

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung als Element der klimaadaptiven Stadtentwicklung in Deutschland - Eine Darstellung der klimatischen Auswirkungen auf den Regenwasserhaushalt deutscher Städte und die mögliche Rolle dezentraler Regenwasserbewirtschaftung zur Resilienzsteigerung

Bachelorarbeit

Studiengang: Umwelttechnik (B.Sc.)

vorgelegt von

Fabian Jelitto



Hamburg

Am 25. August 2023

Erstgutachter: Prof. Dr. (mult.) Dr. h.c. (mult.). Walter Leal (HAW Hamburg)

Zweitgutachter: M.Sc. Sven Kannenberg (HAW Hamburg)

Zusammenfassung

Problemstellung: Städte sind heutzutage mit einer Vielzahl von Problemen konfrontiert, welche sich aus dem zentralisierten Umgang und der Ableitung von Regenwasser ergeben. Hierzu gehören unter anderem Überflutungen, Dürren und die Verstärkung von Hitzeperioden. Diese Probleme führen zu ökonomischen, ökologischen und gesundheitlichen Schäden.

Methoden: Die Basis dieser Arbeit bildet eine systematische Literaturrecherche. Hierfür wurden unter anderem die Plattform Google Scholar, die Seite des Umweltbundesamtes und der aktuelle Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change verwendet. Im Laufe der Arbeit werden drei Fallbeispiele zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung aus der Literatur vorgestellt. Zudem wird anhand von zwei Programmen eine Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahme entworfen und anschließend auf die Veränderung des Mikroklimas untersucht. Aus den Ergebnissen der Fallbeispiele sowie der Literaturrecherche werden abschließend Vor- und Nachteile sowie Handlungsempfehlungen abgeleitet und ein Fazit gezogen.

Ergebnisse: Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung kann zur Resilienzsteigerung von Städten gegenüber den sich verschärfenden klimatischen Bedingungen führen. Durch die Multifunktionalität der Maßnahmen kann dabei gleichzeitig gegen die Überhitzung, Überflutung und die Ausbildung von städtischen Dürren vorgegangen werden. Die dezentrale Bewirtschaftung von Niederschlagswasser ermöglicht darüber hinaus die Wiederherstellung eines naturnahen Wasserhaushalts.

Diskussion/Schlussfolgerungen: Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung bringt viele positive sowie einige wenige negative Effekte mit sich. Es gibt Schlüsselfaktoren, die das Gelingen einer Maßnahme unterstützen und einige, die eine hinderliche Wirkung haben können. Diese sollten bei der Implementation weiterer Projekte berücksichtigt werden. Die untersuchten Projekte weisen dabei in unterschiedlichen Teilaspekten der Regenwasserbewirtschaftung unterschiedliche Ausprägungen auf. Um den klimatisch bedingten Problemen in Städten bestmöglich entgegenzuwirken, sind die Kombination verschiedener Maßnahmen und die spezifische Anpassung an den Standort als zentrale Kriterien des Erfolgs der Maßnahmen zu bewerten.

Schlüsselwörter: klimaresiliente Stadtentwicklung, dezentrale Regenwasserbewirtschaftung, naturnaher Wasserhaushalt, Stadtklima, Abflussvermeidung

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1. Einleitung inkl. Forschungsfrage.....	1
2. Theoretischer Hintergrund.....	2
2.1. Klimawandel.....	2
2.1.1. Klimasystem im Wandel.....	3
2.2. Wasserkreislauf.....	5
2.2.1. Klimatische Beeinträchtigungen des Wasserkreislaufs.....	7
2.3. Veränderung des Klimas in Deutschland.....	7
2.4. Extremwetterereignisse.....	10
2.4.1. Starkregen.....	10
2.4.2. Dürren und Hitzeperioden.....	11
2.5. Klima in der Stadt.....	13
2.6. Regenwasserbewirtschaftung.....	15
2.7. Politische Rahmenbedingungen und technische Normen.....	19
3. Methoden.....	20
3.1. Forschungsfrage und Zielstellung.....	20
3.2. Literaturarbeit.....	21
3.3. Software.....	23
3.3.1. STORM.Sim.....	23
3.3.2. ENVI-met.....	25
4. Hauptteil/Ergebnisse.....	27
4.1. Institut für Physik in Berlin Adlershof.....	27
4.2. Potsdamer Platz, Berlin.....	31
4.3. Kronsberg, Hannover.....	36
4.4. Dezentrale Straßenentwässerung des Stadthäger Marktplatzes.....	43
4.4.1. STORM.Sim.....	44
4.4.2. ENVI-met.....	49
5. Diskussion und Handlungsempfehlungen.....	59
5.1. Bewertung des Fallbeispiels Stadthagen.....	65
5.2. Beantwortung der Fragestellungen.....	66
5.3. Limitationen.....	67
6. Fazit.....	69
Literaturverzeichnis.....	71
Rechtsverzeichnis:.....	81
Anhangsverzeichnis.....	82
Eidesstattliche Erklärung.....	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Fassadenbegrünung am Haus Lise-Meitner-Haus	29
Abbildung 2 Funktionsprinzip der adiabaten Kühlung mittels Wärmetauscher und Regenwasser	30
Abbildung 3 dRWB am Potsdamer Platz.....	33
Abbildung 4 Konzeptzeichnung des Potsdamer Platzes	34
Abbildung 5 Bebauungsplan Hannover-Kronsberg.....	38
Abbildung 6 Wasserbilanz des Stadtteils Kronsberg ohne Bebauung, mit zentraler Regenwasserbewirtschaftung und mit dezentraler Regenwasserbewirtschaftung	39
Abbildung 7 Originalzeichnung des integrierten Mulden-Rigol-Systems	40
Abbildung 8 Originalzeichnung des Drosselschachts.....	40
Abbildung 9 Retentionsräume im Stadtviertel-Hannover-Kronsberg.....	41
Abbildung 10 Natürliche Wasserbilanz des Standorts Stadthagen	45
Abbildung 11 Stadthäger Marktplatz ohne Versickerungsmulde	46
Abbildung 12 Stadthäger Marktplatz mit Versickerungsmulde.....	48
Abbildung 13 Stadthäger Marktplatz mit Versickerungsmulde und Retentionsfläche.....	49
Abbildung 14 Bitmap des Stadthäger Marktplatzes mit Referenzlänge	50
Abbildung 15 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes 2D	51
Abbildung 16 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes 3D	51
Abbildung 17 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes inklusive RWBM 2D.....	52
Abbildung 18 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes inklusive RWBM 3D.....	52
Abbildung 19 UTCI-Profil ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 3D.....	54
Abbildung 20 UTCI-Profil ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 2D.....	55
Abbildung 21 UTCI-Profil mit RWBM 16:00-17:00 Uhr, 3D	56
Abbildung 22 UTCI-Profil mit RWBM 16:00-17:00 Uhr, 2D	56
Abbildung 23 UTCI-Vergleich mit/ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 3D.....	57
Abbildung 24 UTCI-Vergleich mit/ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 2D	57
Abbildung 25 UTCI-Vergleich mit/ohne RWBM 4:00-5:00 Uhr, 2D.....	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ergebnisse der Schlagwortsuche (eigene Darstellung).....	22
--	----

Abkürzungsverzeichnis

ABP	Abflussbildungsparameter
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BiMoKA	Bildungsmodule für Klimaresiliente Architektur
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BSW	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
dRWB	dezentrale Regenwasserbewirtschaftung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU	Europäische Union
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FLL	Forschungsgesellschaft Landesentwicklung und Landschaftsbau e. V.
GS	Google Scholar
ha	Hektar
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschland
HAWK	Katalog der Hochschule für Angewandte Wissenschaften
HRWM-RL	Hochwasserrisikomanagement Richtlinie
HU	Humboldt-Universität zu Berlin
IGS	Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KURAS	Konzept für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme
LMH	Lise-Meitner-Haus
MRE	Mulden-Rigolen-Element
ppm	Part per million
RWB	Regenwasserbewirtschaftung
RWBM	Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahme
SenStadt	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin
SMI	Bodenfeuchteindex
SPEI	Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
UBA	Umweltbundesamt
UTCI	Universal Thermal Climate Index
WHG	Wasserhaushaltgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
zRWB	zentrale Regenwasserbewirtschaftung

1. Einleitung inkl. Forschungsfrage

Das Klima der Erde verändert sich. Neben der Prävention von anthropogenen Einflüssen auf das Klimasystem spielt dabei auch die Anpassung an Klimafolgen eine zunehmend große Rolle (Pörtner et al., 2022). Der Begriff ‚Klima‘ beschreibt die langjährige Statistik des Wetters. Das Wetter lässt sich dabei anhand verschiedener Parameter beschreiben. Beispielhaft sind hierbei der Wind, die Temperatur, der Luftdruck aber auch Begrifflichkeiten des Wasserkreislaufs wie etwa der Dampfgehalt der Luft, Niederschlagsmengen und auch die Bewölkung zu nennen. Eine Veränderung des globalen Klimas geht dementsprechend mit einer Veränderung dieser Parameter einher und somit auch mit einer Veränderung des Wetters weltweit (Brasseur et al., 2017). Diese Veränderung führte in den vergangenen Jahren vermehrt zu katastrophalen Wetterlagen. Dabei kommt dem Niederschlag eine zentrale Rolle zu. Entweder durch übermäßige Niederschläge, die zu Überflutungen und Hochwasser führen oder durch ausbleibenden Regen, welcher zu Dürreereignissen führen kann (Hauck et al., 2019). Die Ambivalenz dieser Entwicklung lässt sich unlängst bei den Überschwemmungen in Italien und der Dürreperiode in Frankreich erkennen (Schellenberg, 2023; Jöhlinger, 2023). Auch Hitzeereignisse treten häufiger auf, was vor allem in Großstädten teils zu extremen Hitzebelastungen der Bevölkerung führt. Der durch Bebauungen bedingte hohe Versiegelungsgrad in Städten kann in Extremfällen dafür sorgen, dass Städte im Vergleich zum Umland eine um bis zu 10 °C höhere Temperatur aufweisen können (Brasche et al., 2020). Der hohe Versiegelungsgrad in Städten bedingt auch eine höhere Abflussrate des anfallenden Regenwassers, was in starkversiegelten Stadtstrukturen die Vulnerabilität gegenüber Überflutungen erhöhen kann (Kind et al., 2019). In Europa, als hoch urbanisierter Kontinent, spielt die Adaption von Städten gegenüber dem Klimawandel dementsprechend eine zentrale Rolle (Każmierczak et al., 2020). Als Teil der Lösung dieser unterschiedlichen Problematiken ist in den letzten Jahren das Konzept der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung (dRWB) in den Fokus von Entscheidungsträgern und Planern getreten. Die dRWB hat dabei das Ziel, den anfallenden Niederschlag nicht direkt abzuleiten, sondern ortsnah zurückzuhalten, um diesen zu versickern, zu verdunsten, zu reinigen oder zu verwenden (Müller et al., 2023). Diese Art der Regenwasserbewirtschaftung (RWB) bietet eine Vielzahl positiver Aspekte auf den Wasserhaushalt, das Stadtklima sowie auf Menschen und Tiere. Die Maßnahmen sind vielfältig und weisen eine hohe Flexibilität in der Kombination zu

einem Gesamtkonzept auf (Matzinger et al., 2017). Die Folgende Thesis widmet sich dem Thema der dRWB und untersucht anhand Fallbeispielen die mögliche Rolle der dRWB im Umgang mit der aktuellen sowie zukünftigen Klimaproblematik. Dies wird anhand der Fragestellung: „*Welche Potenziale eröffnet die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung zur Bewältigung gegenwärtiger und zukünftiger Herausforderungen im städtischen Wasserhaushalt?*“ untersucht.

Die in dieser Hausarbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich immer gleichermaßen auf weibliche und männliche Personen. Auf eine Doppelnennung und gegenderte Bezeichnungen wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

2.Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden zunächst die Hintergründe des Klimawandels und des klimatischen Systems aufgezeigt. Anschließend wird auf die Probleme eingegangen, denen deutsche Städte in den Zeiten des Klimawandels bereits heute ausgesetzt sind. Des Weiteren wird das Konzept der dRWB vorgestellt und die diesbezüglich zentralen Begriffe geklärt. Abschließend wird auf die politischen sowie technischen Vorschriften und Empfehlungen eingegangen.

2.1. Klimawandel

Zum Verständnis des Klimawandels ist zunächst ein generelles Verständnis des Klimasystems der Erde notwendig. Die Gesamtheit der beteiligten Komponenten zu denen die Atmosphäre, die Lithosphäre, die Biosphäre die Kryosphäre und die Hydrosphäre gehört bilden dabei mit ihren wechselseitigen Einflüssen aufeinander das Klimasystem. Dieses Klimasystem unterliegt großen Schwankungen, da es sich um ein offenes System handelt. Einflüsse von außen wie zum Beispiel der Ausbruch eines Vulkans, Intensitätsschwankungen der Sonneneinstrahlung aber auch anthropogene Einflüsse, wie der Ausstoß von Treibhausgasen, führen zu einer Veränderung dieses komplexen Geflechts (Früh et al. 2021). In der Erdgeschichte kam es aufgrund diverser Ereignisse dabei immer wieder zu Veränderungen des Klimasystems. Die Veränderungen betrafen dabei unter anderem die Verschiebung des Flächenverhältnisses zwischen Meer und Land, die Zusammensetzung der Atmosphäre sowie die Änderung der Kryosphäre (Schönwiese, 2020). Die treibende Kraft des Klimasystems, ist die von der Sonne ausgehende Solarstrahlung (Früh et al. 2021). Neben dem Teil der

Strahlung, der unter anderem durch Wolken, Partikel in der Luft und die Erdoberfläche reflektiert wird und so zurück in den Weltraum gelangt, bleibt der größere Teil vorerst auf der Erde. Dieser Anteil der Solarstrahlung wird von der Atmosphäre wie auch der Erdoberfläche unter anderem in langwellige Strahlung, also Wärmestrahlung, umgewandelt (Brasseur et al., 2017). Die Wärmestrahlung wird dann wiederum von der Atmosphäre sowie vom Boden, also vom Land, sowie den Ozeanen in Richtung Weltraum emittiert. Ein signifikanter Teil dieser Strahlung gelangt jedoch nicht direkt in den Weltraum, sondern wird von Treibhausgasen in der Atmosphäre zunächst absorbiert und erneut in alle Richtungen emittiert (Brasseur et al., 2017). Die langwellige Strahlung wird von diesen Spurengasen dabei stärker absorbiert als die ursprüngliche Strahlung der Sonne. Die in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgase, zu denen Distickstoffoxid (N_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Ozon (O_3) und Wasserdampf gehören, wirken also wie die Scheiben eines Gewächshauses bzw. Treibhauses. Die Strahlung dringt ein, wird umgewandelt und dann verzögert wieder freigesetzt (Sauer, 2001). Dieser sogenannte Treibhauseffekt sorgt für die Erhöhung der bodennahen Temperatur (Brasseur et al., 2017). In dem sich, zwischen eintreffender und ausfallender Strahlung, bildenden Gleichgewicht beträgt die mittlere Temperatur der Erde $15\text{ }^\circ\text{C}$ (Früh et al., 2021). Den größten Anteil am Treibhauseffekt hat dabei der Wasserdampf in der Atmosphäre. Rund 90 % des Treibhauseffektes lassen sich auf diesen zurückführen (Dethloff, 2022). Dieser weist jedoch eine, im Verhältnis zu anderen Treibhausgasen, kurze Verweildauer in der Atmosphäre auf und reagiert besonders stark auf Veränderungen der atmosphärischen Temperatur (Brasseur et al., 2017). Die restlichen 10 % gehen auf die anderen langlebigeren Treibhausgase zurück (Dethloff, 2022). Diese stehen im natürlichen Klimageschehen im Gleichgewicht. Hierbei werden sie entweder chemisch gebildet oder entspringen natürlichen Prozessen. Sie sind Teil der chemischen Kreisläufe und werden somit gespeichert, transportiert und wieder freigegeben. Beispielhaft sind hier der Kohlenstoff-, der Schwefel- und der Stickstoffkreislauf zu nennen (Brasseur et al., 2017).

2.1.1. Klimasystem im Wandel

Dieses Gleichgewicht wird heute durch den anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen und der daraus resultierenden Verstärkung des Treibhauseffektes verschoben (Früh et al., 2021). Den größten Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt hat das,

durch Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzte, CO_2 (Hauck et al., 2019). Der Gehalt von CO_2 in der Atmosphäre hat sich im Vergleich zur vorindustriellen Zeit (1850-1900) von 280 parts per million (ppm), also Teile pro Millionen, auf rund 420 ppm erhöht (Stand 2022) (Becker et al., 2022). Die Erhöhung des CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre führt zu einer erhöhten Temperatur auf der Erde (Brasseur et al., 2017). Über diese direkte Korrelation hinaus führt die Erhöhung des CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre auch zu sogenannten positiven Rückkopplungen. So bedingt beispielsweise die Erhöhung der Temperatur einen höheren Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre. Dies resultiert daraus, dass warme Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann, was wiederum dazu führt, dass sich die Atmosphäre weiter erwärmt (Brasseur et al., 2017). Derartige Rückkopplungen betreffen mit der Hydrosphäre, der Atmosphäre, der Kryosphäre, der Lithosphäre sowie der Biosphäre alle Teile des Klimasystems (Früh et al., 2021). Ein weiteres Beispiel ist, dass das durch den Klimawandel abschmelzende Meereis weniger Strahlung reflektiert als Wasser. Es kommt zu einer weiteren Erwärmung der Erde. Rückkopplungseffekte sind zumeist sehr schwer abschätzbar und ihnen liegen große Unsicherheiten zugrunde, weshalb eine genaue Prognose des zukünftigen Klimas auf der Erde derzeit unmöglich ist (Brasseur et al., 2017). Neben der Emission von Treibhausgasen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wirkt sich die industrielle Bewirtschaftung des Planeten auch durch andere Faktoren auf das Klima aus. Auch die Abholzung von Wäldern und die weitreichende Versiegelung von Flächen haben einen anthropogenen Einfluss auf den natürlichen Treibhauseffekt (Becker et al., 2022). Laut des neuesten Reports des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist die durchschnittliche Temperatur zwischen 2011 und 2020 im Vergleich zum Referenzzeitraum von 1850-1900 um $1,07\text{ °C}$ gestiegen. Der IPCC gibt darüber hinaus unterschiedliche Szenarien an, welche anhand klimabasierter Zukunftsmodelle erstellt werden können. Diese sogenannten Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Szenarien reichen dabei von einem Szenario, in welcher ein Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen eine zentrale Bemühung der Weltgemeinschaft ist (SSP1) bis hin zu einem Szenario, in dem die fossile Verbrennung in Zukunft weiter zunimmt (SSP5). Die Unterschiede in dem Anstieg der durchschnittlichen globalen Oberflächentemperatur schwankt dabei bis zum Jahr 2100 zwischen $1,9\text{ °C}$ bis $2,6\text{ °C}$ beim SSP1 Szenario und $8,5\text{ °C}$ beim SSP5 Szenario (Pörtner et al., 2022).

2.2. Wasserkreislauf

Die Gesamtheit des Wassers auf der Erde wird als Hydrosphäre bezeichnet. Die Hydrosphäre darf dabei nicht als ein die Erde umschließender Mantel verstanden werden, die für gleiche Verteilung des Wassers auf der Erde sorgt. Abgesehen von dem in der Atmosphäre gespeichertem Wasserdampf gibt es starke Unterschiede in der Verteilung des Wassers. Wüsten, Meere und die Polarkappen machen diesen Sachverhalt deutlich. Das Gesamtvolumen des Wassers zu erfassen ist aufgrund der Komplexität der Kreisläufe und der schiereren Menge nicht vollumfänglich möglich (Fohrer et al., 2016). Schätzungen zu Folge befinden sich auf der Erde rund $1,38 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ Wasser (Wittenberg, 2011). Der größte Teil des Wassers liegt als Salzwasser in den Weltmeeren vor. Diese allein umfassen mit rund $1,34 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ 96,54 % des gesamten Wasservolumens der Erde. Die Gesamtheit des Grundwassers hat einen Anteil von 1,69 %, wobei davon rund die Hälfte Süßwasser ist. 1,76 % fallen dem in Form von Schnee oder Eis vorliegenden gefrorenen Wassers der Erde zu. Hierzu gehören unter anderem die Polkappen, der Permafrost aber auch Eis und Schnee in Gebirgen. Den größten Bestand hat jedoch das Eis der Polkappen mit 1,73 %. Bodenfeuchte und das in Organismen gespeicherte Wasser haben einen Anteil von 0,001 %. Den gleichen Anteil am Gesamtvolumen hat der in der Atmosphäre gespeicherte Wasserdampf. Der restliche Anteil von 0,008 % geht auf Oberflächengewässer zurück. Dies umfasst Flüsse, Seen und Sümpfe. Zusammenfassend gesagt ist das Volumen des Wassers auf der Erde zu 98,23 % flüssig, zu 1,76 % fest und zu 0,001 % gasförmig. Von den 2,5 % des Süßwassers auf der Welt sind weniger als ein Drittel von den Menschen nutzbar. Der Großteil des nicht nutzbaren Wassers liegt dabei in Form von Eis an den Polen vor. Direkt nutzbar sind dabei Grundwasser, Wasser aus Seen oder auch Flusswasser. Diese Daten zeigen, wie zentral eine ständige Erneuerung des Süßwassers ist, da die Quellen sonst innerhalb kurzer Zeit erschöpft wären. Der Erneuerung des Süßwassers liegt der Mechanismus des globalen Wasserkreislaufs zugrunde. Prozesse der Verdunstung, des atmosphärischen Wassertransports, des Abfließens von ober- und unterirdischen Wassermassen sowie des Niederschlags sind die essenziellen Bestandteile des Wasserkreislaufs. Als Teil des Klimasystems der Erde ist die treibende Kraft des Wasserkreislaufs, die auf die Erde eintreffende Sonnenstrahlung. Die Gravitationskraft hat insofern eine zentrale Rolle, da diese zum Niederschlag des in der Atmosphäre gespeicherten Wassers und zum Abfluss des Wassers zurück in die Weltmeere führt (Weiler &

Miegel, 2020). Das Wasser der Erde ändert fortwährend seinen Aggregatzustand. Durch Verdunstung wird aus flüssigem Wasser Wasserdampf. 90 % der Verdunstung geht dabei auf die Evaporation, also der Verdunstung von Wasser an unbelebten Oberflächen, zurück. Die restlichen 10 % gehen auf die Transpiration, also auf die Verdunstung von Wasser an den Spaltöffnungen der Pflanzen, zurück (Jowanowitsch, 2013). Dabei tragen die Ozeane mit 85 % des Gesamtanteils zu einem deutlich größeren Teil zur globalen Verdunstung bei (Hauck et al., 2019). Dies liegt an der dauerhaften Verfügbarkeit und der größeren Fläche gegenüber der terrestrischen Fläche (Weiler & Miegel, 2020). Sobald der Wasserdampf in die Atmosphäre eintritt, wird er durch Luftströmungen horizontal und vertikal verteilt (Jowanowitsch, 2013). Die mittlere Verweilzeit eines Wassermoleküls in der Atmosphäre beträgt zehn Tage (Weiler & Miegel, 2020). Sobald der Wasserdampf eine bestimmte Höhe überschreitet, kühlt er so weit ab, dass der Taupunkt überschritten wird. Bei diesem sogenannten ‚Hebungsprozess‘ kommt es zur Auskondensierung von Wassertropfen. Dies geschieht vor allem an den in der Atmosphäre vorhandenen Aerosolen, also in der Luft enthaltene Feststoffpartikel. Die entstandenen Tropfen bündeln sich und es kommt zur Wolkenbildung (Häckel, 2021). Sobald diese Tropfen eine Mindestgröße bzw. ein Mindestgewicht erreicht haben, fallen diese in Form von Niederschlag aus der Wolke aus (Jowanowitsch, 2013). Ein Großteil des verdunsteten Wassers gelangt über den Niederschlag dabei direkt in die Ozeane zurück. Im Gegensatz zu den terrestrischen Flächen verdunstet über dem Ozean eine höhere Wassermasse, als durch Niederschläge wieder aufgenommen wird. Die Gleichung ist auf kontinentaler ebene umgekehrte. Hier verdunstet weniger Wasser als aufgenommen wird. Sobald hier der Niederschlag auf den Boden trifft, kann er mehrere Routen nehmen. Ein Teil des Wassers verdunstet und wird so als Wasserdampf wieder der Atmosphäre zugeführt (Weiler & Miegel, 2020). Dabei hat die Evapotranspiration, also das Verdunsten des Wassers durch Transpiration sowie durch Evaporation, den mengenmäßig größten Anteil am terrestrischen Wasserkreislauf (Hauck et al., 2019). Ein weiterer Teil versickert und gelangt so ins Grundwasser. Diese Art der vorübergehenden Speicherung wird durch die Verweilzeit, also der durchschnittlichen Zeit, die es braucht, bis das Wasser wieder dem Kreislauf zugeführt wird, beschrieben. Charakteristisch sind dabei 1400 Jahre für das Grundwasser. Bei Permafrostböden kann dies eine Zeit von 10.000 Jahren überschreiten (Weiler & Miegel, 2020). Der restliche Teil des Niederschlags fließt über Ströme sowie Flüsse zurück ins Meer (Jowanowitsch, 2013). Durch den Zufluss des

Niederschlags in die Ozeane schließt sich der Kreislauf und die Bilanz von Verdunstung, Niederschlag und Abfluss gleicht sich aus (Weiler & Miegel, 2020).

2.2.1. Klimatische Beeinträchtigungen des Wasserkreislaufs

Die Veränderung des Klimas hat eine starke Beeinflussung des Wasserkreislaufs zur Folge. So kommt es zu einer Veränderung von Menge und Ort des Niederschlags sowie zu einer erhöhten Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre gegenüber Wasser. Diese erhöhte Aufnahmefähigkeit der Luft bedingt stärkere Regenereignisse und Überflutungen. Neben der Erhöhung des Niederschlags ist auch davon auszugehen, dass die Intensität und die Ausdehnung von trockenen Perioden und den daraus möglicherweise entstehenden Dürren zunehmen wird (Hauck et al., 2019). Neben den Wetterextremen kommt es auch bereits heute zu einer starken Veränderung der Jahresniederschläge, was einen zusätzlichen Druck auf die Biosphäre ausübt. Auch die Kryosphäre ist von dem Wandel der klimatischen Bedingungen betroffen. Bemerkbar macht sich dies durch den Rückgang des Schneefalls in Gebieten der Nordhalbkugel. In der Antarktis konnte bis heute kein eindeutiger Rückgang des Niederschlags beobachtet werden. Neben der Menge des Schnees hat sich auch die Zeitspanne der Schneebedeckung verringert. Dies macht sich besonders an maritim geprägten kontinentalen Randgebieten bemerkbar. Auch die Lithosphäre ist durch die Erhöhung der Temperatur einem Wandel ausgesetzt. So nimmt die durchschnittliche Bodenfeuchte in den Ländern der Südhalbkugel ab. Auch der Salzgehalt der Meere (Salinität) hat in den Subtropen, durch die erhöhte Evaporation in diesen Gebieten, zugenommen. Der Anstieg des Meeresspiegels kann im Zeitraum von 1901 bis 2010 auf 19 cm berechnet werden, wobei der jährliche Anstieg weiter zunimmt. Dies kann auf die Ausdehnung des sich erwärmenden Wassers sowie auf das Abschmelzen des Polareises zurückgeführt werden. Es ist zu erkennen, dass der Klimawandel bereits heute auf alle Bereiche des Klimasystems Einfluss nimmt. (Hauck et al., 2019).

2.3. Veränderung des Klimas in Deutschland

Das Klima in Deutschland unterliegt einer hohen Variabilität. Je nachdem, ob die kontinentale heiße bzw. kalte Luft oder die maritime feuchte und milde Luft dominiert, fallen die Jahreszeiten unterschiedlich aus (Becker et al., 2022). Im Vergleich zum globalen Durchschnitt von 1,07 °C hat sich die durchschnittliche Lufttemperatur in

Deutschland seit 1881 um 1,6 °C erhöht (Stand 2021). Grund dafür ist die schnellere Temperatursteigerung terrestrischer Flächen im Vergleich zu maritimen Gebieten (Früh et al., 2021). Je nach Klima-Szenario wird die durchschnittliche Temperatur in Deutschland langfristig um 1,9 °C bis 5,3 °C steigen. Wie bereits im Kapitel „2.2. Wasserkreislauf“ beschrieben, kann eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur zu einer Verstärkung der Extremwetterereignisse in einem Gebiet führen. Die Anzahl der Tage, an denen die Lufttemperatur einen Wert von über 30 °C annimmt, hat sich seit den fünfziger Jahren von drei Tagen auf durchschnittlich zehn Tage im Jahr mehr als verdreifacht. Im Jahr 2019 wurden während des Hitzesommers an 13 Stationen Temperaturen von über 40,3 °C gemessen, wodurch der bis dato geltende Hitzerekord übertroffen wurde. Extreme Hitzesommer wie der Sommer 2019 treten heutzutage je nach Region alle zehn bis 30 Jahre auf. Dieser Statistik steht eine Auftrittswahrscheinlichkeit von einmal alle 40 bis 200 Jahre, in einem Klima-Szenario ohne Erderwärmung, gegenüber. Mit einer Reduzierung von 28 auf 16 Tage, hat die Anzahl der Eistage, also der Tage, die eine maximale Lufttemperatur von 0 °C nicht überschreiten, deutlich abgenommen. Allgemein lässt sich sagen, dass Temperaturextreme, die mit tiefen Temperaturen zu tun haben, in Deutschland deutlich abgenommen und Temperaturextreme, die mit starker Hitze verbunden sind, deutlich zugenommen haben (Becker et al., 2022). In Deutschland auftretende Dürren werden dabei in den meisten Fällen nicht nur durch das Ausbleiben von Niederschlagsereignissen herbeigeführt, sondern auch durch die erhöhte Evapotranspiration, aufgrund der höheren Temperaturen in den Sommermonaten (Riedel et al., 2021). Die Dauer solcher Dürreereignisse könnte sich bei einer Klimaerwärmung von 3 °C um 50 % erhöhen. Es gibt dabei regional starke Unterschiede. So ist beispielsweise besonders der Osten Deutschlands zukünftig von einer Erhöhung der Temperaturen betroffen. Dürren bzw. Niedrigwasser haben in Deutschland in der Vergangenheit bereits für starke ökonomische und ökologische Schäden gesorgt. Beispielsweise haben Dürren in Deutschland zu landwirtschaftlichen Ertragsverlusten von bis zu 40 % geführt. Darüber hinaus kam es zu ökonomischen Schäden durch die Einschränkungen in der Schifffahrt, der Industrie und der Trinkwasserversorgung. Ökologisch führen niedrige Wasserstände zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen in Flüssen und Seen. Bei einer Klimaerwärmung um 3 °C ist davon auszugehen, dass es zu einer dauerhaften Reduzierung der Wasserstände in Deutschland kommt. Dies betrifft auch den Grundwasserspiegel, was gravierende Folgen für die deutschen Ökosysteme hat (Thober et al., 2018). Dem gegenüber steht die

Zunahme des jährlichen Niederschlags in Deutschland um $63 \frac{1}{m^2}$ im Vergleich zum Referenzjahr 1881. Im Schnitt fallen in Deutschland $798 \frac{1}{m^2}$ Niederschlag. Dabei fällt der größere Anteil des Niederschlags in den Sommermonaten. Die Zunahme des Niederschlags fällt dabei jedoch hauptsächlich den Wintermonaten zu. Das Gebiet mit der größten Zunahme ist dabei Nordwestdeutschland mit einer relativen Zunahme in den Wintermonaten von +33 % (Becker et al., 2022). Zu dem höheren Niederschlagswert im Winter kommt die oben beschriebene Abnahme der Tage unter 0 °C. Die beiden Faktoren führen in Teilen Deutschlands zu einer Zunahme von Hochwasserereignissen, da der Niederschlag im Winter nicht schneeförmig ist, sondern als Regen auf die Oberfläche fällt (Thober et al., 2018). Generell kann aufgrund der Datenlage noch nicht vorbehaltlos von einer Zunahme der Extremniederschläge in ganz Deutschland gesprochen werden. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass in Folge des Klimawandels in Zukunft Niederschlagsereignisse intensiver, also niederschlagsreicher und großflächiger werden. Der Vollständigkeit halber muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass auch weitere extreme Wetterphänomene unter dem Einfluss der globalen Erwärmung untersucht werden. Die Veränderung von Hagel, extremen Winden und Tornados sind dabei Teil der Forschung. Die Datenlage zu diesen Wetterextremen ist jedoch noch nicht vollständig statistisch belegbar und wurde deshalb an dieser Stelle ausgeklammert. Die Betrachtung der allgemeinen Auswirkungen des Klimawandels auf Deutschland erschwert sich durch die regionalen Unterschiede. Deutschland befindet sich in der warm-gemäßigten Klimazone, wobei durch die Topografie des Landes das Klima starken regionalen Schwankungen ausgesetzt ist. Dabei spielt der Abstand zum Meer sowie die Höhe über dem Meeresspiegel für die jeweils betrachteten Gebiete eine ausschlaggebende Rolle (Becker et al., 2022). Dies sorgt dafür, dass es in Deutschland bezüglich der Temperatur ein Ost-West Gefälle gibt, welches im Laufe des Klimawandels verstärkt werden wird. Der Osten ist dabei von einer höheren Temperaturänderung betroffen als der vom maritimen Klima geprägte Westen. Bezüglich des Niederschlags wiederum bildet sich ein Nord-Süd-Gefälle aus. Im europäischen Kontext liegt Deutschland in der Mitte zwischen dem Mittelmeerraum, in dem es aufgrund des Klimawandels zu einer Verringerung des Niederschlags kommt und den skandinavischen Ländern, in denen wiederum mit einer Zunahme des Jahresniederschlags zu rechnen ist. In Deutschland ist deshalb vor allem im Norden des Landes mit einer Erhöhung des Niederschlags zu rechnen (Thober et al., 2018).

2.4. Extremwetterereignisse

Extremwetter ist nicht einheitlich definiert. Häufig wird der Begriff jedoch mit der Auftrittswahrscheinlichkeit und der Intensität der Ereignisse verbunden. Wetterlagen, die selten vorkommen und große Schäden anrichten, werden demnach als ‚extrem‘ bezeichnet (Rosenhagen & Schatzmann, 2011). Im Folgenden werden die Extremwetterereignisse Starkregen, Dürren und Hitzeperioden dargestellt. Die Auswahl dieser drei Wetterereignisse resultiert dabei aus der Relevanz für den städtischen Raum (Becker et al., 2015).

2.4.1. Starkregen

Bei der Betrachtung der Starkregenthematik ist es wichtig, die auftretenden Ereignisse zu differenzieren. Die zentralen Begriffe in diesem Zusammenhang sind Starkregen und Überflutungen. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert Starkregen als Niederschlagshöhe von mindestens 10 mm in einem Zeitraum von 60 Minuten (Kind et al., 2019). Zur quantitativen Beschreibung von Niederschlag wird oft die Einheit mm verwendet. Diese beschreibt die Wasserhöhe über der relevanten Fläche. 1 mm entspricht $1 \frac{1}{\text{m}^2}$ oder auch $1000 \frac{\text{m}^3}{\text{km}^2}$ (Wittenberg, 2011). Die Wetterlage bei Starkregen wird darüber hinaus weiter differenziert. So definiert der DWD bei einer Regenmenge von ≥ 10 mm in einer Stunde oder auch ≥ 20 mm in sechs Stunden den Starkregen als ‚markantes Wetter‘. Bei ≥ 25 mm in einer Stunde oder auch ≥ 35 mm in sechs Stunden wird der Starkregen als ‚Unwetter‘ definiert. Und bei ≥ 40 mm in einer Stunde oder auch ≥ 60 mm in sechs Stunden, wird von ‚extremem Unwetter‘ gesprochen. In der Klimaforschung werden allerdings hauptsächlich Niederschlagsdaten eines ganzen Tages verwendet. Kommt es durch Starkregen zu einem Funktionseinbruch der Kanalisation, spricht man von ‚Überflutung‘. Durch diese Überlastung kann das anfallende Regenwasser nicht mehr abgeleitet werden und es kommt zu einem ‚Überstau‘. Das anfallende Wasser verbleibt an der Oberfläche und/oder tritt in Extremfällen aus der Kanalisation wieder an die Oberfläche aus. In diesem Zusammenhang ist auch der Begriff ‚Sturzflut‘ zu nennen. Sturzfluten sind durch Starkregenereignisse ausgelöste Abflüsse, die an Orten mit starken Steigungen auftreten können. Das Wasser wird dabei nicht durch Gewässer abgeleitet, sondern fließt über Oberflächen ab. Auf dem Weg, den das Wasser bei diesem Abfluss nimmt, werden durch die große Kraft des Abflusses Erdboden und Treibgut mitgerissen. Ereignisse wie diese sind oft mit hohen

Schäden verbunden. Neben ökonomischen Schäden, die zum Beispiel durch die Überflutung von Kellern und Autos entstehen, birgt Starkregen auch starke ökologische Risiken. So kann es durch Starkregen zur Aufweichung von Böden kommen, was zu einer Destabilisierung von Bäumen und anderen Vegetationen führen kann. Dies kann das Umstürzen von Bäumen oder das Herabfallen von Ästen bedingen, was vor allem in städtischen Gebieten problematisch sein kann. Damit einher geht auch die verstärkte Bodenerosion. Durch diesen Abtrag des Oberbodens kann es vermehrt zu Hangrutschen und Schlammlawinen kommen. Auch Kontaminationen von Flüssen und Böden können eine Folge von Starkregen sein. Wenn Keller überfluten, in denen sich Heizöltanks befinden oder Autos im Wasser stehen, kann es zu einem Austritt von Öl bzw. Benzin kommen. Die austretenden Schadstoffe lagern sich dann im Boden ab oder werden in nahegelegene Fließgewässer transportiert (Kind et al., 2019).

2.4.2. Dürren und Hitzeperioden

Dürre und Niedrigwasser sind Begriffe, die eine Vielzahl an Ereignissen beschreiben, die mit Trockenheit und Wassermangel bzw. Wasserknappheit in Verbindung stehen. Der Begriff ‚Trockenheit‘ ist dabei vorerst eine subjektive Betrachtung der Abnahme bzw. der kompletten Abwesenheit des verfügbaren Wassers. Im Gegensatz dazu ist die ‚Dürre‘ eine messbare Form der Trockenheit, die sowohl auf Menschen wie auch auf Ökosysteme gravierende Auswirkungen haben kann. Dabei bezieht sich der Begriff Dürre auf die Diskrepanz zwischen dem verfügbaren Wasser und dem spezifischen Wasserbedarf von Mensch und Vegetation. Das Auftreten und die Ausprägung von Dürren werden dabei von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Dazu gehören Niederschlag, Wasserabfluss, Verdunstung bzw. Transpirationsrate, Luftfeuchte und die auftretenden Windgeschwindigkeiten (Riedel et al., 2021). Der DWD unterscheidet dabei mit der meteorologische, der landwirtschaftliche, der hydrologische und der sozioökonomische Dürre vier Arten von Dürren. Von einer ‚meteorologischen Dürre‘ ist die Rede, wenn es über einen Zeitraum von ein bis zwei Monaten überdurchschnittlich trocken ist. Die meteorologische Dürre bezieht sich dabei hauptsächlich auf das Ausbleiben von Niederschlag und die unter Umständen erhöhte Evapotranspiration (Riedel et al., 2021). In einem ungefähren Zeitraum ab zwei Monaten spricht man über eine ‚landwirtschaftliche Dürre‘ (DWD, o. D.a). Bei einer landwirtschaftlichen Dürre, also einem Ereignis, in dem in einem spezifischen Zeitraum weniger Wasser im

Erdboden enthalten ist im Vergleich zum langjährigen Mittelwert für den gleichen Zeitraum, kommt es zunächst zu einer Einschränkung des Wachstums der Vegetation. Dies kann sich jedoch bis hin zum Absterben der Pflanzen fortsetzen. Ausschlaggebend ist hierbei die Bodenfeuchte. Sinkt der Bodenwassergehalt über einen längeren Zeitraum unter einen bestimmten Grenzwert, kann dies bei Pflanzen zu Wasserstress führen (Riedel et al., 2021). Ab ungefähr vier Monaten spricht man von einer ‚hydrologischen Dürre‘ (DWD, o. D.a). Die hydrologische Dürre bezeichnet dabei eine Trockenperiode, die zu einem Absenken der Wasserstände in Seen und im Grundwasser führt. Grund ist hier die erhöhte Evaporation und der, im Gegensatz zum Zufluss, unterm Strich größere Abfluss von Wassermengen (Riedel et al., 2021). Zuletzt ist die ‚sozio-ökonomische Dürre‘ zu nennen. Diese Dürre tritt ab einem Jahr auf und hat soziale und ökonomische Auswirkungen auf die Bevölkerung der betrachteten Region (DWD, o. D.a). Eine solche Ausprägung eines Dürreereignisses hat unter anderem Einfluss auf die soziale Stabilität, den Handel sowie den Transport. Dabei liegen der meteorologischen, der landwirtschaftlichen und der hydrologische Dürre physikalisch messbare Werte zugrunde. Es ist zu betrachten, dass Niedrigwasserereignisse Teil einer normalen ökologischen Dynamik sind. Diese ökologische Dynamik wird jedoch durch den voranschreitenden Klimawandel gestört. Dürren können vielseitig negative Auswirkungen auf die Ökonomie, Ökologie und die Gesellschaft haben. So kann es zu Einschränkungen bei der Trinkwasserversorgung, Ernteaussfällen, Waldbränden und zu Beschränkungen beim Transport kommen (Riedel et al., 2021). Abgrenzend von Dürren muss man ‚Hitzeperioden‘, oder auch ‚Hitzewellen‘ genannt, als alleinstehende Wetterphänomene betrachten. Diese klare Linie zwischen Dürren und Hitzeperioden wird aufgrund des häufig zeitgleichen Auftretens oft nicht gezogen. Eine einheitliche Definition von ‚Hitze‘ und somit auch von den verwandten Begriffen Hitzeperiode und Hitzewelle gibt es in der Fachliteratur nicht (Riedel et al., 2021). Der DWD definiert eine Hitzewelle als „eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlicher thermischer Belastung“ (DWD, o. D.b). Der Begriff Hitze ist dabei bezogen auf eine individuelle Wahrnehmung der Temperatur (Riedel et al., 2021). Für die persönliche Empfindung von Hitze ist dabei die Lufttemperatur kein alleinstehender Wert. Vielmehr setzt sich Hitze aus der Lufttemperatur, der Strahlung, dem Wind und der Luftfeuchtigkeit zusammen. Aus diesen Parametern lässt sich die ‚gefühlte Temperatur‘ ableiten. Sobald die gefühlte Temperatur den Wert von 32 °C überschreitet, spricht man von einer ‚starken Wärmebelastung‘. Ab einer gefühlten Temperatur von 38 °C spricht

man von einer ‚extremen Wärmebelastung‘ (DWD, o. D.b). International wird häufig der ‚Universal Thermal Climate Index‘ (UTCI), zu Deutsch ‚universeller thermischer Klimaindex‘, verwendet, um eine einheitliche Aussage über die Wärmebelastung auf den Menschen geben zu können. Der UTCI ähnelt dabei der gefühlten Temperatur (Sieker et al., 2019). Die Berechnung des UTCI beruht auf einem Modell der Thermoregulation sowie auf einem Bekleidungsmodell. Zudem gehen die meteorologischen Werte Lufttemperatur, Strahlung, Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit mit in die Berechnung ein. Dabei gibt es analog zur gefühlten Temperatur Wärmebelastungskategorien. In der zehnstufigen Skala wird beispielsweise bei einem UTCI von 9 °C bis 26 °C von keinem thermalen Stress ausgegangen und bei einem UTCI von 32 °C – 38 °C von einer starken Hitzebelastung (Krüger, 2021). Es ist davon auszugehen, dass extreme Hitzewellen aufgrund des Klimawandels in Deutschland in Zukunft zunehmen werden. Es zeigt sich bereits heute ein Trend zu immer extremeren, längeren und häufiger auftretenden Hitzewellen (Bach et al., 2013). So hat sich z. B. die Dauer sommerlicher Hitzewellen in Westeuropa im Vergleich zum vorindustriellen Stand verdreifacht (Brasseur et al., 2017).

2.5. Klima in der Stadt

Rund 90 % der Bevölkerung in Deutschland lebt in Klein-, Mittel-, oder Großstädten. Dabei verteilt sich die Bevölkerung zu annähernd gleichen Teilen auf diese drei Stadttypen. Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung definiert dabei Kleinstädte als Gemeinden zwischen 5000 bis 20.000 Einwohnern, Mittelstädte als Gemeinden mit 20.000 bis 100.000 Einwohnern und Großstädte als Gemeinden mit über 100.000 Einwohnern (Eltgers et al., 2018). Dabei fällt Städten im Kontext des Klimawandels eine besonders zentrale, jedoch auch ambivalente Rolle zu. Auf der einen Seite sind Städte durch die Industrie, den Verkehr und den Konsum für einen Großteil der landesweiten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich. Städte nehmen dabei lediglich 14 % der Landfläche in Deutschland ein (Baum et al., 2021). Auf der anderen Seite sind Städte besonders vulnerabel gegenüber den klimatischen Veränderungen und den damit einhergehenden Wetterextremen. Zentral sind hierbei stärkere Niederschläge, Dürren sowie anhaltende Hitzeperioden. Diese hängen alle mit dem städtischen Wassermanagement zusammen (Müller et al., 2023). Ob und wie groß die negativen Auswirkungen der Wetterextreme in einer Stadt sein werden, ist dabei von

einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Entscheidend sind dabei allerdings vor allem die Größe sowie der Versiegelungsgrad der betrachteten Stadt. So sind beispielsweise besonders Großstädte vom Sogenannten ‚Hitzeinseleffekt‘ betroffen. Von einer Hitzeinsel, im englischen ‚Urban Heat Island‘ spricht man, wenn sich die Temperatur eines urbanen Gebiets maßgeblich von der des Umlandes unterscheidet (Henninger et al., 2011). Durch die schlechte Durchlüftung sowie die geringe Verdunstung aufgrund des geringen Anteils von städtischen Grünflächen heizen sich die Gebäude und versiegelten Flächen tagsüber stark auf. Dies führt zu einer um bis zu vier Grad höheren Temperatur, im Vergleich zum Umland. Der Hitzeinseleffekt ist jedoch nachts am stärksten ausgeprägt. Dies liegt an der Wärmespeicherkapazität der verwendeten Baumaterialien. Diese nehmen die Wärme tagsüber auf und geben sie nachts wieder ab. In Extremfällen kann dies zu einer Erhöhung der Temperatur um 10 °C führen, was das Auftreten von Tropennächten begünstigt (Brasche et al., 2020). Das Ausbleiben der nächtlichen Abkühlung bedeutet in vielen Fällen eine zusätzliche hitzebedingte Belastung der in der Stadt wohnenden Menschen. Die durch die erhöhte Temperatur verminderte nächtliche Erholung kann starke negative Einflüsse auf die menschliche Gesundheit mit sich bringen (Baum et al., 2021). Dieser Sachverhalt ist bereits ohne den Klimawandel stark ausgeprägt und wird sich vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung noch verschärfen. Neben der dichten Bebauung bedingt auch das Ausbleiben der sogenannte Verdunstungskühlung eine starke Überwärmung von städtischen Gebieten. Städte zeichnen sich häufig durch einen hohen Anteil an versiegelten und einem geringen Anteil an begrünteten Flächen aus. Gerade im Sommer haben jedoch städtische Begrünungen das Potenzial, durch die Verdunstung an der Blattoberfläche maßgeblich zu einer Kühlung der umliegenden Luftschichten zu führen. Bei dem Übergang des Wassers von der flüssigen zur gasförmigen Phase wird der Umgebung Energie in Form von Wärme entzogen, was zu einer Abkühlung der umgebenden Luft führt (Sieker et al., 2019). Die in städtischen Bebauungen häufig dunklen Materialien weisen eine sehr niedrige Albedo-Wirkung auf. Albedo ist dabei das Maß der Rückstrahlungsfähigkeit von Strahlung bei einer betrachteten Oberfläche. In Städten ist dieser Wert im Schnitt gering und führt so zu einem erhöhten Energieeintrag und somit zu einer erhöhten Temperatur (Becker et al., 2015). Neben der Überwärmung führt der hohe Versiegelungsgrad in Städten auch zu einer größeren Anfälligkeit gegenüber Überflutungen. Der anfallende Niederschlag wird nicht wie auf natürlichen Flächen zurückgehalten und kann versickern, sondern bahnt sich den schnellsten Weg über die Oberfläche in Richtung

der zentralen Regenwasserableitung. Sobald die Kanalisation den anfallenden Regen nicht mehr ableiten kann, kommt es zum Funktionseinbruch dieser, wobei die Folgen von kleineren Wasseranlagerungen bis hin zu überfluteten Kellern und U-Bahnschächten reichen können (Henninger et al., 2011). Diese in Deutschland aktuell noch dem Stand der Dinge entsprechende Art der RWB, birgt vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit einhergehenden Zuspitzung von Starkregenereignissen einige Gefahren. Besonders Städte, welche bis dato nicht viel Erfahrung mit Hochwassern haben, könnten zukünftig von der negativen Entwicklung betroffen sein. Dies sind zu meist kleinere Städte mit kleinen Vorflutern (Kind et al., 2019). In Großstädten kommt es durch den erhöhten Aerosolgehalt der darüber liegenden Atmosphäre, zu stärkeren Niederschlägen (Häckel, 2021). Wie bereits erwähnt ist die Entstehung von Wassertropfen und das daraus resultierende Entstehen von Niederschlag maßgeblich vom Aerosolgehalt der Atmosphäre abhängig (vgl. 2.2. Kapitel Wasserkreislauf). Neben der Erhöhung von Niederschlagswerten werden sich Städte in Zukunft allerdings auch an das Ausbleiben von Niederschlag anpassen müssen. Die Ausbildung von Dürren in den Sommermonaten hat bereits in der Vergangenheit zu ökonomischen und ökologischen Schäden in deutschen Städten geführt, wobei Dürren in Extremfällen über 10 Monate andauert haben (Riedel et al., 2021).

2.6. Regenwasserbewirtschaftung

Die heutzutage am weitesten verbreitete Methode im Umgang mit Regenwasser ist die zentrale Regenwasserableitung. Die zentrale Regenwasserableitung ist dabei so ausgelegt, das anfallende Regenwasser möglichst schnell abzutransportieren und gegebenenfalls an den nächstgelegenen Vorfluter abzugeben. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Systeme, das Misch- und das Trennsystem. Beim Mischsystem wird das anfallende Regenwasser mit dem anfallenden Schmutzwasser aus Haushalten und Industrie gemeinsam über die Kanalisation zur nächstgelegenen Kläranlage transportiert. Das Trennsystem besteht aus zwei Kanalnetzen, die die beiden Wasserströme getrennt voneinander transportieren. Bei beiden Systemen treten dabei bei starken Niederschlägen Probleme auf. In der Mischkanalisation kommt es bei Starkregen durch die anfallende Wassermenge zu einer erheblichen hydraulischen Belastung der Kläranlage. Im Extremfall muss das Regenwasser mit dem Schmutzwasser verdünnt, aber unbehandelt in ein Gewässer eingeleitet werden. Bei der Trennkanalisation wird das Regenwasser

entweder behandelt, kurzfristig zurückgehalten oder direkt in das nächste Gewässer eingeleitet. Da Regenwasser heutzutage vermehrt von Straßenflächen, Häuserfassaden oder Industriegebieten abgeleitet wird, sammeln sich Verunreinigungen und Schadstoffe im Regenwasser an, was zu einer erheblichen Belastung der Gewässer führen kann (Arle et al., 2017). Neben der hydraulischen Belastung führt die konventionelle Regenwasserableitung auch zu einer deutlichen Verschiebung der natürlichen Wasserbilanz. Auf natürlichen Flächen wird mit rund zehn bis 20 % nur ein geringer Anteil des anfallenden Regenwassers abgeleitet. Zehn bis 30 % versickern und werden so in das Grundwasser und die Fließgewässer überführt. Mit 50 % bis 80 % verdunstet der Großteil des anfallenden Regenwassers an Wasseroberflächen und Pflanzen. Dabei variiert die natürliche Wasserbilanz an verschiedenen Standorten aufgrund der Untergrundbeschaffenheit und Topografie. In städtischen Gebieten werden im Schnitt 70 % abgeleitet, zehn Prozent versickern und 20 % verdunsten. Dies kann zu niedrigeren Grundwasserständen und zu einer erhöhten Aufheizung von Innenstädten führen (Müller et al., 2023). Wie bereits erwähnt, wird es in Zukunft in Deutschland vermehrt zu Starkregen und damit auch zu Überflutungen in städtischen Gebieten kommen. Die zentrale Regenwasserableitung wird dabei zumeist so dimensioniert, dass sie einem alle zwei bis fünf Jahre auftretenden Starkregenereignis standhält. Bei Regenereignissen, die über diese Bemessung hinausgehen, ist mit Überschwemmungen zu rechnen. Technisch gesehen ist die Dimensionierung für stärkere Regenereignisse zwar möglich, jedoch ist eine Umsetzung aus ökonomischen Gründen kaum realisierbar (Becker et al., 2015). Als Teil der Lösung für die oben genannten Probleme hat sich in den vergangenen Jahren die dRWB immer weiter durchgesetzt. Im Gegensatz zur herkömmlichen und damit zentralen Bewirtschaftung des anfallenden Regenwassers, wird mittels dRWB auf einen ortsnahen und kleinteiligeren Umgang mit Niederschlagswasser gesetzt (Müller et al., 2023). Die dRWB beruht dabei auf sechs Teilaspekten. Der Nutzung, der Versickerung, der Verdunstung, der Rückhaltung, der Behandlung und der gedrosselten Ableitung des Regenwassers. Diese werden dabei je nach Bedarf und Standort variiert. So kann es zum Beispiel in Innenstädten sinnvoll sein, eine erhöhte Verdunstungsrate anzustreben, um eine Kühlung der Umgebungsluft herbeizuführen (Sieker, o. D.b). Die Maßnahmen zur dRWB sind vielfältig. Mittels einer Zisterne beispielsweise lässt sich Regenwasser speichern und im häuslichen Gebrauch, wie der Toilettenspülung, verwenden. Das Speichern von Regenwasser kann allerdings auch im größeren Maßstab zu einer Entlastung des Abwassernetzes führen.

Durch die vorübergehende Speicherung in Retentionsspeichern kann Wasser zeitverzögert in einen Vorfluter abgegeben werden, um so hydrologische Spitzenlasten aufzufangen und so die Kanalisation zu entlasten. Ein weiterer zentraler Bestandteil der dRWB ist die Entsiegelung. Die Entsiegelung bietet dabei eine Möglichkeit, die natürliche Wasserbilanz auf einer gegebenen Fläche wiederherzustellen. Die Maßnahmen können dabei vom Abriss alter Gebäude bis hin zur Anlegung von Parkanlagen, Grünflächen oder auch künstlichen Wasserflächen reichen. Auch die Teilentsiegelung durch die Implementierung von durchlässigen Straßenbelägen kann einen Einfluss auf die Wasserbilanz haben (BSW, 2006). Auch Dachbegrünungen können den Anteil der versiegelten Flächen ausgleichen. Dabei können diese entweder intensiv oder extensiv realisiert werden. Bei der extensiven Dachbegrünung muss im Regelfall nicht zusätzliche gedüngt und gewässert werden. Jedoch wird diese Art der Dachfläche in der Regel nicht als zusätzliche Wohnfläche (Dachterrasse) genutzt. Die Bepflanzung ist einfacher gehalten als bei der intensiven Dachbegrünung, was zu einer verringerten Aufnahmefähigkeit von Regenwasser führt. Die intensive Dachbegrünung hingegen hat eine deutliche höhere Aufnahmefähigkeit und wird teilweise mit Bäumen und großen Gewächsen realisiert. Diese Art der Begrünung ist allerdings pflegeintensiver. Neben der Begrünung von Dächern gibt es auch die Fassadenbegrünung. Dabei werden Häuserfassaden mittels Kletterpflanzen versehen, die teils ganze Wände bedecken können. Auch diese haben das Potenzial durch Verschattung und Verdunstung einen erheblichen Teil zur Kühlung von Städten beizutragen (Matzinger et al., 2017). Eine Form der multifunktionalen Regenwasserbewirtschaftung ist die sogenannte Versickerungsanlage. Diese ist darauf ausgelegt, anfallenden Niederschlag vollständig zu versickern oder stark gedrosselt und auf ein Minimum begrenzt abzuleiten. Die Maßnahmen, die bereits heute eingesetzt werden, sind sehr unterschiedlich und von mehreren Standortfaktoren und dem verfügbaren Platz abhängig. Zudem ist zu klären, inwieweit die anfallenden Regenabflüsse mit Schadstoffen belastet sind. Im Gegensatz zur herkömmlichen Regenableitung können mittels einer Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahme (RWB) Schadstoffe, ohne die Mitwirkung einer Kläranlage, aus dem Regenwasser abgeschieden werden. Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, ist die Reinigung mittels einer belebten Bodenzone. Diese begrünte Schicht kann bei der Infiltration von Regenwasser Partikel abscheiden, welche von den im Boden lebenden Mikroorganismen abgebaut werden. Die etabliertesten Versickerungsmethoden in Deutschland sind die Flächenversickerung, die Muldenversickerung, die Rigolenversickerung sowie die

Mulden-Rigolenversickerung (BSW, 2006). Des Weiteren haben sich in den vergangenen Jahren auch neue Systeme durchgesetzt, zu denen unter anderem die Tiefbeet-Rigolenversickerung und die Versickerung mittels Baumrigolen zählt. Je nach verwendeter Anlage gibt es Unterschiede in der Verdunstungsleistung, der Rückhalteleistung, der Versickerungsleistung, der Reinigungsleistung und des Abflusses. So haben beispielsweise Versickerungsmulden ein hohes Potenzial anfallende Schadstoffe zu filtern, wohingegen Baumrigolen zu einer erhöhten Verdunstung beitragen können (IGS, 2018). Im Kontext der dRWB wird oft auf eine Kombination verschiedener Maßnahmen gesetzt. Unter dem Begriff ‚Schwammstadt‘ versteht man die wassersensible Stadtentwicklung, wobei die Stadt wie ein Schwamm fungieren soll. Durch einen hohen Anteil an unversiegelten und versickerungsfähigen Flächen soll während niederschlagsreicher Perioden Wasser gespeichert und in das Grundwasser geführt werden. Dieses Wasser soll dann während Trockenperioden die Entstehung von Dürren und den Hitzestress abmildern (Hansen et al., 2018). Auch der Begriff blau-grüne Infrastruktur ist zentral im Kontext der dRWB. Blau-grüne Infrastruktur wird dabei definiert als „Naturnahe dezentrale Technologien zur Retention, Speicherung, Versickerung, Behandlung und Verwendung (Evapotranspiration) von Niederschlagswasser“ (Müller et al., 2023, S. 15). Die Begrifflichkeit ‚naturnah‘ bezieht sich dabei auf Maßnahmen, die an die Natur angelegt sind. In diesem Zusammenhang wird der Begriff mit dem naturnahen Wasserhaushalt, also dem oben beschriebenen natürlichen Wasserhaushalt, in Verbindung gebracht. Die Anlagen sind dementsprechend auf eine Wiederherstellung der natürlichen Wasserbilanz ausgelegt (Müller et al., 2023). Im Kontext der dRWB ist auch der Begriff ‚Kaskadenprinzip‘ von zentraler Bedeutung. Dabei handelt es sich um die stufenweise Behandlung von Regenwasser im öffentlichen und privaten Raum. So werden beispielsweise Niederschläge zunächst auf einem Gründach gespeichert und verdunstet. Sobald das maximale Retentionsvolumen der Dachbegrünung erreicht ist, fließt das Regenwasser über Leitungen in eine Versickerungsanlage oder in ein offenes Gewässer. Die realisierbaren Kaskadensysteme variieren dabei in der Art sowie in der Anzahl der einzelnen Stufen. Über diese Kombination einzelner RWBM wird die Realisierung eines speziell auf die vorherrschenden Bedingungen angepassten Bewirtschaftungssystems möglich (Sieker et al., 2019).

2.7. Politische Rahmenbedingungen und technische Normen

Die für die dRWB zentralen Regelungen sind in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG) (WRRL) und der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (Richtlinie 2007/60/EG) (HRWM-RL) festgelegt. Beide sind mit dem Wasserhaushaltgesetz (WHG) in nationales Recht umgewandelt worden. Das WHG wurde mittels verschiedener Verordnungen konkretisiert. Hierzu gehören die Abwasserverordnung, die Grundwasserverordnung und die Oberflächengewässer-Verordnung. Neben dem WHG legt auch das Bodenschutzgesetz Richtlinien für den Bodenwasserhaushalt vor (Sieker, o. D.c). Mit der WRRL wurde eine Grundlage für den Schutz und den Erhalt europäischer Gewässer geschaffen. Ziel der WRRL ist die Herstellung eines guten Gewässerzustandes aller Oberflächen-, Küsten- und Übergangsgewässer sowie des Grundwassers. Die Aufgaben für die Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU), die durch die WRRL formuliert sind, beinhalten eine Bestandsaufnahme der Gewässer unter ökologischen, wasserwirtschaftlichen und ökonomischen Gesichtspunkten. Weitere Aufgaben sind die fortwährende Überwachung dieser Zustände und die Formulierung sowie die Umsetzung von Maßnahmen zum Erreichen eines guten Gewässerzustandes (Richtlinie 2000/60/EG, 2000). Das Ziel der 2007 veröffentlichten HRWM-RL ist es, Hochwasserrisiken zu verringern und gleichzeitig die Folgen von Hochwasser auf Menschen, Umwelt, Kulturerbe und die Wirtschaft gering zu halten. Auch hierbei haben die Mitgliedstaaten der EU zunächst die Aufgabe, eine Bestandsaufnahme der Hochwasserrisikogebiete zu erstellen und danach Ziele und Pläne zu formulieren, wie diese angepasst werden können (Richtlinie 2007/60/EG, 2007). Die rechtlich verpflichtende Grundlage für die Planung von RWBM bildet das WHG. Dies resultiert aus der Tatsache, dass RWBM den Wasserhaushalt beeinflussen. Das Gesetz stammt ursprünglich aus dem Jahr 1957 und wurde im Rahmen der Veröffentlichung der WRRL 2002 vollständig überarbeitet (BMUV, o. D.). Zentrale Ziele sind dabei, wie aus den EU-Richtlinien abzuleiten ist, der Schutz der Gewässer sowie die Anpassung an und die Prävention von Hochwasserereignissen. Dabei werden im WHG spezifische Anforderungen an die Einleitung und die Beseitigung von Abwässern gestellt. Auch Anforderungen an den Bau und den Betrieb von Abwasseranlagen sind in dem Gesetz festgelegt. Nach dem WHG ist dabei auch von Abwasser zu sprechen, wenn Wasser von bebauten und/oder befestigten Flächen abfließt (§54 Abs. 1 S. 2 WHG). Darüber hinaus wird spezifisch darauf hingewiesen,

dass es vorzuziehen ist, Niederschlagswasser zu versickern und zu verrieseln und nicht mittels Mischkanalisation abzuleiten (§55 Abs. 2 WHG). Neben den politischen Richtlinien spielen technische Normen eine wichtige Rolle bei der Umsetzung von RWBM. Dabei gibt es eine Reihe an Institutionen, welche Regelwerke, Arbeitsblätter und Merkblätter bezüglich der dRWB erarbeiten und veröffentlichen. Dazu gehören unter anderem die Deutsche Vereinigung Wasser und Abfall (DWA), das Deutsche Institut für Normung (DIN), die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) und die Forschungsgesellschaft Landesentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL). Die Richtlinien geben dabei für eine Vielzahl von Anwendungen der dRWB Normen und Richtlinien vor und werden unter anderen in Verordnungen zitiert (Sieker, o. D.d). Zentral für diese Arbeit sind dabei die Arbeits- und Merkblätter der DWA. So gibt die DWA-A 138-1 Anforderungen und vereinfachte Bemessungsmöglichkeiten für die Dimensionierung von Versickerungsanlagen vor (DWA-A 138-1, 2020). In der DWA-A 100 wird darüber hinaus das Ziel formuliert, den natürlichen Wasserhaushalt beizubehalten, soweit es ökologisch, wirtschaftlich und technisch möglich ist (DWA-A 100, 2006).

3. Methoden

Das folgende Kapitel widmet sich dem methodischen Vorgehen zur Erstellung dieser Bachelorarbeit. Im ersten Unterkapitel werden die Forschungsfragen und die Zielstellung aufgeführt. Daraufhin folgt eine Erläuterung bezüglich des Vorgehens bei der Literatursuche und eine Beschreibung der im Fallbeispiel 4.4. verwendeten Softwares zur Erstellung einer RWBM in der Stadthäger Innenstadt.

3.1. Forschungsfrage und Zielstellung

Das Thema dieser Arbeit ist die dRWB und ihr Potenzial, die klimatischen Stressfaktoren in Städten zu reduzieren. Die bereits in der Einleitung vorgestellte Hauptfragestellung lautet: *„Welche Potenziale eröffnet die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung zur Bewältigung gegenwärtiger und zukünftiger Herausforderungen im städtischen Wasserhaushalt?“*

Des Weiteren werden folgende Fragestellungen im Laufe der Arbeit behandelt, um zur Beantwortung der Hauptfrage beizutragen.

- Wie lässt sich die dRWB in städtischen Gebieten umsetzen?
 - Welche konkreten Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen gibt es und wie wurden diese in den Projekten umgesetzt?
 - Welche Standortfaktoren sind maßgeblich für die Implementierung von RWBM?
- Welchen Einfluss haben die Maßnahmen der dRWB auf den Wasserhaushalt des betrachteten Referenzgebiets und wie verändert sich das vorherrschende Mikroklima?
- Wie kann die zentrale Regenwasserableitung durch die Verwendung dezentraler Lösungen entlastet werden?
- Welche Rolle kann die dRWB bei der Prävention von Überflutungen spielen?

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, die genannten Fragestellungen zu beantworten und einen Ausblick auf die zukünftige Rolle der dRWB zu geben. Hierzu werden die Ergebnisse der Beispielprojekte sowie weiterführende Informationen aus der Fachliteratur analysiert.

3.2. Literaturarbeit

Für die Erstellung dieser Arbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Begonnen wurde mit einer Websuche bei Google, um einen ersten Eindruck von dem Thema zu erhalten. Hier wurde zunächst in den Fokus gestellt, ob es nützliche Projekte gibt, welche als Beispiele in dieser Arbeit herangezogen werden könnten. Für die Websuche bei Google wurde die Wortkombination „Klimaresiliente Städte“ genutzt. Diese Sucheinstellung ergab mit dem Suchfilter „wortwörtlich“ 32.300 Ergebnisse. Hier wurde anhand der Überschriften und Webseitenhalter eingegrenzt und nur relevante Seiten näher betrachtet, um passende Projekte zu finden. Beispielsweise wurde die Seite des Umweltbundesamtes (UBA) genutzt, welche Fachinformationen und weiterführende Literatur zu dem Thema beinhaltet. So konnte das Projekte ‚Hannover-Kronsberg‘ identifiziert werden, welches in dieser Arbeit aufgeführt wird. Die Google Suche „Kronsberg Hannover“ ergab 351.000 Ergebnisse. Genaue Daten sowie Ablaufpläne und Konzepte sind auf der offiziellen Webseite der Stadt Hannover veröffentlicht. Dazu gehören neben dem Planungshandbuch der Siedlung auch das realisierte Wasserkonzept der Neubausiedlung Kronsberg (Rumming et al., 2004; Altevers

et al., o. D.). Anhand des Projektes konnten zentrale Aspekte der klimaresilienten Stadtentwicklung abgeleitet werden, zu denen auch das Regenwassermanagement gehört. Die Schlagwortsuche mittels UBA ergab mit dem Filter „Publikationen“ für das Wort „Regenwassermanagement“ 72 Ergebnisse. Aus den Publikationen konnten weitere zentrale Schlagwörter, wie beispielsweise Regenwasserbewirtschaftung, abgeleitet werden (Müller et al., 2023). Die Schlagwortsuche „Regenwasserbewirtschaftung“, welche mit dem Filter „wörtlich“ bei Google 114.000 Ergebnisse hervorbringt, zeigt als drittes Ergebnis die Webseite „Sieker.de“. Diese Seite behandelt einen Großteil der Themen, die zu einem umfänglichen Verständnis des Themas ‚dezentrale Regenwasserbewirtschaftung‘ führen. Dabei wird auf Publikationen hingewiesen, welche mit der Firma sowie mit dem namensgebenden Prof. Dr. Sieker ausgearbeitet wurden. Kooperationspartner waren dabei unter anderem das UBA und die Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (IGS, 2018; Sieker et al., 2019). Über die Seite der Berliner Senatsverwaltung wurden die beiden Projekte ‚Berlin Adlershof‘ und ‚Berlin Potsdamer Platz‘ gefunden. Der auf der Internetseite veröffentlichte „ökologische Stadtplan“ bietet einen Überblick sowie weiterführende Informationen über stadtökologische Projekte, die in der Hauptstadt realisiert wurden. Zur Erstellung der Fallbeispiele wurde neben den im Internet zugänglichen Quellen auch auf Videos der Plattform Bildungsmodule für Klimaresiliente Architektur (BiMoKA) zurückgegriffen (Bimoka, 2020a; Bimoka, 2020b). Mittels dieser Recherche und den Fallbeispielen konnte das Thema eingegrenzt und auf die dRWB festgelegt werden. In Tabelle 1 ist eine Auswahl von Schlagwortkombinationen zum Thema inklusive der verwendeten Webseiten und der Anzahl der Ergebnisse dargestellt. Zudem ist die Anzahl der tatsächlich verwendeten Dokumente abgebildet. Neben den Webseiten des UBA und Google wurde auch Google Scholar (GS), der DWD und der Katalog der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAWK) verwendet.

Tabelle 1 Ergebnisse der Schlagwortsuche (eigene Darstellung)

Webseite	Schlagwortkombination	Anzahl der Ergebnisse	Auswahl
UBA	Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung	98	3
UBA	Schwammstadt	69	1

HAWK	Klimawandel	1331	4
HAWK	Wasserkreislauf	139	3
HAWK	Ökologie	2855	1
GS	UTCI	7690	1
DWD	Niederschlag	3905	3

Auch Quellen aus dem politischen Prozess waren Teil der Recherche, beispielsweise die WRRL und das WHG. Die benötigten Normen und Richtlinien wurden der Sekundärliteratur entnommen. Auf erfolgreiche Anfrage an das DWA liegt eine Kopie der DWA-M 102-4 in Papierform vor. Des Weiteren wurde die für die Erstellung des Fallbeispiels 4.4. verwendete Bodenanalyse der Stadthäger Innenstadt auf Anfrage an die Stadthäger Baufirma Schweerbau GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt. Diese wurde durch das Ingenieurbüro Dr. Moll im Jahr 2020 im Auftrag der Firma Schweerbau GmbH & Co. KG durchgeführt.

3.3. Software

In der Literatur zum Thema dRWB wird in vielen Fällen bei der Bemessung und Planung von Versickerungsanlagen die Software STORM.SIM der Firma Innoaqua verwendet (Matzinger et al., 2017). Auf Anfrage und nach Zusenden des für diese Arbeit angefertigten Exposees wurde eine dreimonatige Studentenlizenz zur Verfügung gestellt. Der E-Mail-Verlauf ist in Anhang 1 dargestellt. Für die Untersuchung des entstehenden Mikroklimas werden in der Literatur verschiedene Softwarelösungen verwendet (Sieker et al., 2019; Matzinger et al., 2017). Die Firma ENVI-met bietet mit der gleichnamigen Software ein Produkt an, welches sich besonders für die Implementierung von Begrünungen im städtischen Raum eignet (ENVI-met, 2023a). Auf Anfrage an die Firma wurde auch hier eine dreimonatige Studentenlizenz zur Verfügung gestellt. Der E-Mail-verlauf ist in Anhang 2 dargestellt.

3.3.1. STORM.Sim

STORM.Sim ist eine Simulationssoftware, die eine Dimensionierung von RWBM ermöglicht. Die Software greift dabei unter anderem auf KOSTRA Daten, Daten vom Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD) sowie auf OpenStreetMap Daten zurück (InnoAqua, o. D.). KOSTRA steht dabei für ‚Koordinierte

Starkniederschlagsregionalisierung und -Auswertung'. Diese vom DWD erarbeiteten Datensätze geben Aufschluss über die Niederschlagshöhe und die Niederschlags-spende von Regenereignissen in Deutschland, in Abhängigkeit von der Dauerstufe und der Wiederkehrzeit. Die Regenspende ist die abzuleitende Niederschlagsmenge einer bestimmten Fläche in einer bestimmten Zeit. Die Dauerstufe ist ein ausgewählter Zeitabschnitt, in dem Niederschlag fällt. Die Wiederkehrzeit ist eine statistische Größe, die angibt, in welcher mittleren Zeitspanne davon auszugehen ist, dass ein bestimmtes Niederschlagsereignis einmal auftritt. Anhand dieser Parameter können Aussagen über die Wahrscheinlichkeit und die Intensität von Starkregenereignissen getroffen werden. Der aktuelle Datensatz ist der KOSTRA-DWD-2020 (Junghänel et al., 2023). Der im Programm verwendete HAD ist ein Gemeinschaftsprojekt verschiedener Behörden, Institute sowie Länder. Er gibt unter anderem Auskunft über Hydrometeorologie, das Grundwasser, den Wasserhaushalt und oberirdische Gewässer (BfG, 2021). Neben Daten sind in STORM.Sim auch Berechnungsformeln hinterlegt. Zentral sind hierbei die Formeln nach DWA 138-1 und DWA-M 102-4 (InnoAqua, o. D.). Das Arbeitsblatt DWA 138-1 gibt dabei Informationen und Vorschriften für den Bau, den Betrieb und die Instandhaltung von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen sowie Berechnungsformeln, die zur Vordimensionierung von RWBM genutzt werden können (DWA-A 138-1, 2020). Im Merkblatt DWA-M 102-4 sind Berechnungsformeln zur Ermittlung des mittleren jährlichen Wasserhaushalts von bebauten Gebieten gegeben. Somit ist es ein zentrales Element zur Umsetzung eines naturnahen Regenwassermanagements. Die Berechnungen beruhen auf Aufteilungswerten vom Abfluss, der Grundwasserneubildung und der Verdunstung spezifischer Flächen bei einem bekannten Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) (DWA-M 102-4, 2022). Der k_f Wert ist bei der Auswahl einer RWBM entscheidend. Der Wert beschreibt in quantitativer sowie in qualitativer Hinsicht die Durchlässigkeit eines Bodens. Angegeben in $\frac{m}{s}$ hängt die Höhe des Wertes von der Lagerungsdichte und der Korngröße, des im Boden vorkommenden Sediments, ab. Kies ist mit einem k_f Wert von größer $1 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$ sehr gut durchlässig, wohingegen tonige Böden mit einem k_f Wert von kleiner $1 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$ sehr undurchlässig sind (BSW, 2006). Für die Erstellung der RWBM werden einige Annahmen getroffen. Das Thema der Bemessung ist äußerst komplex und ohne Vereinfachungen, im Rahmen einer Bachelorarbeit, nicht umzusetzen. Zunächst handelt es sich um eine Dimensionierung und Integrierung einer Maßnahme im Bestand. Dabei wird davon

ausgegangen, dass die auf der bemessenen Fläche anfallenden Abflüsse auch zu der RBWM gelangen. Der nötige Umbau des vorliegenden Straßenablaufs wird nicht berücksichtigt bzw. dimensioniert (Nowak, 2019). Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Verschmutzungsgrad des anfallenden Regenwassers eine dezentrale Bewirtschaftung zulässt. Der Grundwasserschutz wird als gegeben angenommen. Dies stützt sich auf die qualitative Bewertungsmatrix der Hamburger Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, wonach auf ‚nicht ständig parkierte Hof- bzw. Gewerbeflächen‘ die Integrierung einer Muldenversickerung als tolerierbar einzuschätzen ist (BSW, 2006). Die Dimensionierung der Maßnahme basiert auf der Berechnungsformel nach DWA-A 138-1. Dies ist gegenüber der Berechnung mittels einer Langzeitanalyse der Regendaten eine vereinfachte Methode (DWA-A 138-1, 2020). Überdies wurde kein Überflutungsnachweis nach DIN 1986 durchgeführt. Nach DIN 1986 sind Entwässerungsanlagen so zu dimensionieren, dass bei einer unplanmäßigen Überflutung genügend Schutz gegeben ist. Der Überflutungsnachweis bezieht sich neben der RWBM auch auf die umliegenden Freiflächen. Ein Überflutungsnachweis ist dabei nicht, wie die Bemessung der RWBM, auf eine Jährlichkeit von ein bis fünf Jahre ausgelegt, sondern auf zehn bis 30 Jahre (DIN 1986-100, 2016). Die verwendeten Werte und Abmessungen für die Versickerungsanlage sind in Kapitel „4.4. Dezentrale Straßenentwässerung des Stadthäger Marktplatzes“ dargelegt.

3.3.2. ENVI-met

Im Fallbeispiel 4.4. wird neben STORM.Sim auch das Programm ENVI-met verwendet. ENVI-met wurde dabei von der gleichnamigen Firma ENVI-met GmbH entwickelt. ENVI-met bietet die Möglichkeit, mittels Simulationen die mikroklimatischen Verhältnisse eines selbst gewählten Referenzgebietes zu analysieren. Dabei gehen eine Vielzahl von Einflussfaktoren in die Berechnung mit ein. Dazu gehören Langwellige Strahlung, kurzwellige Strahlung, die Wärmeleitfähigkeit von Gebäuden, Wärmeaustausche mit der Erdoberfläche und durch Vegetation ausgelöste Beschattungen und Verdunstungen. Weitere zentrale Berechnungsparameter sind die vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen, zu denen unter anderem Windverhältnisse, Temperatur und Luftfeuchtigkeit gehören. ENVI-met wird dabei häufig für die Untersuchung von den Einflüssen von urbanem Grün auf das Mikroklima verwendet. Dies resultiert aus der Tatsache, dass es mit ENVI-met möglich ist, eine Vielzahl an Begrünungen wie

beispielsweise Fassadenbegrünungen, Dachbegrünungen, aber auch Rasenflächen sowie spezifische Bäume wie Ulme, Buche, Eiche etc., in die Simulation zu integrieren. Das Programm erzeugt die Ergebnisse auf Grundlage von drei Modellen. Einem atmosphärischen-, einem Erdboden-, und einem Vegetations-Modell. Das atmosphärische-Modell gibt dabei unter anderem Informationen über Lufttemperatur, Windfelder und auftretende Turbulenzen. Anhand des Erdboden-Modells können Daten bezüglich der Bodentemperatur und des Wasserhaushalts des Bodens erhoben werden. Die unterschiedlichen Wechselwirkungen von Vegetationen und der Umwelt können anhand des Vegetations-Modells analysiert werden (ENVI-met, 2023a). Das Programm selbst ist dabei in vier Teilbereiche einzuordnen die wiederum unterschiedliche Tools beinhalten (Siehe Anhang 10). Bei der Erstellung mittels ‚ENVI-met-Spaces‘ oder alternativ ‚ENVI-met-Monde‘ kann ein maßstabsgetreues Modell des betrachteten städtischen Kontextes erstellt werden. Dabei können Gebäude, Vegetationen und Böden aus einer Vielzahl von vorgegebenen Typen ausgewählt und der Realität entsprechend implementiert werden. Bei der Simulation können dann mittels ‚ENVI-guide‘ Werte bezüglich der Meteorologie und des Standortes sowie eine Zeit, in der die Simulation stattfinden soll, festgelegt werden. Sobald die Simulationsparameter bestimmt sind, wird die Simulation mittels ‚ENVI-core‘ durchgeführt. Nach Vollendung der Simulation können die Daten mit ‚BIO-met‘ prozessiert werden. BIO-met bietet dabei unter anderem die Möglichkeit Daten bezüglich des thermalen Komforts zu berechnen. Mittels ‚ENVI-met-LEONARDO‘ lassen sich dann die Berechnungen visualisieren und vergleichen (ENVI-met, 2023c). Um ein aussagekräftiges Ergebnis für das Fallbeispiel Nummer 4.4. zu generieren und den einer Bachelorarbeit entsprechenden Umfang nicht zu überschreiten, müssen einige Daten auf Grundlage von fundierten Schätzungen angenommen werden. Die im 3D-Modell erstellten Gebäude haben alle die gleichen Wände sowie Dächer (Siehe Anhang 12). Eine genaue Darstellung und Analyse der am Stadthäger Marktplatz vorkommenden Gebäudetypen ist nicht gegeben. Des Weiteren wurde auf die Integration von Fenstern verzichtet. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass bei einer Simulation dieser Größe die Integration von Fenstern in Fassaden und Dächern kaum eine Auswirkung auf das Gesamtergebnis hat (ENVI-met, 2023b). Des Weiteren wurde zur Vereinfachung der Simulation eine maximale Höhe der Gebäude von zwölf Metern angenommen. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die meisten Gebäude am Stadthäger Marktplatz dreistöckig sind (siehe Anhang 3). Über die Gebäude gemittelt wurde dabei eine Geschosshöhe von drei Metern

angenommen (Loga et al., 2015). Die Dachform der Gebäude wurde im 3D-Modell teilweise vereinfacht, wobei der niedrigste Punkt des Dachs acht und der höchste zwölf Meter beträgt. Die für die Simulation des Mikroklimas verwendeten Werte und Abmessungen sind im Kapitel „4.4. Dezentrale Straßenentwässerung des Stadthäger Marktplatzes“ dargelegt.

4. Hauptteil/Ergebnisse

In diesem Kapitel werden Umfang, Umsetzung und Ergebnisse von Anwendungsbeispielen der dRWB in Berlin und Hannover vorgestellt. Zudem wird mittels den Softwares STORM.Sim und ENVI-met eine beispielhafte Maßnahme für den Stadthäger Marktplatz dimensioniert und anschließend ausgewertet.

4.1. Institut für Physik in Berlin Adlershof

Das Institut für Physik in Berlin Adlershof ist ein 2003 fertiggestelltes Gebäude, welches durch die Verwendung von Zisternen, Fassaden- und Dachbegrünungen sowie eines Versickerungsteiches auf das Ableiten von Niederschlagswasser verzichtet und somit vollständig dezentral bewirtschaftet wird (SenStadt, o. D.). Dabei ist die dRWB so ausgelegt, dass auch Starkregenereignisse innerhalb der Gebäudegrenzen bewirtschaftet werden können (Bimoka, 2020a).

Chronologie, räumlicher Kontext und Projektausführung

Baubeginn des Lise-Meitner-Hauses (LMH), welches heute der Sitz des Instituts für Physik der Humboldt Universität Berlin (HU) ist, war 1999 (SenStadt, 2014b). Vorangegangen waren die Zustimmung des Berliner Senats, die Baumaßnahmen des neuen naturwissenschaftlichen Campus der HU mit einem Budget von bis zu 280 Millionen Euro zu finanzieren sowie verschiedene Architekturwettbewerbe für die einzelnen Institute. Der Preis für das Physik Institut ging dabei an Georg Augustin und Ute Frank. Die Konstruktion wurde 2003 mit dem Berliner Architekturpreis ausgezeichnet (HU, o. D.). Das LMH ist Teil des Campus Adlershof im Südosten von Berlin. Der Campus ist dabei wiederum Teil des größten Wissenschafts- und Technologieparks Deutschlands, dem Technologiepark Adlershof. Dieser beherbergt auf einer Fläche von 4,6 km², neben sechs Wissenschaftlichen Instituten der HU, namentlich Mathematik, Geografie, Informatik, Physik, Psychologie und Chemie, elf außeruniversitäre Forschungsinstitute sowie rund 1270 Unternehmen. Zu den 28.000 Beschäftigten des

Technologieparks kommen 950 Auszubildene und 6.600 Studenten (Adlershof, 2023). Nach der Fertigstellung des 9.700 m² großen Gebäudes im Jahr 2003, war der Bau, mit einem Bruttorauminhalt von 74.000 m³, Teil von verschiedenen Forschungsprojekten bezüglich des Wasserverbrauchs sowie der erreichten Verdunstungskälte durch die implementierten Fassadenbegrünung. Zudem sollte auch die Auswirkung der verbauten dRWB auf die Energiebilanz des Gebäudes untersucht werden. Ab 2010 wurde diese Untersuchung von der TU Berlin übernommen und durch die Förderinitiative EnEff:Stadt finanziert. Von 2013 bis 2016 gab es ein weiteres Projektmonitoring. Dieses wurde unter anderem durch Fördergelder des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unterstützt (SenStadt, o. D.; SenStadt, 2014b). Die Ergebnisse sind dabei mit in das Projekt ‚Konzept für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme‘ (KURAS) eingeflossen (Matzinger et al., 2017).

Regenwasserbewirtschaftung

Das Institutsgebäude wird vollständig dezentral bewirtschaftet und besitzt somit keinen Anschluss an die Kanalisation. Die Bewirtschaftung deckt dabei mit der Versickerung, der Verdunstung und der Nutzung des anfallenden Niederschlagswassers einen Großteil der Möglichkeiten dRWB ab. Die implementierten Lösungen sind dabei die Begrünung von Teilen der Hausfassade, die Retention von Niederschlagswasser in Zisternen und die Nutzung des anfallenden Niederschlags zur Bewässerung der verwendeten Kletterpflanzen sowie zur adiabaten Kühlung des Gebäudes. Dazu kommt die Versickerung sowie Verdunstung von Regenwasser in einem künstlich angelegten Teich sowie der den Teich umgebenden belebten Bodenzone (SenStadt, o. D.). Zudem wurden Teile der Dachfläche extensiv begrünt (Schmidt, 2012). Das auf der rund 4.700 m² großen Dachfläche des Gebäudes anfallende Niederschlagswasser wird zunächst in Zisternen zwischengespeichert. Im Gebäude gibt es dabei insgesamt fünf Niederschlagswasserzisternen, die jeweils 11 m³ Wasser speichern können. Sobald bei Starkregenereignissen das maximale Volumen der Zisternen überschritten wird, wird das Niederschlagswasser mittels Pumpen in einen der fünf Innenhöfe befördert. Im Inneren des 450 m² großen Hofes befindet sich ein 225 m² großer Teich. Der Rest des Hofes dient bei Starkregenereignissen als Retentionsraum und versickert das Regenwasser über eine belebte Bodenzone. Die implementierte Starkregenvorsorge kann dabei innerhalb von drei Tagen 600 m³ Niederschlagswasser bewirtschaften (Bimoka, 2020a). Ein Anwendungsbereich des in den Zisternen gespeicherten

Niederschlagwassers ist die Bewässerung der Fassadenbegrünung (SenStadt, 2010). Am Institutsgebäude wurden in insgesamt 150 Fassadenkübeln 18 unterschiedliche Arten von Kletterpflanzen gepflanzt. Diese wurden an neun unterschiedlichen Fassaden des Gebäudes aufgestellt. Ein Großteil wurde dabei an den Südfassaden und an den Innenhöfen angebracht (siehe Abbildung 1) (SenStadt, 2014d). Bei der Auswahl der Pflanzen wurde dabei darauf geachtet, dass sie auch in den Kübeln extreme klimatische Bedingungen aushalten können. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Substrate sowie Kübel verwendet, um gegebenenfalls Unterschiede im Wuchs der Pflanzen bestimmen zu können (Schmidt, 2012).

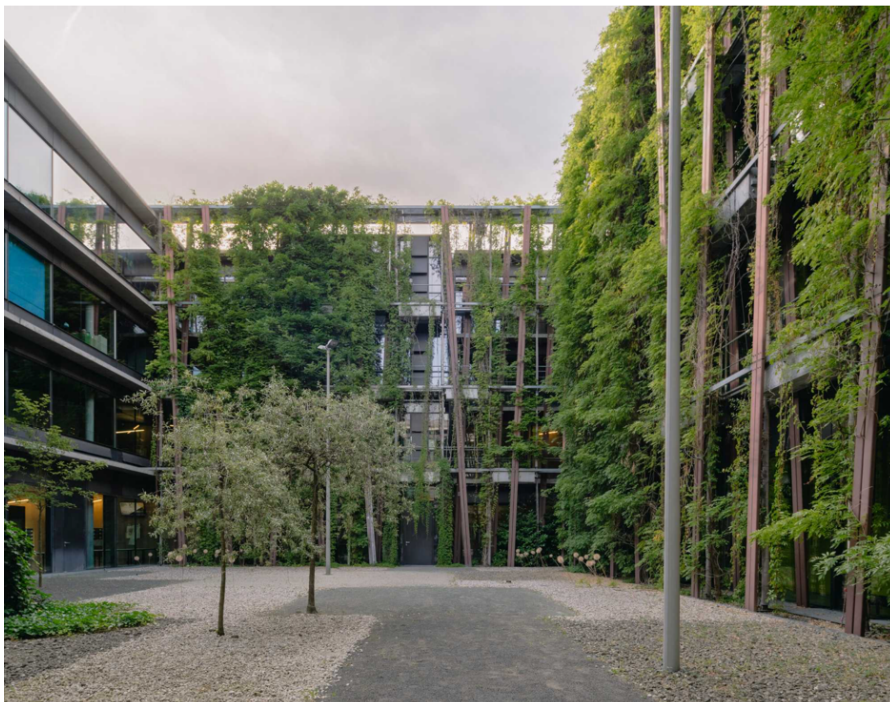


Abbildung 1 Fassadenbegrünung am Haus Lise-Meitner-Haus (Quelle: Augustin et al., o. D.)

Die Bepflanzungen der Fassaden hat dabei zwei Wirkungen auf das Klima innerhalb und außerhalb des Gebäudes. Durch die direkte Verschattung des Gebäudes in den Sommermonaten wird eine passive Kühlung des Instituts erreicht (SenStadt, 2014d). Neben dieser passiven Kühlleistung der Fassadenbegrünung wird auch durch die Verdunstungskühlung eine erhebliche Kühlleistung erzielt. Ein Kubikmeter Wasser hat dabei bei 30 °C eine Kühlleistung von 680 kWh. Dies entspricht der Wärmeenergie, die ein Liter Wasser aufnehmen und dementsprechend der Umgebung entziehen kann. Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass die Fassadenbegrünung im Erdgeschoss, mit einer Verdunstung von rund 25 mm am Tag, eine Kühlleistung von 17 kWh pro Quadratmeter und Tag erzeugt hat. Im Durchschnitt betrug die Verdunstung zwischen 10 und 15 mm pro Tag. Diese Daten beziehen sich dabei auf die

Sommermonate. Diese Daten beziehen sich dabei auf eine Kühlleistung außerhalb des Gebäudes und sind nicht mit einer direkten Klimatisierung zu vergleichen. Jedoch konnte nachgewiesen werden, dass eine solche Begrünung im Gegensatz zu einem herkömmlichen Sonnenschutz erhebliche Vorteile bietet. Diese beinhalten dabei neben energetischen Vorteilen auch die Zufriedenheit der Mitarbeiter (SenStadt, 2010). Konkret konnte dabei nachgewiesen werden, dass im besten Fall der Primärenergiebedarf, also der Energiebedarf, der für die Kühlung sowie das Heizen eines Gebäudes nötig ist, von 83 kWh pro Quadratmeter ohne Sonnenschutz auf 42 kWh pro Quadratmeter mit Fassadenbegrünung gesenkt werden kann. Eine Verschattung mit einem automatischen Sonnenschutz kann die Kühlleistung auf 57 kWh pro Quadratmeter senken. Am Lise-Meitner-Haus ist die Einsparung der Primärenergie zur Kühlung in den südorientierten Büros auf 26 % berechnet (SenStadt, 2014d). Eine weitere Anwendung des in den Zisternen gespeicherten Regenwassers ist die Implementierung einer Klimaanlage, welche das Wasser zur adiabaten Kühlung der Innenräume verwendet. Mittels Luft zu Luft Wärmetauscher, mit dem im Winter eine Wärmerückgewinnung erreicht wird, kann im Sommer durch das zusätzliche Einsprühen vom Wasser in den Abluftstrom eine erhebliche Abkühlung der Zuluft erreicht werden. Das versprühte Wasser verdunstet und entzieht so dem Abluftstrom Energie in Form von Wärme. Die Funktionsweise ist in Abbildung 2 dargestellt (SenStadt, 2010).

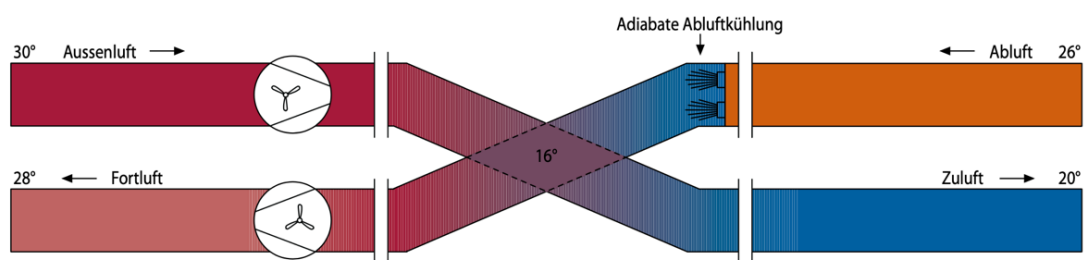


Abbildung 2 Funktionsprinzip der adiabaten Kühlung mittels Wärmetauscher und Regenwasser (Quelle: SenStadt, 2010)

Dabei ist die verbaute Anlage in der Lage, bei einer Außentemperatur von 30 °C, den Zuluftstrom auf bis zu 21 °C abzukühlen, ohne technisch erzeugte Kälte zu verwenden. Gegenüber konventionellen Klimaanlage können so 90 % der Kälteleistung eingespart werden. Außerdem werden bis zu 99 % der Kosten gegenüber einer Absorptionskältemaschine eingespart (SenStadt, 2014d). Insgesamt kann durch die Implementierung der dRWB am Institut für Physik der HU nahezu vollständig auf die zusätzliche

Kühlung des Gebäudes mittels konventioneller Kälteerzeugung verzichtet werden (Schmidt, 2012).

Bewertung der dRWB

Die am Institut für Physik der HU implementierte dRWB weist vor allem im Bereich der Kühlung von Gebäuden durch die Implementierung von Fassadenbegrünungen positive Ergebnisse auf. Das durch die Verschattung sowie durch die Verdunstung erzeugte Klima führt zu einer deutlichen Verringerung der Innen- und Außentemperatur und demzufolge zu einer deutlichen Verringerung der benötigten Kühlleistung. Durch die Integration einer zusätzlichen, mit Regenwasser betriebenen, adiabaten Abluftkühlung konnte eine erhebliche Einsparung von Kosten sowie Strom erreicht werden. Der hohe Regenwasserbedarf bei der Verdunstung durch die Begrünung des Gebäudes sowie die integrierte Versickerungsmulde ermöglichen es, auf die zentrale Regenwasserableitung des anfallenden Niederschlagwassers zu verzichten, was zu einer Entlastung der städtischen Kanalisation führt (Senstadt, 2010; Senstadt o. D.).

4.2. Potsdamer Platz, Berlin

Der Potsdamer Platz im Herzen Berlins ist einer der meistbesuchten Plätze der Stadt. Nach einer turbulenten Historie wurde der Platz Mitte der neunziger Jahre komplett neugestaltet und ist nun vollständig von der städtischen Kanalisation abgekoppelt (Hoyer et al., 2011). Das Ziel, den Landwehrkanal zu entlasten und so eine größere Resilienz gegen Starkregenereignisse aufzubauen sowie für ein besseres Stadtklima und eine bessere Wasserqualität zu sorgen, wurde durch ein zusammenhängendes hoch technologisches Regenwasserkonzept realisiert. Das zentrale Element der dRWB ist dabei ein groß angelegter Teich, namentlich der ‚Piano-See‘ (Well & Ludwig, 2020).

Chronologie, räumlicher Kontext und Projektausführung

Als 1938 der Potsdamer Bahnhof eröffnet wurde, entwickelte sich der Platz zu einem der geschäftigsten öffentlichen Bereiche in Europa. 1920 hatte der Platz mit 83.000 Besuchern pro Tag den Zenit erreicht. Dabei hat sich die Architektur des Platzes stetig geändert, was die Reputation des Platzes, einer der fortschrittlichsten urbanen Gebiete Deutschlands zu sein, stetig untermauerte. Der Potsdamer Platz, der während des zweiten Weltkriegs nahezu vollständig zerstört wurde, war in Zeiten des Kalten Krieges eine Grenzzone der Ost-West-Teilung der Stadt. Nach dem Fall der Mauer und der

Wiedervereinigung Deutschlands wurde der Potsdamer Platz vollständig neugebaut, wobei die Nutzung des Regenwassers eine zentrale Rolle spielte. 1991 wurde vom Berliner Senat ein Wettbewerb ausgeschrieben, wobei die Architektur des ‚neuen‘ Potsdamer Platzes im Mittelpunkt stand. Der Preis ging an Renzo Piano, welcher sich stark an dem historischen Kontext des Platzes orientierte. Die umliegenden Gebäude wurden von verschiedenen Architekten entworfen und sind teilweise mit Anlagen zur dRWB ausgestattet. Dabei hatte Herbert Dreiseitl den Auftrag, ein Wassersystem zu entwerfen, welches das anfallende Regenwasser zum einen als optisches Element und zum anderen zur Nutzung und besseren Mikroklimabildung im städtischen Kontext etabliert. Das Landschaftsdesign sollte dabei einen hohen Anteil an naturnahen Flächen beinhalten, die als Gegenpol zum urbanisierten Kontext des Platzes dienen. So wurden beispielsweise künstlich angelegte Wasserfälle gebaut, um den Lärm der umliegenden Straßen zu übertönen (Hoyer et al., 2011). Die gesamte Bau- und Planungszeit betrug dabei vier Jahre und dauerte von 1994 bis 1998 an. Die dRWB wird weiterhin von der Technischen Universität Berlin begleitet, wobei unter anderem Daten über die Wasserqualität des Platzes erhoben werden (SenStadt, 2014a; Bimoka, 2020b). 2011 wurde das Stadtquartier mit einem Preis der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen ausgezeichnet (SenStadt, 2014a).

Regenwasserbewirtschaftung

Die Implementierung der dRWB am Potsdamer Platz zielt darauf ab, Regenwasser so zu bewirtschaften, dass es nicht mehr Abfluss von Niederschlagswasser gibt als im unbebauten Zustand. Grund dafür ist, dass es in der Vergangenheit bereits häufig zu einem Versagen der Mischkanalisation kam und teils stark belastetes Regenwasser direkt in den Landwehrkanal geflossen ist. Mit den RWBM am Potsdamer Platz wird eine Fläche von rund 44.000 m² dezentral bewirtschaftet. Dazu gehören 19 Gebäude und die zwischen den Gebäuden liegenden Straßen und Wege (Bimoka, 2020b). Das Regenwasser wird für die Toilettenspülung, für die Bewässerung der Grünflächen sowie zur Nachspeisung urbaner Gewässer verwendet. Dafür wird Wasser unter anderem in Zisternen gespeichert. Über die installierte extensive sowie intensive Dachbegrünung wird das Wasser wieder verdunstet. Die Integration von künstlichen Wasserflächen soll zusätzlich zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen und Starkregenereignisse abdämpfen und so die Kanalisation und den Landwehrkanal entlasten (SenStadt, 2014c). Entlang der dRWB gibt es unterschiedlichste Reinigungsstufen, welche den

Piano-See zu einem der, unter wasserqualitativen Gesichtspunkten, besten Gewässer in Berlin machen (Bimoka, 2020b). In Abbildung 3 ist das Schema der dRWB des Potsdamer Platzes dargestellt.

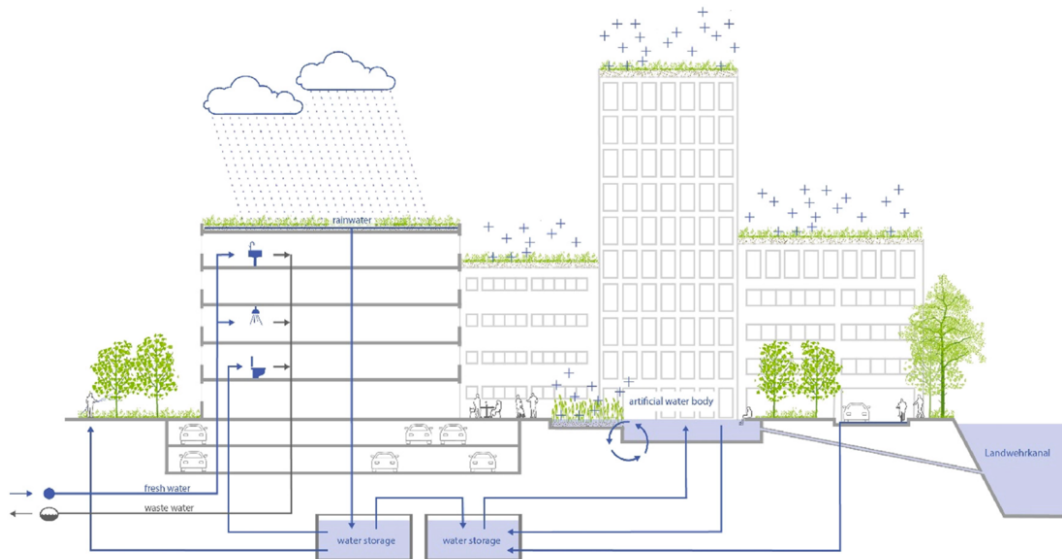


Abbildung 3 dRWB am Potsdamer Platz (Quelle: Well & Ludwig, 2020)

Die Dachbegrünung der umliegenden Gebäude nimmt mit 12.000 m² einen erheblichen Teil der angeschlossenen Dachfläche ein. Diese trägt dabei erheblich zur Verdunstungsleistung des gesamten Raumes bei. Rund die Hälfte des auf die Dachbegrünung treffenden Niederschlags wird direkt verdunstet (Well & Ludwig, 2020). Das restliche Niederschlagswasser von Dach- sowie versiegelten Flächen wird in Zisternen geleitet. Die fünf Zisternen, welche Teil der dRWB am Potsdamer Platz sind, haben ein Gesamtvolumen von 2.600 m³. Das in den Zisternen gespeicherte Wasser wird zu einem Großteil zur Toilettenspülung verwendet (Hoyer et al., 2011). Mit rund $10.800 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$ werden rund 15 % des gesamten anfallenden Niederschlagswassers auf diese Art verwendet. Die restlichen 85 % gehen auf die Verdunstung durch Dachbegrünung und Wasserflächen sowie auf die bei Starkregenereignissen gedrosselte Abfuhr in den Landwehrkanal zurück (SenStadt, 2014a). Sobald die Zisternen vollständig gefüllt sind, wird das Wasser in die urbanen Gewässer geleitet. Dabei teilt sich die offene Wasserfläche in zwei Teile auf. Einmal den südlichen Teil, wobei hierzu der dreieckige Piano-See und der benachbarte Arm gehören sowie der aus Kanälen

bestehende nördliche Teil (Hoyer et al., 2011). Eine Karte des Potsdamer Platzes ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei sind die Wasserflächen blau eingezeichnet.



Abbildung 4 Konzeptzeichnung des Potsdamer Platzes (Quelle: SenStadt, 2014c)

Das urbane Gewässer im Süden des Platzes hat eine Fläche von 12.000 m² und ist am tiefsten Punkt zwei Meter tief. Die Höhe des Wasserstandes ist variabel, sodass bei extremen Niederschlagsereignissen ein Retentionsraum für das Niederschlagswasser vorhanden ist. Dieser beträgt, mit allen Wasserflächen zusammen, rund 13.500 m³ (Hoyer et al., 2011; Bimoka, 2020b). Das gespeicherte Wasservolumen wird dabei verdunstet oder in Ausnahmefällen wie einem zehnjährigen Niederschlagsereignis, also einem Niederschlagsereignis, welches im Schnitt einmal alle zehn Jahre auftritt, mit einer maximalen Abflussrate von drei Litern pro Sekunde und Hektar in den Landwehrkanal eingeleitet (SenStadt, 2014a; Bimoka 2020b). Eine Versickerung des Niederschlagswassers findet nicht statt. Dies liegt daran, dass es sich bei der Wasserfläche und den umliegenden Begrünungen um eine Dachbegrünung handelt. Unterhalb des Potsdamer Platzes sind mehrere Geschosse gebaut, wodurch eine Versickerung in das Erdreich nicht möglich ist (Bimoka, 2020b). Die gesamte Verdunstung am Potsdamer Platz beträgt $11.570 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$, was zu einer erheblichen Abkühlung des Bereichs führt (SenStadt, 2014a; Bimoka, 2020b). Die Gewährleistung einer guten Wasserqualität war bei der Planung des Projektes ein zentrales Thema. Die Planung des Wassersystems hat mehrere Jahre in Anspruch genommen und wurde auf Grundlage diverser Analysen

und Berechnungen erstellt. Bei der etablierten dRWB handelt es sich um ein Zirkulationssystem. Das Wasser wird aus dem urbanen Gewässer über die Zisternen wieder in das Gewässer gepumpt. Dabei durchläuft es mehrere Reinigungsstufen (Hoyer et al., 2011). Die Behandlung des Regenwassers beginnt jedoch bereits bei der Dachbegrünung. Auf Grundlage der Voruntersuchungen war es notwendig, möglichst viele Nährstoffe, die unter anderem durch Staub in das System eingetragen werden, bereits in der Dachbegrünung zurückzuhalten. Hierzu wurde bei der Dachbegrünung auf das Düngen der Bepflanzung sowie auf das Verwenden von nährstoffreichen Substraten verzichtet. Innerhalb der Zisternen wird das Wasser zusätzlich gereinigt. Aufgrund der hohen Verweilzeit in den Zisternen kommt es dort zu bakteriologischen Prozessen. Die Mikroorganismen in den Speichern bilden einen rund einen Zentimeter hohen Klärschlamm, der ähnlich wie in einer Kläranlage das Wasser vorreinigt (Bimoka, 2020b). Sobald das Wasser über die Zisternen in die urbanen Gewässer gepumpt wird, durchläuft es den zentralen Teil der Regenwasserbehandlung. Entlang des Sees sowie des nördlichen Teils des Gewässers sind belebte Bodenzonen angelegt. Beim Abfluss aus dem See sowie bei der Zuführung des Wassers im nördlichen Teil des offenen Gewässers durchläuft das Wasser diese Bodenzonen. Dabei werden Nährstoffe und Partikel aus dem Wasser abgeschieden und das Wasser wird so gefiltert (Hoyer et al., 2011). Das gesamte Wasservolumen wird alle zwei Tage durch die unterschiedlichen Reinigungsstufen zirkuliert. Das Ergebnis ist dabei ein oligotrophes Gewässer, welches eine der besten Wasserqualitäten in Berlin aufweist (Bimoka, 2020b). Das etablierte System ist demnach sehr effektiv, jedoch ist es auch mit hohen Kosten verbunden. Sowohl der Betrieb der Anlage sowie die dauerhafte Überwachung der Wasserqualität sind mit einem hohen Aufwand verbunden. Zwar können durch die Verwendung von Regenwasser zur Toilettenspülung Kosten eingespart werden, jedoch ist nicht mit einer Amortisation der Kosten von neun Millionen Euro, welche die Implementierung des Systems gekostet hat, zu rechnen.

Bewertung der dRWB

Eine Regenwasserbewirtschaftung wie diese konnte nur auf Grundlage der großen historischen Relevanz des Platzes implementiert werden. Die integrierte dRWB erfüllt jedoch verschiedenste Aufgaben, die zu einer klimaresilienteren Entwicklung des urbanen Kontextes beitragen. Durch die Verdunstung, die Rückhaltung sowie die Regenwasseraufbereitung kann der Hitze, den Überflutungen und der Verschmutzung

von urbanen Gewässern gezielt entgegengewirkt werden. Die Regenwassernutzung ermöglicht zudem eine Einsparung von Frischwasser (Hoyer et al., 2011). Die Herstellung eines natürlichen Wasserhaushalts konnte nicht erreicht werden, da eine Versickerung am Standort nicht möglich ist (Bimoka, 2020b). Das Konzept der dRWB am Potsdamer Platz zielt dabei zentral auf die Vermeidung von Überflutungen durch ein hohes Retentionsvolumen ab. Durch das Anlegen der Wasserflächen ist eine große Retentionsfläche entstanden, welche gegenüber der zentralen Regenwasserableitung eine erhebliche Entlastung der Berliner Kanalisation bedingt (Well & Ludwig, 2020).

4.3. Kronsberg, Hannover

Das Stadtviertel ‚Hannover-Kronsberg‘ in der niedersächsischen Landeshauptstadt Hannover, ist ein zur EXPO 2000 errichtetes Neubaugebiet. Die errichteten Wohnungsbauten sollten dabei zunächst den Mitarbeitern der EXPO 2000 als Wohnquartier dienen (Rumming et al., 2004). Das unter dem Motto der Nachhaltigkeit errichtete Viertel setzt dabei auf damals wenig erprobte Maßnahmen. Unter anderem im Bereich der Energieversorgung, der fußgängerfreundlichen Infrastruktur, der Freiraumgestaltung und der sozialen Infrastruktur. Zudem wurde das gesamte Stadtviertel mit dezentralen RWBM ausgestattet (Heise, 2002). Die dRWB war zur damaligen Zeit in diesem Maßstab einmalig (Altevers et al., o. D.).

Chronologie, räumlicher Kontext und Projektausführung

Vor Beginn der Bebauung des Gebiets, auf dem die heutige Kronsberg-Siedlung steht, war die Fläche von industrieller Landwirtschaft geprägt. 1960 wurde das Gebiet von der hannoverschen Stadtplanung als Planungsgebiet auserkoren, in dem mehr als 30.000 Wohnungen entstehen sollten. Daraufhin wurden die ansässigen landwirtschaftlichen Betriebe von der Stadt Hannover gekauft. In den 80er-Jahren wurde das geplante Projekt dann auf 6.000 Wohneinheiten verkleinert, bis es 1990 dann aufgrund der EXPO 2000 gänzlich umgestellt wurde (Rumming et al., 2013). Die Zusage zur Ausführung der Expo erhielt Deutschland 1988 (Heise, 2002). Das Motto war dabei Mensch-Natur-Technik. Die Stadt Hannover plante daraufhin ein gänzlich neues Stadtviertel, namentlich ‚Hannover-Kronsberg‘ oder auch ‚EXPO-Siedlung‘, zu errichten. Es wurden in verschiedenen Arbeitsgruppen Vorschläge erarbeitet, wie das neu zu errichtende Stadtviertel als zukunftsweisendes Projekt der Stadtplanung umgesetzt werden kann. Ziel war es hierbei, auf einer großen Fläche neue Standards in

Bezug auf Stadtplanung, Ökologie und Sozialplanung zu setzen und zu erproben. Die aufgewendete Summe für die zwischen 1997 und 2000 realisierte Bebauung betrug dabei rund 500 Millionen Euro. Dieses Geld ist sowohl von öffentlicher wie auch privater Hand investiert worden (Rumming et al., 2004). Die für die Implementierung des Mulden-Rigolen-Systems aufgebrauchte Summe betrug 22.686.000 DM (Altevers et al., o. D.). Dies entspricht rund 11.600.000 € (Deutsche Bundesbank, o. D.). Dieser Wert steht einem berechneten Wert von 24.656.00 DM bzw. 12.606.412 € für eine herkömmliche Entwässerung gegenüber. Dies entspricht einer Kosteneinsparung von acht Prozent. Diese Einsparung geht unter anderem auf den Verzicht von Straßengullys und das Ausbleiben von Ersatzzahlungen nach damaligem Naturschutzrecht zurück (Rumming et al., 2004; Deutsche Bundesbank, o. D.). Zur Eröffnung der EXPO waren 2.700 Wohneinheiten realisiert (Rumming et al., 2013), wobei die Bauarbeiten bis ins Jahr 2013 andauerten und insgesamt 3.200 Wohneinheiten geschaffen wurden (Büchner & Schlichtmann, 2017). Das Stadtviertel Hannover-Kronsberg gehört zum Stadtbezirk Kirchrode-Bemerode-Wülferode, im Süd-Osten der Stadt Hannover. Es ist Teil des Stadtteils Bremerode, welcher eine Bevölkerungszahl von rund 20.000 Einwohner aufweist (Landeshauptstadt Hannover, o. D.). Dabei verbindet das neue Stadtviertel Hannover-Kronsberg den Stadtteil Bemerode mit dem zur EXPO 2000 errichteten EXPO-Gelände. Das Neubaugebiet weist eine Fläche von rund 1,5 km² auf, wobei es rund drei Kilometer lang und durchgehen 500 Meter breit ist. Der für das Neubaugebiet namensgebende Kronsberg ist dabei nicht als Berg zu verstehen. Es handelt sich beim Kronsberg um einen rund sechs Kilometer langen Hügelrücken an der Stadtgrenze von Hannover. An diesen Hügelrücken gliedert sich das Viertel und ist dabei in schachbrettartig angelegte Parzellen unterteilt. Im Zentrum dieser Parzellen ist jeweils eine Grünfläche implementiert. Diese raumbewusste Umsetzung des Neubaugebietes ermöglicht ein von öffentlichen Freiräumen durchzogenes Gesamtbild. Die diversen Grünanlagen im privaten und öffentlichen Bereich führen zu einer erhöhten Wohnqualität der Anwohner. Neben diesen Grünflächen gibt es zudem eine hohe Zahl von Freizeitangeboten durch Spielplätze, Sportstätten sowie Wasserinstallationen (Rumming et al., 2013).

In der Abbildung 5 ist eine detaillierte Abbildung des Wohngebiets dargestellt.



Abbildung 5 Bebauungsplan Hannover-Kronsberg (Quelle: Bähre et al., 2000)

Es ist eine Unterteilung des Stadtviertels in Kronsberg Nord und Kronsberg Mitte zu erkennen. Außerdem ist das Zentrum des Viertels und das Gewerbegebiet dargestellt (Bähre et al., 2000). Aktuell wird südlich des zur Expo 2000 realisierten Bauprojekts ein weiterer Stadtteil mit dem Namen ‚Kronsberg Süd‘ oder auch ‚Kronsrode‘ gebaut. Das 2016 vorgestellte Konzept umfasst 53 Hektar (Bodemann et al., 2017). Kronsberg Süd soll 8.000 Menschen Wohnraum bieten und sich dabei an die sozialen sowie ökologischen Maßstäbe des Projekts Hannover-Kronsberg halten. 2022 sind in Kronsberg Süd die ersten Wohnungen bezogen worden (Landeshauptstadt Hannover, 2023).

Regenwasserbewirtschaftung

Das Regenwassermanagement des Stadtviertels Hannover-Kronsberg war zum Zeitpunkt der Erbauung ein kaum in diesem Ausmaß getestetes System (Rumming et al., 2013). Die Planung des Projekts wurde von einem Zusammenschluss aus Parteien übernommen, die unter dem Namen ‚Planungsteam Wasser‘ agierten. Das Planungsteam Wasser bestand dabei aus dem Atelier H. Dreiseitl, der Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH und dem Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie unter der Leitung von Herrn Prof. Sieker (Altevers et al., o. D.). Ziel der Planer war es dabei, die durch den Bau der Wohneinheiten versiegelten Flächen zu kompensieren. Der Stadtteil ist so gebaut, dass das anfallende Regenwasser fast gänzlich versickert

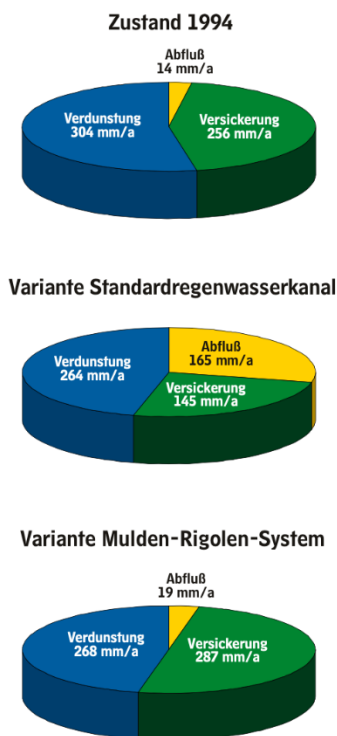


Abbildung 6 Wasserbilanz des Stadtteils Kronsberg ohne Bebauung, mit zentraler Regenwasserbewirtschaftung und mit dezentraler Regenwasserbewirtschaftung (Quelle: Altevers et al., o. D.)

und so kein weiterer Druck auf die zentrale Abwasserinfrastruktur Hannovers ausgeübt wird (Rumming et al., 2013). Neben den ökologischen Ansprüchen, die an das Bauprojekt Hannover-Kronsberg angelegt wurden, gab es weitere Gründe dafür, keine herkömmliche Bebauung zu planen. Eine Studie der Universität Hannover belegte bereits 1983, dass eine Bebauung des Kronsbergs und die damit einhergehende Flächenversiegelung einen erheblichen negativen Einfluss auf den natürlichen Grundwasserhaushalt des Gebiets haben würde. Des Weiteren ist die Niederschlagsmenge am Kronsberg mit 194 mm pro Jahr im Vergleich zum Rest der Landeshauptstadt stark überdurchschnittlich. Die etwa 150 Hektar große Baufläche verfügt daher über ein System, welches auf Grundlage von Mulden-Rigolen-Systemen, Drosselabflusskanälen, Retentionsflächen, Regenrückhaltebecken, Dachbegrünungen und Vorflutern den natürlichen Standard der Grundwasserneubildung erhält. Dieser Sachverhalt ist in

Abbildung 6 dargestellt. Neben der Sicherstellung eines natürlichen Wasserhaushalts, sorgt die dezentrale RWB in Kronsberg auch für einen erhöhten Hochwasserschutz und ein verbessertes Stadtklima und bietet Erholungsgebiete für die Bewohner (Altevers et al., o. D.).

Umsetzung der dRWB im öffentlichen Raum

Der bebaute Boden des Stadtviertels Hannover-Kronsberg besteht hauptsächlich aus Kalkmergel. Dieser hat eine geringe Durchlässigkeit gegenüber Wasser. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, sind die RWBM so konzipiert, dass anfallendes Regenwasser so lange wie möglich verlangsamt wird, bevor es in den nächsten Vorfluter gelangt. Daraus resultiert ein System, welches sowohl auf Versickerung wie auch auf dezentraler bzw. semizentraler Verzögerung des anfallenden Regenwassers beruht (Altevers et al., o. D.). In der ersten Instanz sind dafür bei rund elf Kilometern der Straßen im Viertel Mulden-Rigolen-Systeme, mit einer durchschnittlichen Breite von zwei Metern, am Straßenrand integriert (Rumming et al., 2013). In Abbildung 7 ist die Originalzeichnung einer Mulden-Rigole dargestellt. In die rund 30 bis 40 cm

abgesenkte Mulde fließt durch den Muldenzulauf das Regenwasser. Dieses sickert dann zunächst durch den etwa 30 cm hohen Mutterboden. In diesem sowie in der da-

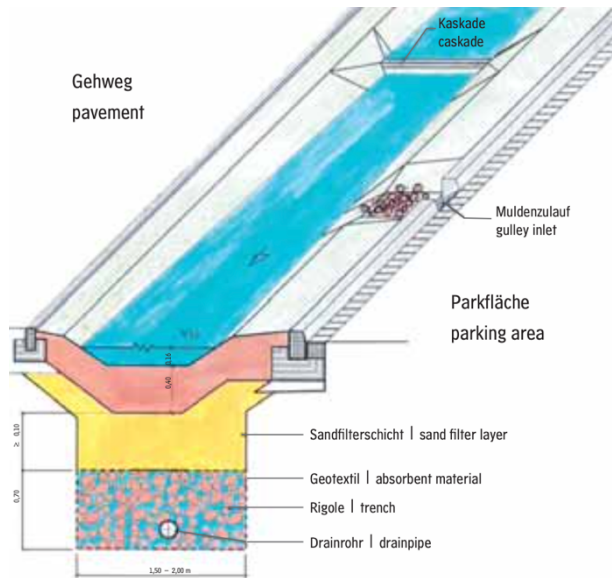


Abbildung 7 Originalzeichnung des integrierten Mulden-Rigol-Systems (Quelle: Rumming et al., 2013)

runter liegenden Sandschicht wird das Wasser zunächst durch Abtrennung von Schwebstoffen gereinigt. Danach fließt das Wasser in den mit Kies befüllten Bodenspeicher, also in die Rigole. Von dort aus kann das Wasser in den Boden versickern. Überschüssiges Wasser wird über das Drainagerohr in den in den in Abbildung 8 dargestellten Drosselschacht geleitet.

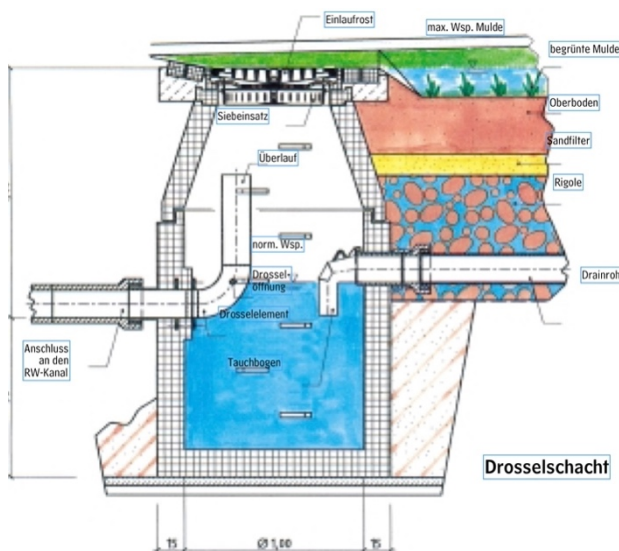


Abbildung 8 Originalzeichnung des Drosselschachts (Quelle: Altevers et al., o. D.)

Das in den Drosselschacht geleitete Wasser kann von dort aus über einen Überlauf zu den angelegten Retentionsflächen geleitet werden, wo ein weiterer Teil des Regenwassers versickert (Altevers et al., o. D.). Das Wasser wird so stark verzögert an den Rohgraben, welcher der Vorfluter ist, der für die Entwässerung des Gebiets benutzt wird, weitergegeben (Rumming et al., 2004). Dabei ist die Menge aufgrund der Bauweise des Überlaufs auf drei Liter pro Sekunde und Hektar begrenzt. Die Retentionsflächen und Mulden-Rigolen-Systeme bedingen durch die Transpiration des Niederschlagswassers ein besseres Stadtklima. Zudem führen die offenen Wasserflächen zu einer reduzierten Staubbildung. Da das Stadtviertel Hannover-Kronsberg am Hügelrücken errichtet ist und dementsprechend an vielen Stellen ein Gefälle aufweist, ist die Integration eines Stufensystems notwendig. Dabei werden in den Mulden in regelmäßigen Abständen Trennstufen eingebaut. Diese ermöglichen die gleichmäßige Beschickung der Entwässerungsmulden. Die verbauten Mulden sind so dimensioniert, dass sie einem einjährigen Regenereignis standhalten. Die Rigolen haben die Kapazitäten einem fünfjährigen Regenereignis standzuhalten. Die in der Stadt zusätzlich errichteten Retentionsflächen sowie das Regenrückhaltebecken Anecamp, welches im Verlauf der Baumaßnahmen nach naturnahen Maßstäben umgebaut wurde, sind für ein zehnjähriges Regenereignis dimensioniert (siehe Abbildung 9) (Altevers et al., o. D.).

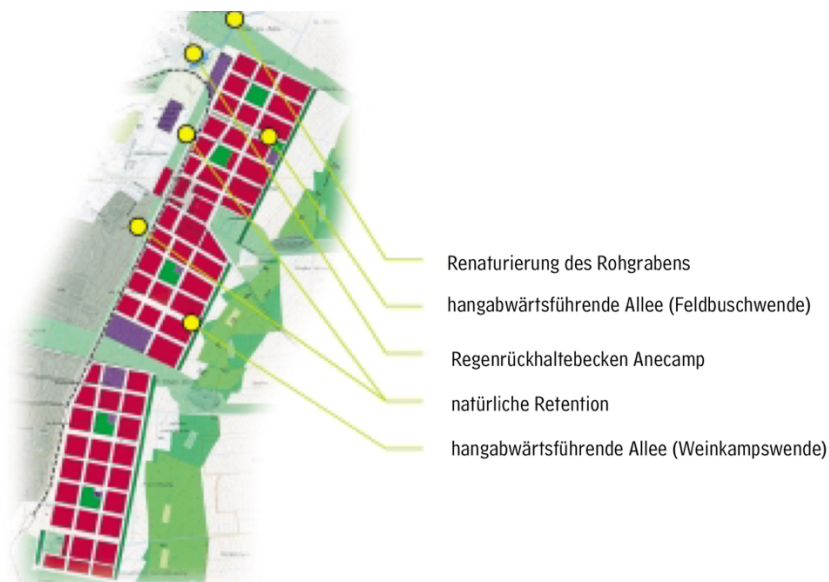


Abbildung 9 Retentionsräume im Stadtviertel-Hannover-Kronsberg (Quelle: Altevers et al., o. D.)

Umsetzung der RWB im nichtöffentlichen Raum

Die Planung der dRWB geht über den öffentlichen auch in den privaten Raum über. Auf einer Fläche von rund 46 ha wurden dafür von unterschiedlichen

Bauunternehmern Konzepte entwickelt, die eine Versickerung und verlangsamte Ableitung des Regenwassers ermöglichen. Die Rahmenbedingung war hierbei auch wie bei der öffentlichen RWB der Bebauungsplan. Dieser sieht vor, dass anfallendes Regenwasser in Mulden-Rigolen-Systeme zu leiten ist. Sofern es nicht vollständig am Ort des Niederschlags versickert werden kann, kann es in das öffentliche Regenabwasserwassernetz geleitet werden. Die Ausführung der privaten Mulden-Rigolen-Systeme variiert dabei je nach Bauunternehmen. Auch alternative Versickerungs- und Rückhaltungsmöglichkeiten, wie etwa Versickerungsbecken, sind im privaten Bereich integriert. Zudem gibt es gemeinschaftliche Versickerungsanlagen, welche die dRWB für mehrere Wohnobjekte gewährleistet. Vereinzelt wurden auch Systeme zur Regenwassernutzung verbaut. Der durch die Integration verschiedener RWBM erzeugte Anteil unversiegelter Flächen beträgt im privaten Bereich im Schnitt mit ungefähr 90.974 m² rund 44 %. Die restlichen 56 % (116.479 m²) der versiegelten Fläche teilt sich in 31 % (65.181 m²) Dachflächen und 25 % (51.298 m²) Wegflächen, Stellplätze und andere Bebauungen ein. Wobei auch hier mit 61 % (31.192 m²) der befestigten Flächen ein Großteil durchlässig gestaltet ist. Diese Flächen sind dann unter anderem mit Porenpflastern, Schotterrasen und Fugenpflastern realisiert. Ein weiterer Aspekt des in Hannover-Kronsberg realisierten Projekts zur dRWB ist das Implementieren von Dachbegrünungen. Im Bauplan ist festgelegt, dass ein Teil der Dachflächen mit einer Begrünung zu versehen ist. Zusätzlich dazu sind auf einigen Gebäuden Dachbegrünungen realisiert, die nicht verbindlich im Bebauungsplan stehen. Die Summe der Dachflächen, auf denen eine Begrünung realisiert ist, beträgt 18.830 m² und hat damit einen Anteil von 29 % an der gesamten Dachfläche (Altevers et al., o. D.). Im Rahmen der Bebauung wurden auch einzelne Projekte realisiert, die für den Stadtteil einzigartig sind. Beispielhaft ist hier die Grundschule des Stadtviertels mit dem eigenen Regenrückhaltebecken zu nennen (Rumming et al., 2004).

Bewertung der dRWB

Die im Stadtviertel realisierten dezentralen RWBM erreichen die von den Planern und Investoren antizipierten Ziele im vollen Ausmaß. Das Bauvorhaben, welches zur Zeit der Errichtung in dieser Größe in Deutschland einzigartig war, beweist, dass eine dezentrale RWB die Aufgaben einer zentralen Regenwasserableitung vollumfänglich und auch unter erschwerten Bedingungen, in diesem Fall der Untergrund aus Kalkmergel, erfüllen kann (Rumming et al., 2013). Hier ist ein Ereignis zu nennen, dass

sich kurz nach Fertigstellung des Mulden-Rigolen-Systems in Hannover-Kronsberg ereignet hat. Es kam zu einem Regenereignis, bei dem innerhalb einer Stunde rund 36 mm Niederschlag gemessen wurden. Dieser Niederschlag entspricht in seiner Belastung für das Regenwassernetz ungefähr dem eines hundertjährigen Niederschlagsereignisses. Das für ein solches Regenereignis nicht ausgelegte Mulden-Rigolen-System hat trotz Diskrepanz zwischen der Auslegung und der realen Belastung die Funktionsfähigkeit nicht verloren und es kam nicht zum Versagen der Anlagen (Altevers et al., o. D.). Über die Kombination verschiedener Maßnahmen war es darüber hinaus möglich, den natürlichen Wasserhaushalt auch nach der Bebauung weitestgehend beizubehalten (Altevers et al., o. D.).

4.4. Dezentrale Straßenentwässerung des Stadthäger Marktplatzes

Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die Etablierung einer Versickerungsanlage auf den Wasserhaushalt sowie auf das Mikroklima des Stadthäger Marktplatzes haben kann. Dazu wird zunächst mittels STORM.Sim eine Versickerungsanlage dimensioniert und der resultierende Wasserhaushalt dargestellt. Anschließend werden die Auswirkungen der Maßnahme auf das Mikroklima untersucht.

Standort Stadthagen

Stadthagen ist mit rund 23.500 Einwohnern eine Mittelstadt im Bundesland Niedersachsen. Die Kreisstadt des Landkreises Schaumburg wurde um das Jahr 1250 gegründet und besitzt inklusive der umliegenden Ortschaften eine Fläche von rund 6.000 ha (Stadt Stadthagen, o. D.). Hintergrund dieser Bemessung sind die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Thesis laufenden Umbaumaßnahmen in der Stadthäger Innenstadt. Für den Marktplatz selbst sind die geplanten Maßnahmen noch in der Diskussionsphase, der Umbau ist jedoch bereits beschlossen. Leitbild des Stadthäger Strukturkonzeptes ist dabei der Umbau der Innenstadt hin zur Barrierefreiheit. Der Umbau hin zu einer klimaresilienten Innenstadt ist kein Teil des bisherigen Konzepts. So ist weder aktuell noch in Zukunft eine dezentrale Bewirtschaftung des Regenwassers vorhanden bzw. geplant. Zudem ist der aktuell bereits geringe Baumbestand des Stadthäger Marktplatzes teils stark geschädigt und wird in den Planungskonzepten für die Stadthäger Innenstadt nicht integriert. Der aktuelle Zustand des Marktplatzes wird

dementsprechend im Folgenden als baumfrei angesehen. Dies resultiert aus dem schlechten Zustand und der geringen Höhe der Bäume im Bestand (Stadt Stadthagen, 2018).

4.4.1. STORM.Sim

Mittels STORM.Sim lassen sich eine Vielzahl von Entwässerungsanlagen realisieren. Bei der Auswahl einer geeigneten Maßnahme sind dabei einige Faktoren zu berücksichtigen. Es wird davon ausgegangen, dass die den Marktplatz umgebenden Gebäude eine Dachbegrünung nicht zulassen. Dies liegt an dem für Dachbegrünung maximal zulässigen Winkel von 45° , den die Häuser am Marktplatz überschreiten (Siehe Anhang 3) (Riechel et al., 2017). Aufgrund dessen wurde für die Auslegung der RWBM nur die versiegelte Bodenfläche des Marktplatzes berücksichtigt. Die Implementierung einer Fassadenbegrünung ist mittels STORM.Sim nicht möglich (STORM.Sim, 2023). Für die Dimensionierung und Auswahl einer geeigneten im Programm realisierbaren Versickerungsanlage nach DWA-A138-1, ist zunächst der k_f Wert des Bodens der Stadthäger Innenstadt zu bestimmen. Die Annahme eines k_f Werts von $6,83 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ geht dabei auf Untersuchungen des Ingenieurbüros Dr. Moll zurück. Bei der von der Firma Schweerbau GmbH & Co. KG in Auftrag gegebene Untersuchung wurde an mehreren Stellen der Stadthäger Innenstadt mittels Rammkern-Sondierbohrung Bodenproben entnommen. Die einzelnen Proben wurden dabei zu Mischproben zusammengefügt. Die Ergebnisse sowie die punktuellen Standorte der Bohrungen sind in Anhang 4 dargestellt. Die Bohrungen wurden dabei in den umliegenden Straßen und nicht auf dem Marktplatz selbst durchgeführt. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass die Bodenbeschaffenheit des Marktplatzes nicht wesentlich von der Beschaffenheit der umliegenden Straßen abweicht. Die Untersuchungen ergaben dabei in fünf der sieben Fälle einen sandigen Boden nach der Definition der Ländergemeinschaft Abfall und in zwei Fällen einen Lehm/Schluff Boden. Die in der Software STORM.Sim hinterlegten Werte für unterschiedliche Bodenzusammensetzungen geben für den Bodentyp ‚schluffiger Sand‘ einen k_f Wert von $6,83 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ an (STORM.Sim, 2023). Ein solcher k_f Wert lässt eine Vielzahl an RWBM zu. Zum einen die Muldenversickerung. Eine solche RWBM lässt sich bis zu einem k_f Wert von $2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ verwenden. Diese mögliche RWBM ist die technisch am einfachsten umsetzbare, jedoch benötigt sie am meisten Fläche. Des Weiteren gibt es die

Bewirtschaftung mittels Tiefbeet-Rigole (Riechel et al., 2017). Diese hat zwar einen geringeren Flächenbedarf, ist jedoch aufgrund der Einbautiefe von 30 cm im öffentlichen Bereich ein Gefahrenpotenzial (Nowak, 2019). Ein Mulden-Rigolen-Element hätte einen geringeren Flächenbedarf gegenüber einer reinen Muldenversickerung, ist jedoch mit der Software STORM.Sim nicht realisierbar (STORM.Sim, 2023; IGS, 2018). STORM.Sim bietet die Möglichkeit, ein Mulde-Rigolen-System zu bemessen (STORM.Sim, 2023). Diese kommen jedoch meist erst ab einem k_f Wert von unter $1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zum Einsatz und sind dementsprechend leistungsbezogen stark überdimensioniert für den Einsatz in der Stadthäger Innenstadt (Riechel et al., 2017). Im Folgenden wird eine Versickerungsmulde dimensioniert, da dies die einzige RWBM ist, die mittels des Programms realisiert werden kann und weder über- noch unterdimensioniert ist. Das grundlegende Kriterium für die dRWB am Standort Stadthagen ist die natürliche Wasserbilanz des Standortes, welcher in Abbildung 10 dargestellt ist.

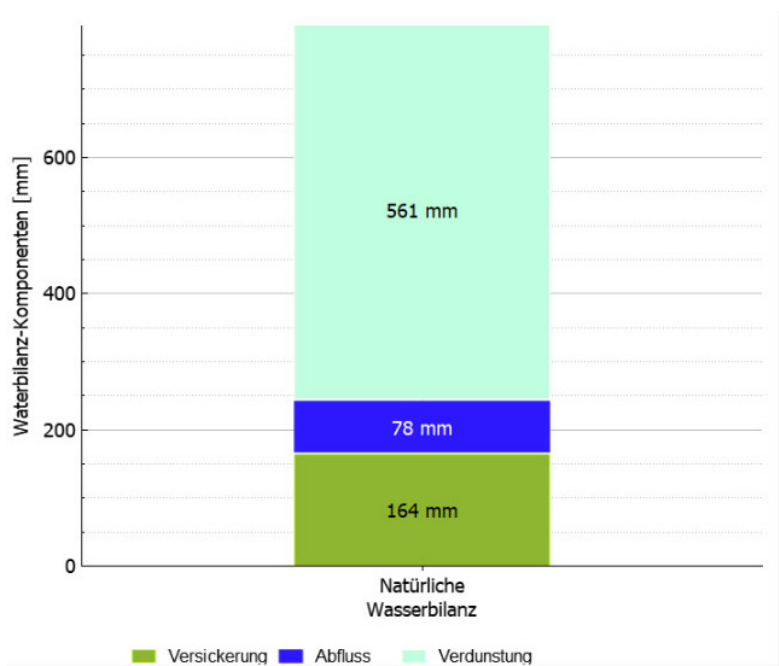


Abbildung 10 Natürliche Wasserbilanz des Standorts Stadthagen (Quelle: STORM.Sim)

Für die Dimensionierung der Versickerungsmulde ist die Jährlichkeit eine entscheidende Größe. Versickerungssysteme werden gewöhnlich auf eine Jährlichkeit von $n = 0,2 \text{ a}^{-1}$ bemessen. Dies bedeutet, dass die Anlagen so ausgelegt werden, dass es alle fünf Jahre aufgrund eines Starkregenereignisses zu einem Überlaufen kommt. Maßgeblich sind hier die Regendaten des KOSTRA-DWD-2020. Auch Versickerungsmulden werden auf eine Jährlichkeit von fünf Jahren bemessen. Die Mulde läuft also im Schnitt einmal alle fünf Jahre über (Nowak, 2019). Ein Ausschnitt der für den Standort

Stadthagen vorliegenden KOSTRA-Daten ist in Anhang 5 gegeben. Die Dauerstufe, die bei der Dimensionierung von Anlagen mit Rückhaltefunktion ausschlaggebend ist, wird dabei über den Vergleich der relevanten Dauerstufen (5min – 72 Stunden) ermittelt. Der Wert, der die größte Dimensionierung erfordert (ungünstigster Fall), ist dabei der ausschlaggebende (Sieker, o. D.a). In Abbildung 11 ist ein Ausschnitt aus dem Programm STORM.Sim zu sehen.¹ Die rot umrandete Fläche bildet dabei den Marktplatz der Stadthäger Innenstadt. Anhand der im Programm hinterlegten Geodaten, den KOSTRA-DWD 2020 Daten sowie dem HAD berechnet das Programm automatisch die natürliche Wasserbilanz (STORM.Sim, 2023). In Anhang 6 sind die Informationen über das Einzugsgebiet, inklusive der Größe des Gebiets von 0,388 ha, gegeben.

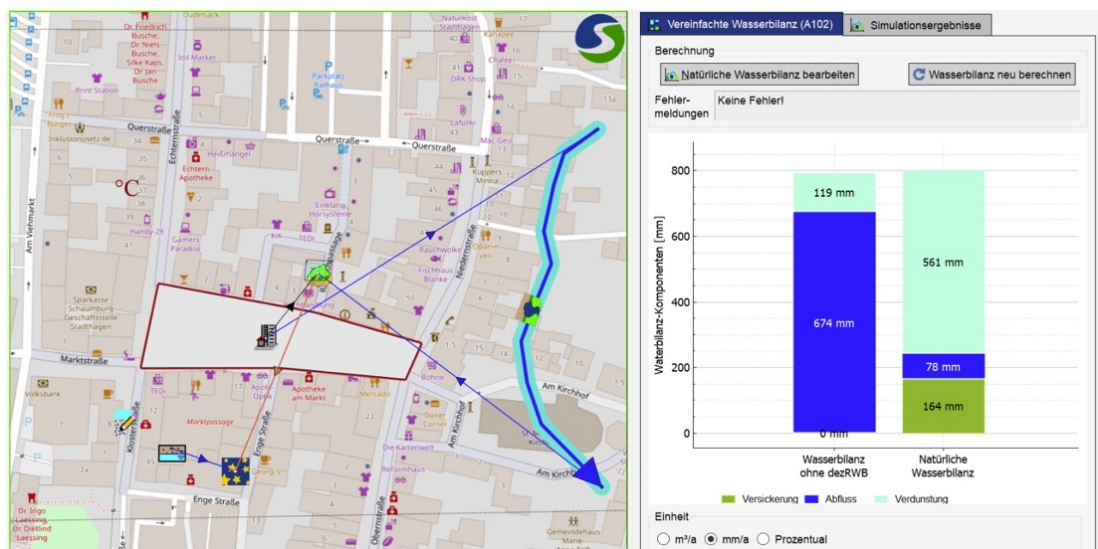


Abbildung 11 Stadthäger Markplatz ohne Versickerungsmulde (Quelle: Eigene Darstellung mittels STORM.Sim)

Für die Dimensionierung der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen in STORM.Sim sind sechs Systemelemente ausschlaggebend. Auf der einen Seite die Temperatur, die Verdunstung und die Regendaten, welche zusammengefasst die Klimadaten bilden. Die Verdunstung (jährliche Verdunstung von 561 mm), die Temperatur (jährlicher Mittelwert von 10.5 °C) und die in Anhang 5 gegebenen Regendaten werden dabei anhand der hinterlegten Daten im Programm automatisch auf das Einzugsgebiet angepasst. Die Systemelemente Gebietsauslass, Grundwasser und Fließgewässer haben auf der anderen Seite bei dieser vereinfachten Erstellung einer dezentralen Versickerungsanlage ohne die Rücksichtnahme auf Schadstoffbelastungen keinen Einfluss. Diese kommen unter anderem bei der Implementierung und Bilanzierung einer zentralen RWB zum Tragen. Die Systemelemente sind anhand verschiedener Symbole, wie

¹ Für eine Ansicht der vollständigen Benutzeroberfläche siehe Anhang 6

einer blauen Linie, welche für das Systemelement Fließgewässer steht, in der Software dargestellt (STORM.Sim, 2023). Für die in Abbildung 11 dargestellte aktuelle Wasserbilanz ohne dRWB wird die gesamte Einzugsfläche als undurchlässige Fläche definiert. Es wird dabei der Abflussbildungsparameter (ABP) ‚Pflaster mit dichten Fugen‘ gewählt. Dies entspricht dem in Anhang 3 dargestellten Bodenbelag des Marktplatzes. In Anhang 6 sind die Abflusswerte dieses ABP gezeigt. Die aktuelle Wasserbilanz zeigt eine deutlich geringere Verdunstung und einen erheblich höheren Ablauf des Regenwassers als die natürliche Wasserbilanz. Mittels der im Programm hinterlegten Rechenvorschriften nach DWA-138-1 kann nun eine Versickerungsmulde dimensioniert werden. Zunächst müssen jedoch die für die Mulde bestehenden Dimensionierungsvorschriften berücksichtigt werden. Hierbei wird sich an das Regelblatt 601 der Berliner Wasserbetriebe zum Regelquerschnitt der Mulden-Rigolen-Systeme gehalten (siehe Anhang 7). Dieses Regelwerk basiert auf den Vorgaben der FGSV für Mulden sowie Rigolen und ist somit auch geeignet, um die Dimensionierung der Mulde daraus abzuleiten. Daraus geht für die Bemessung der Mulde eine Neigung von 1:2 sowie eine Tiefe von 30 cm hervor. Überdies geht eine Mindestbreite der Sohle von 80 cm sowie eine Dicke der Mutterbodenschicht von 30 cm hervor (Berliner Wasserbetriebe, 2017). Die Höhe des Überlaufs ist dabei, wie von der Software vorgegeben, mit einem Wert von 0,25 m definiert (STORM.Sim, 2023). Bei der Dimensionierung wird ein Sicherheitszuschlag von 1,2 gewählt (DWA-138-1, 2020). Die benötigte Fläche wird nach Eingabe der relevanten Parameter wie den oben genannten Abmessungen der Mulde, der zugrunde liegenden Jährlichkeit sowie den im Programm hinterlegten KOSTRA und HAD-Daten nach DWA-A 138-1 berechnet. Die Fläche wird dabei iterativ berechnet, sodass auch das Regenwasser, was auf die Versickerungsmulde selbst fällt, mit in die Berechnung einbezogen wird (STORM.Sim, 2023). Die aus der Berechnung resultierenden Abmessungen für die Versickerungsmulde sind gänzlich in Anhang 8 dargestellt. Die Mulde weist eine Länge von 116,28 m, eine Breite von 4,1 m und eine resultierende Gesamtfläche von 476,75 m² auf. Dabei ist die Breite der Mulde, in Anlehnung an die von der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH gegebene Straßenaufteilung von Quartiersstraßen mit RWBM, auf 4,1 m festgelegt (IGS, 2018). Die Länge der Versickerungsmulde bleibt variabel und wird von dem Programm berechnet. Das resultierende Volumen der Versickerungsmulde beträgt 98,34 m³. Bei der Planung einer Versickerungsmulde ist bei einem hohen Versiegelungsgrad des Referenzgebiets zudem eine zusätzliche Grünfläche zur

vorübergehenden Retention des Regenwassers anzulegen. Diese Fläche misst dabei rund 10 bis 20 Prozent der angeschlossenen versiegelten Fläche (Sieker & Banerdmann, o. D.) Die vollständige Abmessung der dimensionierten Versickerungsmulde ohne zusätzliche Retentionsfläche ist in Anhang 8 dargestellt. Die Abmessung der Mulde mit Retentionsfläche ist in Anhang 9 dargestellt. Für die Grünfläche wurde die hinterlegte Wasserbilanz eines Laubwaldes verwendet. Diese weist eine Bilanz von 50 % Verdunstung, 5 % Abfluss und 45 % Versickerung auf. Vorlage ist hierbei die Integration von Bäumen in und an Versickerungsmulden. Die Integration von Baumbestand in der dRWB kann dabei zu einer Erhöhung der Verdunstungsleistung innerhalb des Bezugsgebietes führen, was sich positiv auf die Wiederherstellung der natürlichen Wasserbilanz auswirkt. Zudem profitieren die Bäume maßgeblich von der erhöhten Wasser- und Mineralstoffverfügbarkeit durch die Mulde. Die Wahl des Baumes ist dabei auch ein zu berücksichtigender Faktor. Für öffentliche Plätze eignen sich Eichen aufgrund der Staunässertoleranz und der geringen Astbruchgefahr (IGS, 2019).

Ergebnisse

In Abbildung 12 ist die resultierende Versickerungsmulde inklusive der angepassten Wasserbilanz dargestellt. Dabei repräsentiert die gelbe Teilfläche in der Mitte die Mulde.

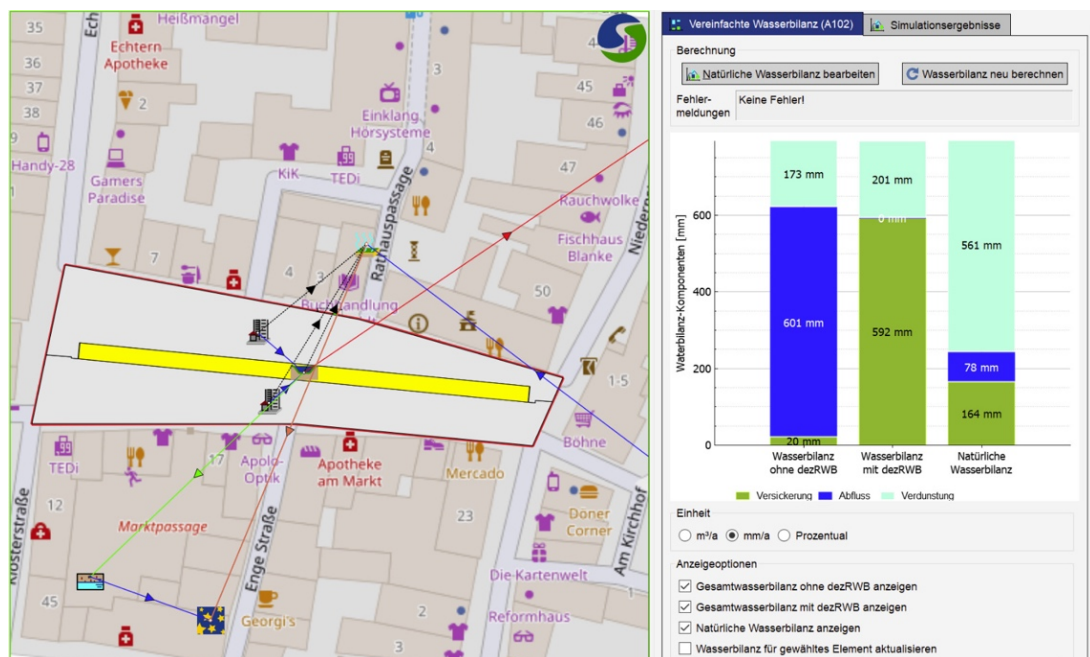


Abbildung 12 Stadthäger Markplatz mit Versickerungsmulde (Quelle: Eigene Darstellung mittels STORM.Sim)

Es ist eine deutliche Verschiebung der Wasserbilanz ersichtlich. Der Niederschlag, welcher ohne die Implementierung der RWBM als Abfluss anfällt, wird nun

vollständig versickert und so dem Grundwasser beigefügt. Zudem ist eine leichte Erhöhung der Verdunstung ersichtlich. In Abbildung 13 ist die Versickerungsmulde mit der angeschlossenen Grünfläche inklusive Wasserbilanz dargestellt. Gelb hinterlegt ist dabei wieder die Mulde. Die Teilfläche unterhalb der Mulde ist die zusätzliche Grünfläche.

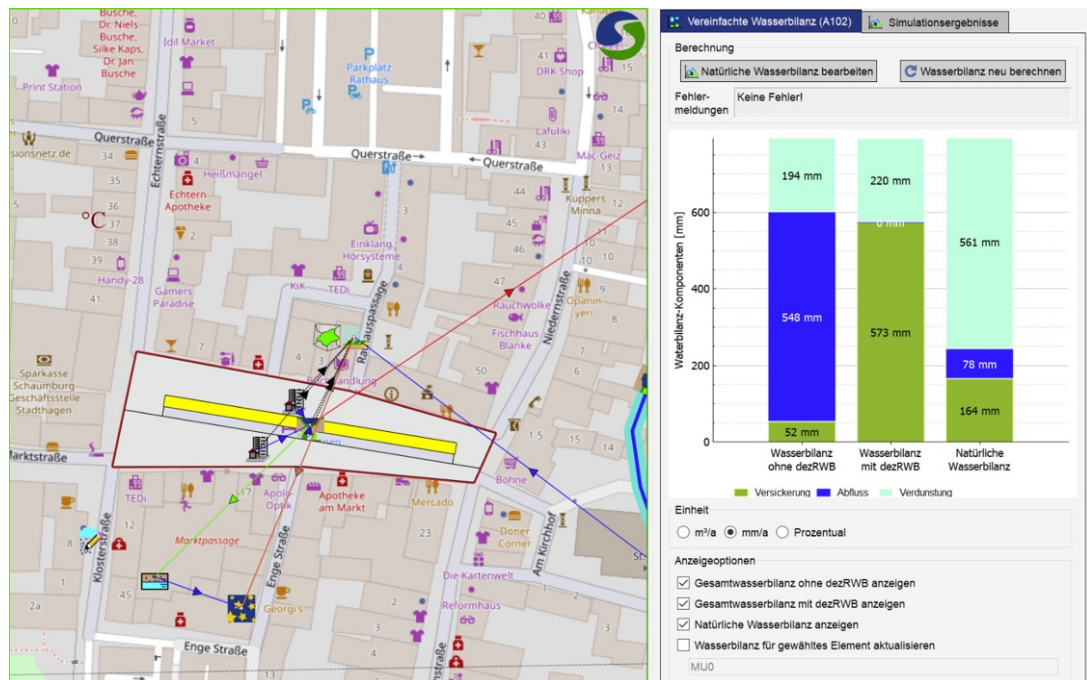


Abbildung 13 Stadthäger Marktplatz mit Versickerungsmulde und Retentionsfläche (Quelle: Eigene Darstellung mittels STORM.Sim)

Durch die veränderte Flächennutzung und den so reduzierten Ablauf des Regenwassers reduziert sich die benötigte Länge der Mulde von 116,28 m auf 105,46 m, die Fläche der Mulde von 476,75 m² auf 432,39 m² und das benötigte Volumen von 98,34 m³ auf 89,14 m³ (STORM.Sim, 2023). Die zusätzliche Grünfläche ist auf 367,52 m² dimensioniert. Das entspricht rund zwölf Prozent der angeschlossenen versiegelten Fläche. Diese setzt sich aus der Gesamtfläche des Platzes von 3.880 m² abzüglich der Fläche der Versickerungsmulde (432,38 m²) sowie der Grünfläche (367,52 m²) zu einer Fläche von rund 3.080 m² zusammen. Die positiven Effekte durch die Verschattung sowie die Verdunstung der Bäume werden nachfolgend mit der Software ENVI-met ermittelt.

4.4.2. ENVI-met

Um Daten bezüglich der potenziellen Einflüsse auf das Mikroklima durch die Integrierung der mittels STORM-Sim dimensionierten RWBM zu gewinnen, wird zunächst

ein 3D-Modell der Stadthäger Innenstadt erstellt. Um eine maßstabsgetreue Dimensionierung des Modells zu erreichen, wird dabei ein Bild aus der Vogelperspektive der Innenstadt mit einer Referenzlänge als Bitmap-Datei in die Hintergrundebene eingefügt (Siehe Abbildung 14).



Abbildung 14 Bitmap des Stadthäger Marktplatzes mit Referenzlänge (Quelle: Google Earth, 2023)

Die Anzahl der Zellen sowie die Größe dieser sind so ausgelegt, dass die Größe der Gebäude maßstabsgetreu abgebildet wird. In der Abbildung sind die einzelnen Zellen anhand eines Punktes in der Mitte der jeweiligen Zelle erkennbar. Eine Zelle entspricht $3 \cdot 3$ m (Siehe Anhang 11). Die für die Simulation verwendeten Konstruktionseigenschaften vom Dach und den Außenflächen sind dabei in Anhang 12 dargestellt. Diese werden dabei für die Gesamtheit der Gebäude als einheitlich angenommen. Für den Untergrund des Platzes wird der in dem Programm hinterlegte Bodenbelag ‚Basalt Brick Road‘ zu Deutsch ‚Basaltstein-Pflaster‘ verwendet (ENVI-met, 2023c). Dieser stimmt mit dem in Anhang 3 gezeigten Bodenbelag überein. Die Bemessungswerte für den Untergrund sind in Anhang 12 gegeben. In Abbildung 15 ist die integrierte Bebauung des Marktplatzes aus der Vogelperspektive dargestellt.



Abbildung 15 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes 2D (Quelle: ENVI-met, 2023c; Google Earth, 2023)

Erkennbar sind dabei auch die Unterschiede in der Höhe der Gebäude. In Abbildung 16 ist die gleiche Bebauung als 3D-Modell dargestellt. Der pinkfarbene Boden ist dabei der Bodenbelag Basalt Brick Road.

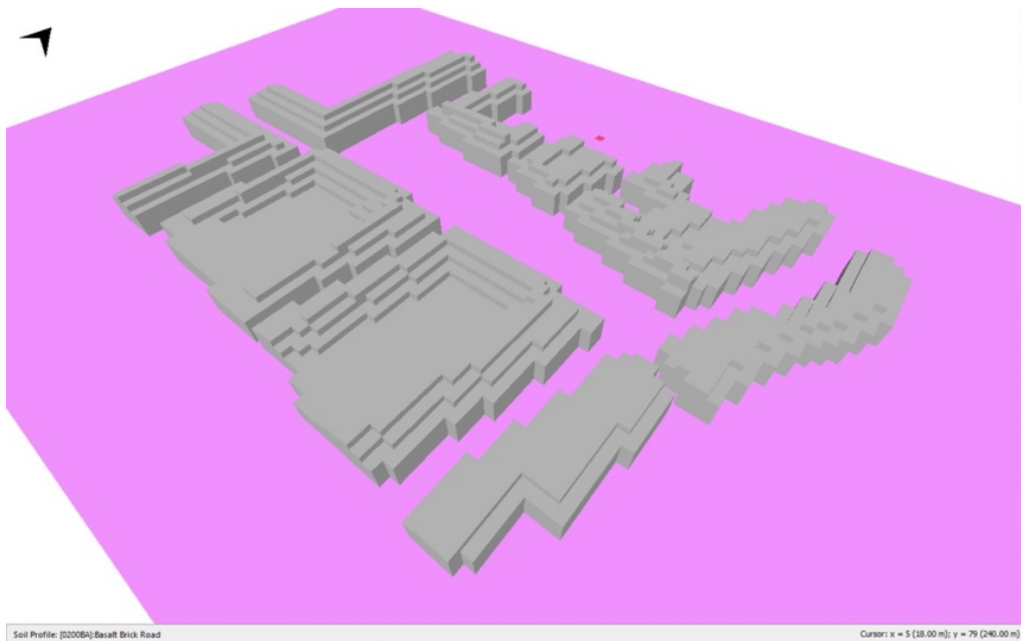


Abbildung 16 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes 3D (Quelle: ENVI-met, 2023c)

Die in Abbildung 17 und 18 dargestellte Grünfläche in der Mitte des Marktplatzes entspricht der in STORM.Sim dimensionierten RWBM. Bei der Erstellung des 3D-Modells wurde darauf geachtet, einen verhältnismäßig großen Abstand zwischen

Bebauung und Kartenrand zu realisieren, da dies zu einem besseren Simulationsergebnis führt (ENVI-met, 2023b).

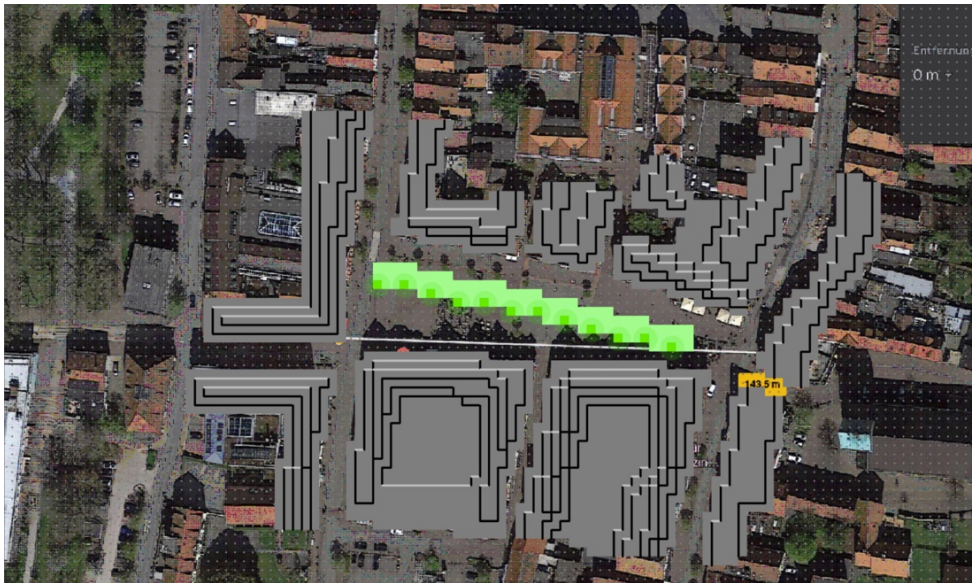


Abbildung 17 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes inklusive RWBM 2D (Quelle: ENVI-met, 2023c; Google Earth, 2023)

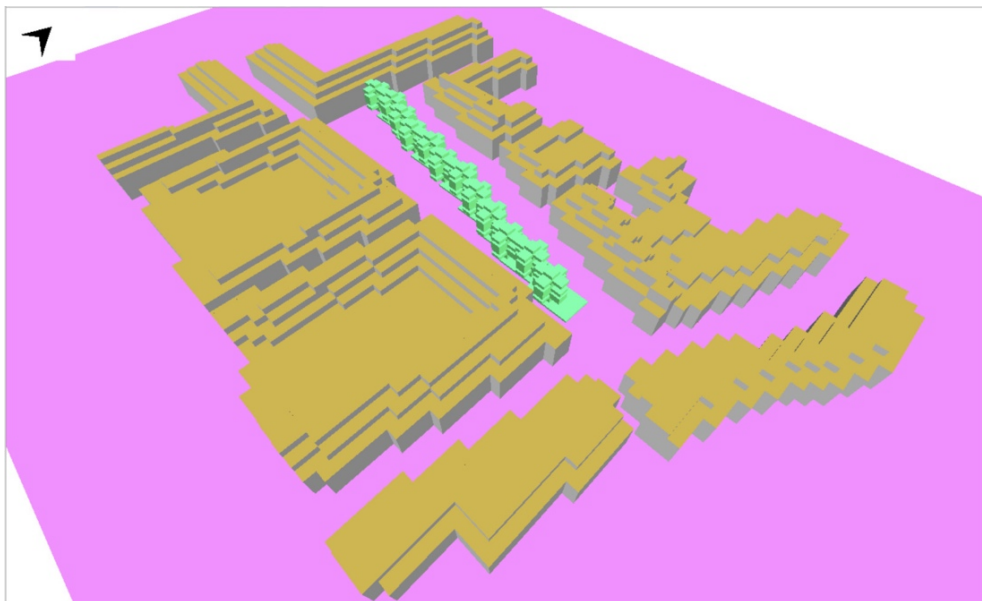


Abbildung 18 Bebauung des Stadthäger Marktplatzes inklusive RWBM 3D (Quelle: ENVI-met, 2023c)

Die mittels STORM.Sim dimensionierte RWBM hat eine Abmessung von $105 \cdot 7,6$ m. Aufgrund der durch die Abmessung der einzelnen Zellen gegebenen Maximalauflösung von $3 \cdot 3$ m ist die genaue Darstellung der RWBM nicht möglich. Mittels ENVI-met lässt sich dementsprechend entweder eine Fläche von $6 \cdot 105$ m oder $9 \cdot 105$ m realisieren. Dabei ist für die RWBM eine Fläche von $9 \cdot 105$ m realisiert, da diese näher am tatsächlichen Wert der dimensionierten RWBM liegt. Zudem ist wie bereits erläutert, ein Mindestanteil von 10 % der zusätzlichen Grünfläche an der

gesamten versiegelten Fläche einzuhalten. Dies ist bei einer Grünfläche von $6 \cdot 105 \text{ m}$ nicht erfüllt. Für die Begrünung der Mulde wird eine Grasfläche von mittlerer Dichte mit einer Höhe von 50 cm angenommen (Siehe Anhang 13). Die Wahl der Bepflanzung geht dabei auf die im Regelblatt 601 der Berliner Wasserbetriebe hinterlegten Bepflanzungen einer Versickerungsmulde zurück (Berliner Wasserbetriebe, 2017). Wie bereits erklärt, sind die in der Simulation verwendeten Bäume Eichen. In Abbildung 17 sind diese als dunkelgrüne Zellen im Grünstreifen dargestellt. In der Abbildung 18 ist die Dreidimensionalität der Eichen ersichtlich. Die Eichen wurden dabei in einem Abstand von mindestens sechs Metern zueinander integriert. Dies ist notwendig, um eine übermäßige Verschattung der Versickerungsmulde zu vermeiden. Diese könnte sonst zu Funktionseinbußen und Wachstumsbeeinträchtigungen der in der Mulde befindlichen Begrünung führen (Rehfeld-Klein, 2021). Eine 3D-Ansicht der verwendeten Eichen ist in Anhang 14 dargestellt. Die Höhe der Eiche ist dabei vom Programm mit 11,31 m vorgegeben. Das Datum der Simulation ist der 10.07.2023. Für die Simulation des 3D-Modells sind meteorologische Parameter festzulegen. Im Anhang 15 sind die eingetragenen Werte dargestellt. Die meteorologischen Daten ergeben sich dabei zum einen aus den für den 10.07.2023 von dem Programm vorgeschlagenen Daten für den Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverlauf, den vorgeschlagenen Werten für die spezifische Luftfeuchtigkeit in 2.500 m und der Oberflächenrauheit und der Wolkenbedeckung (ENVI-met, 2023c). Zum anderen ist für den Standort Stadthagen ein für Deutschland typischer Westwind mit einer Stärke von $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ angenommen (Brasseur et al., 2017). Die Windstärke resultiert aus der verfügbaren Rechenleistung, da eine höhere Windgeschwindigkeit bei der Größe der Simulation zu erheblichen Fehlern führt. Die Zeiten der Simulationen sind auf 4:00 bis 5:00 Uhr, 10:00 bis 11:00 Uhr, 15:00 bis 16:00 Uhr und 22:00 bis 23:00 Uhr festgelegt. Aufgrund der hohen Relevanz wird sich bei der Betrachtung der Ergebnisse im Folgenden auf den Zeitraum zwischen 15:00 und 16:00 Uhr sowie auf den Zeitraum zwischen 4:00 und 5:00 Uhr konzentriert. Dies resultiert zum einen aus der Tatsache, dass die Tageshöchsttemperatur ungefähr um 16 Uhr erreicht wird und so eine hohe Relevanz für eine Abkühlung des Platzes vorliegt (Sieker et al., 2019; Brasseur et al., 2017). Zum anderen soll so der Einfluss der RWBM auf das nächtliche Mikroklima untersucht werden. Die restlichen Zeiten wurden so gewählt, dass eine Betrachtung der unterschiedlichen Tagesabschnitte (morgens, mittags, abends, nachts) möglich ist. Für die

Auswertung der Simulationsergebnisse wird sich maßgeblich an dem UTCI orientiert. Dies geschieht in Anlehnung an den vom UBA veröffentlichten Abschlussbericht zur Potenzialanalyse von Verdunstungskühlungen in städtischen Kontexten (Sieker et al., 2019). Für die Berechnung der UTCI-Werte wird eine Frau mittleren Alters mit sommerlicher Kleidung verwendet (siehe Anhang 16).

Ergebnisse

Die in den Abbildungen 19 und 20 dargestellten UTCI-Werte, zeigen eine erhebliche Hitzebelastung durch die auftretenden Temperaturen im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr. Die Referenzhöhe der UTCI- sowie Lufttemperaturmessung ist dabei auf 1,5 m festgelegt. Auf der Fläche des Marktplatzes ist im unbegrüntem Zustand ein nahezu homogener Wert von rund 36 °C zu erkennen. Lediglich im Schatten der Hausfassaden sind deutlich niedrigere UTCI-Werte erkennbar. Dort werden Werte von rund 26 °C erreicht.

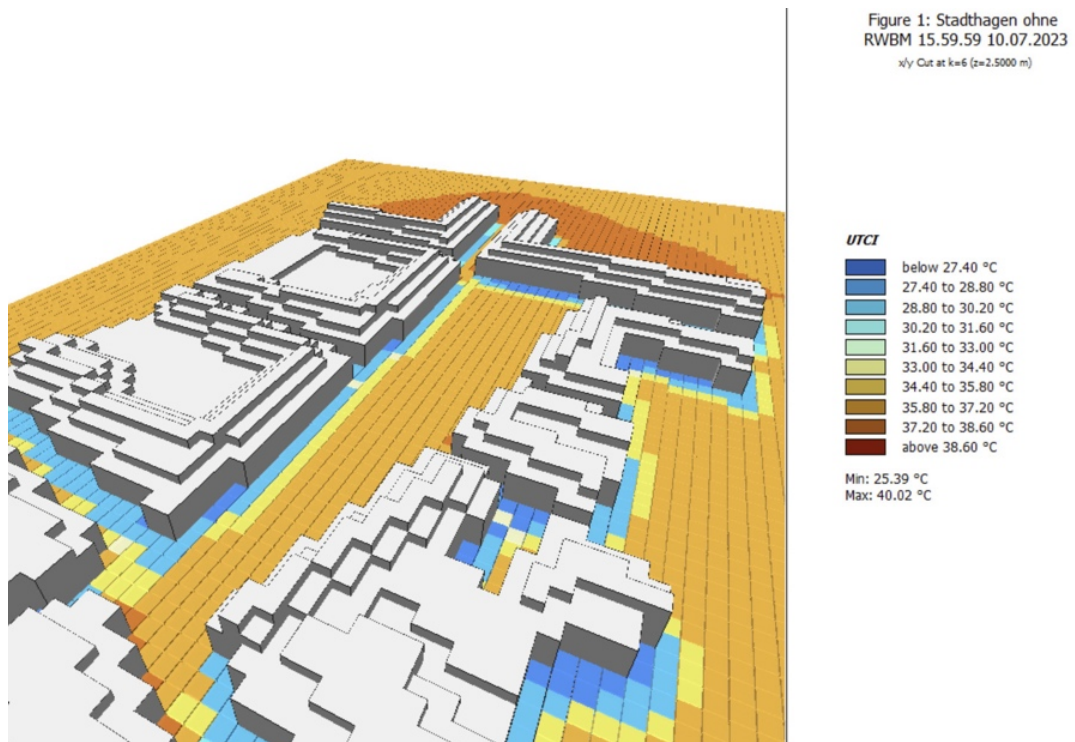


Abbildung 19 UTCI-Profil ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 3D (Quelle: Eigene Darstellung mittels ENVI-met, 2023c)

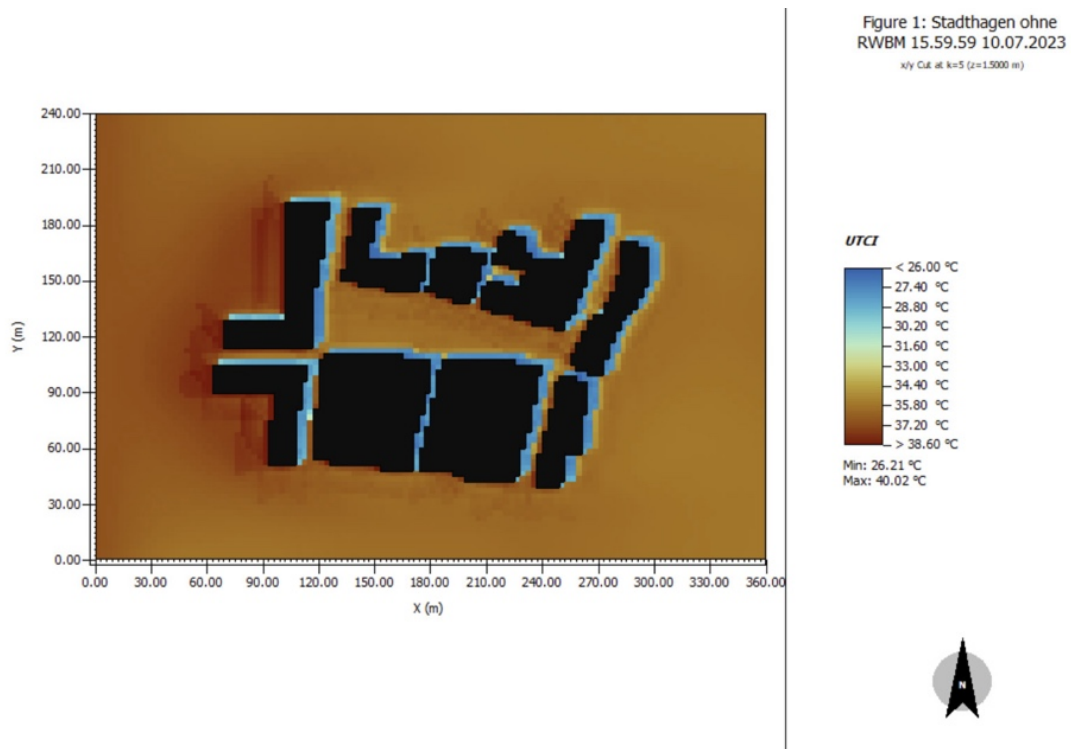


Abbildung 20 UTCI-Profil ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 2D (Quelle: Eigene Darstellung mittels ENVI-met, 2023c)

Neben den an den Häuserfassaden auftretenden Minimalwerten, treten Maximalwerte am linken Rand des Marktplatzes auf. Jedoch ist hier anzumerken, dass es sich bei der Darstellung lediglich um ein selbst gewähltes Referenzgebiet handelt und die Bebauung der Stadthäger Innenstadt über die in dem 3D-Modell erstellten Grenzen hinausgeht. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der Maximalwerte außerhalb des Marktplatzes im Folgenden ausgeklammert. In Abbildung 21 und 22 sind die UTCI-Werte auf dem Stadthäger Marktplatz mit der dimensionierten RWBM dargestellt. Darüber hinaus ist im Anhang 18 die Lufttemperatur des Marktplatzes im begrünnten und im unbegrünnten Zustand in dem Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr dargestellt. Ein Vergleich dieser beiden Temperaturprofile ist in Anhang 19 dargestellt. Durch die Implementierung der Grünfläche ist im Bereich der Bepflanzung eine deutliche Reduzierung der UTCI-Werte erkennbar.

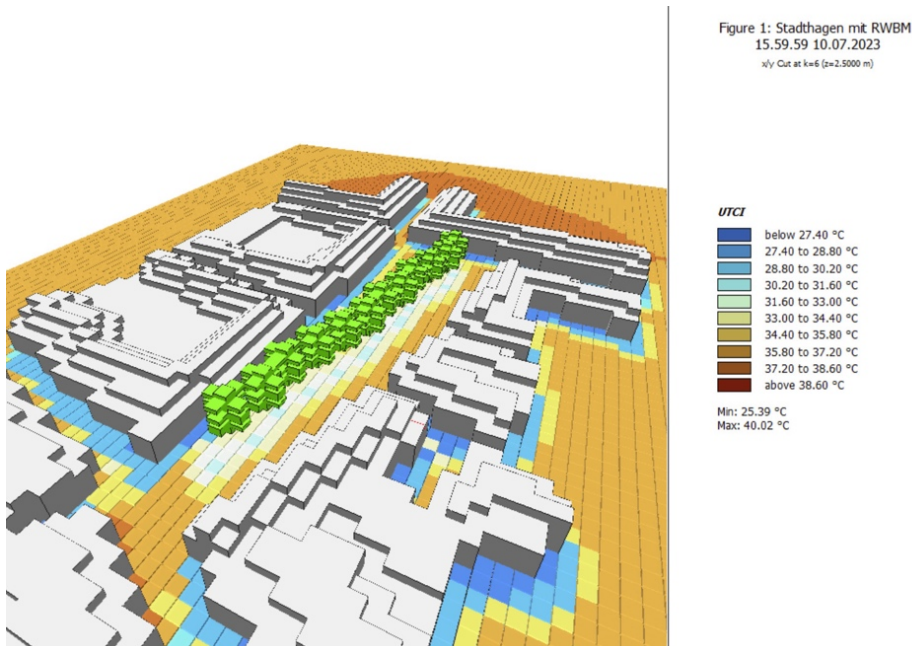


Abbildung 21 UTCI-Profil mit RWBM 16:00-17:00 Uhr, 3D (Quelle: Eigene Darstellung mittels ENVI-met, 2023c)

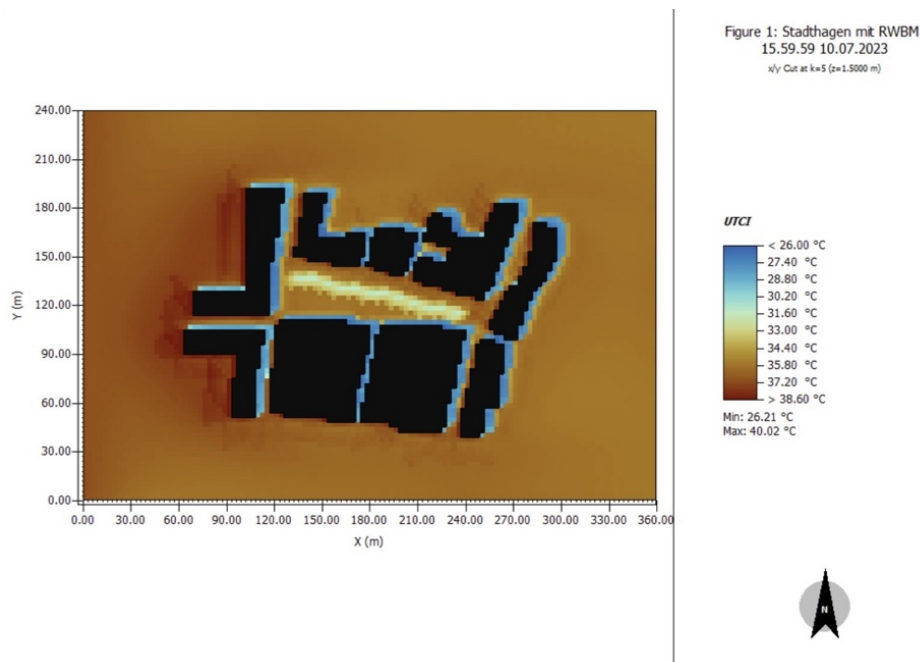


Abbildung 22 UTCI-Profil mit RWBM 16:00-17:00 Uhr, 2D (Quelle: Eigene Darstellung mittels ENVI-met, 2023c)

Dabei sinken die Werte in der Mitte der Bepflanzung auf bis zu 31 °C. Es ist jedoch erkennbar, dass die Reduzierung der Temperatur lediglich im bepflanzten Bereich auftritt und nicht zu einer generellen Abkühlung des Marktplatzes führt. Dies lässt darauf schließen, dass der verringerte UTCI-Wert hauptsächlich auf die Beschattung durch die Bäume zurückzuführen ist. Ein erheblicher Einfluss durch die Verdunstungskühlung lässt sich anhand dieser Messergebnisse nicht erkennen.

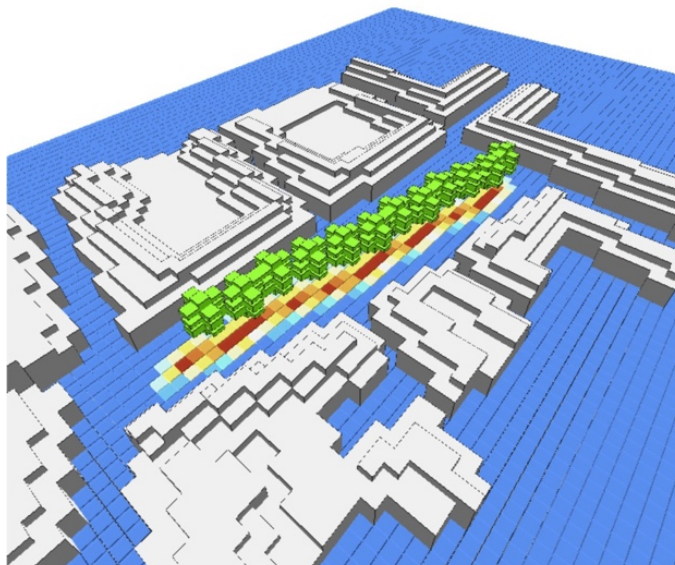


Figure 1: Vergleich Stadthagen ohne RWBM 15.59.59 10.07.2023 mit Stadthagen mit RWBM 15.59.59 10.07.2023
x/y Cut at k=5 (z=1.5000 m)



Abbildung 23 UTCI-Vergleich mit/ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 3D (Quelle: Eigene Darstellung mittels ENVI-met, 2023c)

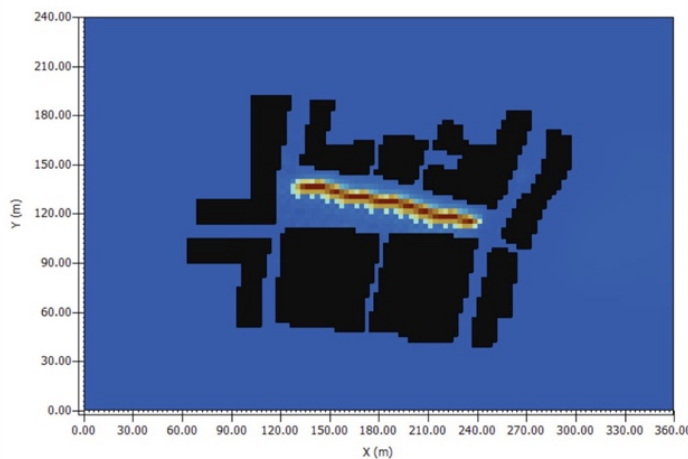


Figure 1: Vergleich Stadthagen ohne RWBM 15.59.59 10.07.2023 mit Stadthagen mit RWBM 15.59.59 10.07.2023
x/y Cut at k=5 (z=1.5000 m)

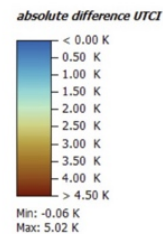


Abbildung 24 UTCI-Vergleich mit/ohne RWBM 16:00-17:00 Uhr, 2D (Quelle: Eigene Darstellung mittels ENVI-met, 2023c)

In Abbildung 23 und 24 ist der direkte Vergleich zwischen den UTCI-Werten der beiden Szenarien gegeben. Auch hier ist die erhebliche Reduzierung der Temperatur um bis zu 5 °C zu sehen. Bei der Betrachtung der Temperatur sowie der UTCI-Werte bei Nacht ergibt sich ein konträres Bild. In Abbildung 25 ist dabei die Differenz der nächtlichen UTCI-Werte dargestellt.

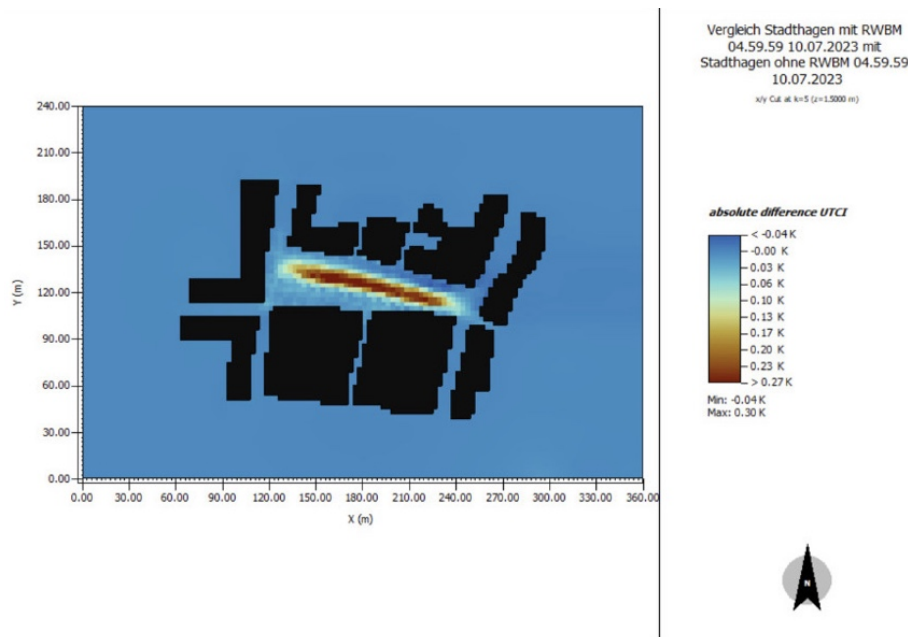


Abbildung 25 UTCI-Vergleich mit/ohne RWBM 4:00-5:00 Uhr, 2D (Quelle: Eigene Darstellung mittels ENVI-met, 2023c)

Bei der Betrachtung der nächtlichen UTCI-Werte ist darauf zu achten, dass das Referenzszenario, aufgrund des vereinheitlichten Farbschemas, getauscht ist. Die rote Teilfläche in der Mitte zeigt dementsprechend nicht wie in Abbildung 24 eine Reduzierung der UTCI-Werte, sondern eine Erhöhung der UTCI-Werte, im Vergleich zum unbeplanten Zustand. Die maximale Erhöhung liegt dabei bei $0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Oberhalb der Bepflanzung kommt es auch zu einer kleinräumigen Verringerung der UTCI-Werte. Die maximale Verringerung beträgt $0,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Implementierung einer RWBM führt dementsprechend sowohl zu einer Erhöhung wie auch zu einer Verringerung der UTCI-Werte. In den Anhängen 19 und 20 sind die Untersuchungsergebnisse für die Zeiträume von 10:00 bis 11:00 Uhr und von 22:00 bis 23:00 Uhr dargestellt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse im Zeitraum von 22:00 bis 23:00 Uhr ergibt sich ein vergleichbares Bild wie beim nächtlichen Szenario von 4:00 bis 5:00 Uhr. Auch hier kommt es zu einer großflächigen Erhöhung des UTCI-Wertes (max. $0,32 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und gleichzeitig zu einer kleinflächigen Abkühlung (max. $0,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Im Vergleich dazu ergibt sich bei dem morgendlichen Szenario von 10:00 bis 11:00 Uhr eine erhebliche Verringerung der UTCI-Werte. Die maximale Abkühlung beträgt dabei $3,87 \text{ }^{\circ}\text{C}$. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sowohl im Zeitraum von 10:00 bis 11:00 Uhr, als auch im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr, zu einer geringen Erhöhung der UTCI-Werte kommt. Aufgrund der Skalierung sind diese minimalen Änderungen jedoch nicht in der Darstellung erkennbar und dementsprechend nicht lokalisierbar. Beim

morgendlichen Szenario beträgt die maximale Erhöhung 0,05 °C und im mittäglichen Szenario 0,06 °C.

5. Diskussion und Handlungsempfehlungen

Städte stehen vor dem Hintergrund des Klimawandels vor einer Vielzahl an Problemen. Bereits heute zeigt sich ein hoher Druck auf die zentralisierte Regenwasserableitung, die in den meisten Städten der Stand der Technik ist (Arle et al., 2017). Der Klimawandel wird den Druck auf Städte weiter erhöhen. Wetterextreme werden häufiger auftreten, was zur Vermehrung von städtischen Überflutungen und Hitzeperioden führen wird. Dabei werden sich neben materiellen Beschädigungen, wie die durch eine Überflutung entstehenden Lädierungen an Häusern und Fahrzeugen, in Zukunft auch die negativen Einflüsse auf die Menschen und die Natur in den Städten häufen (Becker et al., 2015). So ist das Stadtgrün unter dem fortschreitenden Klimawandel immer stärkeren Stressfaktoren ausgesetzt. Im Sommer führen höhere Temperaturen, weniger Niederschläge, eine höhere Verdunstung und die großflächige Ableitung von Niederschlagswasser zu einem Absinken des Grundwasserspiegels. Die sich gegebenenfalls daraus bildenden Dürren sorgen für eine starke Beeinträchtigung der Funktionalität der Stadtbegrünung (Dosch et al., 2015). Auch die Bewohner von städtischen Gebieten leiden vermehrt unter der extremen Hitze. Durch die hohen Temperaturen kann es zu erheblichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen kommen. Dabei sind vor allem die sensiblen Bevölkerungsgruppen wie Säuglinge, alte Menschen, kranke Menschen oder auch arme Menschen betroffen (Becker et al., 2015). Städten kommt dabei eine zentrale Rolle zu. Mit dem stetigen Zuwachs in städtischen Gebieten bilden diese den Grundlegenden Lebensraum für eine immer größer werdende Anzahl an Menschen. Mit der dafür notwendigen Erschließung weiterer Flächen geht jedoch auch eine Erhöhung des Versiegelungsgrades einher. Dies wiederum führt zu einer Verschärfung sowohl der Hitze- als auch der Überflutungsproblematik (Müller et al., 2023). Neben der höheren Vulnerabilität gegenüber Starkregenereignissen und extremer Hitze bringt die zunehmende Versiegelung städtischer Räume weitere Probleme mit sich. Da der Regen Partikel von Oberflächen wie Fassaden oder Böden aufnimmt und danach zentral abgeleitet wird, kann es zu einer erhöhten Schadstoffbelastung im Abwasser kommen, welcher in Kläranlagen unter Aufwand komplexer Techniken entgegengewirkt werden muss (Arle et al., 2017). Diesen Problemen kann durch den Einsatz von dRWB entgegengewirkt werden. Diese Art des Umgangs mit Regenwasser ist sowohl national

wie auch international in diversen Projekten realisiert und validiert worden (Hörn-schemeyer et al., 2023). Die dRWB bietet dabei als Teil eines Lösungskonzeptes die Möglichkeit einer Vielzahl von klimabedingten Problemen in städtischen Gebieten entgegenzuwirken (Becker et al., 2015).

Bei der Bewältigung der städtischen Hitze Problematik ist die Verwendung dezentraler Lösungsansätze in mehreren Hinsichten von Vorteil. Zum einen kann die direkte Verschattung durch RWBM, wie beispielsweise Fassadenbegrünungen, Dachbegrünungen oder auch Bäume, zu einer erheblichen Reduzierung der Hitzebildung führen. Besonders die Verschattung durch Fassadenbegrünungen hat dabei ein großes Kühlungs-potential. So kann diese beispielsweise zu einer Verringerung der notwendigen Kühlleistung am Gebäude um 50 % führen (Sieker et al., 2019). Dies konnte am Institut für Physik in Berlin anhand verschiedener Fassadenbegrünungen nachgewiesen werden (SenStadt, 2010). Neben der Verschattung durch Fassadenbegrünungen kann auch die Verschattung durch Bäume einen positiven Einfluss auf die klimatischen Bedingungen innerhalb und außerhalb der Gebäudeebene haben (Sieker et al., 2019). Durch Bäume erzielte Verschattungen können dabei mehrere Meter vom Baum entfernt noch zu einer Reduzierung der Hitze führen. Gerade auf Plätzen und Straßen macht sich dieser Effekt bemerkbar. Baumrigolen, also die Kombination zwischen einer Baumbepflanzung und einer Rigole, haben dabei eine besonders hohe Verschattungsleistung (Matzinger et al., 2017). Durch die erhöhte Bodenfeuchte, aufgrund der Versickerung des Niederschlagswassers durch die Rigole, steht der Baumbepflanzung mehr Wasser zur Verfügung. Dies resultiert in einem gesteigerten Wachstum des Baumes und dementsprechend auch in einer größeren schattenspendenden Baumkrone. Dabei sind solche Effekte auf das Wachstum der Stadtbäume auch bei der Kombination mit anderen Versickerungsanlagen, wie beispielsweise Muldenversickerungen, festzustellen (IGS, 2019; IGS, 2018). Die Verschattung kann eine signifikante Änderung des Humanbioklimas in städtischen Gebieten herbeiführen (Matzinger et al., 2017). So kann, wie im Fallbeispiel der Stadthäger Innenstadt, an einem windschwachen Sommertag der Unterschied im UTCI-Wert zwischen beschatteter Fläche unterhalb eines Baums und nicht beschatteter Fläche 5 °C betragen. Dies kann der Unterschied zwischen einer sehr starken Hitzebelastung und einer starken Hitzebelastung sein (Krüger, 2021). Neben der Verschattung und somit der direkten Kühlung, können RWBM auch indirekt über die Verdunstung zu einer Kühlung der umliegenden Luftschichten führen. Diese

Kühlleistung hängt dabei von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu gehören unter anderem der Boden, die Vegetation und die Wasserverfügbarkeit. Zentral ist dabei auch die vorherrschende Stadtstruktur. So kann davon ausgegangen werden, dass in kleineren Städten bzw. in weniger dicht bebauten Stadtteilen das Potenzial der Verdunstungskühlung höher ist als in dicht bebauten Stadtstrukturen. Das Abkühlungspotenzial durch die Verdunstung an RWBM, bewegt sich im Bereich um einen Grad. Auf Quartiersebene kann durch die Etablierung von RWBM, eine deutliche Verringerung des Hitzestresses und der Ausprägung von Tropennächten erreicht werden. Die Art sowie der Standort der Maßnahme sind wesentliche Faktoren für die mögliche Verdunstungsleistung. Die Integration von Maßnahmen ist besonders effektiv, wenn sie an Teilräumen realisiert wird, welche besonderem Hitzestress ausgesetzt sind. Zudem haben besonders Fassadenbegrünungen und Baum-Rigolen das Potenzial zu einer Verdunstungskühlung im städtischen Kontext beizutragen (Sieker et al., 2019). Auch künstlich angelegte Wasserflächen, wie der am Potsdamer Platz realisierte Piano-See, haben ein hohes Verdunstungspotenzial und können gleichzeitig als Retentionsfläche sowie künstlerisches Element des Städtebaus etabliert werden (Hoyer et al., 2011). Durch Dachbegrünungen können hohe Verdunstungsraten erzielt werden, jedoch ist die Kühlleistung im Außenbereich geringer als die Kühlleistung von Fassadenbegrünungen und Bäumen (Sieker et al., 2019).

Jedoch kommt der Dachbegrünung bei der Resilienzsteigerung gegenüber Starkregenereignissen in städtischen Gebieten eine zentrale Rolle zu. Je nach Art der Dachbegrünung können erhebliche Mengen an Niederschlagswasser zurückgehalten und gegebenenfalls direkt verdunstet werden. Der Niederschlagsrückhalt spielt bei der Überflutungsvorsorge eine wichtige Rolle. Durch die verzögerte Ableitung von Niederschlagswasser können Niederschlagspitzen abgeschwächt werden, was zu einer Entlastung des Entwässerungssystems führt. Neben Dachbegrünungen können auch Gewässer, Rigolen und andere Versickerungsanlagen zu einer erhöhten Regenrückhaltung beitragen (Becker et al., 2015). Auch die Regenwassernutzung kann einen Beitrag zur Entlastung der Kanalisation leisten. Beispielsweise wird das für die Nutzung von Toiletten verwendete Regenwasser häufig in großen Zisternen gespeichert. Dieses zusätzliche Retentionsvolumen kann analog zur Dachbegrünungen eine gedrosselte Ableitung des Regenwassers ermöglichen (Dosch et al., 2015). Die am Potsdamer Platz integrierte Regenwassernutzung zeigt darüber hinaus auch das Potenzial Frischwasser

einzusparen, um so auch ökonomische Vorteile aus der dRWB zu ziehen (Hoyer et al., 2011). Neben der Retention kann auch die Versickerung von Niederschlägen zu einer Resilienzsteigerung gegenüber Starkregenereignissen führen. Natürliche Flächen können im Gegensatz zu versiegelten Flächen Wasser aufnehmen, welches dann versickert und so in das Grundwasser überführt wird (Dosch et al., 2015). Die dezentrale Versickerung des Niederschlagswassers kann die Kanalisation entlasten, da das Wasser am Ort des Niederschlags versickert und/oder verdunstet, im Regelfall allerdings nicht in die Kanalisation abgeleitet wird. Versickerungsanlagen sind darüber hinaus so gestaltet, dass sie bei Starkregenereignissen Wasser vorübergehend speichern können (Kind et al., 2019). Die Art der Versickerungsmaßnahme ist dabei von äußeren Faktoren abhängig. Je nach Versickerungsfähigkeit des Bodens und der Schadstoffbelastung des Niederschlagswassers müssen spezielle Anlagentypen verwendet werden (IGS, 2018). Das Bauprojekt Hannover-Kronsberg zeigt dabei, dass es trotz schlechter Durchlässigkeitswerte des Bodens möglich ist, eine große versiegelte Fläche dezentral zu bewirtschaften. Dabei ist zum einen die Größe der gebauten Maßnahmen und zum anderen die auf den Standort angepasste Kombination der RWBM maßgeblich für den Erfolg der in Hannover-Kronsberg realisierten dRWB verantwortlich (Altevers et al., o. D.) Allgemein zeichnet sich die dRWB durch eine hohe Variabilität der realisierbaren Lösungen aus. Kaskadensysteme, also die Bewirtschaftung des Regenwassers über mehrere Maßnahmen, zeigen diesen Sachverhalt deutlich. Eine Kombination von Dachbegrünung, Regenwassernutzung und einer urbanen Wasserfläche, wie sie am Potsdamer Platz integriert wurde, ist nur eines von einer Vielzahl von möglichen Kaskadensystemen (Altevers et al., o. D.; Hoyer et al., 2011). Durch die große Anzahl an Möglichkeiten lassen sich Regenwasserbewirtschaftungssysteme auf die speziellen Ansprüche eines Gebietes anpassen (Becker et al., 2015). Die Kombination verschiedener Maßnahmen kann dabei dafür sorgen, den natürlichen Wasserhaushalt wiederherzustellen. Der Wasserhaushalt in Städten ist durch einen erheblichen Abfluss des Niederschlagswassers geprägt. Durch die Herstellung der natürlichen Wasserbilanz, welche einen hohen Anteil an Verdunstung und Versickerung aufweist, lässt sich eine höhere Resilienz gegenüber klimatischen Extremen herstellen (Müller et al., 2023). Dabei wird bereits im Gesetz festgelegt, dass der Versickerung von Niederschlagswasser, im Gegensatz zur Ableitung mittels einer Mischkanalisation, Vorrang zu geben ist (§55 Abs. 2 WHG). Die Herstellung eines naturnahen Wasserhaushaltes ist dabei als Idealziel festzulegen, welches auf lange Sicht erreicht werden kann (Müller et al.,

2023). Der Anspruch, anfallendes Niederschlagswasser zu Verdunsten und so einen Beitrag zur Herstellung eines naturnahen Wasserhaushalts zu leisten, ist aktuell nicht rechtlich festgelegt. Mit der Einführung der DWA-M 102, welche das Ziel definiert, die Versickerung, die Verdunstung, und den Abfluss auf ein unbebautes Niveau zu heben, ist dabei jedoch bereits eine technische Regel etabliert, welche das Ziel des naturnahen Wasserhaushalts aufgreift (Sieker et al., 2019; DWA-M 102-4, 2022). Mit einer Realisierung in großflächigen Referenzgebieten, wie beispielsweise einer deutschen Großstadt, in den nächsten Jahren nicht zu rechnen (Müller et al., 2023). Jedoch zeigt das Bauprojekt Hannover-Kronsberg, dass die Kombination verschiedener Maßnahmen ein hohes Potenzial bietet auch nach der Bebauung den natürlichen Wasserhaushalt beizubehalten (Altevers et al., o. D.). Die dRWB hat zudem das Potenzial zu einer erheblichen Entlastung des Schadstoffeintrages in öffentliche Gewässer zu führen. Da das Regenwasser dezentral versickert und/oder behandelt wird können Schadstoffe am Ort des Entstehens abgetrennt werden. Die Schadstoffe können dabei beispielsweise von den Mikroorganismen in der belebten Bodenschicht einer Versickerungsmulde zersetzt werden. Durch die dezentrale Behandlung können Kläranlagen entlastet werden, was zu einer höheren Wasserqualität des Kläranlagenablaufs führen kann (Müller et al., 2023). So kann beispielsweise durch das fortlaufende Zirkulieren des Niederschlagswassers durch eine belebte Bodenzone am Potsdamer Platz in Berlin, eine für Berliner Verhältnisse überdurchschnittlich hohe Wasserqualität im künstlich angelegten Piano-See erreicht werden (Hoyer et al., 2011; Bimoka, 2020b). RWBM haben darüber hinaus eine Vielzahl weiterer positiver Einflüsse auf Mensch und Natur. So kann durch die Schaffung von Grünflächen Lebensraum für eine Vielzahl von Tieren und Insekten entstehen. Bei der Planung von RWBM kann dabei auf die Wahl der Pflanzen geachtet werden, um einen höchstmöglichen Beitrag zur Steigerung der Biodiversität zu gewährleisten. Neben den oben genannten Vorteilen kommen der dRWB unter dem Begriff ‚Ökosystemdienstleistungen‘, also positive Einflüsse, die Ökosysteme auf den Menschen haben, noch weitere Aspekte hinzu (Matzinger et al., 2017). Die Schaffung von Grünflächen im Kontext der dRWB kann zu einer Steigerung des menschlichen Wohlbefindens führen. Neben der direkten und indirekten Kühlung der Umgebungstemperatur können Grünflächen auch zu einer Verbesserung der Luftqualität führen, als Lärmschutz dienen und generell Orte zur Naherholung schaffen (Trapp et al., 2020).

Bei der Integrierung von RWBM muss auch auf mögliche negative Folgen und gegebenenfalls auftretende Problematiken geachtet werden, die während der Planung und des Betriebs auftreten können. Durch den erhöhten Wassereintrag in den Boden kann es durch Versickerungsanlagen zu Schäden an Gebäudfundamenten, Kellern und an der verbauten Leitungsinfrastruktur kommen. Auch kann es durch den Rückstau von Wasser gegebenenfalls zu einer zeitweiligen Überflutung von Verkehrswegen kommen. Im Fall eines Überlaufens von Retentions speichern kann es deshalb zu Sachschäden an Autos und anderen Fahrzeugen kommen. Neben den Sachschäden kann es durch die Implementierung einer dRWB auch zu Schäden an der menschlichen Gesundheit kommen. Überstaute Retentionsräume können eine Gefahr für Menschen darstellen, da sie gegebenenfalls vorübergehend genug Wasser beinhalten, um eine Ertrinkungsgefahr darzustellen (Müller et al., 2023). Auch kann es bei der antizipierten Kühlleistung durch die dRWB zu einer gegensätzlichen Wirkung kommen. Durch veränderte Strömungsverhältnisse kann es lokal zu einer Erhöhung des UTCI kommen. Diesbezüglich ist es bei der Bewertung der Maßnahme zentral, die Veränderung des Mikroklimas über einen genügend langen Zeitraum zu betrachten, um eine fundierte Aussage über die Wirksamkeit der Maßnahme treffen zu können. So kann es beispielsweise temporär und lokal durch eine RWBM zu einer Erhöhung der nächtlichen Temperatur kommen, jedoch kann die gleiche Maßnahme längerfristig zu einer Reduzierung der Tropennächte führen (Sieker et al., 2019; Matzinger et al., 2017).

RWBM können durch Geruchs- oder Lärmbildungen, welche beispielsweise durch den Betrieb von Pumpsystemen erzeugt werden, einen negativen Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden haben (Müller et al., 2023). Maßnahmen der dRWB sind häufig mit einem hohen Flächenanspruch verbunden. Daraus können Zielkonflikte entstehen. Beispielsweise kann es vorkommen, dass der für eine Dachbegrünung verwendete Platz nicht für den Ausbau von Solaranlagen verwendet werden kann (Hachmann, 2020). Nutzungskonflikte bestehen dabei vor allem bei der Integrierung von RWBM im Bestand, da durch die teils sehr geringe Flächenverfügbarkeit in Städten ohne großräumige Umbauten keine weiträumigen Maßnahmen integriert werden können. Hierbei muss auf eine Kombination von Maßnahmen gesetzt werden, welche an das Referenzgebiet angepasst werden (Becker et al., 2015). Das theoretische Potenzial der dRWB ist hoch, jedoch ist das erschließbare Potenzial im Vergleich dazu, um ein Vielfaches geringer. Zwischen dem theoretischen und dem im Endeffekt

erschließbaren Potenzial liegen bauliche Restriktionen, Kosten-Nutzen-Restriktionen und Handlungsrestriktionen, die eine Umsetzung nur in speziellen Gebieten im städtischen Kontext möglich machen (Sieker et al., 2019).

5.1. Bewertung des Fallbeispiels Stadthagen

Die mittels STORM.Sim sowie ENVI-met dimensionierte RWBM zeigt sowohl bei der Wasserbilanz als auch bei der Reduzierung von Hitzestress einen erheblichen positiven Einfluss. Mittels der Versickerungsmulde kann der Abfluss des Regenwassers vollständig vermieden werden, was zu einer Erhöhung der Grundwasserneubildung beiträgt (Dosch et al., 2015). Des Weiteren kann so das zentrale Entwässerungssystem entlastet werden (Kind et al., 2019). Die Herstellung eines naturnahen Wasserhaushaltes kann durch die Implementierung der dimensionierten Anlage nicht erreicht werden. Der Wasserhaushalt verschiebt sich von einer hohen Ableitung hin zu einer hohen Versickerung. Dabei kommt es kaum zu einer Erhöhung der Verdunstung. Hier muss bei der Bewertung der Ergebnisse allerdings darauf geachtet werden, dass es mittels des Programms nicht möglich, war eine Kombination aus Baumbepflanzung und Mulde zu realisieren. Die realisierte RWBM besteht aus zwei Einzelementen, die nicht miteinander in Verbindung stehen (STORM.Sim, 2023). Aus der Literatur lässt sich schließen, dass gerade die Bepflanzung von Versickerungsanlagen mit Bäumen ein erhebliches Potenzial besitzt, um die Verdunstungsrate in städtischen Gebieten zu erhöhen. Beispielhaft ist hier die Baum-Rigole und der Baumbestand in Versickerungsmulden zu nennen (Sieker et al., 2019; Matzinger et al., 2017). Mittels der an der Versickerungsmulde integrierten Baumbepflanzung kann eine deutliche Erhöhung des thermalen Komforts herbeigeführt werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Verringerung des UTCI im betrachteten Szenario, mit einer Verbesserung des thermalen Komforts einhergeht. Hierbei ist jedoch die Betrachtung der unterschiedlichen Uhrzeiten zu berücksichtigen. Sowohl bei dem mittäglichen Szenario (15-16 Uhr) sowie bei dem morgendlichen Szenario (10-11 Uhr) kommt es durch die Implementierung der RWBM zu einer deutlichen Verringerung des UTCI. Dies beschränkt sich dabei auf die bepflanzte Fläche und geht hauptsächlich auf die Beschattung durch die Baumbepflanzung zurück. Dies deckt sich mit dem Befund des vom UBA durchgeführten Projekts zur Verdunstungskühlung städtischer Gebiete, wonach tagsüber der Großteil der Kühlleistung auf die Verschattung zurückzuführen ist (Sieker et al.,

2019). Eine durch Verdunstung erzielte Kühlleistung kann anhand der Ergebnisse nicht nachgewiesen werden. Weder das vom Programm berechnete Temperaturprofil noch die UTCI-Werte weisen darauf hin, dass es zu einer Abkühlung des Marktplatzes über die Grenzen der Beschattung kommt (Siehe Anhang 17 und Abbildung 22). Das abendliche sowie das nächtliche Szenario weisen eine leichte Erhöhung der UTCI-Werte auf. Die Erhöhung des UTCI beträgt dabei im Extremfall rund $0,32\text{ °C}$. Diese Erhöhung kann dabei den Ursprung in einer Vielzahl von Faktoren haben. Beispielhaft ist hier eine veränderte Luftströmung auf dem Marktplatz oder die durch die Bäume gespeicherte Wärmeenergie zu nennen (Sieker et al., 2019). Darüber hinaus kommt es auch zu kleinräumigen Verringerungen der UTCI-Werte, wobei diese im Vergleich zu der Erhöhung vernachlässigbar sind (Siehe Abbildung 25 und Anhang 19). Anhand der geringen Erhöhung des UTCI ist nicht davon auszugehen, dass es zu einer erheblichen Änderung des Wohlbefindens der Bewohner kommt (Krüger, 2021). Um den Einfluss der RWBM auf die gefühlte nächtliche Temperatur zu untersuchen, ist zudem eine Analyse der Wärmeentwicklung am Standort über einen längeren Zeitraum notwendig. Eine solche Untersuchung kann Aufschluss über die Reduzierung von Tropennächten durch die Integration der dRWB geben (Sieker et al., 2019). Generell ist die Integration der RWBM mit einer Verbesserung des Wasserhaushalts sowie mit einer Verbesserung der gefühlten Temperatur am Tag verbunden. Dabei ist jedoch in beiden Belangen noch Potenzial zur Verbesserung zu geben. Die Integration eines Kaskadensystems mit weiteren Maßnahmen wie einer Fassadenbegrünung, welche eine hohe Verdunstungsrate aufweist, kann dabei durch den erhöhten Verdunstungsanteil einen positiven Einfluss auf den Wasserhaushalt haben (Matzinger et al., 2017). Parallel dazu kann die Verdunstung zu einem verbesserten thermalen Komfort führen (Sieker et al., 2019). Zudem kann eine Langzeitanalyse der Temperaturentwicklung am Stadthäuser Marktplatz Aufschluss darüber geben, an welchen Stellen die Implementierung von RWBM am meisten zur Verbesserung des thermalen Komforts in Stadthäuser Innenstadt beitragen kann (Matzinger et al., 2017).

5.2. Beantwortung der Fragestellungen

Die Beantwortung der Fragestellungen ergibt sich aus den oben genannten Argumenten für bzw. gegen eine Implementierung von RWBM sowie aus den in den Fallbeispielen vorgestellten Regenwasserbewirtschaftungssystemen. Zur zentralen

Fragestellung, „*Welche Potenziale eröffnet die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung zur Bewältigung gegenwärtiger und zukünftiger Herausforderungen im städtischen Wasserhaushalt?*“, lässt sich sagen, dass die dRWB bereits heute ein hohes Potenzial besitzt, Resilienzen gegenüber Starkregenereignissen, Dürren und Hitzeextremen zu schaffen. Neben der Resilienzsteigerung gegenüber Wetterextremen hat die dRWB darüber hinaus das Potenzial für eine generelle Verbesserung des Stadtklimas zu sorgen. So kann präventiv dafür gesorgt werden, dass die Hitze in der Stadt, welcher sich in Folge des Klimawandels und dem Zuwachs von städtischen Gebieten noch verstärken wird, abgeschwächt wird. Durch die Implementierung verschiedener auf das Bezugsgebiet angepasste dRWB lassen sich durch den Charakter der Multifunktionalität von RWBM mehrere Herausforderungen gleichzeitig lösen. Zu diesen gehören neben der Prävention von Überflutung und Hitzeextremen auch andere Faktoren wie die Reinigung von Niederschlagswasser und der Erhalt der städtischen Biodiversität.

5.3. Limitationen

Die vorliegende Arbeit ist unter der Betrachtung einiger Limitationen zu bewerten. Die dRWB ist ein breit gefächertes Themengebiet mit einer Vielzahl an Anwendungsbereichen und Techniken. Diese Arbeit untersucht die Potenziale dieses Verfahrens und geht dabei auf repräsentative Untersuchungen sowie Anwendungsbeispiele ein. Ein vollständiger Überblick über alle Anwendungsbereiche sowie Technologien kann im Rahmen einer Bachelorarbeit nicht realisiert werden.

Die Datenlage zur dRWB ist entsprechend der bereits langen Implementation von Maßnahmen sehr gefestigt. Jedoch ist das Thema nach wie vor Bestandteil vieler Forschungsprojekte. Gerade bei der Thematik der Verdunstungskühlung werden dabei noch zentrale Aspekte untersucht, wie beispielsweise die negativen Einflüsse einer erhöhten Luftfeuchtigkeit und damit Schwüle in städtischen Gebieten (Sieker et al., 2019).

Bei der Vorstellung der Fallbeispiele aus der Literatur konnte nur auf veraltete Daten zurückgegriffen werden, welche demnach nicht die aktuelle vorangeschrittene Erwärmung der Atmosphäre mit einbeziehen. Dies ist vor allem bei dem Projekt Hannover-Kronsberg relevant. Die Unterlagen bezüglich der realisierten Maßnahmen sind vor

der endgültigen Fertigstellung der dRWB veröffentlicht worden. Zwar gibt es Dokumente bezüglich der Neubausiedlung, wie der im Jahr 2013 veröffentlichte Bericht „Hannover-Kronsberg: 15 Jahre Erfahrungen mit einem nachhaltigen Modellprojekt“ jedoch gehen diese nur am Rande auf die realisierten RWBM ein (Rumming et al., 2013).

Das Fallbeispiel Stadthagen, in welchem auf Grundlage von Simulationssoftwares eine RWBM dimensioniert und anschließend ausgewertet wird, unterliegt einigen Limitationen. Ein Großteil der Annahmen und Einschränkungen sind bereits im Methodenteil dieser Arbeit aufgeführt. Darüber hinaus ist bei der Dimensionierung wesentlich nur eine Maßnahme realisiert. Dies bedingt sich aus der Tatsache, dass die Recherche der technischen Hintergründe sowie verwendbarer Referenzprojekte mit hohem Aufwand verbunden ist. Die Implementierung weiterer Maßnahmen bis hin zu einem Kaskadensystem unterliegt weiteren Bestimmungen und Vorschriften. Der Arbeitsaufwand und die entsprechende Dokumentation der Ergebnisse würden im Kontext dieser Thesis, den Rahmen einer Bachelorarbeit überschreiten. Damit einher geht auch, dass einige Werte sowohl bei der Berechnung des Mikroklimas als auch bei der Dimensionierung der Anlage aus dem Programm übernommen werden mussten. Dies ist durch den Umstand bedingt, dass zu den entsprechenden Werten keine Referenz in der Literatur gefunden werden konnte. Beispielfhaft ist hier zum einen die Überlaufhöhe einer Versickerungsmulde ohne Rigole sowie die spezifische Luftfeuchtigkeit in 2.500 m Höhe zu nennen. Hierbei wurde dabei die Relevanz der Faktoren auf die Ergebnisse, durch eine Änderung der Werte, überprüft. Dabei war festzustellen, dass sich die Ergebnisse der Simulation und der Dimensionierung der Versickerungsanlage in einem Änderungsbereich von 50 % kaum unterschieden. Auf diese Weise konnte eine qualitative Abschätzung und Validierung der Ergebnisse erfolgen. Darüber hinaus ist die Auswertung der Ergebnisse nur unter Vorbehalt repräsentativ. Der Zeitabschnitt der Analyse, hinsichtlich der mikroklimatischen Veränderung des Stadthäger Marktplatzes, ist entsprechend des Umfangs und der vorhandenen Rechenleistung sehr klein gewählt. Vier unterschiedliche Simulationen an einem Tag können nur bedingt Aufschluss über das Kühlungspotenzial der realisierten Lösung geben. Um beispielsweise den Einfluss auf das Auftreten von Tropennächten zu validieren, ist eine Langzeituntersuchung nötig (Sieker et al., 2019). An dieser Stelle setzt sich der Mehrwert der Simulation aus der Kombination von den Ergebnissen und der Übereinstimmung

dieser Ergebnisse mit in der Literatur gegebenen Beobachtungen und Auswertungen zusammen. Ein Beispiel für eine Publikation, welche in Bezug auf die Änderung des UTCI ähnliche Ergebnisse hervorbringt, ist die 2019 vom UBA veröffentlichte Untersuchung zum Potenzial der Verdunstungskühlung in städtischen Gebieten (Sieker et al., 2019).

In der Literatur wird bezüglich der Potenziale von RWBM kaum auf Unterschiede zwischen Klein-, Mittel- und Großstädten eingegangen. Es wird auf die Verschärfung der Problematiken im urbanen Raum eingegangen und das Potenzial der dRWB wird diesbezüglich erläutert. Eine spezifische Unterscheidung der Potenziale bei unterschiedlichen Stadtgrößen wird dabei jedoch selten vorgenommen. In dieser Arbeit wird deshalb, abgesehen von der bereits beschriebenen höheren Verdunstungsleistung in weniger dicht besiedelten Stadtstrukturen, auf diese Unterscheidung nicht eingegangen (Sieker et al., 2019).

6. Fazit

Das Klima der Erde verändert sich. Die Auswirkungen der Klimaerwärmung sind dabei unterschiedlich. Mehr Niederschlag, mehr Hitze und eine Zunahme von Dürreereignissen stellt Deutschland in Zukunft vor eine Vielzahl von Problemen. Dabei rücken besonders die Städte in den Mittelpunkt. Eine hohe Vulnerabilität und ein konstanter Zuwachs machen Städte in Zukunft zu zentralen Gebieten, im Umgang mit den Klimafolgen. Durch die Zunahme von Hitzeinseln, Tropennächten, Überflutungen und städtische Dürren ist die Anpassung städtischer Gebiete unausweichlich, um deutsche Städte nach wie vor lebenswert zu gestalten. Das Konzept der dRWB bietet dabei Lösungsansätze, die in ihrer Multifunktionalität einen entscheidenden Beitrag zu einer höheren Resilienz gegenüber den klimatischen Bedingungen leisten können. Durch die Implementierung von Lösungen, wie Dachbegrünungen, Versickerungsmulden und Regenwasserzisternen, lassen sich Niederschläge, welche in aktuellen Stadtstrukturen mehrheitlich abgeleitet werden, zurückhalten, verdunsten, versickern und nutzen. Auf diese Weise können Niederschlagsspitzen zurückgehalten werden, was zu einer Entlastung der zentralen Regenwasserableitung führt. Überflutungen, welche durch die Überlastung der Kanalisation entstehen, können vermindert und gegebenenfalls vorgebeugt werden. Neben der hydraulischen Entlastung der Kanalisation lässt sich mittels dRWB auch der Eintrag von Schadstoffen in Kläranlagen verringern. Die belebte

Bodenschicht, welche in einer Vielzahl von Versickerungsanlagen vorhanden ist, kann die Schadstoffe aus dem Regenwasser filtern und somit reinigen. Mittels dRWB lässt sich die Verdunstung in einem Referenzgebiet deutlich erhöhen. Die erhöhte Verdunstungsrate führt zu einer Reduzierung von Hitzestress in Städten. Auch durch die Verschattung, welche durch die Implementierung von RWBM wie beispielsweise Baumrigolen oder Fassadenbegrünungen erzeugt wird, können positive Effekte auf die klimatischen Bedingungen innerhalb sowie außerhalb von Gebäuden erzielt werden. Diese reichen von der Reduzierung der benötigten Kühlleistung zur Klimatisierung von Gebäuden bis hin zur deutlichen Verbesserung des Humanbioklimas. Unter Begriffen wie Schwammstadt, oder blau-grüner Infrastruktur wird bereits heute daran gearbeitet, das natürlichen Gleichgewichts zwischen Versickerung, Verdunstung und Abfluss zu erhalten. Die Implementierung einer dRWB und einer damit einhergehenden Annäherung an den naturnahen Wasserhaushalt ist eine zentrale Stellschraube für die Herstellung einer lebenswerten und sicheren Stadt, welche heutzutage und in Zukunft ein Zuhause für eine immer größer werdende Zahl von Menschen bietet.

Literaturverzeichnis

Adlershof (2023, 27. März). Berlin Adlershof: Daten und Fakten. <https://www.adlershof.de/adlershof-in-zahlen>

Altevers, B., Groß, C., Menze, H., Brandt, K., Pieper, A., Schulze, F., Heeren, I. & Kirchhoff, R. (o. D.) Wasserkonzept Kronsberg: Teil des EXPO-Projektes „Ökologische Optimierung Kronsberg“. Landeshauptstadt Hannover. <https://www.hannover.de/content/download/221411/file/Wasserkonzept-Kronsberg.pdf>

Augustin, G., Frank, U. & Winkler, S. (o. D.). Institut für Physik. Augustin und Frank/Winkler Architekten. Abgerufen am 4. August 2023, von <https://augustinundfrank.de>.

Bach, C., Birkmann, J., Kropp, J., Olonscheck, M., Setiadi, N., Vollmer, M. & Walther, C. (2013). Abschätzung der Verwundbarkeit gegenüber Hitzewellen und Starkregen. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. https://www.researchgate.net/publication/295652962_Abschätzung_der_Verwundbarkeit_gegenuber_Hitzewellen_und_Starkregen

Bähre, I., Eckert, A., Kastner, R., Martinsen, R., Wittenberg, A., Rumming, K., Sevilla, A & Schilken, P. (2000). Modell Kronsberg: Nachhaltiges Bauen für die Zukunft. Landeshauptstadt Hannover. https://www.hannover.de/content/download/426243/file/kronsberg_nachhaltigesbauen_d_e.pdf

Baum, S, Elsaasser, P., Goetzke, R., Henseler, M., Hoymann, J. & Kreins, P. (2021). Handlungsfelder der Landnutzung. Springer-Verlag. In H. Gömann (Hrsg.) & J. Fick (Hrsg.), *Wechselwirkungen zwischen Landnutzung und Klimawandel* (S. 71-134). Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-18671-5>

Becker, A., Deutschländer T., Friedrich, K., Früh, B., Herbst, M., Jochumsen, K., Junghänel, K., Klein, B., Kreienkamp, F., Leppelt, T., Leps, N., Löwe, P., Möller, J., Rauthe, M., Rösner, S., Schenk, L., Schmidt, T., Tivig, M., Walter, A., Winterrath, T & Ziese, M. (2022). Nationaler Klimareport: Klima – Gestern, heute und in der Zukunft (6. Aufl.). DWD. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf;jsessionid=0697940566CC6696907FC3D8DD7B86CF.live11053?__blob=publicationFile&v=15

Becker, C., Hübner, S., Sieker, H., Gilli, S. & Post, M. (2015). Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung: Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte. Bundesinstitut für Bau,- Stadt- und Raumforschung. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2015/DL_UeberflutungHitzeVorsorge.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSW) (2006). Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung (2. Auflage). Freie und Hansestadt Hamburg. <https://www.hamburg.de/content-blob/135118/4bab847f13e77cbfba5cfa1cbeaa22ab/data/regenwasserbroschuere.pdf>

Berliner Wasserbetriebe (2017). Mulden-Rigolen-System Regelquerschnitt: Regelblatt 601. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj2-YGe24uAAxUsVKQEHSRAD-QQFnoECBQQA&url=https%3A%2F%2Fwww.bwb.de%2Fregelblaetter%2Frgbl601_11-2017.pdf&usg=AOvVaw2D9IEgfm4RguexTRIGMn-h&opi=89978449

Bimoka (2020a, 27. März). Projekt: Institut für Physik Adlershof - Adiabate Abluftkühlung und Starkregenbewirtschaftung [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=clzWN36vIK4>

Bimoka (2020b, 11. September). Projekt: Potsdamer Platz - Regenwasserbewirtschaftung [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=NC0IcU0LJ1s>

Bodemann, U., Hoff, U., Fabich, M & Rückert, T. (2017). Gebrauchsanweisung Stadterweiterung Kronsberg Süd. Landeshauptstadt Hannover. <https://kronsrode.de/content/Gebrauchsanweisung.pdf>

Brasche, J., Hauslade, G., Maderspacher, J., Schelle, R., Zölch, T., Arpe, N., Banihashemi, F., Fensch, N., Fischer, F., Gaiser, T., Kruse, L., Limmer, T., Vötter, C., Wager, R., Weinberger, M. & Grenzebach, E. (2020). Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern: Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. Technische Universität München. https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Leitfaden/ZSK-TP1_Leitfaden_deutsch_komprimiert.pdf

Brasseur, G. P. (Hrsg.), Jacob, D. (Hrsg.), & Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.), Birkmann, J., Gräfe, P., Kottmeier, C., Lotze-Campen, H., Mahrenholz, P., Merz, B., Piontek, F., Serdeczny, O., Vereecken, H., Augustin, J., Birkmann, J., Bronstert, A., Brüggemann, N., Deutschländer, T., Dobler, A., Eschenbaach, A., ... & Werner, P. C. (2017). Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-50397-3>

Büchner, M. & Schlichtmann, G. (2017). Bauen am Kronsberg Süd: planungs und baubegleitende Qualitätssicherung. Landeshauptstadt Hannover. https://www.hannover.de/content/download/808719/file/2017-07_Brosch.%20Vorgabe%20BAUEN%20AM%20KRONBERG%20SUED_QS_web.pdf

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (2021). Hydrologischer Atlas Deutschland. https://www.bafg.de/DE/Service/presse/2021-11-05_Geoportal_Steckbrief3.html

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (o. D.). Das Wasserhaushaltsgesetz. Abgerufen am 27. Juli 2023, von <https://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/gewasserschutzrecht/deutschland/das-wasserhaushaltsgesetz>

Arle, J., Bartel, H., Baumgarten, C., Bertram, A., Blondzik, K., Brandt, S., Brauer, F., Claussen, U., Damian, H. P., Dieter, D., Galander, C., Ginzky, H., Grimm, S., Helmecke, M., Kofmeier, K., Hofmeier, M., Hülsmann, W., Kirschbaum, B., Knobloch, T., ... & Wolter, R. (2017). Wasserwirtschaft in Deutschland: Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. UBA/BMUV. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_wasserwirtschaft_in_deutschland_2017_web_aktualisiert.pdf

Dethloff, K. (2022). Unberechenbares Klima: Ursachen und Unsicherheiten des Klimawandels. Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-64900-8>

Deutsche Bundesbank (o. D.) Umtausch von DM in Euro. Abgerufen am 01. Juni 2023, von <https://www.bundesbank.de/de/aufgaben/bargeld/dm-banknoten-und-muenzen/-/umtausch-von-dm-in-euro-599338#:~:text=Der%20amtliche%20Umtauschkurs%20betr%C4%95gt%201%20Euro%20f%C3%9C%20DM%20.>

DWD (o. D.a). Wetter- und Klimalexikon: Dürre. Abgerufen am 28. Juni 2023, von <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=603288&lv2=100578>

DWD (o. D.b). Wetter- und Klimalexikon: Hitzewelle. Abgerufen am 29. Juni 2023, von <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=624852&lv2=101094>

Dosch, F., Haury, S., Skowski, J., Wahler, B., Willinger, S., Arndt, T., Mayer, F., Hommes, M. & Mösch, S. (2015). Grün in der Stadt: Für eine lebenswerte Zukunft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmub/verschiedene-themen/2015/gruenbuch-2015-dl.pdf?__blob=publication-file&v=2

Eltges, M., Kaltenbrunner, R., Porrsche, L., Milbert, A., Regnery, D., Vogel, F. & Kickartz, M. (2018). Kleinstädte: Chancen, Dynamiken, Potenziale. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/izr/2018/6/downloads/izr-6-2018-komplett-dl.pdf?__blob=publication-file&v=1

ENVI-met (2023a, 23. Februar). ENVI-met Model Architecture. <https://envi-met.info/doku.php?id=intro:modelconcept>

ENVI-met (2023b, 6. Juni). Example Models and Model Data. ENVI-met. <https://envi-met.info/doku.php?id=examples:start>

ENVI-met (Version 5.5.1) [Software]. (2023c). <https://www.envi-met.com/de/handlungsfelder/>

Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., Casper, M., Bronstert, A., Schumann, A. & Weiler, M. (2016). Hydrologie. Haupt-Verlag. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838545134>

Früh, B., Brauch, J., Brienens, S., Buchholz, S., Fröhlich, K., Hoff, A., Imbery, F., Krienkamp, F., Lenhardt, J., Leps, N., Paxian, A., Seybert, H., Steger, C., Walter, A & Wehring, S. (2021). Klimavorhersagen und Klimaprojektionen: Wie entstehen Aussagen über das zukünftige Klima?. DWD. https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/klima/broschuere_klimaforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Google Earth (2023). [Stadthäger Innenstadt]. Abgerufen am 01. Juli 2023, von <https://earth.google.com/web/search/Stadthagen,+Deutschland/@52.3238789,9.20491343,73.10747996a,286.2739697d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCfaGRTNqqjAefiGRTNqqjAGcwY811DfUVAIQyovc9RIVDA>

Hachmann, R. (2020). Kommunales Grünflächenmanagement – ein wichtiger Beitrag auf dem Weg zur Smart City. In C. Etezadzadeh (Hrsg.), *Smart City – Made in Germany: Die Smart-City-Bewegung als Treiber einer gesellschaftlichen Transformation* (S. 259-268). Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-27232-6>

Häckel, H. (2021). Meteorologie (9. Auflage). Ulmer-Verlag. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838555041>

Hansen, R., Born, D., Lindschulte, k., Rolf, W., Bartz, R., Schröder, A., Becker, C., Kowarik, I., & Pauleit, S. (2018). Grüne Infrastruktur im urbanen Raum: Grundlagen, Planung und Umsetzung in der integrierten Stadtentwicklung. Bundesamt für Naturschutz.

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiZ0qrDIKyAAxViS_EDHe2-AooQFnoECCUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bfn.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2FBfN%2Fservice%2FDokumente%2Fskripten%2Fskript503.pdf&usg=AOvVaw1UN-naggodqHCbXB9mncQXi&opi=89978449

Hauck, M., Leuschner, C., & Homeier, J. (2019). Klimawandel und Vegetation: Eine globale Übersicht. Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-59791-0>

Heise, P. (2002) Nachhaltigkeit von Weltausstellungen am Beispiel der Expo 2000 in Hannover. Eine Wirkungsanalyse. (Dissertation Raumplanung). Abgerufen von <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/2854/1/Heise.pdf>

Henninger, S. (Hrsg.), Chiffllaard, P., Hartz, A., Kubiniko, J., Kühne, O. & Tobias, K. (2011). Stadökologie: Bausteine des Ökosystems Stadt. Schöningh-Verlag. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838535593>

Hörnschemeyer, B., Lewe, M., Kleckers, J., Stretz, C., Klemm, C., Budde, J., Söfker-Rienets, A. & Vonhoegen, L. (2023). Leitfaden RessourcenPlan – Teil 3.2: Lernen von anderen. In FH-Münster, *Abschlusspublikation: Leitfaden RessourcenPlan*. Fachhochschule Münster. <https://www.fh-muenster.de/forschungskooperationen/r2q/produkte/gemeinsame-produkte/abschlusspublikation-leitfaden-ressourcenplan.php>

Hoyer, J., Dickhaut, W., Kronawitter, L. & Weber, B. (2011). Water Sensitive Urban Design Principles and Inspiration for Sustainable Stormwater Management in the City of the Future. Jovis-Jovis-Verlag. https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Research/Forschungsgruppen/REAP/WD_Publikationen/Hoyer_Dickhaut_Kronawitter_Weber_Manual_WSUD_2011.pdf

Humboldt Universität Berlin (o. D.). Chronologie des Umzugs nach Adlershof. Abgerufen am 4. August 2023, von <https://www.hu-berlin.de/de/ueberblick/campus/adlershof/ueberblick/geschichte/umzug>

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (IGS) (2019). Baum-Rigole TreeDrain. Sieker. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwign8bWkI6AAxVpcfED-HViPCFUQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sieker.de%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FBroschuere_Baumrigole_2019.pdf&usg=AOvVaw1vUZYT-x-v75-yGO9B5oaEe&opi=89978449

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (2018). Planungshilfe für eine dezentrale Straßenentwässerung. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi5moGi8oiAAxVGXaQEHWf-FACkQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.berlin.de%2Fsen%2Fuvk%2F_assets%2Fumwelt%2Fwasser-und-geologie%2Fregenwasser%2Fplanungshilfe.pdf&usg=AOvVaw0KJnkb6C8KhZ-lhy4XsGAd&opi=89978449 Anlage 2 unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiwt5m0j46AAxX0QvEDHskT-CJoQFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.berlin.de%2Fsen%2Fuvk%2F_assets%2Fumwelt%2Fwasser-und-geologie%2Fregenwasser%2Fplanungshilfe_anl2.pdf&usg=AOvVaw3z368JxjVM_pOKSh385UW-&opi=89978449

InnoAqua. (o. D.). STORM: Bemessung einzelner Regenwasserbewirtschaftungs-Anlagen bis hin zu komplexen Entwässerungssystemen. Abgerufen am 8. Juli 2023, von <https://www.innoaqua.de/software/storm/>

Jöhlinger, K. (2023, 22. Februar). Frankreich erlebt ungewöhnlich lange Dürreperiode im Winter. Die Zeit. <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2023-02/duerre-frankreich-rekord-32-tage-ohne-regen-klima>

Jowanowitsch, R. (2013). Globale Zirkulation – Alles im Fluss. In H. Frater (Hrsg.), *Im Fokus: Geowissen: Wie funktioniert unser Planet* (S. 145-152). Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-34791-7>

Junghänel, T., Ostermöller, J. & Deutschländer, T. (2023). KOSTRA-DWD-2020: Hinweise und Hilfestellungen zur Verwendung des KOSTRA-DWD-Datensatzes Version 2020. DWD.

https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/kostra_dwd_2020_anwenderhilfe_pdf.pdf;jsessionid=3C6F79AE3323017FE9742E097AF42F68.live11052?__blob=publication-file&v=3

Kaźmierczak, A., Bittner, S., Breil, M., Coninx, I., Johnson, K., Kleinenkuhnen, L., Kochova, T., Lauwaet, D., Nielsen, H., Smith, H & Zandersen, M. (2020). Urban adaptation in Europe: how cities and towns respond to climate change. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-adaptation-in-europe>

Kind, C., Kaiser, T., Riese, M., Bubeck, P., Müggenburg, E., Thieke, A., Schüller, L., Fleischmann, R. & Thieke, A. (2019). Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vorsorge-gegen-starkregenereignisse-massnahmen-zur>

Krüger, E. (2021). Applications of the Universal Thermal Climate Index UTCI in Biometeorology. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76716-7_3

Landeshauptstadt Hannover (2023, 10. Februar). Kronsberg Süd: Im Stadtbezirk Kirchrode-Bemerode-Wülferode erstreckt sich das Neubaugebiet Kronsberg Süd. <https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Planen,-Bauen,-Wohnen/Bauen-Denkmalpflege/Hannover-baut/Aktuelle-Bauprojekte-im-Stadtgebiet/Kronsberg-Süd>

Landeshauptstadt Hannover (o. D.). Kirchrode-Bemerode-Wülferode: Ein Stadtbezirk stellt sich vor. Abgerufen am 01.06.23, von <https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Bürger-Service/Stadtbezirksportale-Hannover/Stadtbezirk-Kirchrode-Bemerode-Wülferode/Der-Stadtbezirk/Ein-Stadtbezirk-stellt-sich-vor>

Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N. & Born, R. (2015). Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt. https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcopo/2015_IWU_LogeEtAl_Deutsche-Wohngebäudetypologie.pdf

Matzinger, A., Riechel, M., Remy, C., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Sieker, H., Pallasch, M., Köhler, M., Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., Pille, L., ... & Reichmann, B. (2017). Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung: Ergebnisse des Projektes KURAS. KURAS. http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumente_Verwaltung/pdf/20170428_Leitfaden_Regenwasser_full_final_med_res.pdf

Müller, A., Afferden, M., Khurelbaatar, G., Ueberham, M., Reese, M., Fischer, H., Geyler, S., Hofmann, E., Wüstneck, T., Ziegenbein, T., Sahlbach, T., Winkler, U., Berbig, J., Mohr, M. & Stefan, M. (2023). Wege zum abflussfreien Stadtquartier: Potentiale, Wirkungen und Rechtsrahmen des ortsnahen Schmutz- und

Regenwassermanagements. UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_34-2023_wege_zum_abflussfreien_stadtquartier.pdf

Nowak, J., Rühmland, S., Rustige, H., Post, M. & Sommer, H. (2019). Leistungsfähigkeit von Praxiserprobten Formen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung im urbanen Kontext. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin - Fachbereich Wasserwirtschaft.
https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEWjlte3a54iAAxWPU6QEHVOR-BzoQFnoECBwQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.berlin.de%2Fsen%2Fuvk%2F_assets%2Fumwelt%2Fwasser-und-geologie%2Fregenwasser%2Fmonographie_regenwasserbewirtschaftung.pdf&usg=AOvVaw1f7fidi-Byyc_TxXueobgQP&opi=89978449

Pörtner, H., Roberts D., Adams, H., Adelekan, I., Adler, C., Adrian, R., Aldunce, P., Ali, E., Bednar, B., Begum, R., Bezner Kerr, R., Biesbroek, R., Birkmann, J., Bowen, K., Caretta, M.A., Carnicer, J., Castellanos, E., Cheong, T.S., Chow, W., ... & Ibrahim, Z. (2022). Technical Summary. In [H. Pörtner, D. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem] (Hrsg). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (6. Auflage, S. 37-118). Cambridge University Press.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf

Rehfeld-Klein, M. (2021). Bäume in Versickerungsmulden: Impuls zum Regelungsrahmen. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj61uG0iJiAAx-WJRvEDHc62BrkQFnoECBkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.hcu-hamburg.de%2Ffileadmin%2Fdocuments%2FREAP%2FBGS%2FBaumrigolen-Workshop%2FBaeume_in_Versickerungsmulden_Impuls_zum_Regelungsrahmen_Matthias_Rehfeld-Klein_SENUVK_BERLIN.pdf&usg=AOvVaw0os7J1UCs3cpYkv1VVjX6E&opi=89978449

Riechel, M., Remy, C., Matzinger, A., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Sieker, H., Pallasch, M., Köhler, M., Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., ... & Rehfeld-Klein, M. (2017). Maßnahmensteckbriefe der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projektes KURAS.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiDkbrLhYmAAx-WpVqQEZH9HAzAQFnoECCMQAQ&url=http%3A%2F%2Fkuras-projekt.de%2Ffileadmin%2FDokumenten_Verwaltung%2Fpdf%2FSteckbriefe_komplett_web.pdf&usg=AOvVaw1ibkEMXu3Y3oRjtWbjDjMm&opi=89978449

Riedel, T., Nolte, C., Beek, T., Liedtke, J., Sures, B. & Grabner, D. (2021). Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen

und Strategien. UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/niedrigwasser-duerre-grundwasserneubildung>

Rosenhagen, G. & Schatzmann, M. (2011). Das Klima der Metropolregion auf Grundlage meteorologischer Messungen und Beobachtungen. In M. Claussen (Hrsg.) *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg* (S. 19-58). Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-16035-6>

Rumming, K., Kier, K. & Mönninghoff, H. (2013). Hannover-Kronsberg: 15 Jahre Erfahrungen mit einem nachhaltigen Modellprojekt. Landeshauptstadt Hannover. <https://www.hannover.de/content/download/440482/file/Broschüre%20Modell%20Kronsberg.pdf>

Rumming, K., Brandt, K., Kier, G., Martinsen, R., Mönninghoff, H., Rumming, K., Schilken, P. & Iifeu, H. (2004). Handbuch Hannover Kronsberg: Planung und Realisierung. Landeshauptstadt Hannover. <https://www.hannover.de/content/download/426260/file/plaunghandbuchkronsberg.pdf>

Sauer, G. W. (2001). Die ökologische Herausforderung: Umweltzerstörung als sicherheitspolitische Determinante. Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-322-83451-5>

Schellenberg, A. (2023, 21. Mai). Italienische Behörden melden schwere Schäden nach Unwettern. Die Zeit. <https://www.zeit.de/politik/ausland/2023-05/italien-unwetter-schwere-schaeden>

Schmidt, M. (2012). Institut für Physik in Berlin-Adlershof: Fachliche und Wissenschaftliche Projektbegleitung. Technische Universität Berlin. <http://www.gebaeudekuehlung.de/projekt.html>

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin (SenStadt) (o. D.). Institut für Physik in Berlin-Adlershof: Stadtökologisches Modellvorhaben. https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/download/modellvorhaben/faltblatt_institut_physik.pdf

SenStadt (2010). Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung: Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiM6vyY776AAxWQX_ED-HWIID0wQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.stadtentwicklung.berlin.de%2Fbauen%2Foekologisches_bauen%2Fdownload%2FSenStadt_Regenwasser_dt_bfrei_final.pdf&usg=AOvVaw12RexdQU_SH8SP-ftUouE7&opi=89978449

SenStadt (2014a). Regenwasserbewirtschaftung und Wasserdesign am Potsdamer Platz. https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/de/modellvorhaben/kuras/download/potsdamerplatz.pdf

SenStadt (2014b). Stadtökologisches Modellvorhaben „Monitoring Institut für Physik“. https://digital.zlb.de/viewer/metadata/15868307/1/LOG_0003/

SenStadt (2014c). Potsdamer Platz - ein Areal mit beispielhaftem Regenwasserkonzept. https://digital.zlb.de/viewer/metadata/15868909/1/LOG_0003/

SenStadt (2014d). Monitoring: Projektergebnisse. Technische Universität Berlin. https://digital.zlb.de/viewer/metadata/15868285/1/LOG_0003/

Sieker, H & Banerdmann, S (o. D.). Versickerungsmulden. Sieker. Abgerufen am 14. Juli 2023, von <https://www.sieker.de/fachinformationen/regenwasserbewirtschaftung/versickerung/article/versickerungsmulden-156.html>

Sieker, H. (o. D.a). Bemessung von Grundstücksentwässerungsanlagen. Sieker. Abgerufen am 12. Juli 2023, von <https://www.sieker.de/fachinformationen/entwaesserungssysteme/article/ueberflutungsnachweise-554.html>

Sieker, H. (o. D.b). Konzept der dezentralen Regenwasser-Bewirtschaftung. Sieker. Abgerufen am 25. Juli 2023, von <https://www.sieker.de/fachinformationen/umgang-mit-regenwasser/article/konzept-der-dezentralen-regenwasser-bewirtschaftung-76.html>

Sieker, H. (o. D.c). Wassergesetz. Sieker. Abgerufen am 27. Juli 2023, von <https://www.sieker.de/fachinformationen/rechtliche-grundlagen/article/wassergesetze-95.html>

Sieker, H. (o. D.d). Technische Regeln. Sieker. Abgerufen am 27. Juli 2023, von <https://www.sieker.de/fachinformationen/rechtliche-grundlagen/article/technische-regeln-96.html>

Sieker, H., Steyer, R., Büter, B., Leßmann, D., Tils, R., Becker, C. & Hübner, S. (2019). Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwic4r6fxpiAAxV8R_EDH-WoQATsQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fpublikationen%2Funtersuchung-der-potentiale-fuer-die-nutzung-von&usq=AOvVaw2s5zI8KA-A43SazCOXtG2b&opi=8997844

Stadt Stadthagen (2018). Innenstadtentwicklung Stadthagen: Gestaltungskonzept für das Zentrum der Altstadt. https://www.stadthagen.de/city_info/display/dokument/show.cfm?region_id=228&id=419903

Stadt Stadthagen (o. D.). Zahlen., Daten, Fakten. Abgerufen am 31. Juli 2023, von https://www.stadthagen.de/city_info/webaccessibility/index.cfm?item_id=866089#Einwohnerzahlen

STORM.Sim (Version 2.2) [Software]. (2023). InnoAqua. <https://www.innoaqua.de/software/storm/>

Thober, S., Marx, A. & Boeing, F. (2018). Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. Helmholtz-

Zentrum für Umweltforschung. https://www.ufz.de/export/data/2/207531_HOKLIM_Broschüre_final.pdf

Trapp, J. (Hrsg.), Winker, M. (Hrsg.), Anterola, J., Brüning, H., Frick-Trzebitzky, F., Gunkel, M., Libbe, J., Liehr, S., Matzinger, A., Nenz, D., Reichmann, B., Rouault, P., Schramm, E. & Stieß, I. (2020). Blau-grün-graue Infrastrukturen vernetzt planen und umsetze. Deutsches Institut für Urbanistik GmbH. <https://difu.de/publikationen/2020/blau-gruen-graue-infrastrukturen-vernetzt-planen-und-umsetzen>

Weiler, M. & Miegel, K. (2020). Globaler und regionaler Wasserkreislauf. In C. D. Schönwiese (Hrsg.) *Klimatologie* (5. Aufl., S. 29-46). Ulmer-Verlag. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838553870>

Well, F. & Ludwig, F. (2020). Bluegreen architecture: A case study analysis considering the synergetic effects of water and vegetation. In Higher Education Press (Hrsg.) *Frontiers of Architectural Research* (9. Aufl., S. 192-202). <https://www.sciencedirect.com/journal/frontiers-of-architectural-research/vol/9/issue/1>

Wittenberg, H. (2011). *Praktische Hydrologie: Grundlagen und Übungen*. Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-8348-9889-0>

Rechtsverzeichnis:

DIN (2016). DIN 1986-100:2016-12 Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke - Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056. Beuth-Verlag. <https://www.beuth.de/de/norm/din-1986-100/264064948>

DWA (2020). DWA-A 138-1:2020-11 – Entwurf: Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser - Teil 1: Planung, Bau, Betrieb. Beuth-Verlag. <https://www.beuth.de/de/technische-regel-entwurf/dwa-a-138-1/331677227>

DWA (2022). DWA-M 102-4:2022-03: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers. Beuth-Verlag. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/dwa-m-102-4/353663655>

DWA (2006). DWA-A 100:2006-12: Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung. Beuth-Verlag. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/dwa-a-100/97908775>

Richtlinie 2000/60/EG (Wasserrahmenrichtlinie) (2000). https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC_1&format=PDF

Richtlinie 2007/60/EG (Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie) (2007). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/richtlinie_management_hochwasserrisiken.pdf

WHG. (2009). https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/index.html

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: E-Mail-Verkehr STORM.Sim	83
Anhang 2: E-Mail-Verkehr ENVI-met	85
Anhang 3: Foto des Stadthäger Marktplatzes (Stand Juni, 2023)	87
Anhang 4: Bodenanalyse des Stadthäger Marktplatzes	88
Anhang 5: KOSTRA-Daten des Stadthäger Marktplatzes	91
Anhang 6: Abmessungen, Bodenbelag und Wasserhaushalt des Stadthäger Marktplatzes	92
Anhang 7: Dimensionierungsvorschriften einer Mulden-Rigolen-Versickerung/ einer Muldenversickerung	94
Anhang 8: Abmessung der Versickerungsmulde ohne Retentionsfläche	95
Anhang 9: Abmessung der Versickerungsmulde mit Retentionsfläche	97
Anhang 10: ENVI-met Headquarter	99
Anhang 11: Modell Geometrie des Stadthäger Marktplatzes	100
Anhang 12: Materialien, Geometrien und die zugehörigen physikalischen Eigenschaften der im Modell verwendeten Häuserwände, Dächer und Bodenbeläge	101
Anhang 13: Physikalische Eigenschaften der verwendeten Grasbepflanzung	103
Anhang 14: 3D-Darstellung einer im Programm verwendeten Eiche	104
Anhang 15: Meteorologische Parameter der Simulation	105
Anhang 16: Physikalische Parameter der verwendeten UTCI-Vergleichsperson....	106
Anhang 17: Lufttemperatur des Stadthäger Marktplatzes mit und ohne RWBM im Zeitraum 15-16Uhr	107
Anhang 18: Vergleich der Lufttemperaturen des Stadthäger Marktplatzes im Zeitraum 15-16Uhr	108
Anhang 19: Vergleich des UTCI des Stadthäger Marktplatzes im Zeitraum 22-23Uhr	109
Anhang 20: Vergleich des UTCI des Stadthäger Marktplatzes im Zeitraum 10-11Uhr	110

Angang 1: E-Mail-Verkehr STORM.Sim

Fabian Jelitto

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

API

2023-05-24 16:41

war687@haw-hamburg.de

/

Neuer Lead: Software testen Sehr geehrte Damen und Herren, mein Name ist Fabian Jelitto. Ich bin Student an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg im Studienfach Umwelttechnik. Im Rahmen meiner Bachelorarbeit beschäftige ich mich mit dem dezentralen Regenwassermanagement in Kleinstädten. Mein Ziel ist es dabei, dezentrales Regenwassermanagement als einen wichtigen Lösungsansatz bezüglich der Anpassung künftig auftretender klimatischer Veränderungen darzustellen. Des Weiteren möchte ich in der Arbeit einen praktischen Teil in Form einer Dimensionierung einer Versickerung Rigole integrieren. Bei meiner Recherche bin ich dabei auf Ihre Software Storm.Sim gestoßen. Meiner Einschätzung nach kann diese Software eine zentrale Hilfe bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit darstellen. Diese soll dann an meine Heimatstadt übergeben werden, um gegebenenfalls Anreize für die Integrierung einer dezentralen Regenwassermaßnahme (vermutlich unter Verwendung Ihrer Software) zu schaffen. Aus diesem Grund mein Anliegen und die Frage, ob es möglich wäre, die von Ihnen erstellte Software während der Entstehungszeit meiner Bachelorarbeit zu verwenden. Ich freue mich über eine Rückmeldung von Ihnen. Mit freundlichen Grüßen, Fabian Jelitto.

Quelle: Eigene Darstellung

Von: Adrian Labonde [REDACTED]
Datum: Freitag, 26. Mai 2023 um 11:08
An: Jelitto, Fabian <Fabian.Jelitto@haw-hamburg.de>
Cc: Harald Sommer [REDACTED]
Betreff: STORM.Sim

Guten Tag Herr Jelitto,

vielen Dank für Ihre Kontaktaufnahme.

Aus unserem Softwareportfolio würde sich hierzu STORM.Sim sehr gut eignen.

Gerne unterstützen wir Ihr Vorhaben.

Bitte lassen Sie uns dafür entsprechend beigefügtes Dokument (Lizenzvereinbarung STORM) ausgefüllt, unterzeichnet und mit den darauf aufgeführten erforderlichen Unterlagen (2) zukommen.

Wir können Ihnen anschließend die gewünschte Lizenzierung mit einem Kurtutorial bereitstellen.

Für Ihre Rückfragen und weitere Unterstützungsmöglichkeiten steht Ihnen mein Kollege Dr. Harald Sommer zur Verfügung. Mit freundlichen Grüßen

Adrian Labonde

Softwarevertrieb | Überflutungsmodellierung und Starkregenvorsorge

INNOAQUA
Software für Wassersensibile

) [REDACTED]
@ [REDACTED]
www.innoaqua.de

InnoAqua GmbH & Co. KG
[REDACTED]
[REDACTED]

Quelle: Eigene Darstellung

Von: Jelitto, Fabian [<mailto:Fabian.Jelitto@haw-hamburg.de>]
Gesendet: Montag, 29. Mai 2023 16:13
An: Adrian Labonde [REDACTED]
Betreff: AW: STORM.Sim

Guten Tag Herr Labonde,

vielen Dank für Ihre positive Rückmeldung. Anbei finden sie meine Immatrikulationsbescheinigung, die Kurzbeschreibung meiner Bachelorarbeit und die Lizenzvereinbarung.

Ich möchte an dieser Stelle noch einmal Danke sagen, dass sie mich bei meinem Projekt unterstützen und mir die Erstellung einer fundierteren Bachelorarbeit ermöglichen.

Mit freundlichen Grüßen,
Fabian Jelitto.

Quelle: Eigene Darstellung

Von: Adrian Labonde [REDACTED] >
Datum: Mittwoch, 31. Mai 2023 um 15:40
An: Jelitto, Fabian <Fabian.Jelitto@haw-hamburg.de>
Cc: Harald Sommer [REDACTED]
Betreff: AW: STORM.Sim

Hallo Herr Jelitto,

Vielen Dank für Ihren Lizenzantrag.

Sehr gerne unterstützen wir Ihr Vorhaben.

Ich liefere Ihnen heute die angefragte STORM.Sim-Einzelplatzlizenz.

Lieferung STORM.Sim und STORM.Care

Software-Download Version 2.2.198: [REDACTED]

Lizenzschlüssel: [REDACTED]

Einsatzzeitraum bis: 15.08.2023

Installationshinweise:

Beigefügt finden Sie eine Kurzanleitung zu den ersten Schritten in STORM.Sim. Hierin finden Sie u.a. Instruktionen zur Installation und Lizenzierung und einem Kurz-Tutorial.

Wir freuen uns sehr, dass Sie STORM.Sim in Ihrem Vorhaben einsetzen.

Für Rückfragen zu STORM, für den Herstellersupport und fachlichen Auskünften steht Ihnen Herr Dr. Harald Sommer [REDACTED] zur weiteren Verfügung.

Mit besten Grüßen und viel Erfolg beim Projekt!

Adrian Labonde

Softwarevertrieb | Überflutungsmodellierung und Starkregenvorsorge

Quelle: Eigene Darstellung

Angang 2: E-Mail-Verkehr ENVI-met

Studenten Lizenz ENVI-met



© Jelitto, Fabian <Fabian.Jelitto@haw-hamburg.de>
An: info@envi-met.com

Freitag, 26. Mai 2023 um 14:38

○ Allgemein|Alle Mitarbeiter (uneingeschränkt)

Sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Fabian Jelitto. Ich bin Student an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg im Studienfach Umwelttechnik. Im Rahmen meiner Bachelorarbeit beschäftige ich mich mit dem dezentralen Regenwassermanagement in Kleinstädten. Mein Ziel ist es dabei, dezentrales Regenwassermanagement als einen wichtigen Lösungsansatz bezüglich der Anpassung künftig auftretender klimatischer Veränderungen darzustellen. Des Weiteren möchte ich in der Arbeit einen praktischen Teil in Form einer Dimensionierung einer Versickerung Rigole integrieren. Bei meiner Recherche bin ich dabei auf Ihre Software ENVI-met gestoßen. Meiner Einschätzung nach kann diese Software eine zentrale Hilfe bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit darstellen. Diese soll dann an meine Heimatstadt übergeben werden, um gegebenenfalls Anreize für die Integrierung einer dezentralen Regenwassermaßnahme (vermutlich unter Verwendung Ihrer Software) zu schaffen.

Leider habe ich festgestellt, dass meine Universität keinen Zugriff auf Ihre Software hat und der Erwerb für mich als Student mit Kosten in Höhe von 290 Euro verbunden ist. Als Studierender mit begrenzten finanziellen Ressourcen ist es mir jedoch nicht möglich, diesen Betrag aufzubringen, um die Simulationen zu erzeugen, die für meine Bachelorarbeit von entscheidender Bedeutung sind.

Daher möchte ich höflich anfragen, ob es eine Möglichkeit gibt, dass ich die Software ENVI-met auf anderem Wege erhalten könnte, ohne dafür bezahlen zu müssen. Ich bin mir bewusst, dass Ihr Unternehmen kostenpflichtige Programme anbietet, aber ich hoffe dennoch, dass Sie meine Situation verstehen können und eine Lösung finden, um mir bei meiner wissenschaftlichen Arbeit zu helfen. Für den Fall, dass eine kostenlose Bereitstellung von ENVI-met nicht möglich ist, würde ich gerne erfragen, ob es alternative Optionen gibt, wie beispielsweise eine zeitlich begrenzte Ausleihe.

Ich bedanke mich im Voraus für Ihre Aufmerksamkeit und hoffe sehr auf eine positive Rückmeldung. Bitte lassen Sie mich wissen, ob weitere Informationen oder Nachweise meiner Immatrikulation erforderlich sind. Gerne stehe ich Ihnen für Rückfragen zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen,
Fabian Jelitto.

Quelle: Eigene Darstellung

AW: Studenten Lizenz ENVI-met



○ [Redacted] <[Redacted]>
An: © Jelitto, Fabian

Montag, 29. Mai 2023 um 15:43

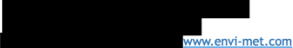
Sehr geehrter Her Jelitto,

wir stellen Ihnen gern eine 3-monatige Lizenz für Studenten zur Verfügung. Bedenken Sie bitte, dass für alle vorbereitenden Arbeiten sowie für die Visualisierung keine kostenpflichtige Lizenz benötigt wird, sondern nur wenn Sie die eigentliche Simulation starten wollen. Dies bedeutet, dass Sie bereits mit der kostenfreien Lite Version die genannten Arbeiten vorbereiten können. Ich schlage vor, dass Sie danach noch mal auf uns zukommen, um den Lizenzschlüssel zu erhalten. Ihre Anfrage werde ich entsprechend weiterleiten.

Grundsätzlich möchte ich sagen, dass ich von Ihrer E-Mail positiv überrascht war, es ist lange her, dass wir von einem Studenten/ einer Studentin eine Mail ohne Fehler und mit sehr gutem Ausdruck erhalten haben. Falls Sie einmal ein Remote Internship machen möchten, können Sie gern auf mich zukommen.

Mit freundlichen Grüßen

Daniela Bruse
Geschäftsführerin



www.envi-met.com

[Decoding Urban Nature](#)

Predict the effects of urban design changes on the microclimate environment and human thermal comfort.

**ENVI
_MET**



Quelle: Eigene Darstellung

AW: Studenten Lizenz ENVI-met



📧 Jelitto, Fabian <Fabian.Jelitto@haw-hamburg.de>
An: 📧 Jelitto, Fabian

Mittwoch, 5. Juli 2023 um 13:16

🔒 Allgemein|Alle Mitarbeiter (uneingeschränkt)

Sehr geehrte Frau Bruse,

im Rahmen meiner Bachelorarbeit befinde ich mich nun an dem Punkt, an dem ich gerne mittels ENVI-met Simulationen zu meinem Projekt starten möchte. Ich habe bereits ein erstes 3D-Modell mithilfe von „Spaces“ erstellt und möchte es nun simulieren. Falls Ihr Angebot einer dreimonatigen Studentenlizenz immer noch besteht, wäre ich Ihnen sehr dankbar dafür. Ich bin bereits beeindruckt von den Möglichkeiten, die das Programm bietet, und freue mich darauf, es in meine Bachelorarbeit einzubinden.

Mit freundlichen Grüßen,
Fabian Jelitto.

Von: Jelitto, Fabian <Fabian.Jelitto@haw-hamburg.de>
Datum: Mittwoch, 31. Mai 2023 um 14:34
An: [REDACTED]
Betreff: AW: Studenten Lizenz ENVI-met

Quelle: Eigene Darstellung

ENVI-met License Key for Fabian.Jelitto



📧 license@envi-met.com <license@envi-met.com>
An: 📧 Jelitto, Fabian; Cc: [REDACTED]

Mittwoch, 5. Juli 2023 um 16:56



[Alle herunterladen](#) · [Vorschau für alle](#)

Dear Mr. Fabian.Jelitto,

Please find attached to this email your .LICX file.
You will need those in order to register your installation according to the attached instructions.

Your License is valid from 5/Jul/2023 until 5/Oct/2023.

To install our software, please download the **ENVI-met** Lite Version here:
www.envi-met.info/public/files/stable/ENVImet_recent_setup.exe
and register your license in the Headquarter according to the attached instructions.

Included is your own specific user key.
This key is unique to your license and should not be used by anyone except for yourself.

Since Version 5, the BIO-met key is not needed anymore, the **ENVI-met** main key is automatically used.

Your key:

Key **ENVI-met:** [REDACTED]

If you have any further questions or concerns, please do not hesitate to contact us.
Thank you for your time and have a great day.

Sandra Donisch
ENVI-met GmbH · Decoding Urban Nature
[REDACTED]

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 3: Foto des Stadthäger Marktplatzes (Stand Juni, 2023)



Quelle: Eigene Aufnahme

Anhang 4: Bodenanalyse des Stadthäger Marktplatzes²

Dr. Moll GmbH u. Co. KG Befund-Nr.: 2354/3-4/20 vom: 18.02.2020 Anlage: 4.1 Seite: 1 / 2

Mischprobenbezeichnung aus dem Umstichproben: Herkunf: Bodenart nach LAGA: Entnahmetiefe (m u. Gok./Fok.): Probenahme-Analyse durch:	s. s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2	s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2	s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2	Zuordnungswerte entspr. LAGA-Richtlinie Technische Regeln Boden, Stand 05. November 2004					Analyseverfahren
				Verwendung in bodenähnlichen Anwendungen		eingeschränkter Einbau in technischen Bauwerken			
				Z 0 (Sand)	Z 0 (Lehm/Schluff)	Z 0 (Ton)	Z 0 ¹⁾	Z 1	
Untersuchungen an der Originalsubstanz (OS): Trockensubstanz M-%: 91,9 90,8 79,4 94,8 TOC mg/kg TR: 17 7,0 7,7 14 Blei mg/kg TR: 12 15 27 7,4 Cadmium mg/kg TR: 0,11 <0,10 <0,10 0,11 Chrom ges. mg/kg TR: 17 10 13 13 Kupfer mg/kg TR: 7,3 14 13 5,6 Nickel mg/kg TR: 18 12 12 17 Quecksilber mg/kg TR: <0,10 <0,10 <0,10 <0,10 Zink mg/kg TR: 55 39 41 49 Kohlenwasserstoffe ges. mg/kg TR: <100 <100 <100 <100 - mobiler Anteil bis C ₁₀ mg/kg TR: <50 <50 <50 <50 EOX mg/kg TR: <1,0 <1,0 <1,0 <1,0 Naphthalin mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Aromatnaphthalin mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Acenaphthen mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Fluoren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Phenanthren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Anthracen mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Fluoranthren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Pyren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,073 Benzo-(a)-anthracen mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,089 Chrysen mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,076 Benzo-(b)-fluoranthren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,12 Benzo-(k)-fluoranthren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Benzo-(a)-pyren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,097 Indeno-(1,2,3-cd)-pyren mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,072 Dibenz-(a,h)-anthracen mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,050 Benzo-(g,h,i)-perylene mg/kg TR: <0,050 <0,050 <0,050 <0,089 FAK ohne Naphthalin mg/kg TR: n.n. n.n. n.n. 0,88 Summe FAK nach EPA mg/kg TR: n.n. n.n. n.n. 0,88									
Bewertung OS: Z 1 Z 0 Z 1 Z 0 Bewertung OS²⁾: Z 1 Z 0 Z 1 Z 0									

Anmerkungen: Ergebnisse der Untersuchungen am Eluat, die Gesamtbewertung sowie weitere Erläuterungen siehe Tab. MK1s-L-neu

¹⁾ Gilt für Verfüllung von Abgrabungen unter besonderen Voraussetzungen.
²⁾ Bodenmechanische Werte sind zu beachten. Der Wert 15 mg/kg gilt für Bodennatursand und Lehmschluff. Für Bodennatursand Ton gilt der Wert 20 mg/kg.
³⁾ Bodenmechanische Werte sind zu beachten. Der Wert 1 mg/kg gilt für Bodennatursand und Lehmschluff. Für Bodennatursand Ton gilt der Wert 1,5 mg/kg.
⁴⁾ Bei einem Ck-Wertklasse > 20 beträgt der Zurechnungswert 10 mg/kg.
⁵⁾ Kohlenwasserstoffe: C10 bis C22 (mobiler Anteil) C10 bis C21 (Gesamtanteil). Zurechnungswerte gelten für KRH-Verbindungen C_n bis C_{n+2}. Gesamtanteil nach DIN EN 15710 (C10 bis C20) darf insgesamt den Wert für den Gesamtanteil nicht übersteigen.
⁶⁾ Bodennatursand mit Zurechnungswert > 3 mg/kg und Körnungsgesch. 1 mg/kg FAK nach EPA darf nur unter besonderen Voraussetzungen eingebaut werden (unter Beachtung hydrologischer günstiger Standortbedingungen).
⁷⁾ Bei Überschreitung sind die Umstände zu prüfen.
⁸⁾ Ermittlungsbedingung.

Mischprobenkonzept:
 Mischprobe ON1-MP aus den Urproben: ON1.1, ON1.2, ON1.3, ON1.4, ON1.5, ON1.6, ON1.7, ON1.8, ON1.9, ON1.10
 Mischprobe ON2-MP aus den Urproben: ON2.1, ON2.2, ON2.3, ON2.4, ON2.5, ON2.6, ON2.7, ON2.8, ON2.9, ON2.10
 Mischprobe ON3-MP aus den Urproben: ON3.1, ON3.2, ON3.3, ON3.4, ON3.5, ON3.6, ON3.7, ON3.8, ON3.9, ON3.10
 Urprobe: ON3.2

Quelle: Dr. Moll GmbH u. Co. KG, 2020

Dr. Moll GmbH u. Co. KG Befund-Nr.: 2354/3-4/20 vom: 18.02.2020 Anlage: 4.2 Seite: 2 / 2

Mischprobenbezeichnung aus dem Umstichproben: Herkunf: Bodenart nach LAGA: Entnahmetiefe (m u. Gok./Fok.): Probenahme-Analyse durch:	s. s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2	s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2	s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2 s. Anl. 1 u. 2	Zuordnungswerte entspr. LAGA-Richtlinie Technische Regeln Boden, Stand 05. November 2004					Analyseverfahren
				Verwendung in bodenähnlichen Anwendungen		eingeschränkter Einbau in technischen Bauwerken			
				Z 0 Z 0 ¹⁾	Z 1.1	Z 1.2	Z 2	> Z 2	
Untersuchungen am Eluat (DIN EN 12457-4): pH-Wert: 8,8 8,8 8,4 elektrische Leitfähigkeit µS/cm: 171 171 171 Arsen mg/l: 0,0010 n.a. n.a. n.a. Blei mg/l: <0,0010 n.a. n.a. n.a. Cadmium mg/l: <0,00020 n.a. n.a. n.a. Chrom ges. mg/l: <0,0010 n.a. n.a. n.a. Kupfer mg/l: <0,0010 n.a. n.a. n.a. Nickel mg/l: <0,0010 n.a. n.a. n.a. Quecksilber mg/l: <0,00020 n.a. n.a. n.a. Zink mg/l: <0,010 n.a. n.a. n.a. Chlorid mg/l: 2,2 2,1 2,4 Sulfid mg/l: 25 17 30 Cyanid ges. mg/l: n.a. n.a. n.a. n.a. Phenolindex mg/l: n.a. n.a. n.a. n.a.									
Bewertung Eluat ohne pH-Wert: Z 1.2 Z 0 Z 1.2									
Gesamtbewertung Originalsubstanz und Eluat: Z 1.2 Z 0 Z 1.2 Gesamtbewertung Originalsubstanz und Eluat¹⁾: Z 1.2 Z 0 ¹⁾ Z 1.2 Empfohlene Entsorgung: Z 1.2 Z 0 ¹⁾ Z 1.2									

Anmerkungen: Ergebnisse der Untersuchungen an der Originalsubstanz und weitere Anmerkungen siehe Tab. MK1s-L-neu

¹⁾ bei natürlichen Böden in Ausnahmefällen bis 300 mg/l
²⁾ bei reaktiven Böden in Ausnahmefällen bis 0,100 mg/l
³⁾ Ermittlungsbedingung
⁴⁾ aufgrund der Herkunft aus Vorranggebieten keine Verwendung für besonders sensiblen Bereichen
⁵⁾ Ersatz-abhängige Verwendung
 n.a. = nicht bodenmechanische Bestandsdaten
 n.B. = nicht bodenmechanische Bestandsdaten
 PN = Probenahme
 PV = Probenentwertung

Mischprobenkonzept:
 Mischprobe MK1-MP aus den Urproben: MK1.1, MK1.2, MK1.3, MK1.4
 Mischprobe MK2-MP aus den Urproben: MK2.1, MK2.2, MK2.3, MK2.4
 Mischprobe MK3-MP aus den Urproben: MK3.1, MK3.2, MK3.3, MK3.4, MK3.5, MK3.6, MK3.7, MK3.8, MK3.9, MK3.10

Nähere Erläuterungen siehe Berichtstext.

Quelle: Dr. Moll GmbH u. Co. KG, 2020

² Der gesamte Anhang 4 zeigt Daten die durch den Kontakt mit der Firma Schwebbau GmbH & Co. KG erhalten wurden. Diese Daten gehen auf eine im Auftrag dieser Firma durchgeführte Bodenuntersuchung durch die Firma Dr. Moll GmbH u. Co. KG zurück.



Prüfberichte, Prüfzeugnisse und Gutachten dürfen nur ungekürzt an Dritte weitergegeben werden. Jede Veröffentlichung, auch von Auszügen, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung. Mitglied im **BWB**, Bundesverband unabhängiger Institute für bautechnische Prüfungen e.V. Anerkannt für Untersuchungen von Baustoffen gemäß RAP-Sta.

Quelle: Dr. Moll GmbH u. Co. KG, 2020



Prüfberichte, Prüfzeugnisse und Gutachten dürfen nur ungekürzt an Dritte weitergegeben werden. Jede Veröffentlichung, auch von Auszügen, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung. Mitglied im **BWB**, Bundesverband unabhängiger Institute für bautechnische Prüfungen e.V. Anerkannt für Untersuchungen von Baustoffen gemäß RAP-Sta.

Quelle: Dr. Moll GmbH u. Co. KG, 2020



Prüfberichte, Prüfzeugnisse und Gutachten dürfen nur ungelistet an Dritte weitergegeben werden. Jede Veröffentlichung, auch von Auszügen, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung. Mitglied im **WIB**: Bundesverband unabhängiger Institute für bautechnische Prüfungen e.V. Anerkannt für Untersuchungen von Baustoffen gemäß RAB-ÖStA.

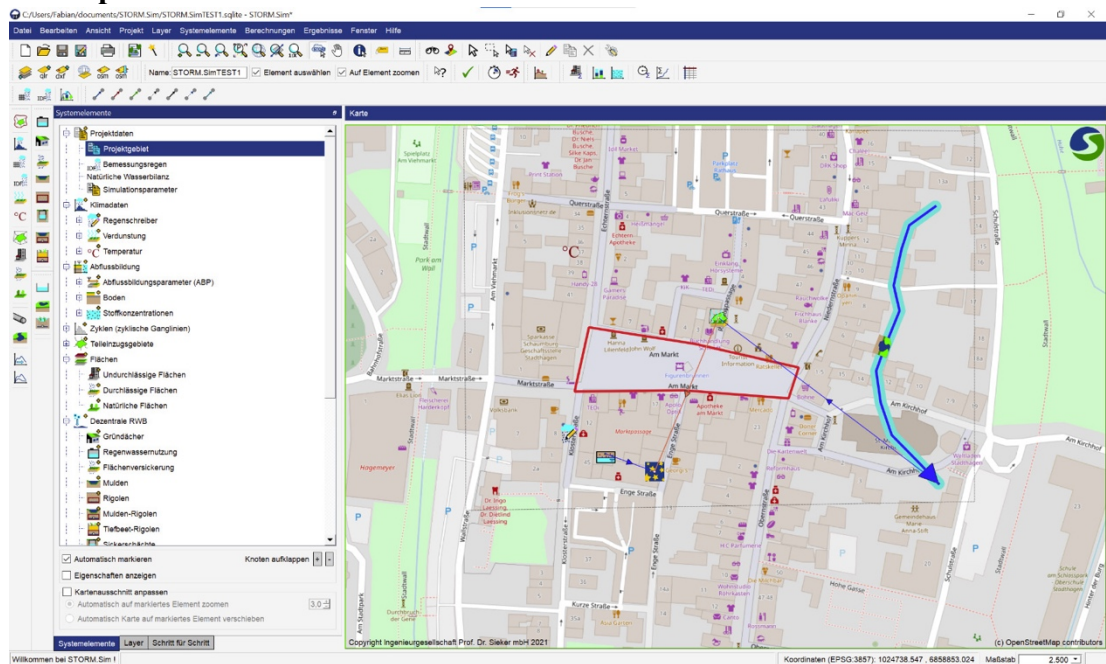
Quelle: Dr. Moll GmbH u. Co. KG, 2020

Anhang 5: KOSTRA-Daten des Stadthäger Marktplatzes

	n=1.00	n=0.50	n=0.33	n=0.20	n=0.10	n=0.05	n=0.03	n=0.02	n=0.01
D=5 min	7,00	8,60	9,60	10,90	12,80	14,70	16,00	17,60	20,00
D=10 min	9,00	11,10	12,40	14,00	16,40	18,90	20,50	22,60	25,70
D=15 min	10,30	12,60	14,10	15,90	18,70	21,50	23,30	25,70	29,20
D=20 min	11,20	13,70	15,30	17,40	20,30	23,40	25,40	28,00	31,80
D=30 min	12,60	15,40	17,20	19,50	22,80	26,30	28,50	31,50	35,70
D=45 min	14,00	17,20	19,20	21,70	25,50	29,30	31,80	35,10	39,80
D=60 min	15,10	18,60	20,70	23,50	27,50	31,60	34,30	37,90	43,00
D=90 min	16,80	20,60	23,00	26,00	30,50	35,10	38,10	42,10	47,70
D=120 min	18,10	22,20	24,70	28,00	32,80	37,80	41,00	45,20	51,30
D=180 min	20,00	24,50	27,40	31,00	36,40	41,80	45,40	50,10	56,80

Quelle: STORM.Sim, 2023

Anhang 6: Abmessungen, Bodenbelag und Wasserhaushalt des Stadthäger Marktplatzes



Quelle: STORM.Sim, 2023

Projektinformationen
Datenbank

Projektinformationen

Projektname:

Projektbeschreibung:

Ort: PLZ:

Straße: Nr.:

Land:

Auftraggeber/Kunde:

Kommentar:

Projektgebiet

An der Adresse anlegen Größe: ha Digitalisieren Projektgebiet digitalisieren

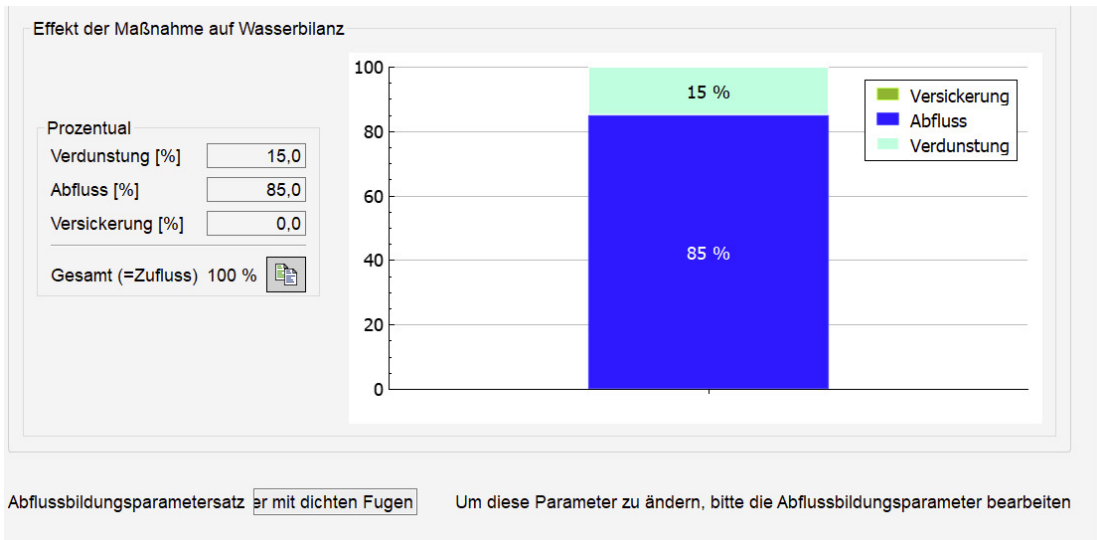
Aus Layer importieren

Projekteigenschaften

Automatisch laden

Automatisch verschieben

Quelle: STORM.Sim, 2023



Art der Abflussbildung

Undurchlässige Fläche
 Durchlässige Fläche
 Natürliche Fläche

Abflussbildungsparameter (ABP)

Abflussbildungsparametersatz **Pflaster mit dichten Fugen**

Abflussbeiwerte für die Simulation

Benetzungsverluste [mm]	0,50	Anfangsabflussbeiwert [-]	0,00
Muldenverlust [mm]	1,80	Endabflussbeiwert [-]	0,75

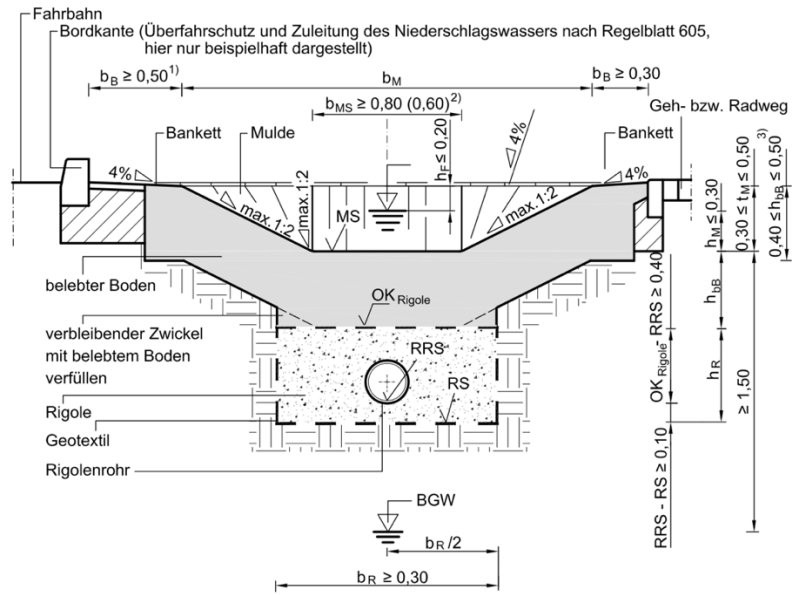
Abflussbeiwerte für die Bemessung

Abflussbeiwert c_{∞} [-]	0,75	Abflussbeiwert c_e [-]	1,00
---------------------------------	------	--------------------------	------

Quelle: *STORM.Sim, 2023*

Anhang 7: Dimensionierungsvorschriften einer Mulden-Rigolen-Versickerung/ einer Muldenversickerung


Maße in m



Quelle: Berliner Wasserbetriebe, 2017

Anhang 8: Abmessung der Versickerungsmulde ohne Retentionsfläche

Geometrie

Polygon digitalisieren Fläche digitalisieren 




Rechteck digitalisieren

Rechteck digitalisieren mit



- definierten Abmessungen
- Mittelpunkt
- Abmessungen

Abmessungen

- Länge [m]
- Breite [m]
- Fläche [m²]

Aus Layer importieren   

Quelle: STORM.Sim, 2023

Name	ABP	Verschmutzung	Fläche [m ²]	cm [-]	Vers. Fläche [m ²]
 Unten	Pflaster mit dichten Fugen	A102_D	1.663,99	0,75	1.247,99
 Oben	Pflaster mit dichten Fugen	A102_D	1.741,55	0,75	1.306,16

Flächen bearbeiten

Typ des Abflussbeiwertes

Simulation

Bemessung

Flächen anzeigen

Alle Flächen (auch indirekt angeschlossene) Nur direkt angeschlossene Flächen

Flächenbilanz

	Insgesamt	Undurchlässig
Undurchlässige Flächen (2 Elemente)	3.405,54	2.554,15
Durchlässige Flächen (0 Elemente)	0,00	0,00
Natürliche Flächen (0 Elemente)	0,00	0,00
Alle Flächen (2 Elemente)	3.405,54	2.554,15

Einheit m² ha km²

Quelle: STORM.Sim, 2023

Volumen

	Länge [m]	Breite [m]	Fläche [m ²]
Oberfläche	116,28	4,10	476,77
Sohle	115,08	2,90	333,78

autom. Vol.KL

Speichervolumen zu Beginn [%]

Neigung [1:x]

Tiefe [m]

Volumen [m³]

Angeschlossene Fläche [m²] Spezifisches Speichervolumen [m³/ha] Spezifisches Speichervolumen [mm]

Überlauf

Überlaufhöhe [m]

Speichervolumen [m³] Spezifisches Speichervolumen [m³/ha]

autom. Überlaufleistung

autom. Überl. KL

Quelle: STORM.Sim, 2023

Infiltration

Bodendaten | Schluffiger Sand

Kf-Wert [m/s] 6.83E-06


Kf-Wert [mm/h] 24,6

min. max.

Sickerfläche [m²] 0,00 476,77

Versickerungsleistung [l/s] 0,00 1,63


Gemäß DWA-A138 wird der kf-Wert für die Berechnung der Versickerungsleistung halbiert

autom. Sicker-KL 

Bodenwasserhaushalt

Simulation mit Bodenwasserhaushalt

Verdunstung

Verdunstung | Verdunstung 1 

Mutterbodenschicht

Dicke [m] 0,30

Volumen [m³] 25,03

Feldkapazität [%] 25

Speichervolumen zu Beginn [%] 0

Quelle: STORM.Sim, 2023

Bemessungsparameter

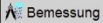
Wiederkehrzeit [a] Häufigkeit [1/a] Sicherheitszuschlag [-]

Bemessungsparameter 5,0 0,200 1,20

Angeschlossene Fläche [m²] 2554 auto


mit Überflutungs-Nachweis

Dimensionierung durchführen

 Bemessung Fehlermeldungen Keine Fehler!

Ergebnisse

	Vorhandenes Volumen [m³]	Erforderliches Volumen [m³]	Maßgebende Dauer [min]	Entleerungszeit [h]
Bemessungsergebnis	98,34	98,34	360	16,8




Anpassung an Bemessungsergebnis

Oberfläche in m²

Länge [m] Vorhandener Wert 116,28

Breite [m] Erforderlicher Wert 116,28


Tiefe [m] Angepasster Wert 116,28



Quelle: STORM.Sim, 2023

Anhang 9: Abmessung der Versickerungsmulde mit Retentionsfläche

Geometrie

Polygon digitalisieren Fläche digitalisieren 

Rechteck digitalisieren

Rechteck digitalisieren mit

- definierten Abmessungen
- Mittelpunkt
- Abmessungen

Abmessungen

- Länge [m]
- Breite [m]
- Fläche [m²]

Aus Layer importieren




Verbindungen

Ziel für die Versickerung Auswählen...

Ziel des Überlaufs Auswählen...

Gebiet Auswählen...

Quelle: STORM.Sim, 2023

Name	ABP	Verschmutzung	Fläche [m²]	cm [-]	Vers. Fläche [m²]
 Unten	Pflaster mit dichten Fugen	A102_D	1.447,27	0,75	1.085,45
 Oben	Pflaster mit dichten Fugen	A102_D	1.639,37	0,75	1.229,53
 Bewaldung	Laubwald	A102_D	367,52	0,00	0,00

Flächen bearbeiten

-
-
-
-

Typ des Abflussbeiwertes

- Simulation
- Bemessung

Flächen anzeigen

- Alle Flächen (auch indirekt angeschlossene)
- Nur direkt angeschlossene Flächen

Flächenbilanz

	Insgesamt	Undurchlässig
Undurchlässige Flächen (2 Elemente)	3.086,64	2.314,98
Durchlässige Flächen (0 Elemente)	0,00	0,00
Natürliche Flächen (1 Elemente)	367,52	0,00
Alle Flächen (3 Elemente)	3.454,16	2.314,98

Einheit m² ha km²

Quelle: STORM.Sim, 2023

Volumen

	Länge [m]	Breite [m]	Fläche [m²]
Oberfläche	105,46	4,10	432,44
Sohle	104,26	2,90	302,41

autom. Vol.KL Volumen-KL...

Speichervolumen zu Beginn [%]

Neigung [1:x]

Tiefe [m]

Volumen [m³]

Angeschlossene Fläche [m²] Spezifisches Speichervolumen [m³/ha] Spezifisches Speichervolumen [mm]

Überlauf

Überlaufhöhe [m]

Speichervolumen [m³] Spezifisches Speichervolumen [m³/ha]

autom. Überlaufleistung Überlaufleistung [l/s]

autom. Überl. KL Überlauf KL...

Quelle: STORM.Sim, 2023

Infiltration

Bodendaten Schluffiger Sand

Kf-Wert [m/s] 6,83E-06

Kf-Wert [mm/h] 24,6

min. max.

Sickerfläche [m²] 302,41 432,44

Versickerungsleistung [l/s] 1,03 1,48

Gemäß DWA-A138 wird der Kf-Wert für die Berechnung der Versickerungsleistung halbiert

autom. Sicker-KL Sicker-KL...

Bodenwasserhaushalt

Simulation mit Bodenwasserhaushalt

Verdunstung

Verdunstung Verdunstung 1

Mutterbodenschicht

Dicke [m] 0,30 Feldkapazität [%] 25

Volumen [m³] 22,68 Speichervolumen zu Beginn [%] 0

Quelle: STORM.Sim, 2023

Bemessungsparameter

Wiederkehrzeit [a] 5,0 Häufigkeit [1/a] 0,200 Sicherheitszuschlag [-] 1,20

Angeschlossene Fläche [m²] 2315 auto

Bemessungsparameter 5,0 0,200 1,20

mit Überflutungs-Nachweis

Dimensionierung durchführen

Bemessung Fehlermeldungen Keine Fehler!

Ergebnisse

	Vorhandenes Volumen [m³]	Erforderliches Volumen [m³]	Maßgebende Dauer [min]	Entleerungszeit [h]
Bemessungsergebnis	89,14	89,14	360	16,8

Grafik

Anpassung an Bemessungsergebnis

Oberfläche in m²

Länge [m]

Breite [m]

Tiefe [m]

Vorhandener Wert 432,43

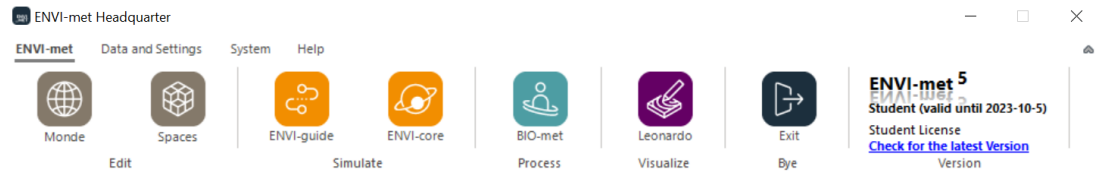
Erforderlicher Wert 432,43

Angepasster Wert 432,43

Anpassen

Quelle: STORM.Sim, 2023

Anhang 10: ENVI-met Headquarter



Quelle: *Quelle: ENVI-met, 2023c*

Anhang 11: Modell Geometrie des Stadthäger Marktplatzes

Model Geometry

Model Dimensions:

x-Grids: y-Grids: z-Grids:

Size of grid cell in meter:

dx= dy= dz= (base height)

Method of vertical grid generation:

dz of lowest gridbox is split into 5 subcells

telescoping (dz increases with height)

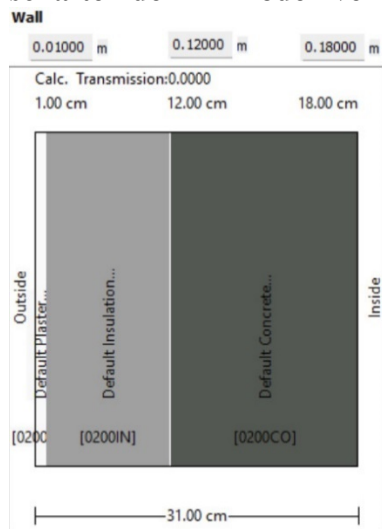
Telescoping factor (%):

Start telescoping after height (m):

Model rotation out of grid north:

Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 12: Materialien, Geometrien und die zugehörigen physikalischen Eigenschaften der im Modell verwendeten Häuserwände, Dächer und Bodenbeläge



Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Database-ID: [0200PL]

Name: Default Plaster

Color:

Parameter	Value
Default Thickness	0.01000
Absorption	0.60000
Transmission	0.00000
Reflection	0.40000
Emissivity	0.93000
Specific Heat	850.00000
Thermal Conductivity	0.60000
Density	1500.00000
Extra ID	0

Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Database-ID: [0200IN]

Name: Default Insulation

Color:

Parameter	Value
Default Thickness	0.01000
Absorption	0.50000
Transmission	0.00000
Reflection	0.50000
Emissivity	0.90000
Specific Heat	1500.00000
Thermal Conductivity	0.07000
Density	400.00000
Extra ID	0

Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

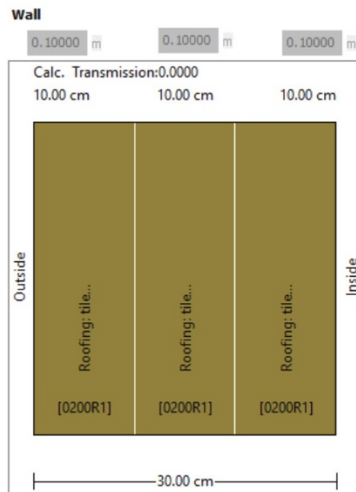
Database-ID: [0200CO]

Name: Default Concrete

Color:

Parameter	Value
Default Thickness	0.01000
Absorption	0.30000
Transmission	0.00000
Reflection	0.50000
Emissivity	0.90000
Specific Heat	850.00000
Thermal Conductivity	1.60000
Density	2220.00000
Extra ID	0

Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c



Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Database-ID: [0200R1]
Name: Roofing: tile
Color: [Color Selection]

Parameter	Value
Default Thickness	0.05000
Absorption	0.70000
Transmission	0.00000
Reflection	0.30000
Emissivity	0.93000
Specific Heat	800.00000
Thermal Conductivity	0.84000
Density	1900.00000
Extra ID	0


Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Database-ID: [0200BA]
Name: Basalt Brick Road
Color: [Color Selection]

Parameter	Value
z0 Roughness Length	0.01000
Albedo	0.20000
Emissivity	0.90000
ExtraID	0
Surface is irrigated	False
Costs	0.00000
Water: Mixing Coefficient	0.00100
Water: Turbidity/Extinction	2.10000

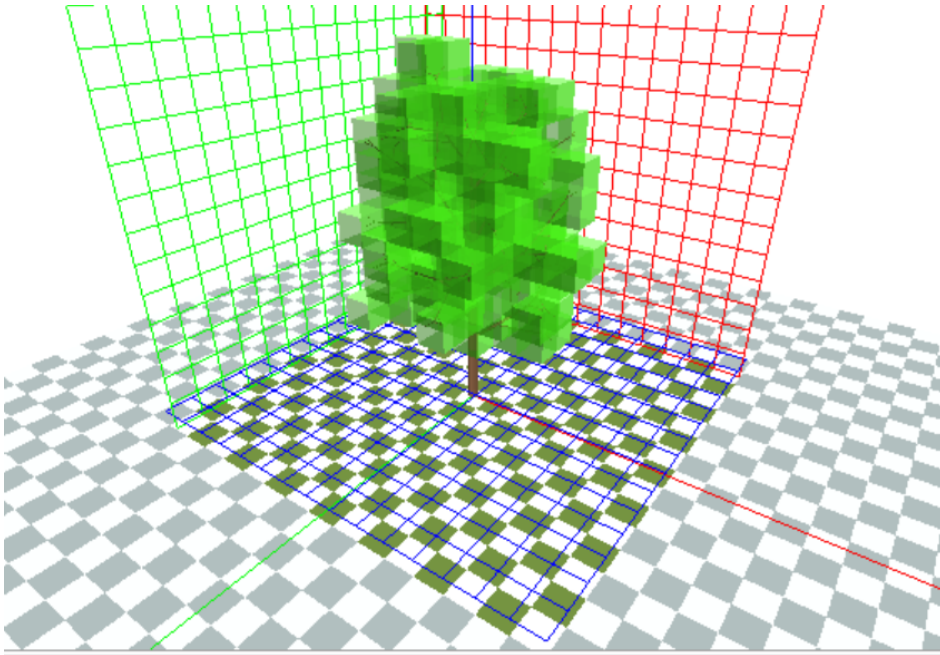
Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 13: Physikalische Eigenschaften der verwendeten Grasbepflanzung

Database-ID:	[0200XY]
Name:	Grass 50 cm aver. dense
Color:	
Parameter	Value
Alternative Name	(None) ...
CO2 Fixation Type	C3
Leaf Type	Gras
Albedo	0.20000
Emissivity	0.97000
Transmittance	0.30000
Plant height	0.50000
Root Zone Depth	0.50000
Costs	0.00000
Leaf Area (LAD) Profile	0.30000,0.30000,0.30000,0.30000,0.30000,0.30000,0.30000,0.30000,0.30000,0.30000,0.30000
Root Area (RAD) Profile	0.10000,0.10000,0.10000,0.10000,0.10000,0.10000,0.10000,0.10000,0.10000,0.10000,0.00000
Season Profile	1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000,1.00000

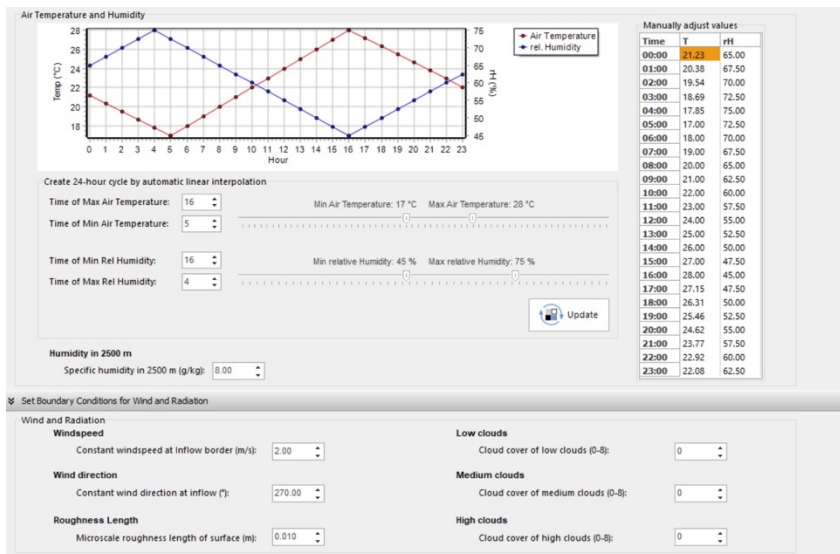
Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 14: 3D-Darstellung einer im Programm verwendeten Eiche



Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 15: Meteorologische Parameter der Simulation



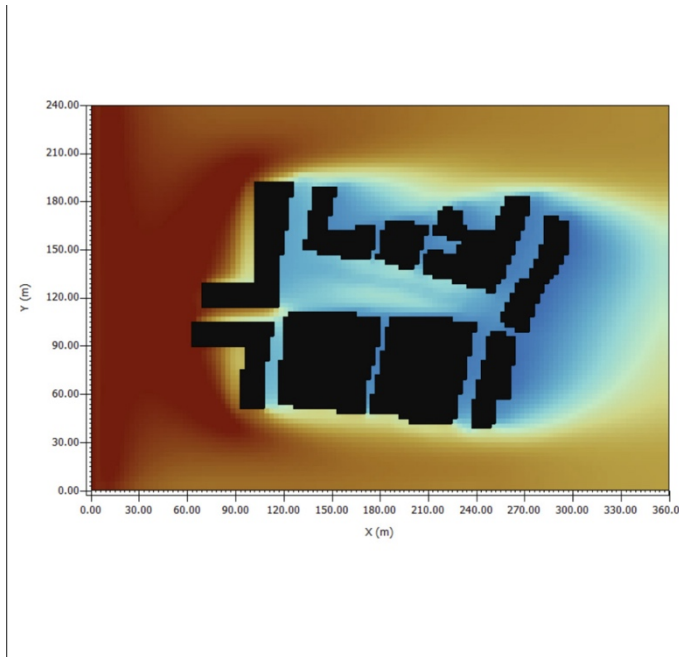
Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 16: Physikalische Parameter der verwendeten UTCI-Vergleichsperson

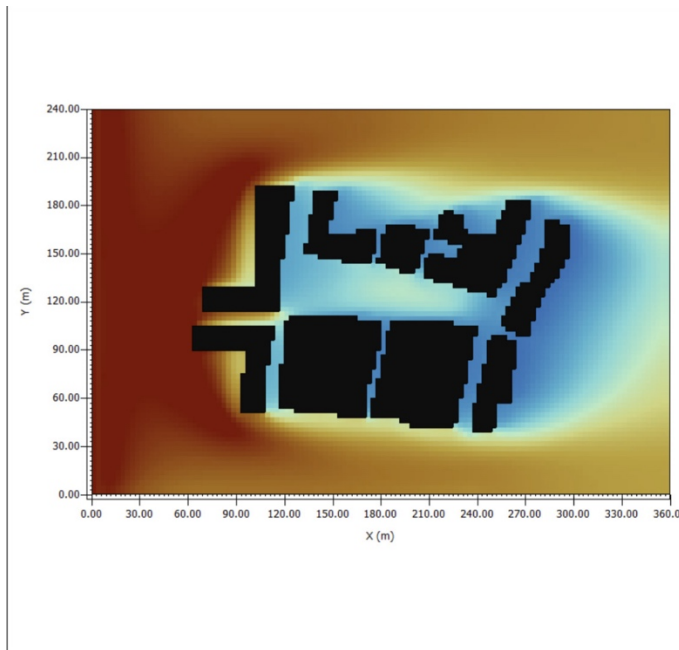
Body parameters	
Age of person (y): 35	Gender: Female
Weight (kg): 75.00	Height (m): 1.75
Body position: standing	
Surface Area (DuBois-Area): 1.91 m ²	
Clothing parameters	
Static Insulation Outdoor (clo): 0.50	Indoor (clo): 0.90
Persons metabolism	
Total Metabolic rate (W): 158.79 (=83.22 W/m ²)	
(met): 1.43	

Quelle: *Quelle: ENVI-met, 2023c*

Anhang 17: Lufttemperatur des Stadthäger Marktplatzes mit und ohne RWBM im Zeitraum 15-16Uhr

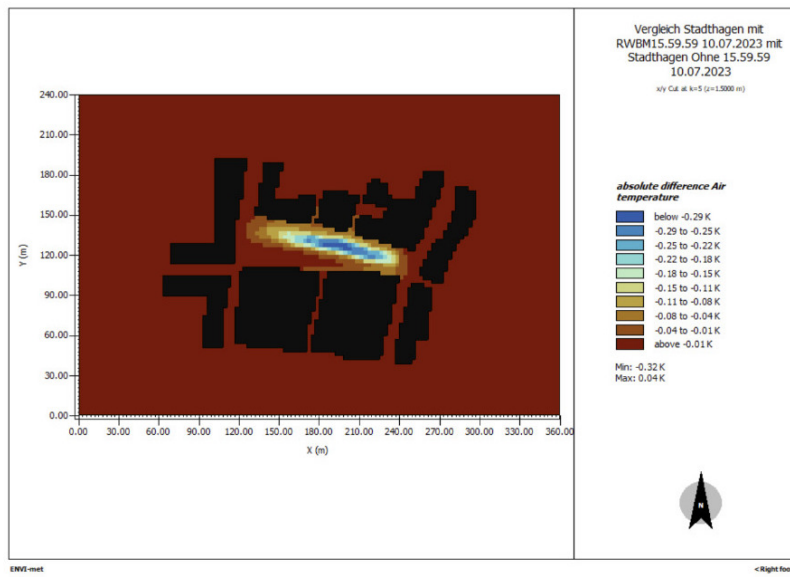


Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c



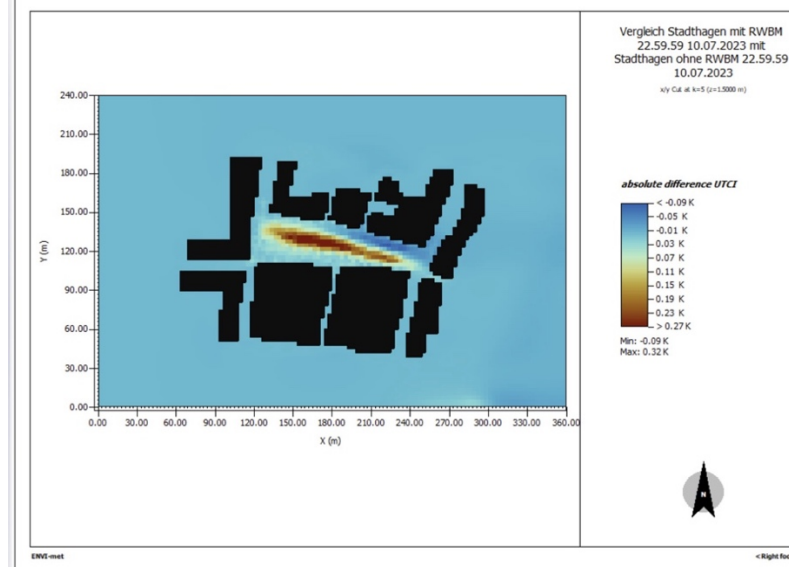
Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 18: Vergleich der Lufttemperaturen des Stadthäger Marktplatzes im Zeitraum 15-16Uhr



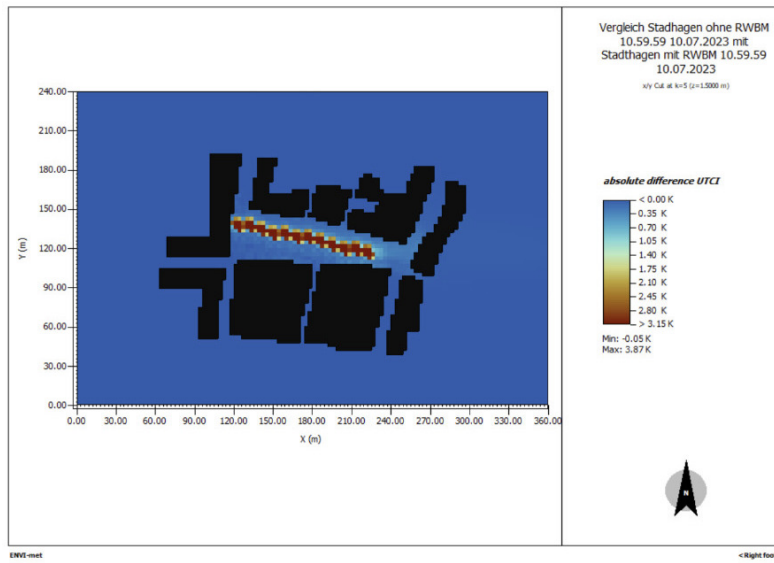
Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 19: Vergleich des UTCI des Stadthäger Marktplatzes im Zeitraum 22-23Uhr



Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Anhang 20: Vergleich des UTCI des Stadthäger Marktplatzes im Zeitraum 10-11Uhr



Quelle: Quelle: ENVI-met, 2023c

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

Hamburg, 25.08.2023

Fabian Jelitto

