien wird ab einer Entfernung von

mehr als 1 km zwischen eines natürlichen Wasservorkommens und einer Waldfläche die Bewertung „sehr schlecht“ vergeben. Basis der quantitativen Einordnung sind Gespräche mit Fachexperten, die das Vorhaben inhaltlich unterstützt haben. Wegstrecken von bis zu 1 km werden in der Praxis als realistisch für den leitungsgebundenen Aufbau einer Löschwasserversorgung angenommen. Die Abbildung 28 zeigt, welche Waldflächen keine bestehenden natürlichen Wasservorkommen in räumlicher Nähe haben (rote Färbung). Es ist zu erkennen, dass nur wenige Flüsse in Sachsen durch die großen Waldgebiete fließen. Die Option der Löschwasserversorgung aus den natürlichen Wasservorkommen ist also als begrenzt einzustufen. Vergleichbar den methodischen Ansätzen für die Auswertung der natürlichen Wasservorkommen erfolgt ein homogenes Vorgehen bei den künstlichen Wasservorkommen.

### 5.3.2 künstliche Wasservorkommen

Im Kontext der Analyse zu den Standorten von Hydranten in Sachsen, zeigt sich ein zu erwartendes Bild, wie der nachfolgenden Kartendarstellung entnommen werden kann. Das öffentliche Trinkwasserversorgungsnetz ist primär in den städtisch geprägten Regionen lokalisiert und demnach ist die Option der Löschwasserentnahme nur im städtischen Bereich eine wesentliche Option. Im Kontext der Löschwasserbereitstellung in direkter Nähe zu Wald- und Schutzgebieten (< 1 km) stellen Hydranten nur eine untergeordnete Alternative dar. Abbildung 29 untermauert mittels der roten Charakterisierung das eindeutige Bild.

#### Legende

gut
  mittel
  schlecht
  sehr schlecht

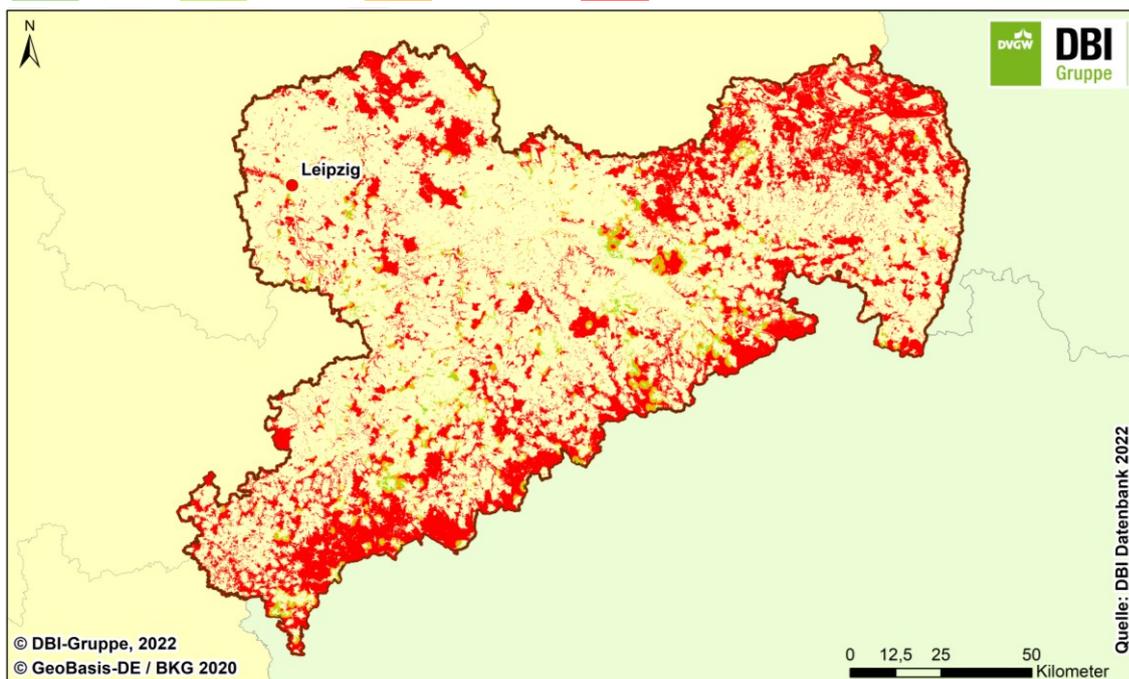


Abbildung 29: Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung von künstlichen Wasservorkommen zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

## 5.4 Auswertung der Infrastrukturdaten

Ein weiterer diskutierter Aspekt mit direktem Einfluss auf das zukünftige Waldbrandrisiko bzw. ein Faktor, der die Einsatzgeschwindigkeit beeinflusst, sind die Infrastrukturdaten Sachsens. Die Erreichbarkeit der sächsischen Wald- und Schutzgebiete erfolgt gemäß der Ergebnisdarstellung der Abbildung 22 und wird gemeinsam mit dem Geodatensatz zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten (Abbildung 1) überlagert und im Folgenden ausgewertet. Das Bewertungssystem basiert folgerichtig erneut auf den qualitativen Einschätzungen zu den Abständen des öffentlichen Straßennetzes zu den Wald- und Schutzgebieten. Die Analyse trägt dem Fakt Sorge, dass bei einem Brandereignis sowohl Personal als auch die Löschtechnik bestmöglich, über kurze und geeignete Straßen und Wege, zum Einsatzort gelangt. Abweichend von der bisherigen Auswertung werden für die Infrastrukturdaten nur zwei Kategorien bzw. Legendeneinträge definiert. Die Vorgehensweise begründet sich in der enormen Datenmenge und -komplexität. Die Kategorie „schlecht“ definiert sich ausgehend von den Analysen aus Kapitel 4.3 ab einem Entfernungsradius von mehr als 200 m. Damit werden in der Auswertung die sächsischen Wald- und Schutzgebiete ausgewiesen, die sich aufgrund unwegsamen Geländes vorrangig für neue Löschwasserentnahmestellen eignen. Die Ergebnisse der Modellierung können der nachfolgenden Abbildung 30 entnommen werden.

### Legende

■ gut ■ schlecht

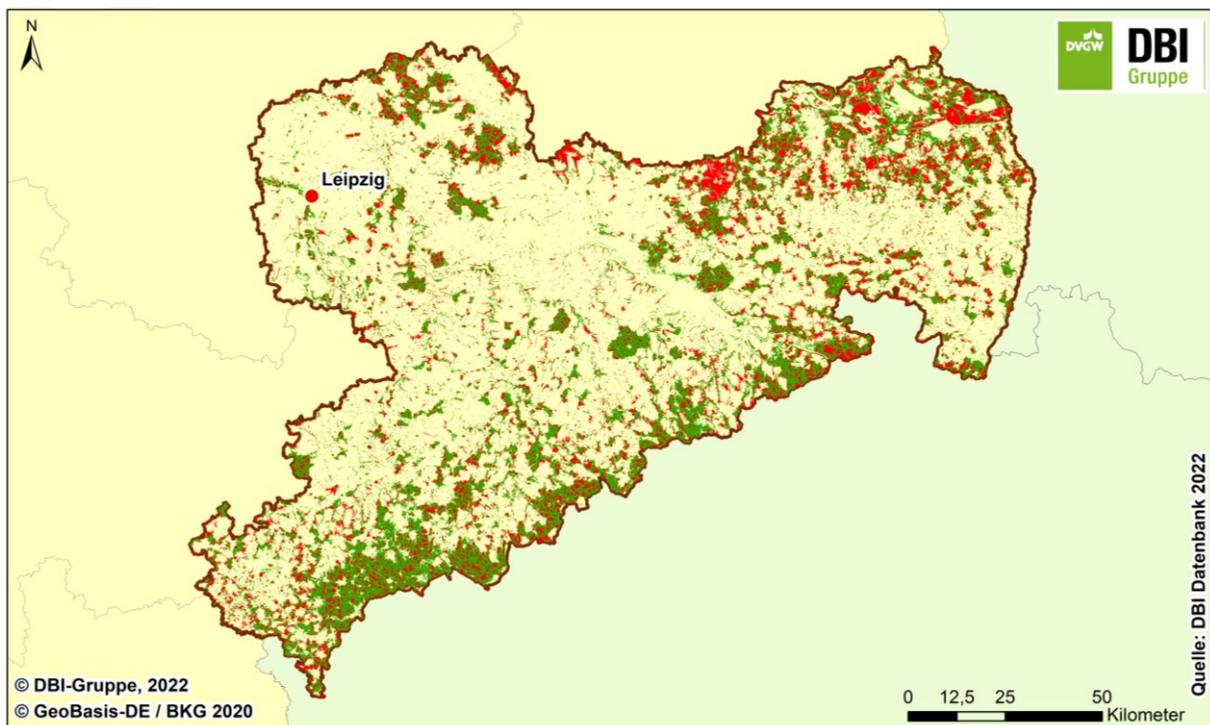


Abbildung 30: Verschneidung und Bewertung des Faktors räumliche Entfernung des öffentlichen Straßennetzes zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten

Die Geodaten zeigen, dass sich in Sachsen bei der Erreichbarkeit ein ungleichmäßiges Bild ergibt. Einerseits gibt es, primär in den nördlichen Wald- und Schutzgebieten, große Waldgebiete mit sehr schlechter Erreichbarkeit bzw. Verfügbarkeit von befahrbaren Straßen / Wegen (rote Färbung). Andererseits gibt es auch große Waldgebiete, wie beispielsweise den Tharandter Wald, die durch ihren „schachbrettartigen“ Aufbau über sehr gute Anbindungsoptionen verfügen. Im Wesentlichen können als besonders gefährdete Regionen die Königsbrücker Heide, die Braunkohlegebiete der Region Boxberg sowie die Sächsische Schweiz identifiziert werden.

## 5.5 Auswertung des Tourismus / Faktor Mensch

Der letzte, in diesem Projekt diskutierte Aspekt mit direktem Einfluss auf das zukünftige Waldbrandrisiko bzw. ein Faktor, der das Auftreten sowie Eintreten von Waldbränden negativ beeinflusst, ist der Tourismus oder der Faktor Mensch. Als wesentliche Ursache von Waldbränden in den sächsischen Wald- und Schutzgebieten erfolgt die Auswertung gemäß der Ergebnisdarstellung der Abbildung 23 und wird gemeinsam mit dem Geodatenatz zu den sächsischen Wald- und Schutzgebieten (Abbildung 1) überlagert und im Folgenden ausgewertet.

Die Differenzierung der Legende erfolgt ausgehend von den Analysen aus Kapitel 4.4 in die vier dargestellten Kategorien bzw. Legendeneinträge. Die Vorgehensweise begründet sich in der vorliegenden Datenstruktur der touristischen Statistiken des Freistaats Sachsen. Die Kategorien definieren sich auf Basis der flächenspezifischen touristischen Ankünfte je Gemeinde. Damit werden für den Legendeneintrag „schlecht“ eine Ankunftsintensität von 5 Touristen pro Hektar und Jahr ausgewiesen. Die Einschätzung erfolgt auf Basis quantitativer Einordnung seitens der Studierendersteller. Die Ergebnisse der Modellierung können der nachfolgenden Abbildung 31 entnommen werden.

### Legende

<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> schlecht	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black;"></span> gut
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></span> mittel	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: green; border: 1px solid black;"></span> keine Aussage

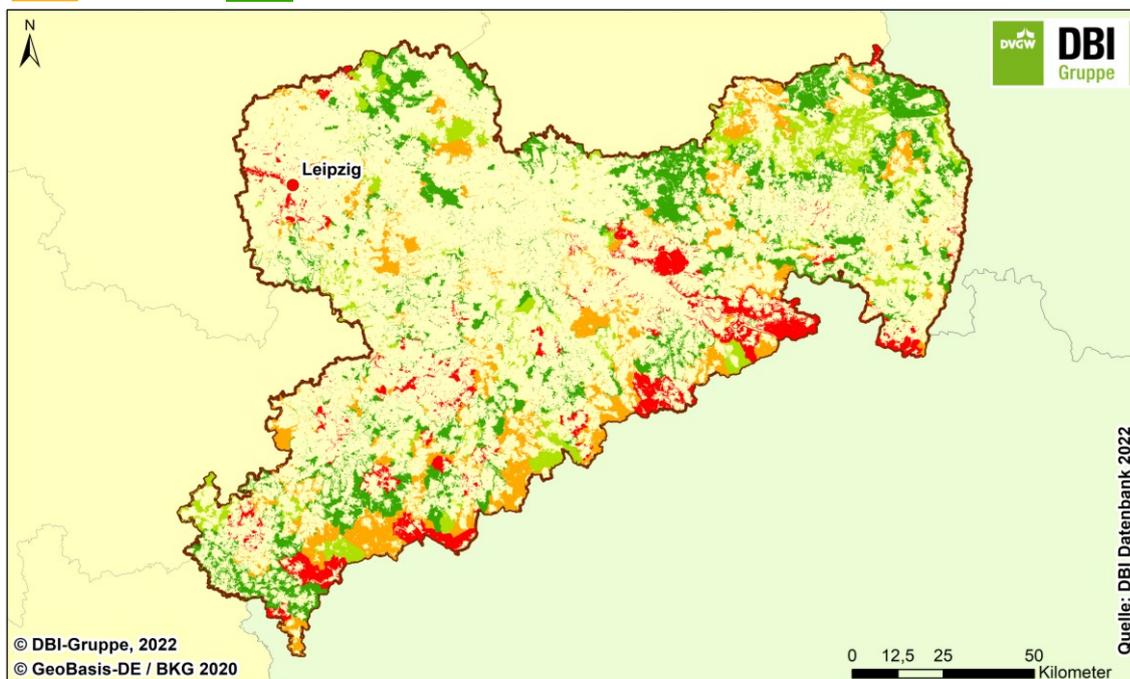


Abbildung 31: Verschneidung und Bewertung des Faktors Tourismus / Mensch auf die sächsischen Wald- und Schutzgebiete

Die Geodaten zeigen ein, im Vergleich zu den anderen Auswertungen der Faktoren, differenziertes Bild für die sächsischen Wald- und Schutzgebiete. Große Teile der nordsächsischen Wälder weisen

eine positive Bewertung auf und sind auf Basis der Legendenfarben „grün“ und „hellgrün“ für das zukünftige Waldbrandrisiko nicht so stark gefährdet. Im Kontext der gefährdeten Wald- und Schutzgebiete zeigt die Bewertung „schlecht“ deutlich mehr Gebiete in der Grenzregion zu Tschechien sowie entlang der Elberegion bis hin zu Sächsischen Schweiz. Hier sind solche Regionen, die vormals als touristische Hotspot-Gemeinden identifiziert worden sind, dargestellt. Das Zusammenspiel von vielen (Tages-)Touristen, insbesondere für den touristischen Zweck Wandern und Erholung, bezogen auf eine geringe Fläche, erhöht das Risiko von Waldbränden durch unachtsames Handeln. In solchen Gebieten muss eine vorsorgende Planung von Löschwasserentnahmestellen zielführend diskutiert werden, um negative Auswirkungen auf die dortigen Biotope bestmöglich abzumildern oder gar abwenden zu können.

## 6 Aufbau einer Bewertungsmatrix für die Interpretation der Ergebnisse sowie der Dringlichkeitsplanung

Im Kapitel der Ergebnisinterpretation werden die Erkenntnisse und Auswertungen der Faktoren aus Kapitel 5 zusammengeführt. Zu diesem Zweck wird im Rahmen der Bearbeitung eine Bewertungsmatrix auf Basis der verschiedenen Kategorien für die Faktoren aufgebaut. Dabei werden die quantitativen Bewertungen, die sich negativ auf das Waldbrandrisiko bzw. die potenzielle Waldbrandlast auswirken, selektiert und via GIS-Modell für jedes Wald- und Schutzgebiet in Sachsen spezifisch ausgewertet. In einem weiteren Schritt erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse und die Auswertung des Kartenmaterials. Die Auswertung basiert auf der abschließenden Dringlichkeitsplanung für die Errichtung von Löschwasserentnahmestellen. Dabei wird die Dringlichkeitsplanung auf Basis der Anzahl der negativen Auswirkungen der Faktoren abgeleitet. Die Flächen der Wald- und Schutzgebiete werden einem Ranking und einer individuellen Charakterisierung unterzogen. Die Auswertung erfolgt auf administrativer Ebene der Gemeinden.

### 6.1 Entwicklung der Bewertungsmatrix und Durchführung eines Rankings

Im Zuge der Auswertungen aus Kapitel 5 wird für jeden Einflussfaktor des Projekts LöschH<sub>2</sub>O eine Bewertung über die negativen Auswirkungen der Faktoren auf das Waldbrandrisiko bzw. die potenzielle Waldbrandlast abgeleitet. Die Zielstellung des Projekts ist es, die sächsischen Wald- und Schutzgebiete zu identifizieren, die das größte Risiko aufweisen und damit zum vordringlichen Handlungsbedarf gehören. Zu diesem Zweck werden die in Tabelle 7 aufgeführten Bewertungen für die Ergebnisdarstellung und Dringlichkeitsplanung via Skript ausgewertet.

Tabelle 7: Bewertungsmatrix für die Dringlichkeitsplanung

Faktor	Bewertung
Klima	„sehr schlecht“
Standorte Feuerwehren	„schlecht“ & „sehr schlecht“
Infrastruktur	„schlecht“
natürliche Wasservorkommen	„sehr schlecht“
künstliche Wasservorkommen	„sehr schlecht“
Tourismus / Faktor Mensch	„schlecht“

Ziel des Modells ist es, je Faktor die obenstehenden negativen Bewertungen zu zählen und spezifisch für jedes der sächsischen Wald- und Schutzgebiete zusammenzuführen. Die selektierten Bewertungen je Faktor sind in der Tabelle 7 dargestellt und zeigen jeweils die negativste Bewertung aus dem Kapitel 5. Lediglich bei der Auswertung zu den Standorten der sächsischen Feuerwehren werden die beiden negativen Bewertungen „schlecht“ und „sehr schlecht“ ausgewählt. Das erstellte Skript wertet anschließend die Summe der negativen Faktoren aus und ordnet die Zahlenwerte der Größe nach.

Das Ergebnis der Dringlichkeitsplanung wird auf Basis von Dringlichkeitsstufen (Anzahl der Bewertung „schlecht“) erarbeitet. Zu diesem Zweck werden die sächsischen Wald- und Schutzgebiete selektiert, die von den sechs Faktoren fünf- beziehungsweise viermal eine negative Bewertung aufweisen und damit als solche mit vordringlichem Handlungsbedarf verstanden werden. Die Auswertung erfolgt im GIS flächenkonkret, wird jedoch für die grafische Auswertung als anteilige Bedarfsfläche (Anteil der Fläche mit dringlichem Handlungsbedarf) bezogen auf die jeweilige Waldfläche innerhalb einer Gemeinde berechnet und ausgewertet. Dieses Vorgehen gewährleistet die Identifikation des tatsächlichen Bedarfs für weitere Löschwasserentnahmestellen, da der vordringliche Bedarf direkt bezogen auf die Waldfläche anteilig bestimmbar ist. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Kapitel 6.2 dargestellt.

## 6.2 Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung des zukünftigen Löschwasserbedarfs

Die Auswertungen der Ergebnisse erfolgt einerseits grafisch mittels bekannter GIS-Kartendarstellungen sowie im Detail als tabellarische Auswertung. Ferner müssen auf Grund der Bewertungsmatrix aus Tabelle 7 zwei Auswertungen aufgrund der unterschiedlichen betrachteten Klimaszenarien R 4.5 und R 8.5 angestellt werden. Wie eingangs beschrieben, werden die flächenkonkreten Wald- und Schutzgebiete als Anteil der Fläche mit dringlichem Handlungsbedarf bezogen auf die jeweilige Waldfläche innerhalb der Gemeinde ausgewertet.

### Klimaszenario R 4.5

Die GIS-basierte Ergebnisdarstellung der sächsischen Wald- und Schutzgebiete mit den Rasterdaten der WEREX VI- Klimamodellierungen aus der Abbildung 13 können für das Szenario R 4.5 aus der nachfolgenden Abbildung 32 entnommen werden.

#### Legende

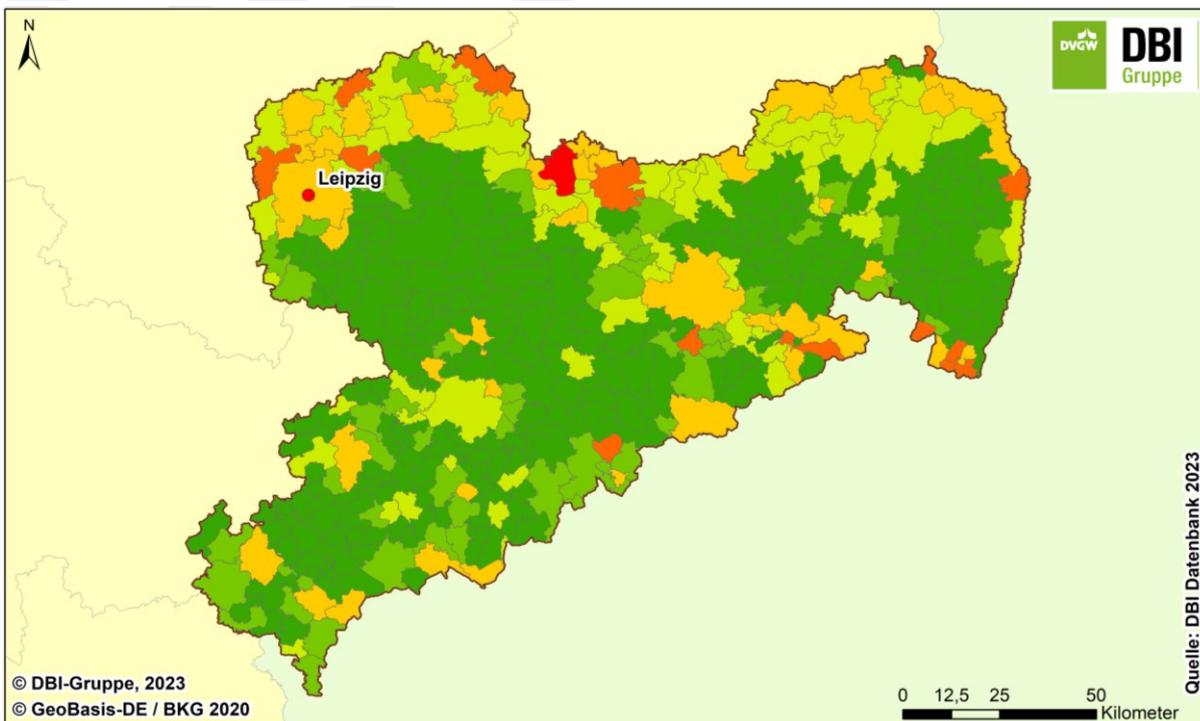
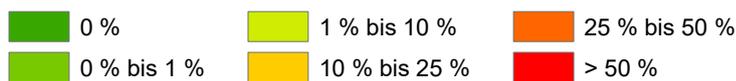


Abbildung 32: Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung bezogen auf die Waldfläche innerhalb der Gemeinde auf Basis des Klimaszenario R 4.5 für die sächsischen Wald- und Schutzgebiete

Die Auswertung zeigt solche Gemeinden, die mit den negativen Auswirkungen der zukünftigen Klimaentwicklung, unter Beachtung der weiteren Faktoren, große Anteile mit Waldflächen mit hohem Waldbrandrisiko besitzen. Die Legende ist demnach zu interpretieren, welchen Anteil die gefährdeten Waldflächen an der gesamten Waldfläche der Gemeinde aufweist. Ausgewiesene

Gemeinden werden im Kontext der Aufgabenstellung als vordringlicher Bedarf identifiziert und hier sollten aus Sicht der Studienersteller spezifische Waldbrandkonzeptionspläne aufgestellt werden, um die Löschwasservorsorge zielführend auf die zukünftigen klimatischen Bedingungen anzupassen. Aus der Kartendarstellung der Abbildung 32 gehen die Gemeinden farblich hervor. Auf Basis der bisherigen Auswertungen aus Kapitel 5 konnten die nordsächsischen bewaldeten Gebiete bereits als besonders gefährdet ausgewiesen werden. Es erscheint logisch, dass diese sich auch bei der Zusammenfassung farblich so darstellen. Ferner weisen auch die Elbregion bis in die Sächsische Schweiz sowie die südlichen Wälder in der Region um das Dreiländereck große Anteile an bedrohten Waldgebieten auf. Im Vergleich zu den bestehenden Waldbrandgefahrenklassen, die der Sachsenforst veröffentlicht (siehe Abbildung 3), kann auf Basis der Ergebnisse dieser Studie ein vergleichbares Fazit für die „hohe Waldbrandgefahr“ gezogen werden. Abweichend von der klaren Nord-Süd-Trennung der Waldbrandgefahrenklassen weisen die Ergebnisse des LöschH<sub>2</sub>O auch Gebiete mit hoher Gefahr aus, die südlicher in Sachsen (Sächsische Schweiz, Zittau, Erzgebirgsregion) liegen. Die Gemeinden mit den größten Anteilen (> 25 %) sind über Sachsen verteilt. Als potenziell gefährdetste Gemeinde mit einem Anteil von > 50 % wird die Gemeinde Zeithain (dunkelrote Färbung) ausgewiesen. Ergänzend weisen ebenso die Gemeinden Beilrode, Bad Düben, Bad Muskau, Johnsdorf und Schkeuditz im Szenario R 4.5 große Anteile auf. In diesen Gemeinden sollten zusätzliche Löschwasserentnahmestellen gefördert und installiert werden. In jedem Falle bedarf es hier, auf Basis der vorliegenden Ergebnisse, einer Detailplanung inkl. ortskonkreter Standortanalyse.

Die detaillierte Flächenauswertung der Dringlichkeitsplanung erfolgt hinsichtlich der Anzahl der Flächen sowie deren Gesamtfläche für die einzelnen Stufen. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 8 gelistet.

Tabelle 8: Detailauswertung der identifizierten Waldflächen auf Basis des Klimaszenarios R 4.5

		Klimaszenario	R 4.5
Dringlichkeit	Stufe 5	Fläche (Gesamt in km <sup>2</sup> )	4,7
		Anzahl der Waldflächen (Gesamt)	64
		Anzahl der Waldflächen (> 1 km <sup>2</sup> )	1
		Anzahl der Waldflächen (> 1 ha)	28
	Stufe 4	Fläche (Gesamt in km <sup>2</sup> )	254,1
		Anzahl der Waldflächen (Gesamt)	2.285
		Anzahl der Waldflächen (> 1 km <sup>2</sup> )	37
		Anzahl der Waldflächen (> 1 ha)	1.296

Die Tabelle 8 zeigt für das Klimaszenario R 4.5 (mittlerer Strahlungsantrieb) die spezifischen Ergebnisse für die Dringlichkeitsstufen vier und fünf. Die höchste Dringlichkeitsstufe fünf visualisiert diejenigen Flächen, die bei den sechs analysierten Faktoren bei fünf die höchste (negativste) Bewertung aufweisen. Für diese Flächen ist ein vordringlicher Handlungsbedarf anzunehmen. Dementsprechend wertet die Dringlichkeitsstufe vier nur vier Mal die höchste (negativste) Bewertung aus. Im Kontext der Auswertung der Stufe fünf werden 64 spezifische Flächen in Sachsen identifiziert. Ferner sind die Flächen hinsichtlich ihrer Flächengröße und Ausdehnung charakterisiert. Ziel dieser Analyse ist es, einen Überblick zu gewinnen, welche besonders gefährdete Wald- oder Schutzgebiete über welche Ausdehnung verfügen, um große zusammenhängende Gebiete für zusätzliche Löschwasserentnahmestellen zu priorisieren. Innerhalb der Stufe fünf sind 28 Flächen größer als ein Hektar und eine größer als ein Quadratkilometer. Für die klimatische Bewertung auf Basis des Klimaszenario R 4.5 sind diese 29 Flächen mittels Detailplanung für Löschwasserentnahmestelle näher und detailliert zu untersuchen. In Summe sind in Sachsen rund 5 km<sup>2</sup> Wald- und Schutzgebiete in der Stufe fünf, was rund 0,09 % der sächsischen Waldfläche entspricht.

Ergänzt um die Dringlichkeitsstufe vier erhöht sich die Anzahl der Flächen mit vordringlichem Bedarf (Flächen > ein Hektar) auf rund 1.300 Waldflächen. Die Gesamtsumme der Waldflächen beträgt in diesem Fall rund 260 km<sup>2</sup> und der prozentuale Anteil des gefährdeten Gebietes erhöht sich auf 4,8 %. Diese Auswertung zeigt, dass innerhalb von Sachsen viele Flächen für eine detaillierte Vorortplanung für die Errichtung von Löschwasserentnahmestellen prädestiniert sind. Um den zusätzlichen Löschwasserbedarf abschätzen zu können, erscheint es logisch, für jede Waldfläche größer einen Hektar, eine Löschwasserentnahmestelle anzunehmen, wodurch der Bedarf bei rund 1.300 liegt. Ergänzend dazu sollten Flächen, die größer einen Quadratkilometer sind, zuerst untersucht und bestenfalls vorrangig behandelt werden.

Zusätzlich zum Klimaszenario R 4.5 erfolgt die Analyse und Auswertung der besonders gefährdeten Wald- und Schutzgebiete noch für das Szenario R 8.5.

### **Exkurs:**

Der gewählte methodische Ansatz der Bewertungsmatrix aus Tabelle 7 bedingt es, dass bei den Ergebnissen der Dringlichkeitsplanung für die klimatischen Entwicklungen nur die Flächen ausgewählt werden, in denen die Bewertung des Klimas als „sehr schlecht“ ausgewiesen wird. Gesetzt dem Fall, dass auch die klimatische Bewertung „schlecht“ im Szenario R 4.5 mit in die Bewertung der Gebiete mit dem vordringlichen Bedarf hinzugefügt wird, so erhöht sich die Fläche um den Faktor vier auf über 1.000 km<sup>2</sup>. Diese Sensitivität zeigt die wesentlichen Auswirkungen der Abänderung eines Faktors durch die Bewertungsmatrix. Eine detaillierte Betrachtung aller möglichen Sensitivitäten ist nicht Teil der aktuell vorliegenden Betrachtungen.

### Klimaszenario R 8.5

Die GIS-basierte Ergebnisdarstellung der sächsischen Wald- und Schutzgebiete mit den Rasterdaten der WEREX VI- Klimamodellierungen aus der Abbildung 14 können für das Szenario R 8.5 aus der nachfolgenden Abbildung 33 entnommen werden.

#### Legende

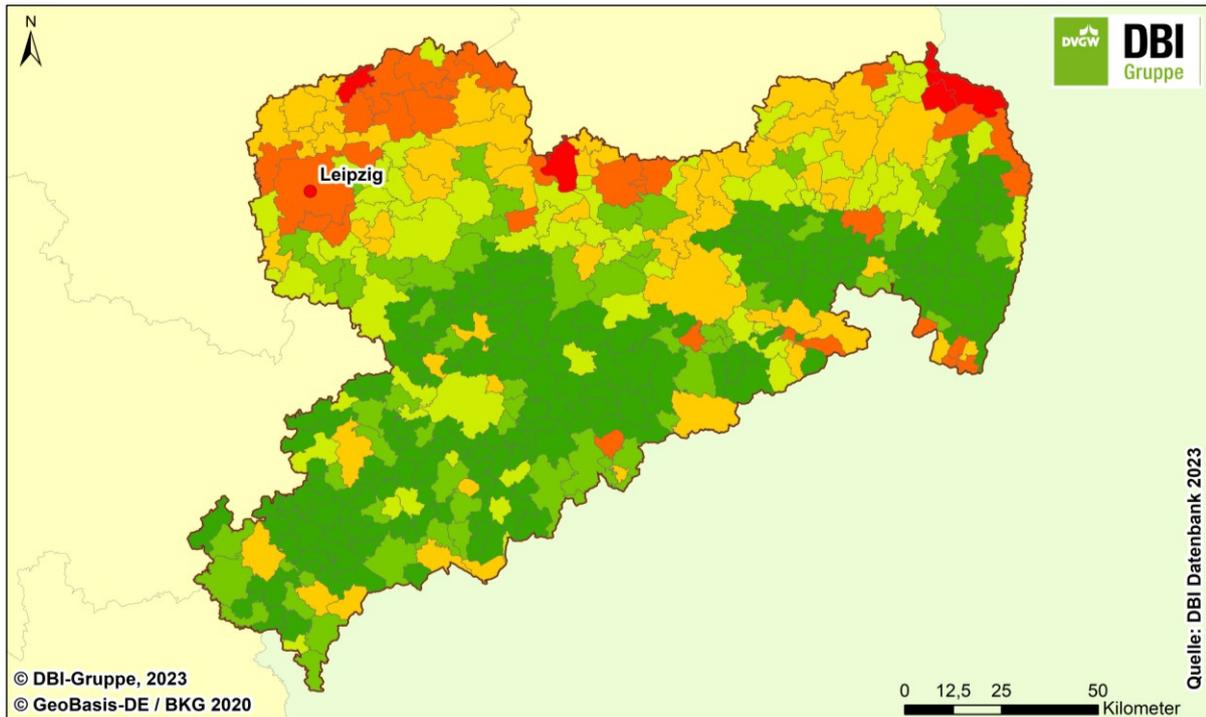
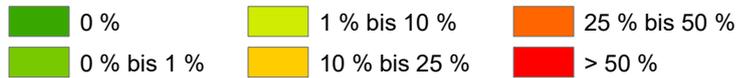


Abbildung 33: Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung bezogen auf die Waldfläche innerhalb einer Gemeinde auf Basis des Klimaszenario R 8.5 für die sächsischen Wald- und Schutzgebiete

Die Auswertung auf Basis des Klimaszenarios R 8.5 (hoher Strahlungsantrieb) zeigt eine deutliche Verschärfung der zukünftigen Situation mit den Gemeinden, die mit den negativen Auswirkungen aufgrund der Klimaentwicklung zu rechnen haben. Aus der Kartendarstellung der Abbildung 33 gehen die Gemeinden farblich (orange/rot) hervor. Auf Basis der Auswertungen aus Kapitel 5 konnten auch für das Klimaszenario R 8.5 die nordsächsischen bewaldeten Gebiete bereits als besonders gefährdet ausgewiesen werden. Ferner treten Gemeinden mit hohen Anteilen an vordringlichem Bedarf flächendeckend bis weit in die Elbregion und in die Sächsische Schweiz vor. Darüber hinaus haben auch die südlichen Wälder in der Region um das Dreiländereck große Anteile an bedrohten Waldgebieten. Die Anzahl der Gemeinden mit einem Anteil von > 50 % steigt im Vergleich zur Auswertung im Szenario R 4.5 auf fünf Gemeinden an. Neben der Gemeinde Zeithain, die bereits zuvor schon Teil war, sind folgend auch Krauschwitz, Weißkeißel und Bad Düben sowie Bad Muskau in dieser höchsten Kategorie. Ergänzend weisen im Szenario R 8.5 weitere 14 Gemeinden Anteile von über 30 % auf.

Im Vergleich zu den bestehenden Waldbrandgefahrenklassen, die der Sachsenforst veröffentlicht (siehe Abbildung 3), kann auf Basis der Ergebnisse dieser Studie ein differenziertes Fazit bei einer klimatischen Verschärfung der Situation für die „hohe Waldbrandgefahr“ gezogen werden. Als Folge eines starken Fortschreitens des Klimawandels mit einem hohen Strahlungsantrieb müssten sowohl die Elbregion bis in die Sächsische Schweiz sowie die südlichen Wälder des Dreiländerecks mit in die Kategorie A „hohe Waldbrandgefahr“ integriert werden.

Die detaillierte Flächenauswertung der Dringlichkeitsplanung basierend auf dem Szenario R 8.5 erfolgt erneut hinsichtlich der Anzahl der Flächen sowie deren Gesamtfläche für die einzelnen Stufen. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 9 gelistet.

Tabelle 9: Detailauswertung der identifizierten Waldflächen auf Basis des Klimaszenarios R 8.5

		Klimaszenario	R 8.5
Dringlichkeit	Stufe 5	Fläche (Gesamt in km <sup>2</sup> )	36,5
		Anzahl der Waldflächen (Gesamt)	204
		Anzahl der Waldflächen (> 1 km <sup>2</sup> )	7
		Anzahl der Waldflächen (> 1 ha)	115
	Stufe 4	Fläche (Gesamt in km <sup>2</sup> )	441,1
		Anzahl der Waldflächen (Gesamt)	3.627
		Anzahl der Waldflächen (> 1 km <sup>2</sup> )	75
		Anzahl der Waldflächen (> 1 ha)	2.116

Die Tabelle 9 zeigt für das Klimaszenario R 8.5 die spezifischen Ergebnisse für die Dringlichkeitsstufen vier und fünf. Im Kontext der Auswertung der Stufe fünf werden 115 spezifische Flächen in Sachsen und damit rund doppelt so viele wie im Klimaszenario R 4.5, identifiziert. Ferner werden die Flächen erneut hinsichtlich ihrer Flächengröße und Ausdehnung charakterisiert. Innerhalb der Stufe fünf sind 115 Flächen größer als ein Hektar und sieben größer als ein Quadratkilometer. Für die klimatische Bewertung auf Basis des Klimaszenario R 8.5 sind diese Flächen mittels Detailplanung für Löschwasserentnahmestelle näher und detailliert zu untersuchen. In Summe sind in Sachsen rund 37 km<sup>2</sup> Wald- und Schutzgebiete in der Stufe fünf, was rund 0,7 % der sächsischen Waldfläche entspricht (Veränderung Faktor 8).

Ergänzt um die Dringlichkeitsstufe vier erhöht sich die Anzahl der Flächen mit vordringlichem Bedarf (Flächen > ein Hektar) auf rund 2.200 Waldflächen. Die Gesamtsumme der Waldflächen beträgt in diesem Fall mehr als 477 km<sup>2</sup> und der prozentuale Anteil des gefährdeten Gebietes erhöht sich auf 8,8 %. Diese Auswertung zeigt, dass innerhalb von Sachsen bei einer Verschärfung der klimatischen

Situation deutlich mehr Flächen für eine detaillierter Vorortplanung für die Errichtung von Löschwasserentnahmestellen prädestiniert sind.

## 7 Optionen für lokale Löschwasserentnahmestellen

In diesem Kapitel folgt ein kurzer Exkurs in die Praxis der Errichtung von Löschwasserentnahmestellen. Im Zuge des SAB – Förderaufruf „Nachhaltig aus der Krise“ sind im zweiten Schwerpunktbereich: II. Klimafolgenbewältigung, Vorsorge und Umgang mit Extremwetterereignissen (Dürre, Hitze, Hochwasser) investive Maßnahmen zur Schaffung von Löschwasserreservoirs in stark brandgefährdeten, schwer zugänglichen Schutzgebieten gefördert worden. Diese bewilligten Förderprojekte in den Gemeinden Bad Schandau und Sebnitz wurden im Kontext der Bearbeitung durch einen gemeinsamen kommunikativen und inhaltlichen Austausch mit der GIS-Pilotstudie LöschH<sub>2</sub>O vernetzt. Aus diesem Grund wird hier in dieser Studie ein kurzer inhaltlicher Rahmen zu möglichen Praxisprojekten hergestellt. Die Analysen der Ergebnisse aus dem Kapitel 6 weisen für das Klimaszenario R 4.5 rund 1.300 Waldflächen mit vordringlichem Bedarf aus, was modellhaft rund 1.300 zusätzlichen Löschwasserentnahmestellen entspricht. Für die Errichtung einer Löschwasserentnahmestelle sollen in einem nächsten Schritt grundlegende Parameter festgelegt werden, die als Mindestanforderungen für solche Entnahmestellen gelten.

### Parameter Löschwasserentnahmestellen [20]:

- mindestens 30 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen
- Anfahrtsweg mit bis zu 12 t Befahrbarkeit (respektive 3,5 t)
- mindestens Platz für einen Pumpenaufstellplatz und bis zu zwei Stellplätze für Feuerwehrfahrzeuge
- mögliche Entnahmestelle in natürlichen Fließgewässern

Darüber hinaus unterliegt in vielen Fällen die Errichtung von baulichen Anlagen (Löschwasserentnahmestellen) strengen naturschutzfachlichen Aspekten, die zu beachten sind. Durch die präferierte Lage sämtlicher Standorte im Wald, ist nach sächsischem Waldgesetz zunächst zu klären, ob durch die Vorhaben die vorhandene Waldfläche in nicht als Wald zu deklarierende Bereiche umgewandelt wird. Daher ist bereits bei Planung zu beachten, dass es zum geringstmöglichen Flächenverbrauch sowie zu Geländeangleichungen kommt [20].

In der nachfolgenden Tabelle 10 werden grobe Preisindikationen für die Errichtung von Löschwasserelementen (in diesem Falle eine Löschwasserzisterne) zusammengefasst.

Tabelle 10: grobe Preisindikation für die Errichtung von Löschwasserzisternen (Preis: Stand 2022) nach [21]

Volumen der Löschwasserzisterne	Preis
50 m <sup>3</sup>	75.000 €
100 m <sup>3</sup>	125.000 €

Die Daten sind zum Stand 2022 aufgenommen worden und stellen eine Momentaufnahme dar. Im Zuge der aktuellen Preis- und Inflationsdynamik sind die Preise um den Faktor 1,5 bis 2 gestiegen. Zur Einschätzung der Kosten sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Waldbrand (2022) in der sächsischen Schweiz rund 10 Mio.€ gekostet hat [22]. Diese Daten zeigen, dass eine vorsorgende Löschwasserbedarfsplanung eine lohnende Investition in die Zukunft ist und dem Schutz der Biotope sowie der Sicherung von Wertbeständen der Ressource Wald dient.

## 8 Öffentlichkeitsarbeit, Workshop sowie Veröffentlichung der Ergebnisse

Bestandteile dieses Kapitels sind die Öffentlichkeitsarbeit und der (Ergebnis-)Workshop, da diese Kernelemente bei der Bearbeitung sowie Kommunikation im Rahmen des Projekts sind. Zusätzlich wurde im Projekt ein breiter Fachexpertenkreis aufgebaut, mit dem die Projekt-Ergebnisse diskutiert und ausgewertet wurden.

Darüber hinaus fanden während der Projektlaufzeit diverse Treffen und Meetings sowohl inhaltlicher Art als auch Treffen mit Vernetzungscharakter statt. In den inhaltlichen Meetings mit dem Kreisbrandmeister des Landratsamts Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Herrn Karsten Neumann sowie dem Landesbranddirektor Herrn Dr.-Ing. Dirk Schneider konnten die gewählten Methodiken und Ideenansätze zielführend erörtert und auf Tauglichkeit geprüft werden. Ferner fanden physische Meetings im Nationalpark Sächsische Schweiz statt, um einen Vorort Eindruck von den lokalen Besonderheiten zu gewinnen. Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, konnten so auch die potenziellen Standorte der durch die SAB geförderten Löschwasserzisternen in den Gemeinden Bad Schandau und Sebnitz besichtigt werden. Diese Eindrücke haben das Verständnis der Problemstellung und möglicher Lösungsansätze maßgeblich geschärft.

Das Arbeitspaket 5 der beantragten Projektskizze sah darüber hinaus noch einen Abschlussworkshop mit einem Fachpublikum vor, dem die Ergebnisse vorgestellt werden sollten. Im Rahmen der Diskussion konnte weiterer Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarf identifiziert werden. Die Teilnehmerliste zeigt die Bandbreite der wesentlichen Interessenvertreter.

### Teilnehmerliste:

- Katrin Müller (Sachsenforst, Abt. 5)
- Andreas Rümpel (sächs. Waldbrandkommission)
- Jörg Fleischer (Sachsenforst, Abt. 5)
- Karsten Neumann (LRA sächs. Schweiz-Osterzgebirge, Kreisbrandmeister)
- Thomas Beier (SMEKUL, Ref. 52)
- Falk Böttcher (dt. Wetterdienst, Abt. Agrarmeteorologie)
- Lutz Delling (Stadt Groitzsch, Brandschutz)

Der Workshop fand am 25.01.2023 in den Räumlichkeiten der DBI Gas- und Umwelttechnik am Besucherstandort in Freiberg, Sachsen, statt und alle Teilnehmenden freuten sich über eine gelungene und informative Veranstaltung.

Neben dem Ergebnisworkshop sind primär im Projektnachgang Vorträge vor einschlägigem Fachpublikum geplant. Auf Einladung des Kreisbrandmeisters des Landratsamts Sächs. Schweiz-Osterzgebirge, Herrn Neumann, ist ein Vortrag auf der Wehrleiteranleitung / Führungskräfte-seminar des Landkreises geplant (04.03.2023 – „Vorstellung der Ergebnisse der SAB-Studie LöschH<sub>2</sub>O“). Darüber hinaus ist der Vortrag auch der Arbeitsgruppe der Kreisbrandmeister für die Arbeitsberatung in Görlitz (24.05. und 25.05.2023) angeboten worden.

Die DBI-GUT wird zudem weitere Schritte zur öffentlichkeitswirksamen Verbreitung der Ergebnisse unternehmen. In diesem Zusammenhang wird der Abschlussbericht auf der firmeneigenen Website publiziert und steht damit dem interessierten Fachpublikum zur freien Verfügung. Ferner sieht der Projektplan die Veröffentlichung einer webbasierten Anwendung durch die DBI-GUT vor.

Die gemeindeschaffen Ergebnisse der GIS-Pilotstudie LöschH<sub>2</sub>O sind unter den folgenden Links online verfügbar:

- Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung für Klimaszenario R 4.5  
(Abbildung 32 des Abschlussberichts)

Link: [Online-Kartendarstellung der Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung R 4.5](#)

- Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung für Klimaszenario R 8.5  
(Abbildung 33 des Abschlussberichts)

Link: [Online-Kartendarstellung der Ergebnisse der Dringlichkeitsplanung R 8.5](#)

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts LöschH<sub>2</sub>O konnten innerhalb des Freistaates Sachsen diejenigen Wald- und Schutzgebietsflächen identifiziert werden, die in den kommenden Jahren aufgrund der klimatischen Entwicklungen im Kontext des Waldbrandrisikos als potenziell gefährdet einzustufen sind. Die Analysen haben gezeigt, dass die Klimawandelfolgenbewältigung Sachsen zukünftig vor erhebliche Probleme stellen kann. Ein präventiver Schutz der Natur, insbesondere des Waldes, ist daher dringend geboten. Die Ergebnisse sind im Kontext der Dringlichkeitsplanung auf administrativer Ebene der Gemeinden ausgewiesen und flächenkonkret im GIS verortet worden. In den Gemeinden mit den höchsten Anteilen an gefährdeten Waldflächen, bezogen auf die gesamte Waldfläche der Gemeinde, sollte eine detaillierte Vorortprüfung für die Planung und Projektierung von zukünftigen Löschwasserentnahmestellen forciert werden. Im mittleren Klimaszenario R 4.5 wurden, basierend auf der Tabelle 8, im Ranking der Faktoren 28 Waldflächen, die jeweils größer als 1 km<sup>2</sup> sind, identifiziert. Diese Flächen zählen zum vorrangigen Bedarf für zusätzliche Löschwasserentnahmestellen, da diese Waldgebiete keinen Zugang zu Löschwasser besitzen oder als schwer zugänglich beurteilt worden sind. In solchen Fällen erscheint eine detaillierte Planung und Förderung, vergleichbar den SAB-Projekten aus der Mehrwert-Initiative für die Errichtung von Löschwasserzisternen im Nationalpark Sächsische Schweiz der Gemeinden Sebnitz und Bad Schandau, lohnend.

Im Zuge der Projektauswertung sowie in der Diskussion zum Abschlussworkshop konnte, gemeinsam mit den Vertretern des SMEKUL und des Sachsenforstes, zusätzlicher Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarf der bisher angestellten Methodiken und Modellierungen identifiziert werden. Im Zusammenhang mit den Auswertungen wurde die zukünftige Konzeptionierung für Infrastrukturmaßnahmen für die sächsischen Wälder diskutiert. Viele der Waldflächen sind in einem möglichen Waldbrand für die Einsatzkräfte nicht oder nur schwer zugänglich erreichbar, weshalb das Konzept aus Rettungs- und Abfuhrwegen im Wald zu überarbeiten ist. Darüber hinaus müssen bei der Planung von neuen Löschwasserentnahmestellen die Befahrbarkeit und Erreichbarkeit gewährleistet werden. Ein weiterer relevanter Aspekt kann in einem GIS-Tool bestehen, welches zur Unterstützung der Feuerwehren für jede Waldfläche ein optimales Routing der Anfahrt ermittelt. Mittels der erwähnten Erweiterungen können die Einsatzkräfte den Löschangriff bei einem Waldbrandereignis schnellstmöglich und damit unter geringerem Ressourceneinsatz bewerkstelligen. Das Tool müsste idealerweise so konzipiert werden, dass es auf den Endgeräten der Einsatzkräfte der Feuerwehr (z.B. spezielle Tablets) und unabhängig von einer Datenverbindung (mobiles Internet) funktionstüchtig ist.

Parallel zu den Verbesserungen der Infrastruktur wurde auch häufig eine einheitliche Datenbank für bestehende Wasservorkommen in Zukunft als essenziell erachtet. Die bestehenden Wasservorkommen aus dieser Studie werden durch die künstlichen Wasservorkommen (Hydranten) angereichert. Durch die zunehmende Verstädterung steigt in den nächsten Jahren voraussichtlich der Trinkwasserbedarf und der Grundwasserspiegel nimmt ab, weshalb viele Hydranten trocken liegen oder Brunnen voraussichtlich austrocknen werden. Ergänzend dazu sind viele Typenschilder der bestehenden Hydranten veraltet und es bedarf einer einheitlichen Datenbank zur systematischen Erfassung. Diese zielführende Erweiterung erscheint vor dem Hintergrund der Struktur der öffentlichen Wasserversorgung in Sachsen als ambitioniert. Es gibt rund 70 verschiedene Träger der öffentlichen Wasserversorgung, die eine solche Datenbank mit homogenisierten Daten speisen müssten [23].

Im Kontext der GIS-gestützten Zusammenstellung von restriktiven und selektiven Faktoren im Projekt könnte eine inhaltliche Verfeinerung der Daten zu (noch) detaillierteren Ergebnissen führen. Weitere diskutierte Faktoren oder Erweiterungen sind:

- Feuerwehr-Standorte: Ergänzung der spezifischen technischen Ausrüstung & Personenstärke als Gewichtung für die GIS-gestützte Entfernungsanalyse
- Implementierung von Boden- und Reliefparametern
- Erweiterung der klimatischen Betrachtungen um den Faktor der bodennahen Verdunstung

Abschließend sei an dieser Stelle abermals darauf hingewiesen, dass die vorliegende Bewertungsmatrix der Faktoren von quantitativen Einschätzungen der Studierersteller abhängt. Die Charakterisierung erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, dient aber zur Beantwortung der zentralen Fragestellung in diesem Projekt. Bei einer abgewandelten und differenzierten Gewichtung der Faktoren (aktuell: gleichmäßige Gewichtung der 6 Faktoren) können spezielle Sensitivitäten ermittelt werden. Derartige Frage- und Zielstellungen sind nicht Teil dieser Betrachtungen, sondern können in folgenden Arbeiten adressiert werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Freistaat Sachsen (Sachsenforst), *Informationen zur Waldbrandgefährdung in Sachsen-Wald, Forstwirtschaft, Jagd: Karte Waldbrandgefahrenklassen*, [https://www.wald.sachsen.de/waldbrandgefaehrdung-4186.html?\\_cp=%7B%22accordion-content-9705%22%3A%7B%220%22%3Atrue%7D%2C%22previousOpen%22%3A%7B%22group%22%3A%22accordion-content-9705%22%2C%22idx%22%3A0%7D%7D](https://www.wald.sachsen.de/waldbrandgefaehrdung-4186.html?_cp=%7B%22accordion-content-9705%22%3A%7B%220%22%3Atrue%7D%2C%22previousOpen%22%3A%7B%22group%22%3A%22accordion-content-9705%22%2C%22idx%22%3A0%7D%7D) **2022**.
- [2] Statistisches Bundesamt, *Flächengröße des Waldes nach Bundesländern*, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/Tabellen/waldflaeche-bundeslaender.html> **2022**.
- [3] Landesamt für Geobasisinformation Sachsen (GeoSN), *Downloadbereich DLM50*, Dresden, <https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-dlm50-4170.html> **2022**.
- [4] Referat für Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit, *Landschaftsmodelle DLM-Geobasisinformation-sachsen.de*, <https://www.landesvermessung.sachsen.de/landschaftsmodelle-3999.html> **2018**.
- [5] Copernicus Programme, *CORINE Land Cover (CLC) 2018*, <https://land.copernicus.eu/pan-european> **2018**.
- [6] Rico Kronenberg, *ReKIS EXPERT*, <https://rekisviewer.hydro.tu-dresden.de/fdm/ReKISExpert.jsp> **2022**.
- [7] Arne Spekat, Dr. Wolfgang Enke, *WMSax2.0-Bereitstellung eines Ensembles regionaler Klimaprojektionen für Sachsen*, Schriftenreihe, Dresden **2020**.
- [8] Deutsches Institut für Internationale Pädagogische Forschung, *RCP-Szenarien – Klimawandel*, <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien> **2022**.
- [9] R. H. Moss, J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant, T. J. Wilbanks, *Nature* **2010**, 463 (7282), 747 – 756. DOI: 10.1038/nature08823.
- [10] Deutscher Wetterdienst (DWD), *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Klimaszenarien (Zukunft) - RCP-Szenarien*, <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien.html>.
- [11] S. Legutke, S. Kindermann, K. Glushak, M. Böttinger, M. Lautenschlager, *CMIP5-Klimasimulationen und Datenbasis für den nächsten Weltklimabericht*, Hamburg, [https://www.mpg.de/6880685/jb\\_20121](https://www.mpg.de/6880685/jb_20121).

- [12] Rico Kronenberg, *Daten ReKIS 2022*.
- [13] Dr.-Ing. Dirk Schneider, *Einfluss von Klimaelementen auf das Waldbrandrisiko, Webkonferenz 2022*.
- [14] Deutscher Wetterdienst (DWD), *Wetter und Klima - Heißer Tag*, Offenbach, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=101162> **2023**.
- [15] MDR, *Trockenheit, Mensch und Feuer: Die große Gefahr für den Wald*, <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/dessau/wittenberg/feuer-wald-mensch-munition-100.html> **2022**.
- [16] R. Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit, S. Sachsenforst, *Sonntagnachmittags brennt es am häufigsten*, Dresden, <https://www.medienservice.sachsen.de/medien/news/1047734> **2022**.
- [17] Geofabrik GmbH, *OpenStreetMap-Deutschland*, <http://download.geofabrik.de/> **2022**.
- [18] Dr.-Ing. Dirk Schneider, *Optionen für die Wasserentnahme aus natürlichen Gewässern (insb. stehende Gewässer), Webkonferenz 2022*.
- [19] Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, *Beherbergungsgewerbe-Statistik*, <https://www.statistik.sachsen.de/html/beherbergung.html> **2019**.
- [20] K. Neumann, *Schaffung von Löschwasserzisternen zur Waldbrandbekämpfung im Nationalpark Sächsische Schweiz 2022*.
- [21] Karsten Neumann, *Kosten für die Errichtung von Löschwasserzisternen, E-Mail 2022*.
- [22] MDR, *Kabinettsbeschluss: Sachsen will Großteil der Kosten für Waldbrände im Sommer 2022 bezahlen*, <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen/waldbrand-kosten-saechsische-schweiz-schaden-100.html> **2022**.
- [23] Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, *Struktur - Wasser - sachsen.de*, <https://www.wasser.sachsen.de/struktur-10234.html> **2019**.