



Universität Potsdam

Lisa Dillenardt | Annegret Thieken

Untersuchung der räumlichen Verteilung von Bodenkühlpotenzialen in Remscheid

Untersuchung der räumlichen Verteilung von Bodenkühlpotenzialen in Remscheid

Lisa Dillenardt | Annegret Thieken

Untersuchung der räumlichen Verteilung von Bodenkühlpotenzialen in Remscheid

Universitätsverlag Potsdam

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Entstanden im Rahmen von



ExTrass

Urbane Resilienz gegenüber extremen Wetterereignissen -
Typologien und Transfer von Anpassungsstrategien
in kleinen Großstädten und Mittelstädten

Gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Universitätsverlag Potsdam 2021

<http://verlag.ub.uni-potsdam.de/>

Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam

Tel.: +49 (0)331 977 2533 / Fax: 2292

E-Mail: verlag@uni-potsdam.de

Soweit nicht anders gekennzeichnet, ist dieses Werk unter einem Creative-Commons-Lizenzvertrag Namensnennung 4.0 lizenziert.

Dies gilt nicht für Zitate und Werke, die aufgrund einer anderen Erlaubnis genutzt werden. Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Online veröffentlicht auf dem Publikationsserver der Universität Potsdam

<https://doi.org/10.25932/publishup-52667>

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-526670>

Der vorliegende Bericht beinhaltet Ergebnisse des Verbundvorhabens „Urbane Resilienz gegenüber extremen Wetterereignissen – Typologien und Transfer von Anpassungsstrategien in kleinen Großstädten und Mittelstädten“ (ExTrass), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Laufzeit: 1. Oktober 2018 - 31. Dezember 2021

Förderkennzeichen: 01LR1709A1

Forschungsprogramm „Leitinitiative Zukunftsstadt“

Verbundleitung und Koordination obliegen dem Institut für Umweltwissenschaften und Geographie der Universität Potsdam, Professur für Geographie und Naturrisikoforschung (Prof. Dr. Annegret Thielen).

Projekt- und Kooperationspartner:

Universität Potsdam, Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Potsdam

- Arbeitsgruppe Geographie und Naturrisikoforschung
- Arbeitsgruppe Landschaftsmanagement

Leibniz-Institut für Raumbezogene Sozialforschung (IRS), Erkner

adelphi research GmbH, Berlin

Johanniter-Unfall-Hilfe, Bundesgeschäftsstelle, Fachbereich Bevölkerungsschutz, Berlin

Landeshauptstadt Potsdam, Koordinierungsstelle Klimaschutz, Potsdam

Stadt Würzburg, Stabsstelle Klima und Nachhaltigkeit, Würzburg

Stadt Remscheid, Fachdienst Umwelt, Remscheid

Inhalt

1. Einleitung und Motivation.....	5
2. Karte der nutzbaren Feldkapazität als Indikator der Bodenkühlfunktion.....	7
2.1. Theoretischer Hintergrund.....	7
2.2. Eingangsdaten	9
2.2.1. Bodenkarte	9
2.2.2. Urban Atlas 2012	12
2.2.3. Open Street Map (OSM).....	13
2.3. Methodik	13
2.4. Ergebnisse.....	16
2.4.1. Innenstadt	18
2.4.2. Lennep.....	19
2.4.3. Industriegebiet in Bornefeld.....	20
2.4.4. Zusammenfassung der Auswertung der Bodenkühlfunktionskarte.....	21
3. Berechnung von Speicherfüllständen	22
3.1. Theoretischer Hintergrund und Eingangsdaten	22
3.2. Methodik zur Abschätzung der Speicherfüllstände	23
3.3. Ergebnisse und Diskussion	23
4. Plausibilisierung der Karte der potenziellen Bodenkühlfunktion.....	26
4.1. Plausibilisierung der Bodenverdichtung.....	26
4.2. Plausibilisierung der räumlichen Verteilung von Bodenkühlpotenzialen	28
4.2.1. Messungen des Stadtklimas	28
4.2.2. Auswertung der Pflanzenvitalität mithilfe des NDVI.....	29
4.2.3. Auswertungen von stadtklimatischen Messungen (Meteobike-Messungen)	33
5. Nutzungsmöglichkeiten der vorgestellten Karte.....	38

Abkürzungsverzeichnis

BFK: Bodenkühlfunktionskarte

BK50: Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:50.000

CDC: Climate Data Center

DWD: Deutscher Wetterdienst

EFTA: Einheitliche Freihandelsassoziation

ET: Evapotranspiration

EU: Europäische Union

FK: Feldkapazität

LANUV: Landesamt für Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

NDVI: normalisierter differenzierter Vegetationsindex

nFK: nutzbare Feldkapazität

NRW: Nordrhein-Westfalen

OSM: OpenStreetMap

BP: Bodenkühlpotenzial

fS: Versiegelungsfaktor

fD: Verdichtungsfaktor

IR: Pixelwerte vom Infrarotband

R: Pixelwerte vom roten Band

Zusammenfassung

Eine Zunahme der allgemeinen Temperatur auf Grund des Klimawandels und die damit einhergehende Zunahme von Hitzewellen führten dazu, dass das Landesamt für Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) einen Leitfaden für den Schutz der positiven Klimafunktion urbaner Böden herausgab. Darauf aufbauend wurde auf regionaler Ebene für die Stadt Düsseldorf die Kühlleistung der urbanen Böden quantifiziert, um besonders schutzwürdige Bereiche zu identifizieren. Im Rahmen des Projektes ExTrass sollte nun die Kühlleistung urbaner Böden innerhalb Remscheids quantifiziert werden, jedoch auf Basis von frei zugänglichen Daten. Eine solche Datengrundlage schließt eine Modellierung des Bodenwasserhaushaltes, welches die Grundlage der Quantifizierung in Düsseldorf war, für Remscheid aus. Jedoch bietet der vorgestellte Ansatz die Möglichkeit, eine solche Untersuchung auch in anderen Gemeinden innerhalb Deutschlands mit relativ wenig Aufwand durchzuführen.

Die Kühlleistung der Böden wurde über die nutzbare Feldkapazität abgeschätzt, welche das Wasserspeichervolumen der obersten durchwurzelten Bodenzone angibt. Es ist der Bodenwasserspeicher, der Wasser für die Evapotranspiration zur Verfügung stellt und damit maßgeblich die Kühlleistung eines Bodens definiert, d.h. durch direkte Evaporation des Bodenwassers sowie durch die Transpiration von Wasser durch Pflanzen. In die Erstellung der Karte sind eingegangen: (a) die Bodenkarte Nordrhein-Westfalens (BK50), um die nutzbare Feldkapazität (nFK) je Fläche zu bestimmen; (b) der Landnutzungsdatensatz UrbanAtlas 2012, in Verbindung mit einer Literaturrecherche, um den Einfluss der Landnutzung auf die Werte der nFK, insbesondere im Hinblick auf Versiegelung und Verdichtung herzuleiten; und (c) OpenStreetMap (OSM), um den Anteil der versiegelten Flächen genauer zu bestimmen, als dies auf Basis des UrbanAtlas möglich gewesen wäre.

Es hat sich gezeigt, dass dieser Ansatz geeignet ist, um die räumliche Verteilung der potenziellen Bodenkühlfunktion innerhalb einer Stadt zu untersuchen. Es ist zu beachten, dass der Einfluss des Grundwassers in Remscheid nicht berücksichtigt werden konnte. Denn es ist damit zu rechnen, dass die Grundwasserverhältnisse aufgrund der geologischen und topographischen Situation in Remscheid kleinräumig Variationen unterliegen und es somit keinen durchgängigen und kartierten Aquifer gibt.

Kleingartenanlagen, Parks und Friedhöfe im innerstädtischen Bereich und allgemein die Landnutzungsklassen Wald und Grünland wurden als Flächen mit einem besonders hohem potenziellen Bodenkühlpotenzial identifiziert. Solche Flächen sind besonders schützenswert. Die Analyse der Speicherfüllstände der oberen Bodenzone, basierend auf der erstellten Karte der potenziellen Bodenkühlfunktion und der klimatischen Wasserbilanz, ergab, dass besonders innerstädtische Flächen, die einen kleinen Bodenwasserspeicher haben, in einem trockenen Jahr bereits früh im Sommer ihre Kühlfunktion verlieren und bei Hitzewellen somit eine verringerte positive Klimafunktion haben. Gestützt wird diese Aussage durch eine Auswertung des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI), der genutzt wurde, um die Veränderung der Pflanzenvitalität vor und nach einer Hitzeperiode im Juni/Juli 2018 zu untersuchen.

Messungen mit Meteobikes, einer Vorrichtung, die dazu geeignet ist, während einer Radfahrt kontinuierlich die Temperatur zu messen, stützen die Erkenntnis, dass innerstädtische

Grünflächen wie Parks eine positive Wirkung auf das urbane Mikroklima haben. Weiterhin zeigen diese Messungen, dass die Topographie innerhalb des Untersuchungsgebietes die Aufheizung einzelner Flächen und die Temperaturverteilung vermutlich mitbestimmt. Die hier vorgestellte Karte der potenziellen Kühlfunktion für Remscheid sollte als Ergänzung in die Klimafunktionskarte für Remscheid eingehen und den bestehenden Layer „flächenhafte Klimafunktion“, der nur die Landnutzung berücksichtigt, ersetzen.

1. Einleitung und Motivation

Böden spielen im Klimawandel eine wichtige Rolle, sowohl als Kohlenstoffspeicher als auch aufgrund ihres kühlenden Effektes durch die Verdunstung von Bodenwasser (Willand & Höke, 2014). Im Hinblick auf die Klimaanpassung ist gerade die Kühlleistung urbaner Böden eine wichtige Ökosystemleistung. Denn eine Zunahme der Temperaturen in den Sommermonaten sowie überdurchschnittlich warme und trockene Jahre wie das Jahr 2018 (Imbery et al., 2018) können aufgrund der Ausbildung von Wärmeinseln belastend für die städtische Bevölkerung sein. Das liegt daran, dass anhaltende Hitzeperioden mit Tropennächten über mehrere Tage das Herz-Kreislaufsystem, besonders von Menschen mit Vorerkrankungen, belasten (Umweltbundesamt, 2020). Jedoch ist die Kühlleistung von Böden durch zunehmende Versiegelung und Verdichtung, insbesondere in wachsenden Städten, bedroht. Deshalb rückt das Thema immer mehr in den Fokus und auch in Nordrhein-Westfalen (NRW) wurde die Bedeutung der Böden im Klimawandel erkannt und thematisiert (Genßler et al., 2010). Hier wurde vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) ein Leitfaden erarbeitet (Kastle et al., 2015), um Böden, die aufgrund ihrer Verdunstungs- und damit Kühlleistung für das Stadtklima von Bedeutung sind, zu identifizieren und von Bebauung freizuhalten.

Um für solche Entscheidungen Planungsgrundlagen zu schaffen, ist es notwendig, den Kühleffekt von Böden auf das urbane Mikroklima zu betrachten und – wenn möglich – zu quantifizieren. Die Kühlung an sich erfolgt durch die Verdunstung von Bodenwasser, wodurch der Umgebung Wärme entzogen und in latente Wärme überführt wird. Der daraus resultierende Kühleffekt, also die Reduktion der Lufttemperatur auf einer Fläche und wie sich diese Reduktion der Temperatur auf umgebende Flächen auswirkt, hängt von der Beschaffenheit des Bodens an sich, dem verfügbaren (Boden-) Wasser, der Interaktion Boden-Pflanze und den klimatischen Bedingungen ab. Diese Faktoren sind jedoch räumlich und teils zeitlich variabel, was die Betrachtung und Quantifizierung erschwert.

Wie kann man diesen Kühleffekt also untersuchen? Eine Möglichkeit ist es, die Reduzierung der Temperatur auf der Fläche an sich zu betrachten und zu messen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, zu untersuchen, wie weit diese Kühlung in umgebende Flächen hineinwirkt. In mehreren Studien wurde gezeigt, dass die Reduzierung der Temperatur auf untersuchten Grünflächen vorhanden ist und dass der Kühleffekt in versiegelte Flächen hinein etwa einer Länge der jeweiligen Grünanlage entspricht (Jauregui, 1991; Spronken-Smith, 1994; Upmanis et al., 1998).

Ab welcher Größe eine Grünfläche einen Kühleffekt auf die Umgebung hat, ist nicht abschließend geklärt. Upmanis et al. (1998) untersuchten eine Fläche mit einer Größe von 2,4 ha und konnten hier keinen signifikanten Kühleffekt auf die Umgebung nachweisen. Das kann bedeuten, dass Grünflächen mit einer Größe unter 2,5 ha keinen signifikanten Kühleffekt auf ihre Umgebung haben. Da es sich um nur eine Untersuchungsfläche handelt und die umliegende Bebauung (Dichte, Höhe, Ausrichtung) einen Einfluss haben kann, muss diese Aussage mit Vorsicht interpretiert werden. Denn eine andere Studie aus Japan konnte auch bei einer Fläche von nur 60*40 Metern (0,24 ha) einen signifikanten Kühleffekt auf die Umgebung nachweisen (Saito et al., 1991).

Das Umweltamt Düsseldorf hat ein Vorgehen entwickelt, um die Kühlleistung von urbanen Böden zu quantifizieren, bei welchem der Boden und der Bodenwasserspeicher im Fokus stehen. Die Kühlleistungen von Böden wurde ermittelt, indem die physikalische Größe „Leistung“ [Watt] je Fläche errechnet wurde (Sperling et al., 2019). Einbezogen werden hier Klimadaten aus dem Modell RUBINLUX, Bodenparameter aus der Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen und Informationen über den Versiegelungsgrad (Sperling et al., 2019). So kann die Kühlleistung des Bodens an sich betrachtet werden, ohne dass der Einfluss der Vegetation berücksichtigt wird.

Die hier vorgestellte Bodenkühlfunktionskarte (im Folgenden mit „BFK“ abgekürzt) zeigt eine weitere Möglichkeit auf, die Bodenkühlfunktion von urbanen Böden flächendeckend zu quantifizieren. Die besondere Qualität der hier vorgestellten Methode ist, dass relativ wenige Daten benötigt werden und die notwendigen Daten frei zur Verfügung stehen. Dazu wird das Speichervolumen der obersten Bodenschicht abgeschätzt, ohne dessen konkrete Befüllung mit Wasser zu bestimmen. Diese Speicherkapazität der Böden ist gleichzusetzen mit der nutzbaren Feldkapazität, d.h. dem pflanzenverfügbaren Wasser, und wird als Indikator für die Kühlfunktion verwendet. Auf Basis der Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen und Landnutzungsdaten wird die räumliche Verteilung dieser Speicherkapazitäten innerhalb Remscheids untersucht und in einer digitalen Karte zur Verfügung gestellt. Das schafft eine Grundlage, um Flächen hinsichtlich ihres Kühlpotenzials zu unterscheiden und besonders schützenswerte Flächen zu identifizieren. Dabei ist zu beachten, dass auch wir uns mit diesem Ansatz auf einen Teilaspekt der Kühlleistung, dem Boden an sich fokussieren und nicht die Vegetation oder den tatsächlichen Bodenwasserhaushalt betrachten. Es handelt sich daher um eine Potenzialabschätzung.

In diesem Bericht werden wir zuerst detailliert beschreiben, wie wir diese Karte erstellt haben (Kapitel 2.1. bis Kapitel 2.3.), um anschließend die Karte an sich und mögliche Interpretationen vorzustellen (Kapitel 2.4.). Um ein besseres Verständnis für die Funktionsweise der digitalen Karte zu schaffen, wird sie anschließend genutzt, um mittels der klimatischen Wasserbilanz über ein Jahr hinweg die Füllstände der oberen Bodenzone zu untersuchen (Kapitel 3). Anschließend werden die Ergebnisse durch Messungen und Satellitendaten hinsichtlich ihrer Plausibilität geprüft (Kapitel 4). Abschließend stellen wir Möglichkeiten zur Nutzung der Karte in der städtischen Planung vor.

2. Karte der nutzbaren Feldkapazität als Indikator der Bodenkühlfunktion

2.1. Theoretischer Hintergrund

Um die Kühlfunktion von Böden zu untersuchen, betrachten wir vorab die Prozesse, die dabei eine Rolle spielen. Die Kühlleistung von Böden lässt sich auf die Verdunstung von Wasser zurückführen. Dabei werden die Transpiration und die Evaporation unterschieden. Die Transpiration (Verdunstung von Wasser durch eine Pflanze) und die Evaporation (Verdunstung von Wasser von einer Wasserfläche oder von nicht bewachsenen Böden) lassen sich zur Evapotranspiration (ET) zusammenfassen (siehe Abbildung 1). Zu welchen Anteilen sich die ET aus der Transpiration und Evaporation zusammensetzt, hängt wesentlich von der Dichte und Art der Vegetation ab. Auf einer dicht bewachsenen Oberfläche steht der Transpiration im Vergleich zur Evaporation eine sehr viel größere Oberfläche zur Verfügung (Blattfläche vs. Bodenfläche; vergleiche Abbildung 1). Dann hat die Transpiration einen höheren Anteil an der ET. Der kühlende Effekt der Böden ist darauf zurückzuführen, dass Bodenwasser durch die ET von einem flüssigen in einen gasförmigen Zustand übergeht. Dieser Aggregatsübergang verbraucht Energie (2257 J/g): Thermische Energie wird der Umgebung entzogen und in latente Wärme überführt. Durch den Entzug thermischer Energie aus der Umgebung kommt es zu einer Abnahme der Umgebungstemperatur.

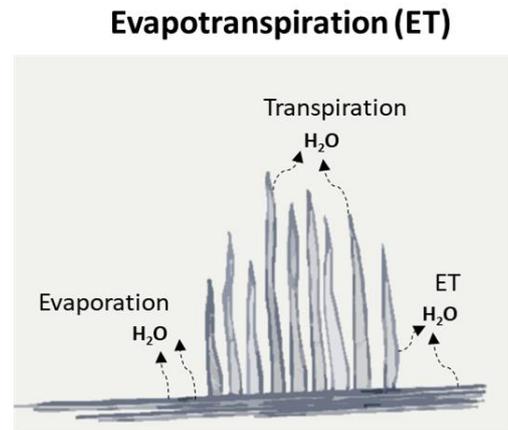


Abbildung 1: Darstellung der Evapotranspiration (ET), welche sich aus der Transpiration und der Evaporation zusammensetzt; eigene Darstellung in Anlehnung an (Brown, 2000).

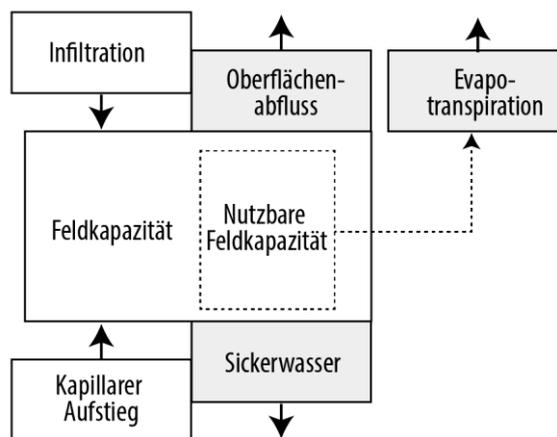


Abbildung 2: Schematischer vereinfachter Aufbau des Bodenwasserhaushaltes; eigene Darstellung.

Böden fungieren bei diesen Prozessen als Wasserspeicher. Daher wird das Kühlpotenzial eines Bodens wesentlich von der Menge Wasser bestimmt, die der Boden theoretisch speichern, d. h. der ET zur Verfügung stellen kann. Dieses Potenzial hängt direkt mit dem Bodenwasserhaushalt zusammen. Abbildung 2 stellt vereinfacht den Bodenwasserhaushalt dar: Dem Boden wird durch Infiltration und kapillaren Aufstieg Wasser zugeführt. Wasser, das nicht in den Bodenporen gespeichert werden kann, geht dem System als Oberflächenabfluss oder Sickerwasser verloren. Das Sickerwasser und das Wasser des Oberflächenabflusses wirken sich kaum auf die Kühlleistung von Böden aus, da sie nicht im signifikanten Umfang für die ET zur Verfügung stehen.

Das potenzielle Wasservolumen, das durch Adsorption und kapillare Kräfte in der Bodenmatrix gegenüber der Schwerkraft zurückgehalten werden kann, wird als Feldkapazität (FK) bezeichnet. Jedoch kann nur ein Teil dieses Volumens durch die Saugspannung von Wurzeln aufgenommen werden. Dieser Anteil wird als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet. Die übrige Menge (FK - nFK) ist zu stark an die Bodenmatrix gebunden. Die nFK kann genutzt werden, um abzuschätzen, wie viel Wasser ein Boden der ET, und damit der Kühlfunktion des Bodens, zur Verfügung stellt.

Dabei ist zu beachten, dass die FK und die nFK Bodenparameter sind und nicht angeben, wie viel Wasser aus dem Boden tatsächlich für die ET und damit der Bodenkühlfunktion zur Verfügung steht. Hierfür wären weitere Informationen, insbesondere genaue Informationen über den Bodenwasserhaushalt (Niederschlag, Grundwasserflurabstände) und Klimadaten sowie die Vegetation und deren jeweiligen Welkepunkte¹, notwendig. Vielmehr geben die FK und die nFK an, wie groß das Wasserspeichervermögen des Bodens ist. Sie bilden somit ein Potenzial ab und hängen von der effektiven Durchwurzelungstiefe, der Korngrößenverteilung, der Lagerung und dem Anteil organischen Materials ab (Schrey, 2014). Solche Informationen sind in gängigen Bodenkarten enthalten oder können auf Basis der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Sponagel et al., 2005) abgeleitet werden.

Die Nutzung der Böden können diese Bodeneigenschaften beeinflussen. Gerade in urbanen Räumen kommt es durch Versiegelungs- und Verdichtungsprozesse zu einer Beeinträchtigung der Wasserspeicherungen und damit der Bodenkühlfunktion, da das Volumen des Porenraums reduziert wird und/oder auf versiegelten Flächen die Infiltration und Evaporation von Wasser extrem vermindert (bzw. gänzlich unterbunden) sein kann. Hierbei ist die Landnutzung ein wichtiger Faktor. Gerade in urbanen Räumen hängt die Landnutzung mit der Verdichtung und/oder Versiegelung von Böden zusammen. Welche Versiegelungsgrade und welche Bodenverdichtung in den jeweiligen Landnutzungsklassen zu erwarten sind, ist Teil einiger Forschungsarbeiten (Marcotullio et al., 2008; Marzluff et al., 2008). Sowohl der Einfluss der Versiegelung als auch der Einfluss der Verdichtung auf die Kühlfunktion von Böden wird im Kapitel 2.3 thematisiert.

¹ Der pflanzenspezifische Welkepunkt gibt an, ab welchem Wassergehalt eine Pflanze irreversibel geschädigt ist. Ist der Welkepunkt unterschritten, kann die Pflanze nicht mehr im vollen Umfang Wasser aufnehmen und transpirieren. Für die nFK wird ein allgemeiner Welkepunkt bei $pF = 4,2$ angenommen.

2.2. Eingangsdaten

2.2.1. Bodenkarte

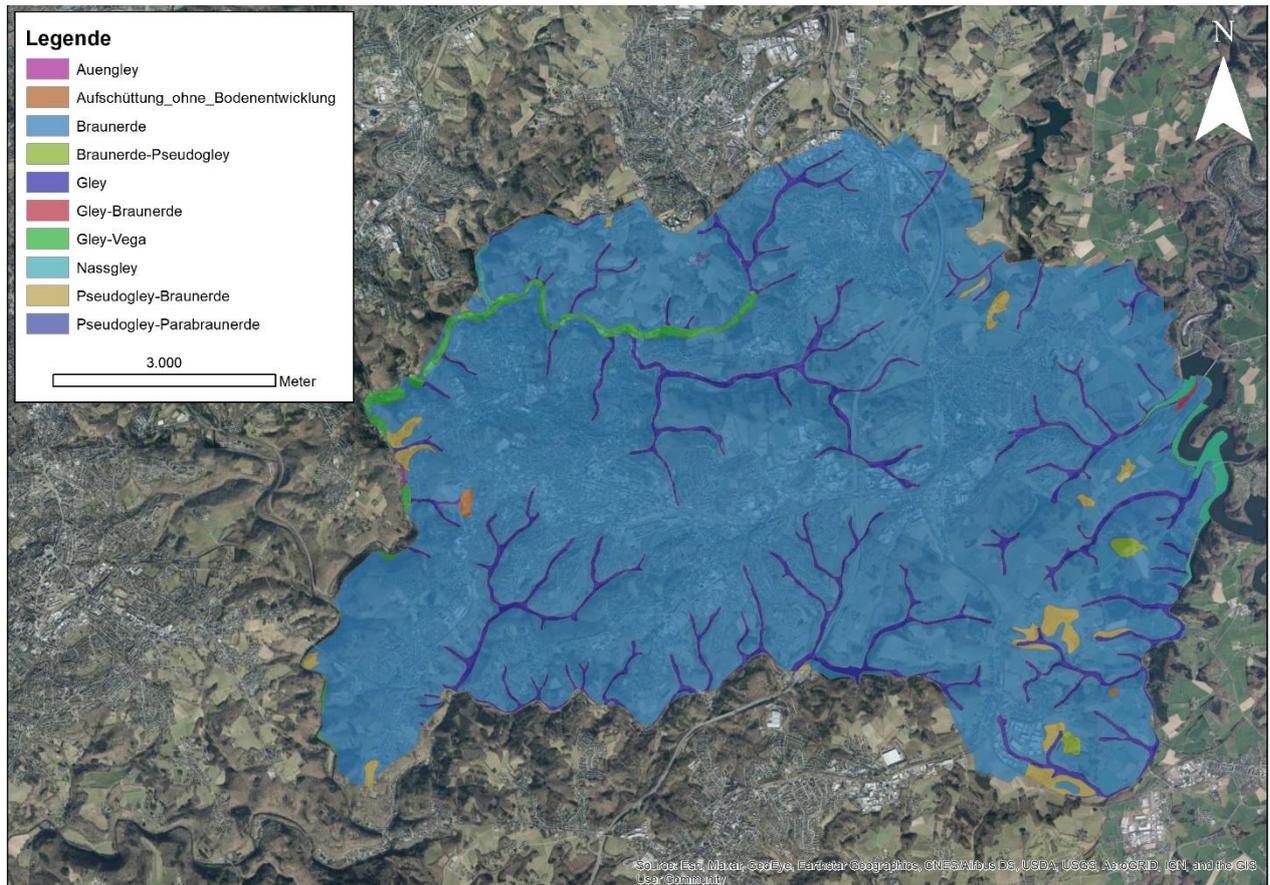


Abbildung 3: Ausschnitt aus der BK50 von NRW für den Bereich Remscheid; dargestellt ist der Bodentyp; Grundkarte: ESRI.

Die Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:50.000 (BK50) wurde vom „Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen“ erstellt. Die Karte stellt auf Basis von schon existentem Kartenmaterial und im Gelände erhobenen bodenkundlichen Daten flächendeckend den Bodenaufbau bis in eine Tiefe von zwei Metern dar (Schrey, 2014). Die genaue Tiefe hängt gegebenenfalls von der Tiefe des anstehenden Festgesteines oder etwaigen Grundwasserleitern ab, wenn diese weniger als zwei Meter unter der Geländeoberfläche anstehen (Schrey, 2014). Dieser ursprünglich analoge Datensatz kann mittlerweile als digitaler Vektordatensatz frei im GEOportal.NRW² bezogen werden.

Die Bodenkarte gliedert die Flächen in Abhängigkeit vom Bodensubtyp³ und der Bodenart⁴ in Bodeneinheiten (Schrey, 2014). Tabelle 1 fasst die Bodeneinheiten und ihre Merkmale zusammen, die innerhalb Remscheids vorkommen. Abbildung 3 stellt die räumliche Verteilung der Bodeneinheiten innerhalb Remscheids dar. Die vorherrschende Bodeneinheit in Remscheid ist die Braunerde mit einem Flächenanteil von 89,26 %, gefolgt vom Gley mit einem

² <https://www.geoportal.nrw/>

³ Bodenentwicklung (Schrey, 2014)

⁴ Korngrößenzusammensetzung (Schrey, 2014)

Flächenanteil von 7,24 % (siehe Tabelle 1). Alle anderen Bodeneinheiten sind mit einem Flächenanteil von weniger als 2% vertreten.

Auf Basis der Bodeneinheiten sind Kennwerte für den Bodenwasserhaushalt ermittelt worden. Für die Erstellung der BFK steht der Kennwert der nFK im Fokus. Die nFK wird definiert als der Anteil der Feldkapazität, der für die Vegetation nutzbar ist und in den Mittelporen bei einer Saugspannung von pF 1,8 bis 4,2 gespeichert wird. Die nFK errechnet sich aus der Differenz zwischen der Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt⁵ (Sponagel et al., 2005). Die Feldkapazität leitet sich nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung aus der Bodenart bei mittlerer Lagerungsdichte und unter Berücksichtigung des Skelettanteils sowie des Humusgehaltes ab (Schrey, 2014; Sponagel et al., 2005). Das bedeutet auch, dass die Lagerungsdichte in dieser Abschätzung keine genauere Berücksichtigung erfährt. Da die Lagerungsdichte in urbanen Räumen durch die Landnutzung verändert sein kann, ergänzen wir die Daten der BK50 durch Landnutzungsdaten (siehe unten).

Als Bezugstiefe für die Berechnung der nFK wird die effektive Durchwurzelungstiefe verwendet (vergleiche Tabelle 1, Spalte 3). Die effektive Durchwurzelungstiefe beschreibt den oberen Bereich des Bodens, in welchem der Bodenwasserhaushalt durch die Interaktion Boden-Pflanze geprägt ist (Schrey, 2014). Dieser Wert wurde für die Bodenkarte rechnerisch bestimmt und bezieht sich auf einen theoretischen Bewuchs mit einjährigen Ackerpflanzen (Schrey, 2014). Ist die Tiefe der Bodenschicht geringer als die errechnete effektive Durchwurzelungstiefe, dann wird sie entweder durch anstehendes Festgestein oder einen Grundwasserleiter nach unten abgegrenzt (Schrey, 2014).

⁵ Der permanente Welkepunkt ist auf Basis von pflanzenökologischen Untersuchungen für alle Kulturpflanzen konventionell bei 1,5 MPa (pF 4,2) festgelegt (Sponagel et al., 2005).

Tabella 1: Zusammenfassung der auftretenden Bodentypen durch Daten aus der Bodenkarte BK50 (Spalte 1-4) und Beschreibungen der jeweiligen Bodentypen (Spalte 6), Quelle: (Schrey, 2014)

Bodeneinheit	FA ⁶ [%]	nFK ⁷	Tiefe [dm] ⁸	Bodenart	Beschreibung
Auengley	0,02	35	2	tonig-schluffig	Auenbraunerde, Kennzeichnung durch Auendynamik, Gley: siehe Beschreibung Gley.
Aufschüttung_ohne_Bodenentwicklung	0,09	139	10	lehmig-sandig,	Boden aus anthropogen aufgeschüttetem Material.
Braunerde	89,26	153	9	tonig-schluffig	durch Verwitterung und Tonmineraleubildung gleichmäßig braun gefärbter und verlehmteter Boden.
Braunerde-Pseudogley	0,21	153	11	tonig-schluffig	Braunerde: siehe Beschreibung Braunerde; Pseudogley: durch Stau des Sickerwassers zeitweilig vernässeter Boden; gefleckter (Eisen, Mangan) oder gebleichter Stauwasserleiter über mamoriertem Staukörper.
Gley	7,24	86	5	tonig-schluffig	durch Grundwasserfluss geprägter Boden; rostfleckiger Oxidations- über grauem Reduktionshorizont; mittlerer Grundwasserstand tiefer als 4 dm unter Gelände.
Gley-Braunerde	0,04	38	3	tonig-schluffig	Gley: siehe Beschreibung Gley; Braunerde: siehe Beschreibung Braunerde.
Gley-Vega	1,09	172	10	tonig-schluffig	Gley: siehe Beschreibung Gley; Braunaueboden (Vega): Boden aus mehr oder weniger humosem Bodenmaterial, das in Talauen durch Flüsse sedimentiert wurde; meist stark schwankendes Grundwasser; (ursprünglich) periodisch überflutet.
Nassgley	0,11	38	2	tonig-schluffig	Grundwasserboden mit grauem Reduktionshorizont unmittelbar unter dem humosen Oberboden; Grundwasser lang anhaltend nahe der Oberfläche.
Pseudogley-Braunerde	1,34	166	11	tonig-schluffig	Pseudogley: durch Stau des Sickerwassers zeitweilig vernässeter Boden; gefleckter (Eisen, Mangan) oder gebleichter Stauwasserleiter über mamoriertem Staukörper; Braunerde: siehe Braunerde.
Pseudogley-Parabraunerde	0,03	213	11	tonig-schluffig	Pseudogley: durch Stau des Sickerwassers zeitweilig vernässeter Boden; gefleckter (Eisen, Mangan) oder gebleichter Stauwasserleiter über mamoriertem Staukörper; Parabraunerde: Braun gefärbter Boden, der durch Tonverarmungs- und -anreicherungsprozesse infolge vertikaler Tonverlagerung gekennzeichnet ist.

⁶ Anteil an der Gesamtfäche Remscheids

⁷ Nutzbare Feldkapazität

⁸ Effektive Durchwurzelungstiefe; beschreibt den Bereich, in welchem der Bodenwasserhaushalt maßgeblich durch die Transpiration von Pflanzen beeinflusst ist.

2.2.2. Urban Atlas 2012

Urban-Atlas ist ein Vektordatensatz, welcher für den gesamten EU-Raum und die EFTA-Staaten (Europäische Freihandelsassoziation) einheitliche Informationen urbaner Räume über die Landnutzung enthält. In urbanen Räumen werden räumliche Strukturen ab einer Größe von 0,25 ha und im ländlichen Raum von 1 ha aufgelöst. Das geschieht auf Basis von hochauflösenden Satellitenbilder (SPOT 5&6 und Formosat2) und statistische Datensätze aus dem Urban-Audit (EEA, 2012).

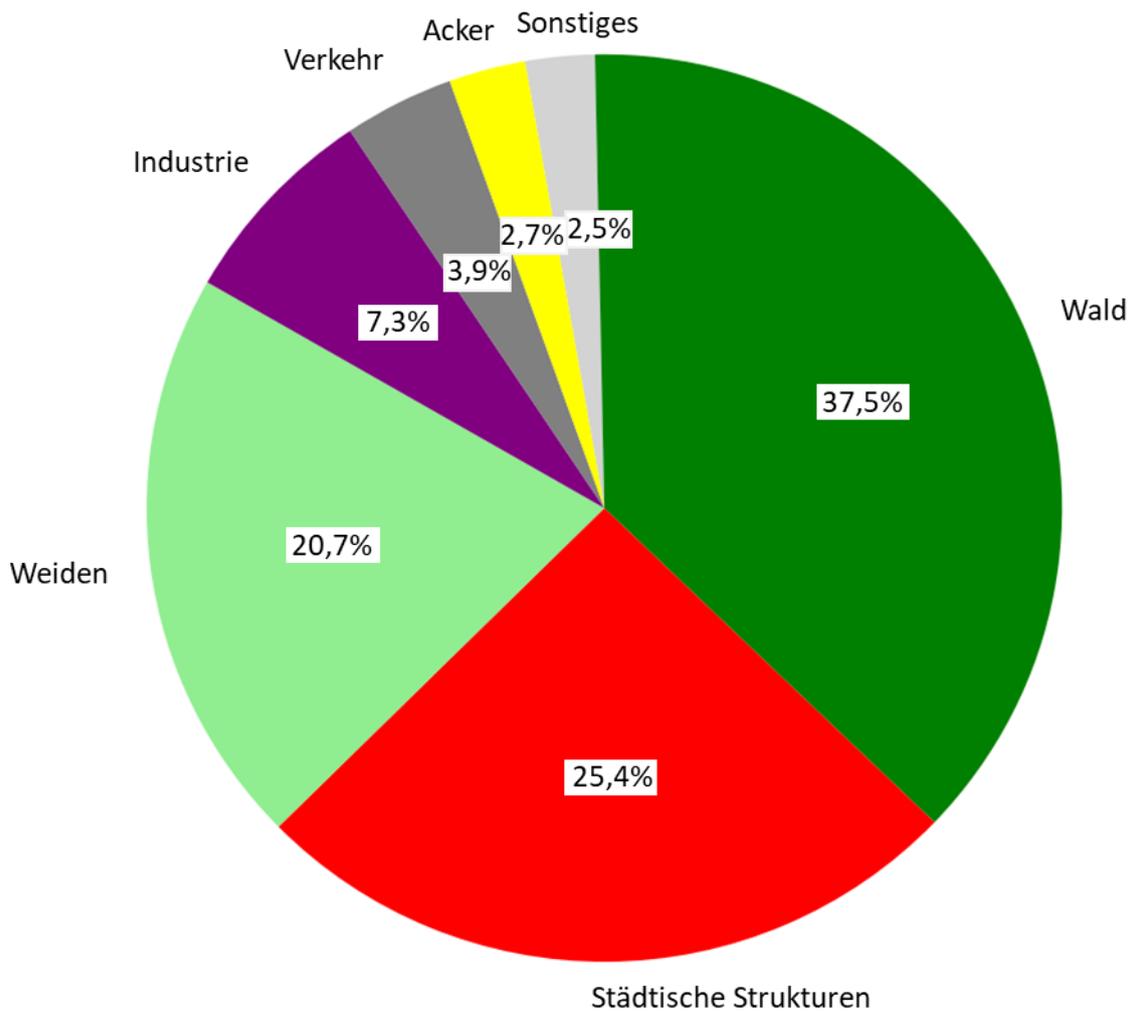


Abbildung 4: Prozentuale Anteile der abgebildeten Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche Remscheids, basierend auf dem Urban Atlas 2012.

Der Urban Atlas 2012 steht auf der Webseite des Copernicus Land Monitoring Services zum freien Download bereit. Es gibt einen aktuelleren Datensatz, der nach der Erstellung der BFK 2020 herausgegeben wurde. Der Datensatz weist nur geringe Veränderungen für den Raum Remscheid auf, und diese Veränderungen finden sich auf nicht versiegelten oder bebauten Flächen. Daher wurde die BFK nicht nochmals berechnet. Abbildung 4 fasst zusammen, welche Landnutzungsklassen des Urban Atlas innerhalb Remscheids die größten Flächenanteile ausmachen. Der größte Flächenanteil ist mit Wald bedeckt. Städtische Strukturen nehmen den zweitgrößten Flächenanteil ein.

2.2.3. Open Street Map (OSM)

OSM ist eine frei zugängliche Geodatenbank. Hier werden fortlaufend Geodaten gesammelt und in einer Weltkarte zusammengefügt. Die einzelnen Datensätze, wie z. B. Straßennetze oder Gebäudegrundflächen, können separat von der offiziellen Webseite heruntergeladen und weiterverarbeitet werden. Für die BFK wurden Gebäudegrundflächen innerhalb Remscheids verwendet. Gebäudegrundflächen können als vollständig versiegelte Flächen angesehen werden. Die hohe räumliche Auflösung, die OSM-Daten in Bezug auf Gebäudegrundflächen mit sich bringen, nutzen wir, um die Versiegelungsinformationen aus dem UrbanAtlas zu ergänzen.

2.3. Methodik

Die räumliche Verteilung von Bodenkühlpotenzialen soll auf Grundlage der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Datensätze ermittelt werden. Hierfür wird die räumliche Verteilung der nFK betrachtet, die zunächst direkt der digitalen BK50 entnommen werden kann. Wie viel Wasser der Boden tatsächlich in seinen Poren speichern kann, hängt jedoch auch von seiner Überprägung ab. Daher sollen die Verdichtung und Versiegelung der Böden einbezogen

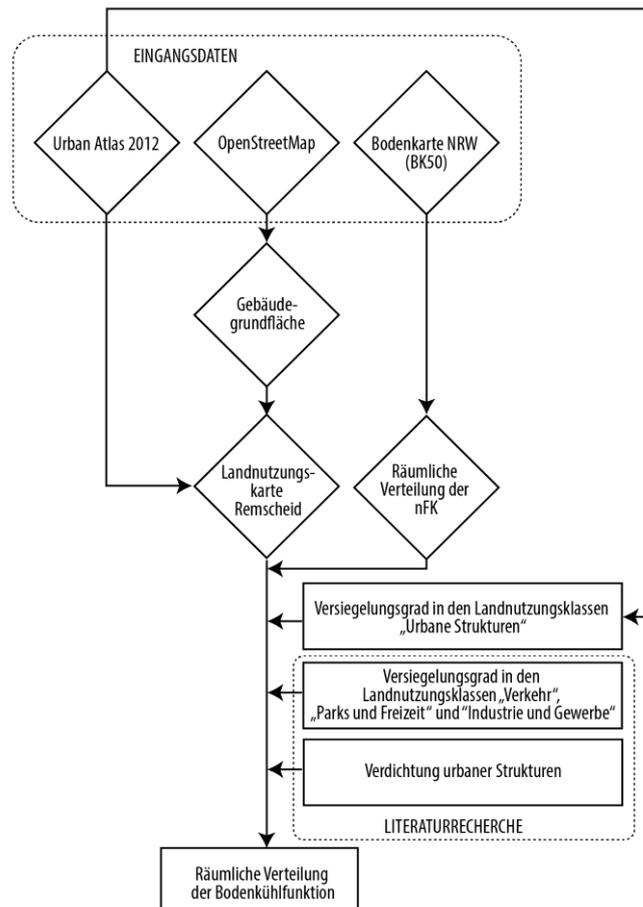


Abbildung 5: Schematischer Work-Flow zur Erstellung der BFK.

werden. Abbildung 5 stellt schematisch den Arbeitsablauf dar, mit welchem die BFK erstellt wurde. Alle kartografischen Arbeitsschritte wurden mit ArcMap 10.3 ausgeführt.

Urban Atlas 2012 wurde als Eingangsdatensatz verwendet. In einem ersten Schritt wurden die Gebäudegrundflächen aus dem OpenStreetMap Datensatz extrahiert und als separate Landnutzungsklasse dem Urban Atlas zugefügt. Das Resultat ist eine digitale Karte, die Remscheids gesamte Fläche hinsichtlich der Landnutzung in Patches⁹ aufteilt.

In einem nächsten Schritt wurden die Daten der nFK aus der Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen extrahiert und mit dem Landnutzungsdatensatz verschnitten. Dabei wurde die nFK nicht innerhalb der Landnutzungs-Patches gemittelt. War die nFK innerhalb eines Landnutzungspatches uneinheitlich, wurde das Patch aufgeteilt, sodass jedes Patch eindeutig einer Landnutzungsklasse zuzuordnen ist und einen einheitlichen Wert für die nFK hat. Im Resultat definiert sich jedes Patch über zwei Parameter: (1) die Landnutzung und (2) die nFK.

Tabelle 2 fasst alle 21 verwendeten Landnutzungsklassen zusammen. Der Einfluss der Landnutzung auf den Bodenwasserspeicher wurde über den Grad der Versiegelung und die Verdichtung definiert. Für diese beiden Einflüsse wurden Faktoren abgeleitet, um ihren Einfluss auf die nFK zu berechnen.

Tabelle 2: Zusammenfassung der verwendeten Landnutzungsklassen, deren Versiegelungsgrad und für die Berechnungen verwendeten Faktoren, ***1: Die Versiegelung dieser Strukturen wurde auf Basis von Satellitenbildern für jede einzelne Fläche separat bestimmt; S.L. = Anteil versiegelter Fläche.

No.	Verwendete Landnutzungsklassen	Versiegelung [%]	Faktor Versiegelung	Faktor Verdichtung
1	Sehr stark verdichtete urbane Struktur (Versiegelung > 80 %)	80	0,2	0,5
2	Stark verdichtete urbane Struktur (S.L. 50 - 80 %)	50	0,5	1
3	Mittelstark verdichtete urbane Struktur (S.L. 30 - 50 %)	30	0,7	1
4	Wenig verdichtete urbane Struktur (S.L. 10 - 30 %)	10	0,9	1
5	Sehr wenig verdichtete urbane Struktur (S.L. < 10 %)	0	1	1
6	Isolierte Strukturen (Bauernhöfe)	35	0,65	1
7	Industrie, Gewerbe, Öffentliche -, militärische - und private Flächen	50	0,5	1
8	Autobahnen, Schnellstraßen	70	0,3	0,5
9	Andere Straßen	70	0,3	0,5
10	Bahn und Bahngelände	70	0,3	0,5
11	Mülldeponie	97	0,03	1
12	Baustellen	97	0,03	1
13	Land ohne momentane Nutzung	***1	***1	1
14	Grüne urbane Strukturen	0	1	1
15	Sport- und Freizeitanlagen (inkl. Kleingärten)	30	0,7	1
16	Landwirtschaftliche Anbaufläche	0	1	1
17	Weiden	0	1	1
18	Wald	0	1	1
19	Krautvegetation	0	1	1
20	Wasser	0	1	1
21	Gebäudegrundfläche	100	0	1

⁹ Patches sind thematisch einheitliche Flächen, welche sich auf Grund ihrer Eigenschaften klar von der Umgebung abgrenzen lassen.

(a) Abschätzung der Versiegelung

Im Urban Atlas werden städtische Strukturen anhand ihres Versiegelungsgrades in fünf Klassen unterteilt (vergleiche Tabelle 2). Diese reichen von „sehr gering verdichtete urbane Struktur“ mit einem Versiegelungsgrad von <10 % bis hin zu „stark verdichtete urbane Struktur“ mit einem Versiegelungsgrad >80 %. In den Versiegelungsgrad einbezogen werden Gebäudegrundflächen, Parkplätze, Bürgersteige, Straßen und andere Formen der Versiegelungen. Für alle Flächen der Landnutzungsklasse „urbane Strukturen“ wurde für den Grad der Versiegelung der untere Wert des im Urban Atlas angegebenen Versiegelungsgrad verwendet, da die Gebäudegrundflächen aus OSM separat betrachtet werden. Für die Gebäudegrundflächen wurde ein Versiegelungsgrad von 100 % angenommen.

Um die Versiegelungsgrade der übrigen Landnutzungsklassen abzuschätzen, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Nach Berekamp & Pranzas (1990, zitiert nach Marzluff et al., 2008), ergeben sich folgende Versiegelungsgrade je Landnutzung: „Industrie & Gewerbe“ 50 – 100 %, (verwendeter Wert 50 %); „Parks“: 10 – 40 % (verwendeter Wert 30 %) und „Straßen“: 40 – 100 % (verwendeter Wert 70 %). Für „Industrie & Gewerbe“ wurde der untere Wert des angegebenen Bereiches verwendet, da auch hier Gebäudegrundflächen aus OSM berücksichtigt werden. Für die Landnutzungsklassen „Autobahnen, Schnellstraßen“, „Andere Straßen“ und „Bahn und Bahngelände“, welche in Abbildung 4 zu einer Klasse „Verkehr“ zusammengefasst wurden, wird 70 % Versiegelung angenommen, die aus der Sichtung von Orthophotos abgeleitet wurden. Ausgehend von dem oben genannten Literaturwert für Parks und der Sichtung von Orthophotos wird für die Landnutzungsklasse „Parks und Freizeitanlagen“ in Remscheid von einer Versiegelung von 30 % ausgegangen.

Für die Landnutzungsklassen „Mülldeponien“ und „Baustellen“ wird ein Versiegelungsgrad von 97 % angenommen, weil es auf unversiegelten Böden, die zudem nicht mit Vegetation bedeckt sind, zu einer Krustenbildung kommt, die den Boden beinahe vollständig versiegelt. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch das witterungsbedingte Einschlämmen von feinen Korngrößen und der Verdichtung durch Befahren und Begehen der Flächen. Solche Verdichtungseffekte können bei fehlender Vegetation nicht durch Pflanzen bzw. deren Wurzeln ausgeglichen werden (Marcotullio et al., 2008).

Der Versiegelungsgrad der Landnutzungsklasse „Isolierte Strukturen“ wurde auf Grundlage von digitalen Orthophotos¹⁰ mit einer räumlichen Auflösung von 0,1 m ermittelt. Bei einer visuellen Untersuchung dieser Landnutzungsklasse in Remscheid auf Basis der Orthophotos zeigte sich, dass es sich um Bauernhöfe handelt. Die Gesamtfläche dieser Bauernhöfe, ausgenommen der Häusergrundflächen, ist im Durchschnitt zu 35 % versiegelt. Die Landnutzungsklasse „Land ohne momentane Nutzung“ zeichnet sich durch eine uneinheitliche Versiegelung aus. Daher wurde für jedes Patch dieser Klasse die Versiegelung separat, ebenfalls auf Grundlage der oben genannten Orthophotos, abgeschätzt. Als unversiegelt definiert wurden die Landnutzungsklassen „Wald“, „Krautige Vegetation“, „Landwirtschaftliche Flächen“, „Grünland“, „Wasser“ und „Grüne urbane Strukturen“.

¹⁰ Diese Bilddaten stehen über ESRI als Grundkarte (Basemap) für Remscheid zur Verfügung. Sie stellen die Oberflächen vom 20.04.2016 dar.

(b) Abschätzung der Bodenverdichtung

Urbane Böden sind durch Bebauung, Versiegelung oder regelmäßiges Begehen und Befahren einer erhöhten Beanspruchung ausgesetzt, was zu einer Zunahme der Bodenverdichtung führt. Die nFK in der BFK wurde auf Basis einer mittleren Lagerungsdichte errechnet. Somit sind Verdichtungsunterschiede in der Bodenkarte nicht aufgelöst. Aber durch kontinuierliche Beanspruchung (z. B. Bebauung, Begehung) erhöht sich die Packungsdichte der Böden, wodurch sich das Porenvolumen reduziert. Im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Böden ist für urbane Böden eine um 50 % höhere Verdichtung typisch (Marcotullio et al., 2008). Die Verdichtung des Bodens reduziert direkt den für die Kühlfunktion wichtigen Porenraum (Bodenwasserspeicher). Für die stark beanspruchten und versiegelten Flächen der Landnutzungsklassen „sehr stark verdichtete urbane Struktur“, „Autobahnen, Schnellstraßen“, „andere Straßen“ und „Bahn und Bahngelände“ wird daher eine Verringerung des Porenvolumens von 50 % angenommen (vergleiche Tabelle 2).

Nachdem Faktoren für die Versiegelung und die Verdichtung je Landnutzungsklasse abgeleitet wurden, wird das Volumen des Bodenwasserspeichers für jedes Patch errechnet. Ausgegangen wird von der nFK unter Berücksichtigung aller in Tabelle 2 zusammengetragenen reduzierenden Faktoren. Das Bodenkühlpotenzial wird für jedes Patch berechnet nach Formel [1].

$$\mathbf{BP = nFK * fS * fD} \quad [1]$$

mit BP = Bodenkühlpotenzial, nFK = nutzbare Feldkapazität (laut bodenkundlicher Kartieranleitung), fS = Versiegelungsfaktor und fD = Verdichtungsfaktor.

Eine Sonderstellung nehmen freie Wasserflächen und damit Wasserkörper wie Seen oder Flüsse ein. Die von Wasserkörpern ausgehende Kühlung hängt von einer Vielzahl von Faktoren wie der Saisonalität, dem Tagesgang, der Größe, Form und Art des Gewässers, dem Breitengrad der Lokalität, der Windgeschwindigkeit sowie der Beschaffenheit des Ufers ab (Amani-Beni et al., 2018; Yu et al., 2020). Die von Wasserkörpern ausgehende Kühlung kann daher nicht mit dem hier vorgestellten Ansatz abgeschätzt werden. Deshalb wurden diese Flächen in der Karte gesondert als „Wasserflächen“ gekennzeichnet; sie gehen in keine weiteren Berechnungen ein.

2.4. Ergebnisse

Mit dem beschriebenen Verfahren wurde eine Karte erstellt, welche die räumliche Verteilung der nFK in Remscheid wiedergibt und dabei die Faktoren Versiegelung und Verdichtung berücksichtigt. In der Karte der Bodenkühlpotenziale (Abbildung 6) wird jedem Patch in Abhängigkeit des errechneten Wertes eine Farbe zwischen grün (hohe Bodenkühlfunktion bzw. ein hoher Wert) und rot (niedrige Bodenkühlfunktion bzw. ein niedriger Wert) zugeordnet.

In diesem Abschnitt wird die Karte im Gesamten und für einzelne Stadtbereiche vorgestellt. Die Karte von ganz Remscheid und einzelne Detailausschnitte sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 zu sehen.

Die Werte der nutzbaren Feldkapazität liegen im gesamten Stadtbereich zwischen 0 (= die Fläche kann kein Wasser speichern) und 177 l/m²60cm.

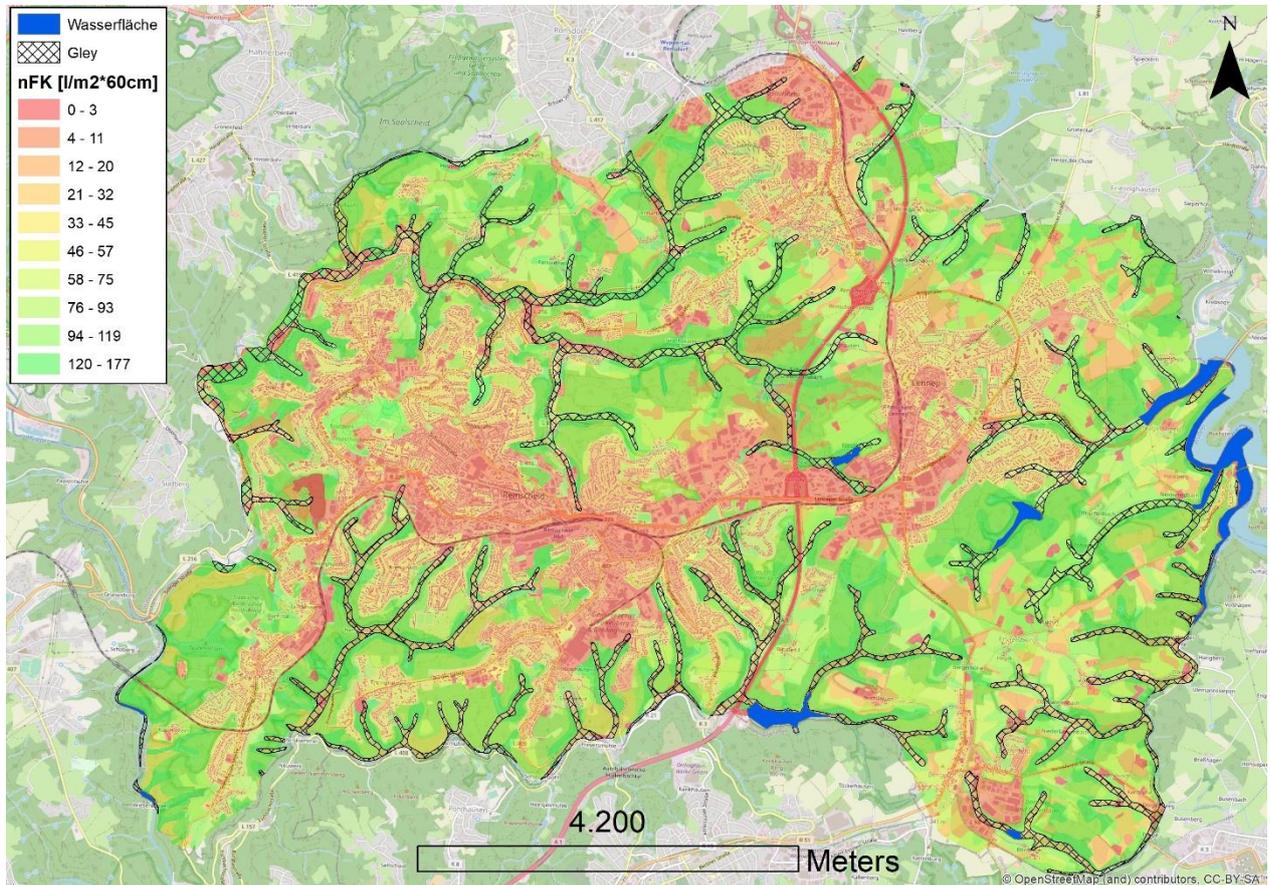


Abbildung 6: BFK für den gesamten Raum Remscheids.

Betrachten wir die Karte im Gesamten wird deutlich, dass es drei städtische Bereiche gibt, die sich durch geringe Kühlpotenziale von der Umgebung abheben. Diese Bereiche sind (1) der innerstädtische Bereich Remscheids, (2) Lennep und (3) Lüttringhausen. Zurückzuführen ist das auf die höhere Verdichtung und Versiegelung in diesen Bereichen. Umschlossen sind diese Bereiche von kaum versiegelten Flächen, welchen dadurch eine höhere potenzielle Kühlfunktion zugewiesen wurde.

Im Folgenden werden drei Bereiche genauer betrachtet: (a) der stark verdichtete und versiegelte Innenstadtbereich (Abbildung 7, oben links und oben rechts); (b) repräsentativ für einen weniger stark verdichteten und versiegelten städtischen Bereich, welcher sich sowohl in Lennep als auch in Lüttringhausen findet, wird Lennep genauer betrachtet (Abbildung 7, unten rechts); anschließend wird das (c) Industriegebiet in Bornefeld untersucht (unten links).

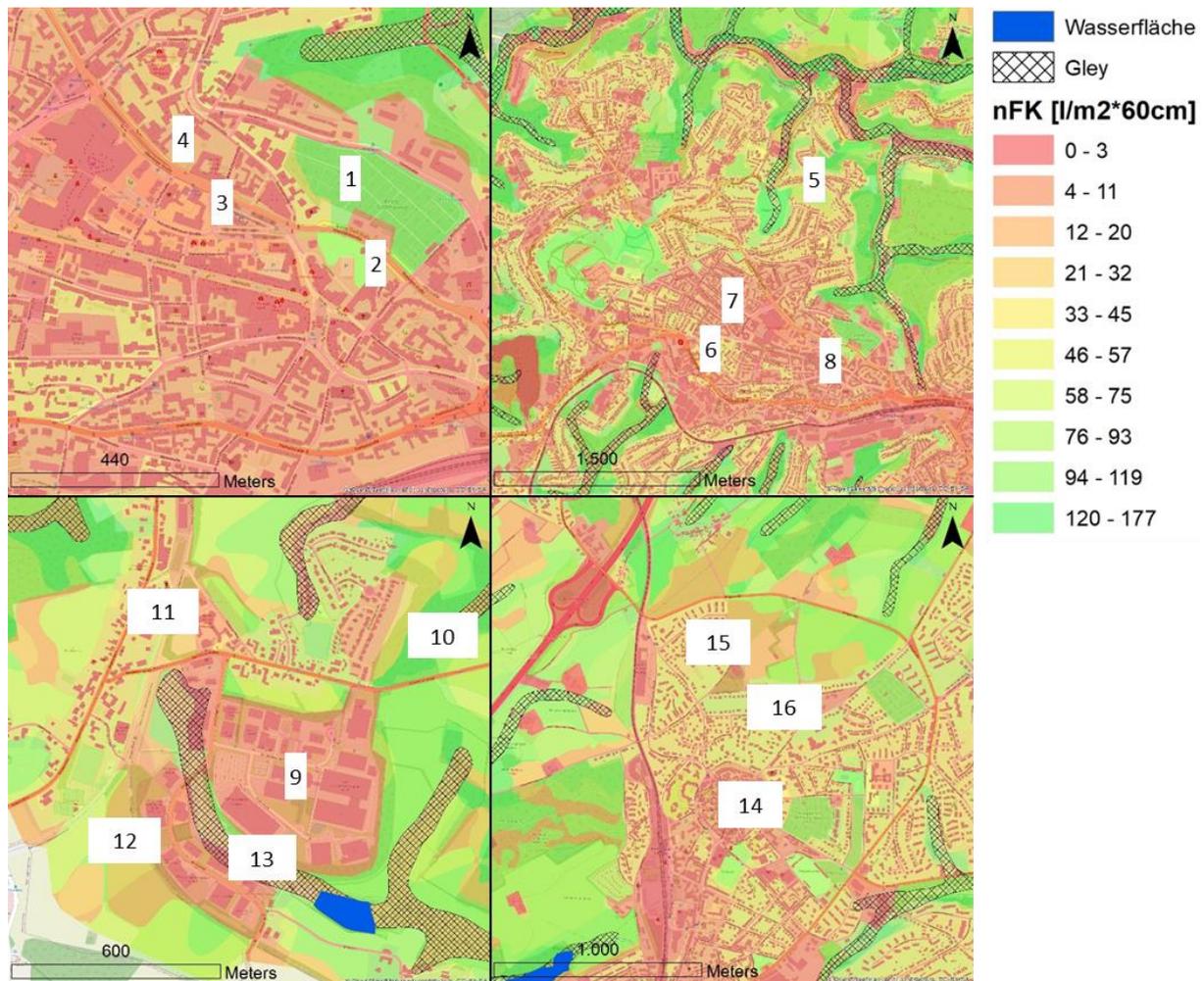


Abbildung 7: Detailsichten der BFK; oben links: Innenstadtbereich-CloseUp; oben rechts: Innenstadtbereich; unten links: Industriegebiet; unten rechts: Lennep, Grundkarte: OpenStreetMap.

2.4.1. Innenstadt

Gerade der innerstädtische Bereich Remscheids ist von versiegelten und verdichteten Flächen geprägt. Einige Bereiche wurden in Abbildung 7 mit Nummern markiert und werden im Folgenden genauer besprochen.

Aus der Karte geht hervor, dass Kleingartenanlagen (siehe Abbildung 7; oben rechts; Nr. 5) Bereiche mit höheren Bodenkühlpotenzialen sind. Dies ist auf die geringe Versiegelung und Verdichtung dieser Flächen zurückzuführen. Hier nicht einbezogen ist, dass Kleingartenanlagen zudem Flächen sind, die durch ihre Bewirtschaftung von den Nutzern auch in trockenen Perioden vermutlich bewässert werden. Durch die regelmäßige Bewirtschaftung wird zudem der Boden gelockert, wodurch eine geringere Verdichtung vermutet werden kann. Es ist also davon auszugehen, dass die tatsächliche Kühlwirkung von Kleingärten in der BFK unterschätzt wird.

Bereiche mittleren Bodenkühlpotenzials finden sich dort, wo Einfamilienhäuser und die dazugehörigen Gärten die Flächen prägen (siehe Abbildung 7; oben rechts; Nr. 6). Die höhere Bodenkühlfunktion ergibt sich aus der geringeren Versiegelung und Verdichtung.

Neben diesen entlastenden Bereichen gibt es stark versiegelte Bereiche (siehe Abbildung 7; oben rechts; Nr.7), bei denen von einer erhöhten Verdichtung des Untergrundes auszugehen ist. Das Bodenkühlpotenzial ist hier besonders gering, da Wasser durch Versiegelung und fehlenden Bewuchs auf großen Teilen dieser Flächen weder infiltrieren noch transpirieren kann. Trotzdem wird Folgendes unterschieden: Flächen, die durch Häuser oder Straßen voll versiegelt sind, haben einen nFK-Wert von 0. Flächen, die nicht durch ein Gebäude versiegelt sind, sich aber in der Landnutzungs-kategorie „stark verdichtete urbane Strukturen“ befinden, wird ein geringes Potenzial zugeordnet, da von einem unversiegelten Anteil von 20 % ausgegangen wird (s.o.). Damit wird gewährleistet, dass unversiegelte Flächen, wie verkehrsbegleitende Grünflächen oder Hinterhöfe, welche kleiner als 0,25 ha sind und daher nicht vom UrbanAtlas erfasst wurden, Berücksichtigung finden. Dennoch bleibt es ein Manko der Karte, dass solche Strukturen nicht genau lokalisiert werden können und daher ihr Flächenanteil auf der Gesamtfläche gemittelt wird.

Umschlossen von diesen stark verdichteten urbanen Strukturen gibt es unversiegelte Bereiche, deren Größe 0,25 ha übersteigt und die daher als eigenes Patch in der BFK dargestellt werden. Ein solcher Bereich ist in Abbildung 7 (oben rechts) mit der Nummer 4 markiert und wird in Abbildung 7 (oben links) im Detail abgebildet. Abgebildet ist der Innenstadtbereich rund um den Friedhof (Abbildung 7; oben links; Nr. 1), den Bökerspark (Abbildung 7; oben links; Nr. 2), den Friedrich-Ebert-Platz (Abbildung 7; oben links; Nr. 3) und einen Parkplatz (Abbildung 7; oben links; Nr. 4).

Die BFK zeigt deutlich, dass der Friedhof und der Bökerspark einen größeren potenziellen Wasserspeicher haben als der Friedrich-Ebert-Platz und der Parkplatz. Die ersten beiden Standorte sind somit potenziell feuchtere und damit kühlende Standorte.

2.4.2. Lennep

Lennep ist neben dem Innenstadtbereich ein weiterer verdichteter Bereich innerhalb Remscheids. Abbildung 7 (unten rechts) zeigt Lennep. Vier Bereiche sind mit Nummern markiert. Im Vergleich zum Innenstadtbereich sind Lenneps städtische Strukturen weniger stark verdichtet. Doch auch hier gibt es stark versiegelte und verdichtete Bereiche (Abbildung 7; unten rechts; Nr. 15) mit geringerem potenziellen Bodenkühlpotenzial. Die weniger stark verdichteten und versiegelten Bereiche (Abbildung 7; unten rechts; Nr. 16 und Nr. 17) sind durch eine Bebauung mit Einfamilienhäusern geprägt und weisen im Vergleich zur Fläche Nr. 15 höhere Werte für die potenzielle Bodenkühlfunktion auf.

Die unterschiedlichen Werte in der BFK der Flächen Nr. 16 und Nr. 17 in Abbildung 7 (unten rechts) sind nicht auf die Landnutzung, sondern auf unterschiedliche nFK-Werte in der Bodenkarte zurückzuführen. Die Unterschiede in den nFK-Werten ergeben sich nicht aus den Bodentypen, denn der gesamte Bereich ist dem Bodentyp Braunerde zuzuordnen. Jedoch

schwankt die effektive Durchwurzelungstiefe: Während bei der Nr. 16 eine effektive Durchwurzelungstiefe von 0,7 m vorherrscht, findet sich laut Bodenkarte bei der Nr. 17 eine Durchwurzelungstiefe von 1,1 m. Dadurch nimmt die BFK einen höheren Wert an der Nr. 17 und einen niedrigeren Wert an der Nr. 16 an. Hier zeigt sich also der Einfluss der effektiven Durchwurzelungstiefe auf die nFK. Wodurch die geringe Durchwurzelungstiefe verursacht wird, kann mit der vorhandenen Datengrundlage nicht geklärt werden.

2.4.3. Industriegebiet in Bornefeld

Das Industriegebiet in Bornefeld befindet sich im südöstlichen Bereich Remscheids. Abbildung 7 (unten links) zeigt einen Kartenausschnitt im Bereich dieses Industriegebietes. Dem dicht bebauten Bereich des Industriegebietes wird ein geringes Bodenkühlpotenzial zugewiesen (Abbildung 7; unten links, Nr.9). Durch die OSM-Grundkarte wird deutlich, dass der größte Teil des Industriegebietes mit Gebäuden, Straßen und Parkplätzen bebaut ist. Kleinräumige unversiegelte Flächen, die diese Struktur aufbrechen, können in der BFK nicht dargestellt werden. In der Mehrheit handelt es sich dabei um künstlich angelegte verkehrsbegleitende Grünflächen. Diese Flächen sind teilweise mit Bäumen und Sträuchern bepflanzt. Ihr Potenzial zur Kühlung kann mit der räumlichen und thematischen Auflösung der BFK nicht erfasst werden.

Das Umland des Industriegebietes ist hinsichtlich seiner Landnutzung heterogen. Neben einem Waldstück mit einem hohen potenziellen Kühlpotenzial (Abbildung 7; unten links Nr.10), befindet sich hier auch ein locker bebautes Wohngebiet (Abbildung 7; unten links; Nr.11) mit einem mittleren potenziellen Kühlpotenzial und landwirtschaftlich geprägte Flächen (Abbildung 7; unten links; Nr. 12), deren Kühlpotenzial uneinheitlich ist. Letzteres ist auch hier auf eine heterogene Durchwurzelungstiefe zurückzuführen.

Neben dem in Remscheid vorherrschenden Bodentyp „Braunerde“ findet sich in diesem Bereich der Stadt auch ein geringer Flächenanteil des Bodentyps „Gley“. Dem Bereich, in welchem sich der Gley befindet (Abbildung 7, unten links, Nr. 11), wurde ein mittleres Bodenkühlpotenzial zugeordnet. Dies ist auf die geringe effektive Durchwurzelungstiefe von durchschnittlich 0,2 m zurückzuführen. Der Gley ist ein von Grundwasser geprägter Bodentyp. Daher ist davon auszugehen, dass die effektive Durchwurzelungstiefe durch anstehendes Grundwasser nach unten schon in geringen Tiefen abgegrenzt wird (vergleiche Tabelle 2; Beschreibung „Gley“). Ab welcher Tiefe das Grundwasser hier genau ansteht, kann auf Grundlage der Bodenkarte nicht bestimmt werden. Es ist jedoch wichtig zu diskutieren, wie die Kühlungsfunktion von Bereichen zu ermitteln ist, in denen die effektive Durchwurzelungstiefe schon in geringen Tiefen durch das Grundwasser begrenzt wird. In der BFK, die sich auf die Verteilung der nFK beschränkt, ist solchen Standorten aufgrund der geringeren effektiven Durchwurzelungstiefe eine geringe Kühlungsfunktion zugewiesen worden. Es sind aber gerade diese feuchten Standorte, an denen eine hohe Bodenkühlfunktion wahrscheinlich ist. Die Kühlungsfunktion von Standorten, an denen durch Grundwasser oder Staunässe geprägte Böden auftreten, sollte in folgenden Untersuchungen genauer betrachtet werden. Daher sind diese Flächen schraffiert in der Karte dargestellt.

2.4.4. Zusammenfassung der Auswertung der Bodenkühlfunktionskarte

Die BFK stellt die räumliche Verteilung der potenziellen Bodenkühlfunktion innerhalb Remscheids dar. Faktoren, die bei der Erarbeitung berücksichtigt wurden, sind (a) die nFK, (b) die Versiegelung von Flächen und (c) die Verdichtung von stark beanspruchten Flächen. Die BFK identifiziert folgende Gebiete, in welchen die Bodenkühlfunktion von Versiegelung und Verdichtung reduziert wurde:

- Der stark von Verdichtung und Versiegelung geprägte Innenstadtbereich. Der Hauptfaktor, der hier die räumliche Verteilung der Bodenkühlfunktion bestimmt, ist die urbane Landnutzung. Versiegelung und Verdichtung haben hier einen sehr starken Einfluss auf die Werte der BFK.
- Weniger dicht bebaute Flächen, die von freistehenden Häusern und Gärten geprägt sind. Solche Flächen finden sich unter anderem in Lennep und Lüttringhausen. Sie sind durch urbane Landnutzung geprägt, jedoch weniger stark als die zuvor beschriebenen Flächen im Innenstadtbereich. Auf diesen weniger stark verdichteten Siedlungsflächen bestimmen neben der Landnutzung auch der Bodentyp und die effektive Durchwurzelungstiefe die Bodenkühlfunktion.
- Die Flächen im Industriegebiet Bornefeld zeichnen sich durch starke Versiegelung aus. Der Einfluss von verkehrsbegleitenden Grünflächen wird in der Karte nicht aufgelöst.

Neben diesen stark beanspruchten Flächen konnten Flächen mit einem hohen potenziellen Bodenkühlpotenzial identifiziert werden:

- Kleingartenanlagen im und am Innenstadtbereich;
- Parks und Friedhöfe im stark verdichteten Innenstadtbereich;
- nicht urbane Flächen, die durch die Landnutzungsklassen Wald und Weiden geprägt sind. Diesen Flächen wird in der Karte ein teils hohes Bodenkühlpotenzial zugewiesen, was im Wesentlichen vom Bodentyp und der effektiven Durchwurzelungstiefe abhängt und auf das Fehlen von Verdichtung und Versiegelung zurückzuführen ist. In der Gesamtfläche von Remscheid machen diese Flächen über 50 % aus.

Weiterhin konnten Flächen aufgezeigt werden, deren Bedeutung für das Stadtklima auf Basis der BFK nicht geklärt werden konnte, bei denen aber von einem hohen Kühlpotenzial ausgegangen werden kann. Das sind zum einen Flächen des Bodentyps Auengley, Braunerde-Pseudogley, Gley, Gley-Braunerde, Gley-Vega und Nassgley. Diese Flächen machen insgesamt ca. 10 % der Gesamtfläche Remscheids aus. Andererseits löst die BFK keine kleinräumigen, z.B. verkehrsbegleitenden, Grünflächen im Innenstadtbereich und in Industriegebieten auf. Deren Kühlwirkung ist aber vermutlich zu vernachlässigen.

3. Berechnung von Speicherfüllständen

Die BFK gibt die räumliche Verteilung der nFK wieder (vergleiche Kapitel 1). Damit wird das Wasserspeichervolumen der obersten durchwurzelten Bodenschicht abgebildet. In diesem Kapitel nutzen wir diese Eigenschaft der BFK, um die Wassersättigung der beschriebenen Bodenzone über zwei trockene Jahre hinweg (2018 und 2019) zu untersuchen.

3.1. Theoretischer Hintergrund und Eingangsdaten

Wasser wird dem System „Boden“ sowohl über den Niederschlag als auch durch kapillaren Grundwasseraufstieg zugefügt. Da wir die oberste Bodenzone betrachten und keine Daten über die Grundwasserzufuhr vorliegen, konzentrieren wir uns in der hier vorgestellten Untersuchung auf den Anteil an Wasser, der dem Boden über Niederschlag zugeführt wird. Vernachlässigt wird der Anteil am Niederschlag, der den betrachteten Bodenwasserspeicher in Form von Abflüssen (Oberflächenabfluss und Abfluss in tieferen Schichten) wieder verlässt.

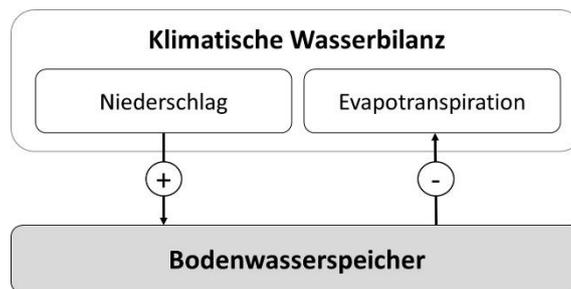


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der klimatischen Wasserbilanz (eigene Darstellung).

Ein Teil der Niederschläge geht dem System „Boden“ über die bereits in Kapitel 2.1. beschriebene Evapotranspiration (EP) verloren. Die Differenz aus Niederschlag und der Evapotranspiration, also der Anteil des Niederschlages, der dem System „Boden“ netto zugefügt wird, wird als klimatische Wasserbilanz bezeichnet (siehe Abbildung 8). Beide Größen, Niederschlag und Evapotranspiration, stehen als Rasterdatensätze mit einer räumlichen Auflösung von 1 km und einer zeitlichen Auflösung von einem Monat über das Datenportal Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung. Auf dieser Grundlage wurde die klimatische Wasserbilanz für jeden Monat zwischen April 2018 und September 2019 abgeschätzt.

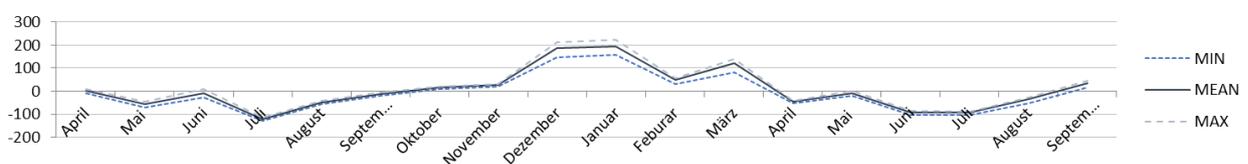


Abbildung 9: Monatliche klimatische Wasserbilanz für den Zeitraum zwischen April 2018 und September 2019

In Abbildung 9 ist die klimatische Wasserbilanz als Monatssumme in mm angegeben. Die Werte wurden aus den Rasterdaten mit einer Auflösung von 1 km zellenweise errechnet. Der höchste Wert (Abbildung 9; MAX) und der niedrigste Wert (Abbildung 9; MIN) sowie der durchschnittliche Wert (Abbildung 9; MEAN) wurden für den Gesamttraum Remscheid ermittelt.

Eine positive Wasserbilanz bedeutet, dass mehr Niederschlag fällt, als Wasser durch ET verdunstet. Dem System Boden wird Wasser über den Niederschlag zugefügt, der Bodenwasserspeicher füllt sich. Wasser, das nicht mehr von dem befüllten Bodenwasserspeicher aufgenommen wird, fließt als Oberflächenabfluss oder in tieferen Schichten ab. Solche Zustände finden sich vor allem in den Wintermonaten. Ist die Wasserbilanz negativ, wird mehr Wasser verdunstet, als durch Niederschlag aufgefüllt wird. Dem System Boden wird Wasser über ET entzogen, der Bodenwasserspeicher leert sich. Das geschieht insbesondere in den Sommermonaten und kann je nach Dauer und Bodeneigenschaften Wasserstress bei Pflanzen und eine reduzierte Bodenkühlfunktion verursachen.

3.2. Methodik zur Abschätzung der Speicherfüllstände

Um die Befüllung des Bodenwasserspeichers zu ermitteln, wird dieser Speicher als potenziell mit Wasser befüllbares Volumen je Quadratmeter betrachtet. Die Speicherfüllstände jedes Quadratmeters werden zwischen April 2018 und September 2019 ermittelt, indem dem spezifischen Füllvolumen die Menge Wasser zu- oder abgeführt wird, die über die klimatische Wasserbilanz für den jeweiligen Monat definiert wurde. Für den Ausgangspunkt, April 2018, wird angenommen, dass die Bodenwasserspeicher vollständig gefüllt sind. Diese Annahme beruht auf dem sehr feuchten Vorjahr 2017.

3.3. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 10 fasst die Ergebnisse dieser Betrachtungen zusammen. Die Füllstände wurden in drei Klassen eingeteilt: (1) 70-100% Füllung: kein Wasserstress für Pflanzen, (2) 40-70%: leichter Wasserstress, (3) 0-40%: erhöhter Wasserstress. Die Bodenwasserspeicher leeren sich von April 2018 bis Juli 2018. Zwischen Juli 2018 und September 2018 bleiben die Bodenwasserspeicher leer. Erst im Oktober 2018 füllen sich die Bodenwasserspeicher wieder bis zum Dezember 2018 vollständig auf, um sich im Jahr 2019 bereits im April wieder zu leeren und bis zum Juni 2019 vollständig entleert zu sein. Die Auffüllung der Bodenwasserspeicher beginnt 2019 erst wieder im September.

Eine Analyse der Füllstände für das Jahr 2000, ein Jahr mit durchschnittlichen Niederschlagsmengen für Remscheid, ergab, dass keine Wasserknappheit innerhalb Remscheids auftritt. Im Vergleich hierzu zeigen die klimatische Wasserbilanz und die

Ergebnisse der Berechnung der Speicherfüllstände der Jahre 2018 und 2019, wie trocken diese Jahre waren und welche potenzielle Belastung sich daraus für die Vegetation und für die Kühlfunktion der Böden ergab. In beiden Jahren konnten urbane Böden die Intensität von Hitzewellen in den Sommermonaten wohl weniger abschwächen, als wenn sie ausreichend mit Wasser versorgt gewesen wären. Es wird auch deutlich, wie ein trockenes Vorjahr die Auswirkungen eines trockenen Folgejahres potenzieren kann, indem die Bodenspeicher bereits früher im Jahr geleert sind.

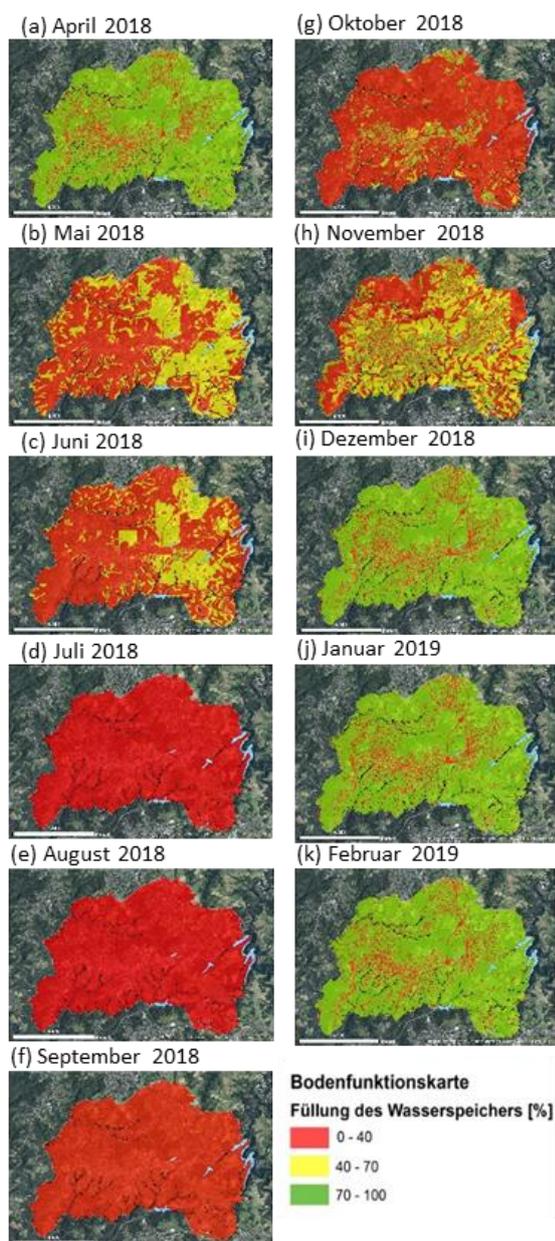


Abbildung 10: Errechnete Speicherfüllstände für die Stadt Remscheid für den Zeitraum von April 2018 bis Februar 2019.

Wasserstress für die Pflanzen eher überschätzt wird. Einmal bezieht sich der abgeleitete Wasserstress der Vegetation auf die Kraut- und Strauchschicht. Insbesondere Bäume haben tiefer reichende Wurzeln und können während Trockenperioden von tieferliegenden Wasserreservoirs profitieren. Hinzu kommt, dass die Befüllung durch Niederschlag und die Entleerung durch ET je Monat gerechnet und damit stark vereinfacht wurde. Die Füllmenge

Räumliche Unterschiede der Füllstände innerhalb Remscheids sind auf unterschiedlich große Bodenwasserspeicher zurückzuführen: Besonders in verdichteten städtischen Bereichen entleeren sich die hier kleineren Bodenwasserspeicher während einer Trockenperiode rascher, wodurch Pflanzen potenziell eher Wasserstress ausgesetzt sind. Es ist zu erwarten, dass Böden in diesen Bereichen bereits früh im Jahr nicht mehr die volle Kühlleistung erbringen können. Auch wenn sich diese kleinen Speicher schneller wieder füllen, sobald es Niederschläge gibt, ist zu beachten, dass die Vegetation, hat sie den Welkepunkt überschritten, trotz erneuter Wasserzufuhr nicht mehr zur ursprünglichen Vitalität zurückkehren wird und damit die Kühlleistung, erbracht durch die Transpiration, verringert bleiben wird. Bereiche mit einem größeren potenziellen Bodenwasserspeicher entleeren sich langsamer. Hier können Pflanzen, wenn es keinen Niederschlag gibt, länger aus dem Speicher heraus mit Wasser versorgt werden, womit Wasserstress erst zu einem späteren Zeitpunkt auftritt.

Die Analyse der Füllstände hat jedoch Grenzen, die bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Diese Grenzen resultieren aus Vereinfachungen, die notwendig waren, um die Analyse für ganz Remscheid erstellen zu können und führen dazu, dass die Befüllung der Bodenwasserspeicher eher unterschätzt und der

des Bodenspeichers ist begrenzt. Wird er bei der Modellierung dieses Systems einmalig mit der Niederschlagssumme eines Monats befüllt, kann der Teil der Niederschlagssumme, der die Füllmenge des Speichers überschreitet, für diesen Monat nicht mehr berücksichtigt werden. Ein weiterer Punkt ist die fehlende Einbeziehung des Grundwassers. Doch gerade an Standorten, an denen das Grundwasser hoch ansteht, können Pflanzen während Trockenperioden von diesem profitieren. Es finden somit auch hier die bereits im Kapitel 2 diskutierten grundwassergeprägten Gley-Böden keine Berücksichtigung.

4. Plausibilisierung der Karte der potenziellen Bodenkühlfunktion

4.1. Plausibilisierung der Bodenverdichtung

Die Verdichtung von Böden verringert deren potenzielles Wasserspeichervolumen und hemmt ihre Kühlleistung. Urbane und stark beanspruchte Böden sind stärker verdichtet als bewirtschaftete Böden (z.B. Ackerflächen) oder weniger beanspruchte Flächen (z.B. Grünland). Wie sehr sich ein Boden verdichtet, hängt weiterhin von der Bodenart, der Scherfestigkeit, der Bodenfeuchte, dem Humusgehalt, dem Steinanteil, dem Fein- und Grobporenanteil und der Dichte des Festsubstrates ab (Weyer & Boeddinghaus, 2016). Da die Vielzahl an Parametern die genaue Abschätzung der Bodenverdichtung erschwert, wurde für die Ableitung der BFK ein Wert aus der Literatur von 50% Verdichtung für stärker verdichtete Flächen (Marcotullio et al., 2008) angenommen (siehe Tabelle 2).

Um diesen Wert auf seine Plausibilität zu prüfen, wurde am 19. und 21. August 2020 auf neun Flächen innerhalb Remscheids (siehe Tabelle 3) die Verdichtung des Oberbodens mit einem Handpenetrometer gemessen.

Tabelle 3: Ergebnisse der lokalen Messungen der Bodenfeuchte und Bodenverdichtung an 9 Standorten in Remscheid (19. – 21.08.2021).

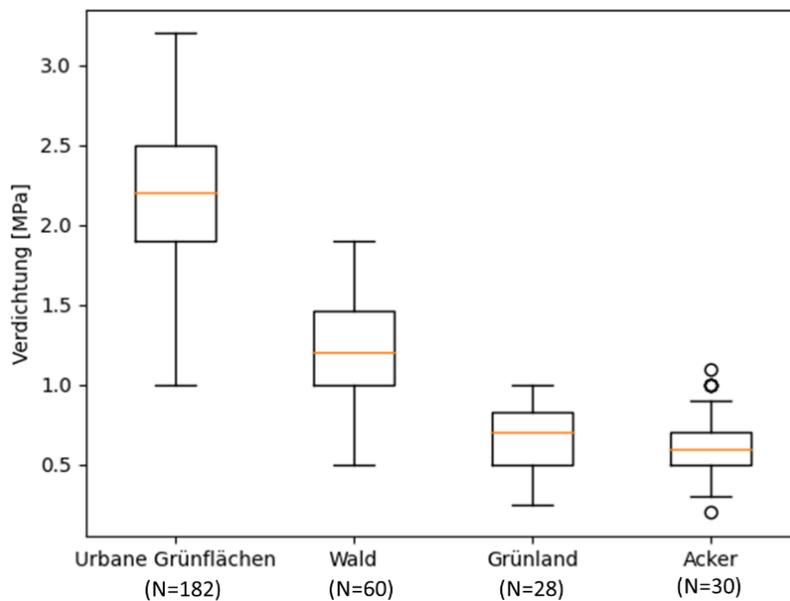
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Urbane Grünfläche	Urbane Grünfläche	Verkehrsbegleitende Grünfläche	Urbane Grünfläche	Wald	Wald	Urbane Grünfläche	Grünland	Acker
Uhrzeit	11:15	12:30	13:00	12:10	17:15	16:47	12:00	13:15	12:45
Bodenfeuchte (MEAN)	16,9	20,9	11,0	10,4	6,7	9,6	18,3	15,2	17,5
Bodenverdichtung (MEAN) [MPa]	2,1	2,2	2,2	2,2	1,0	1,3	2,3	0,7	0,6
	(N=29)	(N=30)	(N=63)	(N=30)	(N=30)	(N=30)	(N=30)	(N=28)	(N=30)
SD	0,5	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,2	0,2



Abbildung 11: Überblick der Standorte, an denen zwischen dem 19.08.2020 und dem 20.08.2020 Messungen der Bodenverdichtung durchgeführt wurden.

Mit einem Handpenetrometer wird der vertikale Eindringwiderstand gemessen. Je höher der Eindringwiderstand, desto dichter ist der Boden gelagert. Da die letztliche Lagerungsdichte

des Bodens von einer Vielzahl an Parametern abhängt (siehe oben), werden Messungen mit Handpenetrometern hauptsächlich für vergleichende Messungen von Böden verwendet. So kann dieselbe Fläche vor oder nach einer Beanspruchung, d.h. einer potenziellen Verdichtung, bemessen werden. Oder es können durch Messungen entlang eines Transekts Unterschiede der Lagerungsdichte erkannt werden. Wir nutzten das Handpenetrometer, um Flächen unterschiedlicher Landnutzung hinsichtlich der Dichte der obersten Bodenschicht zu vergleichen.



Gemessen wurde auf vier urbanen Grünflächen (Abbildung 11; links; Flächen 1, 2, 3 und 7). Diese Flächen liegen im dichtbesiedelten Innenstadtbereich, sind selbst aber nicht bebaut oder versiegelt. Weiterhin wurde auf einer Grünlandfläche (Abbildung 11; rechts; Fläche 8) und einem Maisfeld (Abbildung 11; oben-rechts; Fläche 9) sowie auf zwei Waldflächen (Abbildung 9; links; Flächen 5 & 6) gemessen.

Abbildung 12: Für vier Landnutzungsclassen gemittelte Verdichtungswerte; alle Werte basieren auf den Werten aus Abbildung 9, mit N ist die Gesamtzahl der Messpunkte je Klasse benannt.

Da die Lagerungsdichte sehr kleinräumigen Variationen unterliegt, wurden je Fläche mehrere Messungen von zwei Personen durchgeführt, um daraus einen Mittelwert für die jeweilige Fläche abzuleiten. Die Ergebnisse der Messungen finden sich in Tabelle 3. Es zeigt sich, dass auf Flächen gleicher oder ähnlicher Landnutzung ähnliche Verdichtungswerte gemessen wurden.

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Verdichtungsmessungen als Boxplot. Hierfür wurden die Verdichtungswerte für die vier vorkommenden Landnutzungsclassen zusammengefasst. Der Median für jede Landnutzung zeigt, dass auf urbanen Grünflächen die höchsten Verdichtungswerte und auf der Ackerfläche die geringsten Verdichtungswerte gemessen wurden. Die Verdichtung der obersten Bodenschicht auf urbanen Grünflächen ist ca. zwei- bis dreimal so hoch wie auf Flächen mit anderen Landnutzungen. Die Messungen stützen somit den Literaturwert von einer 50 % höherer Verdichtung von beanspruchten Flächen.

4.2. Plausibilisierung der räumlichen Verteilung von Bodenkühlpotenzialen

Um die räumliche Verteilung der Bodenkühlpotenziale in der BFK auf ihre Plausibilisierung zu prüfen, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse von lokalen Messungen der Bodenfeuchte und mobilen Temperaturmessungen in Remscheid sowie eine Untersuchung der Pflanzenvitalität über eine Hitzeperiode hinweg vorgestellt. Ziel ist es, die theoretisch abgeleiteten Werte mit gemessenen Werten abzugleichen.

4.2.1. Messungen der Bodenfeuchte

An vier Standorten in der Remscheider Innenstadt wurden im Sommer 2019 Messungen der Bodenfeuchte mit einer Bodenfeuchtesonde durchgeführt. Gemessen wurde auf dem Friedhof (Abbildung 7; oben links, Nr. 1), im Bökerspark (Abbildung 7; oben links, Nr. 2), auf dem Friedrich-Ebert-Platz (Abbildung 7; oben links, Nr. 3) und auf einem Parkplatz (Abbildung 7; oben links, Nr. 4). Nach der BFK haben der Friedhof und der Bökerspark eine hohe potenzielle Kühlfunktion und hohe nFK-Werte. Der Parkplatz und der Friedrich-Ebert-Platz haben eine geringere potenzielle Kühlfunktion und niedrigere nFK-Werte.

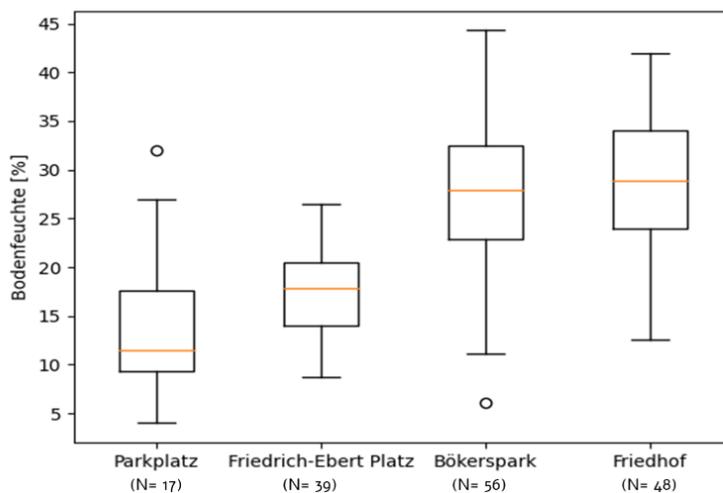


Abbildung 13: Durchschnittliche Bodenfeuchte von vier Standorten in der Innenstadt von Remscheid. Die Daten wurden am 15.05.2019 aufgenommen.

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Messungen als Box-Plot. Bei allen Standorten, bis auf den Friedrich-Ebert-Platz, streuen die Messwerte stark. Dies liegt an der heterogenen Verteilung der Bodenfeuchte über die Messflächen hinweg, welcher in kleinräumigen Unterschieden der obersten Bodenzone begründet liegt. Ursachen hierfür sind zum Beispiel

kleine Aufschüttungen und kleine Mulden oder Unterschiede in der Vegetation. Für den Bökerspark und den Friedhof gilt daher: Je größer die Untersuchungsfläche war und je mehr Messpunkte für diese Fläche aufgenommen wurden, desto größer fällt die Streuung aus. Für den Parkplatz wurden mit 17 Messungen am wenigsten Messpunkte aufgenommen, weil zum einen die Gesamtfläche des Parkplatzes gering ist und zudem der Boden hier teils so stark verdichtet war, dass keine Messungen vorgenommen werden konnten. Diese extreme Verdichtung macht diesen Standort allgemein zu einem sehr trockenen Standort, an dem sich nach Regenfällen jedoch auch oberflächlich Wasser staut und nicht versickern kann.

Die Potenzialunterschiede, die sich in der BFK zeigten, werden durch den Median der Messergebnisse an den vier Standorten bestätigt (vgl. Abb. 13): Auf dem Friedhof und im Bökerspark wurden im Durchschnitt (hier: Median) höhere Bodenfeuchtwerte aufgenommen als auf dem Parkplatz und dem Friedrich-Ebert-Platz. Der Friedhof und der Bökerspark sind somit tatsächlich feuchter als die verkehrsbegleitende Grünfläche des Friedrich-Ebert-Platzes und des Parkplatzes. Das untermauert die Annahme, dass weniger verdichtete, kaum versiegelte und stattdessen mit Vegetation bewachsene Standorte einen potenziell größeren Bodenwasserspeicher aufweisen und potenziell mehr Wasser für ET und damit zur Kühlung zur Verfügung stellen.

4.2.2. Auswertung der Pflanzenvitalität mithilfe des NDVI

In diesem Abschnitt wird die Plausibilität der BFK durch eine Analyse des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) überprüft. Hierzu wird zuerst der nötige theoretische Hintergrund erklärt. Die Daten, die in diese Analyse eingegangen sind, werden ebenso vorgestellt wie die zur Auswertung verwendete Methodik. Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchung präsentiert.

Eine Analyse des NDVI wird auf Basis von Satellitenbildern durchgeführt. Jedes Satellitenbild wird als Rasterdatensatz bestehend aus verschiedenen Spektralbändern geliefert. Jedes Spektralband enthält Informationen über einen bestimmten Spektralbereich. Der NDVI ist ein Index, der aus den spektralen Bändern „Rot“ und „Nahes Infrarot“ nach der folgenden Formel abgeleitet wird:

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R}) \quad [2]$$

mit IR = Pixelwerte vom Infrarotband und R = Pixelwerte vom roten Band

Der NDVI kann verwendet werden, um die Vitalität von Pflanzen abzuschätzen: Eine nicht gestresste Pflanze reflektiert wenig Licht im roten Spektralbereich, jedoch mehr Licht im NIR. Eine gestresste Pflanze hingegen reflektiert mehr Licht im roten Spektralbereich (die Blätter werden rot bzw. braun) und weniger Licht im NIR. Für eine solche Untersuchung wird die Entwicklung des NDVI auf einer Fläche untersucht. Wie eine Momentaufnahme des NDVI für eine Fläche ausfällt, hängt von der Pflanzenbedeckung an sich und der Pflanzenart ab. Dadurch kann u.a. untersucht werden, wie sich eine Hitzeperiode auf eine Vegetation auswirkt. Neiff et al. (2015) konnten so eine Abnahme des NDVI auf Maisfeldern von 0,06 (mit einer Spannweite von 0,01 bis 0,13) über eine Hitzeperiode hinweg feststellen.

Wir untersuchen die Entwicklung des NDVI über den heißen und trockenen Sommer 2018, der schon im Fokus der Untersuchung der Speicherfüllstände stand (vgl. Kap. 3). Unsere Hypothese ist, dass die Vegetation auf Flächen, denen wir in unserer BFK eine hohe potenzielle Kühlfunktion zugewiesen haben, über eine Hitzeperiode hinweg weniger an Vitalität verliert

(also weniger gestresst sind), als auf Flächen, denen wir in der BFK einen niedrigen Wert für die potenzielle Kühlfunktion zugewiesen haben. Denn die BFK koppelt die potenzielle Bodenkühlfunktion an das Volumen des Bodenwasserspeichers der oberen durchwurzelten Bodenzone (vgl. Kapitel 1). Je größer dieses Volumen ist, desto länger bzw. besser überstehen Pflanzen Trockenperioden ohne Wasserstress.

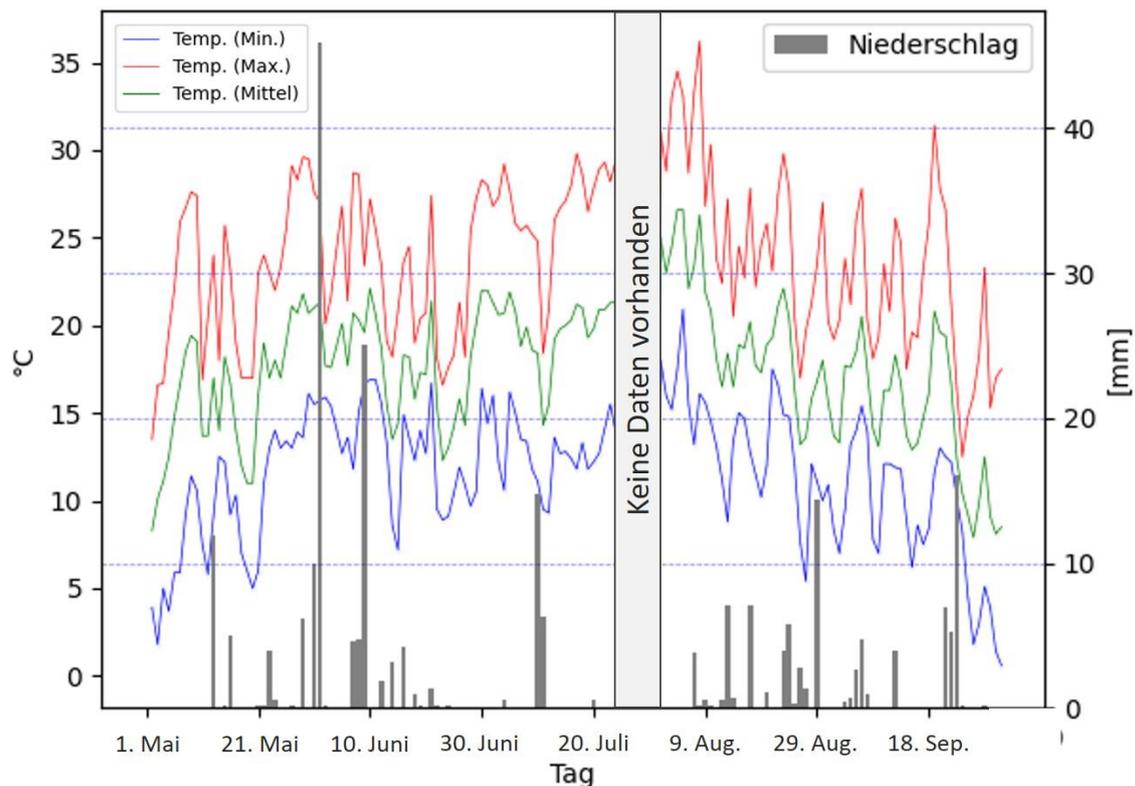


Abbildung 14: Tägliche Werte für den Zeitraum zwischen dem 1. Mai 2018 und dem 30. September 2018 für den Niederschlag (graue Balken, rechte Achse) und die Temperaturen (gestrichelte Linien, linke Achse) aufgenommen von der DWD-Station in Wuppertal; für den Zeitraum vom 24. Juli 2018 bis zum 30. Juli 2018 liegen keine Daten vor.

Verwendet wurden Bilder des Satelliten Sentinel-2, welche über den Open-Hub von Copernicus frei verfügbar sind. Bei der Auswahl der Daten wurde darauf geachtet, dass die Aufnahmen wolkenfrei sind. Es wurden 2A-Produkte mit einer Auflösung von 20 m verwendet, da diese bereits eine Atmosphärenkorrektur beinhalten. Um eine Trockenperiode zu identifizieren, wurden der tägliche Niederschlag und die durchschnittliche Tagestemperatur über den gesamten Sommer 2018 betrachtet (siehe Abbildung 14). Daten der DWD-Station in Wuppertal wurden verwendet, weil es die am nächsten zum Untersuchungsgebiet liegende DWD-Station ist. Die Daten stammen aus dem CDC des DWD und weisen eine Datenlücke am Ende des Monats Juli auf.

Auf Basis der DWD-Daten konnte eine Trockenperiode zwischen Ende Juni und Anfang Juli identifiziert werden (vergleiche Abbildung 14). Für diesen Zeitraum gibt es vom 29.06.2018 und vom 07.07.2018 passende Sentinel-2-Aufnahmen des Untersuchungsgebietes. Um die Auswirkungen des gesamten Sommers 2018 zu untersuchen, wurde ein Datensatz vom

30.09.2018 verwendet. Mit diesen Daten soll die Entwicklung über eine Hitzeperiode (Vergleich vom 29.06.2018 und dem 07.07.2018) und über einen heißen und trockenen Sommer wie 2018 (Vergleich vom 29.06.2018 und dem 30.09.2018) untersucht werden.

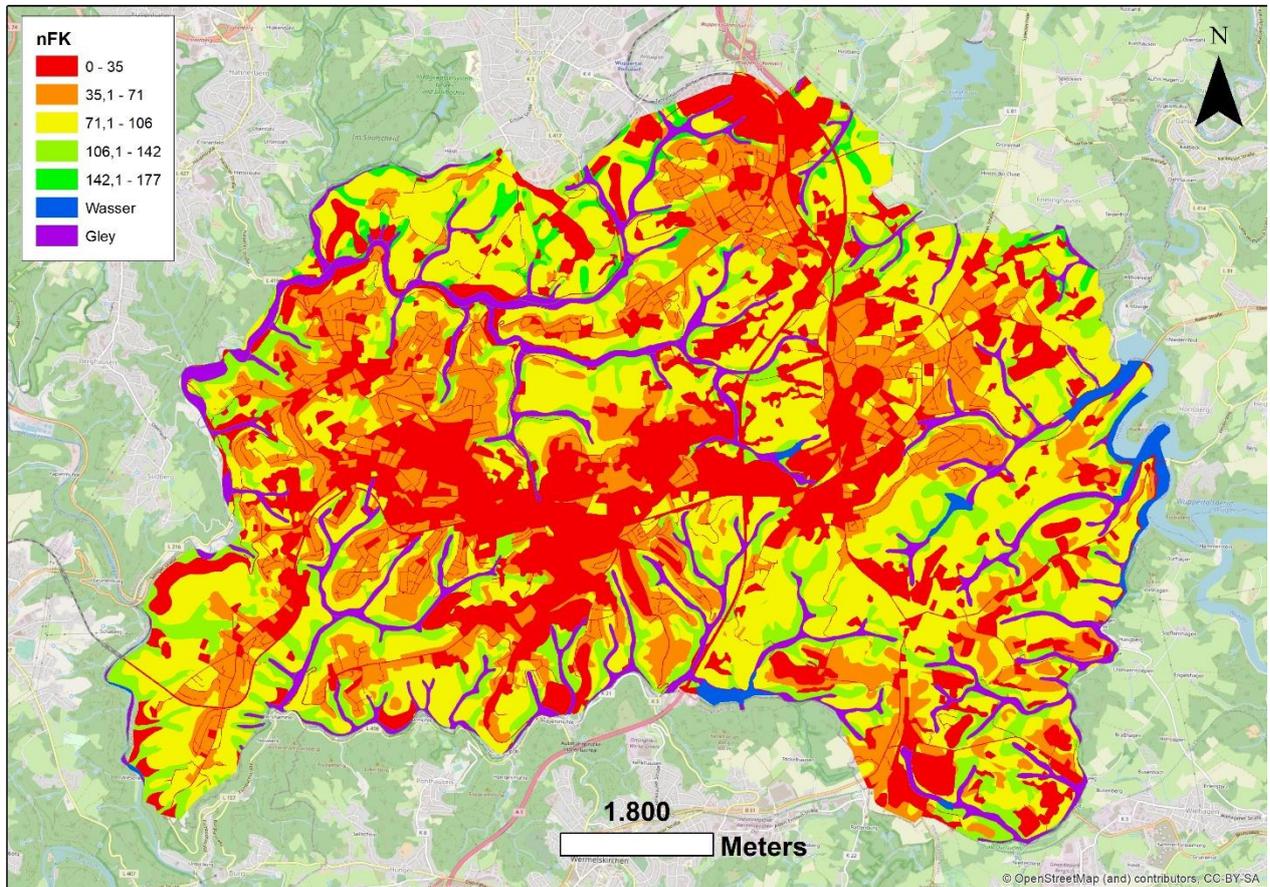


Abbildung 15: In 5 Klassen mit je gleich großen Intervallen eingeteilte BFK; Wasser und Gley sind als separate Klassen ausgewiesen.

Um den NDVI zu untersuchen, wurde wie folgt vorgegangen:

- (1) Der NDVI wurde für jeden der drei Zeitpunkte (29.06.2018, 07.07.2018, 30.09.2018) zellenweise aus den Bändern 4 und 8a nach der oben genannten Formel mit der Software ArcMap 10.3 errechnet.
- (2) Die BFK wurde auf Basis der nFK-Werte in fünf Klassen unterteilt (siehe Abbildung 15). Flächen mit dem Bodentyp Gley wurden separat betrachtet. Wasserflächen sind von dieser Analyse ausgenommen.
- (3) Die NDVI-Werte aus Schritt (1) wurden innerhalb der klassifizierten Bereiche der BFK aus Schritt (2) gemittelt (MEAN).

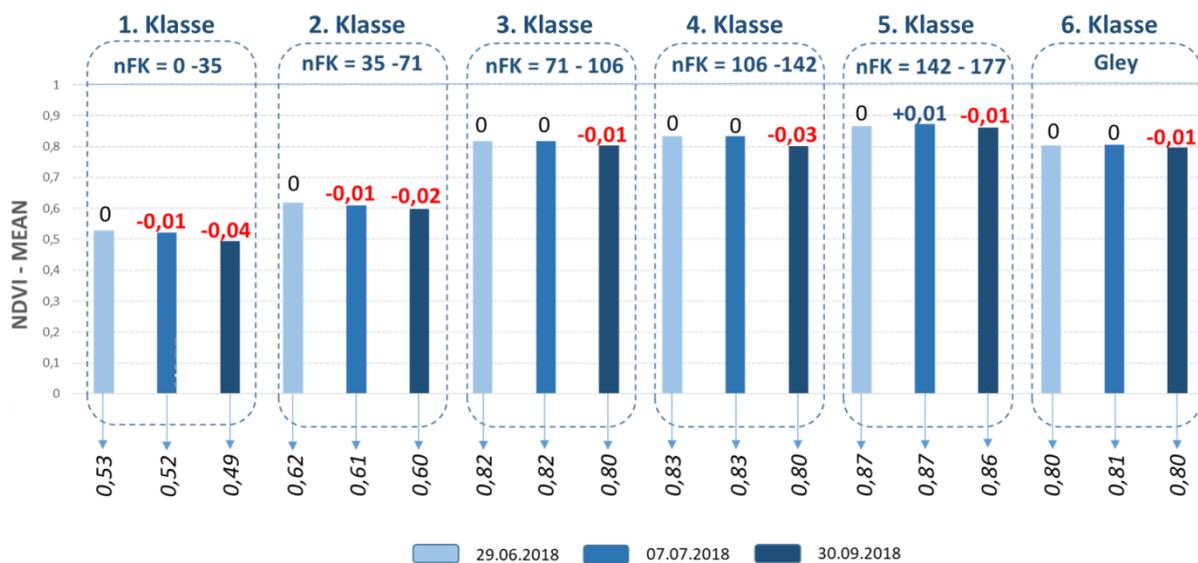


Abbildung 16: Ergebnisse der Untersuchung des NDVI für Flächen in Remscheid; die unterschiedlichen Farben der Balken informieren über das Aufnahmedatum der ausgewerteten Sentinel-Bilder; die 6 Klassen sind von der BFK abgeleitet und entsprechen den Klassen in Abbildung 15.

Abbildung 16 stellt den gemittelten NDVI für jeden der drei Aufnahmezeitpunkte und für jede Klasse aus Schritt (2) vor. In allen Klassen gibt es zwischen der ersten Aufnahme und der dritten Aufnahme eine Abnahme des NDVI. Die beiden Klassen mit den geringsten nFK-Werten, d.h. Klasse 1 und 2, setzen sich von den anderen vier Klassen ab durch (a) allgemein niedrigere Werte für den NDVI und (b) eine kontinuierliche Abnahme des NDVI über den Untersuchungszeitraum hinweg.

Nimmt der NDVI auf einer Fläche über die Zeit ab, deutet dies auf eine Abnahme der Pflanzenvitalität an diesem Standort hin. Die Abnahme des NDVI zwischen dem 29.06.2018 und dem 30.09.2018, die sich in allen Klassen findet, lässt sich auf den trocknen und heißen Sommer 2018 zurückführen. Dadurch wurde die Vegetation unabhängig vom Standort durch fehlende Niederschläge und hohe Temperaturen belastet. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass es standortbedingte Unterschiede in der Intensität dieser Belastung gibt. Dabei muss diskutiert werden, dass die Änderungen im NDVI über die Hitzeperiode hinweg eher gering ausfällt im Vergleich zu den Ergebnissen von Neiff et al. (2015). Allerdings ist zu beachten, dass wir den NDVI innerhalb von Flächen ermitteln, die wir über die Einteilung der Werte der BFK in fünf Klassen definiert haben. Das heißt, dass diese Flächen weder homogen hinsichtlich ihrer Vegetation noch hinsichtlich ihres Versiegelungsgrades sind. Die beiden Klassen mit den geringsten nFK-Werten setzen sich von den anderen Klassen durch allgemein niedrigere NDVI-Werte ab (Abbildung 16). Diese geringen Werte sind auf den geringeren Bewuchs zurückzuführen, denn Flächen dieser Klasse sind stärker verdichtet und versiegelt. In diesen beiden Klassen nimmt der NDVI aber über die Zeit auch am stärksten ab. Es zeigt sich zudem eine Abnahme während der ersten Hitzeperiode zwischen dem 29.06.2018 und dem 07.07.2018. Gleichzeitig weist die Klasse mit den höchsten nFK-Werten und die Klasse der grundwassergeprägten Gley-Böden die geringste Abnahme des NDVI über den gesamten

Untersuchungszeitraum auf. In diesen Klassen ist kein Einfluss der ersten Hitzeperiode auf die Pflanzenvitalität zu erkennen (Abbildung 16). Es zeigt sich, dass ein hoher nFK-Wert in der BFK mit einer geringeren Belastung der Pflanzenvitalität während einer Hitzeperiode verknüpft ist. Außerdem ist zu beobachten, dass die Vegetation an Standorten mit dem Bodentyp „Gley“ nicht während der betrachteten Hitzeperiode und kaum über den gesamten Sommer 2018 an Wasserstress gelitten hat. Das unterstreicht, dass diese grundwassernahen Flächen gesondert ausgewiesen werden sollten.

Die Auswertung des NDVI und damit die Analyse der Pflanzenvitalität über einen trockenen und heißen Sommer hinweg untermauert die Plausibilität der BFK. In Kapitel 1 haben wir dargelegt, dass besonders auf bewachsenen Flächen die Bodenkühlfunktion hoch ist und von der Vegetation über Transpiration gewährleistet wird. Ist eine Fläche stark bewachsen und ist die Vegetation nicht durch Wasserstress beeinträchtigt, hat die Fläche eine hohe potenzielle Kühlfunktion. Deshalb haben wir die nFK als Indikator für die potenzielle Kühlfunktion herangezogen. Nun zeigt sich, dass es die so bestimmten Flächen mit hohen nFK- Werten sind, auf denen Pflanzen einen geringeren Wasserstress während einer Hitzeperiode ausgesetzt sind. Die Schlussfolgerungen basierend auf der Landnutzung, Bodenkarte und Literatur decken sich mit den Schlussfolgerungen, die wir aus den Satellitendaten ziehen können.

4.2.3. Auswertungen von stadtklimatischen Messungen (Meteobike-Messungen)

Zwischen dem 19.08.2020 und dem 21.08.2020 wurden Messungen innerhalb Remscheids vor Sonnenaufgang (5-6 Uhr), mittags (14 Uhr) und nach Sonnenuntergang (21 Uhr) mit Meteobikes durchgeführt. Meteobikes sind handflächengroße Apparaturen, bestehend aus einem kleinen Computer und einem Temperatursensor, die kontinuierlich verortet die Temperatur messen. Eine solche Apparatur wird an einem Fahrrad befestigt, mit welchem dann Strecken innerhalb eines zu untersuchenden Gebietes abgefahren werden. Für Remscheid wurden solche Messungen innerhalb der Innenstadt durchgeführt. Die Route ist in Abbildung 17 dargestellt.

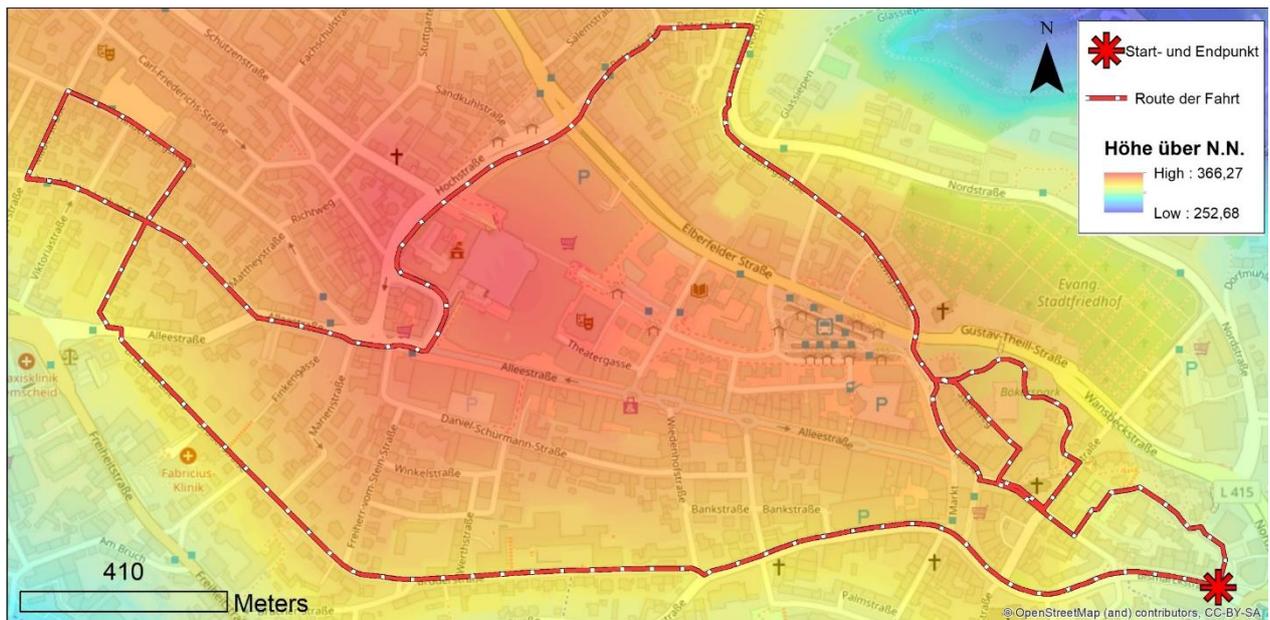


Abbildung 17: Die Route der Messfahrt (gestrichelte, schwarze Linie) und Höhenmodell der Remscheider Innenstadt, Grundkarte: OpenStreetMap.

Ziel der Messungen in Remscheid war es, Unterschiede im Mikroklima innerhalb der Innenstadt zu untersuchen und festzustellen, inwieweit wir solche Unterschiede auf Grundlage der BFK erklären können und was uns solche Unterschiede im Mikroklima über die Klimafunktion von unterschiedlichen Landnutzungsklassen im urbanen Raum sagen können. Um zu untersuchen, wie sich Landschaft auf das Mikroklima im urbanen Raum auswirkt, führt man solche Temperaturprofile möglichst während einer autochthonen Wetterlage durch. Auf Grund des Planungsaufwandes einer Messfahrt wurde vorab ein Zeitfenster von vier Wochen festgelegt. Innerhalb dieses Zeitfensters wurde auf Grundlage von Wettervorhersagen wenige Tage vor dem geplanten Beginn der Messungen ein genauer Termin festgelegt. Daher und auf Grund des wechselhaften Wetters innerhalb dieses Zeitfensters war es nicht möglich, die Messungen während optimaler Wetterbedingungen durchzuführen. Für die hier präsentierte Auswertung wurden zwei Zeiträume ausgewählt: (a) die Messung am 19.08.2020 zwischen 14:00 Uhr und 14:30 Uhr, und (b) die Messung vom 21.08.2020 von 5:00 Uhr bis 5:30 Uhr. Die Auswahl wurde auf Grundlage von Daten zur stündlichen Wolkenbedeckung von der DWD-Station in Düsseldorf getroffen.

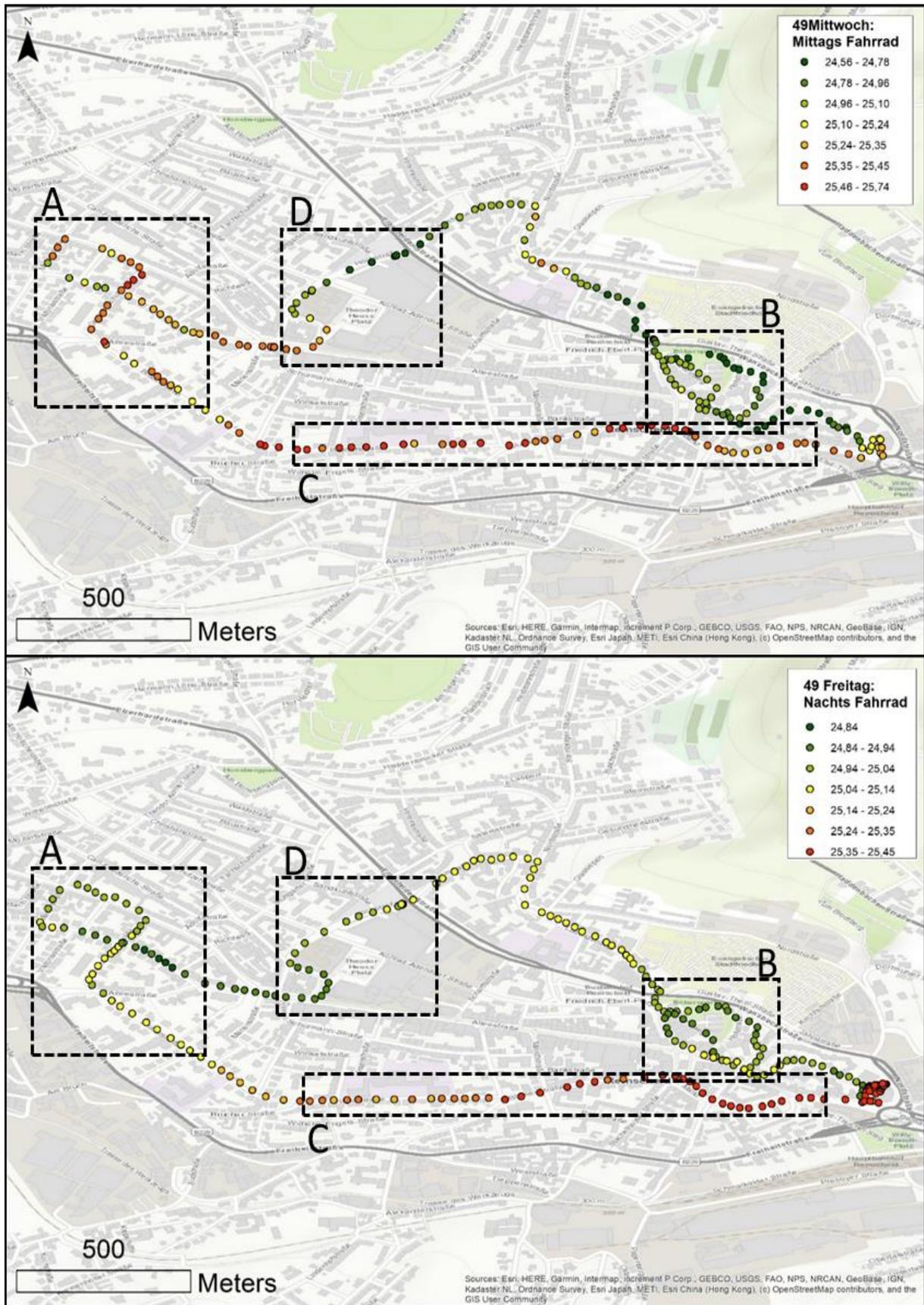


Abbildung 18: Visuelle Auswertung der Meteobike-Messungen; beide Messfahrten wurden mit dem Meteobike mit der Nummer 49 durchgeführt; oben: Messfahrt durchgeführt am 19.08.2020 ab 14:00 Uhr; unten: Messfahrt durchgeführt am 21.08.2020 ab 5:00 Uhr.

Eine Messfahrt dauerte ca. 30 Minuten. Die Messfahrten sind als Rundfahrt ausgelegt, sodass sie an dem Punkt enden, an dem sie angefangen haben. Ausgangspunkt der Messfahrten ist der Parkplatz des MK-Hotels in der Bismarckstraße 39 in 42852 Remscheid. Die Route der Messfahrten ist in Abbildung 17 dargestellt.

Wenn die erste und letzte Temperaturmessung einer Messfahrt nicht identisch waren, wurde die Temperatur korrigiert, da es in diesem Fall innerhalb des Messzeitraumes eine allgemeine Temperaturveränderung gab. Davon ist die Messung am 19.08.2020 zwischen 14:00 und 14:30 Uhr betroffen, nicht aber die Messung vom 21.08.2020 zwischen 5:00 und 5:30 Uhr. Die Korrektur der Messung geht davon aus, dass die Differenz aus der zuerst und zuletzt aufgenommenen Temperatur den allgemeinen Temperaturanstieg innerhalb Remscheids zwischen 14:00 und 14:30 Uhr widerspiegelt. Daher wurde zwischen diesen beiden Zeitpunkten ein linearer Temperaturanstieg angenommen und davon ausgehend für jeden Zeitpunkt der Messfahrt die Temperatur interpoliert. Anschließend wurde für jeden Messzeitpunkt die Differenz zwischen der Starttemperatur der Messung und der jeweiligen interpolierten Temperatur berechnet. Diese Differenz spiegelt die reine Temperaturzunahme an dem jeweiligen Zeitpunkt wider, der nicht durch die Landschaft verursacht wurde, sondern in der allgemeinen Temperaturzunahme innerhalb Remscheids über den Messzeitraum hinweg begründet ist. Daher wurde die jeweilige errechnete Differenz von der jeweiligen tatsächlich gemessenen Temperatur der Messfahrt abgezogen.

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Messfahrten als absolute Temperatur. Jeder Punkt repräsentiert eine Messung. Vier Bereiche sind durch Umrandungen hervorgehoben. (A) ist ein weniger verdichteter Bereich, hier herrschen Einfamilienhäuser und deren Gärten vor, (B) ist der Bereich des Bökersparks. Die übrige Fläche (C) und (D) sind stark verdichtete urbane Flächen.

Die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten gemessenen Temperatur betrug am Mittwochmittag 1,2 °C und Freitagnacht nur 0,6 °C. Dass die aufgenommenen Temperaturunterschiede eher gering sind, liegt (a) an den nicht optimalen Messbedingungen und (b) daran, dass die angefahrene Grünfläche, auf der geringere Temperaturen zu erwarten sind, eher klein und daher auch in ihrer mikroklimatischen Wirkung begrenzt ist. Die höheren Temperaturunterschiede am Mittwoch zwischen 14:00 Uhr und 14:30 Uhr sind auf die unterschiedlich starke Aufwärmung Remscheids während des Sonnenhöchststandes zurückzuführen. Vor Sonnenaufgang (Freitag) sind die mikroklimatischen Unterschiede innerhalb der Innenstadt geringer. Zu erwarten wäre gewesen, dass die mikroklimatischen Unterschiede zu diesem Zeitpunkt größer sind. Denn über Nacht findet keine Wärmezufuhr durch die Sonne, sondern eine Ausstrahlung statt. Das Mikroklima wird nun dadurch bestimmt, wie sehr sich eine Fläche aufgeheizt hat und wie rasch sie wieder abkühlen kann.

Bei beiden Messfahrten grenzt sich der Bökerspark (Bereich B in Abbildung 17) durch geringere Temperaturen von der stärker bebauten Umgebung ab. Dieser Bereich (B) heizt sich über die Mittagszeit weniger stark auf und kühlt über die Nacht hinweg am stärksten ab. Die Bereiche C und D (Abbildung 17) sind stark verdichtete und bebaute Bereiche, weisen aber unterschiedliche Temperaturen auf. Zu erklären ist dies vermutlich durch Remscheids Topografie. Der Innenstadtbereich von Remscheid liegt auf einer Kuppe (siehe Abbildung 16). Der Bereich D in Abbildung 17 liegt auf dem höchsten Punkt dieser Kuppe. Hier wurden bei

beiden Messfahrten geringere Temperaturen aufgenommen. Dies liegt vermutlich an der guten Durchlüftung dieses Bereiches, wodurch die warme Luft abgeführt wird. Der Bereich C in Abbildung 17 befindet sich hingegen am unteren Hang dieser Kuppe und ist bei beiden Messfahrten als überdurchschnittlich warmer Bereich aufgefallen. Es kann vermutet werden, dass die warme Luft hier nicht (durch Wind) abgeführt wird, sondern die Wärmestrahlen zwischen den Gebäuden reflektiert werden und somit im bebauten Bereich verbleiben.

Die geringeren Temperaturen im Bereich des Bökersparkes (B, Abbildung 17) und des weniger stark bebauten Bereiches (A, Abbildung 17) sowie die hohen Temperaturen des stark verdichteten Bereiches C decken sich mit den Schlussfolgerungen der BFK. Überraschend ist der starke Einfluss der Topografie. Da der Innenstadtbereich auf einer Kuppe liegt, gibt es sehr gut belüftete Bereiche, die sich trotz hoher Bebauung weniger stark aufheizen. Um detaillierte Aussagen über die Auswirkungen der Landschaft auf das Mikroklima der Stadt Remscheid treffen zu können, sind die gemessenen Temperaturunterschiede zu gering. Es lassen sich jedoch folgende Punkte zusammenfassen:

- (a) Grünflächen wie der Bökerspark heizen sich weniger stark über den Tag hinweg auf und haben nachts eine kühlende Wirkung.
- (b) Weniger stark bebaute Bereiche (Abbildung 17, A) haben wahrscheinlich eine kühlende Wirkung und heizen sich während eines Tages weniger stark auf als stärker verdichtete Bereiche.
- (c) Die Topografie der Stadt Remscheid hat vermutlich einen deutlichen Einfluss auf das innerstädtische Mikroklima und bewirkt, dass gut durchlüftete Bereiche sich weniger stark erwärmen als weniger gut durchlüftete Bereiche.

5. Nutzungsmöglichkeiten der vorgestellten Karte

Die Karte der potenziellen Bodenkühlfunktion wird den Partnern der Stadt Remscheid mit diesem Bericht als Geodatensatz übergeben.

Die Motivation für die Erstellung der BFK war die Identifizierung von besonders schützenswerten Böden in Remscheid. Denn auch in Remscheid sind Flächen zunehmend von Versiegelung und Verdichtung betroffen. Wir haben in vorangegangenen Kapiteln gezeigt, wie wichtig unversiegelte Böden für das Mikroklima im städtischen Raum sind. Da auch Remscheid bereits von überdurchschnittlich warmen Sommern betroffen war, ist das Stadtklima hier bereits in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. So hat die RWTH Aachen 2018 eine Klimafunktionskarte erstellt, welche die Klimafunktion von 2017 in der Stadt Remscheid abbildet.

Die BFK kann als thematische Ergänzung der Klimafunktionskarte verwendet werden. Zur Bestimmung der Klimafunktionen der Flächen sind neben der Landnutzung auch die Bodenverdichtung, der Versiegelungsgrad sowie Bodeneigenschaften eingegangen (siehe Abbildung 3). Dadurch ermöglicht die BFK eine differenzierte Betrachtung der flächenhaften Klimafunktionen und, in Kombination mit der Klimafunktionskarte, die Identifizierung von schützenswerten Flächen innerhalb Remscheids. Diese Informationen können in zukünftige Planungsvorhaben eingebracht werden.

Quellen

- Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G.-d., & Xu, J. (2018). Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 1-6.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.016>
- EEA. (2012). *Copernicus Land Monitoring Service – Local Component: Urban Atlas*. European Environmental Agency. <https://land.copernicus.eu/user-corner/publications/ua-flyer/view>
- Genßler, L., Hädike, A., Hübner, T., Jacob, S., König, H., Mehlig, B., Michels, C., Neumann, P., J., R.-M., Seidentücker, C., Sträter, E., Straub, W., Werking-Radtke, J., & Koch, C. (2010). *Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen*. U. u. V. N.-W. Landesamt für Natur.
- Imbery, F., Friedrich, K., Haeseler, S., Koppe, C., Janssen, W., & Bissolli, P. (2018). *Vorläufiger Rückblick auf den Sommer 2018 –eine Bilanz extremer Wetterereignisse*.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180803_bericht_sommer2018.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Jauregui, E. (1991). Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and Buildings*, 15, 457-463.
- Kastle, M., Molt, C., & Kaufmann-Boll, C. (2015). *Kühlleistung von Böden - Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW*. LANUV.
https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/arbla29/LANUV-Arbeitsblatt%2029_web.pdf
- Marcotullio, Braimoh, & Onishi. (2008). The Impacts of Urbanization on Soils. In *Land Use and Soil Resources* (pp. 201-250). Springer.
- Marzluff, Schulenberger, Endlicher, Alberti, Bardley, & ZumBrunnen. (2008). *Urban Ecology*. Springer.
- Saito, I., Ishihara, O., & Katayama, T. (1991). Study of the Effect of Green Areas on the Thermal Environment in an Urban area. *Energy and Buildings*, 15, 493-498.
- Schrey, H. P. (2014). *Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1: 50.000 – Inhalt, Aufbau, Auswertung*. Geologischer Dienst NRW.
- Sperling, C., Valentin, I., & Kastler, M. (2019). Die Karte der Bodenkühlleistung in der Stadt Düsseldorf. *Umweltamt Düsseldorf*. <https://doi.org/doi.org/10.37307/j.1868-7741.2019.02.04>
- Sponagel, H., Grottenthaler, W., Hartmann, K., Hartwich, R., Janetzko, P., Joisten, H., Kühn, D., DSabel, K., & Traidl, R. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung* (Vol. 5.). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Spronken-Smith, R. (1994). *Energetics and cooling in urban parks* [Dissertation, University of British Columbia]. <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/831/items/1.0088055>.
- Umweltbundesamt. (2020, 27.11.2020). *Gesundheitsrisiken durch Hitze*. Retrieved 15.01.2021 from <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>
- Upmanis, H., Eliasson, I., & Lindqvist, S. (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, 18, 681–700. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199805\)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199805)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L)
- Weyer, T., & Boeddinghaus, R. (2016). *Bodenverdichtung vermeiden: Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen*. U. Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Willand, A., & Höke, S. (2014). *Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes* (TEXTE 56/2014). (Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Issue. Umweltbundesamtes.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-fachlicher-rechtlicher-organi>

Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126630. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>