



UNIVERSITÄT
BAYREUTH

Universität Bayreuth

Geographisches Institut Bayreuth

Lehrstuhl Geomorphologie

Sommersemester 2024 bis Sommersemester 2025

Abgabe am: 04.05.2025

Studienprojekt der Physischen Geographie

Leitung: PD Dr. Klaus-Martin Moldenhauer

Schwammstadt-Viertel St. Georgen und Hammerstadt

Abschlussbericht

Vorgelegt von:

Leonie Müller

Geographie: Gesellschaft und Umwelt B. Sc.

6. Fachsemester

Matrikelnummer: 1865370

E-Mail: leonie.mueller@uni-bayreuth.de

Ilka Mack

Geographie: Gesellschaft und Umwelt B.Sc.

5. Fachsemester

Matrikelnummer: 1885970

E-Mail: ilka.mack@uni-bayreuth.de

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
Kurzfassung	3
1. Einleitung.....	5
2. Studiengebiet	6
2.1. Oberflächennaher Untergrund	7
2.2. Klima und Klimawandel.....	11
3. Bodenhydrologische Grundlagen	15
3.1. Matrixpotential	17
3.2. Hydraulische Leitfähigkeit	18
3.3. Infiltration.....	19
3.4. Anthropogene Einflüsse auf bodenhydrologische Prozesse.....	25
4. Methodik.....	27
4.1. Infiltrometerablesungen.....	27
4.2. Visualisierung der Ergebnisse	28
4.3. Erstellung der Karten.....	29
5. Ergebnisse.....	30
6. Diskussion	35
7. Handlungsempfehlungen.....	38
8. Fazit	40
Literaturverzeichnis	41
Eigenständigkeitserklärung	46
Anhang.....	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Karte vom Untersuchungsgebiet in den Bayreuther Stadtteilen St. Georgen und Hammerstadt und den Standorten zu Versickerungsmessungen sowie mikrometrologischer Messungen.	6
Abbildung 2: Geologische Karte Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2025) ..	7
Abbildung 3: Kartenausschnitt aus der geologischen Karte dGK25 (Nummer 6035) (Emmert, Kurt Bader, et al., 1977)	9
Abbildung 4: Ausschnitt der bodenkundliche Übersichtskarte (Nummer 635) (Peschl, 2004).....	10
Abbildung 5: Vergleich der mittleren Niederschlagssumme je Monat an der DWD Station Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth et al., 2023).....	11
Abbildung 6: Mittlere jährliche Anzahl von Starkregentagen ($\geq 25\text{mm}$) an der DWD Station Heinersreuth Vollhof (Landkreis Bayreuth et al., 2023).....	12
Abbildung 8: Vergleich der Monatsmitteltemperaturen an der DWD Station Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth et al., 2023).....	13
Abbildung 7:Mittlere Lufttemperatur und Änderung der Temperatur in Oberfranken (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022)	13
Abbildung 9: Mittlere jährliche Anzahl von Hitzetagen an der DWD-Station Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth et al., 2023).....	14
Abbildung 10: Retentionskurven der Hauptbodenarten (Stahr et al., 2020)	18
Abbildung 11: Typischer Infiltrationsverlauf (Fohrer et al., 2016).....	20
Abbildung 12: Infiltration aus einer Bewässerungsrinne in Ton-, Schluff- und Sandboden (Hartge et al. 2020).....	22
Abbildung 13: Abflussverhalten einer Flächenversickerung mit teildurchlässiger Pflasterung (Johnscher, 2016)	27
Abbildung 14: Kf-Werte der Standorte in cm/min.....	31
Abbildung 15:Infiltrationsverlauf Standort S10.....	32
Abbildung 16: Infiltrationsverlauf Standort S04.....	32
Abbildung 17: Karte zur Bodenversiegelung in St. Georgen und Hammerstadt gegliedert nach Versiegelungsgrad und Bodenbelag.....	33
Abbildung 18: Karte zum Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens im Untersuchungsgebiet	35
Abbildung 19: Bodenoberfläche mit Krustenbildung und Trockenrissen.....	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schichtenfolge (Stratigraphie) Kartenblatt Bayreuth (Emmert et al., 1977).....	8
Tabelle 2: Korneinteilung nach DIN 4022.....	16
Tabelle 3: Mittlere Abflussbeiwerte (ψ_m) für Dächer nach DWA-M 153.....	24
Tabelle 4: Mittlere Abflussbeiwerte (ψ_m) für Straßen, Wege und Plätze (flach) nach DWA-M 153.....	24
Tabelle 5: Zusammenstellung der Standorte in verschiedene Einheiten und Einteilungen.	30
Tabelle 6: Oberflächentypen und deren Fläche sowie Anteil an der Gesamtfläche.....	34
Tabelle 7: Versiegelungsfaktor und Fläche sowie Anteil an der Gesamtfläche nach Versiegelungsgrad.....	34

Kurzfassung

Im Rahmen des Studienprojektes (Modul PG4) in Zusammenarbeit mit der Initiative „Demografiefeste Kommune“ zum Thema Hitze(-anpassung) der Stadt Bayreuth untersuchten zwei Studentinnen der Universität Bayreuth in den Stadtteilen St. Georgen und Hammerstadt an elf Standorten die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit mithilfe des Doppelringinfiltrimeters. Die Messungen fanden von Mitte Juni bis Ende Juli 2024 statt. Durch die Ergebnisse kann besser verstanden werden, wie gut der Boden in Fällen von Starkregenereignissen das Wasser aufnehmen kann. Dadurch wird eine Grundlage geschaffen, die für die Schwammstadt-Planung essenziell ist.

Abschließend werden deshalb Handlungsempfehlungen generell und für den Stadtteil St. Georgen spezifisch gegeben, die die Schwammeigenschaften verstärken sollen.

Auch wurde der Versiegelungsgrad des Stadtteils mithilfe einer Kartierung der Bodenbeläge ermittelt. Dieser dient der Einordnung, welche Gebiete besonders von Überschwemmung in Folge von Starkregenereignissen betroffen sind.

1. Einleitung

Laut dem Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (IPCC - Working Group II, 2022) treten die Folgen des menschengemachten Klimawandels, die wir heute erleben, wesentlich schneller ein und sind zerstörerischer sowie umfassender, als vor 20 Jahren prognostiziert wurde.

Die Mainregion in Oberfranken verzeichnet bereits einen mittleren Temperaturanstieg von 1,8 °C (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022). Je nachdem, welche Maßnahmen gegen den Klimawandel ergriffen und wie schnell sie umgesetzt werden, werden sich die Hitzetage in Bayreuth verdoppeln oder vervierfachen (Änderung 2071-2100). Weiterhin nimmt die Zahl der Starkregenereignisse und Überschwemmungen zu (IPCC - Working Group II, 2022). Dies hat negative Auswirkungen auf den Boden und den Wasserhaushalt (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022).

Hier kommt das sogenannte Schwammstadt-Prinzip ins Spiel. Ziel von Schwammstädten ist es, Regenwasser effektiv zu speichern und zu nutzen. Die Poren des Schwammes sind hier mit den Bodenporen zu vergleichen. Das Prinzip soll zu einer Wiederherstellung eines natürlicheren hydrologischen Kreislaufs beitragen, der den Schwerpunkt auf den Rückhalt, die Verdunstung und die Versickerung von Niederschlagswasser im städtischen Raum legt (Pucher, Ertl and Langergraber, 2023). So wird dem Grundwasser bei der Neubildung geholfen und Abflussspitzen in der Kanalisation werden verringert und verzögert. Dazu braucht es möglichst viele unversiegelte Oberflächen in urbanen Räumen (Wasserflächen, Parks, Grünstreifen, Bäume etc.), womit zusätzlich im Sommer die Stadt-Temperatur gesenkt wird (Halbig, 2024).

Dieses Studienprojekt wurde im Rahmen der Initiative „Demografiefeste Kommune“ des Bayerischen Staatsministeriums für Finanzen und Heimat durchgeführt. Das Stadtplanungsamt und das Klimaschutzmanagement der Stadt Bayreuth erarbeiteten in den Stadtteilen St. Georgen und Burg gemeinsam mit Bürger*innen, organisiert in einem Bürgerrat, eine Strategie zur Anpassung an Hitze. An einigen Standorten führte Prof. Christoph Thomas mikrometeorologische Messungen durch. Hier schließt dieses Studienprojekt an und es wurden an diesen Standorten, sofern möglich, Doppelringinfiltrations-Messungen durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit behandelt zunächst die klimatologischen und geologischen Grundlagen, gefolgt von einer ausführlichen Darstellung der bodenhydrologischen Prinzipien. Im weiteren Verlauf werden die anthropogenen Einflüsse auf den Boden analysiert. Es folgt eine Beschreibung der angewandten Methodik, einschließlich der

Infiltrationsmessungen und der Erstellung thematischer Karten. Abschließend werden die Ergebnisse vorgestellt und kritisch diskutiert, gefolgt von konkreten Handlungsempfehlungen.

2. Studiengebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Norden Bayerns, in Oberfranken, innerhalb der Stadt Bayreuth im Stadtteil St. Georgen und Hammerstadt (vgl. Abbildung 1).

Untersuchungsgebiet St. Georgen und Hammerstadt

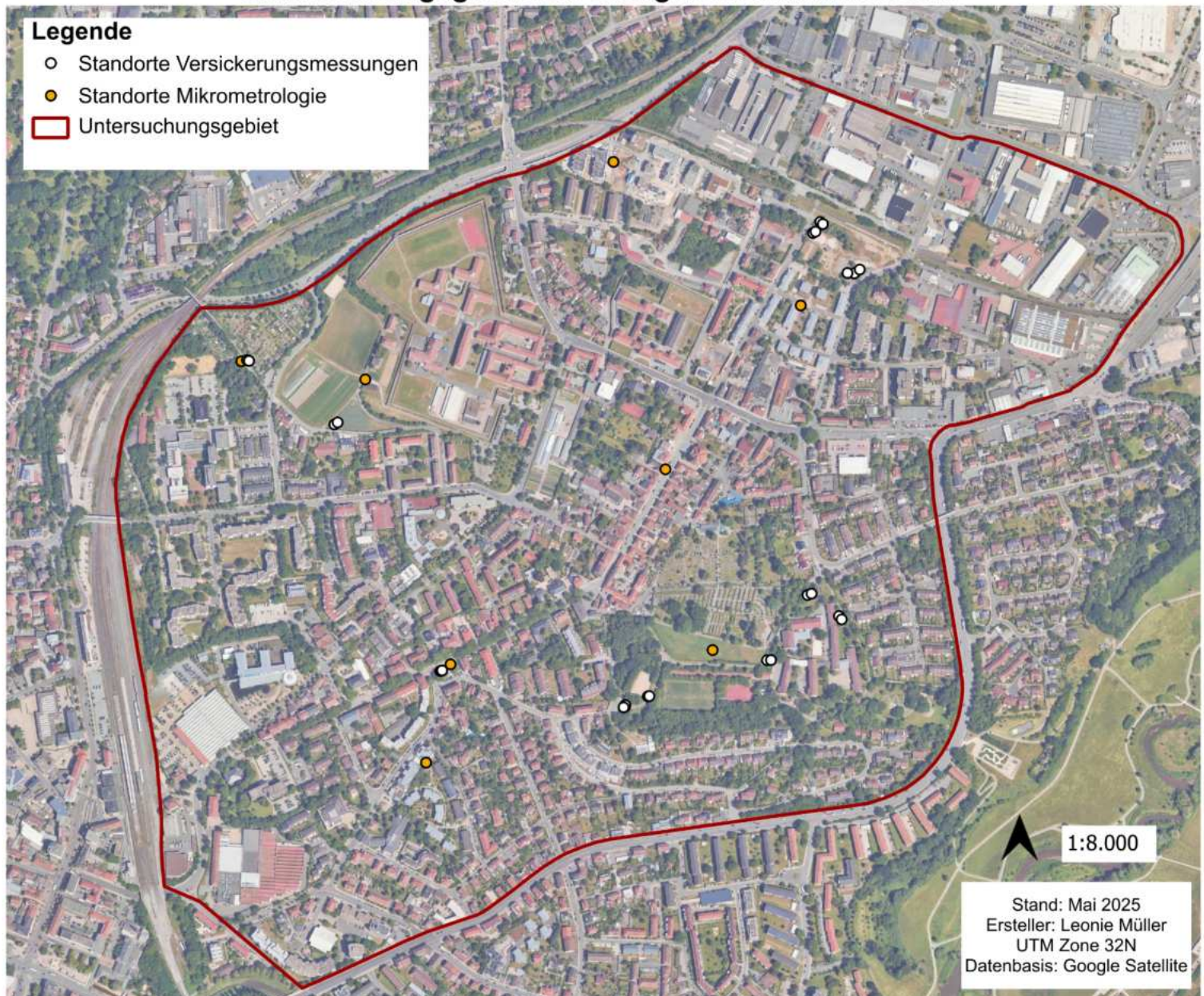


Abbildung 1: Karte vom Untersuchungsgebiet in den Bayreuther Stadtteilen St. Georgen und Hammerstadt und den Standorten zu Versickerungsmessungen sowie mikrometrologischer Messungen.

Es grenzt im Südwesten und Westen an die Bahngleise des Bayreuther Schienennetzes. Im Nordosten dient die Hofer Straße und im Norden die Dr.-Hans-Frisch-Straße als

Grenze. Umrahmt wird das Gebiet im Osten und Südosten von der Albrecht-Dürer-Straße und der Bundesstraße 2. Damit umfasst das untersuchte Gebiet hauptsächlich Wohngebiete, aber auch einen Teil des Industriegebietes und des Einzelhandels. Außerdem befinden sich die Justizvollzugsanstalt, der städtische Friedhof und mehrere Schulen auf dem Gelände. Dies sind die Flächen, auf denen man die niedrigste Versiegelung und beste Versickerung erwartet.

2.1. Oberflächennaher Untergrund

Abbildung 2 gibt eine geologische Übersicht von Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2025).

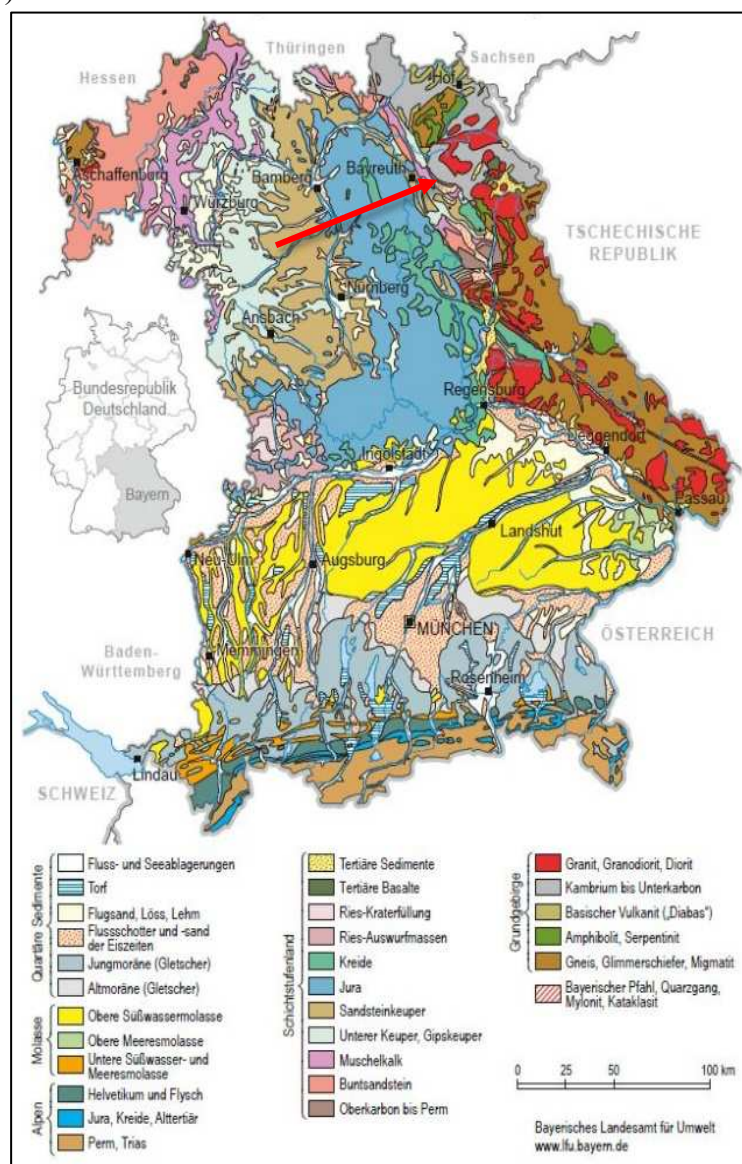


Abbildung 2: Geologische Karte Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2025).

So wie durch Emmert *et al.*, 1977 beschrieben, liegt Bayreuth in dem Gebiet des Ostbayerischen Hügellandes bzw. Bruchschollenland, umgeben von dem fränkischen

Jura im Südwesten (Fränkische Alb) und dem variskischen Grundgebirge (Fichtelgebirge, Frankenwald) im Nordosten. Prinzipiell gibt es neben den Überdeckungen aus dem Holozän und Pleistozän in der Bayreuther Gegend Gesteinsschichten aus dem Unteren Jura (Lias) und der Trias (Keuper, Bundsandstein und Muschelkalk). Die normale Gesteinsschichtung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Schichtenfolge (Stratigraphie) Kartenblatt Bayreuth (Emmert et al., 1977)

[illegible]

Süd-Ost nach Nord-West verlaufende Bruchlinien haben in diesem Gebiet die genannten Gesteinsschichten in Schollen zerlegt und verworfen. Dies ist das Ergebnis tektonischer Prozesse im ausgehenden Mesozoikum (von Freyberg, 1969). Bayreuth selbst befindet



Abbildung 3: Kartenausschnitt aus der geologischen Karte dGK25 (Nummer 6035) (Emmert, Kurt Bader, et al., 1977)

sich in einem ausgedehnten Talkessel, der vorwiegend von Sandsteinkeuper geprägt ist und von Südosten nach Nordwesten durch den Roten Main entwässert wird (Emmert *et al.*, 1977: 12).

Im Untersuchungsgebiet St. Georgen befindet sich im nördlichen Teil (etwas nördlich der Bernecker Str.; siehe Abbildung 3) eine Talfüllung im Zeitraum des Holozän (weiß gefärbt). Dort schnitten die Flüsse noch einmal tief ein. Dann wurden die entstandenen Täler zuerst mit Kies und Sand und dann mit Auelehm und Sand aufgefüllt, wobei sich der Prozess bei Überschwemmungen bis heute fortsetzt.

Im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes ist seit dem Keuper mittlerer 40-50 m mächtiger Burgsandstein mit unteren Basisletten (ein Sandstein, der mit überwiegend rotem Sandstein verzahnt ist) vorhanden (braun gefärbt). Ein prägnantes Merkmal des Mittleren Burgsandsteins ist das häufige Vorkommen von farblich variierenden Hornsteinen, auch Feuersteine genannt, die von gelblich-weißen, rostgelben, braunen, roten und grünen bis hin zu dunkelgrauen Tönen reichen. Diese Farbvielfalt ist das Ergebnis von Quarzausscheidungen (Emmert *et al.*, 1977).

Im Bereich des Bodens befindet sich, wie in Abbildung 4 zu erkennen und durch Peschl (2004) kartiert, im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes der Bodentyp 22e, was fast ausschließlicher Pseudogley und Braunerde-Pseudogley bezeichnet. Der Großteil des Gebietes ist der Bodentyp 424b: fast ausschließlich Braunerde (pseudovergleyt).

Der Friedhof und die Schulen sind im Bereich 424a: fast ausschließlich Braunerde. Einige Messungen fanden auch im westlichen Teil statt, im Bereich des 430b Bodens: fast ausschließlich Pseudogley und Braunerde-Pseudogley aus (grusführendem) Schluff bis Lehm.

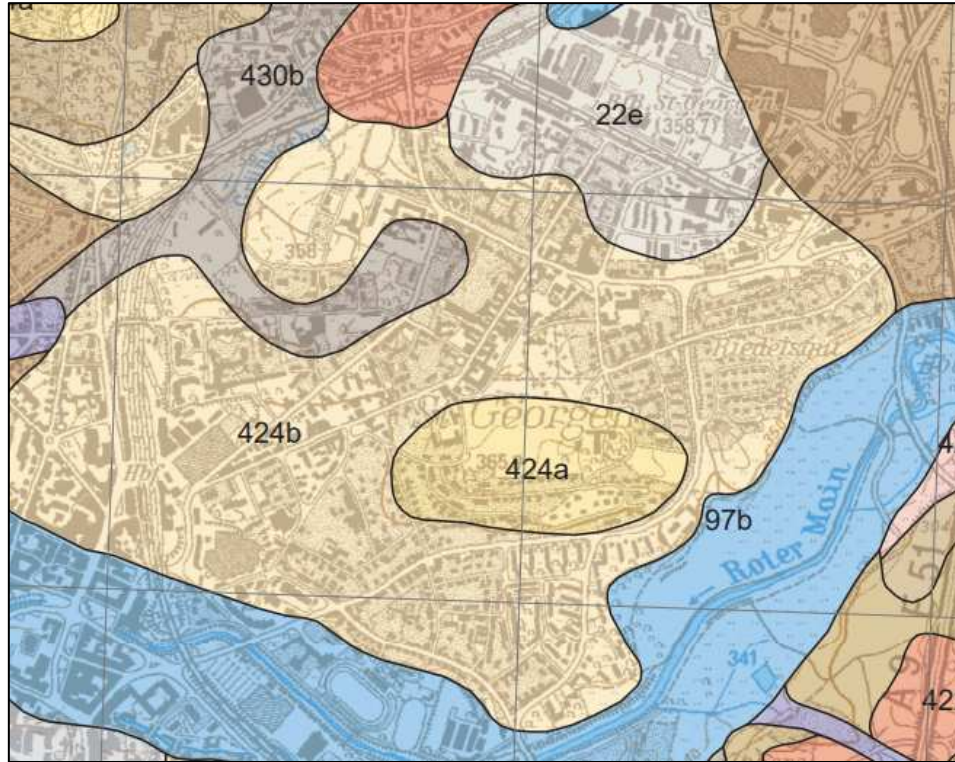


Abbildung 4: Ausschnitt der bodenkundliche Übersichtskarte (Nummer 635) (Peschl, 2004).

2.2. Klima und Klimawandel

Bayreuth liegt in der Klimaregion „Mainregion“ mit der Region „Ostbayerisches Hügelland und Bergland“ nach Nordosten und Südosten (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022). Der jährlich mittlere Niederschlag in Bayreuth beträgt ca. 700 mm (Liter/m²) (Stadt Bayreuth, 2025).

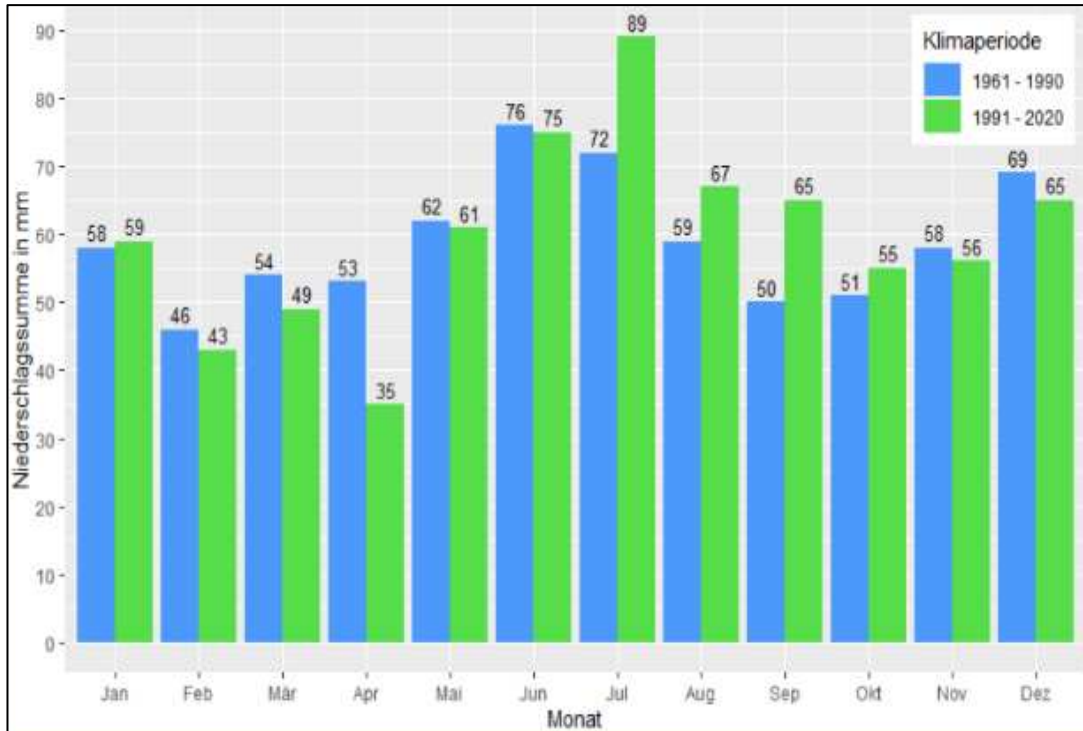


Abbildung 5: Vergleich der mittleren Niederschlagssumme je Monat an der DWD Station Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth et al., 2023).

Abbildung 5 zeigt dabei den Vergleich der mittleren Monatsniederschläge der Perioden 1961-1990 und 1991-2020 an der Klimastation Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth et al., 2023). Es lässt sich ablesen, dass in der früheren Klimaperiode im Frühjahr, sowie im November und Dezember mehr Niederschlag gefallen ist. Seit 1991 ist deutlich mehr Niederschlag im Juli, August und September zu verzeichnen. Grund dafür ist, dass der Klimawandel zunehmend zu Starkregenereignissen führt, da wärmere Luft in der Lage ist, größere Mengen an Wasserdampf aufzunehmen und zu speichern. Starkregenereignisse zeichnen sich durch hohe Regenmengen innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums (mind. 30 mm pro Tag (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2021) in einem begrenzten geografischen Gebiet aus (Fohrer et al., 2016). Abbildung 6 zeigt auch,

hier im Zeitraum 1897-2020, einen linearen Anstieg (rote Linie), gemessen an der Station Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth *et al.*, 2023).

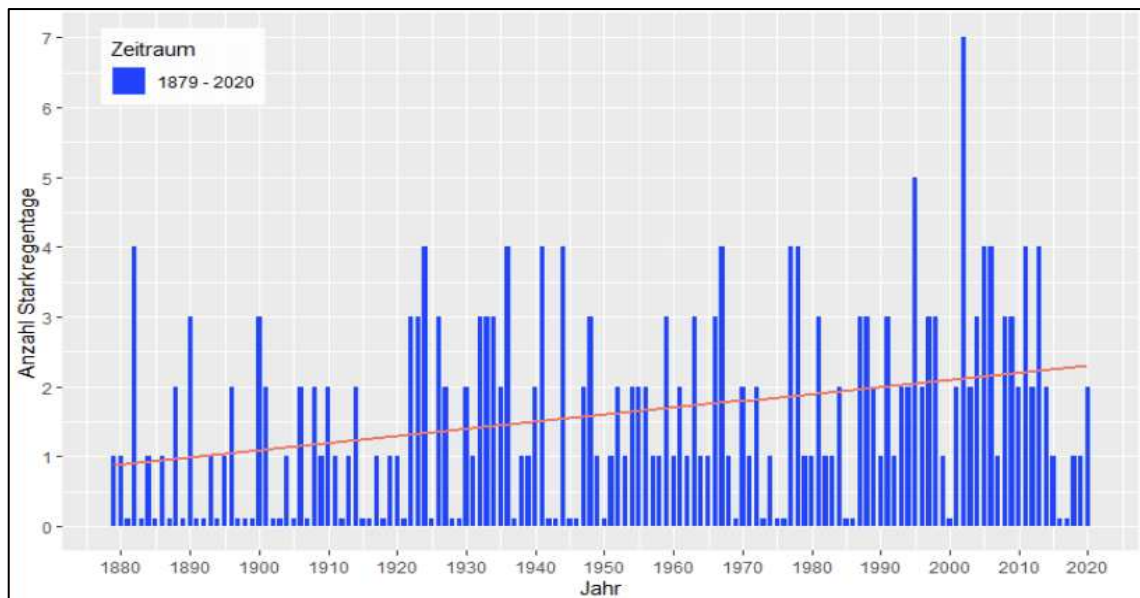


Abbildung 6: Mittlere jährliche Anzahl von Starkregentagen ($\geq 25\text{mm}$) an der DWD Station Heinersreuth Vollhof (Landkreis Bayreuth *et al.*, 2023).

Die Mainregion ist die wärmste Klimaregion Bayerns (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2021). In dieser belief sich im Zeitraum 1971-2000 die mittlere Lufttemperatur auf durchschnittlich 8,5 °C. Der Trend der Jahresmitteltemperatur zwischen 1951 und 2019 liegt bei +1,8 °C (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022). Dies zeigt Abbildung 7.

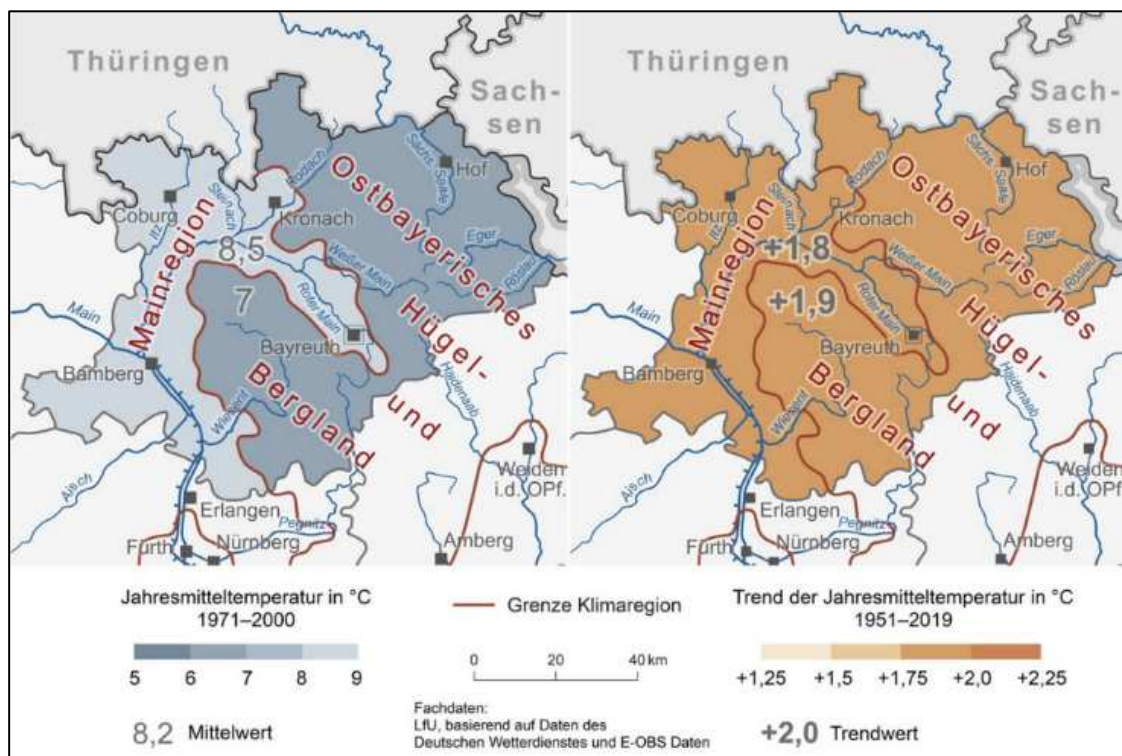


Abbildung 8: Mittlere Lufttemperatur und Änderung der Temperatur in Oberfranken (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022).

Abbildung 8 zeigt den Vergleich mittlerer Lufttemperatur je Monat (homogenisiert) und der Klimastation Heinersreuth-Vollhof etwas westlich von Bayreuth. Auch hier ist im direkten Vergleich zwischen den Zeitperioden 1961-1990 und 1991-2020 eine erhöhte mittlere Lufttemperatur je Monat zu erkennen.

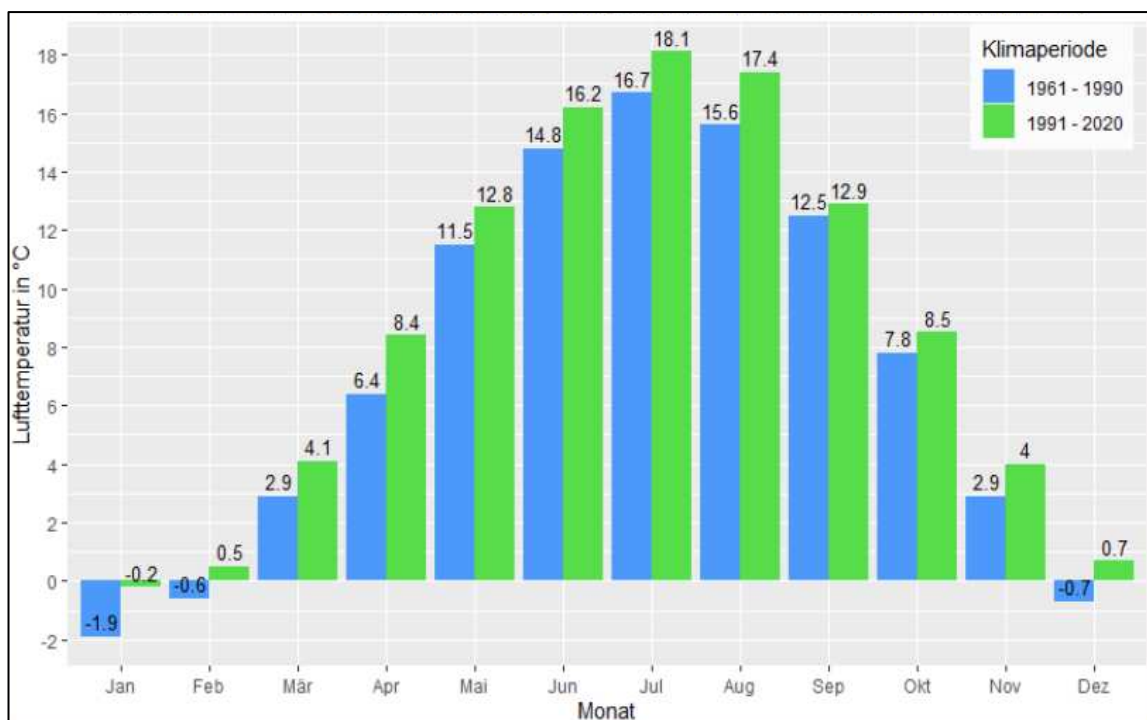


Abbildung 7: Vergleich der Monatsmitteltemperaturen an der DWD Station Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth et al., 2023).

Mit erhöhter Mitteltemperatur steigt die Zahl der Hitzetage (Tag, an denen die Tageshöchsttemperatur 30 °C erreicht oder übersteigt (Deutscher Wetterdienst, 2025)). Auf Abbildung 9 zeigt die rote Linie den linearen Trend (Landkreis Bayreuth *et al.*, 2023). Bei der Analyse der vorgestellten Klimadaten muss der sogenannte Wärmeinseleffekt

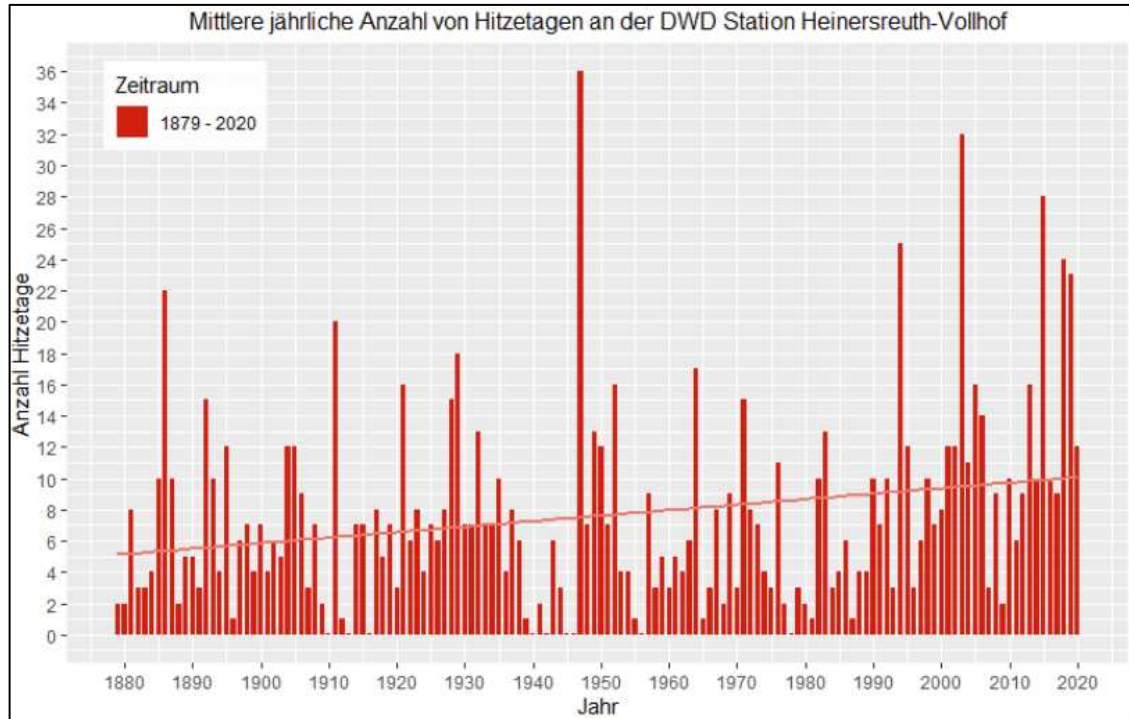


Abbildung 9: Mittlere jährliche Anzahl von Hitzetagen an der DWD-Station Heinersreuth-Vollhof (Landkreis Bayreuth *et al.*, 2023).

berücksichtigt werden. Dieser tritt vor allem im Sommer in urbanen Räumen auf, wo Strukturen wie Gebäude, Straßen und andere versiegelte Oberflächen tagsüber Wärme speichern und diese nachts nur langsam wieder abgeben. Die UV- und Wärmestrahlung wird zwischen Gebäuden abgefangen und die Wärmestrahlung kann durch verringerte Himmelssicht schwieriger abstrahlen (Hollands *et al.*, 2018). Das Fehlen von grüner und blauer Infrastruktur verhindert die Entstehung von Verdunstungskühle, die in natürlichen Landschaften eine wichtige Rolle bei der Temperaturregulation spielt (Halbig, 2024). Auch die Gebäudestrukturen, die Dichte und das Energieverbrauchsverhalten haben Einfluss auf die Höhe des Temperaturunterschieds zwischen urbanen und ruralen Gebieten (Hupfer and Kuttler, 2005: 395).

Die Aufnahme, Speicherung und verzögerte Freisetzung von Wärme, spielt eine zentrale Rolle bei der Veränderung des Stadtklimas im Vergleich zu unversiegelten Gebieten (Wessolek, 2014). Die Stadt ist damit deutlich wärmer als das Umland, aus dem kältere Luft in das urbane (Rand-)Gebiet strömt. Da die Klimastation Heinersreuth-Vollhof außerhalb von Bayreuth steht, ist es sehr wahrscheinlich, dass in Bayreuth und damit auch

in dem zu 41 Prozent (komplett) versiegeltem St. Georgen (eigene Auswertung) vor allem im Sommer höhere Temperaturen herrschen.

3. Bodenhydrologische Grundlagen

Die Bodenhydrologie ist die Wissenschaft, die sich mit dem Transport und der Speicherung von Wasser und Energie im Boden als Teil des Boden-Pflanze-Atmosphäre Kontinuums befasst (Novák und Hlaváčiková 2019). Wichtige Prozesse sind hier unter anderem Niederschlag, Oberflächenabfluss, Infiltration und Evaporation.

Böden werden als Naturkörper bezeichnet und damit als vierdimensionale Ausschnitte aus der oberen Erdkruste, in denen Gestein, Wasser, Luft und lebende Organismen miteinander interagieren (Stahr *et al.*, 2020). Der Boden ist damit ein heterogenes, mehrphasiges, partikuläres, disperses und poröses System mit einer großen Grenzfläche pro Volumeneinheit (Hillel, 2004). Weiterhin wird der Boden als disperses Drei-Phasen-System angesehen: eine enge Verbindung der mineralischen und organischen Partikeln in fester Form, die das Porensystem mit einer flüssigen und gasförmigen Phase ausfüllen (Baumgartner, 1996). Die flüssige Phase ist das Wasser im Boden, auch Bodenlösung genannt, aufgrund der darin gelösten Stoffe. Diese Phase ist essenziell für mechanische Eigenschaften, wie der Festigkeit, Verdichtbarkeit, Durchlässigkeit und Plastizität des Bodens (Hillel, 2004).

Die gasförmige Phase wird als Bodenatmosphäre bezeichnet (Hillel, 2004). Partikel der festen Phase bilden ein Gerüst mit einer inneren Oberfläche, die zu den Hohlräumen hin exponiert ist. Diese Mischung aus unterschiedlichen Korngrößen wird in Feinboden (<2 mm) und Skelett unterteilt und als Bodenmatrix bezeichnet (Baumgartner, 1996). Dieses Hohlraumssystem stellt das räumliche Negativ des Bodens dar (ebd.).

Der Anteil der Hohlräume des Gesamtvolumens beträgt bei mittlerer Lagerungsdichte ca. 50 % (Baumgartner, 1996). Dabei wird zwischen feinen, mittleren und groben Hohlräumen unterschieden, wobei die feinen und mittleren Porenräume zusammen die sogenannte Feldkapazität ergeben (Baumgartner, 1996). Wenn der Boden bis zur Feldkapazität gefüllt ist, erfolgt quasi keine Versickerung. Diese geschieht nur, wenn der Wassergehalt die Feldkapazität überschreitet (ebd.).

Das Porenvolumen (auch Porenziffer genannt) wird von Faktoren wie der Körnung und Kornform, dem Gehalt an organischer Substanz im Boden sowie der Bodenentwicklung beeinflusst. Grundsätzlich steigt das Porenvolumen mit abnehmender Korngröße an

(Blume *et al.*, 2010). Die Unterscheidung von Bodenteilchen und -Partikel sind in Tabelle 2 dargestellt (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002).

Tabelle 2: Korneinteilung nach DIN 4022.

Benennung	Korngröße in mm
Blöcke	>200
Steine	>63
Kieskorn	>2
Sandkorn	>0,063
Schluffkorn	>0,0063
Tonkorn	≤0,002

Die Zunahme der Bodenstabilität und der Lagerungsdichte wird Bodenverdichtung genannt (Blume *et al.*, 2010).

Der Boden kann in Hinblick auf Wasser in zwei Bereiche eingeteilt werden: gesättigt und ungesättigt (Wilhelm, 1997). In Ersterem sind alle Hohlräume des Bodens mit Wasser gefüllt, eine Bewegung erfolgt nur nach dem Wassergradienten. Wenn sich dieses Grundwasser im hydraulischen Gleichgewicht befindet, so ist die Grundwasseroberfläche durch den Grundwasserspiegel gekennzeichnet, der sich in einem Wasserstandsrohr einstellt (= phreatische Oberfläche) (Blume *et al.*, 2010). Bei Grundwasserleitern (Aquiferen), geologische Schichten, die Wasser speichern und leiten, wird zwischen Poren-, Karst- und Kluftgrundwasserleitern unterschieden (Fohrer *et al.*, 2016). Im ungesättigten Bereich hat das Wasser nicht alle Hohlräume gefüllt und wird von Wurzeln, der Schwerkraft, dem Matrixpotential, sowie dem osmotischen Potential beeinflusst (Wilhelm, 1997), womit der Wassergehalt dynamisch ist. Es wird auch als Bodenwasser bezeichnet (ebd.).

Dies wird auch als volumetrischer Wassergehalt bezeichnet, der „als Quotient der Volumina des entfernten Wassers und des Bodens (im Stechzylinder) definiert ist“ (Stahr *et al.*, 2020: 131). Hier kommt das Wasser als feste Wasserhüllen, diffuse Doppelschichten und freies Porenwasser vor (Wilhelm, 1997). Der Bereich des Bodens, der nahezu gesättigt ist, nennt man Kapillarzone (ebd.).

Böden können Wasser durch Kapillarkräfte zurückhalten. Anschaulich beschreiben lassen sich die Kapillarkräfte, beziehungsweise der kapillare Wasseraufstieg durch ein dünnes Kapillarrohr, das in Wasser getaucht wird. Daraufhin steigt das Wasser zu einer bestimmten Höhe, die indirekt proportional zum Durchmesser des Rohrs ist. Der Wasserspiegel innerhalb des Rohres hat eine gekrümmte Form, die als Meniskus

bezeichnet wird (Novák and Hlaváčiková, 2019). An dieser Grenzfläche zwischen Wasser und Luft tritt ein Drucksprung auf: der Kapillardruck, der für das Aufsteigen des Wassers verantwortlich ist (Stahr *et al.*, 2020). Der Boden kann als Bündel von solchen Kapillarrohren verschiedener Durchmesser idealisiert werden (Novák and Hlaváčiková, 2019). Kapillarkräfte wirken vor allem in den mittleren Poren (Baumgartner, 1996) und lassen nach, wenn sie die Poren mit Wasser füllen (Lili *et al.*, 2008). Neben dem Kapillarwasser, das in den Poren oder als Menisken zwischen den Bodenpartikeln vorhanden ist, speichern alle Böden, insbesondere Tonböden, zusätzlich Wasser, das durch elektrostatische Kräfte aber auch Van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrücken an die Oberflächen der Bodenteilchen gebunden wird (Stahr *et al.* 2008; Hartge *et al.*, 2014; Hillel, 2003). Adsorption ist ein Phänomen an Grenzflächen, das durch die unterschiedlichen Anziehungs- oder Abstoßungskräfte zwischen Molekülen, Ionen oder verschiedenen Phasen an ihren freiliegenden Oberflächen entsteht (Hillel, 2003). Menisken wirken gegen die Schwerkraft, indem sie das Wasser aus allen Richtungen in die Zwischenräume ziehen (Hartge *et al.* 2020). Je feinkörniger der Boden ist, desto größer ist die Oberfläche der Teilchen. Dies führt zu einem höheren Wasseranteil (Hartge *et al.* 2020). Sandige Böden und Substrate mit Einzelkorngefüge besitzen nur wenige Mittel- und Feinporen, was zu einer geringen Kapillarwirkung führt (Burkhardt, Kulli and Saluz, 2022).

3.1. Matrixpotential

Der physikochemische Zustand des Bodenwassers lässt sich durch seine freie Energie je Masseneinheit, auch als Potential beschreiben (Hillel, 2003). Dieses Energiepotential kann als Differenz der partiellen spezifischen freien Energie zwischen Bodenwasser und normalem Wasser betrachtet werden (ebd.). Das hydraulische Potential beschreibt die Arbeit, die erforderlich ist, um eine infinitesimal kleine Menge Wasser von einem Referenzzustand aus reversibel in den Boden zu transportieren (Stahr *et al.*, 2020). Wasser fließt im Boden immer vom höheren zum niedrigeren hydraulischen Potential (Stahr *et al.*, 2020; Hillel, 2003: 105). Wenn im Boden Potentialunterschiede im Potentialfeld vorkommen, werden diese durch Ausgleichsbewegungen wieder ausgeglichen (Hartge *et al.*, 2014). Der Zusammenhang zwischen hydraulischem-, Matrix- und Gravitationspotential ist folgender:

$$\Psi_H = \Psi_m + \Psi_Z \text{ (Hartge et al., 2014).}$$

Das Gravitationspotential (ψ_z) ist die Energie, die erforderlich ist, um eine bestimmte Menge Wasser von einem Referenzniveau auf eine bestimmte Höhe (z) zu heben (Wilhelm, 1997). Das Matrixpotential (ψ_m) hält das Wasser gegen die Schwerkraft durch die Adsorptions- und Kapillarkräfte der Bodenpartikel (Wilhelm, 1997) und beschreibt damit die Stärke, mit der das Bodenwasser von der Bodenmatrix festgehalten wird (Hillel, 2003). Grund dafür sind die Kohäsionskräfte der Wassermoleküle und die Adhäsion der Wassermoleküle (Hartge *et al.*, 2014). Das Matrixpotential ist stets negativ, der Betrag des Potentials wird als Wasserspannung bezeichnet (Stahr *et al.*, 2020).

Nässe und Matrixpotential stehen in einer funktionalen Beziehung zueinander. Die grafische Darstellung dieser Wechselwirkung wird als Bodenfeuchtekurve bezeichnet (Hillel, 2003). Dabei gilt: je trockener der Boden, desto höher ist die Saugwirkung (ebd.). (WASSERRÜCKHALTEVERMÖGEN BONAN 2019: 118).

Die sog. pF-Kurve zeigt einen Zusammenhang zwischen Wassermenge und dem Wasserpotential im Boden im Bereich des Matrixpotentials (Abbildung 10). Sie gibt Aufschluss über das für Pflanzen verfügbare Wasser, sowie über die Wassermenge, die der Boden aufnehmen kann (Hartge *et al.*, 2014).

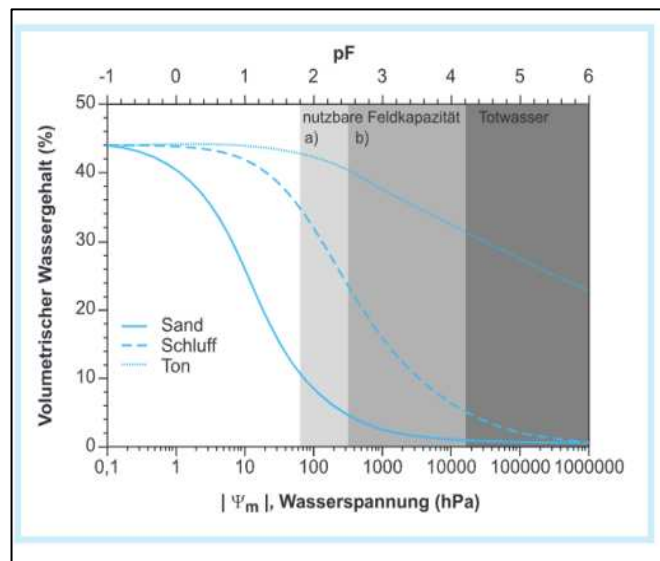


Abbildung 10: Retentionskurven der Hauptbodenarten (Stahr *et al.*, 2020).

3.2. Hydraulische Leitfähigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit dient als Maß für die Fähigkeit eines Bodens, Wasser hindurchzulassen. Die Durchflussmenge kann durch das Darcy'sche Gesetz beschrieben werden:

$$q = k * \frac{d\Psi}{dl}$$

Dabei bezeichnet q die Wassermenge, die pro Zeiteinheit durch eine Fläche, den sogenannten Fließquerschnitt, hindurchfließt. Die Einheit von q wird in $\text{cm}^3, \text{cm}^2, \text{s}^{-1}$, oder m^3, m^2 , angegeben. ψ steht für das antreibende Potenzial, l für die Fließstrecke und k für einen Proportionalitätsfaktor des Substrats, der als hydraulische Leitfähigkeit bezeichnet wird (Blume *et al.*, 2010). Wenn Wasser das Fließmedium ist, wird k als k_f bezeichnet (ebd.). Der k_f -Wert erfasst alle Einflüsse, die der Boden auf die Fließbewegung des Wassers ausübt (Hartge *et al.*, 2014). Die Hydraulische Leitfähigkeit kann je nach vertikaler oder horizontaler Messung variieren (ebd.).

Es wird bei der hydraulischen Leitfähigkeit zwischen gesättigt und ungesättigten unterschieden. Bei ersterem wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers durch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_f) bestimmt (Davie, 2002). Bei ungesättigten Bedingungen ist die hydraulische Leitfähigkeit eines Bodens stark vom Wassergehalt abhängig (ebd.). Mit zunehmender Austrocknung des Bodens sinkt der am Wassertransport beteiligte Porenanteil, und die hydraulische Wasserleitfähigkeit nimmt ab (Fohrer *et al.*, 2016). Nach dem Ende der Wasserzufuhr, beispielsweise nach anhaltenden Niederschlägen, passt sich der Wassergehalt im Bodenprofil schrittweise an, bis ein ausgeglichenes hydraulisches Potenzial erreicht ist (Blume *et al.*, 2010: 302).

Makroporen im Boden erhöhen die hydraulische Leitfähigkeit, da ihre Größe einen erleichterten Wasserfluss ermöglicht und dadurch die Durchlässigkeit des Bodens signifikant gesteigert wird (Wang *et al.*, 2023). Risse im Boden spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle für die hydraulische Durchlässigkeit, insbesondere in ausgedehnten Böden, wo Austrocknungsrisse die hydraulischen Eigenschaften erheblich verändern können. Sie fungieren als bevorzugte Wasserleitpfade, wodurch die hydraulische Leitfähigkeit gesteigert wird und die Wasserverteilung innerhalb der Bodenmatrix beeinflusst wird. (Gao *et al.*, 2024).

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit kann mit Hilfe eines Doppelring-Infiltrometers eindimensional gemessen werden (vgl. 4. Methodik) (Teixeira *et al.*, 2014: 290).

3.3. Infiltration

Infiltration bezeichnet das Eindringen von Wasser in die Bodenoberfläche, das nach Niederschlägen, Bewässerung oder Überflutung erfolgt (Bronstert, 1994). Zusätzlich werden Vorgänge, die diesen Prozess beeinflussen, miteinbezogen (Hartge *et al.*, 2014). Die Infiltration von Niederschlagswasser in den Boden sowie dessen Weitertransport werden durch die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens bestimmt (Fohrer *et al.*, 2016).

Der Verlauf wird durch die aktuelle Infiltrationsrate, also das Wasservolumen, das pro Zeiteinheit in den Boden versickert, beschrieben (Baumgartner, 1996). Die kumulative Infiltration wiederum ist das gesamte Wasservolumen, das innerhalb eines bestimmten Zeitraums versickert ist (Baumgartner, 1996). Die Infiltrationsrate wird häufig durch die Dicke der Wasserschicht ausgedrückt, die während eines bestimmten Zeitintervalls infiltriert wird (Einheit: Länge/Zeit) (Novák and Hlaváčiková, 2019: 138). Die Infiltrationsrate ist abhängig von Körnung, Wassergehalt, Lagerungsdichte, Bewuchs des Bodens (Wilhelm, 1997), Anzahl der Makroporen (Fohrer *et al.*, 2016) sowie Risse und Krusten an der Bodenoberfläche (Lili *et al.*, 2008). Normalerweise werden die Einheiten dieser Parameter in mm/min, mm/h oder in cm/min, cm/h angegeben (Lili *et al.*, 2008). Dies zeigt, dass die Infiltrationsrate proportional zum Kehrwert des Abstands zur Benetzungsfront ist (Hillel 2004). Die maximal mögliche Infiltrationsrate bezeichnet man als Infiltrationskapazität (Baumgartner, 1996; Ward, 2000).

Die Vorrückgeschwindigkeit der Befeuchtungsfront ist bei einem höheren Anfangswassergehalt größer als bei einem niedrigen (Hartge *et al.*, 2014). Abbildung 11 zeigt den idealtypischen Infiltrationsverlauf in einem ursprünglich trockenen Boden (blau) und einem ursprünglich feuchten Boden (grün).

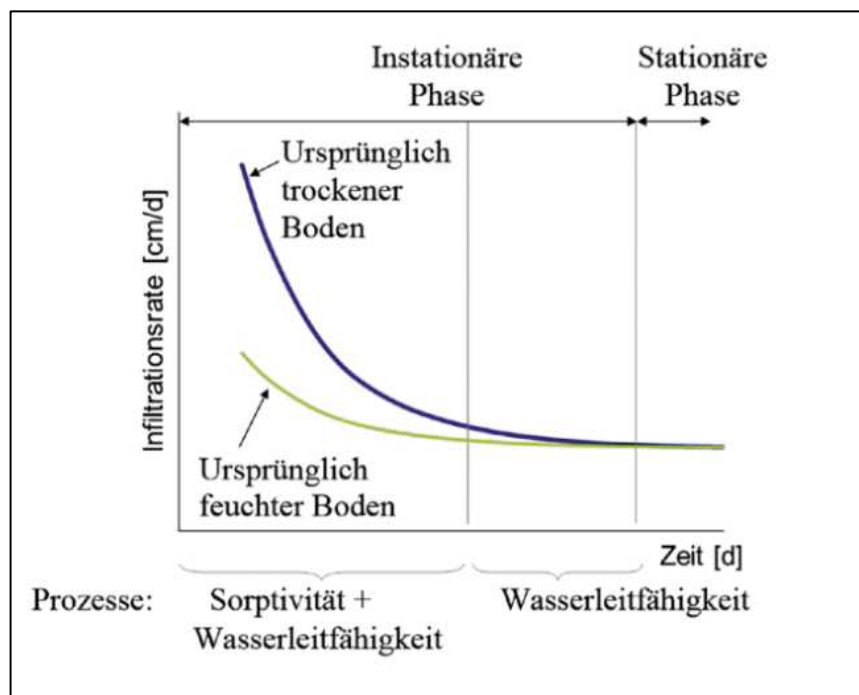


Abbildung 11: Typischer Infiltrationsverlauf (Fohrer *et al.*, 2016).

Der Effekt der anfänglichen Nässe des Bodens kann in den ersten Phasen der Infiltration signifikant sein, wie in der Abbildung zu erkennen, schwindet jedoch im Laufe der Zeit (Hillel 2004).

Zu Beginn von Infiltrationsversuchen ist die Infiltrationsrate am höchsten, da der Boden trocken ist und die Sorptivität eine wesentliche Rolle spielt. Nach einer bestimmten Versuchsdauer stellt sich die Endinfiltrationsrate ein, die ungefähr der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) des Bodens entspricht (Fohrer *et al.*, 2016; Hartge *et al.*, 2014). Zudem hängt der Wassergehalt in der Transportzone maßgeblich von der Menge der zugeführten Wassermenge ab (Hartge *et al.*, 2014). Es gibt verschiedene Phasen der Infiltration im Boden: Sättigungs-, Übergangs-, Transport- und Befeuchtungszone (Hartge *et al.* 2020).

Dabei gibt es keine einheitliche Infiltrationsfront. Das Wasser nimmt vorzugsweise Wege im Boden, durch die schnell an Tiefe oder laterale Strecke gewonnen werden kann. Dies nennt sich präferentieller Fluss (Hartge *et al.* 2020). Beeinflusst wird der Fluss durch Regenwurmtunnel, Wurzelröhren, Schrumpfrisse (ebd.), kleinräumige Texturunterschiede in makroskopisch homogenen Böden (Baker und Hillel 2020), sowie Lufteinschlüsse und Benetzungshemmungen (ebd.). Dabei ist zu beachten, dass Feldmessungen eine beträchtliche räumliche Heterogenität von Infiltrationsraten und -kapazitäten zeigen (Fohrer *et al.*, 2016). In dichten Unterbodenhorizonten oder bei Verdichtungen im Unterboden wird die Infiltration im Oberboden durch rückstauendes Wasser eingeschränkt, da die geringe Wasserleitfähigkeit des Unterbodens den Wassertransport behindert (Fohrer *et al.*, 2016).

Zu Beginn von Regenereignissen, d.h. vor dem Einsetzen von Sättigung der Bodenoberfläche, ist die Regenintensität meist kleiner als die Infiltrationskapazität. Mit dieser wird die unterschiedliche Fähigkeit von Böden ausgedrückt, in Abhängigkeit ihres Feuchtegehalts Wasser aufzunehmen (Fohrer *et al.*, 2016). Mit dem Regenwasser werden dem Boden dabei immer auch gelöste Stoffe zugeführt (Blume *et al.*, 2010: 153).

Wenn die Zuflussrate von Wasser geringer ist als die Infiltrabilität des Bodens, wird der Infiltrationsprozess durch die Zuflussrate bestimmt, die in diesem Fall mit der Infiltrationsrate übereinstimmt (Lili *et al.*, 2008).

Bei der Infiltration muss beachtet werden, dass Luft aus dem Boden entweichen muss, damit Wasser eindringen kann. Dies passiert bei geringen Niederschlägen auf kleinen Infiltrationsflächen und bei heterogenen Porensystemen. Wird die Luft jedoch eingeschlossen, überträgt sie ihren Druck auf das Wasser. Dies führt zum schnellen Ausgleich des hydraulischen Druckgradienten und zum Erliegen der Wasserbewegung (Hartge *et al.* 2020). Das Wasser bewegt sich erst weiter, wenn die Luft umverteilt wird und entweichen kann (Elliott und Walker, 1982).

Weiterhin ist die Resistenz der Bodenoberfläche gegenüber Verschlammung entscheidend für den Vorgang der Infiltration. Dies ist abhängig von der Feuchtigkeit des Bodens und der Menge an Niederschlag direkt auf den Boden. Auch die Vorwärtsbewegung der Befeuchtungsfront führt zu Verschlammung. Das Material wird meist in tieferen Bereichen des Bodens abgelagert, da der Gradient der Befeuchtungsfront in der Tiefe durch den höheren Wassergehalt abnimmt (Hartge *et al.*, 2014). Wenn keine Bodenbedeckung vorhanden ist, zerkleinern Regentropfen bei hoher Niederschlagsintensität die Bodenaggregate. Dies führt dazu, dass die größeren, besonders gut leitfähigen Poren an der Bodenoberfläche verstopft werden (Fohrer *et al.*, 2016). Dabei kann sich eine bis zu 1,5 cm starke Kruste ausbilden. Diese Kruste versiegelt die Bodenoberfläche und kann die Wasserleitfähigkeit des Bodens um 1–2 Zehnerpotenzen sowie die Verdunstungsmenge vermindern (Fohrer *et al.*, 2016).

Wenn nicht flächendeckend infiltriert wird (durch Niederschlag), sondern z.B. durch Bewässerungsprojekte eher punktuell, muss die Infiltration als mindestens zweidimensional (horizontal und vertikal) betrachtet werden (Hartge *et al.*, 2014). Wie in Abbildung 12 zu erkennen, verläuft die Infiltration (hier aus einer Bewässerungsrinne) je nach Bodenart verschieden ab (Hartge *et al.*, 2014). t_1 , t_2 und t_3 sind dabei Zeitspannen seit dem Beginn der Infiltration.

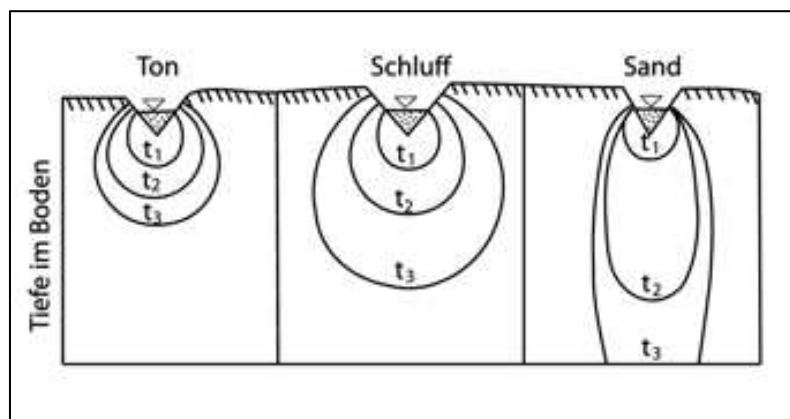


Abbildung 12: Infiltration aus einer Bewässerungsrinne in Ton-, Schluff- und Sandboden (Hartge *et al.* 2020).

Wenn die Regenintensität unter dem Anfangswert der Infiltrationsfähigkeit des Bodens liegt, aber über dem Endwert, absorbiert der Boden zunächst weniger Wasser als seine potentielle Rate, und der Wasserfluss im Boden erfolgt unter ungesättigten Bedingungen. Setzt sich der Regen jedoch mit derselben Intensität fort und verringert sich die Infiltrationsfähigkeit des Bodens, wird die Bodenoberfläche schließlich gesättigt (Hillel, 2003). Laut Rubin (1966) gibt es drei Arten von Regenversickerung: nicht stauende Versickerung, vor-stauende Versickerung und Stauwasser-Versickerung. Wenn die Wasserzufuhr an der Bodenoberfläche stoppt, endet der Infiltrationsprozess, doch die

Abwärtsbewegung des Wassers im Boden setzt sich weiterhin fort (Hillel, 2003). Prinzipiell gibt es hier zwei Möglichkeiten: entweder der Boden ist voll gesättigt, dann erfolgt eine innere Entwässerung, oder er ist ungesättigt, dann erfolgt eine Umverteilung. Tiefere Bereiche werden nasser, während höhere gelegene Bereiche trockener werden (Hillel, 2003). Die Dauer und Geschwindigkeit des Abflusses während der Umverteilung beeinflussen die effektive Wasserspeicherung im Boden (ebd.).

Wenn die Regenintensität größer ist als die aktuelle Infiltrationsrate, kommt es zu einem Oberflächenabfluss, auch Horton'scher Abfluss genannt (Horton, 1933). Dies tritt vor allem auf, wenn stärkere Niederschlagsereignisse auf eine geringe Infiltrationskapazität des Oberbodens treffen. Besonders betroffen sind Böden mit einer niedrigen hydraulischen Leitfähigkeit in der obersten Bodenschicht, wobei Verdichtungen, Verschlämmungen oder Verkrustungen diesen Effekt zusätzlich verstärken (Fohrer *et al.*, 2016). Wenn die Bodenoberfläche schon gesättigt ist und keinen Niederschlag mehr aufnehmen kann, kommt es ebenfalls zu einem Oberflächenabfluss, auch Dunn'scher Abfluss genannt (Dunne, Moore and Taylor, 1975). Dazu zählt auch Abfluss, der aufgrund von Niederschlag auf Flüsse, Seen oder Feuchtgebietsflächen auftritt (Fohrer *et al.*, 2016). Zwischenabfluss bezeichnet den Teil des Niederschlags, der nicht bis zur Grundwasseroberfläche versickert, sondern seitlich als unterirdischer Abfluss in das nächstgelegene Gewässer fließt (ebd.).

Auch wenn Wasser auf hydrophobe Böden trifft, wie häufig in Mitteleuropa unter Grasvegetation auf sandigen Böden oder unter Nadelwäldern mit ausgeprägten Rohhumusauflagen, kann es zu Oberflächenabfluss kommen (Fohrer *et al.*, 2016). Die Anhäufung von schwer abbaubaren Humusfraktionen zusammen mit langen Trockenperioden kann zu Hydrophobie führen. Dadurch wird die Fähigkeit der Bodenteilchen, Wasser aufzunehmen, stark eingeschränkt. Der entscheidende Faktor für diese Benetzungshemmung ist der Benetzungswinkel an den Bodenpartikeln, da er die Interaktion zwischen Wasser und Bodenoberfläche bestimmt (Fohrer *et al.*, 2016).

Der sogenannte Abflussbeiwert (ψ oder C-Wert) gibt an, welcher Anteil des Niederschlags durch die Bodenoberfläche abfließt. Er wird gebildet aus dem Verhältnis zwischen dem abflusswirksamen (effektiven) Niederschlag (N_{eff}) und dem Gesamtniederschlag (N).

$$\psi = N_{\text{eff}} / N$$

Die Höhe des effektiven Niederschlags hängt dabei von verschiedenen Gebietsparametern ab. Hierzu zählen insbesondere das Gefälle des Geländes, die Nutzung

des Landes, die Durchlässigkeit und der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens vorab, gegebenenfalls Rückhaltungen durch natürliche Geländemulden oder Seen sowie künstliche Speichereinrichtungen. Des Weiteren sind auch die Intensität und Dauer der Niederschläge sowie die Temperaturen von Luft und Boden relevant (Schneespeicher, Schneeschmelze, Frost im Boden). Man unterscheidet zwischen dem mittleren Abflussbeiwert, dem Spitzenabflussbeiwert und dem Endabflussbeiwert. Für den mittleren Abflussbeiwert (ψ_m) ergeben sich je nach Art der Befestigung unterschiedliche Werte (vgl. Tabellen 3 und 4). Wichtig ist, dass die Werte nur Richtwerte und je nach spezifischen Bedingungen variieren können (bauformeln.de, o. J.).

Tabelle 3: Mittlere Abflussbeiwerte (ψ_m) für Dächer nach DWA-M 153.

Flächentyp	Art der Befestigung	ψ_m
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	0,9 – 1,0
	Ziegel, Dachpappe	0,8 – 1,0
Flachdach (Neigung bis 3° oder ca. 5 %)	Metall, Glas, Faserzement	0,9 – 1,0
	Dachpappe	0,9
	Kies	0,7
Gründach (Neigung bis 15° oder ca. 25 %)	humusiert < 10 cm Aufbau	0,5
	humusiert \geq 10 cm Aufbau	0,3

Tabelle 4: Mittlere Abflussbeiwerte (ψ_m) für Straßen, Wege und Plätze (flach) nach DWA-M 153.

Flächentyp	ψ_m
Asphalt, fugenloser Beton	0,9
Pflaster mit dichten Fugen	0,75
fester Kiesbelag	0,6
Pflaster mit offenen Fugen	0,5
lockerer Kiesbelag, Schotterrasen	0,3
Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine	0,25
Rasengittersteine	0,15

3.4. Anthropogene Einflüsse auf bodenhydrologische Prozesse

Landnutzungsänderungen, wie Urbanisierung, Landwirtschaft und Forstwirtschaft, verändern die Bodenstruktur und -zusammensetzung, was die Wasserinfiltration und -speicherung beeinflusst.

In urbanen Räumen, wie auch im Untersuchungsgebiet St. Georgen, ist die Versiegelung der Böden ein wichtiger Faktor. Bodenversiegelung wird als die dauerhafte Bedeckung der Bodenoberfläche durch Gebäude, Infrastrukturen oder jegliches undurchlässige künstliche Material definiert (Ungaro *et al.*, 2014). Bodenbefestigungen im urbanen und ruralen Raum sind notwendig, um die Tragfähigkeit von Bauwerken und Verkehrswegen zu verbessern und führen gleichzeitig zu einer Verdichtung des vorhandenen Untergrundes, was die Infiltration von Wasser erschwert (Wessolek, 2014). Weitere Merkmale von Böden in Ballungsräumen sind erhöhte Skelett- bzw. Steingehalte, Ablagerungen von technogenen Substraten, erhöhte Humusgehalte bis in Tiefen von 40 bis 50 cm sowie Veränderungen des Grundwasserflurabstandes (Wessolek, 2014).

Künstlicher Bauschutt im Boden urbaner Gebiete kann die Infiltration von Regenwasser erheblich verringern. Dies gefährdet die Effektivität von Infiltrations- und Biofiltrationsanlagen, da ihre Vorteile durch die eingeschränkte Wasseraufnahme des Bodens stark beeinträchtigt werden können (Pitt *et al.*, 2002). Mineralische Bauabfälle, wie Beton und Ziegel, können den pH-Wert des Bodens beeinflussen und die Verfügbarkeit essenzieller Nährstoffe wie Ammonium und Nitrat reduzieren. Dies wirkt sich negativ auf die Bodenqualität aus und beeinträchtigt dessen Funktionalität (Kourmouli, Stevens and Quinton, 2024).

Versiegelungsmaßnahmen haben die stärksten Auswirkungen auf den Wasserkreislauf, indem sie den kapillaren Aufstieg verringern oder unterbrechen, die Verdunstung verringern, die Infiltration verkürzen und verringern sowie den Oberflächenabfluss beschleunigen und erhöhen (Wessolek, 2014).

Durch die Verringerung der Wasserinfiltrationskapazität und die Verminderung der Grundwasserneubildung wird das Überschwemmungsrisiko erhöht (Pérez-Morales, Romero-Díaz and Illán-Fernandez, 2021). Diese Veränderungen im Wasserkreislauf können zu einem erhöhten Überschwemmungsrisiko führen, insbesondere in städtischen Entwicklungsgebieten, die potenziell gefährdet sind. Die erhöhten Abflussmengen tragen ebenfalls zu diesem Risiko bei (Ungaro *et al.*, 2014).

Zusätzlich werden Böden durch Versalzung, Kontamination und Versauerung durch den Menschen negativ beeinträchtigt (Greul, 2023).

Durch den menschengemachten Klimawandel hat die Mainregion in Oberfranken bereits einen mittleren Temperaturanstieg von 1,8 °C (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022). Je nachdem, welche Maßnahmen gegen den Klimawandel ergriffen werden und wie schnell, werden die Hitzetage in Bayreuth sich verdoppeln oder vervierfachen (Änderung 2071-2100).

Es verdunstet dadurch mehr und kommt vermehrt zu Starkregenereignissen und Dürreperioden. Dies hat Auswirkungen auf den Boden und den Wasserhaushalt (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022). Im Boden kommt es zu Trockenrissen, wodurch die Aufnahme von Wasser anfangs gesteigert werden kann (Mitchell and van Genuchten, 1991). Allerdings kann es auch zu einer Krustenbildung kommen, was den Infiltrationsprozess wiederum hindert.

Eine Begrünung kann in Schwammstädten die Abflussspitzen im Vergleich zu konventioneller Stadtplanung deutlich senken– und zwar um bis zu 92 % (Meng *et al.*, 2022). Vegetation, insbesondere Sträucher, spielt eine entscheidende Rolle in Schwammstädten, da sie Wasser aufnimmt und speichert, zur Verbesserung der Wasserqualität beiträgt und gleichzeitig die Entstehung von Staunässe im städtischen Raum reduziert (Wang *et al.*, 2023).

Auch organischer Dünger kann in urbanen Räumen die Infiltrabilität verbessern, da er den Oberboden stabilisiert und somit den Oberflächenabfluss reduziert. Untersuchungen belegen, dass die Anwendung organischer Zusätze wie Kompost die Porosität und die Aggregatstabilität des Bodens erhöht, was wiederum höhere Infiltrationsraten fördert (Cogger, 2013). Gerade bei Trockenheit und Hydrophobie begünstigt organisches Material den präferenziellen Fluss und bringt Mikroorganismen mit (Burkhardt, Kulli and Saluz, 2022). Sie steigern die Wasserspeicherkapazität des Bodens, wodurch eine stabilere Bodenmatrix entsteht, die eine geringere Anfälligkeit für Erosion aufweist (Risse *et al.*, 2011).

Eine Lösung für die Verbesserung der Infiltrabilität in urbanen Räumen sind durchlässige Bodenbeläge. Sie führen zu einer Verringerung des Oberflächenabflusses und der Abflussgeschwindigkeit (Sieker, 1999), sparen Wasser durch Recycling ein und vermeiden Verschmutzung durch die natürliche Filterfunktion des Bodens (Scholz and Grabowiecki, 2007). Eine schematische Darstellung des Abflussverhaltens mit teildurchlässiger Pflasterung ist in Abbildung 13 dargestellt.

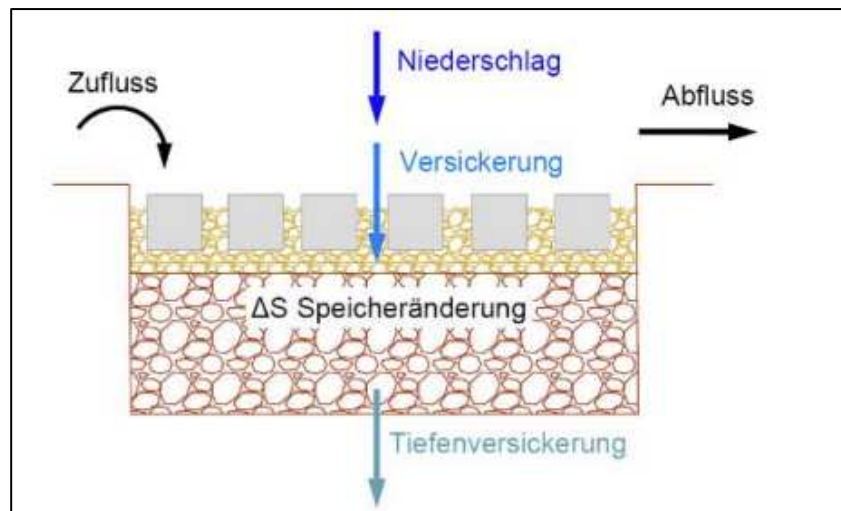


Abbildung 13: Abflussverhalten einer Flächenversickerung mit teildurchlässiger Pflasterung (Johnscher, 2016).

Möglichkeiten wären z.B. (Johnscher, 2016) Schotterrasen für wenig frequentierte Verkehrsflächen, Holzpflaster, Holzroste für Gartenwege oder Spielflächen, Rasengittersteine für mäßig frequentierte Flächen, Zufahrten, Parkplätze etc. und Rasen- oder Splittfugenpflaster für Höfe oder Plätze (Johnscher, 2016:25). Hinzu kommen noch Versickerungsanlagen wie Versickerungsteiche, Mulden- oder Beckenversickerungen und Rohr-Rigolen-Systeme (Sieker, 1999).

4. Methodik

4.1. Infiltrometerablesungen

In unseren Versuchen verwendeten wir das Doppelringinfiltrometer. Das Infiltrometer ist nach der DIN EN ISO 22282-5:2012-09 gebaut (Ulke, 2016) und nach Royal Eijkelkamp, (2022) aufgebaut und verwendet. Dieses besteht aus einem kleineren (Durchmesser 18 cm) und einem damit verbundenen größeren Metallzylinder. Beide Zylinder haben eine Höhe von 15 cm. Der äußere Zylinder hat einen Durchmesser von 30 cm und soll das eindimensionale vertikale Fließen sicherstellen (Fohrer *et al.*, 2016). Vor dem Eindringen des Infiltrometers in den Boden, werden vorsichtig größere Zweige, Steine entfernt und höhere Pflanzen, falls vorhanden, abgeschnitten.

Nachdem das Infiltrometer einige Zentimeter mithilfe eines Kunststoffhammers und einem Holzscheit/Brett in den Boden eingeschlagen ist, stellt man einen Meterstab in den inneren Ring, um während des Versuchs die Wasserhöhe abzulesen. Nun wird Wasser zuerst in den äußeren Ring geschüttet und dann, sobald dieser ausreichend gefüllt ist, in den inneren Ring. Dabei muss vorsichtig vorgegangen werden, damit die Bodenoberfläche nicht verschlämmt. Das wird verhindert, indem z.B. eine Hand unter den Wasserstrahl gehalten wird. Der Wasserstand beider Ringe soll die ganze Messung lang das gleiche Niveau haben, im äußeren Ring kann jederzeit nachgeschüttet werden, um dies zu garantieren. Jetzt wird im regelmäßigen Abstand (alle 30 Sekunden oder alle eine oder zwei Minuten) der Wasserstand abgelesen. Falls das Wasser, insbesondere zu Beginn und bei trockenen Böden, sehr schnell versickert und noch keine Regelmäßigkeit erkennbar ist, kann auch im inneren Ring Wasser nachgefüllt werden. Dies muss selbstverständlich dokumentiert werden.

Im Verlauf des Versuchs bildet sich im Boden ein typisches Feuchteprofil aus, das sich durch eine Sättigungszone, eine Durchfeuchtungsfront und eine Benetzungszone auszeichnet (Fohrer *et al.*, 2016). Die stark reduzierte Wasserspannung, das Matrixpotential, stellt den Hauptgrund dar, warum das zugeführte Wasser zu Beginn der Infiltration in die Bodenporen eingesogen wird. Mit fortschreitender Aufsättigung des Bodens verliert die Wasserspannung zunehmend an Bedeutung. In der Endphase des Wassertransports wird der Prozess ausschließlich durch die Wirkung der Schwerkraft bestimmt (Fohrer *et al.*, 2016). Das Ziel ist es, eine solche regelmäßige Infiltrationsrate zu haben, z.B. 1 cm/min. Für eine bessere Datenqualität wurden an allen Standorten mindestens zwei Messungen durchgeführt.

4.2. Visualisierung der Ergebnisse

Während der Messungen wurden die Ablesungen in eine Feldliste in Excel nach Vorbild von Royal Eijkelpkamp (2022) übertragen (siehe Anhang). Aus den Ablesungen im inneren Ring des Doppelringinfiltrometers konnte die Infiltrationsrate errechnet werden (z.B. 2 cm/min). In der Regel wurde alle eine Minute die Höhe des Wassers gemessen, falls zu Beginn sehr viel infiltrierte, wurde manchmal auch alle 30 Sekunden gemessen. Als alle Messungen durchgeführt worden sind, wurden die Daten in R übertragen, um eine Auswertung vorzunehmen. Mithilfe des Datenvisualisierungspaketes „ggplot2“ erfolgte die Visualisierung der Messwerte.

4.3. Erstellung der Karten

Die Erfassung des Versiegelungsgrades innerhalb des Untersuchungsgebietes erfolgte durch die Erstellung von Karten. Hierfür wurde die GIS-Software QGIS genutzt. Ein Google Satellitenbild und die Grundkarte von Open Street Map dienten als Orientierungslayer und Kartenbasis. Mithilfe der Erstellung eines Polygons wurde das Untersuchungsgebiet eingezeichnet. Um die Flächen der Gebäude zu erhalten, wurde der Layer „Hausumringe“ für den Regierungsbezirk Oberfranken von OPENDATA der bayerischen Vermessungsverwaltung eingefügt (Bayerische Vermessungsverwaltung, o. J.). Dieser wurde mithilfe des Tools „extract by location“ auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten, sodass nur noch Hausumringe innerhalb unseres Interessengebietes angezeigt wurden. Anschließend wurden die Standorte der Versickerungsmessungen in QGIS mithilfe gespeicherter Koordinaten eingefügt und unter dem Layer „Standorte Versickerungsmessungen“ gespeichert. Zusätzlich wurde für jeden Messort der gemessene kf-Wert hinterlegt. In gleicher Weise wurden die Standorte der Klimastationen der Mikrometeorologie unter dem Layer „Standorte Mikrometeorologie“ eingefügt. Die Einteilung der Versiegelungs-Layer erfolgte nach Orientierung an mittleren Abflussbeiwerten für verschiedene Bodenbeläge gemäß DWA-M 153 (DWA, 2007) (siehe Tabelle 3 und 4). Dabei wurde aus praktischen Gründen folgende Anpassung vorgenommen: Der in Tabelle 3 genannte Flächentyp „Fester Kiesbelag“ wird in der Kartierung als „verdichtet“ aufgeführt. Außerdem wurden „Pflaster mit offenen Fugen (0,5)“ und „Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine (0,25)“ zum Layer „weites Pflaster (0,3)“ zusammengeführt. In der Tabelle 3 fehlende Hartplatz-Flächen bilden einen eigenen Layer und besitzen wie Asphalt auch einen Versickerungsbeiwert von 0,9. Die Polygone der Layer wurden einerseits über Fernerkundung mithilfe des Google Satellitenfotos erstellt. Der Bodenbelag „Asphalt“ war beispielsweise über die dunkelgraue Farbe aus der Satellitenaufnahme erkennbar. Zusätzlich wurde das gesamte Gebiet abgelaufen und die Beläge der versiegelten Flächen in einer ausgedruckten Version des Satellitenphotos eingetragen. Diese wurden anschließend mithilfe von Digitizing-Tools Fläche für Fläche in QGIS digitalisiert.

Der Layer „Asphalt“ umfasst asphaltierte Flächen sowie Betonplatten und Pflaster mit versiegelten Fugen. Der Layer „enges Pflaster“ umfasst Splittfugenpflaster, Rasenfugenpflaster, Erdfugenpflaster und Plattenbelag. Unter „weites Pflaster“ wurden Poren- und Ökopflaster, Basaltsteinpflaster sowie Natursteinpflaster zusammengefasst. Der Layer „Versiegelung ohne Zuordnung“ beinhaltet alle Flächen, die erkennbar über

das Satellitenfoto eine Versiegelung aufweisen, deren Versiegelungsart jedoch nicht feststellbar war. Dies liegt an einer uneindeutigen Farbe und nicht einsehbarem Bodenbelag vor Ort. Hauptsächlich handelt es sich um Privatgrundstücke, deren Hof geschlossen und nicht zugänglich war oder um Flächen der JVA.

Nachdem alle Flächen digital eingetragen worden sind, wurden Überlappungen zwischen Polygonen mithilfe des Tools „fix geometries“ entfernt. Über einen Hilfslayer und zusammen mit dem Tool „Dissolve“ konnte anschließend der Layer „Freiflächen“ erstellt werden. Nun wurden die Flächengrößen aller Polygone berechnet und innerhalb ihres jeweiligen Layers aufsummiert. Daraus lässt sich der Versiegelungsanteil des Gebietes berechnen. Für die Karte zum Versickerungsbeiwert (kf-Wert) wurde zwischen den Messpunkten mithilfe der Anwendung „IDW interpolation“ interpoliert und der Layer „kf-Wert“ erstellt. Zum Schluss wurden mehrere Print-Layouts entworfen.

5. Ergebnisse

Insgesamt wurden 23 Messungen an elf Standorten in St. Georgen durchgeführt. Am Standort S02 gab es drei Messungen, da zwischen den Ergebnissen von S02.1 und S02.2 erhebliche Unterschiede festgestellt wurden. Das gleiche wurde bei Standort S06 durchgeführt. An anderen Standorten mit ähnlichen Abweichungen konnte aufgrund von Zeitmangel keine dritte Messung durchgeführt werden. Die Einteilung der Werte in die verschiedenen Einheiten und in die verschiedenen Kategorisierungen ist in Tabelle 5 zu sehen. Im Folgenden wird die Einteilung nach der DIN-Norm 18130-1 verwendet.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Standorte in verschiedene Einheiten und Einteilungen.

Standort	Kf-Wert in m/s	Kf-Wert in mm/min	Kf-Wert in mm/h	Kf-Wert in cm/d	Kf-Wert in cm/min	Durchlässigkeit nach DIN 18130-1	Kf-Wert nach Burghardt und Ornauf (1999)
01.1	$1,67 \cdot 10^{-5}$	1	60	144	0,1	Durchlässig	Sehr hoch
01.2	$3,33 \cdot 10^{-5}$	2	120	288	0,2	Durchlässig	Sehr hoch
02.1	$1,67 \cdot 10^{-5}$	1	60	144	0,1	Durchlässig	Sehr hoch
02..2	$8,33 \cdot 10^{-5}$	5	300	720	0,5	Durchlässig	Äußerst hoch
02.3	$3,33 \cdot 10^{-5}$	2	120	288	0,2	Durchlässig	Sehr hoch
03.1	$2,50 \cdot 10^{-5}$	1,5	90	216	0,15	Durchlässig	Sehr hoch
03.2	$5,00 \cdot 10^{-5}$	3	180	432	0,3	Durchlässig	Äußerst hoch
04.1	$1,67 \cdot 10^{-5}$	1	60	144	0,1	Durchlässig	Sehr hoch
04.2	$7,50 \cdot 10^{-5}$	4,5	270	648	0,45	Durchlässig	Äußerst hoch
05.1	$2,50 \cdot 10^{-5}$	1,5	90	216	0,15	Durchlässig	Sehr hoch
05.2	$1,67 \cdot 10^{-5}$	1	60	144	0,1	Durchlässig	Sehr hoch
06.1	$1,67 \cdot 10^{-4}$	10	600	1440	1	Stark durchlässig	Äußerst hoch

06.2	$2,00 \cdot 10^{-4}$	12	720	1728	1,2	Stark durchlässig	Äußerst hoch
06.3	$7 \cdot 10^{-3}$	7	420	1008	0,7	Stark durchlässig	Äußerst hoch
07.1	$2,17 \cdot 10^{-4}$	13	780	1872	1,3	Stark durchlässig	Äußerst hoch
07.2	$1,00 \cdot 10^{-4}$	6	360	864	0,6	Durchlässig	Äußerst hoch
08.1	$5,00 \cdot 10^{-5}$	3	180	432	0,3	Durchlässig	Äußerst hoch
08.2	$3,33 \cdot 10^{-5}$	2	120	288	0,2	Durchlässig	Sehr hoch
09.1	$1,67 \cdot 10^{-5}$	1	60	144	0,1	Durchlässig	Sehr hoch
09.2	$1,67 \cdot 10^{-5}$	1	60	144	0,1	Durchlässig	Sehr hoch
10.1	$1,67 \cdot 10^{-5}$	1	60	144	0,1	Durchlässig	Sehr hoch
10.2	$3,33 \cdot 10^{-5}$	2	120	288	0,2	Durchlässig	Sehr hoch
11.1	$8,33 \cdot 10^{-5}$	5	300	720	0,5	Durchlässig	Äußerst hoch
11.2	$1,33 \cdot 10^{-4}$	8	480	1152	0,8	Durchlässig	Äußerst hoch

Abbildung 14 zeigt die kf-Werte der Standorte in cm/min.

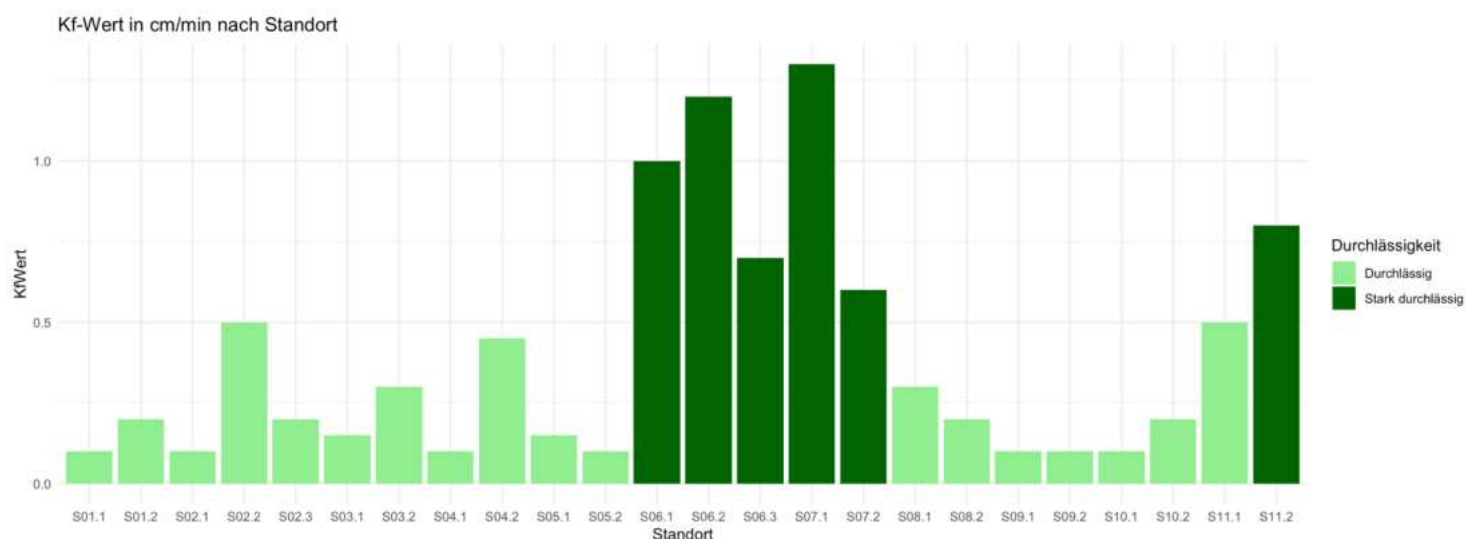


Abbildung 14: Kf-Werte der Standorte in cm/min (eigene Darstellung).

Die dunkelgrüne Färbung zeigt, dass der Untergrund „stark durchlässig“ ist, die hellgrüne hat die Einteilung „durchlässig“.

Einen typischen Infiltrationsverlauf zeigt Abbildung 15 des Standorts S10:

Hier erkennt man bei beiden Messungen den typischen logarithmischen Verlauf (aus Royal Eijkelkamp, 2022) mit einer höheren anfänglichen Infiltrationsrate, die sich dann im Verlauf auf einen Wert einpedelt.

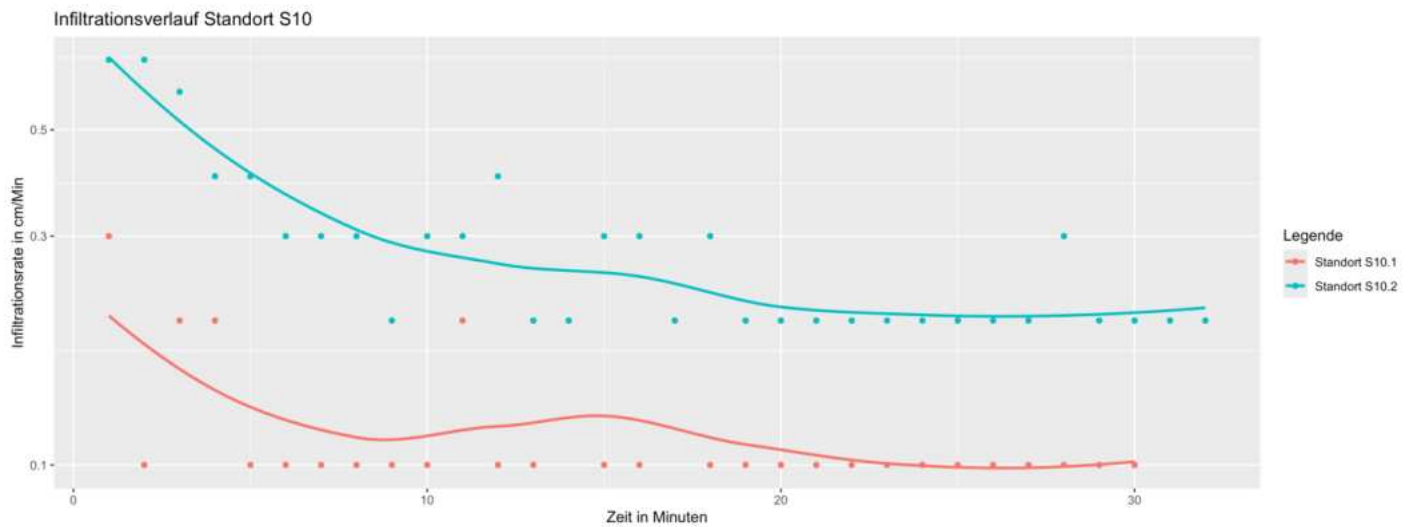


Abbildung 15: Infiltrationsverlauf Standort S10.

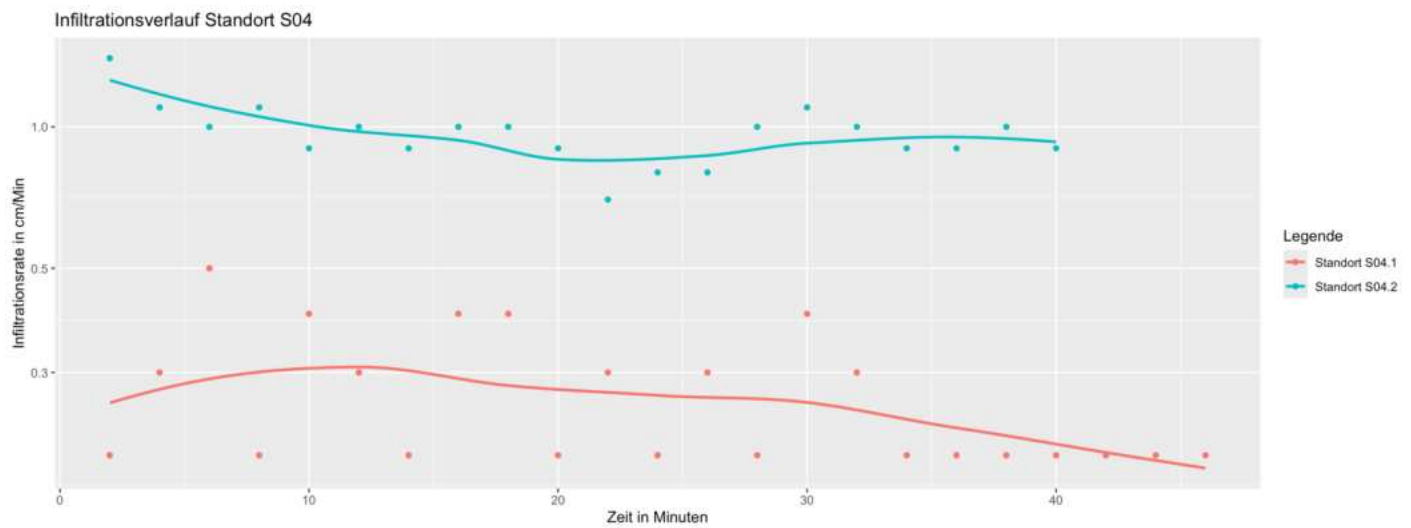


Abbildung 16: Infiltrationsverlauf Standort S04.

Ein untypischer Verlauf wäre Standort S04 und besonders Standort S04.1:

Hier pendelt sich die Infiltrationsrate zwar auch auf einen Wert ein, hat aber zu Beginn niedrige Werte, dann höhere und dann wieder niedrigere. Generell ist hier auch die Spanne vom höchsten bis zum niedrigsten Wert nicht sehr hoch (0,4 cm/Min).

Bodenversiegelung - St. Georgen und Hammerstadt

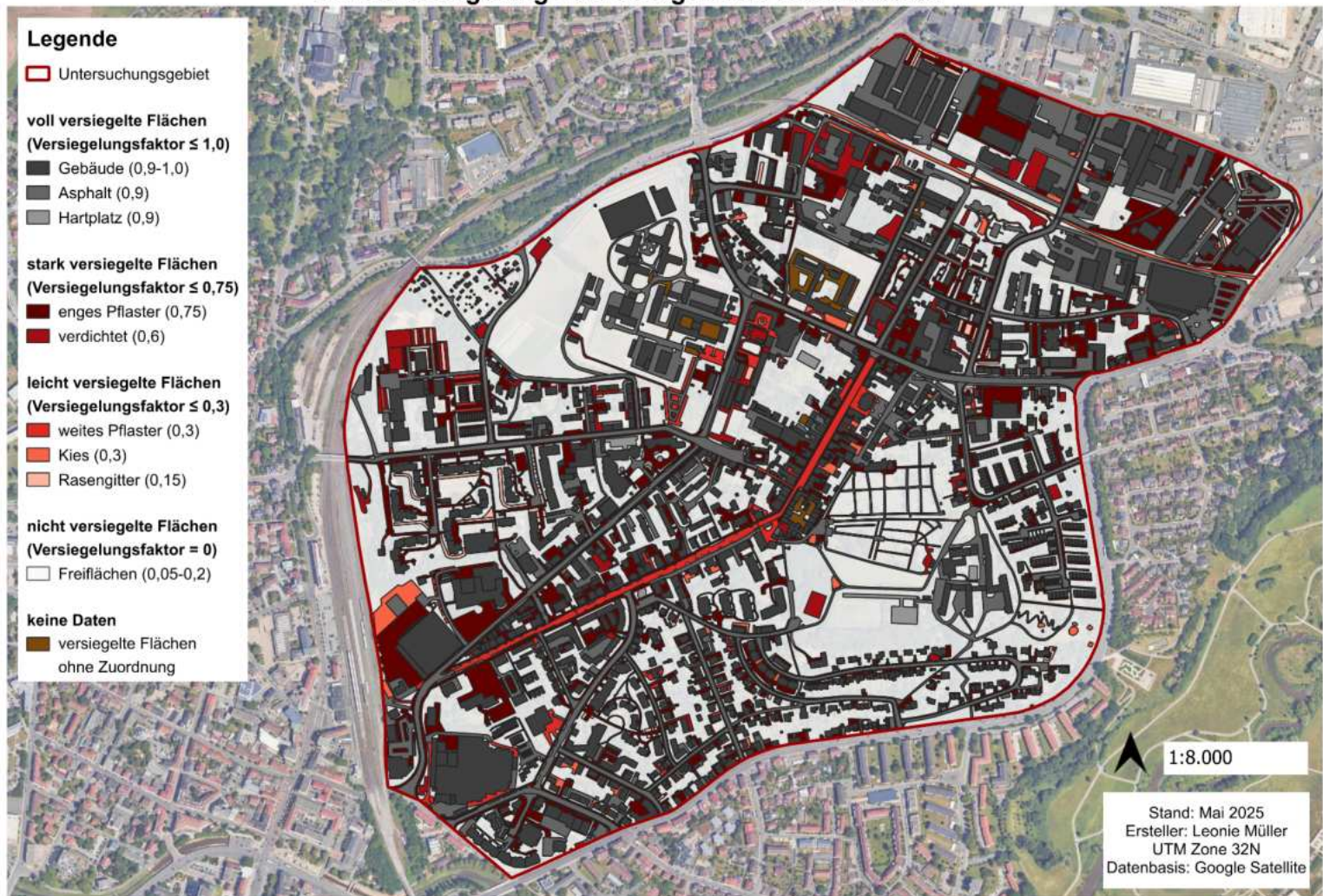


Abbildung 17: Karte zur Bodenversiegelung in St. Georgen und Hammerstadt gegliedert nach Versiegelungsgrad und Bodenbelag.

Die durch die Kartierung des Untersuchungsgebietes festgestellten Grade der Bodenversiegelung und die durch die Infiltration ermittelten Durchlässigkeitsbereiche können der Karte zur Bodenversiegelung (Abbildung 17 und Anhang in Größe A4) und der Karte zum Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens (Abbildung 18 und Anhang) entnommen werden. Die Kartierung ergab, dass rund 41 % des Gebietes vollständig versiegelt sind (Gebäude, Asphalt und Hartplatz). Stark versiegelte Flächen machen 14 % der Gesamtfläche aus, während leicht versiegelte Flächen wie Kies, Rasengitter und weites Pflaster nur etwa 3% einnehmen (siehe Tabelle 7). Die einzelnen Werte sind den Tabellen 6 und 7 zu entnehmen. Unter Zuhilfenahme der Abbildung 17 ist ein hohes Maß an Bodenversiegelung in der nördlichen und zentralen Zone des Untersuchungsgebiets, insbesondere entlang der Hauptstraßen und in den dichter bebauten Bereichen, sichtbar. Große Teile des Kartenbildes werden von Gebäuden eingenommen – ein typisches Merkmal innerstädtischer Strukturen. In den Randbereichen, insbesondere im Südosten und Westen, sind hingegen viele nicht versiegelte oder nur leicht versiegelte Flächen

erkennbar, was auf eher durchgrünte Wohngebiete oder weniger dicht bebaute Areale hinweist.

Tabelle 6: Oberflächentypen und deren Fläche sowie Anteil an der Gesamtfläche.

Oberflächentyp	Fläche in m²	Fläche (in ha)	Anteil (in %)
Gebäudeflächen	367.060	3,67	23,67
Asphalt	257.362	2,57	16,59
Hartplatz	5.243	0,05	0,34
Enges Pflaster	189.232	1,89	12,19
Verdichtet	30.658	0,31	1,98
Weites Pflaster	25.294	0,25	1,63
Kies	16.008	0,16	1,03
Rasengitter	9.237	0,09	0,60
versiegelte Flächen ohne Zuordnung	7.826	0,08	0,50
Freiflächen	643.765	6,44	41,48
Untersuchungsfläche gesamt	1.551.687	15,52	100,0

Tabelle 7: Versiegelungsfaktor und Fläche sowie Anteil an der Gesamtfläche nach Versiegelungsgrad.

Versiegelungsgrad	Versiegelungsfaktor (C-Wert)	Fläche (im m²)	Fläche (in %)
Voll versiegelt	≤ 1,0	629.665	40,57
Stark versiegelt	≤ 0,75	219.890	14,17
Leicht versiegelt	≤ 0,3	50.539	3,26
Versiegelte Flächen ohne Zuordnung	-	7.826	0,50
Nicht versiegelt	= 0	643.765	41,48
Fläche versiegelt gesamt	-	907.920	58,51
Gesamtfläche		1.551.687	100

Unter Zuhilfenahme der Karte zum Durchlässigkeitsbeiwert (Abbildung 18) fällt auf, dass große Teile des Untersuchungsgebiets mit hellblauen Farbtönen überlagert sind, was auf mittlere bis gute Durchlässigkeitswerte (kf zwischen 8,64 und 864 cm/d) hinweist. Diese Bereiche gelten als durchlässig und begünstigen die natürliche Versickerung von Niederschlagswasser. In einigen kleineren Zonen – insbesondere im südöstlichen Teil in der Nähe des Werstoffsammelplatz „Stuckberg“ und auf der Feldbrache der JVA – sind intensive Blautöne zu erkennen, die auf sehr hohe kf-Werte über 1295 cm/d hindeuten. Diese Zonen sind als stark durchlässig klassifiziert und eignen sich besonders gut für die Regenwasserversickerung.

Durchlässigkeitsbeiwert - St. Georgen und Hammerstadt

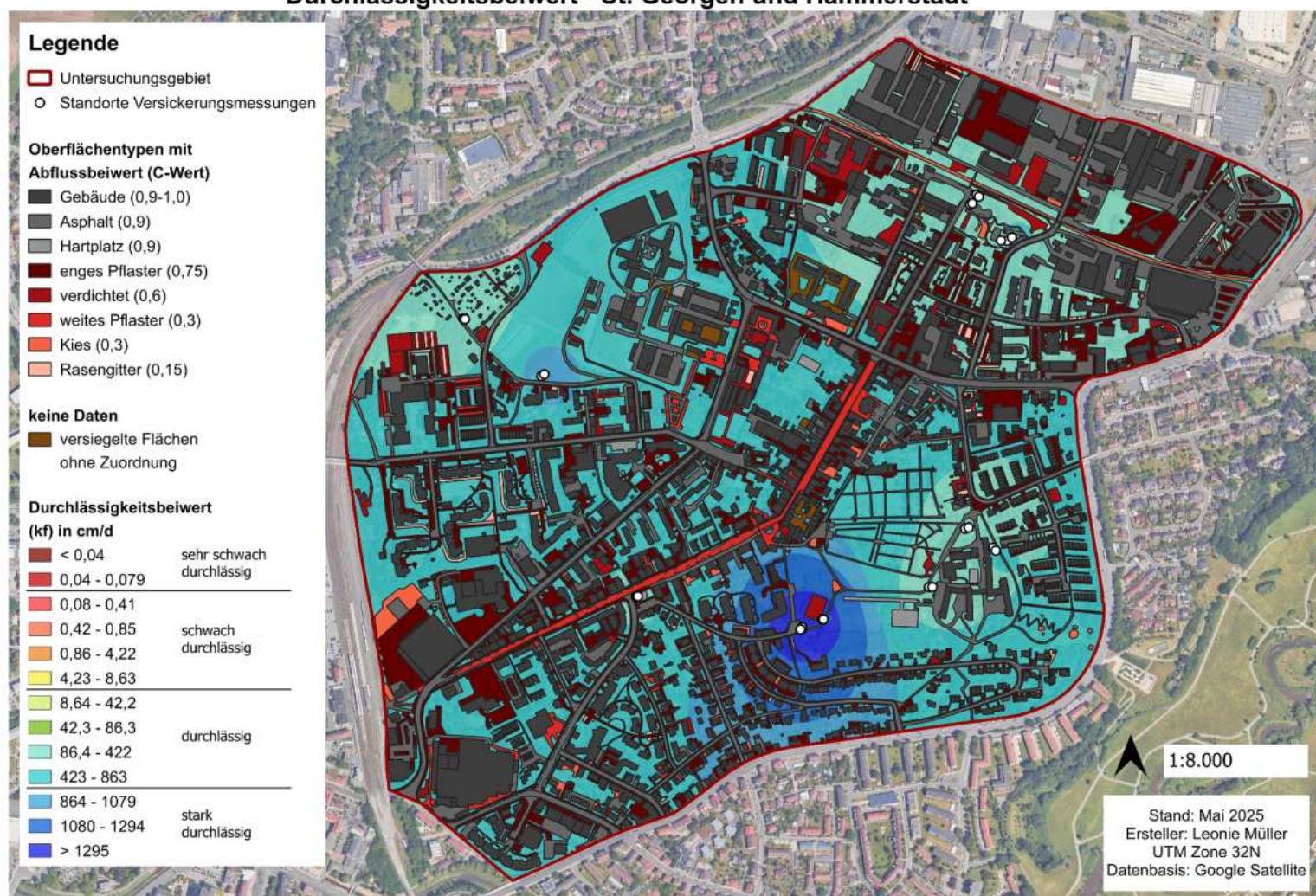


Abbildung 18: Karte zum Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens im Untersuchungsgebiet.

6. Diskussion

Es ist zu beachten, dass die Methodik der Doppelringinfiltrationsmessungen nur oberflächennahe Ergebnisse produziert (Ulke, 2016). Die Methodik gibt dennoch

wichtige Informationen über die für Menge an Niederschlag, die im Boden aufgenommen werden kann und der Abfluss, der dadurch verhindert werden kann.

In der Gesamtübersicht fällt auf, dass Standort S06 am Wertstoffsammelplatz Stuckberg sowie S07.1 am Bolzplatz nicht weit entfernt eine besonders hohe Infiltrationsrate aufweisen. Es ist zu vermuten, dass eine Messung auf der Friedhofswiese, wo eine der Mikrometeorologiestationen steht, ähnlich hohe Werte aufweisen würde. Weitere stärkere Infiltrationsraten wurden bei den Standorten S11.1 und S11.2 auf den landwirtschaftlichen Flächen der JVA St. Georgen gemessen. Grund dafür ist wahrscheinlich der lockere und nicht verdichtete Ackerboden. Dieses Grundstück ist mindestens in den letzten 100 Jahren nicht bebaut gewesen (BayernAtlas, 2025). Die niedrigeren Werte waren bei den Standorten S05 am Fahrradweg an der Grundschule, S09 am Grünstreifenrand beim Kleingartenverein gegenüber der Landwirtschaftsfläche der JVA, S01 an der Seestraße am Rande des Spielplatzes und S10 in der gleichen Straße etwas in Richtung der Gleise. Alle dieser Standorte sind in der Nähe von Wegen oder Straßen und könnten dadurch bei Bauarbeiten verdichtet worden werden. S01 und S05 waren zusätzlich wenig bewachsen. Dadurch fehlt eine Auflockerung durch die Wurzeln der Pflanzen. Zusätzlich hatten sich eine Kruste, die die Infiltration hemmt, sowie Trockenrisse gebildet, wie in Abbildung 19 zu sehen. Dadurch wird auch kein idealtypischer logarithmischer Verlauf erzielt.



Abbildung 19: Bodenoberfläche mit Krustenbildung und Trockenrisse

Schwierigkeiten bei Kartierung lagen in der Flächenabgrenzung, da die Auflösung des Satellitenbildes nicht besonders fein war. Außerdem konnte eine geringe Verschiebung

zwischen dem Satellitenbild und den Polygonen des importierten Layers „Hausumringe“ trotz Projektion und Nutzung eines gemeinsamen Koordinatensystems nicht behoben werden. Besonders kleine Flächen wie etwa Gartenwege wurden bei der Kartierung nicht beachtet und einige Flächen wurden als Polygon überzeichnet und damit größer dargestellt als sie sind. Im Idealfall kommt es hier jedoch zu einem Ausgleich. Der Layer „versiegelte Flächen ohne Zuordnung“ musste erstellt werden, da die Bodenbeläge mancher Flächen vor Ort nicht einsehbar waren oder über die Fernanalyse nicht eindeutig zugeordnet werden konnten. Diese nicht kategorisierten Flächen machen 0,5 % der Gesamtfläche aus. Zudem ergab sich eine kleine Diskrepanz zwischen der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes, welche einmal in QGIS berechnet wurde ($1.550.706\text{m}^2$) und durch aufsummieren der Teilflächen entstand ($1.551.687\text{m}^2$). Dieser Unterschied konnte nicht behoben werden. Eine mögliche Fehlerquelle besteht zudem in dem Layer der Gebäude. Für alle Dächer wurde der Versiegelungsfaktor von 0,9-1,0 angenommen. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass Dächer mit Kiesbelag oder Begrünung im Untersuchungsgebiet existieren. Diese haben einen geringeren Versiegelungsfaktor von 0,7 bzw. 0,3-0,5. Aufgrund der schweren Umsetzbarkeit der Kartierung von Hausdächern wurde diese potentielle Fehlerquelle in Kauf genommen. Zudem ist es bei der Kartierung vor Ort möglich, dass Poren- und Ökopflaster als solche nicht erkannt und der Kategorie „enges Pflaster“ zugeordnet wurden. Auch existieren für den Versiegelungsfaktor nur Richtwerte, welche je nach spezifischen Bedingungen variieren können.

Eine weitere Schwierigkeit in diesem Studienprojekt war die Beschaffung von ausreichend Wasser, da nur zwei Kanister zur Verfügung standen. Besonders auf sehr durchlässigen Böden oder Böden mit möglichen Mäuselöchern versickerte zu Beginn viel Wasser, sodass uns teilweise der Wasservorrat ausging. Daher wurde der kf-Wert bei manchen Messungen gegen Ende z.B. nur dreimal gemessen. Es ist nicht vollständig auszuschließen, dass er weiter hätte sinken können. Zudem konnten manchmal am gleichen Tag keine Kontrollmessungen durchgeführt werden, entweder aus Wassermangel oder aus Zeitgründen. Weiterhin konnte nicht zu jeder Mikroklima-Station von Prof. Thomas eine Versickerungskurve entstehen. Gründe dafür waren fehlende Möglichkeiten, das Doppelringinfiltrimeter in den Boden einzubringen, sowie fehlende Kontakte zu Hausbesitzer*innen, um eine erforderliche Genehmigung zur Messung einzuholen. Daher fand ein Großteil der Messungen auf städtischen Flächen statt.

Um eine bessere Datenqualität zu erzielen, wäre es zudem vorteilhaft gewesen, die Messungen zu einem früheren Zeitpunkt im Jahr zu beginnen, bevor höhere

Temperaturen und Trockenphasen, die den Boden austrocknen, eintraten. Leider war dies aufgrund von Abstimmungsgründen mit der Stadtverwaltung und der Mikroklimatologie nicht realisierbar. Zudem konnten im späteren Jahresverlauf keine Messungen durchgeführt werden, da eine der zwei beteiligten Personen ein Auslandssemester antrat.

7. Handlungsempfehlungen

Die Förderung einer nachhaltigen Wassermanagementstrategie erfordert eine gezielte Umsetzung verschiedener Maßnahmen, um die Versickerung von Wasser zu unterstützen, Erosionsprozesse zu vermeiden und die Abwassersysteme zu entlasten. Ein zentraler Ansatz ist die Verwendung permeabler Oberflächenstrukturen wie Pflastersteine oder Gitter anstelle von versiegelten Materialien wie Asphalt, da diese die Versickerung erheblich begünstigen (Sieker, 1999). Bestehende unversiegelte Flächen sollten erhalten bleiben. An allen geeigneten Orten sollte eine aktive Entsiegelung vorgenommen werden, um die Bodenfunktion zu stärken und natürliche Versickerungsprozesse wiederherzustellen. Dies trägt gleichzeitig dazu bei, städtische Abwassersysteme zu entlasten und das Risiko von Überflutungen bei Starkregen zu reduzieren (Paulus, 2023). Darüber hinaus kann die Infiltration durch den zielgerichteten Bewuchs auf unversiegelten Flächen gesteigert werden. Vegetation fixiert den Oberboden und schützt ihn gegen Erosion, während sie ökologischen Nutzen bietet und das städtische Mikroklima positiv beeinflusst (Meng et al., 2022). Privatpersonen sollten motiviert werden, ihre eigenen Gärten zu entsiegeln und Grünflächen anzulegen, um auf lokaler Ebene einen Beitrag zum Wassermanagement zu leisten. Die Installation von Versickerungsmulden und Baumrigolen bietet praktische Lösungen, um Niederschlagswasser gezielt zu sammeln und vor Ort versickern zu lassen. Diese Maßnahmen unterstützen nicht nur den natürlichen Wasserkreislauf, sondern tragen auch zur Wiederauffüllung des Grundwassers bei (Wessolek, 2014).

Langfristig sollte das Schwammstadt-Prinzip umgesetzt werden, bei dem städtische Strukturen darauf ausgerichtet werden, Wasser effizient zurückzuhalten und zu infiltrieren. Ergänzende Maßnahmen wie Fassaden- und Dachbegrünung sind ebenfalls entscheidend, da sie dazu beitragen, Wasserspeicherung und Verdunstung zu fördern und gleichzeitig die Abwassersysteme zu entlasten (Ponweiser, 2021). Begrünte Dächer und Fassaden verbessern das urbane Mikroklima und bieten zusätzliche Vorteile für die Luftqualität und die Biodiversität (ebd.).

Die erfolgreiche Umsetzung dieser Maßnahmen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Kommunen, Stadtplaner*innen, Wissenschaftler*innen und der Bevölkerung, um nachhaltige und klimaresiliente Strukturen zu schaffen, die den Herausforderungen des Klimawandels gerecht werden. Die Kombination aus technischen Lösungen und dem Engagement der Gesellschaft bildet die Grundlage für eine ganzheitliche und effektive Wassermanagementstrategie.

8. Fazit

Das vorliegende Studienprojekt hat gezeigt, wie bedeutend bodenhydrologische Untersuchungen für die klimaresiliente Stadtentwicklung sind. Die durchgeführten Infiltrationsmessungen in den Bayreuther Stadtteilen St. Georgen und Hammerstadt lieferten Erkenntnisse über die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Böden und deren Fähigkeit, Starkregenereignisse zu puffern. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass insbesondere unversiegelte und wenig verdichtete Flächen ein hohes Potenzial zur Versickerung aufweisen und somit essenziell für die Umsetzung des Schwammstadt-Prinzips sind.

Die Kartierung des Versiegelungsgrades offenbarte, dass über 58 % der Untersuchungsfläche versiegelt sind – ein Wert, der die Dringlichkeit von Entsiegelungsmaßnahmen und der Förderung durchlässiger Oberflächen unterstreicht. Gleichzeitig wurde deutlich, dass bereits kleinräumige Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit und Nutzung erhebliche Auswirkungen auf die Infiltrationsfähigkeit haben können.

Trotz methodischer Herausforderungen, wie der begrenzten Wassermenge oder der eingeschränkten Zugänglichkeit mancher Flächen, konnte eine fundierte Datengrundlage geschaffen werden. Diese bildet eine wertvolle Basis für zukünftige Planungen im Rahmen der Schwammstadtstrategie und liefert konkrete Anhaltspunkte für Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der urbanen Wasseraufnahmefähigkeit.

Dabei ist die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Stadtverwaltung und Bürgerschaft kann dabei ein entscheidender Erfolgsfaktor sein.

Literaturverzeichnis

Baumgartner, A. (1996) *Allgemeine Hydrologie, quantitative Hydrologie*. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: Borntraeger (Lehrbuch der Hydrologie).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021) *Bayerns Klima im Wandel - Klimaregion Mainregion*. 3rd edn. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Klimafaktenblätter). Available at: [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00178,AARTxNODENR:358788,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00178,AARTxNODENR:358788,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2022) 'Klima-Steckbrief Oberfranken'. Available at: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=836420855&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_klima_00204%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=836420855&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_klima_00204%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2025) 'Geologischer Übersichtskarte von Bayern'. Augsburg. Available at: https://www.lfu.bayern.de/geologie/geologie_bayerns/ueberblick/index.htm.

BayernAtlas (2025) *Historische Topographische Karte Bayern 1:25.000*. Available at: https://atlas.bayern.de/?c=677751,5422939&z=7&r=0&l=vt_standard,916738b0-a3e6-48d0-a093-361c1b9cb497&t=kul_heim (Accessed: 27 April 2025).

Blume, H.-P. et al. (2010) *Scheffer/Schachtschnabel Lehrbuch der Bodenkunde*. 16th edn. Heidelberg: Springer Spektrum. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-49960-3>.

Bronstert, A. (1994) *Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen*. Available at: <https://doi.org/10.5445/IR/17494>.

Burghardt, W. and Ornauf, C. (1999) 'Auswirkung von mechanischer Belastung durch Bautätigkeit auf die Versickerungsleistung eines lehmig-sandigen Bodens', *Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft*, 91(2), pp. 965–968.

Burkhardt, M., Kulli, B. and Saluz, A.G. (2022) 'Schwammstadt im Strassenraum'.

Cogger, C.G. (2013) 'Potential Compost Benefits for Restoration of Soils Disturbed by Urban Development', *Compost Science & Utilization*, 13(4), pp. 243–251. Available at: <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080/1065657X.2005.10702248>.

Davie, T. (2002) *The Fundamentals of Hydrology*. 2nd edn. Abingdon: Routledge (Routledge Fundamentals of Physical Geography, 5). Available at: <https://sgcobinsus.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/11/hidrologi-dasar.pdf>.

Deutscher Wetterdienst (2025) *Wetter- und Klimalexikon: Heißer Tag*. Available at: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101162&lv2=101094> (Accessed: 11 April 2025).

Deutsches Institut für Normung e.V. (2002) 'DIN 4022: Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels'. Available at: https://de.wikipedia.org/wiki/DIN_4022.

Dunne, T., Moore, T. and Taylor, C.H. (1975) 'Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions', *Hydrological Sciences Bulletin*, XX(3), pp. 305–327.

Elliott, R.L. and Walker, W.R. (1982) 'Field Evaluation of Furrow Infiltration and Advance Functions', *Transactions of the ASAE*, 25(2), pp. 0396–0400. Available at: <https://doi.org/10.13031/2013.33542>.

Emmert, U., Bader, Kurt, *et al.* (1977) 'Geologische Karte 6035 Bayreuth'. München: Bayerisches Geologisches Landesamt (Geologische Karte 1:25.000). Available at: [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl_geo.htm,APGxNODENR:100256,AARTxNR:12002,AARTxNODENR:209656,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl_geo.htm,APGxNODENR:100256,AARTxNR:12002,AARTxNODENR:209656,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).

Emmert, U., Bader, Kurt, *et al.* (1977) *Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Erläuterungen zum Blatt Nr. 6035 Bayreuth*. 1st edn. München: Bayerisches Geologisches Landesamt.

Fohrer, N. *et al.* (2016) *Hydrologie*. UTB. Available at: <https://books.google.com/books?hl=de&lr=&id=HqmeDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=hydrologie+fohrer&ots=Rs-QIJ16r7&sig=jEVbVh2uuMDcqdFqs4sbMeMPCoY> (Accessed: 22 March 2025).

von Freyberg, B. (1969) 'Tektonische Karte der Fränkischen Alb und ihrer Umgebung', 77(81).

Gao, H. *et al.* (2024) 'Dynamic evolution of desiccation cracks and their relationship with the hydraulic properties of expansive soil.', *International Journal of Geomechanics*, 24(3), p. 04023299. Available at: <https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-9299>.

Greul, M. (2023) *Flächenversiegelungsgesetze zum Bodenschutz in Österreich und Deutschland*. Johannes Kepler Universität Linz. Available at: <https://epub.jku.at/download/pdf/9488541.pdf> (Accessed: 22 March 2025).

Halbig, G.W. (2024) 'Das Stadtklima: Herausforderung im Klimawandel: Leben auf der Wärmeinsel', *Physik in unserer Zeit*, n/a(n/a), p. 2401719. Available at: <https://doi.org/10.1002/piuz.202401719>.

Hartge, K.H. *et al.* (2014) *Einführung in die Bodenphysik*. 4th edn. Schweizerbart. Available at: <https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510652808> (Accessed: 22 March 2025).

Hillel, D. (2003) *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier. Available at: <https://books.google.com/books?hl=de&lr=&id=qK7zzLIUEloC&oi=fnd&pg=PP1&dq>

=Introduction+to+Environmental+Soil+Physics&ots=-KflJlKzwG&sig=wcyRhsAkLcHFtR9iE5VgJ0KGeqq (Accessed: 22 March 2025).

Hollands, J. *et al.* (2018) ‘Greening Aspang - Messtechnische Untersuchungen zur ganzheitlichen Betrachtung mikroklimatischer Wechselwirkungen in einem Straßenzug einer urbanen Hitzeinsel’, *Bauphysik*, 40(3), pp. 105–168. Available at: <https://doi.org/10.1002/bapi.201810014>.

Horton, R.E. (1933) ‘The role of infiltration in the hydrologic cycle’, *Transactions American Geophysical Union*, 14(1), pp. 446–460.

Hupfer, P. and Kuttler, W. (2005) *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. 11th edn. Wiesbaden: Teubner. Available at: [10.1007/978-3-322-96749-7](https://doi.org/10.1007/978-3-322-96749-7).

IPCC - Working Group II (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 3068. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf.

Johnscher, L. (2016) *Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung: Auswirkungen auf den urbanen Wasserhaushalt*. Masterarbeit. Technische Universität Graz. Available at: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/SWW/3_Unterseite_Lehre/4_Masterarbeiten/2016_MA_Johnscher.pdf (Accessed: 11 April 2025).

Kourmouli, A., Stevens, C. and Quinton, J. (2024) ‘Construction and demolition mineral-based waste impacts soil functioning and ecosystem services’, in *EGU General Assembly Conference Abstracts*. *EGU General Assembly*, Vienna, p. 15682. Available at: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2024EGUGA..2615682K/doi:10.5194/egusphere-egu24-15682.

Landkreis Bayreuth *et al.* (2023) *Klimaanpassungskonzept zur nachhaltigen Klimaanpassung und für natürlichen Klimaschutz für den Landkreis Bayreuth*. Bayreuth. Available at: https://klima.landkreis-bayreuth.de/fileadmin/user_upload/Redaktion_Klima/Website/Klimaanpassung/Klimaanpassungskonzept/Dokumente_und_Pr%C3%A4sentationen/ko_20231212_lkb_klimaanpassungskonzept-ank-das-aenderungen-in-inkl-synergien.pdf.

Lili, M. *et al.* (2008) ‘Methods for measuring soil infiltration: State of the art’, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 1(1), pp. 22–30.

Meng, B. *et al.* (2022) ‘Flood Control and Aquifer Recharge Effects of Sponge City: A Case Study in North China’, *Water*, 14(1), p. 92. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14010092>.

Mitchell, A.R. and van Genuchten, M.T. (1991) ‘Deterministic modeling of preferential flow in a... - Google Scholar’. Available at: https://scholar.google.com/scholar?hl=de&as_sdt=0%2C5&q=Deterministic+modeling+of+preferential+flow+in+a+cracked+soil+during+flood+irrigation&btnG= (Accessed: 22 March 2025).

Novák, V. and Hlaváčiková, H. (2019) *Applied soil hydrology*. Springer. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-01806-1.pdf> (Accessed: 22 March 2025).

Paulus, M. (2023) *Strategien für Entsiegelung: Möglichkeiten der Raumplanung in den Bundesländern Wien und Niederösterreich*. Diplomarbeit. Technische Universität Wien. Available at: <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/189364/1/Paulus%20Marko%20-%202023%20-%20Strategien%20fuer%20Entsiegelung%20Moeglichkeiten%20der...pdf>.

Pérez-Morales, A., Romero-Díaz, A. and Illán-Fernandez, E. (2021) 'Chapter 22 - Rainfall, anthropogenic soil sealing, and floods. An example from southeastern Spain', in J. Rodrigo-Comino (ed.) *Precipitation*. Elsevier, pp. 499–520. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00022-7>.

Peschl, A. (2004) 'Übersichtsbodenkarte 6035 Bayreuth'. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Übersichtsbodenkarten von Bayern). Available at: https://www.lfu.bayern.de/download/boden/uebk25/uebk25_6035_bayreuth.pdf.

Pitt, R. *et al.* (2002) 'Urbanization factors affecting infiltration', in *Ground Water/Surface Water Interactions. Summer Specialty Conference*, Colorado: American Water Resources Association, pp. 181–186. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c5900ecd7d16e6ca0b6f060574cbbdff54048867> (Accessed: 23 April 2025).

Ponweiser, D. (2021) *Einsatz von Nutzpflanzen bei Fassaden- und Dachbegrünung*. Diplomarbeit. TU Wien. Available at: <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/16951/1/Ponweiser%20Daniel%20-%202021%20-%20Einsatz%20von%20Nutzpflanzen%20bei%20Fassaden-%20und...pdf>.

Pucher, B., Ertl, T. and Langergraber, G. (2023) 'Natur-basierte Systeme in der Siedlungswasserwirtschaft', *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 75, pp. 24–27. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00905-1>.

Risse, M. *et al.* (2011) 'Impacts of Organic Soil Amendments on Runoff and Soil Erosion under the Natural Rainfall Conditions, preliminary Results', in *Proceedings of the 2011 Georgia Water Resources Conference. Georgia Water Resources*, Georgia: University of Georgia, pp. 11–13. Available at: <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3466/files/2023/06/5.5.3Risse.pdf>.

Royal Eijkelkamp (2022) 'Double ring infiltrometer: Operating instruction'. Available at: <https://www.royaleijkelkamp.com/media/akhiejk0/m-0904e-double-ring-infiltrometer.pdf>.

Rubin, J. (1966) 'Theory of rainfall uptake by soils initially drier than their field capacity and its applications', *Water Resources Research*, 2(4), pp. 739–749. Available at: <https://doi.org/10.1029/WR002i004p00739>.

Scholz, M. and Grabowiecki, P. (2007) 'Review of permeable pavement systems', *Building and Environment*, 42(11), pp. 3830–3836. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>.

Sieker, H. (1999) *Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. Available at: https://www.sieker.de/fileadmin/sieker/Buero/veroeffentlichungen/diss_HSieker.pdf (Accessed: 11 April 2025).

Stadt Bayreuth (2025) *Stadtklima*. Available at: [https://www.bayreuth.de/rathaus-buergerservice/umwelt-klima/klimaschutz-und-energie/klimaschutzkonzept/stadtklima/#:~:text=Die%20mittlere%20j%C3%A4hrliche%20Niederschlagsh%C3%B6he%20betr%C3%A4gt,mm%20\(Liter%2Fm%C2%B2\).](https://www.bayreuth.de/rathaus-buergerservice/umwelt-klima/klimaschutz-und-energie/klimaschutzkonzept/stadtklima/#:~:text=Die%20mittlere%20j%C3%A4hrliche%20Niederschlagsh%C3%B6he%20betr%C3%A4gt,mm%20(Liter%2Fm%C2%B2).) (Accessed: 23 April 2025).

Stahr, K. *et al.* (2020) *Bodenkunde und Standortlehre*. UTB.

Teixeira, W.G. *et al.* (2014) *Application of Soil Physics in Environmental Analyses*. 1st edn. London: Springer (Progress in Soil Science). Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-06013-2.pdf>.

Ulke, B. (2016) 'Boden, Baugrube, Verbau', in T. Krause and B. Ulke (eds) *Zahlentafeln für den Baubetrieb*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, pp. 1165–1246. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-658-02838-1_10.

Ungaro, F. *et al.* (2014) 'Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydropedological approach', *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(1), pp. 33–42. Available at: <https://doi.org/10.2478/johh-2014-0005>.

Wang, Y. *et al.* (2023) 'Soil Macropore and Hydraulic Conductivity Dynamics of Different Land Uses in the Dry–Hot Valley Region of China.', *Water*, 15(17), p. 3036. Available at: <https://doi.org/10.3390/w15173036>.

Ward, R.C. (2000) *Principles of hydrology*. 4. ed. London [u.a.]: McGraw-Hill.

Wessolek, G. (2014) 'Bodenüberformung und -versiegelung', in *Handbuch der Bodenkunde*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–35. Available at: <https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk2001002>.

Wilhelm, F. (1997) *Hydrogeographie*. 3., verb. Aufl. Braunschweig: Westermann (Das geographische Seminar).

Eigenständigkeitserklärung

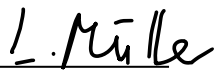
Hiermit versichern wir, Ilka Mack (Matrikelnummer 1885970) und Leonie Müller (Matrikelnummer 1865370), dass wir den vorliegenden Bericht mit dem Titel „Schwammstadt-Viertel St. Georgen“ selbstständig verfasst haben und keine anderen als die im Literatur-, Tabellen- und Abbildungsverzeichnis angegebenen gedruckten und elektronischen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben.

Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach diesen Quellen entnommen sind, haben wir in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle deutlich kenntlich gemacht. Der Bericht wurde nicht bereits anderweitig als Leistungsnachweis oder zum Erlangen eines akademischen Grades eingereicht.

Ilka Mack



Leonie Müller

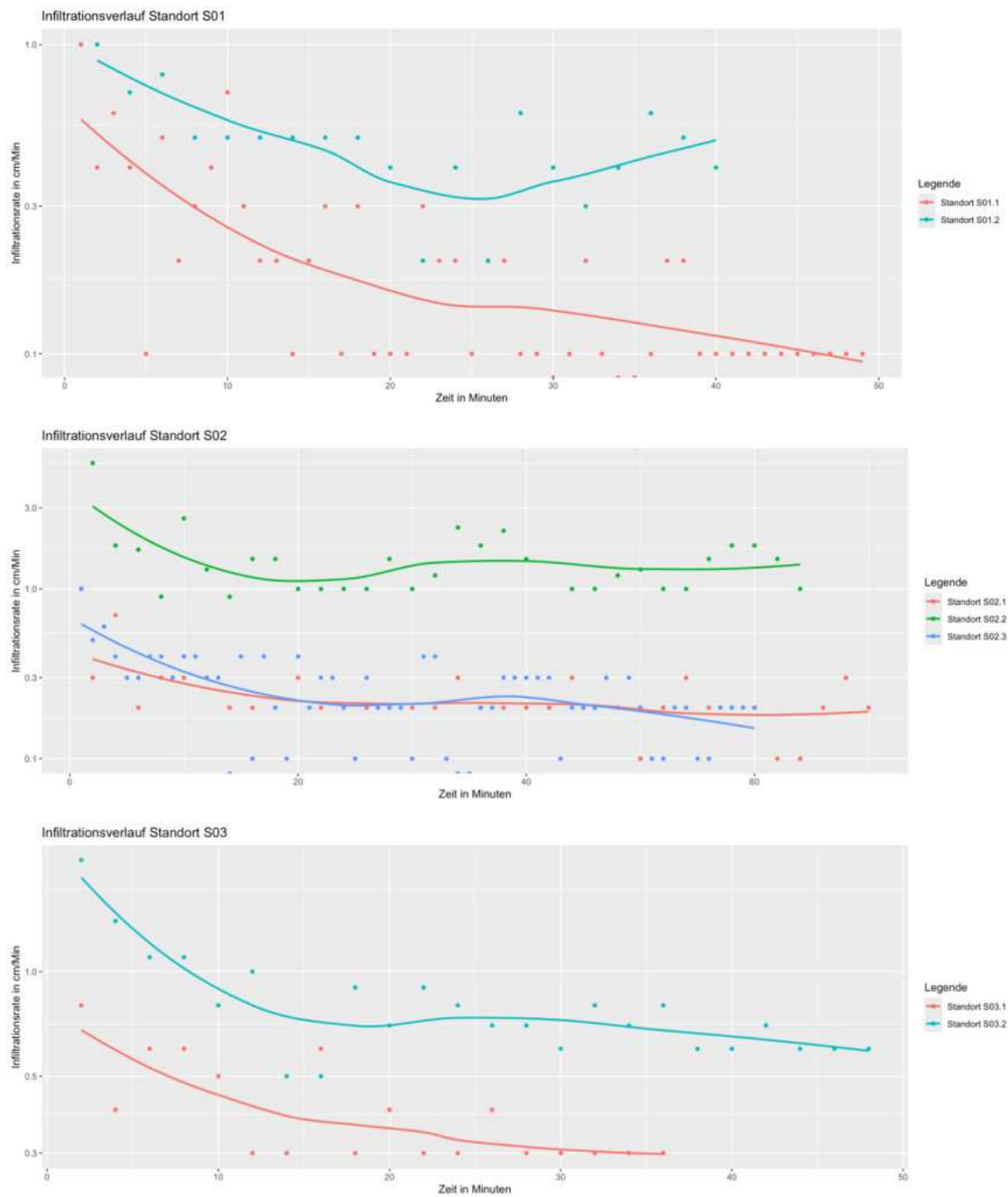


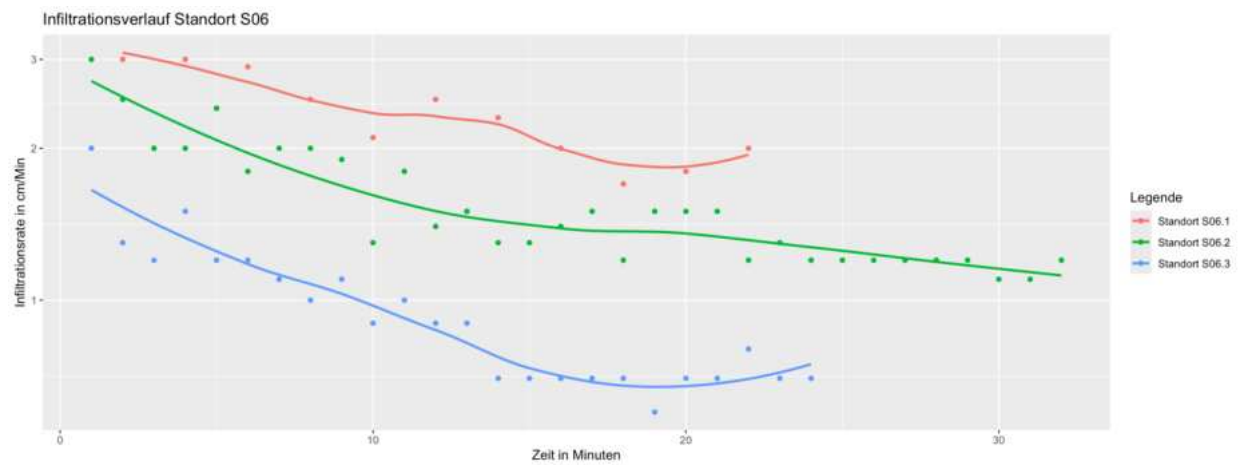
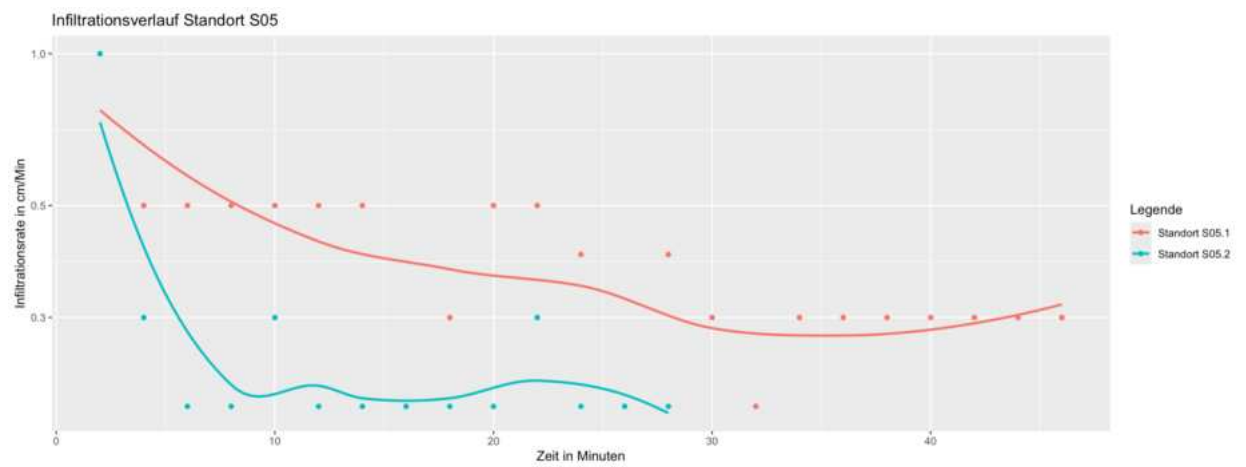
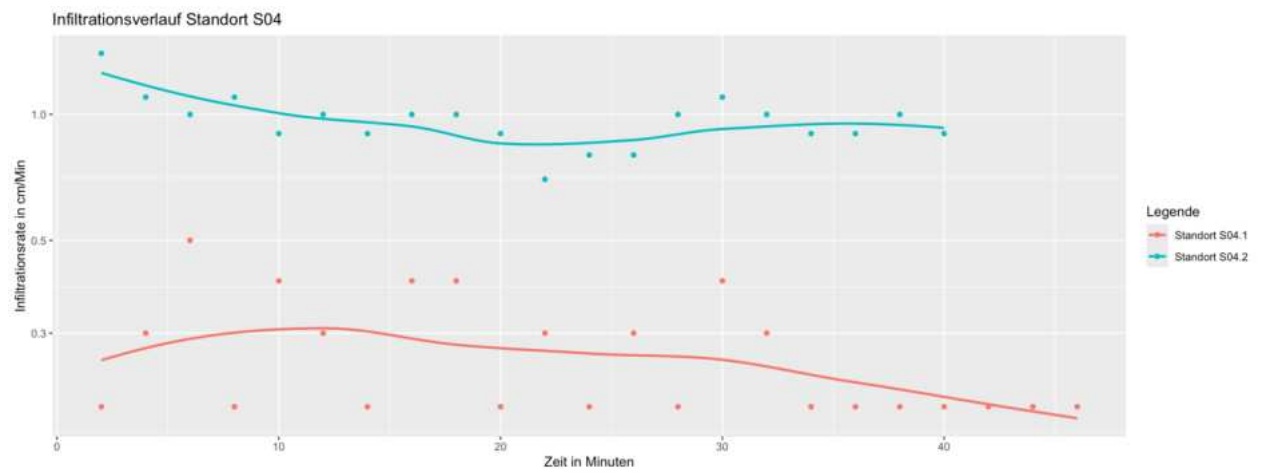
Ort, Datum

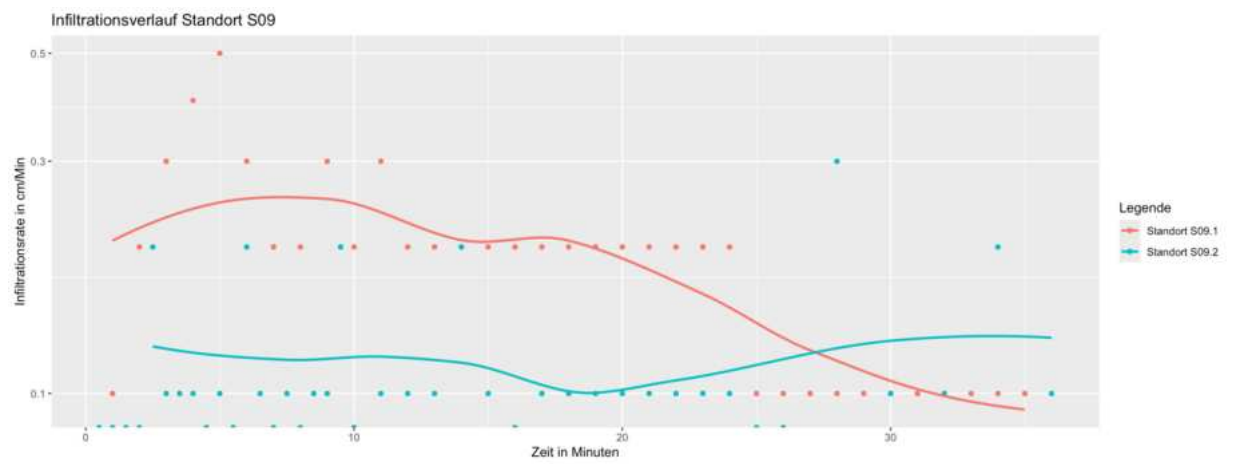
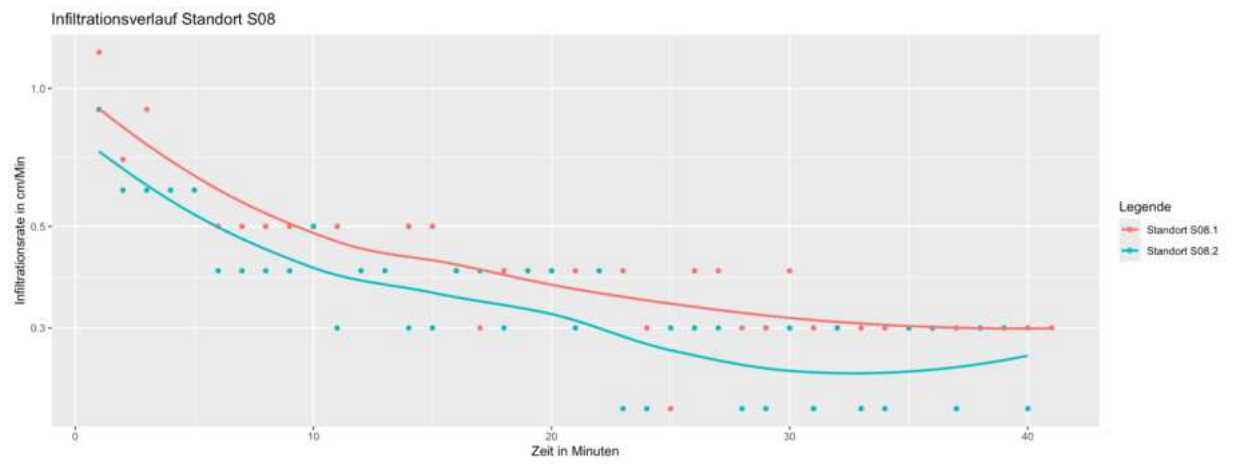
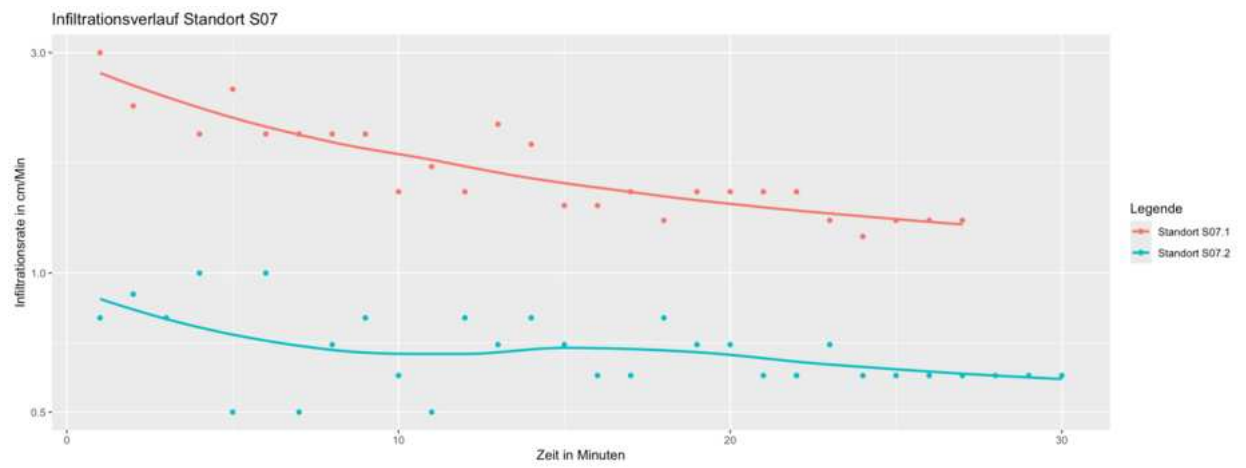
Bayreuth, 04.05.2025

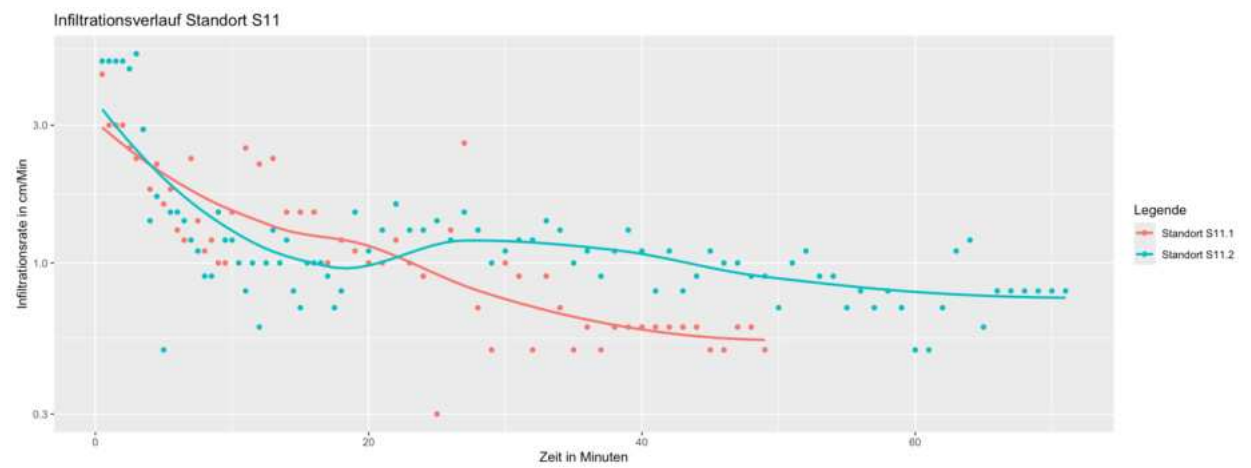
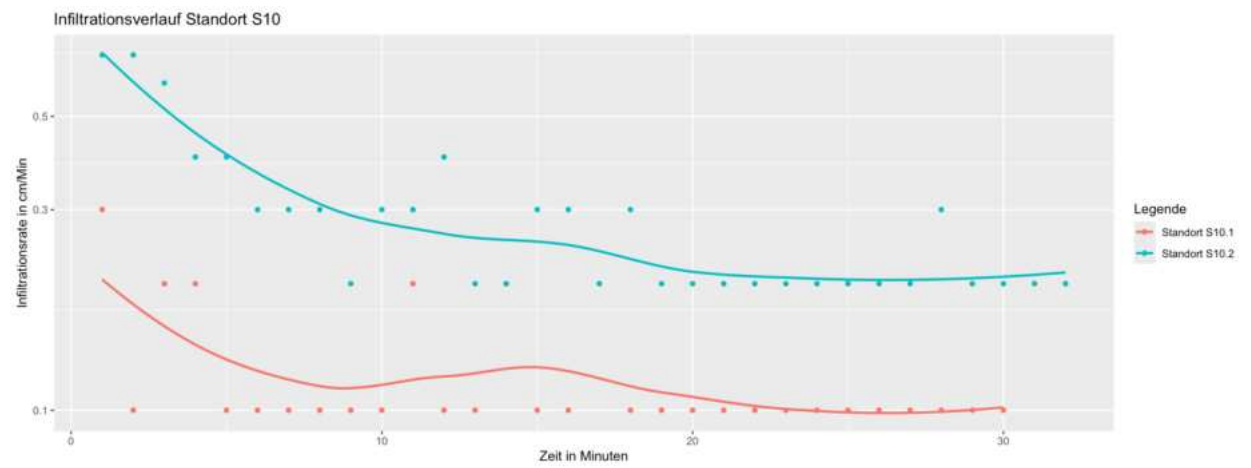
Anhang

Infiltrationsverläufe







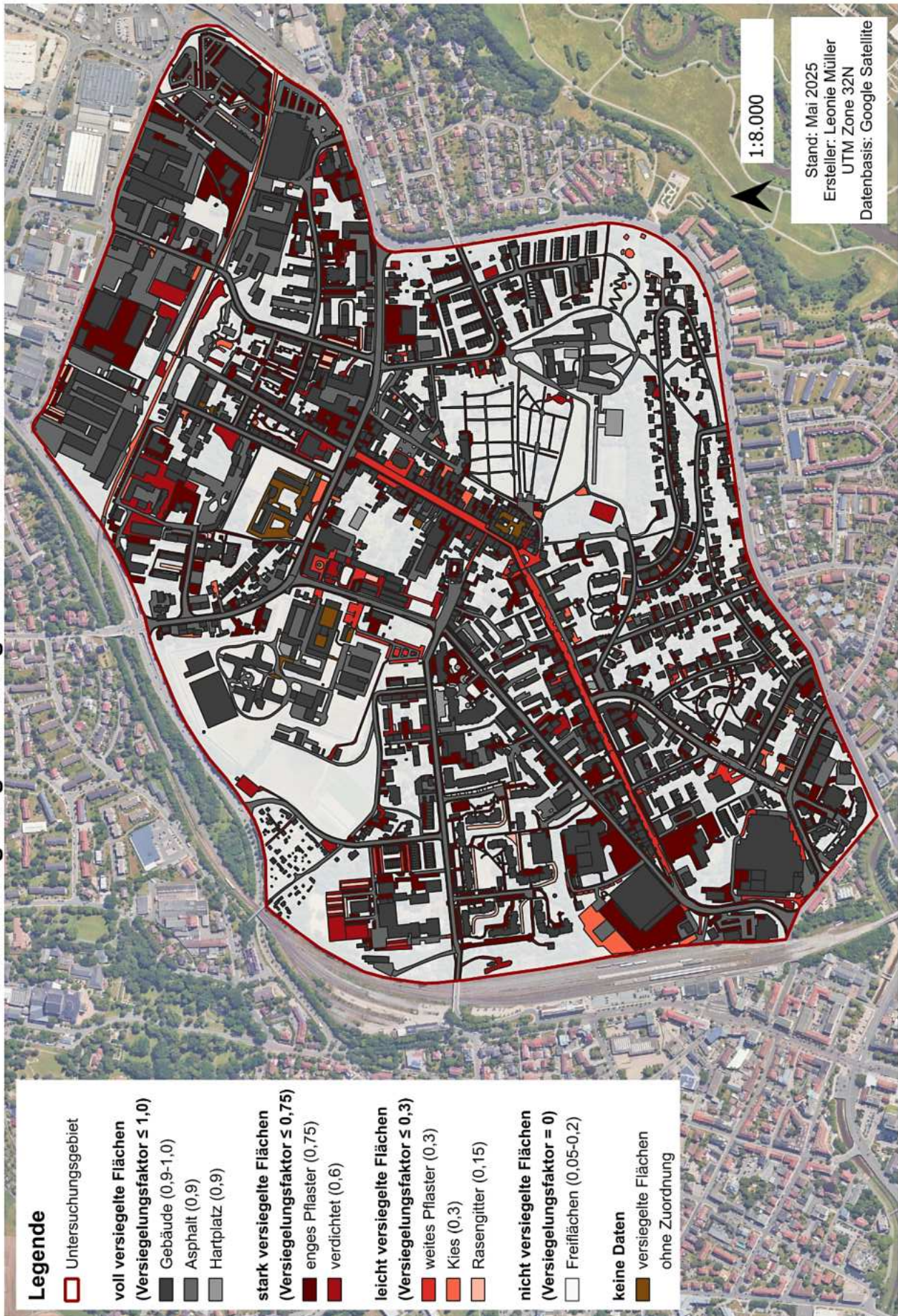


Datum :
Ort :
Bemerkungen:

FELDLISTE

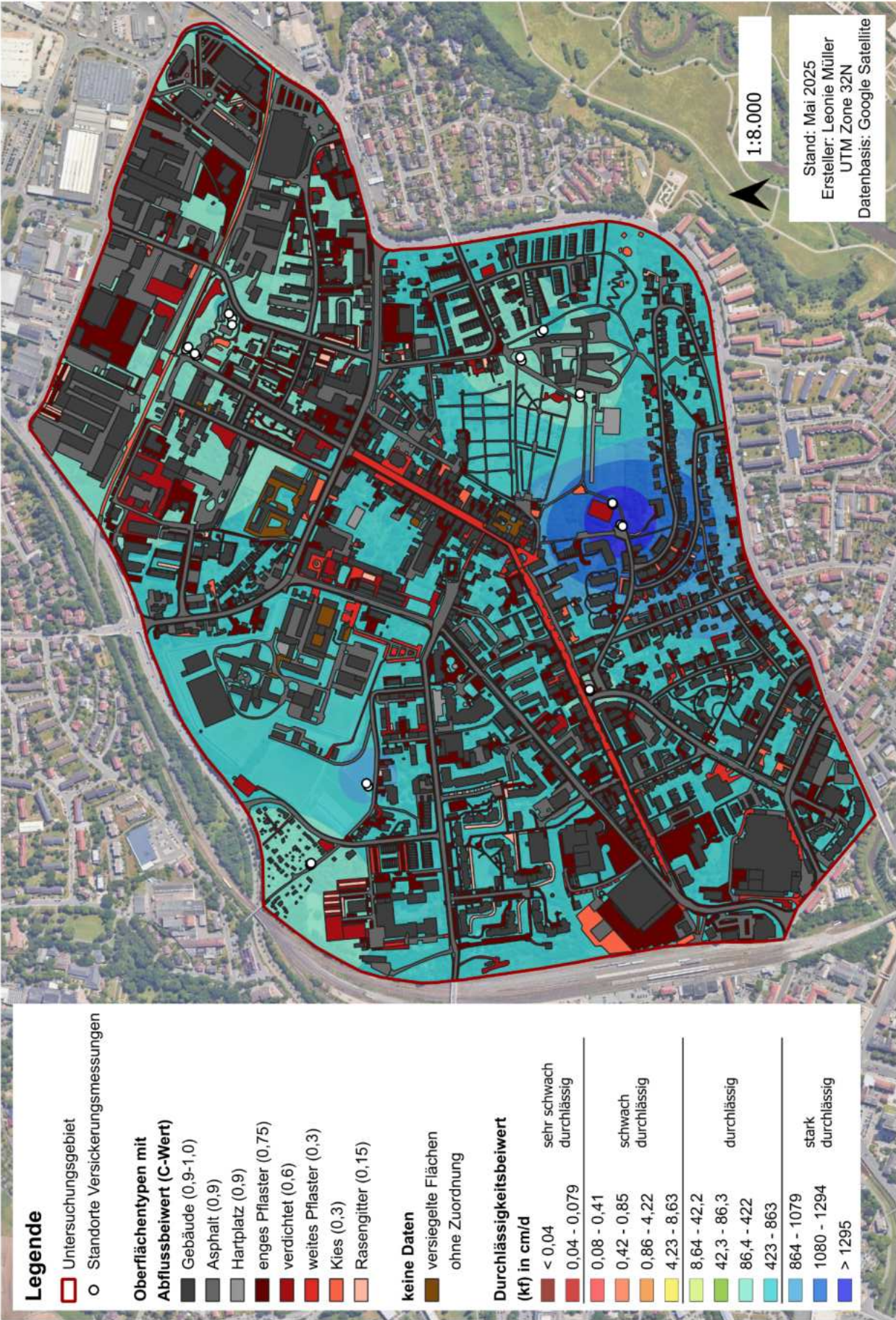
[illegible]

Bodenversiegelung - St. Georgen und Hammerstadt



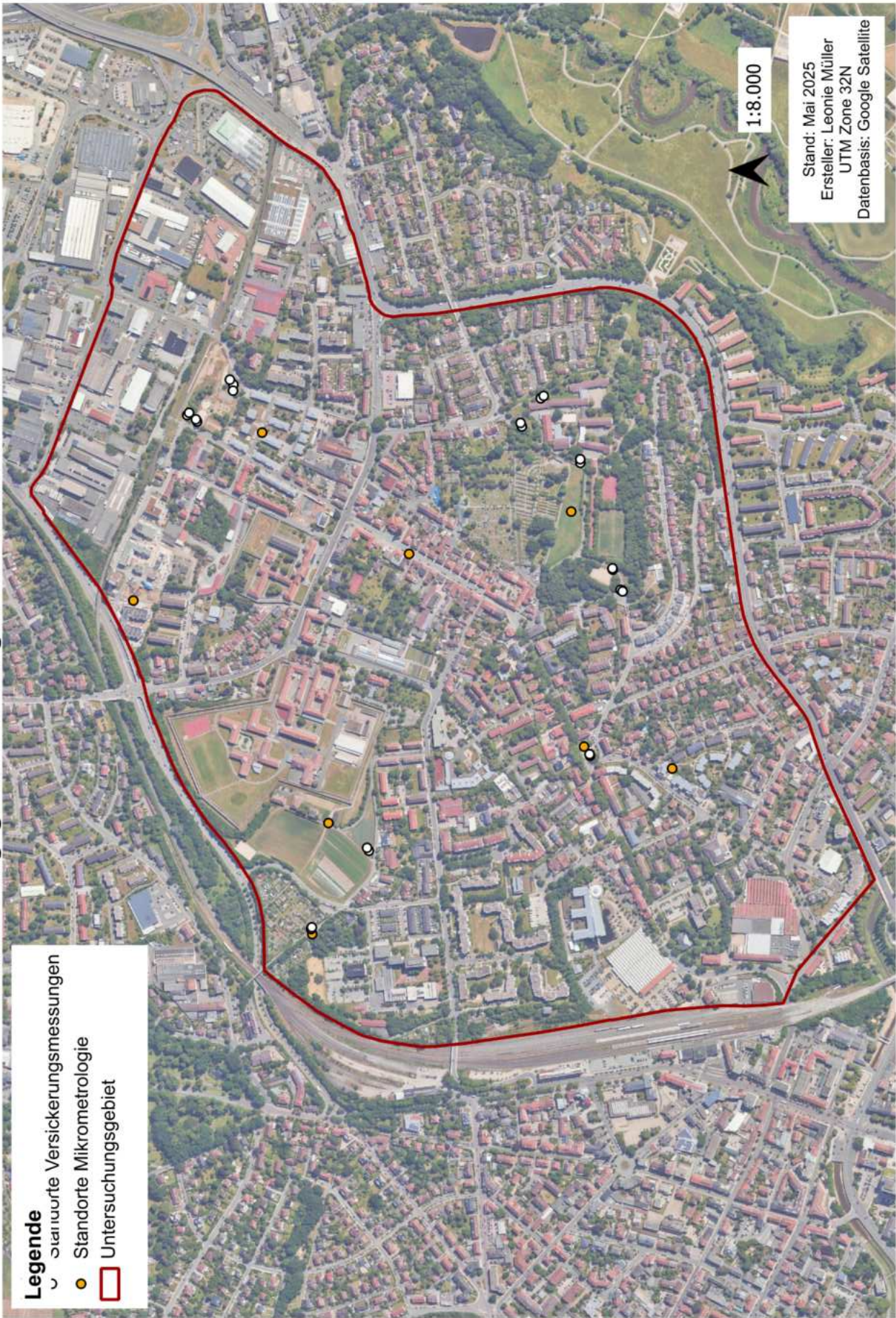
Karte Durchlässigkeitsbeiwert A4

Durchlässigkeitsbeiwert - St. Georgen und Hammerstadt



Karte Untersuchungsgebiet A4

Untersuchungsgebiet St. Georgen und Hammerstadt



Benötigte Materialien für die Messungen



