

**Professur für Hydrologie**  
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Max Schmit

**Ermittlung einer naturnahen urbanen Wasserbilanz  
(NatUrWB) als Zielvorgabe für deutsche Städte**

-

**Erstellung eines interaktiven Webtools**



**Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler**

**Freiburg i. Br., April 2021**



**Professur für Hydrologie**  
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Max Schmit

**Ermittlung einer naturnahen urbanen Wasserbilanz  
(NatUrWB) als Zielvorgabe für deutsche Städte**

-

**Erstellung eines interaktiven Webtools**

---

|              |                                 |
|--------------|---------------------------------|
| Referent:    | Prof. Dr. Markus Weiler         |
| Korreferent: | Jun.-Prof. Dr. Andreas Hartmann |
| Betreuer:    | Andreas Steinbrich              |
|              | Hannes Leistert                 |
|              | Alexander Krämer (WWL)          |

---

**Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler**

**Freiburg i. Br., April 2021**





# Vorwort

Diese Arbeit wäre nicht ohne die Hilfe vieler Menschen zu Stande gekommen denen ich an dieser Stelle danken will.

Zuallererst möchte ich Prof. Dr. Weiler für die Idee zu diesem Thema danken. Auch für die vielen hilfreichen Videokonferenzen, die mir immer viel weitergeholfen haben, wenn ich nicht mehr weiterwusste und mir den Weg aufgezeigt haben, wie ich ein Problem angehen und lösen kann, bin ich ihm sehr dankbar.

Mein Dank gilt auch Jun.-Prof. Dr. Andreas Hartmann für die Annahme der Zweitkorrektur, ohne die die Arbeit nicht hätte durchgeführt werden können.

Weiterhin gilt ein besonderer Dank Andreas Steinbrich, der mir in vielen E-Mails und Telefongesprächen geholfen hat durch den Dschungel an Daten zu manövrieren und auf dessen Arbeit ich so gut aufbauen konnte. Durch das stets offene Ohr und die konstruktiven Antworten habe ich es so geschafft auch den hoffentlich letzten Sonderfall der BÜK zu behandeln.

Ein sehr großer Dank gilt auch Hannes Leistert, der mich stetig mit neuen RoGeR Versionen beliefert hat und mir bei jeder neuen Fehlermeldung schnell zu deren Lösung verholfen hat. So haben wir es geschafft nach der 10. Version endlich alle Besonderheiten eingebaut und Fehler ausgemerzt zu haben. Ich danke ihm für die große Ausdauer und den unermüdlichen Problemlösungscharakter, den er bei dieser Arbeit gezeigt hat.

Auch danke ich Jürgen Strub für die Möglichkeit eines Büroplatzes und die Unterstützung bei dem Auftreiben der nötigen Rechenkraft für die Simulationen.

Für das Veröffentlichen der Internetseite und der Datenbank danke ich der Gbr. WWL Umweltplanung und Geoinformatik. Vor allem Alexander Krämer danke ich dafür, sich der Herausforderung gestellt zu haben eine Internetseite mittels Django zu hosten.

Auch will ich Carine Schmit Kayser und Claude Schmit danken, dass ich auch unter den erschwerten Bedingungen von Corona und Homeoffice, immer einen Arbeitsplatz mit Bildschirm gefunden habe. Weiterhin gilt Claude Schmit auch ein großer Dank für das Korrekturlesen dieser Arbeit, ohne das sicher noch viele Rechtschreibfehler darin enthalten wären.

Zu guter Letzt, will ich noch einen großen Dank an meine Büronachbarin und Masterarbeits-Mitstreiterin Eva Breitenbach aussprechen. Dank ihr war auch die einsamste und arbeitsreichste Zeit nie langweilig.



# Inhaltsverzeichnis

|                                                       |             |
|-------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>                        | <b>I</b>    |
| <b>Verzeichnis der Abbildungen im Text.....</b>       | <b>III</b>  |
| <b>Verzeichnis der Karten im Text.....</b>            | <b>V</b>    |
| <b>Verzeichnis der Tabellen im Text.....</b>          | <b>VI</b>   |
| <b>Verzeichnis der Abbildungen im Anhang.....</b>     | <b>VII</b>  |
| <b>Verzeichnis der Karten im Anhang.....</b>          | <b>VIII</b> |
| <b>Verzeichnis der Tabellen im Anhang.....</b>        | <b>IX</b>   |
| <b>Zusammenfassung.....</b>                           | <b>X</b>    |
| <b>Summary.....</b>                                   | <b>XI</b>   |
| <b>1. Einleitung .....</b>                            | <b>1</b>    |
| <b>2. Problemstellung und Zielsetzung .....</b>       | <b>5</b>    |
| <b>3. Methode .....</b>                               | <b>7</b>    |
| 3.1 Voruntersuchungen.....                            | 7           |
| 3.1.1 Zeitauflösung und Zeitspanne .....              | 7           |
| 3.1.2 Sommer-Winter Wichtung des Niederschlags .....  | 9           |
| 3.2 NatUrWB Modell.....                               | 10          |
| 3.2.1 Wetterdaten .....                               | 11          |
| 3.2.1.1 Mehrjährige Stationsmittelwerte .....         | 12          |
| 3.2.1.2 Simulationszeitraum .....                     | 14          |
| 3.2.1.3 Qualitätstests und Stationswahl .....         | 17          |
| 3.2.1.3.1 Niederschlagsstationen .....                | 17          |
| 3.2.1.3.2 Temperatur und Evapotranspiration .....     | 19          |
| 3.2.1.4 Auffüllen der Lücken.....                     | 20          |
| 3.2.1.5 Skalieren auf mehrjährige Mittelwerte .....   | 21          |
| 3.2.2 Simulations-Polygone .....                      | 22          |
| 3.2.2.1 Auffüllen der Bodenprofile .....              | 23          |
| 3.2.2.2 Wetterstation und Topografie .....            | 26          |
| 3.2.3 Nachschlage-Polygone .....                      | 31          |
| 3.2.4 Simulation mit RoGeR_WB_1D.....                 | 31          |
| 3.2.4.1 Ableiten der Bodenparameter aus der BÜK ..... | 33          |
| 3.2.4.2 Regionalisierung.....                         | 35          |
| 3.2.4.3 Gefälle .....                                 | 38          |
| 3.2.4.4 Landnutzungsparameter.....                    | 39          |
| 3.2.5 Bestimmung der NatUrWB-Referenz .....           | 42          |
| 3.3 Städtevergleich.....                              | 45          |

---

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. Ergebnisse.....</b>                                   | <b>46</b> |
| 4.1 Voruntersuchungen .....                                 | 46        |
| 4.1.1 Zeitauflösung und Zeitspanne .....                    | 46        |
| 4.1.2 Sommer-/Winter-Wichtung des Niederschlags.....        | 48        |
| 4.2 NatUrWB-Modell .....                                    | 50        |
| 4.2.1 Variabilität der Regionalisierung .....               | 50        |
| 4.2.2 Variabilität des Gefälles .....                       | 52        |
| 4.2.3 Trainingsjahr für die Bodenfeuchte .....              | 53        |
| 4.2.4 Ausgabe des NatUrWB-Modells am Beispiel Freiburg..... | 53        |
| 4.3 Städtevergleich.....                                    | 61        |
| <b>5. Diskussion.....</b>                                   | <b>64</b> |
| 5.1 Voruntersuchungen .....                                 | 64        |
| 5.1.1 Zeitauflösung und Zeitspanne .....                    | 64        |
| 5.1.1.1 Zeitauflösung der Niederschlagsdaten.....           | 64        |
| 5.1.1.2 Zeitspanne der Wetterdaten .....                    | 65        |
| 5.1.2 Sommer-Winter-Wichtung des Niederschlags.....         | 66        |
| 5.2 NatUrWB-Modell .....                                    | 68        |
| 5.2.1 Variabilität der Regionalisierung .....               | 69        |
| 5.2.2 Variabilität des Gefälles .....                       | 70        |
| 5.2.3 Trainingsjahr für die Bodenfeuchte .....              | 71        |
| 5.2.4 Ausgabe des NatUrWB-Modells am Beispiel Freiburg..... | 72        |
| 5.3 Städtevergleich.....                                    | 76        |
| <b>6. Schlussfolgerungen .....</b>                          | <b>79</b> |
| <b>7. Literaturverzeichnis .....</b>                        | <b>80</b> |
| <b>Anhang .....</b>                                         | <b>87</b> |

## Verzeichnis der Abbildungen im Text

|               |                                                                                                                                                                                    |    |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1:  | Einfluss der Versiegelung an der Wasserbilanz im deutschlandweiten Mittel.....                                                                                                     | 1  |
| Abbildung 2:  | Diagramm der jährlichen Mittelwerte der Jahre 2007 bis 2019 der Quotienten aus den gemessenen und den mehrjährigen (1980-2010) Jahresmittelwerten des Niederschlags. ....          | 16 |
| Abbildung 3:  | Screenshot der interaktiven Visualisierung zur manuellen Durchsicht der monatlichen Stationsmittelwerte des Niederschlags. ....                                                    | 19 |
| Abbildung 4:  | Änderung des Mittelwertes der Quotienten aus den Jahresmittelwerten zu den mehrjährigen Mittelwerten der Stationen durch das Skalieren der Daten.....                              | 22 |
| Abbildung 5:  | Histogramm und Boxplot der Standardabweichungen der Topografie der einzelnen Simulations-Polygone vor dem weiteren Aufteilen. ....                                                 | 28 |
| Abbildung 6:  | Boxplots der Standardabweichung der mittleren Höhe eines Polygons, zum Vergleich der topografischen Variabilität innerhalb eines Polygons vor und nach dem Aufteilen. ....         | 30 |
| Abbildung 7:  | Schematische Darstellung der verschiedenen Abfluss-Prozess die in RoGeR implementiert sind. ....                                                                                   | 32 |
| Abbildung 8:  | Boxplots der relativen Abweichungen zum besten Durchgang der Voruntersuchung je Zeitspanne der Wetterdaten und Zeitauflösung der Niederschlagsdaten für ET, TP und Abfluss. ....   | 47 |
| Abbildung 9:  | Diagramm der mehrjährigen monatlichen Mittelwerte des Niederschlags am gleichen fiktiven Punkt, der durch eine jährliche Wichtung aus 20 zufälligen Stationen bestimmt wurde. .... | 49 |
| Abbildung 10: | Dichte-Histogramm und Boxplot der Standardabweichungen des mehrjährigen Sommer- und Winter-Niederschlags je Simulations-Polygon. ....                                              | 50 |
| Abbildung 11: | Dichte-Histogramm und Boxplot der Standardabweichungen der mehrjährigen jährlichen Temperatur und Evapotranspiration je Simulations-Polygon.....                                   | 51 |
| Abbildung 12: | Histogramm mit der Häufigkeitsdichte und Boxplot der Standardabweichungen des Gefälles je Simulations-Polygon.....                                                                 | 52 |
| Abbildung 13: | Auszug der Verläufe (340 Stk.) der durch RoGeR_WB_1D simulierten, monatlichen Werte der Bodenfeuchte über die 11 Simulationsjahre. ....                                            | 53 |
| Abbildung 14: | Tortendiagramm der allgemeinen naturnahen Landnutzungsverteilung für die Stadt Freiburg.....                                                                                       | 56 |
| Abbildung 15: | Tortendiagramm der NatUrWB-Referenz für die Stadt Freiburg.....                                                                                                                    | 56 |
| Abbildung 16: | Stoffflussdiagramm der jährlichen Modellergebnisse für die Stadt Freiburg.....                                                                                                     | 57 |
| Abbildung 17: | Dreiecksdiagramm der Modellergebnisse je Simulations-Polygon für die Stadt Freiburg. ....                                                                                          | 58 |
| Abbildung 18: | Beispiel einer Infobox des Dreiecksdiagramms der Modellergebnisse je Simulations-Polygon für die Stadt Freiburg. ....                                                              | 58 |
| Abbildung 19: | Vergleich der NatUrWB-Referenzwerte der 82 Großstädte Deutschlands.....                                                                                                            | 61 |
| Abbildung 20: | Vergleich der durch das NatUrWB-Modell bestimmten naturnahen Verteilungen der Landnutzungen der 82 Großstädte Deutschlands. ....                                                   | 62 |

---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 21: Entwicklung der Anzahl an DWD-Stationen mit 10-minütigen Niederschlagsdaten. ....                                                                                                                                                                                    | 66 |
| Abbildung 22: Diagramm der mehrjährigen monatlichen Mittelwerte des Niederschlags am gleichen fiktiven Punkt, der durch eine jährliche Wichtung aus 20 zufälligen Stationen bestimmt wurde; mit eingezeichneten Grenzen für die Sommer-Winter-Wichtung des Niederschlags. ....     | 67 |
| Abbildung 23: Diagramm der mehrjährigen monatlichen Mittelwerte des Niederschlags am gleichen fiktiven Punkt, der durch eine halb-jährliche Wichtung aus 20 zufälligen Stationen bestimmt wurde; mit eingezeichneten Grenzen für die Sommer-Winter-Wichtung des Niederschlags..... | 68 |
| Abbildung 24: Punktwolken der hohen Standardabweichung zum mehrjährigen Mittelwert je Parameter in Bezug zur Fläche des Polygons. ....                                                                                                                                             | 69 |
| Abbildung 25: Punktwolke der hohen Standardabweichungen zum Mittelwert des Gefälles in Bezug zur Fläche des Polygons. Auf der x-Achse ist nur das obere Ende angezeigt. ....                                                                                                       | 71 |
| Abbildung 26: Auszug der Verläufe (340 Stk.) der durch RoGeR_WB_1D simulierten monatlichen Werte der Bodenfeuchte in Relation zur jeweiligen Feldkapazität über die 11 Simulationsjahre.....                                                                                       | 72 |
| Abbildung 27: Boxplots der Wasserbilanz-Anteile ET, Abfluss und GWNB der NatUrWB-Referenzwerte der 82 Großstädte Deutschlands. ....                                                                                                                                                | 76 |
| Abbildung 28: Boxplots der Anteile der Landnutzungs-Kategorien an den NatUrWB-Referenzwerten der 82 Großstädte Deutschlands. ....                                                                                                                                                  | 77 |

## Verzeichnis der Karten im Text

|           |                                                                                                                                                           |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Karte 1:  | Ausgewählte und mögliche DWD-Stationen für die Voruntersuchung. ....                                                                                      | 8  |
| Karte 2:  | Ausgewählte Bodenprofile für die Voruntersuchung und ihre<br>Bodenklasse. ....                                                                            | 8  |
| Karte 3:  | Auszug aus den Darstellungen der Niederschlags-Stationen, die nicht im<br>mehrjährigen DWD-Raster liegen, und deren genutzte nächste<br>Rasterzelle. .... | 12 |
| Karte 4:  | Darstellung der wegfallenden Stationen je nach gewähltem Zeitraum. ....                                                                                   | 15 |
| Karte 5:  | Darstellung der gewählten und wegfallenden Niederschlags-Stationen. ....                                                                                  | 18 |
| Karte 6:  | Flächen ohne definierte Profile oder ohne definiertes Hauptprofil in der<br>BÜK-Sachdatenbank. ....                                                       | 23 |
| Karte 7:  | Schematische Darstellung des Ersetzens fehlender Bodenprofile der<br>BÜK am Beispiel von Magdeburg. ....                                                  | 24 |
| Karte 8:  | Schematische Darstellung der Erstellung der Simulations-Polygone am<br>Beispiel der Stadt Aschaffenburg. ....                                             | 27 |
| Karte 9:  | Veranschaulichung der Vereinfachung an den Grenzen der Thiessen-<br>Polygone. ....                                                                        | 27 |
| Karte 10: | Darstellung des Prozesses zum Aufteilen der Polygone je nach<br>Höhenstufen, Teil 1. ....                                                                 | 29 |
| Karte 11: | Darstellung des Prozesses zum Aufteilen der Polygone je nach<br>Höhenstufen, Teil 2. ....                                                                 | 30 |
| Karte 12: | Auszug der Miniaturkarten der Simulations-Polygone die außerhalb des<br>DGM-Rasters liegen. ....                                                          | 38 |
| Karte 13: | Darstellung der Naturraumeinheiten und der Bodentypen der Stadt<br>Freiburg (Nachschlage-Clip). ....                                                      | 54 |
| Karte 14: | Darstellung der Bodengesellschaften der Stadt Freiburg; Auszug der<br>interaktiven Karte mit Informationskasten. ....                                     | 54 |
| Karte 15: | Darstellung der Naturraumeinheiten der Stadt Freiburg in der ganzen<br>Ausdehnung. ....                                                                   | 55 |
| Karte 16: | Darstellung der zur Bestimmung der naturnahen Landnutzungsverteilung<br>für die Stadt Freiburg herangezogenen Flächen. ....                               | 59 |
| Karte 17: | Karte aller Simulations-Polygone mit einer Standardabweichung zum<br>Mittelwert des Gefälles über 27 %-Punkten. ....                                      | 70 |

## Verzeichnis der Tabellen im Text

|            |                                                                                                                                                                                           |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: | Parameter der Voruntersuchung, zur Zeitauflösung und Zeitspanne, die miteinander geschaufelt wurden. ....                                                                                 | 9  |
| Tabelle 2: | Auflistung der Stations-IDs, je Parameter, der Stationen, die nicht in einer Rasterzelle des mehrjährigen DWD-Rasters liegen, und wie deren mehrjährige Mittelwerte bestimmt wurden. .... | 14 |
| Tabelle 3: | Anzahl an möglichen Wetterstationen je gewähltem Zeitraum.....                                                                                                                            | 15 |
| Tabelle 4: | Auflistung der tolerierten Anzahl an Datenlücken die länger als 20, 12, 4 oder 2 Wochen sind und die maximale Anzahl an Fehlwerten je Station. ..                                         | 18 |
| Tabelle 5: | Auflistung der verschiedenen Schritte zur Herleitung eines mehrjährigen Wetter-Mittelwertes und deren Anzahl und Flächenanteil am gesamten Simulations-Polygon-Datensatz. ....            | 37 |
| Tabelle 6: | Auflistung der verschiedenen Schritte zur Herleitung eines Gefälle-Mittelwertes und deren Anzahl und Flächenanteil am gesamten Simulations-Polygon-Datensatz. ....                        | 39 |
| Tabelle 7: | Auflistung der Simulations-Parameter je Landnutzung ID. ....                                                                                                                              | 41 |
| Tabelle 8: | Vergleich der NatUrWB-Ergebnisse zu Steinbrich et al. (2018) der Stadt Freiburg.....                                                                                                      | 73 |



---

## Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung A1: Boxplots der absoluten Abweichungen zum besten Durchgang der<br>Voruntersuchung je Zeitspanne der Wetterdaten und Zeitauflösung der<br>Niederschlagsdaten in mm/a. .... | 90  |
| Abbildung A2: Verlaufsplan des erstellten ArcGIS-Moduls "eliminate_by_area" .....                                                                                                     | 100 |
| Abbildung A3: Verlaufsplan des erstellten ArcGIS-Moduls zur Erstellung der<br>Simulations-Polygone, wie in Kapitel 3.2.2.2 beschrieben. ....                                          | 100 |
| Abbildung A4: Verlaufsplan des erstellten ArcGIS-Moduls zur Erstellung der<br>Nachschlage-Polygone, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben. ....                                            | 100 |

## Verzeichnis der Karten im Anhang

|           |                                                                                                                                                                                  |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Karte A1: | Darstellung der Niederschlags-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen, und deren genutzte nächste Rasterzelle. ....                                               | 91 |
| Karte A2: | Darstellung der Temperatur-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen und deren genutzte nächste Rasterzelle. ....                                                   | 92 |
| Karte A3: | Darstellung der Temperatur-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen, und keine nahegelegene Rasterzelle aufweisen. ....                                            | 93 |
| Karte A4: | Darstellung der Evapotranspiration-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen, und deren genutzte nächste Rasterzelle. ....                                          | 94 |
| Karte A5: | Miniaturkarten der Bodengesellschafts-Polygone der BÜK250, die nicht mit Bodenprofile von Nachbar-Polygonen aufgefüllt werden konnten.<br>Teil 1. ....                           | 95 |
| Karte A6: | Miniaturkarten der Bodengesellschafts-Polygone der BÜK250, die nicht mit Bodenprofile von Nachbar-Polygonen aufgefüllt werden konnten.<br>Teil 2. ....                           | 96 |
| Karte A7: | Darstellung aller Polygone mit einer topografischen Variabilität von mehr als 110 m Standardabweichung zum Mittelwert, nach dem Aufteilen der Polygone über die Topografie. .... | 97 |
| Karte A8: | Miniaturkarten der Simulations-Polygone, die nicht mit mehrjährigen Mittelwerten für das Wetter aus dem DWD-Raster abgeleitet werden konnten. ....                               | 98 |
| Karte A9: | Karte aller Simulations-Polygone mit hohen Standardabweichungen der mehrjährigen Wetter-Mittelwerte. Zu sehen ist jeweils der Süden Deutschlands. ....                           | 99 |

---

## Verzeichnis der Tabellen im Anhang

|             |                                                                                                                                           |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle A1: | Zuordnung der Grundwasserstufe in der BÜK zum mittleren Grundwasserflurabstand. ....                                                      | 98  |
| Tabelle A2: | Auflistung aller Softwarepakete, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden mit der jeweiligen Version und Link zur Internetseite. .... | 101 |

## Zusammenfassung

Durch die Urbanisierung verändert sich der Wasserhaushalt eines Gebietes, wodurch sich das Regime stadtnaher Gewässer und die Grundwasserkörper erheblich beeinflusst werden. Diesem Phänomen wird bisher im WHG Gesetz nur teilweise begegnet, gemäß welchem Niederschlagswasser versickert, verrieselt oder ortsnahe in ein Oberflächengewässer abgeleitet werden soll. Hierdurch wird ein Großteil des auftretenden Niederschlagswassers dem Grundwasser zugeführt ohne Berücksichtigung der möglicherweise hierdurch entstehenden Schäden und Probleme. Die verminderte Verdunstung durch die Urbanisierung wird durch diese Regelung nicht berücksichtigt. Das eigentliche Prinzip des WHG, Gewässer soweit wie möglich in einen naturnahen Zustand zu versetzen, wird dadurch nicht erreicht. Daher ist die Forderung des DWA-A 100 hin zu einer integralen Beurteilung des Wasserhaushalts zu gelangen und somit das Prinzip des WHG zu wahren.

Zur Beurteilung der urbanen Wasserhaushalte nach diesem Prinzip ist eine Definition des naturnahen Referenzzustands notwendig. Die von Steinbrich et al. (2018) vorgeschlagene Herangehensweise, um diesen naturnahen Zustand zu definieren, wird in dieser Arbeit weiterentwickelt und in einem Modell, das für ganz Deutschland anwendbar ist, umgesetzt.

Zur Bestimmung des Referenzzustandes werden die Bodenparameter aus der Bodenübersichtskarte von Deutschland (BGR 2018b) bezogen und ein Datensatz an DWD-Stationen für die Wetterzeitreihen zusammengestellt. Diese werden mit den 13 möglichen RoGeR Landnutzungen kombiniert und anschließend mit dem Wasserbilanzmodell RoGeR\_WB\_1D simuliert. Bei der Abfrage eines Referenzzustandes wird in den im Untersuchungsgebiet vorkommenden Naturraumeinheiten des Hydrologischen Atlases Deutschlands (BMU 2003) nach den vorkommenden Landnutzungen (Corine-Landcover) auf den gleichen Bodengesellschaften gesucht. Die in der Umgebung vorkommende Landnutzung als heutiges Kulturland, ohne Siedlungsanteile wird demnach als naturnaher Zustand definiert. Mittels dieser Landnutzungsverteilung werden die Simulations-Ergebnisse zu einer „Naturnahen Urbanen Wasserbilanz“ (NatUrWB) aggregiert, die als Referenzzustand dienen soll.

Dieses Modell wird in dem interaktiven Webtool [www.naturwb.de](http://www.naturwb.de) umgesetzt und steht somit jedem zur freien Verfügung.

Schlagwörter: naturnahe urbane Wasserbilanz, urbane Hydrologie, Referenzzustand, Modell RoGeR, Webtool, NatUrWB, Wasserhaushalt

---

## Summary

Urbanization changes the water balance of an area. This considerably changes the regimes of close surface waters and groundwater bodies. So far, these effects have only partially been countered in the federal water act of Germany (WHG) by obliging rainwater to get seeped away, trickled down or discharged into nearby surface waters. As a result, a large part of the rainwater is seeped into the groundwater without considering the damage and problems that this may cause. The reduced evaporation due to urbanization is not considered at all by this regulation. The actual principle of the WHG, to bring water bodies as far as possible back to a near natural state, is not achieved by this law. Therefore, the DWA-A 100 proposes to implement an integral urban drainage principle and thus preserve the principle of the WHG.

To assess the urban water balance in this manner, a definition of the near-natural reference state is necessary. The proposed approach from Steinbrich et al. (2018) to define this near-natural state is further developed in this work and implemented in a model for Germany.

To determine this reference state, the soil parameters are obtained from the soil overview map of Germany (BGR 2018b) and a set of weather timeseries is created out of DWD station data. These are combined with the 13 possible RoGeR land use categories and simulated with the water balance model RoGeR\_WB\_1D. When querying for a reference state, the natural regions of the Hydrological Atlas of Germany (BMU 2003) occurring in the study area are selected. In those the occurring land uses (Corine Landcover) that are occurring on the same soil groups are then queried. This means that the cultivated land uses, without settlements, occurring nowadays in the surrounding of the study area is defined as the near-natural state. With this distribution of land uses the simulation results get aggregated to get a “near-natural urban water balance” (NatUrWB). This NatUrWB reference serves as the reference state for the water balance.

This model is implemented in an interactive webtool, that runs under the domain of [www.naturwb.de](http://www.naturwb.de).

Keywords: near natural urban water balance, urban hydrology, reference state, RoGeR model, webtool, NatUrWB, water balance



## 1. Einleitung

Die Urbanisierung schreitet in Deutschland und weltweit stetig voran. So waren Ende 2019 bereits 14,35 % der Fläche der Bundesrepublik Siedlungs- und Verkehrsflächen (Statistische Ämter der Länder 2020). Im Durchschnitt wächst diese Fläche jeden Tag um 62,7 ha an (Statistische Ämter der Länder 2020). Die damit einhergehende Versiegelung; 2018 waren 45,1 % der Siedlungs- und Verkehrsfläche (Statistische Ämter der Länder 2020) versiegelt; beeinflussen den Wasserhaushalt in erheblichem Maße (Fletcher et al. 2013). So hat Haase (2009), durch Auswertung historischer Daten, rückblickend den Wasserhaushalt der Stadt Leipzig von 1870 bis 2007 simuliert. Der Anstieg der Urbanisierung und die damit einhergehende Versiegelung, führte zu einer Verringerung des Anteils der Evapotranspiration um 25 % und einem Anstieg des Anteils an Oberflächenabfluss um 182 % an der Wasserbilanz. Diese Tendenz, der Auswirkungen der Urbanisierung auf die Wasserhaushaltkomponenten, wurden bereits mehrfach dargelegt (z. B. Jourdan et al. 2019; Hao et al. 2015; Fletcher et al. 2013; Pauleit et al. 2005; Paul und Meyer 2001). Zusätzlich führt die Versiegelung zu höheren Abflusspeaks bei lokalen Starkregenereignissen (Braud et al. 2013). Schematisch ist der Einfluss der Versiegelung in Abbildung 1, aus dem DWA-M 153, dargestellt.

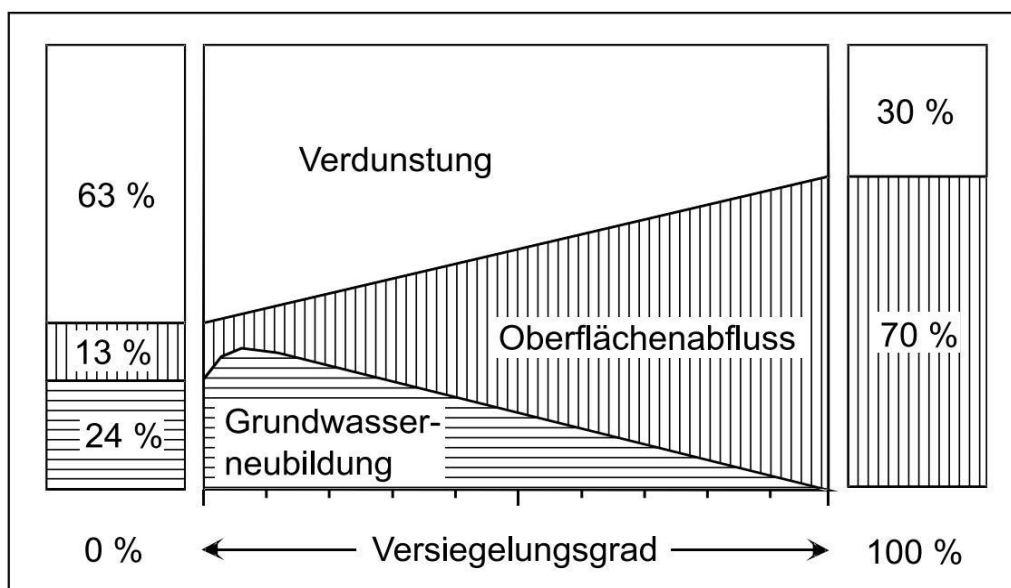


Abbildung 1: Einfluss der Versiegelung an der Wasserbilanz im deutschlandweiten Mittel. (DWA-M 153)

Um dem vermehrten Oberflächenabfluss entgegenzuwirken, hat der Deutsche Bundestag bei der Novellierung 2009 des Wasserhaushaltsgesetz (WHG) festgelegt, dass *„Niederschlagswasser soll ortsnah versickert, verrieselt oder direkt [...] in ein Gewässer eingeleitet werden“* (§ 55 (2) WHG). Diese Regelung und die daraus häufig resultierenden Gebühren für das Abführen von Niederschlagswasser, führen in Neubaugebieten zu einer Zunahme von dezentralen Versickerungsanlagen, da diese ökonomischer als die Trennkanalisation sind. Diese technischen Anlagen führen zu einer erhöhten Grundwasserneubildung, die je nach Gebiet und Ausbauanteil an dezentralen Versickerungsanlagen, sogar die „natürliche“ Grundwasserneubildung übersteigen können (Göbel et al. 2004). Dadurch kann es zu einem großflächigen oder lokalen Grundwasseranstieg kommen. Obwohl dieser Anstieg zum einen positiv zu bewerten ist, kann dieser auch negative Auswirkungen haben. Dies sind beispielsweise Schäden durch Grundwassereintritt in Kellern, Aufschwimmen von Gebäuden, ein erhöhter Fremdwasseranfall in Kanalisationen oder gar Kontamination des Grundwassers durch Mobilisieren von Schadstoffen in Altlasten oder Friedhöfen. (Göbel et al. 2007; Göbel et al. 2004)

Die geringere Evapotranspiration in Siedlungen und die damit einhergehenden Probleme, werden mit dieser Regelung nicht berücksichtigt. Eine Abnahme der Evapotranspiration führt zu einem Aufheizen der Städte, was in Zeiten von Klimawandel immer relevanter wird. Versickerungsmulden sind zwar meist begrünte Anlagen, trotzdem ist deren Einfluss auf die Evapotranspiration der Siedlung im Gesamten nicht sehr groß. Hierfür muss verstärkt auf begrünte Dächer, Parkanlagen und Stadtbäume gesetzt werden. (Henrichs et al. 2016; Leistert et al. 2018)

Neben dem Einfluss der Versiegelung und der dezentralen hohen Versickerung durch technische Anlagen, beeinflussen Siedlungen weiterhin durch Bewässerungen von Parkanlagen und privaten Gärten den Wasserhaushalt (Weiler et al. 2019). Demnach zeigt sich, dass der Einfluss von Siedlungen auf den Wasserhaushalt sehr vielfältig ist.



Die Regelung des § 55 (2) WHG zielt jedoch hauptsächlich auf den erhöhten Oberflächenabfluss aus Siedlungsgebieten ab, indem das Wasser zur Grundwasserneubildung verschoben wird. Das eigentliche Prinzip des WHG, dass „[...] Gewässer sollen so weit wie möglich wieder in einen naturnahen Zustand zurückgeführt werden [...]“ das in § 5 Absatz 2 definiert wird, wird durch diese Regelung demnach nicht erfüllt. Um dieses Prinzip zu erfüllen, wäre eine differenziertere Betrachtungsweise der Siedlungsentwässerung, wie sie die DWA-A 100 definiert, notwendig. Diese definiert die integrale Siedlungsentwässerung wie folgt: „Übergeordnete Zielsetzung der integralen Siedlungsentwässerung muss es sein, die Veränderungen des natürlichen Wasserhaushaltes durch Siedlungsaktivitäten in mengenmäßiger und stofflicher Hinsicht so gering zu halten, wie es technisch, ökologisch und wirtschaftlich vertretbar ist.“ (DWA-A 100, S. 11)

Diese integrale Siedlungsentwässerung wäre auch im Sinne des 11. Nachhaltigkeitsziels (sustainable development goal (SDG)) der Vereinten Nationen, Städte nachhaltiger zu gestalten. (United Nations 2015)

Zum einen müsste für dieses Ziel, die Wasserbilanz von Siedlungen dem naturnahen Zustand anzunähern, die genaue Wasserbilanz von Städten bestimmt werden. Hierfür eignen sich vor allem Modellsimulationen, um die gesamte Komplexität von Städten abbilden zu können. Diese Simulationen können z. B. mit dem ereignisbasierten Niederschlag-Abfluss-Modell UrbanRoGeR ohne vorherige Kalibrierung bestimmt werden (Leistert et al. 2018). Aber auch eine vereinfachte Bestimmung über Flächenkennwerte, wie sie im DWA-A 102 (Entwurf) beschrieben wird, kann hierfür genutzt werden.

Um die urbane Wasserbilanz jedoch einordnen zu können, muss weiterhin auch der Referenzzustand, der als naturnah angesehen wird, festgelegt werden. Im DWA-A 102 (Entwurf) wird empfohlen die Werte mit den Wasserbilanzgrößen aus dem Hydrologischen Atlas Deutschlands (HAD) zu vergleichen. Hierfür sollen die Wasserbilanzgrößen der unbebauten Flächen im Umland herangezogen werden. Da diese Rasterfelder jedoch 1 km<sup>2</sup> groß sind und somit die räumliche Variabilität der Wasserbilanzgrößen oft nicht ausreichend abbilden, empfiehlt auch das DWA-A 102 (Entwurf) auf differenziertere Betrachtungen zurückzugreifen. Weiterhin basieren die Wasserbilanzwerte vom HAD auf Wetterdaten von 1961–1990 (BMU 2003) und sind somit etwas veraltet.

Eine weitere Herangehensweise zur Bestimmung dieses Referenzzustandes wurde von der Arbeitsgemeinschaft des WaSiG-Projektes erarbeitet. Hierbei wird die heutige, nicht urbane Landnutzung als Kulturland, die in der gleichen Naturraumeinheit, auf den gleichen Böden vorkommen, als naturnahen Zustand definiert (Steinbrich et al. 2018). Dieser Zustand beschreibt den Referenzzustand somit nicht als anthropogen unbeeinflussten Zustand, sondern berücksichtigt, dass ohne die Siedlungen eher von einer Nutzung der Fläche als Kulturland auszugehen wäre. Dieses Verfahren soll im Zuge dieser Arbeit weiterentwickelt und auf Deutschland angewendet werden.

Der so bestimmte Referenzzustand der Wasserbilanz, ermöglicht durch den Vergleich mit dem Ist-Zustand eine bessere Evaluierung, Einordnung und Gestaltung der Stadtplanung in Bezug auf die Wasserbilanz. Die Bandbreite der Maßnahmen, die zur Beeinflussung der urbanen Wasserbilanz möglich sind, sind z. B. Dachbegrünungen, dezentrale Versickerungsanlagen, Stadtbäume, sowie Pflastersteine (Jackisch et al. 2013). Die Ausweisung eines naturnahen Referenzzustandes für jedes Gebiet in Deutschland stellt somit einen Baustein dar, um die Zielsetzung, eines naturnahen urbanen Wasserhaushaltes, umsetzen zu können. Durch den anschaulichen Vergleich des Ist- zum Soll-Zustand können weitere politische Diskurse und Forderungen angeregt werden.

## 2. Problemstellung und Zielsetzung

Die Wasserbilanz eines Gebietes lässt sich mit vertretbarem Aufwand nur über Modell-Simulationen bestimmen. Hierfür müssen die Bodeneigenschaften parametrisiert und eine natürliche Landnutzung angenommen werden. Die Bodeneigenschaften lassen sich bundesweit aus der Bodenübersichtskarte (BÜK) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) ableiten.

Die Landnutzung die als natürlicher Zustand anzunehmen ist, ist dagegen weniger trivial. Bei neu bebauten Gebieten ist die Ermittlung der natürlichen Landnutzung noch relativ einfach, da die bestehende Landnutzung angenommen werden kann, dagegen ist dies für bestehende Siedlungsgebiete bereits schwieriger. Hier ist keine natürliche Landnutzung mehr vorhanden und muss daher für eine Wasserbilanzmodellierung sinnvoll angenommen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine deutschlandweit anwendbare Methode zu entwickeln, um die Zielgröße der „natürlichen“ Wasserbilanz von urbanen Siedlungen zu bestimmen. Damit die Methode sich als Referenzmethode durchsetzen kann, ist dabei auf geringe Hürden bei der Anwendung zu achten. Daraus lassen sich folgende Zielgrößen definieren:

1. Deutschlandweite Einheitlichkeit
2. Leicht verständliche Methode
3. Einfache Anwendung der Methode
4. Realistische und erreichbare Referenzwerte
5. Anwendbarkeit für bestehende Siedlungen sowie Neuerschließungen

Die Einheitlichkeit der Methode, führt zu einer besseren Vergleichbarkeit der ermittelten Referenzwerte. Daher soll die Methode auch exemplarisch auf verschiedene Städte angewendet werden und die ermittelten Werte miteinander verglichen werden.

Mit der Zielsetzung der natürlichen Wasserbilanz für Städte ist von einem erhöhten Planungs- und Investitionsaufwand auszugehen. Hierfür muss die Ermittlung des Zielwertes gut zu kommunizieren sein.

Um eine große Hürde bei der Akzeptanz zu bewältigen und Hürden der Praxis zu überwinden, sollte die Methode leicht anzuwenden sein (Freytag et al. 2018). Hierfür soll ein interaktives Webtool erstellt werden, das es mit wenigen Klicks jedem ermöglicht einen Referenzwert für ein frei gewähltes Gebiet in Deutschland zu bestimmen.

Die ermittelten Referenzwerte für die Wasserbilanz sollten realistische Werte für einen naturnahen Zustand liefern. Auch sollten die Referenzwerte einen erreichbaren Zustand beschreiben, da ansonsten davon auszugehen ist, dass die Zielvorgabe als utopisch eingestuft werden würde und keine Anwendung finden wird. Auch wenn ohne Menschen davon auszugehen ist, dass ein Großteil der Bundesrepublik bewaldet wäre, würde die generelle Annahme der Landnutzung Wald zu sehr hohen Evapotranspirationswerten führen, was für Siedlungsgebiete unerreichbar wäre. Des Weiteren würde diese Annahme den realen Zustand vernachlässigen, dass 50.7 % (Statistisches Bundesamt 2020b) der Bundesfläche heute Ackerflächen sind und nur 29.8 % Wald (Statistisches Bundesamt 2020b). Zusätzlich entstehen Siedlungen meist in flachen topographischen Lagen und weniger an Hängen, wo eher von einer landwirtschaftlichen Nutzung der Fläche auszugehen ist. Daher ist bei einer nicht bebauten Fläche eher davon auszugehen, dass diese ohne die Siedlung zu einem Teil Ackerfläche wäre. Daraus leitet sich das Ziel der Arbeit ab, eine Methode zu entwickeln, die realistische und erreichbare Zielwerte ergibt.

Obwohl es bei Neuerschließungen am realistischsten ist, von der aktuellen Landnutzung auszugehen, um den natürlichen Zustand zu definieren, sollte das Modell ebenso für diese Gebiete anwendbar sein, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

## 3. Methode

Dieses Kapitel behandelt zuerst die Voruntersuchungen, mit denen grundlegende Parameter für die spätere Simulation festgelegt werden, bevor in Kapitel 3.2 das entwickelte NatUrWB-Modell, das die naturnahe urbane Wasserbilanz bestimmt, erläutert wird. Im Anschluss wird in Kapitel 3.3 ein Vergleich der Ergebnisse für verschiedene Städte beschrieben.

### 3.1 Voruntersuchungen

Um einige Entscheidungen zum NatUrWB-Modellaufbau, für die Simulationen mit RoGeR\_WB\_1D, zu treffen, werden zuerst Voruntersuchungen gemacht und ausgewertet. Zu diesen Entscheidungen gehört die Zeitauflösung der Niederschlagsdaten, die Zeitspanne der Wetterdaten und die Periode der Niederschlagswichtung.

#### 3.1.1 Zeitauflösung und Zeitspanne

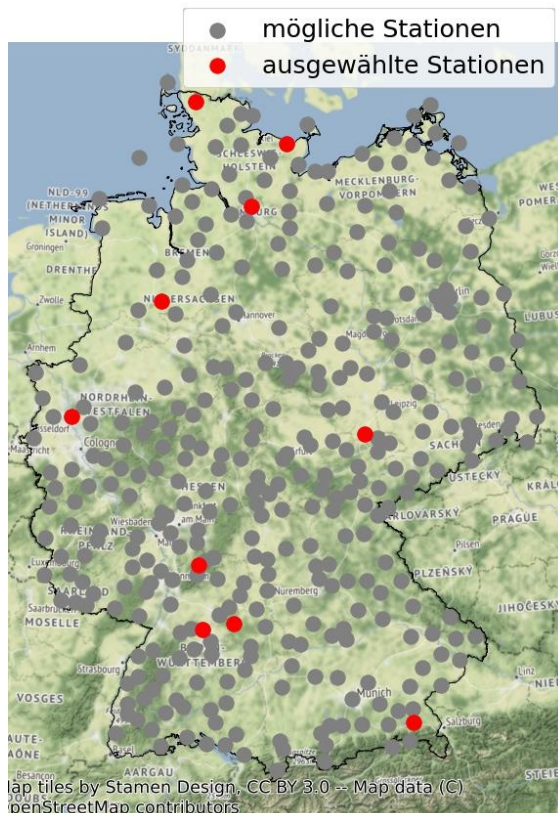
Die Rechenzeit für die Simulationen steigt je größer die Zeitspanne und je kleiner der Zeitschritt der Eingangsniederschlagsdaten ist. Dagegen ist aber anzunehmen, dass die Aussagekraft der Simulationsergebnisse hierbei sinkt. Um die Rechenzeit zu verkürzen, ohne die Aussagekraft der Ergebnisse zu gefährden, wird zuerst eine Voruntersuchung gemacht, um die optimale Zeitdauer und den optimalen Zeitschritt für die Simulationen zu ermitteln.

Hierzu werden drei verschiedene Zeitauflösungen (10-minütig, stündlich und täglich) und 6 verschiedene Zeitspannen von 12 bis 2 Jahre für die Eingangswetterdaten getestet.

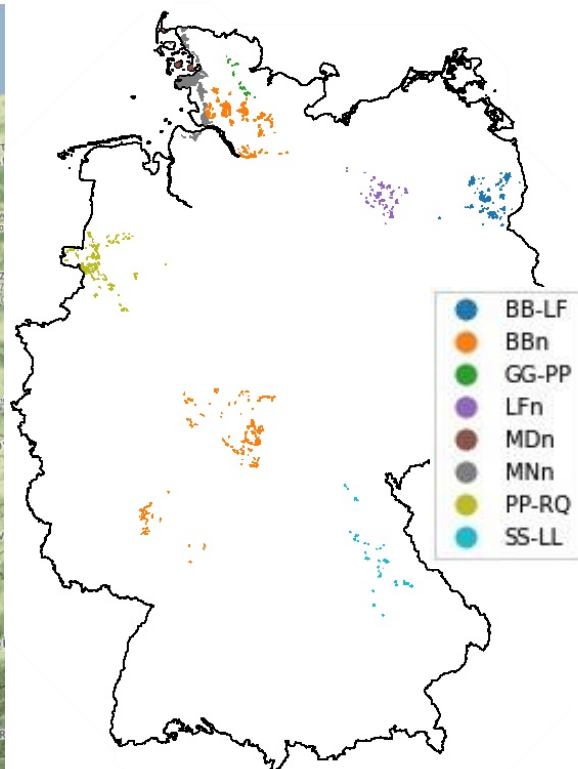
Zuerst wird hierfür eine Auswahl aller möglichen DWD Stationen getroffen die ausreichend Daten haben. Diese müssen mindestens 12 Jahre Niederschlagsdaten mit einer Auflösung von 10 Minuten, so wie 12 Jahre Temperatur und Evapotranspirationsdaten mit einer täglichen Auflösung besitzen. Aus diesen möglichen Wetterstationen werden dann zufällig 10 verschiedene DWD-Wetterstationen ausgewählt. Diese sind in Karte 1 dargestellt.

Da RoGeR\_WB\_1D bisher nur mit 10-minütigen Niederschlagsdaten rechnen kann, wurden die stündlichen und täglichen Niederschlagsdaten auf 10\_minütige Werte aufgeblasen. Hierfür wurden, für die stündlichen Werte jeweils ein Blockregenevent von einer Stunde mit einem Sechstel der stündlichen Niederschlagssumme je 10 Minuten angenommen. Für die täglichen Werte wurde dies äquivalent durchgeführt.

Zusätzlich wurden zehn zufällige Bodenprofile aus der BÜK ausgewählt. Da das Modell später die naturnahe Wasserbilanz ermitteln soll, wurden hierfür nur die Polygone berücksichtigt, die keine urbane Landnutzung haben. Des Weiteren werden die Profile so lange zufällig neu ausgewählt, bis kein unvollständig definiertes Profil mehr dabei ist. Die Lage der gewählten Profile ist in Karte 2 dargestellt. Die RoGeR-Parameter werden, wie anschließend in Kapitel 3.2.4.1 beschrieben, aus der BÜK Sachdatenbank abgeleitet.



**Karte 1: Ausgewählte und mögliche DWD-Stationen für die Voruntersuchung.**



**Karte 2: Ausgewählte Bodenprofile für die Voruntersuchung und ihre Bodenklasse.**

Um realistische Werte für das Gefälle anzunehmen, wird für jedes dieser BÜK-Polygone, über zonale Statistik, der Mittelwert des Gefälles vom digitalen Gelände-Modell mit einer Auflösung von 80 Metern (DGM80) (EROS 2010) bestimmt.

Die RoGeR-Parameter Urban, Muldenspeicher & Bäume werden hierbei auf null gesetzt, da diese eher in Stadtgebieten von Bedeutung sind und somit die Variabilität, der nicht untersuchten Parameter geringgehalten wird. Für die Landnutzung wird eine zufällige Landnutzung der BÜK Polygone gewählt.

**Tabelle 1: Parameter der Voruntersuchung, zur Zeitauflösung und Zeitspanne, die miteinander geschaufelt wurden.**

|                                             |                                                          |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>DWD Stations-IDs</b>                     | 3821, 6259, 1078, 2306, 3284, 963, 2907, 856, 4349, 1975 |
| <b>Zeitauflösung der Niederschlagsdaten</b> | 10-minütig, stündlich und täglich                        |
| <b>Zeitspanne der Wetterdaten</b>           | 12-, 10-, 8-, 6-, 4- und 2 Jahre                         |
| <b>Boden Parameter</b>                      | 10 verschiedene Bodenprofile aus der BÜK                 |

Diese verschiedenen Parameter, wie in Tabelle 1 zusammengefasst, werden miteinander geschaufelt, so dass jede mögliche Kombination an Parametersätzen entsteht (1800 Stk.) und mit RoGeR\_WB\_1D simuliert.

### 3.1.2 Sommer-Winter Wichtung des Niederschlags

Um zu entscheiden ob die Niederschlagswichtung für das ganze Jahr oder getrennt für das Sommer- und Winter-Halbjahr ermittelt werden soll, werden 20 zufällige Punkte in Deutschland gewählt. Für diese Punkte wird aus den regionalisierten, mehrjährigen Niederschlag Raster des DWDs (DWD 2011b) die mehrjährigen, monatlichen Mittelwerte extrahiert.

Diese Monatswerte werden anschließend auf den Jahresmittelwert der 20 Punkte gewichtet, so dass jeder Punkt im Jahresmittel gleich viel Niederschlag erbringt. Anders ausgedrückt, wird für einen fiktiven Punkt, der im Jahresmittel in der Mitte der 20 Punkte liegt, 20 regionalisierte Verläufe berechnet. Jeder Verlauf basiert auf einer anderen Station mit einer entsprechenden Jahres-Niederschlags-Wichtung. Dieser Schritt ist in Gleichung (1) dargestellt.

$$N_{monat,Station,gew} = N_{monat,Station} * \frac{\sum_{i=1}^{20} \sum_{m=1}^{12} N_{m,s}}{12 * 20} * \left( \frac{\sum_{m=1}^{12} N_{m,Station}}{12} \right)^{-1} \quad (1)$$

$N_{monat,Station,gew}$ : skaliertes, mehrjähriger Monatsmittelwert des fiktiven Punktes der durch Regionalisierung der jeweiligen Station bestimmt wurde.

$N_{monat,Station}$ : mehrjähriger Monatsmittelwert einer Station

$N_{m,s}$ : mehrjähriger Monatsmittelwert für den Monat m und die Station s

$N_{m,Station}$ : mehrjähriger Monatsmittelwert für den Monat m und die jeweilige Station

Die sich so ergebenden Monatsverläufe werden qualitativ miteinander verglichen.

### 3.2 NatUrWB Modell

Um den naturnahen Wasserhaushalt von Städten zu ermitteln, wird die Methode von Steinbrich et al. (2018), die beispielhaft an mehreren Städten ermittelt wurde, weiterentwickelt und auf ganz Deutschland angewendet. Anders als häufig bei Bewertungen nach der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) wurde hierbei nicht das Einzugsgebiet (EZG) als Referenzgebiet herangezogen, sondern die Naturraumeinheit (NRE) des hydrologischen Atlases Deutschlands (HAD).

Ein EZG erstreckt sich oft über viele Höhenmeter und kann sehr unterschiedliche klimatische Verhältnisse aufweisen. So würde z. B. das Einzugsgebiet von Köln bis hoch in die Alpen gehen. Da die Wasserbilanz stark von klimatischen Verhältnissen abhängt, eignet sich dieser Betrachtungsraum nicht gut als Referenzgebiet für die naturnahe Wasserbilanz von Städten. Auch ein definierter Umkreis um ein urbanes Gebiet eignet sich nicht, als Referenzgebiet, da dies in einigen Gebieten zu hohen und anderen zu niedrigen Höhenvariabilitäten führt. So würde ein Umkreis von 50 km um Freiburg vom Feldberg (1439 mNN) bis zur Rheinebene (~150 mNN) reichen. Für Berlin hingegen, wo das Umland sehr flach ist, würde sich die Höhenvariabilität im gleichen Umkreis auf unter 100 Meter beschränken. (OpenStreetMap-Mitwirkende 2020)

Die Naturraumeinheiten des HAD gruppieren „*Räume gleichartiger naturräumlicher Randbedingungen für den Landschaftshaushalt*“ (BMU 2003) ohne anthropogene Überprägungen zu berücksichtigen. Zur Ausweisung dieser Räume wurde die Geologie, der Boden und das Klima berücksichtigt. (BMU 2003)

Für ganz Deutschland werden Simulations-Polygone basierend auf der BÜK250 erstellt, wie in Kapitel 3.2.2 erläutert wird. Zusätzlich wird ein Datensatz mit Nachschlagepolygonen erstellt, indem die Simulations-Polygone mit den NRE des HAD und der Corine-Landcover (CLC) Datensatz verschnitten werden, wie in Kapitel 3.2.3 weiter erläutert wird.

Diesen Simulations-Polygonen werden, in Kapitel 3.2.4, die Boden-Parameter, die Wichtungsfaktoren für die Wetterdaten und das Gefälle zugeteilt. Anschließend werden diese Parameter mit den möglichen Landnutzungs-Parametern geschaufelt (Kapitel 3.2.4.4) und mit RoGeR\_WB\_1D simuliert.



Anhand der Nachschlagepolygone bestimmt das NatUrWB-Modell, welche Böden in dem untersuchten urbanen Gebiet vorkommen. Anschließend wird nach den gleichen Böden in der gleichen Naturraumeinheit gesucht und deren naturnahe Landnutzungen ermittelt. Mit dieser Verteilung der Landnutzungen werden die Ergebnisse der Modellsimulationen für das urbane Gebiet gewichtet, um einen Referenzwert für den naturnahen Wasserhaushalt zu erhalten. Diese Vorgehensweise wird näher in Kapitel 3.2.5 ausgeführt.

### 3.2.1 Wetterdaten

Um die Wasserbilanzgrößen zu bestimmen, ist ein Datensatz an Wetterzeitreihen für ganz Deutschland notwendig. Hierfür wird auf das Klimabeobachtungsnetzwerk des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen. Daraus werden die historischen, 10-minütigen Niederschlagsdaten (DWD 2019b, Spalte: RWS\_10), sowie die historischen, täglichen Temperaturdaten (DWD 2019a, Spalte: TMK) und die abgeleiteten Daten zur täglichen potentiellen Evapotranspiration über Gras, das nach dem AMBAV-Modell bestimmt wurde, (DWD 2019c, Spalte: VPGB) herangezogen.

Um eine erste Auswahl der Stationen zu treffen, werden zuerst die jeweiligen Meta-Tabellen des DWDs gefiltert. Für den Niederschlag werden die Stationen aussortiert, die weniger als 10 Jahre Messungen haben, eine Datenlücke von mehr als einem Jahr aufweisen oder keinen Datenpunkt im Simulations-Zeitraum aufweisen. Für die Temperatur- und die Evapotranspiration-Stationen wurden nur die aussortiert, wo der in der Meta-Tabelle angegebene Endzeitpunkt der Messung vor dem 1.1.2007 liegt. Da die Meta-Tabelle der Evapotranspiration keine Angaben zum Messzeitraum besitzt, wird diese um einen Start und Endzeitpunkt der Messreihe ergänzt indem jede Stations-Datei geladen wird und der maximale bzw. minimale Messpunkt ermittelt wird. Die Messreihen dieser gewählten Stationen werden alle vom CDC-Server des DWDs heruntergeladen.

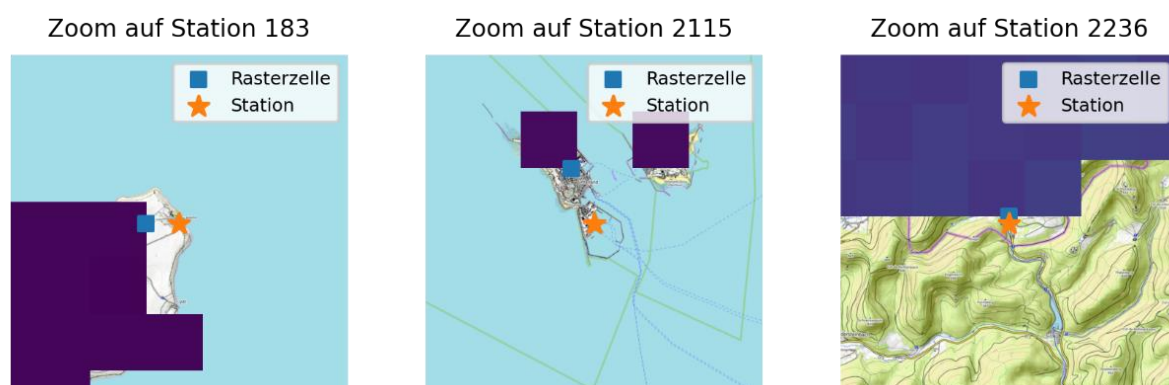
Diese Stationsdaten werden im Folgenden weiterverarbeitet, um einen Datensatz mit lückenlosen, qualitätsgeprüften und repräsentativen Wetterdaten zu erlangen. Hierfür wird in Kapitel 3.2.1.1 der genaue Simulationszeitraum festgelegt, in Kapitel 3.2.1.3 die Stationsdaten auf ihre Qualität hin untersucht und daraufhin die Stationen ausgewählt für die jeweils ein Set aus Niederschlag, Temperatur und Evapotranspirationsdaten erstellt werden soll. Für diese ausgewählten Stationen werden dann in Kapitel 3.2.1.4 die Lücken gefüllt, so dass lückenlose Wetterdaten für die Simulation vorliegen. Zum Schluss werden in Kapitel 3.2.1.5 die Daten noch auf die mehrjährigen Klimamittelwerte skaliert.

### 3.2.1.1 Mehrjährige Stationsmittelwerte

Zur weiteren Bearbeitung der Stationen wird für jede Station der mehrjährige Stationsmittelwert für die Temperatur, die Evapotranspiration und den Niederschlag bestimmt. Für die Temperatur und die Evapotranspiration werden hierbei die Monatsmittel und ein Jahresmittel bestimmt, wogegen für den Niederschlag zusätzlich ein Sommer- und Wintermittelwert bestimmt wird.

Die Grundlage hierfür bilden die regionalisierten, mehrjährigen Raster des DWDs. Hierbei bilden die Raster für den Niederschlag und die Temperatur den Zeitraum von 1980-2010 und für die Evapotranspiration den Zeitraum von 1990-2010 ab. Die Rasterdaten werden gegenüber den mehrjährigen Stationsmittelwerten bevorzugt, da sie auch Werte für Orte liefern, an denen die Stationen nur wenig bis keine Messungen in dem Klimazeitraum aufweisen. Da die Raster auf der Grundlage aller verfügbaren Stationsmessungen beruhen, haben die Rasterzellen, in denen eine Station liegt, für die über den gesamten Klimazeitraum Messungen vorliegen, auch den mehrjährigen Mittelwert dieser Station als Zellenwert. Daher wird der Einheitlichkeit wegen für alle Stationen der mehrjährige Stationsmittelwert aus der jeweiligen Rasterzelle, in der die Station liegt, abgeleitet. (DWD 2011a, 2011b, 2011c)

Da einige Stationen allerdings außerhalb der Rasterzellen liegen, werden deren mehrjährigen Mittelwerte anders hergeleitet. Da es sich hierbei um Stationen handelt, die am Rande Deutschlands liegen, und das DWD-Raster nicht ganz Deutschland an den Rändern abdeckt, wird bei diesen in einem Umkreis von bis zu 2 km nach einer Rasterzelle gesucht. Diese Zellen werden mit OSM-Karten als Hintergrund einzeln dargestellt und händisch auf ihre Plausibilität hin überprüft. Ein Auszug dieser Darstellungen ist in Karte 3, und die gesamten Darstellungen sind im Anhang in Kapitel A3.1 abgebildet.



**Karte 3:** Auszug aus den Darstellungen der Niederschlags-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen, und deren genutzte nächste Rasterzelle. Die komplette Ansicht ist im Anhang in Kapitel A3.1 für alle Parameter zu finden. Quelle des Kartenhintergrunds: OpenStreetMap, Kartenthema: OpenTopoMap

Zur weiteren Kontrolle wird der mehrjährige Stationsmittelwert (DWD 2018) mit dem Wert der neuen Rasterzelle, des mehrjährigen DWD-Rasters, verglichen. Für die meisten Stationen konnte mit dieser Umgebungssuche ein plausibler mehrjähriger Mittelwert ermittelt werden, da diese meist in relativ flachen topografischen Gebieten liegen. Ausnahmen hiervon gab es allerdings für einige Temperatur-Stationen. Da diese auf Leuchttürmen im Ozean messen, sind sie für die Ermittlung einer NatUrWB-Referenz nicht relevant und werden nicht weiter berücksichtigt. Zwei weitere Ausnahmen bilden die Stationen mit der ID 1759 und 2236.

Bei der Station mit der ID 2236 war die Abweichung zum mehrjährigen Mittelwert der Stationsmessung beim Niederschlag, mit 32 mm/a, zu hoch, um herangezogen zu werden. Diese Station befindet sich in einem hügeligen Gebiet, wie in Karte 3 zu erkennen ist. Daher wird für diese Station der mehrjährige Stationsmittelwert des Niederschlags des Zeitraumes 1980-2010 genutzt. Da diese Station allerdings nicht in den mehrjährigen Stationsmittelwerten für die Temperatur und die Evapotranspiration auftritt, wird hier trotzdem auf die nächste Rasterzelle zurückgegriffen. Da die Topografie hauptsächlich auf den Niederschlag großen Einfluss hat, sollte dies ausreichend sein.

Bei der Station mit der ID 1759 handelt es sich um die Insel Greifswalder Oie, die außerhalb des DWD-Rasters liegt und für die kein mehrjähriger Mittelwert definiert ist, da diese Station erst seit 2001 in Betrieb ist. Da diese Station allerdings nur für diese Insel genutzt wird, auf der es sehr wenige Häuser gibt, wird hier eine weitere Vereinfachung vorgenommen, um überhaupt eine NatUrWB-Referenz der Insel bestimmen zu können. Es wird ein eigener mehrjähriger Mittelwert aller verfügbaren Stationsmessungen erstellt. Dieser Mittelwert steht demnach für den Zeitraum 2001-2019.

In Tabelle 2 sind alle Stationen, die in keiner Rasterzelle des DWD-Rasters liegen, und deren Annahmen zur Ermittlung eines mehrjährigen Mittelwerts zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Auflistung der Stations-IDs, je Parameter, der Stationen, die nicht in einer Rasterzelle des mehrjährigen DWD-Rasters liegen, und wie deren mehrjährige Mittelwerte bestimmt wurden. Kursiv sind die Stationen, die für alle Parameter auftreten. Fett sind die Stationen, die nicht bei allen Parametern aufgetreten sind.

| Parameter                 | nahegelegene Rasterzelle                                                             | Stationsdaten     | gelöscht                                       |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|
| <b>Niederschlag</b>       | <i>183, 2115, 3631, 4271, 5132, 6157</i>                                             | <i>1759, 2236</i> | -                                              |
| <b>Temperatur</b>         | <i>183, 2115, 2236, 3631, 4271, 5132, 6157, <b>7343, 7373</b></i>                    | <i>1759</i>       | <b>102, 954, 1228, 1341, 1759, 2961, 13904</b> |
| <b>Evapotranspiration</b> | <i>183, 2115, 2236, <b>2201</b>, 3631, 4271, 5132, 5779, 6157, <b>7343, 7373</b></i> | <i>1759</i>       | -                                              |

Auf der Grundlage dieser mehrjährigen Stationsmittelwerte wird weiterhin eine Matrix mit Wichtungsfaktoren bestimmt, um die Werte einer Station auf die einer anderen zu regionalisieren. Hierfür wird für den Niederschlag und die Evapotranspiration der Quotient aus dem mehrjährigen Mittelwert der Zielstation zur Ausgangsstation und für die Temperatur die Differenz beider Stationen gebildet, wie die jeweiligen Formeln (2), (3) und (4) aufzeigen.

$$\text{Niederschlag: } WF_{N,a,z} = \frac{N_{ma,z}}{N_{ma,a}} \quad (2)$$

$$\text{Evapotranspiration: } WF_{ET,a,z} = \frac{ET_{ma,z}}{ET_{ma,a}} \quad (3)$$

$$\text{Temperatur: } WF_{T,a,z} = T_{ma,z} - T_{ma,a} \quad (4)$$

$WF_{N,a,z}$ : Wichtungsfaktor für den Niederschlag von der Ausgangs-Station zur Ziel-Station

$N_{ma,z}$ : mehrjähriger Niederschlags-Mittelwert der Ziel-Station

$N_{ma,a}$ : mehrjähriger Niederschlags-Mittelwert der Ausgangs-Station

### 3.2.1.2 Simulationszeitraum

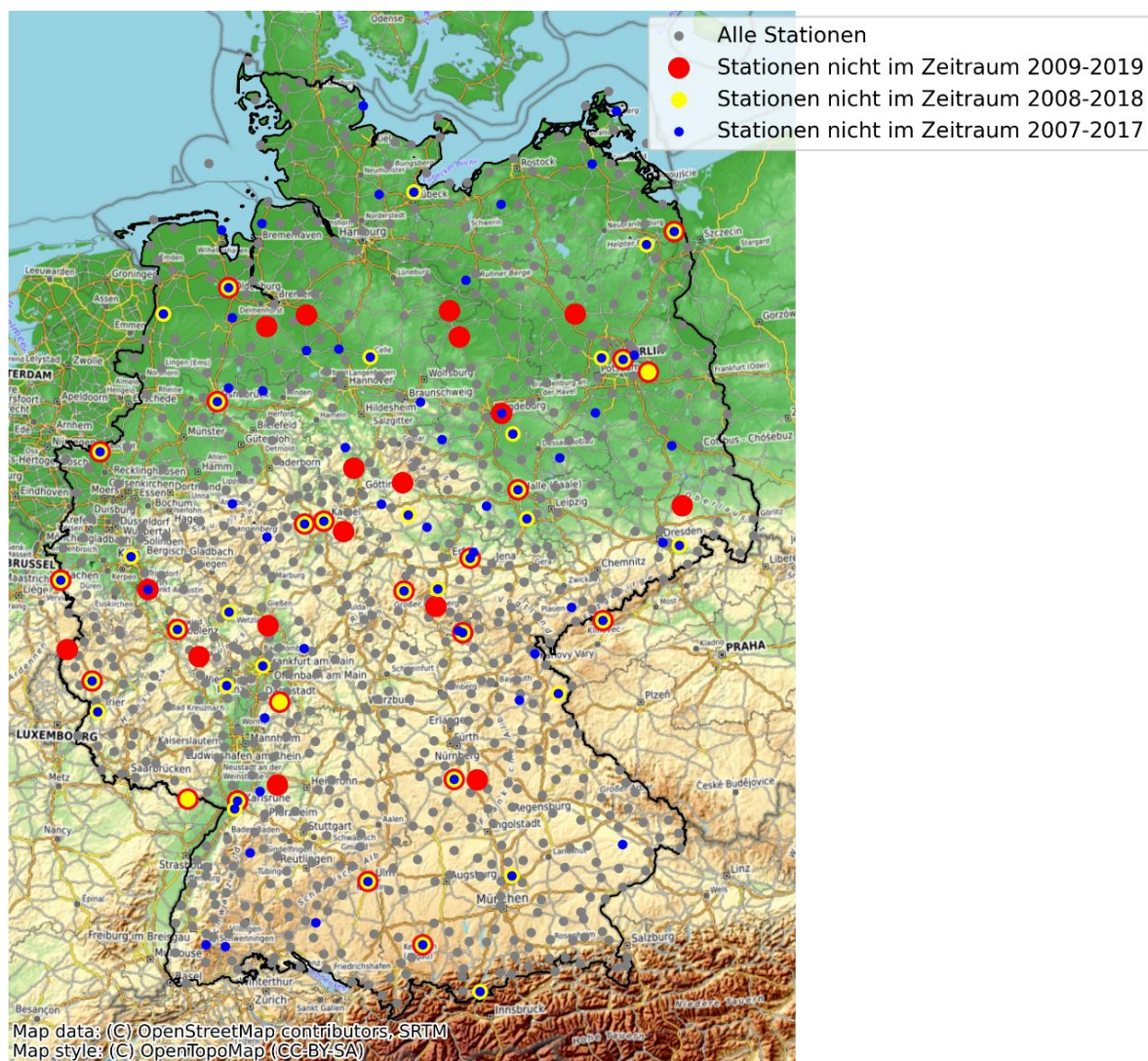
Durch die Voruntersuchung wurde die Simulationsdauer auf 11 Jahre, wie der Diskussion in Kapitel 5.1.1.2 zu entnehmen ist, festgelegt, wobei das erste Jahr dem Einpendeln der Bodenfeuchte dient. Da die Niederschlagsdaten die größte räumliche Variabilität innehaben, ist es sinnvoll sich auf so viel wie möglich Niederschlagsstationen zu berufen. Daher wird die Wahl der für die Simulation gewählten Standorte der Wetterstationen anhand der Niederschlagsstationen erstellt, ungeachtet der Verfügbarkeit von Temperatur und Evapotranspirationsdaten.

Um einen möglichst aktuellen NatUrWB-Referenzwert zu bestimmen, sollten auch die Messungen möglichst aktuell sein. Wegen der Fluktuation der Niederschlagsmessstationen über die Zeit, stehen je nach Wahl des Zeitraums unterschiedlich viele Stationen zur Verfügung. Die mögliche Anzahl an Stationen je gewähltem Zeitraum ist in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Anzahl an möglichen Wetterstationen je gewähltem Zeitraum.**

| Zeitraum  | Anzahl an Stationen |
|-----------|---------------------|
| 2007-2017 | 733                 |
| 2008-2018 | 771                 |
| 2009-2019 | 773                 |

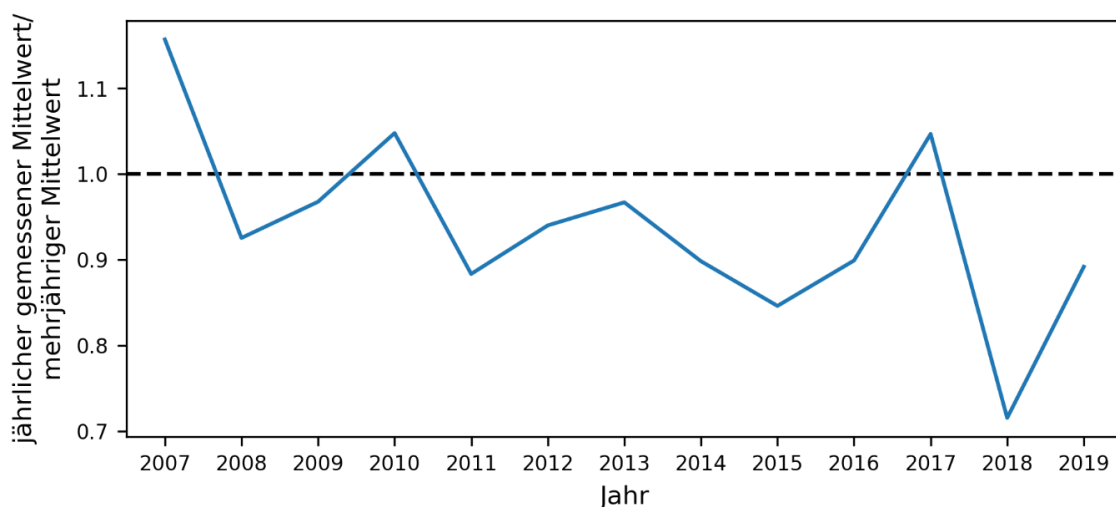
Hierbei ist zu erkennen, dass vor allem der Zeitraum 2007-2017 wesentlich weniger Stationen aufweist. Die Zeiträume 2008-2018 und 2009-2019 unterscheiden sich in der Anzahl der Stationen nur geringfügig voneinander. Da aber auch die räumliche Verteilung der wegfallenden Stationen eine Rolle spielen kann, stellt Karte 4 diese räumlich dar.



**Karte 4: Darstellung der wegfallenden Stationen je nach gewähltem Zeitraum.**

Karte 4 zeigt keine räumlich ungünstige Ansammlung an ausgeschlossenen Stationen, sondern eine eher homogene Verteilung dieser. Eine Auffälligkeit ist allerdings westlich von Karlsruhe zu erkennen, wo die Rheinebene am Fuße des nördlichen Schwarzwaldes im Zeitraum 2008-2018 und 2007-2017 nicht gut abgebildet ist, da die beiden hier vorhandenen Stationen wegfallen. Im Zeitraum 2009-2019 ist dieser Bereich allerdings mit einer Station abgebildet.

Des Weiteren sollten die gewählten Jahre eher durchschnittliche Klimajahre sein, damit die NatUrWB-Referenz nicht von Extremereignissen dominiert werden. Um dies zu beurteilen, wird der Quotient aus dem jährlichen Mittelwert einer Station durch deren mehrjährigen Stationsmittelwert des Klimazeitraums 1980-2010 (DWD 2018) gezogen. Die jährlichen Mittelwerte dieser Quotienten sind in Abbildung 2 aufgezeichnet.



**Abbildung 2: Diagramm der jährlichen Mittelwerte der Jahre 2007 bis 2019 der Quotienten aus den gemessenen und den mehrjährigen (1980-2010) Jahresmittelwerten des Niederschlags.**

In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass das Jahr 2018 mit nur 71.5 % des durchschnittlichen Niederschlags außerordentlich trocken war. Allgemein liegen die Jahre 2008-2019, mit Ausnahme von 2010 und 2017, eher unter dem durchschnittlichen mehrjährigen Mittelwert.

Es zeigt sich, dass sich kein, zur Erfüllung aller Kriterien, optimaler Zeitraum wählen lässt. Nur aus der Betrachtung der mittleren Jahresniederschläge im Vergleich zu dem mehrjährigen Mittel, wäre der Zeitraum 2007-2017, für die Simulation des NatUrWB-Referenzwertes, am besten geeignet. Da allerdings die Stationsdichte der Niederschlagsmessungen in diesem Zeitraum wesentlich geringer ist, wird von diesem trotzdem abgesehen. Dafür werden in Kapitel 3.2.1.5 die Niederschlagsreihen auf das mehrjährige Mittel hochskaliert. Daher wird der Zeitraum 2009-2019 als Kompromiss gewählt, da dieser am aktuellsten ist und die größte Stationsdichte aufweist. Der Simulationszeitraum wird demnach auf den Zeitraum vom 1.1.2009 bis 31.12.2019 festgelegt und die Messreihen werden im Folgenden nur noch für diesen Zeitraum betrachtet.

### **3.2.1.3 Qualitätstests und Stationswahl**

In einem weiteren Schritt werden die Stationsdaten auf deren Qualität hin untersucht. Hierfür werden zuerst die Zeitreihen auf die jeweilige komplette Zeitreihe für den Simulationszeitraum gesetzt, so dass der Zeitschritt immer zehn Minuten für den Niederschlag, bzw. ein Tag für die Temperatur und die Evapotranspiration beträgt und keine Lücken in der Zeitreihe mehr sind. Die fehlenden Datenpunkte werden dabei mit Fehlwerten ausgefüllt.

Zuerst werden die Niederschlagsdaten in Kapitel 3.2.1.3.1 überprüft und eine Selektion der Stationen getroffen, die anschließend als Basis für die Simulationen dienen. In Kapitel 3.2.1.3.2 werden dann die Temperatur und Evapotranspirationsdaten auf ihr Qualität hin überprüft.

#### **3.2.1.3.1 Niederschlagsstationen**

Alle Testergebnisse der Qualitätstests werden in der Meta-Tabelle markiert und führen anschließend zu der Auswahl der Stationen, die für die Simulationen berücksichtigt werden.

Ein Qualitätstest besteht darin, die gemessenen 10-minütigen Niederschlagsintensitäten mit den regionalisierten Starkregen-Rastern des KOSTRA-DWD der Dauerstufe 10 Minuten und einer Jährlichkeit von 100 Jahren (DWD 2010) zu vergleichen. Alle Messwerte, die größer als ein 100-jähriges Niederschlagsereignis an dem Stationsort sind, werden gelöscht. Dadurch werden einerseits unplausible Werte gelöscht und andererseits die Niederschlagszeitreihen von lokalen Extremereignissen bereinigt. Das Bereinigen lokaler Extremereignisse kommt der Allgemeingültigkeit der NatUrWB-Referenzen zugute. Dieser Prozess führt zur Bereinigung von 127 Messpunkten.

Ein weiterer Test besteht darin die Niederschlagsmessungen im Vergleich zu den Messrekorden des DWDs (DWD 2016) zu vergleichen. Hierfür wird aus den 10-minütigen Daten der Jahres- und der Monatsmittelwert bestimmt, wobei die Mittelwerte um die fehlenden Datenpunkte gewichtet erhöht wird. So wird getestet, ob die jährlichen mittleren Niederschläge zwischen 242 und 3.503 mm/a und die Monatsmittelwerte zwischen 0 und 778 mm/Monat liegen. In diesem Bereich lagen allerdings alle Messpunkte, weswegen aus dem Test keine Konsequenz erfolgt ist.

Beim dritten Test wird die Anzahl aufeinanderfolgender gleicher Messwerte, die ungleich null sind, gezählt. Bei mehr als drei aufeinanderfolgenden identischen Messwerten werden diese gelöscht, da sie als unrealistisch erachtet werden. Dieser Test führt zum Löschen von insgesamt 112.018 Messwerten.

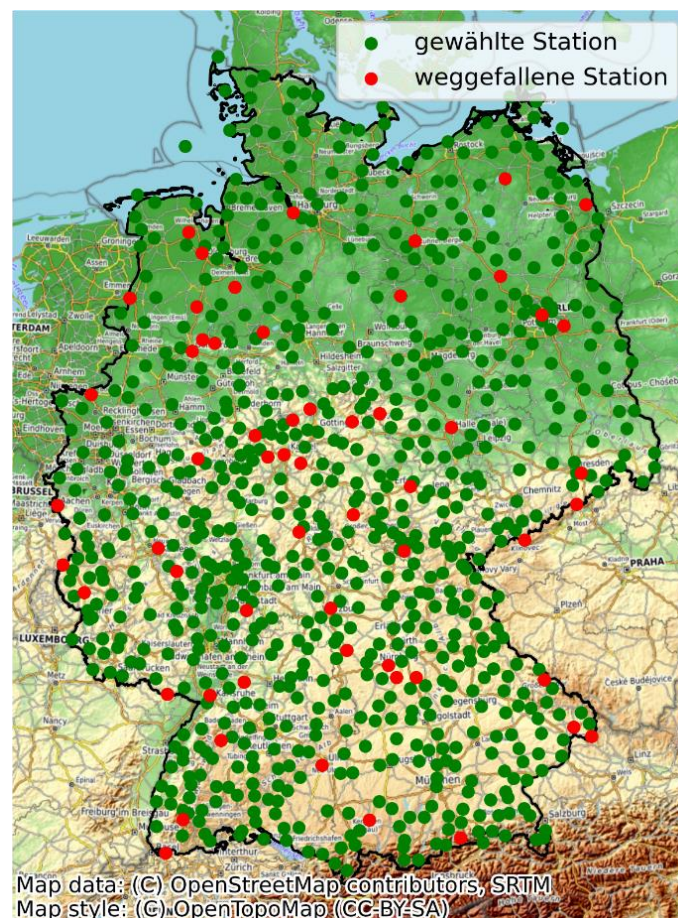


Weiterhin wird getestet wie groß die auftretenden Datenlücken sind. Hierfür wird gezählt, wie viele Datenlücken länger als 2, 4, 8, 12, 16, und 20 Wochen sind. Daraus werden die Stationen gewählt, die als Basis für die Simulationen dienen sollen. Hierfür wird als Richtwert eine Datenlücke von 20 Wochen als Grenze erachtet. Das bedeutet, dass Stationszeitreihen, die eine größere Datenlücke als 20 Wochen aufweisen ausgeschlossen werden. Aber auch Zeitreihen die mehr als 10 Datenlücken von mindestens zwei Wochen aufweisen. Die genauen Grenzwerte sind in Tabelle 4 aufgelistet. Von den 812 heruntergeladenen Stationen werden hierdurch 56 Stationen ausgeschlossen. Unter diesen 56 Stationen sind auch die in Kapitel 3.2.1.2 erwähnten Stationen, die nicht den ganzen Simulationszeitraum abbilden.

**Tabelle 4: Auflistung der tolerierten Anzahl an Datenlücken die länger als 20, 12, 4 oder 2 Wochen sind und die maximale Anzahl an Fehlwerten je Station.**

|                          | > 20 Wochen | > 12 Wochen | > 4 Wochen | > 2 Wochen | Summe NAs             |
|--------------------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------------------|
| <b>tolerierte Anzahl</b> | 0           | 1           | 5          | 10         | 20.160<br>(6*24*7*20) |

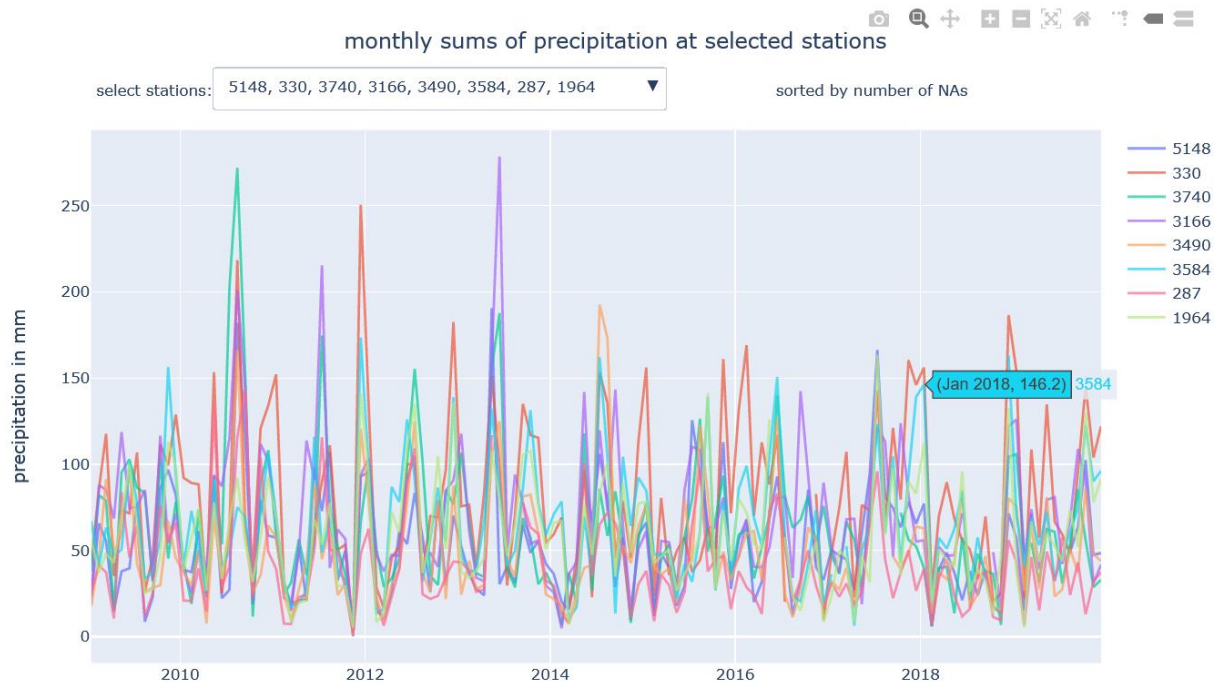
Außerdem werden Stationen ausgeschlossen, die mehr Fehlwerte aufweisen als 20 Wochen Datenlücke darstellen würden, wodurch zwei weitere Stationen ausgeschieden sind. Daraus ergeben sich die 754 gewählten Stationen die in Karte 5 dargestellt sind.



**Karte 5: Darstellung der gewählten und weggefallenen Niederschlags-Stationen.**



Zusätzlich werden die monatlichen Mittelwerte der Stationen in einem interaktiven Diagramm visualisiert und händisch auf Auffälligkeiten hin untersucht. Mit diesem wurde auch in einem iterativen Prozess die Kriterien für die Qualitätstests und die Wahl der Stationen optimiert. Ein Auszug dieser Visualisierung ist in Abbildung 3 zu sehen.



**Abbildung 3: Screenshot der interaktiven Visualisierung zur manuellen Durchsicht der monatlichen Stationsmittelwerte des Niederschlags.**

Da die regionale Variabilität des Niederschlags am größten ist, wird die hier getroffene Auswahl der Stationen als Basis für die Simulationen herangezogen und für jede dieser Stationen wird im Folgenden ein Datensatz mit Niederschlag, Temperatur und Evapotranspirationsdaten erstellt.

### 3.2.1.3.2 Temperatur und Evapotranspiration

Äquivalent zum Niederschlag werden auch alle Temperatur- und Evapotranspirationsdaten auf ihre Qualität hin überprüft. Wie beim Niederschlag werden die Toleranzgrenzen der Tests in einem iterativen Prozess, mit Hilfe einer interaktiven Visualisierung der täglichen und monatlichen Werte und einer manuellen Einschätzung der Plausibilität der Werte, festgelegt.

Zuerst werden die jeweiligen Stationsmesswerte mit den Werten der fünf nächsten Stationen verglichen. Hierfür werden die Messwerte dieser fünf Stationen, mit der in Kapitel 3.2.1.1 bestimmten Wichtung, auf regionalisierte Werte für die untersuchte Station umgerechnet und deren Mittelwert bestimmt. Durch diesen Vergleich sollen unrealistische oder regional extreme Messwerte aussortiert werden.

Liegt der Temperaturwert der untersuchten Station mehr als 5°C neben dem regionalisierten Mittelwert der fünf nächsten Stationen, so wird der Wert als fehlerhaft betrachtet und aussortiert. Hierdurch werden 3.056 Temperaturwerte aussortiert.

Für die Evapotranspiration werden zum einen die 17 zu geringen Werte, die kleiner als 25 % des regionalisierten Mittelwertes der fünf nächsten Stationen, aber größer als 2 mm/d sind, aussortiert. Zum anderen werden die 23 zu hohen Werte, die größer als 200 % des regionalisierten Mittelwertes der fünf nächsten Stationen und 3 mm/d sind, aussortiert. Die festen Grenzwerte, unter denen die ET nicht aussortiert wird, dienen dazu, kleine Werte nicht zu berücksichtigen, da bei diesen die prozentuale Abweichung schnell erreicht ist, obwohl die tatsächliche Abweichung noch gering ist.

Weiterhin werden die Messwerte auf monatliche und jährliche Mittelwerte aufsummiert (ET), bzw. gemittelt (T), um diese mit den mehrjährigen Werten zu vergleichen. Dieser Test dient allerdings nur der Überprüfung der Daten und führt zu keinem Aussortieren von Datenpunkten.

Auch für die Temperatur und die Evapotranspiration werden die Rekordwerte des DWDs (2016) als Grenzwerte herangezogen, was allerdings ebenfalls zu keinen Fehlwerten führt.

Äquivalent zum Niederschlag in Kapitel 3.2.1.3.1 werden drei konsekutive, gleiche Werte als Fehlwerte aussortiert. Hierbei werden für die Evapotranspiration konsekutive Werte von 0 mm/d nicht berücksichtigt. Dies führt für die Evapotranspiration zu 24 und für die Temperatur zu 105 neuen Fehlwerten.

#### **3.2.1.4 Auffüllen der Lücken**

Die Datenlücken die unter anderem durch die Qualitätstests in Kapitel 3.2.1.3 entstanden, aber auch bereits in den Rohdaten vorhanden sind, werden nun mit realistischen Werten ausgefüllt. Hierbei werden auch die Temperatur und Evapotranspirationsdaten zu Stationen hinzugefügt die nur Niederschlagsmessungen aufweisen.

Hierfür wird für jede in Kapitel 3.2.1.3.1 gewählte Station, der Abstand zu allen vorhandenen Stationen ermittelt. Hierdurch wird die Reihenfolge der zum Ausfüllen verwendeten Stationen bestimmt. Angefangen bei der nächsten Station, werden diese jeweils mit dem in Kapitel 3.2.1.1 bestimmten Wichtungsfaktor, auf regionalisierte Messwerte für die untersuchte Station umgerechnet. Mit dieser regionalisierten Messreihe werden dann die Fehlwerte aufgefüllt. Ist die Messreihe der jeweiligen Station weiterhin lückenhaft, wird die nächstnahe Station zum Auffüllen der fehlenden Werte genutzt. Dies wird so lange wiederholt, bis keine Fehlwerte mehr in den Stationsdaten vorhanden sind.

### 3.2.1.5 Skalieren auf mehrjährige Mittelwerte

Wie bereits angedeutet werden die Wetterdaten auf den mehrjährigen Mittelwert skaliert, um die Klimavariabilität der Jahre 2009 bis 2019 abzufedern und eine bessere Repräsentativität der Zeitreihen für ein Gebiet zu gewährleisten.

Für den Niederschlag und die Evapotranspiration wird hierfür für jede Station der originale, aufgefüllte Messwert aus dem vorherigen Kapitel mit dem Quotienten aus dem mehrjährigen Jahresmittelwert, aus Kapitel 3.2.1.1, und dem Mittelwert der jeweiligen Messreihe multipliziert. Dies ist beispielhaft für die Evapotranspiration in Gleichung (5) dargestellt.

Für den Niederschlag wurde für diese Skalierung allerdings nicht der Jahresmittelwert, sondern die Sommer- und Wintermittelwerte herangezogen, um die jahreszeitliche Variabilität besser abzubilden.

Für die Temperatur wurde hierfür eine absolute Differenz des Jahresmittelwertes zum mehrjährigen Jahresmittel bestimmt und zu jedem Messwert addiert, wie in Gleichung (6) aufgezeigt wird.

$$ET_{skal} = ET_{orig} * \frac{ET_{ma,Jahresmittel}}{ET_{orig,mittel}} \quad (5)$$

$$T_{skal} = T_{orig} + (T_{ma,Jahresmittel} - T_{orig,mittel}) \quad (6)$$

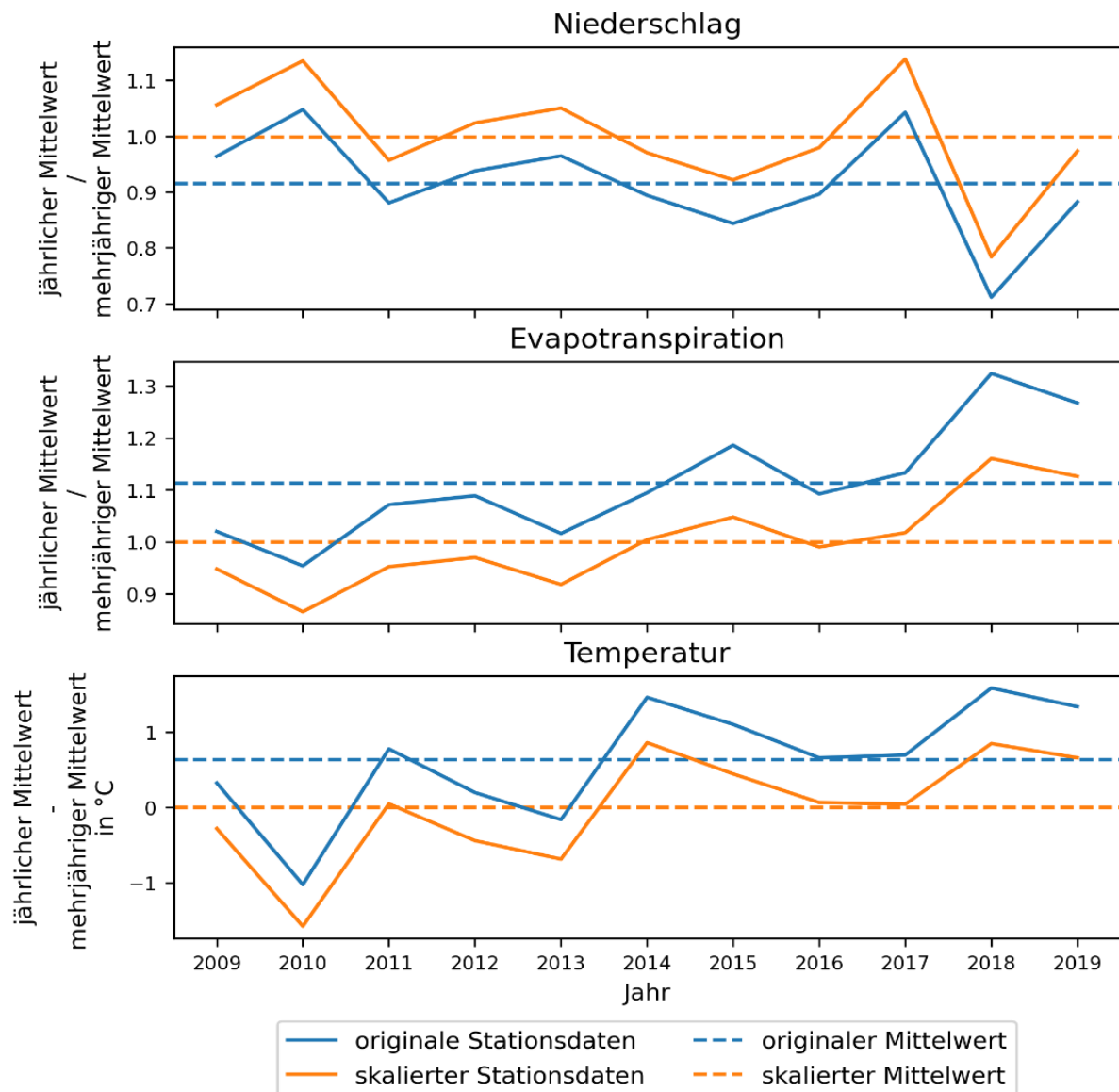
$ET_{skal}$ : skaliertes Tageswert der Evapotranspiration in °C

$ET_{orig}$ : originaler Tageswert der Evapotranspiration in °C

$ET_{ma,Jahresmittel}$ : mehrjähriger Jahresmittelwert der Evapotranspiration in °C

$ET_{orig,mittel}$ : Mittelwert über den Simulationszeitraum der originalen Tageswerte der Evapotranspiration in °C

Abbildung 4 zeigt welche Änderung hierdurch bei den Wetterdaten erzielt wird. Es zeigt den jährlichen Mittelwert aus allen Quotienten (bzw. Differenzen bei der Temperatur) der jährlichen Stationsmittelwerte zu dem jeweiligen mehrjährigen Jahresmittelwert der Station. Dies wird für die unveränderten, sowie für die skalierten Wetterdaten dargestellt. Zusätzlich ist als gestrichelte Linie der jeweilige Mittelwert der dargestellten Linien aufgezeichnet. Befindet sich dieser Mittelwert bei eins, bzw. null für die Temperatur, so entsprechen die Wetterdaten im Mittel dem mehrjährigen Mittelwert an der Station.



**Abbildung 4: Änderung des Mittelwertes der Quotienten aus den Jahresmittelwerten zu den mehrjährigen Mittelwerten der Stationen durch das Skalieren der Daten.**

Anschließend wird für jede dieser gewählten Stationen ein Set an Wetterdaten (T, ET, und N) für den Zeitraum 1.1.2009 bis 31.12.2019, im richtigen Format für die RoGeR Simulationen, erstellt.

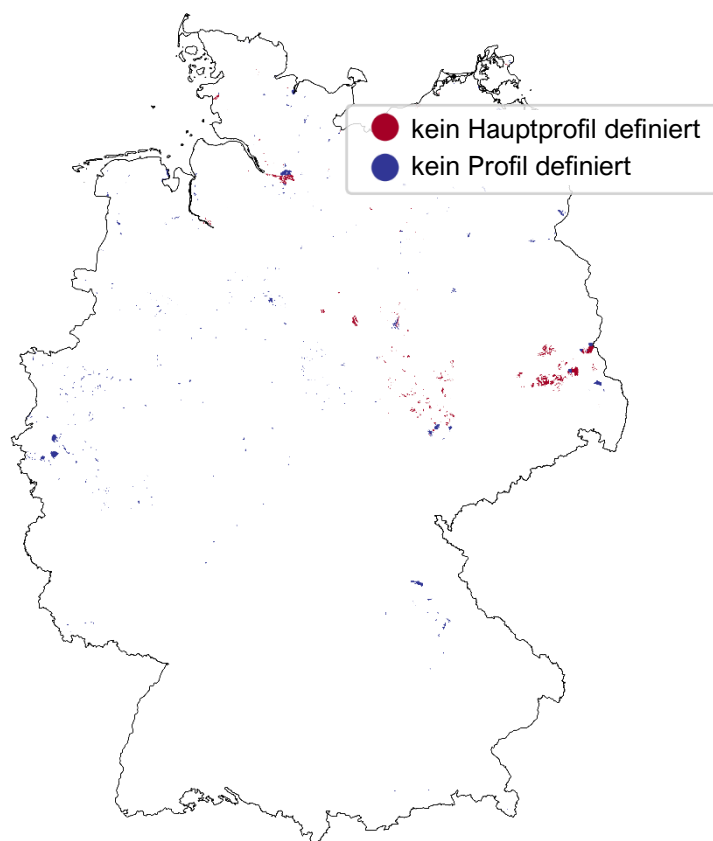
### 3.2.2 Simulations-Polygone

Dieses Kapitel beschreibt, wie die Flächen, für welche ein Set an Simulationen erstellt werden soll, definiert werden. Diese Flächen stellen die Basis des NatUrWB-Modells dar, da auf deren Grundlage die Wasserbilanzsimulationen erstellt werden. Hierfür werden zuerst die fehlenden Bodengesellschaften der BÜK in Kapitel 3.2.2.1 aufgefüllt. Anschließend werden die Polygone in Kapitel 3.2.2.2 einer Wetterstation zugeteilt und der Topografie angepasst.

### 3.2.2.1 Auffüllen der Bodenprofile

Für die Wasserbilanz-Simulationen wird ein Datensatz mit definierten Bodenprofilen für ganz Deutschland benötigt, der möglichst wenig Lücken aufweist. Die Grundlage hierfür bietet die von der BGR (2018b) erstellte Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:250.000 (BÜK250). Jedes Polygon stellt eine Bodengesellschaft dar, für die in der Sachdatenbank der Bodenprofile der BGR (2018a) mehrere Bodenprofile mit deren jeweiligem Flächenanteil definiert sind.

Die BGR veröffentlicht diese Sachdatenbank als vorläufige Version und übernimmt ausdrücklich keine Haftung für die Vollständigkeit und Plausibilität der Daten. (BGR 2018a) In dieser sind für einige Bodengesellschaften überhaupt keine Bodenprofile definiert. Dies sind meist alte Stadtzentren, Industriegebiete oder Tagebaue. Des Weiteren gibt es Bodengesellschaften, für die zwar einige Profile definiert sind, aber bei denen das Hauptprofil, also das Bodenprofil mit dem größten Flächenanteil, nicht definiert ist. Dies sind oft urbane Gebiete. In der Karte 6 sind diese Flächen dargestellt.



**Karte 6: Flächen ohne definierte Profile oder ohne definiertes Hauptprofil in der BÜK-Sachdatenbank.**

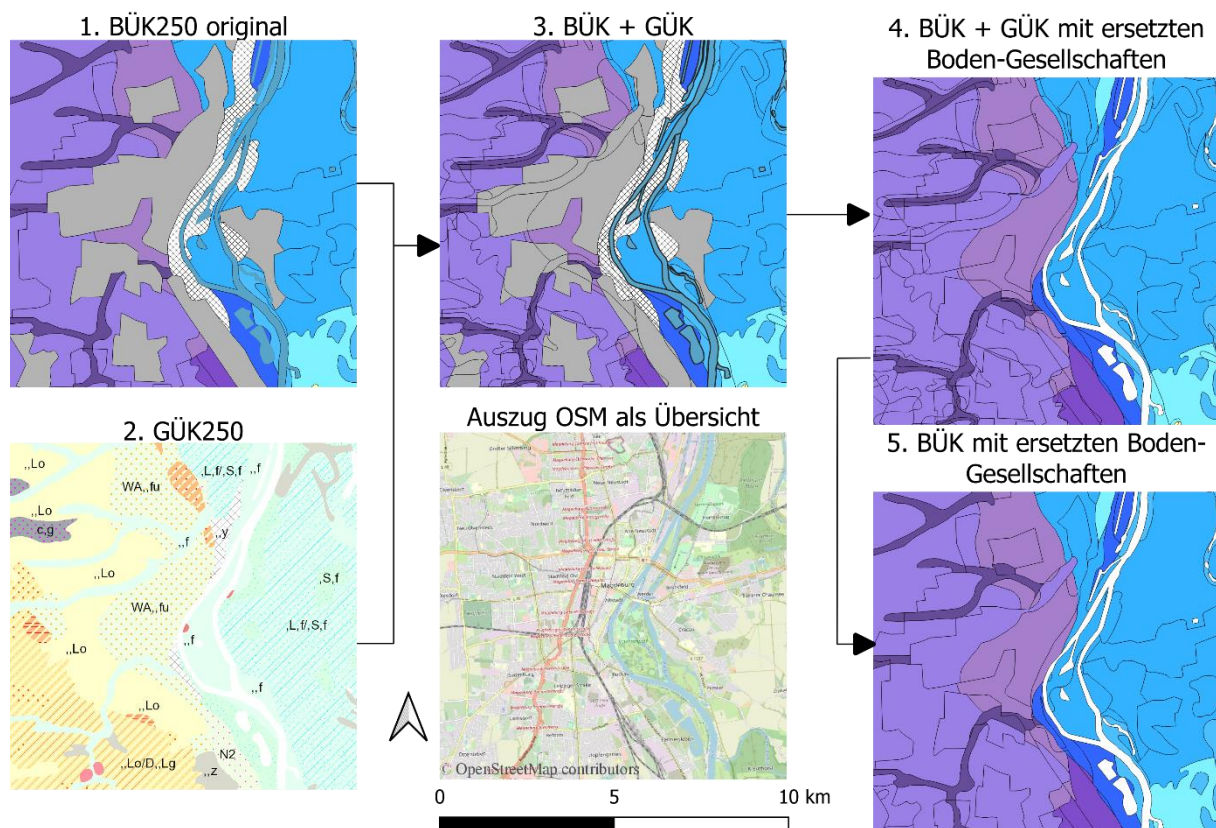
Um auch für diese Gebiete einen NatUrWB-Referenzwert bestimmen zu können, wird die BÜK250 (Karte 7-1) mit dem Basis-Layer der Geologischen Übersichtskarte Deutschlands (GÜK, Karte 7-2) im Maßstab 1:250.000 der BGR verschnitten. Diese kategorisiert die oberflächennahe Geologie (BGR 2015). Das Ergebnis ist, beispielhaft für die Stadt Magdeburg, in Karte 7-3 dargelegt.

Anschließend werden die Polygone, die Gewässer repräsentieren, gelöscht, da auf diesen kein Bodenprofil definiert ist und auch nicht ersetzt werden soll. Da auf diesen keine urbane Landnutzung zu erwarten ist, stellt der Verlust dieser Flächen kein Problem dar.

Dann werden für die Polygone, die kein (Haupt-)Bodenprofil definiert haben, die Nachbarpolygone mit gleicher Geologie herangezogen. Besitzt mindestens ein Nachbar mit gleicher Geologie mindestens ein Haupt-Bodenprofil, so wird von dem Nachbarpolygon mit der größten gemeinsamen Grenze die Bodengesellschafts-ID übernommen. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis sich keine Bodengesellschafts-ID mehr verändert.

War dieser Schritt nicht erfolgreich, wird die Bodengesellschafts-ID von dem Nachbarn mit mindestens einem Haupt-Bodenprofil mit der größten gemeinsamen Grenze bezogen.

Kann auch dieser Schritt keine validen Bodenprofile liefern, weil das Polygon keinen direkten Nachbarn hat, wird in einem Umkreis von 1 km nach einem Polygon mit der gleichen Geologie gesucht und dessen Bodengesellschafts-ID übernommen. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn das Polygon eine Insel darstellt. Da Gewässerflächen anfangs gelöscht wurden, besitzt das Bodengesellschaftspolygon der BÜK hier keinen Nachbarn. Das Ergebnis der drei Iterationsschritte ist in Karte 7-4 dargestellt.



**Karte 7: Schematische Darstellung des Ersetzens fehlender Bodenprofile der BÜK am Beispiel von Magdeburg. Grau dargestellt sind die Polygone ohne Bodenprofil-Informationen in der BÜK-Sachdatenbank.**

Nach diesen drei Iterationen sind immer noch 88 Polygone vorhanden, die kein Haupt-Bodenprofil besitzen. Diese werden mit OpenStreetMap (OSM 2020) als Hintergrund dargestellt und manuell gesichtet. Diese Karten sind im Anhang in Karte A5 und Karte A6 dargestellt. Daraus ergibt sich, dass die meisten dieser Polygone kleine Inseln, Dünen oder ein Watt im Meer darstellen. Da auf diesen keine Siedlungen vorkommen, werden diese Polygone gelöscht und im Folgenden nicht mehr berücksichtigt. Nur drei dieser Bodengesellschafts-IDs werden weiterhin behalten, da diese aktuelle urbane oder mögliche zukünftige urbane Gebiete darstellen, für die zu einem späteren Zeitpunkt möglicherweise einmal Bodenprofile definiert werden. Diese drei Bodengesellschaften tragen die IDs (GEN\_ID) 474, 813 bzw. 2137. Trotzdem werden auch für diese keine NatUrWB-Simulationen durchgeführt.

Die drei beschriebenen Iterationsschritte führen für die naturnahe urbane Wasserbilanz zu schlechteren Referenzergebnissen und sind nur als Kompromiss zu verstehen, um möglichst für jedes Gebiet einen Referenzwert ausgeben zu können. Während der erste und dritte Iterationsschritt noch recht plausible Bodenprofile liefern, da diese mit der Geologie verknüpft sind, ist der zweite Iterationsschritt als kritisch zu betrachten. Um diese Information abzuspeichern, werden diese Schritte mit einer Variable („BUEK\_flag“) wie folgt markiert:

0. Original Bodenprofildaten aus der BÜK250;
1. Bodengesellschafts-ID vom Nachbarn mit der größten gemeinsamen Grenze und mit gleicher Geologie bezogen;
2. Bodengesellschafts-ID vom Nachbarn mit der größten gemeinsamen Grenze, aber mit unterschiedlicher Geologie bezogen;
3. Bodengesellschafts-ID vom nächsten Nachbarn (< 1 km) und mit gleicher Geologie bezogen;
4. Original Bodenprofildaten aus der BÜK250 aber kein definiertes Hauptprofil und daher keine Simulation durchgeführt.

Um bei späteren Aktualisierungen der BÜK-Sachdatenbank gewährleisten zu können, dass die original Bodenprofile aus der Sachdatenbank der BÜK dem Polygon erneut zugewiesen werden können, wird der hierfür nötige Schlüssel („TKLE\_NR“) gedoppelt, wobei er einmal die abgeänderten und einmal die original Information besitzt.

Da die Grenzen der GÜK250 und der BÜK250 nicht genau aufeinanderliegen, entstehen kleine Verschnittflächen an deren Grenzen. Um diese zu eliminieren, werden Polygone, die kleiner als 100 m<sup>2</sup> sind, mit dem erstellten ArcGIS Modul „eliminate\_by\_area“ mit dem Nachbarn mit der größten gemeinsamen Grenze zusammengeführt. Die genaue Prozedur dieses Moduls ist im Anhang in Abbildung A2 visualisiert. Da auch die BÜK keine kleineren Polygone als 100 m<sup>2</sup> hat, wird hierdurch auch kein bestehendes Polygon der BÜK vereinfacht, sondern lediglich die durch das Verschneiden mit der GÜK neu entstandenen.

Zum Abschluss werden die Polygone über die Bodengesellschafts-ID aufgelöst, um die Informationen und Polygone der GÜK zu eliminieren und nur die Bodengesellschaft-Polygone abzubilden. Das Ergebnis ist in Karte 7-5 zu sehen.

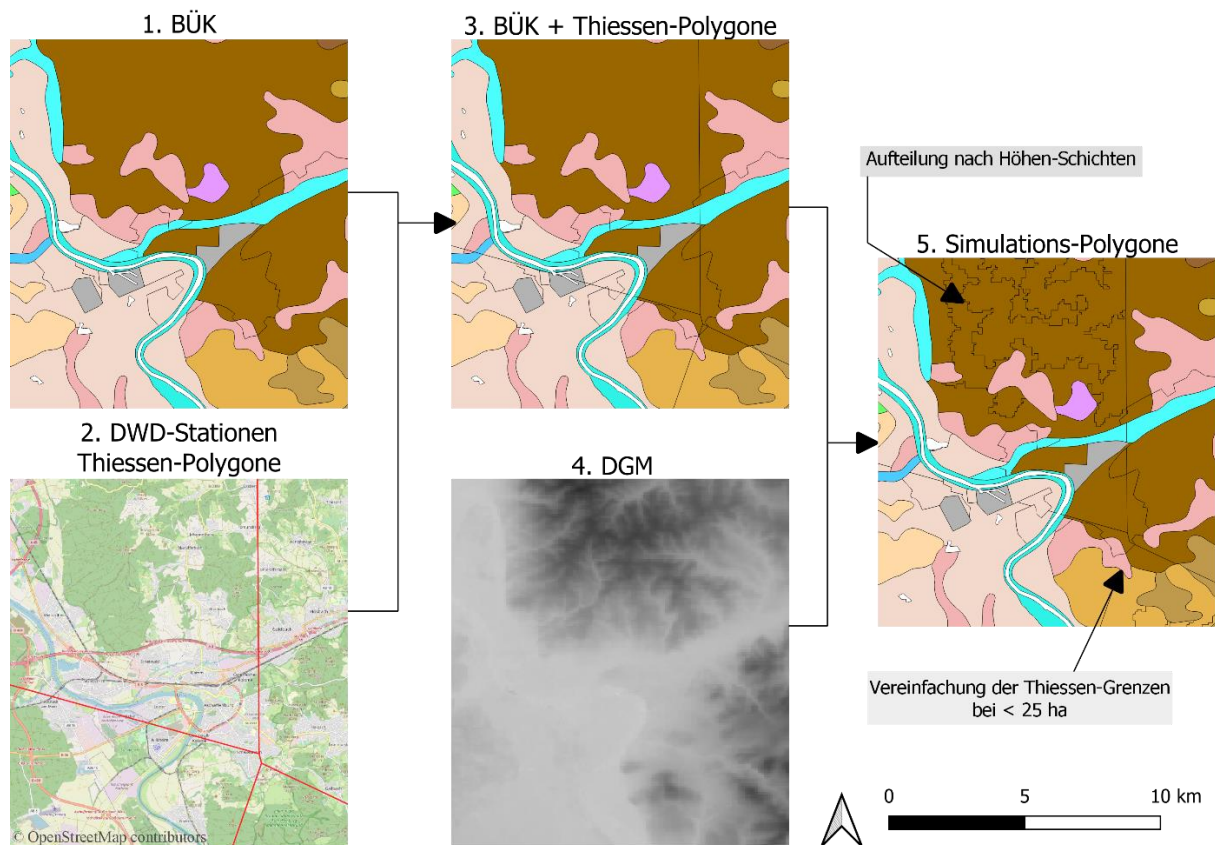
### **3.2.2.2 Wetterstation und Topografie**

Das folgende Vorgehen ist in Karte 8 beispielhaft für die Stadt Aschaffenburg dargestellt.

Um jedem Polygon aus Kapitel 3.2.2.1 die passende Wetterstation der in Kapitel 3.2.1.3.1 gewählten Stationen zuzuordnen, werden die Thiessen-Polygone um diese Stationen gebildet (Karte 8-2). Diese spannen den jeweiligen Bereich um eine Station auf, der dieser am nächsten liegt.

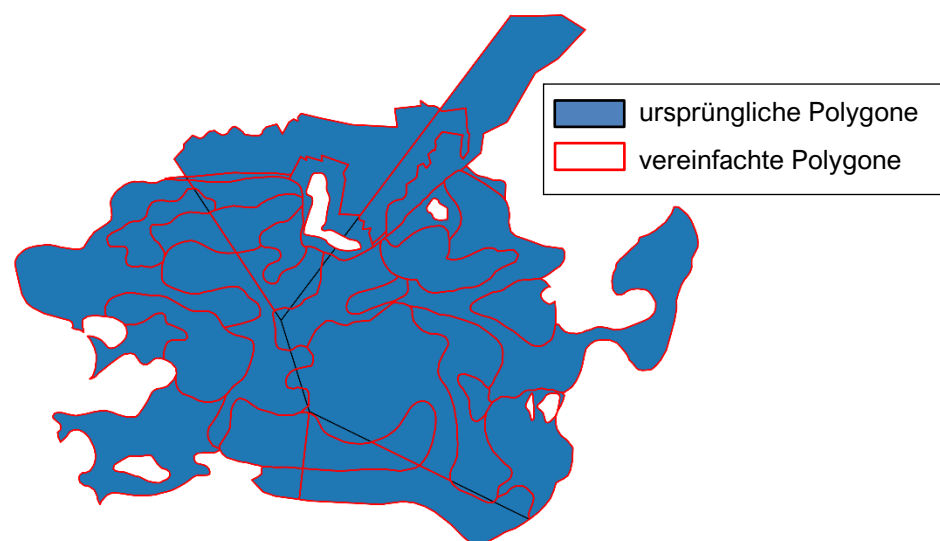
Diese Thiessen-Polygone werden anschließend mit dem ausgefüllten Polygon-Datensatz der BÜK aus dem vorherigen Kapitel (Karte 8-1) verschnitten. Anschließend werden die Polygone, die nicht in der BÜK vorkommen (also jene, welche durch das Überstehen der Thiessen-Polygone entstehen), gelöscht. Das hierfür erstellte ArcGIS Modul ist im Anhang in Abbildung A3 dargestellt. Karte 8 -3 zeigt das Ergebnis dieses Schrittes.





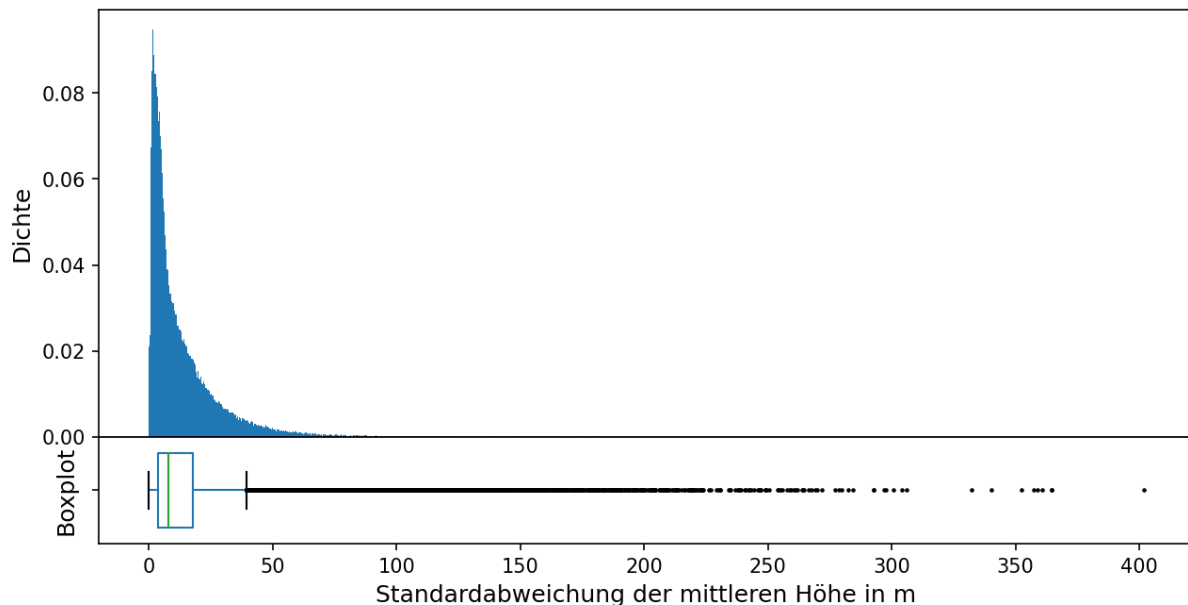
**Karte 8: Schematische Darstellung der Erstellung der Simulations-Polygone am Beispiel der Stadt Aschaffenburg.**

Um Rechenleistung beim Simulieren und späteren Aggregieren einzusparen, werden die Grenzen, die durch den Verschnitt von BÜK- und Thiessen-Polygonen entstanden sind, vereinfacht. Hierfür werden die Polygone an den Thiessen-Grenzen, die kleiner als 25 ha sind, der Nachbar-Station zugeordnet und anschließend erneut über die Bodengesellschaften und Wetterstationen aufgelöst. Dieser Prozess ist in Karte 9 veranschaulicht. Da es bei der Wahl der Wetterstation nicht auf 100 m Genauigkeit ankommt, birgt dies keine große Ungenauigkeit, führt aber zu einer Einsparung von 14.544 Polygonen.



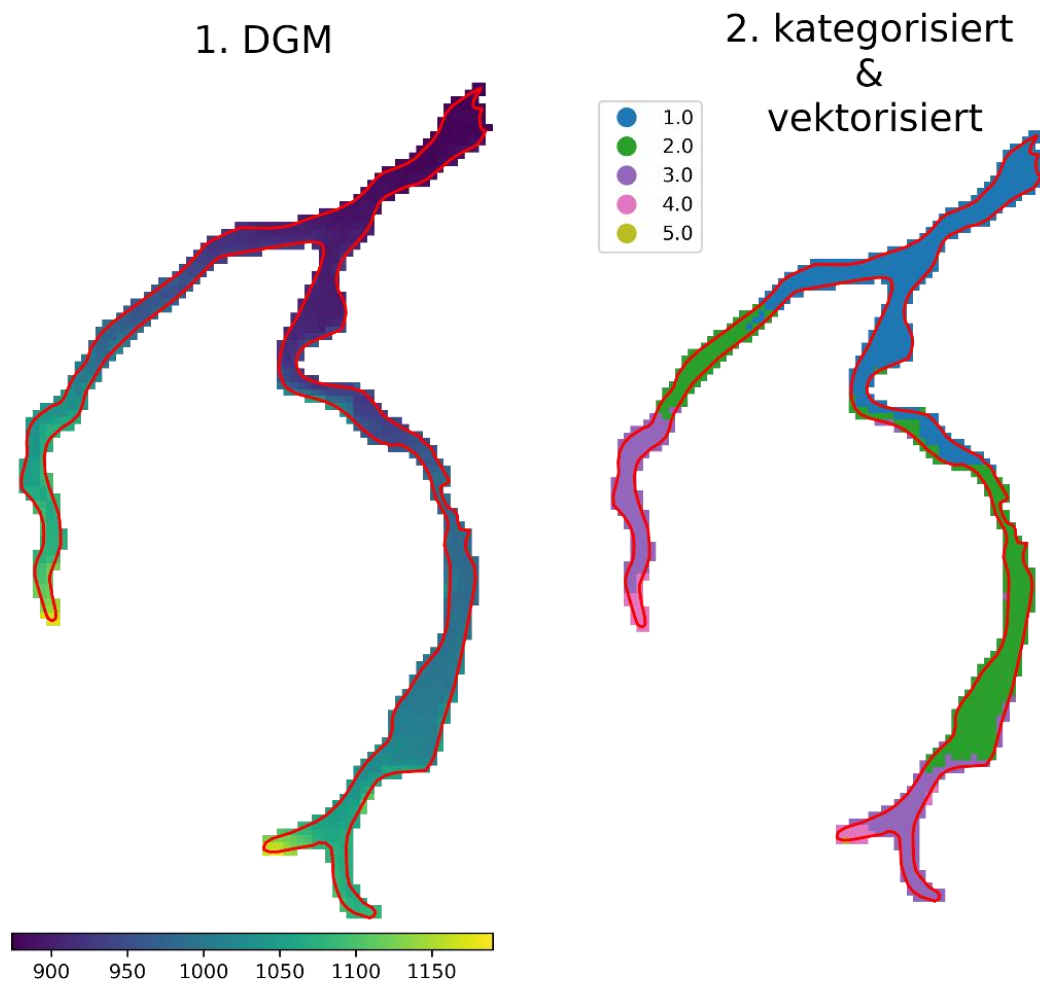
**Karte 9: Veranschaulichung der Vereinfachung an den Grenzen der Thiessen-Polygone.**

Da der Niederschlag eine große Sensibilität auf die Topografie aufweist, würden große topografische Unterschiede in einem Polygon zu ungenauen Simulationsergebnissen führen. Mit einer zonalen Statistik wird die Standardabweichung zum Mittelwert aus einem digitalen Geländemodell mit einer Auflösung von 80 x 80 m ermittelt. Die Variabilität dieser Abweichung ist in Abbildung 5 aufgezeigt. Zu erkennen ist, dass einige der Polygone noch eine große Variabilität mit einer Standardabweichung von bis zu 400 m in der Topografie aufweisen.



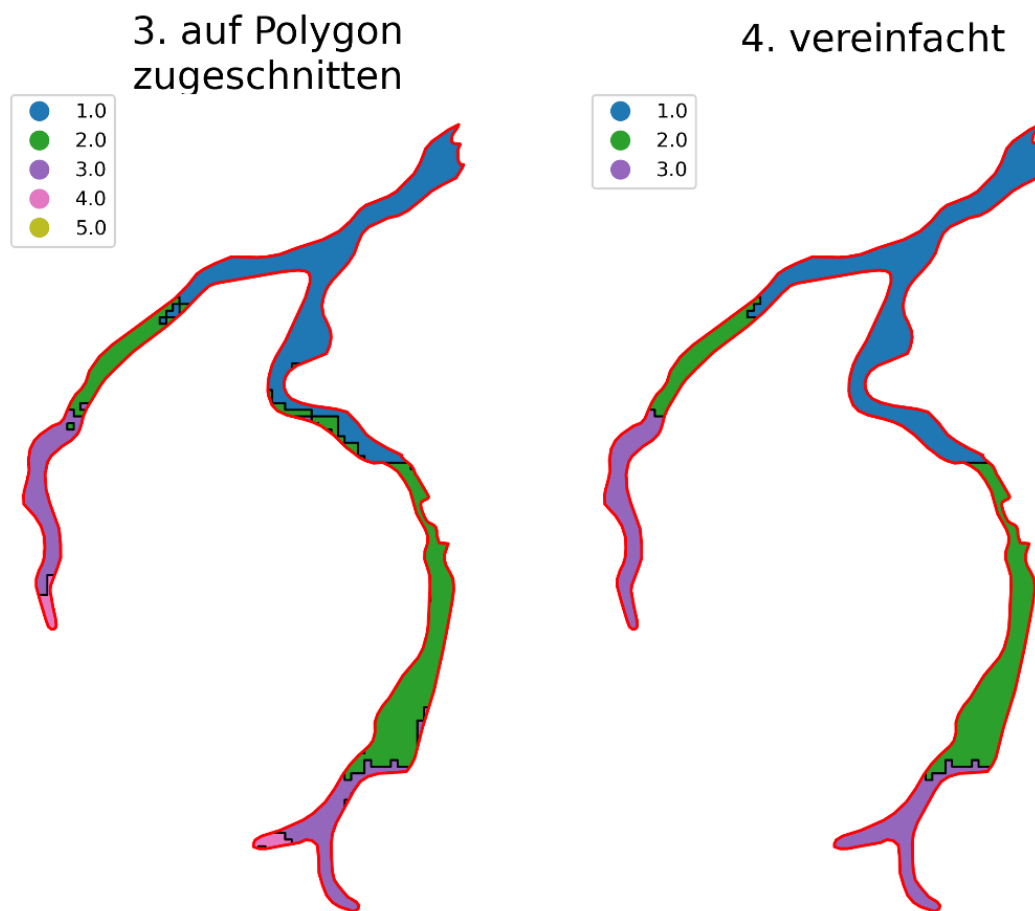
**Abbildung 5: Histogramm und Boxplot der Standardabweichungen der Topografie der einzelnen Simulations-Polygone vor dem weiteren Aufteilen.**

Um diese Variabilität zu verringern, werden die 4.402 Polygone die eine Standardabweichung von mehr als 50 m aufweisen, weiter aufgeteilt. Hierfür wird das DGM80 auf das jeweilige Polygon zugeschnitten, wobei alle das Polygon berührende Rasterzellen miteingeschlossen werden. Anschließend wird das Raster in Gruppen von bis zu 100 m Höhendifferenz kategorisiert und zu einem Vektor-Layer vektorisiert. Dies ist in Karte 10 exemplarisch für ein Polygon dargestellt.



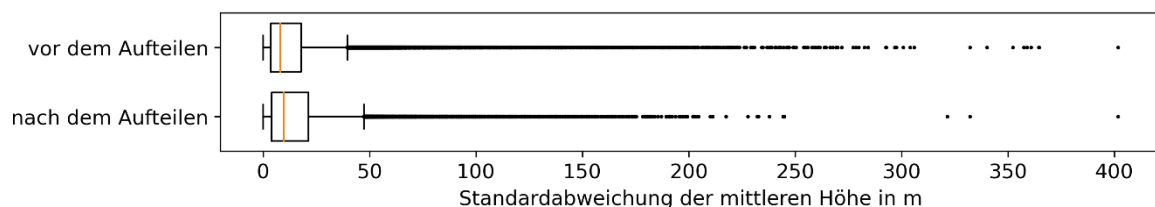
**Karte 10: Darstellung des Prozesses zum Aufteilen der Polygone je nach Höhenstufen, Teil 1. In Rot ist das jeweilige Polygon, das aufgeteilt wird, dargestellt.**

Danach wird dieser Layer auf das jeweilige Polygon zugeschnitten (Karte 11-3). Durch diesen Prozess entstehen viele kleine Polygone, wie an den Rändern des Eingangspolygons in Karte 11-3 zu erkennen ist. Durch das Kategorisieren auf Rasterebene können einzelne Rasterzellen von Zellen einer anderen Kategorie umgeben sein. Weiterhin können Zellen durch das Zuschneiden auf das Eingangspolygon von ihrer Gruppe getrennt werden. Diese kleinen Polygone würden den Rechenaufwand erheblich erhöhen. Das genutzte Regionalisierung-Raster vom DWD, wie in Kapitel 3.2.4.2 noch erläutert wird, weist eine Zellengröße von 1 x 1 km auf. Die bessere Auflösung der Höhenvariation, durch diese kleineren Polygone, kann daher bei der Regionalisierung nicht genutzt werden. Der Vorteil der Aufteilung wäre somit nicht mehr vorhanden. Daher werden in einem weiteren Schritt die Polygone vereinfacht. Hierbei werden Polygone, die kleiner als 30 ha sind, dem Nachbarpolygon mit der größten gemeinsamen Grenze zugeordnet. Diese Vorgehensweise ist äquivalent zu der Vereinfachung der Thiessen-Grenzen die in Karte 9 dargestellt wurde. Das Ergebnis dieses Schrittes ist in Karte 11-4 für das Beispiel-Polygon dargestellt.



**Karte 11:** Darstellung des Prozesses zum Aufteilen der Polygone je nach Höhenstufen, Teil 2. In Rot ist das jeweilige Polygon, das aufgeteilt wird, dargestellt.

Durch diesen Prozess des Aufteilens der Polygone in topografische Untergruppen entstehen 15.315 zusätzliche Polygone. Dadurch kann die topografische Variabilität innerhalb eines Polygons für einige Polygone verringert werden, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist. Allerdings sind auch weiterhin einige Polygone mit hoher topografischer Variabilität anzutreffen. Dies sind vor allem Polygone der deutschen Alpen, wie Karte A7 im Anhang zeigt. Diese Gebiete könnten nur durch engmaschigere Regionalisierungs-Raster gut abgebildet werden. Da hier aber wenige große, urbane Gebiete zu erwarten sind, da es sich um die Steilhänge der Alpen handelt, wird auf eine weitere Aufteilung der Polygone verzichtet.



**Abbildung 6:** Boxplots der Standardabweichung der mittleren Höhe eines Polygons, zum Vergleich der topografischen Variabilität innerhalb eines Polygons vor und nach dem Aufteilen.

Dadurch erhöht sich die Gesamtzahl an Simulations-Polygone auf 130.503 für ganz Deutschland. Diese Polygone erhalten nun eine eindeutige Simulations-ID (SIM\_ID) zur späteren Zuweisung der Simulations-Ergebnisse.

### 3.2.3 Nachschlage-Polygone

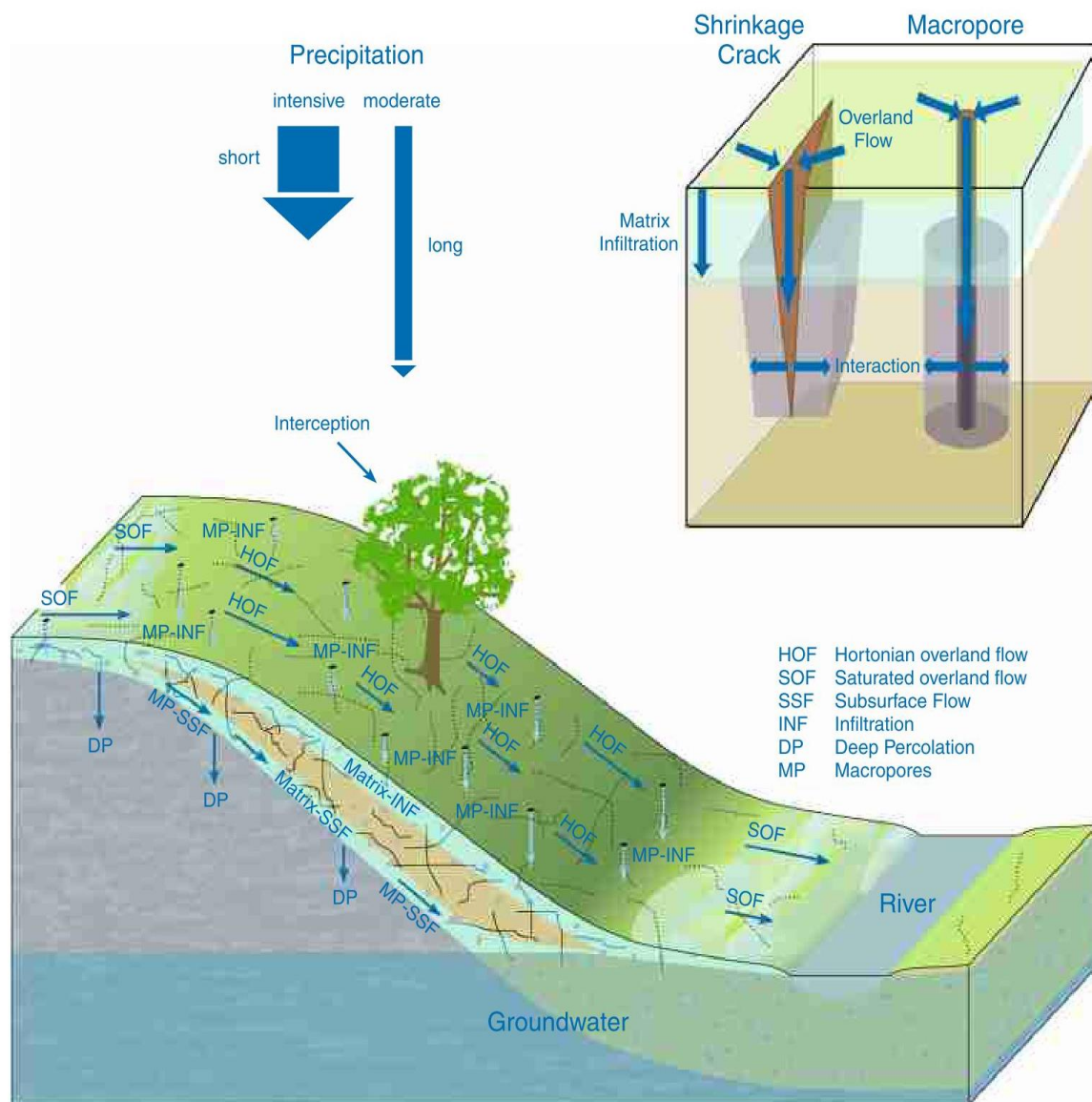
Zur Bestimmung der Landnutzung für jedes Simulations-Polygon aus Kapitel 3.2.2 werden diese Polygone mit der Naturraumeinheit des Hydrologischen Atlases Deutschlands (HAD) (BMU 2003) und dem „Corine Landcover“ (CLC) Datensatz von 2012 (BKG 2012) verschnitten. Anschließend werden die Polygone, die keine Simulations-ID besitzen (also jene, welche nur in den Naturraumeinheiten des HADs oder dem CLC Datensatz definiert sind), gelöscht. Das hierfür erstellte ArcGIS-Modell ist in Abbildung A4 im Anhang dargestellt. Die so erstellten Polygone werden im Folgenden als Nachschlagepolygone bezeichnet.

Über den Landnutzungscode des CLC-Datensatzes wird der entsprechende RoGeR-Code für die Landnutzung definiert.

### 3.2.4 Simulation mit RoGeR\_WB\_1D

Die Wasserbilanzgrößen für die Referenzwerte werden mit RoGeR\_WB\_1D bestimmt (Leistert et al. 2020). Dieses Modell ist eine eindimensionale Modellvariante der RoGeR-Familie. Bei dem RoGeR-Modell handelt es sich um ein Wasserhaushalts-Modell, das auf physikalischen Prozessen beruht und als unkalibriertes Modell verwendet werden kann. RoGeR wurde als Niederschlag-Abfluss-Modell (N-A-Modell) entwickelt, um die Abflussbildung für den Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) zu modellieren. Über die letzten Jahre wurde dieses Modell in zahlreichen Projekten weiterentwickelt, um die Wasserbilanz für verschiedene Betrachtungsgrößen, also von der Versuchsebene bis zur Mesoebene, zuverlässig für große zeitliche und geografische Ausdehnungen bestimmen zu können. Bei vielen N-A-Modellen erfolgt die Quantifizierung der Abflüsse während eines Niederschlagsereignisses über konstante Abflüsse, wogegen das RoGeR-Modell die Infiltrations-Dynamik während eines Niederschlagsereignisses abbildet. So werden die schnellen Zwischenabflusskomponenten (SSF), ebenso wie die Komponenten, die durch Makroporen und Schwindrisse entstehen, simuliert. Die Makroporeninfiltration springt erst an, wenn der Hortonschen Oberflächenabfluss (HOF) zu einem Aufstau des Wassers an der Oberfläche führt und hängt weiterhin von der dynamischen Sättigungsfront im Boden ab. (Steinbrich et al. 2016, 2021)

Das RoGeR\_WB\_1D Modell wurde von dem RoGeR\_WB\_Urban Modell, das für die Bilanzierung von urbanen Wasserbilanzen erstellt wurde, abgeleitet, um langjährige Wasserbilanzgrößen von urbanen und nicht urbanen Flächen zu bestimmen. Bei dieser Variante werden keine lateralen Umverteilungen berücksichtigt. (Professur für Hydrologie 2021; Steinbrich et al. 2021)



**Abbildung 7: Schematische Darstellung der verschiedenen Abfluss-Prozess die in RoGeR implementiert sind. (Steinbrich et al. 2016, S. 3)**

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Modellparameter für die Simulation mit RoGeR\_WB\_1D bestimmt werden. In Kapitel 3.2.4.1 werden die Bodenparameter aus der BÜK abgeleitet. Weiterhin werden die Regionalisierungs-Faktoren (Kapitel 3.2.4.2) und das Gefälle (Kapitel 3.2.4.3) für jedes Simulations-Polygon bestimmt. Diese Parameter werden anschließend mit den möglichen Landnutzungsparametern, wie in Kapitel 3.2.4.4 erläutert wird, geschaufelt. So ergibt sich für jedes Simulations-Polygon, das in Kapitel 3.2.2 bestimmt wurde, mehrere verschiedene Referenzwerte je nach vorkommender Landnutzung.

Die sich so ergebenden 4.382.618 Modellparameter-Kombinationen werden anschließend mit RoGeR\_WB\_1D simuliert. Hierfür wurde ein ausführbares Skript erstellt, mit dem eine stapelweise Durchführung mehrerer RoGeR Simulationen im Multiprozessorbetrieb gesteuert werden kann. Durch die simultane Ausführung mehrerer Simulationen konnte die Simulationszeit ungefähr um das 7-Fache beschleunigt werden.

### 3.2.4.1 Ableiten der Bodenparameter aus der BÜK

Die Bodenübersichtskarte Deutschlands (BÜK) stellt, wie bereits in Kapitel 3.2.2.1 erläutert, die Grundlage der simulierten Böden dar. Jedem Polygon ist eine Bodengesellschaft (GEN\_ID) zugeordnet, für die in der Sachdatenbank der BÜK die einzelnen Bodenprofile (BF\_ID) und deren prozentualer Anteil (FLANT\_SPAN) an der Bodengesellschaft als Spannweite angegeben sind. Für jedes Bodenprofil wiederum sind in der Sachdatenbank die verschiedenen Horizonte definiert.

Um von diesen definierten Horizonten auf RoGeR-Modellparameter zu gelangen, wird die von Steinbrich et al. (2018) Vorgehensweise genutzt. Hierbei werden für die definierten Horizonte in einem ersten Schritt, mithilfe der Pedotransferfunktionen von Wessolek et al. (2009), die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, die nutzbare Feldkapazität und die Luftkapazität abgeleitet. Zusätzlich wird der Horizont je nach seiner Eignung um als Basis des Bodenprofils angesehen zu werden, also ob der Feinboden als grundwasserbeeinflusst, Stauhorizont oder Gestein einzuordnen ist, eingeordnet.

Da RoGeR\_WB\_1D nur mit einem Bodenprofil ohne Horizontberücksichtigung arbeitet, werden weiterhin die verschiedenen Horizonte eines Bodenprofils auf ein gemeinsames Profil zusammengefügt. Hierbei wird zuerst der Grund des Feinbodens, und somit die Mächtigkeit des Bodenprofils hergeleitet. Dabei gilt die Oberkante des ersten Horizontes, der nach der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005) eins der Kürzel „C“ (Untergrundhorizont), „P“ (Ton-/Tonmergelgestein) oder „T“ (Lösungsrückstände aus Carbonat-Gestein) erhält, als Grund des Profils. Weiterhin gelten auch grundwasserbeeinflusste Horizonte, die die Kürzel „Sd“ (stauender Horizont) oder „W“ (durch Grundwasser beeinflusster Horizont) erhalten haben, als Grund des Bodenprofils, wobei die Hälfte der Mächtigkeit dieser Horizonte jedoch noch dem Bodenprofil zugeschlagen wird.

Bei einigen Bodenprofilen in der Sachdatenbank ist bereits der erste Horizont als Gestein definiert, obwohl darunter noch Feinboden liegt. Da es unwahrscheinlich erscheint, dass unter einer massiven Gesteinsschicht noch ein Bodenhorizont auftritt, ist davon auszugehen, dass es sich hierbei nicht um festes Gestein, sondern eher um groben Kies handelt. Da Grobkies auf den Wasserhaushalt keinen großen Einfluss hat, werden diese Bodenprofile „abgedeckt“, indem der oberste Horizont nicht berücksichtigt wird.



Anschließend wird für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die Luft- und Feldkapazität ein, je nach Horizontmächtigkeit gewichtetes, arithmetisches Mittel bestimmt. Da das perkolierende Wasser durch den Horizont mit der geringsten hydraulischen Leitfähigkeit am meisten zurückgehalten wird, wird für die Tiefenperkolation die im Bodenprofil minimal auftretende, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit herangezogen.

In der Sachdatenbank der BÜK ist für jedes Bodenprofil der Grundwassereinfluss als Grundwasserstufe (GWS) kategorisiert. Aus diesen Grundwasserstufen wird mit Hilfe der Tabelle A1, die im Anhang hinterlegt ist, der mittlere Grundwasserflurabstand ermittelt. Hierbei wird für Profile, die nicht durch Grundwasser beeinflusst sind, ein pauschaler Grundwasserflurabstand von 10 Meter angenommen. Bei dieser Tiefe ist davon auszugehen, dass das Grundwasser keinen Einfluss mehr auf die Wasserbilanz hat.

Die Makroporendichten werden, wie in Kapitel 3.2.4.4 erläutert wird, von der Landnutzung abgeleitet. Zu diesen Werten wird zusätzlich, wie bei Steinbrich et al. (2016), auf Basis des Skelettgehalts der Böden, ein Zuschlag für das Profil bestimmt. Hierbei wird für Skelettanteile zwischen 10 und 25 Volumen-% ein Zuschlag von 25 MP/m<sup>2</sup> und bei mehr als 25 Volumen-% ein Zuschlag von 50 MP/m<sup>2</sup> angenommen. Als maßgeblicher Horizont wird für die horizontale Makroporendichte der obere und für die vertikale Makroporendichte der unterste Horizont herangezogen. Abweichend davon wird für Torfböden die vertikale Makroporendichte pauschal auf 200 MP/m<sup>2</sup> gesetzt und die Landnutzung hierbei nicht berücksichtigt. Da Torfböden in der BÜK meist mit sehr geringen Durchlässigkeiten parametrisiert sind, würde ohne diese Makroporen zu viel hortonscher Oberflächenabfluss modelliert werden.

Für Bodenprofile, die in der BÜK als Moore definiert sind, also wo die Bodensubtyp-Bezeichnung mit H (natürliche Moore) oder K (Erd- und Mulmoore) beginnt, wird ein Muldenspeicher von 20 mm definiert. Dies ist durch die abflussverzögernde Struktur der Moore begründet. Für alle anderen Bodenprofile wird dieser Parameter auf 0 mm gesetzt.

Für die Anfangsbodenfeuchte (Theta) wird jeweils 80 % der Feldkapazität angenommen.

Diese Herleitung der Bodenparameter wurde durch Vergleiche mit Lysimeter-Daten durch Steinbrich et al. (2018) bereits validiert. Diese hat ergeben, dass über 10 Jahre aufsummierte Modellergebnisse der Grundwasserneubildung Abweichungen von unter 1 % zu den Lysimeter-Werten aufzeigten (Steinbrich et al. 2018).



Einige Bodenprofile in der BÜK-Sachdatenbank sind nicht definiert oder die Summe der angegebenen, mittleren Flächenanteile der Bodenprofile einer Bodengesellschaft ergibt keine 100 %. Daher wird der jeweilige Anteil eines Bodenprofils an der Bodengesellschaft neu bestimmt. Hierbei wird die Differenz der Summe der definierten, zur Summe der undefinierten Bodenprofile bestimmt. Jeder definierte Anteil eines Bodenprofils wird im Anschluss mit dem Quotienten von 100 zu dieser Differenz multipliziert, wie Gleichung (7) aufzeigt. Die Summe der undefinierten Bodenprofile wird zusätzlich als Variable abgespeichert, um beim Abrufen der Daten einen entsprechenden Hinweis ausgeben zu können.

$$BFID_{area} = FLANT_{MITT} * \frac{100}{\sum_{all} FLANT_{MITT} - \sum_{undefined} FLANT_{MITT}} \quad (7)$$

$BFID_{area}$ : Neu bestimmter Anteil des Bodenprofils an einer Bodengesellschaft in %  
 $FLANT_{MITT}$ : Mittlerer Anteil des Bodenprofils an einer Bodengesellschaft, der in der BÜK angegeben ist in %

### 3.2.4.2 Regionalisierung

Um von den Messwerten der zugeteilten Wetterstation auf die tatsächlichen Wetterreihen der Simulations-Polygone zu gelangen, wird eine Regionalisierung durchgeführt. Diese ergibt für jedes Simulations-Polygon ein Set an Wichtungsfaktoren.

Als Basis der Regionalisierung dienen die mehrjährigen Rasterdaten des DWDs (2011a, 2011b, 2011c). Diese weisen eine Auflösung von 1 x 1 km auf und wurden in drei Schritten bestimmt. Zuerst wurden die monatlichen Stationsmesswerte auf das Meeresniveau umgerechnet. Hierfür wurden für verschiedene Gebiete Regressionsgeraden, welche die topografische Höhe als Eingangs-Parameter haben, bestimmt. Diese wurden für die Temperatur und die Evapotranspiration für 10 Gebiete in Deutschland bestimmt. Beim Niederschlag wurde der erhöhten, regionalen Variabilität durch kleinere Gebiete (1° x 1°) gleicher Regressions-Gerade Rechnung getragen. Diese Regressionskoeffizienten wurden zwischen den jeweiligen Gebietsmittelpunkten interpoliert, um auf eine Regressionsgerade für eine Station zu kommen. Im zweiten Schritt wird ein 1 x 1 km Rasterdatensatz in der Ebene erstellt. Hierbei wurden die Rastermittelpunkte aus den monatlichen, auf Meeresniveau bezogenen Stationsmesswerten mit einer quadratischen, inversen Distanzwichtung bestimmt. Im letzten Schritt wurden diese Rasterzellen mit den interpolierten Regressionskoeffizienten auf deren jeweilige topografische Höhe erhöht. Der sich hieraus ergebende Rasterdatensatz wird anschließend auf den mehrjährigen Klimazeitraum aufsummiert. (Kaspar et al. 2013; Müller-Westermeier 1995)

Eine Validierung der Regionalisierungs-Raster des DWD durch Maier und Müller-Westermeier (2010) hat ergeben, dass die Temperatur in 90 % der Fälle geringere Abweichungen als 1°C und in 70 % der Fälle unter 0.5°C aufweisen. Die höchsten Abweichungen sind dabei in Gebirgen vorzufinden. Beim Niederschlag hat sich herausgestellt, dass sommerliche Starkregenereignisse etwas geglättet werden. Des Weiteren hängt die Güte der Regionalisierung mit der Höhe der Station zusammen. Im Vergleich mit anderen GIS bezogenen Regionalisierungs-Methoden, konnten diese jedoch keine treffenderen Ergebnisse als das DWD-Raster liefern.

Da die Stationsdatensätze bereits in Kapitel 3.2.1.5 auf diese Raster-Datensätze skaliert wurden, entspricht deren Mittelwert über den Simulationszeitraum dem der langjährigen Raster-Zelle in der die Station liegt. Daher kann die Bestimmung der Wichtungsfaktoren ausschließlich auf Basis der Rasterdatensätze stattfinden.

Für die Temperatur und die potenzielle Evapotranspiration werden jährliche Mittelwerte bestimmt. Dagegen werden für den Niederschlag halbjährliche Mittelwerte für das Sommer (April-September) und Winter-Halbjahr (Oktober-März) bestimmt. Hierfür werden die jeweiligen mehrjährigen, monatlichen DWD-Raster zuerst zu einem Sommer- und Winter-Raster aufsummiert.

Für jedes Simulations-Polygon wird mittels zonaler Statistik der Mittelwert des langjährigen DWD-Rasters bestimmt. Hierbei werden zuerst nur die Rasterzellen berücksichtigt deren Mittelpunkt im Polygon liegen. Konnte dieser Schritt keinen Wert liefern, werden weiterhin auch die Rasterzellen berücksichtigt, die das Polygon schneiden, also nur zu einem Teil im Polygon liegen.

Selbst nach diesen beiden Schritten gibt es Polygone, für die kein mehrjähriger Mittelwert bestimmt werden konnte. Diese liegen hauptsächlich am Rande Deutschlands und werden mit einer Umgebungssuche gefüllt. Hierfür wird das jeweilige Polygon in je 25 m Schritten vergrößert, bis schneidende Rasterzellen gefunden werden. Maximal wird allerdings im Umkreis von 4,5 km gesucht. Die Distanz bei der Rasterzellen gefunden wurden wird zusätzlich abgespeichert („WEA\_dist“), um später dem/der Benutzer\*in des Modells als Zusatzinformation ausgegeben zu werden.

Weiterhin bleiben 57 Simulations-Polygone für die kein Wert ermittelt werden kann. Durch Vergleich mit den Informationen der BÜK ist zu erkennen, dass es sich größtenteils um Watt-Böden handelt. Da auf diesen Böden keine urbane Siedlung zu erwarten ist, werden diese gelöscht.

Die übrigen 8 Polygone werden mit OSM als Kartengrundlage einzeln visualisiert, was in Karte A8 im Anhang hinterlegt ist. Dadurch ergibt sich, dass die meisten dieser Polygone im Meer liegen und ebenso vernachlässigt werden können. Einzig die Insel Greifswalder Oie wird behalten. Da bei dieser eine Wetterstation auf der kleinen Insel liegt, werden die Wetterkoeffizienten manuell auf eins, bzw. null für die Temperatur, gesetzt.

Da je nach Schritt, um einen mehrjährigen Mittelwert des Simulations-Polygons zu erlangen, die Güte der Regionalisierung abnimmt, werden diese mit einem Code markiert („WEA\_flag“). Dieser nimmt folgende Werte an:

0. Der mehrjährige Mittelwert des Wetters wurde aus inne liegenden Rasterzellen bestimmt.
1. Der mehrjährige Mittelwert des Wetters wurde aus schneidenden Rasterzellen bestimmt.
2. Der mehrjährige Mittelwert des Wetters wurde durch Rasterzellen aus der Umgebung hergeleitet.
3. Die Wetter-Wichtungs-Koeffizienten wurden manuell gesetzt.

In Tabelle 5 sind die jeweiligen Anteile der beschriebenen Herleitungsschritte am gesamten Datensatz aufgelistet. Hierbei ist zu erkennen, dass bei den meisten Simulations-Polygonen der erste und zweite Schritt ausreichend waren, um ein mehrjährigen Wetter-Mittelwert zu bestimmen. Nur bei weniger als 0,04 % der Fläche in Deutschland musste der zweite und dritte Schritt angewendet werden.

**Tabelle 5: Auflistung der verschiedenen Schritte zur Herleitung eines mehrjährigen Wetter-Mittelwertes und deren Anzahl und Flächenanteil am gesamten Simulations-Polygon-Datensatz.**

| <b>Wetter Code<br/>(„WEA_flag“)</b> | <b>Anzahl an<br/>Simulations-Polygonen</b> | <b>Flächenanteil in %</b> |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| <b>0</b>                            | 94.617                                     | 94,64                     |
| <b>1</b>                            | 35.647                                     | 5,33                      |
| <b>2</b>                            | 228                                        | 0,0358                    |
| <b>3</b>                            | 1                                          | 0,0002                    |
| <b>gelöscht</b>                     | 56                                         | 0,0484                    |

Die gewonnenen langjährigen Jahresmittelwerte der Temperatur, der Evapotranspiration und die halbjährlichen Mittelwerte des Niederschlags werden anschließend ins Verhältnis zu deren jeweiligem langjährigen Stationsmittelwert aus Kapitel 3.2.1.1 gesetzt. Hierbei werden die Wichtungsfaktoren nach den Gleichungen (2), (3) und (4) aus Kapitel 3.2.1.1 bestimmt.

### 3.2.4.3 Gefälle

Aus dem digitalen Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 80 x 80 m (EROS 2010) wird zu Beginn mit ArcGIS ein Rasterdatensatz mit dem prozentualen Gefälle bestimmt.

Äquivalent zu den Mittelwerten der langjährigen Wetterdaten aus Kapitel 3.2.4.2 werden auch die Mittelwerte des Gefälles aus dem Gefälle-Raster bestimmt. Zuerst werden also nur innen liegende Rasterzellen berücksichtigt und anschließend dann alle berührenden Rasterzellen.

Auch beim Gefälle liegen einige Polygone komplett außerhalb des Rasters und können nicht durch einfache zonale Statistik bestimmt werden. Einzelne Darstellungen der 83 Polygone mit OSM, wie sie auszugsweise in Karte 12 dargestellt sind, ergeben, dass es sich auch bei diesen Polygonen hauptsächlich um vernachlässigbare Watt-, Dünen- und Sandflächen im Meer handelt. Ausnahmen hiervon stellen einige Flächen nahe des Festlands wie z. B. die Hafenanlage in Simulations-Polygon 42962, dar. Diese werden manuell rausgesucht und wie in Kapitel 3.2.4.2 beschrieben mit Werten von Rasterzellen aus der Umgebung aufgefüllt. Hierbei ist die maximale Entfernung, in der nach einer Rasterzelle gesucht wird, 2 km, und die genutzte Entfernung wird in der Variable „SL\_dist“ abgespeichert.



**Karte 12: Auszug der Miniaturkarten der Simulations-Polygone die außerhalb des DGM-Rasters liegen.  
Kartenhintergrund: OpenStreetMap, Thema: OpenTopoMap**

Auch diese Schritte werden mit einer Variable („SL\_flag“) markiert, um später eine Auskunft beim Abrufen einer NatUrWB-Referenz ausgeben zu können. Diese nimmt folgende Werte an

0. Das Gefälle wurde aus innen liegenden Rasterzellen bestimmt.
1. Das Gefälle wurde aus schneidenden Rasterzellen bestimmt.
2. Das Gefälle wurde durch Rasterzellen aus der Umgebung hergeleitet. (<2 km)

In Tabelle 6 ist eine Übersicht dargestellt bei wie vielen Simulations-Polygonen welcher Schritt angewendet wurde und welchen Anteil diese am gesamten Datensatz ausmachen. Zu erkennen ist, dass beim Gefälle fast ausschließlich Rasterzellen mit inne liegendem Raster-Zentrum genutzt wurden. Dies liegt an der relativ hohen Auflösung des DGM-Rasters.

**Tabelle 6: Auflistung der verschiedenen Schritte zur Herleitung eines Gefälle-Mittelwertes und deren Anzahl und Flächenanteil am gesamten Simulations-Polygon-Datensatz.**

| <b>Gefälle Code<br/>(„SL_flag“)</b> | <b>Anzahl an<br/>Simulations-Polygonen</b> | <b>Flächenanteil in %</b> |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| <b>0</b>                            | 128.948                                    | 99,97                     |
| <b>1</b>                            | 1.439                                      | 0,0075                    |
| <b>2</b>                            | 6                                          | 0,0009                    |
| <b>gelöscht</b>                     | 77                                         | 0,0158                    |

#### 3.2.4.4 Landnutzungsparameter

Zusätzlich zu den bisher bestimmten Eingangsparametern für RoGeR, werden auch einige Parameter nur durch die Landnutzung definiert. Hierbei wird ein Datensatz an Eingangsparametern je RoGeR-Landnutzungs-ID definiert. Die verschiedenen Landnutzungen und deren ID („LANU\_ID“) sind hierbei folgende:

0. Felsen ohne Vegetation
2. Flächen mit spärlicher Vegetation
3. Strände- Dünen und Sandflächen
4. Heiden und Moorheiden / Wald-Strauch-Übergangsstadien
5. Nicht bewässertes Ackerland
6. Weinbauflächen
7. Obst- und Beerenobstbestände
8. Wiesen und Weiden / Natürliches Grünland
9. Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe
10. Laubwälder
11. Mischwälder
12. Nadelwälder
13. Sümpfe / Torfmoore

Bei den drei Landnutzungen für Wälder wird der Landnutzungs-Code für RoGeR\_WB\_1D auf die Landnutzung 8, natürliches Grünland, gesetzt und der Parameter „Bäume“ auf den jeweiligen Waldtyp. Hierdurch entstehen zwei Interzeptions-Speicher, einmal für den Waldboden und einmal für die Baumkronen. Bei allen anderen Landnutzungen wird der Parameter für die Bäume auf null, also kein separater Interzeptions-Speicher für Bäume, gesetzt.

Der Versiegelungsgrad wird für alle Landnutzungen auf 0 % gesetzt, da der „natürliche“, unversiegelte Zustand bestimmt werden soll. Eine Ausnahme hiervon ist die Landnutzung „Felsen ohne Vegetation“ (LANU\_ID = 0). Felsen stellen auch ohne zusätzliche Versiegelung bereits eine versiegelte Fläche dar und werden daher mit einem Versiegelungsgrad von 100 % simuliert.

Über die Makroporendichten und -längen werden in RoGeR\_WB\_1D die Infiltrationsprozesse durch die Makroporen parametrisiert. Diese hängen hauptsächlich von den Bodentieren, vor allem vom *Lumbricus terrestris* (Erdwurm), der Durchwurzelung und den bodenphysikalischen Eigenschaften ab (Steinbrich et al. 2016). Die bodenphysikalischen Eigenschaften beziehen sich zum einen auf die Eigenschaft des Bodens, je nach Wetter Schrumpfrisse auszubilden und zum anderen auf den Anteil des Skelettgehalts, der durch die im Kapitel 3.2.4.1 bestimmten Makroporen-Zuschläge abgebildet wird. Die Abschätzung der Durchwurzelung und der Bodentiere erfolgt, äquivalent zu Steinbrich et al. (2016), über die Landnutzung. Je nach Landnutzung werden die Makroporendichten in horizontaler ( $MPD_H$ ), sowie vertikaler Richtung ( $MPD_V$ ) und die Länge der vertikalen Makroporen ( $MPL_V$ ) definiert.

In Abweichung zu Steinbrich et al. (2018), wo jedes Polygon mit der darauf vorkommenden Landnutzung simuliert wird und die naturnahe Wasserbilanz aus den umliegenden, simulierten Flächen aggregiert wird, wird für die NatUrWB-Referenz die reale Fläche mit den verschiedenen Landnutzungen simuliert. Somit wird nur die Verteilung der Landnutzungen aus der Umgebung abgeleitet und nicht die Wasserbilanz. Dies ergibt eine genauere naturnahe Wasserbilanz, da Parameter wie das Gefälle und die Regionalisierung auch für das untersuchte Gebiet parametrisiert sind. Zusätzlich sind zukünftige Änderungen der Landnutzungsverteilung leichter einzubauen und das Modell somit zukunftsfähiger.

Hierfür werden die in Tabelle 7 zusammengefassten Parameter je Landnutzungs-ID mit den Parametern je Simulations-Polygon geschaufelt. So ergeben sich alle möglichen Landnutzungskombinationen für ein Simulations-Polygon. Um Rechenleistung zu sparen, werden jedem Simulations-Polygon jedoch ausschließlich die Landnutzungen zugewiesen, die auch in der gleichen Naturraumeinheit auf der gleichen Bodengesellschaft vorkommen. Hierfür wird im Nachschlagepolygon nach den jeweiligen Naturraumeinheiten und Bodengesellschaften gesucht und die daraus resultierenden Landnutzungen angenommen.

**Tabelle 7: Auflistung der Simulations-Parameter je Landnutzung ID. Der Landnutzungs-Code ist der Eingabewert für Roger, wohingegen die Landnutzungs-ID die tatsächliche Landnutzung kategorisiert. Die Werte der Makroporendichten und -längen stammen von Steinbrich et al. (2016)**

| Landnutzungs-ID<br>„LANU_ID“ | Landnutzungs-<br>Code | Bäume | Versiegelung<br>[%] | MPD <sub>V</sub><br>[MP/m <sup>2</sup> ] | MPL <sub>V</sub><br>[cm] | MPD <sub>H</sub><br>[MP/m <sup>2</sup> ] |
|------------------------------|-----------------------|-------|---------------------|------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| 0                            | 0                     | 0     | 100                 | 0                                        | 1                        | 0                                        |
| 2                            | 2                     | 0     | 0                   | 75                                       | 30                       | 125                                      |
| 3                            | 3                     | 0     | 0                   | 15                                       | 15                       | 15                                       |
| 4                            | 4                     | 0     | 0                   | 100                                      | 50                       | 125                                      |
| 5                            | 5                     | 0     | 0                   | 75                                       | 30                       | 125                                      |
| 6                            | 6                     | 0     | 0                   | 75                                       | 50                       | 125                                      |
| 7                            | 7                     | 0     | 0                   | 100                                      | 50                       | 125                                      |
| 8                            | 8                     | 0     | 0                   | 100                                      | 80                       | 125                                      |
| 9                            | 9                     | 0     | 0                   | 100                                      | 30                       | 125                                      |
| 10                           | 8                     | 1     | 0                   | 150                                      | 50                       | 150                                      |
| 11                           | 8                     | 2     | 0                   | 150                                      | 50                       | 150                                      |
| 12                           | 8                     | 3     | 0                   | 150                                      | 30                       | 150                                      |
| 13                           | 13                    | 0     | 0                   | 100                                      | 30                       | 125                                      |

Eine Ausnahme hiervon stellen die Bodenprofile dar, die als Boden einen massiven Felsen definiert haben. Da diese Flächen keine andere Landnutzung als die Landnutzung „Felsen“ (LANU\_ID = 0) zulassen, werden diese auch nur damit simuliert.

Weiterhin gibt es einige Simulations-Polygone, für die in der gleichen NRE und auf der gleichen Bodengesellschaft keine naturnahen Landnutzungen vorzufinden ist. Für diese Polygone werden alle 13 verschiedenen Landnutzungen simuliert.

Diese Prozesse werden mit einer Variable („LANU\_flag“) markiert, um später dem Ergebnis als Information hinzugefügt zu werden. Diese nimmt folgende Werte an:

0. Die Landnutzungsverteilung konnte aus der jeweiligen NRE abgeleitet werden.
1. Die Landnutzungsverteilung konnte nicht aus der jeweiligen NRE abgeleitet werden und alle 13 Landnutzungen wurden simuliert.
2. Die Landnutzungsverteilung wurde auf die Landnutzung 0, „Felsen ohne Vegetation“, fixiert.

### 3.2.5 Bestimmung der NatUrWB-Referenz

Die Simulationsergebnisse werden anschließend aufbereitet und in eine Datenbank geladen.

Der erste Schritt der Aufbereitung besteht darin, die 11-jährigen Simulationsergebnisse auf die Notwendigkeit eines Trainings-Jahres für die Bodenfeuchte hin zu untersuchen. Wie der Diskussion in Kapitel 5.2.3 zu entnehmen ist, wurde sich für ein Trainingsjahr entschieden. Somit wird das erste Jahr der Simulations-Ergebnisse gelöscht.

Aus den Ergebnissen der übrigen 10 Jahre werden die jährlichen Mittelwerte für die Tiefenperkolation, den Zwischenabfluss, den gesamten Oberflächenabfluss (OA) und die Evapotranspiration für jede Modell-Kombination bestimmt.

Da der Zwischenabfluss (ZA) je nach Gegebenheit zu schnellen Abflussreaktionen führt, kann dieser entweder dem Abfluss oder der Grundwasserneubildung (GWNb) hinzugezählt werden. Um die resultierenden NatUrWB-Referenzen nicht unerreichbar für Städte zu machen und dadurch die Akzeptanz der Zielsetzung „naturnahe Wasserbilanz“ für urbane Gebiete zu gefährden, wird der ZA nicht komplett der GWNb hinzugezählt. Grundwassernaher ZA wird dabei dem Abfluss hinzugezählt und somit grundwasserferner ZA der GWNb. Als grundwassernah werden dabei die Zwischenabflüsse der Profile, in denen der Grundwasserflurabstand kleiner als die Bodenmächtigkeit oder kleiner als 1 m ist, angenommen.

Die sich so ergebenden Komponenten für die GWNb, den Abfluss und die ET aller Simulationssets, werden, zusammen mit den Eingangs- und Legenden-Tabellen, in eine PostGIS-Datenbank geladen. Für das Abrufen einer NatUrWB-Referenz aus dieser Datenbank wird eine Python-Klasse („Query“) definiert, die diese Abfrage implementiert. Das Vorgehen dieser Python-Klasse wird im Folgenden erläutert.



Als Eingabe braucht das Modell ein Polygon, das innerhalb Deutschlands liegt und für das die NatUrWB-Referenz bestimmt werden soll. Mit diesem Eingabe-Polygon wird dann das Nachschlage-Polygon ausgeschnitten. Dadurch ergeben sich die verschiedenen Naturraumeinheiten (NRE) je Simulations-Polygon und deren Flächenanteil. Das Ergebnis dieses Ausschneidens wird im Folgenden „Nachschlage-Clip“ bezeichnet. Anschließend werden die einzelnen Simulations-Ergebnisse für das gewählte Gebiet und die benötigten Simulations-Polygon-Parameter aus der Datenbank geladen.

In einem nächsten Schritt werden die Simulations-Ergebnisse über die verschiedenen Kategorien aggregiert, um auf eine einzelne Wasserbilanz für das untersuchte Gebiet zu gelangen. Bisher liegen einzelne Ergebnisse für jede Kombination aus Simulations-Polygon, Bodenprofil und Landnutzung vor. Diese Aggregation teilt sich in 5 einzelne Aggregationen auf.

Als erstes werden die Ergebnisse über die Bodenprofile aggregiert. Hierfür wird der jeweilige Anteil des Bodenprofils an der Bodengesellschaft ( $BFID_{Area}$ ), der in Kapitel 3.2.4.1 bestimmt wurde, mit dem jeweiligen Ergebnis multipliziert und über die Simulations-ID und die Landnutzungs-ID aggregiert. So ergeben sich Ergebnisse je Simulations-Polygon- und Landnutzungs-Kombination.

Wenn allerdings für ein Bodenprofil nur die Landnutzung 0, Felsen ohne Vegetation, simuliert wurde (siehe Kapitel 3.2.4.4, LANU\_flag = 2), so wird der jeweilige Anteil des Bodenprofils an der Bodengesellschaft je nach Landnutzung neu bestimmt.

Als zweites werden die Ergebnisse über die Landnutzung aggregiert. Hierfür wird in den Nachschlage-Polygonen nach den NRE-Bodengesellschafts-Kombinationen gesucht, die im Nachschlage-Clip vorkommen. Dabei werden jedoch nur Polygone berücksichtigt, die eine naturnahe, also nicht urban geprägte Landnutzung definiert haben. Als naturnah werden dabei alle Landnutzungen angesehen, die einen CLC-Code von über 199 haben. Daraus ergibt sich die jeweilige Verteilung der naturnahen Landnutzungen je Bodengesellschaft und NRE.

Bei manchen Bodengesellschaft-NRE-Kombinationen ergeben sich jedoch keine naturnahen Landnutzungen, da z. B. auf allen Polygonen mit der gleichen Bodengesellschaft in der jeweiligen NRE eine urbane Nutzung stattfindet. Für diese wird in einem Umkreis um das Eingabe-Polygon nach naturnahen Landnutzungen auf der gleichen Bodengesellschaft gesucht. Hierfür wird das Eingabe-Polygon in 30 km Schritten bis maximal 120 km vergrößert und mit dem Nachschlage-Polygon überlagert bis sich eine Landnutzungsverteilung ergibt. Wird selbst damit keine Landnutzungsverteilung gefunden, wird dieses Polygon aus der weiteren Aggregation ausgeschlossen.

Anschließend werden die bisherigen Ergebnisse mit der jeweiligen Landnutzungsverteilung gewichtet aggregiert. So ergibt sich ein Ergebnis-Datensatz je Kombination aus Simulations-Polygon und NRE.

In einem dritten Schritt werden die Ergebnisse auf die Simulations-IDs aggregiert, indem der Anteil eines Simulations-Polygons je NRE aus dem Nachschlage-Clip ermittelt wird und als Wichtung dient. Daraus ergibt sich eine Wasserbilanz je Simulations-Polygon.

Als viertes werden die Anteile der Simulations-Polygone je Bodengesellschaft aus dem Nachschlage-Clip ermittelt. Damit gewichtet ergeben sich die einzelnen Wasserbilanzen je Bodengesellschaft.

Diese werden in einem letzten Schritt über die jeweilige Bodengesellschaft gewichtet gemittelt. Der Anteil, den eine Bodengesellschaft am Eingabe-Polygon ausmacht, wird aus dem Nachschlage-Clip ermittelt. Daraus ergibt sich die einzelne Wasserbilanz für das gewählte urbane Gebiet. Dies ist die NatUrWB-Referenz für das Eingabe-Polygon.

Zusätzlich zu den Aggregationen, erstellt die Query-Klasse zu jeder Anfrage ein Set an Nachrichten, die dem NatUrWB-Ergebnis hinzugefügt werden sollen, um die Güte der bestimmten Referenz einschätzen zu können. Ausgegeben werden Nachrichten zum Anteil des Eingabe-Polygons:

- das nicht simuliert wurde, also außerhalb der Simulations-Polygone liegt. Dies tritt z. B. in Grenzregionen oder bei Gewässerflächen auf.
- bei dem die Bodengesellschaft abgeändert wurde, da kein Haupt-Bodenprofil in der BÜK definiert war, und die jeweiligen Anteile der Schritte, die hierfür verwendet wurden. (Siehe Kapitel 3.2.2.1)
- für das in der BÜK keine sekundären Bodenprofile definiert waren ( $BFID_{undef}$ ) und die somit nicht berücksichtigt wurden. (Siehe Kapitel 3.2.4.1)
- für das keine naturnahe Landnutzungen in der gleichen NRE auf gleicher Bodengesellschaft gefunden wurde. Zusätzlich wird der Anteil wiedergegeben, für den mittels Umkreissuche eine naturnahe Landnutzungsverteilung gefunden werden konnte, mitsamt der hierfür verwendeten mittleren Distanz und für welchen Anteil dies nicht möglich war. (Siehe gleiches Kapitel weiter oben)
- bei dem die Landnutzung abgeändert wurde indem ein Bodenprofil nur für die Landnutzung 0, „Felsen ohne Vegetation“, simuliert wurde. („LANU\_flag“ = 2, siehe Kapitel 3.2.4.4)

- bei dem das Gefälle nicht aus einem Rastermittelpunkt des DGM bezogen werden konnte und die jeweiligen Anteile der verwendeten Schritte zum Beziehen eines Gefällewertes. (Siehe Kapitel 3.2.4.3)
- bei dem die Regionalisierung des Wetters nicht aus einem Zellen-Mittelpunkt des DWD-Rasters bezogen werden konnte und die jeweiligen Anteile der verwendeten Schritte zum Festlegen der Wichtungsfaktoren. (Siehe Kapitel 3.2.4.2)
- bei dem die Standardabweichung des bestimmten Mittelwertes des mehrjährigen Klimaparameters aus dem DWD-Raster über einem Grenzwert liegt und dessen maximaler Wert. Dabei ist der gewählte Grenzwert 0,5°C für die Temperatur, 25 mm/a für die Evapotranspiration und jeweils 40 mm/6 Monate für den Sommer-, bzw. Winter-Niederschlag. Die Parameter werden dabei einzeln aufgelistet. (Siehe Kapitel 5.2.1)
- bei dem die Standardabweichung des ermittelten Mittelwertes für das Gefälle aus dem DGM80 größer als 20 %-Punkte ist. (Siehe Kapitel 5.2.2)
- für das bei dem Bestimmen eines mehrjährigen Mittelwertes des Wetters ein besonderer Schritt unternommen wurde. (Siehe Station 1759 & 2236 in Kapitel 3.2.1.1)

Weiterhin implementiert die Query-Klasse die Standard-Visualisierungen der Ergebnisse, die in Kapitel 4.2.4 dargestellt werden.

### 3.3 Städtevergleich

Um die Variabilität der in Deutschland auftretenden NatUrWB-Referenzen zu untersuchen, werden für alle 82 Großstädte Deutschlands (Statistisches Bundesamt 2020a), also Städte mit mehr als 100.000 Einwohner\*innen, deren NatUrWB-Referenz bestimmt. Für diese 82 Städte werden die Polygone der Verwaltungsgrenze von OpenStreetMap bezogen. Für jedes dieser Polygone wird ein NatUrWB-Referenzwert abgefragt und miteinander verglichen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Voruntersuchungen

#### 4.1.1 Zeitauflösung und Zeitspanne

Es werden zwei Parameter, die Zeitauflösung und die Zeitspanne untersucht. Um die Variabilität einzeln zu betrachten werden die Ergebnisse gruppiert. Hierfür wird jeweils für den nicht betrachteten Parameter das anzunehmende beste Ergebnis genommen. Dies ist für die Zeitspanne 12 Jahre, da eine längere Zeitdauer zu genaueren Ergebnissen führt und für die Zeitauflösung 10-minütig, da dies die genaueste Auflösung und die Standard-Auflösung von RoGeR ist.

Des Weiteren wird die relative Differenz des Ergebnisses zum besten Durchgang, also dem Durchgang mit einer Zeitspanne von 12 Jahren und einer Zeitauflösung von 10 Minuten je Boden und Wetterstation bestimmt. Dies ist in Gleichung (8) exemplarisch für die Evapotranspiration dargestellt. Die Ergebnisse des besten Durchgangs werden somit als am nächsten an der Realität angenommen.

$$\frac{ET_{sim} - ET_{best}}{ET_{best}} \quad (8)$$

$ET_{sim}$ : jeweilige simulierte Evapotranspiration  
 $ET_{best}$ : beste simulierte Evapotranspiration (10-minütige Zeitauflösung des Niederschlags und 12 Jahre Zeitspanne der Wetterdaten) für gleichen Boden und Wetterstation

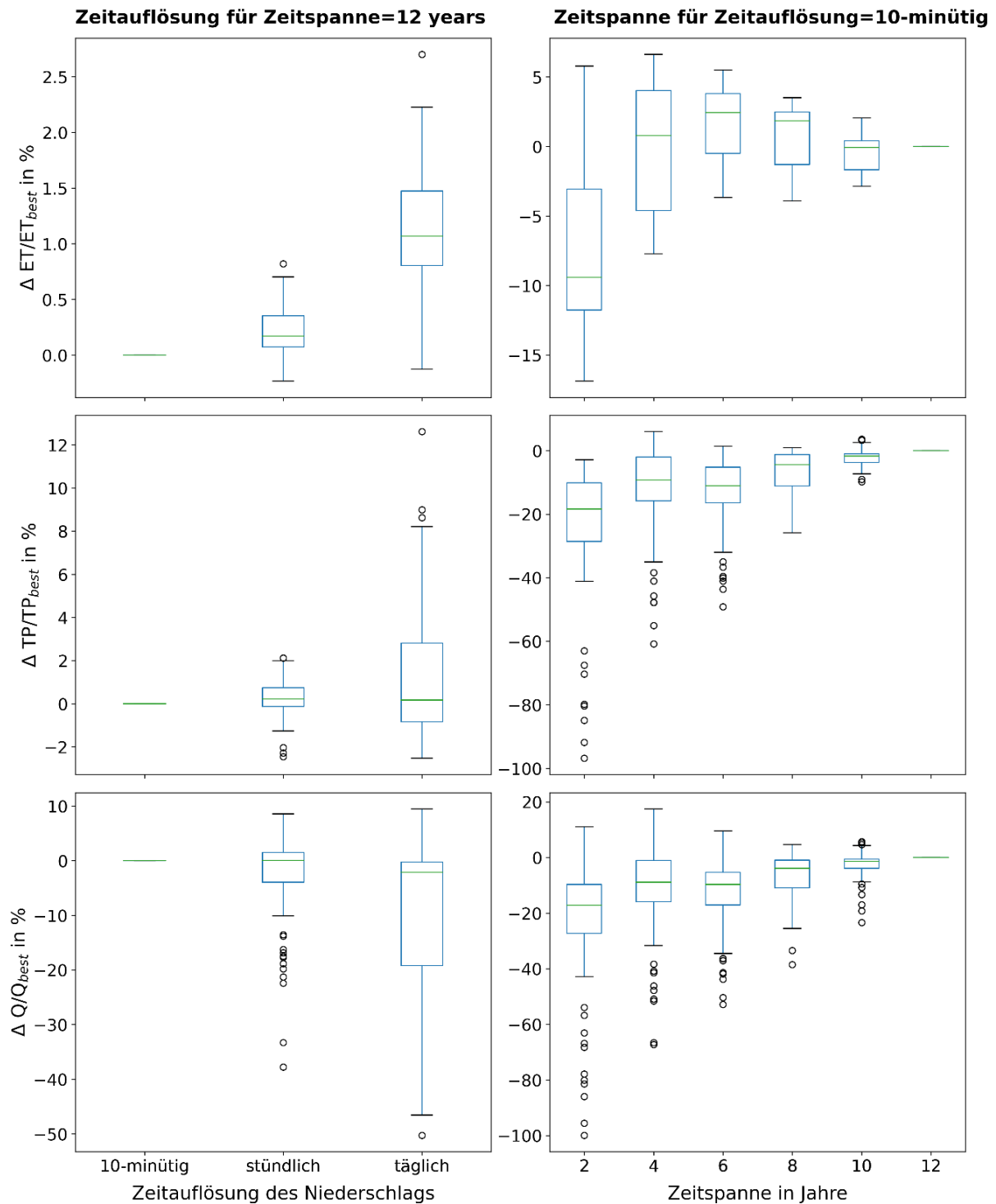
Zur Beurteilung der Sensitivität werden die Parameter Evapotranspiration (ET), Abfluss (Q) und Tiefenperkolation (TP) betrachtet. Der Zwischenabfluss (ZA) wird hier zum Abfluss hinzugezählt. Die relativen Abweichungen der einzelnen Simulationen werden als Boxplots in Abbildung 8 dargestellt.

Abbildung 8 zeigt, dass die relativen Abweichungen der Ergebnisse mit geringerer Zeitauflösung der Niederschlagsdaten steigen.

Die ET streut bei einer stündlichen Auflösung von -0,2 % bis 0,8 %. Bei einer täglichen Auflösung streut ET von -0,1 % bis 2,7 %, wobei der Interquartilsbereich (IQB) zwischen 0,8 % und 1,5 % liegt. Mit größerer Zeitauflösung nimmt die simulierte ET leicht zu.

Bei der TP steigt die Streuung der Ergebnisse von -2,5 % bis 2,1 % bei stündlicher Auflösung auf -2,5 % bis 12,6 % bei täglicher Auflösung an. Bei größerer Auflösung verlagern sich die TP-Simulationsergebnisse demnach in den positiven Bereich, es wird also mehr TP simuliert.

Der Abfluss zeigt bei einer stündlichen Auflösung relative Abweichungen von -37,8 % bis 8,6 % und bei einer täglichen Auflösung von -50,3 % bis 9,5 % zum besten Durchgang. Die Simulationsergebnisse für größere Zeitspannen verlagern sich beim Abfluss hauptsächlich in den negativen Bereich.



**Abbildung 8: Boxplots der relativen Abweichungen zum besten Durchgang der Voruntersuchung je Zeitspanne der Wetterdaten und Zeitauflösung der Niederschlagsdaten für ET, TP und Abfluss.**

Mit sinkender Zeitspanne der Wetterdaten gibt es eine Zunahme der Variabilität der drei Größen ET, TP und Abfluss.

Die Variabilität der relativen Abweichungen der ET liegt bei einer Zeitspanne von 2 Jahren zwischen -16,9 % und 5,8 %. Bei 10 Jahren ist sie noch bei -2,9 % bis 2,1 %. Von 2 auf 6 Jahre verringert sich der Medianwert der relativen Abweichung von -9,4 % auf 2,4 %. Bei längeren Wetterdaten sinkt der Medianwert anschließend langsam. Bei einer Zeitspanne von 10 Jahren liegt er dann bei -0,1 %.

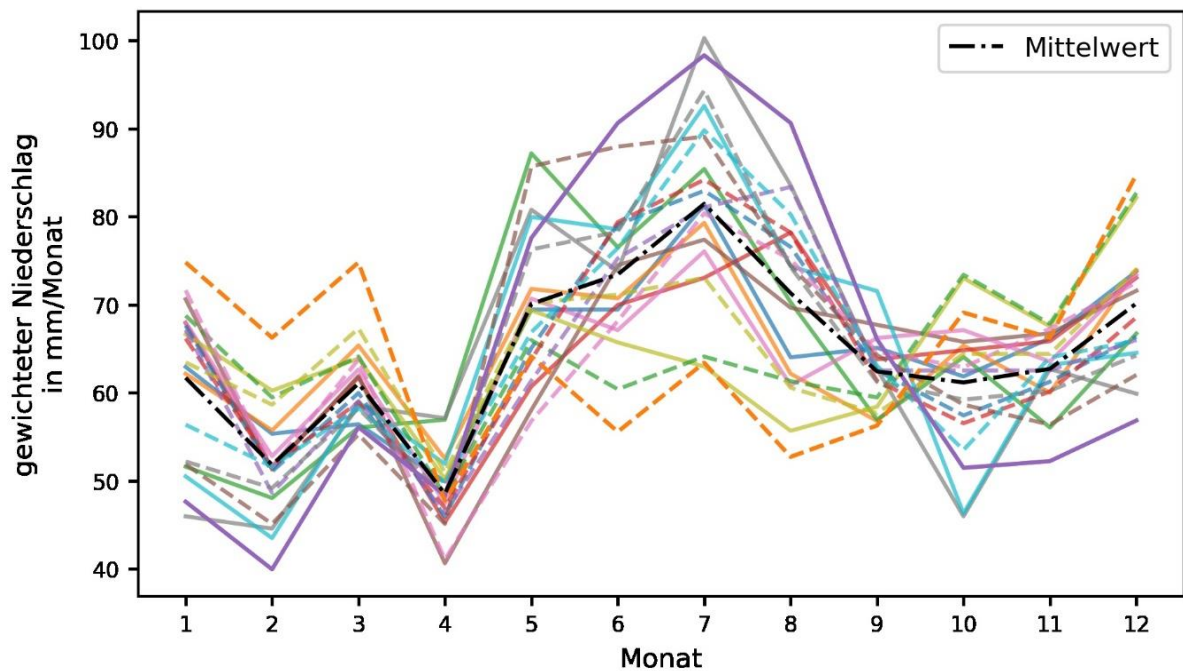
Für die TP gibt es Ausreißer der relativen Abweichung zum besten Durchgang, die einen Bereich von -96,8 % bis -2,9 % bei 2 Jahren Wetterdaten aufspannen. Dieser verkleinert sich mit steigender Zeitspanne auf -9,8 % bis 3,6 % bei 10 Jahren Wetterdaten. Der IQB hingegen spannt einen Bereich von -28,6 % bis -10,1 % bei 2 Jahren auf und verkleinert sich stetig bis auf -3,8 % bis -1,0 % bei 10 Jahren Wetterdaten.

Die Ergebnisse des Abflusses haben bei 2 Jahren Wetterdaten noch Abweichungen von -100,0 % bis 11,1 % und einen IQB von -27,4 % bis -9,7 %. Dieser Bereich verkleinert sich mit steigender Anzahl an Jahren der Wetterdaten bis auf einen Bereich von -23,4 % bis 5,7 % und einen IQB von -3,9 % bis -0,6 % bei 10 Jahren.

Die absoluten Abweichungen zum besten Durchgang sind in Abbildung A1 im Anhang dargestellt.

#### **4.1.2 Sommer-/Winter-Wichtung des Niederschlags**

Der Jahresverlauf der gewichteten mehrjährigen Monatsmittelwerte des Niederschlags der 20 zufälligen Punkte wurde in Abbildung 9 dargestellt. Zusätzlich zu den Verläufen wurde für jeden Monat der Mittelwert aus allen Verläufen bestimmt und dargestellt.



**Abbildung 9:** Diagramm der mehrjährigen monatlichen Mittelwerte des Niederschlags am gleichen fiktiven Punkt, der durch eine jährliche Wichtung aus 20 zufälligen Stationen bestimmt wurde.

Hierbei ist zu erkennen, dass einige Verläufe in den Wintermonaten im untersten Bereich der Linien sind, aber in den Sommermonaten im oberen Bereich. So ist z. B. die violette Linie im Februar mit etwa 40 mm/Monat der Verlauf mit dem niedrigsten Niederschlag, aber von Juni bis August mit über 90 mm/Monat unter den zwei höchsten.

Umgekehrt gibt es einige Verläufe, die in den Wintermonaten wesentlich höhere Niederschläge als der Mittelwert besitzen, dafür im Sommer aber unter den niedrigsten sind. So hat z. B. die gestrichelte orangene Regionalisierung von Dezember bis März am meisten Niederschlag von allen mit um die 70 mm/Monat, aber von Juni bis September am wenigsten mit um die 60 mm/Monat.

Beim Betrachten der einzelnen Linien ist zu erkennen, dass die meisten um den März-April, bzw. September-Oktober, die Seite zum Mittelwert wechseln.

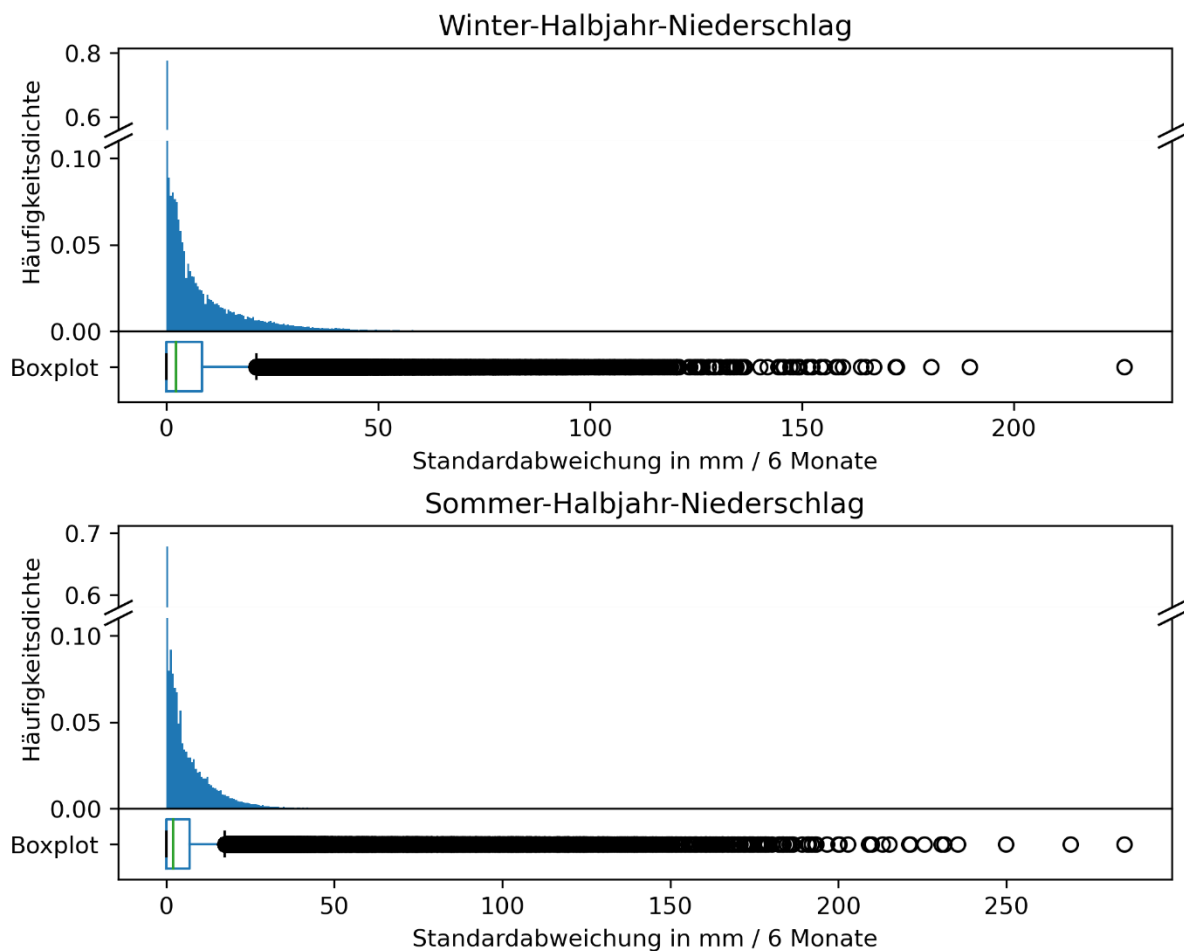
Im Juli zeigt sich die höchste Variabilität der verschiedenen Regionalisierungen mit einer Spannweite von um die 40 mm/Monat.

## 4.2 NatUrWB-Modell

Im folgenden Kapitel wird auf einige Ergebnisse der Datengrundlage des NatUrWB-Modells eingegangen und anschließend das Ergebnis des Modells selbst, anhand der Stadt Freiburg dargestellt.

### 4.2.1 Variabilität der Regionalisierung

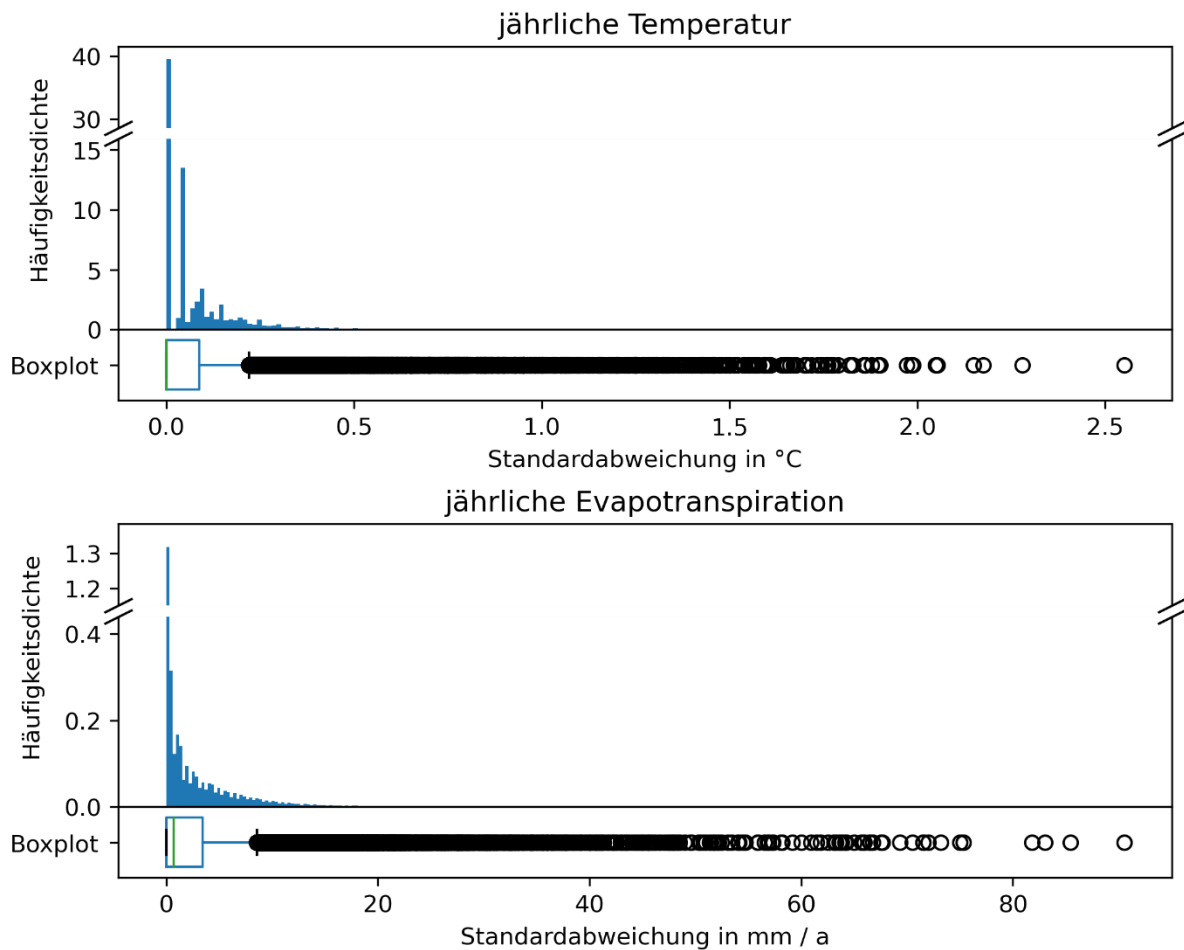
Wie Kapitel 3.2.4.2 beschreibt, wird die Regionalisierung der Klimastations-Wetterdaten auf Grundlage der Mittelwerte je Simulations-Polygon, die aus dem jeweiligen mehrjährigen DWD-Raster bezogen wurden, berechnet. Daher ist für die Güte der Regionalisierung die Variabilität innerhalb eines Simulations-Polygons ausschlaggebend. Hierfür wurde die jeweilige Standardabweichung der bestimmten Mittelwerte mit zonaler Statistik bestimmt.



**Abbildung 10:** Dichte-Histogramm und Boxplot der Standardabweichungen des mehrjährigen Sommer- und Winter-Niederschlags je Simulations-Polygon.



Abbildung 10 zeigt die Variabilität der Standardabweichungen zum mehrjährigen Mittelwert des Sommer-, bzw. Winter-Niederschlags je Simulations-Polygon an. Dabei zeigt sich, dass bei 75 % der Simulations-Polygone eine Standardabweichung von weniger als 8,5 mm / 6 Monate (Winterhalbjahr), bzw. 7 mm / 6 Monate (Sommerhalbjahr) auftreten. Unter 50 mm / 6 Monate Standardabweichung weisen je 98,5 % (Winterhalbjahr), bzw. 98,6 % (Sommerhalbjahr) der Polygone auf. Maximal erstrecken sich die Standardabweichungen für das Winterhalbjahr bis 226 mm / 6 Monate, bzw. bis 285 mm / 6 Monate für das Sommerhalbjahr.



**Abbildung 11: Dichte-Histogramm und Boxplot der Standardabweichungen der mehrjährigen jährlichen Temperatur und Evapotranspiration je Simulations-Polygon.**

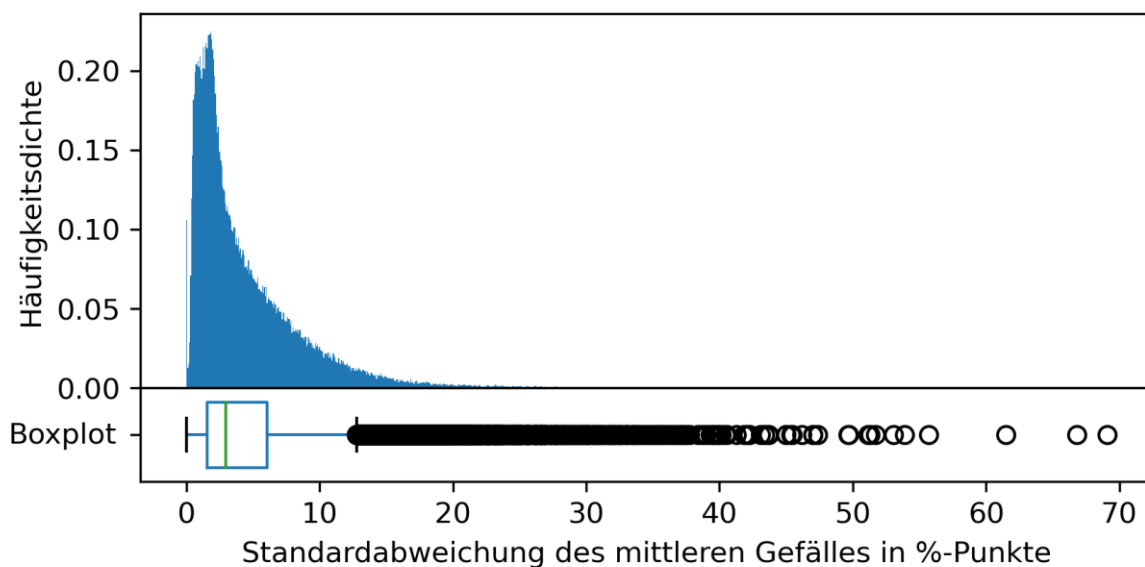
Abbildung 11 zeigt die Variabilität der Standardabweichungen zum mehrjährigen, jährlichen Mittelwert der Temperatur bzw. der Evapotranspiration.

Bei der Temperatur ist die maximale Standardabweichung 2,55°C für ein Simulations-Polygon. 75 % der Polygone haben eine kleinere Standardabweichung als 0,088°C. Eine kleinere Standardabweichung als 0,25°C weisen 93,4 % der Polygone auf.

Bei der potenziellen Evapotranspiration beträgt die maximale Standardabweichung zum mehrjährigen jährlichen Mittelwert eines Simulations-Polygons 90,5 mm/a. 75 % der Polygone haben eine Standardabweichung von weniger als 3,42 mm/a. Weniger als 10 mm/a Standardabweichung weisen 93,7 % der Polygone auf.

#### 4.2.2 Variabilität des Gefälles

Beim Beziehen eines mittleren Gefällewertes aus dem DGM80, was in Kapitel 3.2.4.3 beschrieben wurde, wird zusätzlich auch die Standardabweichung vom Mittelwert bestimmt. Diese gibt Ausschluss über die Variabilität des Gefälles innerhalb eines Simulations-Polygons und daher auch über die Güte der für dieses Gebiet bestimmten Wasserbilanz-Komponenten.



**Abbildung 12: Histogramm mit der Häufigkeitsdichte und Boxplot der Standardabweichungen des Gefälles je Simulations-Polygon.**

In Abbildung 12 ist die Variabilität des Gefälles innerhalb der Simulations-Polygone als Dichteverteilung und als Boxplot dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass 75 % der Simulations-Polygone eine Standardabweichung von weniger als 6,05 %-Punkte aufweisen. Weiterhin haben 90,33 % der Polygone eine geringere Standardabweichung als 10 %-Punkte. Die Ausreißer dieser Verteilung weisen Standardabweichungen von bis zu 69,10 %-Punkten auf.

### 4.2.3 Trainingsjahr für die Bodenfeuchte

Eine willkürliche Auswahl von 340 Modellkombinationen, der über 11 Jahre simulierten monatlichen Bodenfeuchten, ist in Abbildung 13 dargestellt. Dies sind alles Böden um die DWD-Wetterstation 44, also in der Nähe von Oldenburg/Bremen. Diese zeigen alle zu Beginn der Simulation einen Anstieg an. Weiterhin ist ein Jahresverlauf zu erkennen.

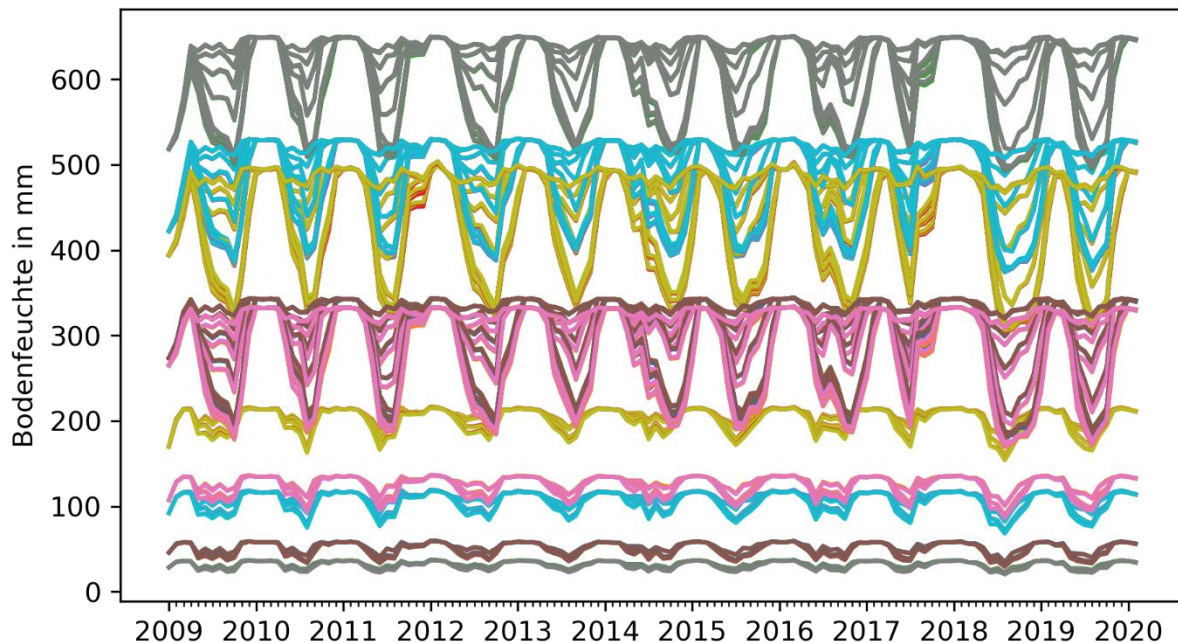
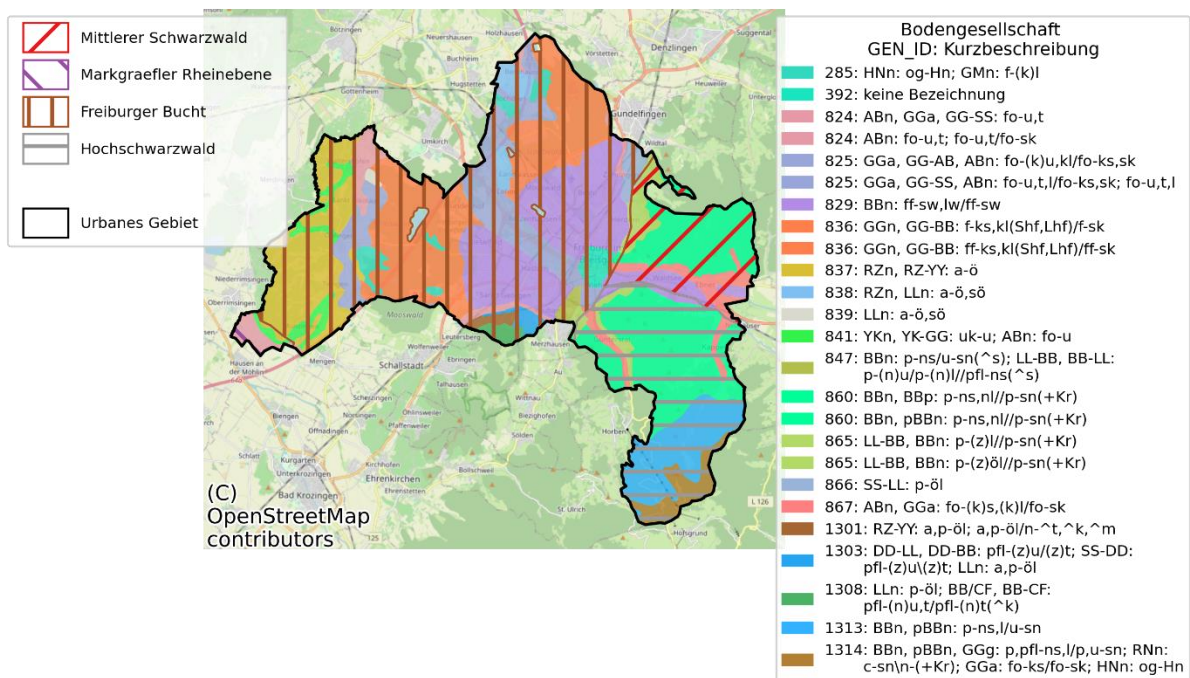


Abbildung 13: Auszug der Verläufe (340 Stk.) der durch RoGeR\_WB\_1D simulierten, monatlichen Werte der Bodenfeuchte über die 11 Simulationsjahre.

### 4.2.4 Ausgabe des NatUrWB-Modells am Beispiel Freiburg

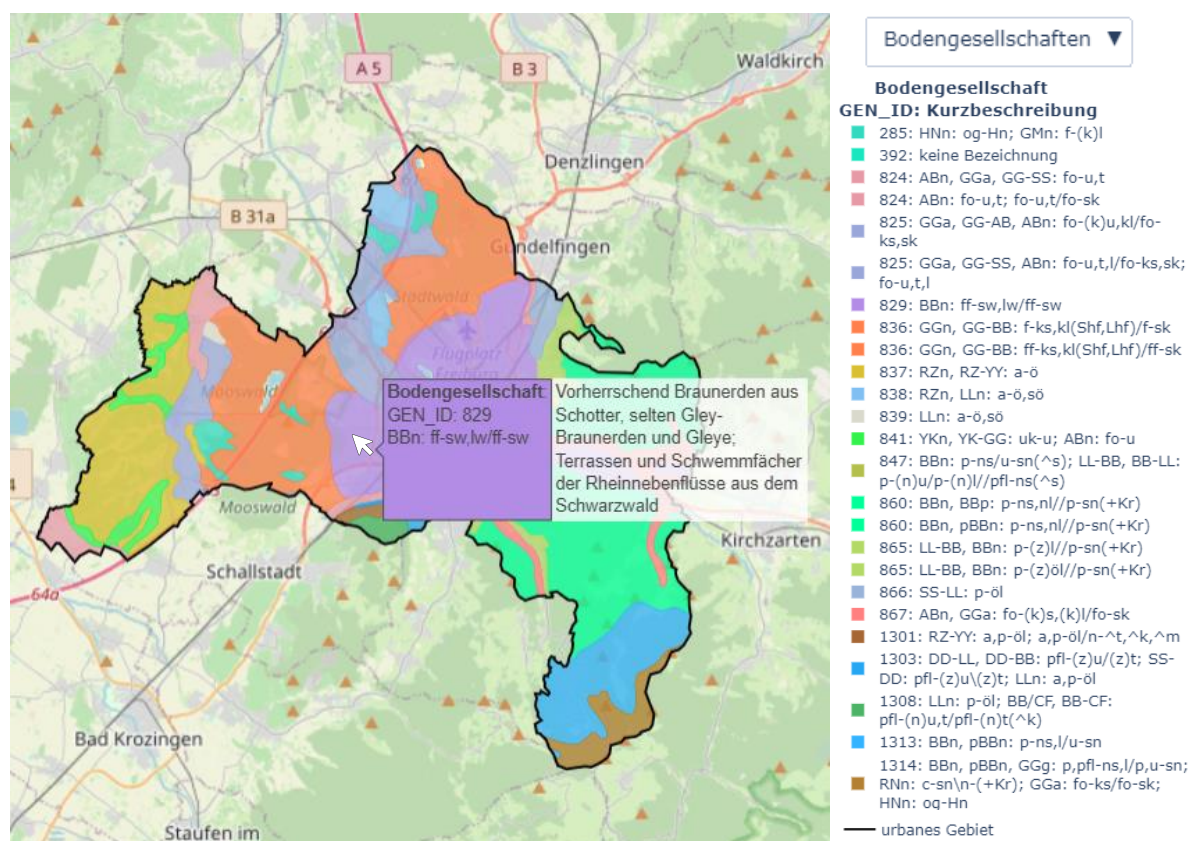
Um das Ergebnis des NatUrWB-Modells darzustellen, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse und die Standardabbildungen für die Stadt Freiburg dargestellt. Die Stadtgrenze wurde dabei von OpenStreetMap bezogen und zeichnet die administrative Grenze der Stadt auf. Diese Abbildungen und Karten sind auch in dem interaktiven Webtool integriert und bilden das Ergebnis beim Abfragen einer NatUrWB-Referenz. Dieses Webtool ist unter [www.naturwb.de](http://www.naturwb.de) zu finden.

Die erste Karte (Karte 13) zeigt die in dem untersuchten Gebiet vorkommenden Böden. Es ist zu erkennen, dass im Freiburger Stadtkern hauptsächlich Braunerden auf Schotter vorkommen, wogegen an den Gebirgsrändern des Schwarzwaldes, wie dem Kybfelsen, hauptsächlich Braunerden aus sandig lehmigen Schuttdecken definiert sind. Zum Kaiserstuhl (Osten) hin sind einige Gleye und Gley-Braunerden definiert. Zusätzlich zeigt die Karte schraffiert die Naturraumeinheiten, die in dem Gebiet vorkommen.



**Karte 13: Darstellung der Naturraumeinheiten und der Bodentypen der Stadt Freiburg (Nachschlage-Clip).**

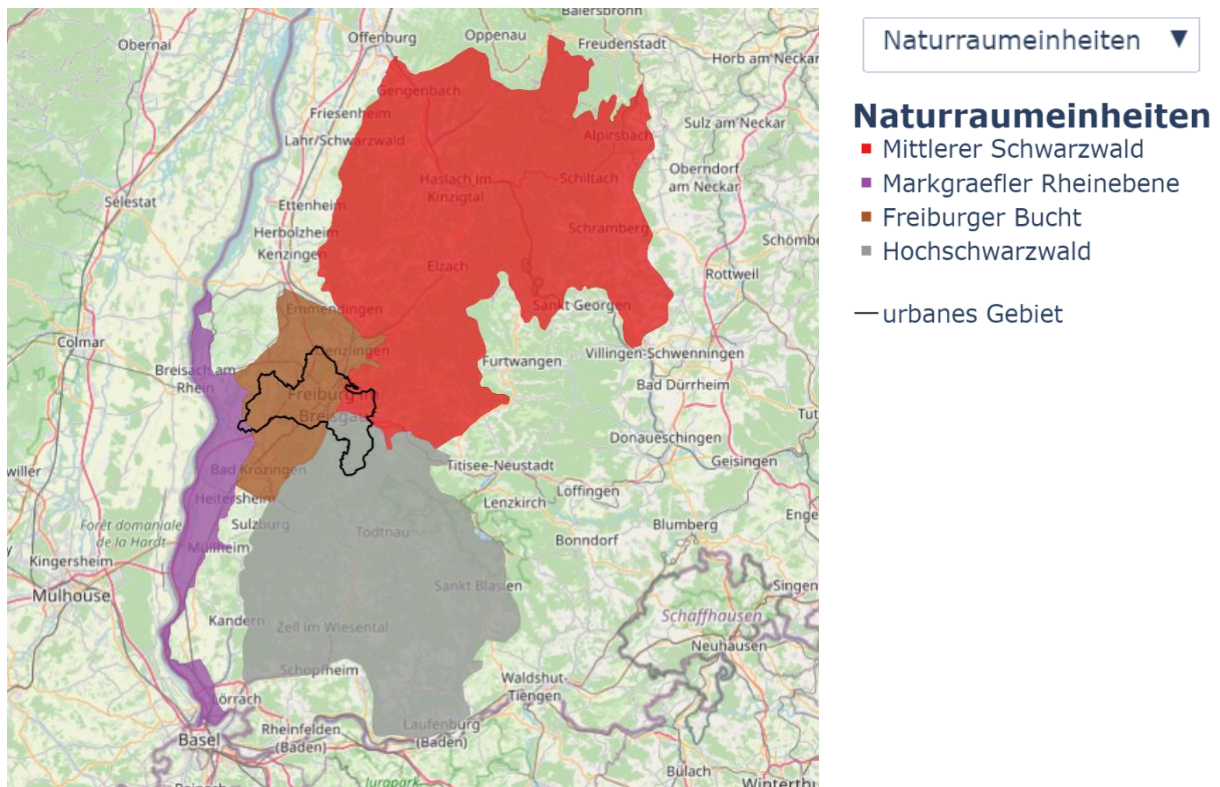
Da diese statische Darstellung mit den Kürzeln der Bodentypen nur wenigen Menschen ersichtlich ist, wird im Webtool auf diese verzichtet und dafür eine interaktive Karte gezeigt, bei der beim Überfahren mit der Maus weitere Erläuterungen als Text in einer Informationsbox erscheinen. Ein Auszug hiervon ist in Karte 14 dargestellt.



**Karte 14: Darstellung der Bodengesellschaften der Stadt Freiburg; Auszug der interaktiven Karte mit Informationskasten. Kartengrundlage: OpenStreetMap**

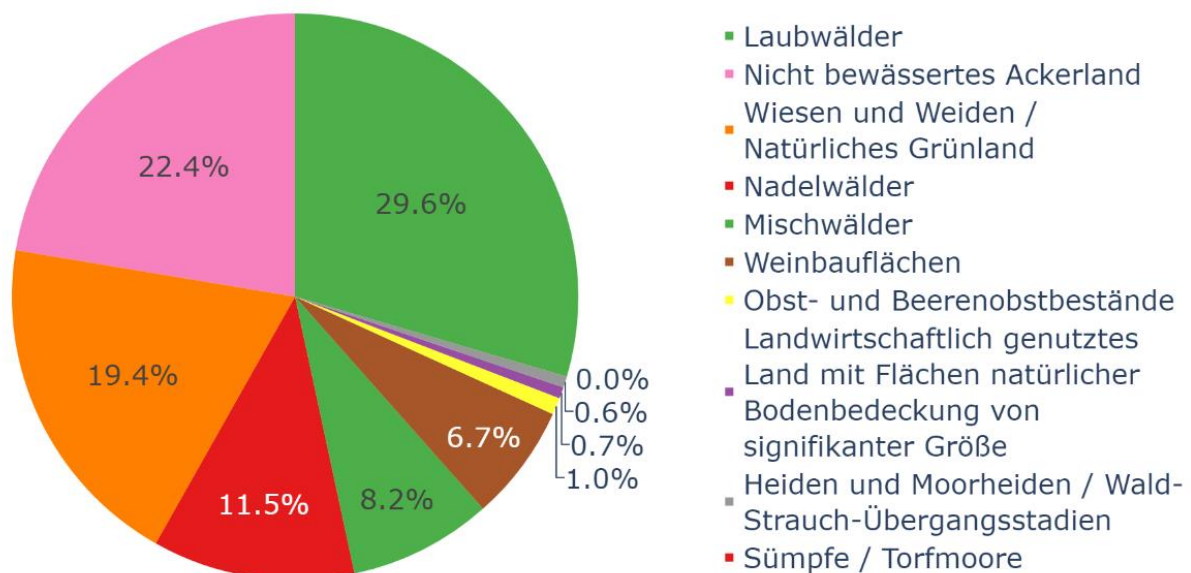


Desweiteren lässt sich diese Karte auf die Darstellung der vorkommenden Naturraumeinheiten umschalten, wie in Karte 15 dargestellt. Darin sind für die Stadt Freiburg die vier NRE, Mittlerer Schwarzwald, Hochschwarzwald, Freiburger Bucht und Markgräfler Rheinebene und deren ganze Ausdehnung zu erkennen. In diesen wird nach der naturnahen Landnutzungsverteilung für die jeweiligen Böden gesucht. Dabei ist zu erkennen, dass sich das Gebiet für Freiburg, in dem nach Landnutzungen gesucht wird, von der Schweizer Grenze bis nach Ofenburg erstreckt.



**Karte 15: Darstellung der Naturraumeinheiten der Stadt Freiburg in der ganzen Ausdehnung. Kartengrundlage: OpenStreetMap**

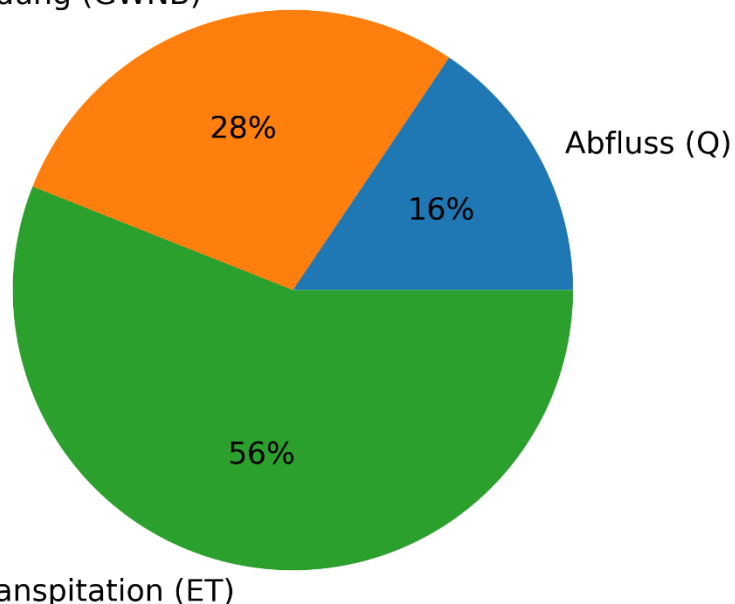
Aus den Bodengesellschaften und den NRE ergeben sich, wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben, die Landnutzungsverteilung für jedes Simulations-Polygon. Aggregiert man diese Verteilung auf das untersuchte Gebiet, so erhält man für die Stadt Freiburg die allgemeine, naturnahe Landnutzungsverteilung, die in Abbildung 14 dargestellt ist. Diese zeigt die ermittelte naturnahe Landnutzungsverteilung an. Wäre keine Urbanisierung in dem Gebiet, so wird davon ausgegangen, dass sich diese Landnutzung einstellen würde. Für Freiburg wäre demnach 29,6 % der Fläche Laubwald, 22,4 % nicht bewässertes Ackerland und 19,4 % Wiesen und Weiden, bzw. Grünland.



**Abbildung 14:** Tortendiagramm der allgemeinen naturnahen Landnutzungsverteilung für die Stadt Freiburg.

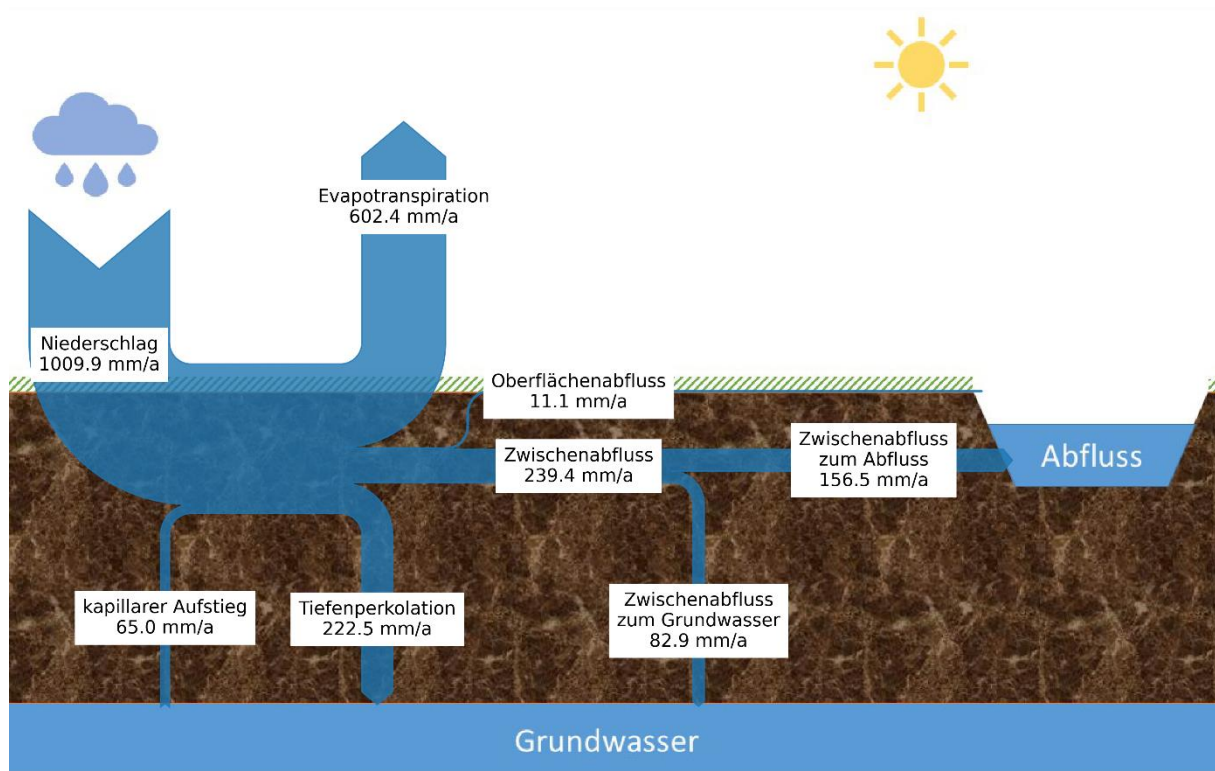
Aus der ermittelten Landnutzungsverteilung für jedes Bodenprofil, ergibt sich für jedes Bodenprofil eine Wichtung der einzelnen Modellergebnisse. Durch Aggregieren der Ergebnisse mit den jeweiligen Landnutzungen und Flächenanteilen, wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben, ergibt sich die NatUrWB-Referenz für die Stadt Freiburg. Dieser Referenzwert ist in Abbildung 15 dargestellt und weist 56 % Evapotranspiration, 28 % Grundwasserneubildung und 16 % Abfluss auf.

Grundwasserneubildung (GWNB)



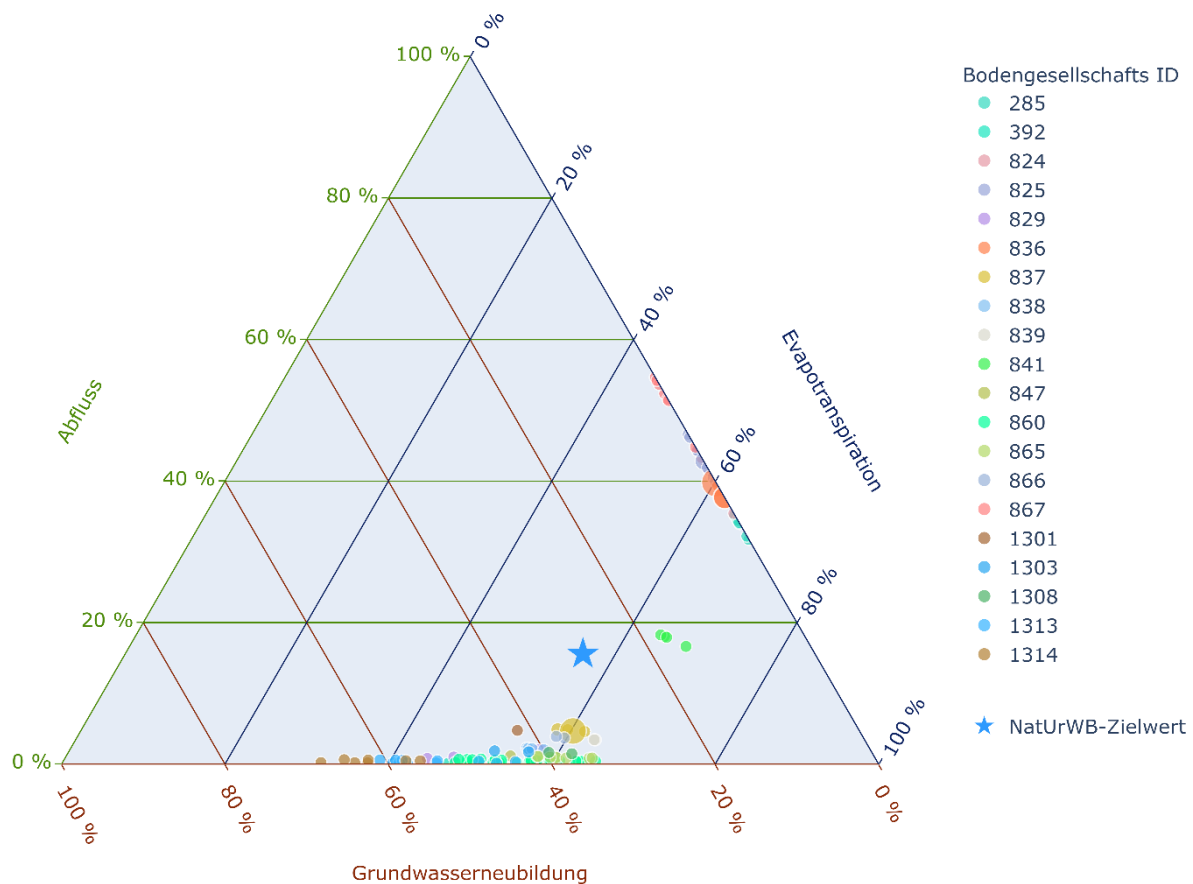
**Abbildung 15:** Tortendiagramm der NatUrWB-Referenz für die Stadt Freiburg.

Um zu einem besseren Verständnis der einzelnen Teile dieser NatUrWB-Referenz beizutragen, werden die Ergebnisse weiterhin in einem Stoffflussdiagramm, Abbildung 16, dargestellt. In diesem sind die jährlichen Summen der einzelnen Komponenten dargestellt. So sind auf der linken Seite die Eingangs-Wasserflüsse, Niederschlag und kapillarer Aufstieg und auf der rechten Seite die ausgehenden Komponenten der Wasserbilanz dargestellt. Diese Darstellung zeigt auch den Anteil des Zwischenabflusses an, der dem Abfluss, bzw. der GWNB hinzugezählt wird. Für Freiburg wird demnach 65,4 % des ZA dem Abfluss hinzugezählt.



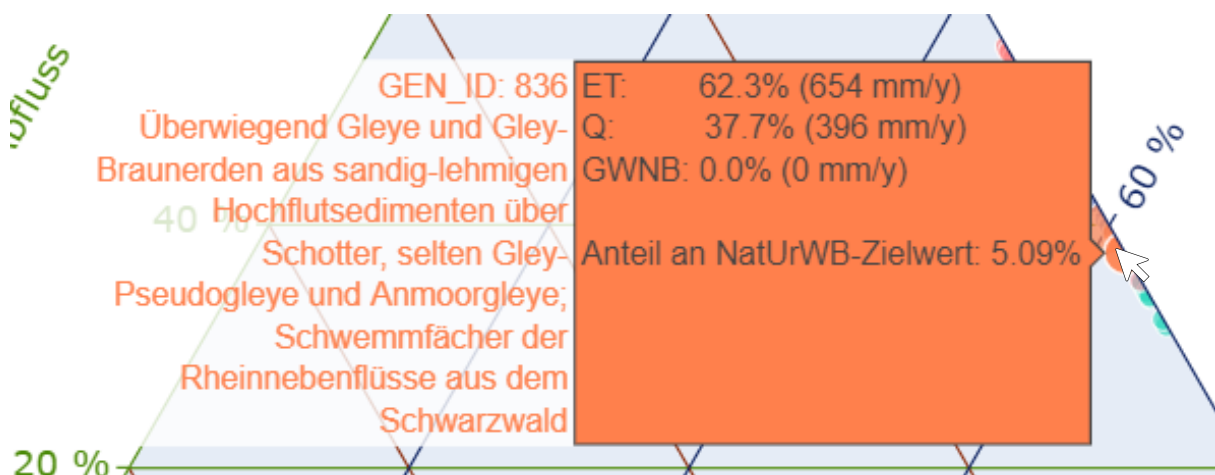
**Abbildung 16: Stoffflussdiagramm der jährlichen Modellergebnisse für die Stadt Freiburg.**

Das erhaltene Ergebnis sollte jedoch nicht als starrer Zielwert, sondern eher als einen Bereich, dem man sich annähert, angesehen werden. Um diesen Bereich darzustellen, werden die einzelnen Ergebnisse der Simulations-Polygone, zusätzlich zum NatUrWB-Referenzwert in einem Dreiecksdiagramm dargestellt. Diese Darstellung, die in Abbildung 17 aufgezeigt ist, ermöglicht es, die Ergebnisse der einzelnen Bodengesellschaften untereinander zu vergleichen. Zusätzlich stellt die Größe der Punkte den Anteil an der NatUrWB-Referenz dar.



**Abbildung 17: Dreiecksdiagramm der Modellergebnisse je Simulations-Polygon für die Stadt Freiburg.**

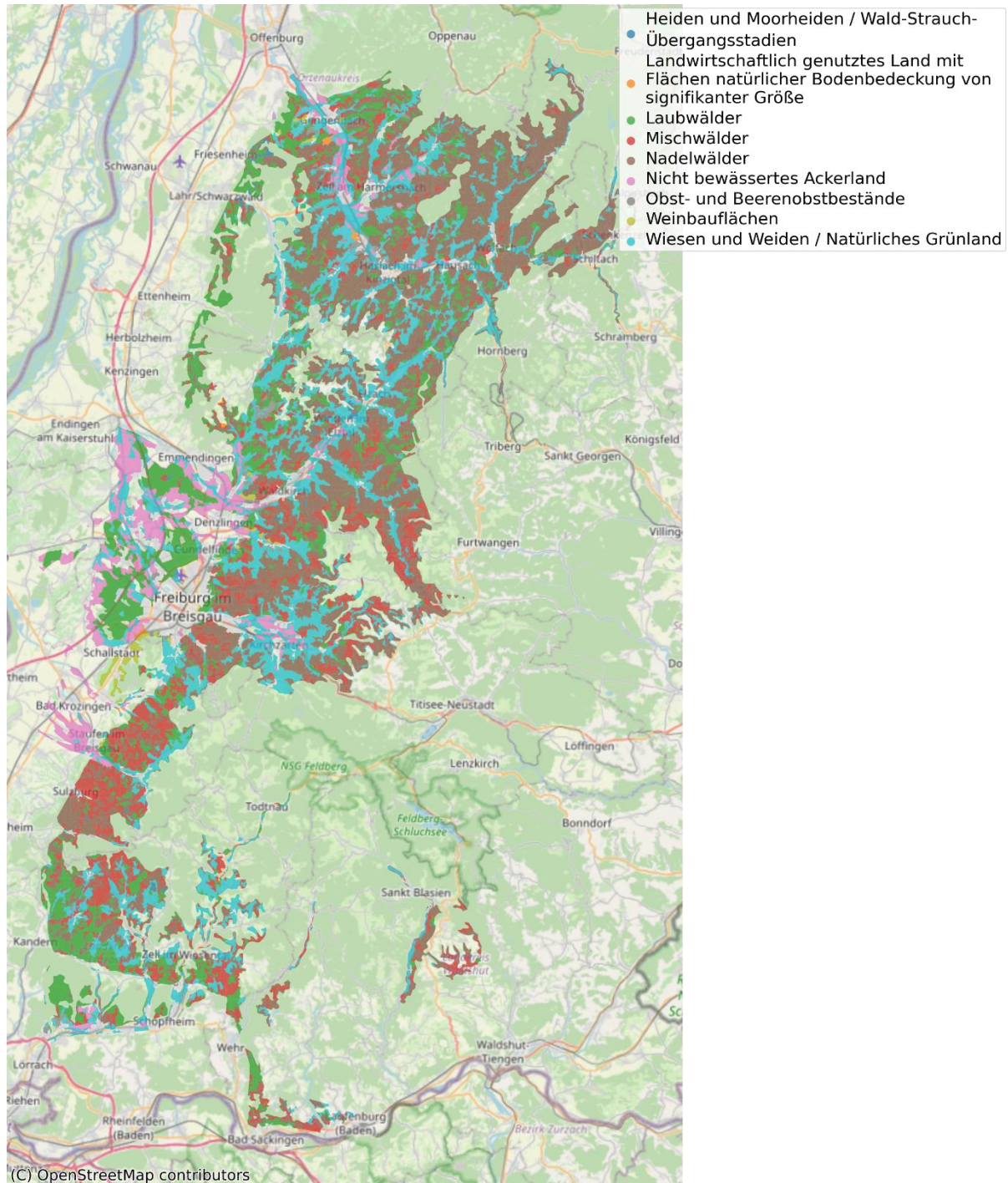
Da diese Darstellung für Laien ebenfalls weniger intuitiv ist, wird auch ihr eine interaktive Infobox hinzugefügt, die beim Überfahren mit der Maus angezeigt wird. Diese ist beispielhaft in Abbildung 18 dargestellt und gibt Auskunft über die drei Wasserbilanz-Komponenten, ET, Abfluss und GWNB, sowie über den Anteil des Simulations-Polygons an der NatUrWB-Referenz und liefert eine Erklärung der Bodengesellschaft.



**Abbildung 18: Beispiel einer Infobox des Dreiecksdiagramms der Modellergebnisse je Simulations-Polygon für die Stadt Freiburg.**



Zusätzlich kann mit dem Python-Objekt der „Query“-Klasse des Ergebnisses auch eine Karte erstellt werden, welche die gewählten Flächen, die zum Bestimmen der naturnahen Landnutzungsverteilung genutzt werden, darstellt. Diese ist in Karte 16 für Freiburg dargestellt und zeigt, dass auch innerhalb des gewählten Polygons nach naturnahen Landnutzungen gesucht wird, sofern diese nicht urbanisiert sind. Da die Erstellung dieser Karte jedoch zeitintensiv ist, wird auf diese im Webtool verzichtet.



**Karte 16: Darstellung der zur Bestimmung der naturnahen Landnutzungsverteilung für die Stadt Freiburg herangezogenen Flächen.**

Zusätzlich gehören zu jedem NatUrWB-Ergebnis, wie in Kapitel 3.2.5 erläutert wurde, auch die Zusatzbemerkungen, die Aufschluss über die Genauigkeiten des Ergebnisses liefern. Für Freiburg sind dies folgende Zusatzbemerkungen:

- 0,46 % des gewählten urbanen Gebietes wurden nicht simuliert und somit auch nicht für den NatUrWB-Referenzwert in Betracht gezogen. Dies kann daran liegen, dass ein Teil ihres Gebietes außerhalb Deutschlands liegt, als Gewässer definiert ist und somit keine Bodeneigenschaften vorliegen, die simuliert werden könnten oder nicht in der Bodenübersichtskarte des BGR definiert ist. Die berechnete NatUrWB-Referenz gilt demnach nur für 99,54 % des gewählten urbanen Gebietes.
- Für 11,72 % des gewählten urbanen Gebietes war das definierte Bodenprofil in der Bodenübersichtskarte nicht parametrisiert und wurde daher nicht berücksichtigt. Hierbei handelt es sich bei jeder Bodengesellschaft aber um sekundäre Bodenprofile, die also nicht den Hauptanteil der Bodengesellschaft ausmachen.
- 8,11 % des gewählten urbanen Gebietes lag kein Rastermittelpunkt des Regionalisierungs-Rasters vom DWD innerhalb des simulierten Polygons vor, weswegen die Regionalisierung von Zellen abgeleitet wurde, die das Polygon berühren.
- Bei 6,59 % des gewählten urbanen Gebietes war die Variabilität innerhalb eines Simulations-Polygons des mehrjährigen Niederschlags des Winter-Halbjahres größer als 40 mm/6 Monate. Maximal lag diese Standardabweichung hingegen bei 80,1 mm/6 Monate. Da bei der Regionalisierung für jedes Simulations-Polygon nur ein Mittelwert aus dem mehrjährigen DWD-Raster bestimmt wurde, ist diese Variabilität unter Umständen nicht gut abgebildet worden.
- Bei 0,18 % des gewählten urbanen Gebietes war die Variabilität innerhalb eines Simulations-Polygons des mehrjährigen Niederschlags des Sommer-Halbjahres größer als 40 mm/6 Monate. Maximal lag diese Standardabweichung hingegen bei 45,8 mm/6 Monate. Da bei der Regionalisierung für jedes Simulations-Polygon nur ein Mittelwert aus dem mehrjährigen DWD-Raster bestimmt wurde, ist diese Variabilität unter Umständen nicht gut abgebildet worden.
- Bei 3,38 % des gewählten urbanen Gebietes war die Variabilität innerhalb eines Simulations-Polygons der mehrjährigen Temperatur größer als 0,50°C. Maximal lag diese Standardabweichung hingegen bei 0,80°C. Da bei der Regionalisierung für jedes Simulations-Polygon nur ein Mittelwert aus dem mehrjährigen DWD-Raster bestimmt wurde, ist diese Variabilität unter Umständen nicht gut abgebildet worden.

### 4.3 Städtevergleich

Die simulierten NatUrWB-Referenzen der 82 Großstädte Deutschlands sind in Abbildung 19, nach aufsteigender GWNB sortiert, dargestellt.

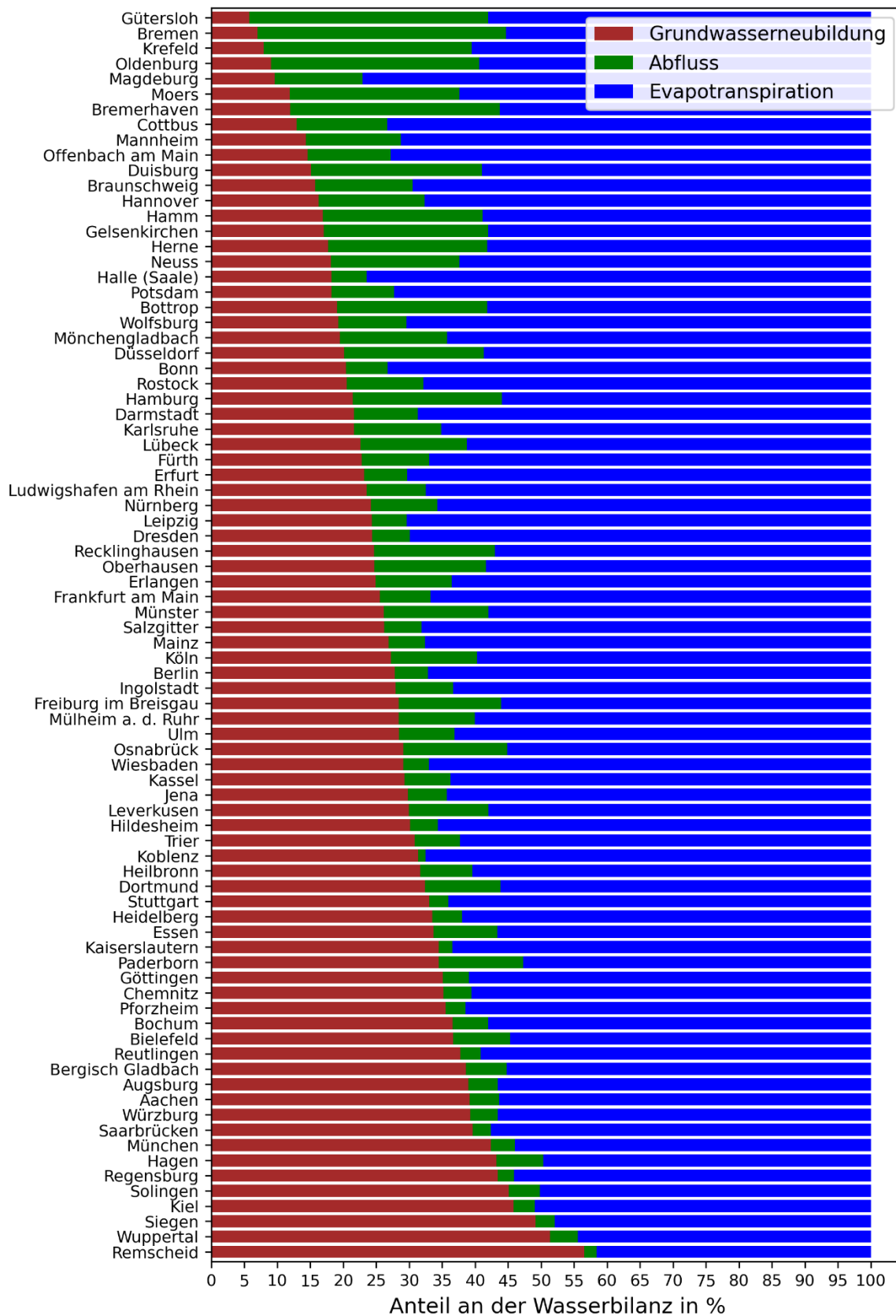
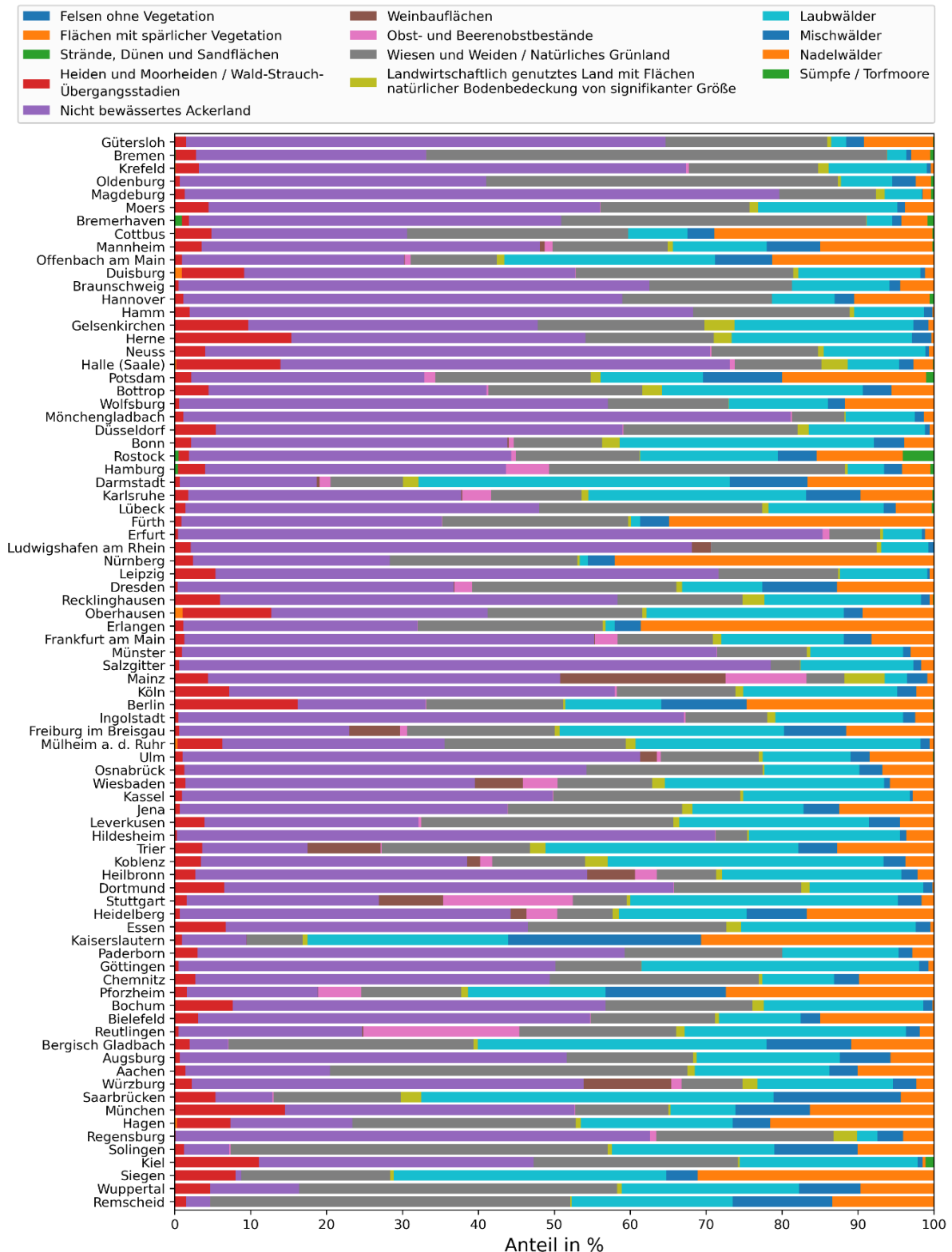


Abbildung 19: Vergleich der NatUrWB-Referenzwerte der 82 Großstädte Deutschlands. Sortiert nach aufsteigender GWNB.

Zu erkennen ist in Abbildung 19, dass die Werte der Grundwasserneubildung von 5,7 % für Gütersloh bis 56,5 % für Remscheid liegen. Beim Abfluss weist Koblenz mit 1,1 % den minimalen und Bremen mit 37,7 % den maximalen Wert auf. Die Evapotranspiration erstreckt sich von 41,6 % für Remscheid bis 77,1 % für Magdeburg.



**Abbildung 20: Vergleich der durch das NatUrWB-Modell bestimmten naturnahen Verteilungen der Landnutzungen der 82 Großstädte Deutschlands. Sortiert nach aufsteigender GWNB.**

Diese unterschiedlichen Wasserbilanzkomponenten der NatUrWB-Referenzen basieren je nach Stadt auf unterschiedlichen Verteilungen der Landnutzungen. Diese ermittelte naturnahe Landnutzungsverteilung ist in Abbildung 20 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Landnutzung „nicht bewässertes Ackerland“ bei vielen Städten eine große Rolle spielt, mit bis zu 84,9 % Anteil bei Erfurt. Allerdings gibt es auch Städte, bei denen diese Landnutzung nicht so stark auftritt, so ist deren minimaler Anteil mit 0,8 % bei Siegen anzutreffen.

## 5. Diskussion

### 5.1 Voruntersuchungen

#### 5.1.1 Zeitauflösung und Zeitspanne

Da es sich bei den untersuchten Flächen und Stationen nur um eine kleine zufällig gewählte Anzahl an Flächen handelt, ist nur eine grobe qualitative Betrachtung sinnvoll. Andere Flächen und Stationen hätten wiederum andere Ergebnisse geliefert. Für eine statistische Normal-Verteilung ist die Anzahl an Stichproben noch zu gering.

Trotzdem lassen die Ergebnisse eine Aussage über die zu erwartenden Abweichungen durch geringere Zeitauflösung der Niederschlagsdaten oder geringere Anzahl an Jahren der Wetterdaten zu. Die sich hier ergebenden Abweichungen würden auch beim deutschlandweiten Simulieren auftreten. Es ist aber durchaus möglich, dass dabei noch mehr Abweichungen bei einigen Böden auftreten könnten. Das heißt die Voruntersuchung gibt keinen kompletten Aufschluss über alle möglichen Abweichungen, kann aber als Negativbeispiel die Null-Hypothese, dass eine höhere Auflösung bzw. eine größere Zeitspanne keinen Einfluss auf das Modell-Ergebnis haben, widerlegen. Da die NatUrWB-Referenz für alle Bodentyp realistische Werte liefern soll, ist eine Abweichung einiger Flächen bereits ausreichend, um von der Vereinfachung abzulassen.

##### 5.1.1.1 Zeitauflösung der Niederschlagsdaten

Die Ergebnisse der Voruntersuchung zeigen für den Abfluss hohe relative Abweichungen mit steigender Zeitauflösung. Bereits bei stündlichen Werten kommt es hier bis zu -37,8 % relativer Abweichung zum besten Durchgang. Dies liegt wahrscheinlich am schlechter simulierten hortonschen Oberflächenabfluss (HOF)

Zu einem HOF kommt es nur unter starken Niederschlagsintensitäten, welche die Versickerungskapazität übersteigen. Die gröbere Zeitauflösung der Niederschlagsdaten führt allerdings zu einer Mittelung des Niederschlags wodurch er an Intensität verliert. Dies führt dazu, dass gröbere Niederschlagsauflösungen zu geringeren Abflüssen führen, da die mögliche Infiltrationsgeschwindigkeit des Bodens seltener durch die Niederschlagsintensität überschritten wird. Dies erklärt auch, dass die relativen Abweichungen des Abflusses hauptsächlich negativ sind, also der simulierte Wert geringer ist als der beste Durchgang.

Die Höhe der relativen Abweichung ist zwar auch bedingt durch die relativ geringen Abflüsse, da die oben erwähnten -37,8 % im Absoluten nur einer Abweichung von -7,0 mm/a entsprechen, wie Abbildung A1 im Anhang zeigt. Im Allgemeinen kommt es auf den in der Voruntersuchung untersuchten Flächen nicht zu viel Abfluss, wodurch der Fehler durch den geringeren simulierten HOF nicht so stark ausfällt.

Der Fehler beim Abfluss durch den unterschätzten HOF bei stündlicher bzw. täglicher Zeitauflösung der Niederschlagsdaten spiegelt sich im positiven hauptsächlich in der TP wider. Der geringer modellierte Abfluss wird demnach größtenteils dem Grundwasser hinzugefügt. Ein kleiner Anteil spiegelt sich aber auch in der ET wider. Dies lässt sich in Abbildung A1 darlegen, da hier die absolute Differenz der Wassermenge dargestellt ist.

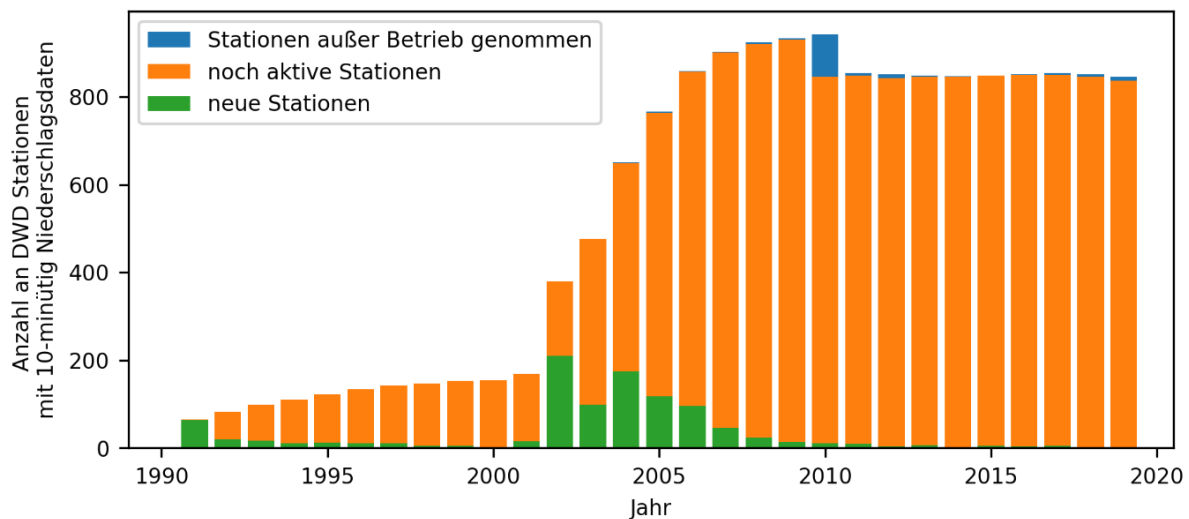
Da es voraussichtlich auf einigen Flächen in Deutschland aber zu wesentlich mehr HOF kommen würde als bei den zufällig gewählten Flächen der Voruntersuchung, könnte hier dieser Fehler noch stärker ins Gewicht fallen. Daher werden für die Zeitauflösung der Niederschlagsdaten 10-minütige Niederschlagsdaten beibehalten.

#### **5.1.1.2 Zeitspanne der Wetterdaten**

Für alle drei betrachteten Komponenten, ET, TP und Abfluss zeigt sich eine Abnahme der Streuung der relativen Differenz zum besten Durchgang mit zunehmender Zeitspanne. Diese Streuung ist wahrscheinlich hauptsächlich ein Resultat der jährlichen Schwankungen der Wetterdaten.

Da das Wetter jährlichen Schwankungen unterliegt, kann es bei nur zwei Jahren Daten dazu führen, dass diese Schwankung das Ergebnis dominiert und nicht z. B. die Bodeneigenschaften. So würde ein trockenes Jahr eher zu geringeren TP-Werte führen, da einfach weniger Niederschlag gefallen ist und wenn welcher gefallen ist, die Wahrscheinlichkeit, dass der Boden zu trocken für die Infiltration war, groß ist. Zusätzlich wäre die potenzielle ET in diesen Jahren höher, was zu höheren ET-Ergebnissen führen würde. Da die Ergebnisse des NatUrWB-Modells allgemeingültige Referenzwerte ergeben sollten, sind diese Schwankungen nicht akzeptabel und es sollten so viele Jahre wie möglich an Wetterdaten einfließen.

Dem gegenüber steht allerdings die Stationsdichte. Da Niederschlagsmengen eine starke regionale Variabilität aufweisen, sollte die Stationsdichte für das NatUrWB-Modell auch so hoch wie möglich sein. Die DWD Stationen wurden erst mit der Zeit auf 10-minütige Daten umgestellt. Wie Abbildung 21 zeigt wurden viele Stationen zwischen 2002 und 2008 auf 10-minütige Daten umgestellt. So werden es weniger mögliche Stationen je länger der Zeitraum in die Vergangenheit reichen soll.



**Abbildung 21: Entwicklung der Anzahl an DWD-Stationen mit 10-minütigen Niederschlagsdaten. Datenbasis: Meta-Tabelle vom DWD (2019b)**

Des Weiteren steigert sich die benötigte Simulationszeit mit steigender Zeitspanne der Wetterdaten.

Aus diesen drei Optimierungszielen, lange Zeitreihe, vertretbare Simulationsdauer und große Stationsdichte der Niederschlagsmessungen, ergab sich ein Kompromiss von 11 Jahren Daten. Bei 10 Jahren Wetterdaten waren die IQB'e der relativen Abweichungen zu den 12 Jahren Daten für den Abfluss zwischen -3,9 % und -0,6 %, für die TP zwischen -3,8 % und -1,0 % und für die ET zwischen -1,7 % und 0,4 %. Dieser Schwankungsbereich wurde als hinreichend genau erachtet, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Um zusätzlich ein Jahr für das Einpendeln der Bodenfeuchte zu haben, wurde der Simulationszeitraum für das NatUrWB-Modell auf 11 Jahre festgelegt.

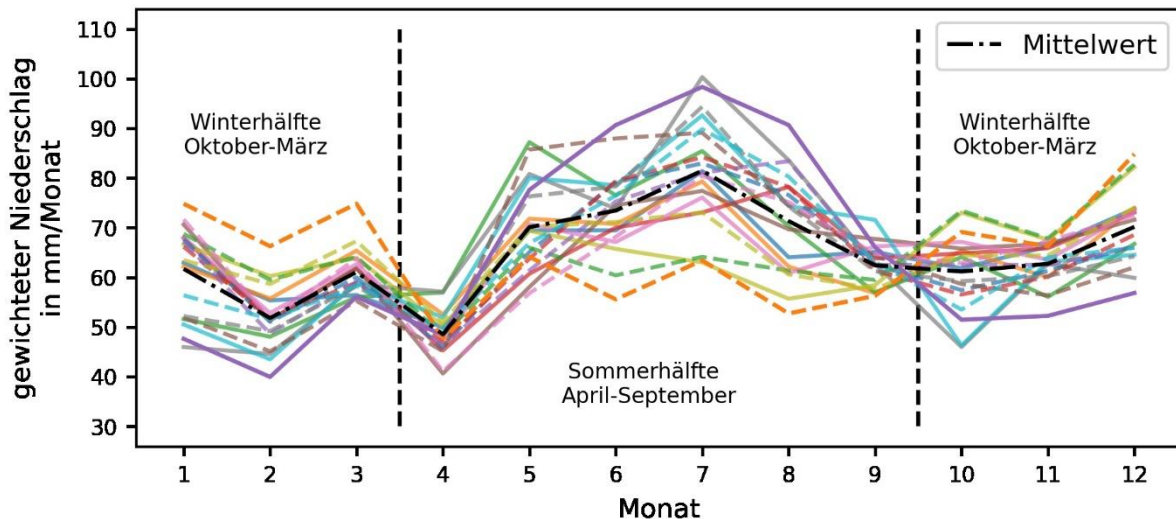
### 5.1.2 Sommer-Winter-Wichtung des Niederschlags

Die meisten Verläufe, die erneut in Abbildung 22 dargestellt sind, weichen im Winter anders vom Monats-Mittelwert ab als im Sommer. So ist beispielsweise die violette Linie im Winter weit unterhalb des Mittelwerts und im Sommer weit oberhalb. Umgekehrt gibt es auch Linien, die im Winter weit über dem Mittelwert liegen und im Sommer weit unterhalb, wie z. B. die gestrichelte, orange Linie.

Im Optimalfall wären alle Verläufe gleich, da sie alle den Jahresverlauf für den gleichen fiktiven Punkt darstellen. Da sie aber mit nur einem jährlichen-Wichtungsfaktor von 20 verschiedenen Stationen ermittelt wurden, sind hier die unterschiedlichen jahreszeitlichen Schwankungen nicht berücksichtigt worden. Um diese unterschiedlichen Niederschlagsregime etwas abzubilden, wird eine Sommer- und eine Winter-Halbjahr-Wichtung für den Niederschlag angewendet.

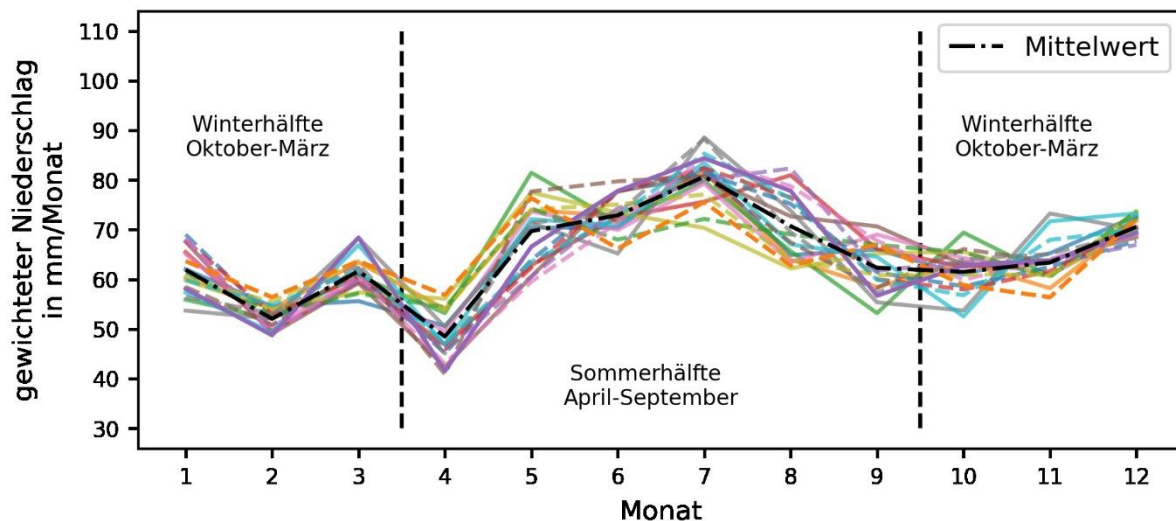


Die Grenze zwischen Winter und Sommer wird aus dem Verlauf dieser Vorversuchslinien ermittelt und ist in Abbildung 22 dargestellt. Die meisten Linien wechseln die Seite zum Mittelwert um den März-April und wieder um den September-Oktober. Daher wurden die Sommermonate als April bis September definiert und die Wintermonate zwischen Oktober bis März.



**Abbildung 22:** Diagramm der mehrjährigen monatlichen Mittelwerte des Niederschlags am gleichen fiktiven Punkt, der durch eine jährliche Wichtung aus 20 zufälligen Stationen bestimmt wurde; mit eingezeichneten Grenzen für die Sommer-Winter-Wichtung des Niederschlags.

Diese Grenzen sind nur eine qualitative Abschätzung des besten Bereichs, ergeben aber eine wesentlich treffendere Regionalisierung als ein ganzjähriger Wichtungsfaktor, wie der Vergleich der Abbildung 22 mit der Abbildung 23 zeigt. In dieser wurden Winter- und Sommer-Halbjahr-Wichtungen für den Niederschlag auf die 20 Punkte angewendet. Die resultierenden Verläufe streuen wesentlich weniger um den Mittelwert. Auch scheinen hier die Schwankungen der unterschiedlichen Niederschlagsregime wesentlich weniger zu abweichenden Regionalisierungen zu führen.



**Abbildung 23:** Diagramm der mehrjährigen monatlichen Mittelwerte des Niederschlags am gleichen fiktiven Punkt, der durch eine halb-jährliche Wichtung aus 20 zufälligen Stationen bestimmt wurde; mit eingezeichneten Grenzen für die Sommer-Winter-Wichtung des Niederschlags.

Noch kleinskaligere Wichtungen wurden nicht betrachtet, da keine allgemeingültigen Tendenzen mehr in Abbildung 23 zu erkennen waren und diese Regionalisierung als ausreichend genau betrachtet wurde. Auch wäre bei einer monatlichen Wichtung von einer zusätzlichen Fehlerquelle auszugehen, da typische Niederschlagsereignisse nicht immer im gleichen Monat auftreten, sondern es auch zu monatlichen Verschiebungen kommen kann. Wenn beispielsweise im mehrjährigen Durchschnitt der April eher wenig Niederschlag bringt, wogegen der Mai schon wesentlich niederschlagsintensiver ist, dann kann es aber durchaus vorkommen, dass in einem Jahr diese niederschlagsintensive Phase schon im April auftritt und dafür der Mai trocken ausfällt. Dieser April würde dann trotzdem mit der geringen April-Wichtung regionalisiert werden und niedriger ausfallen, wogegen der Mai mit der hohen Mai-Wichtung, höher ausfallen würde.

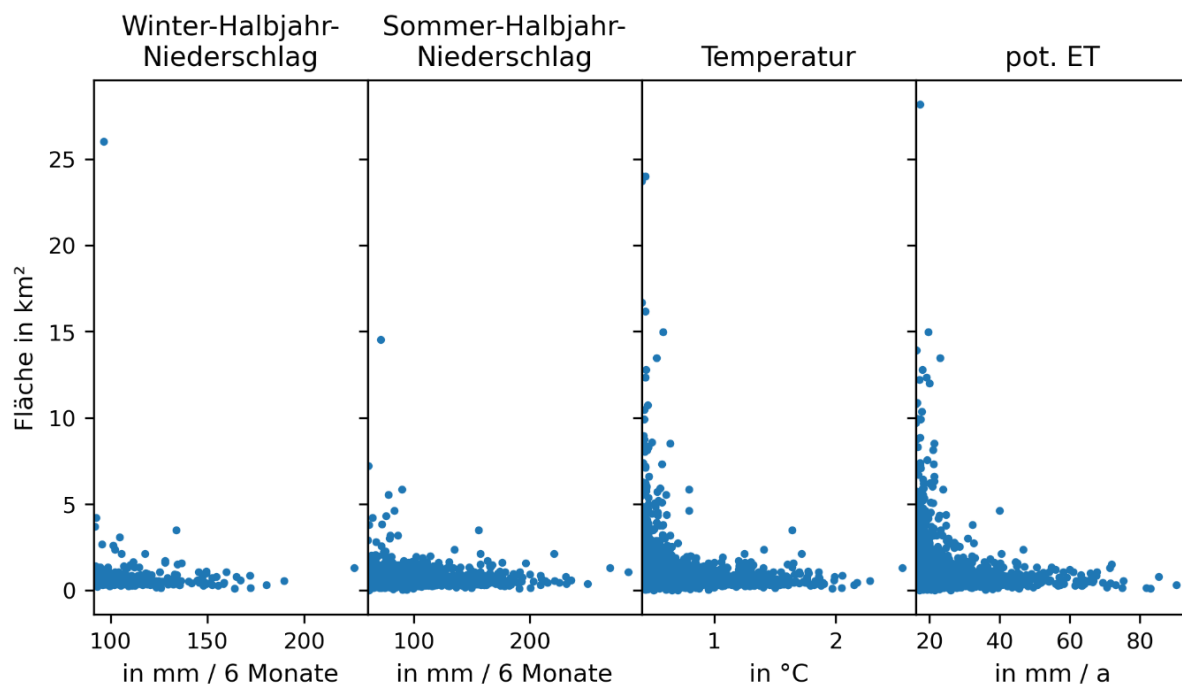
## 5.2 NatUrWB-Modell

Bisher wurden die erhaltenen Ergebnisse nicht auf Plausibilität geprüft. Da das zu Grunde liegende RoGeR Modell und die hier genutzte Ableitung der Eingangs-Parameter jedoch bereits mehrfach verifiziert wurden (Steinbrich et al. 2018), sollten die einzelnen Ergebnisse plausibel sein. Zum weiteren Validieren wäre die Anwendung der NatUrWB-Methode mit anderen Wasserhaushalts-Modellen und ein Vergleich der Ergebnisse sinnvoll. Auch ein Vergleich mit den Wasserbilanzwerten des HADs könnte die Vorteile der verwendeten Methode verdeutlichen oder zu deren Plausibilisierung beitragen.

### 5.2.1 Variabilität der Regionalisierung

Die Variabilität der mehrjährigen DWD-Rasterzellen innerhalb eines Polygons, die in Kapitel 50 aufgezeigt sind, bewegt sich für die meisten Polygone in einem recht engen Bereich. Betrachtet man eine Standardabweichung von 50 mm / 6 Monate für den Niederschlag als vertretbare Grenze der Variabilität, so erfüllen dies immerhin 98,6 % (Sommer-Halbjahr) bzw. 98,5 % (Winter-Halbjahr) der Polygone. Bei der Temperatur weisen 93,4 % der Polygone eine geringere Standardabweichung als 0,25°C auf. Bei der potenziellen Evapotranspiration weisen 93,7 % der Polygone eine geringere Standardabweichung als 10 mm/a auf. Diese genannten Grenzwerte können ohne Bedenken als vertretbar angenommen werden.

Allerdings gibt es für jeden Parameter auch die Ausreißer-Polygone, die eine sehr hohe Variabilität aufweisen. Betrachtet man diese Ausreißer jedoch geografisch, wie dies in Karte A9 im Anhang hinterlegt ist, ist zu erkennen, dass es sich hierbei um gebirgige Gebiete handelt. Bei den in Karte A9 gewählten Grenzwerten für die Standardabweichungen ergeben sich nur Gebiete der deutschen Alpen.



**Abbildung 24: Punktwolken der hohen Standardabweichung zum mehrjährigen Mittelwert je Parameter in Bezug zur Fläche des Polygons. Auf der x-Achse ist jeweils nur das obere Ende angezeigt.**

Abbildung 24 zeigt die Größe der Polygone in Bezug auf deren Standardabweichung zum mehrjährigen Mittelwert. Daraus ist zu erkennen, dass die Polygone mit sehr hohen Standardabweichungen eher kleine Polygone sind. Dies ist unter anderem ein Resultat des Zerschneidens nach der Topografie, was in Kapitel 3.2.2.2 nachzulesen ist. Hierbei wurden Polygone allerdings nicht kleiner als 30 ha zerschnitten.

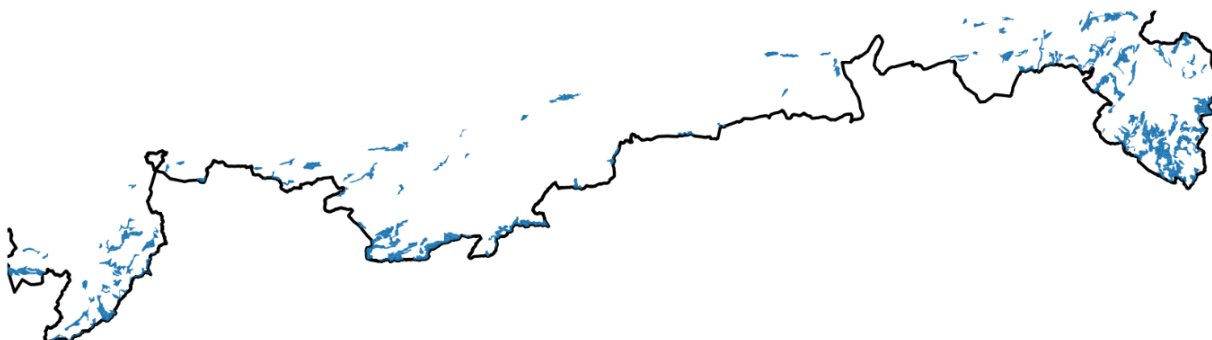
Da die Polygone bereits nach der Topografie zerlegt wurden und die hohen Abweichungen trotzdem mit topografisch steilen Gebieten zusammenhängen, ist davon auszugehen, dass sich diese Polygone nicht sinnvoll weiter zerlegen lassen, ohne eine sehr enge Auflösung zu erhalten. Da die Raster-Datensätze des DWDs diese kleinskalige Variabilität allerdings nicht abbildet, wäre die Aufteilung der Polygone nur ein scheinbarer Gewinn an Genauigkeit. Dies wäre allerdings mit einem erhöhten Rechenaufwand verbunden. Weil weiterhin bei diesen gebirgigen Gebieten nicht von einer dichten urbanen Nutzung auszugehen ist, werden diese hohen Variabilitäten der Regionalisierungen hingenommen.

Um diese Variabilität und die damit einhergehende Verschlechterung des Simulations-Ergebnisses transparent zu machen, werden Flächen, bei denen eine hohe Standardabweichung hingenommen wurde, in den Zusatzbemerkungen dem Ergebnis hinzugefügt. Hierbei wird für jeden Parameter ein Grenzwert festgelegt, ab dem diese Bemerkung ausgegeben wird. Dieser Grenzwert ist für die Temperatur  $0,5^{\circ}\text{C}$ , für die Evapotranspiration 25 mm/a und für den Sommer-, bzw. Winter-Niederschlag jeweils 40 mm/6 Monate.

Da die genutzte Klimaperiode (1981-2010) für die Regionalisierung bereits nicht mehr ganz aktuell ist, wäre eine Neubestimmung der Modellergebnisse mit der seit März 2021 veröffentlichten Klimaperiode 1991-2020 sinnvoll. Dadurch würden die bestimmten Ergebnisse einen aktuelleren Bezug erlangen.

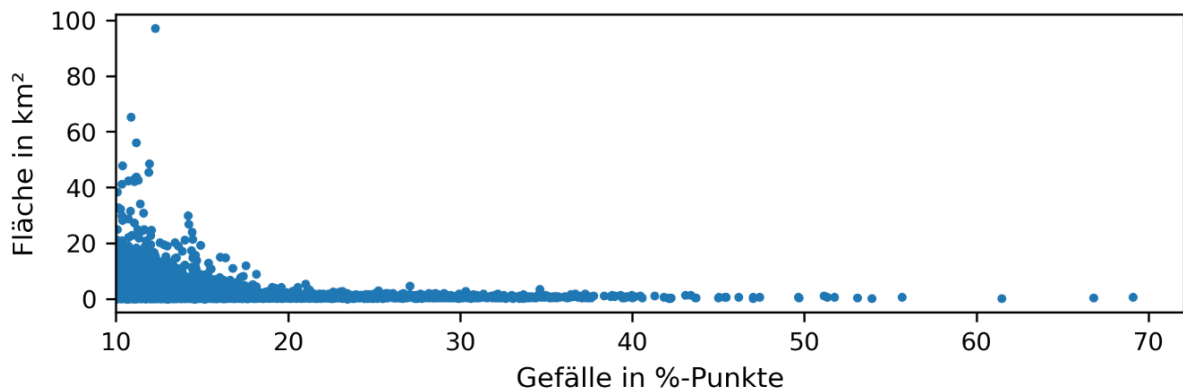
### 5.2.2 Variabilität des Gefälles

Ähnlich wie bei der Regionalisierung der Wetterdaten, ist auch beim Gefälle der Großteil der Standardabweichungen in einem geringen vertretbaren Bereich. So weisen 90,33 % der Polygone eine Standardabweichung von weniger als 10 %-Punkte auf.



**Karte 17: Karte aller Simulations-Polygone mit einer Standardabweichung zum Mittelwert des Gefälles über 27 %-Punkten. Zu sehen ist der Süden Deutschlands.**

In Karte 17 ist zu erkennen, dass es sich bei Gebieten mit besonders hoher Standardabweichung des Gefälles, um Gebiete der deutschen Alpen handelt. Die Variabilität des Gefälles ist demnach besonders groß, wenn es sich um eine gebirgige Topografie handelt.



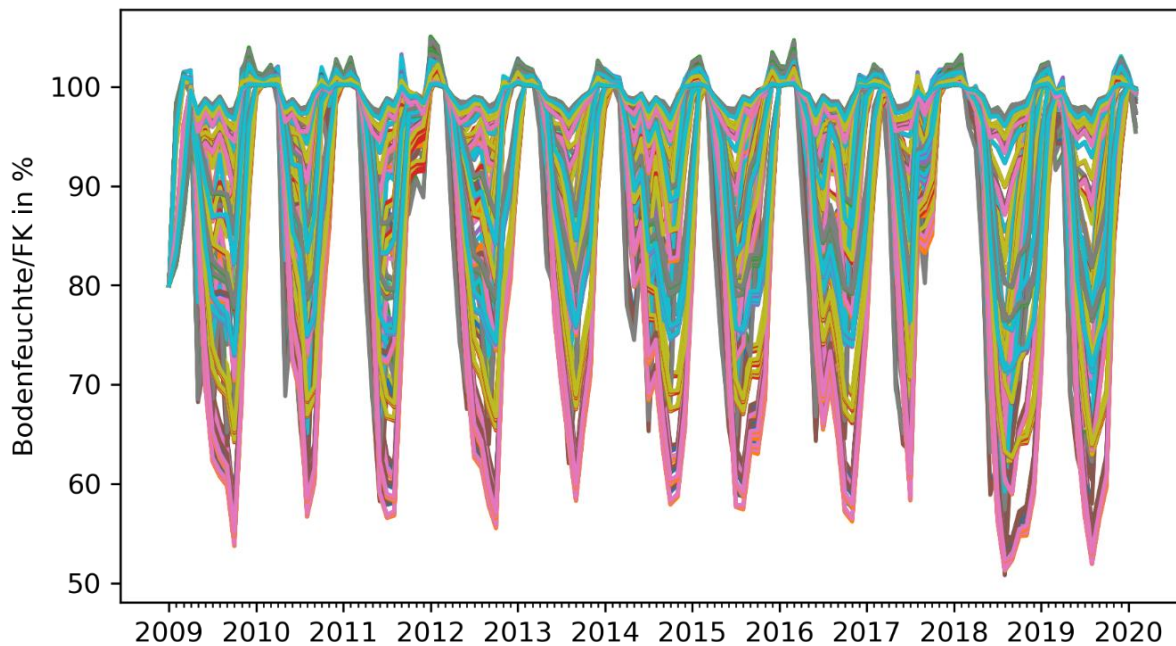
**Abbildung 25: Punktwolke der hohen Standardabweichungen zum Mittelwert des Gefälles in Bezug zur Fläche des Polygons. Auf der x-Achse ist nur das obere Ende angezeigt.**

Abbildung 25 zeigt, ebenso wie bei der Regionalisierung im vorangegangenen Kapitel, dass die Polygone mit hoher Gefälle-Variabilität bereits sehr klein sind. Um keine zu große Fraktionierung der Polygone zu erhalten, wird auch hier von einer weiteren Aufteilung abgesehen. Auch bei diesen Polygonen ist es unwahrscheinlich, dass sich große urbane Gebiete bilden oder vorkommen werden, weswegen die damit tolerierte Ungenauigkeiten nur selten von Bedeutung sein wird.

Auch beim Gefälle werden Flächen mit einer hohen Standardabweichung in den Zusatzbemerkungen des NatUrWB-Ergebnisses ausgewiesen. Dabei gilt ein Grenzwert von 20 %-Punkten Standardabweichung.

### 5.2.3 Trainingsjahr für die Bodenfeuchte

Die in Kapitel 4.2.3 beschriebenen, steilen Anstiege der Bodenfeuchte am Beginn der Simulation legen nahe, dass der Eingabeparameter für die Bodenfeuchte eher unterschätzt wurde. Setzt man diese Bodenfeuchten in Relation zur jeweiligen Feldkapazität, ergeben sich die Verläufe in Abbildung 26.



**Abbildung 26: Auszug der Verläufe (340 Stk.) der durch RoGeR\_WB\_1D simulierten monatlichen Werte der Bodenfeuchte in Relation zur jeweiligen Feldkapazität über die 11 Simulationsjahre.**

In dieser ist ebenfalls der anfängliche Anstieg zu erkennen. Weiterhin ergibt sich, dass die Feldkapazität im Januar, wo die Simulation beginnt, eher bei 100 % als bei 80 % der Feldkapazität liegt. Es zeigt sich demnach, dass ein Einspielen der Bodenfeuchte notwendig ist, um diese realistisch abzubilden. Obwohl dieses Einspielen nach 4 Monaten bereits erreicht ist, wird trotzdem das ganze erste Jahr hierfür herangezogen, damit jeder Monat gleich oft im Ergebnis abgebildet wird.

#### **5.2.4 Ausgabe des NatUrWB-Modells am Beispiel Freiburg**

Die resultierenden NatUrWB-Referenzwerte und deren Visualisierungen, wie sie in Kapitel 4.2.4 am Beispiel der Stadt Freiburg dargestellt sind, stellen einen Kompromiss zwischen Ausführlichkeit und einfachem Verständnis dar. So dienen die Darstellungen der Übersichtskarten der Bodengesellschaften (Karte 14) und der Naturraumeinheiten (Karte 15) für Laien eher als Übersicht und dem grundlegenden Verständnis des Prozesses. Für Fachpersonal bieten diese jedoch einen tieferen Einblick in die Plausibilität der Ergebnisse. Die Darstellungen der Landnutzungsverteilung (Abbildung 14) und der NatUrWB-Referenz (Abbildung 15) als Tortendiagramm sind wenig komplex und sollten auch Laien verständlich sein. Dagegen richtet sich die Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Simulations-Polygone als Dreiecksdiagramm (Abbildung 17) eher an ein kundiges Fachpersonal, das daraus Entscheidungen ableiten kann.

Die Implementierung des Modells im Webtool, sollte eine einfache Bedienbarkeit gewährleisten und dadurch zu einer vermehrten Anwendung führen können. Bisher erfolgt die Eingabe des Polygons durch Abruf der Verwaltungsgrenze mit Hilfe von OpenStreetMap oder durch manuelles Einzeichnen. Um auch eine professionelle Anwendung des Webtools zu fördern, wäre eine zusätzliche Option zum Hochladen eines Polygons sinnvoll. Weiterhin wäre es sinnvoll, den fachkundigen Anwender\*innen des Webtools die genutzten Wetter- und Eingangsdaten zusammen mit den Resultaten zum Herunterladen zur Verfügung zu stellen. Dadurch könnten die Simulationen der urbanen Wasserbilanz auf der gleichen Grundlage wie die NatUrWB-Referenz erfolgen. Dies würde die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erheblich fördern.

Um die Anwendung der NatUrWB-Referenz zu fördern, wäre auch eine API-Implementierung denkbar, durch die ein Einbinden in anderen Softwarepaketen möglich wäre. Vorstellbar wäre auch die zugrunde liegende NatUrWB-Python Klasse zusammen mit den Daten, die notwendig sind, um die Datenbank aufzubauen, als OpenSource-Projekt zu veröffentlichen.

**Tabelle 8: Vergleich der NatUrWB-Ergebnisse zu Steinbrich et al. (2018) der Stadt Freiburg. Alle Angaben in mm/a.**

| Parameter                    | Steinbrich et al. (2018)      | NatUrWB          |                  |                      |
|------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------------|
|                              | NRE Freiburger Bucht (Vauban) | ganz Freiburg    | Vauban           | NRE Freiburger Bucht |
| <b>kapillarer Aufstieg</b>   | -                             | 65               | 29               | 130                  |
| <b>Niederschlag</b>          | 856                           | 1010             | 928              | 895                  |
| <b>ET</b>                    | 606                           | 602              | 551              | 602                  |
| <b>OA</b>                    | 16                            | 11               | 11               | 7                    |
| <b>ZA</b>                    | 65                            | 240              | 151              | 297                  |
| <b>TP</b>                    | 166                           | 222              | 245              | 108                  |
| <b>Abfluss = OA &amp; ZA</b> | 81 <sup>1</sup>               | 168 <sup>2</sup> | 108 <sup>2</sup> | 277 <sup>2</sup>     |
| <b>GWNB = TP &amp; ZA</b>    | 231 <sup>1</sup>              | 305 <sup>2</sup> | 300 <sup>2</sup> | 305 <sup>2</sup>     |

<sup>1</sup> Bei Steinbrich et al. 2018 wird jeweils der gesamte Zwischenabfluss hinzuaddiert.

<sup>2</sup> Bei der NatUrWB-Referenz wird jeweils nur ein Teil des Zwischenabflusses dem Abfluss bzw. der GWNB hinzugezählt.

In Tabelle 8 wird das Ergebnis des NatUrWB-Modells für Freiburg mit dem Ergebnis von Steinbrich et al. (2018) verglichen. Dabei ist zu erkennen, dass sich der Niederschlag der bestimmten NatUrWB-Referenz (Spalte 3) stark von dem bei Steinbrich et al. (2018) (Spalte 2) unterscheidet. Dieser Unterschied begründet sich in den unterschiedlichen Gebieten, die untersucht wurden. Steinbrich et al. (2018) haben keine Referenzen für ganz Freiburg bestimmt, sondern sich auf das Vauban-Gebiet beschränkt und hierfür die ganze NRE Freiburger Bucht simuliert. Daher wird die NatUrWB-Referenz zusätzlich auch für das gleiche Planungsgebiet Vauban (Spalte 4) und die gesamte NRE Freiburger Bucht (Spalte 5) bestimmt.

Jedoch auch beim Vergleich der NatUrWB-Referenz für das Planungsgebiet Vauban und der von Steinbrich et al. (2018) bestimmten Referenz treten Unterschiede in den Ergebnissen auf. Der Niederschlag unterscheidet sich um 72 mm/a. Zum einen ist dies durch die unterschiedliche Herangehensweise begründet. Da Steinbrich et al. (2018) die gesamte NRE Freiburger Bucht simulieren, stellt die simulierte Niederschlagssumme den Mittelwert für diese NRE dar. Dagegen ist die Niederschlagssumme der NatUrWB-Referenz der mittlere Niederschlag des Vauban Gebietes. Die NatUrWB-Referenz für die ganze NRE Freiburger Bucht ergibt eine Niederschlagssumme von 887 mm/a und somit nur noch einen Unterschied von 39 mm/a. Dies verdeutlicht den Vorteil der NatUrWB-Herangehensweise.

Neben den verschiedenen Simulationsjahren ist diese Differenz ein Effekt des Skalierens der Niederschlagsdaten auf das mehrjährige Mittel, das in Kapitel 3.2.1.5 beschrieben wurde. Da das letzte Jahrzehnt eher trockener als der mehrjährige Durchschnitt war, wurde der Niederschlag etwas erhöht, um dem mehrjährigen Mittel zu entsprechen. Hierdurch ist davon auszugehen, dass die NatUrWB-Referenz allgemeingültiger ist, da kurzzeitige Schwankungen des Wetters nicht das Ergebnis dominieren. Allerdings kann das trockenere Jahrzehnt auch ein Resultat des Klimawandels sein und somit keine kurzzeitige Schwankung, sondern eher einen langjährigen Trend darstellen. Um diesen Effekt auszuschließen, wäre eine Skalierung der Wetterdaten auf das langjährige Mittel von 1991-2020, das vom DWD Anfang 2021 herausgegeben wird, und eine anschließende Neuberechnung mit RoGeR\_WB\_1D sinnvoll.

Ähnlich wie der Niederschlag ist auch die Evapotranspiration bei der NatUrWB-Referenz des Vaubans um 55 mm/a kleiner. Betrachtet man die NatUrWB-Referenz für die gesamte NRE Freiburger Bucht ist der Unterschied zu Steinbrich et al. (2018) nur noch 4 mm/a. Das bedeutet, dass dieser Unterschied hauptsächlich durch die unterschiedlichen Simulationsgebiete entsteht. Die ET der gesamten NRE ist demnach um 51 mm/a größer als im Vauban.



Weiterhin ist zu erkennen, dass der Zwischenabfluss der NatUrWB-Referenz höher liegt als bei Steinbrich et al. (2018). Dies könnte an Änderungen des RoGeR Modells liegen, die in der Zwischenzeit vorgenommen wurden. So wurde bei Steinbrich et al. (2018) noch kein kapillarer Anstieg mit berücksichtigt. Bei der NatUrWB-Referenz für das Vauban-Gebiet wurden jedoch 29 mm/a kapillarer Anstieg simuliert. Für die NRE Freiburger Bucht liegt der Wert mit 130 mm/a noch wesentlich höher. Der kapillare Aufstieg hängt von der Höhe des anstehenden Grundwassers ab. Bei Steinbrich et al. (2018) wurden für die NRE Freiburger Bucht die Grundwasserstände des Planungsgebiets Vauban angenommen, weswegen die NatUrWB-Referenz für das Vauban am ehesten für den Vergleich geeignet ist. Der kapillare Anstieg stellt einen zusätzlichen Input dar, wodurch die Bodenfeuchtigkeit steigt und es schneller zu ZA kommen kann.

Zusätzlich wurde die Berechnung des Zwischenabflusses im RoGeR-Modell in der Zwischenzeit verändert. 2018 wurde ZA nur generiert, wenn mehr Wasser infiltriert ist, als die Tiefenperkolation (TP) aufnehmen kann. Da es in der Realität jedoch auch zu ZA kommt, wenn die TP noch nicht erschöpft ist, werden diese Prozesse mittlerweile kombiniert betrachtet. Das perkolierende Wasser wird jeweils auf die TP und den ZA aufgeteilt, auch wenn die Tiefenperkolation noch mehr aufnehmen könnte. Dies verändert die RoGeR-Ergebnisse zugunsten des ZA.

Da allerdings auch die Tiefenperkolation der NatUrWB-Referenz des Vaubans größer ist, ist davon auszugehen, dass dies vor allem an dem zusätzlichen Input (Niederschlag und kapillarer Aufstieg) und der geringeren ET liegt. Dadurch steht den übrigen Wasserbilanzkomponenten zusätzlich 156 mm/a zur Verfügung. Die Differenz der Vauban-NatUrWB-Referenz zur Referenz von Steinbrich et al. (2018) von TP und ZA zusammen beträgt insgesamt 165 mm/a.

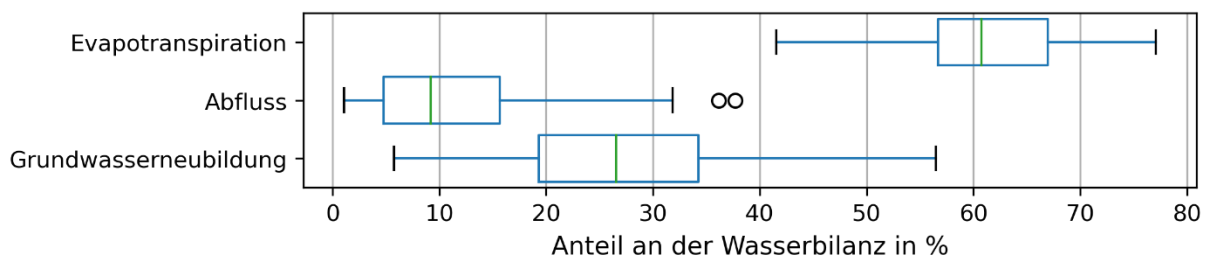
Steinbrich et al. (2018) legten sich noch nicht darauf fest, wie der Zwischenabfluss zu bilanzieren ist. Dieser könnte dem Abfluss oder der Grundwasserneubildung hinzugezählt werden, da er je nach Gebiet zu einer schnellen Abflussreaktion führt oder eher weiter perkoliert. Bei der NatUrWB-Referenz wird die Zuordnung des ZA je nach Grundwasserflurabstand (GWFA) gewählt. So wird der ZA in Bodenprofilen mit einem GWFA kleiner als 1 m oder mit anstehendem Grundwasser dem Abfluss hinzugezählt. Ansonsten wird dieser der GWNB hinzugezählt. Diese Zuordnung ergibt Referenzwerte die mehr Abfluss abbilden als bei einer reinen Zuordnung zur GWNB. Dadurch erhöht sich die Erreichbarkeit des Referenzwertes für Städte, was zu einer erhöhten Akzeptanz des Ziels einer naturnahen urbanen Wasserbilanz führen sollte. Diese Zuordnung könnte jedoch auch anders gewählt werden und sollte durch weitere Untersuchungen und Fachdiskussionen festgelegt werden.

### 5.3 Städtevergleich

Für die 82 Großstädte Deutschlands wurde jeweils die NatUrWB-Referenz bestimmt. Deren einzelne Ergebnisse sind in Kapitel 4.3 dargestellt.

Das DWA-M 153 gibt als deutschlandweiter Mittelwert für unversiegelte Flächen die Wasserbilanz wie folgt an: 63 % ET, 13 % Abfluss und 24 % GWNB. Diese Werte unterscheiden sich nur geringfügig von den Mittelwerten der 82 ermittelten NatUrWB-Referenzen. Diese ergeben 61,5 % ET, 11,5 % Abfluss und 27,0 % GWNB. Somit scheinen die Ergebnisse in einem plausiblen Bereich zu liegen.

Die Verteilungen der einzelnen Wasserbilanzkomponenten der 82 Großstädte Deutschlands, sind in Abbildung 27 als Boxplots dargestellt. In diesen lässt sich erkennen, dass alle drei Komponenten einen IQB von etwa 10 bis 15 %-Punkten aufweisen. Für einen Großteil der Städte liegen die Komponenten demnach in einem ähnlichen Rahmen, allerdings ist die gesamte Spannweite der Komponenten wesentlich größer. Für jede Komponente gibt es also Städte, deren Wasserbilanz-Komponenten weiter vom Mittelwert entfernt liegen.



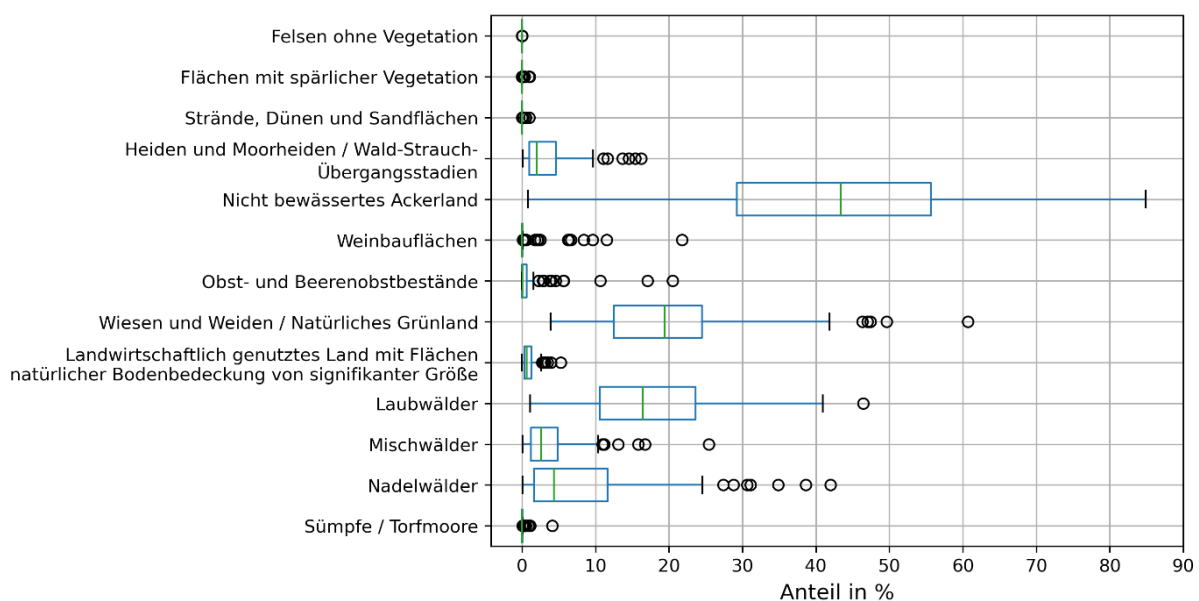
**Abbildung 27: Boxplots der Wasserbilanz-Anteile ET, Abfluss und GWNB der NatUrWB-Referenzwerte der 82 Großstädte Deutschlands.**

Die Annahme des deutschlandweiten Mittelwertes für jede Stadt würde demnach zu großen Ungenauigkeiten und schwierig zu erreichenden Zielwerten führen. Würde z. B. für alle Städte Deutschlands der mittlere Abfluss von 11,5 % als Referenz angenommen werden, so wäre dieser Zielwert für die Stadt Bremen mit dem hohen Grundwasserstand schwer zu erreichen. Dies würde die Akzeptanz des Zielwertes stark beeinträchtigen. Der Zielwert des Abflusses von 37,7 % für die Stadt Bremen ist hingegen realistischer zu erreichen.

Weiterhin wurden hierbei nur die Städte mit einer Einwohnerzahl von über 100.000 betrachtet. Diese liegen hauptsächlich in topografisch flachen Gebieten, die eine große Ausdehnung zulassen. Es ist daher davon auszugehen, dass einige kleinere Städte noch größere Abweichungen aufweisen können, da diese z. B. in gebirgigeren Gebieten liegen können. Die Wasserbilanz in solchen Gebieten kann erheblich vom deutschlandweiten Mittel abweichen.

Zusätzlich werden die ermittelten Verteilungen der naturnahen Landnutzungen, die den Berechnungen des NatUrWB-Referenzwertes zu Grunde liegen in Abbildung 28 miteinander verglichen. Hierbei ist zu erkennen, dass einige Landnutzungen fast gar nicht bei den 82 Großstädten Deutschlands vorkommen. Die Landnutzungen „Felsen ohne Vegetation“, „Flächen mit spärlicher Vegetation“, „Strände, Dünen und Sandflächen“ und „Sümpfe / Torfmoore“ kommen z. B. kaum vor. Bei diesen handelt es sich um spezielle Landnutzungen, die sich nur in wenigen Gebieten vorfinden. Trotzdem wäre eine Vernachlässigung der Flächen nicht ratsam, da diese durchaus in Deutschland vorkommen.

Vor allem die Landnutzung „nicht bewässertes Ackerland“ variiert sehr stark von Stadt zu Stadt. Aber auch die Landnutzungen „Wiesen und Weiden / natürliches Grünland“, „Heiden und Moorheiden / Wald-Strauch-Übergangsstadien“ und die verschiedenen Waldarten zeigen eine Variabilität auf, die gegen die Verwendung eines deutschlandweit einheitlichen Mittelwertes sprechen.



**Abbildung 28: Boxplots der Anteile der Landnutzungs-Kategorien an den NatUrWB-Referenzwerten der 82 Großstädte Deutschlands.**

Die erhaltenen NatUrWB-Referenzwerte der einzelnen Städte, die hier bestimmt wurden, sollten jedoch im konkreten Fall neu bestimmt werden. Diese bilden nämlich die administrativen Grenzen einer Stadt ab und nicht nur das urbanisierte Gebiet. Somit könnte sich für das urbanisierte Gebiet eine andere naturnahe Wasserbilanz ergeben, wie das Beispiel von Freiburg in Kapitel 5.2.4 bereits gezeigt hat.

Es hat sich gezeigt, dass die Variabilität der naturnahen urbanen Wasserbilanzen und der ermittelten naturnahen Landnutzungsverteilung der Städte erheblich ist. Dies macht die Notwendigkeit der Verwendung eines einheitlichen Vorgehens zum Bestimmen einer naturnahen Wasserbilanz für urbane Gebiete, das von konstanten Werten absieht und die regionalen Gegebenheiten berücksichtigt, deutlich. Eine solche Vorgehensweise stellt die hier beschriebene Vorgehensweise des NatUrWB-Modells dar.

## 6. Schlussfolgerungen

Das erstellte NatUrWB-Modell und die Webseite ([www.naturwb.de](http://www.naturwb.de)), die dieses Modell einem großen Publikum einfach zugänglich macht, stellen eine erste Grundlage zur Ermittlung der jeweiligen naturnahen Wasserhaushalte von Städten dar. Insbesondere die Webseite sollte die Hürde einer Anwendung dieses Zielwertes erheblich verringern und so zu einer Anwendung dieser Methodik führen. Allerdings ist das verwendete Prozedere nicht die einzig mögliche Herangehensweise an die Problemstellung der Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushaltes. Da eine einheitliche Vorgehensweise zu begrüßen wäre, um eine Vergleichbarkeit garantieren zu können, muss sich das Modell daher erst in der Praxis bewähren.

Vor allem beim Kriterium zur Anrechnung des Zwischenabflusses zur Grundwasserneubildung oder zum Abfluss sind verschiedene Ansätze denkbar. Diese sollten durch weitere Fachdiskussionen festgelegt werden.

Weiterhin wäre es sinnvoll, die NatUrWB-Prozedur auch mit anderen Wasserbilanzmodellen zu testen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Damit würde sich der Einfluss des zu Grunde liegenden Wasserbilanzmodells bestimmen lassen. Ebenso sollten die erhaltenen Wasserbilanzen mit denen des HADs verglichen werden.

Auch wären weitere Untersuchungen sinnvoll, welche die Ergebnisse des NatUrWB-Modells mit den tatsächlichen Wasserbilanzen von Städten vergleichen. Darüber würden sich bessere Aussagen über die Erreichbarkeit des Zielwertes treffen lassen.

Eine Schwachstelle könnte das erstellte Modell beim Modellieren von gebirgigen Gebieten aufweisen, da hier die genutzten Regionalisierungs-Raster und das Gefälle oft nicht ausreichend genau aufgelöst sind. Da in diesen Gebieten jedoch wenig Siedlung zu erwarten ist, sollte dieser Nachteil vernachlässigbar sein.

Weiterhin wurde das Modell mit der Klimaperiode 1981 bis 2010 modelliert und eine Aktualisierung der Modell-Ergebnisse mit der Klimaperiode 1991 bis 2020 wäre ratsam. Hierdurch würden die bestimmten Referenzen einen aktuelleren Bezug erlangen.

Insgesamt ist das erstellte Modell eine gute erste Methode zur Bestimmung eines naturnahen urbanen Wasserhaushaltes, das weiterhin auf Plausibilität und Machbarkeit überprüft werden sollte und ausgebaut werden kann. Es ermöglicht vor allem die politische Diskussion und Umsetzung dieses Zielwertes für Städte.

## 7. Literaturverzeichnis

EG-WRRL, vom 23.10.2000: Europäische Wasserrahmenrichtlinie, Richtlinie 2000/60/EG. In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* (I. 327). Online verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC_1&format=PDF)

756d3d694eeb.0003.02/DOC\_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 15.09.2020.

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen und 31 Listen. Unter Mitarbeit von Herbert Sponagel. 5., verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).

WHG, vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19.06.2020 (BGBl. I S. 1408) geändert worden ist (31.07.2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz). In: *BGBl. I (Bundesgesetzblatt Teil I)*.

Braud, I.; Breil, P.; Thollet, F.; Lagouy, M.; Branger, F.; Jacqueminet, C. et al. (2013): Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology*, 485, 5-23. In: *Journal of Hydrology* 485, S. 5–23. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2012.04.049.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2012): Corine Land Cover 10 ha. CLC10.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2015): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (GÜK250). Online verfügbar unter <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=C1DE9507-F568-4667-8E2D-F19C4152F64A>, zuletzt geprüft am 08.11.2020.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2018a): Sachdatenbank der Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (BÜK200). Online verfügbar unter [https://download.bgr.de/bgr/boden/BUEK200/Datenbank/BUEK200DE\\_Sachdaten\\_V0.6.zip](https://download.bgr.de/bgr/boden/BUEK200/Datenbank/BUEK200DE_Sachdaten_V0.6.zip), zuletzt geprüft am 06.11.2020.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2018b): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (BÜK250). Online verfügbar unter <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=d443a2ac-8eb5-49f7-ad80-bdfa05a96b47>, zuletzt geprüft am 06.11.2020.

Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD). 3. Lieferung. Bonn.

DWA-A 100, Dezember 2006: Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung (ISiE).

DWA-M 153, August 2007: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser.

DWA-A 102 (Entwurf), Oktober 2016: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2010): Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD). Version 2010R: Climate Data Center (CDC). ASC-Raster. Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/return\\_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA\\_DWD\\_2010R/asc/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/asc/), zuletzt geprüft am 12.11.2020.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011a): Raster der vieljährigen Mittel der Lufttemperatur (2 m) für Deutschland 1981-2010. Version v1.0: Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/multi\\_annual/air\\_temperature\\_mean/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/air_temperature_mean/), zuletzt geprüft am 11.01.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011b): Raster der vieljährigen Mittel der Niederschlagshöhe für Deutschland 1981-2010. Version v1.0: Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/multi\\_annual/precipitation/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/precipitation/), zuletzt geprüft am 11.01.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011c): Vieljährige Raster der potentiellen Evapotranspiration über Gras (per Kalendermonat) 1991-2010. Version v1.x: Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/multi\\_annual/evapo\\_p/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/evapo_p/), zuletzt geprüft am 11.01.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2016): Wetterrekorde. 11. Auflage. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/presse/wetterrekorde.html>, zuletzt geprüft am 20.11.2020.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2018): Vieljährige Stationsmittelwerte für die Klimareferenzperiode 1981-2010, für aktuellen Standort und Bezugsstandort. Version V0.x, 2018. Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/multi\\_annual/mean\\_81-10/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/multi_annual/mean_81-10/), zuletzt aktualisiert am 19.04.2018, zuletzt geprüft am 07.01.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019a): Historische tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland. Version V006, 2018. Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/daily/kl/historical/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/), zuletzt aktualisiert am 29.01.2019, zuletzt geprüft am 07.01.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019b): Historische 10-minütige Stationsmessungen der Niederschlagshöhe in Deutschland. Version V1. Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/10\\_minutes/precipitation/historical](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/precipitation/historical), zuletzt aktualisiert am 26.02.2019, zuletzt geprüft am 07.01.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019c): Berechnete tägliche Werte von charakteristischen Elementen aus dem Boden und dem Pflanzenbestand. Version V19.3. Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/derived\\_germany/soil/daily/historical/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/derived_germany/soil/daily/historical/), zuletzt aktualisiert am 13.11.2019, zuletzt geprüft am 07.01.2021.

Earth Resources Observation And Science Center (EROS) (2010): Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Digital Elevation Model. ~ 80 x 80 m: U.S. Geological Survey.

Fletcher, T. D.; Andrieu, H.; Hamel, P. (2013): Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. In: *Advances in Water Resources* 51, S. 261–279. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.09.001.

Freytag, Tim; Bannert, Lisa; König, Florenz (2018): Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung im Planungsprozess. Hintergründe, Problemfelder und Erfolgsfaktoren. Leitfaden. Online verfügbar unter <https://freidok.uni-freiburg.de/fedora/objects/freidok:15714/datastreams/FILE1/content>, zuletzt geprüft am 02.03.2021.

Göbel, Patricia; Coldewey, W. G.; Dierkes, C.; Kories, H.; Meßer, J.; Meißner, E. (2007): Impacts of green roofs and rain water use on the water balance and groundwater levels in urban areas. In: *Grundwasser* 12 (3), S. 189–200. DOI: 10.1007/s00767-007-0032-y.

Göbel, Patricia; Stubbe, Holger; Weinert, Mareike; Zimmermann, Julia; Fach, Stefan; Dierkes, Carsten et al. (2004): Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions. In: *Journal of Hydrology* 299 (3-4), S. 267–283. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.013.



- Haase, Dagmar (2009): Effects of urbanisation on the water balance – A long-term trajectory. In: *Environmental Impact Assessment Review* 29 (4), S. 211–219. DOI: 10.1016/j.eiar.2009.01.002.
- Hao, L.; Sun, G.; Liu, Y.; Wan, J.; Qin, M.; Qian, H. et al. (2015): Urbanization dramatically altered the water balances of a paddy field-dominated basin in southern China. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19 (7), S. 3319–3331. DOI: 10.5194/hess-19-3319-2015.
- Henrichs, M.; Langner, J.; Uhl, M. (2016): Development of a simplified urban water balance model (WABILA). In: *Water Sci Technol* 73 (8), S. 1785–1795. DOI: 10.2166/wst.2016.020.
- Jackisch, Nicole; Brendt, Thomas; Weiler, Markus; Lange, Jörg (2013): Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung im Vaubangelände - unter besonderer Berücksichtigung von Gründächern und Vegetation. Endbericht. Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften, Professur für Hydrologie (Projektnummer: 2009-09).
- Jourdan, Camille; Borrell-Estupina, Valérie; Sebag, David; Braun, Jean-Jacques; Bedimo Bedimo, Jean-Pierre; Colin, François et al. (2019): A non-stationary model for reconstruction of historical annual runoff on tropical catchments under increasing urbanization (Yaoundé, Cameroon). In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, S. 1–50. DOI: 10.5194/hess-2019-116.
- Kaspar, F.; Müller-Westermeier, G.; Penda, E.; Mächel, H.; Zimmermann, K.; Kaiser-Weiss, A.; Deutschländer, T. (2013): Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. In: *Adv. Sci. Res.* 10 (1), S. 99–106. DOI: 10.5194/asr-10-99-2013.
- Leistert, Hannes; Steinbrich, Andreas; Schütz, Tobias; Weiler, Markus (2018): Wie kann die hydrologische Komplexität von Städten hinreichend in einem Wasserhaushaltsmodell abgebildet werden? In: Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling und Jens Grundmann (Hg.): *M<sup>3</sup> - Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung*. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 an der TU Dresden (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 39.18), S. 227–235.
- Leistert, Hannes; Steinbrich, Andreas; Weiler, Markus (2020): RoGeR\_WB\_1D. Version 2.94: UNI Freiburg, Fachbereich Hydrologie. Online verfügbar unter <https://www.hydrology.uni-freiburg.de/roger/>, zuletzt geprüft am 11.02.2021.
- Maier, Ute; Müller-Westermeier, Gerhard (2010): Verifikation klimatologischer Rasterfelder. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 235).

Müller-Westermeier, Gerhard (1995): Numerisches Verfahren zu Erstellung klimatologischer Karten. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 193). Online verfügbar unter <https://d-nb.info/1081741732/34>, zuletzt geprüft am 01.03.2021.

OpenStreetMap-Mitwirkende (2020): OpenStreetMap (OSM). Map style: OpenTopoMap (CC-BY-SA). Online verfügbar unter <https://s.tile.opentopomap.org/{z}/{x}/{y}.png>, zuletzt geprüft am 08.12.2020.

Paul, Michael J.; Meyer, Judy L. (2001): Streams in the Urban Landscape. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 32 (1), S. 333–365. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040.

Pauleit, Stephan; Ennos, Roland; Golding, Yvonne (2005): Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change—a study in Merseyside, UK. In: *Landscape and Urban Planning* 71 (2-4), S. 295–310. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2004.03.009.

Professur für Hydrologie (2021): Niederschlag-Abflussmodell RoGeR. (Runoff Generation Research). Internetpräsenz. Unter Mitarbeit von Hannes Leistert, Andreas Steinbrich und Markus Weiler. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.hydrology.uni-freiburg.de/roger/>, zuletzt aktualisiert am 19.02.2021, zuletzt geprüft am 02.03.2021.

Statistische Ämter der Länder (2020): Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder. Tabellenband. Hg. v. Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder. Online verfügbar unter <https://www.statistikportal.de/de/ugrdl>, zuletzt geprüft am 28.12.2020.

Statistisches Bundesamt (2020a): Einwohnerzahl der größten Städte in Deutschland am 31. Dezember 2019. In Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1353/umfrage/einwohnerzahlen-der-grossstaedte-deutschlands/>, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Statistisches Bundesamt (2020b): Bodenfläche insgesamt nach Nutzungsarten in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/bodenflaeche-insgesamt.html>, zuletzt aktualisiert am 13.10.2020, zuletzt geprüft am 28.12.2020.

Steinbrich, Andreas; Henrichs, Malte; Leistert, Hannes; Scherer, Isabel; Schuetz, Tobias; Uhl, Mathias; Weiler, Markus (2018): Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushalts als Planungsziel für Siedlungen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 62 (6), S. 400–409. DOI: 10.5675/HYWA\_2018.6\_3.

Steinbrich, Andreas; Leistert, Hannes; Weiler, Markus (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. In: *Environ Earth Sci* 75 (21), S. 1–16. DOI: 10.1007/s12665-016-6234-9.

Steinbrich, Andreas; Leistert, Hannes; Weiler, Markus (2021): RoGeR – ein bodenhydrologisches Modell für die Beantwortung einer Vielzahl hydrologischer Fragen. In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 14 (2), S. 94–101. DOI: 10.3243/kwe2021.02.004.

United Nations (2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. General Assembly (A/RES/70/1).

Weiler, Markus; Schütz, Tobias; Schaffitel, Axel; Koelbing, Merle; Steinbrich, Andreas; Brendt, Thomas (2019): Der naturnahe Wasserhaushalt als Leitbild in der Siedlungswasserbewirtschaftung. Analyse der Langzeitauswirkungen auf Grundwasserneubildung, Verdunstung und Abflussbildung im urbanen Raum. Hg. v. Professur für Hydrologie, Fakultät für Umwelt und natürliche Ressourcen, Universität Freiburg (Freiburger HydroNotes). Online verfügbar unter [http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/hydrnotes/HNS\\_005.pdf](http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/hydrnotes/HNS_005.pdf), zuletzt geprüft am 10.02.2021.

Wessolek, Gerd; Kaupenjohann, Martin; Renger, Manfred (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. In: *Bodenökologie und Bodengenese* (40).



## Anhang

|                                                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>A1. Verzeichnis der Abkürzungen .....</b>                                                                   | <b>88</b>  |
| <b>A2. Ergänzende Abbildungen zur Voruntersuchung.....</b>                                                     | <b>90</b>  |
| <b>A3. Ergänzende Abbildungen, Karten und Tabellen zur Datenaufbereitung fürs<br/>    NatUrWB-Modell .....</b> | <b>91</b>  |
| A3.1 Kapitel Wetterdaten .....                                                                                 | 91         |
| A3.2 Kapitel Simulations-Polygone .....                                                                        | 95         |
| A3.3 Kapitel Simulation mit RoGeR_WB_1D.....                                                                   | 98         |
| <b>A4. Graphische Darstellung der ArcGIS Module .....</b>                                                      | <b>100</b> |
| <b>A5. Liste der genutzten Softwarepakete.....</b>                                                             | <b>101</b> |
| <b>Ehrenwörtliche Erklärung .....</b>                                                                          | <b>103</b> |

## A1. Verzeichnis der Abkürzungen

|                       |                                                                                                                              |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BF_ID                 | ID eines Bodenprofils in der BÜK-Sachdatenbank                                                                               |
| BFID <sub>area</sub>  | neu bestimmter Anteil des Bodenprofils an einer Bodengesellschaft in %                                                       |
| BGR                   | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe                                                                            |
| BÜK                   | Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland; hier synonym für BÜK250                                                 |
| BÜK250                | Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:250.00                                                      |
| CDC                   | Climate Data Center                                                                                                          |
| CLC                   | Corine-Landcover                                                                                                             |
| DGM                   | digitales Geländemodell                                                                                                      |
| DGM80                 | digitales Geländemodell, mit einer Auflösung von 80 x 80 Meter                                                               |
| DWD                   | Deutscher Wetterdienst                                                                                                       |
| EG-WRRL               | Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft                                                                         |
| ET                    | Evapotranspiration                                                                                                           |
| EZG                   | Einzugsgebiet                                                                                                                |
| FLANT <sub>MITT</sub> | mittlerer Anteil des Bodenprofils an einer Bodengesellschaft, der in der BÜK angegeben ist in %                              |
| GEN_ID                | ID der Bodengesellschaft in der BÜK                                                                                          |
| GÜK                   | Geologische Übersichtskarte Deutschlands                                                                                     |
| GWFA                  | Grundwasserflurabstand                                                                                                       |
| GWNB                  | Grundwasserneubildung                                                                                                        |
| GWS                   | Grundwasserstufe, definierte Kategorien der BÜK zum Grundwassereinfluss                                                      |
| HAD                   | Hydrologischer Atlas Deutschland                                                                                             |
| HOF                   | Hortonscher Oberflächenabfluss; entsteht durch Niederschlagsintensitäten die grösser als die hydraulische Leitfähigkeit sind |
| IQB                   | Interquartilsbereich, der Bereich zwischen dem 25 % und 75 % Quartil                                                         |
| LANU_flag             | Code zum Markieren der Güte der Landnutzungsverteilung                                                                       |
| LANU_ID               | ID der Landnutzungsklasse                                                                                                    |
| mNN                   | Meter über Normal-Null                                                                                                       |
| MP/m <sup>2</sup>     | Makroporen pro Quadratmeter                                                                                                  |
| MPD <sub>H</sub>      | horizontale Makroporendichte                                                                                                 |
| MPD <sub>V</sub>      | vertikale Makroporendichte                                                                                                   |
| MPL <sub>V</sub>      | vertikale Makroporenlänge                                                                                                    |
| N-A-Modell            | Niederschlag-Abfluss-Modell                                                                                                  |
| NatUrWB               | Naturnahe Urbane Wasser-Bilanz                                                                                               |
| NRE                   | Naturraumeinheit                                                                                                             |
| OA                    | Oberflächenabfluss                                                                                                           |
| OSM                   | OpenStreetMap                                                                                                                |
| Q                     | Abfluss                                                                                                                      |
| SDG                   | Sustainable development goals                                                                                                |
| SIM_ID                | Simulations-ID, Eindeutige Kennung für jedes Polygon für das eine Set an Simulationen erstellt wurde                         |
| SL_dist               | Distanz der Gefälle-Rasterzelle, aus der das Gefälle bestimmt wurde, zum Simulations-Polygon                                 |
| SSF                   | schneller Zwischenabfluss, vom Englischen: "sub-surface flow"                                                                |
| TP                    | Tiefenperkolation                                                                                                            |
| WABOA                 | Wasser und Boden Atlas Baden-Württemberg                                                                                     |

---

|          |                                                                                                                                                               |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WEA_dist | <i>Distanz der Regionalisierungs-Rasterzelle des DWDs, mittels der die Wichtungsfaktoren für die Wetter-Zeitreihe bestimmt wurde, zum Simulations-Polygon</i> |
| WEA_flag | Code zum Markieren der Güte der Wetter-Wichtungs -Koeffizienten, Code zum Markieren der Güte des Gefälles                                                     |
| WHG      | <i>Wasserhaushaltsgesetz</i>                                                                                                                                  |
| ZA       | <i>Zwischenabfluss</i>                                                                                                                                        |

## A2. Ergänzende Abbildungen zur Voruntersuchung

### relative Abweichung zum besten Durchgang

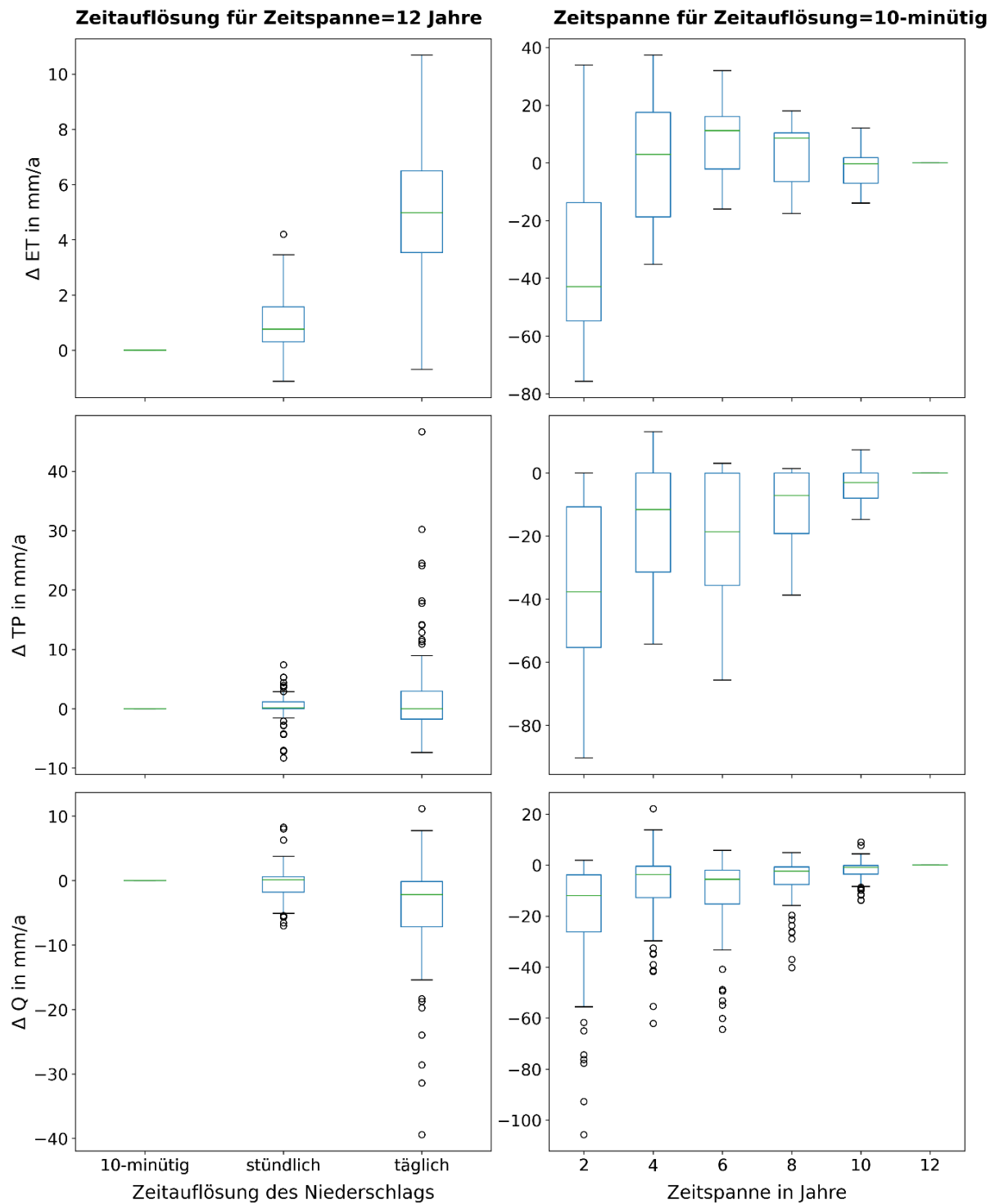


Abbildung A1: Boxplots der absoluten Abweichungen zum besten Durchgang der Voruntersuchung je Zeitspanne der Wetterdaten und Zeitauflösung der Niederschlagsdaten in mm/a.



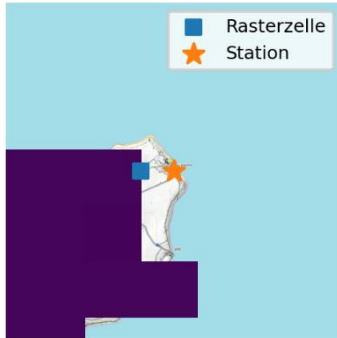
## A3. Ergänzende Abbildungen, Karten und Tabellen zur Datenaufbereitung fürs NatUrWB-Modell

### A3.1 Kapitel Wetterdaten

Niederschlag-DWD-Stationen die nicht im DWD-Raster liegen und deren nächste Rasterzelle

3x3 km Fenster

Zoom auf Station 183



Zoom auf Station 2115



Zoom auf Station 2236



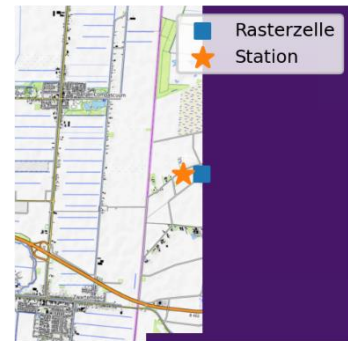
Zoom auf Station 3631



Zoom auf Station 4271



Zoom auf Station 5132



Zoom auf Station 6157

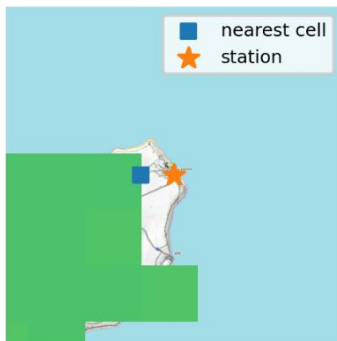


**Karte A1: Darstellung der Niederschlags-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen, und deren genutzte nächste Rasterzelle. Quelle des Kartenhintergrunds: OpenStreetMap, Kartenthema: OpenTopoMap**

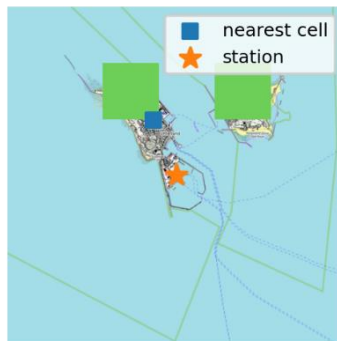
## Temperatur-DWD-Stationen die nicht im DWD-Raster liegen und deren nächste Rasterzelle

3x3 km Fenster

Zoom auf Station 183



Zoom auf Station 2115



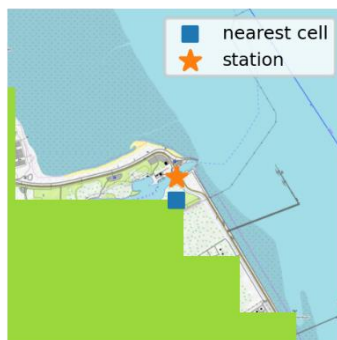
Zoom auf Station 3631



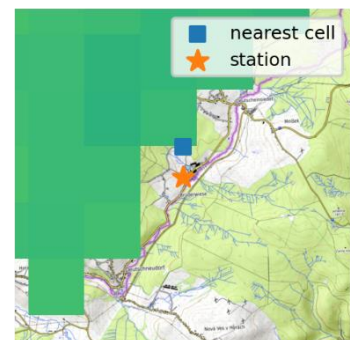
Zoom auf Station 4271



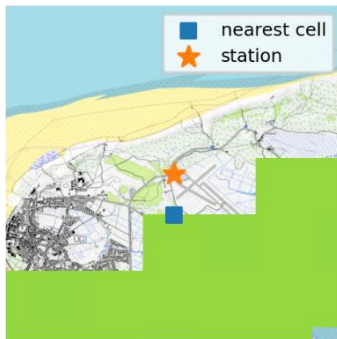
Zoom auf Station 6157



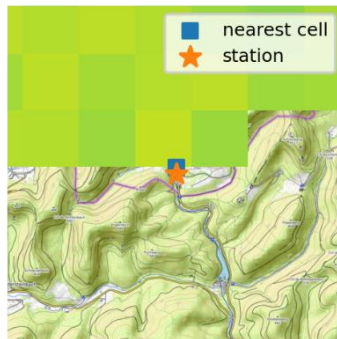
Zoom auf Station 7343



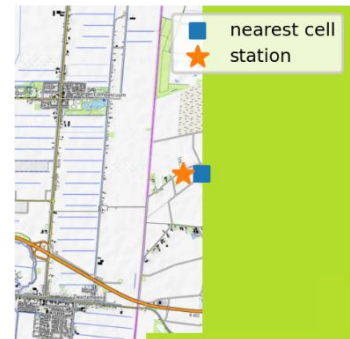
Zoom auf Station 7373



Zoom auf Station 2236



Zoom auf Station 5132



**Karte A2: Darstellung der Temperatur-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen und deren genutzte nächste Rasterzelle. Quelle des Kartenhintergrunds: OpenStreetMap, Kartenthema: OpenTopoMap**

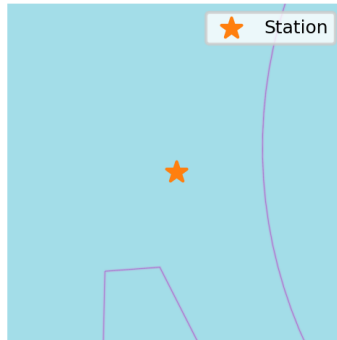
Temperatur-DWD-Stationen die nicht im DWD-Raster liegen  
und keine nächste Rasterzelle haben

8x8 km Fenster

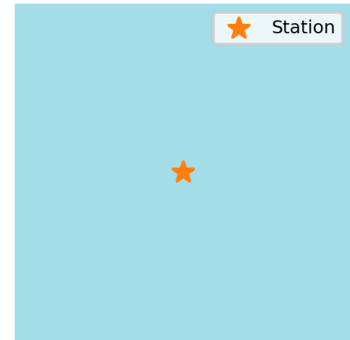
Zoom auf Station 102



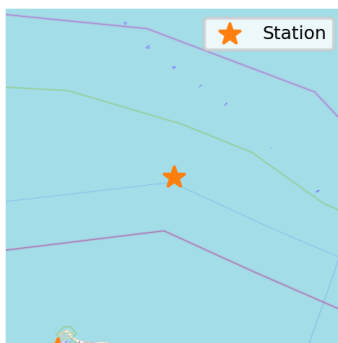
Zoom auf Station 954



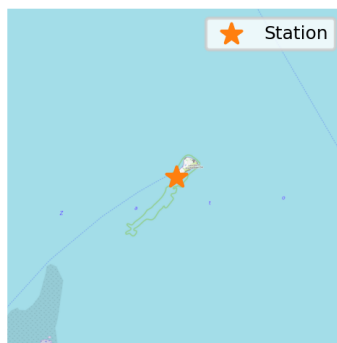
Zoom auf Station 1228



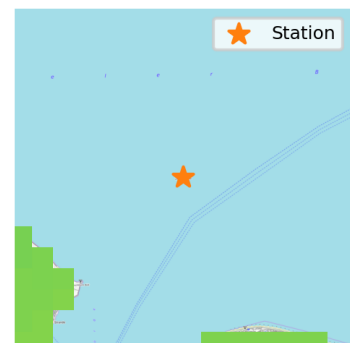
Zoom auf Station 1341



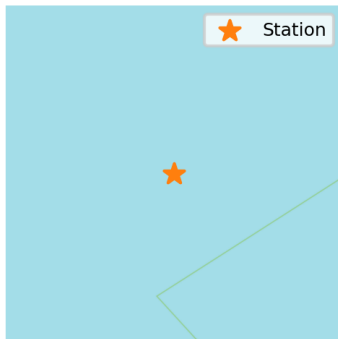
Zoom auf Station 1759



Zoom auf Station 2961



Zoom auf Station 13904

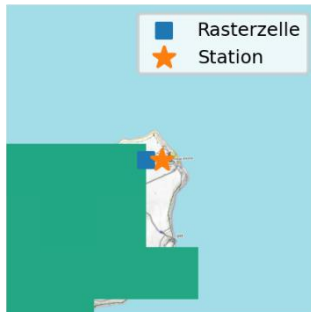


**Karte A3: Darstellung der Temperatur-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen, und keine nahegelegene Rasterzelle aufweisen. Quelle des Kartenhintergrunds: OpenStreetMap, Kartenthema: OpenTopoMap**

## Evapotranspiration-DWD-Stationen die nicht im DWD-Raster liegen und deren nächste Rasterzelle

3x3 km Fenster

Zoom auf Station 183



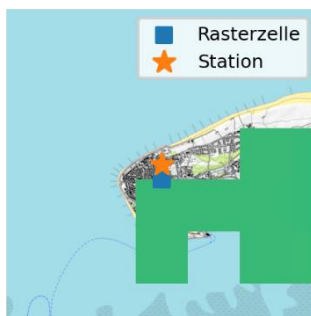
Zoom auf Station 2115



Zoom auf Station 2201



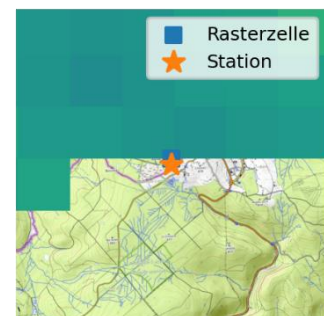
Zoom auf Station 3631



Zoom auf Station 4271



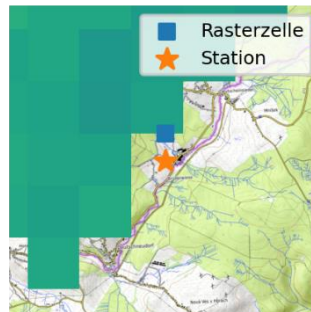
Zoom auf Station 5779



Zoom auf Station 6157



Zoom auf Station 7343



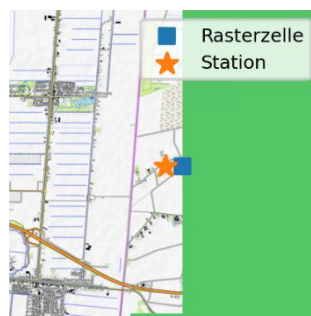
Zoom auf Station 7373



Zoom auf Station 2236



Zoom auf Station 5132



**Karte A4: Darstellung der Evapotranspiration-Stationen, die nicht im mehrjährigen DWD-Raster liegen, und deren genutzte nächste Rasterzelle. Quelle des Kartenhintergrunds: OpenStreetMap, Kartenthema: OpenTopoMap**

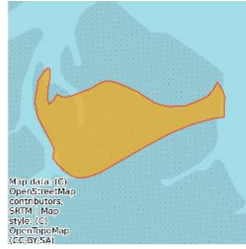


## A3.2 Kapitel Simulations-Polygone

Zoom to GEN\_ID 16.0-0



Zoom to GEN\_ID 16.0-1



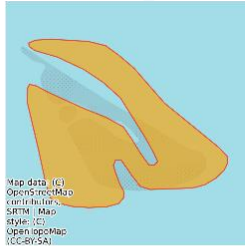
Zoom to GEN\_ID 16.0-2



Zoom to GEN\_ID 16.0-3



Zoom to GEN\_ID 16.0-4



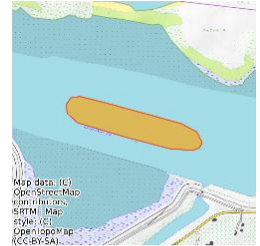
Zoom to GEN\_ID 16.0-5



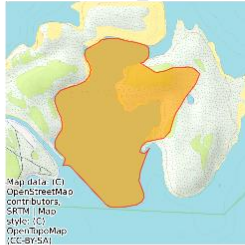
Zoom to GEN\_ID 16.0-6



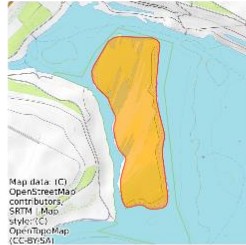
Zoom to GEN\_ID 32.0-0



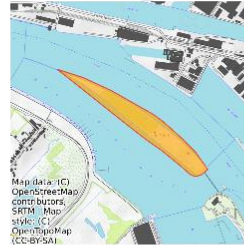
Zoom to GEN\_ID 459.0-0



Zoom to GEN\_ID 461.0-0



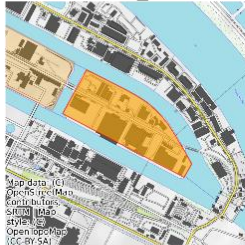
Zoom to GEN\_ID 474.0-0



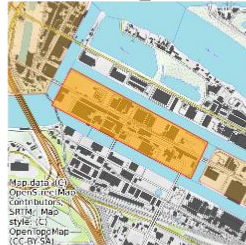
Zoom to GEN\_ID 474.0-1



Zoom to GEN\_ID 474.0-2



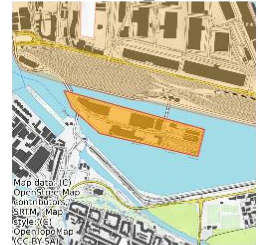
Zoom to GEN\_ID 474.0-3



Zoom to GEN\_ID 474.0-4



Zoom to GEN\_ID 474.0-5



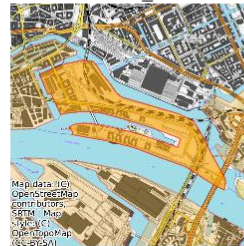
Zoom to GEN\_ID 474.0-6



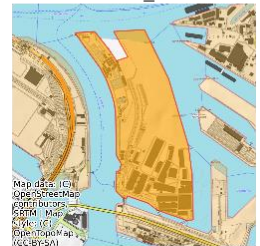
Zoom to GEN\_ID 474.0-7



Zoom to GEN\_ID 474.0-8



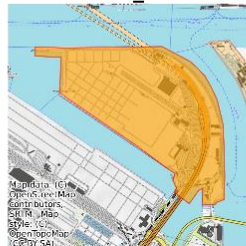
Zoom to GEN\_ID 474.0-9



Zoom to GEN\_ID 474.0-10



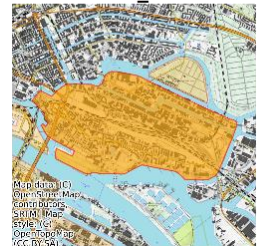
Zoom to GEN\_ID 474.0-11



Zoom to GEN\_ID 474.0-12

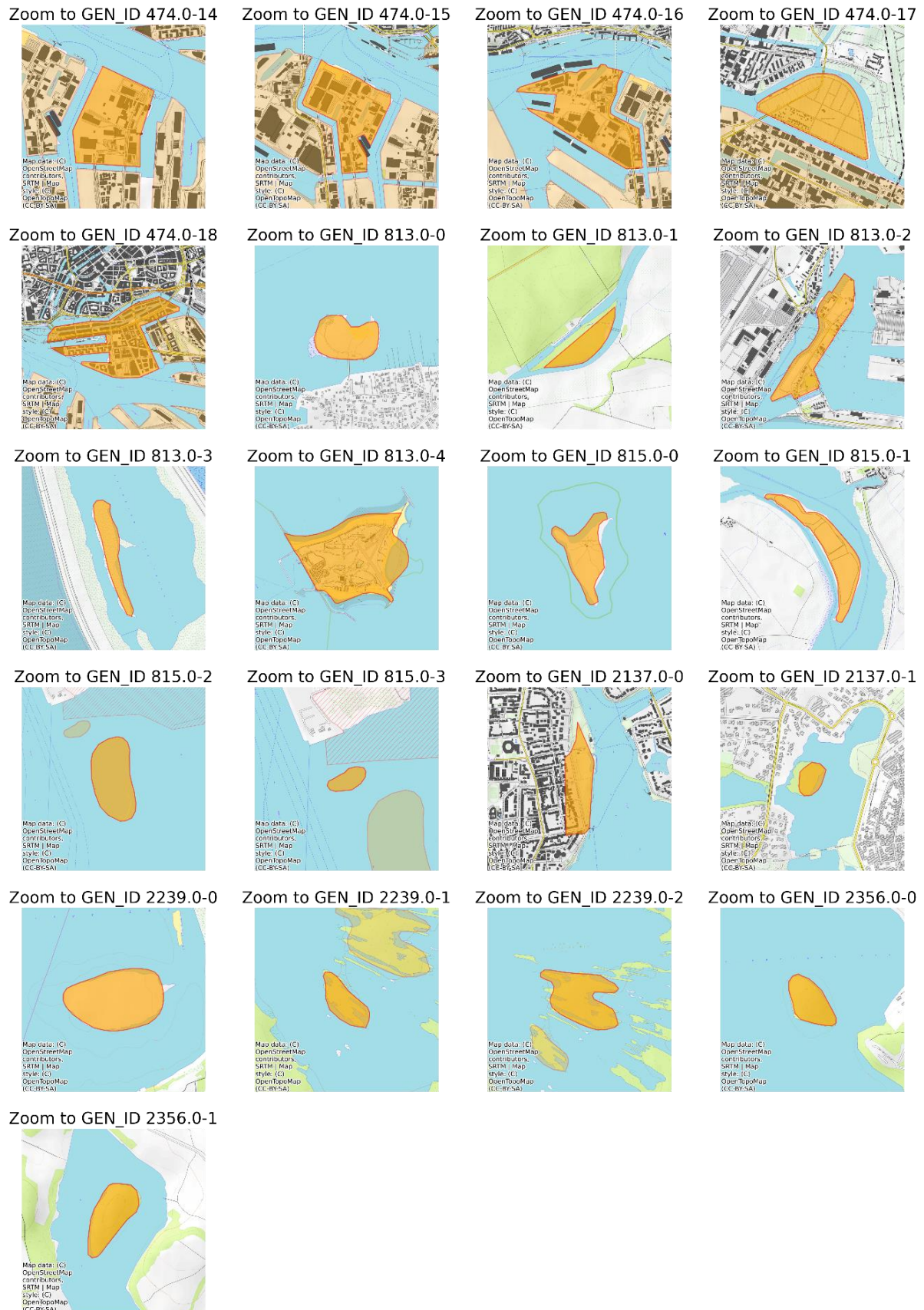


Zoom to GEN\_ID 474.0-13

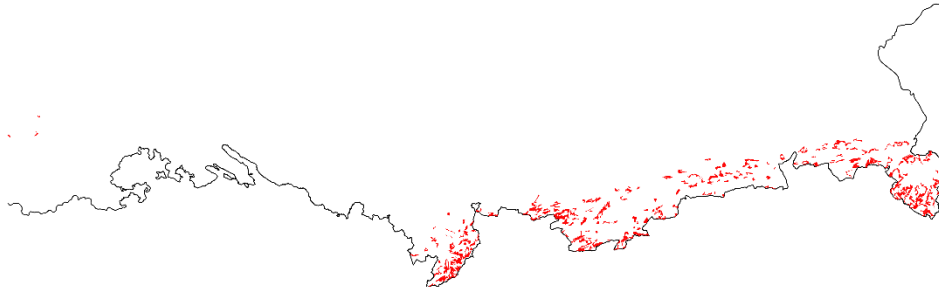


**Karte A5: Miniaturkarten der Bodengesellschafts-Polygone der BÜK250, die nicht mit Bodenprofile von Nachbar-Polygonen aufgefüllt werden konnten. Teil 1. Fenster mit unterschiedlichem Maßstab. Kartenhintergrund: OSM, Thema: OpenTopoMap**





**Karte A6: Miniaturkarten der Bodengesellschafts-Polygone der BÜK250, die nicht mit Bodenprofile von Nachbar-Polygonen aufgefüllt werden konnten. Teil 2. Fenster mit unterschiedlichem Maßstab. Kartenhintergrund: OSM, Thema: OpenTopoMap**



**Karte A7: Darstellung aller Polygone mit einer topografischen Variabilität von mehr als 110 m Standardabweichung zum Mittelwert, nach dem Aufteilen der Polygone über die Topografie. Zu sehen ist der Süden Deutschlands mit den deutschen Alpen.**

### A3.3 Kapitel Simulation mit RoGeR\_WB\_1D

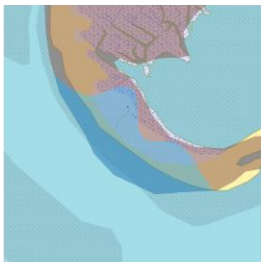
Tabelle A1: Zuordnung der Grundwasserstufe in der BÜK zum mittleren Grundwasserflurabstand.

| GWS    | MGW (GWFA)<br>in cm |
|--------|---------------------|
| -      | 1000                |
| GWS1   | 0                   |
| GWS2   | 10                  |
| GWS3   | 20                  |
| GWS4   | 60                  |
| GWS5   | 120                 |
| GWS5.1 | 105                 |
| GWS5.2 | 145                 |
| GWS6   | 180                 |

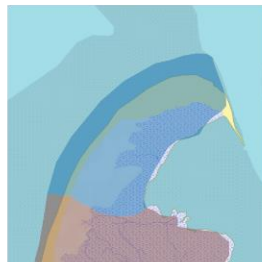
### Simulations-Polygone ohne Wetter-Koeffizient

Fenster unterschiedlicher Größen

Zoom auf SIM\_ID 17997



Zoom auf SIM\_ID 17998



Zoom auf SIM\_ID 18001



Zoom auf SIM\_ID 81018



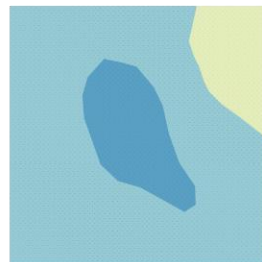
Zoom auf SIM\_ID 33271



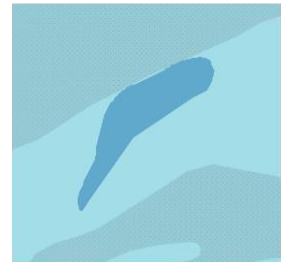
Zoom auf SIM\_ID 81003



Zoom auf SIM\_ID 81017



Zoom auf SIM\_ID 81019



**Karte A8:** Miniaturkarten der Simulations-Polygone, die nicht mit mehrjährigen Mittelwerten für das Wetter aus dem DWD-Raster abgeleitet werden konnten. Kartenhintergrund: OSM, Thema: OpenTopoMap

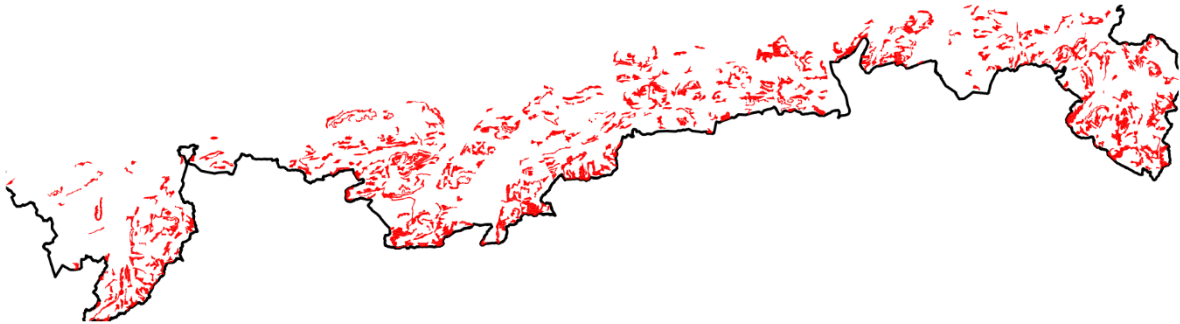


### Simulations-Polygone mit einer hohen Standardabweichung

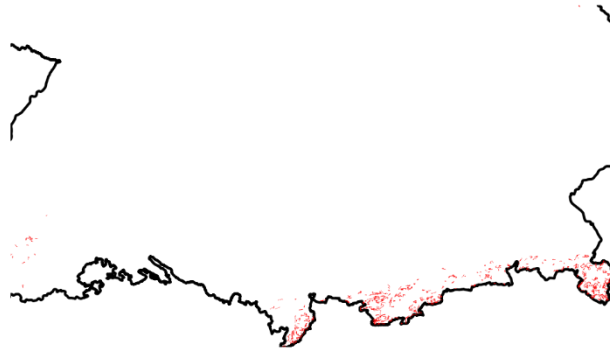
Standardabweichung des Winter-Halbjahr-Niederschlags  $> 110$  mm / 6 Monate



Standardabweichung des Sommer-Halbjahr-Niederschlags  $> 80$  mm / 6 Monate



Standardabweichung der jährlichen Temperatur  $> 0.9^{\circ}\text{C}$



Standardabweichung der jährlichen Evapotranspiration  $> 45$  mm / a



**Karte A9:** Karte aller Simulations-Polygone mit hohen Standardabweichungen der mehrjährigen Wetter-Mittelwerte. Zu sehen ist jeweils der Süden Deutschlands.

## A4. Graphische Darstellung der ArcGIS Module

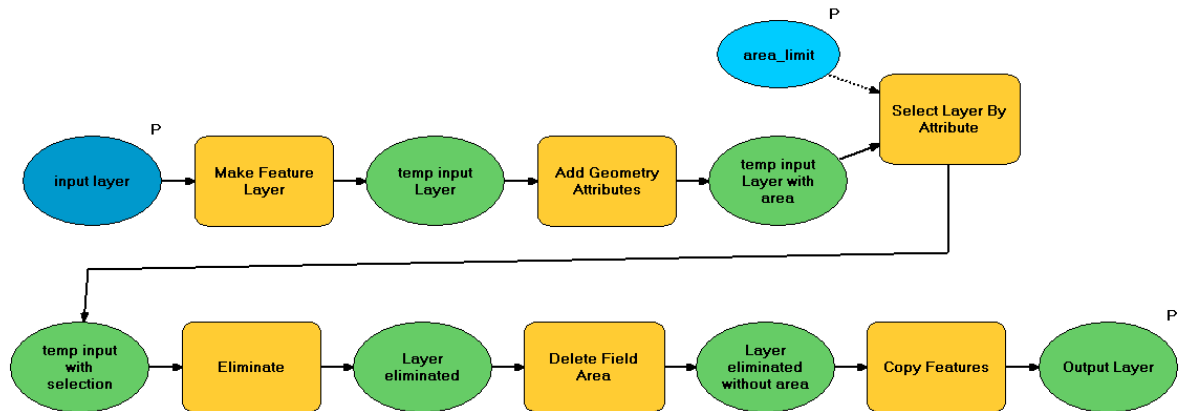


Abbildung A2: Verlaufsplan des erstellten ArcGIS-Moduls "eliminate\_by\_area".

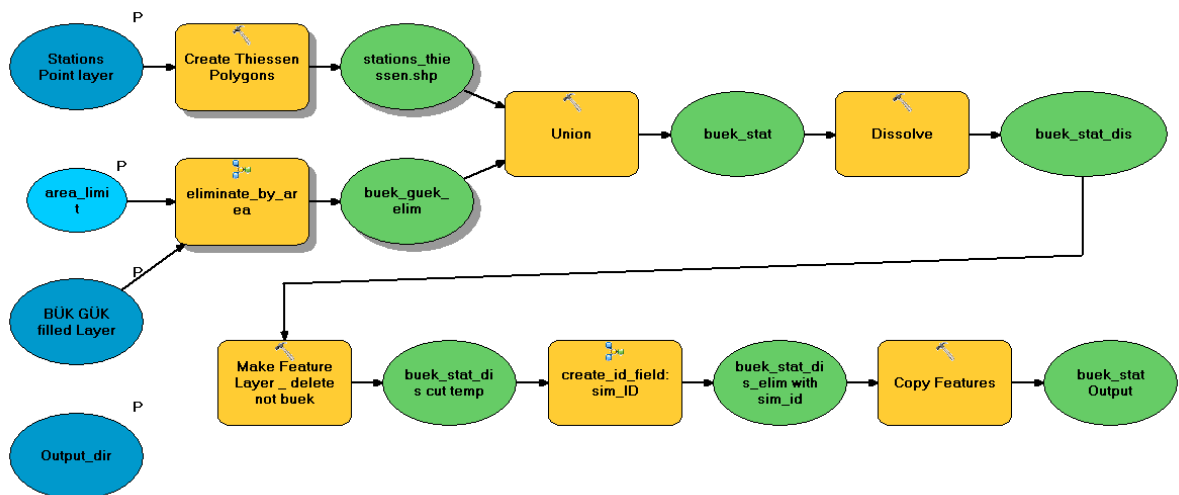


Abbildung A3: Verlaufsplan des erstellten ArcGIS-Moduls zur Erstellung der Simulations-Polygone, wie in Kapitel 3.2.2.2 beschrieben.

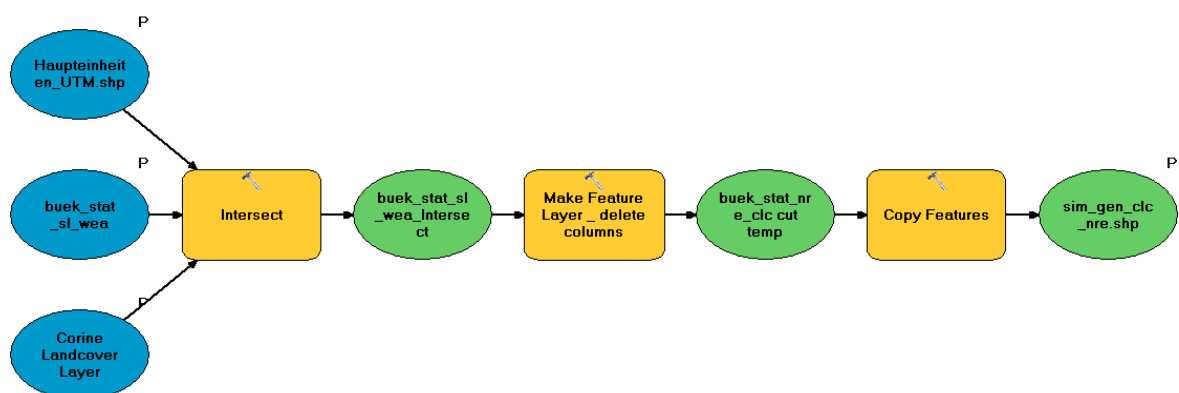


Abbildung A4: Verlaufsplan des erstellten ArcGIS-Moduls zur Erstellung der Nachschlage-Polygone, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben.

## A5. Liste der genutzten Softwarepakete

Tabelle A2: Auflistung aller Softwarepakete, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden mit der jeweiligen Version und Link zur Internetseite. Die Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern gibt nur die Hauptpakete an.

| Name             | Version     | Link                                                                                                   |
|------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aldjemy          | 1.0.0       | <a href="http://www.github.com/aldjemy/aldjemy">www.github.com/aldjemy/aldjemy</a>                     |
| Anaconda         | 4.9.2       | <a href="http://www.anaconda.org">www.anaconda.org</a>                                                 |
| ArcGIS           | 10.5.1      | <a href="http://www.arcgis.com">www.arcgis.com</a>                                                     |
| Bootstrap        | 4.4.1       | <a href="http://www.getbootstrap.com">www.getbootstrap.com</a>                                         |
| Contextily       | 1.0.1       | <a href="http://www.contextily.readthedocs.io">www.contextily.readthedocs.io</a>                       |
| Dash             | 1.17.0      | <a href="http://dash.plotly.com">dash.plotly.com</a>                                                   |
| Django           | 3.1.7       | <a href="http://www.djangoproject.com">www.djangoproject.com</a>                                       |
| Django-leaflet   | 0.27.1      | <a href="http://www.github.com/makinacorp/django-leaflet">www.github.com/makinacorp/django-leaflet</a> |
| Django-sitetree  | 1.16.0      | <a href="http://www.github.com/idlesign/django-sitetree">www.github.com/idlesign/django-sitetree</a>   |
| GDAL             | 3.2.1       | <a href="http://www.gdal.org">www.gdal.org</a>                                                         |
| GeoPandas        | 0.8.1       | <a href="http://www.geopandas.org">www.geopandas.org</a>                                               |
| GIMP             | 2.10.8      | <a href="http://www.gimp.org">www.gimp.org</a>                                                         |
| Jupyter Lab      | 3.0.3       | <a href="http://www.jupyter.org">www.jupyter.org</a>                                                   |
| Jupyter Notebook | 6.1.6       | <a href="http://www.jupyter.org">www.jupyter.org</a>                                                   |
| Matplotlib       | 3.3.3       | <a href="http://www.matplotlib.org">www.matplotlib.org</a>                                             |
| Nominatim        | 3.6.0       | <a href="http://www.nominatim.org">www.nominatim.org</a>                                               |
| NumPy            | 1.19.5      | <a href="http://www.numpy.org">www.numpy.org</a>                                                       |
| Pandas           | 1.2.0       | <a href="http://pandas.pydata.org">pandas.pydata.org</a>                                               |
| Plotly           | 4.14.2      | <a href="http://www.plotly.com">www.plotly.com</a>                                                     |
| PostGIS          | 2.3.3       | <a href="http://www.postgis.net">www.postgis.net</a>                                                   |
| postgresql       | 12.3        | <a href="http://www.postgresql.org">www.postgresql.org</a>                                             |
| Progressbar2     | 3.53.1      | <a href="http://progressbar-2.readthedocs.io">progressbar-2.readthedocs.io</a>                         |
| PyInstaller      | 4.1         | <a href="http://pyinstaller.readthedocs.io">pyinstaller.readthedocs.io</a>                             |
| Python           | 3.8         | <a href="http://www.python.org">www.python.org</a>                                                     |
| QGIS             | 3.10.10     | <a href="http://www.qgis.org">www.qgis.org</a>                                                         |
| Rasterio         | 1.1.8       | <a href="http://www.github.com/mapbox/rasterio">www.github.com/mapbox/rasterio</a>                     |
| RoGeR_WB_1D      | 2.92 – 2.94 | <a href="http://www.hydrology.uni-freiburg.de/roger">www.hydrology.uni-freiburg.de/roger</a>           |
| Shapely          | 1.7.1       | <a href="http://www.github.com/Toblerity/Shapely">www.github.com/Toblerity/Shapely</a>                 |
| simplifiedbf     | 0.2.6       | <a href="http://github.com/rnelsonchem/simplifiedbf">github.com/rnelsonchem/simplifiedbf</a>           |
| Sphinx           | 3.4.3       | <a href="http://www.sphinx-doc.org">www.sphinx-doc.org</a>                                             |
| Spyder           | 4.2.1       | <a href="http://www.spyder-ide.org">www.spyder-ide.org</a>                                             |
| SQLAlchemy       | 1.3.22      | <a href="http://www.sqlalchemy.org">www.sqlalchemy.org</a>                                             |



## Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Max Schmit, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, 12. April 2021

Ort, Datum

Unterschrift