

# Hydrologische & Klimatische Funktionsleistung von SUDS

**Mehrschichtige Analyse verschiedener Parameter  
mit Open-Source-Tools auf zwei Maßstabsebenen.**

Projektbericht für das Modul

*Projekt Landschaftsplanung 5 (Bachelorprojekt)*

an der Technischen Universität München.

<b>School</b>	School of Life Sciences
<b>Lehrstuhl</b>	Lehrstuhl für Renaturierungsökologie
<b>Betreut von</b>	Kollmann, Johannes; Thiele, Max
<b>Eingereicht von</b>	Endemann, Jakob
<b>Submission date</b>	23.03.2026

Munich, 21. März 2026

# Angaben zu den Autoren und ihren Beiträgen

Dieser Bericht wurde von dem auf der Titelseite aufgeführten Autoren erstellt.

# Erklärung zur Verwendung von KI-Tools

- **Verwendete Tools:** KI-Unterstützung wurde für die Erstellung des Entwurfs, die sprachliche Überarbeitung und die Überprüfung der Struktur genutzt.
- **Umfang:** Die KI-Unterstützung konzentrierte sich auf die Formulierung, die Kohärenz und die Formatierung der Abschnitte.
- **Einschränkungen:** Die grundlegenden Analysen, Interpretationen und Designentscheidungen wurden vom Autor vorgenommen.
- **Transparenz:** Von der KI generierte Vorschläge wurden manuell überprüft, korrigiert und nur dort integriert, wo sie geeignet waren.

# Abstract

Die Arbeit untersucht die hydrologische und mikroklimatische Funktionsleistung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) im Kontext klimaangepasster Stadtentwicklung am Beispiel Münchens und des Quartiers Ackermannbogen. Ziel war die Entwicklung eines multiskalaren Analyseframeworks zur getrennten, aber vergleichenden Bewertung wasserhaushaltsbezogener und thermischer Wirkungen grün-blauer Infrastruktur.

Methodisch wurde ein mehrstufiger Workflow aus Geodatenaufbereitung, Klimaszenarienbildung, GIS-Harmonisierung, hydrologischer Bilanzierung und mikroklimatischer Modellierung aufgebaut. Die hydrologische Bewertung erfolgte nach DWA-M 102-4 über einen Vergleich zwischen naturnahem Referenzzustand, Status quo und kontrafaktischer Versiegelung. Die mikroklimatische Bewertung wurde für den Ackermannbogen mit UMEP auf Basis transformierter EPW-Dateien für *Present-day*, *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5*, *SSP3-7.0* und *SSP5-8.5* in den Zeithorizonten 2050 und 2080 durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche hydrologische Entlastungswirkung des bestehenden SUDS-Bestands. Auf gesamtstädtischer Ebene werden jährlich  $774,246.27 \text{ m}^3$  Oberflächenabfluss vermieden und  $906,866.22 \text{ m}^3/\text{a}$  zusätzliche Infiltration ermöglicht. Im Ackermannbogen sinkt der Oberflächenabfluss gegenüber dem kontrafaktisch versiegelten Zustand von  $504.31 \text{ mm/a}$  auf  $2.65 \text{ mm/a}$ , während die Infiltration von  $182.26 \text{ mm/a}$  auf  $680.83 \text{ mm/a}$  steigt. Gleichzeitig nimmt die thermische Belastung in allen Zukunftsszenarien deutlich zu. Der mittlere PET-Wert steigt von  $17.35 \text{ }^\circ\text{C}$  im heutigen Zustand auf bis zu  $42.87 \text{ }^\circ\text{C}$  in *SSP5-8.5* für 2080, Tmrt von  $22.83 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $52.89 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Es wird gezeigt, dass SUDS einen relevanten Beitrag zur urbanen Klimaanpassung leisten, hydrologische und mikroklimatische Wirkungen jedoch unterschiedlichen räumlichen und methodischen Logiken folgen. Während hydrologische Leistungen aggregierbar und auf die gesamtstädtische Ebene hochrechenbar sind, bleiben thermische Effekte an konkrete Stadträume gebunden. SUDS sind daher als multifunktionale, aber nicht allein hinreichende Bausteine klimaresilienter Stadtentwicklung zu bewerten.

# Inhaltsverzeichnis

Angaben zu den Autoren und ihren Beiträgen .....	i
Erklärung zur Verwendung von KI-Tools .....	ii
Abstract .....	iii
Abbildungsverzeichnis .....	v
Tabellenverzeichnis .....	vi
1 Einleitung .....	1
1.1 Relevanz .....	1
1.2 Forschungsfragen .....	2
1.3 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen .....	2
2 Forschungsdesign und Methodik .....	4
2.1 Grunddaten und Datengrundlage (Layer 0) .....	5
2.2 Klimaszenarien und Zukunftsdaten (Layer 1) .....	7
2.3 Datenharmonisierung und GIS-Verarbeitung (Layer 2) .....	9
2.4 Mikroklimatische Modellierung (Layer 3) .....	12
2.5 Hydrologische Modellierung (Layer 4) .....	14
2.6 Kontrafaktisches Szenario (Layer 5) .....	17
2.7 Skalierung und Aggregation (Layer 6) .....	18
3 Ergebnisse .....	20
3.1 Fallstudie Ackermannbogen .....	20
3.1.1 Flächenstruktur und Retentionselemente .....	20
3.1.2 Hydrologische Funktionsleistung .....	21
3.1.3 Mikroklimatische Funktionsleistung .....	24
3.2 Szenarienvergleich (Quartiersebene) .....	26
3.3 Hochrechnung auf gesamtstädtischer Ebene (München) .....	28
4 Digitale Umsetzung und Dashboard-Architekturen .....	31
4.1 EPW-Szenario-Dashboard (München) .....	31
4.2 PET-Dashboard (Ackermannbogen) .....	36
4.3 Wasserbilanz-Dashboard (Ackermannbogen) .....	38
4.4 Aggregations-Dashboard München .....	41
5 Synthese und Bewertung .....	43
5.1 Systemische Gesamtbewertung .....	43
5.2 Beitrag zur Klimaanpassung .....	44
5.3 Planerische Relevanz .....	45
6 Diskussion .....	47
7 Fazit .....	50
8 Ausblick .....	52
References .....	54
A Anhang .....	i

# Abbildungsverzeichnis

1	Forschungsfragen-Matrix .....	2
2	Layer des Forschungsdesigns .....	4
3	Verortung der SUDS in München .....	6
4	Szenarien-Generierungsfluss für die EPW-Dateien .....	8
5	SVF-Diagnostik für den Ackermannbogen .....	11
6	Fließrichtungen und Basin-Strukturen im Ackermannbogen .....	11
7	Potenzielle Aufstaubereiche bei (Stark-)regen .....	12
8	Mikroklima-Modellkette für den Ackermannbogen .....	14
9	Oberflächenklassifikation des Untersuchungsgebietes Ackermannbogen .....	15
10	Dreidimensionale Übersicht des Ackermannbogens .....	21
11	Hydrologische Ergebnisgrafik für den Ackermannbogen .....	23
12	Mikroklimatische Rasterergebnisse für den Ackermannbogen .....	25
13	Szenarienvergleich auf Quartiersebene .....	28
14	Architektur-Flowchart des EPW-Szenario-Dashboards .....	32
15	EPW-Szenario-Dashboard München .....	33
16	Architektur-Flowchart des PET-Dashboards .....	35
17	PET-Dashboard für den Ackermannbogen .....	37
18	Architektur-Flowchart des Wasserbilanz-Dashboards .....	38
19	Wasserbilanz-Dashboard für den Ackermannbogen .....	40
20	Aggregations-Dashboard München .....	42
21	Mittlere $\Delta$ PET gegenüber heute nach Szenario und Jahr .....	xvi

# Tabellenverzeichnis

1	Land-Cover-Klassen und Auftreten im Untersuchungsdatensatz .....	5
2	Kompaktes Inventar der Grunddaten .....	7
3	Kompakte SSP- und Zeitfenstermatrix .....	9
4	Zentrale Mikroklima-Ausgaben .....	14
5	Hydrologische Flächenklassen .....	16
6	Wasserbilanz nach Szenario .....	23
7	PET- und Tmrt-Mittelwerte nach Szenario .....	26
8	Vergleichsmatrix für PET und Tmrt.....	28
9	Stadtweite Wirkungssummary .....	30
10	Input-Output-Mapping für das EPW-Dashboard .....	34
11	PET-Dashboard-Feature-Liste .....	38
12	Backend-/Frontend-Datenabbildung .....	41
13	Verwendete Werkzeuge im Workflow.....	i
14	Grundgleichungen und Projektparameter der Wasserbilanz.....	ii
15	Parameter der Muldenformel .....	ii
16	Parameter der Beckenformel .....	iii
17	Szenariofamilien .....	iv
18	Zeitfenster .....	iv
19	EPW-Dateien und Vergleichs-CSVs .....	v
20	Ensemble-Modelle im EPW-Header .....	vi
21	Vergleichsvariablen in den CSVs .....	vii

22	GCM- und EPW-Variablen.....	viii
23	Szenario-Matrix Ackermannbogen - Anteile.....	viii
24	Szenario-Matrix Ackermannbogen - Jahreswerte in mm/a.....	viii
25	Szenario-Matrix Ackermannbogen - Jahreswerte in m <sup>3</sup> /a.....	ix
26	Delta-Vergleiche Ackermannbogen.....	ix
27	Bestandszahlen München.....	x
28	Flächenbasis für die Hochrechnung.....	x
29	Typische Flächenwerte der Systeme.....	x
30	Stadtweite Wasserbilanz.....	xi
31	Delta-KPIs für München.....	xi
32	Hydrologische Projektannahmen.....	xi
33	Typenparameter.....	xii
34	Vergleichs- und Referenzwerte.....	xii
35	EPW-Dateien und Szenario-Kontext.....	xiii
36	Temperaturkennwerte.....	xiii
37	Strahlungskennwerte.....	xiv
38	EPW-Metadaten.....	xiv
39	Vergleichs-CSV-Variablen.....	xv
40	Top-Veränderungen 2080 gegenüber 2050.....	xvi
41	PET-Mittelwerte der SSP-Szenarien.....	xvii
42	Tmrt-Mittelwerte der SSP-Szenarien.....	xvii
43	Hotspots, Grenzwerte und Rangfolge.....	xviii

44	Wind-Hinweis .....	xviii
----	--------------------	-------



# 1. Einleitung

## 1.1. Relevanz

Der anthropogen bedingte Klimawandel führt in Deutschland zu einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen. Besonders relevant sind dabei sommerliche Hitzeperioden sowie Starkregenereignisse, deren Auswirkungen sich in dicht bebauten und hoch versiegelten städtischen Räumen in besonderem Maße manifestieren. In urbanen Ballungsräumen greifen Flächenversiegelung, geringe Vegetationsanteile und hohe thermische Speicherwirkungen tief in den lokalen Wasser- und Energiehaushalt ein. Versiegelte Oberflächen sind durch einen erhöhten Direktabfluss, eine verminderte Infiltration sowie eine reduzierte Grundwasserneubildung gekennzeichnet. Gleichzeitig wird die Evapotranspiration eingeschränkt, wodurch das Potenzial zur Verdunstungskühlung und zur nächtlichen Abkühlung sinkt. Diese Prozesse tragen wesentlich zur Ausprägung des urbanen Wärmeinseleffekts bei, der mit gesundheitlichen Belastungen und erhöhten Mortalitätsrisiken assoziiert wird (Huber, 2024; Winklmayr et al., 2023)

Vor diesem Hintergrund gewinnen Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) als Bestandteil grüner und blauer Infrastrukturen sowie als Nature-based Solutions an Bedeutung (Benedict & McMahon, 2002). Im Kontext der Schwammstadt stellen sie einen zentralen planerischen Ansatz dar, um Niederschlagswasser nicht primär abzuleiten, sondern möglichst dezentral zurückzuhalten, zu versickern und durch Verdunstung wirksam in den lokalen Wasserhaushalt einzubinden. Ziel dieser Systeme ist es, den Wasserhaushalt urbaner Räume durch Retention, Speicherung, Infiltration und Verdunstung an naturnahe Zustände anzunähern. Damit wird nicht nur ein Beitrag zur Reduktion von Oberflächenabfluss und Überflutungsrisiken geleistet, sondern zugleich eine mikroklimatische Funktionsleistung erbracht. Insbesondere die Verdunstung nimmt dabei eine Schlüsselrolle ein, da sie den Wasserhaushalt mit dem Energiehaushalt koppelt und somit sowohl hydrologische als auch thermische Wirkungen entfaltet (Coutts et al., 2013; Gill et al., 2007).

Für die Bewertung der mikroklimatischen Wirkung städtischer Freiräume und Infrastrukturelemente hat sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) als etablierter Indikator des thermischen Komforts durchgesetzt, da sie die Energiebilanz des menschlichen Körpers unter Berücksichtigung meteorologischer und strahlungsbezogener Einflussgrößen integriert. Eine belastbare Bewertung der Funktionsleistung von SUDS erfordert daher eine gekoppelte Betrachtung hydrologischer und mikroklimatischer Parameter. Um die häufig bestehende Lücke zwischen strategischen Zielsetzungen der Klimaanpassung und deren planerisch-praktischer Umsetzung zu verringern, sind evidenzbasierte und räumlich differenzierte Analysen erforderlich. Digitale Werkzeuge, szenariobasierte Modellierungen und interaktive Auswertungsformate ermöglichen es, die Wirksamkeit unterschiedlicher Systemtypen unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen quantifizierbar und vergleichbar zu machen.

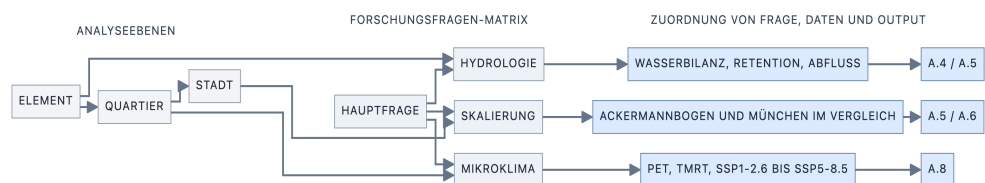
## 1.2. Forschungsfragen

**Die zentrale Forschungsfrage dieser Untersuchung lautet:**

In welchem Maße tragen unterschiedliche Typen von Sustainable Urban Drainage Systems zur hydrologischen und mikroklimatischen Funktionsleistung urbaner Räume in München und im Quartier Ackermannbogen bei, und wie lassen sich diese Wirkungen unter gegenwärtigen sowie zukünftigen Rahmenbedingungen bewerten?

**Daraus werden folgende Unterfragen abgeleitet:**

- Wie unterscheiden sich die hydrologischen Funktionsleistungen von SUDS im Hinblick auf Infiltration, Retention und Abflussreduktion im Vergleich zu einem naturnahen Referenzzustand und einem kontrafaktischen Versiegelungsszenario?
- Welche Auswirkungen gehen von entsiegelten und als Retentionsräume ausgebildeten Freiflächen auf den thermischen Komfort in ihrer unmittelbaren Umgebung aus, gemessen über die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) und die mittlere Strahlungstemperatur (Tmrt)?
- Wie verändern sich die mikroklimatischen Bedingungen im Quartier Ackermannbogen zwischen dem gegenwärtigen Klima und zukünftigen Klimaszenarien der Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5) für die Zeithorizonte 2050 und 2080?
- Welche aggregierten hydrologischen Gesamteffekte ergeben sich bei einer Hochrechnung auf die gesamtstädtische Ebene Münchens im Vergleich zu einem Szenario vollständiger Versiegelung?



**Abbildung 1** Forschungsfragen-Matrix

## 1.3. Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung eines multiskalaren Analyseframeworks zur Quantifizierung der hydrologischen und mikroklimatischen Funktionsleistungen von Sustainable Urban Drainage Systems. Dadurch soll eine integrierte Bewertungsgrundlage bereitgestellt wer-

den, mit der sich die Beiträge dezentraler blau-grüner Infrastrukturen zur urbanen Klimaanpassung und zur Umsetzung von Schwammstadt-Prinzipien systematisch erfassen, vergleichen und planerisch einordnen lassen.

Der Untersuchungsrahmen umfasst zwei Maßstabsebenen. Auf gesamtstädtischer Ebene wird die Landeshauptstadt München betrachtet, um die räumliche Verteilung und aggregierte Leistungsfähigkeit vorhandener Retentionssysteme zu analysieren. Auf Quartiersebene wird das Untersuchungsgebiet Ackermannbogen herangezogen, um kleinräumige hydrologische und mikroklimatische Wirkungen differenziert zu untersuchen. Durch diese Verknüpfung von Makro- und Mikroebene kann sowohl die standortbezogene Wirksamkeit einzelner Systeme als auch deren potenzielle gesamtstädtische Relevanz bewertet werden.

Die methodische Ausrichtung ist modell- und GIS-basiert. Sie verbindet räumliche Flächenanalysen mit hydrologischen Bilanzierungen auf Grundlage des DWA-M 102-4 (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) & Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e. V. (BWK), 2022) mikroklimatischen Simulationen unter Verwendung von UMEP (Lindberg et al., 2018). Im Mittelpunkt stehen dabei die Retentionstypen Mulde und Becken, da für diese sowohl hydrologische als auch mikroklimatisch relevante oberirdische Wirkungen untersucht werden können. Unterirdische technische Infrastrukturen wie Gruben werden demgegenüber nicht in die mikroklimatische Bewertung einbezogen, da ihnen keine unmittelbare oberirdische Verdunstungs-, Strahlungs- oder Verschattungswirkung zugeordnet werden kann.

Dabei werden hydrologische und mikroklimatische Funktionsleistungen über unterschiedliche Vergleichslogiken untersucht. Die hydrologische Bewertung erfolgt über den Vergleich eines naturnahen Referenzzustands, des gegenwärtigen Status quo mit Retentionssystemen sowie eines kontrafaktischen Szenarios vollständiger Versiegelung. Auf diese Weise kann die wasserhaushaltsbezogene Netto-Leistung bestehender Systeme als Differenzgröße bestimmt werden. Die mikroklimatische Bewertung basiert demgegenüber auf PET- und Tmrt-Vergleichen für das Quartier Ackermannbogen zwischen dem gegenwärtigen Klima und zukünftigen Klimaszenarien. Dies wird damit begründet, dass Retentionsflächen im Untersuchungsraum regelmäßig mit Entsiegelung, Vegetation und blau-grüner Freiraumstruktur einhergehen und somit nicht nur hydrologische, sondern auch thermisch wirksame Veränderungen des Stadtraums hervorrufen.

Die Ergebnisse werden in digitalen und interaktiven Dashboards aufbereitet, um eine nachvollziehbare und evidenzbasierte Grundlage für fachliche Bewertung, Kommunikation und zukünftige planerische Entscheidungen im Kontext der Schwammstadtentwicklung bereitzustellen.

## 2. Forschungsdesign und Methodik

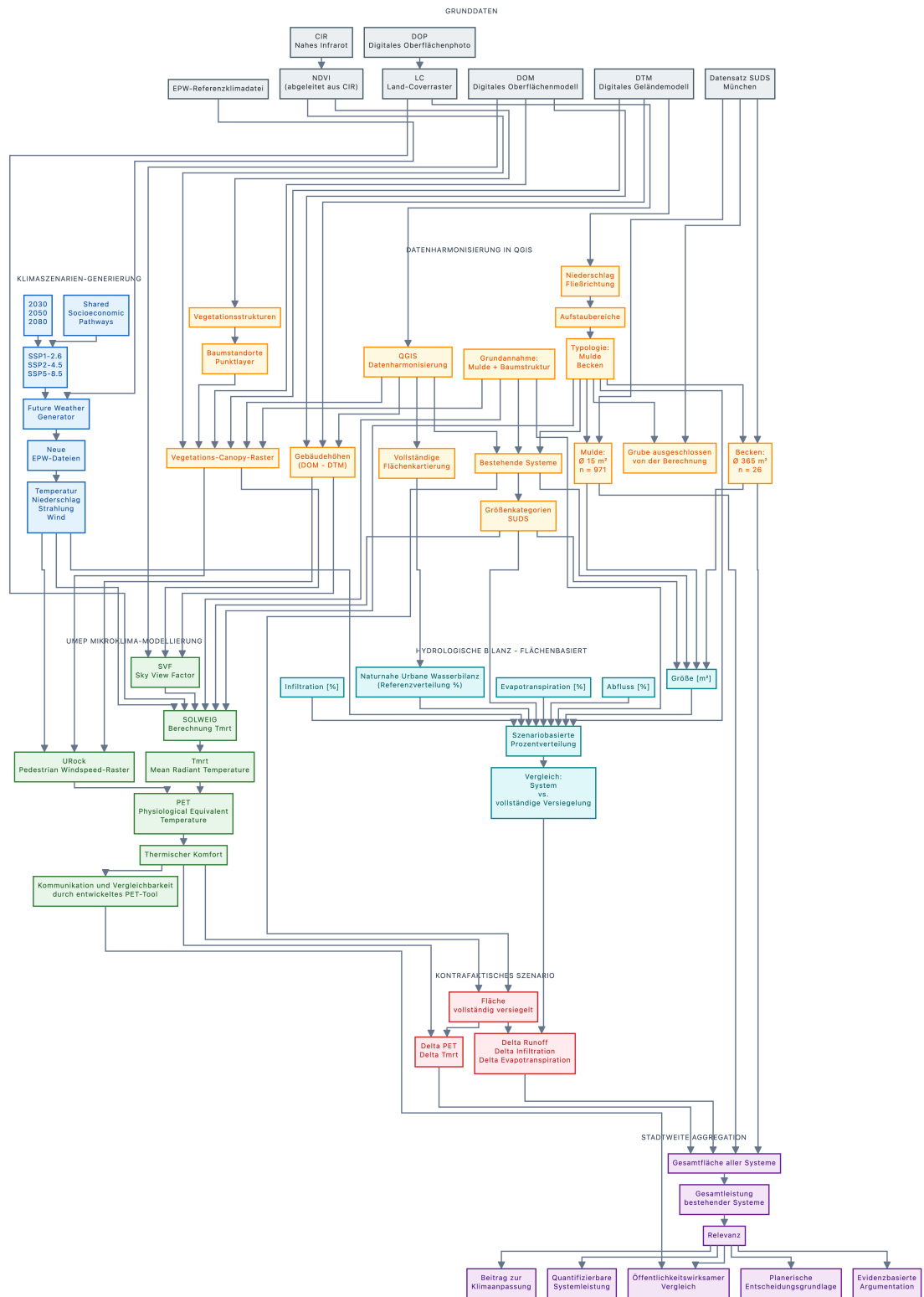


Abbildung 2 Layer des Forschungsdesigns

## 2.1. Grunddaten und Datengrundlage (Layer 0)

**Layer 0** bildet die geodaten- und klimadatenbasierte Ausgangsebene des Untersuchungsdesigns. In diesem Arbeitsschritt wurden diejenigen Grunddaten zusammengeführt, aus denen die nachfolgenden Schritte der Klimaszenarienbildung, GIS-Harmonisierung, hydrologischen Bilanzierung und mikroklimatischen Modellierung abgeleitet wurden.

Die räumliche Datengrundlage umfasste ein Digitales Oberflächenmodell (DOM), ein Digitales Geländemodell (DTM), Color-Infrarot-Daten (CIR), Orthophotos sowie ein daraus entwickeltes Land-Cover-Raster. Sämtliche Grundlagendaten wurden aus dem Open-Data-Portal Bayern (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2026) bezogen und mit einer räumlichen Rasterauflösung von  $1 \times 1$  m verarbeitet. Als einheitliches Referenzsystem wurde durchgängig ETRS89 / UTM Zone 32N (EPSG:25832) verwendet. Datensätze, die nicht bereits in diesem Koordinatensystem vorlagen, wurden vor der weiteren Verarbeitung in EPSG:25832 reprojiziert, sodass eine konsistente räumliche Überlagerung aller Eingangsdaten gewährleistet war. Die CIR-Daten wurden in einen NDVI-Datensatz überführt, um vegetationsbezogene Informationen in die weitere Flächenklassifikation und Canopy-Ableitung einzubinden.

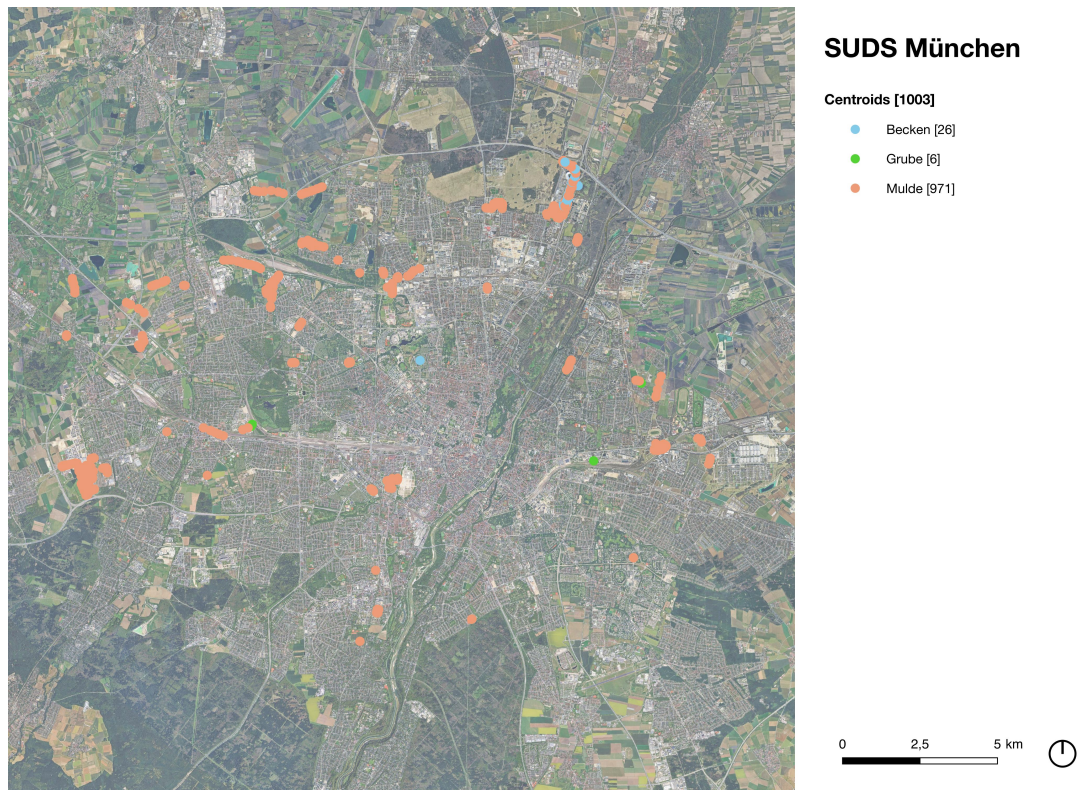
Das Land-Cover-Raster wurde nicht als fertiger Fremddatensatz übernommen, sondern aus den topographischen und bildbasierten Eingangsdaten klassifiziert, rasterisiert und anschließend händisch detailliert. Die definierten Klassen sowie ihr tatsächliches Auftreten im Untersuchungsdatensatz sind in Tab. 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1** Land-Cover-Klassen und Auftreten im Untersuchungsdatensatz

Land-Cover-Klasse	Im Datensatz belegt
Paved	Ja
Buildings	Ja
Evergreen trees	Ja
Deciduous trees	Ja
Grass	Ja
Bare soil	Nein
Water	Nein

Für die klimatologische Referenz wurde ein EPW-Wetterdatensatz des Standorts Munich.AP verwendet, der über [climate.onebuilding.org](https://climate.onebuilding.org) (Lawrie & Crawley, 2022) wurde. Der Datensatz referenziert auf die Koordinaten  $48.35^\circ$  N und  $11.783^\circ$  E bei einer Höhenlage von 448 m ü. NN und basiert auf Beobachtungsdaten aus dem Zeitraum 1930 bis 2023. Der Standort ist der Köppen-Geiger-Klimazone Cfb zugeordnet. Als charakteristische Standortparameter werden unter anderem eine mittlere Jahrestemperatur von  $8.8^\circ\text{C}$ , ein 99%-Temperaturwert von  $27.6^\circ\text{C}$ , ein 1%-Temperaturwert von  $-8.9^\circ\text{C}$ , eine jährliche horizontale Globalstrahlung von  $1174.92\text{ kWh/m}^2$  sowie ein diffuser Strahlungsanteil von 43.2% ausgewiesen. Diese EPW-Datei bildete die Referenz.

renz für die nachfolgende Generierung der Zukunftsszenarien und zugleich die meteorologische Baseline der mikroklimatischen Modellierung.



**Abbildung 3** Verortung der SUDS in München

Eine zentrale Grundlage der gesamtstädtischen Analyse war der SUDS-Datensatz für München. Dieser Datenbestand liegt als GIS-basierter Flächendatensatz vor und bildet die vorhandenen Retentionselemente im Stadtgebiet ab. Gemäß Datenkorpus und Kapitelbriefing umfasst der Rohbestand 1145 Objekte, von denen nach Bereinigung 1003 Elemente als nutzbar in die Analyse eingingen. Die Typenverteilung umfasst 971 Mulden, 26 Becken und 6 Gruben (vgl. Abb. 3). Für die vorliegende Untersuchung wurden Mulden und Becken als analytisch relevante oberirdische Retentionstypen weiterverarbeitet, während Gruben für die mikroklimatische Bewertung ausgeschlossen wurden, da ihnen keine unmittelbare oberirdische Verdunstungs-, Strahlungs- oder Verschattungswirkung zugeordnet werden kann. Die SUDS-Gesamtfläche beträgt  $79,559.49 \text{ m}^2$ ; die hydrologische Rechenbasis für Mulde und Becken liegt bei  $79,482.26 \text{ m}^2$ . Diese Fläche ist als Summe aller erfassten SUDS-Elemente zu verstehen.

Die Datengrundlage wurde zu Teilen sowohl für die gesamtstädtische Betrachtung Münchens als auch für die detaillierte Quartiersanalyse des Ackermannbogens verwendet. Layer 0 stellt damit die konsistente Ausgangsbasis für die weitere Ableitung der Zukunftsdaten, die GIS-Harmonisierung sowie die hydrologischen und mikroklimatischen Analysepfade dar. Die methodische Gesamtlogik entspricht damit der im Forschungsdesign Abb. 2 definierten Abfolge von Grunddaten, Szenariengenerierung, Harmonisierung, Modellierung und Aggregation. Die verwendeten Grundlagendaten sind in Tab. 2 aufgelistet.

**Tabelle 2** Kompaktes Inventar der Grunddaten

Datensatz	Rolle im Workflow	Hinweis
DOM / DTM	Höhenbasis für nDSM, Gebäude- und Vegetationsableitung	Raster, 1 m
CIR / Orthophotos	Vegetations- und Oberflächenklassifikation	NDVI/GNDVI/EVI
EPW Munich.AP	meteorologische Baseline und Zukunftsreferenz	Present-day plus SSPs
SUDS-Inventar München	stadträumliche Retentionsgrundlage	1003 nutzbare Elemente
Baumstandorte	Canopy- und Mikroklimabezug	Punktlayer

## 2.2. Klimaszenarien und Zukunftsdaten (Layer 1)

**Layer 1** umfasst die Bereitstellung und Strukturierung der klimatischen Zukunftsdaten für den szenariobasierten Analysepfad der Arbeit. Ziel dieses Arbeitsschritts war es, ein konsistentes Set aus Referenz- und Zukunftswetterdaten bereitzustellen, das für die EPW-basierte Szenarienanalyse sowie für die mikroklimatische Modellierung des Ackermannbogens verwendet werden konnte. Die Szenarienlogik folgt dabei einem einheitlichen SSP-/Referenzjahr-Schema, sodass alle klimabezogenen Vergleiche auf derselben Datenstruktur beruhen.

Als Baseline wurde ein Present-day-Datensatz verwendet, der die gegenwärtige klimatische Referenz repräsentiert (Lawrie & Crawley, 2022). Die Zukunftsdaten wurden für die beiden Zeithorizonte 2050 und 2080 erzeugt. Im Kontext des Future Weather Generator (Future Weather Generator Project, 2026) entsprechen diese Zeitscheiben den Referenzperioden 2036–2065 für 2050 sowie 2066–2095 für 2080, während die Gegenwartsreferenz auf dem Zeitraum 1985–2014 basiert. Auf dieser Grundlage wurden vier Shared Socioeconomic Pathways berücksichtigt, nämlich SSP1–2.6, SSP2–4.5, SSP3–7.0 und SSP5–8.5. Zusammen mit der Baseline ergab sich damit ein konsistentes Szenarienset aus einem Gegenwartszustand und acht Future-EPWs.

Die Zukunftswetterdateien wurden nicht manuell konstruiert, sondern mit dem Future Weather Generator (Future Weather Generator Project, 2026) aus einer Present-day-EPW transformiert. Damit wurde eine systematische Ableitung zukünftiger EPW-Dateien aus einer einheitlichen Ausgangsdatei sichergestellt. Ergänzend zu den generierten Wetterdateien wurden Vergleichs-CSV-Dateien verwendet, in denen die transformationsbezogenen Änderungen und Kenngrößen dokumentiert wurden. Diese doppelte Datenstruktur aus EPW-Dateien und Vergleichs-CSVs diente

der Nachvollziehbarkeit der Szenarienbildung und der späteren Auswertung in den zugehörigen Dashboards.

Die Transformation der Wetterdateien im Future Weather Generator basiert auf einem standardisierten Satz klimatischer Eingangsvariablen aus den verwendeten GCMs. Berücksichtigt wurden die Variablen TAS, TSMAX, TASMIN, PR, HUSS, PSL, CLT, RSDS, SND und SFCWIND. Für die Modellierung der diffusen Strahlungsanteile wurden die im Workflow implementierten Modelloptionen Ridley/Boland/Lauret, Engerer sowie Paulescu/Blaga als alternative Berechnungsansätze einbezogen. Ergänzend wurde mit den Gitterpunkt-Optionen (GPO) 0, 1 und 2 gearbeitet, die unterschiedliche Verfahren zur Aggregation der vier nächstgelegenen GCM-Gitterpunkte bzw. des daraus abgeleiteten Zellmittelpunkts abbilden. Diese Parametrisierung definiert den technischen Rahmen für die reproduzierbare Erzeugung der Future-EPWs und wurde als Teil der methodischen Dokumentation gesichert. Die Szenariologik ist in Abb. 4 verdichtet und in Tab. 3 zusammengefasst.

Die in Layer 1 erzeugten Zukunftsdaten wurden ausschließlich für den klimatischen Analysepfad eingesetzt. Sie flossen einerseits in die EPW-Szenarioanalyse auf Münchener Ebene ein und dienten andererseits als meteorologische Grundlage der PET- und Tmrt-Vergleiche im Quartier Ackermannbogen. Für die hydrologische Modellierung wurden diese SSP-Szenarien hingegen nicht verwendet. Die hydrologische Vergleichslogik basiert stattdessen auf dem Vergleich zwischen naturnahem Referenzzustand, Status quo mit Retentionssystemen und kontrafaktischem Versiegelungsszenario. Damit wird methodisch klar zwischen klimatischer Zukunftsprojektion und wasserhaushaltsbezogener Funktionsbewertung unterschieden.

Layer 1 stellt damit die klimatische Datengrundlage für alle szenariobasierten Aussagen zur zukünftigen mikroklimatischen Entwicklung des Untersuchungsraums bereit.

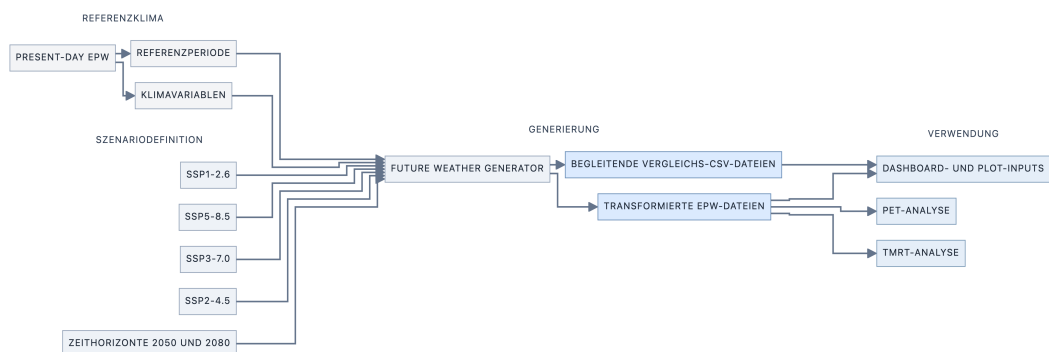


Abbildung 4 Szenarien-Generierungsfluss für die EPW-Dateien

**Tabelle 3** Kompakte SSP- und Zeitfenstermatrix

Szenario	Zeithorizont	Nutzung im Bericht
Present-day	Baseline	Ausgangspunkt für PET, Tmrt und Vergleichsplots
SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5	2050 / 2080	Zukunftspfad für die Mikroklima-Analyse

### 2.3. Datenharmonisierung und GIS-Verarbeitung (Layer 2)

**Layer 2** umfasst die GIS-basierte Harmonisierung, Ableitung und Aufbereitung jener Datensätze, die als unmittelbare Eingangsgrößen für die mikroklimatische Modellierung sowie für die hydrologische Funktionsbewertung benötigt wurden. Im Mittelpunkt standen dabei die Ableitung objektbezogener Höheninformationen, die Trennung von Gebäude- und Vegetationsstrukturen, die Erstellung der für UMEP erforderlichen Rasterprodukte sowie die flächenbezogene Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit für die hydrologische Bilanzierung.

Ein zentraler Verarbeitungsschritt bestand in der Ableitung eines normalisierten Digitalen Oberflächenmodells. Hierfür wurde das Digitale Oberflächenmodell mit dem Digitalen Geländemodell verschnitten, sodass sich das  $n$ DSM als relative Objekthöhe über Gelände ergab. Diese Differenzbildung diente als Grundlage für die weitere Trennung vertikaler Strukturen in Gebäude- und Vegetationselemente. Die topographischen sowie bildbasierten Eingangsdaten wurden auf eine einheitliche Rasterauflösung von  $1 \times 1$  m resampelt, um eine konsistente Weiterverarbeitung innerhalb der Modellkette zu gewährleisten.

Zur Ableitung vegetationsbezogener Informationen wurden aus den CIR-Daten spektrale Vegetationsindizes berechnet. Neben dem NDVI wurden auch GNDVI und EVI herangezogen, um vegetationsdominierte von nicht vegetationsdominierten Flächen sicherer unterscheiden zu können. Der NDVI diente dabei vor allem der allgemeinen Vegetationscharakterisierung, während der GNDVI in Kombination mit Höheninformationen für die Identifikation von Baumkronen und Vegetationsstrukturen oberhalb einer definierten Mindesthöhe eingesetzt wurde. Auf dieser Grundlage konnten Vegetationselemente von Gebäudestrukturen getrennt und für die weitere Modellierung gezielt maskiert werden.

Für die gebäudebezogene Modellierung wurden Gebäudegrundrisse rasterisiert und mit dem  $n$ DSM verschnitten. Daraus wurde ein Building Height Raster beziehungsweise ein gebäudebezogenes DSM abgeleitet, das ausschließlich die oberirdischen Baukörperhöhen abbildet. Ergänzend wurden daraus die für UMEP erforderlichen Raster der Wandhöhe (`wall height`) und Wandausrichtung (`wall aspect`) erzeugt. Diese Produkte waren notwendig, um die strahlungs-

und schattenbezogene Modellierung im Quartier Ackermannbogen geometrisch korrekt abzubilden.

Parallel dazu wurde ein vegetationsbezogenes Canopy-Modell erzeugt. Hierfür wurden relative Höheninformationen aus dem nDSM mit vegetationssensitiven Schwellenwerten verknüpft. Vegetationsstrukturen wurden nur dort als Baumkronen beziehungsweise Canopy interpretiert, wo eine Objekthöhe von  $> 3.5$  m und zugleich ein GNDVI-Wert von  $> 0.2$  vorlag. Zusätzlich wurden Gebäude explizit aus dieser Ableitung ausgeschlossen, sodass ein Canopy Digital Surface Model (CDSM) entstand, das ausschließlich vegetationsbezogene oberirdische Strukturen abbildet. Ergänzend wurden über mehrere Schritte mit Hilfe des CDSM und dessen maximal und minimalwerte Baumkronen als Vektorlayer abgeleitet. Diese dienten der geometrischen Plausibilisierung und der räumlichen Kontrolle der rasterbasierten Canopy-Ableitungen.

Ein weiterer Verarbeitungspfad betraf die Oberflächenklassifikation. Aufbauend auf den harmonisierten Eingangsdaten und den abgeleiteten Höhen- und Vegetationsinformationen wurde das Land-Cover-Raster für die weitere Modellierung präzisiert. Für die mikroklimatische Analyse war dieses Raster erforderlich, um Oberflächentypen räumlich differenziert in die UMEP-Modellkette einzuspeisen. Für die hydrologische Bilanzierung wurde darüber hinaus eine eigenständige Flächencharakterisierung der Oberflächenbeschaffenheiten vorgenommen. Diese diente der wasserhaushaltsbezogenen Zuordnung von Oberflächenfunktionen und bildete die Grundlage für die spätere Bewertung von Infiltration, Retention und Abflussverhalten. Die hydrologische Flächencharakterisierung war demnach nicht identisch mit dem mikroklimatisch motivierten Land-Cover-Raster, sondern auf die Anforderungen der wasserhaushaltsbezogenen Bilanzierung ausgerichtet.

Zur Unterstützung der hydrologischen Interpretation wurden außerdem Fließrichtungen (*flow directions*) sowie lokale Senken- beziehungsweise Beckenstrukturen (*water basins*) unter Verwendung der Toolchain *Channel Network and Drainage Basins* von SAGA GIS (Conrad, 2003) abgeleitet. Letztere entsprachen im Ackermannbogen weitgehend den im SUDS-Datensatz erfassten Beckenstrukturen und ermöglichten eine räumliche Verknüpfung zwischen topographisch ableitbaren Wasserakkumulationsräumen und den bereits kartierten Retentionselementen. Dadurch konnte die Lage der Becken nicht nur inventarbasiert, sondern auch relief- und abflussbezogen eingeordnet werden.

Als beispielhafte Ergebnisse werden hier SVF-, Fließrichtungs- und Basin-Raster aufgeführt. Diese Raster dienen im Bericht vor allem als methodische Diagnoseprodukte und werden in Abb. ??, in Abb. 6 sowie Abb. 7 zusammengefasst.

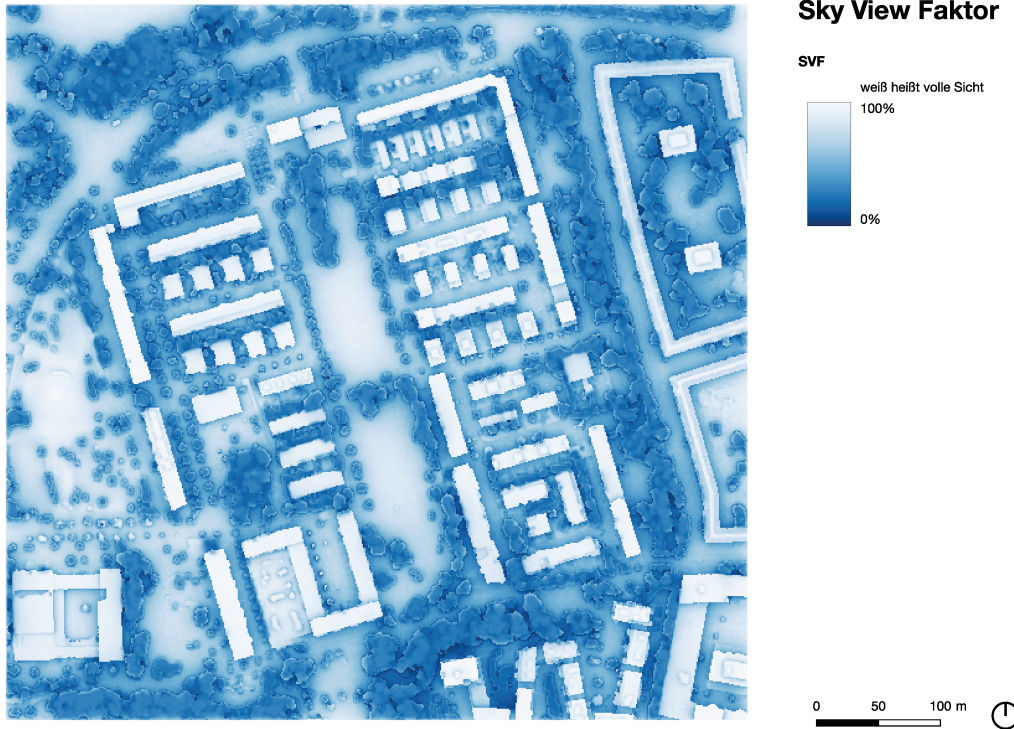


Abbildung 5 SVF-Diagnostik für den Ackermannbogen

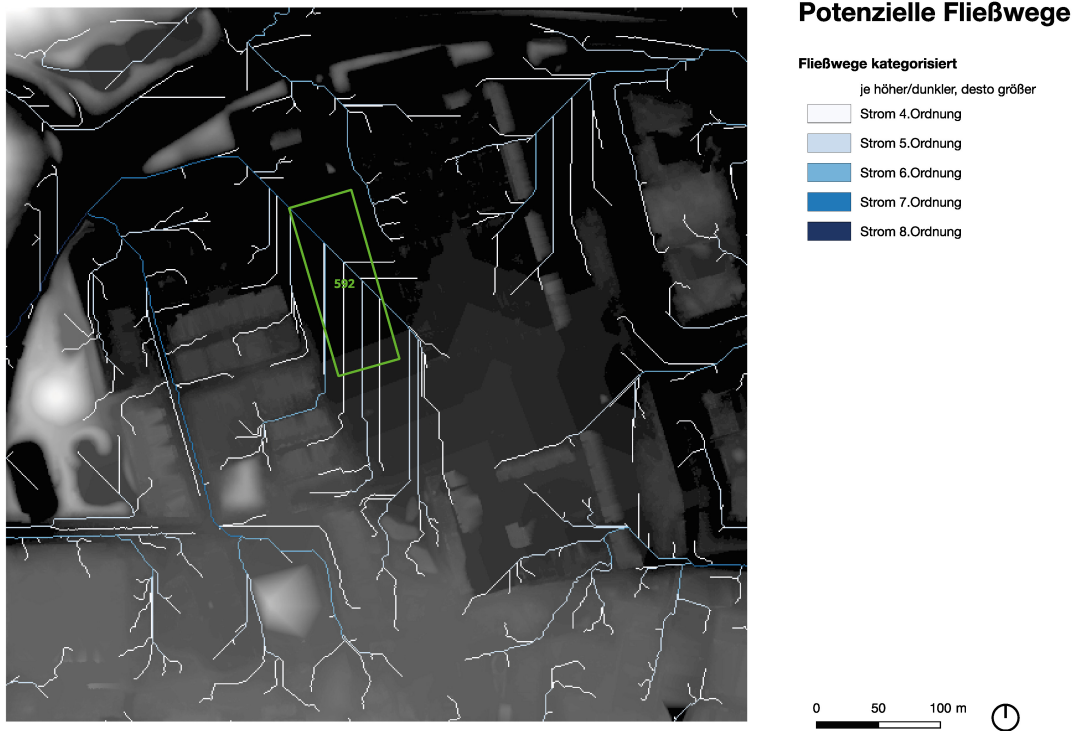
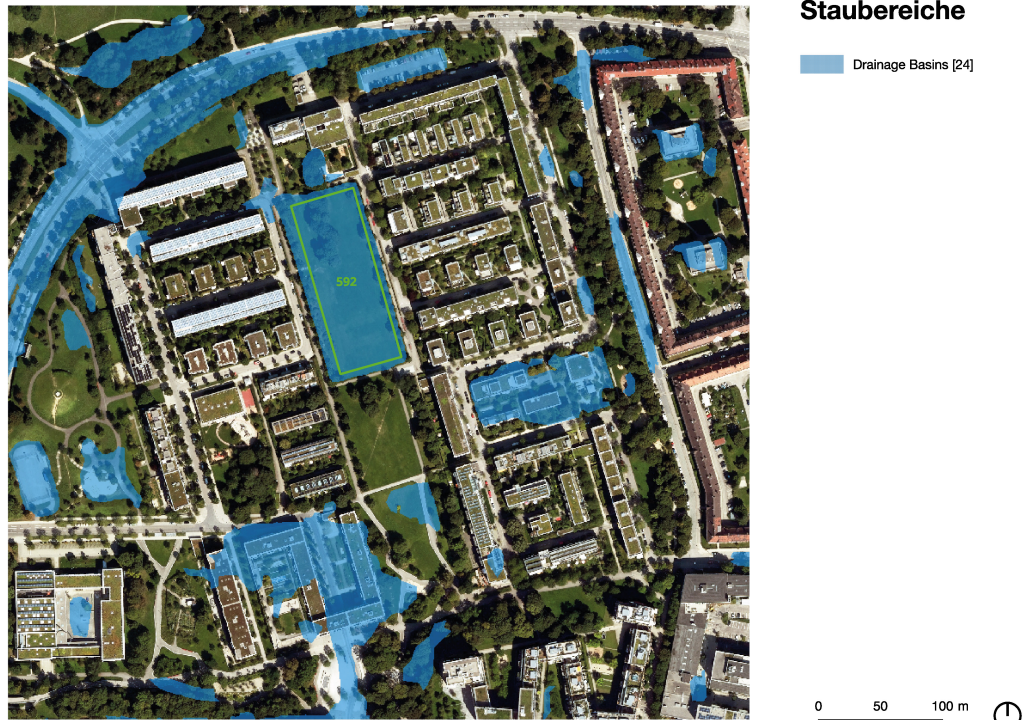


Abbildung 6 Fließrichtungen und Basin-Strukturen im Ackermannbogen



**Abbildung 7** Potenzielle Aufstaubereiche bei (Stark-)regen

## 2.4. Mikroklimatische Modellierung (Layer 3)

**Layer 3** umfasst die mikroklimatische Modellierung des Untersuchungsgebiets Ackermannbogen. Ziel dieses Arbeitsschritts war die quantitative Erfassung der thermischen und strahlungsbezogenen Wirkungen der vorhandenen blau-grünen Freiraumstruktur unter gegenwärtigen sowie zukünftigen Klimabedingungen (Brown & Gillespie, 1995). Im Unterschied zur hydrologischen Analyse, die auf einem Vergleich zwischen naturnahem Referenzzustand, Status quo und kontrafaktischer Versiegelung basiert, wurde die mikroklimatische Bewertung als szenariobasierter Klimavergleich für den realen räumlichen Zustand des Ackermannbogens durchgeführt. Diese Vorgehensweise wurde damit begründet, dass Retentionsflächen im Untersuchungsraum stets mit Entsigelung, Vegetation und oberirdisch wirksamer Freiraumstruktur einhergehen und ihre mikroklimatische Wirkung daher nur in der konkreten räumlichen Konfiguration des Quartiers belastbar abgebildet werden kann.

Die Modellierung erfolgte mit UMEP unter Verwendung der Module SOLWEIG v2025a, UROCK v2023a, Sky View Factor sowie Outdoor Spatial Comfort: Spatial Thermal Comfort, in dem die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) berechnet wurde. Die einzelnen Module wurden in einer gekoppelten Modellkette eingesetzt. SOLWEIG diente der Berechnung strahlungs- und schattenbezogener Parameter, insbesondere der mittleren Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ ) sowie der räumlichen Verteilung direkter und diffuser Strahlungswirkungen. Sky View Factor wurde zur Erfassung der geometrischen Offenheit des Stadtraums eingesetzt. UROCK wurde zur

windfeldbezogenen Modellierung verwendet und lieferte die für die räumliche Komfortbewertung notwendigen Windinformationen. Diese Winddaten gingen wiederum in die Berechnung der PET ein, sodass neben Strahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchte auch die lokale Winddynamik in die thermophysiologische Bewertung einbezogen wurde (Broadbent et al., 2018; Coutts et al., 2013).

Als Eingangsgrößen wurden die in Layer 2 erzeugten Rasterprodukte verwendet. Dazu gehörten insbesondere das DSM, das CDSM, das Gebäude-Raster, die Raster der Wandhöhe und Wandausrichtung sowie das Land-Cover-Raster. Ergänzt wurden diese Geometriedaten durch die meteorologischen Eingangsdaten aus den EPW-Dateien. Die Modellkette wurde für den Present-day-Zustand sowie für sämtliche Zukunftsszenarien SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5 in den Zeithorizonten 2050 und 2080 durchgeführt. Damit wurde die mikroklimatische Reaktion des Quartiers auf ein konsistentes Set unterschiedlicher klimatischer Entwicklungspfade untersucht.

Die Simulationen wurden für einen festen Modellzeitpunkt durchgeführt. Als Bezugszeit wurde durchgängig der 224. Tag des Jahres um 14:00 Uhr gewählt. Dieser Zeitpunkt wurde als repräsentativer Belastungszeitpunkt mit ausgeprägten sommerlichen Extrembedingungen definiert und diente der vergleichbaren Bewertung aller Szenarien. Die Wahl eines einheitlichen Simulationszeitpunkts ermöglichte es, Unterschiede zwischen den Szenarien auf identischer strahlungs- und tageszeitbezogener Grundlage zu analysieren und extreme thermische Belastungssituationen im Quartier gezielt sichtbar zu machen.

Die Modelloutputs wurden rasterbasiert erzeugt. Es wurden somit keine punktuellen Rezeptorwerte, sondern flächendeckende räumliche Verteilungen der relevanten Mikroklimaparameter berechnet. Zu den zentralen Ergebnisgrößen gehörten die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET), die mittlere Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ ), Windfelder, Verschattungsmuster sowie weitere strahlungs- und komfortbezogene Rasteroutputs. Diese räumlich kontinuierlichen Ergebnisflächen bildeten die Grundlage der nachfolgenden GIS-gestützten Analyse und wurden zudem in die interaktiven Dashboards überführt, um die räumliche Wirkung der unterschiedlichen Klimaszenarien nachvollziehbar und explorativ darstellbar zu machen.

Methodisch lag der Schwerpunkt dieses Layers auf der vergleichenden Bewertung des thermischen Komforts unter veränderten klimatischen Rahmenbedingungen. Die räumliche Struktur des Ackermannbogens blieb dabei konstant, während die meteorologischen Eingangsdaten szenarienabhängig variierten. Auf diese Weise konnte isoliert untersucht werden, wie sich die mikroklimatische Leistungsfähigkeit des vorhandenen Quartiers unter zukünftigen Klimabedingungen verändert. Layer 3 stellt damit den zentralen Analysepfad für die Bewertung der klimatischen Funktionsleistung der oberirdisch wirksamen Retentions- und Freiraumstrukturen dar und bildet die Grundlage für die späteren PET- und  $T_{mrt}$ -Vergleiche im Ergebnisteil. Die Modellkette ist in Abb. 8 zusammengefasst; die zentralen Ausgabewerte stehen in Tab. 4.

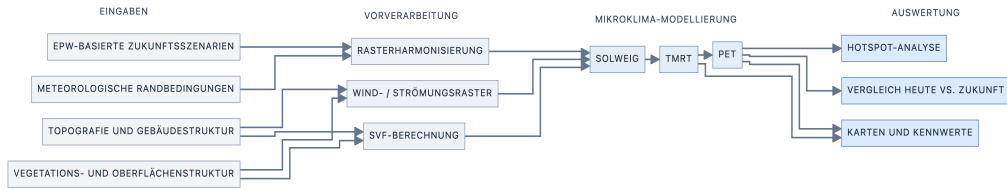


Abbildung 8 Mikroklima-Modellkette für den Ackermannbogen

Tabelle 4 Zentrale Mikroklima-Ausgaben

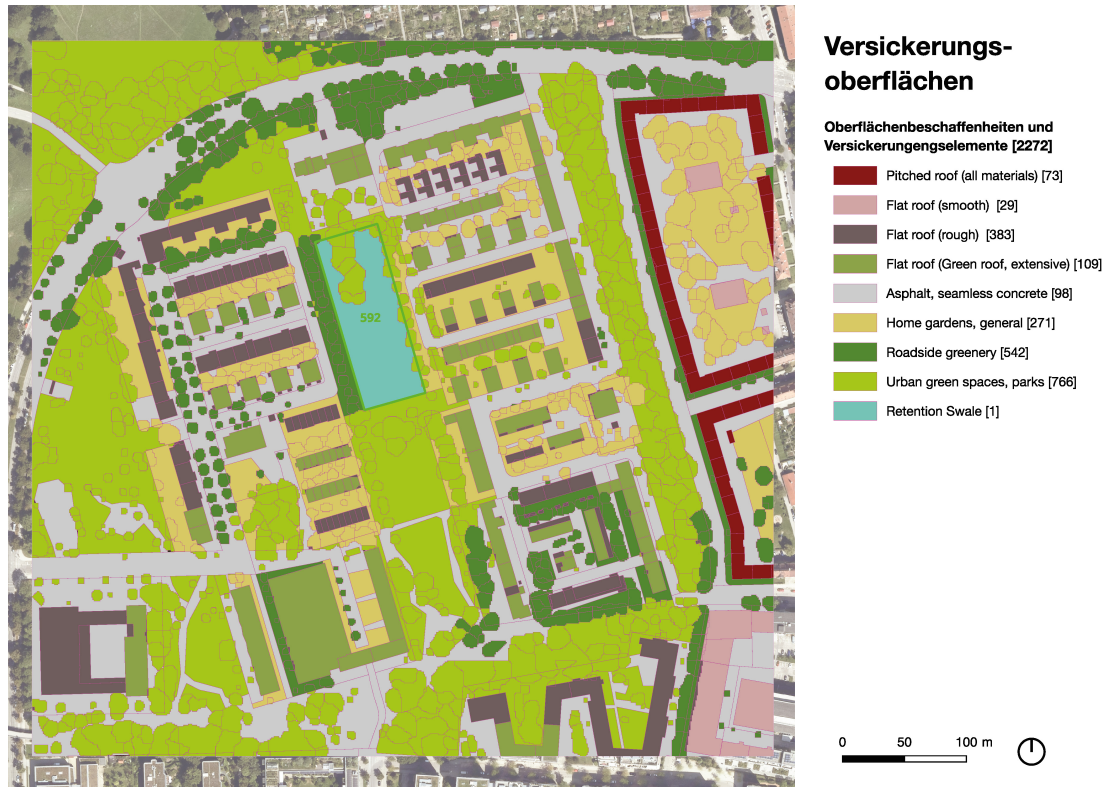
Ausgabe	Bezug	Hinweis
PET	Present-day / SS-Ps	Hauptindikator für thermischen Komfort
Tmrt	Present-day / SS-Ps	Strahlungsbezogene Belastung
Wind	1.5 m Höhe	Randbedingung für PET
Rasteroutputs	ganzflächig	Grundlage für Karten und Dashboards

## 2.5. Hydrologische Modellierung (Layer 4)

**Layer 4** umfasst die hydrologische Modellierung der wasserhaushaltsbezogenen Funktionsleistung der betrachteten Retentionstypen. Ziel dieses Arbeitsschritts war die Quantifizierung der Beiträge von Mulden und Becken zur Retention, Infiltration und Abflussreduktion im Vergleich zu einem naturnahen Referenzzustand sowie zu einem kontrafaktischen Versiegelungsszenario. Die Berechnung erfolgte ausschließlich auf Grundlage des Regelwerks DWA-M 102-4 (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) & Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e. V. (BWK), 2022) orientierte sich damit an einem etablierten wasserwirtschaftlichen Verfahren zur Bilanzierung von Niederschlagswasser in urbanen Räumen.

Die hydrologische Bewertung wurde nicht rasterbasiert, sondern auf polygonbezogenen Flächeneinheiten durchgeführt. Ausgangspunkt waren Oberflächenpolygone, denen je nach Flächentyp und Durchlässigkeit unterschiedliche hydrologische Eigenschaften zugeordnet wurden. Auf dieser Grundlage konnten die wasserhaushaltsbezogenen Teilfunktionen der Flächen differenziert bilanziert werden. Berücksichtigt wurden insbesondere die Größen Retention, Infiltration und Oberflächenabfluss. Die Modellierung zielte somit nicht auf eine ereignisbasierte hydraulische Simulation ab, sondern auf eine vereinfachte, flächenbezogene Wasserhaushaltsbilanz im Sinne einer vergleichenden Funktionsbewertung.

Die Berechnung erfolgte über drei Vergleichszustände. Erstens wurde ein standortspezifisch ermittelter naturnaher Referenzzustand (NaUrWb) angesetzt, um einen Ziel- beziehungsweise Vergleichswert für einen möglichst unbeeinträchtigten Wasserhaushalt bereitzustellen (Schmit, 2023). Zweitens wurde der gegenwärtige Status quo mit den vorhandenen Retentionstypen modelliert. Drittens wurde ein kontrafaktisches Szenario vollständiger Versiegelung definiert, in dem die betrachteten Retentionsflächen als versiegelt angenommen wurden und anfallendes Niederschlagswasser vollständig in die Kanalisation abgeführt wird. Durch diese Drei-Zustände-Logik konnte die hydrologische Netto-Leistung bestehender Retentionssysteme als Differenz zwischen Realzustand, naturnahem Zielzustand und versiegelter Gegenwelt ausgewiesen werden.



**Abbildung 9** Oberflächenklassifikation des Untersuchungsgebietes Ackermannbogen

Für die Zuordnung hydrologischer Parameter wurde eine differenzierte Oberflächenklassifikation verwendet. Die berücksichtigten Flächenklassen sind in Tab. 5 zusammengefasst. Diese Flächenklassen wurden den Polygonen zugewiesen, wie in Abb. 9 und bildeten die Grundlage der parameterbezogenen Differenzierung der Wasserhaushaltsbilanz.

**Tabelle 5** Hydrologische Flächenklassen

Flächenklasse	Fläche [m <sup>2</sup> ]
Pitched roof (all materials)	7 720.04
Flat roof (smooth)	5 917.30
Flat roof (rough)	21 228.56
Flat roof (gravel)	0.00
Flat roof (Green roof, extensive)	27 446.26
Flat roof (Green roof, intensive)	0.00
Flat roof (Retention roof)	0.00
Asphalt, seamless concrete	92 250.00
Paving with tight joints	0.00
Partially permeable surface coverings (joint ratio 2 % to 5 %)	0.00
Partially permeable surface coverings (joint ratio 6 % to 10 %)	0.00
Partially permeable coverings (porous stones, seepage stones)	0.00
Grass pavers (joint ratio 20 % to 30 %)	0.00
Surface courses without binder (water-bound surface)	0.00
Open water surface	0.00
Urban greenery in dense development	0.00
Vegetation in industrial and commercial space	0.00
Home gardens, general	43 248.49
House gardens, south facing, irrigated	0.00
Roadside greenery	38 662.10
Urban green spaces, parks	102 854.38

Für den Status quo wurde vereinfachend angenommen, dass die gesamten an die betrachteten Becken angeschlossenen versiegelten Flächen beziehungsweise Dachflächen in die jeweilige Retentionsfläche entwässern. Damit wurde die hydrologische Wirkung der Becken als aufnehmende und versickerungswirksame Struktur in einer abstrahierten, aber vergleichbar operationalisierbaren Form abgebildet. Für die Becken wurde im Status quo die höchste Versickerungskapazität mit einem  $k_f$ -Wert von 3600 mm/h angesetzt. Diese Annahme diente der modellhaften Erfassung eines sehr hohen Versickerungspotenzials innerhalb der Retentionsfläche. Im kontrafaktischen Szenario wurde demgegenüber unterstellt, dass auch die Beckenflächen selbst versiegelt sind, sodass kein versickerungswirksamer Retentionsraum mehr vorhanden ist und der anfallende Niederschlag vollständig dem Abflusssystem beziehungsweise der Kanalisation zugeführt wird.

Zwischen den beiden Maßstabsebenen bestand dabei eine methodische Differenzierung. Auf gesamtstädtischer Ebene wurden Mulden und Becken als hydrologisch relevante Retentionsty-

pen berücksichtigt. Für das Quartier Ackermannbogen lag der hydrologische Fokus hingegen ausschließlich auf Becken. Damit wurde der hydrologische Vergleich auf Quartiersebene gezielt an jene Retentionselemente angepasst, die im Untersuchungsraum tatsächlich als maßgebliche wasserhaushaltswirksame Struktur vorlagen.

Die hydrologische Modellierung diente damit der vereinfachten, aber systematischen Gegenüberstellung unterschiedlicher wasserhaushaltsbezogener Zustände. Layer 4 liefert damit die Grundlage für die spätere Darstellung der hydrologischen Leistungsdifferenzen zwischen naturnahem Referenzzustand, realem Bestand und kontrafaktischer Vollversiegelung auf Quartiers- und Stadtebene.

## 2.6. Kontrafaktisches Szenario (Layer 5)

**Layer 5** umfasst die Konstruktion des kontrafaktischen Szenarios, das als analytische Vergleichsfolie für die Bewertung der Netto-Leistung bestehender Retentionssysteme diente. Ziel dieses Arbeitsschritts war die Formulierung eines bewusst vereinfachten Gegenbilds zum Realzustand, in dem die wasserhaushalts- und mikroklimatisch wirksamen Retentionsflächen nicht als entsiegelte oder versickerungsfähige Elemente, sondern als vollständig versiegelte Flächen betrachtet werden. Das kontrafaktische Szenario fungiert damit nicht als Prognose, sondern als methodisches Referenzmodell, anhand dessen sichtbar gemacht werden kann, welche Leistungen durch die vorhandene blau-grüne Infrastruktur gegenüber einer hypothetischen Vollversiegelung überhaupt erbracht werden.

Inhaltlich beschränkte sich die Umwandlung im kontrafaktischen Szenario auf die Retentionsflächen selbst. Es wurden somit ausschließlich die jeweiligen Beckenflächen umcodiert, während angrenzende Grün- und Freiflächen unverändert blieben. Diese Entscheidung ist methodisch bedeutsam, da auf diese Weise die Wirkung der Retentionsfläche als eigenständiges Infrastrukturelement isoliert betrachtet werden konnte. Die Kontrafaktik zielte somit nicht auf eine vollständige Transformation des umgebenden Freiraums, sondern auf die gezielte Negation jener Fläche, die im Realzustand die zentrale Retentions- und Versickerungsfunktion übernimmt.

Für die hydrologische Modellierung bedeutete dies, dass die Beckenflächen im kontrafaktischen Zustand als versiegelt angenommen wurden. Daraus folgte, dass die im Status quo vorhandene Speicher- und Versickerungsleistung entfiel und der anfallende Niederschlag vollständig in das Abflusssystem beziehungsweise in die Kanalisation abgeführt wurde. Auf diese Weise konnte die wasserhaushaltsbezogene Differenz zwischen Realzustand und kontrafaktischem Zustand als direkte Maßzahl der hydrologischen Netto-Leistung interpretiert werden. Die Kontrafaktik bildete damit einen zentralen Bestandteil des Drei-Zustände-Vergleichs zwischen NaUrWb, Status quo und Vollversiegelung.

Dieselbe kontrafaktische Grundlogik wurde sowohl für die Untersuchung des Ackermannbogens als auch für die gesamtstädtische Analyse Münchens verwendet. Trotz der unterschiedlichen Maßstabsebenen blieb somit die methodische Konstruktion des Gegenbilds identisch. Auf Quar-

tiersebene bezog sich die Kontrafaktik ausschließlich auf die dort relevanten Beckenstrukturen. Auf gesamtstädtischer Ebene wurde dieselbe Logik auf alle 1003 SUDS übertragen.

Layer 5 stellt damit die methodische Brücke zwischen Realzustand und Deltaanalyse dar. Die kontrafaktische Perspektive ist für die spätere Synthese zentral, da sie die planerische Relevanz der vorhandenen SUDS-Elemente als tatsächlich wirksame Bestandteile einer Schwammstadt-Logik quantifizierbar macht.

## 2.7. Skalierung und Aggregation (Layer 6)

**Layer 6** umfasst die Aggregation und maßstabsbezogene Zusammenführung der in den vorangehenden Schritten erzeugten hydrologischen und mikroklimatischen Ergebnisse. Ziel dieses Arbeitsschritts war es, die kleinräumig und objektbezogen erzeugten Resultate in eine übergeordnete, vergleichende Auswertung zu überführen und dadurch die Relevanz der untersuchten Retentionssysteme auf unterschiedlichen Maßstabsebenen sichtbar zu machen. Dabei wurde bewusst zwischen hydrologischer Hochrechnung und mikroklimatischer Fallstudienanalyse unterschieden.

Die Skalierung auf die gesamtstädtische Ebene erfolgte ausschließlich für den hydrologischen Analysepfad. Die auf Polygon- und Retentionstypenebene berechneten Wasserhaushaltsgrößen wurden auf das Stadtgebiet München aggregiert, um die gesamtstädtische Funktionsleistung der betrachteten SUDS-Elemente in vergleichender Form auszuweisen. Im Zentrum standen dabei Summenbildungen sowie gegenüberstellende Wasserbilanzkennzahlen für die Zustände NaUrWb, Status quo und kontrafaktische Versiegelung. Auf diese Weise konnte dargestellt werden, in welchem Umfang die vorhandenen Retentionssysteme auf stadträumlicher Ebene zu Retention, Infiltration und Abflussreduktion beitragen und wie stark diese Leistungen gegenüber einem vollständig versiegelten Referenzzustand abweichen.

Die mikroklimatische Analyse wurde demgegenüber nicht auf die gesamtstädtische Ebene hochgerechnet. PET- und T<sub>mr,t</sub>-Vergleiche wurden ausschließlich auf Quartiersebene für den Ackermannbogen durchgeführt. Dies wurde damit begründet, dass thermischer Komfort, Strahlungsbelastung und windbezogene Freiraumwirkungen in besonderem Maße an konkrete räumliche Situationen gebunden sind und daher vor allem für jene Stadträume belastbar analysiert werden können, in denen sich Menschen tatsächlich aufhalten. Der Ackermannbogen wurde in diesem Zusammenhang als repräsentativer urbaner Freiraumkontext verstanden, in dem die mikroklimatischen Wirkungen entsiegelter und vegetationsgeprägter Strukturen exemplarisch sichtbar gemacht werden konnten.

Die Aggregation erfolgte demnach entlang zweier unterschiedlicher Ergebnislogiken. Hydrologisch wurden summierte Flächen- und Bilanzgrößen vergleichend zusammengeführt. Mikroklimatisch wurden rasterbasierte Ergebnisfelder des Quartiers szenarienbezogen ausgewertet und gegenübergestellt. Layer 6 übernimmt damit die Funktion einer synthetisierenden Ebene, in der nicht neue Modellierungen durchgeführt, sondern bereits erzeugte Resultate in eine skalierte und

interpretierbare Ergebnisform überführt werden.

Eine wichtige Rolle kam in diesem Zusammenhang der digitalen Ergebnisaufbereitung zu. Die in den vorangegangenen Layern erzeugten Daten und Resultate wurden in interaktive Dashboards überführt, um hydrologische und klimatische Vergleiche übersichtlich, explorativ und maßstabsbezogen darzustellen. Für die hydrologische Analyse ermöglichten die Dashboards eine vergleichende Sicht auf Summen, Differenzen und Wasserbilanzkennzahlen zwischen den untersuchten Zuständen. Für die klimatische Analyse dienten sie der interaktiven Erlebbarkeit der rasterbasierten PET-,  $T_{mrt}$ -, Wind- und Strahlungsergebnisse auf Quartiersebene. Die Dashboards fungierten damit nicht nur als Visualisierungsinstrument, sondern auch als Schnittstelle zwischen analytischer Modellierung, vergleichender Auswertung und planerischer Kommunikation.

Layer 6 schließt somit die methodische Kette ab, indem die sektoral erzeugten Analyseergebnisse in eine gemeinsame Ergebnisarchitektur überführt werden. Während die hydrologische Funktionsleistung auf die gesamtstädtische Ebene aggregiert wird, verbleibt die mikroklimatische Bewertung bewusst auf der Ebene des konkreten Stadtraums.

## 3. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in drei Ebenen zusammengeführt: der Fallstudie Ackermannbogen, dem Quartiersvergleich und der gesamtstädtischen Hochrechnung. Die Visualisierungsschicht wird anschließend in Kapitel 5 separat dokumentiert.

### 3.1. Fallstudie Ackermannbogen

#### 3.1.1. Flächenstruktur und Retentionselemente

Die Fallstudie Ackermannbogen basiert auf einer modellierten Gesamtfläche von 345,727.13 m<sup>2</sup>. Für die hydrologische und mikroklimatische Bewertung ist diese Flächenmatrix die maßgebliche räumliche Grundlage, da sich die nachfolgenden Szenarien nicht auf eine Veränderung der Gesamtfläche, sondern auf eine veränderte Zusammensetzung einzelner Oberflächentypen und auf die Wirkung eines lokalen Retentionselements beziehen. Das Unterkapitel beschreibt daher nicht den gesamtstädtischen Münchner SUDS-Bestand, sondern ausschließlich die lokale Flächenstruktur des Untersuchungsraums Ackermannbogen sowie das dort berücksichtigte Becken als hydrologisch wirksames SUDS-Element.

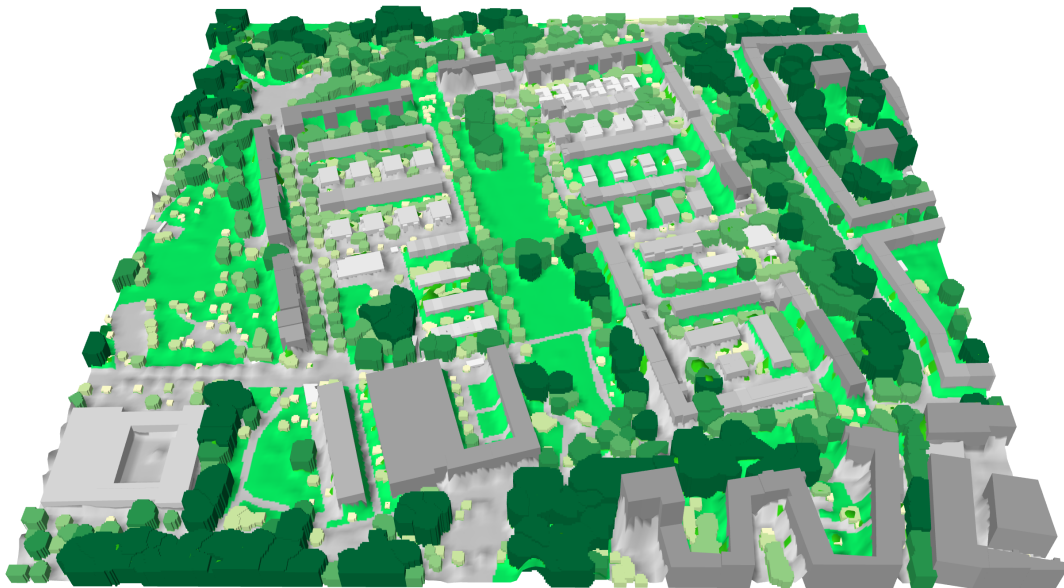
Im Status quo setzt sich die Fläche aus mehreren oberflächen- und nutzungsbezogenen Klassen zusammen. Berücksichtigt wurden geneigte Dächer mit 7,720.04 m<sup>2</sup>, glatte Flachdächer mit 5,917.30 m<sup>2</sup>, raue Flachdächer mit 21,228.56 m<sup>2</sup> sowie extensive Gründächer mit 27,446.26 m<sup>2</sup>. Hinzu kommen 92,250.00 m<sup>2</sup> Asphalt- beziehungsweise nahtlose Betonflächen, 43,248.49 m<sup>2</sup> Hausgärten, 38,662.10 m<sup>2</sup> straßenbegleitende Grünflächen sowie 102,854.38 m<sup>2</sup> urbane Grün- und Parkflächen. Diese Flächenaufteilung zeigt, dass der Ackermannbogen durch ein gemischtes Oberflächengefüge aus stark versiegelten, begrünten und dachbezogenen Teilräumen geprägt ist, das sowohl für die Wasserbilanz als auch für die mikroklimatische Modellierung von zentraler Bedeutung ist.

Als lokales Retentionselement des Status quo wurde im Ackermannbogen ein Becken mit einer Fläche von 6,400 m<sup>2</sup> modelliert. Das Becken stellt damit das zentrale SUDS-Element der Quartiersfallstudie dar und fungiert als hydrologischer Knotenpunkt des lokalen Systems. Seine Relevanz ergibt sich nicht allein aus seiner Flächengröße, sondern insbesondere aus seiner funktionalen Rolle innerhalb der Routinglogik, da an dieses Element Dach- und Verkehrsflächen angeschlossen werden und dadurch Retention und Versickerung im Status quo ermöglicht werden.

Die Szenarienlogik beruht darauf, dass die Gesamtfläche des Quartiers konstant bleibt, während einzelne Oberflächenanteile verschoben werden. Die zentrale lokale Differenz betrifft die Flächenverschiebung von 6,400 m<sup>2</sup> – welche der Größe des Retentionsbeckens entspricht – zwischen versiegelter und begrünter Oberfläche. Im Vergleich der Szenarien wird Asphalt um 6,400 m<sup>2</sup> erhöht, während die Kategorie *Urban green spaces, parks* um denselben Wert reduziert wird. Damit bleibt die Gesamtfläche zwar unverändert, die wasserhaushalts- und freiraumbezo-

gene Qualität des Quartiers verändert sich jedoch deutlich. Diese Flächenverschiebung bildet die zentrale räumliche Voraussetzung für die nachfolgende hydrologische Szenarienbewertung, da sie direkt auf Abfluss, Infiltration und Verdunstung einwirkt.

Die Flächenstruktur des Ackermannbogens dient als funktionale Modellgrundlage für Wasserbilanz und mikroklimatische Simulationen. Unterschiede zwischen den Szenarien entstehen nicht durch eine veränderte Quartiersgröße, sondern durch die Umverteilung von Oberflächenqualitäten sowie die Präsenz bzw. Aktivierung des lokalen Retentionselements. Damit bildet sie die räumliche und analytische Basis zur Bewertung der hydrologischen und mikroklimatischen Funktionsleistung des Quartiers.



**Abbildung 10** Dreidimensionale Übersicht des Ackermannbogens

Die räumliche Einordnung dieser Flächen lässt sich über Abb. 10 nachvollziehen; dort sind Gelände, Bebauung und Freiraumstruktur gemeinsam lesbar.

### 3.1.2. Hydrologische Funktionsleistung

Die hydrologische Funktionsleistung des Ackermannbogens wurde über einen Drei-Szenarien-Vergleich ausgewertet. Verglichen wurden der Status quo mit aktivem SUD-Element (*Scenario 1*), ein kontrafaktisch versiegelter Vergleichsfall ohne wirksame Rückhaltung und Versickerung (*Scenario 2*) sowie ein standortspezifisch ermittelter naturnaher Referenzzustand (*Scenario 3*). Die Bewertung erfolgte über die Kenngrößen Oberflächenabfluss, Infiltration und Evapotranspiration. Als konstante Modellparameter wurden ein Jahresniederschlag von  $P = 1086.80 \text{ mm/a}$ , eine potentielle Evapotranspiration von  $ET_p = 571.79 \text{ mm/a}$ , ein Flächenverhältnis von  $A_{ratio} = 10$  sowie ein Speicher- bzw. Bilanzparameter von  $Z = 11,954.80 \text{ l/(m}^2 \cdot \text{a)}$  angesetzt. Die zugrunde gelegte Modellfläche beträgt  $345,727.13 \text{ m}^2$ . Die kompakten Kennzahlen sind in Abb. 11 und Tab. 6 verdichtet; die Delta-Logik steht in Anhang A.4.

Im Status quo (*Scenario 1*) wurde ein sehr geringer Oberflächenabfluss von 2.65 mm/a berechnet. Demgegenüber standen eine Infiltration von 680.83 mm/a und eine Evapotranspiration von 372.25 mm/a. In prozentualer Zusammensetzung entfielen damit 0.24 % auf Abfluss, 62.65 % auf Infiltration und 34.25 % auf Evapotranspiration. Dieses Ergebnis verweist auf eine stark versickerungsorientierte Wasserhaushaltsfunktion des Becken-Systems im realen Quartierszustand. Der Status quo ist somit durch eine nahezu vollständige Unterdrückung des Oberflächenabflusses und eine deutliche Verlagerung des Niederschlags in unterirdische beziehungsweise verdunstungsbezogene Pfade gekennzeichnet.

Im kontrafaktischen Vergleichsfall (*Scenario 2*), in dem dieselbe Fläche als versiegelt angenommen und ohne Rückhaltung direkt an das Abwassersystem angeschlossen wurde, veränderte sich die Bilanz grundlegend. Der Abfluss stieg auf 504.31 mm/a, während die Infiltration auf 182.26 mm/a absank. Die Evapotranspiration betrug in diesem Fall 369.17 mm/a. Prozentual entspricht dies 46.40 % Abfluss, 16.77 % Infiltration und 33.97 % Evapotranspiration. Die Flächenzusammensetzung blieb dabei inhaltlich gleich; verändert wurde ausschließlich die Routinglogik, indem die im Status quo an das Becken angeschlossenen Dach- und Verkehrsflächen im kontrafaktischen Zustand direkt in das Entwässerungssystem geleitet wurden. Gerade diese Routing-Umstellung ist die zentrale Ursache für den starken Anstieg des Oberflächenabflusses.

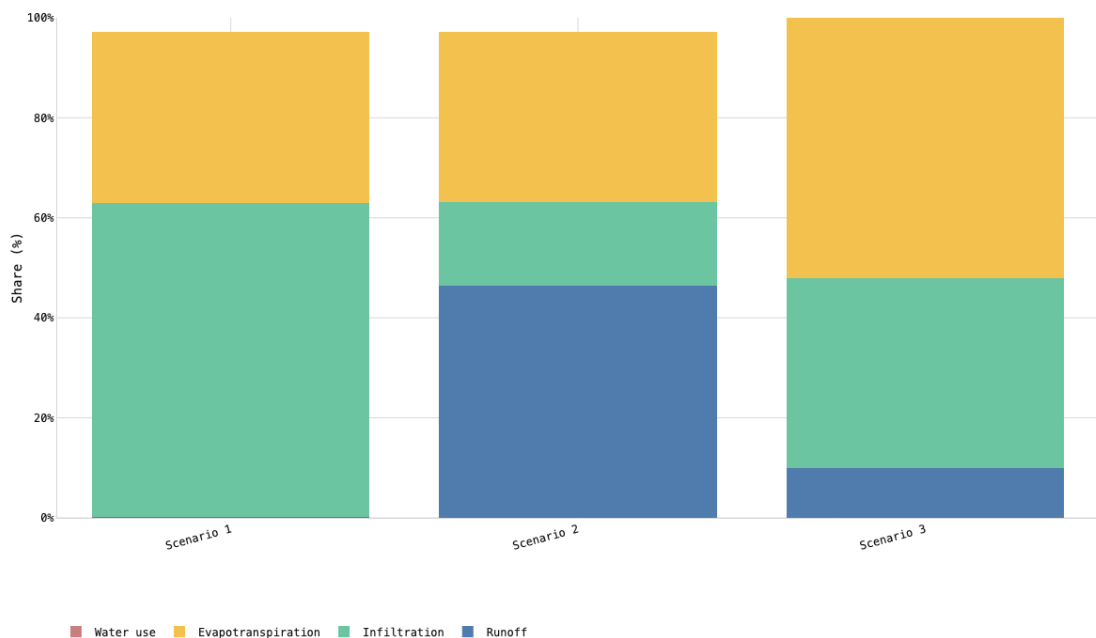
Der naturnahe Referenzzustand (*Scenario 3*) liegt zwischen beiden Extremen, zeigt jedoch ein deutlich anderes Wasserhaushaltsprofil. Hier wurden 108.68 mm/a Abfluss, 412.98 mm/a Infiltration und 565.14 mm/a Evapotranspiration angesetzt. Dies entspricht einer prozentualen Verteilung von 10 % Abfluss, 38 % Infiltration und 52 % Evapotranspiration. Im Vergleich zum Status quo fällt auf, dass der naturnahe Zustand zwar eine höhere Verdunstungsleistung, aber eine geringere Infiltration aufweist. Der Status quo mit Becken nähert sich dem naturnahen Zustand daher nicht linear in allen Teilkomponenten an, sondern erzeugt ein eigenes, technisch vermitteltes Wasserhaushaltsprofil, das vor allem durch eine außergewöhnlich hohe Infiltrationsleistung geprägt ist.

Die Delta-Bildung macht diese Unterschiede besonders deutlich. Im Vergleich zwischen kontrafaktischer Versiegelung und Status quo (2 vs 1) erhöht sich der Oberflächenabfluss um 501.65 mm/a, während die Infiltration um 498.57 mm/a abnimmt. Die Evapotranspiration verändert sich demgegenüber nur geringfügig um  $-3.08$  mm/a. In volumetrischer Betrachtung entspricht dies einem zusätzlichen Abfluss von 173,434.99 m<sup>3</sup>/a. Damit zeigt sich, dass die hydrologische Hauptwirkung des Beckens im Ackermannbogen nicht in einer wesentlichen Veränderung der Verdunstung, sondern in der massiven Reduktion des Oberflächenabflusses und der gleichzeitigen Erhöhung der Infiltration liegt.

Auch der Vergleich zwischen naturnahem Zustand und Status quo (3 vs 1) ist aufschlussreich. Gegenüber dem Status quo weist der naturnahe Referenzzustand einen um 106.03 mm/a höheren Abfluss, eine um 267.84 mm/a geringere Infiltration und eine um 192.89 mm/a höhere Evapotranspiration auf. Daraus folgt, dass der reale Beckenstandort im Ackermannbogen zwar in Bezug auf die Verdunstungsleistung hinter dem naturnahen Zustand zurückbleibt, die Infiltration jedoch deutlich übertrifft. Im Wasserhaushalt wird somit eine Verschiebung von der atmosphä-

rischen Rückführung hin zur unterirdischen Versickerung erkennbar. Der Status quo ist folglich nicht als Annäherung an ein naturnahes Gleichgewicht in allen Komponenten zu interpretieren, sondern als funktional spezialisierte technische Lösung mit klarer Schwerpunktsetzung auf Abflussvermeidung und Versickerung.

Zusammengenommen zeigt die Fallstudie Ackermannbogen, dass bereits die Umstellung einer einzelnen räumlichen Routinglogik am Becken erhebliche hydrologische Unterschiede erzeugt. Das System wirkt im Status quo als hochwirksames Infiltrations- und Retentionselement, das den Oberflächenabfluss nahezu vollständig unterbindet. Gegenüber dem kontrafaktisch versiegelten Zustand wird damit eine deutliche wasserhaushaltsbezogene Netto-Leistung sichtbar. Gegenüber dem naturnahen Referenzzustand tritt zugleich hervor, dass der reale Retentionsraum kein naturnahes Regime reproduziert, sondern ein eigenständiges, technisch geprägtes Leistungsprofil erzeugt, das planerisch vor allem für die Reduktion von Abflusslasten und die Förderung lokaler Versickerung relevant ist.



**Abbildung 11** Hydrologische Ergebnisgrafik für den Ackermannbogen

**Tabelle 6** Wasserbilanz nach Szenario

Szenario	Runoff [mm/a]	Infiltration [mm/a]	ET [mm/a]
Status quo	2.65	680.83	372.25
Kontrafaktisch	504.31	182.26	369.17
Naturnah	108.68	412.98	565.14

### 3.1.3. Mikroklimatische Funktionsleistung

Die mikroklimatische Funktionsleistung des Ackermannbogens wurde über einen szenariobasierten Vergleich der Kennwerte *Physiologisch Äquivalente Temperatur* (PET) und *mittlere Strahlungstemperatur* (Tmrt) untersucht. Sämtliche Auswertungen beziehen sich auf den definierten Vergleichstag 224 um 14:00 Uhr und damit auf einen konsistenten sommerlichen Belastungszeitpunkt. Die räumliche Geometrie des Quartiers blieb in allen Berechnungen konstant; variiert wurden ausschließlich die klimatischen Randbedingungen zwischen dem heutigen Zustand und den Zukunftsszenarien *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5*, *SSP3-7.0* und *SSP5-8.5* für die Zeithorizonte 2050 und 2080. Dadurch konnte die thermische Exposition des vorhandenen Freiraumsystems unter veränderten klimatischen Bedingungen direkt vergleichbar gemacht werden. Die vollständigen Mittelwerte stehen in Tab. 41 und Tab. 42; der Plot ist in Abb. 21 dokumentiert.

Für PET ergibt sich ein klarer und in allen Szenarien konsistenter Erwärmungspfad. Der Mittelwert liegt im heutigen Zustand bei 17.35 °C. Im Jahr 2050 steigen die Werte auf 20.80 °C im Szenario *SSP1-2.6*, auf 20.99 °C in *SSP2-4.5*, auf 21.53 °C in *SSP3-7.0* und auf 22.13 °C in *SSP5-8.5*. Für das Jahr 2080 verschärft sich diese Entwicklung deutlich. Dann werden PET-Mittelwerte von 37.37 °C für *SSP1-2.6*, 38.82 °C für *SSP2-4.5*, 40.98 °C für *SSP3-7.0* und 42.87 °C für *SSP5-8.5* erreicht. Das günstigste Zukunftsszenario bleibt damit deutlich über dem heutigen Belastungslevel, während der höchste Mittelwert im Worst-Case-Szenario *SSP5-8.5* im Jahr 2080 auftritt.

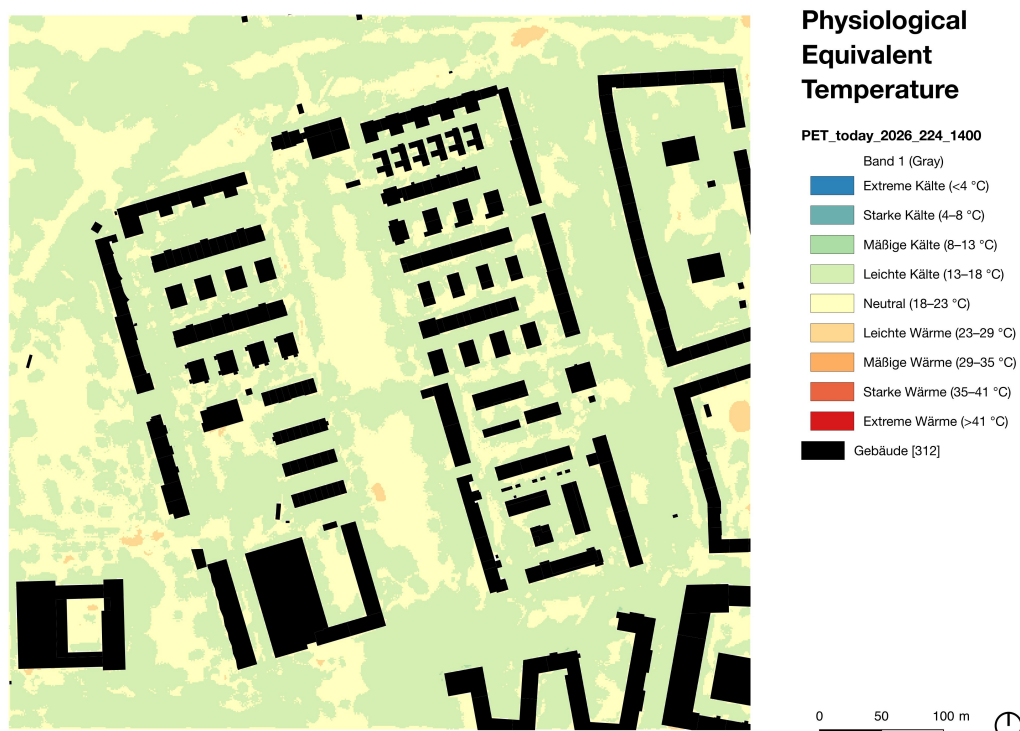
Auch für Tmrt zeigt sich dieselbe Rangfolge der Szenarien, allerdings mit noch stärkeren absoluten Anstiegen. Der heutige Mittelwert beträgt 22.83 °C. Im Jahr 2050 werden Werte von 26.27 °C für *SSP1-2.6*, 26.36 °C für *SSP2-4.5*, 26.82 °C für *SSP3-7.0* und 27.35 °C für *SSP5-8.5* erreicht. Bis 2080 steigen die Tmrt-Werte auf 48.52 °C in *SSP1-2.6*, auf 49.59 °C in *SSP2-4.5*, auf 51.30 °C in *SSP3-7.0* und auf 52.89 °C in *SSP5-8.5*. Die Resultate verdeutlichen, dass der strahlungsbezogene Belastungsanstieg nicht nur parallel zur PET-Entwicklung verläuft, sondern diese in seiner absoluten Größenordnung nochmals übertrifft.

Die Differenzbildung gegenüber dem heutigen Zustand verdeutlicht die Dimension der zukünftigen Belastungszunahme. Für PET reichen die Zuwächse von +3.45 °C bis +25.52 °C. Für Tmrt liegen die Anstiege zwischen +3.43 °C und +30.05 °C. Auch innerhalb derselben Emissionspfade ist zwischen 2050 und 2080 ein starker zusätzlicher Anstieg zu beobachten. PET nimmt je nach Szenario zwischen 16.58 °C und 20.74 °C zu, während Tmrt um 22.25 °C bis 25.53 °C ansteigt. Damit wird sichtbar, dass nicht nur die Wahl des Emissionspfads, sondern auch der Zeithorizont einen erheblichen Einfluss auf die räumliche Wärmebelastung besitzt.

Neben den Mittelwerten ist insbesondere die räumliche Konzentration extremer Belastung relevant. Für den Vergleich *SSP5-8.5 2080* gegenüber dem heutigen Zustand wurde eine Hotspot-Schwelle über das 95. Perzentil der PET-Differenzen definiert. Diese Schwelle liegt bei  $\Delta\text{PET} \geq 32.38$  °C. Auf dieser Basis ergibt sich eine Hotspot-Fläche von 14,098 m<sup>2</sup>, was 5.01 % der gültigen Vergleichsfläche entspricht. Eine Sensitivitätsbetrachtung mit dem strengeren 99. Perzentil (33.42 °C) reduziert die Fläche auf 2,815 m<sup>2</sup> beziehungsweise 1.00 %. Daraus folgt, dass die stärkste thermische Verschärfung nicht flächendeckend, sondern räumlich konzentriert auftritt und somit gezielt identifizierbare Belastungsschwerpunkte im Quartier erzeugt.

Für die PET-Auswertung lag ein valides Vergleichsraster von  $n = 281,312$  Pixeln vor, für Tmrt ein Raster von  $n = 344,448$  Pixeln. Ergänzend wurde für das Windfeld ein mittlerer Wert von  $0.50 \text{ m/s}$  in  $1.5 \text{ m}$  Höhe ausgewiesen. Dieser Wert ist in erster Linie als Rand- und Eingangsbedingung der thermischen Komfortmodellierung zu lesen. Da nur ein einzelnes Höhenlevel betrachtet wurde, eignet sich das Windresultat nicht für eine eigenständige Rangbildung der Szenarien, wohl aber als notwendiger Bestandteil der gekoppelten PET-Berechnung.

Insgesamt zeigt die mikroklimatische Analyse des Ackermannbogens ein eindeutiges Bild. Erstens steigen PET und Tmrt in sämtlichen Zukunftsszenarien deutlich an. Zweitens bleibt selbst das günstigste Szenario *SSP1-2.6* klar wärmer als der heutige Zustand. Drittens markiert *SSP5-8.5* im Jahr 2080 den Belastungsmaximalfall sowohl für PET als auch für Tmrt. Viertens konzentriert sich die stärkste zusätzliche Wärmebelastung räumlich auf klar abgrenzbare Hotspots. Für die planerische Interpretation bedeutet dies, dass die vorhandene Freiraumstruktur des Ackermannbogens zwar weiterhin mikroklimatisch relevant bleibt, die zukünftige Klimasignalstärke jedoch das absolute Belastungsniveau dominiert und dadurch zusätzliche, räumlich fokussierte Anpassungsmaßnahmen erforderlich macht. Die Rasterergebnisse sind in Abb. 12 verankert; die zusammengefassten Werte stehen in Tab. 7 und die vollständigen Mittelwerttabellen in Anhang A.8.



**Abbildung 12** Mikroklimatische Rasterergebnisse für den Ackermannbogen

**Tabelle 7** PET- und Tmrt-Mittelwerte nach Szenario

Szenario	Jahr	PET mean [°C]	Tmrt mean [°C]
today	Present-day	17.35	22.83
SSP1-2.6	2050	20.80	26.27
SSP2-4.5	2050	20.99	26.36
SSP3-7.0	2050	21.53	26.82
SSP5-8.5	2050	22.13	27.35
SSP1-2.6	2080	37.37	48.52
SSP2-4.5	2080	38.82	49.59
SSP3-7.0	2080	40.98	51.30
SSP5-8.5	2080	42.87	52.89

### 3.2. Szenarienvergleich (Quartiersebene)

Der Szenarienvergleich auf Quartiersebene bündelt die mikroklimatischen Ergebnisse des Ackermannbogens zu einer zeitlich und szenariobezogen vergleichbaren Entwicklungslinie. Im Zentrum steht dabei nicht die erneute Beschreibung einzelner Rasterergebnisse, sondern die Einordnung der Belastungszunahme zwischen Gegenwartszustand, mittlerem Zukunftshorizont und fernem Zukunftshorizont. Die Auswertung bezieht sich durchgängig auf denselben Vergleichstag und dieselbe Uhrzeit, sodass die Veränderungen als direkte Differenzen identischer räumlicher Situationen gelesen werden können. Da die Geometrie, Oberflächenstruktur und Vegetationskulisse des Quartiers konstant gehalten wurden, lassen sich die beobachteten Unterschiede eindeutig auf die veränderten klimatischen Randbedingungen der SSP-Szenarien zurückführen.

Über alle Szenarien hinweg zeigt sich eine klare und monotone Erwärmung. Für PET steigt der Mittelwert vom heutigen Zustand mit 17.35 °C zunächst auf Werte zwischen 20.80 °C und 22.13 °C im Jahr 2050 und erreicht bis 2080 ein Niveau zwischen 37.37 °C und 42.87 °C. Parallel dazu nimmt Tmrt von 22.83 °C heute über einen Bereich von 26.27 °C bis 27.35 °C im Jahr 2050 auf Werte zwischen 48.52 °C und 52.89 °C im Jahr 2080 zu. Damit wird deutlich, dass sowohl thermophysiologische Belastung als auch strahlungsbezogene Exposition in allen Zukunftspfaden erheblich ansteigen.

Die Rangfolge der Szenarien ist in allen Kennwerten stabil. Das günstigste Zukunftsszenario ist sowohl für PET als auch für Tmrt jeweils *SSP1-2.6*, während *SSP5-8.5* im Jahr 2080 den un-

günstigsten Fall markiert. Zwischen diesen Polen staffeln sich *SSP2-4.5* und *SSP3-7.0* in der erwartbaren Reihenfolge. Diese Stabilität der Szenarienhierarchie ist methodisch bedeutsam, da sie darauf hinweist, dass die modellierten Unterschiede nicht auf lokale Zufälligkeiten einzelner Rasterzellen zurückzuführen sind, sondern auf ein robustes klimatisches Signal. Der Quartiersraum reagiert somit konsistent auf die Verschärfung der klimatischen Ausgangsbedingungen.

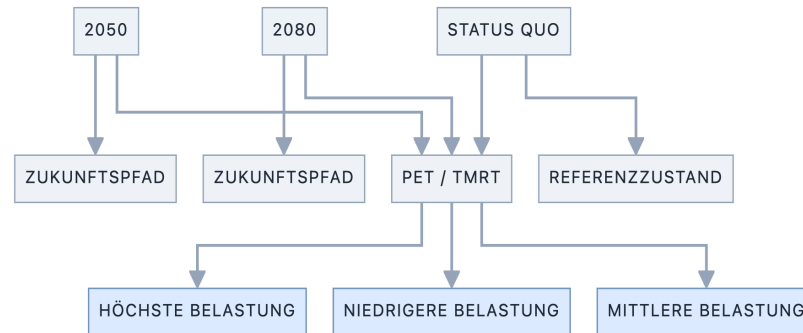
Besonders aufschlussreich ist der Vergleich der Differenzgrößen gegenüber dem heutigen Zustand. Die PET-Zunahme reicht szenarienübergreifend von  $+3.45\text{ °C}$  bis  $+25.52\text{ °C}$ . Für Tmrt liegen die entsprechenden Differenzen zwischen  $+3.43\text{ °C}$  und  $+30.05\text{ °C}$ . Bereits diese Spannweite zeigt, dass sich das thermische Regime des Quartiers nicht nur graduell, sondern in seiner Belastungsordnung verändert. Noch deutlicher wird dies im Vergleich zwischen den Zukunftshorizonten 2050 und 2080. Je nach Emissionspfad steigt PET in diesem Zeitraum um weitere  $16.58\text{ °C}$  bis  $20.74\text{ °C}$ , während Tmrt um  $22.25\text{ °C}$  bis  $25.53\text{ °C}$  zunimmt. Daraus folgt, dass die zeitliche Verschärfung innerhalb eines Szenarios fast ebenso relevant ist wie der Unterschied zwischen den Szenarien selbst.

Die räumliche Ausprägung dieser Erwärmung ist ungleich verteilt. Besonders hohe thermische Zusatzbelastungen konzentrieren sich auf klar abgrenzbare Hotspots. Für den Vergleich *SSP5-8.5 2080* gegenüber dem heutigen Zustand wurde für PET eine Differenzschwelle des 95. Perzentils bei  $\Delta\text{PET} \geq 32.38\text{ °C}$  angesetzt. Daraus ergibt sich eine Hotspot-Fläche von  $14,098\text{ m}^2$  beziehungsweise ein Flächenanteil von  $5.01\%$  der gültigen Vergleichsfläche. Selbst bei einer strengeren Sensitivitätsschwelle des 99. Perzentils verbleibt mit  $2,815\text{ m}^2$  beziehungsweise  $1.00\%$  eine klar nachweisbare Restfläche extremer Zusatzbelastung. Die Erwärmung des Quartiers ist somit nicht allein als Anstieg von Mittelwerten zu interpretieren, sondern als räumlich selektive Verschärfung mit lokal konzentrierten Problembereichen.

Der Szenarienvergleich zeigt außerdem, dass die Freiraumstruktur des Ackermannbogens zwar weiterhin mikroklimatisch wirksam bleibt, die absolute Wärmebelastung jedoch zunehmend durch das übergeordnete Klimasignal bestimmt wird. Lokale Verschattung, Vegetation und Oberflächenstruktur erzeugen weiterhin differenzierte Binnenräume mit relativ günstigeren und ungünstigeren Lagen. Dennoch verschieben sich sämtliche Szenarien in einen deutlich wärmeren Belastungsbereich. Daraus folgt, dass lokale Anpassungsmaßnahmen zwar weiterhin notwendig und wirksam bleiben, ihre Funktion jedoch stärker in der Minderung und räumlichen Umverteilung thermischer Lasten liegt als in einer vollständigen Kompensation des klimatischen Erwärmungssignals.

In der Gesamtschau macht der Quartiersvergleich drei Befunde sichtbar. Erstens verläuft die Entwicklung von PET und Tmrt über alle Szenarien hinweg eindeutig aufwärtsgerichtet. Zweitens bleibt selbst der günstigste Zukunftspfad deutlich über dem heutigen thermischen Niveau. Drittens konzentriert sich die stärkste zusätzliche Wärmebelastung auf räumlich klar identifizierbare Teilbereiche. Für die planerische Bewertung des Ackermannbogens bedeutet dies, dass klimaangepasste Quartiersentwicklung nicht nur auf durchschnittliche Wärmeindizes reagieren sollte, sondern insbesondere auf die gezielte Bearbeitung solcher räumlichen Hotspots.

Die Vergleichsmatrix ist in Abb. 13 und Tab. 8 verdichtet.



**Abbildung 13** Szenarienvergleich auf Quartiersebene

**Tabelle 8** Vergleichsmatrix für PET und Tmrt

Szenario	Jahr	PET-Differenz zu today [°C]	Tmrt-Differenz zu today [°C]
SSP1-2.6	2050	3.45	3.43
SSP2-4.5	2050	3.64	3.53
SSP3-7.0	2050	4.19	3.99
SSP5-8.5	2050	4.78	4.52
SSP1-2.6	2080	20.03	25.68
SSP2-4.5	2080	21.48	26.76
SSP3-7.0	2080	23.63	28.46
SSP5-8.5	2080	25.52	30.05

### 3.3. Hochrechnung auf gesamtstädtischer Ebene (München)

Die Hochrechnung auf gesamtstädtischer Ebene zeigt den aggregierten hydrologischen Nutzen des Münchner SUDS-Bestands. Dabei ist ausdrücklich zu berücksichtigen, dass sich die Auswertung nicht auf die Gesamtfläche der Stadt München bezieht, sondern auf die Summe aller erfassten SUDS-Elemente. Die relevante Flächenbasis beträgt insgesamt 79,559.49 m<sup>2</sup>, wovon 54,048.57 m<sup>2</sup> auf Mulden, 25,433.69 m<sup>2</sup> auf Becken und 77.23 m<sup>2</sup> auf Gruben entfallen. Für die hydrologische Hochrechnung wurde eine Rechenbasis von 79,482.26 m<sup>2</sup> für Mulden und Becken verwendet. Der aggregierte Bestand umfasst 1003 nutzbare Elemente, darunter 971 Mulden, 26

Becken und 6 Gruben. Die Struktur der Hochrechnung ist in Tab. 9 zusammengefasst; die ausführliche Bilanz steht in Anhang A.5.

Im Status quo ergibt sich für diese Flächenkulisse ein aggregierter Oberflächenabfluss von  $4,750.97 \text{ m}^3/\text{a}$ , eine Infiltration von  $906,866.22 \text{ m}^3/\text{a}$  sowie eine Evapotranspiration von  $38,577.29 \text{ m}^3/\text{a}$ . Der kontrafaktisch versiegelte Vergleichsfall weist demgegenüber einen Oberflächenabfluss von  $778,997.24 \text{ m}^3/\text{a}$ , keine Infiltration und eine Evapotranspiration von  $171,197.25 \text{ m}^3/\text{a}$  auf. Für den naturnahen Referenzzustand wurden  $95,019.45 \text{ m}^3/\text{a}$  Oberflächenabfluss,  $361,073.90 \text{ m}^3/\text{a}$  Infiltration und  $494,101.13 \text{ m}^3/\text{a}$  Evapotranspiration ausgewiesen. Damit wird sichtbar, dass der reale SUDS-Bestand ein eigenes Wasserhaushaltsprofil erzeugt, das sich sowohl vom versiegelten Vergleichsfall als auch vom naturnahen Referenzzustand deutlich unterscheidet.

Die stärkste stadtweite Wirkung zeigt sich im Vergleich zwischen Status quo und kontrafaktischer Versiegelung. Durch den vorhandenen SUDS-Bestand werden jährlich  $774,246.27 \text{ m}^3$  Oberflächenabfluss vermieden. Gleichzeitig ermöglicht das System eine zusätzliche Grundwasserneubildung beziehungsweise Infiltration von  $906,866.22 \text{ m}^3/\text{a}$ . Diese beiden Größen markieren den zentralen hydrologischen Mehrwert der vorhandenen blau-grünen Infrastruktur auf der aggregierten Münchner Ebene. Die Hochrechnung belegt damit, dass bereits die Summe der bestehenden Retentionselemente eine erhebliche Entlastung gegenüber einem vollständig versiegelten Vergleichszustand erzeugt. Im Vergleich zum naturnahen Referenzzustand zeigt sich hingegen kein vollständiges Annähern an ein naturnahes Wasserhaushaltsregime. Die Abflussdifferenz des Status quo gegenüber dem naturnahen Zustand beträgt  $-90,268.48 \text{ m}^3/\text{a}$ . Der reale SUDS-Bestand unterschreitet den naturnahen Abfluss also deutlich, während zugleich andere Wasserhaushaltskomponenten, insbesondere Infiltration und Evapotranspiration, in anderer Gewichtung ausgebildet sind. Dies bestätigt, dass die bestehenden Münchner Retentionselemente nicht als Reproduktion eines naturnahen Zustands zu verstehen sind, sondern als technisch geprägtes Funktionssystem mit einem klaren Schwerpunkt auf Abflussvermeidung und Infiltration.

Für die planerische Einordnung ist besonders bedeutsam, dass die Hochrechnung als Aggregationsschritt von Einzelementen gelesen werden muss und nicht als flächenhafte Stadtmodellierung. Die dargestellten Werte verdichten die Leistung von Mulden und Becken über alle erfassten SUDS-Elemente hinweg zu einer gesamtstädtischen Bilanz. Gerade diese Aggregationslogik macht sichtbar, dass die hydrologische Wirkung nicht nur auf Quartiersebene, sondern auch in der Summe der dezentralen Einzelemente eine relevante Größenordnung erreicht. Die Hochrechnung liefert damit eine belastbare quantitative Grundlage, um den Beitrag bestehender Retentionssysteme zur städtischen Klimaanpassung und zur Schwammstadtentwicklung für München einzuordnen.

**Tabelle 9** Stadtweite Wirkungssummary

KPI	Wert [m <sup>3</sup> /a]	Bezug
Vermeidung von Oberflächenabfluss	774 246.27	Status quo vs. Kontrafall
zusätzliche Infiltration	906 866.22	Status quo vs. Kontrafall
Abflussdifferenz im Vergleich zu Naturnah	-90 268.48	Status quo vs. Naturnah

## 4. Digitale Umsetzung und Dashboard-Architekturen

Die digitale Umsetzung der Analyse wurde so konzipiert, dass die heterogenen Daten- und Modelloutputs der hydrologischen und mikroklimatischen Untersuchung in nachvollziehbare, interaktive und vergleichbare Auswertungsumgebungen überführt werden konnten. Die Dashboards erfüllen dabei keine eigenständige Modellierungsfunktion, sondern dienen der strukturierten Aufbereitung, Exploration und Kommunikation der zuvor erzeugten Ergebnisse. Methodisch ist daher zwischen Analysepipeline und Visualisierungsebene zu unterscheiden. Während die Berechnungen in den vorgelagerten Layern erzeugt wurden, übernehmen die Dashboards die Aufgabe, diese Resultate in einer für Vergleich, Plausibilisierung und planerische Interpretation geeigneten Form zugänglich zu machen.

Die Dashboard-Architektur wurde entlang der drei zentralen Auswertungspfade des Projekts aufgebaut. Erstens wurde ein EPW-Szenario-Dashboard für München entwickelt, das die transformierten Wetterdateien und ihre klimatischen Kennwerte vergleichbar macht. Zweitens wurde ein PET-Dashboard für den Ackermannbogen erstellt, das rasterbasierte Mikroklimaergebnisse interaktiv auswertbar macht. Drittens wurde ein Wasserbilanz-Dashboard für den Ackermannbogen aufgebaut, das die Ergebnisse der hydrologischen Szenarienlogik in einer strukturierten Vergleichsumgebung visualisiert. Ergänzend wurde ein gesamtstädtisches Aggregations-Dashboard für München entwickelt, in dem die hochgerechneten hydrologischen Kennwerte in komprimierter Form dargestellt werden. Zusammen bilden diese vier Werkzeuge eine digitale Ergebnisarchitektur, die den Übergang von der methodischen Berechnung zur planerischen Kommunikation ermöglicht. Die Dashboard-Platzhalter werden in den folgenden Unterabschnitten als konkrete Abbildungs- und Tabellenvorlagen geführt.

### 4.1. EPW-Szenario-Dashboard (München)

Das EPW-Szenario-Dashboard dient der Aufbereitung und dem Vergleich der Present-day-EPW sowie der acht transformierten Future-EPWs. Sein Ziel besteht darin, die im Future Weather Generator erzeugten Wetterdatensätze nicht nur als Eingabedateien für die Modellierung vorzuhalten, sondern deren Unterschiede auch visuell und analytisch überprüfbar zu machen. Damit fungiert das Dashboard als Schnittstelle zwischen klimatischer Szenarienerzeugung und der späteren mikroklimatischen Modellierung.

Die zugehörige Architektur ist in Abb. 14 verankert; die konkrete Pipeline-Datei ist im Methodik-Ordner hinterlegt.

Als Eingangsgrößen wurden die EPW-Dateien selbst sowie die zugehörigen Vergleichs-CSV-Dateien verwendet. Innerhalb der Pipeline erfolgte zunächst ein Parsing der Wetterdateien, anschließend eine Normalisierung der Variablen und schließlich deren Überführung in ein einheitliches Dataset. Diese Transformation war notwendig, um Gegenwarts- und Zukunftsdaten mit denselben Diagramm- und Vergleichslogiken auswerten zu können. Die Visualisierungsebene

basiert damit nicht auf den Rohdateien selbst, sondern auf einer standardisierten Datenstruktur, in der alle Szenarien konsistent nebeneinanderliegen.

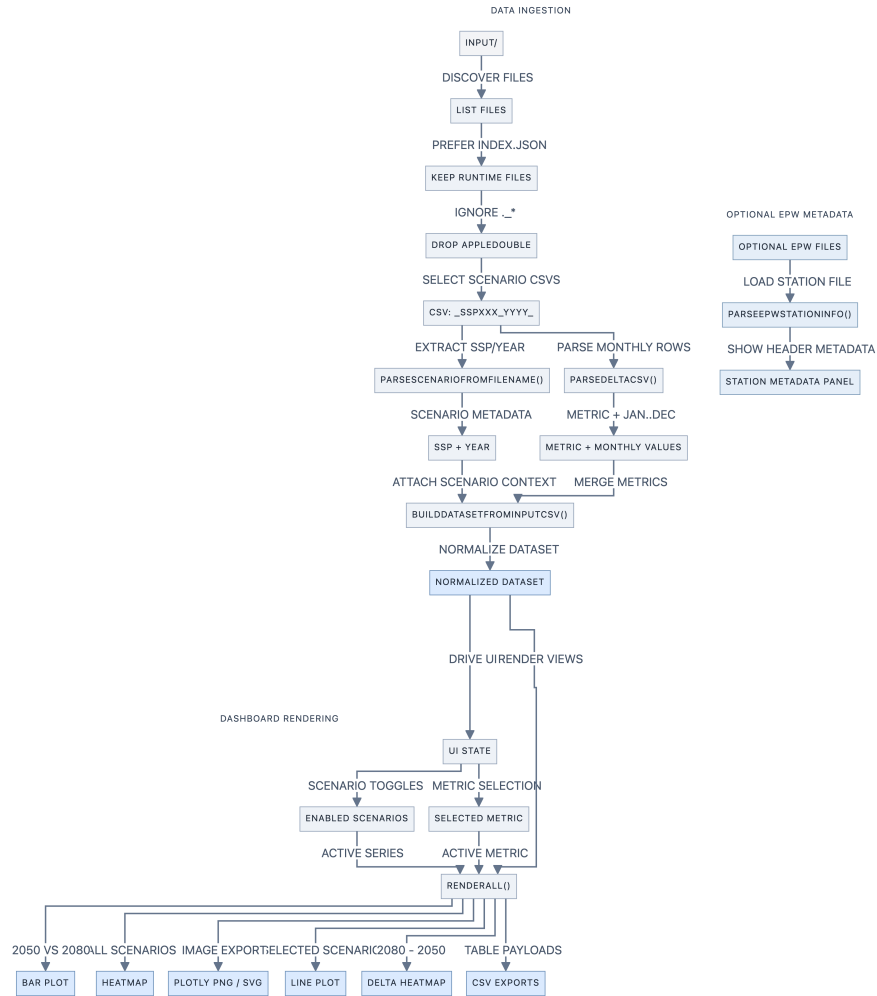


Abbildung 14 Architektur-Flowchart des EPW-Szenario-Dashboards

Zu den zentralen Outputs des Dashboards gehören Heatmaps, Linienplots, Jahresmittelwerte sowie Delta-Darstellungen, insbesondere für den Vergleich zwischen 2050 und 2080. Ergänzend werden EPW-Metadaten dargestellt, sodass Herkunft, Szenariozuordnung und zeitliche Einordnung der Dateien unmittelbar nachvollzogen werden können. Das Dashboard ist damit als Vergleichswerkzeug konzipiert, nicht als Ersatz für die methodische Beschreibung der EPW-Erzeugung. Seine Funktion liegt vielmehr darin, die transformierten Klimadaten transparent zu machen und damit die Grundlage für die nachfolgenden PET- und Tmrt-Vergleiche nachvollziehbar zu halten.

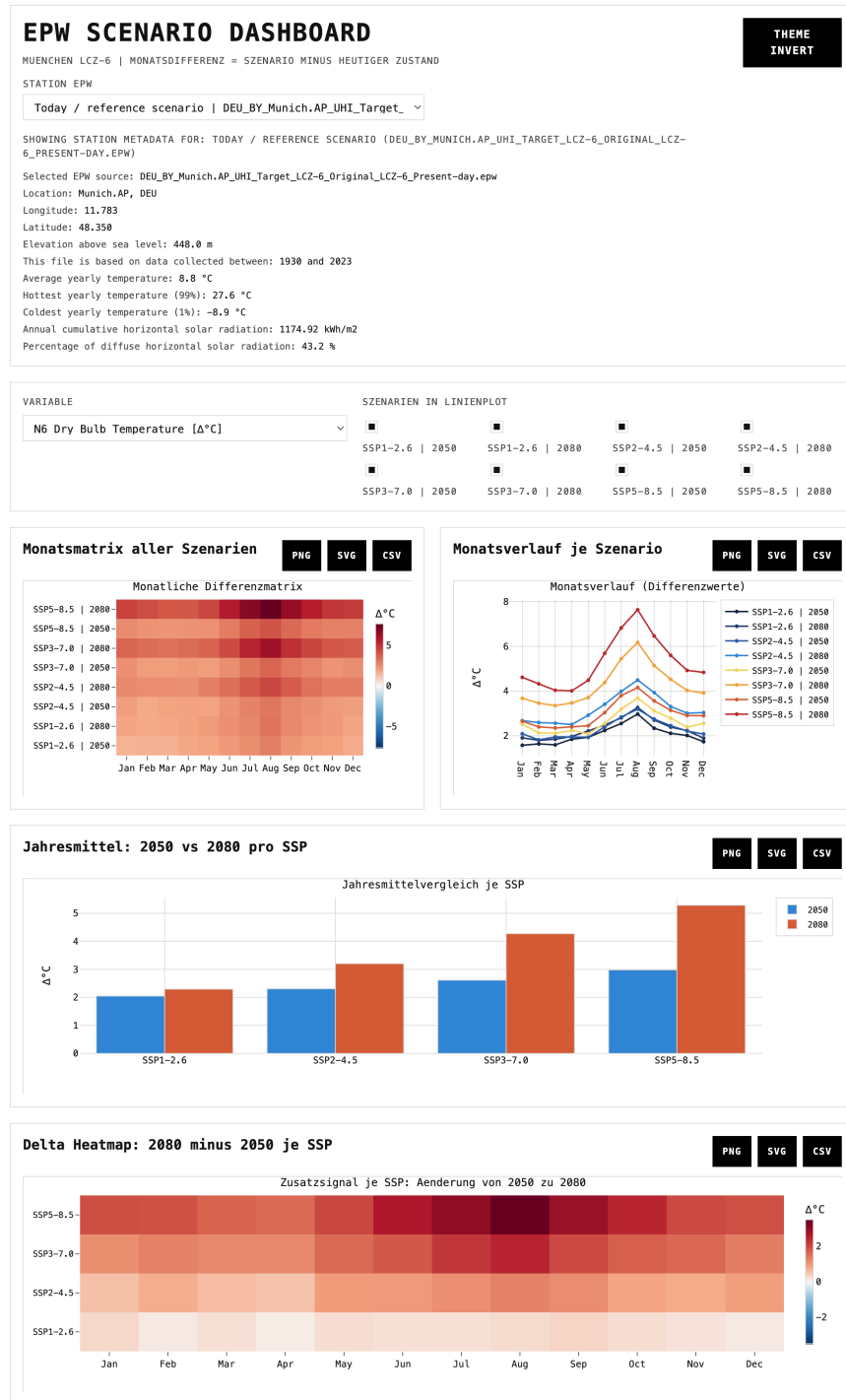


Abbildung 15 EPW-Szenario-Dashboard München

**Tabelle 10** Input-Output-Mapping für das EPW-Dashboard

---

Input	Output
EPW-Dateien	vergleichbare Wetterkennwerte
Vergleichs-CSVs	Validierung der Transformation
Heatmaps / Linienplots	Szenariovergleich
CSV-Exporte	Weiterverarbeitung in PET und Dashboards

---

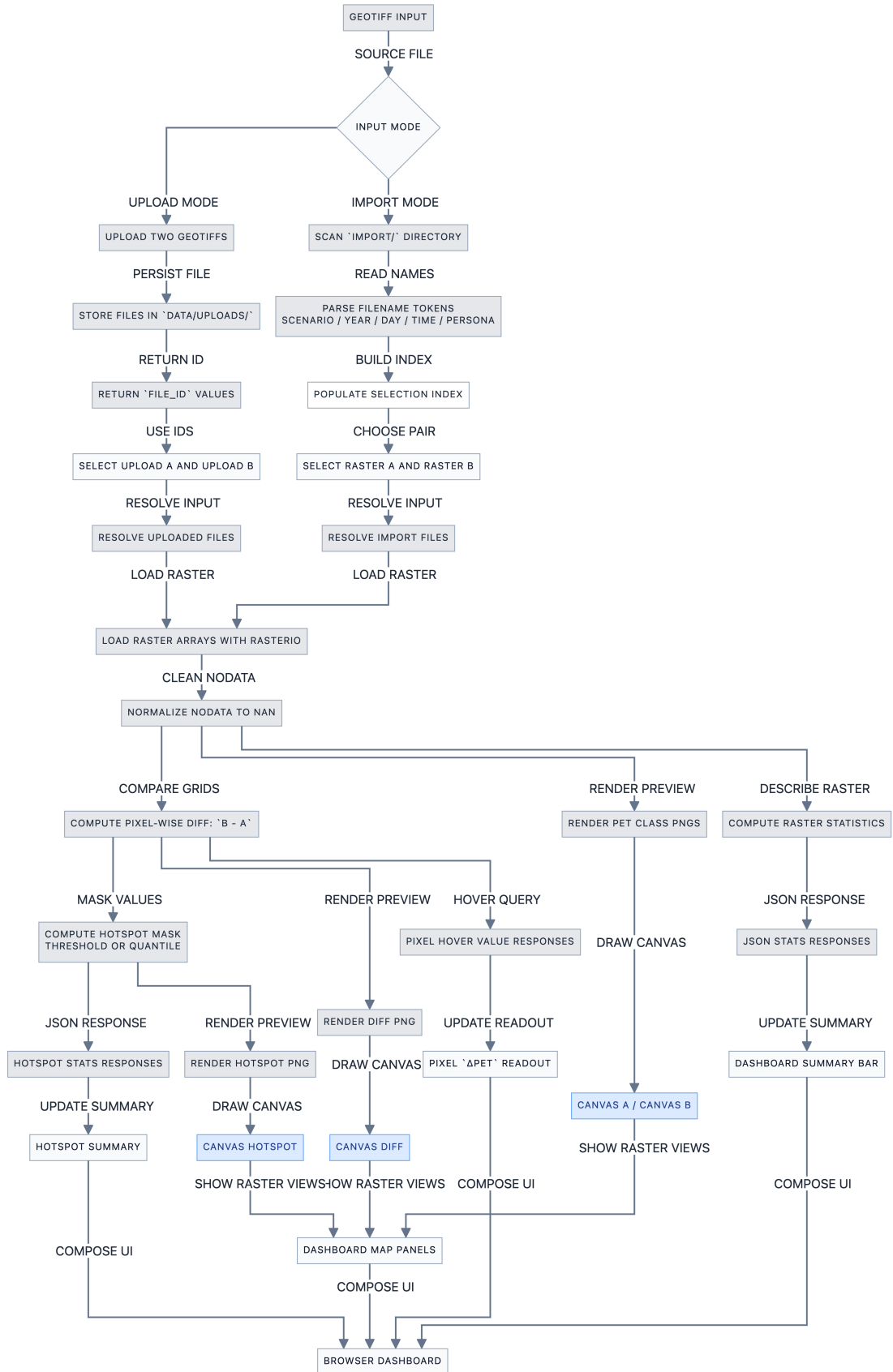


Abbildung 16 Architektur-Flowchart des PET-Dashboards

## 4.2. PET-Dashboard (Ackermannbogen)

Das PET-Dashboard wurde entwickelt, um die rasterbasierten Mikroklimaergebnisse des Ackermannbogens in einer interaktiven Auswertungsumgebung zusammenzuführen. Im Zentrum steht die Aufgabe, die durch UMEP erzeugten PET-Raster nicht nur als Einzelkarten darzustellen, sondern ihre szenarienbezogenen Unterschiede räumlich und statistisch lesbar zu machen. Das Dashboard übernimmt damit eine vermittelnde Funktion zwischen hochaufgelösten Rasterdaten und einer vergleichenden Interpretation auf Quartiersebene.

Die Architekturübersicht ist in Abb. 16 dokumentiert; die konkrete Pipeline-Datei ist im Methodik-Ordner hinterlegt.

Die Eingangsgrößen des Dashboards bestehen aus GeoTIFF-Rastern sowie daraus abgeleiteten Analyseprodukten. In der Verarbeitung werden diese Raster mit Hilfe geeigneter Rasterwerkzeuge eingelesen, verschnitten und in Differenzflächen überführt. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei die Berechnung von  $\Delta\text{PET}$  zwischen Present-day und Zukunftsszenarien beziehungsweise zwischen unterschiedlichen Zukunftspfaden. Auf diese Weise können nicht nur absolute thermische Belastungen, sondern auch räumliche Verschiebungen und Verstärkungen des Hitzestresses sichtbar gemacht werden.

Die resultierenden Outputs umfassen Kartenprodukte, Hotspot-Darstellungen und statistische Zusammenfassungen. Hinzu kommen Interaktionsmöglichkeiten, durch die Szenarien direkt gegeneinander gestellt und Pixelwerte explorativ abgefragt werden können. Dadurch wird das Dashboard zu einem Instrument der räumlichen Vergleichbarkeit: Nicht nur Mittelwerte, sondern auch Hotspots, Übergänge und kleinräumige Differenzen werden sichtbar. Gerade für die Analyse des Ackermannbogens ist diese Funktion zentral, da sich die thermische Belastung nicht homogen verteilt, sondern auf räumlich klar abgegrenzte Teilflächen konzentriert.

## PET GEOTIFF VERGLEICH

Lokale Analyse und Visualisierung von PET-Rastern pro Klima-Szenario.

BEREIT

MODUS: Input-Ordner DARK MODE  
 VERGLEICH A/B

PERSONA A: ohne Persona | JAHR A: 2026 | TAG A: 224 | ZEIT A: 1400 | SZENARIO A: today  
 PERSONA B: ohne Persona | JAHR B: 2050 | TAG B: 224 | ZEIT B: 1400 | SZENARIO B: SSP5-85

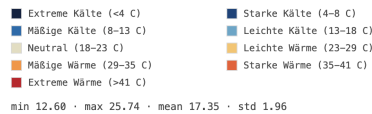
HOTSPOT-METHODIK: Quantil | HOTSPOT RICHTUNG: Beide (abs) | SCHWELLE / QUANTIL: 0,95 Aktualisieren

### KLIMA-SZENARIO A

PNG-EXPORT VOLLBILD



#### PET KLASSEN

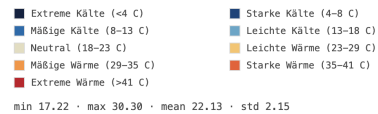


### KLIMA-SZENARIO B

PNG-EXPORT VOLLBILD

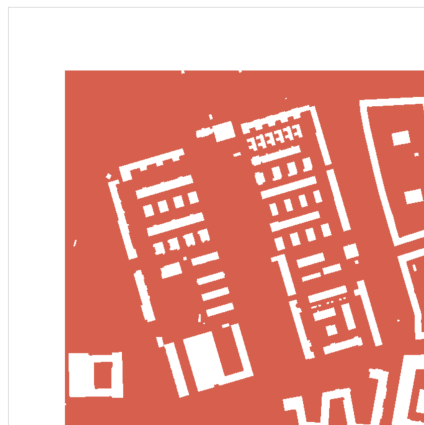


#### PET KLASSEN

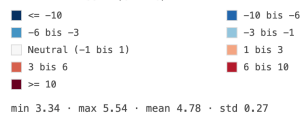


### DIFFERENZ B - A

PNG-EXPORT VOLLBILD

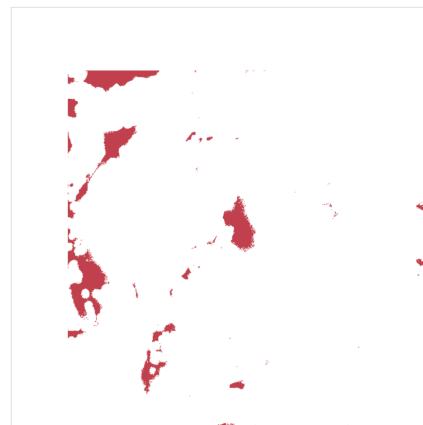


#### DIFFERENZKLASSEN (GRAD C)



### HOTSPOTS

PNG-EXPORT VOLLBILD



#### HOTSPOT FARBEN

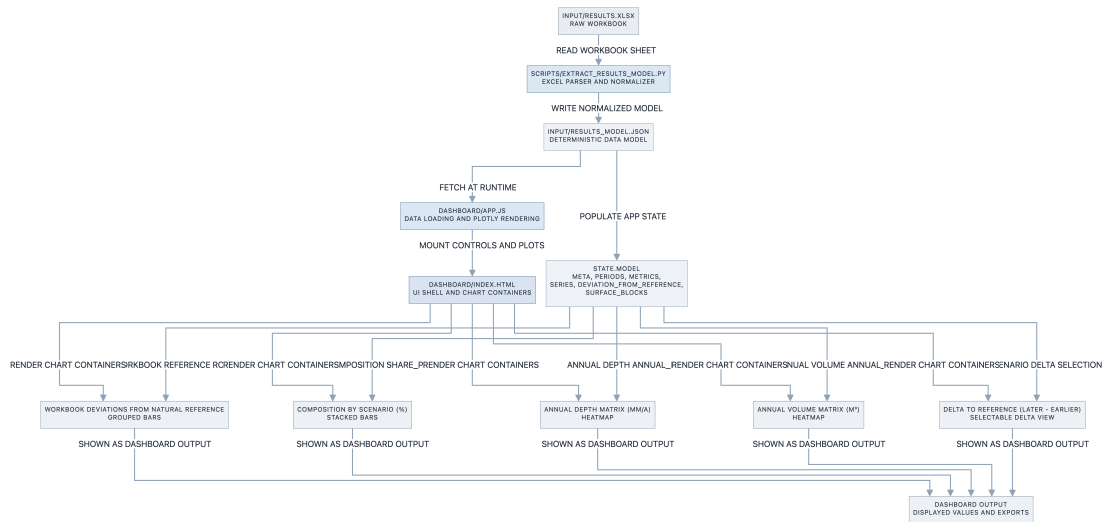


SZENARIEN A: today 2026 · Tag 224 · 1400 | B: SSP5-85 2050 · Tag 224 · 1400 **STATS A** min 12.60 · max 25.74 · mean 17.35 · std 1.96  
**STATS B** min 17.22 · max 30.30 · mean 22.13 · std 2.15 **DIFF** min 3.34 · max 5.54 · mean 4.78 · std 0.27  
**HOTSPOTS** Hotspots: 14450 (5.1%) · +14450 / -0 · Schwelle 5.32 C

Abbildung 17 PET-Dashboard für den Ackermannbogen

**Tabelle 11** PET-Dashboard-Feature-Liste

Feature	Zweck
Raster-Input	Einlesen der PET-GeoTIFFs
Differenzlogik	Berechnung von $\Delta$ PET gegen Present-day und zwischen Szenarien
Hotspots	Identifikation räumlicher Belastungsschwerpunkte
Export	Weitergabe als Karten und Kennwerte



**Abbildung 18** Architektur-Flowchart des Wasserbilanz-Dashboards

### 4.3. Wasserbilanz-Dashboard (Ackermannbogen)

Das Wasserbilanz-Dashboard wurde für die vergleichende Darstellung der hydrologischen Szenarien des Ackermannbogens entwickelt. Anders als das PET-Dashboard, das primär rasterbasierte Geodaten verarbeitet, basiert dieses Werkzeug auf tabellarischen Ergebnissen der Wasserbilanzberechnungen. Ziel ist es, die Zustände *Status quo*, *kontrafaktische Versiegelung* und *naturnahe Referenzzustand* in einer gemeinsamen, übersichtlich lesbaren Benutzeroberfläche gegenüberzustellen.

Die zugehörige Architektur ist in Abb. 18 verankert; die konkrete Pipeline-Datei ist im Methodik-Ordner hinterlegt.

Als primäre Eingangsquelle dienten Excel-basierte Ergebnistabellen. Innerhalb der Pipeline wurden diese zunächst extrahiert, anschließend in ein JSON-basiertes Datenmodell überführt und

danach für die Visualisierung aufbereitet. Diese Zwischenschicht ist konzeptionell bedeutsam, da sie die Datenhaltung von der eigentlichen UI trennt. Auf diese Weise konnten die hydrologischen Kennwerte in strukturierter Form weiterverarbeitet werden, ohne die Visualisierungslogik direkt an das ursprüngliche Tabellenformat zu binden.

Die Visualisierung erfolgt über gestapelte Balkendiagramme, Heatmaps und Delta-Charts. Diese Formate ermöglichen eine parallele Gegenüberstellung von Abfluss, Infiltration und Evapotranspiration in den drei untersuchten Szenarien. Der besondere Vorteil des Dashboards liegt in der klaren Trennung zwischen Datenmodell und Darstellungsoberfläche. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der hydrologischen Resultate erhöht und zugleich eine flexible Weiterentwicklung der Visualisierung erleichtert. Für den Bericht übernimmt das Wasserbilanz-Dashboard damit die Funktion eines analytischen Kommunikationsraums, in dem die Wasserhaushaltslogik des Ackermannbogens verdichtet und verständlich dargestellt wird.



Abbildung 19 Wasserbilanz-Dashboard für den Ackermannbogen

**Tabelle 12** Backend-/Frontend-Datenabbildung

Datenebene	Funktion
Excel-Tabellen	Rohquelle der Wasserbilanz
JSON-Modell	strukturierte Übergabe an die UI
Balkendiagramme	Vergleich von Runoff, Infiltration und ET
Delta-Charts	Darstellung der Szenariodifferenzen

#### 4.4. Aggregations-Dashboard München

Das Aggregations-Dashboard für München stellt die stadtweite Hochrechnung der hydrologischen Ergebnisse dar (vgl. Abb. 20). Es basiert auf einer statischen html-Struktur und bündelt die aggregierten Resultate der gesamtstädtischen Auswertung in einer kompakten Visualisierungs-umgebung. Inhaltlich bildet es damit die digitale Entsprechung zu der in Kapitel 3 dargestellten Hochrechnung der SUDS-Leistung auf die Ebene Münchens.

Im Mittelpunkt des Dashboards stehen zentrale Kennzahlen wie vermiedener Oberflächenabfluss und zusätzliche Infiltration. Ergänzt werden diese durch Szenarienvergleiche, die den Status quo, den kontrafaktisch versiegelten Zustand und den naturnahen Referenzzustand nebeneinanderstellen. Visualisiert werden diese Inhalte über Diagramme und exportierbare Darstellungen, wodurch das Dashboard nicht nur für die Analyse, sondern auch für Dokumentation und Kommunikation nutzbar wird. Die zugrunde liegenden Annahmen, insbesondere zu Niederschlag und Koeffizienten, bleiben dabei als interpretative Grundlage relevant und werden im Dashboard als kontextgebende Information mitgeführt.

Seine besondere Funktion liegt darin, die Hochrechnung als Aggregationsleistung sichtbar zu machen, ohne den Eindruck einer flächendeckenden Stadtklimasimulation zu erzeugen. Das Dashboard ist daher als Werkzeug der hydrologischen Gesamtübersicht zu lesen: Es fasst dezentrale Einzelelemente in einer stadträumlichen Bilanz zusammen und übersetzt deren kumulative Wirkung in verständliche Leistungskennzahlen. Damit bildet es die digitale Synthese des hydrologischen Analysepfads auf gesamtstädtischer Ebene.

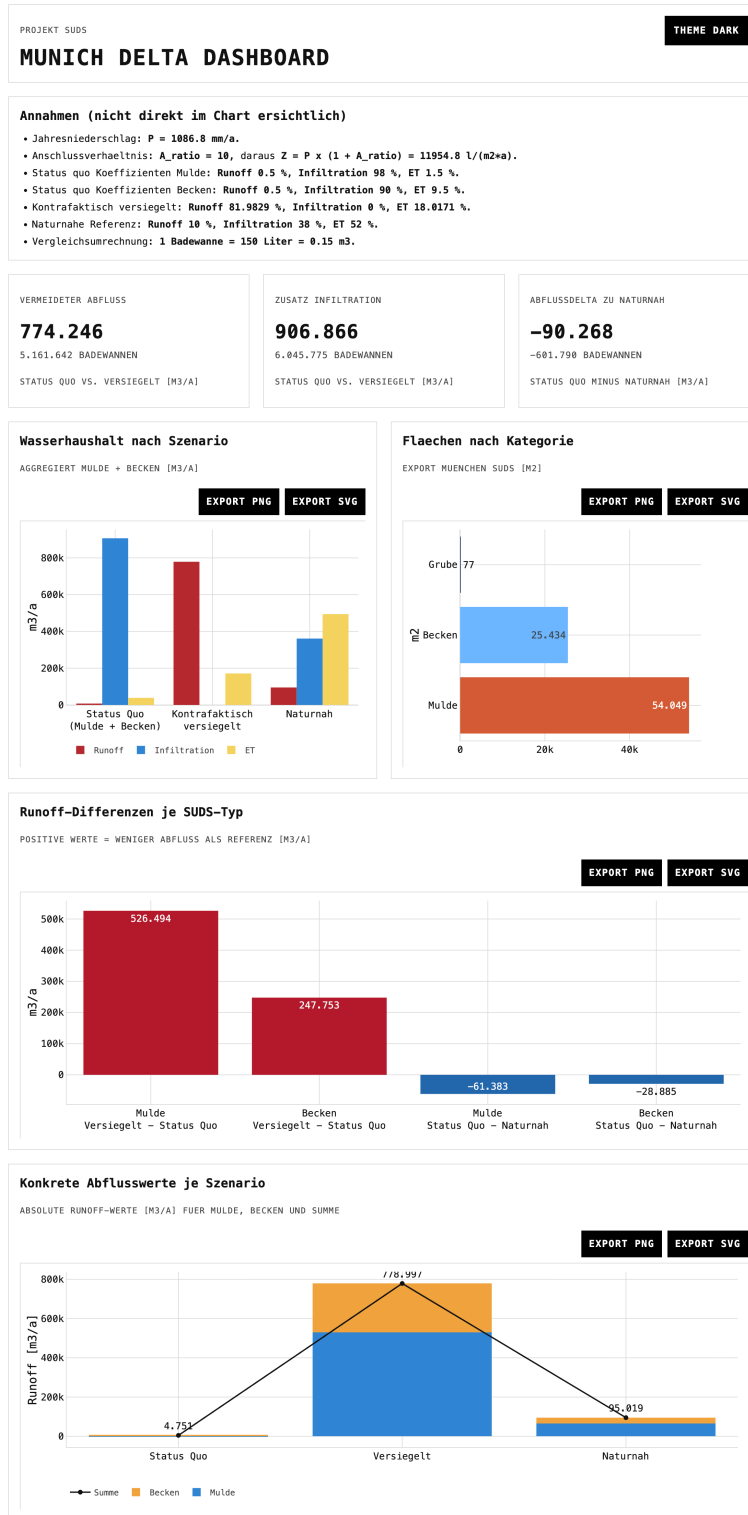


Abbildung 20 Aggregations-Dashboard München

## 5. Synthese und Bewertung

### 5.1. Systemische Gesamtbewertung

Die systemische Gesamtbewertung führt die hydrologischen und mikroklimatischen Ergebnisse in einer gemeinsamen Interpretationslogik zusammen. Ausgangspunkt ist dabei die Feststellung, dass die beiden Analysepfade unterschiedliche, aber komplementäre Funktionsdimensionen urbaner Retentionssysteme sichtbar machen. Hydrologisch wird vor allem die Fähigkeit zur Reduktion von Oberflächenabfluss und zur Erhöhung der Infiltration erfasst. Mikroklimatisch wird demgegenüber die thermische Exposition des konkreten Stadtraums unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen untersucht. Erst in der Synthese wird deutlich, dass beide Leistungsdimensionen nicht deckungsgleich verlaufen und deshalb auch planerisch nicht als identische Wirkung gelesen werden dürfen.

Auf der hydrologischen Seite zeigt die Gesamtbilanz des Münchner SUDS-Bestands eine eindeutig positive Funktionsleistung gegenüber dem versiegelten Kontrafall. Im Status quo werden jährlich  $774,246.27 \text{ m}^3$  Oberflächenabfluss vermieden und  $906,866.22 \text{ m}^3/\text{a}$  zusätzliche Infiltration ermöglicht. Diese Größen belegen, dass die vorhandenen Retentionselemente stadtweit eine relevante wasserhaushaltsbezogene Entlastungswirkung entfalten. Der versiegelte Vergleichszustand verschiebt den Wasserstrom demgegenüber nahezu vollständig in Richtung Oberflächenabfluss und Kanalisation. Bereits diese Gegenüberstellung zeigt, dass der SUDS-Bestand nicht nur funktional wirksam, sondern systemisch relevant ist, weil er an mehreren Stellen gleichzeitig in den urbanen Wasserhaushalt eingreift.

Die mikroklimatische Synthese ergibt ein anderes, aber ebenso klares Bild. Im Ackermannbogen steigen PET und Tmrt in sämtlichen Zukunftsszenarien von der Gegenwart über 2050 bis 2080 deutlich an. Selbst das günstigste Szenario *SSP1-2.6* bleibt klar wärmer als der heutige Zustand, während *SSP5-8.5 2080* die höchste thermische Belastung markiert. Daraus folgt, dass die lokale Freiraumstruktur zwar weiterhin mikroklimatisch wirksam bleibt, das absolute Belastungsniveau jedoch zunehmend durch das übergeordnete Klimasignal bestimmt wird. Die vorhandene grünblaue Struktur kann also Belastung mildern und räumlich differenzieren, sie kann die zukünftige Erwärmung aber nicht vollständig kompensieren.

Besonders aufschlussreich ist die räumliche Gegenüberstellung beider Funktionsdimensionen. Die hydrologische Wirkung verteilt sich netzartig über angeschlossene Flächen und Retentionselemente, also über ein funktionales System aus Zufluss, Speicherung und Versickerung. Die thermische Belastung konzentriert sich dagegen auf klar abgrenzbare Hotspots. Für den Vergleich *SSP5-8.5 2080* gegenüber dem heutigen Zustand wurde im Ackermannbogen eine PET-Hotspot-Fläche von  $14,098 \text{ m}^2$  identifiziert, was  $5.01 \%$  der gültigen Vergleichsfläche entspricht. Diese Differenz in der räumlichen Logik ist planerisch zentral: Hydrologische Wirksamkeit verlangt eine Netz- und Flächenperspektive, thermische Wirksamkeit dagegen eine gezielte Bearbeitung räumlich konzentrierter Problembereiche.

In systemischer Perspektive folgt daraus, dass kein einzelnes SUDS-Element alle Anpassungsleistungen zugleich maximiert. Vielmehr zeigt sich ein arbeitsteiliges Wirkungsgefüge. Hydrologisch können Retentionselemente den urbanen Wasserhaushalt messbar entlasten. Mikroklimatisch können sie über Entsiegelung, Vegetation, Strahlungsmodifikation und Verdunstung zu günstigeren lokalen Bedingungen beitragen. Die Zukunftsszenarien machen jedoch deutlich, dass gerade die thermische Belastung zusätzliche, räumlich fokussierte Maßnahmen erfordert wird. Der zentrale Synthesatz lautet daher nicht, dass ein einzelnes System alle Probleme löst, sondern dass SUDS den hydrologischen Druck wirksam reduzieren, während die klimatische Zukunft weiterhin hohe thermische Belastungen erzeugt und damit weitere Anpassung notwendig macht.

## 5.2. Beitrag zur Klimaanpassung

Der Beitrag der untersuchten Retentionssysteme zur Klimaanpassung ist vor allem in ihrer Doppelfunktion als wasserhaushaltsbezogene und mikroklimatisch relevante Infrastruktur zu sehen. Im Bereich des urbanen Wassermanagements leisten SUDS einen direkt quantifizierbaren Beitrag zur Schwammstadtentwicklung, da sie Oberflächenabfluss verringern, Infiltration fördern und damit Abflusslasten aus dem kanalgebundenen Entwässerungssystem herausnehmen. Gerade unter den Bedingungen häufiger auftretender Starkregenereignisse ist diese Funktion als zentrale Anpassungsleistung zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst bei einer vergleichsweise begrenzten Flächenkulisse bereits erhebliche hydrologische Entlastungseffekte erreicht werden können.

Darüber hinaus leisten die Systeme einen indirekten Beitrag zur thermischen Anpassung, weil Retentionsflächen im Untersuchungsraum mit Entsiegelung, Vegetation und veränderter Oberflächenstruktur verbunden sind. Diese räumlichen Eigenschaften beeinflussen Strahlungshaushalt, Verschattung, Windwirksamkeit und Verdunstung. Die Analyse des Ackermannbogens zeigt, dass solche Freiraumkonfigurationen für den thermischen Komfort relevant bleiben. Zugleich macht sie deutlich, dass ihre Funktion unter zukünftigen Klimabedingungen stärker als Minderung denn als vollständige Lösung zu interpretieren ist. Der Beitrag zur Klimaanpassung besteht damit nicht in der Aufhebung, sondern in der Reduktion von Belastungsspitzen und in der Herstellung vergleichsweise günstigerer mikroklimatischer Teilräume.

Die Ergebnisse machen außerdem sichtbar, dass die klimatische Anpassungsleistung maßstababhängig gelesen werden muss. Hydrologische Effekte lassen sich aggregieren und auf die gesamtstädtische Ebene hochrechnen. Thermische Effekte bleiben demgegenüber an konkrete Stadträume und Aufenthaltsorte gebunden. Daraus folgt, dass Klimaanpassung nicht allein über stadtweite Kennzahlen, sondern ebenso über kleinräumige Freiraumqualitäten verstanden werden muss. Der Ackermannbogen fungiert in diesem Zusammenhang als repräsentativer Stadtraum, in dem sich die Spannungen zwischen lokaler Wirksamkeit und globalem Erwärmungstrend exemplarisch beobachten lassen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass SUDS einen relevanten, aber nicht hinreichenden

Beitrag zur urbanen Klimaanpassung leisten. Sie sind insbesondere dort wirksam, wo hydrologische Entlastung, Entsiegelung und Vegetationsintegration zusammenwirken. Ihre Stärke liegt somit in der Verbindung technischer und freiraumbezogener Anpassungslogiken. Gerade diese Verschränkung macht sie zu einem wichtigen Baustein klimaangepasster Stadtentwicklung.

### 5.3. Planerische Relevanz

Die planerische Relevanz der Ergebnisse liegt in ihrer unmittelbaren Übersetzbarkeit in räumliche Entscheidungslogiken. Erstens wird sichtbar, dass Retentionssysteme nicht nur als wassertechnische Anlagen, sondern als Bestandteil einer multifunktionalen Freirauminfrastruktur verstanden werden sollten. Insbesondere dort, wo Becken und Mulden mit Entsiegelung, Vegetation und nutzbaren Freiräumen verbunden werden, entstehen Leistungen, die über reine Entwässerungsfunktionen hinausgehen. Diese Mehrfachwirkung ist für die Planungspraxis zentral, weil sie die Verbindung von Regenwassermanagement, Freiraumqualität und Klimaanpassung unterstützt.

Zweitens zeigt die Auswertung, dass unterschiedliche Zielgrößen unterschiedliche räumliche Strategien verlangen. Die Reduktion des Oberflächenabflusses erfordert eine netzartige Verteilung und funktionale Kopplung dezentraler Elemente. Die Reduktion thermischer Belastung erfordert dagegen die gezielte Bearbeitung räumlicher Hotspots. Für die Planung folgt daraus, dass Schwammstadtstrategien nicht nur flächenquantitativ, sondern auch räumlich selektiv entwickelt werden müssen. Ein hoher hydrologischer Gesamtnutzen ersetzt nicht automatisch die Bearbeitung mikroklimatisch problematischer Teilräume.

Drittens besitzt die entwickelte Methodik eine hohe Übertragbarkeit. Die Gliederung in Layer 0 bis Layer 6, die Trennung von Referenzfall, Kontrafall und Zukunftsszenarien sowie die getrennte Behandlung von Wasserbilanz, PET, Tmrt und Wind bilden eine robuste Struktur, die auch in anderen Stadtteilen oder Kommunen angewendet werden kann. Voraussetzung dafür ist lediglich, dass lokale Geometrien, Oberflächendaten und Klimaszenarien neu eingesetzt werden. Die vorliegende Arbeit liefert damit nicht nur Ergebnisse für München und den Ackermannbogen, sondern zugleich ein methodisches Grundgerüst für weitere Untersuchungen im Kontext klimaangepasster Stadt- und Freiraumentwicklung.

Viertens unterstreicht die digitale Aufbereitung der Ergebnisse die planerische Anschlussfähigkeit des Ansatzes. Die Dashboards machen komplexe Modellierungen räumlich und szenarienbezogen lesbar und erleichtern damit Kommunikation, Abstimmung und Priorisierung. Gerade in transdisziplinären Planungsprozessen können solche Werkzeuge dazu beitragen, zwischen technischen Kennwerten, räumlichen Entwurfsfragen und strategischen Zielsetzungen zu vermitteln. Die Ergebnisse des vorliegenden Berichts sind daher nicht nur analytisch, sondern auch kommunikations- und handlungsorientiert relevant.

Zusammenfassend liegt die planerische Relevanz der Untersuchung in drei Punkten: in der quantitativen Sichtbarmachung hydrologischer Entlastungsleistungen, in der räumlich differenzierten Identifikation thermischer Hotspots und in der Bereitstellung eines übertragbaren methodischen

Rahmens für die klimaangepasste Weiterentwicklung urbaner Freiräume. Damit wird die Arbeit sowohl als Bewertungsinstrument für bestehende SUDS-Systeme als auch als Planungsgrundlage für zukünftige Schwammstadtstrategien anschlussfähig.

## 6. Diskussion

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass sich die hydrologische und mikroklimatische Funktionsleistung von Sustainable Urban Drainage Systems nur dann angemessen bewerten lässt, wenn beide Wirkungsebenen getrennt modelliert und erst anschließend synthetisch zusammengeführt werden. Gerade diese methodische Zweiteilung erweist sich als Vorteil in der Arbeit. Einerseits konnte die wasserhaushaltsbezogene Leistung der Retentionselemente über ein klar strukturiertes Vergleichsdesign zwischen naturnahem Referenzzustand, Status quo und kontrafaktischer Versiegelung quantifiziert werden. Andererseits wurde für die mikroklimatische Bewertung deutlich, dass thermischer Komfort und Strahlungsbelastung nicht über dieselbe Szenarielogik beschrieben werden können, da sie unmittelbar an die konkrete räumliche Konfiguration des Quartiers gebunden sind. Die getrennte, aber aufeinander bezogene Modellierung war daher notwendig, um Fehlinterpretationen zu vermeiden und die unterschiedlichen Aussagehorizonte der beiden Analysepfade sichtbar zu machen.

Hydrologisch belegen die Ergebnisse eine deutliche Leistungsfähigkeit der betrachteten Retentionselemente. Sowohl im Ackermannbogen als auch in der gesamtstädtischen Hochrechnung zeigt sich, dass durch bestehende SUDS-Systeme erhebliche Abflussmengen vermieden und große Infiltrationsvolumina ermöglicht werden. Besonders relevant ist dabei, dass diese Leistung nicht durch eine einzelne Großstruktur, sondern durch die Summe dezentral verteilter Elemente erzeugt wird. Für die Schwammstadtplanung ist dieser Befund zentral, da er die Wirksamkeit kleinteiliger, in der Fläche verteilter Maßnahmen bestätigt. Gleichzeitig wird sichtbar, dass der Status quo keinen naturnahen Wasserhaushalt im engeren Sinn reproduziert. Vielmehr entsteht ein technisch geprägtes Funktionsprofil, das sich durch eine starke Verschiebung zugunsten der Infiltration auszeichnet. Dieser Befund ist nicht als Defizit, sondern als Ausdruck urbaner Anpassungslogik zu interpretieren. Unter hoch versiegelten Bedingungen ist nicht zu erwarten, dass technische oder halb-natürliche Retentionssysteme einen vorurbanen Zustand vollständig abbilden. Vielmehr ist ihre Funktion darin zu sehen, die negativen Folgen urbaner Versiegelung gezielt abzumildern.

Mikroklimatisch ergibt sich eine differenziertere Bewertung. Die Analyse des Ackermannbogens zeigt, dass entsiegelte, vegetationsgeprägte und freiraumwirksame Retentionsräume lokal zur Modifikation thermischer Belastungen beitragen. Zugleich belegen die Zukunftsszenarien, dass der übergeordnete Erwärmungstrend die absolute Belastung deutlich erhöht. Selbst in vergleichsweise günstigen Szenarien steigen PET und Tmrt erheblich an, während sich im ungünstigsten Szenario deutlich ausgeprägte Hotspots extremer Zusatzbelastung herausbilden. Daraus folgt, dass grün-blaue Infrastruktur zwar eine relevante Milderungsfunktion besitzt, ihre Wirkung jedoch unter zukünftigen Klimabedingungen zunehmend relativiert wird. Die Ergebnisse sprechen somit gegen ein zu optimistisches Verständnis lokaler Anpassungsmaßnahmen. Retentions- und Freiraumsysteme bleiben wichtig, sie ersetzen jedoch keine übergeordneten Strategien der Klimaschutz- und Anpassungspolitik.

Methodisch ist hervorzuheben, dass die Arbeit mit einem bewusst vereinfachten, aber trans-

parenten Modellrahmen operiert. Dies betrifft insbesondere die hydrologische Bilanzierung. Die Verwendung des DWA-M 102-4 erlaubt eine standardisierte und fachlich anschlussfähige Bewertung, ersetzt jedoch keine ereignisbasierte hydraulische Simulation. Annahmen wie die vollständige Entwässerung versiegelter und überdachter Flächen in die Becken des Status quo oder die vollständige Ableitung in die Kanalisation im kontrafaktischen Szenario vereinfachen die tatsächlichen Entwässerungsbeziehungen. Diese Vereinfachungen waren jedoch notwendig, um eine belastbare, vergleichende Deltaanalyse zu ermöglichen. Der methodische Gewinn liegt gerade in dieser Vergleichbarkeit. Die Untersuchung zielt nicht auf die vollständige Nachbildung jedes lokalen Wasserflusses, sondern auf die Ermittlung funktionaler Leistungsdifferenzen zwischen plausibel definierten Zuständen.

Auch die mikroklimatische Modellierung ist mit Begrenzungen verbunden. Die Simulationen beruhen auf einem festen sommerlichen Belastungszeitpunkt und bilden damit einen Extremzustand ab, nicht jedoch den gesamten Jahresverlauf oder die thermische Dynamik unterschiedlicher Tageszeiten. Diese Fokussierung ist methodisch plausibel, da gerade Belastungsspitzen für die gesundheitliche und planerische Relevanz entscheidend sind. Gleichwohl bleibt damit offen, wie sich die Unterschiede zwischen den Szenarien im Tages- oder Jahresgang verändern würden. Hinzu kommt, dass die räumliche Geometrie des Quartiers in allen Szenarien konstant gehalten wurde. Dadurch konnte isoliert die Wirkung veränderter Klimadaten untersucht werden. Gleichzeitig wurden mögliche zukünftige Änderungen in Vegetationsentwicklung, Materialität, Bebauung oder Nutzung nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse beschreiben somit keine vollständige Zukunft des Ackermannbogens, sondern die Reaktion seines heutigen räumlichen Zustands auf veränderte klimatische Randbedingungen.

Eine weiterer Punkt liegt in der gewählten Maßstabskombination. Die gesamtstädtische Ebene macht den kumulativen hydrologischen Nutzen dezentraler SUDS sichtbar, während die Quartiersebene die räumliche Feinstruktur mikroklimatischer Belastungen offenlegt. Gerade diese Verknüpfung von Aggregation und Detailanalyse erweitert die Aussagekraft des Untersuchungsdesigns. Zugleich verweist sie auf eine Grenze der Übertragbarkeit. Die mikroklimatischen Ergebnisse des Ackermannbogens besitzen exemplarischen Charakter, lassen sich jedoch nicht ohne Weiteres auf die gesamte Stadt München verallgemeinern. Thermischer Komfort ist eng an spezifische räumliche Situationen gebunden. Die Wahl des Ackermannbogens ist insofern plausibel, als es sich als gut durchgrüntes Mischwohnquartier um einen repräsentativen urbanen Aufenthaltsraum handelt. Dennoch bleibt die Aussagekraft der klimatischen Analyse an diesen konkreten Stadtraum gebunden.

Diskutiert werden muss ferner die Frage, wie SUDS im planerischen Diskurs begrifflich gefasst werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Retentionsflächen nicht auf eine technische Entwässerungsfunktion reduziert werden können. Dort, wo sie mit Vegetation, Entsiegelung und nutzbaren Freiräumen verbunden sind, entstehen multifunktionale Räume mit hydrologischer, klimatischer und sozialräumlicher Bedeutung. Gerade darin liegt ihre Relevanz für Schwammstadtstrategien. Gleichzeitig zeigt die vorliegende Untersuchung, dass nicht jede hydrologisch wirksame Infrastruktur auch mikroklimatisch bedeutsam ist. Die bewusste Ausklammerung unterirdischer Gruben aus der klimatischen Bewertung war daher fachlich notwendig. Diese Unterscheidung unter-

streicht, dass Schwammstadtplanung nicht allein auf technischer Entwässerungsleistung beruhen darf, sondern die oberirdische Raumwirksamkeit von Maßnahmen systematisch mitdenken muss.

Schließlich verweist die Arbeit auf die Bedeutung digitaler (open-source) Werkzeuge in der klimaangepassten Planung. Die Verknüpfung aus GIS, EPW-Transformation, UMEP-Modellierung, wasserhaushaltsbezogener Bilanzierung und interaktiven Dashboards ermöglicht eine hohe Transparenz des Gesamtprozesses. Dies ist nicht nur methodisch, sondern auch planungspolitisch relevant. Komplexe Zusammenhänge zwischen Klimaszenarien, Wasserhaushalt und thermischer Belastung werden dadurch in eine Form überführt, die kommunizierbar und überprüfbar bleibt. Gleichzeitig bleibt kritisch anzumerken, dass digitale Modellierungen stets auf Annahmen, Klassifikationen und Parametrisierungen beruhen. Ihre Ergebnisse sind daher nicht als objektive Abbildung der Realität zu lesen, sondern als wissensbasierte, modellgestützte Annäherung an urbane Umweltprozesse.

Insgesamt wurde deutlich, dass die untersuchten SUDS im Spannungsfeld zwischen technischer Infrastruktur, freiraumbezogener Anpassung und stadtökologischer Systemleistung zu verorten sind. Ihre hydrologische Wirkung ist klar nachweisbar und planerisch hoch relevant. Ihre mikroklimatische Wirkung ist ebenfalls bedeutsam, jedoch stärker kontextabhängig und unter zukünftigen Klimabedingungen relativiert. Die Arbeit bestätigt damit die Relevanz dezentraler Retentionssysteme für die klimaangepasste Stadtentwicklung, weist aber zugleich darauf hin, dass ihre Wirkung nur dann angemessen verstanden werden kann, wenn hydrologische und klimatische Funktionsleistungen differenziert, multiskalar und in ihrer jeweiligen räumlichen Logik betrachtet werden.

## 7. Fazit

Die vorliegende Untersuchung hatte das Ziel, die hydrologische und mikroklimatische Funktionsleistung von Sustainable Urban Drainage Systems in einem multiskalaren Analyseansatz für München und das Quartier Ackermannbogen zu bewerten. Auf Grundlage GIS-basierter Flächenanalysen, hydrologischer Wasserhaushaltsbilanzierung nach DWA-M 102-4, mikroklimatischer UMEP-Modellierung sowie szenariobasierter EPW-Transformationen konnte gezeigt werden, dass SUDS einen relevanten Beitrag zur klimaangepassten Stadtentwicklung leisten, ihre Wirkungen jedoch je nach Funktionsdimension, Maßstabsebene und Zukunftsszenario unterschiedlich ausfallen.

Hydrologisch wurde deutlich, dass die betrachteten Retentionselemente eine erhebliche Entlastungsleistung erzeugen. Auf gesamtstädtischer Ebene werden durch den vorhandenen SUDS-Bestand jährlich große Abflussmengen vermieden und zugleich erhebliche Infiltrationsvolumina ermöglicht. Auch auf Quartiersebene zeigte sich im Ackermannbogen eine ausgeprägte Wirksamkeit des Beckensystems, insbesondere durch die drastische Reduktion des Oberflächenabflusses und die starke Förderung der Versickerung. Der Vergleich mit dem kontrafaktisch versiegelten Zustand verdeutlicht damit die tatsächliche Netto-Leistung der vorhandenen Retentionsinfrastruktur. Gegenüber dem naturnahen Referenzzustand wurde zugleich sichtbar, dass SUDS keinen vorurbanen Wasserhaushalt reproduzieren, sondern ein eigenes, technisch vermitteltes Regime erzeugen, das vor allem auf Abflussvermeidung und Infiltration ausgerichtet ist.

Mikroklimatisch zeigte die Untersuchung, dass entsiegelte und vegetationsgeprägte Retentionsräume zur Modifikation thermischer Belastungen beitragen, dass diese Wirkung jedoch unter zukünftigen Klimabedingungen zunehmend vom übergeordneten Erwärmungssignal überlagert wird. Im Ackermannbogen steigen sowohl PET als auch  $T_{mrt}$  in allen Zukunftsszenarien deutlich an. Selbst im günstigsten Entwicklungspfad verbleibt das Belastungsniveau über dem heutigen Zustand, während sich im ungünstigsten Szenario räumlich konzentrierte Hotspots extremer thermischer Zusatzbelastung ausbilden. Die mikroklimatische Funktionsleistung der vorhandenen Freiraumstruktur ist damit als relevante, aber begrenzte Anpassungsleistung zu bewerten. Ihre Stärke liegt vor allem in der lokalen Minderung und räumlichen Differenzierung von Belastung, nicht in der vollständigen Kompensation klimatischer Erwärmung.

In der Zusammenschau zeigt sich, dass die hydrologische und mikroklimatische Funktionsleistung nicht entlang derselben Logik beschrieben werden können. Hydrologische Effekte lassen sich objekt- und flächenbezogen aggregieren und auf die gesamtstädtische Ebene hochrechnen. Thermische Effekte bleiben dagegen eng an konkrete Aufenthaltsräume und räumliche Konfigurationen gebunden. Gerade diese Differenz bestätigt die Notwendigkeit eines mehrschichtigen und maßstabsspezifischen Untersuchungsdesigns. Die entwickelte Trennung zwischen hydrologischem Drei-Zustände-Vergleich und mikroklimatischem Szenarienvergleich erweist sich damit nicht als methodische Schwäche, sondern als notwendige Voraussetzung für eine fachlich belastbare Bewertung.

Die Ergebnisse unterstreichen zugleich die planerische Relevanz von SUDS als Bestandteil einer Schwammstadtstrategie. Retentionselemente sind nicht nur als technische Entwässerungseinrichtungen zu lesen, sondern als multifunktionale Bestandteile grün-blauer Infrastruktur, die Wasserhaushalt, Freiraumqualität und Klimaanpassung miteinander verknüpfen. Gerade dort, wo Retentionsräume mit Entsiegelung, Vegetation und nutzbaren Freiflächen verbunden werden, entstehen Mehrfachwirkungen, die über eine rein wasserwirtschaftliche Funktion hinausgehen. Für die Planung folgt daraus, dass SUDS nicht isoliert, sondern als integraler Bestandteil räumlicher Anpassungsstrategien verstanden werden sollten.

Darüber hinaus wurde mit der Arbeit ein übertragbares methodisches Framework entwickelt. Die Verknüpfung aus Grunddatenaufbereitung, Klimaszenarien, GIS-Harmonisierung, mikroklimatischer Simulation, hydrologischer Bilanzierung, kontrafaktischer Analyse und digitaler Dashboard-Aufbereitung stellt eine strukturierte Prozesskette bereit, die auch auf andere Quartiere und Städte angewendet werden kann. Die Untersuchung leistet damit nicht nur einen standortbezogenen Beitrag für München und den Ackermannbogen, sondern auch einen methodischen Beitrag zur Bewertung urbaner SUDS-Systeme im Kontext klimaangepasster Stadt- und Freiraumentwicklung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Sustainable Urban Drainage Systems einen nachweisbaren und planerisch relevanten Beitrag zur urbanen Klimaanpassung leisten. Ihre hydrologische Wirkung ist klar quantifizierbar und systemisch bedeutsam. Ihre mikroklimatische Wirkung ist lokal wirksam, aber unter zukünftigen Klimabedingungen begrenzt. Die zentrale Schlussfolgerung lautet daher, dass SUDS als notwendiger, jedoch nicht allein ausreichender Baustein klimaresilienter Stadtentwicklung verstanden werden müssen. Ihre größte Stärke liegt in der Verbindung technischer, ökologischer und räumlicher Funktionen innerhalb einer integrierten Schwammstadtlogik.

## 8. Ausblick

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung ergeben sich mehrere fachliche, methodische und planerische Perspektiven für weiterführende Arbeiten. Zunächst wird deutlich, dass die getrennte Betrachtung hydrologischer und mikroklimatischer Funktionsleistungen zwar notwendig war, zugleich jedoch den Bedarf an noch stärker integrierten Bewertungsansätzen offenlegt. Künftige Untersuchungen sollten daher darauf abzielen, beide Wirkungsebenen nicht nur parallel, sondern stärker gekoppelt zu modellieren. Insbesondere die Rolle der Verdunstung als Bindeglied zwischen Wasser- und Energiehaushalt bietet hierfür einen vielversprechenden Ansatzpunkt. Eine engere Verknüpfung hydrologischer Bilanzierungsverfahren mit mikroklimatischen Simulationen könnte dazu beitragen, die Wechselwirkungen zwischen Infiltration, Bodenfeuchte, Vegetationsdynamik und thermischem Komfort noch präziser zu erfassen.

Methodisch eröffnet die Arbeit mehrere Möglichkeiten der Weiterentwicklung. Für die hydrologische Modellierung wäre eine Ergänzung durch ereignisbezogene oder dynamische Simulationen sinnvoll, um neben der bilanziellen Jahresperspektive auch Extremereignisse, saisonale Unterschiede und zeitlich variierende Abflussprozesse abzubilden. Dadurch könnte die Aussagekraft im Hinblick auf Starkregenmanagement und Überflutungsvorsorge erweitert werden. Im mikroklimatischen Bereich wäre es sinnvoll, nicht nur einen einzelnen sommerlichen Belastungszeitpunkt zu betrachten, sondern Tagesgänge, unterschiedliche synoptische Wetterlagen und mehrere Jahreszeiten einzubeziehen. Dadurch ließe sich die gegenwärtig punktuelle Extremfallanalyse zu einer umfassenderen Charakterisierung klimatischer Belastungs- und Entlastungsmuster ausbauen.

Darüber hinaus erscheint eine Erweiterung der räumlichen Fallstudienbasis sinnvoll. Der Ackermannbogen hat sich als geeigneter exemplarischer Untersuchungsraum erwiesen, da dort die mikroklimatischen Wirkungen eines realen grün-blauen Freiraumgefüges sichtbar gemacht werden konnten. Für eine breitere Generalisierbarkeit wäre es jedoch notwendig, weitere Quartierstypen mit abweichender Dichte, Morphologie, Vegetationsausstattung und Nutzungsstruktur einzubeziehen. Insbesondere dicht bebaute Innenstadträume, gewerblich geprägte Areale oder großmaßstäbliche Neubauquartiere könnten wertvolle Vergleichsfälle liefern. Auf diese Weise ließe sich untersuchen, unter welchen räumlichen Bedingungen SUDS ihre hydrologische und mikroklimatische Wirkung besonders wirksam entfalten und wo ihre Grenzen liegen.

Ein weiterer Entwicklungspfad betrifft die Differenzierung der Retentionstypen selbst. Die vorliegende Arbeit fokussierte aus guten fachlichen Gründen auf Mulden und Becken, da diese sowohl hydrologisch als auch oberirdisch-mikroklimatisch wirksam sind. Künftige Untersuchungen könnten jedoch zusätzliche Typen und Kombinationen in die Bewertung aufnehmen, etwa Retentionsdächer, multifunktionale Freiräume, lineare Entwässerungssysteme oder gekoppelte Systeme aus oberirdischer und unterirdischer Infrastruktur. Dadurch ließe sich die Frage vertiefen, welche Typologien unter unterschiedlichen städtischen Rahmenbedingungen die größten Mehrfachwirkungen entfalten.

Auch die digitale Umsetzung bietet Entwicklungspotenzial. Die in der Arbeit entwickelten Dashboards haben gezeigt, dass komplexe Modellierungs- und Bilanzierungsergebnisse in eine zugängliche und planerisch anschlussfähige Form überführt werden können. Perspektivisch könnten diese Werkzeuge um zusätzliche Analyse- und Interaktionsfunktionen erweitert werden. Denkbar wären beispielsweise live veränderbare Szenarienparameter, stärker integrierte Vergleichsmodi zwischen Stadtteilen, automatisierte Kennwertgenerierung oder Schnittstellen zu kommunalen Planungs- und Geodatenplattformen. Damit könnten Dashboards nicht nur als Kommunikationsinstrumente, sondern zunehmend auch als operative Werkzeuge in Planungs- und Entscheidungsprozessen eingesetzt werden.

Planerisch verweist die Arbeit auf die Notwendigkeit, SUDS konsequent als multifunktionale Infrastruktur weiterzuentwickeln. Künftige Schwammstadtstrategien sollten sich daher nicht auf die technische Dimension der Regenwasserbewirtschaftung beschränken, sondern SUDS systematisch mit Freiraumgestaltung, Aufenthaltsqualität, Biodiversität, Verschattung und Hitzeminderung verknüpfen. Gerade vor dem Hintergrund zunehmender klimatischer Belastungen gewinnt die Frage an Bedeutung, wie technische und landschaftsarchitektonische Strategien integrativ entworfen werden können. Der Mehrwert zukünftiger Projekte wird dabei vermutlich weniger in der Optimierung einzelner Kennwerte als in der gezielten Kopplung mehrerer Wirkungsdimensionen liegen.

Schließlich eröffnet die Arbeit auch eine Forschungsperspektive im Hinblick auf Bewertungs- und Priorisierungssysteme. Die Ergebnisse legen nahe, dass hydrologische und mikroklimatische Leistungen nicht einfach in einem einheitlichen Summenwert aufgehen, sondern unterschiedliche räumliche und funktionale Logiken besitzen. Künftige Forschung könnte daher darauf abzielen, ein mehrkriterielles Bewertungsframework zu entwickeln, das Wasserhaushalt, thermischen Komfort, Biodiversität, Aufenthaltsqualität und planerische Umsetzbarkeit gemeinsam berücksichtigt. Ein solcher Ansatz könnte insbesondere für Kommunen hilfreich sein, um Maßnahmen nicht nur technisch, sondern strategisch und räumlich priorisieren zu können.

Die entwickelte Methodik, die gewonnenen Ergebnisse und die digitale Ergebnisarchitektur bilden ein belastbares Fundament, auf dem zukünftige Untersuchungen zu klimaangepasster Stadt- und Freiraumentwicklung aufbauen können. Gerade angesichts der zunehmenden Relevanz von Hitzeanpassung, Regenwassermanagement und Schwammstadtstrategien erscheint eine solche Weiterentwicklung nicht nur sinnvoll, sondern notwendig.

## References

- Bayerische Vermessungsverwaltung. (2026). Open Data – Kostenfreie Geodaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung [Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung – [www.geodaten.bayern.de](http://www.geodaten.bayern.de) (Daten verändert), Lizenz: CC BY 4.0].
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2002). Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, *20*, 12–17.
- Broadbent, A. M., Krayenhoff, E. S., & Georgescu, M. (2018). The Motive and Means to Cool Cities: A Review of Cooling Strategies and Their Impacts. *Urban Climate*, *24*, 100–122.
- Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (1995). *Microclimatic Landscape Design: Creating Thermal Comfort and Energy Efficiency*. John Wiley & Sons.
- Conrad, O. (2003). Channel Network and Drainage Basins [Terrain Analysis | Channels, SAGA GIS ta\_channels 5]. In *SAGA GIS Tool Library Documentation*. <https://saga-gis.sourceforge.io>
- Coutts, A. M., Tapper, N. J., Beringer, J., Loughnan, M., & Demuzere, M. (2013). Watering Our Cities: The Capacity for Water Sensitive Urban Design to Support Urban Cooling and Improve Human Thermal Comfort in the Australian Context. *Progress in Physical Geography*, *37*(1), 2–28. <https://doi.org/10.1177/0309133312461032>
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) & Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e. V. (BWK). (2022, März). *DWA-M 102-4/BWK-M 3-4: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer — Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers* (Techn. Ber. Nr. DWA-M 102-4/BWK-M 3-4). DWA und BWK. Verfügbar 18. März 2026 unter <https://shop.dwa.de/Publikationen/Entwaesserungssysteme/Regenwasser/>
- Future Weather Generator Project. (2026). Future Weather Generator [Accessed 2026-03-20].
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, *33*(1), 115–133.
- Huber, V. (2024). Heat mortality during the extreme summer 2022.
- Lawrie, L. K., & Crawley, D. B. (2022). Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx) [paper in progress].
- Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C. W., Sun, T., Theeuwes, N. E., Järvi, L., Ward, H. C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K. F. G., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., & Zhang, Z. (2018). Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*, *99*, 70–87. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.020>
- Schmit, M. (2023). *Naturnahe urbane Wasserbilanz (NatUrWB)* [Webtool zur Bestimmung der naturnahen urbanen Wasserbilanz als Referenzzustand]. HyFr. Verfügbar 21. März 2026 unter <https://www.naturwb.de>
- Winklmayr, C., Matthies-Wiesler, F., Muthers, S., Buchien, S., Kuch, B., an der Heiden, M., & Mücke, H.-G. (2023). Heat in Germany: Health risks and preventive measures. *Journal of Health Monitoring*, *8*(Suppl 4), 3–32. <https://doi.org/10.25646/11651>

# A. Anhang

## A.1 Verwendete Tools

Tabelle 13 Verwendete Werkzeuge im Workflow

---

Tool
QGIS
UMEP
Python
R
Plotly
Future Weather Generator
rasterio
Excel
JSON
Mermaid
HTML / JavaScript
CSV
GeoTIFF
Java SE 17

---

## A.2 Verwendete Formeln und Modelle

Wasserbilanz - Grundgleichungen

$$Z = a_F \cdot P_{\text{korr}}$$
$$a_A + g_A + v_A = 1$$
$$RD_A = a_A \cdot Z$$
$$GWN_A = g_A \cdot Z$$
$$ET_A = v_A \cdot Z$$

$$Z = P \cdot (1 + A_{\text{ratio}})$$

**Tabelle 14** Grundgleichungen und Projektparameter der Wasserbilanz

Parameter	Wert	Einheit
$P$	1086.8	mm/a
$ET_p$	571.7933322	mm/a
$A_{\text{ratio}}$	10	1
$Z$	11954.8	l/(m <sup>2</sup> /a)

## Typ Mulde

$$g_A = 0.8608 + 0.02385 \ln(P) - 0.00005331 ET_p - 0.002827 f_{S,M}$$

$$- 0.000002493 k_f + 0.0009514 \ln\left(\frac{k_f}{f_{S,M}}\right)$$

$$v_A = 0.000008562 ET_p + 2.611 \cdot \frac{P - 64.35}{P} \cdot f_{S,M}^{0.9425}$$

$$- 0.000001211 k_f$$

$$a_A = 1 - g_A - v_A$$

**Tabelle 15** Parameter der Muldenformel

Symbol	Einheit
$P$	mm/a
$ET_p$	mm/a
$f_{S,M}$	%
$k_f$	mm/h

## Typ Grube

$$a_A = 0.1$$

$$g_A = 0.9$$

$$v_A = 0$$

## Typ Becken

$$v_A = \frac{ET_p \cdot A_W}{P \cdot A_W + \sum_{i=1}^n A_{b,a,i} \cdot a_{F,i}}$$

$$a_A = 1 - v_A$$

$$g_A = 0$$

Tabelle 16 Parameter der Beckenformel

Symbol	Einheit
$A_W$	m <sup>2</sup>
$A_{b,a}$	m <sup>2</sup>
$a_F$	1
$P$	mm/a
$ET_p$	mm/a

## Delta- und Skalierungslogik

$$\Delta X = X_{\text{Szenario}} - X_{\text{Referenz}}$$

$$\text{Gesamtwert} = \sum \text{über alle berücksichtigten SUDS-Elemente}$$

### A.3 Szenarientabellen

#### Szenariofamilien

**Tabelle 17** Szenariofamilien

---

Familie
SSP1-2.6
SSP2-4.5
SSP3-7.0
SSP5-8.5

---

#### Zeitfenster

**Tabelle 18** Zeitfenster

---

Fenster	Jahre	Zeitraum
Referenz	1985–2014	Present-day
Zukunft 2050	2036–2065	mittleres Zukunftsfenster
Zukunft 2080	2066–2095	spätes Zukunftsfenster

---

## EPW-Dateien und Vergleichs-CSVs

**Tabelle 19** EPW-Dateien und Vergleichs-CSVs

---

Szenario	Jahr	EPW-Datei	CSV
Reference	Present-day	Present-day.epw	–
SSP1-2.6	2050	ssp126-2050.epw	ssp126-2050.csv
SSP1-2.6	2080	ssp126-2080.epw	ssp126-2080.csv
SSP2-4.5	2050	ssp245-2050.epw	ssp245-2050.csv
SSP2-4.5	2080	ssp245-2080.epw	ssp245-2080.csv
SSP3-7.0	2050	ssp370-2050.epw	ssp370-2050.csv
SSP3-7.0	2080	ssp370-2080.epw	ssp370-2080.csv
SSP5-8.5	2050	ssp585-2050.epw	ssp585-2050.csv
SSP5-8.5	2080	ssp585-2080.epw	ssp585-2080.csv

---

Ensemble-Modelle im EPW-Header

**Tabelle 20** Ensemble-Modelle im EPW-Header

---

Modell

---

BCC-CSM2-MR

CanESM5

CanESM5-1

CanESM5-CanOE

CAS-ESM2-0

CMCC-ESM2

CNRM-CM6-1

CNRM-CM6-1-HR

CNRM-ESM2-1

EC-Earth3

EC-Earth3-Veg

EC-Earth3-Veg-LR

FGOALS-g3

GFDL-ESM4

GISS-E2-1-G

GISS-E2-1-H

GISS-E2-2-G

IPSL-CM6A-LR

MIROC-ES2H

MIROC-ES2L

MIROC6

MRI-ESM2-0

UKESM1-0-LL

Vergleichsvariablen in den CSVs

**Tabelle 21** Vergleichsvariablen in den CSVs

---

Variable
Ground Temperatures auf 0.5 m, 2.0 m und 4.0 m
N6 Dry Bulb Temperature
N7 Dew Point Temperature
N8 Relative Humidity
N9 Atmospheric Station Pressure
N10 Extraterrestrial Horizontal Radiation
N11 Extraterrestrial Direct Normal Radiation
N12 Horizontal Infrared Radiation Intensity
N13 Global Horizontal Radiation
N14 Direct Normal Radiation
N15 Diffuse Horizontal Radiation
N16 Global Horizontal Illuminance
N17 Direct Normal Illuminance
N18 Diffuse Horizontal Illuminance
N19 Zenith Luminance
N21 Wind Speed
N22 Total Sky Cover
N23 Opaque Sky Cover
N30 Snow Depth
N33 Liquid Precipitation Depth

---

## GCM- und EPW-Variablen

**Tabelle 22** GCM- und EPW-Variablen

Kategorie	Einträge
GCM-Variablen	TAS, TASMAX, TASMIN, PR, HUSS, PSL, CLT, RSDS, SND, SFCWIND
EPW-Felder	Dry Bulb Temperature, Relative Humidity, Atmospheric Pressure, Global Horizontal Radiation, Diffuse Horizontal Radiation, Wind Speed, Total Sky Cover, Snow Depth, Liquid Precipitation Depth
Diffuse-Irradiation-Modelle	Ridley / Boland / Lauret, Engerer, Paulescu / Blaga
Solar-hour adjustment	ByMonth, ByDay, None
GPO-Wert	0, 1, 2

**A.4 Flächenaufschlüsselung Ackermannbogen**

## Szenario-Matrix

**Tabelle 23** Szenario-Matrix Ackermannbogen - Anteile

Szenario	Runoff %	Infiltration %	ET %
Scenario 1	0.244	62.645	34.252
Scenario 2	46.403	16.770	33.968
Scenario 3	10.000	38.000	52.000

**Tabelle 24** Szenario-Matrix Ackermannbogen - Jahreswerte in mm/a

Szenario	Runoff mm/a	Infiltration mm/a	ET mm/a
Scenario 1	2.654	680.829	372.247
Scenario 2	504.307	182.258	369.165
Scenario 3	108.680	412.984	565.136

**Tabelle 25** Szenario-Matrix Ackermannbogen - Jahreswerte in m<sup>3</sup>/a

Szenario	Runoff m <sup>3</sup> /a	Infiltration m <sup>3</sup> /a	ET m <sup>3</sup> /a
Scenario 1	917.494	739.925	0.988
Scenario 2	174352.483	198.078	186.172
Scenario 3	37573.624	448.831	61.419

## Delta-Vergleiche

**Tabelle 26** Delta-Vergleiche Ackermannbogen

Delta	Runoff mm/a	Infiltration mm/a	ET mm/a
2 vs 1	501.653	-498.571	-3.082
3 vs 1	106.026	-267.845	192.889
3 vs 2	-395.627	230.726	195.971

**A.5 Retentionselemente München**

## Bestandszahlen

**Tabelle 27** Bestandszahlen München

Kennwert	Wert
Raw-Bestand	1145
Nutzbarer Bestand	1003
Mulde	971
Becken	26
Grube	6

## Flächenbasis

**Tabelle 28** Flächenbasis für die Hochrechnung

Kennwert	Wert
Gesamtfläche aller SUDS-Elemente	79559.49 m <sup>2</sup>
Rechenbasis Mulde + Becken	79482.26 m <sup>2</sup>

## Typische Flächenwerte

**Tabelle 29** Typische Flächenwerte der Systeme

Typ	Medianfläche
Mulde	14.96 m <sup>2</sup>
Becken	364.88 m <sup>2</sup>

## Stadtweite Wasserbilanz

Tabelle 30 Stadtweite Wasserbilanz

Szenario	Runoff [m <sup>3</sup> /a]	Infiltration [m <sup>3</sup> /a]	ET [m <sup>3</sup> /a]
Status quo	4750.97	906866.22	38577.29
Kontrafaktisch	778997.24	0.00	171197.25
Naturnah	95019.45	361073.90	494101.13

## Delta-KPIs für München

Tabelle 31 Delta-KPIs für München

KPI	Wert [m <sup>3</sup> /a]
Avoided runoff	774246.27
Additional infiltration	906866.22
Runoff difference vs. naturnah	-90268.48

## A.6 Annahmen und Parameter

## Hydrologische Projektannahmen

Tabelle 32 Hydrologische Projektannahmen

Parameter	Wert	Einheit
$P$	1086.8	mm/a
$ET_p$	571.7933322	mm/a
$A_{\text{ratio}}$	10	1
$Z$	11954.8	l/(m <sup>2</sup> /a)

## Typenparameter

**Tabelle 33** Typenparameter

Parameter	Wert	Einheit
$k_f$ Gültigkeitsbereich	14 bis 3600	mm/h
$a_A$ Grube	0.1	1
$g_A$ Grube	0.9	1
$v_A$ Grube	0	1
$a_A$ Becken	$1 - v_A$	1
$g_A$ Becken	0	1

## Vergleichs- und Referenzwerte

**Tabelle 34** Vergleichs- und Referenzwerte

Parameter	Wert	Einheit
Vergleichstag	224	Tag des Jahres
Uhrzeit	14:00	Uhr
NatUrWb-Fläche Ackermannbogen	345727.13	m <sup>2</sup>
NatUrWb Runoff	10	%
NatUrWb Infiltration	38	%
NatUrWb ET	52	%

**A.7 EPW-Szenarienvergleich**

## EPW-Dateien und Kontext

**Tabelle 35** EPW-Dateien und Szenario-Kontext

Szenario	Jahr	EPW-Datei	CSV
Reference	Present-day	Present-day.epw	–
SSP1-2.6	2050	ssp126-2050.epw	ssp126-2050.csv
SSP1-2.6	2080	ssp126-2080.epw	ssp126-2080.csv
SSP2-4.5	2050	ssp245-2050.epw	ssp245-2050.csv
SSP2-4.5	2080	ssp245-2080.epw	ssp245-2080.csv
SSP3-7.0	2050	ssp370-2050.epw	ssp370-2050.csv
SSP3-7.0	2080	ssp370-2080.epw	ssp370-2080.csv
SSP5-8.5	2050	ssp585-2050.epw	ssp585-2050.csv
SSP5-8.5	2080	ssp585-2080.epw	ssp585-2080.csv

## Stations-Metadaten und abgeleitete Kennwerte

**Tabelle 36** Temperaturkennwerte

Szenario	Mean yearly temp	Hottest (99%) yearly temp	Coldest (1%) yearly temp
Present-day	8.800	27.600	-8.900
SSP1-2.6 / 2050	10.846	30.800	-7.000
SSP1-2.6 / 2080	11.095	31.100	-6.800
SSP2-4.5 / 2050	11.112	30.900	-6.500
SSP2-4.5 / 2080	12.005	32.400	-5.600
SSP3-7.0 / 2050	11.418	31.700	-5.900
SSP3-7.0 / 2080	13.076	34.441	-4.600
SSP5-8.5 / 2050	11.782	32.100	-5.800
SSP5-8.5 / 2080	14.093	36.000	-3.600

**Tabelle 37** Strahlungskennwerte

Szenario	Annual GHI	Diffuse share
Present-day	1174.92	43.2
SSP1-2.6 / 2050	1245.08	53.8
SSP1-2.6 / 2080	1252.65	53.2
SSP2-4.5 / 2050	1227.12	55.3
SSP2-4.5 / 2080	1237.48	54.3
SSP3-7.0 / 2050	1221.88	55.7
SSP3-7.0 / 2080	1233.93	54.5
SSP5-8.5 / 2050	1227.55	55.2
SSP5-8.5 / 2080	1239.11	54.0

## EPW-Metadaten

**Tabelle 38** EPW-Metadaten

Parameter	Wert	Einheit
LOCATION	Munich.AP, BY, DEU, SRC-TMYx	–
Latitude	48.35000	deg
Longitude	11.78300	deg
Elevation	448.0	m

Vergleichs-CSV-Variablen

**Tabelle 39** Vergleichs-CSV-Variablen

---

Variable
Ground Temperatures 0.5 m
Ground Temperatures 2.0 m
Ground Temperatures 4.0 m
N6 Dry Bulb Temperature
N7 Dew Point Temperature
N8 Relative Humidity
N9 Atmospheric Station Pressure
N10 Extraterrestrial Horizontal Radiation
N11 Extraterrestrial Direct Normal Radiation
N12 Horizontal Infrared Radiation Intensity
N13 Global Horizontal Radiation
N14 Direct Normal Radiation
N15 Diffuse Horizontal Radiation
N16 Global Horizontal Illuminance
N17 Direct Normal Illuminance
N18 Diffuse Horizontal Illuminance
N19 Zenith Luminance
N21 Wind Speed
N22 Total Sky Cover
N23 Opaque Sky Cover
N30 Snow Depth
N33 Liquid Precipitation Depth

---

### A.8 PET-Vergleich (SSP-Szenarien)

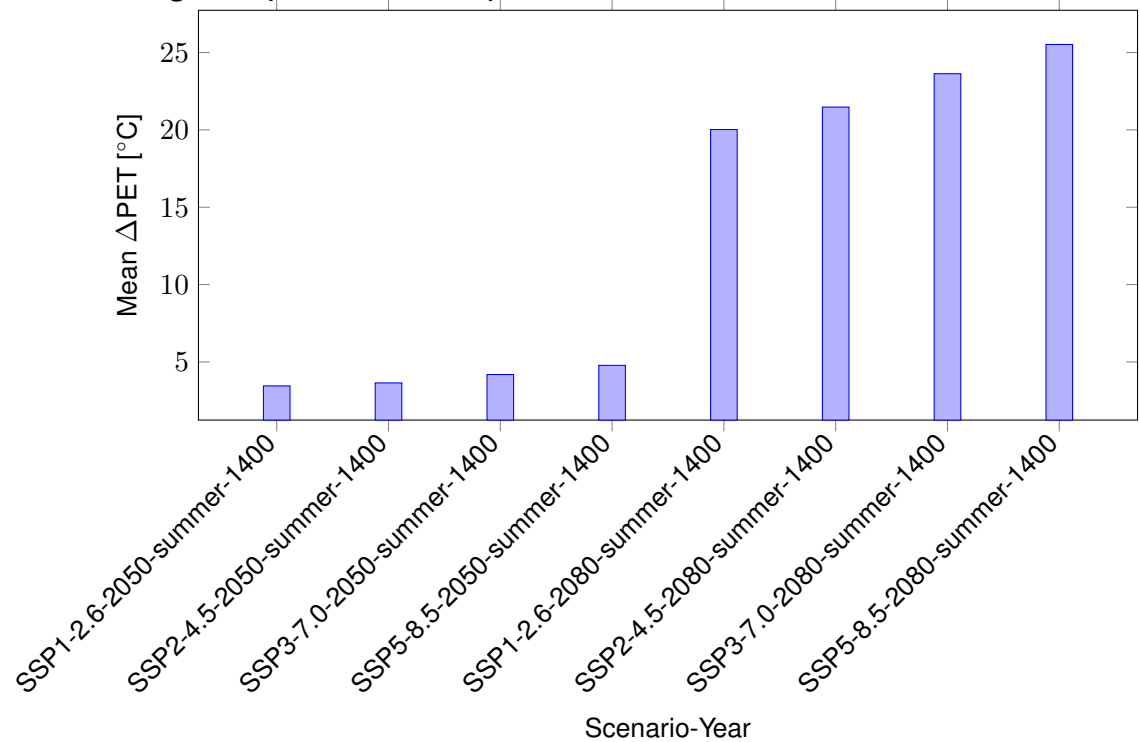


Abbildung 21 Mittlere  $\Delta$ PET gegenüber heute nach Szenario und Jahr

Tabelle 40 Top-Veränderungen 2080 gegenüber 2050

Szenario	Persona	DOY / Time	Mean $\Delta$ PET [°C]
SSP5-8.5		224 / 1400	20.744
SSP3-7.0		224 / 1400	19.445
SSP2-4.5		224 / 1400	17.832
SSP1-2.6		224 / 1400	16.576

## PET-Mittelwerte

**Tabelle 41** PET-Mittelwerte der SSP-Szenarien

Szenario	Jahr	PET mean [degC]	Delta [degC]
today	Present-day	17.346	0.000
SSP1-2.6	2050	20.796	3.450
SSP2-4.5	2050	20.989	3.643
SSP3-7.0	2050	21.534	4.188
SSP5-8.5	2050	22.125	4.779
SSP1-2.6	2080	37.372	20.025
SSP2-4.5	2080	38.821	21.475
SSP3-7.0	2080	40.979	23.633
SSP5-8.5	2080	42.870	25.524

## Tmrt-Mittelwerte

**Tabelle 42** Tmrt-Mittelwerte der SSP-Szenarien

Szenario	Jahr	Tmrt mean [degC]	Delta [degC]
baseline	Present-day	22.834	0.000
SSP1-2.6	2050	26.268	3.434
SSP2-4.5	2050	26.365	3.531
SSP3-7.0	2050	26.821	3.987
SSP5-8.5	2050	27.352	4.518
SSP1-2.6	2080	48.516	25.682
SSP2-4.5	2080	49.590	26.756
SSP3-7.0	2080	51.297	28.463
SSP5-8.5	2080	52.885	30.051

### Hotspots, Grenzwerte und Rangfolge

**Tabelle 43** Hotspots, Grenzwerte und Rangfolge

---

Kennwert	Wert
Vergleich	SSP5-8.5 2080 minus today
Hotspot-Schwelle	32.380 degC
Hotspot-Pixel	14098
Hotspot-Fläche	14098 m <sup>2</sup>
Hotspot-Anteil	5.0115 %
Sensitivitaet q99	33.422 degC
Fläche bei q99	2815 m <sup>2</sup>

---

### Wind-Hinweis

**Tabelle 44** Wind-Hinweis

---

Kennwert	Wert
Mittlere Windgeschwindigkeit	0.499 m/s
Höhe	1.5 m
Vertikaler Vergleich	nicht verfügbar

---